# 제 출 문

국토교통부장관 귀하

'대용량 LNG플랜트 설계 및 건설기술 개발'(연구개발 기간 : 2008.09.10 ~ 2020.12.17) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021. 03. 17 .

주관연구기관명 : GS건설 (대표자) 임병용 (인)
협동연구기관명 : GS건설 (대표자) 임병용 (인)
협동연구기관명 : 한국가스공사 (대표자) 채희봉 (인)

주관연구기관책임자: 권혁태
협동연구기관책임자: 김동윤
협동연구기관책임자: 윤인수

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

# 제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘LNG플랜트 설계기술 개발’(연구개발 기간 : 2008.09.10 ~ 2020.12.17) 과제의 최종보고서 OOO부를 제출합니다.

2021 . 01 . 31 .

주관연구기관명 : 지에스건설(주) (대표자) 임 병 용 (인)

주관연구기관책임자: 권 혁 태

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

# 보 고 서 요 약 서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>08가스플랜트D02</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2008.09.10.~ 2020.12.17</td><td>단계구분</td><td>(3단계)/(3단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">플랜트기술 고도화 사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">LNG플랜트사업단</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">대용량 LNG플랜트 설계 및 건설기술 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">LNG플랜트 설계기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">권 혁 태</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 26명<br>내부: 23명<br>외부: 03명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부:2,896,000천원<br>민간:2,288,000천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:5,184,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 74명<br>내부: 66명<br>외부: 08명</td><td>총 연구비</td><td>정부:9,903,000천원<br>민간:9,295,000천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:19,198,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">지에스건설(주)</td><td colspan="2">참여기업명 : 한국가스공사</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:연세대학교, 가스안전기술공사</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
</table>

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

| 연구개발성과의 보안등급 및 사유 | 일반 |
|---|---|

9대 성과 등록·기탁번호

| 구분 | 논문 | 특허 | 보고서 원문 | 연구시설·장비 | 기술요약 정보 | 소프트웨어 | 화합물 | 생명자원 | | 신품종 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 생명정보 | 생물자원 | 정보 | 실물 |
| 등록·기탁 번호 | | | | | | | | | | | |

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설·장비명 | 규격 (모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격 (천원) | 구입처 (전화) | 비고 (설치장소) | NTIS 등록번호 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| 요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다) | 보고서 면수 |
|---|---|

# 요약문

| | |
|---|---|
| 연구의<br>목적 및 내용 | 국내 건설 및 엔지니어링 업체가 우수한 인력을 바탕으로 신규 플랜트 시장의 진입을 위한 기반을 마련하는 연구이다. 실제 규모 (5MTPA급)의 플랜트 건설에 필요한 기본설계집과 이의 근거가 되는 테스트베드 (100톤/일 2기 급) 설계로써 제품 개발과 공정 개발의 성격을 포함한다.<br>테스트베드의 세부시행 방식은 공정 사이클의 적용 측면에서 두 가지 방안을 동시에 추진하도록 기획되었다. 2핵심과제의 공정기술을 기반으로 기존 사이클 구성을 검토한 후 기존 사이클과 국산화 새로운 개발 사이클을 이용한 두 계열의 액화시스템을 구성하는 것이다. |
| 연구개발성과 | ■ 상용 LNG 플랜트 기술동향조사 완료 (1차년도)<br>■ Train-1 개념설계 완성 (1차년도)<br>- FEED 벤치마킹 / 테스트베드 구성 및 설계기준 확정<br>■ Train-1 기본설계 완성 (2차년도)<br>- Design Basis / PFD / Equipment List / P&ID / Layout 작성<br>- Engineering Summary Sheets 작성<br>- 기본설계집 작성<br>■ Train-1 상세설계 완성 (3차년도)<br>- 공종별 설계 (공정, 기계, 배관, 전기, 계장, HSE, CAS)<br>■ Train-2 기본설계 완성 (4차년도)<br>- Design Basis / PFD / Equipment List / P&ID / Layout<br>- Engineering Summary Sheets 작성<br>- 기본설계집 작성<br>■ Train-2 상세설계 완성 (4, 5, 6차년도)<br>- 공종별 설계 (공정, 기계, 배관, 전기, 계장, HSE, CAS)<br>■ 상용급 LNG플랜트 FEED Package 작성 (5, 6차년도)<br>- 5MTPA급 LNG플랜트 기본설계<br>- LNG플랜트 Engineering Spec. 작성<br>■ 액화공정 최적화 프로그램 (2~6차년도)<br>■ LNG플랜트 관련 검사기준 (3~6차년도)<br>■ LNG플랜트 해외진출을 위한 정책지원 방안 (5, 6차년도) |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | 테스트베드 Train-1, 2의 기본, 상세설계를 통해 LNG플랜트 테스트베드의 건설을 완료하였다. 아직까지 국내에서는 LNG플랜트 액화공정 실적이 전무하므로, 향후 본 경험을 바탕으로 세계 LNG플랜트 시장진입을 가능할 것으로 보여진다.<br>특히 상용급 LNG플랜트 기본설계는 21세기 최대 규모의 가스전으로 평가되어지는 모잠비크 4광구를 대상으로 하여 수행되었으며, 액화공정은 2핵심에서 개발된 KSMR공정으로 하여 설계하였다. 향후 모잠비크 가스전이 상용화될 때, 본 설계가 모잠비크 LNG플랜트 적용시 기반문서로 활용될 것으로 판단된다. |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 국문핵심어<br>(5개 이내) | 피드 | 액화기술 | 액화천연가스 | 액화플랜트 | 기본설계 |
| 영문핵심어<br>(5개 이내) | Front End Engineering Design | Liquefaction Technology | Liquefied Natural Gas | Liquefaction Plant | Basic Design |

# 목 차


1. 연구개발과제 개요 ····· 6
가. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 6
나. 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 6
2. 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 10
가. 연구수행 전략 및 방법론 ····· 10
나. 연구수행 과정 및 내용 ····· 14
다. LNG플랜트 테스트베드 개념설계집 ····· 19
라. 기술동향 조사보고서 ····· 29
마. LNG플랜트 테스트베드 Train-1 기본설계집 ····· 30
바. LNG플랜트 테스트베드 Train-1 상세설계집 ····· 32
사. LNG플랜트 테스트베드 Train-2 기본설계집 ····· 56
아. LNG플랜트 테스트베드 Train-2 상세설계집 ····· 58
자. 상용급 LNG플랜트 FEED Package ····· 83
차. 액화공정 최적화 프로그램 ····· 105
카. LNG플랜트 관련 검사기준 ····· 107
타. LNG플랜트 해외진출을 위한 정책지원 방안 ····· 109
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 110
가. 목표 ····· 110
나. 연구개발 내용 및 산출성과물 ····· 110
다. 연구개발 최종 목표 달성도 ····· 112
4. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 113
가. 예상 기대 효과 ····· 113
나. 추가 연구의 필요성 ····· 113
다. 타 연구에의 응용 ····· 114
라. 사업화 추진 방안 ····· 114

# 1. 연구개발과제 개요

## 가. 연구개발의 목적 및 필요성

### (1) 연구개발의 목적

3-1-1과제는 2핵심과제의 공정 데이터와 해외 선진 FEED 사례를 기반으로 LNG플랜트 기본설계 및 FEED 개발을 위한 설계기술로 정의되며, 일산 100톤급 테스트베드(Train-1, 2) FEED 및 상세설계, 5MTPA 상용급 FEED Package 개발 등을 주요 연구내용으로 한다.

### (2) 연구개발의 필요성

#### (가) EPC 수행 능력의 확보

2핵심과제의 공정기술과 연계하여 테스트베드 실증을 기반으로 FEED 능력과 해외시장에서 요구되는 EPC(Engineering, Procurement and Construction) 수행 능력의 확보가 필요하다.

#### (나) 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화

국내의 기존 플랜트 상세설계, 기자재 조달 및 건설 관련 역량과 전문 인적 자원을 활용하여 프로젝트 초기 단계에서 수행되는 FEED 수주를 통한 종합적인 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화가 요구된다.

## 나. 연구개발의 정의, 범위, 특징

### (1) 연구개발의 정의

액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas)는 천연가스를 -162℃로 냉각하여 부피를 1/600 압축하여 저장 및 운송을 용이하게 한 것으로, 그림 1과 같은 value chain을 구성한다.




그림 1. LNG Value Chain

3-1-1 과제는 천연가스 액화공정기술을 기반으로 LNG플랜트 설계기술을 개발하기 위한 과제이다. 본 과제에서는 각 핵심과제(1, 2핵심과제)에서 개발된 기술의 검증을 위하여 일산 100톤급 테스트베드 2기(Train-1, 2)를 설계하며, 이를 기반으로 상용급 액화플랜트의 기본설계를 진행한다. Train-1은 해외 선진사의 상용공정을 바탕으로 설계를 진행하며, 2호기는 2핵심 1세부과제에서 개발한 한국형 신액화공정(KSMR : Korea Single Mixed Refrigerant Process)을 적용하여 설계한다. 2기의 테스트베드 설계를 기반으로 최종 목표인 상용급(5MTPA) LNG플랜트를 설계하여 LNG플랜트 설계기술을 개발한다. 이러한 설계기술을 바탕으로 위탁기관에서는 LNG플랜트 액화공정에 대한 최적화 기술을 개발하며, 공동기관에서는 액화 공정제어 기술을 개발한다.

LNG플랜트의 일반적인 공정 구성은 그림 2에서 보이는 바와 같이 전처리, 액화, 저장의 단계를 거치게 되며, 특히 본 과제에서는 액화 공정에 중점을 두어 기술을 개발을 한다.




그림 2. LNG 생산 process

### (2) 연구개발의 범위

3-1-1 과제의 핵심이 되는 기술은 LNG플랜트의 설계기술이며, 1, 2핵심과제에서 분석 및 개발된 기술을 상용급 LNG플랜트의 설계에 실제 적용하는 실용화 기술이다.

① 제2핵심과제의 공정 데이터와 해외 선진 FEED 사례를 기반으로 LNG플랜트 기본설계 및 FEED 개발을 위한 설계기술 개발

② 일산 100톤급 2기(Train-1, 2) 테스트베드 상세설계, 이에 기반한 대용량(5 MTPA급) LNG플랜트 기본설계 패키지 개발

위의 2가지의 핵심 기술을 개발하기 위해서 구체적인 기반기술의 범위를 구성하여야 하며 이를 표 1에 요약하여 나타내었다.

**표 7. 기술개발 범위**

| 과제명 | 기술분야 | 연구범위 |
|---|---|---|
| FEED 및 기본/상세설계 기술 개발 | LNG플랜트 설계기술 | ■ 테스트베드 구성 및 설계기준 확정<br>■ 상용공정 테스트베드 기본설계(Train-1)<br>■ 상용공정 테스트베드 상세설계(Train-1)<br>■ 신액화공정 테스트베드 기본설계(Train-2)<br>■ 신액화공정 테스트베드 상세설계(Train-2)<br>■ 상용급(5MTPA) LNG플랜트 기본설계 |
| | LNG플랜트 설계/시공 표준구축 | ■ LNG플랜트 표준 시스템 정립<br>■ 국제 표준 기반 국내 표준/법체계 정비<br>■ LNG플랜트 분야 기준/표준 작성 |
| | 국제표준 기반의 LNG플랜트 지원정책 및 제도 | ■ LNG플랜트 국외 관련 법, 제도 조사<br>■ LNG플랜트 국내외 관련 법, 제도 보완 |

### (3) 연구개발의 특징

#### (가) 연구의 비전

LNG플랜트 해외사업 및 핵심기술 선두그룹의 경우에 시장 카르텔을 형성하고 있으며, 관련 기술의 확산 및 보급에 대해 상당히 폐쇄적인 국제적 상황이다. 이로 인하여 기술교류 및 제휴가 사실상 불가능한 여건이어서 후발그룹의 기술 확보 및 신규 시장 진입이 어렵다. 즉, 과거 정유·화학, 발전 등과 달리 LNG와 같은 고부가 플랜트 건설사업의 경우에는 선두 기업의 이익 확보를 위하여 기술 및 사업제휴가 극히 제한적으로 이루어지고 있다.

최근의 국제 에너지 시장은 중국, 인도 등 신흥 경제개발 국가 등의 에너지 확보 경쟁 등으로 인하여 기존의 대단위 유전 개발 사업은 물론 해양, 중소규모 유전지역으로 확대되고, 천연가스에 대한 관심이 확대되고 있다. 이에 후발기업도 독자적인 특화기술개발 또는 선두그룹과의 제휴를 통하여 시장진입을 시도하고 있다. 이러한 LNG플랜트사업에 있어서 주요 기술변화로는 보다 대규모의 유전에 대용량의 공정과 장치로 집적된 플랜트를 설계, 건설하는 추세이며, 한편으로는 세계 각지의 해양 중소 가스전을 효율적으로 개발하기 위한 콤팩트(compact) FPSO에 집적한 LNG플랜트 기술이 추진되고 있다.

따라서 본 3-1-1과제는 그림 3에 도시한 바와 같이 비전은 2015년 이후 선진기업과 경쟁이 가능한 설계 및 시공기술을 보유한 국가로 진입하는 것이며, 이러한 설계 및 건설기술을 기반으로 해외시장 진출을 추진하는 것이다.

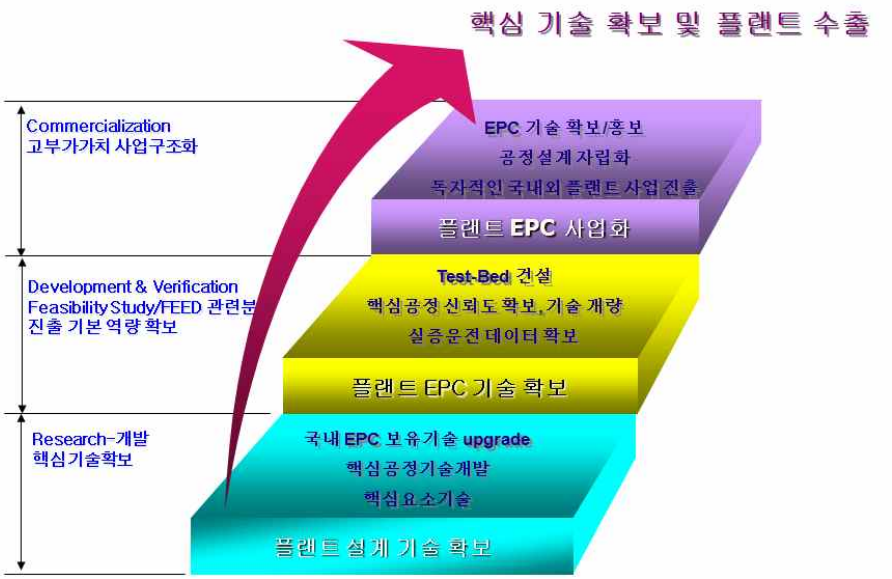



**그림 3. 플랜트 산업의 국가 차원의 로드맵**

### (나) 발전방향

본 과제는 LNG플랜트 value chain에서 부가가치가 높은 분야의 기술경쟁력을 확보하여 글로벌 시장에 진입하기 위하여 천연 가스를 액체원료나 연료로 전환하는 LNG 원천기술과 설계/건설기술의 자립을 통하여 국제 경쟁력을 확보하는 것이 목적이다.

궁극적 시장진출 성공을 위해 본 프로그램에서는 자체 연구개발에만 의지하지 않고 선진기술의 조기 확보 및 사업화 전략 수립 및 추진을 주도하는 기술마케팅 기능을 강화하는 역무도 포함한다.

본 과제는 플랜트기술고도화 전체 사업의 일환으로써 과제 완료 후 LNG플랜트의 실용화 및 해외시장 진출 실현을 궁극적인 최종 목표로 삼기 때문에 LNG플랜트개발의 기본방향은 필요한 EPC 기술력 확보와 대규모 실용화 경험 확보가 핵심 내용이다.

① LNG플랜트 해외시장 진입을 위한 EPC 필수기술 확보

② 기존 선진기술 습득, 고유의 자체기술력 확보 및 전 방위 기술 마케팅 전략의 추진으로 선진 업체의 가스플랜트 시장 카르텔 형성 및 기술이전 기피에 대응

③ 이의 실증을 위해서는 테스트베드 구축 등 대규모 사업단 과제의 추진

# 2. 연구개발 수행 내용 및 결과

## 가. 연구수행 전략 및 방법론

### (1) 연구수행 전략

#### (가) 연구개발 추진전략

① 국내 여건을 감안하여 국외 선진기관과 공동연구 추진

㉮ 원천, 핵심기술에 대한 전략적인 공동연구 추진

㉯ 개발기술을 기반으로 선진기업과 전략적 제휴방안 추진

㉰ 선진기술개발체계/관련 지식 습득을 통한 독자 연구기반 마련

② 새로운 아이디어와 우수한 기술의 접목을 통한 융·복합 특화기술 추진

㉮ 각종 요소 및 시스템에 IT, 마이크로(micro), 소재, USN, 자동화 등 우수한 기술을 접목하여 특화 경쟁력을 가지는 융·복합기술을 개발

③ LNG 플랜트 사업수행에 중요한 핵심 가치사슬(Value Chain)에 연관된 기술을 중심으로 로드맵을 마련하고 사업전략과 연계하여 R&D로 추진

㉮ 원천/일반/보유/중간진입/경쟁기술을 전략적 특화기술로 재분류하여 선택과 집중을 실천

㉯ 지식경제부 원천/요소기술 접목, 기존 LNG 인프라 활용하고 위험회피전략으로 기술경쟁체계(실증기술 중심 + 특화/기반기술)를 도입

④ 성과목표를 구체적으로 제시하고 성과지표 달성을 증명할 수 있는 연구, 시험평가, 테스트베드와의 연계를 반드시 포함하여 추진

⑤ 실용화 및 사업화 성과를 구체적으로 명시하고, 테스트 베드와의 연계를 포함하여 추진하며 이를 위해 사업단 및 핵심1, 2주관기관과의 협조체계를 구축

#### (나) 연구개발 추진방안

① 연구개발 추진체계

㉮ 시장 ⇔ LNG플랜트 ⇔ 기술 ⇔ 기반 인프라 간의 연계성을 동시에 고려한 연구 추진 체계를 구성함으로써 연구 추진 방향과 전략의 연계성을 확보

㉯ 본 과제의 핵심주관기관(핵심연구책임자)은 3핵심과제의 총괄 및 조정 역할 수행

㉰ 선도적 위치에 있는 해외 및 국내 주요 기관 및 전문가와 공동연구 추진

㉱ 타 핵심주관기관과의 협업을 통한 기술 개발 과제 연계성 확보 및 협조체계를 구축하여 추진

㉲ 실용화 중심의 연구개발사업임을 감안하여 가급적 산학연 공동연구 추진방안을 모색

**표 8. 3핵심과제 연구기관 개요**

| 과 제 명 | | | 연구 기관 | 연구 책임자 | 비 고 (기관참여유형) |
|---|---|---|---|---|---|
| 대용량 LNG 플랜트 설계/건설 기술 개발 | | | GS건설(주) | 권혁태 | 주관 |
| 3 핵심 | LNG 플랜트 설계기술 개발 | | GS건설(주) | 권혁태 | 주관 |
| | | (3-1-1) FEED 및 기본/상세설계 기술 개발 | GS건설(주) | 권혁태 | 주관 |
| | | (3-1-1) LNG 플랜트 설계기술 개발 | 연세대학교 | 문 일 | 위탁 |
| | | (3-1-1) LNG 플랜트 테스트베드(일반제조시설) 설치기준에 관한 타당성 연구 | 가스안전공사 | 조영도 | 위탁 |
| | | (3-1-2) LNG 플랜트 공정제어 설계기술 개발 | 고등기술연구원 | 박찬국 | 공동 |
| | LNG 플랜트 건설기술 및 운영 유지관리 기술개발 | | GS건설(주) | 김동윤 | 협동 |
| | | (3-2) LNG 플랜트 건설 및 운영 유지관리 기술개발 | GS건설(주) | 김동윤 | 협동 |
| | 초대용량 LNG 저장탱크 설계기술 개발 | | 한국가스공사 | 윤인수 | 협동 |
| | | (3-4-1) FEED 및 기본/상세설계 기술 개발 | 한국가스공사 | 윤인수 | 협동 |
| | | (3-4-1) LNG 저장탱크의 내부탱크 설계 최적화기술 개발 | 한양대학교 | 하성규 | 위탁 |
| | | (3-4-1) LNG 저장탱크의 외부탱크 설계 최적화기술 개발 | 연세대학교 | 임윤묵 | 위탁 |
| | | (3-4-2) LNG 저장탱크 수명평가 기술 개발 | 가스안전공사 | 김영구 | 공동 |

② 연구개발 추진방안

㉮ 3-1-1과제의 연구개발 기간은 총 7년 3개월로, 효과적인 기술개발과 성과관리를 위하여 3단계로 구분하여 진행한다.

㉯ LNG 플랜트는 해외 지향적인 사업으로서 제2핵심과제의 공정기술을 기반으로 EPC 능력 확보가 관건이며, 특히 대형화, 컴팩트화되는 플랜트 시스템과 다변화되는 시장 환경에 대응하기 위한 FEED 능력 확보는 필수적이다.

- LNG 플랜트사업 EPC 기술을 정의하고 전략기술과 중간진입기술을 구분하여 추진
- 200 톤/일 규모의 테스트베드에 적용될 전처리 액화의 공정구성 기술 개발
- 200 톤/일(100 톤/일 2기)급 테스트베드 구축을 통하여 개발기술의 실증적 검증을 전제

㉰ 앞서 설정한 추진방향에 따라 3-1-1 과제의 구체적인 추진전략은 선진 FEED 사례의 벤치마킹 및 습득, 주요 전략별 내용은 다음과 같다.

- 선진 FEED 사례 벤치마킹 및 습득
  . 선진 기술개발체계/관련지식 등 습득을 통한 연구기반 마련
  . 선진사례/우수사례 벤치마킹(JGC, KBR, Chiyoda, TECHNIP 등)
  . 1단계 설계기반 확보, 2단계 통합설계 및 시공기술 확보, 3단계 LNG 플랜트 실용기술 확보

. 기술개발과정에서 기술적 확인이 필요한 예상 문제점 예측과 이에 대한 대책을 초기 단계에서부터 수립

- 해외전문가 그룹의 예상 역할과 자문의 범위 및 내용

. 기초 기반 기술의 결과에 대한 검증과 이의 설계 활용을 위한 검토

. 상업적으로 획득이 가능한 기존 공정 검토 및 개발 방향 제시

- 테스트베드 구축 및 활용

. 200 톤/일(100 톤/일 2기)급 테스트베드 설계 및 구축

. 설계기술의 성능평가 및 보완

. 설계기술의 신뢰성 확보

③ 기술혁신 방안

목표 지향적이고 성공 가능성을 높이기 위하여 가스플랜트 Value Chain에 직접 관련된 기술을 선정하며 목표달성에 영향을 미치는 중심기술을 도출하는 연구 전략을 추진하며 또한 해외의 선진 기술을 습득하기 위하여 Benchmarking, Commissioned Engineering, Reverse Engineering 등의 기술 혁신 방안을 모색하여 연구 수행을 한다.

| 방안 | 전략 및 방법 |
|---|---|
| 과제 추진에서의 기술 혁신 방안 | ■ 선진 연구사례 Benchmark 심화<br>■ 국내외 연구기관 및 간행물 활용<br>■ 철저한 시장조사/사업성 분석<br>■ 국제컨퍼런스(Gastech, LNG, WGC 등) 교류<br>■ 분야별 전문가 그룹 의견수렴 |
| 과제 수행에서의 생산성 극대화 | ■ 타 사업과의 결과 교류를 통한 활용 극대화<br>■ 기 개발 솔루션 및 신기술 개방 동향 활용<br>■ 상시 평가 및 Feedback 체제 유지<br>■ 요소기술별 전문업체 아웃소싱 추진 |

④ 추진조직 및 인력투입

본 과제의 수행을 위한 인력의 경우 1차년도에는 기본설계팀과 기술지원팀 인력을 중심으로 동원하여 선진사 및 기술사의 FEED 및 기술 Benchmarking을 수행하기 위해 미국 LNG 액화 기술 보유사를 통해 동 사업단 참여 인력의 Training 프로그램을 진행하였으며, 2~6년차에는 테스트베드의 기본설계 및 상세설계 수행을 위해 설계 모든 관련 부서로부터 참여 인력을 동원 추진하였다. 마지막으로 상용급 플랜트의 기본설계집을 작성하는 5~6년차에는 기본설계팀을 중심으로 해외 가스전으로부터 생산되는 천연가스를 액화하는 기초를 만드는 5MTPA 상용급 FEED를 완성시키는 업무를 수행하였다.

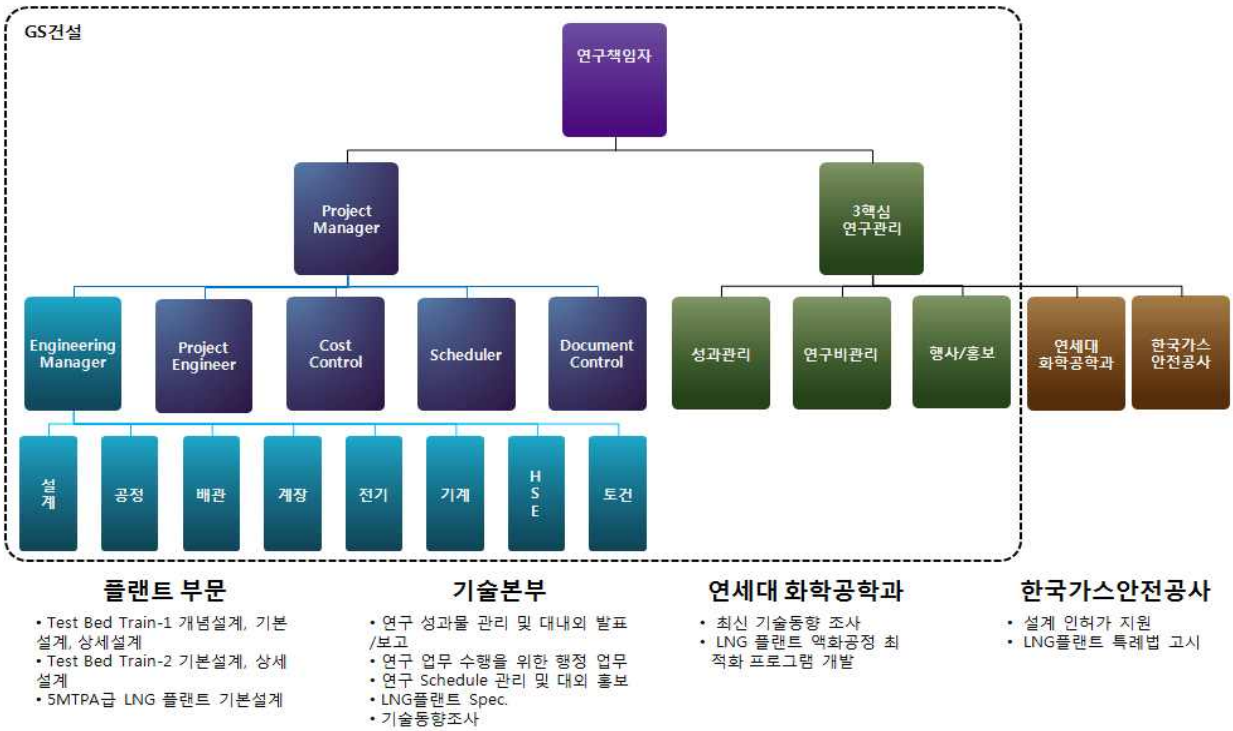



그림 4. 주관기관의 추진조직 및 역무

## 나. 연구수행 과정 및 내용

### (1) 1차년도

#### (가) 개요

1차년도에서는 선행 연구 조사 및 설계기준을 도출하고 해외 선진 기술 자문 및 분석을 하는 등, 설계 기반을 확립하기 위한 초기 연구의 성과 지표가 마련되었으며, 이에 각 세부과제별 해당 결과물에 대한 별도의 측정 방법을 통하여 성과를 측정하되 테스트베드 설계를 위한 기본설계집이 착수된다.

#### (나) 연구내용 및 범위

① Train-1 개념설계

- FEED 벤치마킹
- 테스트베드 구성 및 설계기준 확정
- 테스트베드 FEED 초기단계 시행
- 플랜트 scale-up 기법 및 도구

### (2) 2차년도

#### (가) 개요

2차년도에서는 1년차 연구 성과와 더불어 1 및 2 핵심과제 결과를 이용한 공정/제어 기준 정립하는 등 설계 기반을 확립하는 성과 지표가 마련되었으며, 이에 각 세부과제별 해당 결과물에 대한 별도의 측정 방법을 통하여 성과를 측정하되 테스트 베드 설계를 위한 기본설계집이 완료된다.

#### (나) 연구내용 및 범위

① Train-1 기본설계

- Design Basis 작성
- PFD 작성
- Equipment List 작성
- P&ID 작성
- Layout 작성
- Engineering Summary Sheets 작성
- 기본설계집 작성

### (3) 3차년도

#### (가) 개요

3차년도에서는 테스트베드 FEED 상세 설계, 1핵심과제 동적 최적화 모사를 이용한 설계 보완, 테스트베드 공정제어 시스템 구축 등, LNG 플랜트의 통합성능을 확보하는 초기 연구가 성과 지표가 마련되었으며, 이에 각 세부과제별 해당 결과물에 대한 별도의 측정 방법을 통하여 성과를 측정하되 테스트베드 설계를 위한 상세설계가 실시된다.

#### (나) 연구내용 및 범위

① Train-1 상세설계

- Process Engineering
- Mechanical Engineering
- Piping Engineering
- Electrical Engineering
- Instrument Engineering
- CAS
- Safety and Fire Fighting

② Train-2 기본설계

- Design Verification
- Basic Design Gap Analysis
- Design Basis 작성
- PFD 작성
- Equipment List 작성
- P&ID 작성
- Layout 작성
- Engineering Summary Sheets 작성
- 기본설계집 작성

### (4) 4차년도

#### (가) 개요

4차년도에서는 3년차 연구 성과와 더불어 테스트베드 공정제어 시스템 구축 제어 시스템 및 scale up 연구 추진, BSU 운전 분석 및 Feedback 등을 통하여 LNG 플랜트의 통합성능을 확보하는 성과 지표가 마련되었으며, 이에 각 세부과제별 해당 결과물에 대한 별도의 측정 방법을 통하여 성과를 측정하되 테스트베드 설계를 위한 상세설계 패기지가 완성된다.

#### (나) 연구내용 및 범위

① Train-2 상세설계

- Process Engineering
- Mechanical Engineering
- Piping Engineering
- Electrical Engineering
- Instrument Engineering
- CAS
- Safety and Fire Fighting

### (5) 5차년도

#### (가) 개요

5차년도에서는 테스트베드 시운전/보완/운전 등을 통하여 얻어진 데이터를 분석한다. 소용량 LNG플랜트(테스트베드, 100TPD)의 자료를 기반으로 대용량 LNG플랜트(5MTPA)로의 Scale-up 연구를 진행한다. 이와 맞물려, 상용급 LNG플랜트의 기본설계를 진행하기 위하여 대형 LNG플랜트 분석, Design Basis를 바탕으로 기본설계 절차서를 작성할 예정이다.

#### (나) 연구내용 및 범위

① 테스트베드 데이터 분석

- KSMR 공정 분석
- KSMR Equipment 분석

② 대형 LNG 플랜트 분석

- 열교환기/압축기 기술 분석
- FEED Package 분석
- Site별 feed gas 분석
- Refrigerant 분석

③ Design Basis 작성

- Basic Engineering Design Data
- Process Design Basis
- Specifications for Utility and Offsite

④ 기본설계 절차서 작성

- Document Lists

⑤ LNG플랜트 설계/시공 표준 구축

- LNG플랜트 설계 Spec, Code, Standard, Regulation 등 분석을 기초한 LNG 플랜트 표준화체계 시스템 정립
- 국제표준 기반의 국내표준/법체계 정비/제안/인증

⑥ 국제 표준 기반의 LNG플랜트 지원정책 및 제도 개발

- 국내외 LNG플랜트 건설제도, 법령, 세제지원 조사

### (6) 6차년도

#### (가) 개요

6차년도에서는 5년차도 연구 성과와 더불어 상용급 LNG플랜트 기본설계 패키지 작성 해외 전문기관 설계 인증 획득을 통하여 LNG플랜트의 실용기술을 확보하는 성과 지표가 마련되었으며, 이에 각 세부과제별 해당 결과물에 대한 별도의 측정 방법을 통하여 성과를 측정한다.

#### (나) 연구내용 및 범위

① 상용급 LNG 플랜트 기본설계

- Design Basis 작성
- PFD 작성
- Equipment List 작성
- P&ID 작성
- Layout 작성
- Engineering Summary Sheets 작성
- 기본설계집 작성

② LNG 플랜트 설계/시공 표준 구축

- LNG 플랜트 설계요령, 기술기준, 코드, 기준 개발

③ 국제 표준 기반의 LNG 플랜트 지원정책 및 제도 개발

- 사업단 테스트베드 구축을 위한 법체계정비와 정책, 제도개선 지원
- 건설제도 및 법령, 세제지원 등의 해외시장진출 지원제도 제시

# 다. LNG플랜트 테스트베드 개념설계집

## (1) 개요

테스트베드의 공정선정을 위하여 선진기술사의 자료의 분석 및 업체 방문조사를 실시하였으며, 각 공정의 H&MB와 PFD를 분석하고, 이를 바탕으로 액화공정을 모사하여 비교한 후, 테스트베드에 적합한 공정을 선정하여 개념설계집을 완성하였다.




그림 5. 테스트베드 개념설계 절차

## (2) 선진기술 자료조사

### (가) 대상업체

① APCI : C3/MR 공정

② Phillips : COP 공정

③ Black & Veach : PRICO 공정

④ Statoil/Linde : MFCP 공정

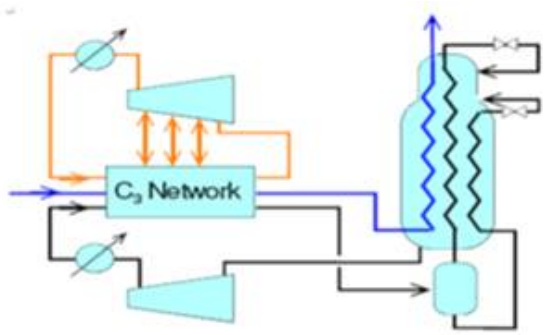
⑤ Axens : Liquefin 공정

⑥ Shell : DMR 공정

### (나) 선진기술 자료조사 및 비교

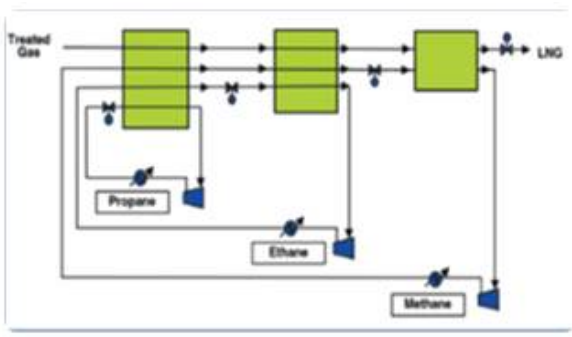
| Licensor | Air Product | Phillips | Black & Veach | Statoil/ Linde | Axens | Shell |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 공정 | C3/MR | COP | PRISCO | MFCP | Liquefin | DMR |
| 냉매 | C3/MR (N2, C1, C2, C3) | C3/C2/C1 | SMR (N2,C2, C3,iC5) | DMR (C1,C2, C3, N2) | DMR (C1,C2,C3, C4,N2) | DMR (C1,C2, C3, N2) |
| 열교환기 유형 | (Kettle) + SWHE | PFHE | PFHE | PFHE + SWHE | PFHE + PFHE | SWHE + SWHE |
| 비고 | 시장 점유율 1위 | Egypt, Trininad | Algeria | Snovit, Norway | N/A | Sakhalin |
| 총 트레인 수 | 52 | 2 | 3 | 1 | | |

① C3MR 공정



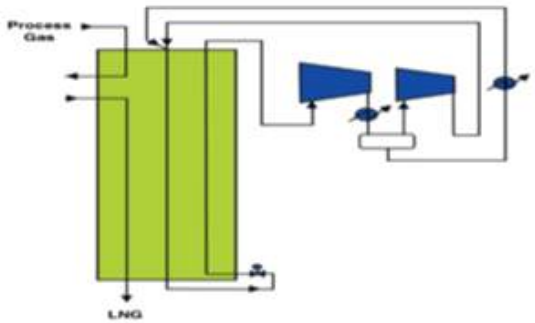

- 시장점유율 1위
- Air Product의 Proprietary Spiral Wound Heat Exchanger를 사용함
- 운전이 Flexible함
- Heat Exchanger를 미국에서만 만들고 있으며, 따라서 운송 등의 문제로 단위 Train 크기에 제한이 있음

② COP 공정




- Cascading 방식의 대표적인 예로 운전은 간단하나 효율이 낮음
- 대용량 Train에 적절히 맞출 수 있는 Module 설계
- PFHE로 구성되어 vendor 선택이 용이
- Compressor가 여러대이므로 Availability가 떨어짐

③ PRICO 공정



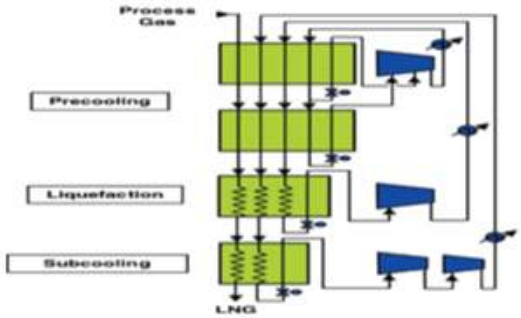

■ 공정이 비교적 간단하나 단위 투자비가 비쌀 수 있음

■ 대규모보다는 소규모(Stranded) 가스전에 유리

■ 크기는 대략 APCI/Phillips의 1/3 가량까지로 제한됨

■ Algeria의 공장은 2004년 폭발사고를 경험하였음

④ MFCP 공정

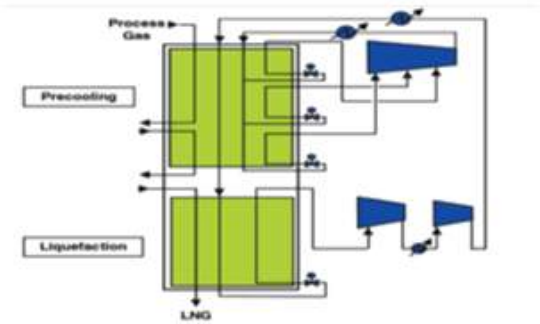



■ 기본적으로 APCI/Shell 등과 비슷하나, Precooling 에서 PFHE를 사용함

■ SWHE는 Linde의 Proprietary Item임

■ SWHE자체는 다른 공정에도 이용이 되는 item 이므로 안정성 문제는 없음

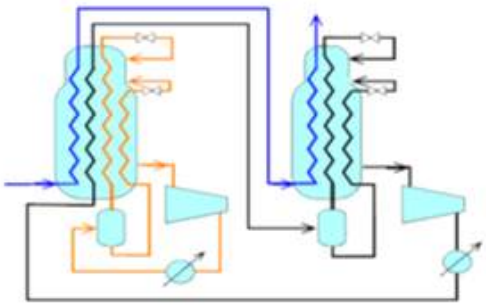
⑤ Liquefin 공정




■ 현재까지 설치된 예는 없음

■ PFHE로만 구성되어 있으므로 장치 공급선이 다양하며 큰 용량의 설계가 용이함

⑥ DMR 공정



■ APCI의 C3MR 공정과 유사하나 Precooling을 C3대신 혼합냉매를 사용함으로써 효율을 높임

■ Precooler는 Linde에서 공급하는 SWHE를 사용함

(3) 해외 상용업체 방문조사

(가) APCI(미국) : C3/MR 공정

(나) Axens(프랑스) : Liquefin 공정

(다) Linde(독일) : MFCP

(라) PIL/UMIST(영국) : LNG 액화공정 최적화 기술

표 10. 해외 상용업체 방문조사 결과

| Licensor | Air Product | Axens | UMIST | Linde |
|---|---|---|---|---|
| 일시 | 2009년 1월 | 2009년 2월 | 2009년 2월 | 2009년 2월 |
| 지역 | 미국(Allentown) | 프랑스(파리) | 영국(맨체스터) | 독일(뮌헨) |
| 내용 | ▪ LNG Process의 공정모사/설계 및 선진사 벤치마킹<br>▪ Main Cryogenic Heat Exchanger shop 방문 및 견학 | ▪ Liquefin Process에 대한 공정 조사<br>▪ 상용화 실적 없음<br>▪ Design에 대한 신뢰성을 높이기 위한 KBR 등과 검증작업 수행중 | ▪ 기본설계에 대한 설계 검증이 가능하나 상세설계에서는 어려움이 있음 | ▪ Linde LNG 공정기술 조사<br>▪ Snovit Plant는 초기 문제가 많았으나 현재, 용량의 96 ~ 98%로 운전중임<br>▪ 중소형 LNG플랜트의 경우 Plate Fin Type 열교환기 추천 |
| 비고 | ▪ 지속적인 기술 관련 교류 예정이나, Test-Bed에 대한 License 제공 의향 없음 | ▪ Test-Bed에 대한 License 제공 의향 없음 | ▪ UMIST에서 보유중인 LNG 공정 License 검토예정 | ▪ Test-Bed에 대한 License 제공의향 없음 |



Spiral Wound Heat Exchanger(SWHE)

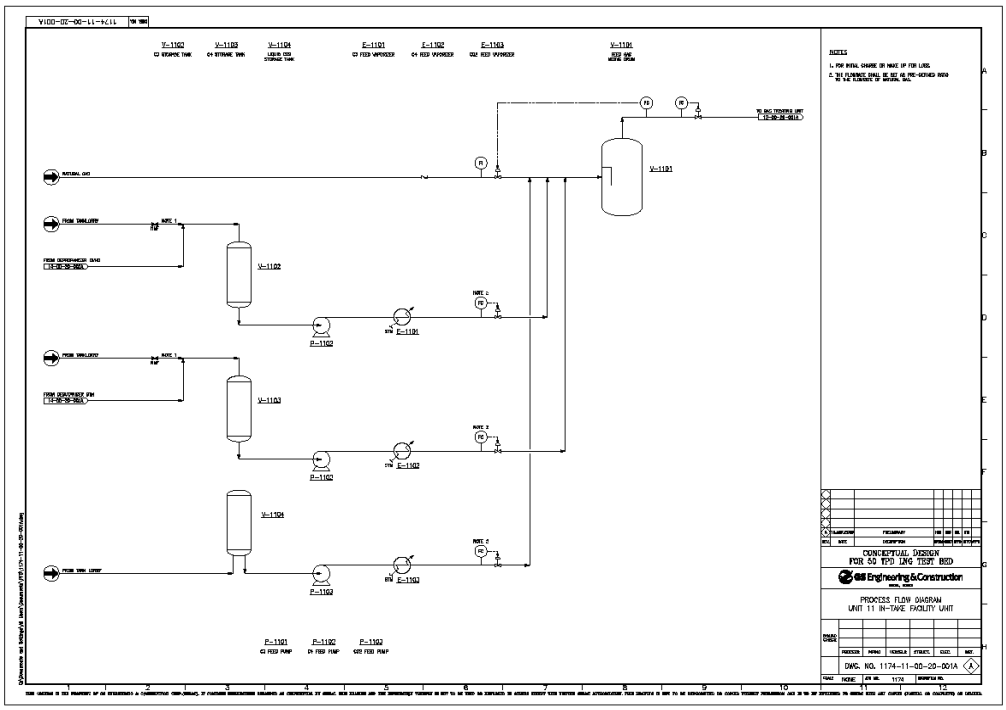


Plate Fin Heat Exchanger(PFHE)

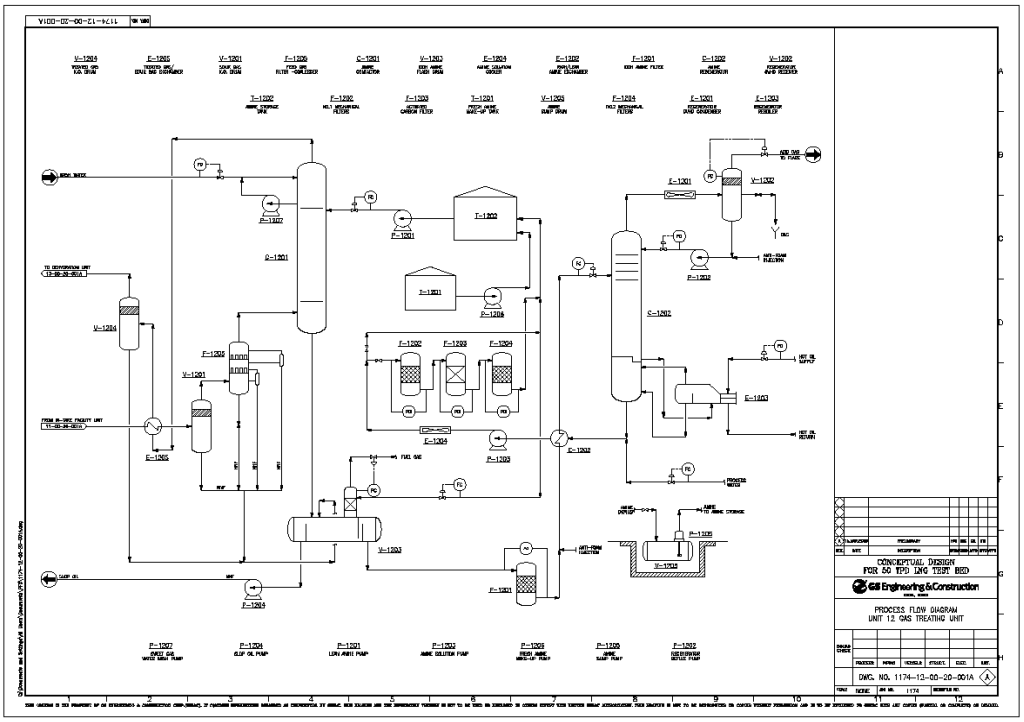
그림 6. 열교환기 유형

## (4) 열물질수지 / PFD 분석

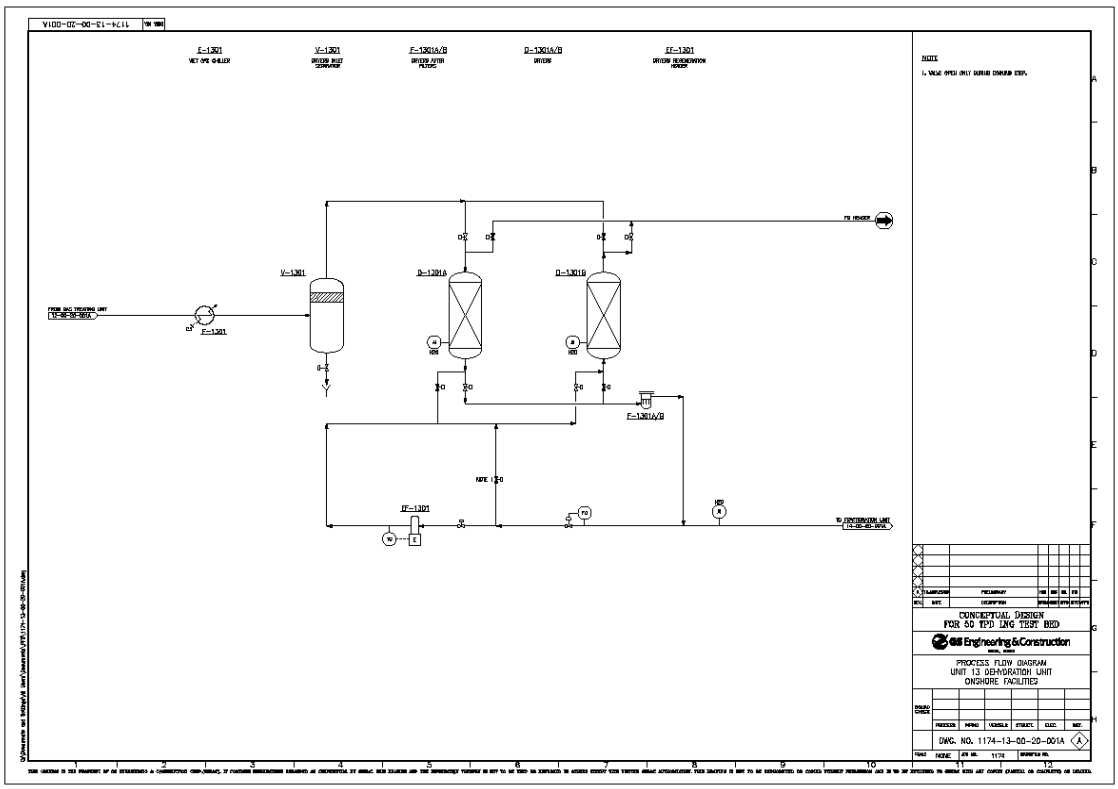
### (가) In-Take Facility Unit



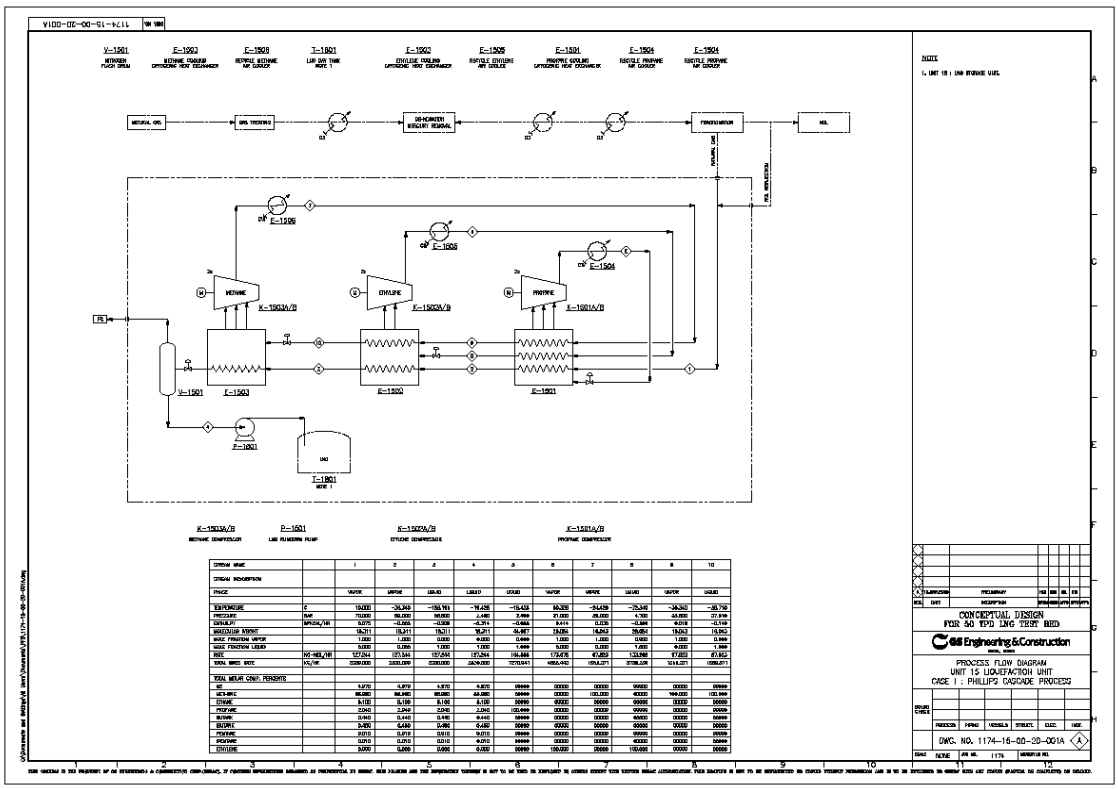

### (나) Gas Treating Unit



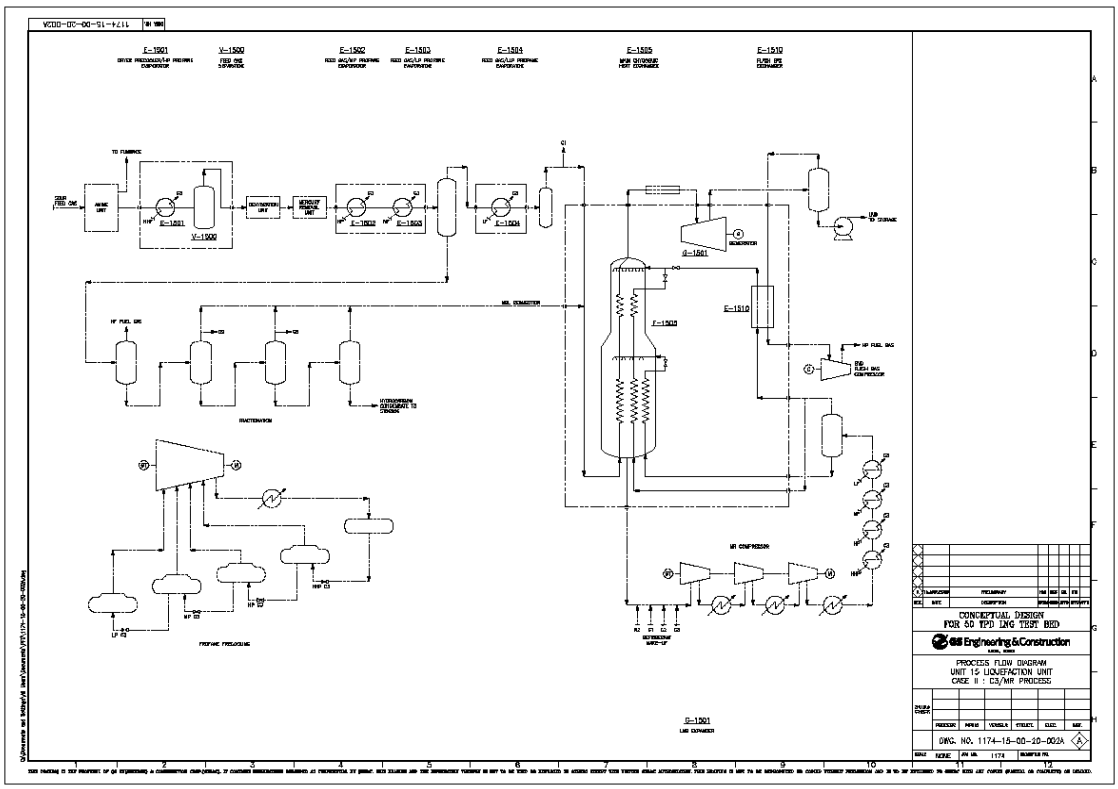
## (다) Dehydration Unit(Onshore Facilities)




## (라) Liquefaction Unit(Case 1 : Phillips Cascade Process)

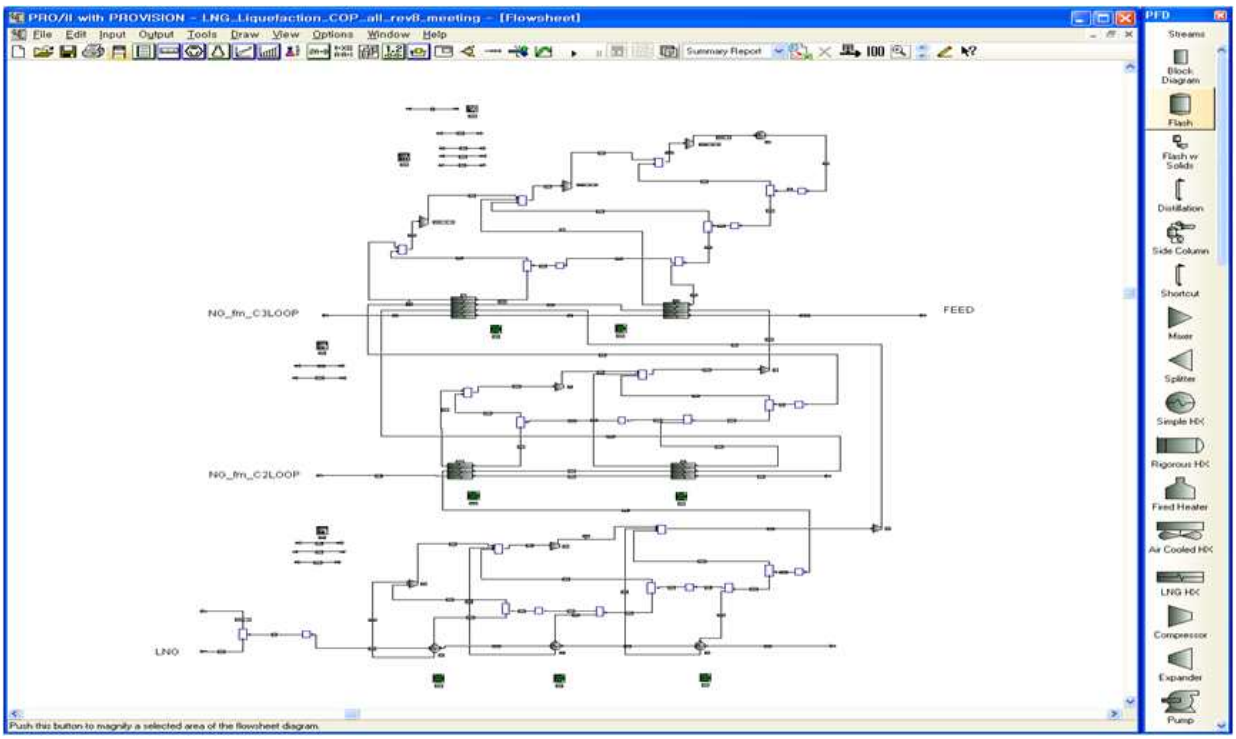


(마) Liquefaction Unit(Case 2 : C3/MR Process)



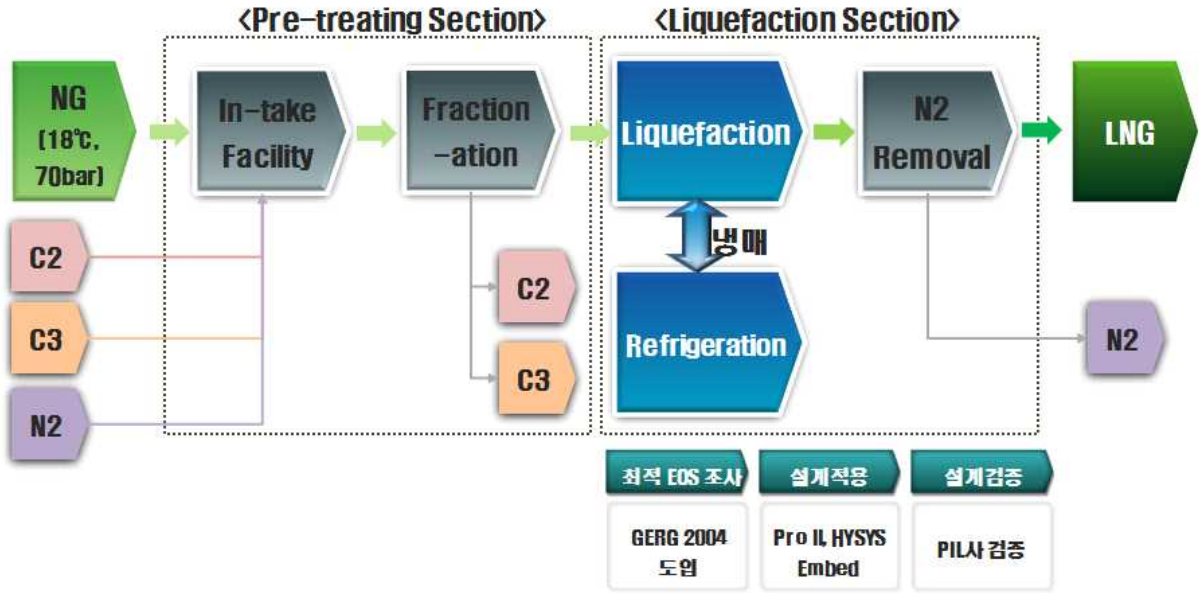

(5) 공정모사

(가) COP Process Simulation



### (6) 공정선정

테스트베드 Train-1은 전처리 공정과 액화공정으로 구성되며, 전처리 공정은 C1(천연가스)와 N2, C2, C3를 혼합하는 Intake-Facility, C2, C3를 분리하는 Fractionation으로 구성되며, 액화공정은 냉매를 통해 C1을 액화시키는 Liquefaction 공정과 냉매를 냉각하는 Refrigeration 공정과 그리고 N2를 제거하는 N2 Removal 공정으로 구성된다.




### (7) 테스트베드 개념설계

#### (가) 목차

1. Conceptual Design Basis of Test Bed
2. Pretreatment Unit
    - 2-1. In-Take Facility
    - 2-2. Gas Treating
    - 2-3. Dehydration
    - 2-4. Fractionation
3. Liquefaction Unit
    - 3-1. Case Study of Liquefaction Process – Cascade Process
    - 3-2. Case Study of Liquefaction Process – C3/MR Process
4. Recommendation for Test Bed Design

#### (나) In-Take Condition

① Feed Gas Composition

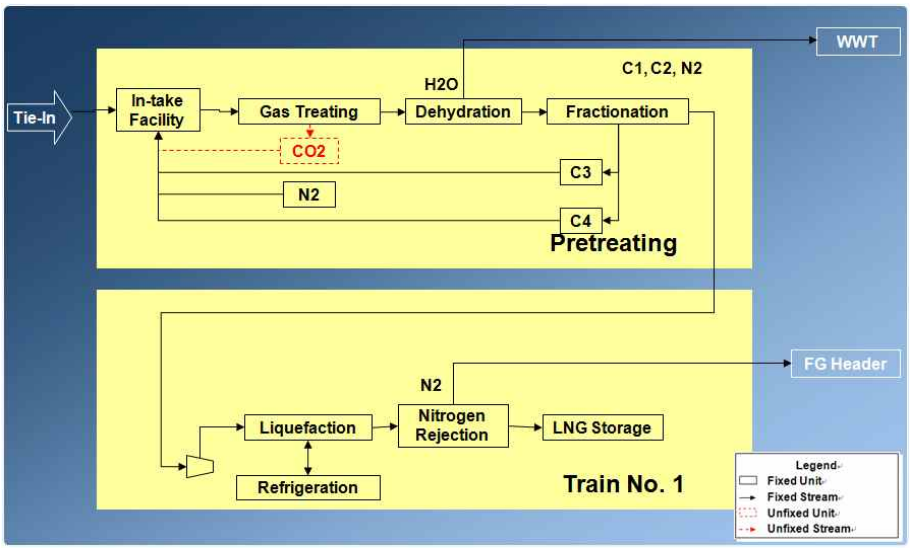
| Classification | In-take Facility | | Train-1 |
|---|---|---|---|
| | Inlet | Outlet | |
| Component | Mol % | | |
| CO2 | N/A | 0.94 | - |
| Water | - | - | - |
| N2 | 0.22 | 4.92 | 4.97 |
| C1 | 91.33 | 86.00 | 86.98 |
| C2 | 5.36 | 5.05 | 5.10 |
| C3 | 2.14 | 2.11 | 2.04 |
| i-C4 | 0.46 | 0.53 | 0.44 |
| n-C4 | 0.47 | 0.55 | 0.45 |
| i-C5 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| n-C5 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |

② Boundary Feed Gas Composition

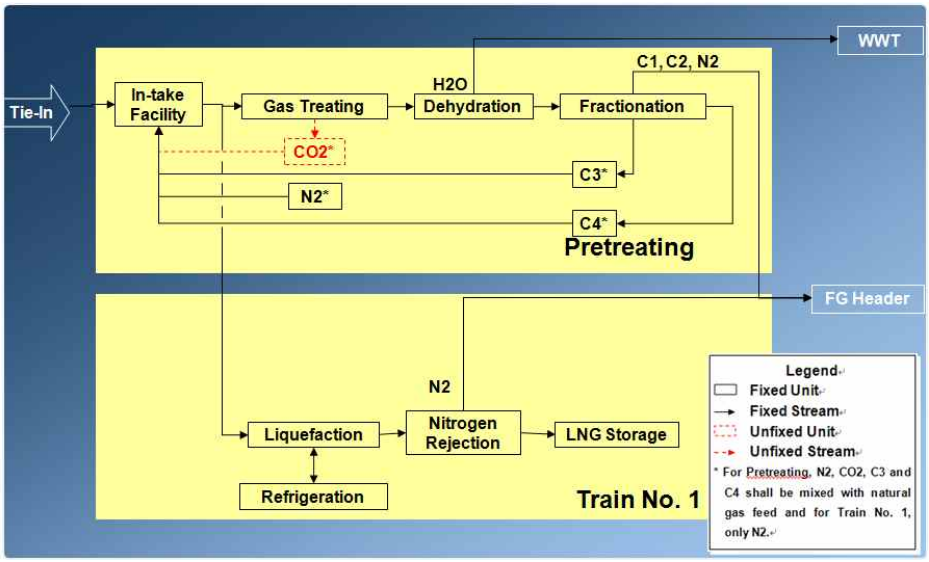
| Classification | Pretreating | Train-1 |
|---|---|---|
| Operating Pressure | 70 bara | 70 bara |
| Operating Temperature | 10℃ | 10℃ |
| Flow Rate | 100 TPD | 50 TPD |

## (다) Overall Block Diagram

①Block Diagram(1)




② Block Diagram(2)




### (라) 전처리공정

| 공정 | 내용 |
|---|---|
| In-take Facility | ■ FEED Gas Mixing Drum에서 천연가스 및 N2, CO2, C3, C4가 일정조성으로 혼합<br>■ N2, CO2, C3, C4는 전처리 공정에 투입되는 전처리가스의 조성을 일정하게 유지하기 위하여 천연가스 인입유량을 기준으로 비율제어 한다 |
| Gas Treating | ■ Acid Gas : CO2<br>■ CO2 는 50 ppmv 수준까지 제거<br>■ Amine Process 적용<br>- Secondary Amine인 DEA 적용<br>- KIER의 Alkali Salt Process 및 BASF의 aMDEA Process를 Reference로 추가검토 |
| Dehydration | ■ Molecular Sieve를 사용한 수분 제거 |
| Fractionation | ■ Demethanizer : 천연가스(주로 C1)를 분리하여 저장탱크 및 FG header로 이송<br>■ Deethanizer : C3이상의 성분을 분리하기 위한 공정. Depropanizer와 연결<br>■ Depropanizer : C3는 칼럼 상부에서 포집되며 C4는 하부에서 Debutanizer로 이송<br>■ Debutanizer : C4는 칼럼의 상부에서 포집하여 저장탱크로 이송 |

### (마) 액화공정

| 공정 | 내용 |
|---|---|
| C3/MR | ■ APCI의 대표적인 액화공정으로 90% 이상의 점유율을 보유하고 있음<br>■ 열교환기는 Proprietary SWHE를 사용 |
| COP | ■ 열교환기는 open tech인 PFHE를 사용.<br>■ PFHE를 사용하는 공정은 COP, PRICO, Liquefin이 있으나 PRICO는 소규모 가스전에 유리하고 Liquefin은 설치사례가 없음<br>■ COP 공정만이 대용량 상용화 공정 실적 있음 |

## 라. 기술동향 조사보고서

### (1) 개요

국내외 LNG 액화플랜트 시장 동향 및 기술 동향, 액화공정 기술 분석을 통해 본 과제 수행에 적용 가능한 기술을 도출하고 연구 수행 방향을 설정하고자 한다.

### (2) 연구수행 내용

**(가) 액화플랜트 시장 동향 및 해외 시장 진출시 문제점 분석**

**(나) 액화플랜트 기술 분석 및 핵심 기술 도출**

**(다) 액화공정 기술 분석**

**(라) 과제 수행에 적용 가능한 기술 도출 및 연구 수행 방향 결정**

### (3) 연구수행 결과

**(가) 과제 수행에 적용 가능한 기술 도출**

① 핵심기술인 액화공정을 개발하고, 이를 바탕으로 FEED 수행 경험을 쌓아 선진 EPC 기업과 경쟁이 가능한 기술 확보

② 연산 5백만톤 규모의 액화공정에는 APCI의 C3MR이나 Shell의 DMR 등 현재 시장에서 검증된 기술에 대한 연구를 통하는 것이 시장 진출에 바람직

③ 열교환기의 경우 SWHE가 비용측면에서 유리하나 실제 생산 가능한 업체들을 고려할 경우, 본 과제에서는 PWHE 사용이 더 적합할 것으로 예상

④ 연산 5백만톤 규모의 경우 압축기의 driver selection시 2개의 GE사 제품을 사용하는 것이 적합할 것으로 판단

**(나) 연구 수행 방향 결정**

① 국내 LNG플랜트 분야의 가치사슬과 산업기반이 취약한 관계로 투자비가 큰 연구개발사업에 민간 주도의 추진과 사업화에 한계가 존재

② 국내의 LNG플랜트 참여 형태는 시공분야가 주류를 이루고 있으며, 기본설계를 포함하는 FEED와 전체 사업관리를 주도하는 PMC 역무의 수주에는 많은 제약조건이 존재

③ 플랜트엔지니어링 분야에서 프로젝트 초기 단계에서 수행되는 FEED 수주를 통한 종합적인 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화가 요구

④ 테스트베드 실증을 기반으로 FEED 능력과 해외시장에서 요구되는 EPC 능력을 확보하는 것이 시장진입 경쟁력 확보에 매우 중요함

⑤ LNG플랜트는 다양한 학제와 원천기술, 응용기술의 복합체로서 해외시장 진입을 위한 EPC 필수기술(핵심기반+공정+설계+건설)의 개발을 위한 연구사업이 필요

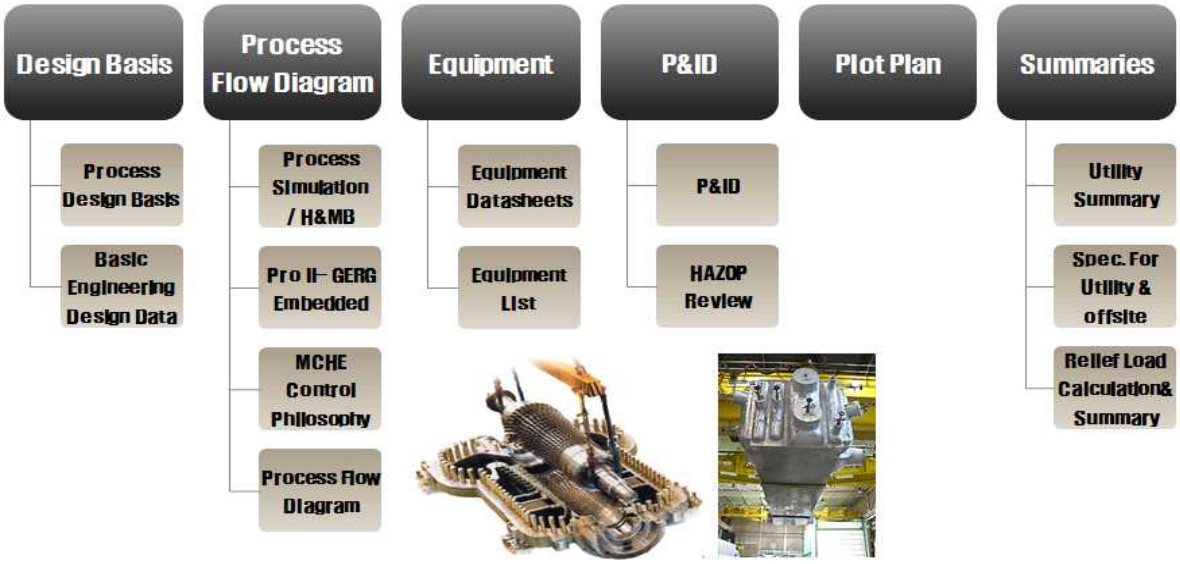
⑥ 냉매의 선택 및 최적화 기법에 대한 연구를 통해 공정의 최적화가 필요

⑦ 테스트베드 설계로부터 연산 5백만톤 규모 설계가 가능한 Scale-up기법과 용량 변화에 따라서 변화가 가능한 설계 능력 확보를 위한 연구가 요구

# 마. LNG플랜트 테스트베드 Train-1 기본설계집

## (1) 개요

기본설계는 크게 6단계로 구분하여 LNG플랜트에 대한 설계기준을 확립하고, 공정, 장치 등에 대한 설계를 진행하였다.




## (2) Train-1 기본설계집 목차

CONTENTS


1.0 PROJECT DESIGN BASIS
- 1.1 PROCESS DESIGN BASIS
- 1.2 BASIC ENGINEERING DESIGN DATA
- 1.3 SPECIFICATIONS FOR UTILITY & OFFSITE

2.0 ENGINEERING DESIGN INFORMATION
- 2.1 PROCESS DESCRIPTION
- 2.2 HEAT & MATERIAL BALANCE
- 2.3 DRAWINGS
  - 2.3.1 PROCESS FLOW DIAGRAM
  - 2.3.2 MATERIAL SELECTION DIAGRAM
  - 2.3.3 PIPING & INSTRUMENT DIAGRAM
  - 2.3.4 PLOT PLAN
  - 2.3.5 CAUSE & EFFECT DIAGRAM
  - 2.3.6 SINGLE LINE DIAGRAM
- 2.4 EQUIPMENT LIST
- 2.5 EQUIPMENT PROCESS DATA SHEET
  - 2.5.1 PLATE FIN HEAT EXCHANGER
  - 2.5.2 SHELL & TUBE HEAT EXCHANGER
  - 2.5.3 ELECTRIC HEATER
  - 2.5.4 AIR COOLER
  - 2.5.5 COLUMN
  - 2.5.6 VESSEL
  - 2.5.7 PUMP
  - 2.5.8 COMPRESSOR
- 2.6 SUMMARY
  - 2.6.1 EFFLUENT SUMMARY
  - 2.6.2 UTILITY SUMMARY
  - 2.6.3 RELIEF LOAD SUMMARY
  - 2.6.4 LINE SCHEDULE
  - 2.6.5 INSTRUMENT DATA SUMMARY SHEET

### (3) Train-1 기본설계 검토

#### (가) 기본설계 실증



■ 업체 : PfcE, PT Badak (Indonesia)
■ 기간 : 2009. 10
■ 현장 방문하여 기본설계 자료 검증

#### (나) 기본설계 액화공정 및 최적화 검토



■ 업체 : PIL (Manchester Univ. Process Integration Center)
■ 기간 : 2009.12
■ Propane Cycle
- PIL사의 Review결과와 GS건설 설계 결과가 큰 차이가 없음(Propane 유량 차가 2% 이내)

■ MR Cycle
- Feasible Heat Transfer가 되도록 MR 유량을 GS건설 설계값보다 5% 증가시켜, Min. App. Temp를 3.2℃로 계산(SW 및 EOS 차이에 기인함)

■ 검토사항 기본설계 반영

#### (다) 기본설계 위험성 정량분석



■ 업체 : Clean Engineering
■ 기간 : 2010.02~2010.03
■ Dow F&EI System
- 위험물질의 상대적 위험성을 등급으로 표시하는 system

■ 사고피해규모 예측
- 화재/폭발사고 시나리오에 따른 피해규모 예측

■ F-N curve 작성
- 사고가능 유발성(F)와 근로자의수(N)의 log 그래프

## 바. LNG플랜트 테스트베드 Train-1 상세설계집

### (1) 개요

Test Bed Train-1의 상세설계는 상용 공정인 C3/MR 혼합냉매 공정을 적용하여, 2010년 4월 시작으로 2011년 4월 상세설계를 완료하였다.

상세설계에서는 2010년 3월 완성된 Basic Design Package의 작성된 자료를 근거로 각종 Specifications 및 Drawing 작성 또는 MTO(Material Take-Off) Work 등 각종 Construction Work 전의 모든 업무를 Detail Engineering에 반영하여 작성하여 진행되었다. 또한, Test Bed Train-1에 대한 Dynamic 시뮬레이션도 함께 진행하고, 이를 상세설계에 적용하였다.

**표 12. 테스트베드 Train-1 상세설계자료 목록**

| 공종 | 주요 산출물 |
|---|---|
| Process | ▪ P&ID 등 Doc. & Dwg. 148 종 |
| Mechanical | ▪ Engineering Drawing 33 종 |
| Piping | ▪ Plot Plan 등 Doc. & Dwg. 18 종 |
| Instrument | ▪ Instrument Drawings 등 Doc. & Dwg. 47 종 |
| Electrical | ▪ Electrical Schedule 등 Doc. & Dwg. 68 종 |
| CAS | ▪ Civil Drawings 등 Doc. & Dwg. 132 종 |

### (2) Process Engineering

Process Engineering 업무는 기본설계집으로 작성된 정보를 바탕으로 Process 및 Utility 등 Plant내의 모든 기기, 운전 및 Safety를 위한 계장 및 이들을 연결하는 배관에 대한 설계를 위해 Process Data를 확정하는 설계 업무로 이에 대한 성과물로 PFD(Process Flow Diagram), P&ID(Piping & Instrument Diagram), Process Data Sheet 및 각종 Summary Sheet 등의 작업을 진행하였다.

공정 설계는 기계 및 기기와 관련된 각 장치와 각종 계장과 배관의 Design 및 Hydraulic Calculation, Equipment 및 Instrument Data Sheet 작성, Engineering Drawing 및 Vendor Print Check 등의 업무도 포함하여 진행되었다. 또한, P&ID와 UDD(Utility Distribution Diagram) 및 Plot Plan 이외에 배관설계와 관련하여 이루어져야 할 부문 설계에서는 Piping Process Data 작성 및 Line Schedule의 작성 업무 등도 함께 진행되었다.

아래의 그림 24를 보면 Process 업무 진행 흐름을 알 수 있다. 이와 같이 Process Engineering은 전기, 계장, 기계, 배관과 모든 업무의 연관성을 갖고 업무 진행이 이루어졌

다.

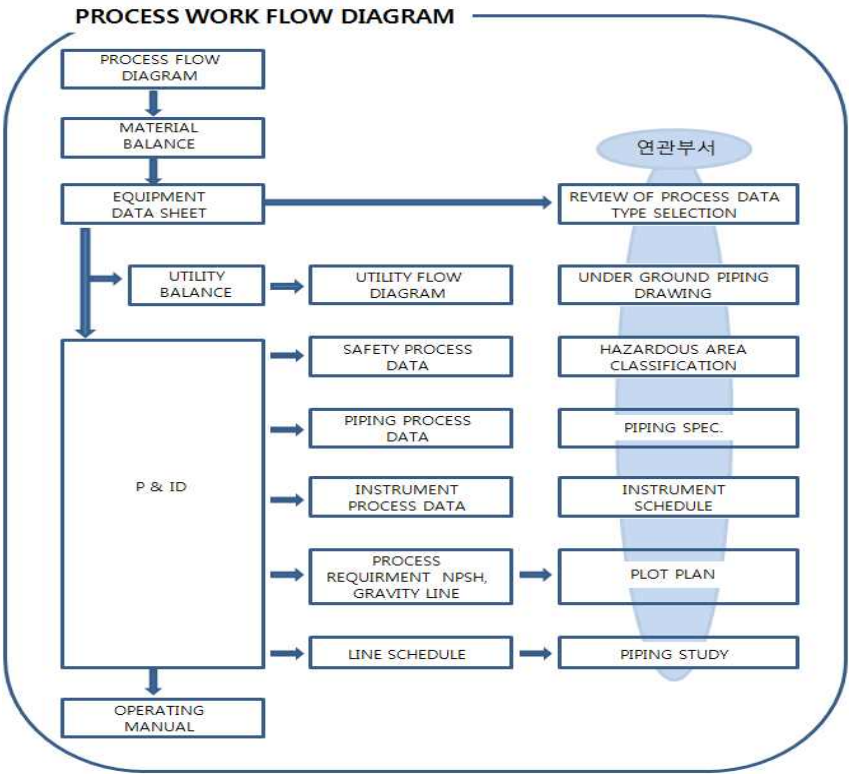



그림 10. PROCESS WORK FLOW DIAGRAM

공정 설계에서는 위의 Process Work Flow Diagram 에서도 볼 수 있듯이 타 업무와의 연관성으로 인해서 공정의 Issue 시점은 Detail Engineering Design 일정에도 큰 영향을 준다. 총 148종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다. 표 16은 공정 설계에 대한 Deliverable List이다.

표 13. Process Deliverable List

| Section | Title | Doc. No | Actual Date |
|---|---|---|---|
| 1. Process | | | |
| 1.1 | General | | |
| - | Operating Manual | GTB-R-00-DOC-001 | 2013-06-28 |
| | Heat and Material Balance | GTB-R-00-DOC-002 | 2013-06-28 |
| 1.2 | Process Drawing | | |
| 1.2.1 | Process Flow Diagram | | |
| - | Symbol & Legend | GTB-R-00-DWG-101 | 2013-06-28 |
| - | In-Take Facility | GTB-R-10-DWG-101 | 2013-06-28 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Liquefaction | GTB-R-11-DWG-101 | 2013-06-28 |
| - | Fractionation | GTB-R-12-DWG-101 | 2013-06-28 |
| - | Mixed Refrigerant Refrigeration | GTB-R-13-DWG-101 | 2013-06-28 |
| - | Propane Refrigeration | GTB-R-13-DWG-102 | 2013-06-28 |
| - | LNG Flash | GTB-R-14-DWG-101 | 2013-06-28 |
| - | Refrigerant Drum | GTB-R-50-DWG-101 | 2013-06-28 |
| 1.2.2 | **Utility Flow Diagram** | | |
| - | Water Supply System | GTB-R-50-DWG-151 | 2013-06-28 |
| - | Air Supply System | GTB-R-50-DWG-152 | 2013-06-28 |
| - | Nitrogen Supply System | GTB-R-50-DWG-153 | 2013-06-28 |
| - | Cooling Water System | GTB-R-50-DWG-155 | 2013-06-28 |
| 1.2.3 | **Piping & Instrument Diagram** | | |
| - | Symbol & Legend (1/4) | GTB-R-00-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | Symbol & Legend (2/4) | GTB-R-00-DWG-302 | 2013-06-28 |
| - | Symbol & Legend (3/4) | GTB-R-00-DWG-303 | 2013-06-28 |
| - | Symbol & Legend (4/4) | GTB-R-00-DWG-304 | 2013-06-28 |
| - | Typical & Detail Drawing (1/2) | GTB-R-00-DWG-305 | 2013-06-28 |
| - | Typical & Detail Drawing (2/2) | GTB-R-00-DWG-306 | 2013-06-28 |
| - | Feed Gas Mixing | GTB-R-10-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | Treated Feed Gas Precooler | GTB-R-11-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | Scrub Column | GTB-R-11-DWG-302 | 2013-06-28 |
| - | Scrub Column Reflux Drum | GTB-R-11-DWG-303 | 2013-06-28 |
| - | Scrub Column Reflux Pump | GTB-R-11-DWG-304 | 2013-06-28 |
| - | Main Cryogenic Heat Exchanger (1/2) | GTB-R-11-DWG-305 | 2013-06-28 |
| - | Main Cryogenic Heat Exchanger (2/2) | GTB-R-11-DWG-306 | 2013-06-28 |
| - | Deetanizer Column | GTB-R-12-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | Deethanizer Column Overhead | GTB-R-12-DWG-302 | 2013-06-28 |
| - | Deethanizer Reflux Pump | GTB-R-12-DWG-303 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Column | GTB-R-12-DWG-304 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Column Overhead | GTB-R-12-DWG-305 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Reflux Pump | GTB-R-12-DWG-306 | 2013-06-28 |
| - | Butane Recycle Pump | GTB-R-12-DWG-307 | 2013-06-28 |
| - | LPG Reinjection Cooler | GTB-R-12-DWG-308 | 2013-06-28 |
| - | LPG Separator | GTB-R-12-DWG-309 | 2013-06-28 |
| - | Suction to V-1301 | GTB-R-13-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | MR Compressor 1$^{st}$ Stage Suction Drum | GTB-R-13-DWG-302 | 2013-06-28 |
| - | LP MR Compressor | GTB-R-13-DWG-303 | 2013-06-28 |
| - | MR Compressor 5$^{th}$ Stage Suction Drum | GTB-R-13-DWG-306 | 2013-06-28 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | HP MR Compressor | GTB-R-13-DWG-307 | 2013-06-28 |
| - | MR / Propane Evaporator Section (1/2) | GTB-R-13-DWG-308 | 2013-06-28 |
| - | MR / Propane Evaporator Section (2/2) | GTB-R-13-DWG-309 | 2013-06-28 |
| - | HP MR Separator | GTB-R-13-DWG-310 | 2013-06-28 |
| - | LLP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DWG-311 | 2013-06-28 |
| - | LP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DWG-312 | 2013-06-28 |
| - | MP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DWG-313 | 2013-06-28 |
| - | HP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DWG-314 | 2013-06-28 |
| - | Propane Compressor | GTB-R-13-DWG-315 | 2013-06-28 |
| - | Propane Condensor | GTB-R-13-DWG-316 | 2013-06-28 |
| - | Propane Accumulator | GTB-R-13-DWG-317 | 2013-06-28 |
| - | Flash Gas | GTB-R-14-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | LNG Export | GTB-R-14-DWG-303 | 2013-06-28 |
| - | Ethane Refrigerant Drum | GTB-R-50-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | Propane Refrigerant Drum | GTB-R-50-DWG-302 | 2013-06-28 |
| 1.2.4 | Utility Distribution Diagram | | |
| - | Flare Collection System | GTB-R-50-DWG-352 | 2013-06-28 |
| - | Cooling Water System | GTB-R-50-DWG-353 | 2013-06-28 |
| - | Cooling Water Distribution | GTB-R-50-DWG-354 | 2013-06-28 |
| - | Service Water & Potable Water System | GTB-R-50-DWG-356 | 2013-06-28 |
| - | Nitrogen System | GTB-R-50-DWG-357 | 2013-06-28 |
| - | Air Supply System | GTB-R-50-DWG-358 | 2013-06-28 |
| - | BOG Collection System | GTB-R-50-DWG-359 | 2013-06-28 |
| - | Flare Vent Distribution | GTB-R-50-DWG-360 | 2013-06-28 |
| 1.3 | Summary Sheets | | |
| - | Equipment List | GTB-R-00-LST-001 | 2013-06-28 |
| - | Utility Summary | GTB-R-00-LST-002 | 2013-06-28 |
| - | Effluent Summary | GTB-R-00-LST-003 | 2013-06-28 |
| - | Relief Load Summary | GTB-R-00-LST-004 | 2013-06-28 |
| - | Battery Limit Summary | GTB-R-00-LST-006 | 2013-06-28 |
| 1.4 | Process Data Sheets | | |
| 1.4.1 | Plate Fin Heat Exchangers | | |
| - | Main Cryogenic Heat Exchanger A | GTB-R-11-DTA-105A | 2013-06-28 |
| - | Main Cryogenic Heat Exchanger B | GTB-R-11-DTA-105B | 2013-06-28 |
| 1.4.2 | Shell & Tube Heat Exchangers | | |
| - | FEED Gas / MP C3 Evaporator | GTB-R-11-DTA-101 | 2013-06-28 |
| - | FEED Gas / LP C3 Evaporator | GTB-R-11-DTA-102 | 2013-06-28 |
| - | Scrub Column OVHD Condenser | GTB-R-11-DTA-103 | 2013-06-28 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Deethanizer OVHD Condensor | GTB-R-12-DTA-101 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer OVHD Condensor | GTB-R-12-DTA-103 | 2013-06-28 |
| - | Reinjection / LLP C3 Evaporator | GTB-R-12-DTA-105 | 2013-06-28 |
| - | HP MR / HP C3 Evaporator | GTB-R-13-DTA-104 | 2013-06-28 |
| - | HP MR / MP C3 Evaporator | GTB-R-13-DTA-105 | 2013-06-28 |
| - | HP MR / LP C3 Evaporator | GTB-R-13-DTA-106 | 2013-06-28 |
| - | HP MR / LLP C3 Evaporator | GTB-R-13-DTA-107 | 2013-06-28 |
| - | Propane Condenser | GTB-R-13-DTA-109 | 2013-06-28 |
| - | Propane Subcooler | GTB-R-13-DTA-110 | 2013-06-28 |
| 1.4.3 | Electric Heater | | |
| - | Scrub Column Reboiler | GTB-R-11-DTA-201 | 2013-06-28 |
| - | Deethanizer Reboiler | GTB-R-12-DTA-201 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Reboiler | GTB-R-12-DTA-202 | 2013-06-28 |
| - | C3 Vaporizer | GTB-R-50-DTA-201 | 2013-06-28 |
| 1.4.4 | Air Cooler | | |
| - | MR Compressor 4th Stage Discharge After Cooler | GTB-R-13-DTA-101 | 2013-06-28 |
| - | MR Compressor 6th Stage Discharge After Cooler | GTB-R-13-DTA-102 | 2013-06-28 |
| - | C3 Compressor Desuperheater | GTB-R-13-DTA-108 | 2013-06-28 |
| 1.4.5 | Column | | |
| - | Scrub Column | GTB-R-11-DTA-301 | 2013-06-28 |
| - | Deethanizer Column | GTB-R-12-DTA-301 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Column | GTB-R-12-DTA-302 | 2013-06-28 |
| 1.4.6 | Vessel | | |
| - | Feed Gas Mixing Drum | GTB-R-10-DTA-401 | 2013-06-28 |
| - | Scrub Column Reflux Drum | GTB-R-11-DTA-401 | 2013-06-28 |
| - | Deethainzer Refulx Drum | GTB-R-12-DTA-401 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Reflux Drum | GTB-R-12-DTA-402 | 2013-06-28 |
| - | LPG Separator | GTB-R-12-DTA-403 | 2013-06-28 |
| - | MR Compressor 1st Stage Suction Drum | GTB-R-13-DTA-401 | 2013-06-28 |
| - | MR Compressor 5th Stage Suction Drum | GTB-R-13-DTA-403 | 2013-06-28 |
| - | HP MR Separator | GTB-R-13-DTA-404 | 2013-06-28 |
| - | LLP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DTA-405 | 2013-06-28 |
| - | LP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DTA-406 | 2013-06-28 |
| - | MP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DTA-407 | 2013-06-28 |
| - | HP C3 Compressor Suction Drum | GTB-R-13-DTA-408 | 2013-06-28 |
| - | Propane Accumulator | GTB-R-13-DTA-409 | 2013-06-28 |
| - | LNG Flash Drum | GTB-R-14-DTA-401 | 2013-06-28 |
| - | C2 Refrigerant Drum | GTB-R-50-DTA-401 | 2013-06-28 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | C3 Refrigerant Drum | GTB-R-50-DTA-402 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Air Receiver | GTB-R-50-DTA-403 | 2013-06-28 |
| 1.4.7 | Pump | | |
| - | Scrub Column Reflux Pump | GTB-R-11-DTA-501 | 2013-06-28 |
| - | Deethanizer Reflux Pump | GTB-R-12-DTA-501 | 2013-06-28 |
| - | Depropanizer Reflux Pump | GTB-R-12-DTA-502 | 2013-06-28 |
| - | Recycle Pump | GTB-R-12-DTA-503 | 2013-06-28 |
| - | Butane Recycle Pump | GTB-R-12-DTA-504 | 2013-06-28 |
| - | C3 Refrigerant Pump | GTB-R-50-DTA-501 | 2013-06-28 |
| - | C3 Filling Pump | GTB-R-50-DTA-502 | 2013-06-28 |
| - | Cooling Water Pump | GTB-R-50-DTA-503 | 2013-06-28 |
| 1.4.8 | Compressor | | |
| - | MR Compressor | GTB-R-13-DTA-601 | 2013-06-28 |
| - | Propane Compressor | GTB-R-13-DTA-602 | 2013-06-28 |
| 1.4.9 | Package | | |
| - | Cooling Tower | GTB-R-51-DTA-701 | 2013-06-28 |
| 1.4.10 | Instrument | | |
| - | Control Valve | GTB-R-00-DTA-702 | 2013-06-28 |
| - | Pressure Safety Relief Valve | GTB-R-00-DTA-703 | 2013-06-28 |
| - | Analyzer | GTB-R-00-DTA-704 | 2013-06-28 |
| - | Flow Meter | GTB-R-00-DTA-705 | 2013-06-28 |
| 1.5 | Cause & Effect Diagram | | |
| - | LIQ Plant Emergency Shut Down 1 of 1 | GTB-R-00-DWG-401 | 2013-06-28 |
| - | Depressuizing of LIQ Plant Fire Zone A 1 of 2 | GTB-R-00-DWG-403 | 2013-06-28 |
| - | Depressuizing of LIQ Plant Fire Zone A 2 of 2 | GTB-R-00-DWG-404 | 2013-06-28 |
| - | Feed NG Supply Flow Low | GTB-R-00-DWG-405 | 2013-06-28 |
| - | LIQ Plant Process Shut Down | GTB-R-00-DWG-407 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 11-Scrub Column Rebolier Trip | GTB-R-11-DWG-401 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 11-Scrub Column Reflux Pump Stop | GTB-R-11-DWG-402 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 11-Scrub Column Level Loss Protection | GTB-R-11-DWG-403 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Deethaniser Reboiler Trip | GTB-R-12-DWG-401 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Deethaniser Reflux Pump Stop | GTB-R-12-DWG-402 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Deethaniser Level Loss Protection | GTB-R-12-DWG-403 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Depropaniser Reboiler Trip | GTB-R-12-DWG-404 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Depropaniser Reflux Pump Stop | GTB-R-12-DWG-405 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Butane Recycle Pumps Stop | GTB-R-12-DWG-406 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 12-Recycle Pumps Stop | GTB-R-12-DWG-407 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 13-MR Compressor Trip | GTB-R-13-DWG-401 | 2013-06-28 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | UNIT 13-Propane Compressor Trip | GTB-R-13-DWG-402 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 13-V-1304 MRL Isolation | GTB-R-13-DWG-403 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 13-V-1309 C3 Liquid Isolation | GTB-R-13-DWG-404 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 13-MR Compressor Recycle | GTB-R-13-DWG-405 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 13-Propane Compressor Recycle | GTB-R-13-DWG-406 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 50-C2 Ref. Tank Level Loss Protection | GTB-R-50-DWG-401 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 50-C3 Ref. Tank Level Loss Protection | GTB-R-50-DWG-402 | 2013-06-28 |
| - | UNIT 50-C3 Vaporizer Electric Heater Stop | GTB-R-50-DWG-403 | 2013-06-28 |

공정 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) PFD(Process Flow Diagram) : Process를 구성하는 중요한 기기 및 Control Logic과 배관이 표시되고, 각 주요 Stream Number를 기준으로 Material Balance를 표기하는 작업등을 진행하였다. 개별기기, 계장 System의 구성, 배관의 화공계산 등을 포함한 상세설계의 기준이 되는 것으로 Process Flow Sheet라고도 하며 특히 Plant의 Plot Plan작성의 기초가 되는 작업이다.

(나) P&ID(Piping & Instrument Diagram) : Plant의 물리적인 구성요소가 되는 모든 기기, 배관, 배관부속품, 계기가 표시되며, Plant 전체설계 특히 운전과 안전측면에서 설계가 타당한가를 검토하는데 반드시 필요한 도면이며 또한 기기배치계획의 기초가 되며, 모든 분야의 상세설계 특히 배관 및 계장설계의 기초가 되는 작업을 진행했다.

(다) UDD(Utility Distribution Diagram) : 사용되는 Utility의 분배계통을 한눈에 표현한 도면으로, 주로 표기되는 utility로는 Nitrogen Gas, Instrument Air, Cooling Water, Service Water & Potable Water 등을 나타내는 작업이 이뤄졌다.

### (3) Mechanical Engineering

Mechanical Engineering에서는 Plant의 성능상 요구되는 여러 가지 Process Requirement와 기계 및 각 부문의 Requirement를 vendor에게 정확히 지시될 수 있도록 하는 일과 각 부문에서 진행되는 상세설계 업무에 기계적인 Information이 정확하게 제공될 수 있도록 하는 일과 함께 각종 Equipment Data sheet의 작성, Engineering Drawing의 작성, Requisition sheet등을 포함하여 작업이 진행되었다. 총 33종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 14. Mechanical Deliverable List

| Section | Title | Doc. No | Actual Date |
|---|---|---|---|
| 2. Mechaical | | | |
| 2.1 | Engineering Drawings | | |
| - | FEED GAS MIXING DRUM | GTB-M-10-DWG-001 | 2011-02-15 |
| - | SCRUB COLUMN | GTB-M-11-DWG-001 | 2011-02-15 |
| - | FEED GAS / MP C3 EVAPORATOR | GTB-M-11-DWG-002 | 2011-02-15 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | FEED GAS / LP C3 EVAPORATOR | GTB-M-11-DWG-003 | 2011-02-15 |
| - | SCRUB COLUMN OVHD CONDENSER | GTB-M-11-DWG-004 | 2011-02-15 |
| - | SCRUB COLUMN REFLUX DRUM | GTB-M-11-DWG-005 | 2011-02-15 |
| - | DEETHANIZER COLUMN | GTB-M-12-DWG-001 | 2011-02-15 |
| - | DEPROPANIZER COLUMN | GTB-M-12-DWG-002 | 2011-02-15 |
| - | DEETHANIZER OVHD CONDENSER | GTB-M-12-DWG-003 | 2011-02-15 |
| - | DEPROPANIZER OVHD CONDENSER | GTB-M-12-DWG-004 | 2011-02-15 |
| - | REINJECTION / LLP C3 EVAPORATOR | GTB-M-12-DWG-005 | 2011-02-15 |
| - | DEETHANIZER REFLUX DRUM | GTB-M-12-DWG-006 | 2011-02-15 |
| - | DEPROPANIZER REFLUX DRUM | GTB-M-12-DWG-007 | 2011-02-15 |
| - | LPG SEPARATOR | GTB-M-12-DWG-008 | 2011-02-15 |
| - | HP MR / HP C3 EVAPORATOR | GTB-M-13-DWG-001 | 2011-02-15 |
| - | HP MR / MP C3 EVAPORATOR | GTB-M-13-DWG-002 | 2011-02-15 |
| - | HP MR / LP C3 EVAPORATOR | GTB-M-13-DWG-003 | 2011-02-15 |
| - | HP MR / LLP C3 EVAPORATOR | GTB-M-13-DWG-004 | 2011-02-15 |
| - | PROPANE CONDENSER | GTB-M-13-DWG-005 | 2011-02-15 |
| - | PROPANE SUBCOOLER | GTB-M-13-DWG-006 | 2011-02-15 |
| - | LP MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-007 | 2011-02-15 |
| - | MP MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-008 | 2011-02-15 |
| - | HP MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-009 | 2011-02-15 |
| - | HP MR SEPARATOR | GTB-M-13-DWG-010 | 2011-02-15 |
| - | LLP C3 COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-011 | 2011-02-15 |
| - | LP C3 COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-012 | 2011-02-15 |
| - | MP C3 COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-013 | 2011-02-15 |
| - | HP C3 COMPRESSOR SUCTION DRUM | GTB-M-13-DWG-014 | 2011-02-15 |
| - | PROPANE ACCUMULATOR | GTB-M-13-DWG-015 | 2011-02-15 |
| - | LNG FLASH DRUM | GTB-M-14-DWG-002 | 2011-02-15 |
| - | C2 REFRIGERANT DRUM | GTB-M-50-DWG-001 | 2011-02-15 |
| - | C3 REFRIGERANT DRUM | GTB-M-50-DWG-002 | 2011-02-15 |
| - | INSTRUMENT AIR RECEIVER | GTB-M-50-DWG-003 | 2011-02-15 |

기계 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

**(가) C3 & MR Compressor : 액화시 사용되는 냉매로 C3, MR이 사용되며 냉동 순환을 통해 필요한 냉매를 생성하기 위해 식히는 압축장치에 대한 Detail Data를 작성하였다.**

(나) Centrifugal Pump : 원심펌프로 액화공정을 위한 냉각수의 순환을 목적으로 사용되는 장치에 대한 Detail Data를 작성하였다.

(다) Proportioning Pump : 제어용량펌프로 성분분리 역할을 하는 Column의 실적을 위해 환류가 되기 위한 목적으로 사용되는 장치에 대한 Detail Data를 작성하였다.

(라) Cooling Tower : 공정상의 냉매로 사용되는 냉각수의 냉각 장치에 대한 Detail Data를 작성하였다.

(마) Vessel & Heat Exchanger : Vessel은 압력용기로서 ASME Section VIII Div.1에 따라 강도계산을 진행 하여 설계 되었다. Heat Exchanger는 유체간 열교환을 위한 장치인데, Process Condition에 따라 열정산(Thermal Rating)하여 기계의 기본적인 성능을 위한 기본 설계를 하고, 상세 설계는 국제규격(TEMA, API) 및 ASME Section VIII Div.1 따라 설계되었다. 상세사항들은 표14의 Engineering Drawing에서 참고 할 수 있다.

(바) Aluminum Brazed Heat Exchanger : 냉매로 사용되는 MR을 Feed와 접촉시켜 액화시키는 장치로서 극저온 상태에서 열교환을 담당한다. Perlite Insulation 재로 채워진 Carbon Steel 재질의 Box에 Core라고 불리는 Aluminum 재질의 열교환기가 들어있는 형식으로서, Box 내부에 질소를 충진 한 상태로 운전하여 극저온 상태에 따른 성애 형성을 방지한다. 설계는 ASME Section VIII Div.1, ASME B31.3 및 해당 장치기기의 국제규격(ALPEMA)에 따라서 설계 하였다.

(사) Electric Heater : 특정 유체에 열을 가해 증발 시키거나, Column의 Reboiler 기능을 주로 했으며, Ni-Cr 선을 포함 하고 있는 Heating 요소에서의 전기열원으로 유체를 가열시키는 장치 기계이며, Plat 환경에 맞추어 상세설계 진행 되었다.

(아) Air Cooled Heat Exchanger : Compressor 후단의 온도를 제어하는 기능을 주로 담당 했으며, Fan으로 공기를 불어 Coil 속의 유체를 Cooling 시키는 장치이며, Plant 환경에 맞추어 상세설계 진행되었다.

### (4) Piping Engineering

Piping Engineering에서는 기기와 기기를 process에서 규정한 대로 적절한 배관부품을 이용하여 연결해 나가는 설계과정으로 관련 기기들이 최상의 운전성능이 유지되고 Plant를 효율적으로 Operation하는데 매우 중요한 영향을 미치며 공정, 토건, 전기, 계장 등과 상호유기적인 밀접한 coordination을 이루면서 작업이 진행되었다. 총 18종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 15. Piping Deliverable List

| Section | Title | Doc. No | Actual Date |
|---|---|---|---|
| 3. Piping | | | |
| 3.1 | General | | |
| - | Purchasing specification for Pipe | GTB-P-00-DOC-002 | 2013-06-28 |
| - | Purchasing specification for Fittings | GTB-P-00-DOC-003 | 2013-06-28 |
| - | Purchasing specification for Flanges | GTB-P-00-DOC-004 | 2013-06-28 |
| - | Purchasing specification for Gaskets | GTB-P-00-DOC-005 | 2013-06-28 |
| - | Purchasing specification for Bolt&Nut | GTB-P-00-DOC-006 | 2013-06-28 |
| - | Purchasing specification for Valves | GTB-P-00-DOC-007 | 2013-06-28 |
| - | 3D model Review | GTB-P-00-DOC-011 | 2011-07-27 |
| 3.2 | Piping drawings and Specifications | | |
| 3.2.1 | Standards drawings and Specification | | |
| - | Piping Typical Drawings | GTB-P-00-SPC-001 | 2013-06-28 |
| - | Piping Supports | GTB-P-00-SPC-002 | 2013-06-28 |
| - | Piping Material Specification | GTB-P-00-SPC-005 | 2013-06-28 |
| - | Tie-in Location Plan & Detail Isometric Drawing | GTB-P-00-SPC-006 | 2013-06-28 |
| - | Utility Station & Safety Shower Location Plan | GTB-P-00-SPC-007 | 2013-06-28 |
| - | Piping Flexibilty Analysis | GTB-P-00-SPC-008 | 2013-06-28 |
| - | Line Schedule | GTB-P-00-LST-001 | 2013-06-28 |
| 3.2.2 | Piping Drawing | | |
| - | Plot Plan | GTB-P-00-DWG-001 | 2013-06-28 |
| - | General Plot Plan | GTB-P-00-DWG-002 | 2013-06-28 |
| - | Plot Plan Elevation | GTB-P-00-DWG-003 | 2013-06-28 |
| - | KEY PLAN | GTB-P-00-DWG-010 | 2013-06-28 |

배관 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) General Documents : Project에 수행하면서 필요한 배관 기자재 구매를 위한 기본적인 조건을 구성한 시방서이다. 주요 항목으로는 배관 기자재의 제작 기준이 되는 각 Code and Standard 적용 범위, 이에 따른 검사 및 시험에 대한 기본적인 사항이 명기되어있다.

(나) Standards drawings and Specification : Plant의 배관 설계를 구성하는 설계의 기준이 되는 내용으로 정리가 되어있다. 즉, 배관 기자재를 구성하는 각 항목의 사양 및 구성 등에 대해서 자세히 설명이 되어있다. 특히 운전 및 안전 측면에서 배관의 설계의 구성 및 위치가 적합한지에 대해서 분석을 수행하며, 해당 결과에 따라서, 배관의 설계를 합리적으로 구성을 한다. 마지막으로 각각의 배관의 설계 정보가 들어있는 list도 지속 수정과 보완 작업이 동시에 진행이 되었다.

(다) Piping Drawings : Plant의 Layout은 각종 기자재와 설비에 대한 배치도, 원료처리설비, 저장설비, 변전소, 각종 유틸리티 공급설비, 폐수처리설비 등의 공장가동에 필요한 모든 시설을 Plot 단위로 표시한 전체 배치도(Unit Plot Plan)를 계획하여 진행된다. 이는 기본설계시 성과물 중 하나이며, Project 초기에 확정되어 설계가 진행되는 과정에서 지속적인 수정과 보완 작업이 진행되었다.

### (5) Instrument Engineering

Instrument Engineering에서는 운전관리를 하기 위해서 계측장치, 제어장치 및 정보처리장치 등을 말한다. 계장 설계는 타부문 설계와 연관성이 많아 독립적인 설계는 불가능 하며 Plant 건설의 계획단계에서부터 시운전까지 계장설계에 대한 업무가 계속 진행된다. 총 49종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 16. Instrument Deliverable List

| Section | Title | Doc. No | Actual Date |
|---|---|---|---|
| 4. Instrument | | | |
| 4.1 | Instrument Drawings | | |
| - | Instrument Schedule | GTB-I-00-DWG-001 | 2017-11-30 |
| - | Instrument Loop Diagram | GTB-I-00-DWG-011 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Logic Diagram | GTB-I-00-DWG-021 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Process Hook-up Drawing | GTB-I-00-DWG-031 | 2013-12-10 |
| - | Instrument Tracing Hook-up Drawing | GTB-I-00-DWG-041 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Connection Drawing | GTB-I-00-DWG-051 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Typical Detail Drawing | GTB-I-00-DWG-061 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Cable Schedule | GTB-I-00-DWG-071 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Cable Drum Schedule | GTB-I-00-DWG-081 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Symbol & Legend | GTB-I-00-DWG-101 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Key Plan | GTB-I-00-DWG-111 | 2013-06-28 |
| - | System Architecture | GTB-I-00-DWG-201 | 2013-06-28 |
| - | Control/Rack Room Layout | GTB-I-00-DWG-301 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Duct Layout 1 of 5 | GTB-I-00-DWG-401 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Duct Layout 2 of 5 | GTB-I-00-DWG-402 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Duct Layout 3 of 5 | GTB-I-00-DWG-403 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Duct Layout 4 of 5 | GTB-I-00-DWG-404 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Duct Layout 5 of 5 | GTB-I-00-DWG-405 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Main Cable Layout 1 of 2 | GTB-I-00-DWG-411 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Main Cable Layout 2 of 2 | GTB-I-00-DWG-412 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Location Plan 1 of 3 | GTB-I-00-DWG-501 | 2017-09-21 |
| - | Instrument Location Plan 2 of 3 | GTB-I-00-DWG-502 | 2017-09-21 |
| - | Instrument Location Plan 3 of 3 | GTB-I-00-DWG-503 | 2017-09-21 |
| - | Gas Detector Location Plan | GTB-I-00-DWG-521 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Wiring Layout (Analog Signal) 1 of 3 | GTB-I-00-DWG-601 | 2017-09-21 |
| - | nstrument Wiring Layout (Analog Signal) 2 of 3 | GTB-I-00-DWG-602 | 2017-09-21 |
| - | nstrument Wiring Layout (Analog Signal) 3 of 3 | GTB-I-00-DWG-603 | 2017-09-21 |
| - | Instrument Wiring Layout (Discrete/Power & Interlock) 1 of 3 | GTB-I-00-DWG-611 | 2017-09-21 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Instrument Wiring Layout (Discrete/Power & Interlock) 2 of 3 | GTB-I-00-DWG-612 | 2017-09-21 |
| - | Instrument Wiring Layout (Discrete/Power & Interlock) 3 of 3 | GTB-I-00-DWG-613 | 2017-09-21 |
| - | Gas Detector Wiring Layout | GTB-I-00-DWG-621 | 2013-06-28 |
| - | CCTV Wiring Layout | GTB-I-00-DWG-631 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Air Piping Layout 1 of 2 | GTB-I-00-DWG-701 | 2017-04-05 |
| - | Instrument Air Piping Layout 2 of 2 | GTB-I-00-DWG-702 | 2017-04-05 |
| - | Analyzer Tubing Layout | GTB-I-00-DWG-801 | 2013-06-28 |
| 4.2 | Instrument Requisition | | |
| - | DCS | GTB-I-00-RFQ-001 | 2013-06-28 |
| - | SIS | GTB-I-00-RFQ-002 | 2013-06-28 |
| - | Flow Element (Orifice,RO) | GTB-I-00-RFQ-101 | 2013-06-28 |
| - | Flowmeter (Rotameter) | GTB-I-00-RFQ-103 | 2013-06-28 |
| - | Level Gauge | GTB-I-00-RFQ-105 | 2013-06-28 |
| - | Pressure & D/P Transmitter (Including Local Indicator) | GTB-I-00-RFQ-106 | 2013-06-28 |
| - | Pressure & Temperature Gauge | GTB-I-00-RFQ-107 | 2013-06-28 |
| - | Temperature Element & Transmitter (Including Skin Thermocouple) | GTB-I-00-RFQ-108 | 2013-06-28 |
| - | Control Valve | GTB-I-00-RFQ-201 | 2013-06-28 |
| - | Pressure Safety & Relief Valve | GTB-I-00-RFQ-202 | 2013-06-28 |
| | Control Valve (Korval) | GTB-I-00-RFQ-211 | 2013-06-28 |
| | Pressure Safety & Relief Valve (KIE) | GTB-I-00-RFQ-222 | 2013-06-28 |
| - | Analyzer Package | GTB-I-00-RFQ-301 | 2013-06-28 |
| - | Gas Detector | GTB-I-00-RFQ-302 | 2013-06-28 |
| - | CCTV | GTB-I-00-RFQ-303 | 2013-06-28 |
| - | Instrument Bulk Materials | GTB-I-00-RFQ-401 | 2011-02-28 |

계장 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) Instrument Loop Diagram : Instrument Schedule과 함께 발신기로부터 수신계기, 조절계로부터 조절변으로 신호의 연결이 어떻게 되어 있는가등 계장 System을 단선도로 표시하여 작성된 Document 작업이 진행되었다.

(나) Instrument Main Cable Layout : 계장 Cable을 어디까지 포설하느냐, Junction Box는 어디에 두느냐 등을 표시하는 작업으로, Main Cable 및 Direct Cable의 포설용 재료 집계용으로 이용하기 위해 진행되었다.

### (6) Electrical Engineering

Electrical Engineering에서는 각종 기기에 대한 구매, 제작용 상세사양을 작성하는 것을 말하며 상세시공도면을 작성하는 것을 포함하여 업무가 진행되었다. 장비에 대한 Vendor Print를 기초로 한 동력부하와 전등부하, 건물설비 부하를 집계하여 단선접속도를 확정 후 작업에 반영과 함께 건물 및 Structure 평면도 및 입면도, 지하 구조물에 대한 토건도면 배관평면도, 위험장소 구획도, Sequence Diagram등을 기초로 조명, 전열, 동력, 접지, 화재감시, 통신설비에 대한 배선도를 반영한 작업이 진행되었다. 총 68종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 17. Electrical Deliverable List

| Section | Title | Doc. No | Actual Date |
|---|---|---|---|
| 4. Electrical | | | |
| 4.1 | Electrical Schedule | | |
| - | Motor & Load Schedule | GTB-E-00-LST-001 | 2011-01-28 |
| - | Cable Schedule | GTB-E-00-LST-002 | 2010-12-23 |
| - | Control Switch Station Schedule | GTB-E-00-LST-005 | 2010-12-23 |
| - | Lighting Panelboard Schedule | GTB-E-00-LST-007 | 2011-01-28 |
| - | Elec. Heat Tracing Panelboard Schedule | GTB-E-00-LST-008 | 2011-01-28 |
| 5.2 | Electrical Drawings | | |
| - | General Notes | GTB-E-00-DWG-001 | 2010-11-25 |
| - | Symbol & Legend(1 of 2) | GTB-E-00-DWG-002 | 2010-11-25 |
| - | Symbol & Legend(2 of 2) | GTB-E-00-DWG-003 | 2010-11-25 |
| - | Symbol & Legend(OUT DOOR) | GTB-E-00-DWG-004 | 2010-11-25 |
| - | Single Line Diagram (HV SWGR., Train-1) | GTB-E-00-DWG-101 | 2011-01-28 |
| - | Single Line Diagram (Existing LV MCC-7ALPM) | GTB-E-00-DWG-103 | 2011-01-28 |
| - | Single Line Diagram (Existing LV MCC-7BLPM) | GTB-E-00-DWG-104 | 2011-01-28 |
| - | Single Line Diagram (Train-1 LV MCC-1/2) | GTB-E-00-DWG-105 | 2011-01-28 |
| - | Single Line Diagram (Train-1 LV MCC-2/2) | GTB-E-00-DWG-106 | 2011-01-28 |
| - | Single Line Diagram (Existing BC & 1Φ UPS SYS.) | GTB-E-00-DWG-107 | 2011-01-28 |
| - | Hazardous Area Classification (Overall) | GTB-E-00-DWG-201 | 2011-01-28 |
| - | Hazardous Area Classification (Train-1)-1/2 | GTB-E-00-DWG-202 | 2011-01-28 |
| - | Hazardous Area Classification (Train-1)-2/2 | GTB-E-00-DWG-203 | 2011-01-28 |
| - | Hazardous Area Classification (Section) | GTB-E-00-DWG-204 | 2011-01-28 |
| - | Electrical Equipment Layout (Train-1) | GTB-E-00-DWG-221 | 2011-03-03 |
| - | Main Cable Route Plan (Train-1,KEY) | GTB-E-00-DWG-241 | 2011-03-03 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Main Cable Route Plan (Train-1,1 of 2) | GTB-E-00-DWG-242 | 2011-03-03 |
| - | Main Cable Route Plan (Train-1,2 of 2) | GTB-E-00-DWG-243 | 2011-03-03 |
| - | Power Plan (Train 1-Key Plan) | GTB-E-00-DWG-301 | 2010-12-23 |
| - | Power Plan (Train 1) | GTB-E-00-DWG-302 | 2010-12-23 |
| - | Power Plan (Control Room) | GTB-E-00-DWG-303 | 2010-12-23 |
| - | Cable List (Train 1 - 1/3) | GTB-E-00-DWG-304 | 2010-12-23 |
| - | Cable List (Train 1 - 2/3) | GTB-E-00-DWG-305 | 2010-12-23 |
| - | Cable List (Train 1 - 3/3) | GTB-E-00-DWG-306 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Plan (Train 1-Key Plan) | GTB-E-00-DWG-321 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Plan (Train 1 - 1/2) | GTB-E-00-DWG-322 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Plan (Train 1 - 2/2) | GTB-E-00-DWG-323 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Plan (Control Room) | GTB-E-00-DWG-324 | 2010-12-23 |
| - | Lighting Plan (Train 1-Key Plan) | GTB-E-00-DWG-341 | 2011-01-28 |
| - | Lighting Plan (Train 1 - 1/3) | GTB-E-00-DWG-342 | 2011-01-28 |
| - | Lighting Plan (Train 1 - 2/3) | GTB-E-00-DWG-343 | 2011-01-28 |
| - | Lighting Plan (Train 1 - 3/3) | GTB-E-00-DWG-344 | 2011-01-28 |
| - | Lighting Plan (Control Room) | GTB-E-00-DWG-345 | 2011-01-28 |
| - | Fire Alarm Plan (Train 1-Key Plan) | GTB-E-00-DWG-421 | 2011-01-28 |
| - | Fire Alarm Plan (Train 1) | GTB-E-00-DWG-422 | 2011-01-28 |
| - | Fire Alarm Plan (Control Room) | GTB-E-00-DWG-423 | 2011-01-28 |
| - | Electric Heat Tracing Plan (Train 1-Key Plan) | GTB-E-00-DWG-441 | 2011-01-28 |
| - | Electric Heat Tracing Plan (Train 1 - 1/2) | GTB-E-00-DWG-442 | 2011-01-28 |
| - | Electric Heat Tracing Plan (Train 1 - 2/2) | GTB-E-00-DWG-443 | 2011-01-28 |
| - | Power Installation Detail-1/3 | GTB-E-00-DWG-501 | 2010-12-23 |
| - | Power Installation Detail-2/3 | GTB-E-00-DWG-502 | 2010-12-23 |
| - | Power Installation Detail-3/3 | GTB-E-00-DWG-503 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Installation Detail-1/4 | GTB-E-00-DWG-504 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Installation Detail-2/4 | GTB-E-00-DWG-505 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Installation Detail-3/4 | GTB-E-00-DWG-506 | 2010-12-23 |
| - | Grounding Installation Detail-4/4 | GTB-E-00-DWG-507 | 2010-12-23 |
| - | Cable Tray Installation Detail-1/3 | GTB-E-00-DWG-508 | 2010-12-23 |
| - | Cable Tray Installation Detail-2/3 | GTB-E-00-DWG-509 | 2010-12-23 |
| - | Cable Tray Installation Detail-3/3 | GTB-E-00-DWG-510 | 2010-12-23 |
| - | Lighting Installation Detail-1/2 | GTB-E-00-DWG-511 | 2010-12-23 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Lighting Installation Detail-2/2 | GTB-E-00-DWG-512 | 2010-12-23 |
| - | Lighting Fixture Schedule | GTB-E-00-DWG-513 | 2011-01-28 |
| 5.3 | Electrical Requisition | | |
| - | Switchgear & MCC | GTB-E-00-RFQ-001 | 2011-03-17 |
| - | Electrical Ex-Proof Materials | GTB-E-00-RFQ-002 | 2011-03-17 |
| - | Cable Tray | GTB-E-00-RFQ-004 | 2011-03-17 |
| - | Conduit | GTB-E-00-RFQ-005 | 2011-03-17 |
| 5.4 | Electrical Specification | | |
| - | Electric Design Basis | GTB-E-00-SPC-001 | 2010-08-30 |
| - | Specification for HV Switchgear | GTB-E-00-SPC-002 | 2010-08-30 |
| - | Specification for LV Switchgear & MCC | GTB-E-00-SPC-003 | 2010-08-30 |
| - | Specification for Electric Motor | GTB-E-00-SPC-004 | 2010-08-30 |
| - | Specification for Electrical Bulk Material | GTB-E-00-SPC-005 | 2010-08-30 |
| - | Specification for Cathodic Protection system | GTB-E-00-SPC-006 | 2010-08-30 |
| - | Specification for Paging System | GTB-E-00-SPC-007 | 2010-08-30 |

전기 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) Single Line Diagram : 기기 List, 전동기 List 및 Plant에 소요되는 전기기기의 부하를 발췌하고 개략적인 조명부하를 산정하여 부하계산을 행하고 Plot Plan상의 부하배치, 비상전원공급계획, 변압기, 차단기등 주요기기의 사양을 반영하여 진행했다.

(나) Hazardous Area Classification : 폭발성 기체 또는 인화성 액체를 취급하는 Plant의 경우 Plot Plan및 공정으로부터 반영된 process data를 기초로 하여 위험장소를 나타내는 작업을 말하며, Safety와 직접적인 연관이 있으므로 Detail한 Data를 작업의 기초로 하여 진행하였다.

(다) Main Cable Route Plan : Plot Plan, Pipe Routing Study 도면 및 전기기기 배치상황을 검토한 후 주간선 경로를 설정한 후, 이를 반영하여 작업하였다.

### (7) CAS Engineering

CAS Engineering에서는 각 Equipment의 하중과 Piping Line을 고려하여, Equipment를 배치하여 반영하는 작업을 진행하였다. 총 132종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

**표 18. CAS Deliverable List**

| Section | Title | Doc. No | Actual Date |
|---|---|---|---|
| 6. CAS | | | |
| 6.1 | GENERAL | | |
| - | 지질조사 보고서 | GTB-C-00-DOC-001 | 2010-08-30 |
| - | Calculation for HVAC System | GTB-A-00-CAL-901 | 2010-12-22 |
| - | Calculation for Calulation for Existing Local Control House Extension | GTB-A-50-CAL-001 | 2011-01-10 |
| 6.2 | Civil drawings | | |
| 6.2.1 | Standards drawings | | |
| - | General notes for civil work | GTB-C-00-DWG-001 | 2010-08-09 |
| - | Standard detail of re-bar arrangement (1/3) | GTB-C-00-DWG-002 | 2010-08-09 |
| - | Standard detail of re-bar arrangement (2/3) | GTB-C-00-DWG-003 | 2010-08-09 |
| - | Standard detail of re-bar arrangement (3/3) | GTB-C-00-DWG-004 | 2010-08-09 |
| - | Pile head treatment detail | GTB-C-00-DWG-005 | 2010-08-09 |
| - | Anchor bolt schedule | GTB-C-00-DWG-006 | 2010-08-09 |
| - | Typical fireproofing details | GTB-C-00-DWG-007 | 2010-08-09 |
| - | Pavement typical section & detail | GTB-C-00-DWG-008 | 2010-08-09 |
| - | U/g pipe protection | GTB-C-00-DWG-009 | 2010-08-09 |
| - | General notes for steel structure | GTB-C-00-DWG-010 | 2010-08-09 |
| - | Member list for steel structure | GTB-C-00-DWG-011 | 2010-08-09 |
| - | Typical beam to column (1/2) moment conn. Details | GTB-C-00-DWG-012 | 2010-08-09 |
| - | Typical beam to column (2/2) moment conn. Details | GTB-C-00-DWG-013 | 2010-08-09 |
| - | Typical beam to column shear conn. Details | GTB-C-00-DWG-014 | 2010-08-09 |
| - | Typical beam to beam connection details | GTB-C-00-DWG-015 | 2010-08-09 |
| - | Typical vertical bracing connection details | GTB-C-00-DWG-016 | 2010-08-09 |
| - | Typical horizontal bracing connection details | GTB-C-00-DWG-017 | 2010-08-09 |
| - | Typical stair & handrail details | GTB-C-00-DWG-018 | 2010-08-09 |
| - | Typical ladder details | GTB-C-00-DWG-019 | 2010-08-09 |
| - | Typical grating floor details | GTB-C-00-DWG-020 | 2010-08-09 |
| - | Base plate details (supported on fdn. & st'l/str.) | GTB-C-00-DWG-021 | 2010-08-09 |

| 6.2.2 | Foundation drawings | | |
|---|---|---|---|
| - | Pile location plan | GTB-C-00-DWG-051 | 2011-05-30 |
| - | Foundation location plan | GTB-C-00-DWG-052 | 2011-05-30 |
| - | Drainage plan | GTB-C-00-DWG-053 | 2011-06-30 |
| - | Road and paving plan | GTB-C-00-DWG-054 | 2011-06-30 |
| - | Foundation details for E-1305 | GTB-C-00-DWG-101 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for E-1306 | GTB-C-00-DWG-102 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for E-1307 | GTB-C-00-DWG-103 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for E-1310 | GTB-C-00-DWG-104 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for E-1105A/B | GTB-C-00-DWG-105 | 2011-06-30 |
| - | Foundation details for EF-5001 | GTB-C-00-DWG-107 | 2011-11-14 |
| - | Foundation details for V-1301 & V-1304(1 OF 2) | GTB-C-00-DWG-121 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1301 & V-1304(2 OF 2) | GTB-C-00-DWG-122 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1302 & V-1303(1 OF 2) | GTB-C-00-DWG-123 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1302 & V-1303(2 OF 2) | GTB-C-00-DWG-124 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1305 | GTB-C-00-DWG-125 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1306 | GTB-C-00-DWG-126 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1307 | GTB-C-00-DWG-127 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1308 | GTB-C-00-DWG-128 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1309 & V-5002(1 OF 2) | GTB-C-00-DWG-129 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-1309 & V-5002(2 OF 2) | GTB-C-00-DWG-130 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-5001 | GTB-C-00-DWG-131 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for V-5003 | GTB-C-00-DWG-132 | 2011-05-30 |
| - | Foundation details for K-1301 | GTB-C-00-DWG-141 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for K-1302 | GTB-C-00-DWG-142 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for Cooling tower X-5001(1/4) | GTB-C-00-DWG-161 | 2011-07-22 |
| - | Foundation details for Cooling tower X-5001(2/4) | GTB-C-00-DWG-162 | 2011-07-22 |
| - | Foundation details for Cooling tower X-5001(3/4) | GTB-C-00-DWG-163 | 2011-07-22 |
| - | Foundation details for P-1101A/B | GTB-C-00-DWG-182 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for P-1201A/B | GTB-C-00-DWG-183 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for P-1202A/B | GTB-C-00-DWG-184 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for P-1203A/B | GTB-C-00-DWG-185 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for P-1204A/B | GTB-C-00-DWG-186 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for P-5001A/B | GTB-C-00-DWG-188 | 2011-09-27 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Foundation details for P-5002A/B | GTB-C-00-DWG-189 | 2011-09-27 |
| - | Foundation details for P-5003A/B | GTB-C-00-DWG-190 | 2011-06-30 |
| - | Instrument duct bank details & Manholie Details (1/2) | GTB-C-00-DWG-221 | 2011-05-30 |
| - | Instrument duct bank details & Manholie Details (2/2) | GTB-C-00-DWG-222 | 2011-05-30 |
| 6.3 | Steel drawings | | |
| - | Pipe rack-1 Column Arrangement Plan & T.O.S EL+9600 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-301 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 T.O.S EL+10700 & EL+11200 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-302 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 T.O.S EL+12600 & EL+14000 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-303 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 T.O.S EL+15400 & EL+19000 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-304 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 Framing Elev. Col Line "PD" | GTB-S-00-DWG-305 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 Framing Elev. Col Line "PE" | GTB-S-00-DWG-306 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 Framing Elev. Col Line "PE1","PE2","P1","P3" & "P4" | GTB-S-00-DWG-307 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 Framing Elev. Col Line "P4a","P5" & "P6" | GTB-S-00-DWG-308 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-2 Column Arrangement Plan & T.O.S EL+11900 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-309 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-2 T.O.S EL+13300 & EL+14700 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-310 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-2 Framing Elev. Col Line "P1", "P2" | GTB-S-00-DWG-311 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-2 Framing Elev. Col Line "PB2", "PA"~"PC" | GTB-S-00-DWG-312 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-3 Col. Arr.Plan & T.O.S EL+11900,13300 & 14700 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-313 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-3 Framing Elev. Col Line "P5a", "PB" & "PC" | GTB-S-00-DWG-314 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 foundation detail for PF1 & PF2 | GTB-S-00-DWG-321 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 foundation detail for PF3 | GTB-S-00-DWG-322 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-1 foundation detail for PF4 | GTB-S-00-DWG-323 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-2 foundation detail for PF6 & PF7 | GTB-S-00-DWG-324 | 2011-06-01 |
| - | Pipe rack-2 & 3 foundation detail for PF5 & PF8 | GTB-S-00-DWG-325 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" Column Arrangement Plan & T.O.S EL+10000 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-351 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" T.O.S EL+14000 & +17000 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-352 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" T.O.S EL+11900,13300,14700,20000 & 25000 Framing Plan | GTB-S-00-DWG-353 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" Framing Elev. Col. Line "PB" | GTB-S-00-DWG-354 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" Framing Elev. Col. Line "PB1","PB2" & "PC" | GTB-S-00-DWG-355 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" Framing Elev. Col. Line "P2" & "P3" | GTB-S-00-DWG-356 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" Framing Elev. Col. Line "P4" & "P5" | GTB-S-00-DWG-357 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" Stair-"1" Plan & Elevation | GTB-S-00-DWG-358 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" V-1001,V-1101,V-1201 & V-1202 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-359 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" V-1203 & V-1401 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-360 | 2011-06-01 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Structure "A" C-1201 & C-1101 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-361 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" C-1202 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-362 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" E-1103 & E-1201 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-363 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" E-1203 & E-1205 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-364 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" E-1304 & E-1102 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-365 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" E-1101 & E-1309 Setting Detail | GTB-S-00-DWG-366 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" foundation detail for SF1 | GTB-S-00-DWG-391 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" foundation detail for SF2 | GTB-S-00-DWG-392 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" foundation detail for SF3 | GTB-S-00-DWG-393 | 2011-06-01 |
| - | Structure "A" foundation detail for SF4 & SF5 | GTB-S-00-DWG-394 | 2011-06-01 |
| - | Working platform for E-1105A/B Plan & Elevation | GTB-S-00-DWG-401 | 2011-06-01 |
| - | Working platform for E-1105A/B Framing Elev.Col.Line "1"~"3" & "A"~"C" | GTB-S-00-DWG-402 | 2011-06-30 |
| - | Working platform E-1105A/B foundation detail for LPF-1 | GTB-S-00-DWG-411 | 2011-06-01 |
| 6.4 | **Existing Building Extension Drawings** | | |
| - | Existing Local Control House Extension Gound Floor Plan | GTB-A-50-DWG-101 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Extension Roof Plan | GTB-A-50-DWG-102 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Extension Elevation (1/2) | GTB-A-50-DWG-103 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Extension Elevation (2/2) | GTB-A-50-DWG-104 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Extension Main Section | GTB-A-50-DWG-105 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Interior Finish Schedule / Door & Window Schedule | GTB-A-50-DWG-106 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Extension Wall Section | GTB-A-50-DWG-107 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Reflected Ceiling Plan | GTB-A-50-DWG-108 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Misc. Detail-(1/2) | GTB-A-50-DWG-109 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Misc. Detail-(2/2) | GTB-A-50-DWG-110 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Door & Window Detail | GTB-A-50-DWG-111 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Demoltion Plan | GTB-A-50-DWG-150 | 2010-12-01 |
| - | Existing Local Control House Extension Foundation Location Plan | GTB-A-50-DWG-151 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Ground Floor Framing Plan | GTB-A-50-DWG-152 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Roof Framing Plan | GTB-A-50-DWG-153 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Framing Elevation-1/2 | GTB-A-50-DWG-154 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Framing Elevation-2/2 | GTB-A-50-DWG-155 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Foundation Re-bar Detail | GTB-A-50-DWG-156 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Roof Slab Re-bar Detail | GTB-A-50-DWG-157 | 2011-01-10 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Existing Local Control House Extension Column & Girder Member List | GTB-A-50-DWG-158 | 2011-01-10 |
| - | Existing Local Control House Extension Misc. Re-bar Details | GTB-A-50-DWG-159 | 2011-01-10 |
| 6.5 | HVAC Drawings | | |
| - | HVAC System Legend & Abbreviation | GTB-A-11-DWG-901 | 2010-12-22 |
| - | HVAC General Details | GTB-A-11-DWG-902 | 2010-12-22 |
| - | HVAC Equipment Schedule | GTB-A-11-DWG-903 | 2010-12-22 |
| - | HVAC System Schematic Diagram | GTB-A-11-DWG-904 | 2010-12-22 |
| - | Existing Local Control House Demolition Piping Plan For Ground Floor | GTB-A-11-DWG-905 | 2010-12-22 |
| - | Existing Local Control House HVAC Equip. Arrangement Plan For Ground Floor | GTB-A-11-DWG-906 | 2010-12-22 |
| - | Existing Local Control House HVAC Piping Plan For Ground Floor | GTB-A-11-DWG-907 | 2010-12-22 |
| - | Existing Local Control House HVAC Piping Section For Ground Floor | GTB-A-11-DWG-908 | 2010-12-22 |

토건 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

**(가) 지질조사 보고서(Soil Investigation Report) : 대지의 지질구조 및 성분, 대지저항 등에 대하여 조사, 측정 및 분석한 보고서를 말하며, 토목, 건축 및 전기 접지설계 등에 필요한 기초 자료로 활용하는 자료로 가장 먼저 선행되는 작업이었다.**

**(나) HVAC(Heating, Ventilation & Air Conditioning) : 공기조화 설비라고 하며 공기의 송풍부, 순환부, 가열부, 냉각부, 청정부, Damper등의 부속장치를 해당 건물에 설치하고 Duct 또는 배관으로 건물의 각 부분에 조절된 공기를 보내고, 실내의 공기를 배출하여 순환시키는 설비에 대한 업무를 진행하였다.**

### (8) 3D Modeling

테스트베드 Train-1의 공정, 배관, 전기, 계장 등의 Access way를 검토하고 운영/유지보수 및 안전규정을 검토하기 위하여 총 3회에 걸쳐 3D Modeling Review 실시

**표 19. 테스트베드 Train-1 3D Modeling Review Results**

| 단계 | 주요 결과 |
|---|---|
| 30% | ■ 2010.11.2. 완료<br>■ 총 19건의 수정사항 도출 |
| 60% | ■ 2011.7.27. 완료<br>■ 총 57건의 수정사항 도출 |
| 90% | ■ 2012.2.9. 완료<br>■ 총 24건의 수정사항 도출<br>■ 설계 반영 |

(9) HAZOP Study

(가) 개요

설계단계에서 운전시 발생 가능한 위험(Hazard)을 제거하고 조업도(Operability)의 문제를 개선하고자 함

① 기간 : 2010. 8. 10 ~ 17

② 전문기관 : 정림테크

③ 결과 : 28개 Node, 284개 항목에 대해 3개의 개선 조치 사항 도출

⇒ Valve 오작동에 의한 MR Compressor의 Damage 등 3건에 대한 개선 권고사항 설계 반영

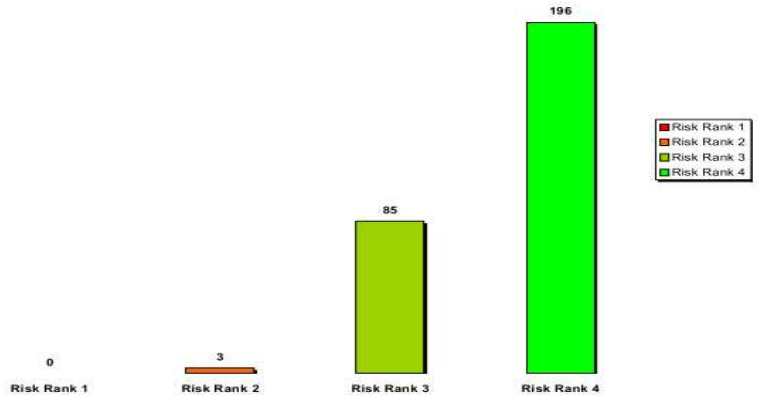



그림 11. Train-1 HAZOP Study Results Summary

표 20. Train-1 HAZOP Study Results

| DEVIATION | CAUSE | CONSEQUENCE | PROTECTION | S | L | R | RECOMMENDATIONS/ QUESTIONS | ANSWERS/ NOTES |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| More Flow | FV-008 malfunction fully open. <Upstream> | 1. Increased flowrate of Flash Gas.<br>2. Decreased condensing efficiency in MCHE (E-1105A/B).<br>3. Potential damage to MR Compressor (K-1301) due to low temperature of refrigerant. | 1. FAH-005<br>2. PI-008<br>3. TAH-017<br>4. TALL-041A/B/C(2oo3) and interlock I-1301 | 1 | 3 | 2 | R-4-01. Review thermal stress in MCHE (E-1105A/B) due to low temperature drop by FV-008 fully open. | |
| More Flow | FV-008 malfunction fully open. <Downstream> | 1. Increased temperature and pressure in Nitrogen Stripper Column (C-1401).<br>2. Potential damage to Nitrogen Stripper Column (C-1401) due to Flash Gas pressure of FV-008. | 1. PAH-043<br>2. TI-076<br>3. LAL-041<br>4. LALL-050<br>5. PSV-038A/B | 1 | 3 | 2 | R-4-02. Review pressure drop range of FV-008 and thermal stress of Nitrogen Stripper Column (C-1401) because FV-008 pressure drop range is too high (58.8 barA). | |
| More Flow | FV-057 malfunction fully open. <Upstream> | 1. Increased flowrate of Flash Gas.<br>2. Decreased condensing efficiency in Flash Gas Exchanger (E-1401).<br>3. Potential damage to Nitrogen Stripper Column (C-1401) due to Flash Gas pressure of FV-057.<br>4. Potential damage to compressor due to low temperature of refrigerant. | 1. TI-071<br>2. TI-014<br>3. TI-073<br>4. TI-072<br>5. PI-008<br>6. TAH-017<br>7. FAL-005 | 1 | 3 | 2 | R-4-03. Review thermal stress in Flash Gas Exchanger (E-1401) due to low temperature drop by FV-057 fully open. | |

(10) Material Selection Review

(가) 개요

설계된 설비들의 재질의 적합성을 사전 검토하고 부식 가능성을 예측하여 반영함으로써 테스트베드 건설와 운용시의 안전문제를 점검하고, 공정의 잠재 사고위험을 방지하기 위하여 실시하였음

① 기간 : 2010. 12.

② 전문기관 : UTEC

③ 검토 범위

- 기본 알고리즘 작성(규격, 코드 등)
- 압력 설비의 위험도 산출
- 설비 재질의 적합성 검토
- 부식 가능성 검토
- 손상에 대한 위험 관리
- 분석 결과 및 위험도

④ 결과

: 총 23개의 Components에 대해 Review를 실시하였으며, 모든 Component들이 부식에 대해 설계상 문제가 없는 것으로 결론

표 21. Distribution of Criticality Rating

| Equipment Type | Equipment Count | Component Count | High | Medium-High | Medium | Low |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pressure Vessels | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| Columns | 2 | 6 | 0 | 2 | 4 | 0 |
| S&T Heat Exchangers | 4 | 10 | 0 | 0 | 7 | 3 |
| Air Coolers | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| **Totals** | **12** | **23** | **0** | **2** | **18** | **3** |

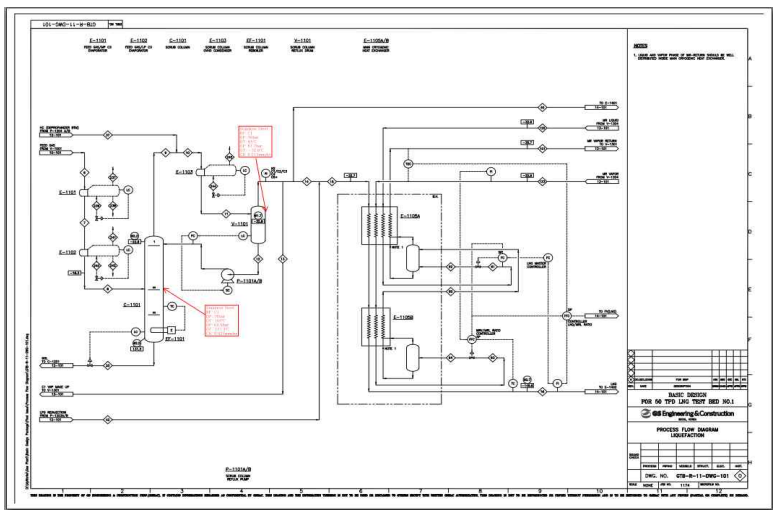


그림 12. Corrosion Study Markup

### (11) Dynamic Simulation

#### (가) 개요

Dynamic Modeling을 통하여 압축기와 MCHE가 포함된 천연가스 Liquefaction Cycle의 Controllability 검증, ESD Logic의 점검 및 Start-up/Shutdown procedure를 확인하고자 실시함

① 기간 : 2011. 9. ~ 2012. 3.

② 전문기관 : Invensys

③ 검토 범위

- Fractionation
- Liquefaction
- C3/MR Cycle

#### (4) 기대효과

- Controllability 점검, ESD Check
- Start-Up 절차 Check
- Compressor Control Logic 점검 및 표준화
- Train-1 시운전 시 활용
- Train-2 및 5MPTA 상용급 설계 활용

표 22. Scope of Dynamic Modeling

| Equipment No. | Description |
|---|---|
| C-1101 | ■ Scrub Column |
| E-1105A/B | ■ Main Cryogenic Heat Exchanger |
| C-1201 | ■ DeEthanizer Column |
| C-1202 | ■ DePropanizer Column |
| K-1301 | ■ MR Compressor |
| K-1302 | ■ Propane Compressor |
| Drums | ■ 17 Items |
| Exchangers | ■ 20 Items |
| Pumps | ■ 7 Items |
| Total | 50Items |

## 사. LNG플랜트 테스트베드 Train-2 기본설계집

### (1) 개요

Test Bed Train-2 공정은 독자 개발한 신액화 공정을 적용함으로써 LNG플랜트 해외시장 설계 및 시공기술을 보유한 국가로 진입하여, 이러한 설계 및 건설기술을 기반으로 해외시장 진출을 목표로 삼아 업무를 진행하였다.

Train-2 기본설계는 3핵심 GS건설과 2핵심 한국가스공사의 협업으로 진행되었다. 한국가스공사에서는 한국형 액화 공정인 KSMR의 공정을 개발하여 Train-2에 적용시켰고, 그 결과를 바탕으로 GS건설에서는 공정 검토 및 Engineering업무를 담당하였다. GS건설과 한국가스공사의 TF활동의 결과물로 2011년 10월 Train-2의 기본 설계집이 완성되었다.




그림 13. 테스트베드 Train-2 기본설계 협업 구성도

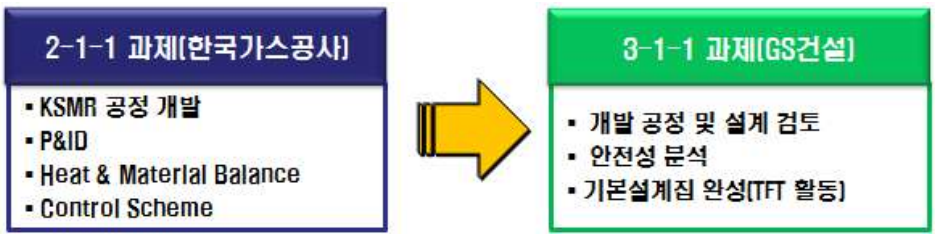



그림 14. 테스트베드 Train-2 TF활동

### (2) 주요 산출물

| 구분 | 주요 산출물 |
|---|---|
| General | Plot Plan 등 Doc. & Dwg. 7 종 |
| Process | P&ID 등 Doc. & Dwg. 56 종 |
| Data Sheet | Plate Fin Heat Exchangers DS 등 58종 |
| Others | Equipment List 등 Doc. 7종 |

(3) Train-2 기본설계집 목차

CONTENTS


1.0 PROJECT DESIGN BASIS
- 1.1 PROCESS DESIGN BASIS
- 1.2 BASIC ENGINEERING DESIGN DATA
- 1.3 SPECIFICATIONS FOR UTILITY & OFFSITE

2.0 ENGINEERING DESIGN INFORMATION
- 2.1 PROCESS DESCRIPTION
- 2.2 HEAT & MATERIAL BALANCE
- 2.3 DRAWINGS
  - 2.3.1 PROCESS FLOW DIAGRAM
  - 2.3.2 MATERIAL SELECTION DIAGRAM
  - 2.3.3 PIPING & INSTRUMENT DIAGRAM
  - 2.3.4 PLOT PLAN
  - 2.3.5 PLOT PLAN-ELEVATION
  - 2.3.7 CAUSE & EFFECT DIAGRAM
  - 2.3.7 SINGLE LINE DIAGRAM
- 2.4 EQUIPMENT LIST
- 2.5 EQUIPMENT PROCESS DATA SHEET
  - 2.5.1 PLATE FIN HEAT EXCHANGER
  - 2.5.2 SHELL & TUBE HEAT EXCHANGER
  - 2.5.3 ELECTRIC HEATER
  - 2.5.4 AIR COOLER
  - 2.5.5 COLUMN
  - 2.5.6 VESSEL
  - 2.5.7 PUMP
  - 2.5.8 COMPRESSOR
- 2.6 SUMMARY
  - 2.6.1 RELIEF LOAD SUMMARY
  - 2.6.2 UTILITY SUMMARY
  - 2.6.3 EFFLUENT SUMMARY
  - 2.6.4 INSTRUMENT DATA SUMMARY SHEET
  - 2.6.5 DEPRESSURIZING SUMMARY
  - 2.6.6 SUMMARY OF TIE-IN BETWEEN TRAIN-1&TRAIN-2
  - 2.6.7 LINE SCHEDULE

## 아. LNG플랜트 테스트베드 Train-2 상세설계집

### (1) 개요

Train-2의 상세설계는 2011년 10월에 완성한 Basic Design Package를 바탕으로 2핵심의 KSMR 공정을 적용하고 2핵심에서 연구 개발한 열교환기와 압축기의 정보를 반영해 진행되었으며, 아래와 같은 조직을 구성하여 수행하였다.

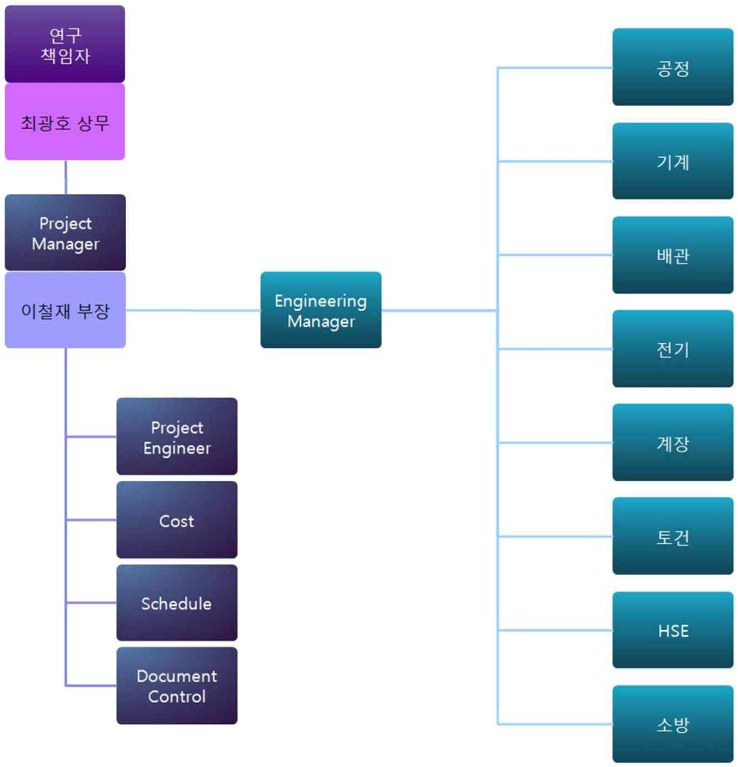



그림 15. Train-2 상세설계 조직도

Train-2 상세설계는 각 공종별로 Process 126종, Mechanical 18종, Piping 40종, Instrument 48종, Electrical 67종, CAS 58종 등 총 358종의 설계 도서를 완성하였다.

표 24. 테스트베드 Train-2 상세설계자료 목록

| 공종 | 주요 산출물 |
|---|---|
| Process | ■ P&ID 등 Doc. & Dwg. 126종 |
| Mechanical | ■ Engineering Drawing 18종 |
| Piping | ■ Plot Plan 등 Doc. & Dwg. 40종 |
| Instrument | ■ Instrument Drawings 등 Doc. & Dwg. 48종 |
| Electrical | ■ Electrical Schedule 등 Doc. & Dwg. 67종 |
| CAS | ■ Civil Drawings 등 Doc. & Dwg. 58종 |

### (2) Process Engineering

Process Engineering 업무는 기본설계집으로 작성된 정보를 바탕으로 Process 및 Utility 등 Plant내의 모든 기기, 운전 및 Safety를 위한 계장 및 이들을 연결하는 배관에 대한 설계를 위해 Process Data를 확정하는 설계 업무로 이에 대한 성과물로 PFD(Process Flow Diagram), P&ID(Piping & Instrument Diagram), Process Data Sheet 및 각종 Summary Sheet 등의 작업을 진행하였다.

Train-2는 기존 Train-1과 Common으로 사용하는 Feed Gas In-take Unit, Fractionation Unit, LNG End Flash Unit, Refrigerant Storage 및 MR Make-up System 등과의 Tie-in이 필요하였으며 공정 설계에서 검토를 지원하였다.

공정 설계는 기계 및 기기와 관련된 각 장치와 각종 계장과 배관의 Design 및 Hydraulic Calculation, Equipment 및 Instrument Data Sheet 작성, Engineering Drawing 및 Vendor Print Check 등의 업무도 포함하여 진행되었다. 또한, P&ID와 UDD(Utility Distribution Diagram) 및 Plot Plan 이외에 배관설계와 관련하여 이루어져야 할 부문 설계에서는 Piping Process Data 작성 및 Line Schedule의 작성 업무 등도 함께 진행되었다.

특히 Train-2의 MR Compressor는 Train-1의 Compressor Vendor인 HTW의 C3/MR Compressor를 개조하여 진행하는 것으로 변경됨에 따라 기존 System과의 Tie-in, 계장 기기 및 배관의 재사용여부 검토, MR Compressor Start-up Sequence 등에 대해서 Vendor의 검토가 이루어질 수 있도록 지원하는 업무도 포함되었다.

타 업무와의 연관성으로 인해서 공정의 Issue 시점은 Detail Engineering Design 일정에도 큰 영향을 준다. 총 124종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 25. Process Deliverable List

| Section | Title | Doc No. | Due Date |
|---|---|---|---|
| 1. Process | | | |
| 1.1 | General | | |
| - | Operating Manual | LTB-R-00-DOC-001 | 2017-12-07 |
| - | Heat and Material Balance | LTB-R-00-DOC-002 | 2017-12-01 |
| 1.2 | Process Drawing | | |
| 1.2.1 | Process Flow Diagram | | |
| - | SYMBOL & LEGEND | LTB-R-00-DWG-101 | 2017-12-01 |
| - | IN-TAKE FACILITY | LTB-R-10-DWG-101 | 2017-12-01 |
| - | FRACTIONATION | LTB-R-12-DWG-101 | 2017-12-01 |
| - | MIXED REFRIGERANT REFRIGERATION | LTB-R-13-DWG-101 | 2017-12-01 |
| - | PROPANE REFRIGERATION | LTB-R-13-DWG-102 | 2017-12-01 |
| - | END FLASH | LTB-R-14-DWG-101 | 2017-12-01 |
| - | SCRUBBER COLUMN | LTB-R-21-DWG-101 | 2017-12-01 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER | LTB-R-21-DWG-102 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSION | LTB-R-23-DWG-101 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSION | LTB-R-23-DWG-102 | 2017-12-01 |
| - | HP MR COMPRESSION | LTB-R-23-DWG-103 | 2017-12-01 |
| - | REFRIGERANT STORAGE | LTB-R-50-DWG-101 | 2017-12-01 |
| 1.2.2 | Piping & Instrument Diagram | | |
| - | SYMBOL & LEGEND (1/4) | LTB-R-00-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | SYMBOL & LEGEND (2/4) | LTB-R-00-DWG-302 | 2017-12-01 |
| - | SYMBOL & LEGEND (3/4) | LTB-R-00-DWG-303 | 2017-12-01 |
| - | SYMBOL & LEGEND (4/4) | LTB-R-00-DWG-304 | 2017-12-01 |
| - | TYPICAL & DETAILDRAWING (1/2) | LTB-R-00-DWG-305 | 2017-12-01 |
| - | TYPICAL & DETAILDRAWING (2/2) | LTB-R-00-DWG-306 | 2017-12-01 |
| - | FEED GAS MIXING | LTB-R-10-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | DEETHANIZER COLUMN | LTB-R-12-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | DEETHANIZER COLUMN OVERHEAD | LTB-R-12-DWG-302 | 2017-12-01 |
| - | DEETHANIZER REFLUX PUMP | LTB-R-12-DWG-303 | 2017-12-01 |
| - | DEPROPANIZER COLUMN | LTB-R-12-DWG-304 | 2017-12-01 |
| - | DEPROPANIZER COLUMN OVERHEAD | LTB-R-12-DWG-305 | 2017-12-01 |
| - | DEPROPANIZER REFLUX PUMP | LTB-R-12-DWG-306 | 2017-12-01 |
| - | BUTANE RECYCLE PUMP | LTB-R-12-DWG-307 | 2017-12-01 |
| - | LPG REINJECTION COOLER | LTB-R-12-DWG-308 | 2017-12-01 |
| - | LPG SEPARATOR | LTB-R-12-DWG-309 | 2017-12-01 |
| - | SUCTION TO V-1301 | LTB-R-13-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | FLASH GAS | LTB-R-14-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | LNG EXPORT | LTB-R-14-DWG-303 | 2017-12-01 |
| - | ETHANE REFRIGERANT DRUM | LTB-R-50-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | PROPANE REFRIGERANT DRUM | LTB-R-50-DWG-302 | 2017-12-01 |
| - | SCRUB COLUMN | LTB-R-21-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | SCRUB COLUMN REFLUX DRUM | LTB-R-21-DWG-302 | 2017-12-01 |
| - | SCRUB COLUMN REFLUX PUMP | LTB-R-21-DWG-303 | 2017-12-01 |
| - | MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER (1/2) | LTB-R-21-DWG-304 | 2017-12-01 |
| - | MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER (2/2) | LTB-R-21-DWG-305 | 2017-12-01 |
| - | SUCTION TO V-2301 | LTB-R-23-DWG-301 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (1ST) SUCTION DRUM | LTB-R-23-DWG-302 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (1ST) | LTB-R-23-DWG-303 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (2ND) SUCTION DRUM | LTB-R-23-DWG-304 | 2017-12-01 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | LK MR COMPRESSOR (2ND) | LTB-R-23-DWG-305 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (3RD) SUCTION DRUM | LTB-R-23-DWG-306 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (3RD) | LTB-R-23-DWG-307 | 2017-12-01 |
| - | MP MR SEPARATOR | LTB-R-23-DWG-308 | 2017-12-01 |
| - | HP MR COMPRESSOR | LTB-R-23-DWG-309 | 2017-12-01 |
| - | HP MR SEPARATOR | LTB-R-23-DWG-310 | 2017-12-01 |
| - | MR BOOSTING PUMP | LTB-R-23-DWG-311 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | LTB-R-23-DWG-312 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSOR | LTB-R-23-DWG-313 | 2017-12-01 |
| - | HP MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | LTB-R-23-DWG-31 4 | 2017-12-01 |
| 1.2.3 | Utility Distribution Diagram | | |
| - | Flare Collection System ( 1 of 2) | LTB-R-50-DWG-352 | 2017-12-01 |
| - | Cooling Water System | LTB-R-50-DWG-353 | 2017-12-01 |
| - | Cooling Water Distribution | LTB-R-50-DWG-354 | 2017-12-01 |
| - | Service Water & Potable Water System | LTB-R-50-DWG-356 | 2017-12-01 |
| - | Nitrogen System | LTB-R-50-DWG-357 | 2017-12-01 |
| - | Air Supply System | LTB-R-50-DWG-358 | 2017-12-01 |
| - | BOG Collection System | LTB-R-50-DWG-359 | 2017-12-01 |
| - | Flare Vent Distribution | LTB-R-50-DWG-360 | 2017-12-01 |
| - | Flare Collection System(2 of 2) | LTB-R-50-DWG-361 | 2017-12-01 |
| - | HP Nitrogen Receiving System | LTB-R-50-DWG-362 | 2017-12-01 |
| 1.3 | Summary Sheets | | |
| - | Equipment List | LTB-R-00-LST-001 | 2017-12-01 |
| - | Relief Load Summary | LTB-R-00-LST-002 | 2017-12-07 |
| - | Utility Summary | LTB-R-00-LST-003 | 2017-12-07 |
| - | Effluent Summary | LTB-R-00-LST-004 | 2017-12-07 |
| - | Depressurizing Summary | LTB-R-00-LST-006 | 2017-12-07 |
| 1.4 | Process Data Sheets | | |
| 1.4.1 | Plate Fin Heat Exchangers | | |
| - | MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER | LTB-R-21-DTA-101 | 2017-12-01 |
| 1.4.2 | Shell & Tube Heat Exchangers | | |
| - | HP MR COMPRESSOR AFTER TRIM COOLER | LTB-R-23-DTA-201 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSOR AFTER TRIM COOLER | LTB-R-23-DTA-202 | 2017-12-01 |
| 1.4.3 | Electric Heater | | |
| - | SCRUB COLUMN REBOILER | LTB-R-21-DTA-201 | 2017-12-01 |
| 1.4.4 | Air Cooler | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | LK MR COMPRESSOR (STAGE 1) AFTER COOLER | LTB-R-23-DTA-101 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (STAGE 2) AFTER COOLER | LTB-R-23-DTA-102 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (STAGE 3) AFTER COOLER | LTB-R-23-DTA-103 | 2017-12-01 |
| - | HP MR COMPRESSOR AFTER COOLER | LTB-R-23-DTA-104 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSOR AFTER COOLER | LTB-R-23-DTA-105 | 2017-12-01 |
| 1.4.5 | **Column** | | |
| - | SCRUB COLUMN | LTB-R-21-DTA-301 | 2017-12-01 |
| 1.4.6 | **Vessel** | | |
| - | SCRUB COLUMN REFLUX DRUM | LTB-R-21-DTA-401 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (STAGE 1) SUCTION DRUM | LTB-R-23-DTA-401 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (STAGE 2) SUCTION DRUM | LTB-R-23-DTA-402 | 2017-12-01 |
| - | LK MR COMPRESSOR (STAGE 3) SUCTION DRUM | LTB-R-23-DTA-403 | 2017-12-01 |
| - | MP MR SEPARATOR | LTB-R-23-DTA-404 | 2017-12-01 |
| - | HP MR SEPARATOR | LTB-R-23-DTA-405 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | LTB-R-23-DTA-406 | 2017-12-01 |
| - | MR FLARE KO DRUM | LTB-R-23-DTA-407 | 2017-12-01 |
| - | HP MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | LTB-R-23-DTA-408 | 2017-12-01 |
| 1.4.7 | **Pump** | | |
| - | SCRUB COLUMN REFLUX PUMP | LTB-R-21-DTA-501 | 2017-12-01 |
| - | MR BOOSTING PUMP | LTB-R-23-DTA-501 | 2017-12-01 |
| 1.4.8 | **Compressor** | | |
| - | LK MR COMPRESSOR | LTB-R-23-DTA-601 | 2017-12-01 |
| - | HP MR COMPRESSOR | LTB-R-23-DTA-602 | 2017-12-01 |
| - | HK MR COMPRESSOR | LTB-R-23-DTA-603 | 2017-12-01 |
| 1.4.9 | **Miscellaneous** | | |
| - | MP MR Mixer | LTB-R-23-DTA-701 | 2017-12-01 |
| - | HP MR Mixer | LTB-R-23-DTA-702 | 2017-12-01 |
| - | LP MR Mixer | LTB-R-23-DTA-703 | 2017-12-01 |
| 1.4.10 | **Instrument** | | |
| - | Control Valve | LTB-R-00-DTA-702 | 2017-12-01 |
| - | Safety & Relief Valve | LTB-R-00-DTA-703 | 2017-12-01 |
| - | Analyser | LTB-R-00-DTA-704 | 2017-12-01 |
| - | Flow Instrument | LTB-R-00-DTA-705 | 2017-12-01 |
| 1.5 | **CAUSE & EFFECT DIAGRAM** | | |
| - | LIQ PLANT EMERGENCY SHUT DOWN(TRAIN-2) | LTB-R-02-DWG-401 | 2017-12-01 |
| - | DEPRESSURIZING OF LIQ PLANT FIRE ZONE(TRAIN-2) | LTB-R-02-DWG-403 | 2017-12-01 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | FEED GAS SUPPLY FLOW LOW (TRAIN-2) | LTB-R-02-DWG-404 | 2017-12-01 |
| - | LIQ PLANT PROCESS SHUT DOWN(TRAIN-2) | LTB-R-02-DWG-406 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 21 - SCRUB COLUMN REBOILER TRIP | LTB-R-21-DWG-401 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 21 - SCRUB COLUMN REFLUX PUMP STOP | LTB-R-21-DWG-402 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 21 - SCRUB COLUMN LEVEL LOSS PROTECTION | LTB-R-21-DWG-403 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - DEETHANIZER REBOILER TRIP | LTB-R-12-DWG-401 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - DEETHANIZER REFLUX PUMP STOP | LTB-R-12-DWG-402 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - DEETHANIZER LEVEL LOSS PROTECTION | LTB-R-12-DWG-403 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - DEPROPANIZER REBOILER TRIP | LTB-R-12-DWG-404 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - DEPROPANIZER REFLUX PUMP STOP | LTB-R-12-DWG-405 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - BUTANE RECYCLE PUMPS STOP | LTB-R-12-DWG-406 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 12 - RECYCLE PUMPS STOP | LTB-R-12-DWG-407 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 23 - MR SYSTEM SHUTDOWN (TRAIN-2) | LTB-R-23-DWG-401 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 23 - LK MR COMPRESSOR (K-2301N) TRIP | LTB-R-23-DWG-402 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 23 - HP MR COMPRESSOR (K-2302N) TRIP | LTB-R-23-DWG-403 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 23 - HK MR COMPRESSOR (K-2303N) TRIP | LTB-R-23-DWG-404 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 23 - V-2306 MR LIQUID ISOLATION | LTB-R-23-DWG-405 | 2017-12-01 |
| | UNIT 23 - MR BOOSTING PUMP STOP | LTB-R-23-DWG-406 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 50 - C2 REFRIGERANT TANK LEVEL LOSS PROTECTION | LTB-R-50-DWG-401 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 50 - C3 REFRIGERANT TANK LEVEL LOSS PROTECTION | LTB-R-50-DWG-402 | 2017-12-01 |
| - | UNIT 50 - C3 VAPORIZER ELECTRIC HEATERSTOP | LTB-R-50-DWG-403 | 2017-12-01 |

공정 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) PFD(Process Flow Diagram) : Process를 구성하는 중요한 기기 및 Control Logic과 배관이 표시되고, 각 주요 Stream Number를 기준으로 Material Balance를 표기하는 작업등을 진행하였다. 개별기기, 계장 System의 구성, 배관의 화공계산 등을 포함한 상세설계의 기준이 되는 것으로 Process Flow Sheet라고도 하며 특히 Plant의 Plot Plan작성의 기초가 되는 작업이다.

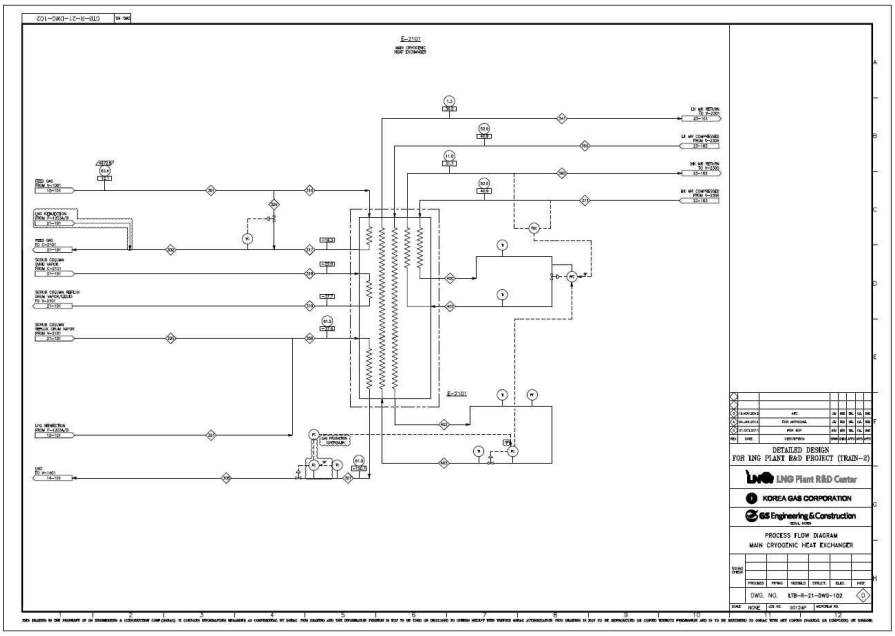


그림 16. Main Cryogenic Heat Exchanger 부분

(나) P&ID(Piping & Instrument Diagram) : Plant의 물리적인 구성요소가 되는 모든 기기, 배관, 배관 부속품, 계기가 표시되며, Plant 전체설계 특히 운전과 안전측면에서 설계가 타당한가를 검토하는데 반드시 필요한 도면이며 또한 기기배치계획의 기초가 되며, 모든 분야의 상세 설계 특히 배관 및 계장설계의 기초가 되는 작업을 진행했다.

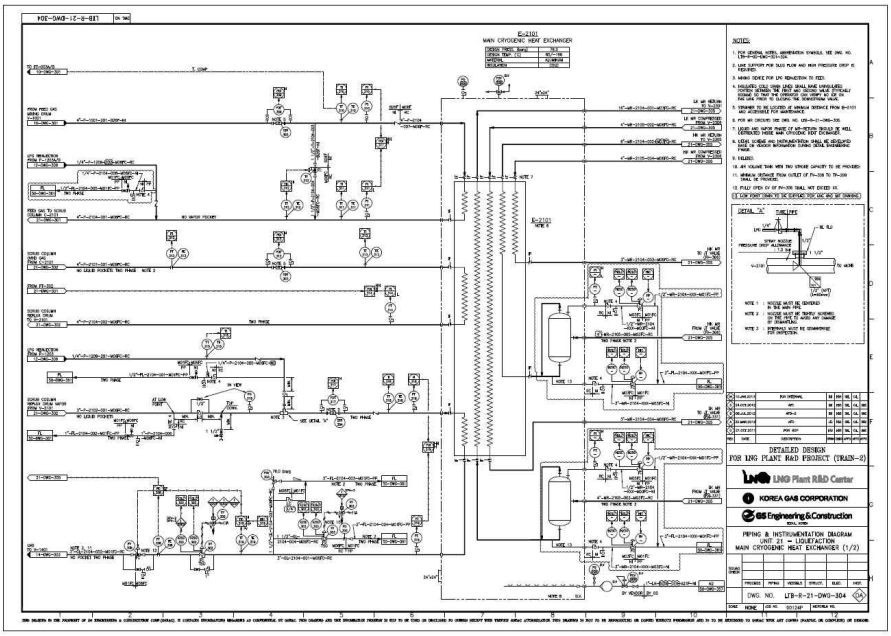


그림 17. Main Cryogenic Heat Exchanger 부분

(다) UDD(Utility Distribution Diagram) : 사용되는 Utility의 분배계통을 한눈에 표현한 도면으로, 주

로 표기되는 utility로는 Nitrogen Gas, Instrument Air, Cooling Water, Service Water & Potable Water 등이 나타내는 작업이 이뤄졌다.

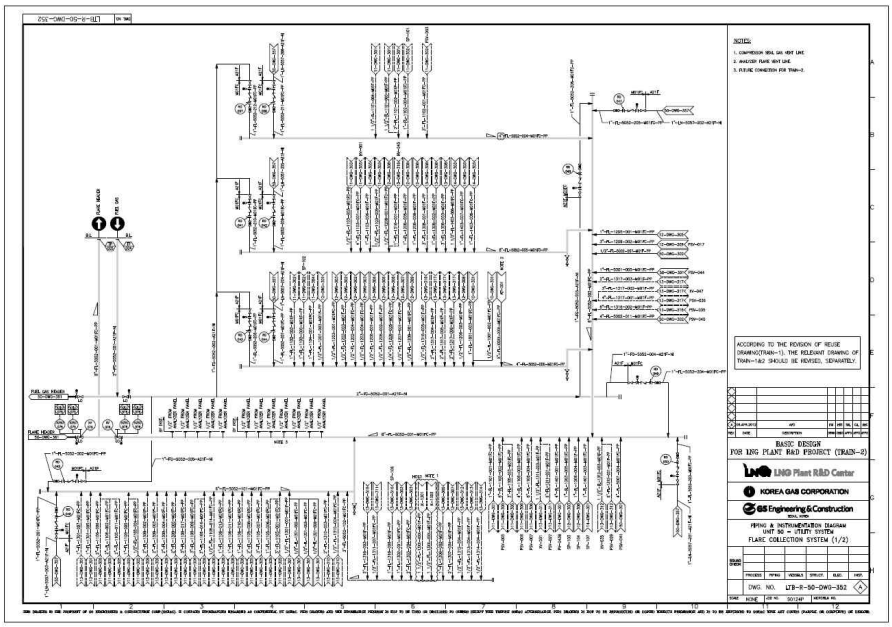



그림 18. Flare Collection System 부분

### (3) Mechanical Engineering

Mechanical Engineering에서는 Plant 성능상 요구되는 Process Requirement를 비롯하여 기계 상세 기술사양을 포함하는 Mechanical Datasheet/Engineering Drawing 및 Requisition을 작성하여 Vendor에 전달 및 Vendor의 견적서를 검토하고, 각 Vendor 견적서 상의 기술 사항을 평가하여 적합한 성능을 발휘 할 수 있는 기계를 구매 할 수 있도록 구매 지원 업무를 진행 하였다. 또한 Vendor가 제출하는 상세 도면을 검토하여 Plant 공사 및 성능에 적합한 기계가 최종 납품 될 수 있도록 Engineering을 수행 하였다. 상기 기계 구매업무 지원을 위해 각종 Equipment Data sheet의 작성, Engineering Drawing의 작성, Requisition 작성 등을 포함하여 작업이 진행되었고, 총 18종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

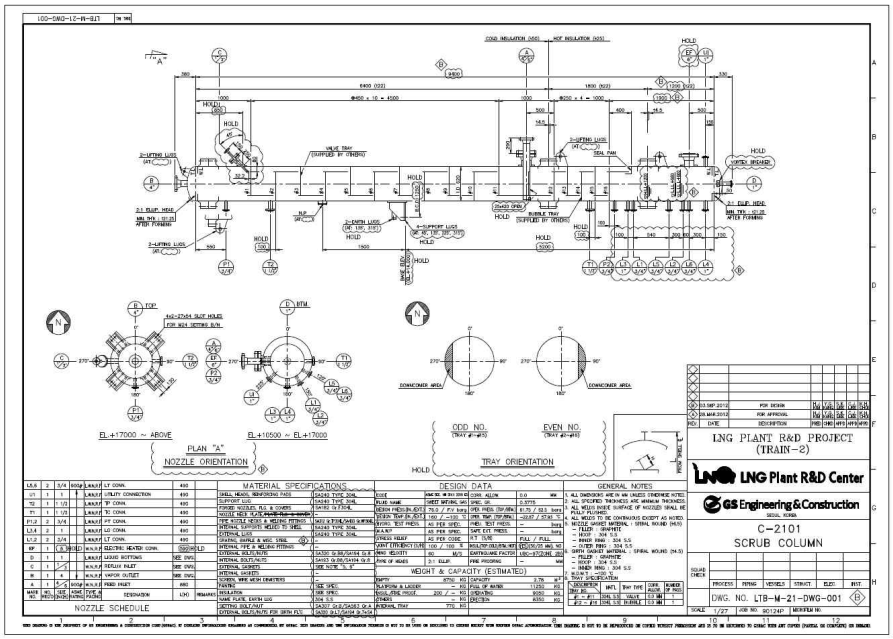



그림 19. Engineering Drawing(Scrub Column)

표 26. Mechanical Deliverable List

| Section | Title | Doc No. | Due Date |
|---|---|---|---|
| 2. Mechanical | | | |
| 2.1 | Mechanical Drawing | | |
| 2.1.1 | Engineering Drawing | | |
| - | SCRUB COLUMN | LTB-M-21-DWG-001 | 2012.05.21 |
| - | SCRUB COLUMN REFLUX DRUM | LTB-M-21-DWG-002 | 2012.05.21 |
| - | LK MR COMPRESSOR(STAGE 1) SUCTION DRUM | LTB-M-23-DWG-003 | 2012.05.21 |
| - | LK MR COMPRESSOR(STAGE 2) SUCTION DRUM | LTB-M-23-DWG-004 | 2012.05.21 |
| - | LK MR COMPRESSOR(STAGE 3) SUCTION DRUM | LTB-M-23-DWG-005 | 2012.05.21 |
| - | MP MR SEPARATOR | LTB-M-23-DWG-006 | 2012.05.21 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | HK MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | LTB-M-23-DWG-007 | 2012.05.21 |
| - | HP MR SEPARATOR | LTB-M-23-DWG-008 | 2012.05.21 |
| - | HP MR COMPRESSOR AFTER TRIM COOLER | LTB-M-23-DWG-009 | 2012.05.21 |
| - | HK MR COMPRESSOR AFTER TRIM COOLER | LTB-M-23-DWG-010 | 2012.05.21 |
| | MR FIARE KO DRUM | LTB-M-23-DWG-011 | 2012.05.21 |
| | HP MR COMPRESSOR SUCTION DRUM | LTB-M-23-DWG-012 | 2012.05.21 |
| 2.1.2 | Material Requisition | | |
| - | PROPORTIONING PUMP | LTB-M-00-RFQ-002 | 2012.04.20 |
| - | VESSEL & HEAT EXCHANGERS | LTB-M-00-RFQ-005 | 2012.03.30 |
| - | ELECTRIC HEATER | LTB-M-00-RFQ-007 | 2012.04.20 |
| - | AIR COOLED HEAT EXCHNAGER | LTB-M-00-RFQ-008 | 2012.03.05 |
| - | COLUMN INTERNAL | LTB-M-00-RFQ-009 | 2012.04.30 |
| - | STATIC MIXER | LTB-M-00-RFQ-010 | 2012.04.30 |

### (4) Piping Engineering

Piping Engineering에서는 기기와 기기를 process에서 규정한 대로 적절한 배관 부품을 이용하여 연결해 나가는 설계과정으로 관련 기기들이 최상의 운전성능이 유지되고 Plant를 효율적으로 Operation하는데 매우 중요한 영향을 미치며 공정, 토건, 전기, 계장 등과 상호유기적인 밀접한 coordination을 이루면서 작업이 진행되었다. 총 40종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 27. Piping Deliverable List

| Section | Title | Doc No. | Due Date |
|---|---|---|---|
| 3. Piping | | | |
| 3.1 | General | | |
| - | Purchasing specification for Pipe | LTB-P-00-DOC-002 | 2012.06.15 |
| - | Purchasing specification for Fittings | LTB-P-00-DOC-003 | 2012.06.15 |
| - | Purchasing specification for Flanges | LTB-P-00-DOC-004 | 2012.06.15 |
| - | Purchasing specification for Gaskets | LTB-P-00-DOC-005 | 2012.06.15 |
| - | Purchasing specification for Bolt&Nut | LTB-P-00-DOC-006 | 2012.06.15 |
| - | Purchasing specification for Valves | LTB-P-00-DOC-007 | 2012.06.15 |
| - | 3D model Review | LTB-P-00-DOC-011 | 2013.05.23 |
| 3.2 | Piping drawings and Specifications | | |
| 3.2.1 | Standards drawings and Specification | | |
| - | Line Schedule | LTB-P-00-LST-001 | 2016.11.29 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | BM Summary Sheet | LTB-P-00-LST-002 | 2017.01.20 |
| 3.2.2 | Drawings | | |
| - | Plot Plan | LTB-P-00-DWG-001 | 2016.11.18 |
| - | General Plot Plan | LTB-P-00-DWG-002 | 2016.11.18 |
| - | Plot Plan Elevation | LTB-P-00-DWG-003 | 2016.11.18 |
| - | Key Plan | LTB-P-00-DWG-010 | 2016.11.18 |
| - | Piping Plan for Collum Area - Ground EL.7000 ~ 10500(1/2) | LTB-P-00-DWG-011 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Collum Area - Ground EL.7000 ~ 10500(2/2) | LTB-P-00-DWG-012 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Collum Area - 2nd Floor EL. 10500 ~ 14000 | LTB-P-00-DWG-013 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Collum Area - 3rd Floor EL. 14000 ~ 17000 | LTB-P-00-DWG-014 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Collum Area - 4th Floor EL. 17000 ~ ABOVE | LTB-P-00-DWG-015 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Mche. Area - Ground EL. 7000 ~ 11000 | LTB-P-00-DWG-016 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Mche. Area - 3rd Floor EL. 11000 ~ 14500 | LTB-P-00-DWG-017 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Mche. Area - 4th Floor EL. 14500 ~ ABOVE | LTB-P-00-DWG-018 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for After Cooler Area - Ground EL. 7000 ~ 11200 (1/2) | LTB-P-00-DWG-019 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for After Cooler Area - Ground EL. 7000 ~ 11200 (2/2) | LTB-P-00-DWG-020 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for After Cooler Area - Ground EL. 7000 ~ 11200 (1/4) | LTB-P-00-DWG-021 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Suction Drum Area - Ground EL. 7000 ~ 9600 (2/2) | LTB-P-00-DWG-023 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Suction Drum Area - PF EL. 9600 ~ 14000 (1/2) | LTB-P-00-DWG-024 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Suction Drum Area - PF EL. 9600 ~ 14000 (2/2) | LTB-P-00-DWG-025 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan forHK MR Compressor Area - Ground EL. 7000 ~ ABOVE | LTB-P-00-DWG-026 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for MR Compressor Area - Ground EL. 7000 ~ ABOVE | LTB-P-00-DWG-027 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for LK MR Compressor Area - Ground EL. 7000 ~ ABOVE | LTB-P-00-DWG-028 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for After Cooler Area - PF EL. 19000 ~ ABOVE | LTB-P-00-DWG-029 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (1/8) | LTB-P-00-DWG-030 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (2/8) | LTB-P-00-DWG-031 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (3/8) | LTB-P-00-DWG-032 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (4/8) | LTB-P-00-DWG-033 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (5/8) | LTB-P-00-DWG-034 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (6/8) | LTB-P-00-DWG-035 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (7/8) | LTB-P-00-DWG-036 | 2013.06.17 |
| - | Piping Plan for Main Pipe Rack Area (8/8) | LTB-P-00-DWG-037 | 2013.06.17 |

배관 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) General Documents : Project에 수행하면서 필요한 배관 기자재 구매를 위한 기본적인 조

건을 구성한 시방서이다. 주요 항목으로는 배관 기자재의 제작 기준이 되는 각 Code and Standard 적용 범위, 이에 따른 검사 및 시험에 대한 기본적인 사항이 명기되어있다.

(나) Standards drawings and Specification : Plant의 배관 설계를 구성하는 설계의 기준이 되는 내용으로 정리가 되어있다. 즉, 배관 기자재를 구성하는 각 항목의 사양 및 구성 등에 대해서 자세히 설명이 되어있다. 특히 운전 및 안전 측면에서 배관의 설계의 구성 및 위치가 적합한지에 대해서 분석을 수행하며, 해당 결과에 따라서, 배관의 설계를 합리적으로 구성을 한다. 마지막으로 각각의 배관의 설계 정보가 들어있는 list도 지속 수정과 보완 작업이 동시에 진행이 되었다.

(다) Piping Drawings : Plant의 Layout은 각종 기자재와 설비에 대한 배치도, 원료처리설비, 저장설비, 변전소, 각종 유틸리티 공급설비, 폐수처리설비 등의 공장가동에 필요한 모든 시설을 Plot 단위로 표시한 전체 배치도(Unit Plot Plan)를 계획하여 진행된다. 이는 기본설계시 성과물 중 하나이며, Project 초기에 확정되어 설계가 진행되는 과정에서 지속적인 수정과 보완 작업이 진행되었다.

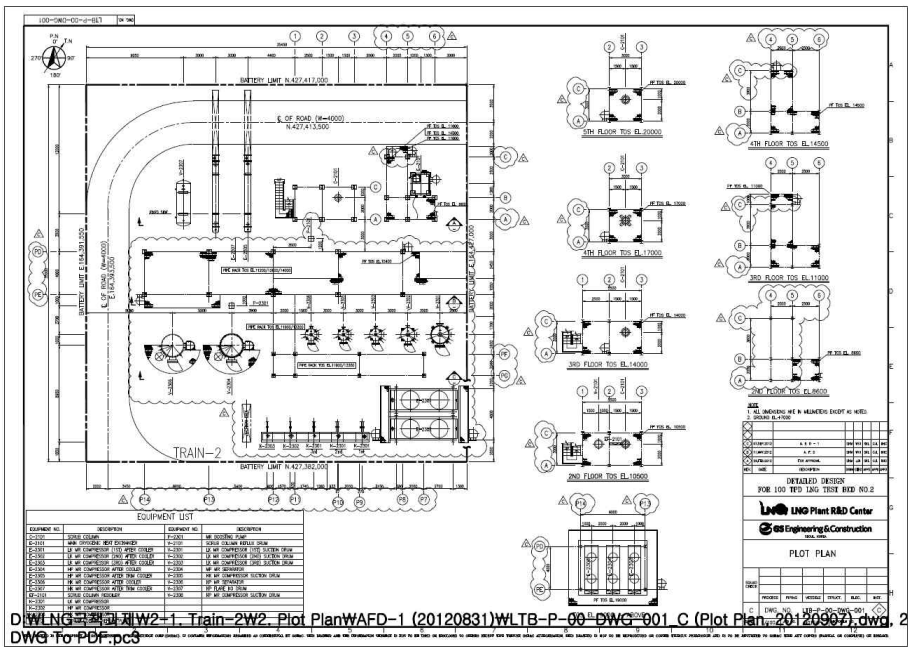



그림 20. Plot Plan

### (5) Instrument Engineering

Instrument Engineering은 운전관리를 하기 위해서 계측장치, 제어장치 및 정보처리장치 등을 말한다. 계장 설계는 타 부문 설계와 연관성이 많아 독립적인 설계는 불가능하며, Plant 건설의 계획단계에서부터 시운전까지 계장설계에 대한 업무가 계속 진행된다. 총 47종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 28. Instrument Deliverable List

| Section | Title | Doc No. | Due Date |
|---|---|---|---|
| 4. Instrument | | | |
| 4.1 | Instrument Drawing | | |
| 4.1.1 | Engineering Drawing | | |
| - | Instrument Schedule | LTB-I-00-DWG-001 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Loop Diagram | LTB-I-00-DWG-011 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Logic Diagram | LTB-I-00-DWG-021 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Process Hook-up Drawing | LTB-I-00-DWG-031 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Connection Drawing | LTB-I-00-DWG-051 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Typical Detail Drawing | LTB-I-00-DWG-061 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Cable Schedule | LTB-I-00-DWG-071 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Cable Drum Schedule | LTB-I-00-DWG-081 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Symbol & Legend | LTB-I-00-DWG-101 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Key Plan | LTB-I-00-DWG-111 | 2017.11.30 |
| - | System Architecture | LTB-I-00-DWG-201 | 2017.11.30 |
| - | Control/Rack Room Layout | LTB-I-00-DWG-301 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Duct Layout 1 of 3 | LTB-I-00-DWG-401 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Duct Layout 2 of 3 | LTB-I-00-DWG-402 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Duct Layout 3 of 3 | LTB-I-00-DWG-403 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Main Cable Layout 1 of 2 | LTB-I-00-DWG-411 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Main Cable Layout 2 of 2 | LTB-I-00-DWG-412 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Location Plan 1 of 3 | LTB-I-00-DWG-501 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Location Plan 2 of 3 | LTB-I-00-DWG-502 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Location Plan 3 of 3 | LTB-I-00-DWG-503 | 2017.11.30 |
| - | Gas Detector Location Plan | LTB-I-00-DWG-521 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Wiring Layout (Analog Signal) 1 of 3 | LTB-I-00-DWG-601 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Wiring Layout (Analog Signal) 2 of 3 | LTB-I-00-DWG-602 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Wiring Layout (Analog Signal) 3 of 3 | LTB-I-00-DWG-603 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Wiring Layout (Discrete/Power & Interlock) 1 of 3 | LTB-I-00-DWG-611 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Wiring Layout (Discrete/Power & Interlock) 2 of 3 | LTB-I-00-DWG-612 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Wiring Layout (Discrete/Power & Interlock) 3 of 3 | LTB-I-00-DWG-613 | 2017.11.30 |
| - | Gas Detector Wiring Layout | LTB-I-00-DWG-621 | 2017.11.30 |
| - | CCTV Wiring Layout | LTB-I-00-DWG-631 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Air Piping Layout 1 of 3 | LTB-I-00-DWG-701 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Air Piping Layout 2 of 3 | LTB-I-00-DWG-702 | 2017.11.30 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Instrument Air Piping Layout 3 of 3 | LTB-I-00-DWG-703 | 2017.11.30 |
| - | Analyzer Tubing Layout | LTB-I-00-DWG-801 | 2017.11.30 |
| 4.1.2 | **Requisition** | | |
| - | DCS | LTB-I-00-RFQ-001 | 2017.11.30 |
| - | SIS | LTB-I-00-RFQ-002 | 2017.11.30 |
| - | Flow Element (Orifice, RO) | LTB-I-00-RFQ-101 | 2017.11.30 |
| | Flowmeter (Rotameter) | LTB-I-00-RFQ-103 | 2017.11.30 |
| - | Level Gauge | LTB-I-00-RFQ-105 | 2017.11.30 |
| - | Pressure & D/P Transmitter (Including Local Indicator) | LTB-I-00-RFQ-106 | 2017.11.30 |
| - | Pressure & Temperature Gauge | LTB-I-00-RFQ-107 | 2017.11.30 |
| - | Temperature Element & Transmitter | LTB-I-00-RFQ-108 | 2017.11.30 |
| - | Control Valve | LTB-I-00-RFQ-201 | 2017.11.30 |
| - | Pressure Safety & Relief Valve | LTB-I-00-RFQ-202 | 2017.11.30 |
| | On-off Valve (Ball type) | LTB-I-00-RFQ-203 | 2017.11.30 |
| - | Gas Detector | LTB-I-00-RFQ-302 | 2017.11.30 |
| - | CCTV | LTB-I-00-RFQ-303 | 2017.11.30 |
| - | Instrument Bulk Materials | LTB-I-00-RFQ-401 | 2017.11.30 |

계장 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) Instrument Loop Diagram : Instrument Schedule과 함께 발신기로부터 수신계기, 조절계로부터 조절변으로 신호의 연결이 어떻게 되어있는가 등 계장 System을 단선도로 표시하여 작성된 Document 작업이 진행되었다.

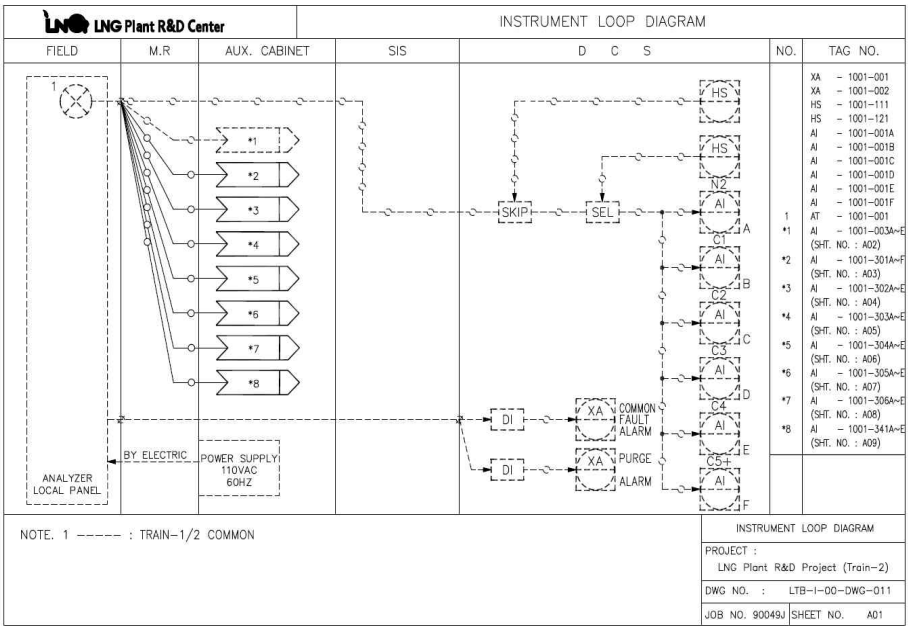



그림 21. Instrument Loop Diagram

### (6) Electrical Engineering

Electrical Engineering에서는 각종 기기에 대한 구매, 제작용 상세사양을 작성하는 것을 말하며 상세시공도면을 작성하는 것을 포함하여 업무가 진행되었다. 장비에 대한 Vendor Print를 기초로 한 동력부하와 전등부하, 건물설비 부하를 집계하여 단선접속도를 확정 후 작업에 반영과 함께 건물 및 Structure 평면도 및 입면도, 지하 구조물에 대한 토건도면 배관평면도, 위험장소 구획도, Sequence Diagram 등을 기초로 조명, 전열, 동력, 접지, 화재감시, 통신설비에 대한 배선도를 반영한 작업이 진행되었다. 총 67종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

표 29. Electrical Deliverable List

| Section | Title | Doc No. | Due Date |
|---|---|---|---|
| 5. Electrical | | | |
| 5.1 | Electrical Drawing | | |
| 5.1.1 | Engineering Drawing | | |
| - | General Notes | LTB-E-00-DWG-001 | 2012.09.30 |
| - | Symbol & Legend(1 of 2) | LTB-E-00-DWG-002 | 2012.09.30 |
| - | Symbol & Legend(2 of 2) | LTB-E-00-DWG-003 | 2012.09.30 |
| - | Symbol & Legend(OUT DOOR) | LTB-E-00-DWG-004 | 2012.09.30 |
| - | Single Line Diagram (HV SWGR., Train-2) | LTB-E-00-DWG-101 | 2012.10.15 |
| - | Single Line Diagram (#7 SS 440V MCC) | LTB-E-00-DWG-102 | 2012.10.15 |
| - | Single Line Diagram (Existing LV MCC-7ALPM) | LTB-E-00-DWG-103 | 2012.10.15 |
| - | Single Line Diagram (Existing LV MCC-7BLPM) | LTB-E-00-DWG-104 | 2012.10.15 |
| - | Single Line Diagram (Train-2 LV MCC-1/2) | LTB-E-00-DWG-105 | 2012.10.15 |
| - | Single Line Diagram (Train-2 LV MCC-2/2) | LTB-E-00-DWG-106 | 2012.10.15 |
| - | Single Line Diagram (Existing BC & 1Φ UPS SYS.) | LTB-E-00-DWG-107 | 2012.10.15 |
| - | Hazardous Area Classification (Overall) | LTB-E-00-DWG-201 | 2012.09.30 |
| - | Hazardous Area Classification (Train-2)-1/2 | LTB-E-00-DWG-202 | 2012.09.30 |
| - | Hazardous Area Classification (Train-2)-2/2 | LTB-E-00-DWG-203 | 2012.09.30 |
| - | Hazardous Area Classification (Section) | LTB-E-00-DWG-204 | 2012.09.30 |
| - | Electrical Equipment Layout (Train-2) | LTB-E-00-DWG-221 | 2012.10.15 |
| - | Main Cable Route Plan (Train-2, KEY) | LTB-E-00-DWG-241 | 2012.11.30 |
| - | Main Cable Route Plan (Train-2, 1of 2) | LTB-E-00-DWG-242 | 2012.11.30 |
| - | Main Cable Route Plan (Train-2, 2of 2) | LTB-E-00-DWG-243 | 2012.11.30 |
| - | Main Cable Route Plan (Control Room) | LTB-E-00-DWG-244 | 2012.11.30 |
| - | Power Plan (Train-2-Key Plan) | LTB-E-00-DWG-301 | 2012.11.30 |
| - | Power Plan (Train-2) | LTB-E-00-DWG-302 | 2012.11.30 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Power Plan (Control Room) | LTB-E-00-DWG-303 | 2012.11.30 |
| - | Grounding Plan (Train-2-Key Plan) | LTB-E-00-DWG-321 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Plan (Train-2 - 1/2) | LTB-E-00-DWG-322 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Plan (Train-2 - 2/2) | LTB-E-00-DWG-323 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Plan (Control Room) | LTB-E-00-DWG-324 | 2012.09.30 |
| - | Lighting Plan (Train-2-Key Plan) | LTB-E-00-DWG-341 | 2012.11.30 |
| - | Lighting Plan (Train-2 - 1/3) | LTB-E-00-DWG-342 | 2012.11.30 |
| - | Lighting Plan (Train-2 - 2/3) | LTB-E-00-DWG-343 | 2012.11.30 |
| - | Lighting Plan (Train-2 - 3/3) | LTB-E-00-DWG-344 | 2012.11.30 |
| - | Lighting Plan (Control Room) | LTB-E-00-DWG-345 | 2012.11.30 |
| - | Fire Alarm Plan (Train-2-Key Plan) | LTB-E-00-DWG-421 | 2012.11.30 |
| - | Fire Alarm Plan (Train-2) | LTB-E-00-DWG-422 | 2012.11.30 |
| - | Fire Alarm Plan (Control Room) | LTB-E-00-DWG-423 | 2012.11.30 |
| - | Electric Heat Tracing Plan (Train-2-Key Plan) | LTB-E-00-DWG-441 | 2013.02.15 |
| - | Electric Heat Tracing Plan (Train-2 - 1/2) | LTB-E-00-DWG-442 | 2013.02.15 |
| - | Electric Heat Tracing Plan (Train-2 - 2/2) | LTB-E-00-DWG-443 | 2013.02.15 |
| - | Power Installation Detail-1/3 | LTB-E-00-DWG-501 | 2012.09.30 |
| - | Power Installation Detail-2/3 | LTB-E-00-DWG-502 | 2012.09.30 |
| - | Power Installation Detail-3/3 | LTB-E-00-DWG-503 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Installation Detail-1/4 | LTB-E-00-DWG-504 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Installation Detail-2/4 | LTB-E-00-DWG-505 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Installation Detail-3/4 | LTB-E-00-DWG-506 | 2012.09.30 |
| - | Grounding Installation Detail-4/4 | LTB-E-00-DWG-507 | 2012.09.30 |
| - | Cable Tray Installation Detail-1/3 | LTB-E-00-DWG-508 | 2012.09.30 |
| - | Cable Tray Installation Detail-2/3 | LTB-E-00-DWG-509 | 2012.09.30 |
| - | Cable Tray Installation Detail-3/3 | LTB-E-00-DWG-510 | 2012.09.30 |
| - | Lighting Installation Detail-1/2 | LTB-E-00-DWG-511 | 2012.09.30 |
| - | Lighting Installation Detail-2/2 | LTB-E-00-DWG-512 | 2012.09.30 |
| - | Lighting Fixture Schedule | LTB-E-00-DWG-513 | 2012.09.30 |
| **5.1.2** | **Electrical Schedule** | | |
| - | Motor & Load Schedule | LTB-E-00-LST-001 | 2012.10.15 |
| - | Cable Schedule | LTB-E-00-LST-002 | 2012.11.30 |
| - | Cable Drum Schedule | LTB-E-00-LST-003 | 2012.12.15 |
| - | Cable Connection Schedule | LTB-E-00-LST-004 | 2013.02.15 |
| - | Control Switch Station Schedule | LTB-E-00-LST-005 | 2012.11.30 |
| - | Lighting Panelboard Schedule | LTB-E-00-LST-007 | 2012.11.30 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Elec. Heat Tracing Panelboard Schedule | LTB-E-00-LST-008 | 2013.02.15 |
| 5.1.3 | Electrical Specification | | |
| - | Electric Design Basis | LTB-E-00-SPC-001 | 2012.09.30 |
| - | Specification for HV Switchgear | LTB-E-00-SPC-002 | 2012.09.30 |
| - | Specification for HV Switchgear | LTB-E-00-SPC-002 | 2012.09.30 |
| - | Specification for LV Switchgear & MCC | LTB-E-00-SPC-003 | 2012.09.30 |
| - | Specification for Electric Motor | LTB-E-00-SPC-004 | 2012.09.30 |
| - | Specification for Electrical Bulk Material | LTB-E-00-SPC-005 | 2012.09.30 |
| - | Specification for VVVF System | LTB-E-00-SPC-006 | 2012.09.30 |
| 5.1.4 | Electrical Requisition | | |
| - | Switchgear & MCC | LTB-E-00-RFQ-001 | 2012.05.30 |
| - | Electrical Ex-Proof Materials | LTB-E-00-RFQ-002 | 2012.11.30 |
| - | Fire Alarm System | LTB-E-00-RFQ-003 | 2012.11.30 |

전기 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

(가) Single Line Diagram : 기기 List, 전동기 List 및 Plant에 소요되는 전기기기의 부하를 발췌하고 개략적인 조명부하를 산정하여 부하계산을 행하고 Plot Plan상의 부하배치, 비상전원공급계획, 변압기, 차단기등 주요기기의 사양을 반영하여 진행했다.

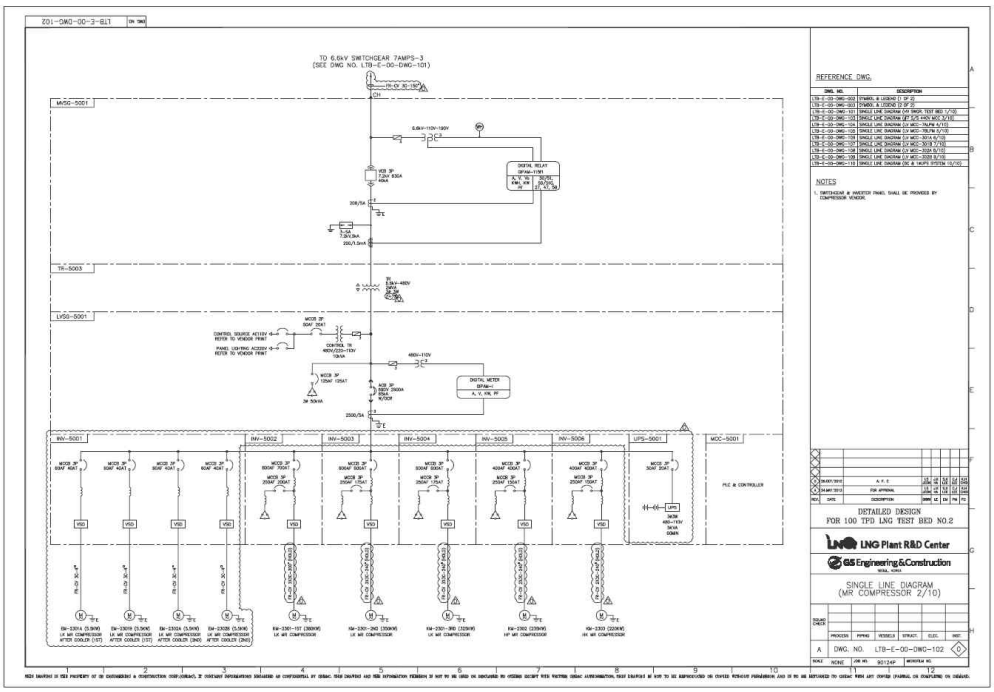



그림 22. Single Line Diagram(MR Compressor)

(나) Hazardous Area Classification : 폭발성 기체 또는 인화성 액체를 취급하는 Plant의 경우 Plot Plan 및 공정으로부터 반영된 process data를 기초로 하여 위험장소를 나타내는 작업

을 말하며, Safety와 직접적인 연관이 있으므로 Detail한 Data를 작업의 기초로 하여 진행하였다.

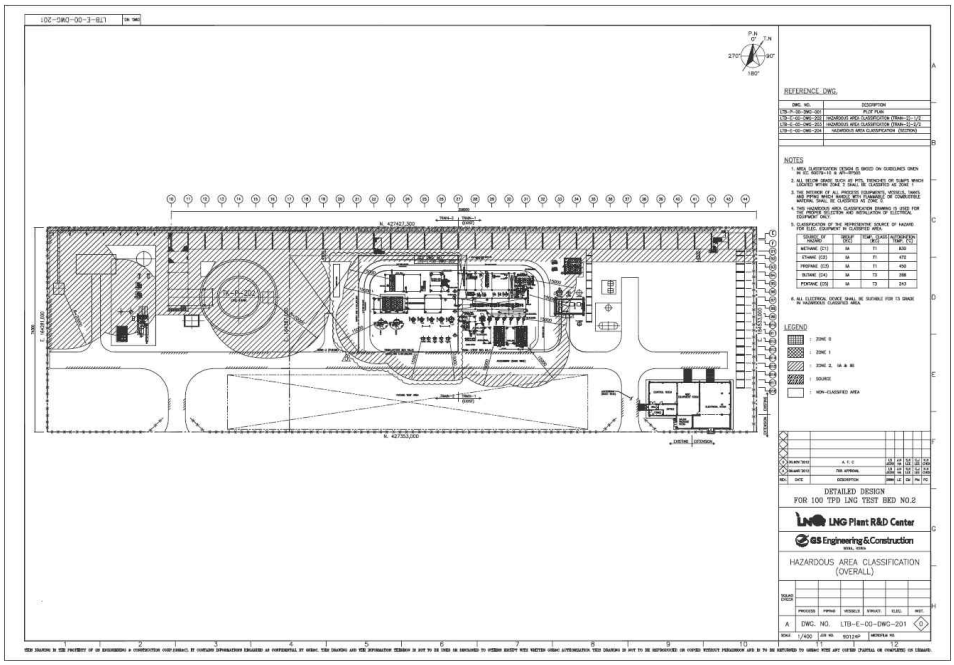



그림 23. Hazardous Area Classification

(다) Main Cable Route Plan : Plot Plan, Pipe Routing Study 도면 및 전기기기 배치상황을 검토한 후 주간선 경로를 설정한 후, 이를 반영하여 작업하였다.

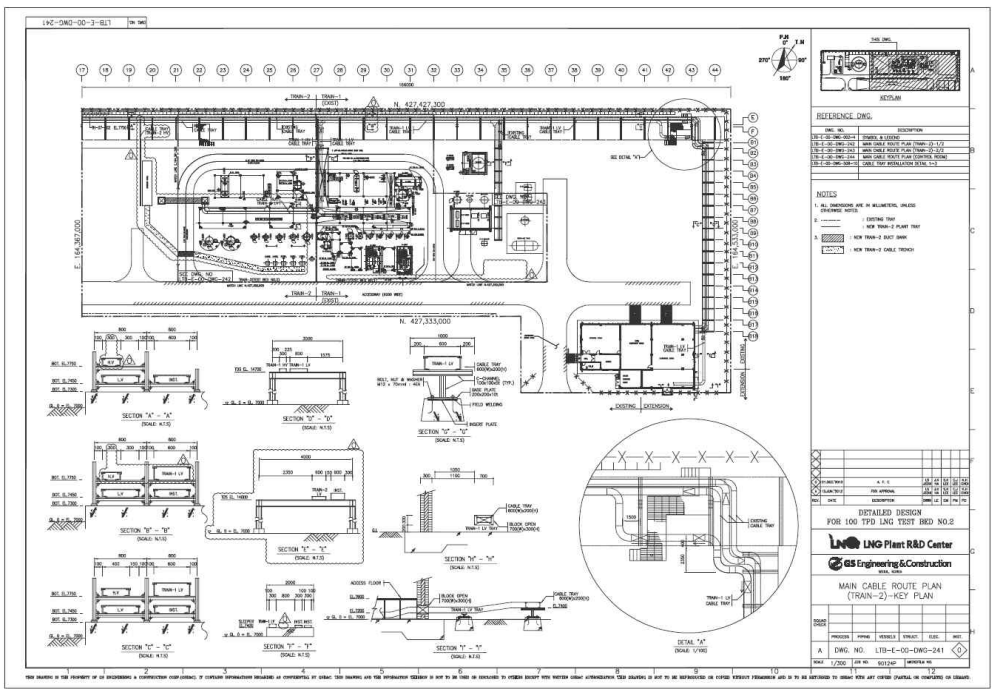



그림 24. Main Cable Route Plan

### (7) CAS Engineering

CAS는 Plant 건설을 위해 필요한 Drawing을 작성하였다. 각 Equipment의 하중과 Piping Line을 고려하여, Equipment를 배치하여 반영하는 작업을 진행하였다. 총 57종의 Documents에 대해 작업이 진행되었다.

토목/철골 상세설계에서 작성한 주요 설계 자료는 다음과 같다.

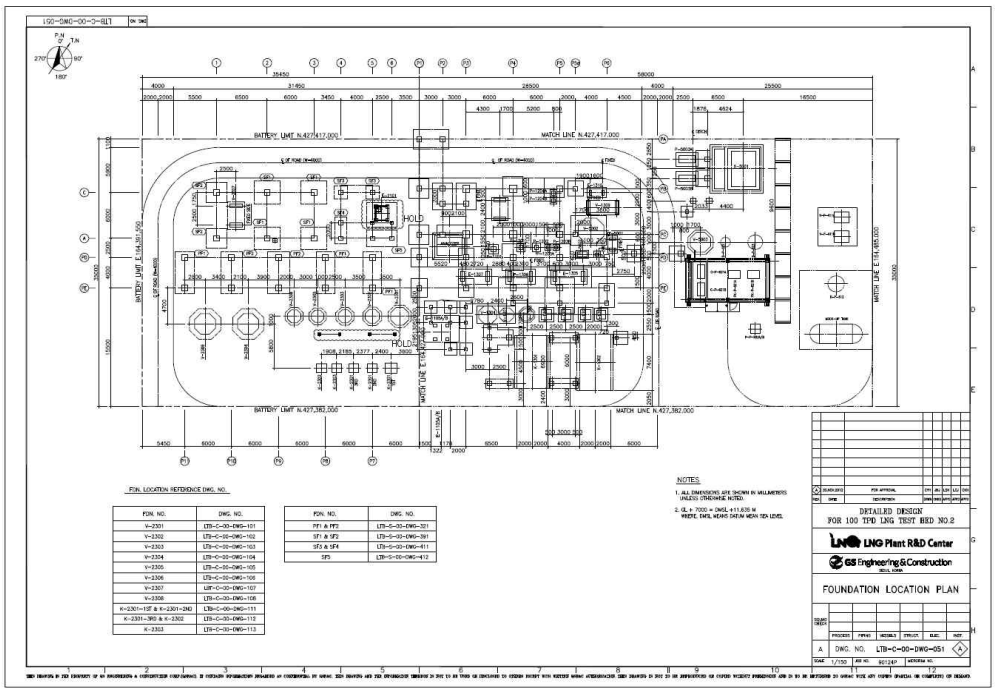



그림 25. Foundation Location Plan

표 30. CAS Deliverable List

| Section | Title | Doc No. | Due Date |
|---|---|---|---|
| 6. CAS | | | |
| 6.1 | Civil Drawing | | |
| 6.1.1 | Foundation Drawings | | |
| - | Pile location plan | LTB-C-00-DWG-051 | 2012.09.30 |
| - | Foundation location plan | LTB-C-00-DWG-052 | 2012.09.30 |
| - | Drainage plan | LTB-C-00-DWG-053 | 2012.11.30 |
| - | Road and paving plan | LTB-C-00-DWG-054 | 2012.11.30 |
| - | Foundation details for V-2301 | LTB-C-00-DWG-101 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for V-2302 | LTB-C-00-DWG-102 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for V-2303 | LTB-C-00-DWG-103 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for V-2304 | LTB-C-00-DWG-104 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for V-2305 | LTB-C-00-DWG-105 | 2012.09.30 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Foundation details for V-2306 | LTB-C-00-DWG-106 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for E-2305 | LTB-C-00-DWG-107 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for E-2307 | LTB-C-00-DWG-108 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for K-2301 | LTB-C-00-DWG-111 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for K-2302 | LTB-C-00-DWG-112 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for K-2303 | LTB-C-00-DWG-113 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for P-2101 | LTB-C-00-DWG-121 | 2012.09.30 |
| - | Foundation details for P-2301 | LTB-C-00-DWG-122 | 2012.09.30 |
| - | Drainage details (1/2) | LTB-C-00-DWG-201 | 2012.11.30 |
| - | Drainage details (2/2) | LTB-C-00-DWG-202 | 2012.11.30 |
| - | Electric duct bank details (1/2) | LTB-C-00-DWG-211 | 2012.11.30 |
| - | Electric duct bank details (2/2) | LTB-C-00-DWG-212 | 2012.11.30 |
| - | Instrument duct bank details & Manholie details (1/2) | LTB-C-00-DWG-221 | 2012.11.30 |
| - | Electric duct bank details (2/2) | LTB-C-00-DWG-212 | 2012.11.30 |
| - | Instrument duct bank details & Manholie details (1/2) | LTB-C-00-DWG-221 | 2012.11.30 |
| - | Instrument duct bank details & Manholie details (2/2) | LTB-C-00-DWG-222 | 2012.11.30 |
| - | Fire fighting details (1/2) | LTB-C-00-DWG-231 | 2012.11.30 |
| - | Fire fighting details (2/2) | LTB-C-00-DWG-232 | 2012.11.30 |
| - | Utility tie in details (1/2) | LTB-C-00-DWG-241 | 2012.11.30 |
| - | Utility tie in details (2/2) | LTB-C-00-DWG-242 | 2012.11.30 |
| 6.1.2 | Steel Drawings | | |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-1 | LTB-S-00-DWG-301 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-2 | LTB-S-00-DWG-302 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-3 | LTB-S-00-DWG-303 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-4 | LTB-S-00-DWG-304 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-5 | LTB-S-00-DWG-305 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-6 | LTB-S-00-DWG-306 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-7 | LTB-S-00-DWG-307 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack framing plan & elevation-8 | LTB-S-00-DWG-308 | 2012.09.30 |
| - | Setting details for Air Cooler | LTB-S-00-DWG-309 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack foundation details-1 | LTB-S-00-DWG-321 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack foundation details-2 | LTB-S-00-DWG-322 | 2012.09.30 |
| - | Pipe rack foundation details-3 | LTB-S-00-DWG-323 | 2012.09.30 |
| - | Local pipe support (1/3) | LTB-S-00-DWG-331 | 2012.09.30 |
| - | Local pipe support (2/3) | LTB-S-00-DWG-332 | 2012.09.30 |
| - | Local pipe support (3/3) | LTB-S-00-DWG-333 | 2012.09.30 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-1 | LTB-S-00-DWG-351 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-2 | LTB-S-00-DWG-352 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-3 | LTB-S-00-DWG-353 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-4 | LTB-S-00-DWG-354 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-5 | LTB-S-00-DWG-355 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-6 | LTB-S-00-DWG-356 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-7 | LTB-S-00-DWG-357 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure framing plan & elevation-8 | LTB-S-00-DWG-358 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure foundation details-1 | LTB-S-00-DWG-391 | 2012.09.30 |
| - | Equipment Structure foundation details-2 | LTB-S-00-DWG-392 | 2012.09.30 |
| - | Working platform for E-2101 framing plan & elevation-1 | LTB-S-00-DWG-401 | 2012.09.30 |
| - | Working platform for E-2101 framing plan & elevation-2 | LTB-S-00-DWG-402 | 2012.09.30 |
| - | Working platform for E-2101 foundation details-1 | LTB-S-00-DWG-411 | 2012.09.30 |
| - | Working platform for E-2101 foundation details-2 | LTB-S-00-DWG-412 | 2012.09.30 |

### (8) 3D Modeling

테스트베드 Train-2의 공정, 배관, 전기, 계장 등의 Access way를 검토하고 운영/유지보수 및 안전규정을 검토하기 위하여 총 3회에 걸쳐 3D Modeling Review 실시

**표 31. 테스트베드 Train-2 3D Modeling Review Results**

| 단계 | 주요 결과 |
|---|---|
| 30% | ■ 2010.9.27. 완료<br>■ 총 22건의 수정사항 도출 |
| 60% | ■ 2013.1.14. 완료<br>■ 총 6건의 수정사항 도출 |
| 90% | ■ 2013.5.23. 완료<br>■ 총 3건의 수정사항 도출<br>■ 설계 반영 |

### (9) HAZOP Study

테스트베드(Train-2) HAZOP은 LNG Plant의 공정에 관련된 자료를 토대로 정해진 Study방법에 의해서 설계된 운전 목적으로부터 이탈(Deviation)하는 원인과 그 결과를 찾아보며 그로 인한 위험(Hazard)과 조업도(Operability)에 야기되는 문제에 대한 가능성이 무엇이 있는가를 Investigation하고 Study하여 설계 단계부터 안전하고 경제적인 LNG Plant를 건설함으로서 미래의 위험이나 개선 사항을 미리 발견하여 예방하고자 2012.8.6～2012.8.7까지 진행하였고,

이를 바탕으로 연구보고서를 작성하였다.

아래 P&ID에 표시된 것과 같은 방식으로 22개의 Node에 대해 평가하여 각각의 Node에 대해 개선 사항을 도출하였다.

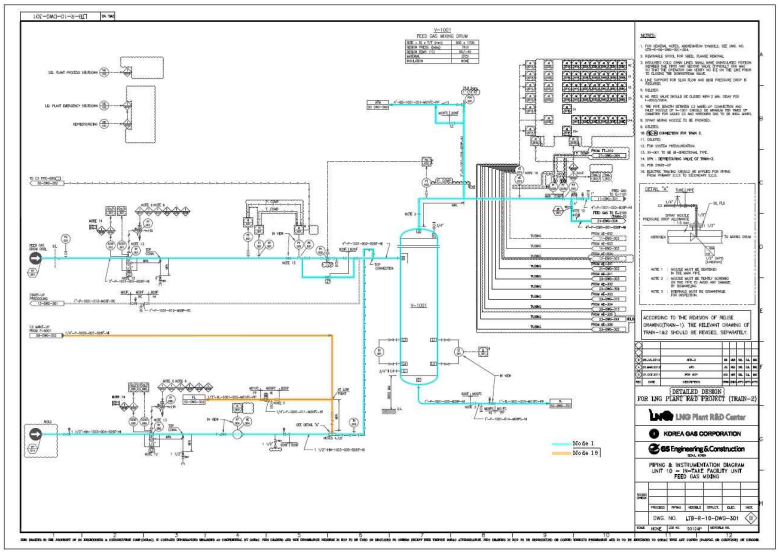


그림 26. HAZOP 결과(Node)

총 22개의 Node를 검토한 결과 아래와 같이 “Risk Rank3“ 8건과 “Risk Rank4“ 250건의 개설 권고 사항을 설계에 반영하였다.

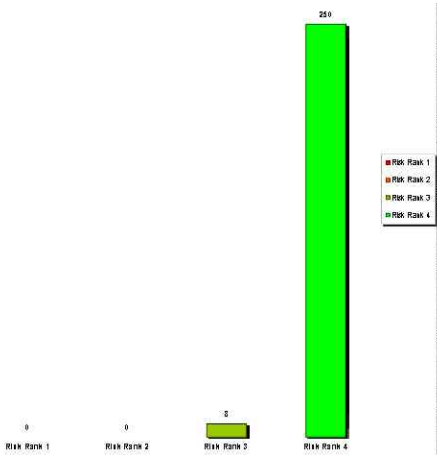



그림 27. HAZOP Results Summary

### (10) Material Selection Review

설계된 재질에 대한 위험성평가(Risk Assessment)를 제반 인자 등을 고려하여 해당 설비에의 적합성 점검 및 추후 최종설계 관리 계획에 활용하기위해 MSR을 수행하였다. 각 설비가 설계된 재질의 위험인자 등을 과학적이고 체계적으로 분석하여 그에 적절한 재질인가에 대한 적합성 평가를 통해 효율적으로 최종설계에 반영하기 위함이다.

위험을 가능성과 중대성의 조합으로 나타내어 평가하였다. 가능성 정도를 낮은 순서로부터 5, 4, 3, 2, 1, 중대성 또한 낮은 순서로부터 E, D, C, B, A로 분류하여 도표로 나타내면 아래표와 같은 결과가 나타난다. 이것을 위험지수(Risk Matrix)라고 한다.

MSR은 관련설비에서 발생할 수 있는 각 손상기구를 파악하고 설비의 설계조건, 운전조건 등의 제반인자를 고려하여 파손가능성을 등급별로 분류하며, 또한 각 해당 설비에 파손이 발생하였을 때 발생할 수 있는 경제, 환경 및 안전 등, 결과의 중대성을 토대로 각 설비의 위험도를 산정하고, 최종적으로는 설비의 위험성 정도를 검사에 반영한다.

총 12개의 Equipment(22 Components)에 대해 수행하여 2개의 Components는 “Medium high “ 18개의 Components는 ” Medium” 3개의 Components에 대해서는 “Low”의 Critical rating의 결과를 얻었음. 각 Components의 Criticality Rating 결과는 아래 표와 같다.

표 32. Equipment Criticality Rating

| Equipment Type | Equipment ID | Component Type | Equipment Description | Criticality Rating |
|---|---|---|---|---|
| Heat Exchanger | E-2101 | Plate Fin | Main Cryogenic Heat Exchanger | M |
| Heat Exchanger | E-2305 | Tube | HP MR Compressor After Trim Cooler | M |
| Heat Exchanger | E-2307 | Tube | HK MR Compressor After Trim Cooler | M |
| Electric Heater | EF-1101 | Bundle | Scrub Column Reboiler | M |
| Air Cooler | E-2301 | Tube | LK MR Compressor(stage 1) After Cooler | MH |
| Air Cooler | E-2302 | Tube | LK MR Compressor(stage 2) After Cooler | M |
| Air Cooler | E-2303 | Tube | LK MR Compressor(stage 3) After Cooler | M |
| Air Cooler | E-2304 | Tube | HP MR Compressor After Cooler | MH |
| Air Cooler | E-2306 | Tube | HK MR Compressor After Cooler | M |
| Column | C-2101 | Vertical | Scrub Column | M |
| Vessel | V-2101 | Vertical | Scrub Column Reflux Drum | M |
| Vessel | V-2301 | Vertical | LK MR Compressor(stage 1) Suction Drum | M |
| Vessel | V-2302 | Vertical | LK MR Compressor(stage 2) Suction Drum | M |
| Vessel | V-2303 | Vertical | LK MR Compressor(stage 3) Suction Drum | M |
| Vessel | V-2304 | Vertical | MP MR sepatator | M |
| Vessel | V-2306 | Vertical | HP MR sepatator | M |
| Vessel | V-2305 | Vertical | HK MR Compressor Suction Drum | M |
| Pump | E-1307 | Pump | Scrub Column Reflux Pump | M |
| Pump | P-2301 | Pumpl | MR Boosting Pump | M |
| Compressor | K-2301 | Bundle | LK MR Compressor | L |
| Compressor | K-2302 | Bundle | HP MR Compressor | M |
| Compressor | K-2303 | Bundle | HK MR Compressor | L |

모든 equipment items에 대해서 consequence ranking은 “A” (catastrophic)에서 “E” (minor)로 나타났으며 평균 “B”로 평가되었다.

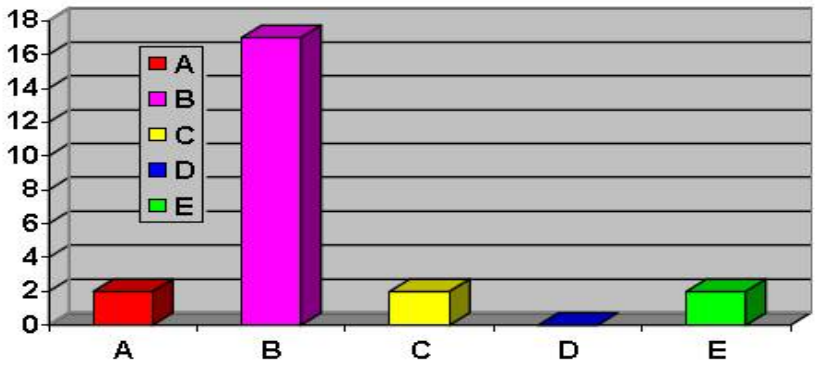



그림 28. Consequence Rating

각 Item의 Probability of Failure Ranking은 "4" (Low)에서 "5" (very low)로 평가되었다.

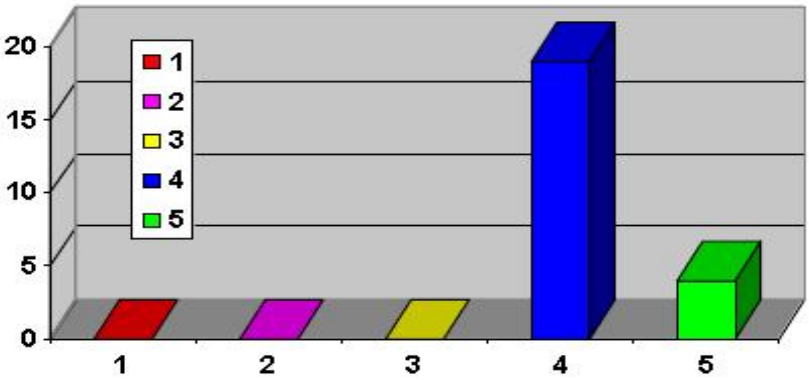



그림 29. Probability of Failure Ranking

Corrosion Rate 평가의 결과는 아래와 같다.

가스플랜트사업단

GS Engineering & Construction

## EQUIPMENT LIST

PROJECT NO. : 1174
PROJECT NAME : LNG Plant R&D Project(Train-2)
CLIENT : LNG Plant R&D Center
SITE : Incheon, Korea

HEAT EXCHANGER

DOC. NO.: GTB-R-00-LST-001
#REF!
#REF!
PAGE : 3

| Rev | Item No. | | Service | Type | Dimension (mm) | | Design Condition | | | | Fluid | | Materials | | P & ID DWG. NO. | Expected Corrosion Rate (mm/yr) | | Remarks |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | ID (mm) | T-T(1) (mm) | P (barg) Shell | P (barg) Tube | T (℃) Shell | T (℃) Tube | Shell | Tube | Shell | Tube | | Shell | Tube | |
| ● | E | 2101 | MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER | PLATE FIN | * | * | 76 | 76 | +65/-175 | +65/-175 | MR | LNG/MR | Al | Al | 11-DWG-305 | 0.013 | 0.013 | There is a medium potential for external corrosion of the shell under wet insulation where the metal temperature is above -15℃ |
| ● | E | 2305 | HP MR COMPRESSOR AFTER TRIM COOLER | S/T | 387 / 670 | 2440 | 13.0 | 76.0 | +65/-45 | +65/-45 | C3 Refrigerant | LNG FEED | LTCS | LTCS | 11-DWG-301 | 0.025 | 0.025 | There is a medium potential for external corrosion of the shell under wet insulation where the metal temperature is above -15℃ |
| ● | E | 2307 | Hk MR COMPRESSOR AFTER TRIM COOLER | S/T | 450 / 750 | 3050 | 13.0 | 76.0 | +65/-45 | +65/-95 | C3 Refrigerant | C-1101 OVHD | LTSC | SS304L | 11-DWG-303 | 0.025 | 0.013 | There is a medium potential for external corrosion of the shell under wet insulation where the metal temperature is above -15℃ |

NOTE: 1. Tube Length
2. 1 inch (Sch. 40) / 1-1/2 inch (Sch. 40)
3. 10 inch (Sch. 40)

1 mil per year = 0.025 mm per yea

## 자. 상용급 LNG플랜트 FEED Package

### (1) 개요

3핵심에서 개발된 LNG플랜트 설계 기술과 2핵심에서 개발된 핵심기술을 바탕으로 상용급 LNG플랜트 기본설계 패키지를 제작하였다. 이를 위하여 상용급 LNG플랜트 분석, Design Basis 작성, 기본설계를 수행하기 위한 제반 업무를 진행하였고, 상용급 LNG플랜트에 대한 기본설계를 작성하였으며, 여기에 보완하여 엔지니어링 Specification, Philosophy 등을 추가하여 최종적으로 상용급 LNG플랜트 FEED Package를 완성하였다.

### (2) 대상부지 검토

프로젝트 대상부지는 초기에 캐나다, 파푸아 뉴기니, 호주, 동티모르, 모잠비크로 선정하였다. 5곳 모두 천연가스전이 발견되어 향후 개발 예정지이다. 검토 조건은 과제의 목표에 맞게 5MTPA가 가능하며, 향후 육상 LNG플랜트로의 개발이 유력시 되는 곳으로 하였다.

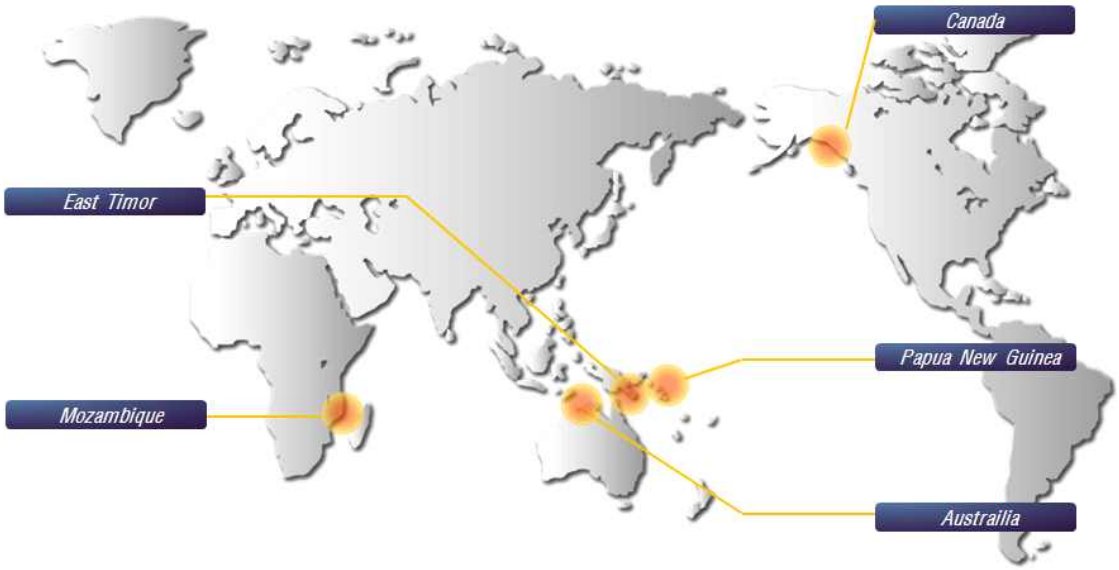



그림 30. 프로젝트 대상 부지

### (3) 대상부지 선정

본 프로젝트의 적용 site는 모잠비크 4광구로 결정하였다. 최근까지 지속적으로 천연가스가 발견되고 있으며, 현재까지 60 TCF가 개발된 상태이다. 이 개발을 위해 참여한 업체는 ENI, GALP, Enh, 가스공사 4개사가 있으며, 가스공사는 전체의 10% 지분을 보유하고 있다. 모잠비크는 총 6개의 광구로 구성되어 있으며, 상업적으로 개발이 가능한 곳은 1, 4광구이며, 1광구는 anadarko가 4광구는 ENI가 주도적으로 개발을 진행하고 있다.

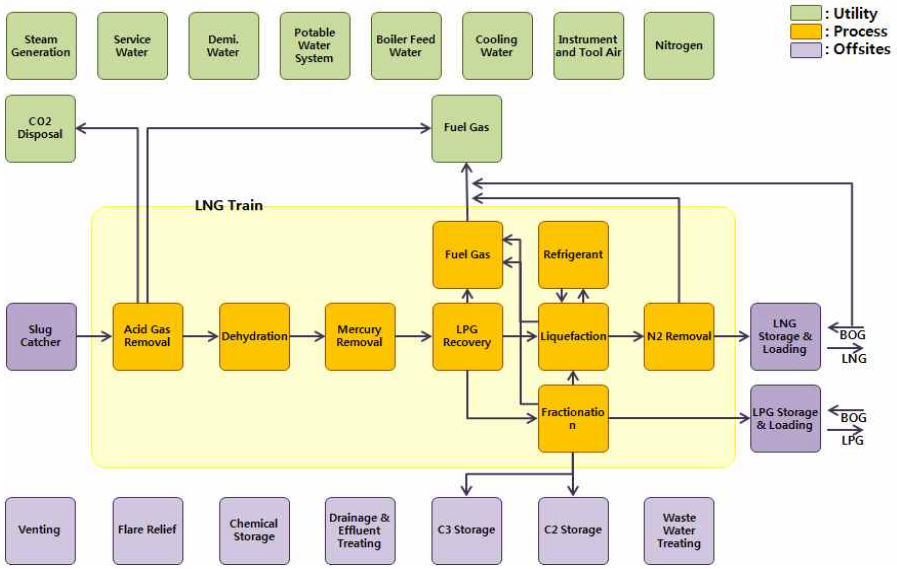
4광구는 전세계에서 가장 많은 천연가스가 발견되고 있으며, 향후 육상 LNG플랜트로의 개발이 유력시 되고 있다.

### (4) 상용급 LNG플랜트 기본설계

#### (가) BFD(Block Flow Diagram)

설계 부지 데이터를 기반으로 한 BFD는 개괄적인 공정을 나타내는 것으로서, 해상 가스전에서 파이프로 이송해온 천연가스를 전처리 및 액화하여 저장탱크에 저장까지를 나타낸다.

전처리는 AGRU(Acid Gas Removal Unit), Dehydration, Mercury Removal을 포함하며, 천연가스에 포함된 이물질을 제거한다. 모잠비크 가스에는 Sulfur가 포함되어 있지 않아, SRU(Sulfur Recovery Unit)은 설치하지 않는다. AGRU, Dehydration 및 Mercury Removal은 기존의 방식을 적용할 예정이다. Fractionation은 C1, C2, C3, C4, C5+로 구성된 전처리 천연가스를 각 조성별로 분리하는 역할을 한다. 이부분은 최종 LNG Spec.에 맞춰 분리하도록 설계하였다. 천연가스를 액화시키는 액화공정은 2핵심 1세부에서 개발된 KSMR 공정을 반영하였다.




#### (나) Intake Facility

##### ① 목적

㉮ The multi-phase flow is collected in separators with a slug handling capacity

㉯ Multi-phase flow is including NG, condensate and rich MEG(water+MEG). MEG is injected upstream to prevent Hydrate Formation

㉰ The liquids that are collected in the separators are routed to the condensate stabilization facility and MEG regeneration

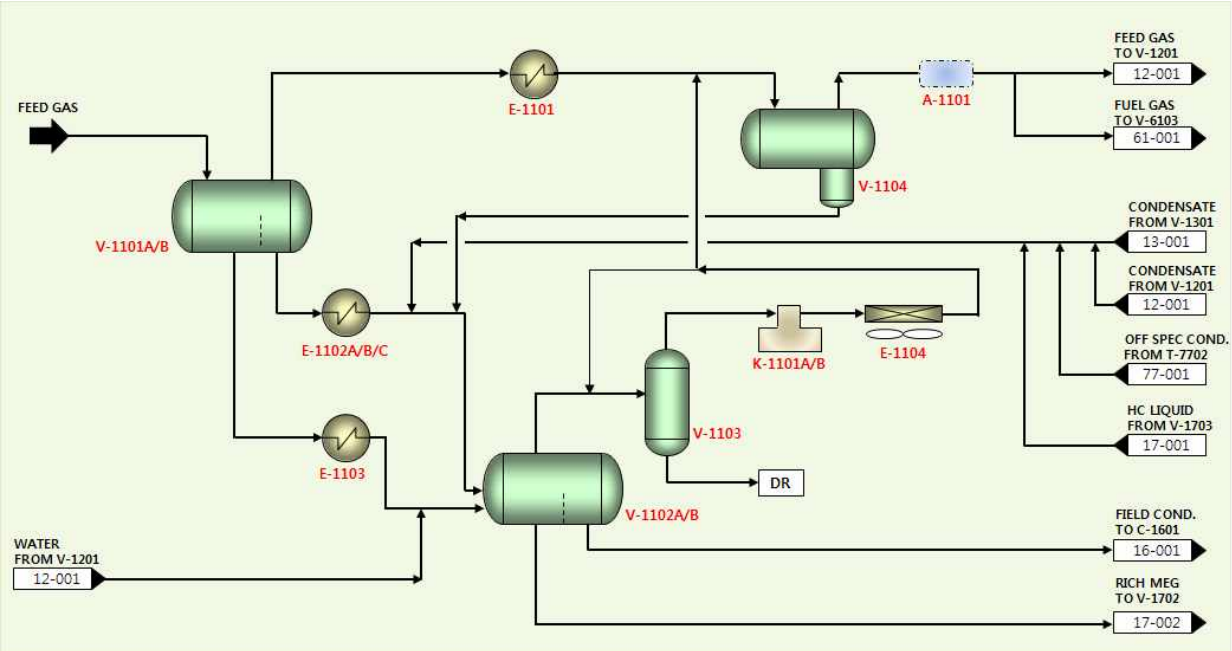
㉱ The gas flow is routed to the feed gas treatment facilities

##### ② Design Figure

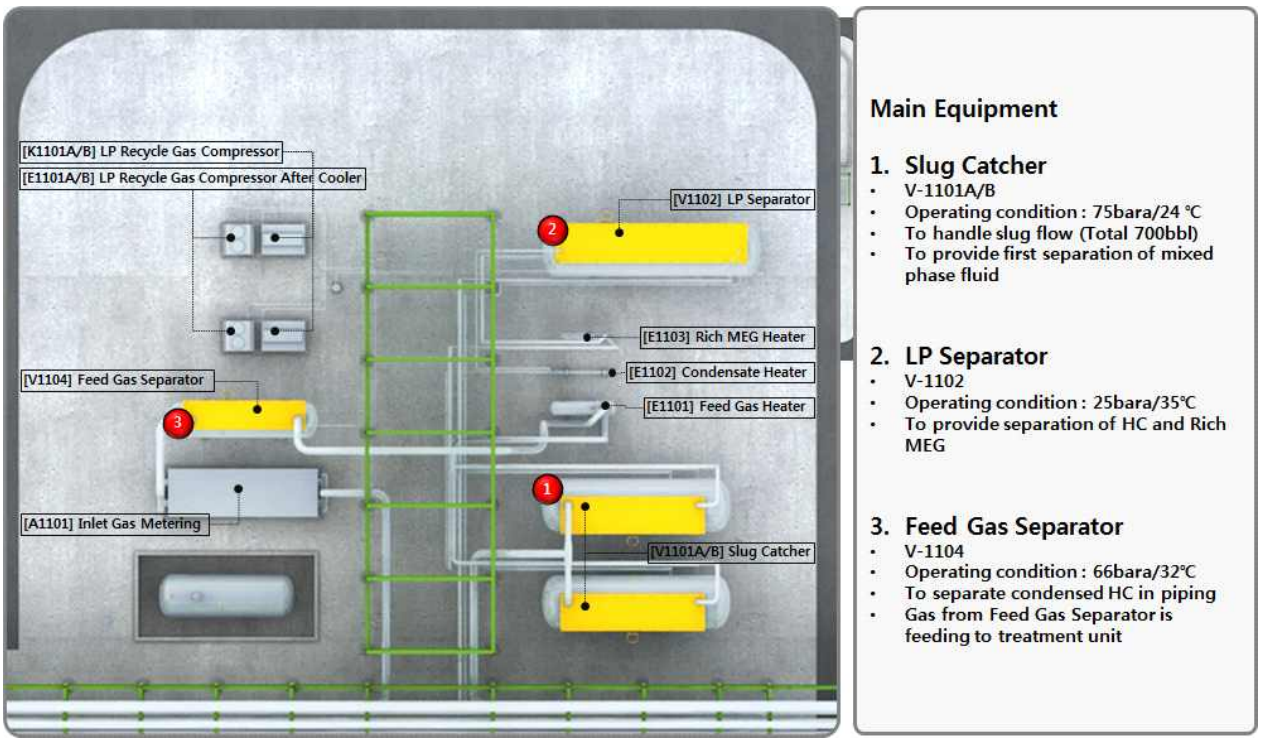
㉮ Two slug catcher will be designed to have a surge volume of 350bbl(each) to handle the slug flow generated during start up, pigging and normal operating.

㉰ The slug volume depends on the specific system such as configuration of flow line and distance of the gas well, hence this slug volume should be determined after specific site selection and upstream flow assurance are completed.

### ③ Simplified PFD




### ④ 단면도



### (나) Acid Gas Removal

#### ① 목적

㉮ Natural gas and well streams contains impurities that need to be removed before liquefaction(e.g. due to toxicity, freezing).

㉯ $CO_2$ : Corrosive component need to be removed to avoid freezing in the cryogenic equipment

㉰ Purpose of the AGR unit is to remove $CO_2$ from Feed Gas to avoid solid carbon dioxide ice formation(freezing) in the MCHE(risk of plugging of MCHE tubes)

#### ② Design Figure

㉮ 0.06mol% of $CO_2$ is expected in Feed Gas.

㉯ AGR Unit designed to handle $CO_2$ composition in Feed Gas up to 1.5mol% for generic design concept.

㉰ $CO_2$ concentration at outlet stream from AGR unit to be 50ppmv. (the freezing limitation of $CO_2$ in LNG @ -161℃ is however around 200ppmv.)

㉱ A-MDEA Process

#### ③ Amine Solvent for Acid Gas Removal

㉮ Due to high regeneration demand, degradation product and corrosivity, MEA and DGA is not recommended as solvent for LNG pre-treatment

㉯ Pure tertiary amine(as MDEA) is not suitable due to slow reaction(kinetics) with $CO_2$ and difficult/impossible to reach 50ppm

㉰ Activated MDEA solutions is very suitable for acid gas removal for LNG pre-treatment

| Solvent capability for gas treatment | MEA | DGA | DEA | MDEA | activated MDEA | Physical solvent | Mixed solvent |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ***Meet LNG specification for acid gas*** | | | | | | | |
| - CO2 | Yes | Yes | No | No | Yes | No (1) | Yes |
| - H2S | Yes | Yes | Yes | Yes | Yes | No (1) | Yes |
| ***RSH and COS removal capacity*** | Partial | Partial | Partial | Slight | Partial (2) | Good | Good |
| **Operational issues** | | | | | | | |
| - Solution subjected to degradation | Yes | Yes | Some | No | No | No | No (3) |
| - Hydrocarbon loss (co-absorbed) | Low | Low | Low | Low | Low | High | Medium |
| - Heat for regeneration | High | High | Medium | Medium | Medium | Low | Medium |
| - Corrosivity | High | Medium | Medium | Low | Low | Low | Low (3) |

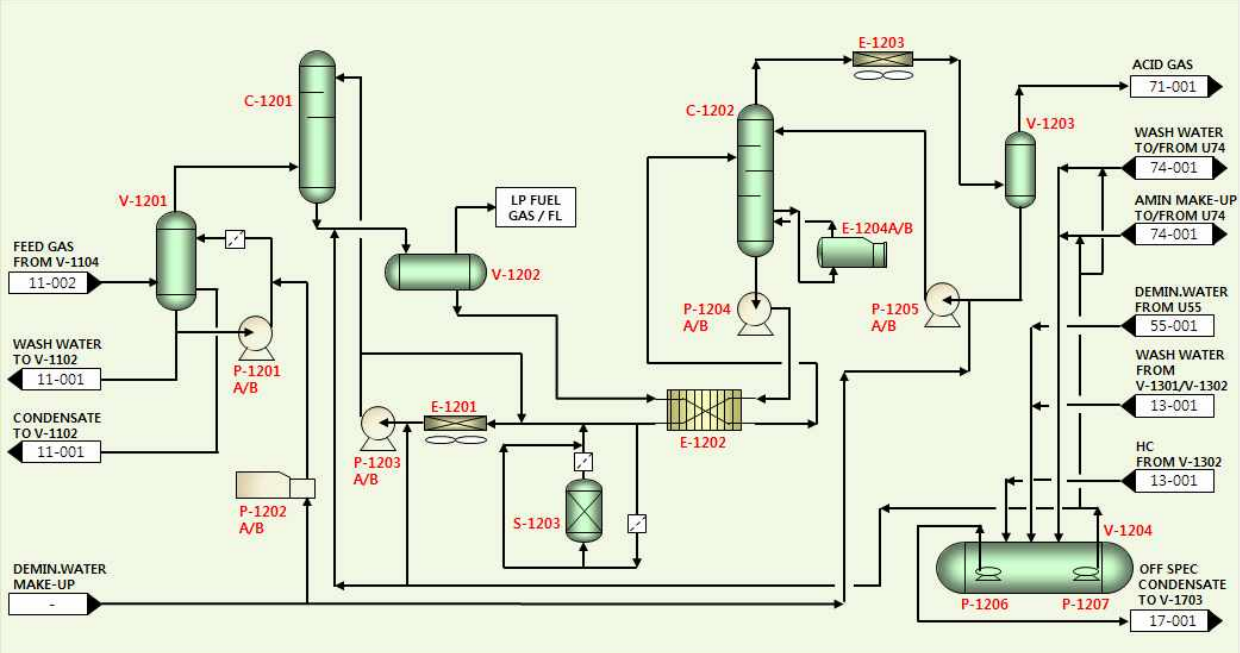
Notes;

1. SELEXOL can in theory reduce H2S levels to below 4 ppmv and CO2 levels to below 50 ppmv. However, no reference exist and process guarantee may be difficult.

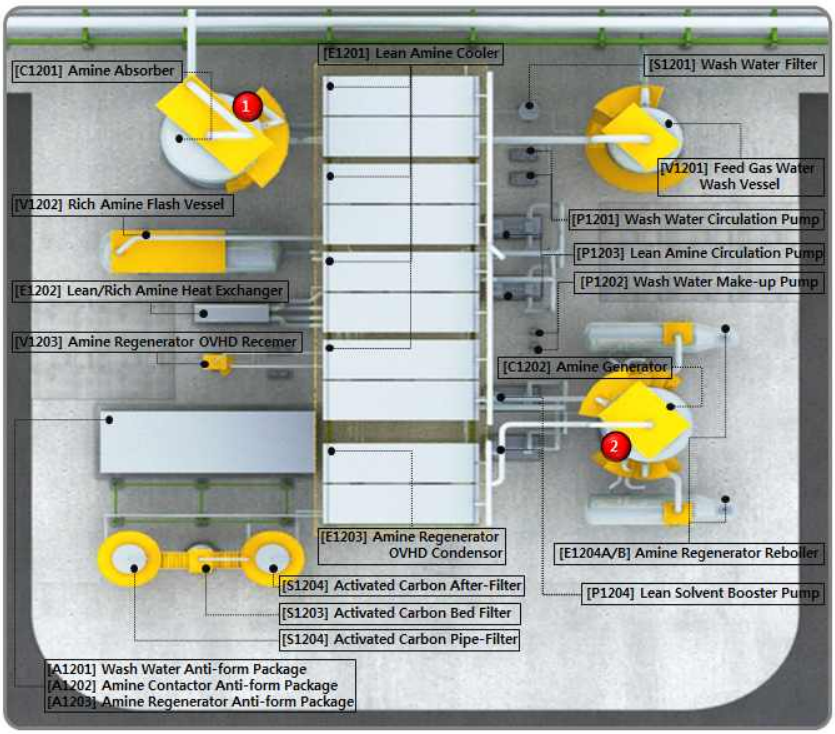
2. BASF indicates deep COS removal capacity is achievable with aMDEA.

3. Provided that the amine in the mixed solvent is based on a tertiary amine.

## ④ Simplified PFD




## ⑤ 단면도




### Main Equipment

**1. Amine Absorber**

- C-1201
- Operating condition : 65bara/38℃ (at Top)
- A-MDEA absorbs CO2 in column and sweet gas to be sent to Dehydration Unit

**2. Amine Regenerator**

- C-1202
- Operating condition : 1.7bara/113.3℃ (at Top)
- Acid gas stripped out from A-MDEA solution is sent to Incinerator in OSBL
- Lean A-MDEA solution is re-circulated to Amine Absorber

### (다) Dehydration

#### ① 목적

㉮ Purpose is to avoid water ice and/or $CH_4$ hydrate formation

㉯ Solid ice or solid hydrates could plug and damage cryogenic lines

㉰ Remove humidity from the feed gas in order to avoid hydrate and ice blockage

#### ② Design Figure

㉮ $H_2O$ spec at the outlet of the dehydration unit is 1 ppm max

㉯ Using three Molecular Sieve Bed

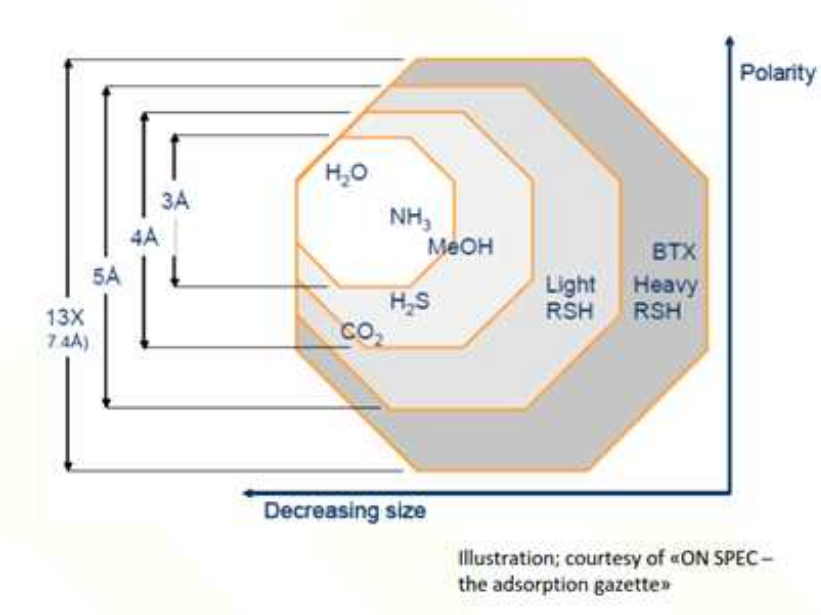
#### ③ Adsorbent Characteristics

㉮ Molecular sieves means that the desiccant have the ability to conduct selective adsorption based on the size of the adsorbate

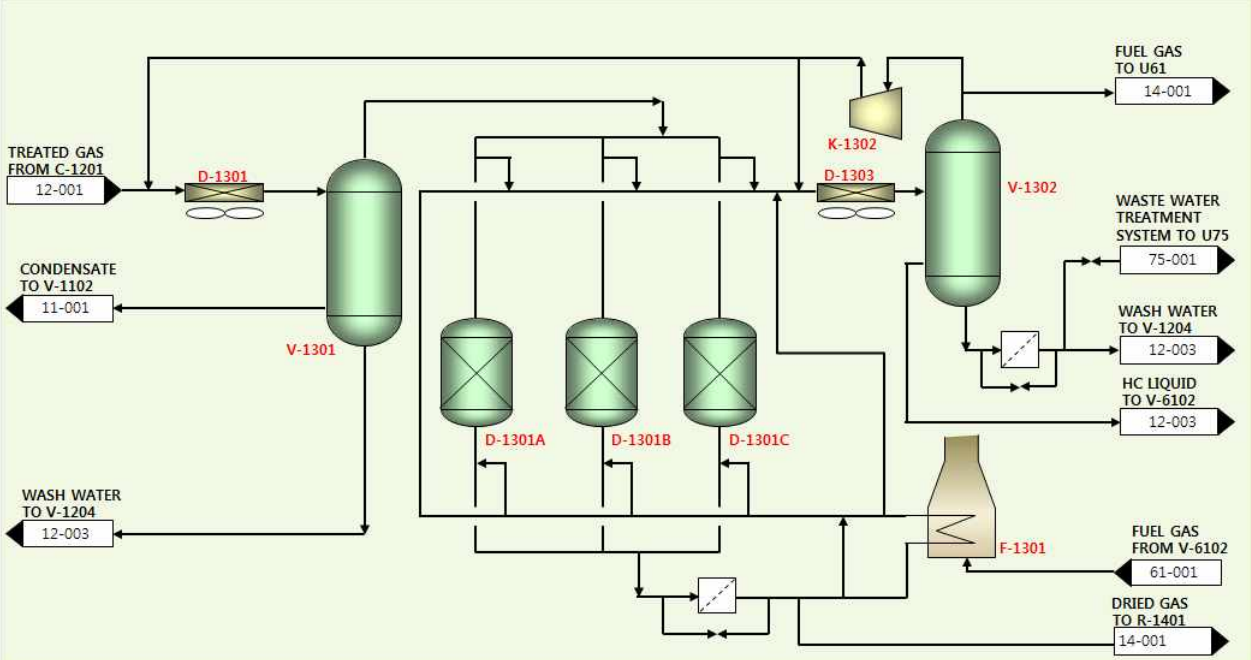
㉯ Zeolite molsieves is available in different standard commercial sizes, shapes and pore openings;

㉰ Type 3A, 4A, 5A : Pore opening =3, 4 & 5 Ångström (0.3/ 0.4/ 0.5nm)

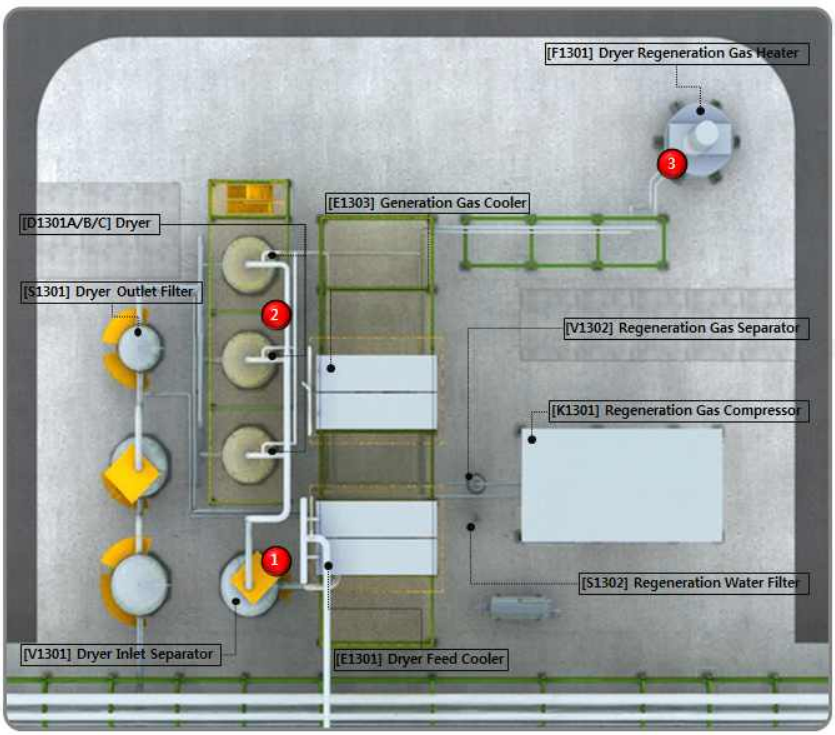
㉱ Type 13X : Pore opening =9 Ångström (0.9nm)



④ Simplified PFD




⑤ 단면도




**Main Equipment**

**1. Dryer Inlet Separator**
- V-1301
- Operating condition : 64bara/39 ℃
- To provide bulk removal of water

**2. Dryer A/B/C**
- D-1301A/B/C
- To remove water contents below 1ppm
- 2 in absorption mode and 1 in regeneration
- Time sequence control

**3. Dryer Regeneration Gas Heater**
- F-1301
- Operating condition : 61.7bara/298℃
- To heat dry regeneration gas up to 298℃
- Regeneration gas passes through saturated dryer bed upward direction

### (라) Mercury Removal

#### ① 목적

㉮ Mercury Removal Unit removes mercury(Hg) from feed gas

㉯ The cold box is made of aluminium, due to metal qualities under cryogenic pressurized conditions

㉰ Mercury reacts chemically with aluminium, and corrodes the aluminium

#### ② Design Figure

㉮ The gas leaving the Mercury Removal Unit shall contain less than 10 ng/Nm3 of Hg

㉯ A mercury removal bed has very much the same geometry as molecular sieve dehydration beds, except for they usually are non-regenerative

㉰ A single bed can have capacity to adsorb Mercury over many years prior to bed change over requirement

㉱ Most commercial Mercury adsorbents are sensitive to liquids, hence normally placed downstream of dehydration system

#### ③ Sulphur Impregnated Activated Carbon

㉮ Most commonly used mercury adsorbent in LNG plants

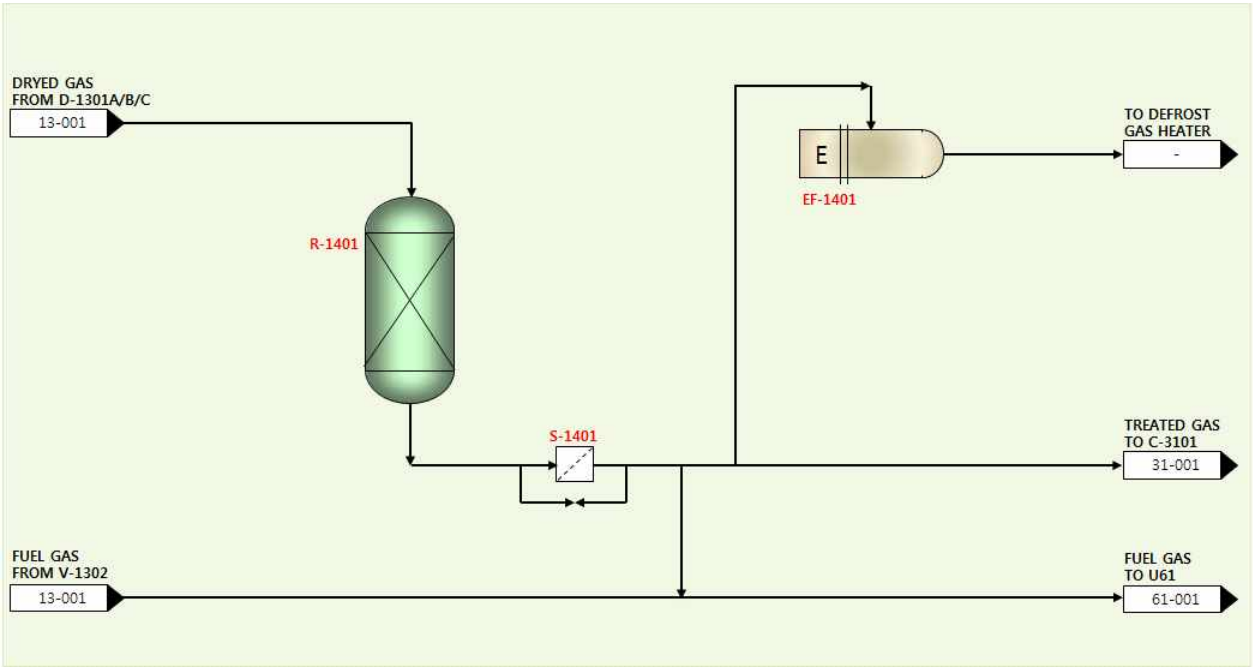
㉯ Mercury react with sulphur to form mercury sulphide

㉰ The chemically bound mercury sulphide(HgS) are kept within the adsorbent mass, and hence there are no cyclic regeneration sequence for this type of adsorbent. (#. Spent Adsorption mass must be treated as special waste)

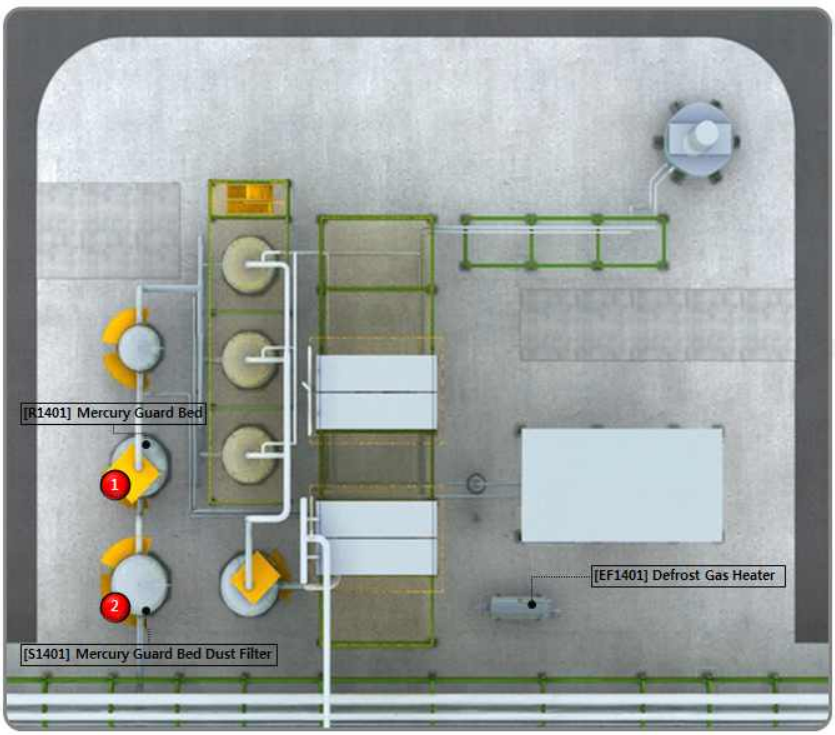


Illustration; Sulphur impregnated activated carbon

④ Simplified PFD




⑤ 단면도




**Main Equipment**

**1.Mercury Guard Bed**
- R-1401
- Operating condition : 62.2bara/39 ℃
- To remove Hg in feed gas
- 1 mercury removal drum filled with catalytic bed

**2.Mercury Guard Bed Dust Filter**
- S-1401
- Operating condition : 61.2bara/38.1 ℃
- Cartridge type filter
- To remove all entrained solid particles down to 10 μm

### (마) NGL Recovery

#### ① 목적

㉮ To Meet LNG max C5+ Specification

㉯ To Avoid freezing of Aromatics and C6+

㉰ To generate sufficient C2/C3 from NG for MR make up

#### ② Design Figure

㉮ Turbo Expander Process

㉯ Treated NG to be boosted up to 90bara

㉰ Benzene Concentration of Treated gas to be less than 1ppm

#### ③ NGL Recovery Method Selection

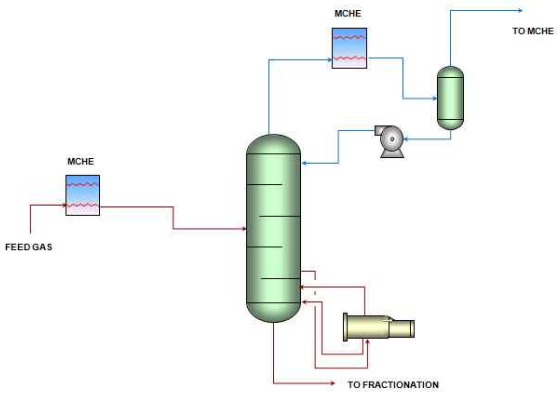
##### ㉮ 고려사항 (Feed Gas가 매우 lean함)

- Low NGL recovery expected
- C2/C3 for MR make up are required
- Required design rate of KSMR process (C2: 515kg/h, C3: 1993kg/h)

| Composition | Mol% |
|---|---|
| Nitrogen | 0.07 |
| CO2 | 50ppm |
| Methane | 96.54 |
| Ethane | 1.99 |
| Propane | 0.74 |
| i-Butane | 0.14 |
| n-Butane | 0.16 |
| i-Pentane | 0.05 |
| N-Pentane | 0.04 |
| Hexane + | 0.27 |

##### ㉯ Scrubber Type

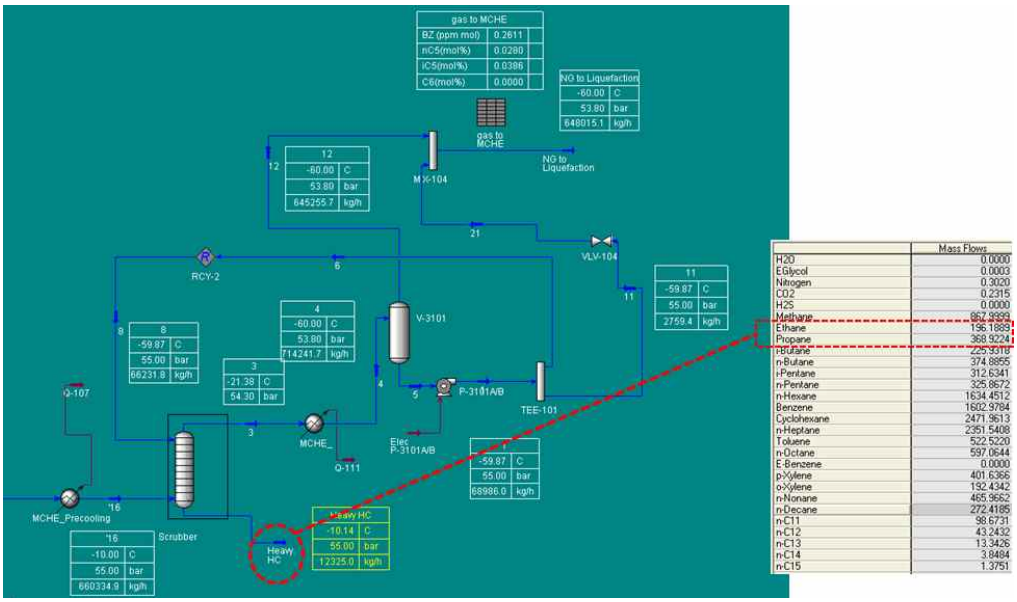
- 개요



.Low NGL production rate. Not enough for refrigerant make up

.Poor Separation-$C_1$ composition is high in NGL-additional DeC1 required-$C_1$ loss

- Simulation



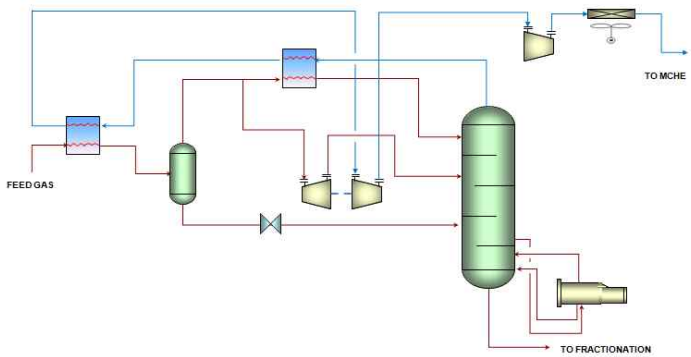

- Operability

.장점 : Simple process gives a benefit to availability-less maintenance and down period of unit

.단점 : If the feed gas is leaner than expected, the operating pressure of the scrub column would need to be reduced-production rate would decreased. Can't operating column during refrigerant cycle S/D

## ㉱ Turbo Expander Process

- 개요

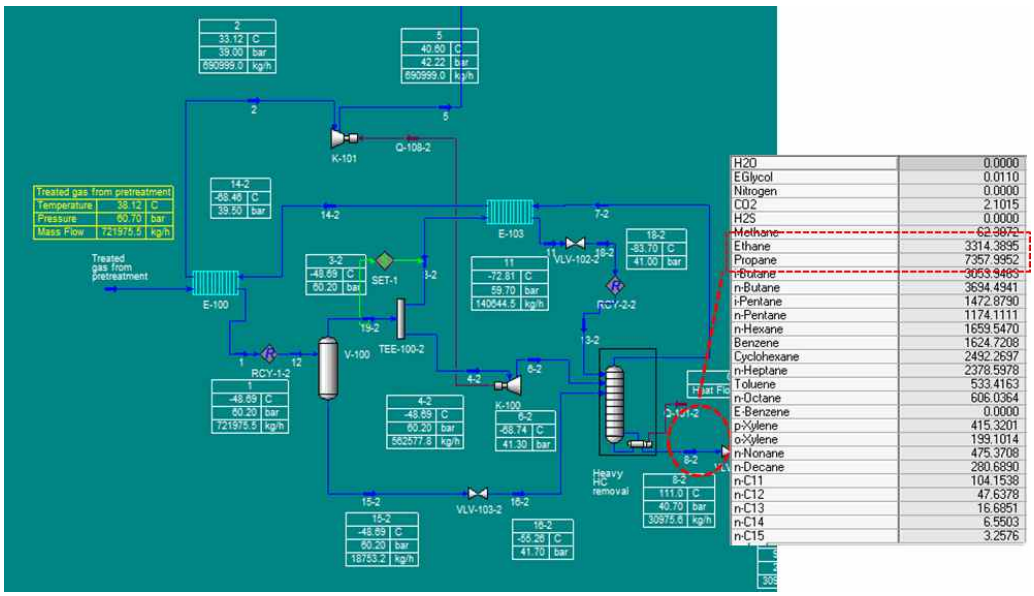



.Sufficient NGL produced to make up refrigerant.

.Additional Equipment required

.More complicated process control

- Simulation

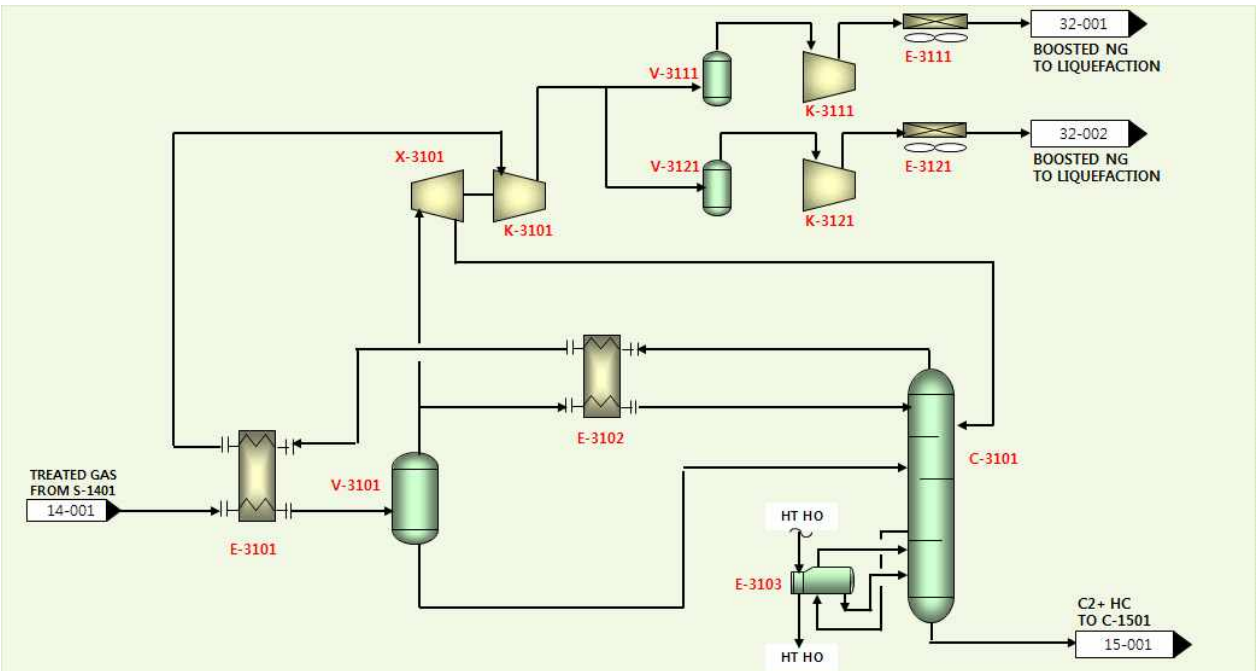



- Operability

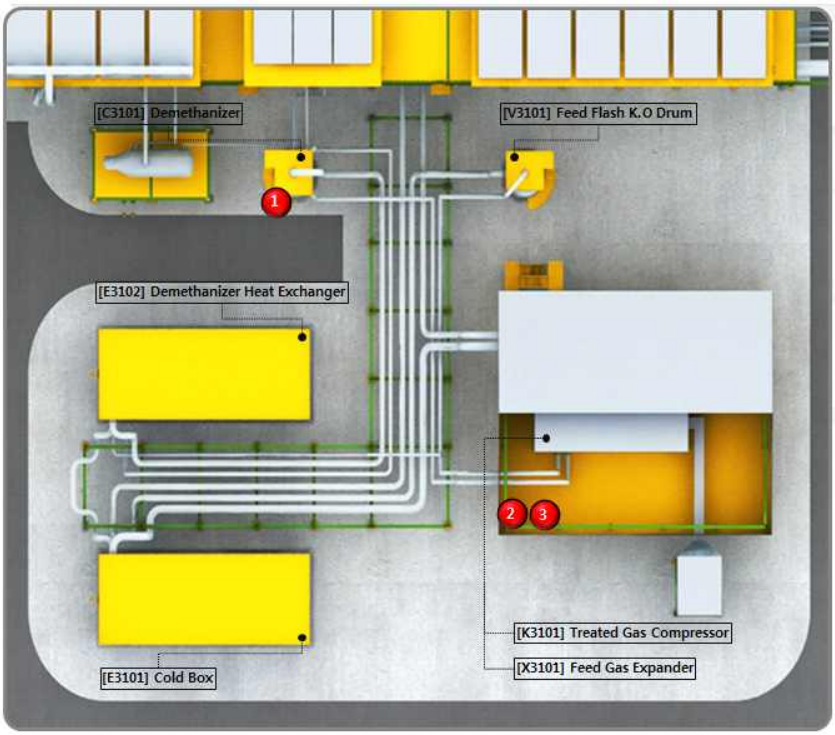
.장점 : Flexible for composition variations thanks to operating range of boosting compressor Independent from the refrigerant cycles-C2/C3 for MR make up can be produced during S/D of refrigerant cycle

.단점 : Additional rotating equipment would impact the liquefaction unit availability

## ④ Simplified PFD



⑤ 단면도




**Main Equipment**

**1. Demethanizer**
- C-3101
- Operating condition : 40bara/-77.8 ℃ (at Top)
- To remove heavy HC from NG
- C2 & C3 from Bottom liquid to be recovered in Fractionation Unit for MR make up

**2. Feed Gas Expander**
- X-3101
- Operating condition : 41.3bara/-68.7 ℃(Outlet)
- Pressure let down from 60.2 bara to 41.3bara
- Cold duty generated by isentropic expansion
- To provide driving power to Treated Gas Compressor

**3. Treated Gas Compressor**
- K-3101
- Operating condition : 42.2 bara / 40.6 ℃(Outlet)
- Treated gas to be further compressed by NG Boosting Compressor(K-3111/3121)

(바) Fractionation

① 목적

㉮ Due to the nature of the equipment(compressors…), continuous losses of refrigerants occurs in MR

㉯ Need for regular make-ups of MR

㉰ Fractionation unit is designed to split C2 to C5+ hydrocarbon cuts to produce make-ups for refrigerant loops

㉱ C2 & C3 production partly routed to refrigerant storages

② Design Figure

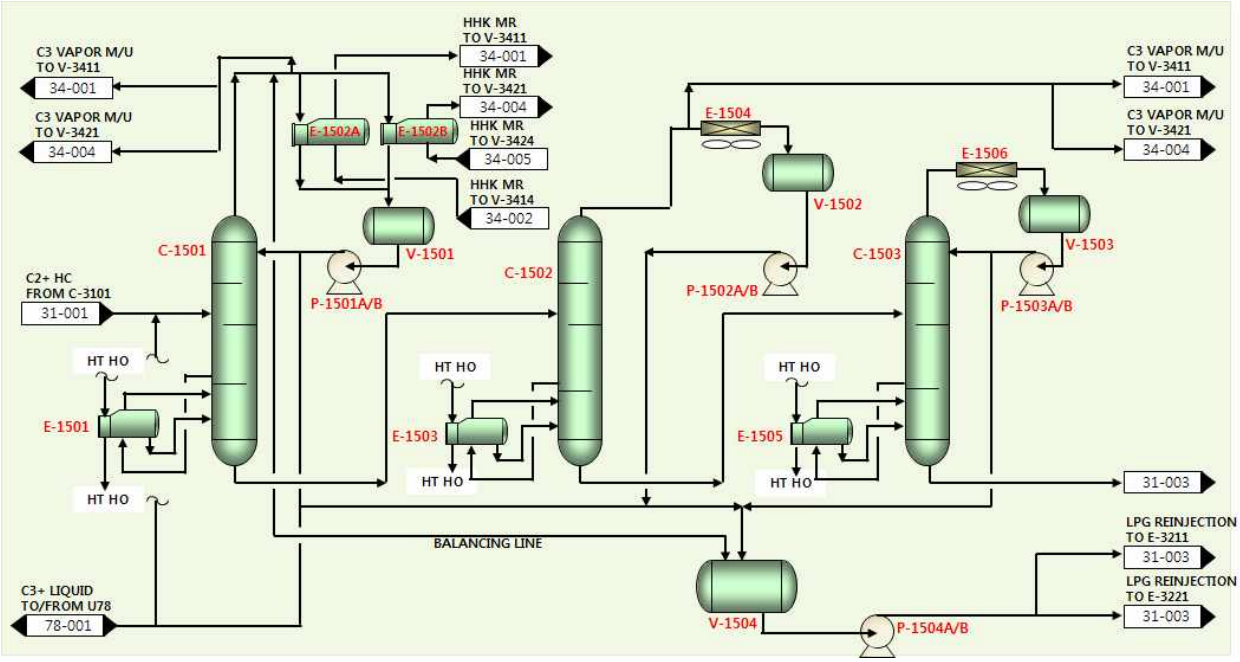
㉮ Three columns for distillation of NGL

㉯ Make up rate of MR in refrigerant loops : 0.05% of circulation rate

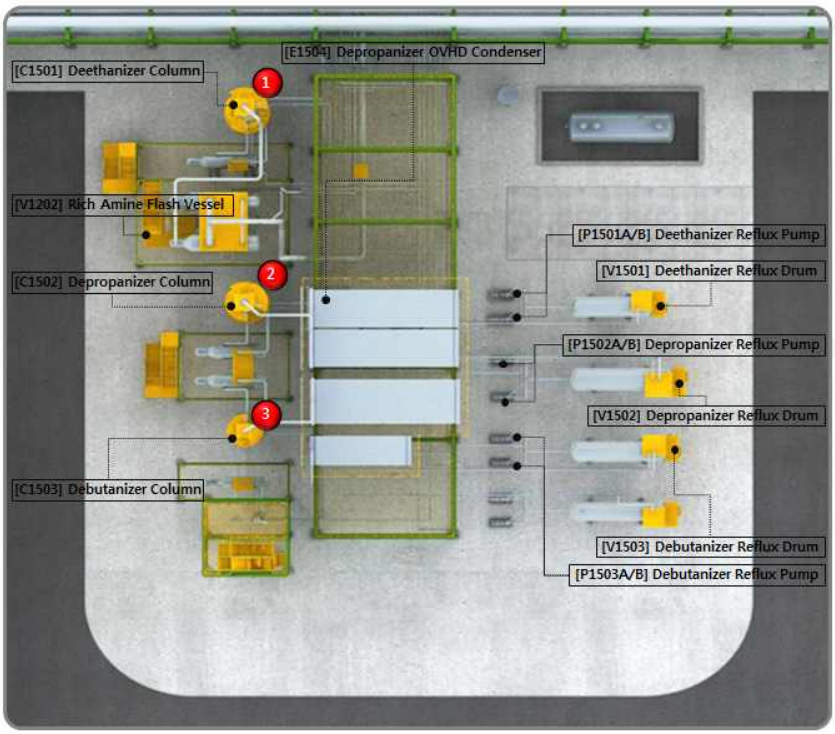
㉰ C2 and C3 for MR make up produced in Fractionation Unit

㉱ All produce liquids in fractionation(C2, C3, C4) are then mixed again and re-injected as feed to MCHE

## ③ Simplified PFD




## ④ 단면도




### Main Equipment

**1.Deethanizer Column**
- C-1501
- Operating condition : 25bara/0 ℃(at Top)
- To produce C2 with more than 96% of purity

**2.Depropanizer Column**
- C-1502
- Operating condition : 14.4bara/41.7 ℃(at Top)
- To produce C3 with more than 98% of purity

**3.Debutanizer Column**
- C-1503
- Operating condition : 5.6bara/49.8℃
- C4 is stripped out from Bottom product to meet the vapor pressure specification of liquid condensate.(RVP below 0.65bara)

### (사) Condensate Stabilization

#### ① 목적

㉮ To remove essentially all butane and lighter gases as well as part of the pentane from the feed liquid

㉯ To achieve a low vapor pressure product that can safely be stored and transported in non-pressurized tanks

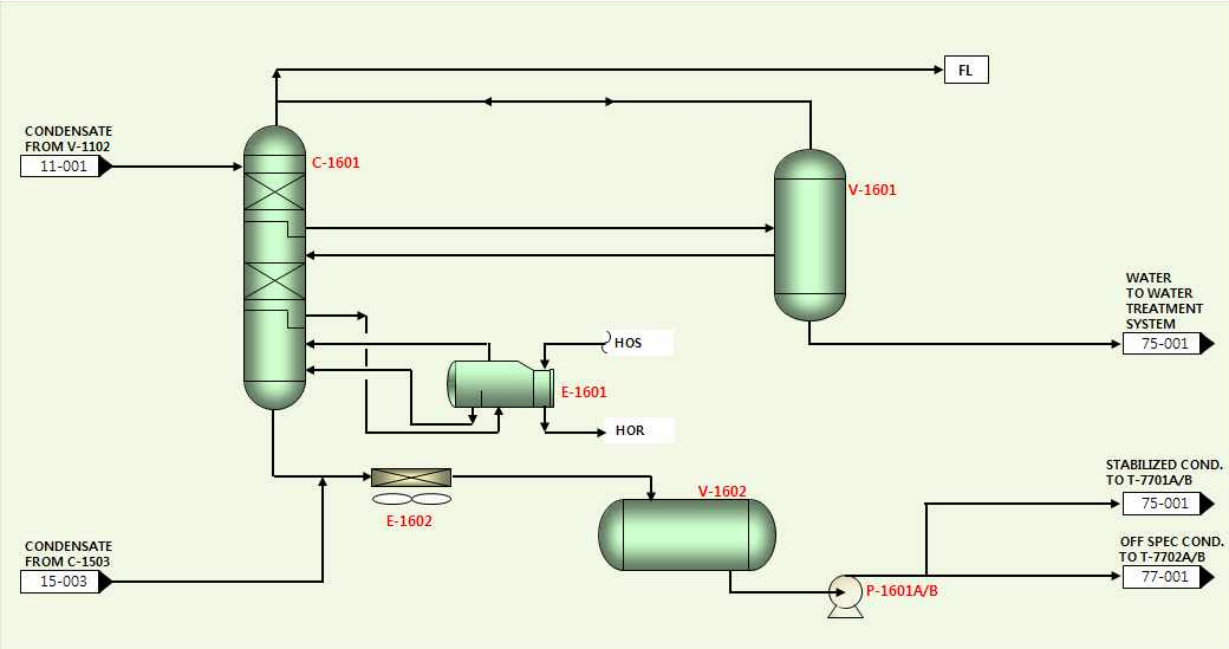
#### ② Design Figure

㉮ Condensate Stabilizer Column Bottom Temperature shall be lower than 150℃ to prevent degradation of any entrained MEG.

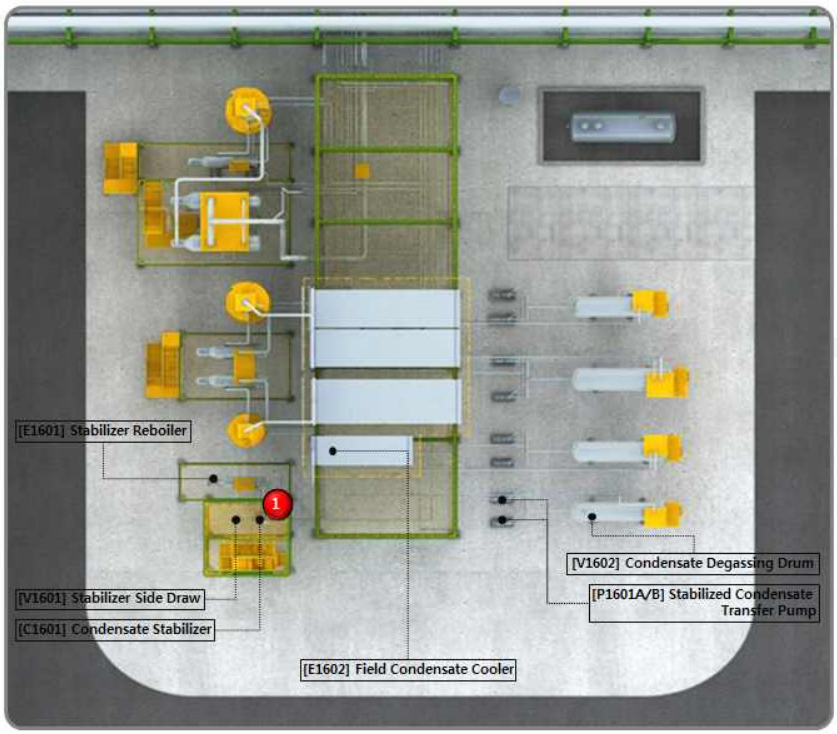
㉯ Filed Condensate from Intake Facility and Plant Condensate from Fractionation to be combined and sent to ATM Storage

㉰ Condensate RVP shall be lower than 0.65bara

#### ③ Simplified PFD



④ 단면도




**Main Equipment**

**1. Condensate Stabilizer**

- C-1601
- Operating condition : 4.5bara/33.1 ℃(at Top)
- Bottom temp : 144 ℃
- To remove C4 and lighter HC to meet vapor pressure requirement

### (아) MEG Regeneration

#### ① 목적

㉮ MEG is injected subsea at the wellhead and potentially also at other points in the subsea gas collection system

㉯ MEG with produced water in Feed Gas will be separated in Intake Facility and sent to MEG Regeneration to remove water from MEG

#### ② Design Figure

㉮ A mix of 80wt% MEG / 20wt% water is injected at the wellheads

㉯ Rich MEG in Feed is expected as a mix of 53wt% MEG / 47wt% water

㉰ Still Column produce the lean MEG(80% MEG + 20% water) by stripping out water

㉱ Still Column bottom Temperature shall be lower than 150℃ to prevent degradation of MEG.

㉲ 65% x 2 Trains

㉳ Slip stream to be taken to prevent solid accumulation

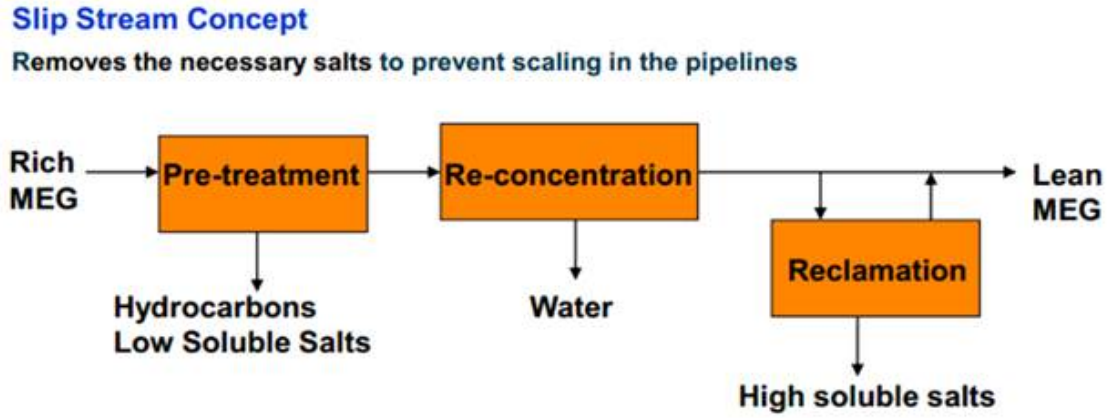
#### ③ Slip Stream Concept

㉮ Formation water contains salt which can be accumulated in regeneration circuit

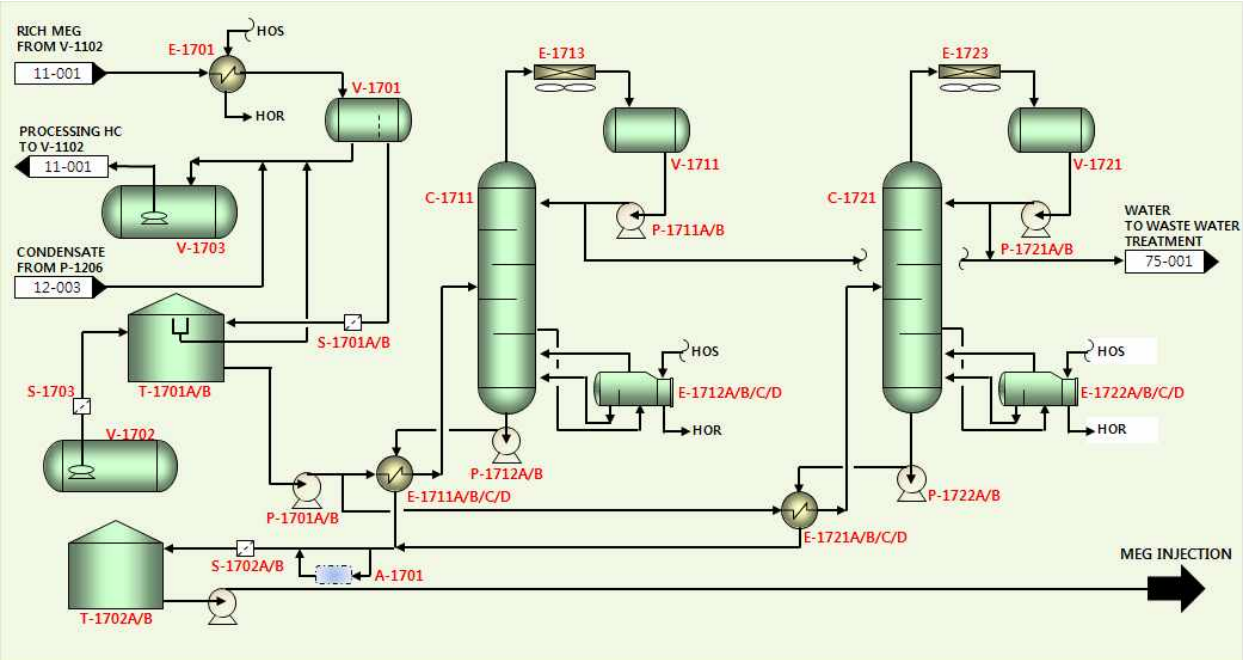
㉯ Full-reclamation of Slip stream may be considered for salt handling

㉰ Slip stream is Preferred mode for On-shore Plant due to ;

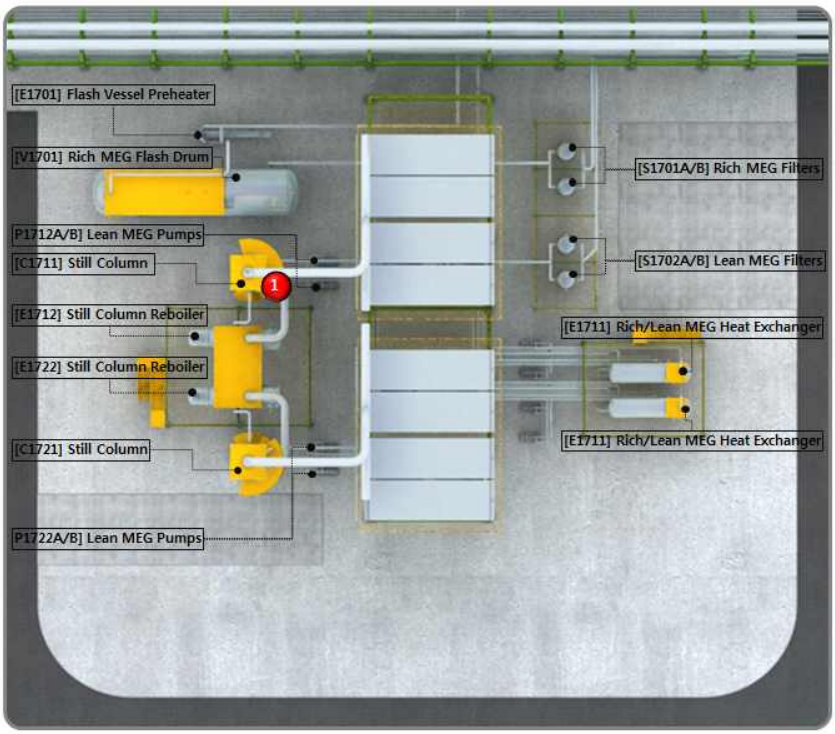
- Lower energy usage than full-reclamation
- Reclaimer bypassed when no formation water
- Operating flexibility
- Higher availability, Regeneration unit can be operated for period with the Reclaimer off line



④ Simplified PFD




⑤ 단면도




**Main Equipment**

**1. Still Column**

- C-1711/C-1721
- Operating condition : 1.8bara/116 ℃(at Top)
- To remove water from Rich MEG

### (5) 상용급 LNG플랜트 FEED Package

#### (가) 설계 조직

상용급 LNG플랜트 기본설계는 3핵심 1세부과제뿐만 아니라, 1, 2핵심의 개발 기술을 바탕으로 진행되는 LNG플랜트 사업단의 종합적인 성과물로서, 아래와 같이 설계 조직을 구성하였다. 일반적인 설계를 위한 조직은 3핵심 1세부 주관기관인 GS건설에서 연구/설계 인력을 편성하였으며, 1, 2핵심에서 주요 기술들에 대한 연구원은 Licensor로서의 파트를 담당하여 설계를 진행하였다.

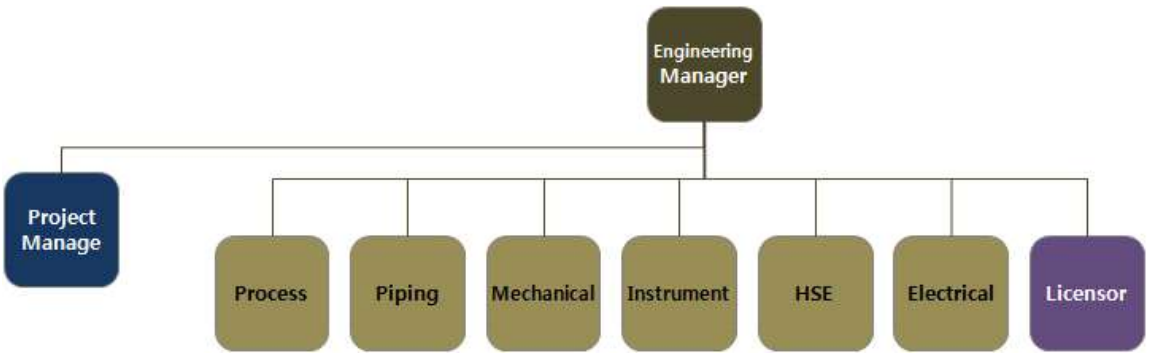



그림 55. LNG플랜트 기본설계 조직도

#### (나) Milestone

상용급 LNG플랜트 기본설계의 주요 Milestone은 다음과 같다.

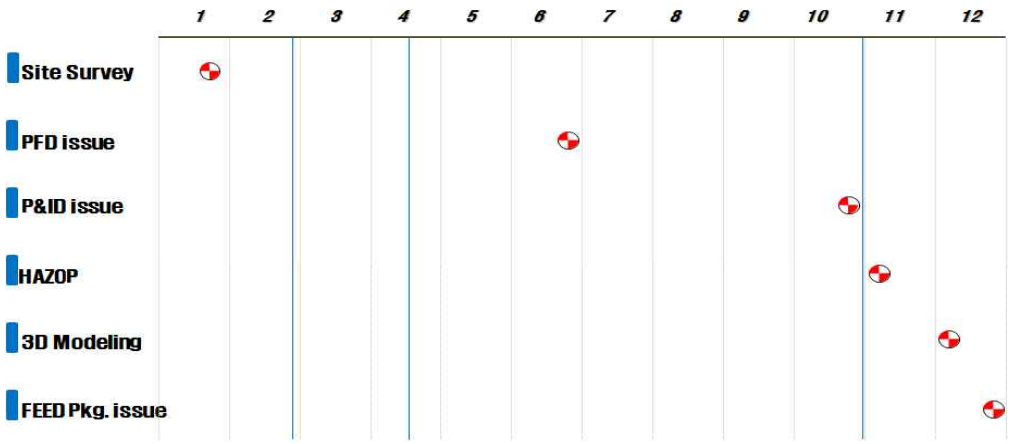



그림 56. LNG플랜트 기본설계 Milestone

#### (다) 목차

현재 운전 중인 상용 LNG플랜트의 FEED pkg. 및 테스트베드 기본설계집 등을 참조하여 상용급 LNG플랜트 기본설계 목차를 완성하였다.

표 34. 5MTPA Feed Package Contents

| Part | | Section | | Comments |
|---|---|---|---|---|
| Ⅰ | General | 01 | Process General | |
| | | 02 | Design Philosophy | |
| | | 03 | HSE | |
| | | 04 | Layout | |
| | | 05 | Summary Sheet | |
| Ⅱ | Engineering Specification | 01 | Process | |
| | | 02 | HSE | |
| | | 03 | Electrical | |
| | | 04 | CAS | |
| | | 05 | Instrument | |
| | | 06 | Mechanical | |
| | | 07 | Piping | |
| | | 08 | Package | |
| Ⅲ | Process | 01 | Intake Facility | |
| | | 02 | Acid Gas Removal | |
| | | 03 | Dehydration | |
| | | 04 | Mercury Removal | |
| | | 05 | Fractionation | |
| | | 06 | Condensate Stabilization | |
| | | 07 | MEG Regeneration System | |
| | | 08 | NGL Recovery | |
| | | 09 | Liquefaction | |
| | | 10 | End Flash | |
| | | 11 | Refrigeration | |
| Ⅳ | Utility & Offsites | 01 | Offsites | |
| | | 02 | Utilities | |

상용급 LNG플랜트 FEED package는 LNG플랜트 사업단의 6년간의 성과를 종합하는 성과물로서 초기 기본설계집에서 수행내용을 강화하여 진행하게 되었다. 본 성과물에서는 아래와 같이 설계를 수행하였다.

- LNG플랜트 EPC 사업 수행절차 확립
- 상용급 LNG플랜트 기본설계
- 상용급 LNG플랜트 사업을 위한 사전 Study 수행
- HSE 분야 설계 수행

### (라) LNG플랜트 EPC 사업 수행절차 확립

본 과제는 실용적인 과제 수행과 동일 방식으로 수행되며, 통상적인 EPC 절차에 준하여 수행되었다. 설계 조직은 GS건설의 EPC 수행조직과 동일하게 진행되었으며, Deliverable 역시 절차에 의하여 진행되었다. 또한, LNG 플랜트의 문서 분석 및 code, standard 분석을 통하여 LNG 플랜트 Engineering Spec.을 비롯한 총 714종의 Documents를 완성하였다.

### (6) 상용급 LNG플랜트 사업을 위한 Dynamic Simulation 수행

#### (가) 목적

상용 LNG플랜트 수행을 위하여 Dynamic Simulation을 수행하였다. DYNSIM™을 사용하여 분석을 수행하였으며, Dynamic Simulation의 목적은 다음과 같다.

- LNG 액화 공정의 동적 모사 모델 구축 (Vendor Information 제외)
- 안정적인 운전을 위한 기본 제어 시스템의 검토
- Process data sheet에 제공된 장치 spec.의 검토
- 정상 운전시 LNG 액화 공정의 성능 검토

#### (나) 범위

5MTPA LNG 액화 공장은 전처리 공정, 액화 공정, 연료 처리 공정 그리고 offsite 및 유틸리티 공정을 포함하고 있다. 하지만, Vendor information을 얻을 수 없는 FEED 단계에서 전체 공장에 대해 동적 모사 모델을 만드는 것은 모델의 신뢰도 측면에서 적절하지 않다. 따라서, 구축된 모델은5 MTPA LNG 액화 공장의 액화 공정만을 포함하고 있으며, 모델에 포함된 Unit은 다음과 같다.

- NGL Recovery - Unit 31
- Liquefaction - Unit 32
- End Flash - Unit 33
- Refrigeration - Unit 34

#### (다) 내용

- 모든 압축기와 기본 제어 시스템의 성능 테스트
- MCHE와 MR 시스템의 성능 테스트

#### (라) 결과

5MTPA LNG Liquefaction Plant의 동적 모사 수행 결과, 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- 정상 상태에서 안정적인 LNG 생산 가능
- 각 Equipment의 Process Spec. 오차 범위 내 이상무
- 기본적인 제어 시스템 이상무

하지만, 정보의 부재로 인해 몇 가지 개선해야 할 점은 다음과 같다.

- MCHE 및 Plate Fin Type Exchanger Vendor Information 접수 후 재해석 필요
- 모든 압축기의 성능 곡선 Update 필요
- MCHE 제어 시스템 향상 필요



그림 57. 상용LNG플랜트 조감도

## 차. 액화공정 최적화 프로그램

### (1) 개요

LNG 플랜트 최적화 모델 개발은 냉매 시스템 모델 개발과 에너지 시스템 모델 개발로 나누어 수행되었다. 냉매 시스템 모델 개발은 LNG플랜트 내 냉매 시스템 최적화 모델 개발을 그 목표로 한다. 최적화 목적은 LNG플랜트 내 압축기에서 소모되는 에너지의 최소화이다. 이를 위해 수학적 모델링과 컴퓨터 프로그래밍을 통해 최적화 모델을 개발하였다.

### (2) 냉매 시스템 모델 개발

냉매시스템은 냉매의 종류에 따라 혼합냉매와 순수냉매 두 가지로 분류한다. 혼합냉매에서는 상용 SMR 공정을 대상으로 냉매시스템을 개발하였다. 이 때 혼합냉매의 유량, 온도, 압력, 조성 등을 변화시켜 가며 최소의 에너지 소모량을 가지는 운전 조건을 산출하여 기존 상용화된 SMR 공정보다 18.2% 에너지를 감소시키는 모델을 개발하였다. 순수냉매에서는 Test-bed 1에 적용하여 모델을 개발하였으며 혼합냉매모델과 동일하게 유량, 온도, 압력을 변수로 하여 최소의 에너지가 소모되는 조건을 찾았다. 그 결과 기존 Test-bed 1의 순수 냉매 사이클보다 15.4% 에너지를 감소하는 모델을 개발하였다.




그림 58. 냉매 시스템 모델 개발

### (3) 에너지 시스템 모델 개발

에너지 시스템 모델 개발은 LNG플랜트 에너지 공급 시스템의 최적화 모델 개발을 그 목표로 한다. 최적화 목적은 플랜트가 필요로 하는 에너지를 공급하는데 드는 비용의 최소화이다. 이를 위해서 수학적 모델링과 컴퓨터 프로그래밍을 통해 최적화 모델을 개발하였다. 가스터빈, 모터, 전기 등의 용량 및 가격 정보를 입력하고 최소의 비용으로 LNG플랜트에 에너지를 공급할 수 있는 장치를 선택하도록 모델을 구성하였다.

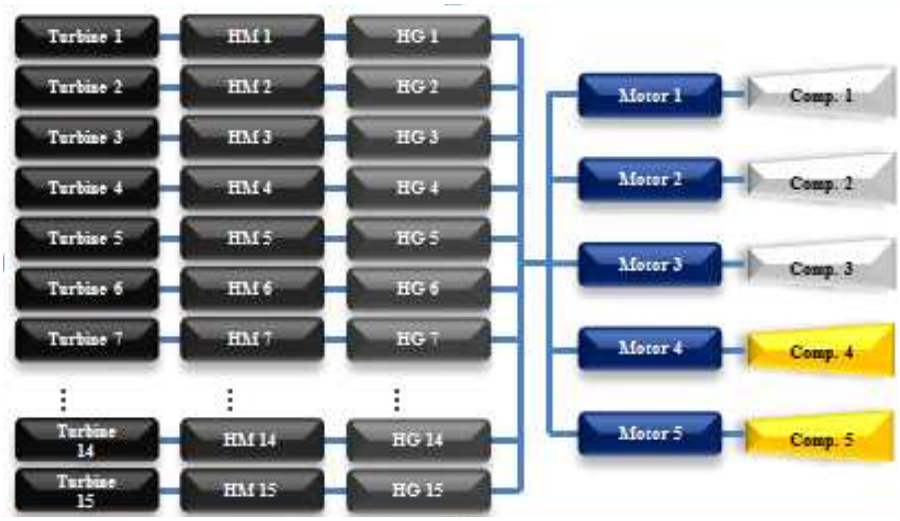



그림 59. 에너지 시스템 모델 개발

### (4) 비용 기반 최적화 모델 개발

5MTPA를 기준 용량으로 냉매 시스템 모델과 에너지 시스템 모델을 연동하여 가장 적은 비용을 가지는 비용기반 최적화 프로그램을 개발하였다.

(가) 고정된 동력 공급 시스템 내에서 SMR 공정의 비용 최소화

(나) C3MR 공정에 대해서 비용을 고려하여 최적화

※ 주요장치 외 다양한 요인 고려하여 최적화 실시

(다) C3MR 공정 내 순수냉매와 혼합냉매를 동시에 최적화

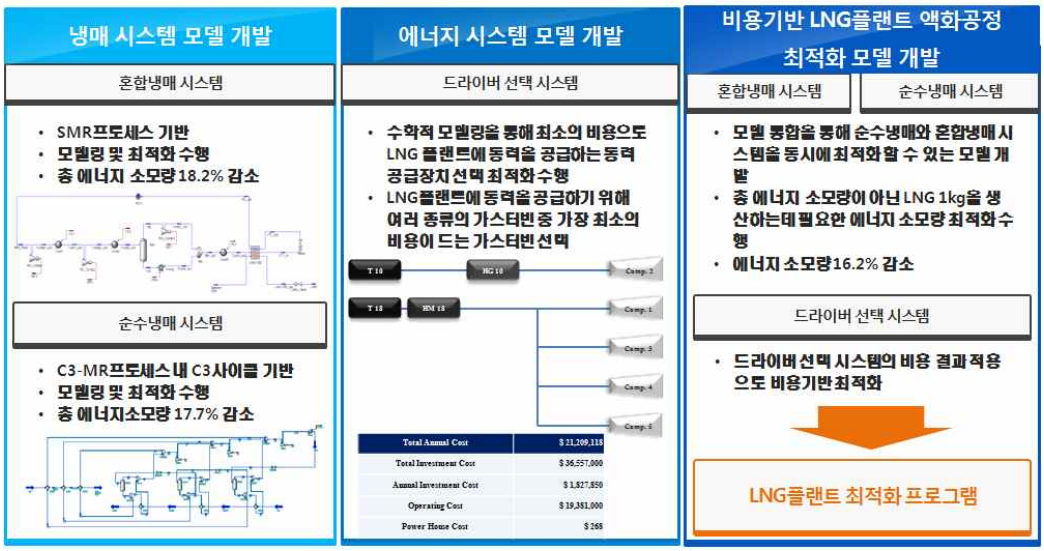



그림 60. 비용 기반 LNG플랜트 최적화 모델 개발

## 카. LNG플랜트 관련 검사기준

### (1) 개요

본 연구는 LNG 플랜트 설계환경 및 부품별 법적 적용 대상을 선별하고, 핵심 기자재 및 시설에 대한 기술검토를 위한 선행 연구를 통하여, 최종 시공 및 준공단계에서 발생할 수 있는 제반 문제점을 사전에 파악하여 테스트 베드의 건설 시공에 적합한 최적의 조건을 제시하는 관련 법적 설치기준을 마련하여, 유권해석 및 법적 절차상의 문제점을 사전에 파악하여 관계기관과의 원활한 조율을 통한 LNG 플랜트 테스트베드의 성공적인 준공을 위한 법적 지원을 통한 안전관리 시스템을 구축하는 것을 목적으로 한다.

### (2) 연구수행 내용

#### (가) 국내 LNG플랜트 설계도면 분석 및 법적 지원

① 설계사의 LNG플랜트 테스트베드 설계도면 검토 및 문제점 제시

② 국내 고압가스안전관리법 적용을 위한 가스설비 및 배관설비 기준 검토

③ LNG플랜트 테스트베드의 법적 적용을 위한 사고예방설비/피해저감설비/안전유지/제조 및 충전기준/점검기준 등 검토

④ 테스트베드 시공을 위한 안전관리 규정 및 질의회신 검토

#### (나) 고압가스 일반제조시설 설치기준 적용에 따른 관계법 지원

① 해외 LNG플랜트 건설 기준 및 적용 관련법 조사

② 고압가스 일반제조의 시설·기술·검사·감리 및 정밀안전 기준 검토

③ 질의회신 내용 검토

#### (다) 고압가스 냉동제조의 시설·기술·검사기준 지원

① 시설기준(배치 기준 / 가스설비 기준 / 사고예방 설비 기준 / 피해 저감설비 기준 / 부대설비 기준 /표시 기준) 등 테스트베드 준공을 위한 세부항목 분석

② 기술기준(안전유지기준/점검기준/수리·청소 및 철거기준) 등 안전 확보를 위한 법적 필요조건 분석

③ 검사기준(중간검사/완성검사/정기검사 및 수시검사)의 검사항목 분석

④ 질의회신 내용 검토

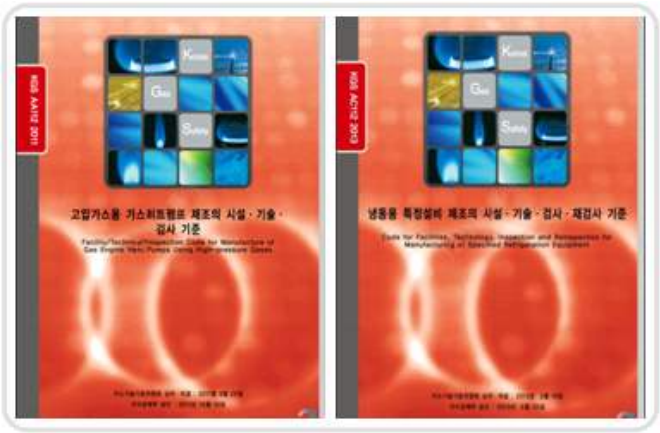
### (3) 연구수행 결과

#### (가) KGS Code에 따른 법적 검사기준 제, 개정

**부속냉동시설 검사기준 제정**

① 고압가스용 가스히트펌프 제조의 시설·기술·검사 기준(KGS AA112)

② 냉동용 특정설비 제조의 시설·기술·검사·재검사 기준(KGS AC112)



# 타. LNG플랜트 해외진출을 위한 정책지원 방안

## (1) 개요

국내외 건설제도, 건설 법령, 주요 세제를 분석하고 해외 시장 진출 지원 제도를 제안함으로써 진입 장벽이 높은 해외 LNG Plant 시장의 국내업체 시장 진출을 위한 정책지원 및 지원체계를 개발하고자 한다.

천연가스 시장에서 떠오르고 있는 모잠비크, 인도네시아, 캐나다 3개국의 법, 제도, 가스 현황을 분석하고 국내 LNG 플랜트 진출을 위한 제도조사를 통해 우리 업체의 효율적인 진출지원을 도모함에 있다.




그림 61. 추진계획 및 기대 효과

## (2) 연구수행 결과

### (가) 해외 자료 조사 및 분석(캐나다/모잠비크/인도네시아)

※ 상기 3개국은 향후 활발한 LNG플랜트 사업이 진행/예상되는 국가임

### (나) LNG플랜트 중·장기 지원정책 수립

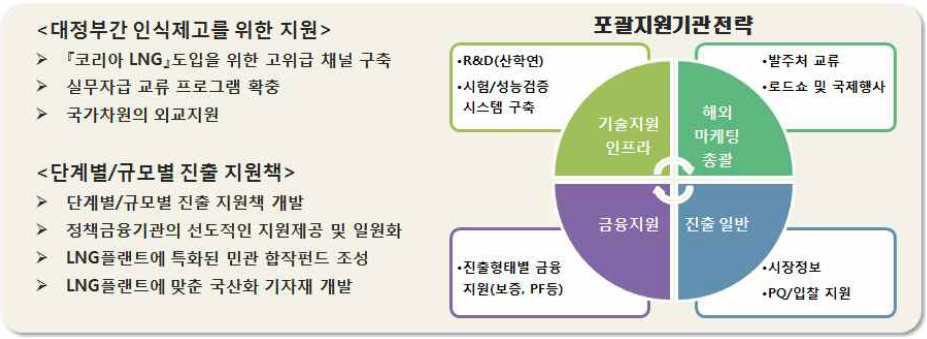



그림 62. 포괄 지원체계 구축

# 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

## 가. 목표

| | |
|---|---|
| **연구개발 목표** | ■ 제2핵심과제의 공정 데이터와 해외 선진 FEED 사례를 기반으로 LNG 플랜트 기본설계 및 FEED 개발을 위한 설계기술 개발 |
| | ■ 200 톤/일(100 톤/일, 2기)급 테스트베드 FEED 및 시공 및 실증, 이에 기반한 대용량(5 MTPA급) LNG플랜트 기본설계 패키지 개발 |
| | ■ LNG플랜트 설비법 체계 정비와 정책, 제도 등 지원방안 수립 및 세계 시장 진출을 위한 연구개발 성과물의 국제표준에 따른 기술표준화 추진 및 인증<br>- LNG 플랜트 설계/시공표준 구축<br>- 국제 표준 기반의 LNG 플랜트 지원정책 및 제도 개발 |

## 나. 연구개발 내용 및 산출성과물

| 연구내용 | | (연계)산출성과물 |
|---|---|---|
| 연구 개발 내용 | ■ **FEED/기본, 상세설계 기술개발** | |
| | - 선진 FEED 벤치마킹 및 사례 구축(FEED 열·물질수지, PFD 등 분석) | ① LNG플랜트 테스트베드 개념설계집<br>② 기술동향조사보고서 |
| | - 테스트베드 구성 및 설계기준 도출(설계기초, 열 및 물질수지 분석, 가스조성, 냉매, 생산량 기반 설계) | ① LNG플랜트 테스트베드 개념설계집<br>③ LNG플랜트 테스트베드 Train-1 기본설계집<br>⑤ LNG플랜트 테스트베드 Train-2 기본설계집 |
| | - 테스트베드 FEED 패키지 및 상세설계, 열·물질수지 기반 기본 공정설계, Hydraulic 기반 배관 설계 | ③ LNG플랜트 테스트베드 Train-1 기본설계집<br>⑤ LNG플랜트 테스트베드 Train-2 기본설계집<br>④ LNG플랜트 테스트베드 Train-1 상세설계집<br>⑥ LNG플랜트 테스트베드 |

| | | |
|---|---|---|
| | | Train-2 상세설계집 |
| | - 테스트베드 운전을 통한 상용급 LNG 플랜트 최적화 데이터 도출 | ⑦ 상용급 LNG플랜트 FEED Package |
| | - 핵심기자재 운전데이터 수집/분석, 상용급 핵심 기자재 선정 기준 도출 | ⑦ 상용급 LNG플랜트 FEED Package |
| | - 테스트베드 설계&대용량 LNG 플랜트 scale-up 연구 | ⑦ 상용급 LNG플랜트 FEED Package<br>⑧ 액화공정 최적화 프로그램 |
| | - 5Mt/y급 LNG플랜트 기본설계집 제시, 상용급 기자재 선정기준 및 가이드라인 제시 | ⑦ 상용급 LNG플랜트 FEED Package |
| | **■ LNG 플랜트 설계/시공 표준 구축** | |
| | - LNG플랜트 설계 Spec, Code, Standard, Regulation 등 분석(설계부문별, 공정분야별, 단위기기별 조사)을 기초한 LNG 플랜트 표준화체계 시스템 정립(ISO TC67/WG10 & 184/SC4 등) | ⑦ 상용급 LNG플랜트 FEED Package |
| | - 국제표준 기반의 국내표준/법체계 정비/제안/인증 | ⑨ LNG플랜트 테스트베드 관련 검사기준 (AA112, AC112) |
| | - LNG 플랜트 설계요령, 기술기준, 코드, 기준 및 표준 계약/업무절차 등 매뉴얼 개발 | ⑦ 상용급 LNG플랜트 FEED Package |
| | **■ 국제 표준 기반의 LNG 플랜트 지원정책 및 제도 개발** | |
| | - 국내외 LNG 플랜트 건설제도, 법령, 세제지원 조사 | ⑩ LNG플랜트 해외진출을 위한 정책지원 방안 |
| | - 사업단 테스트베드 구축을 위한 법체계정비와 정책, 제도 개선 지원 | ⑩ LNG플랜트 해외진출을 위한 정책지원 방안 |
| | - 건설제도 및 법령, 세제지원 등의 해외시장진출 지원 제도 제시 | ⑩ LNG플랜트 해외진출을 위한 정책지원 방안 |

## 다. 연구개발 최종 목표 달성도

| 연구목표 | 성과목표 | 성과지표 | 목표치 | 측정방법 | 가중치 (%) | 달성도 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1) 100톤/일급 테스트베드 설계 | 1) 상용공정 LNG플랜트 테스트베드 설계 완성 | ① LNG플랜트 생산량 | 100TPD | 테스트베드 생산량 확인 | 10% | 100% |
| | | ② 안전설계 | HAZOP 문제점 해소 | HAZOP 결과와 설계도면 검토 | 5% | 100% |
| | | ③ 상용공정 최적화 설계 | 최적 냉매 조성 및 최적 운전 조건 선정 | 액화공정전문가를 통한 검증 | 5% | 100% |
| | | | | 테스트베드 정상운전 | 5% | 100% |
| | | | | Dynamic Simulation을 통한 검증 | 5% | 100% |
| | 2) 신액화공정 LNG플랜트 테스트베드 설계 완성 | ① LNG플랜트 생산량 | 100TPD | 테스트베드 생산량 확인 | 10% | 100% |
| | | ② 안전설계 | HAZOP 문제점 해소 | HAZOP 결과와 설계도면 검토 | 5% | 100% |
| | | ③ 신액화공정 최적화 설계 | 최적 냉매 조성 및 최적 운전 조건 선정 | 테스트베드 정상운전 | 5% | 100% |
| | | | | Dynamic Simulation을 통한 검증 | 5% | 100% |
| 2) 상용급 LNG 플랜트 설계 기술 개발 | 3) 액화공정 최적화 기술 개발 | ① 액화공정 최적화 프로그램 개발 | 상용공정대비 에너지 소모량 10% 이상 감소<br>Specific Work 10% 이상 감소 | 상용소프트웨어 (ProII. HYSYS 등) 계산확인 | 5% | 100% |
| | 4) 상용급 LNG 플랜트 기본 설계기술 개발 | ① 상용 LNG플랜트 FEED | 5MTPA급 LNG 플랜트 FEED 패키지 1식 | 완료설계도서/ 설계도서 목록 | 25% | 100% |
| 3) LNG플랜트 지원 정책/제도 및 표준 개발 | 5) LNG플랜트 표준개발 | ① 초저온 설비 관련 인허가 정비 | 초저온 설비 관련법 개정/제정 1건 이상 | 관보고시 여부 | 5% | 100% |
| | | ② LNG플랜트 EPC 기준 확립 | LNG플랜트 Spec. 패키지 1식 | 완료 LNG 플랜트 Spec./ 설계도서 목록 | 5% | 100% |
| | 6) LNG플랜트 지원정책/ 제도 개발 | ① LNG플랜트 지원정책 수립 | 지원정책보고서 1권 | 보고서 완료 | 5% | 100% |

# 4. 연구개발성과의 활용 계획

## 가. 예상 기대 효과

- LNG플랜트 테스트베드 및 상용급 FEED 설계를 통해 국내 LNG플랜트  설계 기술 확보 및 기술 경쟁력 강화
- LNG 설계 기술을 확보를 통해 해외 LNG플랜트 시장 진출 예상
- 주요 기자재의 테스트베드 적용으로 국내 기자재 업체의 LNG플랜트 관련 기술 축적 및 관련 업계 활성화
- 기술 개발, 지적 재산권 확보, EPC 표준 구축 및 지원제도 제안 등으로 해외플랜트 시장 진출을 위한 폭넓은 정책적 지원 유도
- 개발된 기술로 선진사와의 기술제휴 및 컨소시엄 구성을 통해 선진 시장 진입
- 자원 연계형 투자 개발 사업 추진으로 국내 에너지 자립도 향상
- 공정 최적화 기술의 확보에 따른 국내 LNG 플랜트 기술 경쟁력 강화
- 공정 최적화를 통한 에너지 효율성 향상에 따른 경제적 이득 효과
- 5MTPA급 상용 LNG플랜트의 최적설계 및 운전 최적화에 기여
- 최종산출물을 컴포넌트 형태 또는 패키지 형태로 상용화하여 실제 LNG 플랜트 설계에 활용
- 주요 장치 모델을 이용하여 GTL, LNG 터미널을 비롯하여 질소 액화 등 타 액화 공정 등에 응용
- 타 화학플랜트 및 에너지플랜트의 설계 및 운전 최적화에 활용
- 산업전반 냉동 및 고압가스 일반제조사에 합리적인 적용

## 나. 추가 연구의 필요성

최근 원자재 가격의 급등, 건설 인력 및 장비의 부족 등에 따라 플랜트 건설 투자비가 급증함에 따라, 투자비 절감을 위해 LNG 액화 공장의 단위 train당 생산 규모가 대형화 되어가고 있어(대표적으로 카타르에 건설되고 있는 LNG 액화 공장의 경우 단위 train 생산 규모는 연산 7.8백만 톤 규모로 대형화 됨), 본 과제의 성과물인 연산 5백만 톤 규모의 LNG 액화 기본설계 도서를 기반으로 대형화 연구를 추진할 필요가 있다. 이러한 대형화 플랜트의 기술 확보를 위해서는 LNG플랜트의 주공정인 액화공정의 핵심 설비인 열교환기와 압축기의 개발이 선행되어야 한다.

## 다. 타 연구에의 응용

## 라. 사업화 추진 방안

**(1) 자원 연계형 투자개발사업 컨소시엄 구성**

개발된 기술의 해외시장 진출을 위해서는 국내 기업들이 개발하거나 확보한 해외의 가스전(대규모 가스전, 고립지 가스전, 원격지 가스전, 유전에서의 수반가스 등)에 공정/플랜트 기술과 금융이 어우러지는 자원 연계형 투자개발사업 컨소시엄을 구성함으로써, 궁극적으로는 해외 에너지 자원개발과 연계한 해외플랜트 건설이 가능할 것으로 예상된다.

**(2) 해외 가스전 사업권과 연계**

LNG 가치사슬 요소(천연가스 생산 → LNG생산, 저장 → 운송 → 저장 → 재기화 → 소비)가 제한적인 국내 여건에서 대규모 연구개발사업 및 테스트베드 구축을 통해 기술의 신뢰성과 완성도를 제고하여 국내 공기업 및 민간 주도의 해외 가스전 사업권과 연계하여 우리 기술의 적용이 가능할 것으로 예상된다.

**(3) 개획 개발형 건설사업 모델 개발**

현장 수행실적과 독자기술을 토대로 원격지 중소가스전을 대상으로 기획, 개발형 건설사업의 모델을 개발하고, 적용함으로써 시장경쟁력을 강화할 수 있을 것으로 예상된다.

**(4) 단계별 접근 방법**

**(가) 1단계**

국내기업(석유공사, 가스공사, 민간기업 등)에서 개발하거나 사업권을 확보한 가스전을 중심으로 우선 적용하여 대외 신뢰도, 실적을 확보할 수 있으며, 필요시 선진 기업과 기술제휴나 공동사업을 모색할 수 있는 교섭 기반을 확보할 수 있다.

**(나) 2단계**

주로 대규모 가스전에 집중하고 있는 선진사의 진출이 상대적으로 적은 원격지, 중소가스전을 대상으로 전략적인 기획, 개발형 사업을 추진하며 대외 인지도 및 실적을 확보할 수 있으며, 선진사와 본격적인 기술 제휴 및 컨소시엄 구성에 있어서 전략적 활용도가 큰 장점이 있다.

주의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 플랜트기술고도화사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

# 제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "LNG 플랜트 공정제어 설계기술 개발"과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2016 . 1 . 18

공동연구기관명 : 고등기술연구원
공동연구책임자 : 박찬국
연 구 원 : 김형진
" : 임동렬
" : 김문현
" : 이재용
" : 이춘식
" : 이정승

# 보 고 서 요 약 서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>가스플랜트<br>-D02</td><td>해 당 단 계<br>연 구 기 간</td><td>2009.04.18.<br>~2015.12.17</td><td>단 계 구 분</td><td>총 단계</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">플랜트 연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위<br>과 제 명</td><td colspan="4">LNG 플랜트 설계기술 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">LNG 플랜트 공정제어 설계기술 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>박찬국</td><td>총연구기간<br>참 여<br>연구원수</td><td>총 : 13명<br>내부 : 13명<br>외부 : 명</td><td>총연구비</td><td>정부 :<br>3,148,000천원<br>기업 :<br>1,065,500천원<br>계 :<br>4,213,500천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및<br>소 속 부 서 명</td><td colspan="2">고등기술연구원<br>플랜트엔지니어링 본부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">광신기계공업 외 2</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>284</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 1kg/h급 BSU 플랜트 설계 및 구축<br>• BSU 플랜트 공정 설계 및 건설<br>• BSU 플랜트 공정제어 설계기준 정립 및 개발<br>• BSU 플랜트 구성 단위공정의 동특성 정보 및 운전기술 개발<br>• 최적 제어를 위한 APC 적용 기술개발<br><br>○ 100톤/일급 테스트베드 공정제어 기준 개발<br>• 테스트베드 적용 제어로직 및 주요공정의 BSU 적용을 통한 사전 점검 연구<br>• 테스트베드 공정제어기술(regulatory) 및 APC 기술 확보<br>• 테스트베드 실적용을 위한 최적 regulatory 제어 최적화<br><br>○ 상용급 공정제어 기준 개발<br>• 상용급 LNG 플랜트 제어를 위한 기본설계 패키지 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어<br>(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">천연가스, 액화, 밴치스케일유닛, 고급공정제어, 제어로직</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Natural gas, Liquefaction, BSU, APC, Control logic</td></tr>
</table>

# S U M M A R Y

## Ⅰ. Title: Development of LNG Plant Process Control Design Technology

## Ⅱ. Research and Development Project Summary

The objectives of the R&D project is to validate the appropriateness of process composition and control logic of 100ton/day-scale test bed in advance, through design and construction of Bench-scale Unit of LNG liquefaction process. The final goal of the project lies in establishing the process control design technology of large-capacity LNG plant, including optimal regulatory control and Advanced Process Control of LNG liquefaction plant.

The development of process technology and control logic by examining the operational characteristics of major parts, prior to construction of commercial-scale plant, which is to be applied to test bed, is very important in optimal design and operation of liquefaction plant.

The scope of the R&D project is as follows:

○ 1kg/h-scale LNG BSU design and construction
- LNG BSU process design and construction
- Development of LNG BSU process control design criteria
- Development of dynamic properties and operational technology of LNG BSU unit process
- Development of APC application technology for optimal control

○ Development of 100ton/day-scale test bed process control criteria
- Research on pre-test of control logic by applying LNG BSU technology to important processz
- Securing of regulatory control technology and Advanced Process Control technology of test bed
- Optimization of regulatory control that can be applied to test bed

○ Development of commercial-scale process control standards
- Development of basic design package for commercial-scale LNG plant control

## Ⅲ. Research and Development Contents and Results

Research and development contents and results can be summarized as follows:

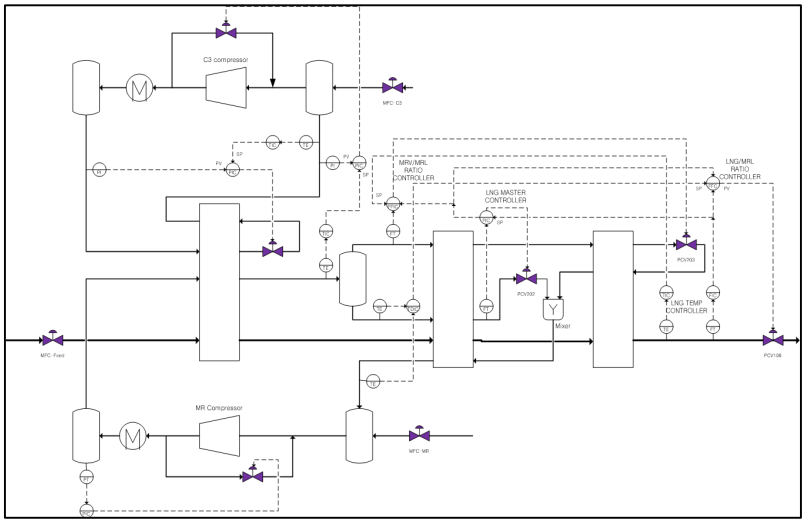
○ Survey of natural gas liquefaction process technology and LNG BSU design
- Literature survey of existing liquefaction plant
- Basic design of LNG BSU liquefaction process
- Selection of equipments and instruments of LNG BSU unit process and detail design

○ Construction and operation of LNG BSU
- Construction of LNG liquefaction process BSU
- Trial oeration of LNG BSU and derivation of unit facility operational characteristics
- Improvement of LNG BSU operation results and complementation of continuous operation facility
- Derivation of LNG BSU continuous operational characteristics
- Performance evaluation of domestic equipments
- Troubleshooting of LNG BSU
- Database construction of operation results

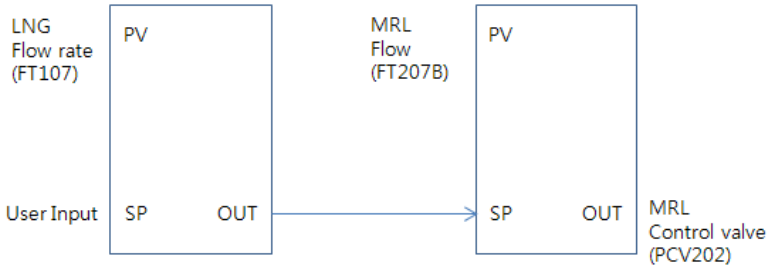
○ Development of LNG liquefaction process control design package
- Development of validation model for test bed train-1 control logic
- Regulatory control optimization of test bed train-1
- Securing of instrumentation and control standards for test bed process
- Design of test bed process control optimization
- Optimization of commercial-scale LNG liquefaction plant control design
- Application of APC to LNG liquefaction process

## Ⅳ. Final Research Results and Application Cases

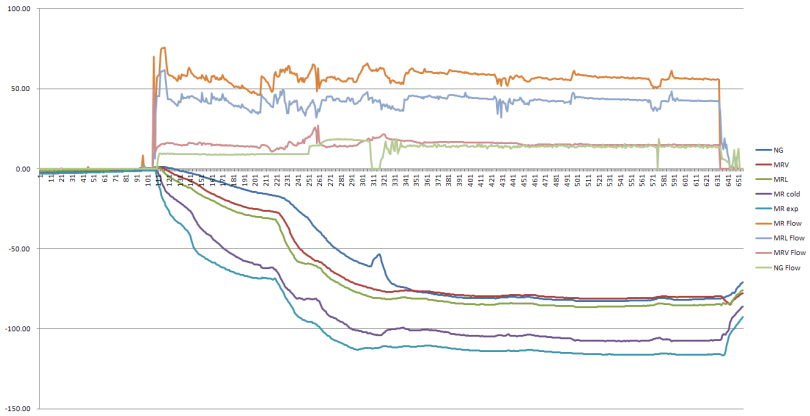
◦ Application of test bed train-1 control logic to LNG BSU
- Validation of test bed train-1 control logic by applying test bed train-1 control logic, which is based on commercial-scale LNG plant design, to LNG BSU




<LNG BSU control logic>




<LNG master controller block diagram for PLC implementation>




<Validation of test bed train-1 control logic by experiment on LNG BSU>

◦ LNG liquefaction process BSU prototype plant

- Operation of reciprocating propane compressor and experiment of propane refrigeration cycle
- Operation of reciprocating mixed refrigerant compressor and experiment of mixed refrigerant refrigeration cycle
- Application of domestic equipment such as Main Cryogenic Heat Exchanger (MCHE)

to LNG BSU and test of temperature drop

• Application of domestic equipment such as cryogenic control valve for J-T effects to LNG BSU and test of temperature drop and flow rate control

## Ⅴ. Research Objective Achievement and Effects

| Objectives | Achievement Rate (%) | Contents |
|---|---|---|
| Analysis of commercial-scale LNG liquefaction plant components and control methods | 100 | - Literature survey of commercial-scale LNG liquefaction plant components<br>- Commerical-scale LNG liquefaction plant control system survey<br>- Patents survey of liquefaction process |
| Analysis of control logic for test bed train-1 | 100 | - Analysis of control methods of test bed train-1<br>- Feasibility study of test bed train-1 control system |
| Basic design of LNG BSU considering scale-up | 100 | - Basic design of LNG BSU<br>* PFD & P&ID<br>* Unit facility specification<br>- Process simulation of steady state |
| Basic design of LNG BSU control system | 100 | - Selction of LNG BSU control points<br>- Bascis design of LNG BSU control system |
| Construction of LNG BSU | 100 | - Construction of skid-mounted type LNG BSU considering test bed train-1<br>- Inspection of completion and safety test |
| Operation of LNG BSU and derivation of unit facility operational characteristics | 100 | - Operation of LNG BSU unit facilities<br>- Derivation of LNG BSU unit facilities' characteristics |

| | | |
|---|---|---|
| Improvement of LNG BSU operation results and complementation of continuous operation facility | 100 | - Operation of propane compressor<br>- Operation of mixed refrigerant compressor<br>- Operation and improvement of entire liquefaction cycle |
| Derivation of LNG BSU continuous operational characteristics | 100 | - Maintenance of entire liquefaction cycle<br>- Liquefaction of natural gas<br>- Maintenance of stable state and analysis of operational characteristics |
| Performance evaluation of domestic equipments | 100 | - Performance evaluation of refrigerant compressor<br>- Performance evaluation of heat exchanger |
| Database construction of operation results and troubleshooting of LNG BSU | 100 | - Database construction of operation results<br>- Trouble-shooting report |
| Development of validation model for test bed train-1 control logic | 100 | - Analysis of control logic for test bed train-1<br>- Development of validation model for test bed train-1 |
| Regulatory control optimization of test bed train-1 | 100 | - Design of 2 types for test bed control<br>- Process simulation and analysis for 2 types of control |
| Securing of instrumentation and control standards for test bed process | 100 | - Securing of standards of instrumentation equipments selection<br>- Securing of standards of instrumentation system components selection<br>- Securing of instrumentation and control equipments scope |
| Design of test bed process control optimization | 100 | - Implementation of test bed train-1 control logic in LNG BSU<br>- Design performance validation by operation of LNG BSU |

| | | |
|---|---|---|
| Optimization of commercial-scale LNG liquefaction plant control design | | - Analysis of commercial-scale LNG plant process<br>- Design of commercial-scale LNG liquefaction plant control |

## VI. Application Plan of Research Results

One of application plan is to contract the execution of technology with manufacturing companies of main equipments of LNG BSU, such as plate-fin type cryogenic heat exchanger, refrigerant compressor. Having not only performance evaluation of unit equipments, but also plant system operation experiences, it is possible to have contracts with the manufacturing companies. To apply to commercial-scale plant, the scale-up and validation technologies must be additionally complemented. Since heat exchangers and compressors are critical equipments in not only LNG plant but also shipbuilding and offshore plant, the research results of this projects can be applied to such fields.

The other application plan is to enter into small-scale LNG plant market in overseas. There are many undeveloped small gas wells in China, Indonesia and Thailand. The experiences of design, construction and operation of LNG BSU can be applied to such niche markets.

# C O N T E N T S


Chapter 1 Summary of R&D Project ····· 19
Section 1 Objectives and Needs of R&D ····· 19
Section 2 Definition, Scope and Characteristics of R&D ····· 20
Section 3 State-of-the-Art of Technology Development ····· 23
1. State-of-the-Art of Technology Development in the World ····· 23
2. Domestic Market Trend ····· 26
3. Overseas Market Trend ····· 27
Section 4 R&D Results' Position in Related Fields ····· 27

Chapter 2 R&D Contents and Results ····· 29
Section 1 R&D Strategies and Methods ····· 29
Section 2 R&D Processes and Contents ····· 30
1. Survey of LNG Liquefaction Process and Design of BSU ····· 30
(1) Literature Survey of Existing Liquefaction Plant ····· 30
(2) Basic Design of LNG BSU Liquefaction Process ····· 45
(3) Detailed Design of LNG BSU and Selection of Unit Equipments and Instruments ····· 57
2. Construction and Operation of LNG BSU ····· 80
(1) Construction of LNG Liquefaction Process BSU ····· 80
(2) Pre-commissioning of LNG BSU and Derivation of Operational Characteristics of Unit Equipments ····· 89
(3) Supplement of LNG BSU after Reviewing Pre-commissioning Results and Supplement of Facilities for Continuous Operation 81
(4) Derivation of Continuous Operational Characteristics of LNG BSU 131
(5) Performance Evaluation of Domestic Equipments ····· 81
(6) Troubleshooting of LNG BSU Operation ····· 169
(7) Construction of Operation Database ····· 182
3. Development of LNG Liquefaction Process Control Design Package 181
(1) Development of Test Bed (Train-1) Control Logic Validation Model ····· 185
(2) Optimization of Test Bed (Train-1) Regulatory Control ····· 91
(3) Establishment of Instrument/Control Standards for Each Test Bed

Process ····· 207
(4) Optimal Design of Test Bed Process Control ····· 2
(5) Design Optimization of Commercial-scale LNG Liquefaction Plant Control ····· 219
(6) Application of APC to LNG Liquefaction Process ····· 2
Section 3 R&D Results and Validation Methods ····· 24

Chapter 3 Final Research Results and Application Cases ····· 242
Section 1 Basic Design Package of LNG Liquefaction Process Control System ····· 242
Section 2 LNG Liquefaction Process BSU Prototype ····· 24

Chapter 4 Research Objective Achievement and Effects ····· 252
Section 1 Degree of Final Objective Achievement ····· 2
Section 2 Technological Effects Analysis of R&D Achievements ····· 4
Section 3 Economical Effects Analysis of R&D Achievements ····· 5
Section 4 Analysis of R&D Achievements' Effects on Policy ····· 6

Chapter 5 Application of R&D Achievements and Additional Research Needs ····· 262
Section 1 Application Plan of R&D Achievements ····· 2
Section 2 Additional Research Needs ····· 6

References ····· 266

[ Appendix ]
1. BSU Heat & Mass Balance ····· 2
2. BSU Equipment List ····· 274
3. BSU Instrument List ····· 276

# 요 약 문

Ⅰ. 제목: LNG 플랜트 공정제어 설계기술 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

본 과제는 LNG 액화공정에 대한 BSU(Bench Scale Unit)의 건설과 운전을 통하여 100톤/일 규모 테스트베드의 공정구성 적합성과 제어로직을 사전에 점검하고 최종적으로는 LNG 액화플랜트의 최적 공정제어기술(regulatory)과 고도공정제어(APC, Advanced Process Control)를 포함하는 대용량 LNG 플랜트의 공정제어 설계기술 확립에 최종 목표를 두고 있다.

이러한 테스트베드에 적용될 공정기술과 제어로직의 개발은 상용 플랜트 건설 전에 주요 부분들에 대한 운전특성을 사전에 점검함으로서 보다 효율적인 액화 플랜트의 최적설계 및 운전 최적화에 매우 중요하다.

주요 개발목표에 대한 내용은 다음과 같다.

○ 1kg/h급 BSU 플랜트 설계 및 구축
- BSU 플랜트 공정 설계 및 건설
- BSU 플랜트 공정제어 설계기준 정립 및 개발
- BSU 플랜트 구성 단위공정의 동특성 정보 및 운전기술 개발
- 최적 제어를 위한 APC 적용 기술개발

○ 100톤/일급 테스트베드 공정제어 기준 개발
- 테스트베드 적용 제어로직 및 주요공정의 BSU 적용을 통한 사전 점검 연구
- 테스트베드 공정제어기술(regulatory) 및 APC 기술 확보
- 테스트베드 실적용을 위한 최적 regulatory 제어 최적화

○ 상용급 공정제어 기준 개발
- 상용급 LNG 플랜트 제어를 위한 기본설계 패키지 개발

## Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

연구개발 수행내용은 다음과 같이 요약될 수 있다.

○ LNG 액화 공정 사전조사 및 BSU 설계
- 선진 액화 플랜트 자료 조사
- LNG 액화 공정 BSU 기본 설계
- BSU 플랜트 단위 장치 및 현장계기 선정과 상세설계

○ LNG 플랜트 BSU 제작 및 운전
- LNG 액화 공정 BSU 제작
- BSU 시운전 및 단위설비 운전 특성 도출
- BSU 시운전 결과 보완 및 연속운전 설비보완
- LNG BSU 연속운전 특성 도출
- 국산 기자재 성능 평가
- BSU trouble shooting
- 운전 결과 DB 구축

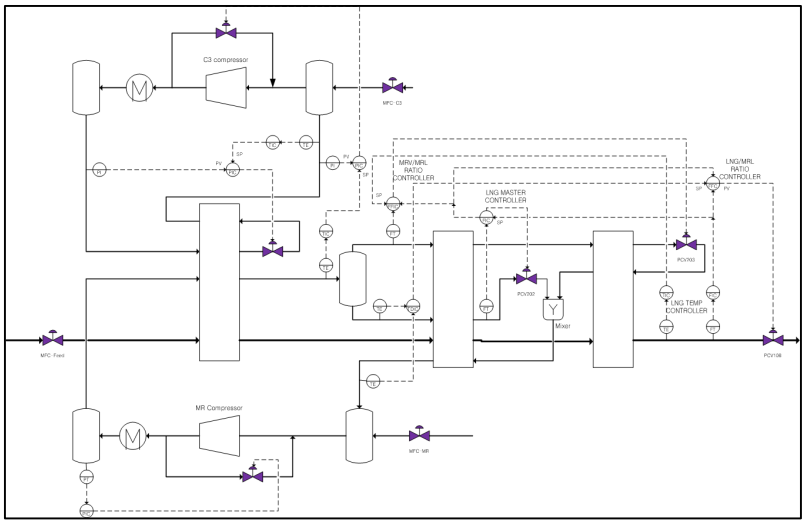
○ LNG 액화 공정 제어 설계 패키지 개발
- 테스트베드(Train-1) 제어로직 검증 모델 개발
- 테스트베드(Train-1) regulatory 제어 최적화
- 테스트베드 공정별 계측/제어 표준정립
- 테스트베드 공정제어 최적화 설계
- 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계 최적화
- LNG 액화 공정의 APC 적용

## Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

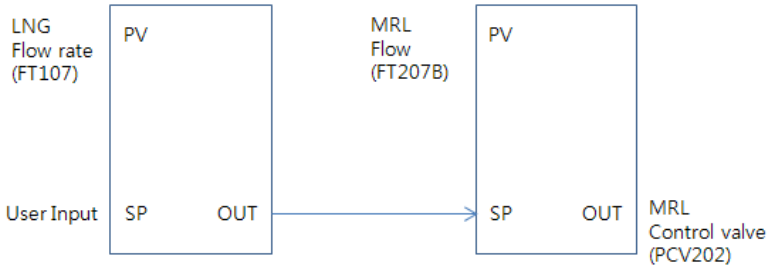
○ 테스트베드(Train-1) 제어로직 BSU 적용

본 연구과제의 성과물인 BSU는 테스트베드(Train-1)의 기본설계를 바탕으로 제작되어진 파일럿 플랜트이기 때문에 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 적용하는데 적합한 모델이라 할 수 있다. 그림은 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 BSU에 구현하기

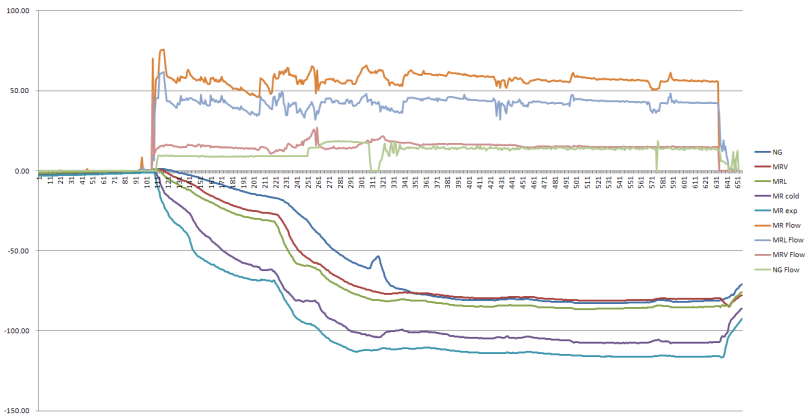
위한 설계안이다. 프로판 예냉 사이클은 테스트베드와 구조가 다르기 때문에 자체 제어로직을 적용하였고, MCHE 부분을 테스트베드(Train-1)과 일치하게 구성하였다.




<LNG BSU 제어 전략>




<LNG 마스터 제어기 블록 다이어그램>




<LNG BSU 현장적용 실험에 의한 테스트베드 Train-1 제어로직 검증>

○ BSU 시작품을 이용한 현장적용

- 왕복동형 프로판 압축기 시운전 및 프로판 사이클 구성 실험
- 왕복동형 혼합냉매 압축기 시운전 및 혼합냉매 사이클 구성 실험
- 국내에서 제작한 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)를 BSU 현장에 적용해서 온도 강하 테스트
- 국내에서 제작한 초저온 제어밸브(J-T 효과용) BSU 적용 및 온도 강하 및 유량 조절 테스트

## Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

| 목 표 | 달 성 도 (%) | 내 용 |
|---|---|---|
| 상용 LNG 액화플랜트 구성 및 제어방식 분석 | 100 | - 상용 LNG 액화 플랜트 구성 정보 수집<br>- 상용 LNG 액화 플랜트 제어시스템 조사<br>- 액화 공정 특허 분석 |
| Test-bed(Train 1) 제어로직 분석 | 100 | - 테스트베드(Train 1)의 제어방식 분석<br>- 테스트베드(Train 1) 제어시스템 타당성 조사 |
| Scale-up을 고려한 BSU 플랜트의 기본설계 | 100 | - BSU 기본 설계서<br>* PFD & P&ID<br>* 단위 설비 사양서<br>- 공정 모사(Steady stete) |
| BSU 플랜트의 제어시스템 기본설계 | 100 | - BSU 제어포인트 선정<br>- BSU 제어시스템 기본 설계 |
| BSU 플랜트 제작 | 100 | - 테스트베드(Train-1)를 고려한 스키드형 제작<br>- 완성검사 및 안전테스트 |
| BSU 시운전 및 단위설비 운전특성 도출 | 100 | - BSU 단위설비 시운전<br>- BSU 단위 설비 특성 도출 |

| | | |
|---|---|---|
| BSU 시운전 결과 보완 및 연속운전 설비 보완 | 100 | - 프로판 압축기 시운전<br>- 혼합냉매 압축기 시운전<br>- 전체 사이클 시운전 및 보완 |
| LNG BSU 연속운전 특성 도출 | 100 | - 전체 사이클 유지<br>- 천연가스 액화<br>- 안정상태 유지 및 운전 특성 분석 |
| 국산 기자재 성능 평가 | 100 | - 냉매 압축기 성능평가<br>- 열교환기 성능평가 |
| BSU DB 구축 및 trouble shooting | 100 | - 운전데이터 DB화<br>- trouble shooting 보고서 |
| 테스트베드(Trin-1) 제어로직 검증 모델개발 | 100 | - 테스트베드(Train-1) 제어 로직 분석<br>- 테스트베드(Train-1) 검증 모델 개발 |
| 테스트베드(Train-1) regulatory 제어 최적화 | 100 | - 테스트베드 제어 설계안 2가지 type 설계<br>- 두 type에 대한 공정 모사 및 분석 |
| 테스트베드 공정별 계측/제어 표준정립 | 100 | - 계측기기 선정 기준 정립<br>- 계측 시스템 구성 기준 마련<br>- 계측/제어 종류 및 범위 정립 |
| 테스트베드(Train-1) 공정제어 최적화 설계 | 100 | - 테스트베드(Train-1) 제어 로직 BSU 구현<br>- BSU 운전을 통한 설계 성능 검증 |
| 상용급 LNG 액화 플랜트 제어설계 패키지 개발 | 100 | - 상용급 LNG 플랜트 공정 분석<br>- 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계 |

## Ⅵ. 연구성과 활용계획

성과 활용방안으로 LNG BSU를 구성하는 핵심 기자재 (플레이트 핀형 초저온 열교환기, 냉매 압축기) 개발 기업과의 기술 실시 계획을 가지고 있다. 기자재 단품만의 성능 검증뿐만이 아니라 플랜트 시스템 운영 경험을 보유하고 있으므로 기술 실시가 가능할 것으로 판단된다. 상용급 플랜트에 적용하기 위해서는 scale-up 및 검증 기술을 추가적으로 보완해야 할 부분이다. 열교환기와 압축기는 LNG 플랜트 분야뿐만 아니라 조선해양 등 타 분야에서도 핵심 기자재이므로, 본 연구 성과를 활용할 수 있을 것으로 보인다.

플랜트 시스템 활용방안으로 해외 중소형 LNG 플랜트 시장 진출 사업화가 가능하다. 중국, 동남아 (인도네시아, 태국 등)에 상당수의 개발되지 않은 소형 가스전을 개발하는 틈새시장 사업에 본 과제의 LNG BSU 설계, 건설, 운전 경험과 실적을 활용할 수 있다.

# 목 차

**제1장. 연구개발과제 개요 ····· 19**
제1절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 19
제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 20
제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 23
1. 세계 기술개발 동향 ····· 23
2. 국내 시장 동향 ····· 26
3. 국외 시장 동향 ····· 27
제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치 ····· 27

**제2장. 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 29**
제1절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 29
제2절 연구수행과정 및 내용 ····· 30
1. LNG 액화 공정 사전조사 및 BSU 설계 ····· 30
(1) 선진 액화 플랜트 자료 조사 ····· 30
(2) LNG 액화 공정 BSU 기본 설계 ····· 45
(3) BSU 플랜트 단위 장치 및 현장계기 선정과 상세설계 ····· 57
2. LNG 플랜트 BSU 제작 및 운전 ····· 80
(1) LNG 액화 공정 BSU 제작 ····· 80
(2) BSU 시운전 및 단위설비 운전 특성 도출 ····· 89
(3) BSU 시운전 결과 보완 및 연속운전 설비보완 ····· 108
(4) LNG BSU 연속운전 특성 도출 ····· 131
(5) 국산 기자재 성능 평가 ····· 158
(6) BSU trouble shooting ····· 169
(7) 운전 결과 DB 구축 ····· 182
3. LNG 액화 공정 제어 설계 패키지 개발 ····· 185
(1) 테스트베드(Train-1) 제어로직 검증 모델 개발 ····· 185
(2) 테스트베드(Train-1) regulatory 제어 최적화 ····· 196
(3) 테스트베드 공정별 계측/제어 표준정립 ····· 207
(4) 테스트베드 공정제어 최적화 설계 ····· 210
(5) 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계 최적화 ····· 219
(6) LNG 액화 공정의 APC 적용 ····· 222

제3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 ····· 241

**제3장. 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 242**
제1절 LNG 액화 공정 제어시스템 기본설계 패키지 ····· 242
제2절 LNG 액화 공정 BSU 시작품 ····· 247

**제4장. 연구목표의 달성 및 효과 ····· 252**
제1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 252
제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 254
제3절 연구개발 성과의 정제적 효과분석 ····· 259
제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 261

**제5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 262**
제1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 262
제2절 추가연구 필요성 ····· 265

**참고문헌** ····· 266

**[ 부 록 ]**
1. BSU Heat & Mass Balance ····· 269
2. BSU Equipment List ····· 274
3. BSU Instrument List ····· 276

# 1장 연구개발과제 개요

## 1절 연구개발의 목적 및 필요성

본 과제는 LNG 액화공정에 대한 BSU(Bench Scale Unit)의 건설과 운전을 통하여 100톤/일 규모 테스트베드의 공정구성 적합성과 제어로직을 사전에 점검하고 최종적으로는 LNG 액화플랜트의 최적 공정제어기술(regulatory)과 고도공정제어(APC, Advanced Process Control)를 포함하는 대용량 LNG 플랜트의 공정제어 설계기술 확립에 최종 목표를 두고 있다. 이러한 테스트베드에 적용될 공정기술과 제어로직의 개발은 상용 플랜트 건설 전에 주요 부분들에 대한 운전특성을 사전에 점검함으로서 보다 효율적인 액화 플랜트의 최적설계 및 운전 최적화에 매우 중요하다.

주요 개발목표에 대한 내용은 다음과 같다.

○ 1kg/h급 BSU 플랜트 설계 및 구축
- BSU 플랜트 공정 설계 및 건설
- BSU 플랜트 공정제어 설계기준 정립 및 개발
- BSU 플랜트 구성 단위공정의 동특성 정보 및 운전기술 개발
- 최적 제어를 위한 APC 적용 기술개발

○ 100톤/일급 테스트베드 공정제어 기준 개발
- 테스트베드 적용 제어로직 및 주요공정의 BSU 적용을  통한 사전 점검 연구
- 테스트베드 공정제어기술(regulatory) 및 APC 기술 확보
- 테스트베드 실적용을 위한 최적 regulatory 제어 최적화

○ 상용급 공정제어 기준 개발
- 상용급 LNG 플랜트 제어를 위한 기본설계 패키지 개발

## 2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

본 과제는 LNG 액화 플랜트에 대한 BSU(Bench Scale Unit, 30kg/h급)의 건설과 운전을 통하여 100톤/일 규모 테스트베드(Test-Bed)의 단위공정 구성 적합성과 제어로직의 사전점검을 연구 목표로 한다. 최종적으로는 LNG 액화플랜트의 최적 공정제어기술(regulatory)과 고도공정제어(APC, Advanced Process Control)를 포함하는 대용량 LNG 플랜트의 공정제어 설계기술 확립에 최종 목표를 두고 있다.

과제의 핵심기술은 공정제어 기술로, 공정 모델링 소프트웨어 및 BSU 플랜트 건설을 통해 BSU에서의 최적의 공정제어 기술을 개발 하고, 이를 테스트베드 건설시 활용하며 상용 플랜트 건설시 관련 기술의 적용방안을 제시한다. 이러한 테스트베드에 적용될 공정기술과 제어로직의 개발은 상용 플랜트 건설 전에 주요 부분들에 대한 운전특성을 사전에 점검함으로서 보다 효율적인 액화 플랜트의 최적설계 및 운전 최적화에 매우 중요하다.

전체 과제성격으로 볼 때 제3핵심과제는 천연가스 액화공정기술을 기반으로 LNG 플랜트를 설계, 시공, 유지관리기술을 개발하기 위한 과제로, 플랜트 공정에서의 제어 기술은 전체 공정의 안전성을 보장하며, 운전의 안정성을 유지하고 환경적 제약을 만족시키는데 중요한 요소로 본 과제는 이러한 공정제어기술이 핵심이다.

본 과제는 3핵심 과제의 테스트베드 설계 기술의 검증을 위하여 2핵심 및 1핵심 과제와의 협업을 통해 진행될 예정이며, BSU 플랜트의 과제에서 역할을 그림 1.2.1에 간략하게 나타내었다.




그림 1.2.1. BSU 플랜트 과제와 관련 핵심과제와의 연계도

표 1.2.1. 연도별 연구내용 및 개발목표

| 구분 | 연구내용 | 개발목표 |
|---|---|---|
| 2차년도<br>(2009.4<br>~<br>2010.4) | - 상용 LNG 액화플랜트 구성 및 제어방식 분석<br>- Test-bed(Train 1) 제어로직 분석<br>- 액화 플랜트 공정제어기술 및 APC 기술 조사<br>- Scale-up을 고려한 BSU 플랜트의 기본설계<br>- BSU 플랜트의 제어시스템 기본설계 | - 제어로직 분석 보고서<br>- 기술조사 보고서 |
| 3차년도<br>(2010.4<br>~<br>2011.4) | - BSU(Train-1) 플랜트 단위장치 및 현장기기 선정과 상세설계 및 동적해석<br>- BSU(Train-1) 플랜트 제작<br>- 테스트베드(Train 1)의 제어로직 분석 및 검증 | - LNG 플랜트 BSU 설계집<br>- BSU Pilot Plant 구축<br>- 테스트베드(Train 제어로직 검증 모델 개발 |
| 4차년도<br>(2011.4<br>~<br>2012.4) | - BSU(Train-1) 시운전 및 특성 분석<br>- 시운전 결과 보완 및 설비 보완<br>- Test-bed 적용 Regulatory 제어 최적화<br>- Test-bed에 적용될 국산부품 시험적용 및 문제점 분석<br>- 제어방식별 테스트결과 DB화 시스템 구축<br>- Test-bed에서 예상되는 trouble shooting 자료확보 | - BSU(Train-1) 플랜트 성능 보고서<br>-Test-bed(Train-1) BSU 적용 안 도출<br>- 제어방식별DB System 구축 |
| 5차년도<br>(2012.4<br>~<br>2013.4) | - 테스트베드(Train-1)의 제어로직 BSU에 구현<br>- 테스트베드(Train-1)의 제어로직 검증을 위한 실험과 결과 도출<br>테스트베드에 적용될 국산 기자재 성능 확인 평가<br>LNG 액화 공정을 위한 APC 설계 | - 테스트베드(Train-1) 제어로직 BSU 구현<br>-테스트베드(Train-1) 제어로직 구현 결과<br>- LNG 액화 공정에 적용 가능한 모델 개발 |
| 5차년도<br>(2013.4<br>~<br>2014.4) | - LNG 액화 공정을 위한 APC 알고리즘 개발<br>- MCHE 성능 검증<br>- 상용급 제어시스템 기본설계 | - APC 알고리즘 개발<br>- 상용급 제어시스템 기본 설계 패키지 개발 |

표 1.2.2. 총 연구개발 수행기간에서 양적성과 목표 및 실적

| 성과지표 | | | 최종목표 | 누적실적 | 최종달성률(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 학술지 게재 논문 | SCI | 국내 | 1 | 1 | 100 |
| | | 국외 | - | - | - |
| | 비SCI | 국내 | 7 | 4 | 57 |
| | | 국외 | - | - | - |
| 특허 출원 | 출원 | 국내 | 8 | 8 | 100 |
| | | 국외 | 0 | 0 | 0 |
| | 등록 | 국내 | 1 | 7 | 700 |
| | | 국외 | - | - | - |
| 해외 기술 지원 건수 | | | - | - | - |
| 개발된 기술의 현장 검증 및 적용(건수) | 현장 검증(경험) | | 3 | 5 | 166 |
| | 현장 적용 | | - | - | - |
| 기술 실시 계약(기술료) | 건수 | | - | - | - |
| | 백만원 | | - | - | - |
| 전문 인력 양성 | | | - | - | - |
| 관련 분야 국제 협력 | | | - | - | - |
| 민간 투자 유인 효과 | 건수 | | - | - | - |
| | 백만원 | | - | - | - |
| 시작품 | | | 2 | 2 | 100 |
| 시제품 | | | - | - | - |
| 학술 회의/발표 | 국내 | | 18 | 30 | 166 |
| | 국외 | | - | - | - |
| 시험조사/관측 | | | 6 | 6 | 100 |
| 해외진출을 위한 현장조사 실적 | | | 2 | 0 | 0 |
| 산학연간 기술 지원 | | | 5 | 5 | 100 |
| 기술확산 교류 | | | 5 | 5 | 100 |
| 산학연 협력 활동 | | | 4 | 4 | 100 |
| 연구 관련 홍보 | | | 3 | 3 | 100 |
| 비용 절감 | 건수 | | - | - | - |
| | 백만원 | | - | - | - |
| 수입 대체 | 건수 | | - | - | - |
| | 백만원 | | - | - | - |
| 기타 저작권 | 실용신안 | | - | - | - |
| | 디자인,S/W등 | | - | - | - |

# 3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 세계 기술개발 동향

액화공정을 통한 LNG 플랜트 단위 Train당 LNG 생산량은 계속해서 증가해왔고 이러한 경향은 그림 1.3.1에서 보듯이 2020년까지 지속될 것으로 전망되고 있다. 이러한 생산능력의 증가는 공정의 변화를 요구하게 되었고 2000년 이전 5MTPA급 이하 규모에서 C3MR공정을 통해 세계시장을 잠식해왔던 미국 APCI의 위상 변화와 함께 대용량 생산공정의 기술 확보를 통한 타 기업의 시장 진입과 점유율 증대의 기회가 도래했음을 그림 1.3.2를 통해 알 수 있다.

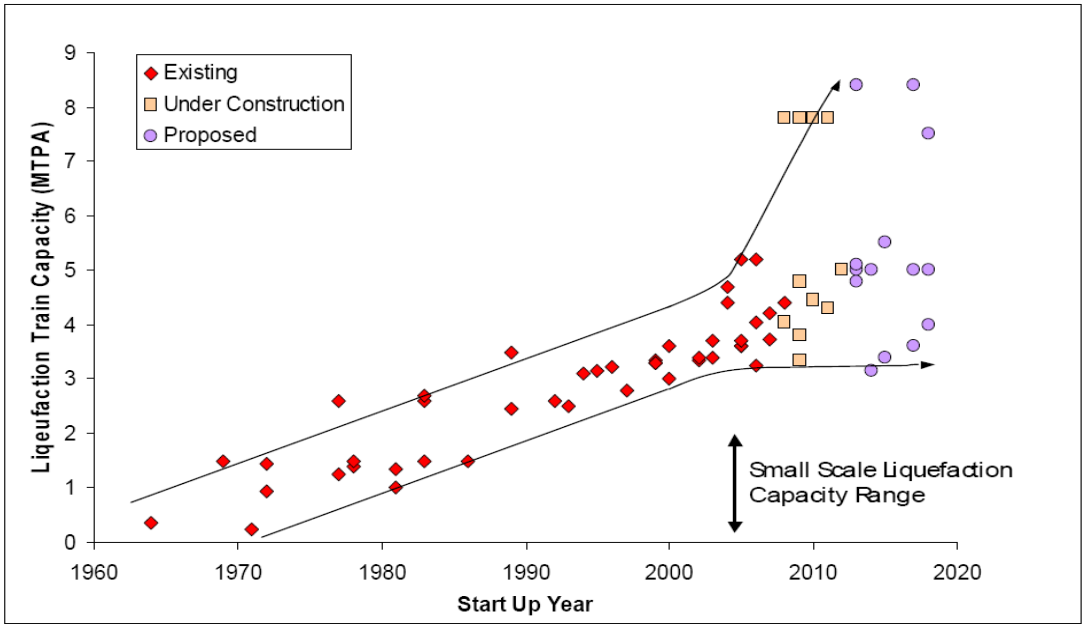



그림 1.3.1 연간 LNG 생산량 변화 추이 (Data source: GTI and Shell)

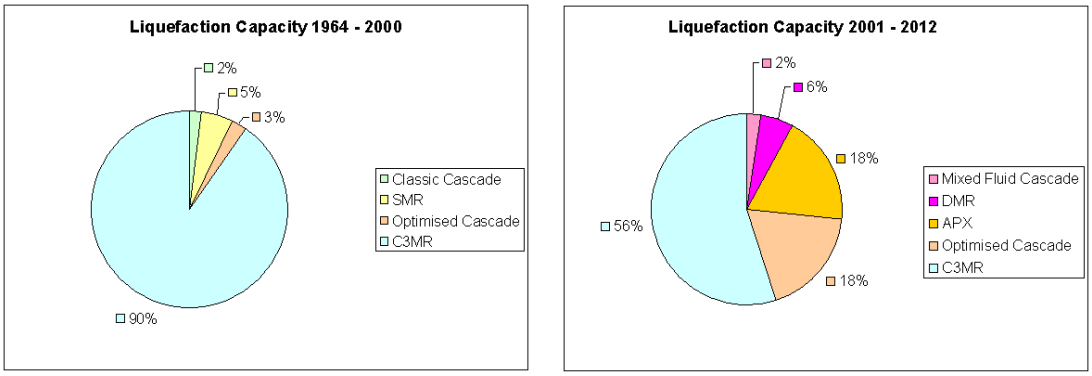



그림 1.3.2 LNG 기술 발전 추이 (Data source; Wood Mackenzie)

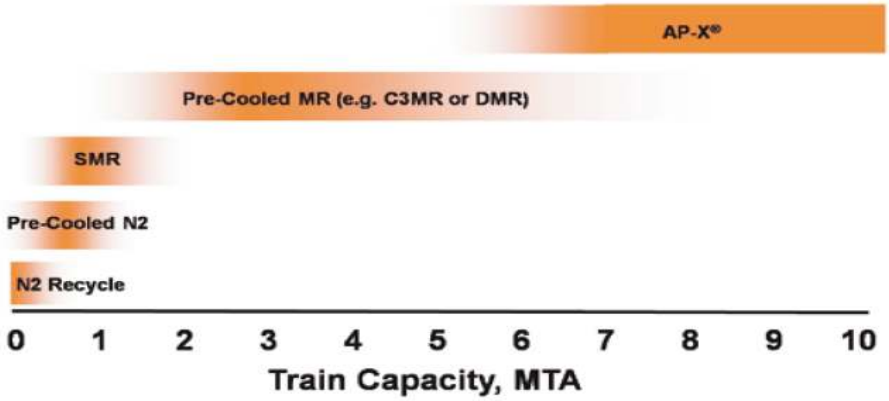



그림 1.3.3 공정별 LNG 생산량 (Data source: APCI)

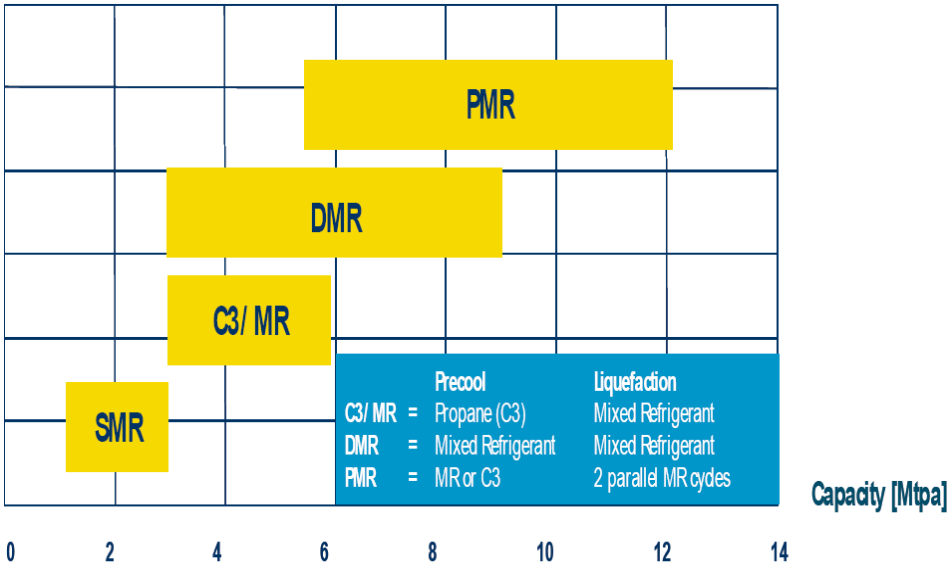



그림 1.3.4 공정별 LNG 생산량 (Data source: Shell)

따라서 증대되는 LNG 생산능력 변화에 대한 공정개발의 방향으로 APCI사는 그림1.3.3에서 알 수 있듯이 10MTPA이하에서 AP-X공정으로 대응한다는 전략이고 Shell, Linne 등의 기업은 그림1.3.4에 도시된 9MTPA, 12MTPA까지 LNG 생산이 가능한 DMR, PMR공정을 통해 경쟁한다는 계획이다.

가. AP-X 공정

AP-X 공정은 기존 C3MR 공정에서 3번째 사이클에 해당하는 N2 사이클을 더함으로서 Propane, MR 사이클의 부하를 경감시켜 주고 결과적으로 생산능력의 증대를 이루어 내는 사이클이다. Propane 사이클에는 kettle 열교환기, MR 사이클에는 spiral wound 열교환기 그리고 N2 사이클에는 spiral wound와 plate-fin 열교환기를 사용하는 것이 특징이다.

나. DMR 공정

예냉 공정을 프로판 대신 혼합냉매를 사용함으로서 예냉과정에서 콘덴서의 용량을 작게 할

수 있고 프로판 압축기의 bottleneck(용량은 압축기 블레이드 팁에서의 마하수에 의해 제한을 받음)을 개선함으로서 LNG 생산용량을 증대 시킨다.

다. PMR 공정

3 사이클로 구성되어 있고 casecade 공정과 흡사하나 모든 사이클은 혼합냉매를 사용하고 각 사이클에 사용되는 동력은 다르며 spiral wound와 plate-fin 열교환기를 함께 사용한다.

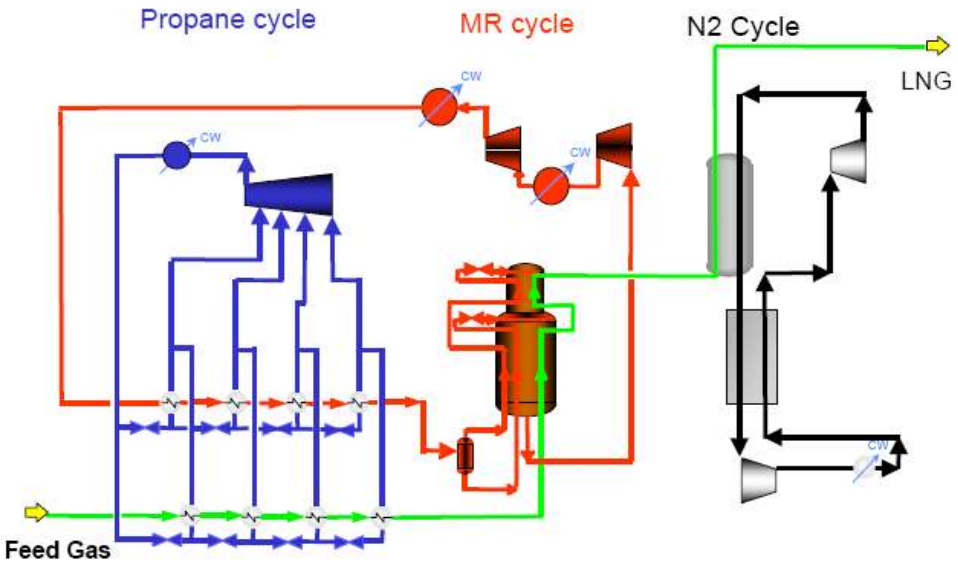



그림 1.3.5 AP-X 개략 공정도

(Data source: P. Martin, J. Pigourier, B. Fischer, "NATURAL GAS LIQUEFACTION PROCESSES COMPARISON")

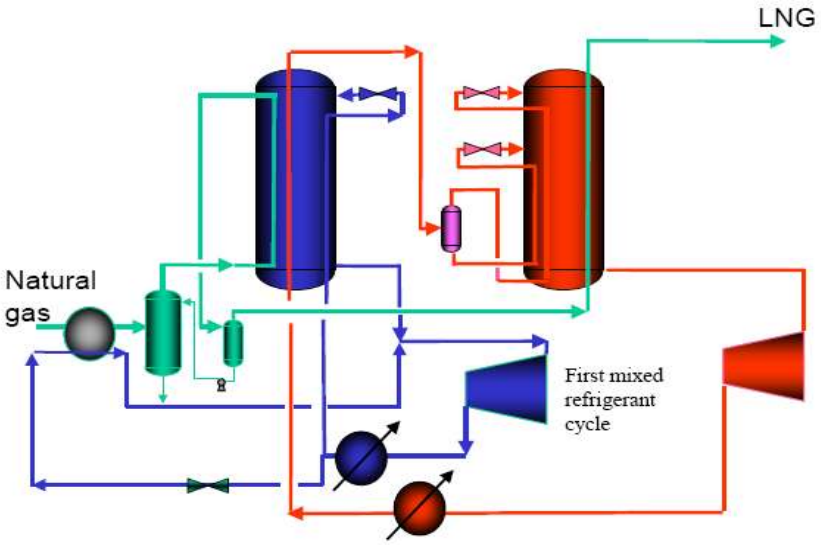



그림 1.3.6 DMR 개략 공정도

(Data source: P. Martin, J. Pigourier, B. Fischer, "NATURAL GAS LIQUEFACTION PROCESSES COMPARISON")

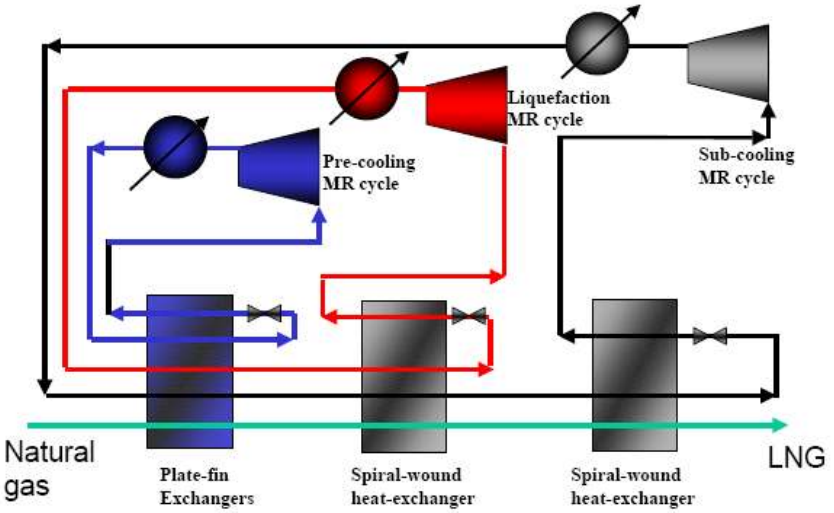



그림1.3.7 PMR 개략 공정도

(Data source: P. Martin, J. Pigourier, B. Fischer, "NATURAL GAS LIQUEFACTION PROCESSES COMPARISON")

2. 국내 시장 동향

LNG 플랜트 사업단을 통해 GS건설은 육상용 테스트베드 Train 2기를 건설하였고 이의 운전을 통해 국내 고유의 LNG 플랜트 기술을 확보하였다. 국내에는 소규모 가스전인 동해가스전을 제외하고는 가스전이 없어 테스트베드를 통해서 확보된 공정 제어 기술, 설계 기술 및 운전 유지 관리기술은 해외시장에 판매할 수 있을 것으로 전망이 된다. 특히 한국가스공사는 모잠비크 광구에 투자를, 한국석유공사는 미국내 셰일가스전 공동개발에 투자를 하고있는 가

운데 국내기업 중 유일하게 SK 이노베이션이 미국내 1개의 셰일가스전에 대한 개발권을 획득함으로서 국내기술을 통해 해외 가스전을 개발하는 방향이 활발히 전개될 것으로 예상된다.

3. 국외 시장 동향

LNG에 대한 전 세계의 수요는 계속 증가하고 있는 추세이며 특히 아시아 지역의 경우 매우 높은 경향을 보인다. 2010년 기준 전 세계의 수요량은 220 MT(Million Ton) 정도인데 반해 해마다 약 9MT 정도의 수요가 늘어나 2035년에는 454MT가 필요할 전망이며 그 중 60% 이상이 아시아에서 소비된다. 따라서 아시아 시장에의 안정적 공급을 위한 LNG 플랜트 건설은 시급히 요구되는 사안이라고 할 수 있으며 따라서 가스전이 없는 아시아 국가에서 공급자와의 장기적 계약을 통해 가스전에 대한 공동개발을 진행할 필요성이 있다.

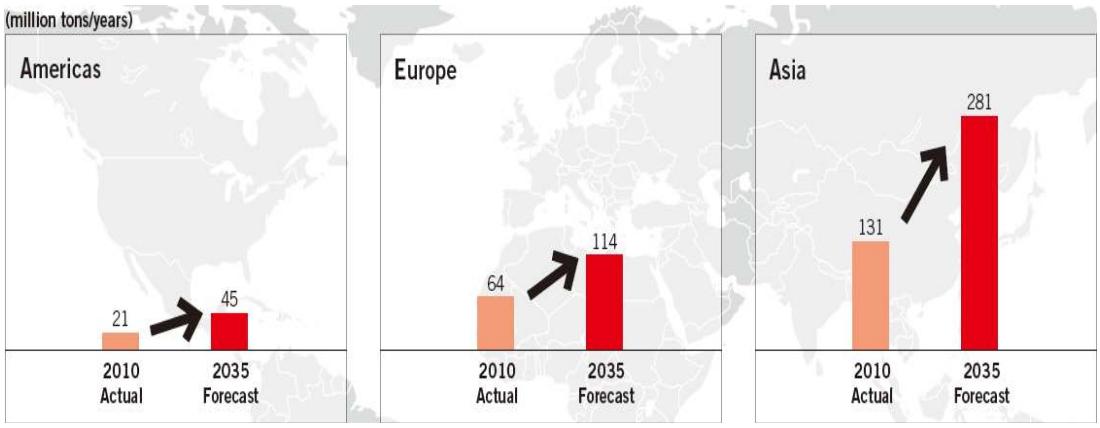



그림1.3.8 전 세계 LNG 수요 현황
(Data source: IEE Japan Asia/World Energy Outlook 2011,
BP Statistical Review of World Energy 2011

4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

본 과제는 LNG 플랜트 사업단에서 최종 성과물 성격인 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 사전 점검하고 최종적으로는 LNG 액화플랜트의 최적 공정제어기술을 확보하는 데 목표를 두고 있다. 이러한 기술개발을 통하여 보다 효율적인 액화 플랜트의 최적설계 및 운전 최적화에 기여하는 것이 가장 큰 기술개발의 성과라 할 수 있다.

기술적으로는 전체 LNG플랜트 설비비의 30-40%정도 차지하고, 전체공정의 효율, 운전 용이성, 신뢰성을 결정하는 주된 요소인 액화공정의 최적 운전 및 제어기술은 본 연구개발에만 국한 되지 않고 그 응용범위가 점차 넓어지는 cryogenic process에 확대 적용 가능하며 본 연구과제를 기반으로 한 LNG액화플랜트 국산화 기술을 통하여 국내·외적으로 선진기술 수준과의 격차 해소로 LNG 액화플랜트의 세계시장으로의 진출도 꾀할 수 있다.

그림 1.4.1은 LNG 플랜트 전체 공정에서 액화 플랜트 위치를 나타내고 있으며 아래의 비율은 전체 비용에서 해당 공정에 투입되는 비용을 백분율로 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 LNG 플랜트에서 가장 많은 기술적, 경제적 비중을 차지하는 것으로 LNG 플랜트에서 액화 기술은 핵심 기술이라 말할 수 있다.

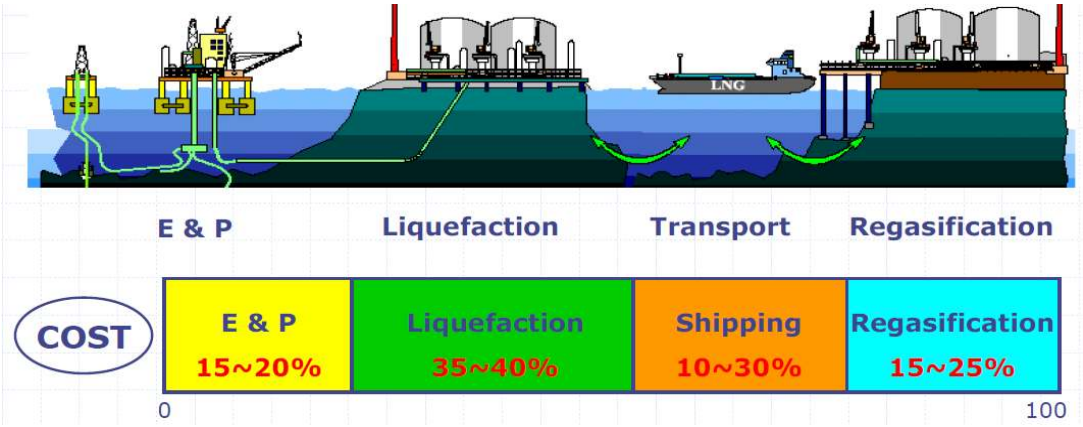



그림 1.4.1. LNG 플랜트 요소 기술 구성 및 비중

본 과제에서 도출한 연구개발 결과를 기반으로 해서 국내 LNG 액화 플랜트의 기술적 향상을 이루어 해외 플랜트 건설 사업 참여시 국내 플랜트산업 활성화 및 신규 고용 효과 창출이 가능하고 천연가스로부터 합성석유 제조기술의 확보에 의한 해외 미개발 가스전 (주로 0.5~5 Tcf 규모의 가스전)에서의 사업 참여시 막대한 기술료 지출 절감 및 사업 참여 기회가 증대될 것이다. 해외 플랜트 시장에 대한 경제적인 효과 뿐 아니라 상대적으로 선진국에 뒤쳐진 플랜트 기자재 분야에도 새로운 시장을 창출 할 수 있으므로 국내 플랜트 기자재 분야의 발전에 큰 촉매제 역할을 할 수 있다.

따라서 본 과제를 통한 국내 플랜트 관련 산업에서 차지하는 역할은 직접적인 해외 시장 진출의 발판이 되며, 해당 부분의 국내 기자재 업체의 시장 창출과 기술 개발 능력 향상을 도모해서 국내 산업 발전에 디딤돌 역할을 할 것으로 기대된다.

# 2장 연구개발 수행 내용 및 결과

## 1절 연구수행 전략 및 방법론

◦ 공동 연구기관인 고등기술연구원은 주관연구기관인 ㈜GS 건설에서 설계 및 건설하는 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 사전 점검하여 테스트베드(Train-1)의 완성도를 높인다.

◦ 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 사전 점검하기 위해서 고등기술연구원에서는 LNG 액화 플랜트의 BSU(Bench Scale Unit)를 설계 및 제작하여 실험을 통해서 검증된 결과를 주관기관에서 피드백하여 테스트베드의 설계 및 건설 완성도를 높인다.

◦ 고등기술연구원의 참여기업인 광신기계공업(주)은 BSU에 적합한 압축기의 설계 자료와 운전 매뉴얼 등을 제공하며, 타 세부기관에서 함께 사업에 참여하는 ㈜동화엔텍은 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)를 설계 및 제작하고, BSU에 장착하여 국산 기자재의 설계 성능을 검증 한다.

◦ Regulatory 제어로 구성된 테스트베드(Train-1)의 제어 성능을 BSU로 검증하고, 보다 진보된 APC(Advanced Process Control)를 이용해서 액화 플랜트 제어 성능을 높여 상용급 LNG 액화 플랜트의 제어 기술을 정립한다.

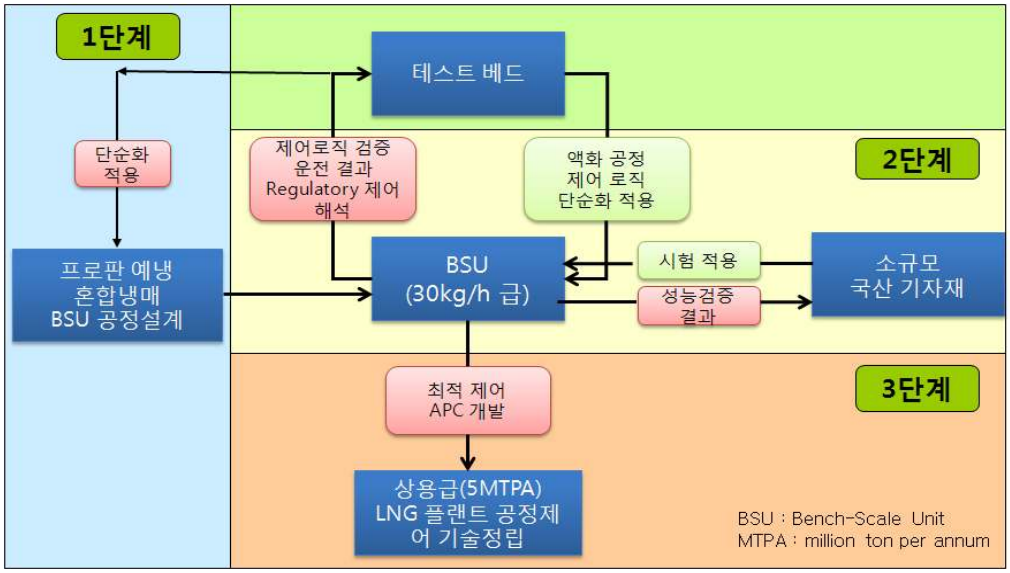



그림 2.1.1. 단계별 연구 수행 전략

## 2절 연구수행과정 및 내용

### 1. LNG 액화 공정 사전조사 및 BSU 설계

#### (1) 선진 액화 플랜트 자료 조사

LNG 액화 플랜트의 공정을 말할 때, 보통 냉동 사이클이 어떤 냉동 사이클을 이용하여 액화하는지를 말한다. 천연가스를 액화하기 위한 사이클에는 Joule-Thomson 팽창, 팽창 기관 (expansion engine), Casecade 방식 등이 있으며, Cascade 방식이 천연가스의 액화에 경제적인 것으로 평가되고 있다. 이러한 방식의 선택은 플랜트 사업성에 큰 영향을 미치는 인자로서 플랜트의 규모, 가스의 조성, 목적, 입지 등을 고려하여 열역학적 유용성, 건설비 운전비 등을 감안하여 종합적으로 평가하여 결정한다.

따라서, 현존하는 LNG 액화 플랜트의 액화 공정 기술은 여러 가지 공정이 있으며, 또 같은 공정이라 하더라고 상황에 따라 약간 씩 틀린 형태가 나오기도 해서 실제 상용 액화 플랜트 공정은 상당히 다양하다고 할 수 있다.

전 세계적으로 널리 사용되어지고 있는 혼합 냉매를 이용한 LNG액화시스템은 다성분 냉매방법 및 저온장치 산업전반에 걸쳐 사용되고 있다. 특히 LNG플랜트의 제어기술은 LNG 수율에 영향을 미치고 전체 공정의 안전성을 보장하며, 운전의 안정성을 유지하고 환경적 제약을 만족시키는데 중요한 요소이다. 특히 극저온 열교환기의 온도를 특정 범위로 유지하는 제어기술은 LNG 플랜트에서의 액화공정 및 하위단계 그리고 그것을 구성하는 단위 설비들에서 야기될 수 있는 문제를 해소하는데 매우 중요하다. 또한 LNG 생산량을 설정하고 이를 유지시킴으로써 LNG 생산량의 계획 및 생산을 효과적으로 조절할 수 있다. 또한 LNG 플랜트와 같은 대형 공정 설비에서는 안정적인 제어를 통한 운전이 필요하고, 설비 운전 시 제약조건들이 많으므로 효율적인 공정 설비의 운영을 위해서는 더욱 중요하다. 널리 알려진 상용 LNG 플랜트는 단위공정의 조합에 따라 다양한 설비구성과 제어방식을 보이며, 본 연구를 위해서는 이러한 상용공정의 분석 및 공정제어 방식의 연구가 필요하다. 아래 Table 1는 이러한 상용공정에 대한 기술 설명과 방법들을 나타내었다.

표 2.2.1. 상용 LNG 플랜트

| Mixed Refrigerants | Pure Refrigerants | Both | Other |
|---|---|---|---|
| Linde-MFCP | CoP Simple cascade | APCI C3/ MR | BP Self refrigerated process |
| Axens Liquefin Process | CoP Enhanced cascade | APCI APX | ABB Randall Turbo-Expander |
| Dual Mixed Refrigerant | | $CO_2$ MFCP | Williams Field Services co. |
| Technip-TEALARC | | | Mustang Group Smart Liquefaction |
| ExxonMobil Dual Multicomponent | | | |
| Black and Veatch Prico Process | | | |
| Technip-Snamprogetti | | | |

가. Black and Veatch's Prico Process

이 공정은 현재 산업 운용에서 가장 기초적이고 간단한 것 중 하나로 대형 열교환기와 단일 혼합 냉동 사이클로 구성된다. 처리용량이 1.2MTPA로 혼합냉매는 methane, ethane, propane, pentane, nitrogen이 사용된다.

나. Dual Mixed Refrigerant

이 공정은 APCI C3/MR공정과 유사하게 두 가지 냉동 사이클을 가진다. 첫 번째 냉동사이클은 ethane과 propane의 혼합 냉매를 이용한 사이클이며 두 번째 냉동 사이클은 nitrogen, methane, ethane, propane and butane의 혼합 냉매를 이용한다. 대략 4.5 MTPA 정도의 용량을 처리할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

다. APCI C3/MR

APCI C3/MR공정은 두 개의 냉각 사이클로 구성되어져 있다. 먼저 C3 사이클에서는 propane을 이용하여 MCHE로 유입되기 전 천연가스를 예냉하는 사이클로 이는 고압, 중압, 저압의 서로 다른 압력을 사용하는 열교환기들로 구성되어진다. 혼합냉매로 methane, ethane, propane, butane, nitrogen이 사용된다. APCI C3-MR 공정은 액화공정 중에 가장 널리 사용되어진 공정으로 액화산업의 90%가 이 공정을 사용하고 있다. 또한 이 공정은 최초의 상업화액화공정으로 가장 오랫동안 사용되어졌으며 가장 큰 용량을 가지고 있다. C3-MR 공정은 최대 용량이 대략 5MTPA이나 높은 장치비용을 가진다. propane 사이클로 인하여 높은 장치비용뿐만 아니라 압축기에서 운전비용 또한 많은 비중을 차지한다.

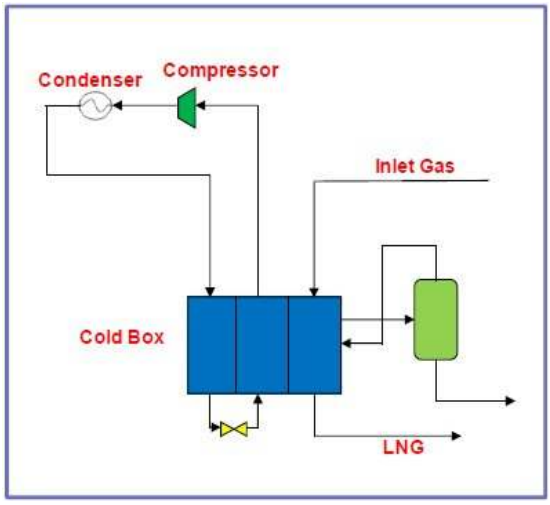



그림 2.2.1. Prico 공정 흐름도

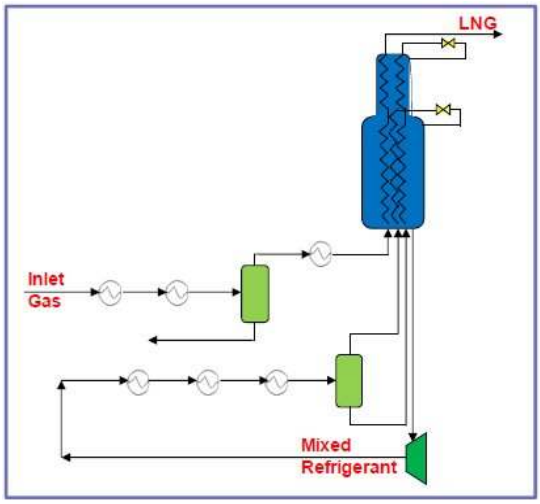



그림 2.2.2. C3/MR 공정 흐름도

라. APCI AP-X

APCI AP-X공정은 APCI C3/MR 공정의 복합 개량형이다. MCHE 후단에 Nitrogen sub-cooling 사이클을 추가하여 공정의 효율과 용량을 증가 시킨 공정이다. pre-cooling 사이클과 subcooling사이클을 이용하여 MCHE의 처리용량을 줄인 공정이다. 혼합냉매는 C3/MR공정과 같은 비율로 matane, ethane, propane, butane, nitrogen으로 구성된다.

최종 sub cooling 사이클은 두 개의 압축기로 구성되어 있으며 순수한 nitrogen을 사용한다. 순수한 Nitrogen은 혼합냉매 보다 더 낮은 온도로 냉각할 수있는 장점을 가지고 있다. 이 공정은 용량을 5MTPA에서 거의 9MPTA 까지 증가할 수 있다.

AP-X공정은 C3/MR 공정에서 열교환기 후단의 N2사이클 첨가만으로 용량증대를 이루 수 있어 대용량이 요구되는 최근 산업현장에서 각광받고 있다.

마. Axens Liquefin Process

Liquefin 공정의 특성은 양쪽 두 냉각사이클에 혼합냉매를 포함하는 것이다. 하나는 처리 전의 천연 가스의 예냉공정이며 또 다른 사이클은 최종 액화공정을 위한 냉각사이클이다. 이렇게 구성된 이유는 작업 분할을 통하여 생산 용량을 증가 시킬 술 있는 이점이 있다. Liquefin 공정의 최대용량은 약 6MTPA로 보고되어진다. 예냉공정에서 천연가스는 -70F에서 -80F로 냉각된다. 효과적인 혼합냉매의 구성으로 압축기의 처리용량을 감소시킬 수 있다. 마지막 액화 단계에서 압축과 냉각을 통하여 대부분 양을 액화시킨다. 두 개의 분리 압축기를 사용하고 대량의 냉각제를 혼합함으로서 작업을 효율적으로 수행한다. 특히 이 공정은 최대량의 상태로 신속히 가동되며 사용되는 냉매양을 유동적으로 변화시킬 수 있어 유연한 운전특성을 가진다. 혼합냉매는 methane, ethane, propane, butane, nitrogen로 구성된다.

특별히 이 공정에서 사용되는 열교환기는 multiple plate fin 열교환기로 coldbox의 크기와 유사하게 열교환기 크기를 유지할 수 있다. 또한 이공정은 압축기의 크기를 조절하여 냉매량을 조절하여 최대용량 7-8MTPA까지 가능하도록 구성되어있다.

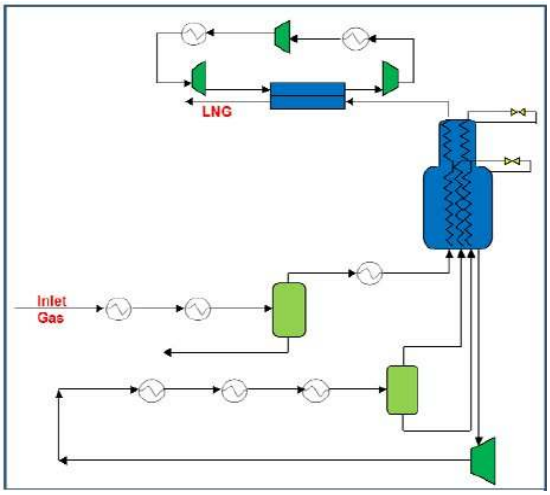



그림 2.2.3. AP-X 공정 흐름도

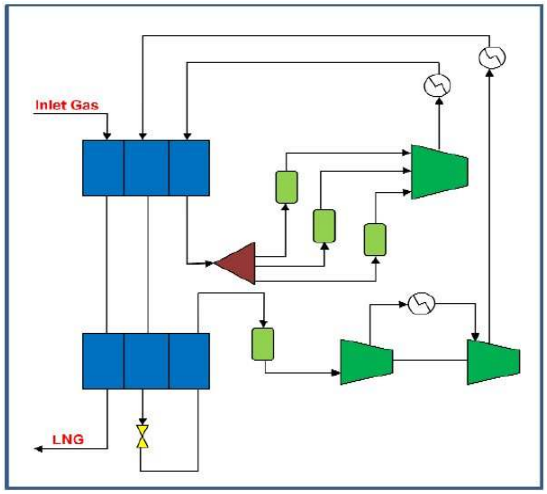



그림 2.2.4. Liquefin 공정 흐름도

바. ExxonMobil Dual Multicomponent process (US patent no.: 6,250,105)

이 공정은 1999년 ExxonMobil 이 특허를 받았다. 이 공정은 두 개의 혼합 냉매 사이클을 사용하는 APCI의 DMR공정과 유사하다. 그러나 이 공정은 높고 낮은 압력의 두 냉각제 순환을 가지고 방향에 따라 바뀔 수 있다.

low-level의 냉매는 천연가스의 온도를 낮추고 액화하며, high-level의 냉매는 low-level의 냉매의 온도를 낮춘다. 이것은 하나의 순환에서 대부분의 에너지를 필요로 하는 양쪽 순환의 냉각에 필요한 일의 양을 줄일 수 있다. DMR 공정과 또 다른점은 20F와 40F사이로의 예냉 공정을 feed stream과으 열교환을 통하여 이루어진다는 점이다. 혼합냉매는 대부분 methaane, ethane, propane, butane, pentane등의 hydrocarbon으로 구성된다. 저압 사이클은 압력 범위 100psia에서 150psia 사이에서 운전된다. 이러한 구성으로 인하여 저압사이클의 압축기를 매우 효율적으로 다룰 수 있다. 고압사이클은 300-350psia사이에서 운전된다. 이 공정은 대용량공정으로 최대 9MTPA에서 사용된다.

사. Technip TEALARC process

이 공정은 두 가지 냉동사이클을 포함한다. 첫 번째 사이클의 냉매는 ethane 과 propane의 혼합물이다. 두 번째 사이클은 첫 번째 사이클로 부터 얻은 혼합냉매로 천연 가스를 냉각한다.

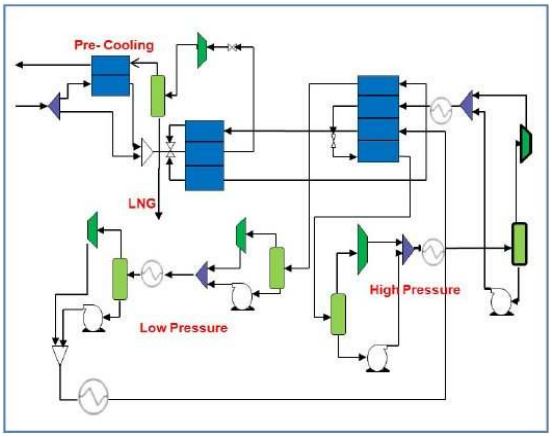



그림 2.2.5. ExxonMobil 공정 흐름도

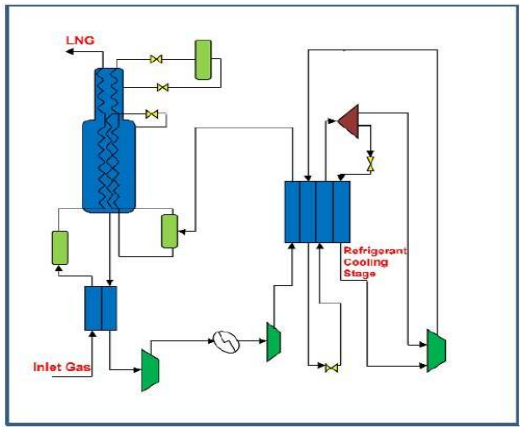



그림 2.2.6. Technip TEALARC 공정

아. BP Self Refrigerated process(US pat No. 6,564,578)

이 공정은 BP Corporation 이 2002년에 특허를 받은 기술로 지금껏 사용되지 않았던 외부 냉각의 방법을 이용한 획기적인 방법이다. 천연가스 flash drum을 이용하여 액상의 천연가스를 얻고 차가운 기상흐름은 천연가스의 냉각을 위해 재사용 되어진다. 이 공정은 4-5회가량 요구하는 LNG 온도에 도달할 때까지 반복하여 운전된다. 이 공정의 대분분의 운전비용은 냉각 탱크에서 액체와 기체를 분리할 때 발생한다.

자. Mustang Engineering Smart Liquefaction process(Pat No. 7225636)

Mustang Engineering은 디자인이 간단하기 때문에 공정을 쉽게 정지시킬 수 있고 다른 곳으로 이동하기도 쉽다. 하지만 이 장치 수가 많아지고 비용 또한 증가되는 문제점을 가지고 있다. 이 공정의 목적은 해양에서 채취하는 천연가스를 다루는 바지선을 위한 것으로 외부 냉각제가 없다. 대신에 천연가스를 나누어 자체 냉각을 위해 사용한다. 그렇기 때문에 별도의 냉각제용 탱크가 필요하지 않다. 이는 충분히 낮은 온도를 얻기 위해 압축과 확장에 더 많은 장비를 요구하게 된다.

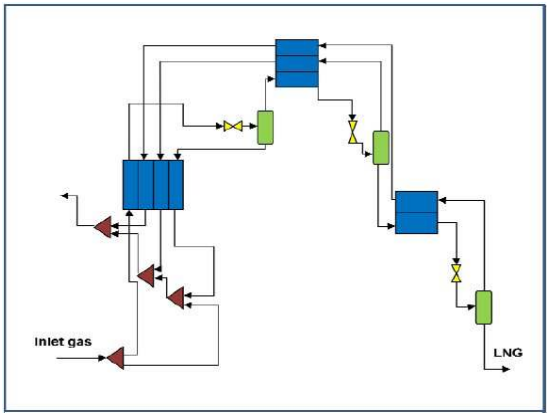



그림 2.2.7. BP 공정 흐름도

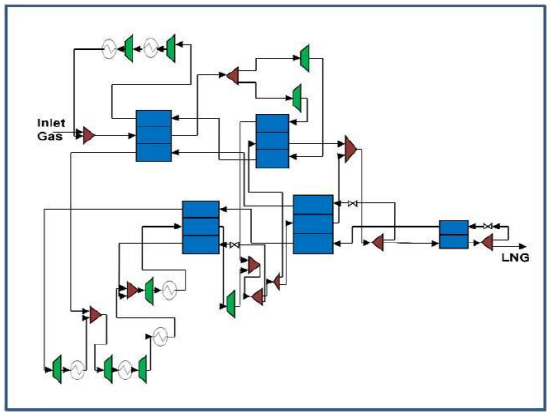



그림 2.2.8. Mustang Engineering 공정

차. Conoco Phillips Simple Cascade

이 공정은 3개의 냉각 사이클로 구성된다. 첫 번째 사이클은 3개의 냉각 단계이며 냉매는 propane 이다. 두 번째 공정은 5개의 냉각 단계 이며 냉매로 ethylene이 사용된다. 천연가스의 feed stream은 두 번째 사이클에서 나오는 다양한 steam을 재순환 시켜 조합한다. 액화된 steam은 LNG생산을 위해 두 번째 순환의 마지막 단계에서 응축된다. 세 번째 냉각 순환은 open-end methane 순환으로서 냉각순환에 사용하기 위한 feed gas의 한 부분으로 많은 단계를 가진 확장 순환이다. 더 많은 냉각과 두 번째 냉각 순환에서의 압력을 줄이기 위한 단계이다.

카. Mixed Fluid Cascade process

이 공정은 세 단계로 구성된다. Pre-cooling, 액화, Sub-cooling이다. 각 단계는 세 개의 분리 혼합 냉각 사이클에 의해 제어된다. 혼합된 냉매는 각기 다른 조성의 methane, ethane, propane, nitrogen으로 구성된다. 이 공정은 혼합된 냉매라는 점을 제외하면 원래의 simple cascade와 같은 공정으로 구성되어있다. 적절히 구성된 혼합냉매는 운전 유연성과 열역학 효율을 향상시킨다. 이 공정의 아이디어는 이전부터 사용되었으나 산업현장에 적용된 첫 번째 사례이다. 용량은 대략 8MTPA이다.

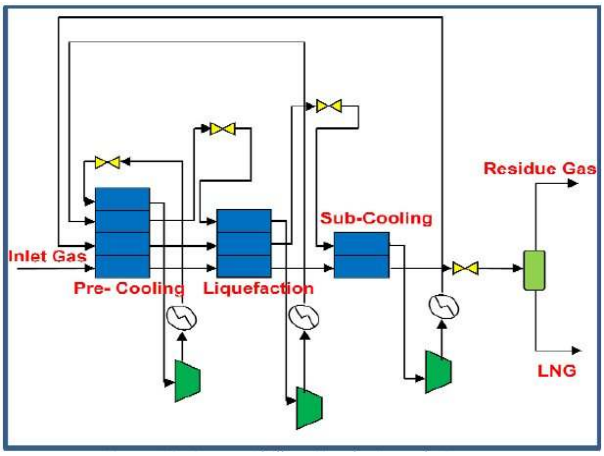



그림 2.2.9. ConocoPhillips 단순 캐스케이드 공정

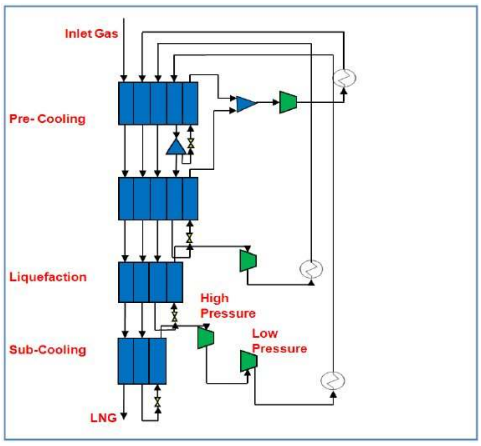



그림 2.2.10. Mixed Fluid Cascade 공정

파. CO2 Precooled Linde Process

이 공정은 이산화탄소를 냉매로 예냉 단계에 사용된 것 말고는 MFCP와 비슷한 공정이다. 이산화탄소를 사용한 이유는 공정을 보다 안정한 운전이 가능하기 때문이다. Pre-cooling 단계의 대부분은 탄화수소(C1,C2,C3등)를 사용하고 있고 이것을 이산화탄소로 대체하는 것은 처음 시도되는 것이다. 이것은 액화공정 또는 어는점 -69.88°F에서 생산된 드라이아이스를 이용하여한 sub-cooling 시스템이다. 이 공정의 capacity는 약 8MTPA로 추정된다.

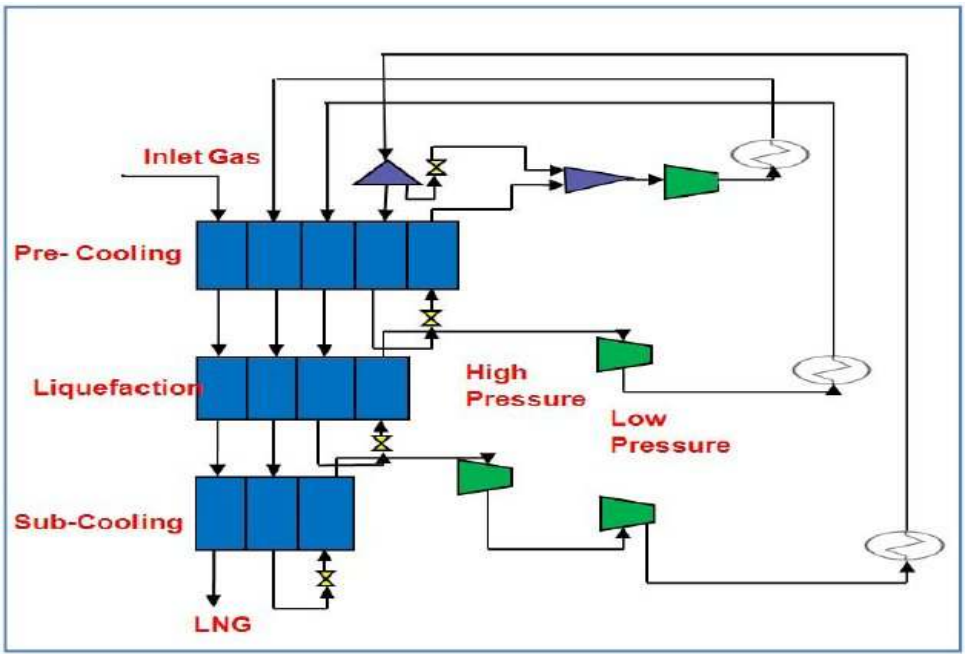



그림 2.2.11. CO2 예냉 MFC 공정

(2) 상용공정 제어구조

본 과제의 연구목표는 LNG 액화공정에 대한 BSU(Bench Scale Unit, LNG 액화용량 1kg/h급)의 건설과 운전을 통하여 100톤/일 규모 테스트베드의 공정구성 적합성과 제어로직을 사전에 점검하고 최종적으로는 LNG 액화플랜트의 최적 공정제어기술(regulatory)과 고도공정제어(APC, Advanced Process Control)를 포함하는 대용량 LNG 플랜트의 공정제어 설계기술 확립에 최종 목표를 두고 있다. 이러한 테스트베드에 적용될 공정기술과 제어로직의 개발은 상용 플랜트 건설 전에 주요 부분들에 대한 운전특성을 사전에 점검함으로서 보다 효율적인 액화 플랜트의 최적설계 및 운전 최적화에 매우 중요하다. LNG 액화공정의 제어로직 및 공정기술을 중심으로 해외 선진기술 및 공정 분석 및 국내·외 플랜트 산업계의 우수한 프로젝트의 벤치마킹을 통해 관련 분야 기술 개발을 연구하였다.

가. APCI C3/MR

기술을 보유하고 있는 기업은 APCI이고 현재 세계 시장의 90% 이상을 점유하고 있다. 현재 공칭생산용량은 연 4.7백만 톤이나 최근에 질소 Expender를 추가한 AP-X 개량공정이 개발되어 연 6백만 톤 이상도 가능하게 되었다.

이 공정의 일반적인 제어 구조는 그림 2.2.12에서 보이는 바와 같다.

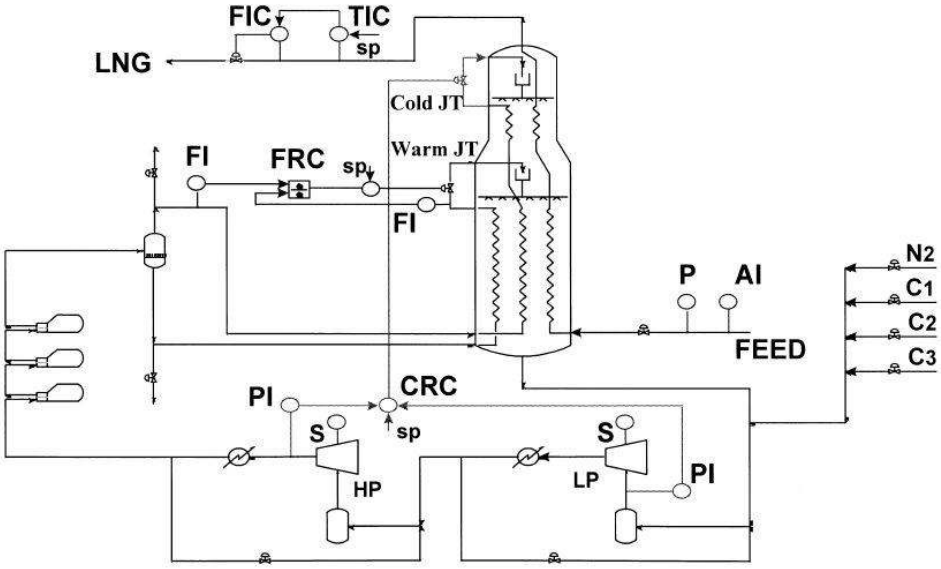



그림 2.2.12. C3/MR공정의 전통적인 regulatory 제어 구조

이 공정은 총 세 가지 피드백 제어루프로 구성되며 첫 번째 제어루프는 LNG 배출흐름의 온도에 따라 최종 유량을 제어하며 두 번째 제어루프는 혼합냉매의 액상과 기상의 비를 비교하여 고온의 JT밸브를 조절하는 루프이다. 세 번째 제어 루프는 압축비 제어기인 CRC제어기에 의해 혼합냉매 압축기의 압력비를 제어하기 위해 저온의 JT밸브를 제어하는 루프이다. 이 같은 제어 구조는 LNG 온도를 제어하는 목적으로는 적합하지가 않다. 이는 최종 생성물의 유속이 온도 및 유량에 직접적인 영향을 주지 않기 때문이다.

U.S. Pat No. 5791160에서는 기존의 전통적인 제어구조와는 달리 압축기 속도에 기초한 제어 방법과 재순환과정에 기초한 제어방법을 사용하여 LNG의 유속 및 온도가 각각 엄격히 제어됨을 보여주고 있다. 그 제어구조는 아래 그림 2.2.13과 같다.

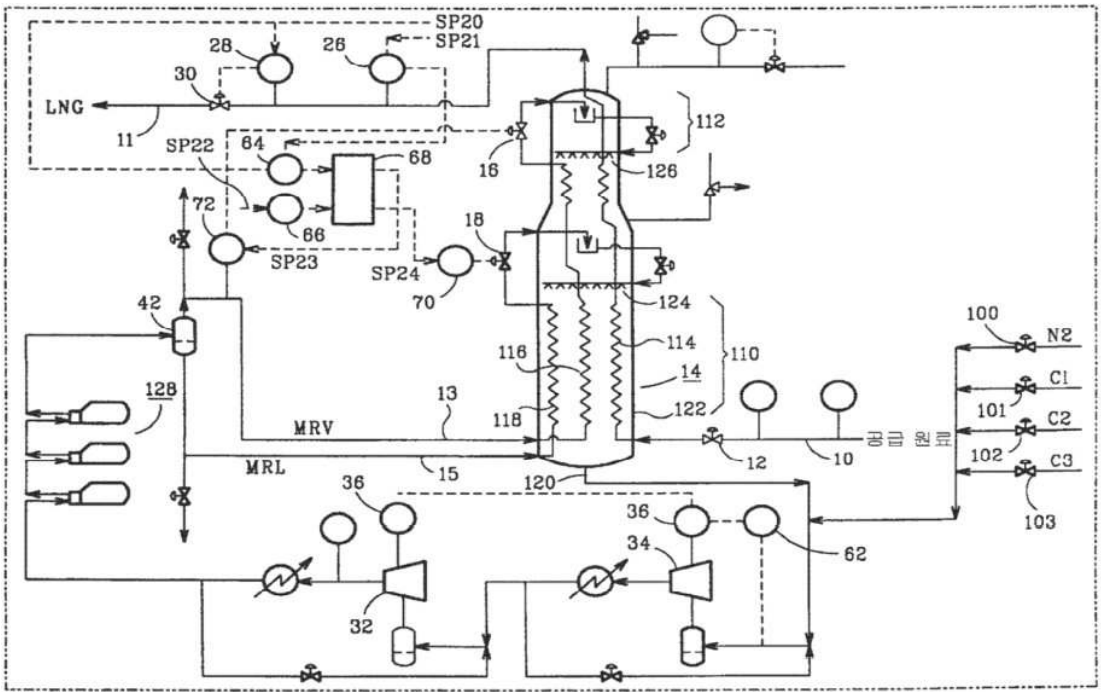



그림 2.2.13. C3/MR공정의 새로운 regulatory 제어 구조

이 특허에서는 LNG plant의 새로운 제어시스템 및 정밀 비선형 모델을 사용하여 LNG 동역학적 시뮬레이션을 통하여 제어성능을 검증 하였다.
제어시스템은 피드포워드 및 피드백 제어를 사용하는 냉매 재순환 과정에 기초한 제어 시스템을 사용하여 MRL 유속 및 MRV 유속, MRL/MRV 유속 비와 이후의 총 MR/LNG 유속 비를 변화시킴으로써 그리고 이어서 속도와 같은 압축기 MV를 현재의 MR 질량 흐름에 대한 압축기의 최적 조작 범위내의 값으로 조절하므로써 LNG 생산 온도를 조절한다.

나. Mixed Fluid Cascade Process

Statoil/Linde가 보유한 기술로 Mixed Refrigerant와 Cascade 공정이 결합된 기술로 간단한 개략도를 그림 2.1.14에 나타내었다. MFC 공정은 서로 다른 세 개의 냉동 사이클로 구성되어있으며 첫 번째 사이클은 고압과 저압의 사이클로 이루어져있다.

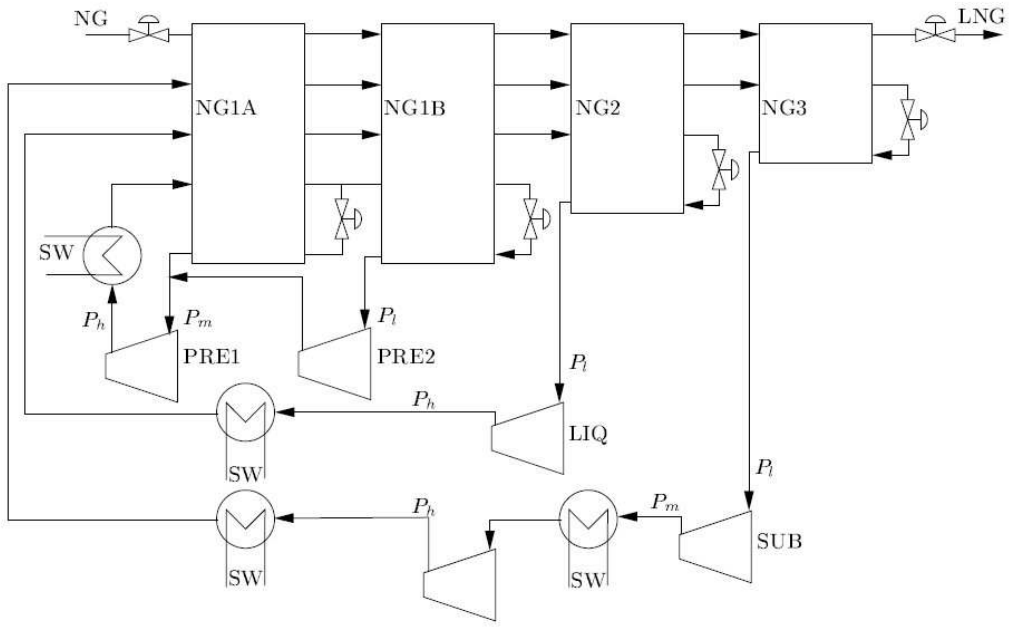



그림 2.2.14. MFC 공정

제어구조를 위한 변수 분석은 아래와 같다.

○ Manipulated variables(MV's):

5 Compressor power Ws,i

4 Choke valve opening zi

4 SW flows in coolers

1 NG flow

9 Composition of three refrigerants

3 active charges (one for each cycle)

○ Constraint during operation

Super-heating: Heat transfer in condenser

Pressure: 2 bar≥P≥60 bar

Compressor outlet temp.

○ Active constraints:

4 super-heatings to be minimized at 4 location

Excess cooling is costly so TLNG,out=-155℃

Optimal with low pressure in cycles so Pl=2 bar (for all 3 cycles)

Maximum cooling: assume △Tsup,i=11℃ at 4 location

○ Unconstrained degree of freedom

3 NG temp.(after NG1A and NG2B and NG2)

Pm in SUB

9 refrigerant composition

현재 공정에 사용되어지는 제어구조는 그림 2.1.15에 나타내었으며 최종 제어변수로 각 열교환기 후단의 온도를 제어하고 NG2의 압력을 제어함으로써 안정적인 LNG 생산을 가능하게 하였다.

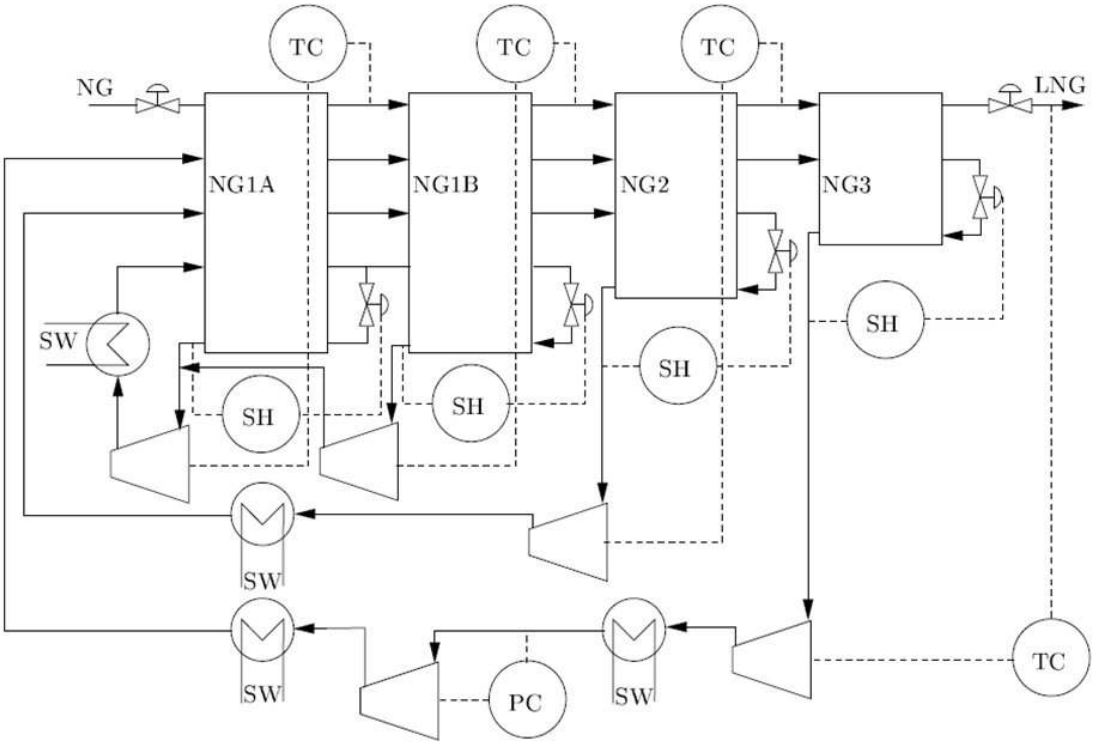



그림 2.2.15. MFC공정을 위해 제안된 제어구조

다. Single-cycle mixed fluid LNG (PRICO) process

그림 2.2.15와 2.2.16에 PRICO 공정의 개략도와 제어 구조를 나타내었다. 혼합냉매로는 33mol% C1, 35% C2, 0% C3, 25% C4, 7% N2가 사용되며 조작 변수는 아래와 같다.

○ Manipulated variables(MV's):

Compressor speed N

Choke valve opening z

Turbine power

Sea water flowrate

Natural gas feed flowrate

Composition of refrigerant (4)

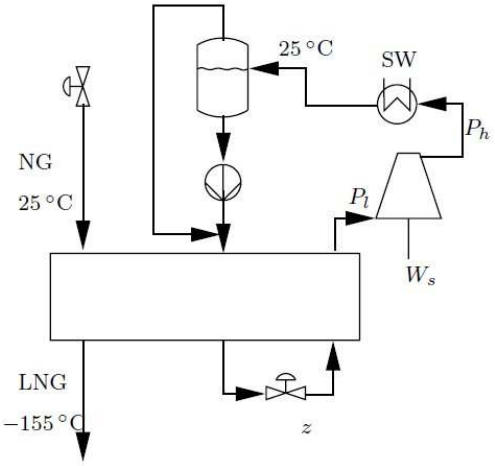



그림 2.2.16. PRICO 공정 개략도

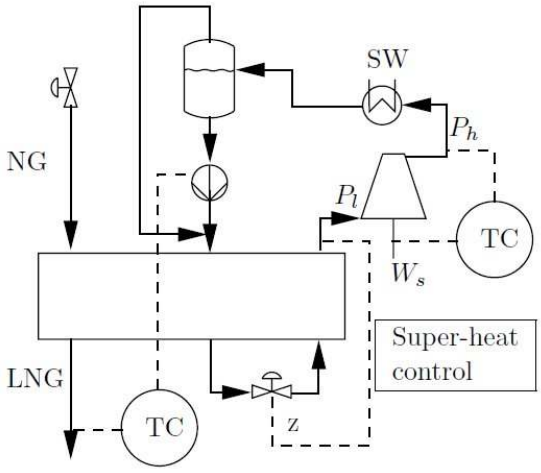
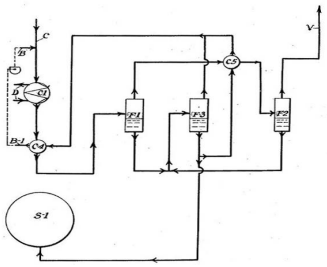
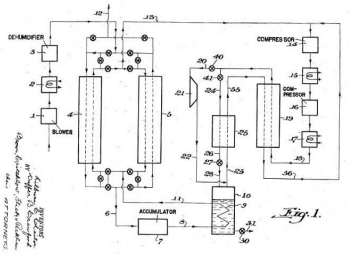
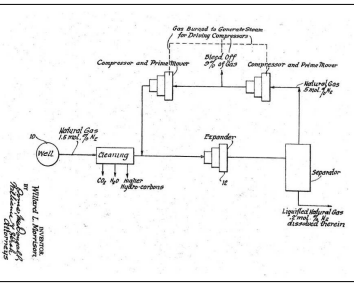
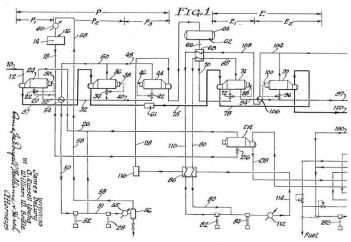
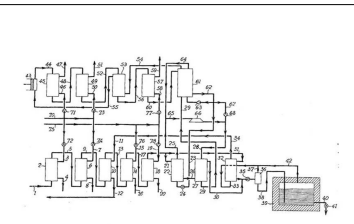
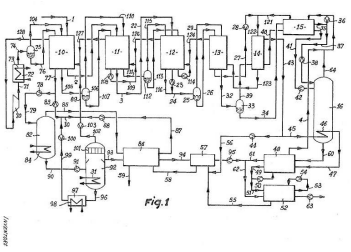


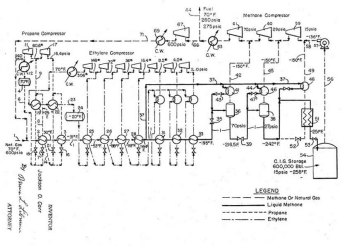
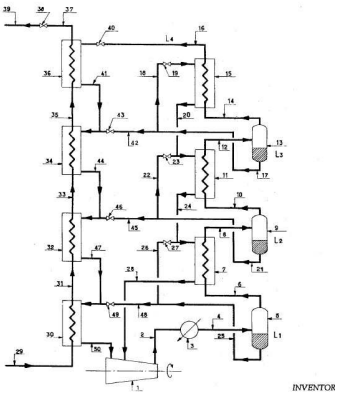
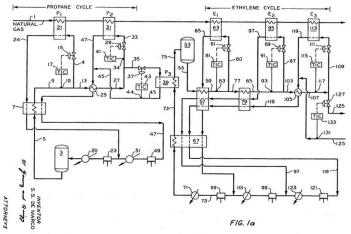
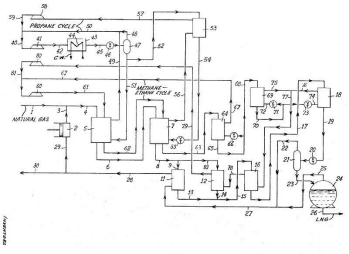
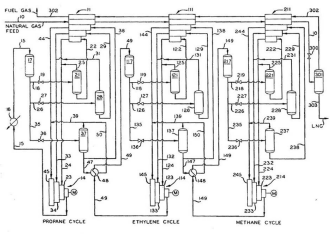

그림 2.2.17. PRICO 공정 제어구조

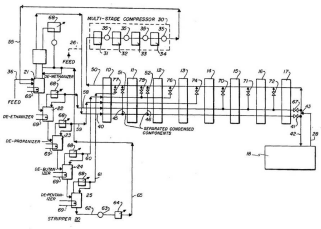
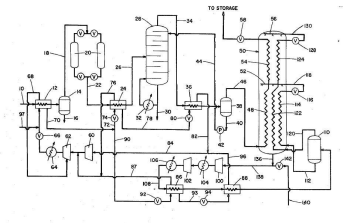
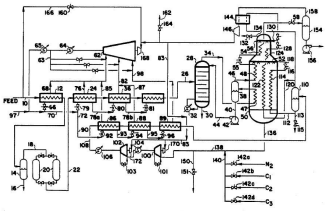
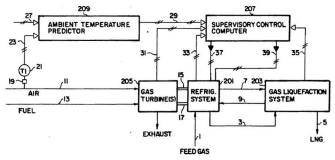
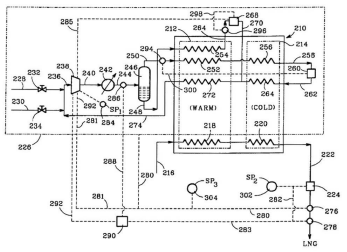
이 공정에서는 liquid pump의 TLNG,out, 과 chock valve에서의 △Tsup, 압축기 후단의 Tom,out,를 제어하는 구조를 적용하여 안정적인 제어성능을 보였다.

라. 그 외 특허

LNG 플랜트 공정 및 제어 관련 특허의 종류는 LNG 플랜트 공정에 대한 새로운 공정에 대한 내용 및 기존 공정에 대한 개선사항, 새로운 공정 제어를 통한 효율적이며 정확한 LNG 액화에 대한 내용이 대부분이었다. 또한 액화 천연 가스의 소량 생산을 위한 맞춤식 공정에 대한 내용도 포함되어 있다. LNG제어방식에 대하여 조사된 특허 내용은 다음과 같다.

| 출원번호 | 특허제목 | 출원인 | 공개연도 | 대표도면 |
|---|---|---|---|---|
| US2,500,129 | Liquefaction System | F. W. Laverty | 1950년 3월 7일 |  |
| US2,509,034 | Method and Apparatus for Liquefying Gaseous Fluids | L. C. Claitor | 1950년 5월 23일 |  |
| US2,900,796 | Method of Liquefying Natural Gas | W. L. Morrison | 1959년 8월 25일 |  |
| US3,020,723 | Method and Apparatus for Liquefaction of Natural Gas | J. De Lury | 1962년 2월 13일 |  |
| US3,066,492 | Process for the Liquefaction of a Gas | J. F. Grunberg | 1962년 12월 4일 |  |
| US3,274,787 | Method for Cooling a Gaseous Mixture to a Low Temperature | M. Grenier | 1966년 9월 27일 |  |

| 출원번호 | 특허제목 | 출원인 | 공개연도 | 대표도면 |
|---|---|---|---|---|
| US3,315,477 | Cascade Cycle for Liquefaction of Natural Gas | J. O. Carr | 1967년 4월 25일 |  |
| US3,364,685 | Method and Apparatus for the Cooling and low Temperature Liquefaction of Gaseous Mixtures | J. C. Perret | 1968년 1월 23일 |  |
| US3,413,816 | Liqufaction of Natural Gas | S. S. De Marco | 1968년 12월 3일 |  |
| US3,418,819 | Liquefaction of Natural Gas by Cascade Refrigeration | J. F. Grunberg | 1968년 12월 31일 |  |
| US3,581,510 | Gas Liquefaction by Refrigeration with Parallel Expansion of the Refregerant | Phillips Petroleum Company | 1968년 7월 8일 |  |

| 출원번호 | 특허제목 | 출원인 | 공개연도 | 대표도면 |
|---|---|---|---|---|
| US3,581,511 | Liquefaction of Natural Gas Using Separated Pure Components as Refrigerants | Institute of Gas Technology | 1969년 7월 15일 |  |
| US3,763,658 | Combined Cascade and Multicomponent Refrigeration System and Method | Air Products and Chemicals, Inc. | 1973년 10월 9일 |  |
| US4,809,154 | Automated Control System for a Multicomponent Refrigeration System | Air Products and Chemicals, Ins. | 1989년 2월 28일 |  |
| US5,139,548 | Gas Liquefaction Process Control System | Air Products and Chemicals, Ins. | 1992년 8월 18일 |  |
| US5,791,160 | Method and Apparatus for Regulatory Control of Production and Temperature in a Mixed Prefrigerant Liquefied Natural Gas Facility | Air Products and Chemicals, Ins. | 1998년 8월 11일 |  |

(2) LNG 액화 공정 BSU 기본 설계

가. 대상공정

LNG 액화 플랜트의 BSU의 대상 공정은 순수 액화 공정이라 할 수 있다. 앞서 LNG 플랜트 전체 공정도에서 전처리 및 저장 공정을 제외한 액화 공정이며 범위는 다음 그림과 같다.

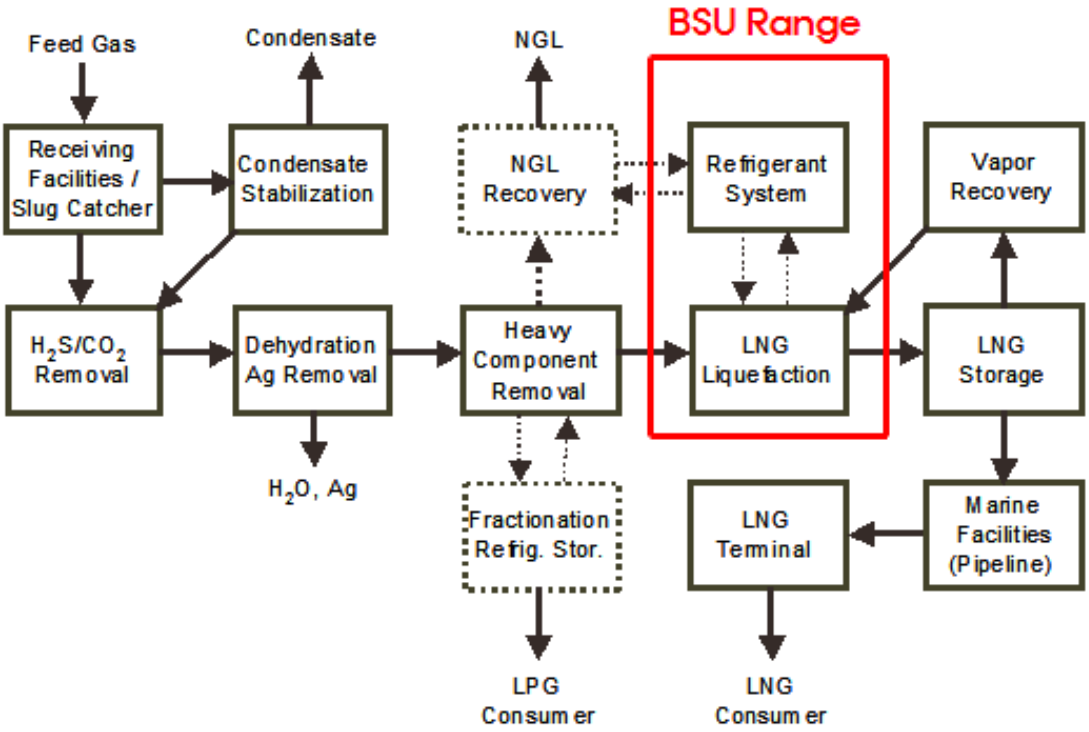



그림 2.2.18. BSU 공정 범위

나. Process Flow Diagram

LNG 액화 플랜트의 BSU 건설을 위해서 먼저 30kg/h의 생산량을 기준으로 공정 모사를 진행하였다. 공정 모사는 Honeywell 사의 Unisim을 이용하였다. Test-bed의 후보공정이 C3MR이므로 C3MR 공정을 따라서 진행을 하였으며, 그에 따른 화면이 아래와 같다.

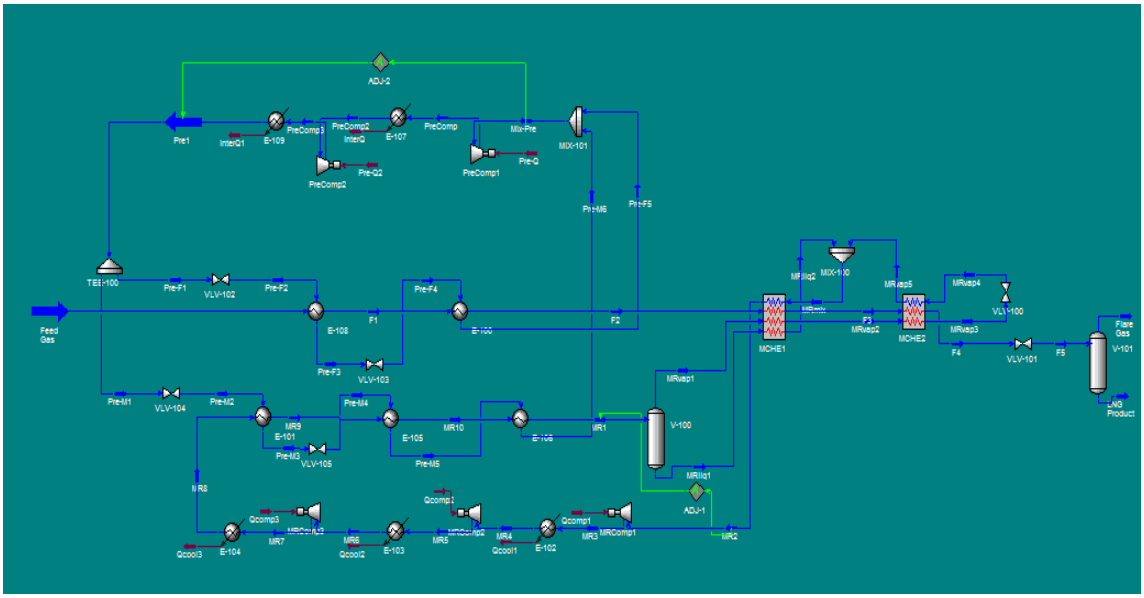



그림 2.2.19. Unisim을 이용한 C3MR 정적 공정 모사

그림의 공정은 10℃의 전처리 과정을 거친 천연가스를 -35℃까지 냉각시키기 위해서 프로판 냉매를 이용해서 예냉하게 되는데, 그 부분이 E-100과 E-108이다. 이 때, 프로판은 2대의 압축기를 통해서 상압에서 약 15 bar 장도로 압축되어 천연가스와 혼합냉매의 예냉을 위해서 천연가스와 혼합냉매에 약 1:4의 비율로 나누어 져서 열교환기를 통해 증발 과정을 거치게 된다.

-35℃ 정도로 예냉된 천연가스는 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)를 통해서 액화가 되는데 그 부분이 MCHE1, MCHE2 부분이다. MCHE에서의 냉매는 메탄, 에탄, 프로판 및 질소가 혼합된 혼합냉매가 쓰이게 되며 냉매로 사용된 후에는 압축기 3대를 통해서 약 60 bar까지 압축된 후, 프로판을 이용해서 -35℃ 부근까지 냉각 후 MCHE를 통해서 응축된다.

액화 플랜트에서 가장 핵심 장비라 할 수 있는 압축기는 일반적으로 Tubo type의 압축기를 사용하나, Bench Scale Unit 특성상 유량이 매우 작기 때문에 Reciprocating type을 사용한다.

다음의 그림은 위의 공정의 PFD(Process Flow Diagram)이다.

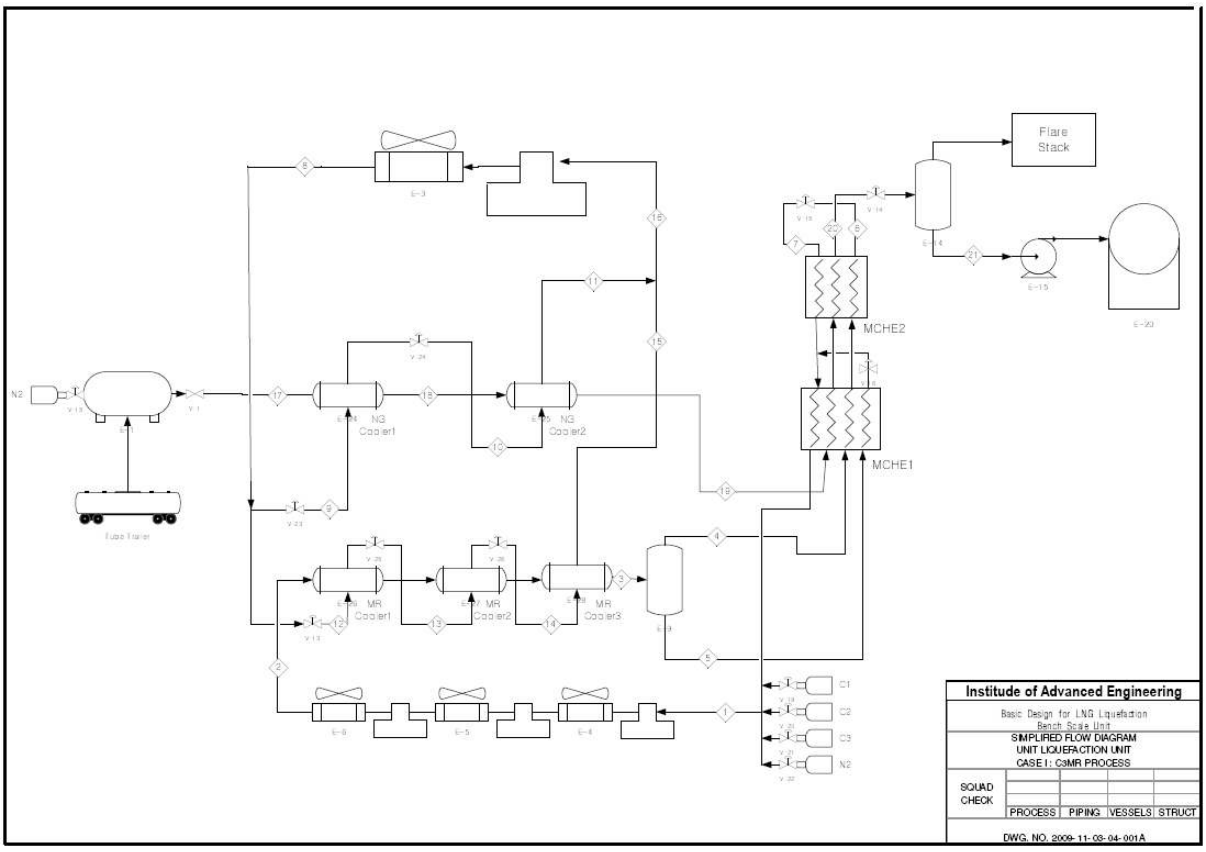



그림 2.2.20. BSU PFD CASE A

한편, BSU 건설의 목적이 테스트베드의 제어로직 점검 및 검증이고, 다양한 실험을 할 수 있게 구성을 해야 하기 때문에 설비의 간소화가 필요하다. 일반적으로 예냉 공정 부분에서 열교환기의 개수를 현재 5개의 열교환기를 사용하게 하였는데, 이는 압축기의 부하를 줄이기 위해서이다. 하지만 BSU에서 효율보다는 실험성 및 간편성을 극대화 시켜 예냉 부분에서 열교환기의 개수를 줄이는 방법을 강구하고, 또 열교환기 업체로부터 긍정적인 답변을 받았다. 따라서 예냉 부분에서 천연가스의 예냉을 담당하는 열교환기 1대와 혼합냉매의 예냉을 담당하는 열교환기 1대를 고려한 설계를 하였다. 통상 열교환기를 여러 개 두는 것은 압축기의 부하를 줄이는 목적으로 냉각 구간을 두어 차례로 냉각을 시키는데, BSU의 목적이 테스트베드의 제어로직 검증 및 공정 실험으로 실험적 성격이 강하기 때문에 최대한 간단하고 실험하기 용이하도록 설계하기 위한 방법이다. 열교환기를 천연가스 예냉 쪽 1대와, 혼합냉매 예냉 쪽 1대를 둔 PFD가 아래의 그림과 같다.

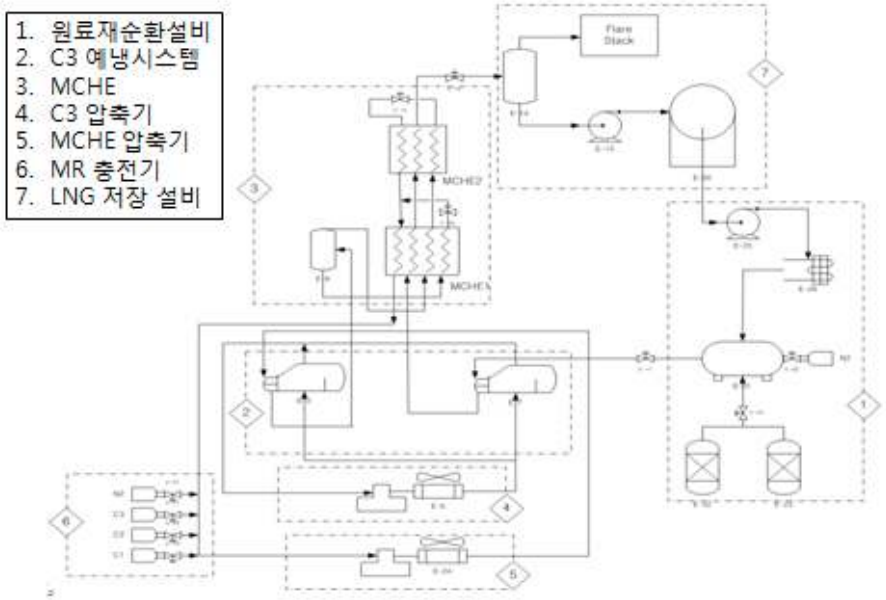



그림 2.2.21. BSU PFD CASE A-1

한편, 같은 맥락으로 BSU의 구성을 간소화하기 위해서 예냉 부분의 열교환기를 Plate-fin type으로 대체한 방법을 설계하였다. Plate-fin type은 다 채널로 stream이 지나가기 때문에 앞서 열교환기가 2대 필요한 것을 하나로 줄일 수가 있으며, 그 부피 또한 컴팩트하기 때문에 시스템 구성에 용이하다. 아래의 그림에서 볼 수 있듯, 앞서 두 가지의 경우에 비해서 아주 간단해 진 것을 볼 수 있다.

- BSU : CASE B(예냉 열교환기 Plate-fin 타입)

이 경우에도 CASE와 기본적으로 동일한 구성이나, Precooling 열교환기가 Plate-Fin 타입으로 대체되어 있다. 엑서지 효율 및 냉동효과는 주위온도의 증가에 따라 급격히 감소하는 것으로 알려져 있다. Precooling의 역할은 외부의 기온 변화에 덜 민감하게 작동되도록 플랜트운전을 하기 위한 것으로써 MR 부분과 Precooling의 두 개 부분으로 이원화 하는 것이다. 예냉시스템에 사용되는 냉매는 프로판과 같은 순수 물질이나, 비공비 혼합냉매를 사용할 수도 있다. 아래 그림에서는 그렇게 구성된 BSU 형상 및 Unisim 컴퓨터 시뮬리에션 모델을 보여준다.

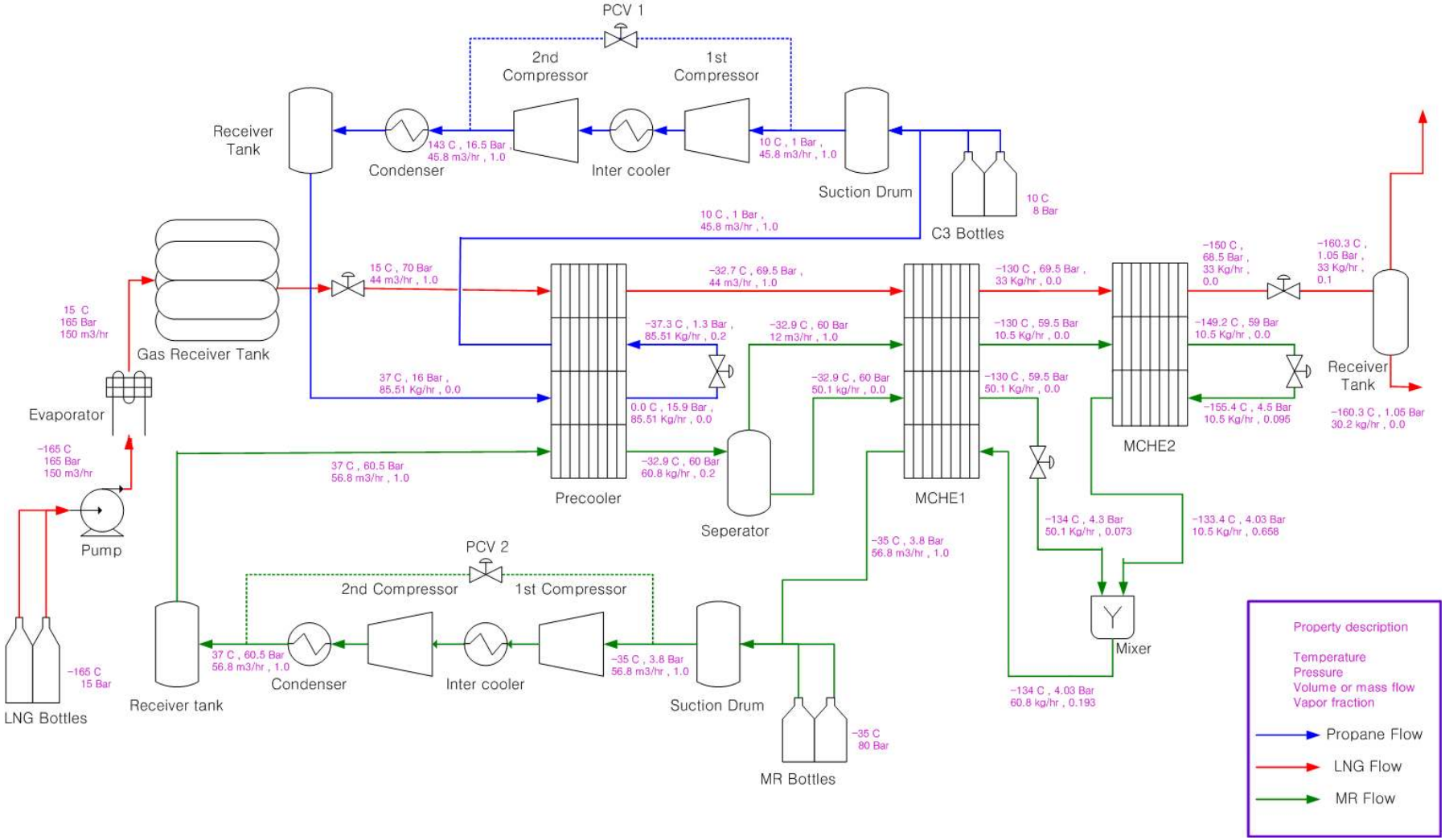



그림 2.2.22. Plate-Fin 타입 Precooling 열교환기 BSU 구성

BSU PFD CASE A-1 부분을 기준으로 한 Heat & Mass Balance는 다음의 표와 같다.

표 2.2.2. Heat & Mass Balance of CASE A-1

| 항목 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperature (℃) | −35.00 | 37.00 | −32.90 | −32.90 | −32.90 | −149.20 | −154.80 |
| Pressure (bar) | 3.80 | 60.50 | 60.00 | 60.00 | 60.00 | 59.00 | 4.80 |
| Mass Flow (kg/h) | 21.31 | 21.31 | 21.31 | 3.68 | 17.63 | 3.68 | 3.68 |
| Volume Flow (m3/h) | 4.24 | 0.26 | 0.08 | 0.03 | 0.05 | 0.01 | 0.04 |
| Vapor Fraction | 1.00 | 1.00 | 0.21 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.09 |

| 항목 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperature (℃) | 37.00 | −36.34 | − | −26.42 | −36.34 | − | 36.62 |
| Pressure (bar) | 16.40 | 1.30 | − | 1.00 | 1.30 | − | 1.00 |
| Mass Flow (kg/h) | 28.00 | 7.00 | − | 7.00 | 21.00 | − | 21.00 |
| Volume Flow (m3/h) | 0.06 | 4.46 | − | 3.166 | 3.12 | − | 12.08 |
| Vapor Fraction | 0.00 | 0.45 | − | 1.00 | 0.45 | − | 1.00 |

| 항목 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temperature (℃) | 21.79 | − | 15.00 | −32.70 | −149.2 | −164.1 | −164.1 |
| Pressure (bar) | 1.00 | − | 70.00 | 69.50 | 68.50 | 1.05 | 1.05 |
| Mass Flow (kg/h) | 28.00 | − | 11.98 | 11.98 | 11.98 | 11.98 | 10.22 |
| Volume Flow (m3/h) | 15.31 | − | 0.18 | 0.12 | 0.03 | 0.78 | 0.02 |
| Vapor Fraction | 1.00 | − | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.14 | 0.00 |

다음의 그림에서 Precooling 싸이클은 두 개의 저압 및 고압 압축기와 콘덴서로 구성되어 있으며, 일반적으로 예냉시스템에서 가장 큰 에너지손실은 콘덴서에서 발생한다. 이러한 손실을 줄이기 위해서는 프로판 대신에 혼합냉매를 사용하면 이러한 손실을 줄일 수도 있다. (DMR 시스템) 아래 그림은 프로판 열교환기의 온도곡선을 보여준다. 아래 모델을 구성하기 위한 설계제한조건 및 결과치를 아래 표에

보여준다. 이 표에서 파란색 표시는 설계 제한 조건임을 나타내 준다.

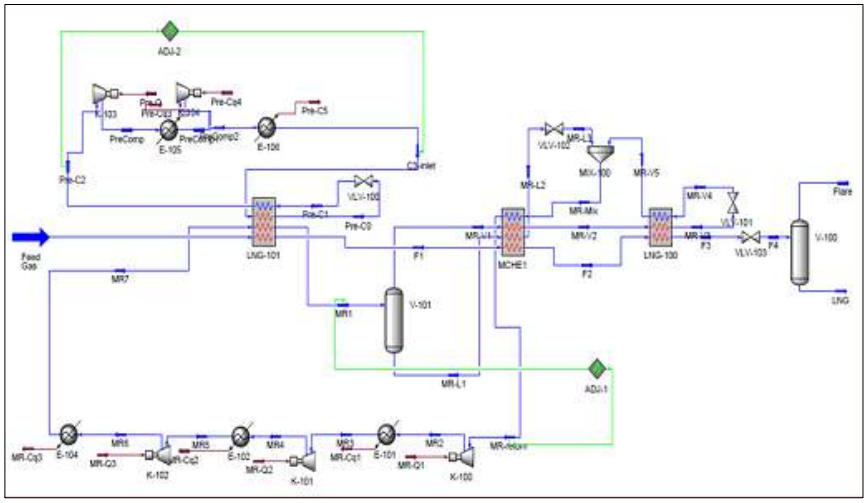


그림 2.2.23. 그림2.2.21에 대응하는 BSU Unisim 정적 모델

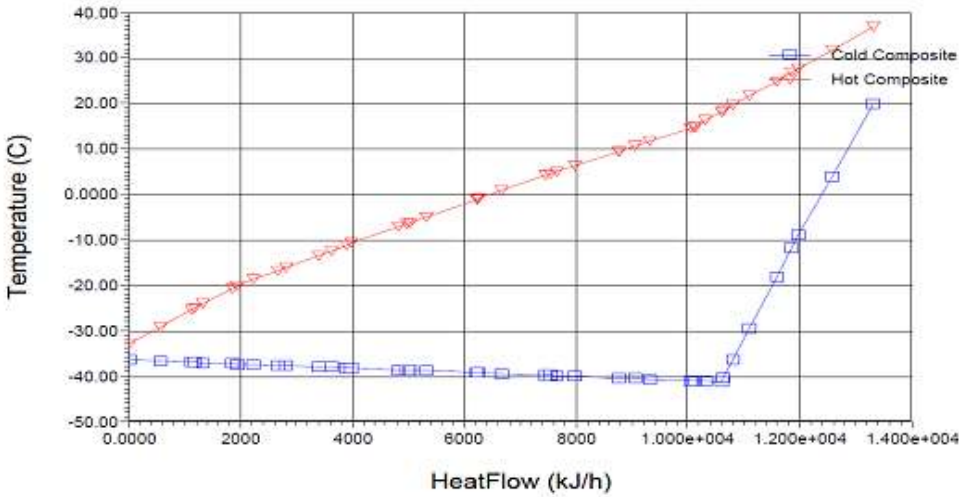



그림 2.2.24. 예냉용 열교환기 내의 온도

표 2.2.3. Heat & Material Balance

| | *Unit* | **Feed Gas** | **C3-inlet** | **F1** | **MR1** | **MR-V1** | **MR-L1** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vapour Fraction | *<none>* | 1 | 0 | 1 | 0.210415 | 1 | 0 |
| Temperature | *C* | 15* | 37* | -32.7* | -32.9* | -32.9 | -32.9 |
| Pressure | *kPa* | 7000* | 1640* | 6950 | 6000* | 6000 | 6000 |
| Molar Flow | *kgmole/h* | 3.2804 | 3.0468 | 3.2804 | 4.2286 | 0.88975 | 3.3388 |
| Mass Flow | *kg/h* | 60* | 134.355* | 60 | 106.684* | 18.4347 | 88.249 |
| Liquid Volume Flow | *m3/h* | 0.181461 | 0.265168 | 0.181461 | 0.285114 | 0.050604 | 0.23451 |
| Heat Flow | *kJ/h* | -245086 | -361080 | -253734 | -373520 | -63497 | -310021 |
| Molar Enthalpy | *kJ/kgmole* | -74712 | -118510 | -77348 | -88332 | -71364 | -92854 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Molar Entropy | *kJ/kgmole-C* | 127.433 | 51.214 | 117.428 | 97.007 | 117.917 | 91.435 |
| | | | | | | | |
| | *Unit* | **F2** | **MR-L2** | **MR-V2** | **MR-return** | **F3** | **MR-V3** |
| Vapour Fraction | *<none>* | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Temperature | *C* | -130* | -130 | -130 | -34.942 | -149.2* | -149.2 |
| Pressure | *kPa* | 6900 | 5950 | 5950 | 380 | 6850 | 5900 |
| Molar Flow | *kgmole/h* | 3.2804 | 3.3388 | 0.88975 | 4.2286 | 3.2804 | 0.88975 |
| Mass Flow | *kg/h* | 60 | 88.249 | 18.4347 | 106.684 | 60 | 18.4347 |
| Liquid Volume Flow | *m3/h* | 0.181461 | 0.23451 | 0.050604 | 0.285114 | 0.181461 | 0.050604 |
| Heat Flow | *kJ/h* | -283050 | -333440 | -71998 | -340590 | -286665 | -72986 |
| Molar Enthalpy | *kJ/kgmole* | -86284 | -99868 | -80919 | -80544 | -87386 | -82029 |
| Molar Entropy | *kJ/kgmole-C* | 71.359 | 54.672 | 68.993 | 145.557 | 63.114 | 60.682 |
| | | | | | | | |
| | *Unit* | **MR-V4** | **MR-V5** | **MR-Mix** | **MR-L3** | **MR2** | **MR3** |
| Vapour Fraction | *<none>* | 0.088978 | 0.65707 | 0.186671 | 0.073752 | 1 | 1 |
| Temperature | *C* | -154.842 | -132.22 | -132.604 | -134.4 | 77.923 | 45* |
| Pressure | *kPa* | 480* | 430 | 430 | 430* | 1960* | 1910 |
| Molar Flow | *kgmole/h* | 0.88975 | 0.88975 | 4.2286 | 3.3388 | 4.2286 | 4.2286 |
| Mass Flow | *kg/h* | 18.4347 | 18.4347 | 106.684 | 88.249 | 106.684 | 106.684 |
| Liquid Volume Flow | *m3/h* | 0.050604 | 0.050604 | 0.285114 | 0.23451 | 0.285114 | 0.285114 |
| Heat Flow | *kJ/h* | -72986 | -68384 | -401830 | -333440 | -320130 | -327420 |
| Molar Enthalpy | *kJ/kgmole* | -82029 | -76857 | -95027 | -99868 | -75706 | -77430 |
| Molar Entropy | *kJ/kgmole-C* | 62.52 | 102.408 | 66.27 | 56.576 | 149.118 | 144.165 |
| | | | | | | | |
| | *Unit* | **MR4** | **MR5** | **MR6** | **MR7** | **PreComp** | **PreComp1** |
| Vapour Fraction | *<none>* | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Temperature | *C* | 91.879 | 45* | 90.638 | 37* | 97.03 | 45* |
| Pressure | *kPa* | 3490* | 3440 | 6100* | 6050 | 440* | 410 |
| Molar Flow | *kgmole/h* | 4.2286 | 4.2286 | 4.2286 | 4.2286 | 3.0468 | 3.0468 |
| Mass Flow | *kg/h* | 106.684 | 106.684 | 106.684 | 106.684 | 134.355 | 134.355 |
| Liquid Volume Flow | *m3/h* | 0.285114 | 0.285114 | 0.285114 | 0.285114 | 0.265168 | 0.265168 |
| Heat Flow | *kJ/h* | -318760 | -329890 | -322250 | -336810 | -299724 | -313171 |
| Molar Enthalpy | *kJ/kgmole* | -75382 | -78014 | -76208 | -79650 | -98373 | -102787 |
| Molar Entropy | *kJ/kgmole-C* | 145.585 | 137.975 | 139.229 | 129.031 | 122.549 | 110.278 |
| | | | | | | | |
| | *Unit* | **PreComp2** | **Pre-C1** | **Pre-C2** | **F4** | **Flare** | **LNG** |
| Vapour Fraction | *<none>* | 1 | 0.091371 | 1 | 0.137856 | 1 | 0 |
| Temperature | *C* | 113.089 | -36.341 | 29.9984 | -164.118 | -164.118 | -164.118 |
| Pressure | *kPa* | 1670* | 130* | 100 | 105* | 105 | 105 |
| Molar Flow | *kgmole/h* | 3.0468 | 3.0468 | 3.0468 | 3.2804 | 0.45223 | 2.8282 |
| Mass Flow | *kg/h* | 134.355 | 134.355 | 134.355 | 60 | 8.8221 | 51.178 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Liquid Volume Flow | *m3/h* | 0.265168 | 0.265168 | 0.265168 | 0.181461 | 0.021767 | 0.159694 |
| Heat Flow | *kJ/h* | -298449 | -381160 | -315718 | -286665 | -26863.6 | -259801 |
| Molar Enthalpy | *kJ/kgmole* | -97955 | -125101 | -103623 | -87386 | -59403 | -91861 |
| Molar Entropy | *kJ/kgmole-C* | 113.456 | 28.5162 | 118.932 | 65.988 | 125.755 | 56.432 |
| | | | | | | | |
| | *Unit* | **Pre-C0** | | | | | |
| Vapour Fraction | *<none>* | 0 | | | | | |
| Temperature | *C* | -20* | | | | | |
| Pressure | *kPa* | 1590 | | | | | |
| Molar Flow | *kgmole/h* | 3.0468 | | | | | |
| Mass Flow | *kg/h* | 134.355 | | | | | |
| Liquid Volume Flow | *m3/h* | 0.265168 | | | | | |
| Heat Flow | *kJ/h* | -381160 | | | | | |
| Molar Enthalpy | *kJ/kgmole* | -125101 | | | | | |
| Molar Entropy | *kJ/kgmole-C* | 27.8454 | | | | | |

표 2.2.4. 주요 시뮬레이션 결과

| Parameter | Value |
|---|---|
| Feed Gas Rate | 60 kg/h |
| LNG Rate | 51.1 kg/h |
| Propane flow rate | 141.5 kg/h |
| MR flow rate | 106.7 kg/h |
| C3 Compressor | 11.7 hp |
| MR Compressor | 13.6 hp |
| LMTD(Precooler/ MCHE1/MCHE2) | 23.7/8.3/2.4 C |
| UA(Precooler/ MCHE1/MCHE2) | 2802/7318/1877 kJ/C-h |

다. 혼합냉매 사이클 설계

기존의 냉각 시스템은 단일 냉매를 사용한다. 대부분의 경우 순수 냉매의 기화 및 응축 온도는 고정되어 있지만 열 진원지의 온도는 열교환 과정에서 변한다. 열교환기의 한 끝단에서의 큰 온도 차로 인해서 불가역성이 일어나고 따라서 냉각 시스템의 효율성이 떨어진다. 특정 운전 조건에 맞는 순수 냉매가 있지만 운전 조건이 변하면 다른 순수 냉매가 더 적합할 수 있다. 이런 문제 해결을 위해서는 기존의 냉매를 새 냉매로 교환하는 것이지만 이는 실질적으로 어렵다. 응축 및 기화 온도 차가 커지면 압축기의 압력비가 증가해야 하고 축일 (shaftwork)의 소비가 늘어

난다.

순수 냉매를 사용함에 따른 문제는 순수 냉매의 열역학적 특성, 냉각 시스템의 운전 조건, 응용 분야가 서로 잘 맞지 않기 때문에 일어난다. 혼합 냉매가 사용되면 이 문제는 냉매 혼합물 조성이나 냉각 시스템 설계 변수를 선택함으로써 극복될 수 있다.

순수 냉매와 혼합 냉매의 가장 큰 차이점은 기체-액체 상변화시의 온도 프로파일 곡선이다. 적당한 냉매 혼합을 사용하면 평균 온도차를 최소화할 수 있으므로 열교환 손실을 순수 냉매에 비해 줄일 수 있다. 냉매 조성, 유량, 기화/응축 압력, 열교환기 구성 등을 변화시킴으로써 혼합 냉매 기화 곡선을 바꿀 수 있다. 공정의 운전 조건이 변한다면 운전 변수를 조절함으로써 원하는 성능을 유지하는 것이 가능하다.

Hot, cold 온도 곡선간의 온도차가 매우 작고 복잡한 상 평형 계산이 필요하기 때문에 정확한 정보를 얻기 위해서는 열역학 특성 계산이 필요하다. 이 때문에 비선형 문제에 대한 모델링 및 최적화가 어려워진다. 혼합 냉매 시스템은 일반적으로 다중 stream 열교환기를 사용한다.

적절한 열교환이 일어나기 위해서는 열교환기내의 온도 교차를 피해야 한다. 압축기 입력 stream의 수분도 고려해야 한다. 열교환기에서 기화된 이후의 혼합 냉매 흐름은 압축기의 입력 stream이 된다. 특정 종류의 압축기에는 입력 stream이 약간의 수분만을 포함해도 피해가 간다.

Hot, cold 곡선은 다음과 같은 특성을 가져야 한다.

- hot, cold 곡선은 근접하고 평행해야 한다. 열교환은 거의 일정한 온도 분포로 수행된다.
- 온도 교차가 일어서는 안된다.
- 기체는 cold 곡선의 끝에서 과열시켜야 한다.

혼합 냉매 시스템 설계에서 3가지 주요 변수가 전체 성능에 결정적인 영향을 미친다. 이는 응축과 기화의 압력 수준, 냉매 유량, 냉매 조성이다.

혼합 냉매 사이클에서 기화 및 응축 온도는 모두 변화의 범위가 넓지만, 혼합 냉매는 2개의 압력 수준에서 기화 및 응축한다. hot, cold 곡선을 보면 온도 교차가 열교환기의 고압 (HP) 끝부분에서 일어난다. 온도 교차를 방지하기 위해서는 응축 및 기화 압력이 적절하도록 2개의 압력 수준간 차이를 증가시킬 수 있다. 온도 교차는 고압 (HP) 꿑부분에서의 차이를 증가시킴으로써 방지할 수 있다. 그러나 동시에 축일 (shaftwork)이 더 필요하다.

고압 (HP) 끝부분 압력은 고압 (HP) 끝부분 온도에 영향을 미치는 반면에, 저압 (LP) 끝부분 압력을 변경시킴으로써 저압(LP) 끝부분 온도에 영향을 미칠수 있다. 그러나 2개의 압력 수준 차이가 커지면 축일 (shaftwork)이 더 요구된다.

냉매 유량을 증가하면 hot, cold 곡선간의 차이를 증가시킨다. 냉매 유량이 적을 때는 고압 (HP) 끝부분에서 hot, cold 곡선간 교차가 일어나지만, 냉매 유량을 증가시키면 온도 교차를 피할 수 있다.
반면에 요구되는 축일 (shaftwork)도 증가한다. 냉매 유량이 너무 적으면, 열교환기에서 온도 교차를 피하기 매우 어렵다. 냉매 유량이 너무 많으면, 압축기로 들어가는 입력 stream에 수분이 존재할 가능성이 많아진다. 따라서, 냉매 유량은 특정 한계내에서만 조절할 수 있다. 냉매 유량의 증가는 요구되는 축일 (shaftwork)도 증가시킨다.

일반적인 혼합 냉매 시스템은 4개 이상의 혼합 냉매 성분을 필요로 한다. Gibbs의 상규칙에 의하면 혼합 냉매 시스템에서 C 자유도를 가진다. 새로운 성분을 투입하거나 기존의 성분을 새로운 성분으로 바꿈으로서 혼합 냉매 시스템의 성능 향상을 위해 필요한 보다 많은 자유도가 생긴다.
최적의 냉매 조성을 선택함으로써 온도 교차 문제를 회피하고 동시에 축일 (shaftwork) 요구량도 감소시킬 수 있다. 이전의 2가지 변수와는 달리, 높은 축일 (shaftwork)을 소비해야만 온도 교차를 제거할 수 있는 것은 아니다. 압력 수준과 냉매 유량은 특정 범위 내에서만 조절될 수 있기 때문에 냉매 조성은 혼합 냉매 시스템 설계에서 가장 유연하고 중요한 변수이다.

혼합 냉매 조성 선택을 위한 수식화에서 가장 어려운 점은 변수 상호간 영향을 많이 미치는 관계와 근접한 냉온 곡선 때문이다. 냉매 조성에 변화를 주면 응축/기화 압력이나 냉매 유량이 hot, cold 곡선의 모양과 위치를 변경시킨다. 따라서, 냉매 유량를 변경시키면 두 곡선의 가로측 길이가 변경된다. 변수에 약간의 변화만 주어도 설계 사양이 나오지 않거나 열교환 자체가 되지 않을 때도 있다. 이는 매우 비선형적 성격의 문제이기 때문에 최적화는 제대로 수행되지 않을 수도 있다.

혼합 냉매 조성 선택 방법을 제시할 수 있다. 열역학적으로 복잡한 설계 문제를 시각화하고 변수간 상호 영향 관계는 hot, cold 곡선으로 요약될 수 있다. 비선형 프로그래밍은 문제의 최적 해법을 위한 설계 변수를 최적화한다. Hot, cold 곡선의 완벽한 일치는 두 개의 곡선이 정확하게 평행하다는 의미이며 방법은 hot, cold 곡선이 가장 평행에 근접할 때, 주어진 냉매 조합내에서 냉매 조성을 찾는 것이다.

냉매 조성, 유량, 기화 및 응축 압력의 최초 조건으로부터 시작한다. 처음에는 운전 조건하에서의 hot 곡선이 생성되고 hot 곡선을 온도차만큼 이동시켜서 pseudo-cold 곡선을 생성시킨다. Psudo-cold 곡선은 조성을 변경함으로써 얻는 최적화 목표로 삼는다. 최적의 조성을 찾기 위한 최적화를 수행하기 위해 비선형 프로그래밍 모델이 사용된다. 곡선의 전체 스펙트럼을 N 간격으로 짜른다. N은 온도 프로파일의 정확도와 요구되는 계산 시간을 고려하여 사용자에 의해 결정된다. 각 간격내에서, pseudo-cold 곡선의 온도와 real cold 곡선의 온도를 계산하기 위해 물질 및 에너지 균형이 사용된다. 최적화 알고리즘은 계속해서 냉매 조성을 업데이트한다. 이 방법은 최적화 기준에 부합되었을 때, 최고의 냉매 조성을 결정한다.

혼합 냉매 시스템 통합 순서는 냉매 유량, 조성, 응축 및 기화 압력 수준 등의 최초 환경으로부터 출발하여, 냉매 조성의 최초 추정값은 임의로 결정한다. 최초 냉매 유량과 압력 수준은 충분히 높은 값으로 선택해서 최적화로 인해 값을 감소시킬 여지를 남겨 두도록 한다.

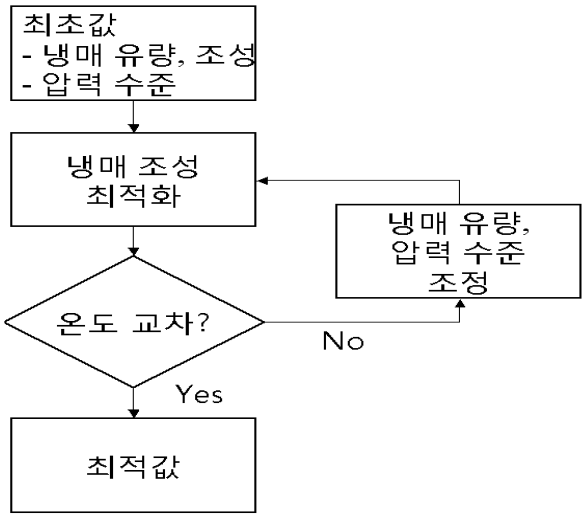



그림 2.2.25. 혼합 냉매 시스템 최적화

주어진 냉매 유량 및 기화 및 응축 압력 수준에 대해서 냉매 조성 최적 설계 선택이 성공적이면 냉각 유량 및 압력 수준이 조정되거나 감소되고 조성 선택 단계로 다시 돌아간다. 여러번 반복후 냉매 유량이 너무 적거나 응축 및 기화 압력 수준이 너무 근접해서 열교환기에서 온도 교차가 항상 일어나면 절차가 종료된다. 냉매 조성을 변경함으로써 더 이상의 향상은 불가능하고 최적화는 최적값을 선택함으로써 냉매 시스템의 마지막 설계 단계에 이른다. 냉매 유량이나 압력 수준은 임의, 판단, 최적화의 방법으로 변경할 수 있다. 최소의 축일 (shaftwork)을 필요로 하는 솔루션이 아주 큰 열교환 면적을 필요로 할 수도 있고 따라서 비용이 많이 들 수도 있다. 축일 (shaftwork)의 절감과 열교환 비용간의 trade-off 관계가 있으며 비용을 최소화하기 위한 경제적인 솔루션을 선택하는 방법을 향후 연구할 수 있다.
시스템이 아무리 복잡하더라도 cold, hot 곡선은 하나씩만 존재하므로 이 곡선간의 간격을 고려함으로써 보다 더 큰 혼합 냉매 시스템도 최적화할 수 있다.

(3) BSU 플랜트 단위 장치 및 현장계기 선정과 상세설계

가. BSU 주요 기자재 선정 및 설계

a. 압축기

압축기는 가스액화를 위한 냉동사이클에서 냉매의 압축공정 역할을 수행하는 기자재이며 사이클의 시작이자 주동력원이다. 압축기는 크게 왕복동형과 회전형 압축기로 구분되고 일반적으로 회전형 압축기의 경우 부피가 적고 에너지 손실이 덜하다고 볼 수 있다. 그러나 비교적 소형의 액화공정에 해당하는 BSU설비는 적은 유량으로 인한 회전형 압축기의 적용이 힘들었고 이에 프로판과 혼합가스의 왕복동형 압축기 2대를 선정하였고 설계사양은 다음절에 상세히 나타내었다.

◦ 프로판 압축기

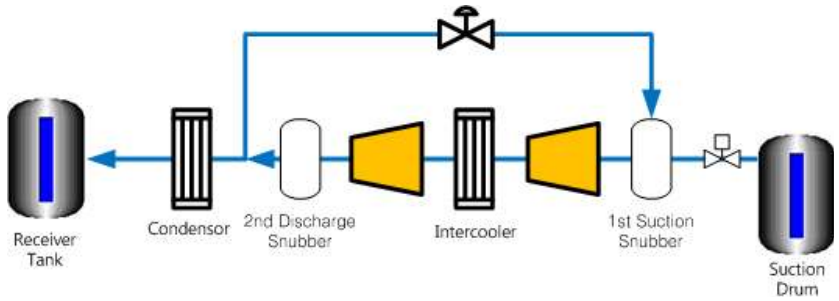



그림 2.2.26. 프로판 압축기의 흐름도

(가) 설계사양

- Number of stages : Two
- Capacity (Dry) : 95$NM^3/hr$

- Compression ratio : 1st=3.336, 2nd=3.195
- Rotational speed : 420rpm
- Electric motor : 15kw, 1750rpm

표 2.2.5. 프로판 압축기의 입출구 조건

| Propane Compressor | 1st Suction Snubber | 2nd Discharge Snubber | Receiver Tank |
|---|---|---|---|
| Oper. Press.($kg/cm^2G.$) | 1 | 20 | 20 |
| Design Press.($kg/cm^2G.$) | 9.9 | 23 | 23 |
| Oper. Temp.(℃) | 10 | 91 | 37 |
| Design Temp.(℃) | 75 | 165 | 75 |

(나) 성능곡선

설계된 압축기의 토출압력은 공정에서 필요한 압력 16.5 BarA. 를 넘어선 21 BarA. 까지 압축할 수 있고 토출유량 또한 50.04$AM^3/hr$ 까지 보낼 수 있다. 이때 필요한 회전동력은 11.5Kw 정도이고 압축기에서 기계적 마찰손실을 감안한 전기모터의 용량의 80%정도 수준이다.

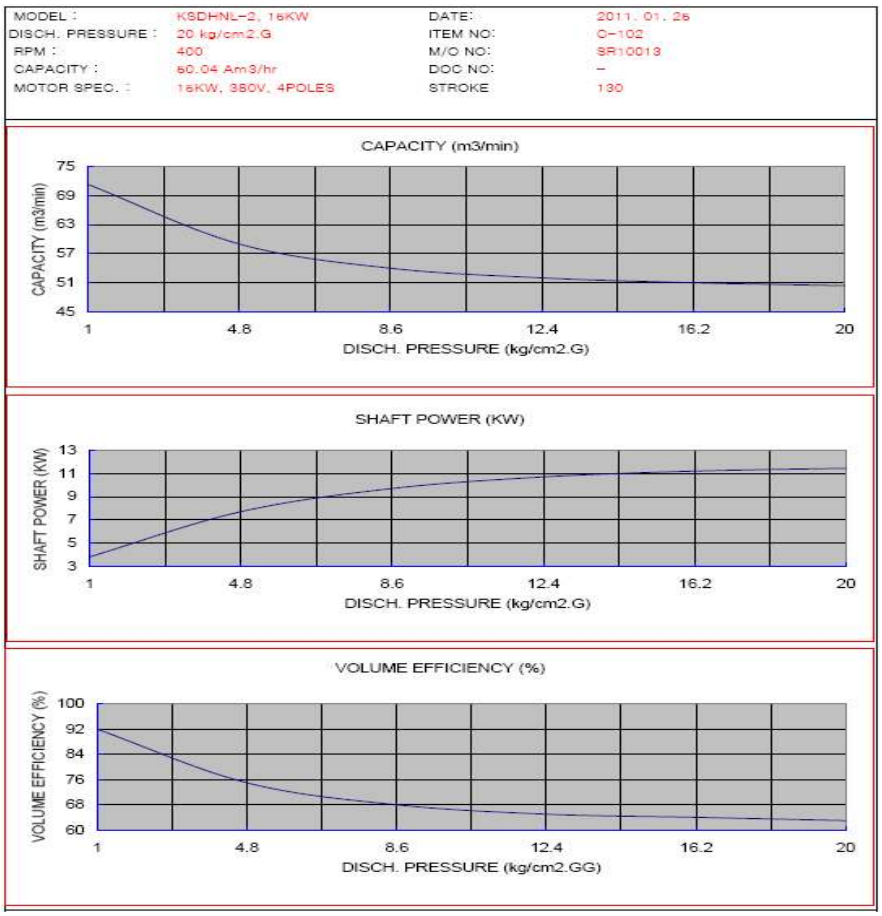



그림 2.2.27. 프로판 압축기의 성능곡선

(다) Piping and Instrument Diagram

프로판과 혼합가스 전부 1단 압축후에 쿨러에 냉각수 공급을 통한 수냉방식의 냉각과정을 거친다  2단 압축후에도 냉각과정을 거치는 것은 유사하지만 혼합가스는 상이 변하지 않는 반면에 프로판은 기상에서 액상의 상변화를 일으키기 때문에 단순 쿨러가 아닌 응축기를 설계하여야만 한다. 응축기의 냉동능력은 다음의 계산식에 의해서 결정된다.

q= 열통과율($Kcal/m^2\,h\,^oC$) * 전열면적($m^2$) * 냉각수 입출구 온도차이($^oC$)
q/3320=R/T(냉동톤 단위)

프로판 압축기의 응축기의 경우 냉각수 입출구 온도차이는 약 105도 정도이고 위의 식에 따라서 냉동톤은 3.295 R/T이다.

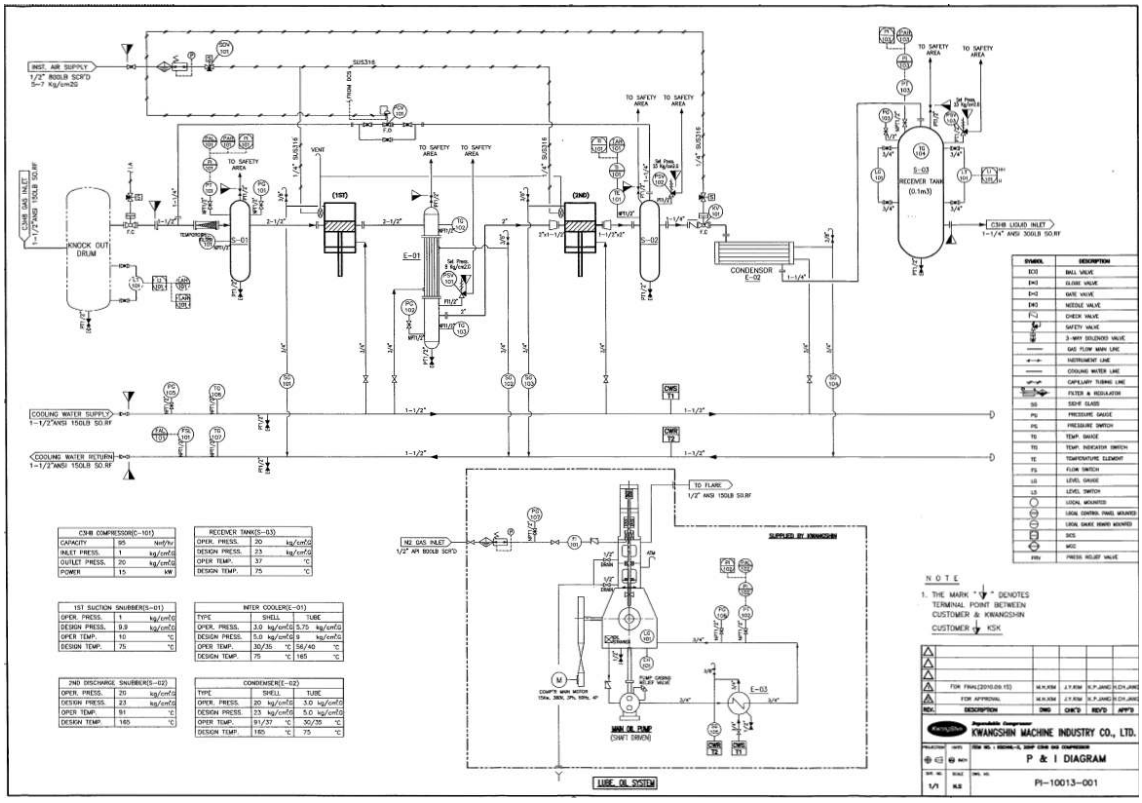



그림 2.2.28. 프로판 압축기의 P&ID

◦ 혼합가스 압축기

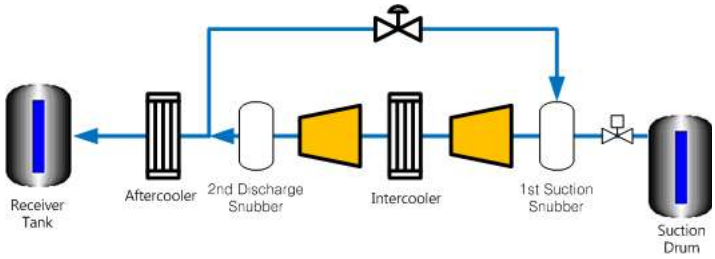



그림 2.2.29. 혼합가스 압축기의 흐름도

(가) 설계사양

- Number of stages : Two
- Capacity (Dry) : $90 NM^3/hr$

- Compression ratio : 1st=4.265, 2nd=3.899
- Rotational speed : 400rpm
- Electric motor : 22kw, 1750rpm

표 2.2.6. 혼합가스 압축기의 입출구 조건

| MR Compressor | 1st Suction Snubber | 2nd Discharge Snubber | Receiver Tank |
|---|---|---|---|
| Oper. Press.($kg/cm^2G.$) | 3.88 | 80 | 80 |
| Design Press.($kg/cm^2G.$) | 5 | 88 | 88 |
| Oper. Temp.(℃) | -34.93 | 130 | 37 |
| Design Temp.(℃) | -50 | 180 | 75 |

(나) 성능곡선

설계된 압축기의 토출압력은 공정에서 필요한 압력 60.5 BarA. 를 넘어선 81 BarA. 까지 압축할 수 있고 토출유량 또한 $16.52 AM^3/hr$ 까지 보낼 수 있다. 이때 필요한 회전동력은 13Kw 정도이고 압축기에서 기계적 마찰손실을 감안한 전기모터의 용량의 60%정도 수준이다. 프로판 압축기에 비해서 토출압력이 높기 때문에 약간 과설계 되었다.

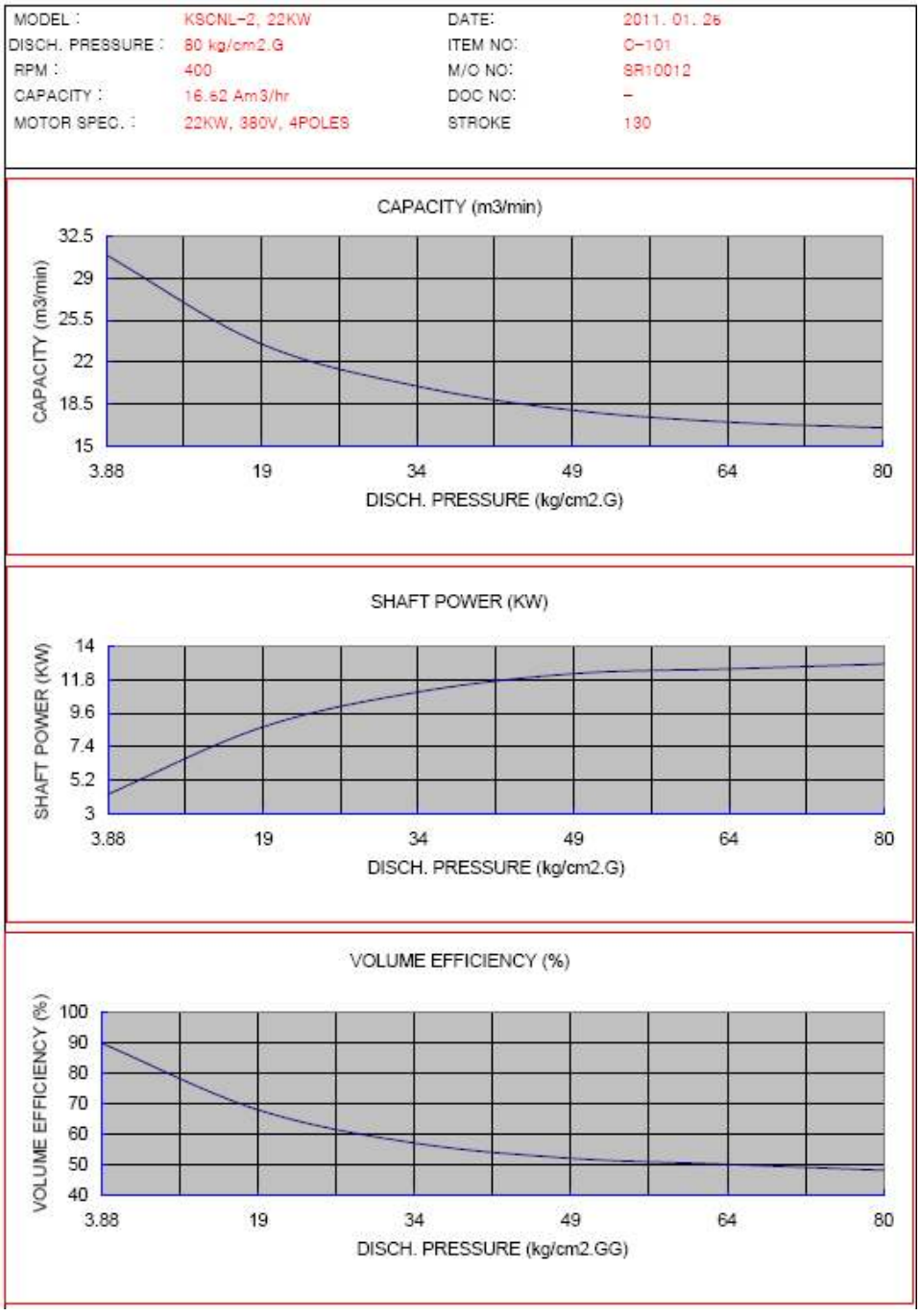



그림 2.2.30. 혼합가스 압축기의 성능곡선

(다) Piping and Instrument Diagram

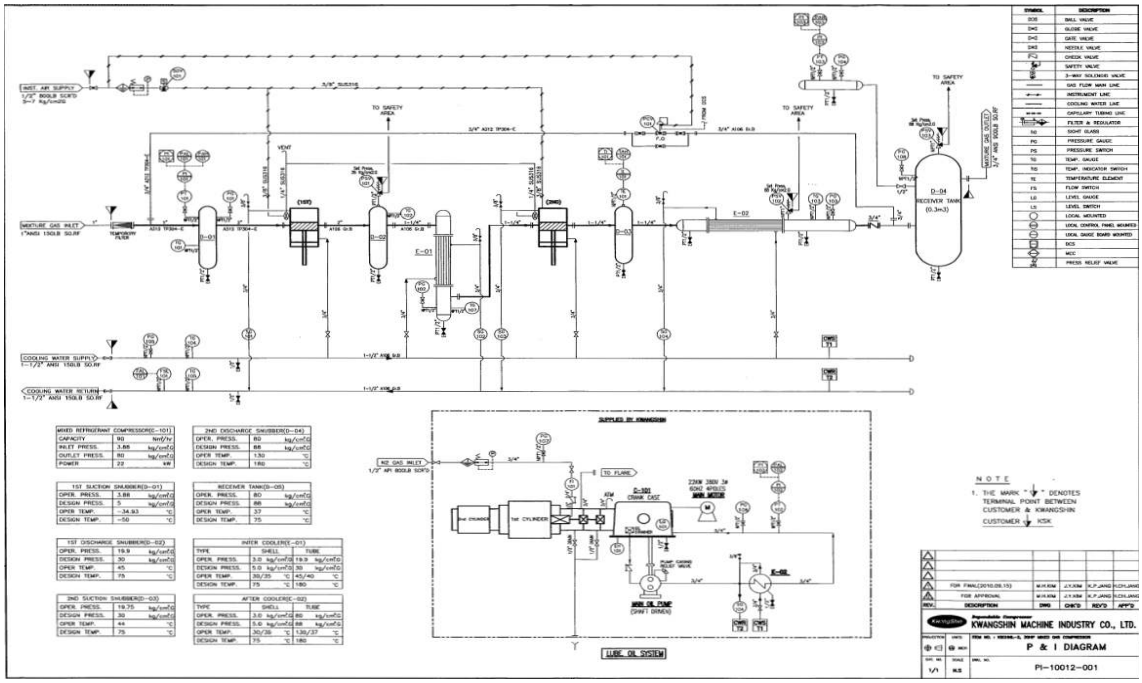



그림 2.2.31. 혼합가스 압축기의 P&ID

◦ 열교환기

냉동사이클에서 응축과 증발과정을 담당하는 열교환기는 냉매와 냉매 혹은 냉매와 Feed gas의 온도차이에 의한 열전달 과정에 의해서 열평형을 이루려는 기기로서 본 BSU설비에는 프로판냉매를 통한 예냉의 역할을 하는 Precooler 1대와 혼합냉매를 통한 본냉의 역할을 하는 MCHE1, MCHE2의 2대의 열교환기를 더해 총 3대의 열교환기가 사용되어졌다. 아래에는 열교환과정이 상세히 나타나있는 PFD와 상용의 공정해석 프로그램 Unisim을 이용한 시뮬레이션을 도시하였다.

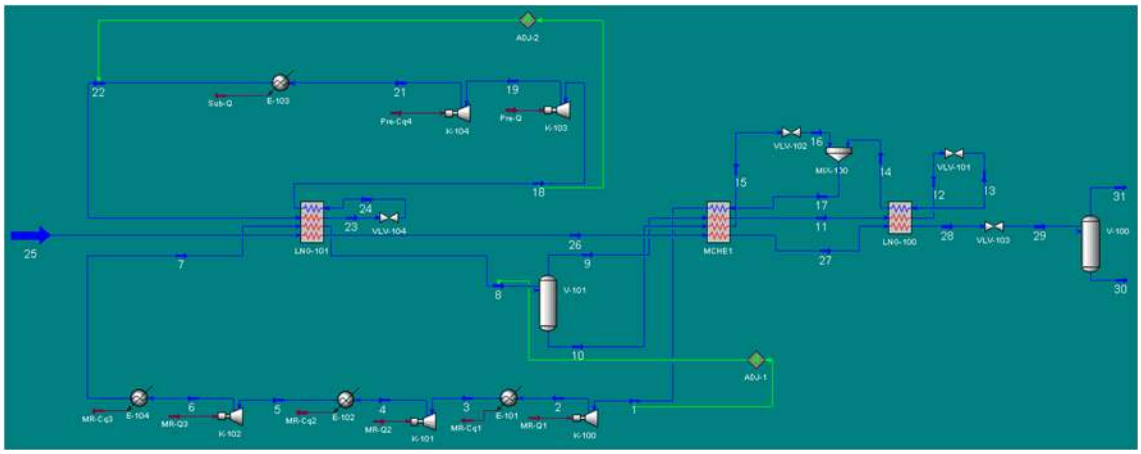
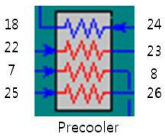
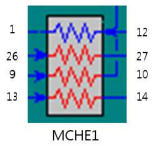



그림 2.2.32. 열교환기의 시뮬레이션



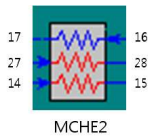

| Stream ID | In / Out | | 24 | 18 | 22 | 23 | 7 | 8 | 25 | 26 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fluid Name | | | PROPANE | | PROPANE | | MR | | NATURAL GAS | |
| | | Units | | | | | | | | |
| Flow Rate : | Total | KG/HR | 85.7 | | 85.7 | | 60.7 | | 33.0 | |
| | Vap. In/Out | KG/HR | 17.7 | 85.7 | - | - | 60.7 | 10.5 | 33.0 | 33.0 |
| | Liq. In/Out | KG/HR | 68.0 | - | 85.7 | 85.7 | - | 50.3 | - | - |
| Molecular Weight | Vap. In/Out | - | 44.10 | 44.10 | - | - | 25.23 | 20.72 | 17.82 | 17.82 |
| | Liq. In/Out | - | 44.10 | | 44.10 | 44.10 | - | 26.43 | - | - |
| Density | Vap. In/Out | KG/M3 | 3.000 | 1.910 | — | - | 82.180 | 96.090 | 64.410 | 101.200 |
| | Liq. In/Out | KG/M3 | 574.7 | | 474.3 | 531.1 | — | 378.1 | - | - |
| Viscosity | Vap. In/Out | CP | 0.0064 | 0.0077 | — | - | 0.0139 | 0.0127 | 0.0130 | 0.0130 |
| | Liq. In/Out | CP | 0.19 | | 0.09 | 0.13 | — | 0.06 | - | - |
| Specific Heat | Vap. In/Out | KCAL/KGMOLE-C | 64.330 | 72.590 | — | - | 69.710 | 68.750 | 50.570 | 75.670 |
| | Liq. In/Out | KCAL/KGMOLE-C | 98.020 | | 133.500 | 110.600 | — | 94.000 | - | - |
| Thermal Conductivity | Vap. In/Out | W/M-K | 0.012 | 0.016 | — | - | 0.035 | 0.033 | 0.039 | 0.038 |
| | Liq. In/Out | W/M-K | 0.130 | | 0.087 | 0.110 | — | 0.094 | - | - |
| Temperature | In/Out | C | -36.3 | 10.0 | 37.0 | 0.0 | 37.0 | -32.9 | 15.0 | -32.7 |
| Operating Pressure | In/Out | BAR | 1.3 | 1.0 | 16.4 | 15.9 | 60.5 | 60.0 | 70.0 | 69.5 |
| Allowable Pressure Drop | | BAR | 0.3 | | 0.5 | | 0.5 | | 0.5 | |
| Heat Load | | KCAL/HR | 8.342E+03 | | 1.978E+03 | | 5.160E+03 | | 1.290E+03 | |

그림 2.2.33. Precooler 설계조건




| Stream ID | In / Out | | 12 | 1 | 26 | 27 | 9 | 10 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fluid Name | | | MR | | MR_VAPOR | | MR_LIQUID | | NATURAL GAS | |
| | | Units | | | | | | | | |
| Flow Rate : | Total | KG/HR | 60.7 | | 10.5 | | 50.3 | | 33.0 | |
| | Vap. In/Out | KG/HR | 8.7 | 60.7 | 10.5 | - | — | — | 33.0 | — |
| | Liq. In/Out | KG/HR | 52.1 | - | — | 10.5 | 50.3 | 50.3 | - | 33.0 |
| Molecular Weight | Vap. In/Out | - | 19.41 | 25.23 | 20.72 | - | - | - | 17.82 | — |
| | Liq. In/Out | - | 26.56 | - | - | 20.72 | 26.43 | 26.43 | - | 17.82 |
| Density | Vap. In/Out | KG/M3 | 7.658 | 5.032 | 96.090 | - | - | - | 101.200 | — |
| | Liq. In/Out | KG/M3 | 552.0 | — | - | 22.9 | 14.3 | 21.0 | - | 418.3 |
| Viscosity | Vap. In/Out | CP | 0.0065 | 0.0087 | 0.0127 | - | - | - | 0.0130 | — |
| | Liq. In/Out | CP | 0.23 | — | - | 0.09 | 0.06 | 0.21 | - | 0.08 |
| Specific Heat | Vap. In/Out | KCAL/KGMOLE-C | 33.930 | 43.110 | 68.750 | - | - | - | 75.670 | — |
| | Liq. In/Out | KCAL/KGMOLE-C | 62.230 | — | - | 59.520 | 94.000 | 61.410 | - | 58.770 |
| Thermal Conductivity | Vap. In/Out | W/M-K | 0.013 | 0.020 | 0.033 | - | - | - | 0.038 | — |
| | Liq. In/Out | W/M-K | 0.173 | — | - | 0.137 | 0.094 | 0.164 | - | 0.153 |
| Temperature | In/Out | C | -132.7 | -35.0 | -32.9 | -130.0 | -32.9 | -130.0 | -32.7 | -130.0 |
| Operating Pressure | In/Out | BAR | 4.3 | 3.8 | 60.0 | 59.5 | 60.0 | 59.5 | 69.5 | 69.0 |
| Allowable Pressure Drop | | BAR | 0.5 | | 0.5 | | 0.5 | | 0.5 | |
| Heat Load | | KCAL/HR | 8.686E+03 | | 1.204E+03 | | 3.182E+03 | | 4.042E+03 | |

그림 2.2.34 MCHE1 설계조건




| Stream ID | In / Out | | 16 | 17 | 27 | 28 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fluid Name | | | MR_VAPOR_EX | | MR_VAPOR_IN | | NATURAL GAS | |
| | | Units | | | | | | |
| Flow Rate : | Total | KG/HR | 10.5 | | 10.5 | | 33.0 | |
| | Vap. In/Out | KG/HR | 1.1 | 6.2 | - | - | — | — |
| | Liq. In/Out | KG/HR | 9.4 | 4.3 | 10.5 | 10.5 | 33.0 | 33.0 |
| Molecular Weight | Vap. In/Out | - | 24.64 | 18.63 | - | - | — | — |
| | Liq. In/Out | - | 20.34 | 24.64 | 20.72 | 20.72 | 17.82 | 17.82 |
| Density | Vap. In/Out | KG/M3 | 13.120 | 7.371 | - | - | — | — |
| | Liq. In/Out | KG/M3 | 500.8 | 529.5 | 22.9 | 507.8 | 418.3 | 446.2 |
| Viscosity | Vap. In/Out | CP | 0.0069 | 0.0063 | - | - | — | — |
| | Liq. In/Out | CP | 0.15 | 0.19 | 0.09 | 0.13 | 0.08 | 0.12 |
| Specific Heat | Vap. In/Out | KCAL/KGMOLE-C | 32.460 | 34.350 | - | - | — | — |
| | Liq. In/Out | KCAL/KGMOLE-C | 56.820 | 61.220 | 59.520 | 56.360 | 58.770 | 55.820 |
| Thermal Conductivity | Vap. In/Out | W/M-K | 0.012 | 0.013 | - | - | — | — |
| | Liq. In/Out | W/M-K | 0.181 | 0.172 | 0.137 | 0.163 | 0.153 | 0.180 |
| Temperature | In/Out | C | -154.8 | -132.5 | -130.0 | -149.2 | -130.0 | -149.2 |
| Operating Pressure | In/Out | BAR | 4.8 | 4.3 | 59.5 | 59.0 | 69.0 | 68.5 |
| Allowable Pressure Drop | | BAR | 0.5 | | 0.5 | | 0.5 | |
| Heat Load | | KCAL/HR | 6.020E+02 | | 1.720E+02 | | 5.160E+02 | |

그림 2.2.35. MCHE2 설계조건

◦ MR seperator

MCHE1에서의 열전달 효율을 증가시키기 위해 설계된 것이 기액분리기이다. 즉 예냉과정을 지난 혼합냉매는 기액이 혼합된 2상 유동이며 이를 MCHE에 들어가기 전에 기액을 분리해서 열전달 효율이 높은 기상은 LNG와 열교환을 하고 열적 포텐셜이 높은 액상은 동일냉매의 기상과 열교환을 하는 과정을 이루게 한다.

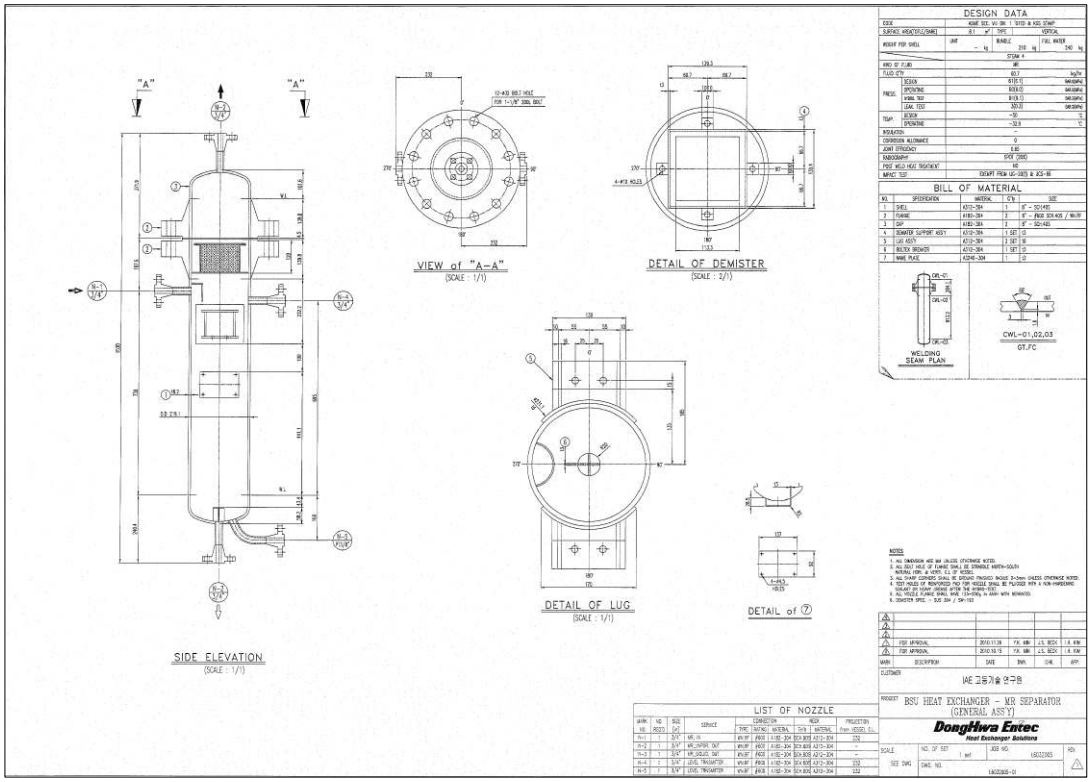



그림 2.2.36. MR 기액분리기의 설계도

표 2.2.7. MR 기액분리기의 설계사양

| | |
|---|---|
| Materials | A312-304 |
| Design pressure | 61 BAR G. |
| Operating pressure | 60 BAR G. |
| Design temperature | -50 ℃ |
| Operating temperature | -32.9 ℃ |
| Volume | 0.0459 $m^3$ |
| Surface area | 8.1 $m^3$ |
| Joint efficiency | 0.85 |

◦ 콜드 박스

LNG 액화 설비에서 초저온 열교환기를 포함하는 액화 장치를 보통 콜드박스라하여 구성하는 것이 일반적이다. BSU의 MCHE 1에서는 열교환기 제작업체의 제작환경에 따라서 하나의 MCHE 1이 두 개의 Plate fin 열교환기로 이루어지는데, 이 열교환기와 MR separator를 콜드박스로 구성하여 설계하였다. 설계된 MCHE 1 콜드박스가 다음 그림에 나타나있다.

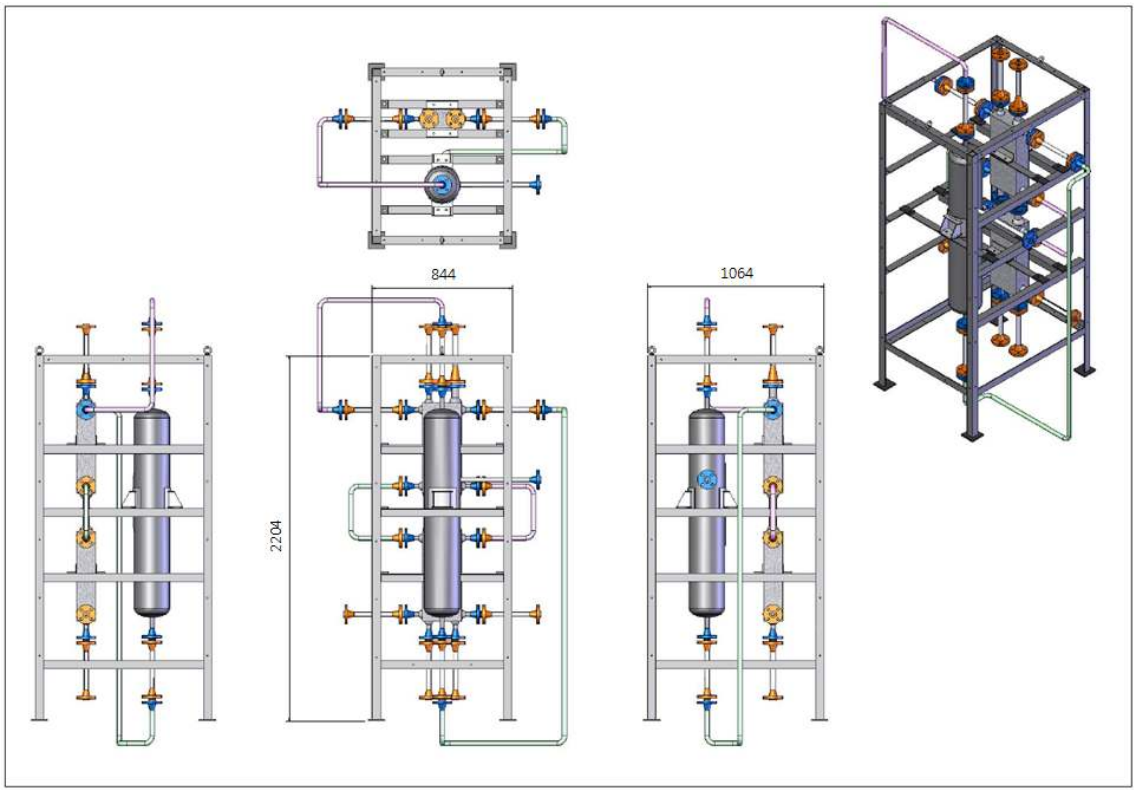



그림 2.2.37 콜드박스 설계도

◦ 가스공급설비

액화의 주 대상 Feed Gas의 NG를 공급하기 위한 설비와 냉매를 압축기에 공급하기 위한 가스공급설비는 NG의 경우 LNG를 펌프가압과 기화에 의해서 가스상태로 파이프베셀에 저장해서 질량유량계를 통해 공급하고 냉매의 경우 용기에서 질량유량계를 통해 직접 석션드럼에 축적된다. 펌프와 기화기의 용량은 $150NM^3/hr$이고 180BarA.의 고압까지 보낼 수 있으며 이를 저장하는 파이프베셀은 직경150A의 Seamless Pipe 8개를 이어서 제작되었고 부피는 $0.625M^3$이다. 또한 프로판과 혼합냉매 석션드럼은 13BarA.의 압력을 견딜 수 있는 $0.5M^3$ 부피이다.

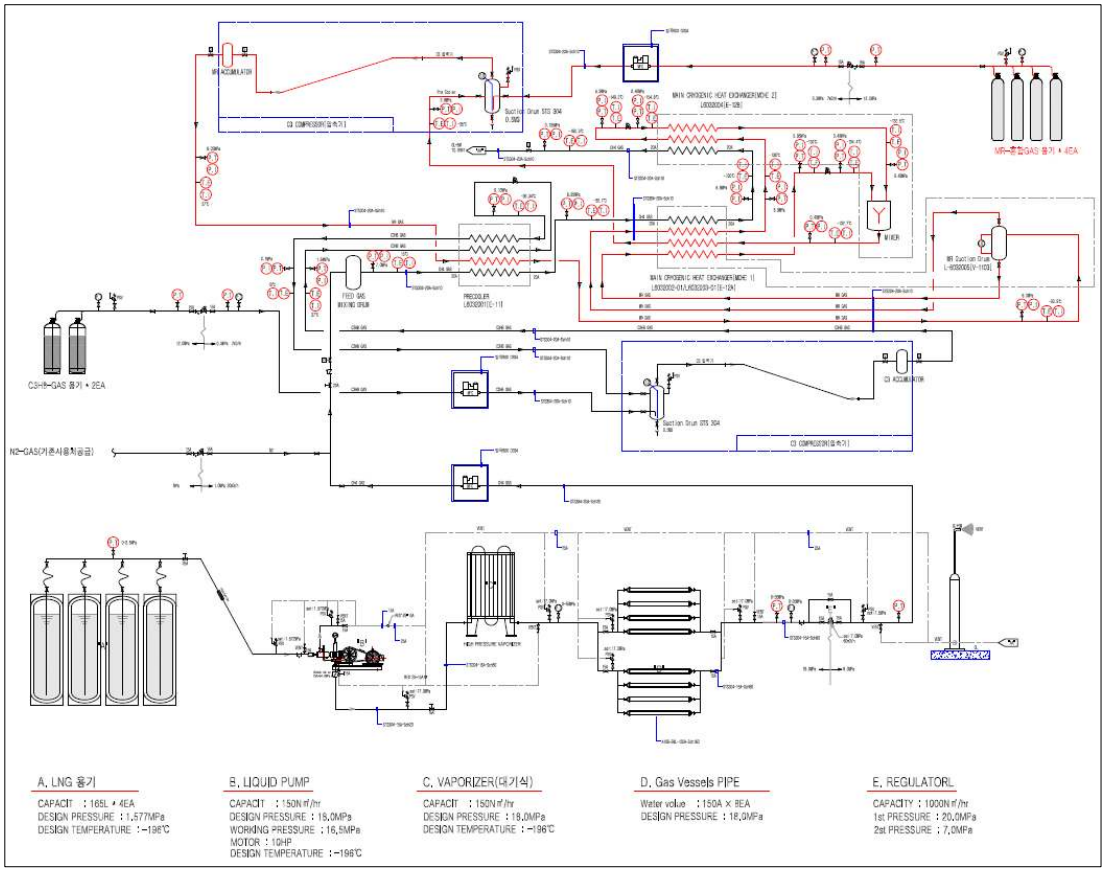



그림 2.2.38. 가스공급설비 P&ID

표 2.2.8. Liquid Pump 설계사양

| | |
|---|---|
| Motor | 10 HP |
| Capacity | 150 $NM^3/hr$ |
| Design pressure | 18 Mpa G. |
| Working pressure | 16.5 Mpa G. |
| Design temperature | -196 ℃ |

표 2.2.9. 기화기 설계사양

| | |
|---|---|
| Materials | STS 304 |
| Capacity | 150 $NM^3/hr$ |
| Design pressure | 18 Mpa G. |
| Design temperature | -196 ℃ |

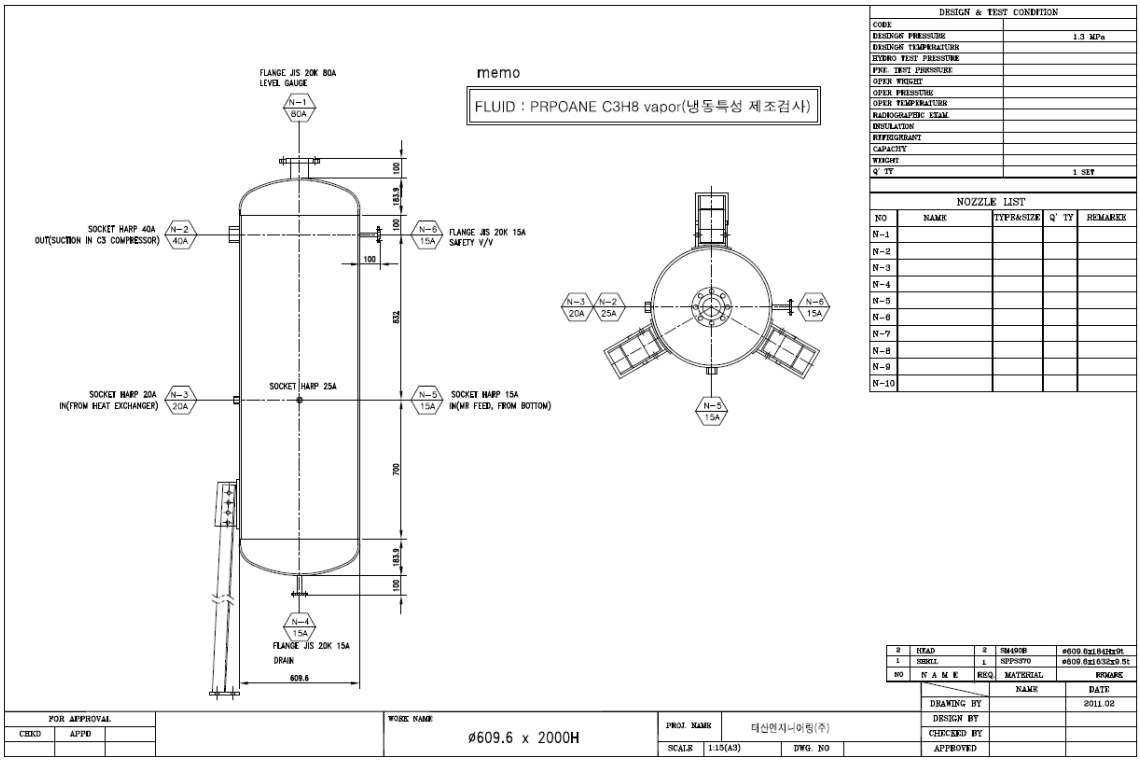



그림 2.2.39. 프로판냉매 석션드럼 설계도

표 2.2.10. 프로판냉매 석션드럼의 설계사양

| | |
|---|---|
| Materials | STPG 370 |
| Design pressure | 1.3 Mpa G. |
| Operating pressure | 0.1 Mpa G. |
| Design temperature | 40 ℃ |
| Operating temperature | 10 ℃ |
| Volume | 0.516 $m^3$ |
| Joint efficiency | 1.0 |

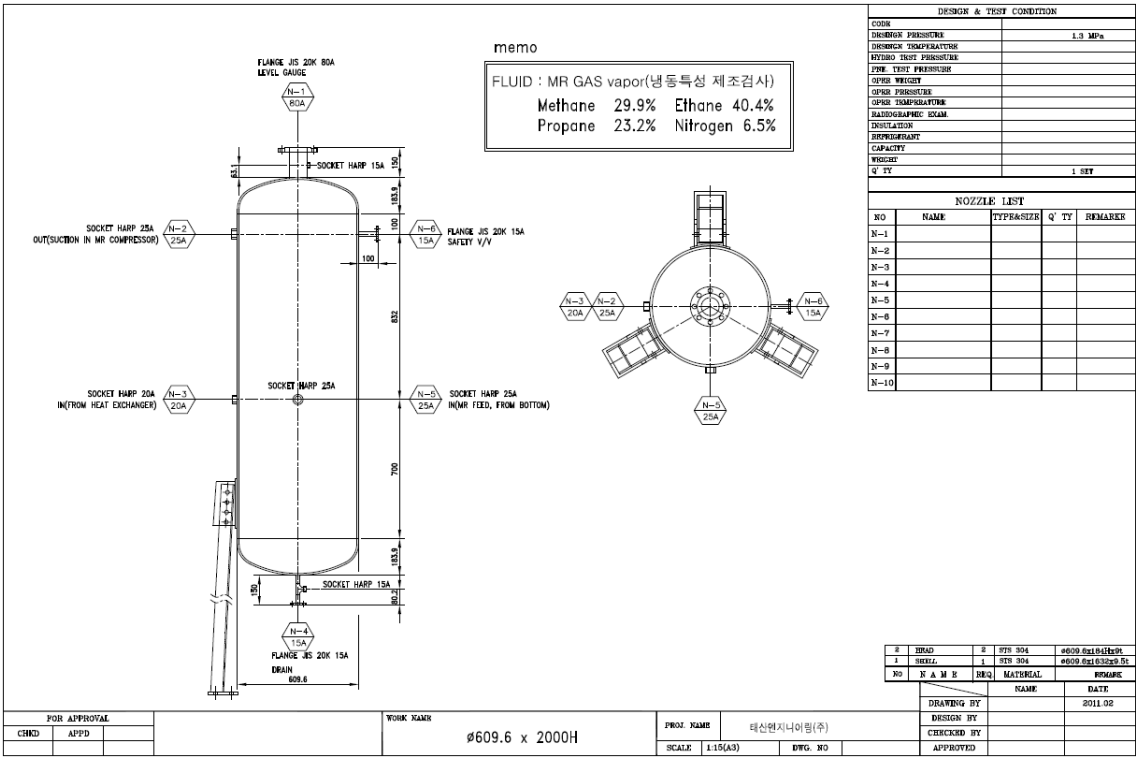



그림 2.2.40. 혼합냉매 석션드럼의 설계도

나. 천연가스 액화 BSU 상세 설계

a. 개요

LNG 액화 Bench scale unit은 LNG 플랜트 사업단에서 추진하는 테스트베드(Train-1)의 기본 설계 자료를 토대로 30kg/h 용량으로 scale down하여 설계한 것으로 기본적으로 APCI 사의 C3MR 공정을 토대로 만들어 졌다. 따라서 천연가스 액화 BSU의 구성은 크게 가스 공급 시설, 혼합냉매 압축기 스키드, 프로판 냉매 압축기 스키드, 콜드박스 스키드로 나뉘며, 주요 공정에 대한 개략도는 아래 그림과 같다.

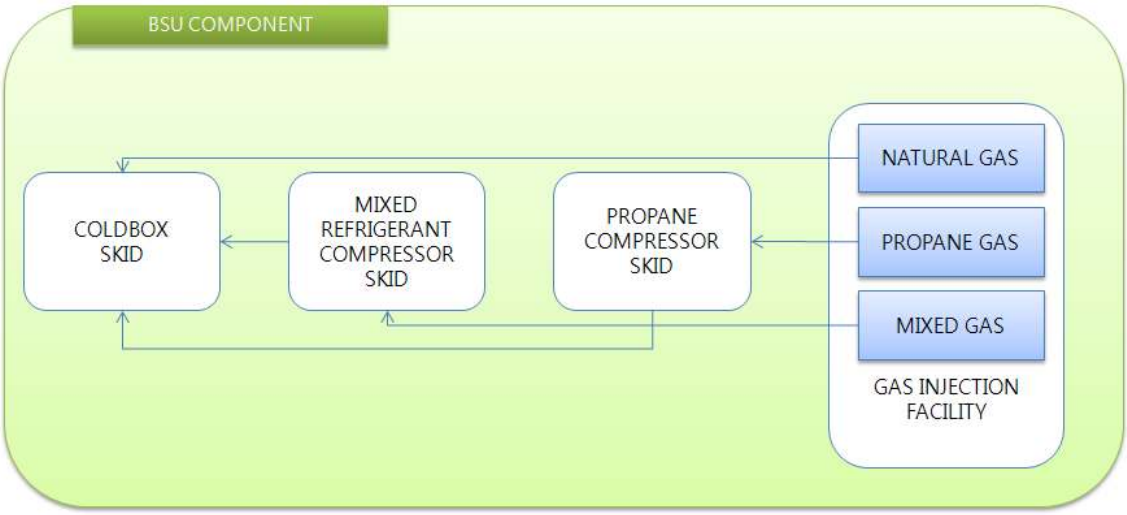



그림 2.2.41. BSU 구성도

이외에도, 압축기 냉각수 공급을 위한 냉각탑, 공압 공급을 위한 질소 공급 장치, 생산된 LNG 및 냉매의 처리를 위한 Flare stack 등의 유틸리티 시설이 있으며, 해당 부분을 포함한 조건들은 아래의 표와 같다.

표 2.2.11. 유틸리티 공급 조건

| | Operating Conditions | | Design Conditions | | Flowrate kg/h | Est. Line Size (inch) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Temperature (℃) | Pressure (bar) | Temperature (℃) | Pressure (bar) | | |
| From GIF* | | | | | | |
| Feed Gas | 15.0 | 70.0 | -20/65 | 110 | 33.0 | 3/4 |
| $N_2$ | 30.0 | 7.0 | -29/65 | 9.8 | 4.0 | 1/2 |
| Cooling Water | 32.0 | 5.0 | 65 | 6.5 | 3400 | 1 1/2 |
| To LST** | | | | | | |
| LNG | -160 | 3.0 | -175 | 5.0 | 30 | 3/4 |
| Flare | - | - | -160 | 16.0 | 3 | 1 |
| * Gas Injection Facilities<br>** LNG Storage Tank | | | | | | |

b. Process Flow Diagram

BSU의 PFD(Process Flow Diagram)은 아래와 같다.

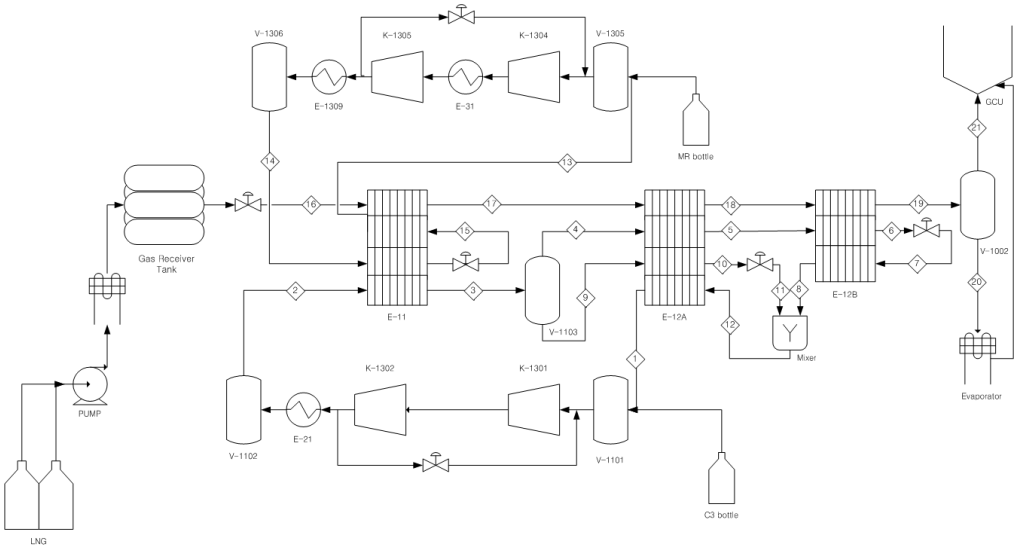



그림 2.2.42. BSU 공정 흐름도

기본적으로 BSU의 설계는 테스트베드(Train-1)의 액화 공정을 기초로 하였기 때

문에 C3MR 공정이며, 전체 LNG 플랜트에서 액화 공정만을 구성하였으므로, 전처리 과정 후에서 시작하여 천연가스 액화 부분까지가 해당 범위가 된다. 위의 PFD에 따른 Heat & Mass Balance는 별첨 자료에 나타나 있다.

c. Piping & Instrument Diagram

BSU 공정에서 천연가스 피드 라인의 구현은 180L 저장 용기(V-1003)에 액체 상태의 천연가스를 초저온 펌프(K-1306)를 이용해 승압하고 이를 기화하여 임시 저장 장치(Pipe vessel: V-1101)에 저장하고 MFC(Mass Flow Controller)를 이용해서 원하는 만큼 쓰는 구조로 설계되었다. 천연가스가 열교환기를 지나 최종적으로 액화가 되면 천연가스 라인 후단의 용기에 저장 또는 Flare stack을 통해서 소각하는 형태로 설계되었다.

프로판 사이클의 구성은 가스 상태의 프로판을 MFC를 이용해서 압축기 전단의 석션 드럼(V-1305)으로 주입하고 여기에 저장된 가스는 프로판 압축기(K-1304, K-1305)를 통해서 압축이 되는데, 압축기 스키드 후단에 있는 컨덴서(E-1309)를 지나면 액화되어 후단의 리시버 탱크(V-1306)에 저장된다. 액체의 프로판은 열교환기 Precooler(E-11)로 들어가서 팽창밸브(CV1)를 지나서 냉각되어 열교환기에서 Cold stream 역할을 하게 된다.

혼합 냉매 사이클은 가스 상태의 혼합냉매를 MFC를 이용하여 압축기 전단의 석션 드럼(V-1101)을 통해서 압축기(K-1301, K-1302)로 유입되며, 유입된 가스는 고압의 가스 상태로 리시버 탱크(V-1102)에 저장된다. 압축된 고압의 혼합냉매는 열교환기(E-11)를 통해서 -30℃ 부근까지 냉각되며, HP MR separator(V-1103)를 통해서 기-액이 분리된다. 분리된 기액 중에서 액체 상태인 혼합냉매는 열교환기(E-12A)를 통해서 sub-cooling 되며 기체 상태인 혼합냉매는 열교환기(E-12A)를 통해서 냉각되고, 후단의 열교환기(E-12B)를 통해서 한번 더 sub-cooling 된다. 기-액이 분리된 혼합냉매는 각각 팽창밸브를 통해서 온도가 하강하고 각각의 열교환기(E-12A, E-12B)에서 Cold stream 역할을 하게 된다. HP MR separator에서 분리된 각각의 혼합냉매는 믹서를 통해서 합해지고 열교환기(E-12B)를 통과한 다음 압축기 전단의 석션드럼으로 다시 모이고 이렇게 혼합냉매 사이클이 완성된다.

해당 공정에 대한 P&ID(Piping & Instrument Diagram)가 아래 그림에 나타나 있다.

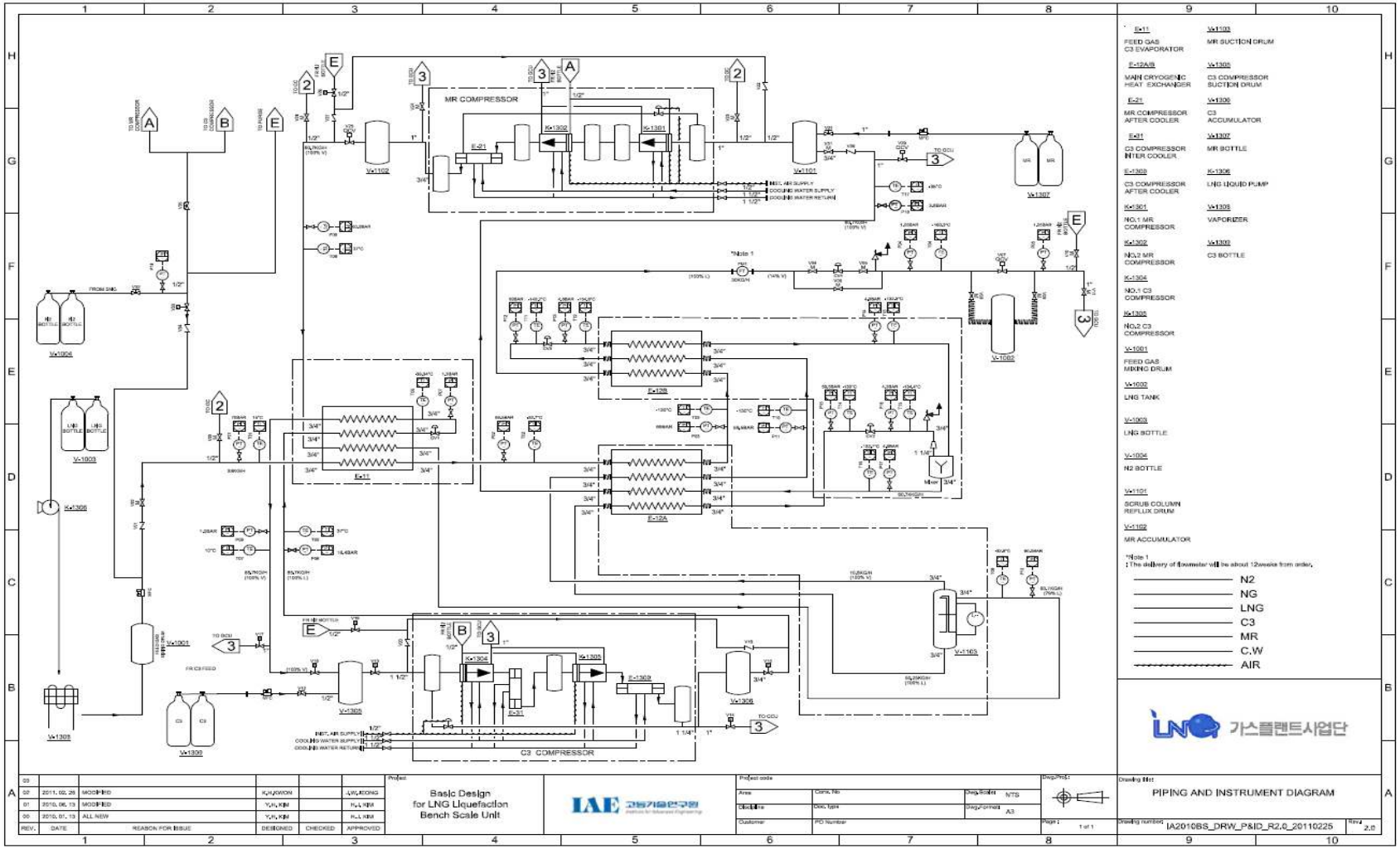



그림 2.2.43. 천연가스 액화 BSU P&ID

d. GA drawing

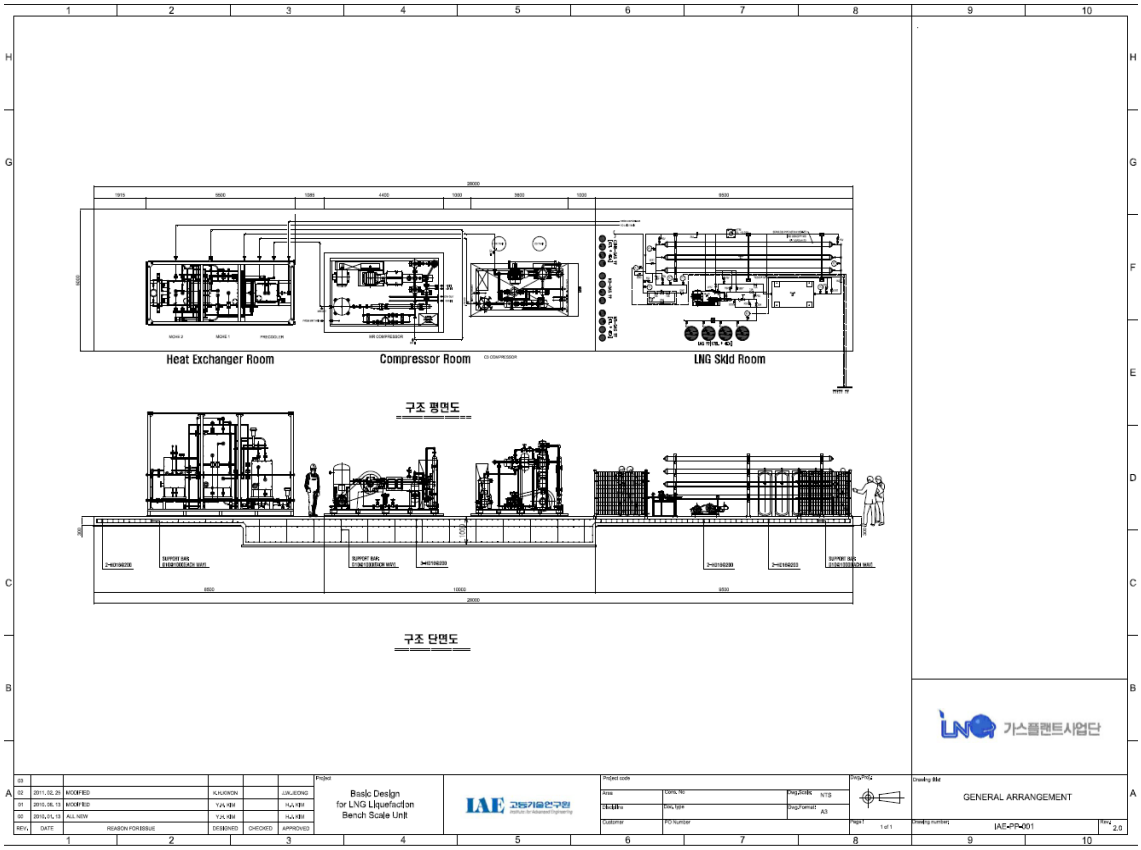



그림 2.2.44. BSU 배치도

BSU의 Equipment list 및 Instrument List는 별첨 자료에 나타나 있다.

BSU의 설계 및 제작의 목적은 테스트베드(Train-1) 건설 이전의 검증차원에 있기 때문에 테스트베드와 최대한 유사하게 설계하는데 있다고 할 수 있다. 하지만 테스트베드(Train-1)의 범위와 규모 등에서 차이점이 있기 때문에 약간의 오차는 존재한다. 테스트베드(Train-1)과 BSU의 차이점을 나타내면 다음의 표와 같다.

표 2.2.12 테스트베드(Train-1)과 BSU와의 차이점

| 구분 | 테스트베드(Train-1) | Bench Scale Unit |
|---|---|---|
| 설치장소 | 인천인수기지 | 고등기술연구원 |
| 범위 | - 전처리부터 액화 후 저장까지 | - 액화 공정 |
| 용량 | 100 ton/day | 0.72 ton/day |
| 열교환기 | - 예냉 공정 : Kettle type<br>- 액화 공정 : Plate-fin type | - 예냉 공정 : Plate-fin type<br>- 액화 공정 : Plate-fin type |
| 압축기 | - 터보 압축기 | - 왕복동형 압축기 |

주관기관에서 설계한 테스트베드(Train-1)의 설계 내용과 앞서 설명한 BSU의 설계 내용을 중요한 제어변수별로 정리하면 다음과 같다. C3MR에서 프로판 냉매 역할이라 할 수 있는 천연가스의 예냉 온도와 천연가스의 최종온도가 중요한 측정 포인트라 할 수 있고, 열교환기의 입장에서는 가장 중요한 역할을 하는 MCHE1의 증발온도가 냉매의 상태를 간접적으로 알 수 있게 하는 파라미터이기 때문에 분석적인 관점에서 중요한 요소라 할 수 있다. 그리고 최종 LNG 온도에 마지막으로 영향을 미치는 MCHE2 토출 온도는 최종 LNG 온도에 결정적인 영향을 미치며, 냉매 사이클에서 냉매의 온도 강하에 결정적인 영향을 미치는 냉매의 압력차이가 전체 시스템에서 중요한 설계 인자가 될 수 있다.

표 2.2.13. 테스트베드와 설계 비교

| 설계 항목 | 테스트베드 (주관기관 설계/건설) | LNG BSU (본 과제 실험 설비) | 오차 (오차율) |
|---|---|---|---|
| 예냉 온도 | -32.7℃ ~ -32.8℃ | -32.7℃ | 0.1℃ (0.3%) |
| MCHE 1 증발온도 | -35.7℃ | -37℃ | 1.3℃ (3.6%) |
| MCHE 2 냉각온도 | -148.6℃ | -149.2℃ | 0.6℃ (0.4%) |
| LNG 최종 온도 | -158.6℃ | -160.3℃ | 1.7℃ (1.1%) |
| 프로판 냉매 토출 압력 | 16.8 bar | 16.4 bar | 0.4℃ (2.4%) |
| 프로판 냉매 흡입 압력 | 1.3 bar | 1.3 bar | 0 bar (0%) |
| 혼합냉매 토출 압력 | 62 bar | 60 bar | 2 bar (3.3%) |
| 혼합냉매 흡입 압력 | 3.8 bar | 3.8 bar | 0 bar (0%) |
| 천연가스 압력 | 70 bar | 70 bar | 0 bar (0%) |
| MRV/MRL 유량 비율 | 1/5 | 1/5 | 0 (0%) |
| Scaledown 비율 (LNG 생산량) | 1/143 | | |

*※ 테스트베드(Train-1) : C3MR의 상용공정을 사용하고 인천 인수기지에 설치/운영되는 100톤/일 급의 실험 설비*

e. 제어 시스템 설계

◦ PID control

제어 변수와 기준 입력 사이의 오차에 근거하여 계통의 출력이 기준 전압을 유지하도록 하는 피드백 제어의 일종으로 비례(Proportional) 제어와 비례적분(Proportional-Integral) 제어, 비례미분(Proportional-Derivative)제어를 조합하여 아래와 같은 공식에 의해 제어되는 방식이다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) + K_I \int_0^t e(\tau)\, d\tau$$

$K_p, K_d, K_i$ 는 비계계수, 미분계수, 적분계수

◦ 제어시스템의 구성

본 Project에서 PID control이 필요한 Instruments는 천연가스 유량계 및 RTD, 압력 트랜스미터, 프로판 냉매 사이클에서의 유량계, RTD, 압력트랜스 미터, 혼합냉매 사이클에서 MRL, MRV 각각의 유량계 및 RTD, 압력 트랜스미터 등이 된다.

본 제어시스템의 중심은 제어프로그램 연산장치로서 PLC를 사용하였다. PLC는 Siemens 사의 S-7 400 기종을 사용하였으며, 이중화로 안정성을 도모하였다. PLC의 핵심인 CPU는 이중화로 두 개가 설치가 되어 있으며, 각 계기에서 PLC로 케이블을 이용하여 Analog I/O, Digital I/O 모듈로 연결되며 이더넷 단자를 이용해서 제어용 워크스테이션으로 이더넷 통신을 한다.

PLC를 사용하기 때문에 각 상황에 맞게 제어 로직을 변경 및 추가 할 수 있으며, 상황에 따라서 수동운전과 자동운전을 자유롭게 스위치 할 수 있도록 하였다. 사용자 인터페이스인 HMI는 Siemens 사의 WinCC 프로그램을 이용하였으며, 이는 서버용 워크스테이션과 클라이언트 워크스테이션에 각각 설치되어 운전원 각각이 분할 운전을 가능하게 하였다.

PID 제어가 필요하지 않은 계기들은 실시간으로 아래의 구성과 같은 제어시스템에서 운전원에 디스플레이 할 수 있고 분 단위로 모든 계기의 값들은 서버 워크스테이션의 데이터베이스에 저장되어 운전이 끝나고 난 뒤에 데이터 형태로 추출이 가능하게 하였다.

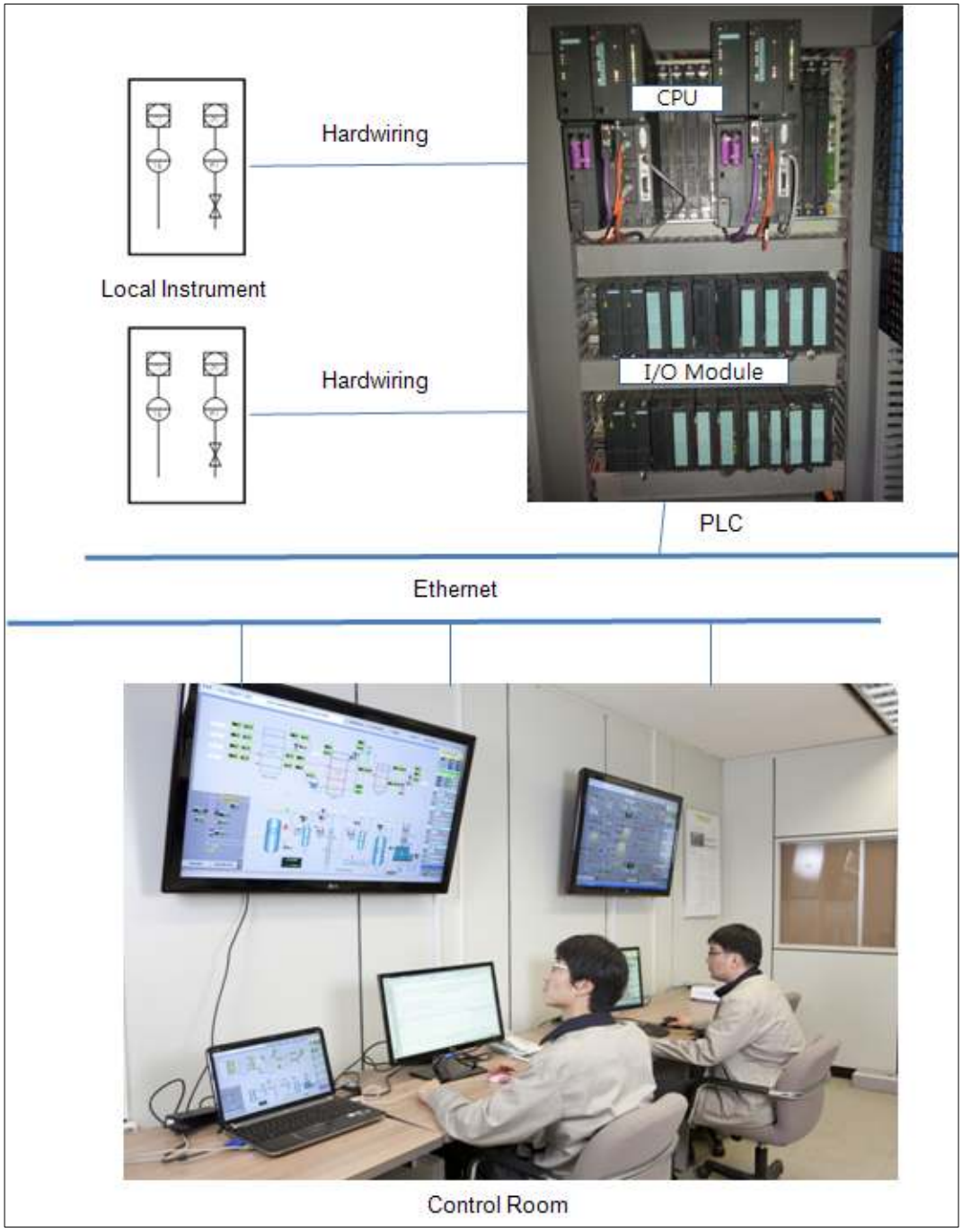



그림 2.2.45. BSU 제어시스템 및 모니터링

◦ Cause & Effect Diagram

**IAE**

**CAUSE AND EFFECT CHART (REV.0)**

**LNG LIQUEFACTION BENCH SCALE UNIT**

**EMERGENCY SHUTDOWN SYSTEM**

| INPUT SIGNAL | TAG | DESCRIPTION | ADDRESS | T | NORMAL CONTACT | RANGE | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | ACTION | CLOSE XV108 | CLOSE XV107 | CLOSE XV203 | CLOSE XV204 | CLOSE XV205 | CLOSE XV206 | CLOSE XV207 | CLOSE XV201 | CLOSE XV202 | CLOSE XV208 | STOP | STOP | CLOSE PCV101 | CLOSE PCV102 | CLOSE PCV103 | CLOSE PCV104 | STOP ET-01 |
| EMERGENCY STOP BUTTON-1 | PB1 | EMERGENCY STOP | | 25KC | NC | DIGITAL | 1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| EMERGENCY STOP BUTTON-2 | PB2 | EMERGENCY STOP | | 25KC | NC | DIGITAL | 2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| EMERGENCY STOP BUTTON-3 | PB3 | EMERGENCY STOP | | 25KC | NC | DIGITAL | 3 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| EMERGENCY STOP BUTTON-4 | PB4 | EMERGENCY STOP | | 25KC | NC | DIGITAL | 4 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| FEED GAS MIXING DRUM OUTLET N2 PRESSURE | PT104 | PWR PRS | RW013 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 5 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET N2 PRESSURE | PT103 | PWR PRS | RW014 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 6 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET N2 PRESSURE | PT106 | PWR PRS | RW015 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 7 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET LNG PRESSURE | PT103 | PWR PRS | RW016 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 8 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| LNG TANK PRESSURE | PT105 | PWR PRS | RW025 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 9 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| C3 ACCUMULATOR OUTLET C3 PRESSURE | PT206 | PWR PRS | RW023 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 10.00 | 10 | | X | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET C3 PRESSURE | PT207 | PWR PRS | RW024 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 11 | | X | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET C3 PRESSURE | PT203 | PWR PRS | RW026 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 12 | | X | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | |
| MR ACCUMULATOR OUTLET MR PRESSURE | PT208 | PWR PRS | RW029 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 13 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET MR PRESSURE | PT207 | PWR PRS | RW028 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 14 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET MR PRESSURE | PT211 | PWR PRS | RW032 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 15 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET TO CONTROL VALVE INLET MR PRESSURE | PT212 | PWR PRS | RW034 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 16 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER INLET FROM CONTROL VALVE OUTLET PRESSURE | PT213 | PWR PRS | RW038 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 17 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET MR PRESSURE TO MIXER PRESSURE | PT214 | PWR PRS | RW036 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 18 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET TO CONTROL VALVE INLET PRESSURE | PT202 | PWR PRS | RW040 | 25KC | 4~20mA | 0.00 ~ 20.00 | 19 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET TO CONTROL VALVE OUTLET PRESSURE | PT205 | PWR PRS | RW042 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 20 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| MIXER OUTLET MR PRESSURE | PT215 | PWR PRS | RW044 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 21 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET MR PRESSURE TO MR COMPRESSOR | PT216 | PWR PRS | RW046 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 22 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO FROM 3840 PRESSURE | - | PWR PRS | RW045 | 25KC | 4~20mA | 1.00 ~ 15.00 | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FEED GAS MIXING DRUM OUTLET N2 TEMPERATURE | TE104 | TEMP TAG | RW051 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 24 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET N2 TEMPERATURE | TE103 | TEMP TAG | RW054 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 25 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET N2 TEMPERATURE | TE106 | TEMP TAG | RW056 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 26 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET LNG TEMPERATURE | TE103 | TEMP TAG | RW055 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 27 | X | | | | | | | | | | | | | | | X | X |
| C3 ACCUMULATOR OUTLET C3 TEMPERATURE | TE206 | TEMP TAG | RW060 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 28 | | X | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | |
| FEED GAS C3 ACCUMULATOR OUTINLET C3 TEMPERATURE | TE207 | TEMP TAG | RW063 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 29 | | X | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET C3 TEMPERATURE | TE203 | TEMP TAG | RW064 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 30 | | X | X | X | X | X | X | | | | | | X | | | | |
| MR ACCUMULATOR OUTLET MR TEMPERATURE | TE208 | TEMP TAG | RW068 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 31 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| FEED GAS C3 EVAPORATOR OUTLET MR TEMPERATURE | TE207 | TEMP TAG | RW066 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 32 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET MR TEMPERATURE | TE211 | TEMP TAG | RW070 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 33 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET TO CONTROL VALVE INLET MR TEMPERATURE | TE212 | TEMP TAG | RW072 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 34 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER INLET FROM CONTROL VALVE OUTLET TEMPERATURE | TE213 | TEMP TAG | RW074 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 35 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.2 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET MR PRESSURE TO MIXER TEMPERATURE | TE214 | TEMP TAG | RW076 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 36 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET TO CONTROL VALVE INLET TEMPERATURE | TE203 | TEMP TAG | RW078 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 37 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HETT EXCHANGER OUTLET TO CONTROL VALVE OUTLET TEMPERATURE | TE205 | TEMP TAG | RW080 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 38 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| MIXER OUTLET MR TEMPERATURE | TE215 | TEMP TAG | RW082 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 39 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| NO.1 MAIN CRYOGENIC HEAT EXCHANGER OUTLET MR TEMPERATURE TO MR COMPRESSOR | TE216 | TEMP TAG | RW084 | 25KC | 4~20mA | -200 ~ 200 | 40 | | | | | | | | X | X | X | | | | X | X | | |
| [illegible] | - | PWR PRS | RW086 | 25KC | 4~20mA | ? | 41 | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| [illegible] | - | PWR PRS | RW088 | 25KC | 4~20mA | ? | 42 | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| [illegible] | - | PWR PRS | RW092 | 25KC | 4~20mA | ? | 43 | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| [illegible] | - | TEMP TAG | RW094 | 25KC | 4~20mA | ? | 44 | | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| [illegible] | - | PWR PRS | RW096 | 25KC | 4~20mA | ? | 45 | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| [illegible] | - | PWR PRS | RW098 | 25KC | 4~20mA | ? | 46 | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| [illegible] | - | PWR PRS | RW099 | 25KC | 4~20mA | ? | 47 | | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| [illegible] | - | TEMP TAG | RW093 | 25KC | 4~20mA | ? | 48 | | | | | | | | | | | X | | | | | | |

◦ LNG BSU 설계집

위에서 설명한 BSU의 기본설계에서부터 주요기자재 상세설계 및 계기 선정에 대한 기록을 토대로 하여 아래의 그림과 같이 LNG 플랜트 BSU 설계집을 제작 하였다.

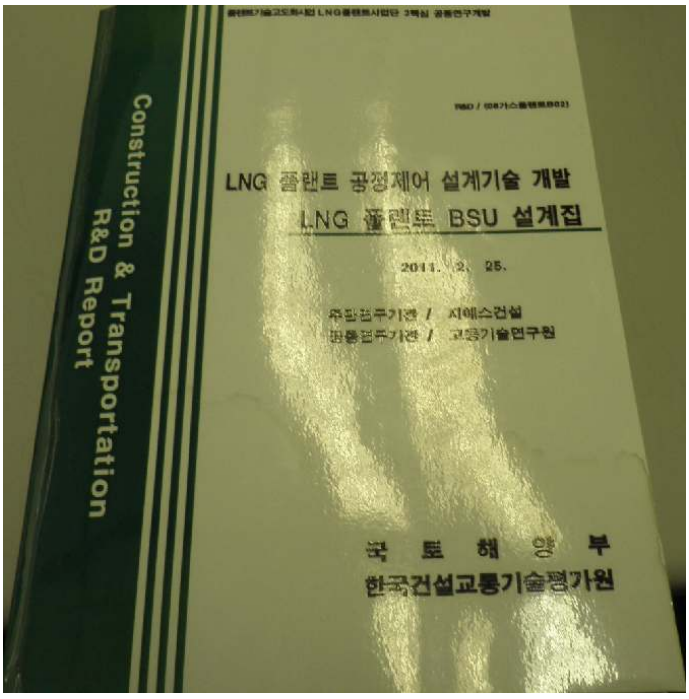



그림 2.2.46 LNG 플랜트 BSU 설계집

2. LNG 플랜트 BSU 제작 및 운전

(1) LNG 액화 공정 BSU 제작

가. 기초공사

BSU 제작에 앞서 해당 부지를 선정하고 기초공사를 진행하였다. 기초공사는 압축기가 놓이게 될 부지에는 압축기의 진동을 감안하여 충분하게 터파기 공사를 진행하였으며, 전체적인 부지에 대한 기초공사 도면은 아래 그림과 같다.

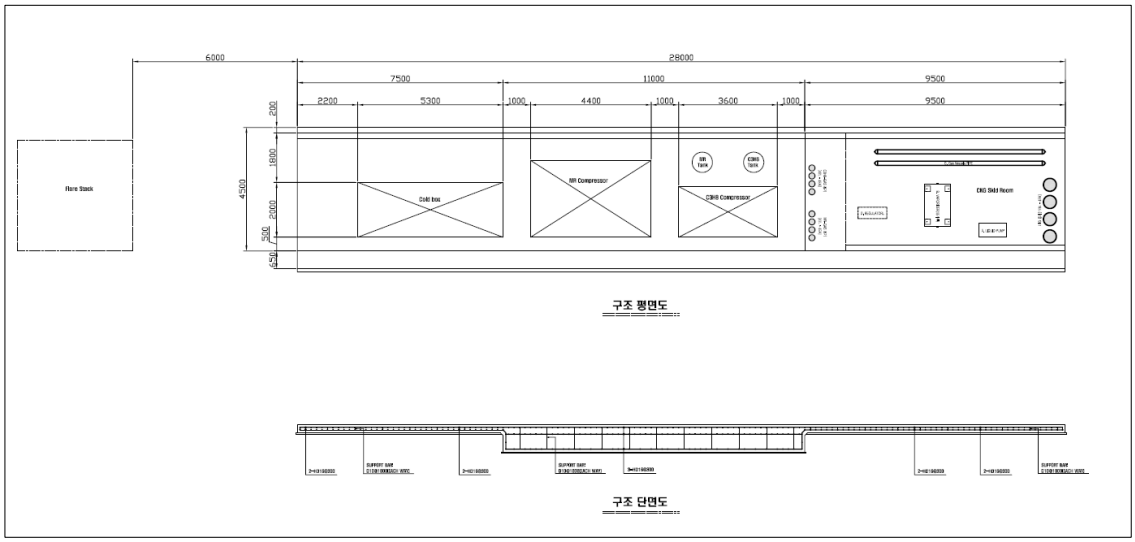



그림 2.2.47. 기초공사 도면

해당 기초공사는 약 한달 정도 소요 되었으며, 아래 그림 순서대로 터파기 및 철근 작업, 양생, 그리고 기초공사를 마친 화면을 보인다.



그림 2.2.48. 기초공사 - 골조작업



그림 2.2.49. 기초공사 사진 - 양생작업

나. 압축기 스키드 제작

천연가스 액화 BSU의 압축기는 프로판 냉매 압축기와 혼합냉매 압축기 2대로 구성되며, 각각의 스키드로 제작되었다. 프로판 압축기 스키드는 석션측 1st subber와 1단 압축을 행하는 피스톤 부분, 1단 압축기에서 압축된 가스를 냉각하는 inter cooler, inter cooler를 통해서 냉각되어진 압축된 가스는 다시 2nd subber로 저장되

며 이것은 다시 두 번째 압축 피스톤을 통해서 최종 압축되어 진다. 최종 압축되어 진 압축기는 콘덴서를 통해서 액화된 프로판을 생성하고 액화된 프로판은 리시버 탱크로 저장되어 진다. 이와 같은 일련의 공정들이 하나의 스키드안에서 행해지며 구성된다. 로컬 제어판넬도 스키드에 포함된다. 프로판 압축기 스키드의 완성된 그림은 아래와 같다.

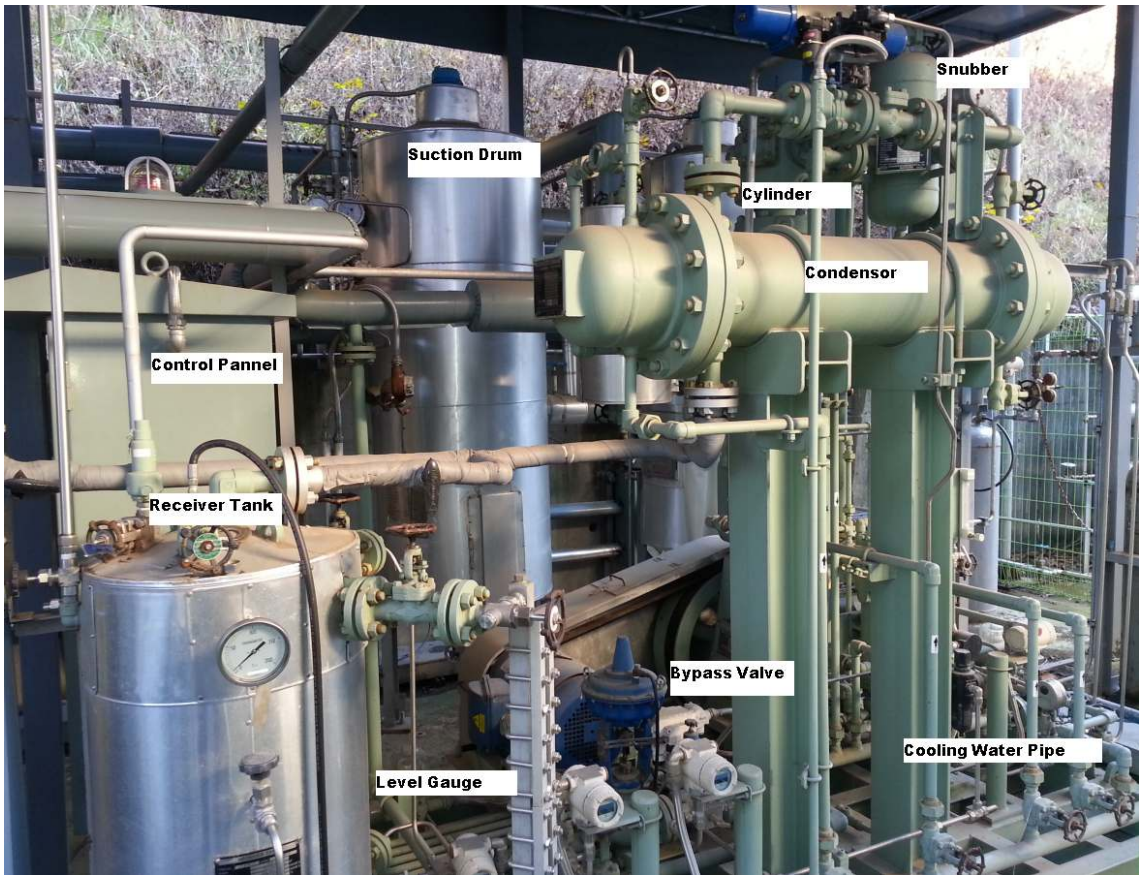



그림 2.2.50. 프로판 냉매 압축기

혼합냉매 압축기는 석션 측 들어오는 가스를 저장하는 1st subber와 1단 압축을 행하는 실린더, 압축된 가스를 냉각하는 inter cooler, inter cooler에서 냉각된 가스를 저장하는 2nd subber, 2nd subber의 가스를 압축하는 두 번째 피스톤과 최종 압축된 가스를 냉각하는 after cooler, after cooler를 통해 식혀진 가스를 저장하는 리시버 탱크로 구성되는데 이와 같은 공정들이 하나의 스키드 안에서 행해지며 구성된다. 프로판 압축기 스키드와 마찬가지로 로컬 제어판넬까지 스키드에 포함되며, 혼합냉매 압축기 스키드 그림은 아래와 같다.




그림 2.2.51. 혼합냉매 압축기

다. 콜드박스 스키드 제작

콜드박스 스키드는 프로판 예냉을 위한 Pre-cooler를 포함한 콜드박스 1기, MCHE1 기능을 하는 Flate-fin 열교환기 두 기와 HP MR separator를 포함한 콜드박스 1기, 그리고 MCHE2 기능을 하는 Flate-fin 열교환기와 Mixer를 포함하는 콜드박스 1기로 구성되어 총 콜드박스 3기로 구성되어 있다. 또한 대부분의 온도 트랜스미터와 압력 트랜스미터를 포함하며, 팽창밸브 역할을 하는 자동제어밸브 4기와 유량계 4 set를 포함하며, 차단 기능의 On-off 밸브 및 수동밸브들이 설치되어 있다.

BSU의 모든 전계장 설비들은 방폭(Exd II) 설비여야 하며, 해당 방폭박스가 콜드박스 스키드 측면에 설치되어 있다. 콜드박스 스키드의 완성 그림은 아래와 같으며 프로판 압축기, 혼합냉매 압축기와 함께 직렬 형태로 연결되어 있다.

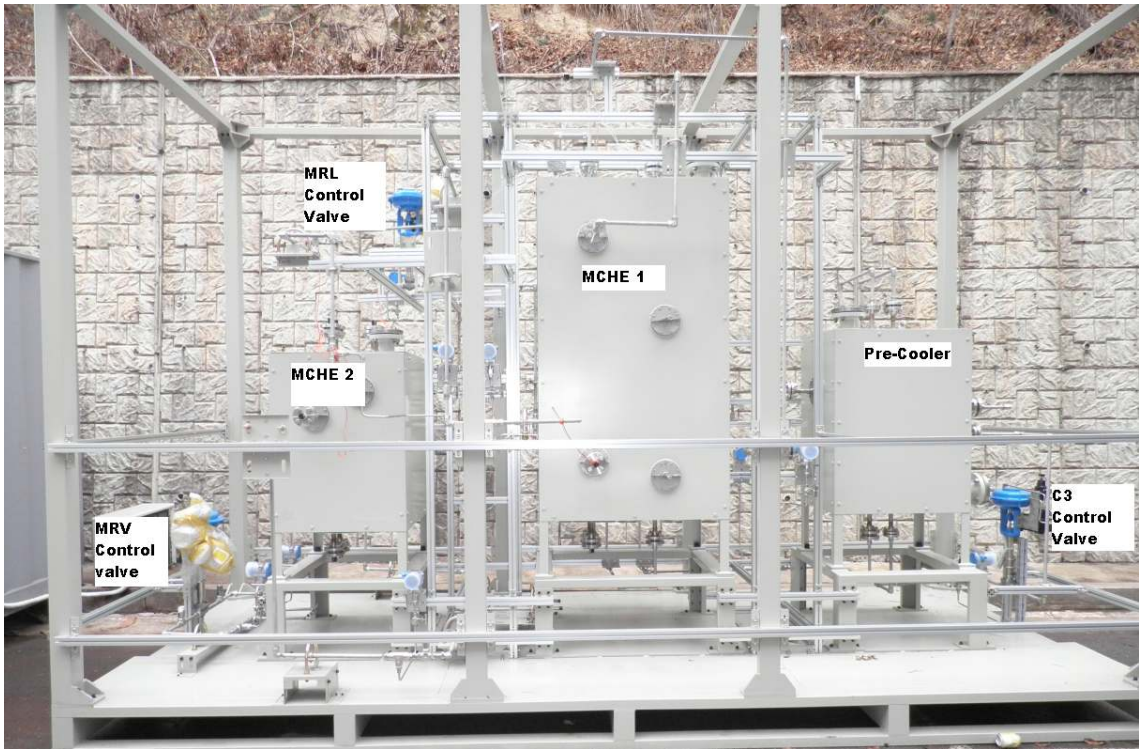



그림 2.2.52. 콜드박스 스키드

라. 배관 및 계기 설치

가스 공급 설비와 프로판 압축기, 혼합냉매 압축기 그리고 콜드박스 스키드로 연결되는 배관은 SUS 316L 배관을 사용하였으며, 연결부위는 약 350 포인트 용접 작업과 Lock 타입의 연결을 하였다. 천연가스 피드라인은 3/4" SUS 316L 튜브를 사용하였으며, 압력 트랜스미터 연결 라인은 3/8" SUS 316L 튜브를 사용하였다. 프로판 사이클에서의 배관은 열교환기 부근에서의 공정 라인에는 3/4" SUS 316L 튜브를 사용하였으며, 압축기 석션 드럼에서 압축기로 연결되는 라인에는 1 1/2" SUS pipe를 사용하였다. 혼합냉매 사이클에서는 열교환기 부근에서의 라인은 3/4" SUS 316L 튜브를 사용하였으며, 혼합냉매 압축기 석션드럼에서 압축기로 연결되는 라인에서는 1" SUS pipe를 사용하였다. 혼합냉매 사이클 및 프로판 냉매 사이클 역시 압력 트랜스미터 연결 라인은 3/8" SUS 316L 튜브를 사용하였다.

온도 센서로는 RTD(측온 저항체)를 사용하였으며, 대부분이 열교환기 부근에 설치되었다. 열교환기와의 거리는 1m 미만의 거리에서 측정이 가능하게 설치하였으며, RTD의 설치된 그림이 아래와 같다.



그림 2.2.53. RTD 설치

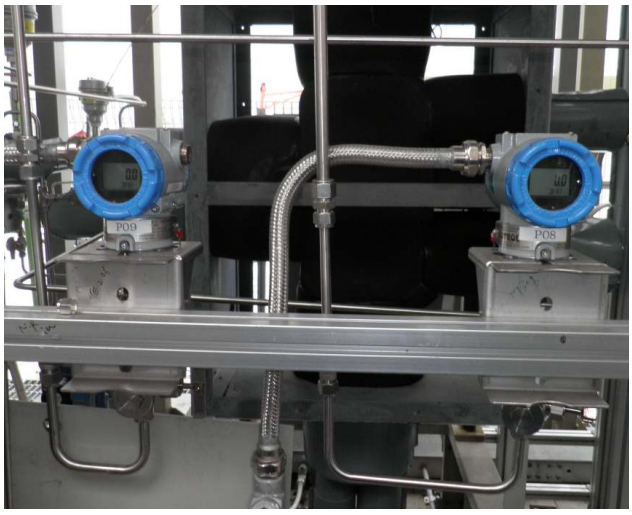


그림 2.2.54. 압력 트랜스미터 설치

압력 트랜스미터는 -1 bar~ 20 bar, 1~200 bar 두 종류의 압력트랜스 미터를 사용하였으며, 대부분이 RTD와 같은 위치에 설치되고, 트랜스미터는 바깥쪽으로 빼어서 그림과 같이 설치하였다.

유량계는 총 5기가 설치되었으며, 1기의 와류 유량계와 5개의 질량 유량계로 구성되었다. 총 6기 중 천연가스 피드 라인에 1기, 프로판 사이클에서 압축된 액상의 프로판 라인에 1기, 압축된 혼합냉매에 1기, 기액이 분리된 혼합냉매 중 액상 부분에 1기, 그리고 팽창 후에 압축기 석션쪽으로 흘러가는 라인에 1기 이렇게 총 6기의 유량계를 설치하였다. 설치된 그림은 아래와 같으며 위쪽이 질량유량계 설치 그림이며, 아래쪽이 와류 유량계의 설치 그림이다.



그림 2.2.55. 질량 유량계와 와류 유량계 설치

마. 냉각수 공급 설비

프로판 냉매 압축기 및 혼합냉매 압축기에 압축가스 냉각 장치로서 냉각수를 사용하였다. 압축된 가스는 온도가 상승하여 압축기의 체적 효율을 저하하기 때문에,

냉각이 필요하다. BSU의 제작에서 냉각수는 원내의 물배관을 이용해서 물탱크에 물을 저장하고 펌프를 이용해서 BSU 냉매 압축기 각각에 공급한다. 한번 순환한 물은 가스와 열교환하여 데워져 나오므로, 냉각탑을 이용해서 다시 냉각해서 압축기로 가게 되는 순환구조로 되어 있다. 냉각수 공급에 사용되는 설비가 아래 사진에서 보이고 있다.



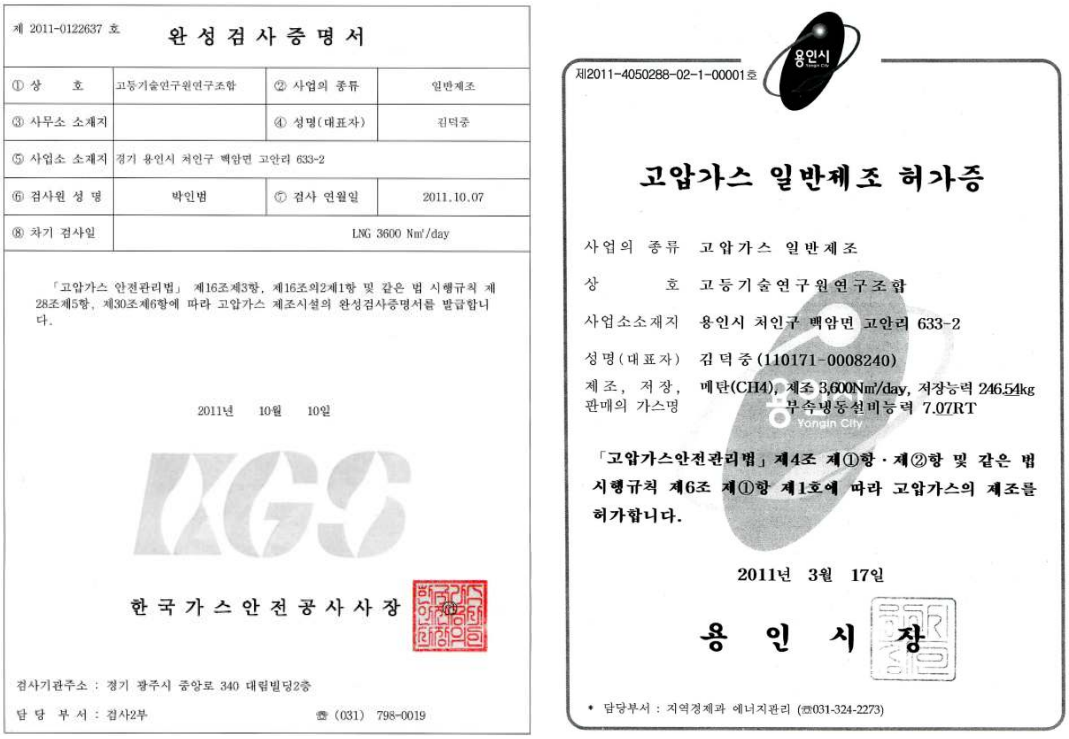

그림 2.2.56. 냉각수 공급 설비

앞서 설명한 BSU 단위 설비들을 가스 진행 방향을 따라서 가스공급설비, 프로판 압축기, 혼합냉매 압축기, 콜드박스 스키드, 플래어 스택 순으로 배치된 BSU 전체 그림이 아래와 같이 나타난다.




그림 2.2.57. LNG BSU 완공 전경

LNG BSU의 제작이 완료되고 난 후 가스안전공사를 통해서 해당 시설에 대한 완성검사를 받았으며, 해당 시청으로부터 사용허가를 받았다. 본 시설은 고압가스 일반제조 시설로 가스안전공사의 고압가스 안전관리법을 적용받아서 검사를 받았으며 아래 그림과 같이 완성검사를 받았으며, 완성검사를 득하고 해당 시청에 사용허가를 받음으로써 해당 설비를 이용할 수 있기 때문에 그림과 같이 고압가스 일반제조 허가증을 받았다.



제 2011-0122637 호

**완 성 검 사 증 명 서**

| | | | |
|---|---|---|---|
| ① 상 호 | 고등기술연구원연구조합 | ② 사업의 종류 | 일반제조 |
| ③ 사무소 소재지 | | ④ 성명(대표자) | 김덕중 |
| ⑤ 사업소 소재지 | 경기 용인시 처인구 백암면 고안리 633-2 | | |
| ⑥ 검사원 성 명 | 박인범 | ⑦ 검사 연월일 | 2011.10.07 |
| ⑧ 차기 검사일 | LNG 3600 Nm³/day | | |

「고압가스 안전관리법」 제16조제3항, 제16조의2제1항 및 같은 법 시행규칙 제28조제5항, 제30조제6항에 따라 고압가스 제조시설의 완성검사증명서를 발급합니다.

2011년 10월 10일

KGS

한 국 가 스 안 전 공 사 사 장

검사기관주소 : 경기 광주시 중앙로 340 대림빌딩2층

담 당 부 서 : 검사2부 ☎ (031) 798-0019

제2011-4050288-02-1-00001호

용인시 Yongin City

**고압가스 일반제조 허가증**

사업의 종류 고압가스 일반제조

상 호 고등기술연구원연구조합

사업소소재지 용인시 처인구 백암면 고안리 633-2

성명(대표자) 김덕중(110171-0008240)

제조, 저장, 판매의 가스명 메탄(CH4), 제조 3,600Nm³/day, 저장능력 246.54kg 부속냉동설비능력 7.07RT

**「고압가스안전관리법」 제4조 제①항·제②항 및 같은 법 시행규칙 제6조 제①항 제1호에 따라 고압가스의 제조를 허가합니다.**

2011년 3월 17일

용 인 시 장

* 담당부서 : 지역경제과 에너지관리 (☎031-324-2273)

그림 2.2.58 BSU 완성검사증명서와 고압가스 일반제조 허가증

(2) BSU 시운전 및 단위설비 운전 특성 도출

가. BSU 시운전

LNG 플랜트 액화공정의 BSU를 제작 후 주요 설비를 중심으로 시운전을 진행하였으며, 시운전 내역은 아래와 같이 진행하였다.

Table 2.2.13. 시운전 시행 내용

| 차수 | 일시 | 내용 | 결과 |
|---|---|---|---|
| 1차 | 2011.11 | 프로판 압축기 시운전 | 압축기 정상 운전 확인. 냉매 사이클 구성에 냉매 가스의 주입이 불충분. 과냉 현상에 대한 대책이 필요 |
| 2차 | 2011.12 | 혼합냉매 압축기 시운전 및 1차 보완 | 프로판 냉매 주입 기능 개선, 혼합냉매 압축기 정상 기동. 프로판 냉매 과냉에 대한 조치가 필요 |
| 3차 | 2012.11 | 팽창밸브 성능 확인 및 2차 보완 | 과냉현상에 대한 제어 수단으로 혼합냉매 사이클을 먼저 구성해서 프로판 과냉현상을 억제. 압축 후 온도를 설계 온도와 맞추기 위한 노력이 필요 |
| 4차 | 2012.2 | 프로판 냉매 과열도 측정 및 3차 보완 | 압축 후 냉매의 온도 상승을 위해 냉각수 양을 조절해서 온도 상승을 유도. 과냉 현상에 따른 압축기 손상을 막기 위한 히터 사용의 결과는 만족스럽지 못함. |
| 5차 | 2012.2 | 단열 후 전체 사이클 시운전 | 설비의 모든 부분(MR separator 제외)에 단열을 하고 시운전 함. 열교환기의 열교환은 비교적 잘 이루어짐. 전체 운전 절차 정립. |

a. 운전설비와 운전방법

BSU 설비와 운전을 위한 공정 흐름도 및 개념도는 그림2.2.59에 나타내었다. Feed Gas 공급은 평택인수기지로부터 용기에 받아 온 LNG를 펌프를 통한 가압 후 기화해서 고압의 가스를 압력조정 후 사용한다. 2종류의 냉매(프로판, 혼합냉매)는 압축기를 통해 압축과 냉각을 해서 열교환기에 보내진다. 플레이트 타입의 열교환

기 3기를 지나면서 냉매와의 열교환을 통해 Feed Gas는 극저온이 되어 LNG로 변하게 된다.

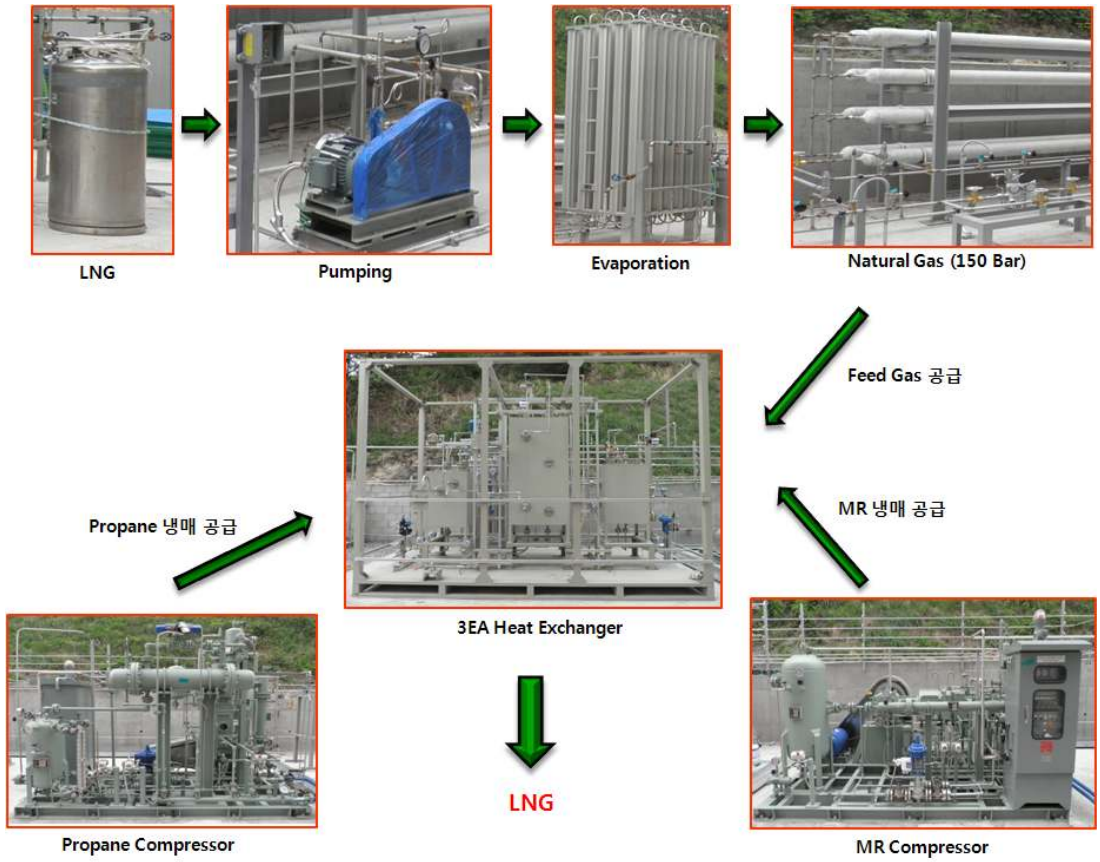



그림 2.2.59. LNG BSU 운전방법 개략도

운전을 위한 장비를 조작하는 순서는 실험을 하기 전과 실험 중 그리고 실험을 종료하는 3단계로 구분해서 각 단계별 절차서를 구비하고 이에 따라 운전 과정이 진행된다.

표 2.2.14 LNG BSU 실험절차서

| 순 서 | 내 용 |
|---|---|
| 1 | 전원 공급 상태 (압축기 3상 380V) 확인 |
| 2 | PLC 제어판넬 통신 포트 확인 |
| 3 | 제어실 HMI 통신, HMI를 통한 원격제어 상태 확인 |
| 4 | 액화질소 용기압력 확인 후 질소공급 |

| | |
|---|---|
| 5 | BSU 설비 기밀 테스트, 가스 퍼지 |
| 6 | 냉매(프로판, 혼합냉매) 배관 진공 |
| 7 | 냉매(프로판, 혼합냉매) 주입 준비 |
| 8 | BSU 기동 밸브 개폐 상태 |
| 9 | 물 펌프, 쿨링 타워 기동, 냉각수 공급 |
| 10 | Flare Stack 상황(LPG 유량, 밸브 개폐 상태) |
| 11 | 안전비품(안전모, 안전화, 보안경, 가스검지기) |
| 12 | MFC를 통한 냉매(프로판, 혼합냉매) 공급, 적정 유량 |
| 13 | 혼합냉매 압축기 구동, 흡입구 적정 압력 |
| 14 | 혼합냉매 제어밸브 전, 후 압력 조절 |
| 15 | 프로판 압축기 구동, 흡입구 적정 압력 |
| 16 | 프로판 제어밸브 전, 후 압력 조절 |
| 17 | 냉매 주입 정지(프로판 16.5Bar, 혼합냉매 60Bar) |
| 18 | CNG 공급스키드 레귤레이터 세팅, 밸브 조절,<br>MFC를 통한 NG 주입(쿨 다운, 유량-시간당 10Nm3) |
| 19 | NG 공급 유량을 점진적 증가시킴<br>(온도강하 트렌드에 따른 시간당 30Nm3 내) |
| 20 | 냉동사이클 모니터링, 온도 유지<br>(MCHE1입구 -32도, MCHE2 입구 -120도 이하) |
| 21 | 냉동사이클 성능 향상<br>(MRV, MRL 밸브 조절을 통한 냉매 유량 제어) |
| 22 | 합냉매 압축기 스톱, Receiver Tank 전, 후 밸브 닫음 |
| 23 | 프로판 압축기 스톱, 프로판 냉매 벤트 |
| 24 | 물 펌프, 쿨링타워 팬 스톱, 냉각수 드레인 |
| 25 | 배관 압력 확인 후 Flare Stack 스톱 |
| 26 | 질소공급 중단, 주변 정리 정돈 |

나. 실험 안전

LNG BSU는 고압가스 일반제조시설로서 실험 시 안전에 대한 각별한 주의가 요구되므로 실험 전 안전점검과 실험 중 일어날 수 있는 사고에 대한 경보 또는 즉각적 대응이 필수적으로 요구된다. 이에 실험에 앞서 준비된 안전에 관한 경보시스템과 대응훈련방법 등을 상세히 그림 2.2.60-61에 나타내었다.

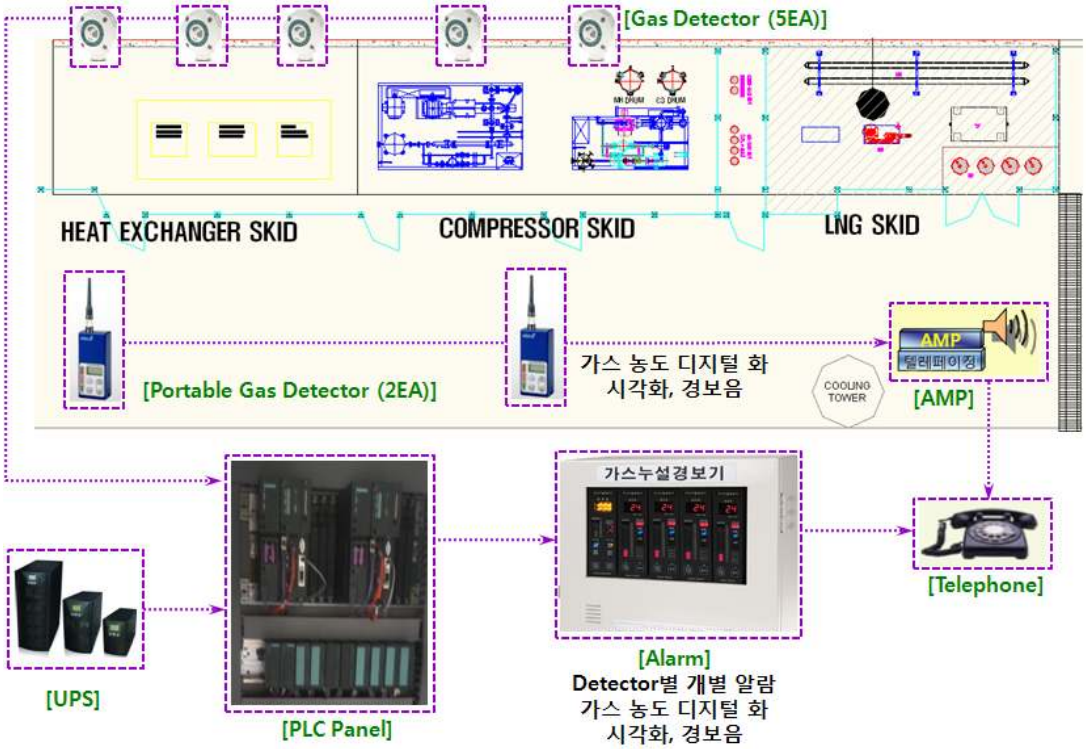



그림 2.2.60 LNG BSU 가스누설 경보체계도

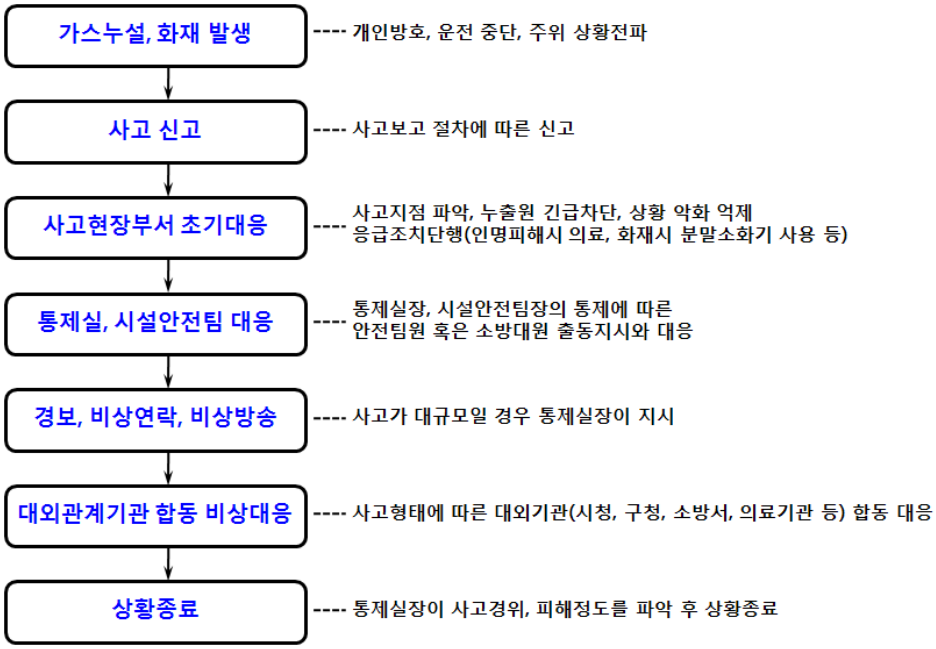
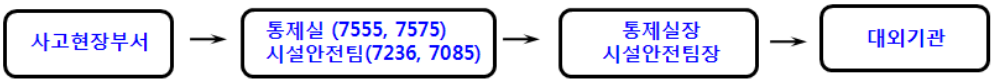



그림 2.2.61 LNG BSU 비상대응 절차서




[대외기관 사고보고 대상]

| 항목 | 보고대상 | 보고처 및 보고기한 | 방법 |
|---|---|---|---|
| 노동부 | 산업재해 | 경기 고용노동지청(031-259-0204,0205)<br>산재예방지도과(031-259-0264)<br>1개월 이내 | 별지양식 |
| | 중대재해 | 용인고용센터(031-289-2110)<br>즉시 | 전화, 팩스,<br>그밖의 방법 |
| | 중대산업사고 | 용인고용센터(031-289-2110)<br>즉시 | 전화, 팩스,<br>그밖의 방법 |
| 119 소방본부 | 화재, 구조, 구급<br>그 외 필요시 | 119<br>즉시(소방기본법 제19조 1항) | 전화 외<br>모든 수단 |
| 한국가스안전공사<br>(KGS) | 사망 | KGS 경기동부지사(1544-4500)<br>즉시 | 전화, 팩스 |
| | 부상 또는 중독 | KGS 경기동부지사(1544-4500)<br>즉시 | 전화, 팩스 |
| | 가스누설, 폭발, 화재 | KGS 경기동부지사(1544-4500)<br>즉시 | 전화, 팩스 |

그림 2.2.62 LNG BSU 사고보고 절차서

| 항목 | 대응 내용 | |
|---|---|---|
| 경계 | 경보 | 비상사이렌 3분간 장음 |
| | 1) | 소음, 냄새 등 이상 징후 파악 |
| | 2) | 가열기구 사용금지 |
| 가스 누설 | 경보 | 고/저음의 파상음, 사고보고 |
| | 1) | 비상 운전중단, 퀵 클로징 밸브 |
| | 2) | 가스공급 밸브 잠금, 발화 물질 제거 |
| 폭발<br>화재 | 경보 | 5초간격 중단음, 사고보고 |
| | 1) | 모든 작업을 중단, 가스공급 밸브 잠금 |
| | 2) | 소방활동, 진화작업 |
| | 3) | 풍향을 고려하여 비상통로, 대피지역을 지정 |
| 대피 | 경보 | 단음, 사고보고 |
| | 1) | 모든 작업을 중단 |
| | 2) | 개인방호, 대피장소로 신속히 이동 |
| | 3) | 인근 실험실, 사람의 대피를 지시 |
| | 4) | 비상사태 발생지역의 진입을 통제 |
| 해제 | 경보 | 1분간 장음 |
| | 1) | 비상 방송을 통한 안내 |

그림 2.2.63 LNG BSU 대응훈련 시나리오

라. 시 운전 결과

2012/03월 LNG BSU 시 운전을 통한 제어화면의 구성을 그림 2.2.64에 나타내었고 Propane, MR, NG의 온도변화 특성을 그림 2.2.65에 있다. 정상조건까지의 도달시간은(C3: 2시간, MR: 3.3시간, NG: 5시간) 정도이고 냉매의 예냉(C3)과 본냉(MR) 사이클 정상화 단계에서 NG 온도의 급격한 변화을 관찰했으며 이원냉동사이클 정상화 후 NG온도의 변화는 둔감해짐을 알 수 있다.

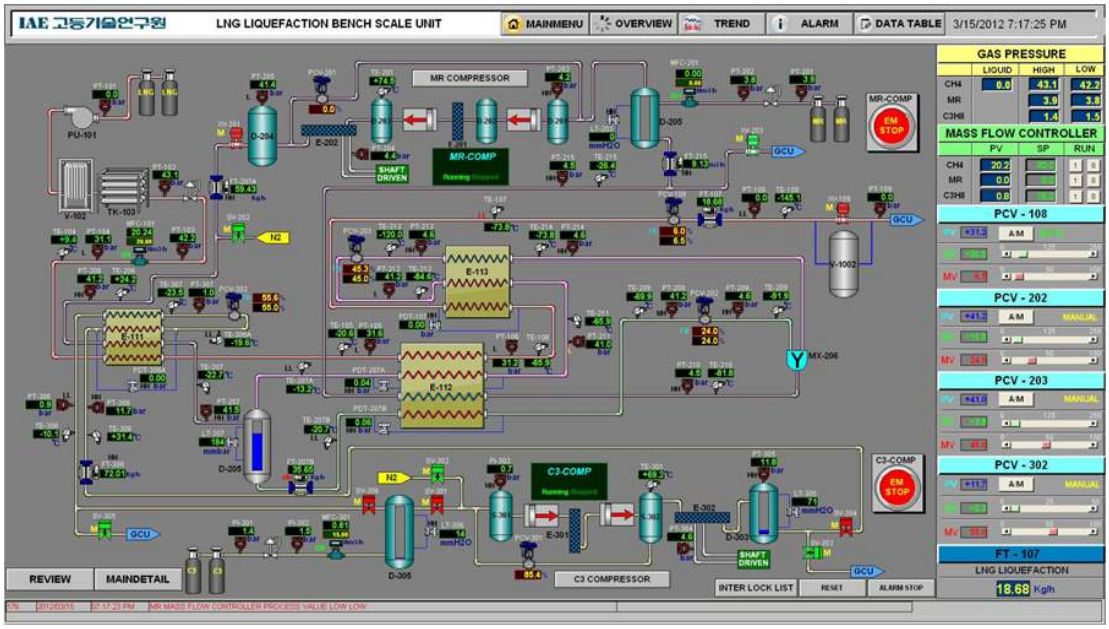



그림 2.2.64 LNG BSU 시 운전 제어화면 (2012/03월)

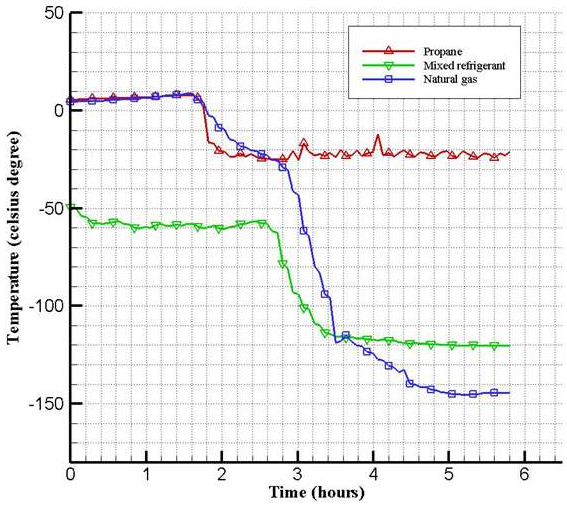



그림 2.2.65 LNG BSU 온도변화 (2012/03월 시 운전)

Propane , Mixed refrigerant, Natural gas의 Test bed 설계안과 BSU 시운전 결과 비교에서 설계조건과 운전결과에 대한 온도의 절대적 차이는 C3: 15도, MR: 35도, NG: 15도 정도이나 설계조건에 대한 온도차이의 상대적 크기는 C3=43% > MR=22% > NG=9% 순 이였다. 또한 예냉 사이클(C3)의 온도조건은 본냉 사이클(MR) 온도에 영향을 주고 이것이 NG의 온도변화에 궁극적 기여함으로서 NG의 설계온도는 냉매온도의 5-15% 오차범위 내에서 가능이 예상된다.

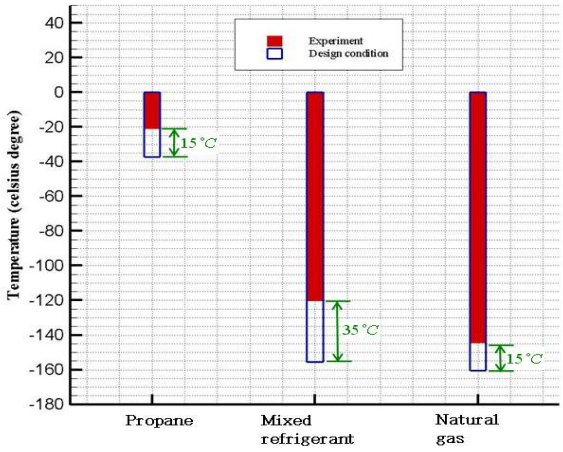



그림 2.2.66 LNG BSU 설계조건과 실험결과 온도 비교 (2012/03월 시 운전)

Natural gas의 부분별 설계안에 대한 온도특성 분석에서 예냉사이클 열교환기(Precooler) 후단에서는 냉매의 절대적 온도차이와 거의 유사하나 본냉사이클 열교환기(MCHE1) 후단에서의 큰 온도차이는 MCHE1 입구에서 혼합냉매의 조건차이에 기인한 기액분리기에서의 기액분리 정도와 냉매조성비 변화에 의한다. 기액분리과정 후 열교환기(MCHE2)에서는 비교적 온도변화폭이 둔감하고 팽창밸브에서의 온도는 운전 압력조건에 의함을 알 수 있다.

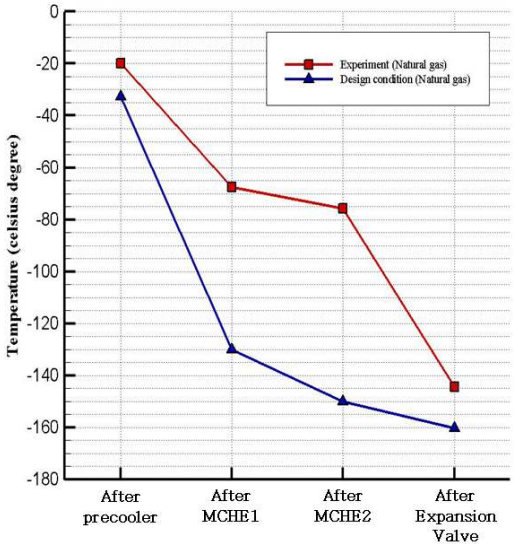
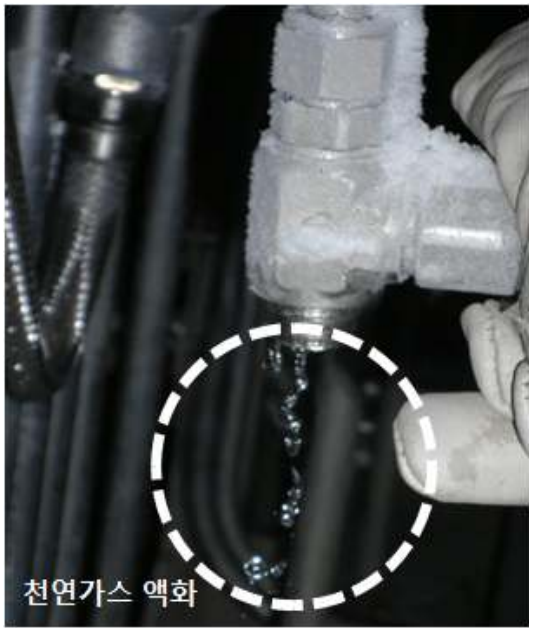



그림 2.2.67 실험 시 NG 온도변화 특성 (2012/03월 시 운전)

그림 2.2.67의 실험에서 알 수 있듯이, 설계된 온도 분포와 실제 실험에서의 온도 분포는 다소 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 가장 큰 온도 차이는 MCHE 1 후단의 온도부터 나타나기 시작하는데, 이것은 열교환기의 온도 근접성 및 냉매 유량을

늘렸을 때 나타나는 과냉 현상 등에 기인한다고 판단된다. 또한 제어밸브 전 후단의 압력 차이에 대한 온도 강하에도 약간의 차이가 있음을 확인하였다. 천연가스의 최종 온도가 -145℃ 정도일 때 BSU 후단의 분기밸브를 통해 천연가스가 액상이 된 것을 아래 그림과 같이 확인 할 수 있었다.




2012년 5월 11일(밸브 개방)




2012년 5월 11일(5 sec)




2012년 7월 25일(밸브개방)




2012년 7월 25일(1 sec)




2012년 7월 25일(2 sec)




2012년 7월 25일(3 sec)

그림 2.2.68 천연가스 액상 확인

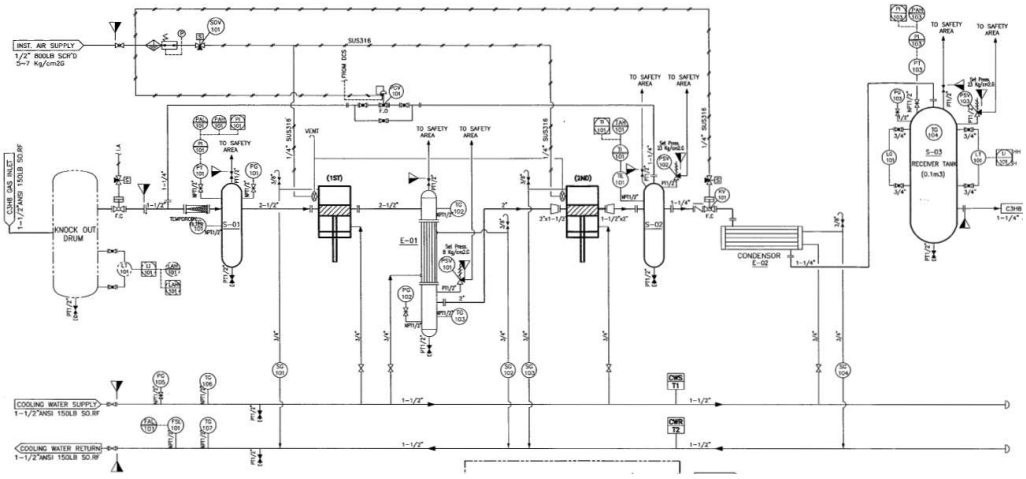
마. BSU 단위설비 운전특성 도출

a. 프로판 압축기

프로판 압축기의 경우 2단 압축과정으로 되어있고 1단 압축 후 중간냉각 과정과 2단 압축 후 냉각과정이 중요하다. 따라서 공정 상에서 입구온도 등의 조건을 적절하게 유지할 필요가 있고 냉각수의 유량을 제어하는 것 또한 중요한 요소이다.

표 2.2.15 프로판 압축기 설계 조건

| | Design press. (BarG.) | Oper. press. (BarG.) | Design temp. (℃) | Oper. temp. (℃) |
|---|---|---|---|---|
| 1st suction snubber | 9.9 | 1 | 75 | 10 |
| Inter cooler(shell) | 5 | 3 | 75 | 30/35 |
| Inter cooler(tube) | 9 | 5.75 | 165 | 56/40 |
| 2nd discharge snubber | 23 | 20 | 165 | 91 |
| Condenser(shell) | 23 | 20 | 165 | 91/37 |
| Condenser(tube) | 5 | 3 | 75 | 30/35 |
| Receiver tank | 23 | 20 | 75 | 37 |




Safety valves

| | 1st dis. line | 2nd dis. line | N2 purge line |
|---|---|---|---|
| Size | PT 1/2" | PT 1/2" | PT 1/2" |
| Set point(BarG.) | 8 | 23 | 2 |
| Quantity(EA) | 1 | 1 | 1 |

Specification

| | |
|---|---|
| Electric motor | 15kw, 380volts, 3 phase, 60hz, 4poles, 1750rpm |
| Starting method | direct on line start |
| Control power | ac 220volts, 1 phase, 60hz |
| Number of stages | 2 stages |
| Flow capacity | 186.6kg/hr, 95Nm/hr |
| Suction condition | 1BarG., 10℃ |
| Discharge condition | 20BarG., 91℃ |
| Ratio of compression | 1stage=3.336, 2stage=3.195 |
| Rotational speed | 420 rpm |

그림 2.2.69 프로판 압축기의 스펙

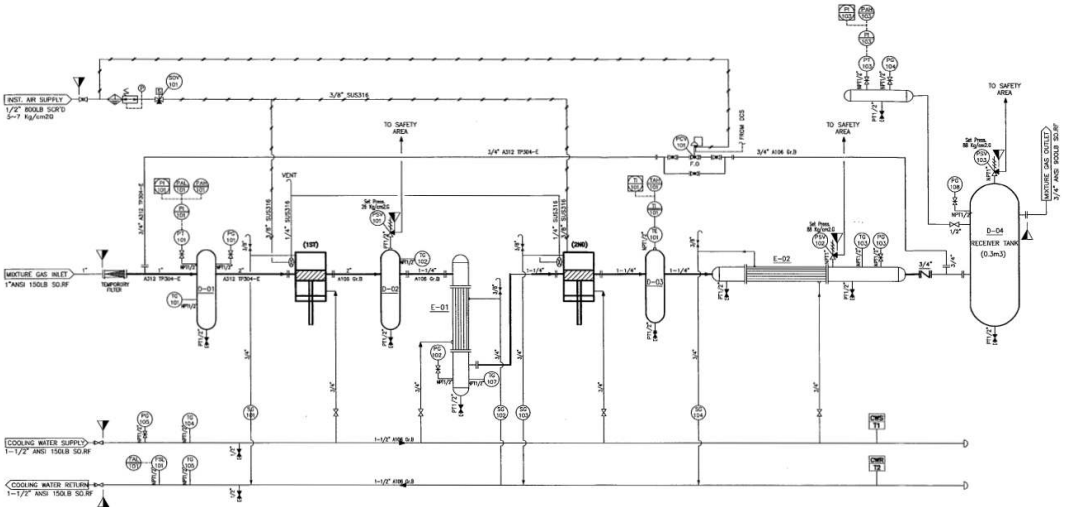
표 2.2.16 프로판 압축기 냉각수 유량 조건

| | Compressor | Intercooler | Aftercooler | Oilcooler |
|---|---|---|---|---|
| Capacity(ton/hr) | 0.20 | 0.22 | 0.69 | 0.56 |
| Inlet temp.(℃) | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Outlet temp.(℃) | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Pressure(BarG.) | 3.0 | 3.0 | 3.0 | 3.0 |
| Total(ton/hr) | 1.67 | | | |

b. 혼합냉매 압축기

혼합냉매 압축기 또한 2단으로서 프로판 압축기와 운전특성과 크게 다르지 않으나 압축 후 온도상승이 매우 크고 2단 압축 후 냉각과정에서도 응축이 되지 않는

다. 응축이 되지 않는 특성이 압축기의 기동에는 비교적 유리하나 압력의 변화가 심한 단점 또한 존재한다.



## Safety valves

| | 1st dis. line | 2nd dis. line | N2 purge line |
|---|---|---|---|
| Size | PT 1/2" | PT 1" | PT 1/2" |
| Set point(BarG.) | 26 | 88 | 2 |
| Quantity(EA) | 1 | 1 | 1 |

## Specification

| | |
|---|---|
| Electric motor | 22kw, 380volts, 3 phase, 60hz, 4poles, 1750rpm |
| Starting method | direct on line start |
| Control power | ac 220volts, 1 phase, 60hz |
| Number of stages | 2 stages |
| Flow capacity | 101.4kg/hr, 90Nm/hr |
| Suction condition | 3.8BarG., -34.93℃ |
| Discharge condition | 80BarG., 130℃ |
| Ratio of compression | 1stage=4.265, 2stage=3.899 |
| Rotational speed | 400 rpm |

그림 2.2.70 혼합냉매 압축기의 스펙

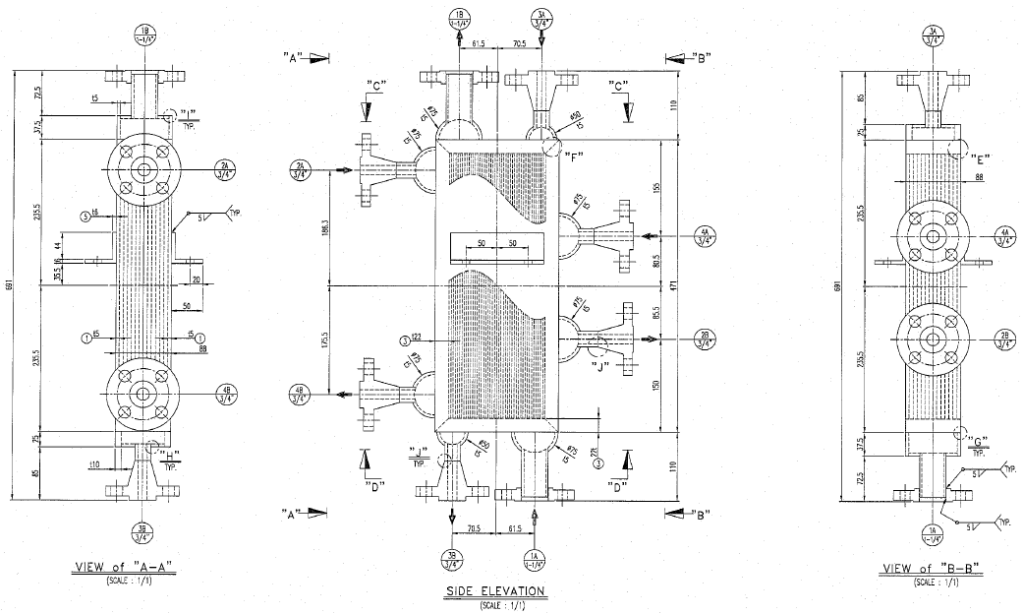
표 2.2.17 혼합냉매 압축기 설계 조건

| | Design press. (BarG.) | Oper. press. (BarG.) | Design temp. (℃) | Oper. temp. (℃) |
|---|---|---|---|---|
| 1st suction snubber | 5 | 3.8 | -50 | -34.93 |
| 1st discharge snubber | 30 | 19.9 | 75 | 45 |
| Inter cooler(shell) | 5 | 3 | 75 | 30/35 |
| Inter cooler(tube) | 30 | 19.9 | 180 | 45/40 |
| 2nd discharge snubber | 88 | 80 | 180 | 130 |
| Aftercooler(shell) | 5 | 3 | 75 | 30/35 |
| Aftercooler(tube) | 88 | 80 | 180 | 130/37 |
| Receiver tank | 88 | 80 | 75 | 37 |

표 2.2.18 혼합냉매 압축기 냉각수 유량 조건

| | Compressor | Intercooler and Aftercooler | Oilcooler |
|---|---|---|---|
| Capacity(ton/hr) | 0.32 | 0.82 | 0.56 |
| Inlet temp.(℃) | 30 | 30 | 30 |
| Outlet temp.(℃) | 35 | 35 | 35 |
| Pressure(BarG.) | 3 | 3 | 3 |
| Total(ton/hr) | 1.70 | | |

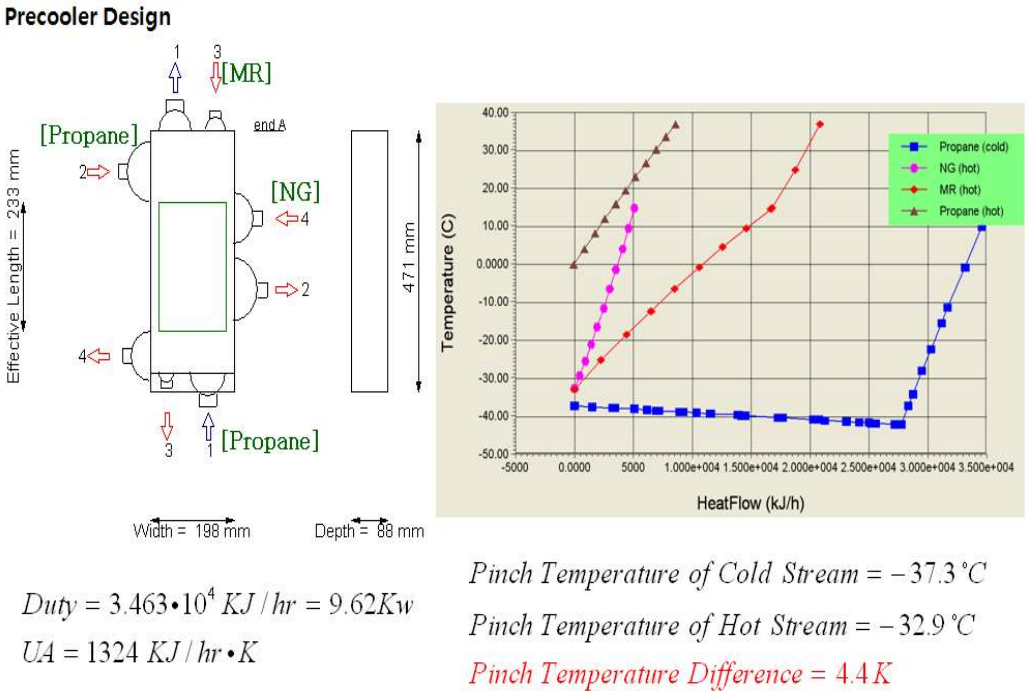
c. Precooler 열교환기



## Specification

| | |
|---|---|
| Series | 1 |
| Type | Brazed aluminum plate fin |
| Fin type | Wavy and plain |
| Size of core | 198mm(width), 88mm(height), 471mm(length) |
| Weight of core | 14 kg |
| Total surface area | 3.08 (m2) |
| Number of passages | 9 |
| Design temperature | -50 ~ 50℃ |

그림 2.2.71 Precooler 열교환기 스펙




$Duty = 3.463 \cdot 10^4\ KJ/hr = 9.62Kw$

$UA = 1324\ KJ/hr \cdot K$

*Pinch Temperature of Cold Stream = −37.3 ℃*

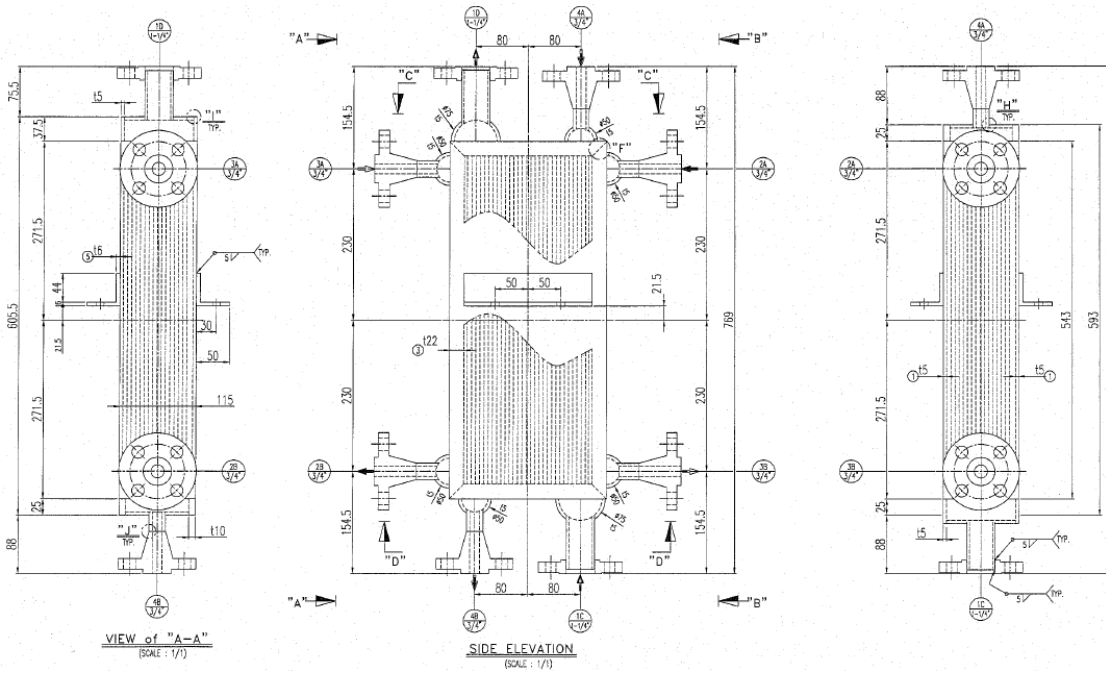
*Pinch Temperature of Hot Stream = −32.9 ℃*

*Pinch Temperature Difference = 4.4 K*

| | Stream1 | Stream2 | Stream3 | Stream4 |
|---|---|---|---|---|
| Kind of fluid | Propane | Propane | MR | NG |
| Flow rate (kg/hr) | 85.7 | 85.7 | 60.7 | 33.0 |
| Design pressure (BarG.) | 2 | 17 | 61 | 71 |
| Operating pressure (BarG.) | 1.3 | 16.4 | 60.5 | 71 |
| Operating Temperature (℃) | -36.3/10 | -36.3/10 | -36.3/10 | -36.3/10 |
| Fin type | Wavy | Wavy | Wavy | Wavy |

그림 2.2.72 Precooler 열교환기 설계 조건

d. Main Cryogenic Heat Exchanger 1

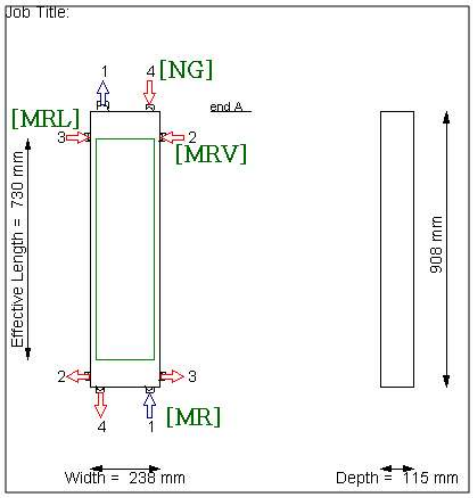


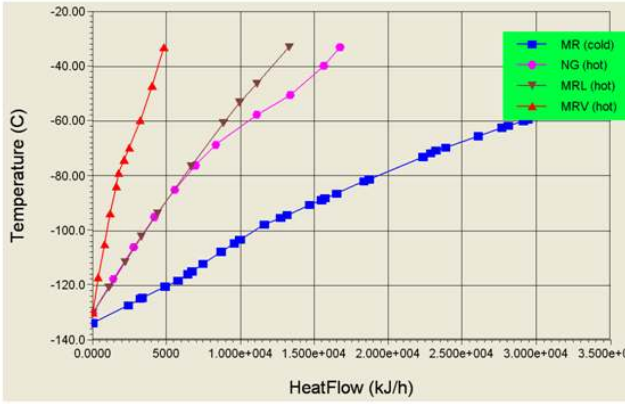

## Specification

| | |
|---|---|
| Series | 2 |
| Type | Brazed aluminum plate fin |
| Fin type | Wavy and plain |
| Size of core | 238mm(width), 115mm(height), 543mm(length) |
| Weight of core | 26 kg |
| Total surface area | 8.1 (m2) |
| Number of passages | 12 |
| Design temperature | -150 ~ 50℃ |

그림 2.2.73 Main Cryogenic Heat Exchanger 1 열교환기 스펙

**MCHE1 Design**




$Duty = 3.484 \cdot 10^4\ KJ/hr = 9.68 Kw$

$UA = 3527\ KJ/hr \cdot K$

$Pinch\ Temperature\ of\ Cold\ Stream = -35.0\ ^\circ C$

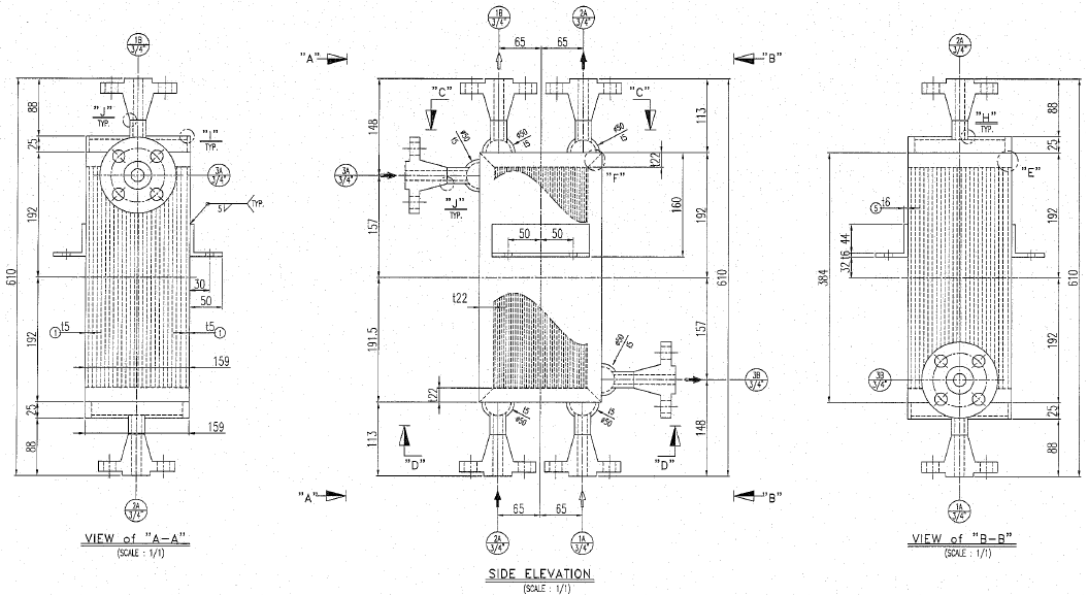
$Pinch\ Temperature\ of\ Hot\ Stream = -32.7\ ^\circ C$

$Pinch\ Temperature\ Difference = 2.3 K$

| | Stream1 | Stream2 | Stream3 | Stream4 |
|---|---|---|---|---|
| Kind of fluid | MR | MRV | MRL | NG |
| Flow rate (kg/hr) | 60.7 | 10.5 | 50.3 | 33.0 |
| Design pressure (BarG.) | 5 | 61 | 61 | 70 |
| Operating pressure (BarG.) | 4.3 | 60 | 60 | 69.5 |
| Operating Temperature (℃) | -132/-35 | -32.9/-130 | -32.9/-130 | -32.7/-130 |
| Fin type | Wavy | Plain | Plain | Wavy |

그림 2.2.74 Main Cryogenic Heat Exchanger 1 설계 조건

e. Main Cryogenic Heat Exchanger 2

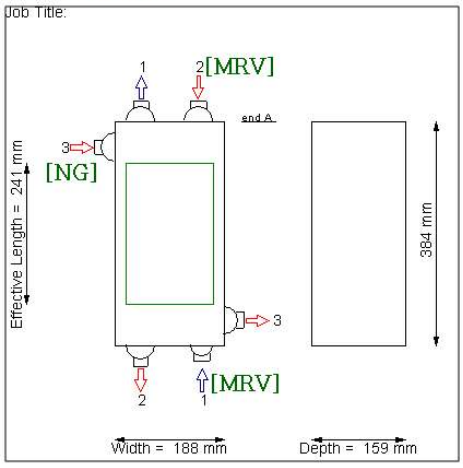


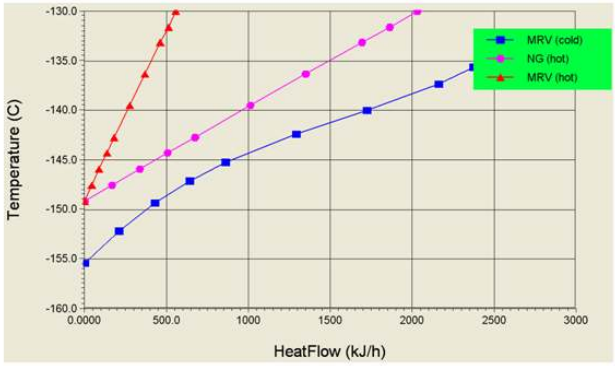

## Specification

| | |
|---|---|
| Series | 1 |
| Type | Brazed aluminum plate fin |
| Fin type | Wavy and plain |
| Size of core | 188mm(width), 159(height), 384mm(length) |
| Weight of core | 17 kg |
| Total surface area | 5.54 (m2) |
| Number of passages | 17 |
| Design temperature | -160 ~ -120℃ |

그림 2.2.75 Main Cryogenic Heat Exchanger 2 열교환기 스펙

**MCHE2 Design**




$Duty = 2.595 \cdot 10^3\ KJ/hr = 7.21Kw$

$UA = 755.5\ KJ/hr \cdot K$

$Pinch\ Temperature\ of\ Cold\ Stream = -145.2\,^{\circ}C$

$Pinch\ Temperature\ of\ Hot\ Stream = -142.6\,^{\circ}C$

$Pinch\ Temperature\ Difference = 2.6K$

| | Stream1 | Stream2 | Stream3 |
|---|---|---|---|
| Kind of fluid | MRL | MRV | NG |
| Flow rate (kg/hr) | 10.5 | 10.5 | 33.0 |
| Design pressure (BarG.) | 5 | 60 | 70 |
| Operating pressure (BarG.) | 4.8 | 59.5 | 69 |
| Operating Temperature (℃) | -155/-132 | -130/-150 | -130/-150 |
| Fin type | Wavy | Plain | Plain |

그림 2.2.76 Main Cryogenic Heat Exchanger 2 설계 조건

(3) BSU 시운전 결과 보완 및 연속운전 설비 보완

가. 프로판 압축기 시운전

완성검사를 받은 직후 냉매 압축기 구동을 하였다. 냉매 압축기 제작 업체인 광신기계공업에서 2명의 엔지니어가 참석하였다. 이틀에 걸쳐 진행된 시운전에서 압축기의 전장 및 계장 상태를 확인하는 작업과 유틸리티 배관 및 작동을 확인하는 작업도 포함되었다. 몇 가지 계장에서 수정부분이 있었으며, 이는 비교적 쉽게 해결할 수 있었다.

본격적인 압축기 구동에서 광신계계의 엔지니어는 로컬에서 조작을 하였으며, 고기원 운전자는 실험동 안쪽에서 HMI화면을 통해서 모니터링 및 조작을 시행하였다. 압축기는 크게 로딩과 언로딩의 동작을 하게되며, 자동운전을 하게 되면 처음에는 언로딩을 하고 수초 후 로딩을 해서 가스를 흡입한 후 압축하게 된다.

프로판 압축기의 운전에서 압축기 자체의 운전은 무리가 없었으나, 압축을 하게 될 가스 즉, 프로판의 기화속도가 압축기의 용량을 맞추지 못하는 문제를 확인 하였다. 따라서 운전자가 언로딩을 하면서 1st 스너버의 압력을 확인하고 로딩을 하였으며, 압력이 일정치 이하로 내려가게 되면 다시 언로딩을 하는 작업을 반복하게 되었다. 이는 액체인 프로판의 자연기화 속도가 예상보다 너무 느린 까닭이었으며, 운전할 때의 온도(10℃ 내외)가 저온이라는 영향도 있었다. 약 1시간 넘게 이와 같은 운전을 반복한 결과 프로판 리시버 탱크에는 50 mmH2O 정도의 액상 프로판이 생성되는 것을 확인 하였다. 아래의 그림 2.2.77은 현장에서 프로판 리시버 탱크의 레벨게이지를 나타낸 화면이다.

50 mmH2O 정도의 액이 레벨에 표시되었을 때 리시버 탱크 후단의 On-off 밸브를 개방하여 열교환기 쪽으로 프로판이 흐르게 하였다. 프로판이 열교환기 쪽으로 흐르고 열교환기 Hot 스트림을 통과하면 팽창용 제어밸브가 있는데, 이 제어밸브는 매뉴얼 모드로 임의로 30%의 Opening을 주었다. 밸브를 개방하고 얼마 지나지 않아서 제어밸브 후단의 온도가 급격히 하강하는 것을 확인 할 수 있었다. 이 온도는 -30℃ 부근까지 하강하였으며, 해당하는 트랜스미터의 온도 곡선을 그림2.2.78에 나타내었다.

그림2.2.78의 곡선이 완만치 못한 것은 프로판과 열교환을 해야 될 유체 즉, 천연가스와 혼합냉매의 공급이 없었기 때문에 리턴되어 돌아오는 프로판의 온도가 디자인 온도인 10℃를 밑돌아서 압축기로 공급되는 것을 막기 위해서 제어밸브를 조작했기 때문이다. 팽창용 제어밸브로 사용했는 밸브의 그림은 아래와 같으며 오른쪽 배관에 서리가 낀 그림을 확인 할 수 있다.




그림 2.2.77. 프로판
리시버탱크의 레벨 게이지




그림 2.2.78. 팽창용 제어밸브
후단의 온도 하강 곡선



그림 2.2.79. 팽창용 제어밸브

앞서 언급하였듯이 프로판 냉매와 열교환을 해야 될 유체가 없었기 때문에 압축기를 기동해서 프로판 냉매 사이클을 구성할수록 증발 후의 온도가 내려가는 것을 막을 수 없었다. 최대한 온도 하강하는 것을 막기 위해서 천연가스를 10 Nm3 정도 흘렸으나 역부족이었으며 혼합냉매는 냉매의 부족으로 사이클을 형성 할 수가 없었다. 이 때 확보하였던 혼합냉매의 양은 47L 6병이었으며 6병을 모두 사용하였지만 혼합냉매 리시버 탱크에는 10 bar 정도의 압력을 얻는데 그쳤다.

실험이 끝난 후 혼합냉매는 모두 밴트하여 태웠으며, 프로판 냉매 역시 밴트해서 태우려고 하였으나 가스부분만 밴트하고 액체 부분은 리시버에 보관해 보기로 하였다.

문제점 및 보완 사항으로 도출된 내용은 충분한 냉매의 공급이 안된다는 것이다. 프로판 냉매는 우선 기화하는 시간이 너무 길어서 냉매는 충분하되 다른 주입 방법을 검토해야 할 것이고 혼합냉매는 냉매를 가져오는 용기가 47L 용기라서 아주 많은 양의 냉매가 필요할 것으로 판단된다. 실험을 마치고 회의 결과 프로판 냉매를 압축기에서 압축을 해서 리시버 탱크로 넣는 방법 대신에 액화된 프로판을 바로 프로판 리시버 탱크에 주입하여 사용하는 것이 좋을 것으로 판단하였으며, 혼합냉매는 한번 실험에 47L 30병이 소요될 것이란 계산에 운전 후에 냉매를 보관할 수 있도록 리시버 탱크 양단에 매뉴얼 밸브를 설치해서 운전이 끝나고 리시버탱크에 일정량을 저장하여 차후 실험에 사용 될 냉매의 양을 최소화하는 방법을 사용하기로 하였다. 이후 실험은 해당 부분이 준비가 되면 바로 시작하기로 하였다.

나. 1차 시운전 보완 및 혼합냉매 압축기 시운전

1차 시운전 결과 나온 문제점 및 보완 사항에 대한 내용은 다음과 같다.

냉매 충전을 위한 밸브 설치

냉매의 보관을 위해서 냉매 리시버 탱크 전·후단에 매뉴얼 밸브를 설치하였으며,

설치된 그림은 다음과 같다.

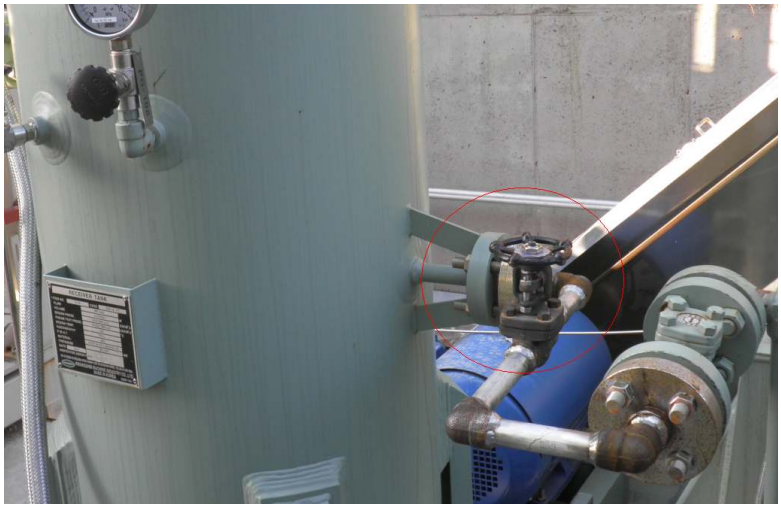


그림 2.2.80. 혼합냉매 리시버 탱크 전단 차단밸브



그림 2.2.81. 혼합냉매 리시버탱크 후단 차단밸브



그림 2.2.82. 프로판 리시버탱크 후단 차단밸브

프로판 리시버 탱크 전단의 차단밸브는 압축기 스키드에 있는 액 역류 방지용 On-off 밸브가 있어 그것으로 대체하기로 하였다.

프로판 냉매의 리시버탱크 액 충전

프로판 냉매의 느린 기화 속도를 해결하기 위해서 리시버 탱크에 액상의 프로판을 바로 주입하였다. 이전의 프로판 용기로는 액을 주입할 수 없으므로 액을 주입할 수 있는 용기(Siphon 용기)를 이용해서 프로판 리시버 탱크에 액상의 프로판을 주입한다.

실험에 앞서 액상의 프로판을 리시버 탱크에 주입하는 작업부터 시작하였다. 프로판 리시버 탱크의 가스부분을 밴트하면서 압차이로 액상 프로판을 주입하였다. 이날 주입한 액상 프로판의 양은 전체 리시버 탱크 볼륨(0.1 m3)의 절반정도를 충전하였다.

2차 실험에서는 먼저 프로판 사이클을 구성하고 천연가스를 열교환기로 주입하고 마지막으로 MR 사이클까지 구성하는 것을 목표로 하였다. 프로판 사이클을 구성하기 위해서 압축기 시동전 프로판 압축기의 공압을 공급하여 리시버 탱크의 전단의 On-off 밸브를 개방하고 리시버 탱크 후단의 밸브를 개방하여 액체인 프로판 가스를 열교환기의 팽창밸브까지 흘린 후 팽창밸브를 수동으로 조절해서 압축기 석션 조건에 다다랐을 때 압축기를 기동하였다. 압축기를 기동하고 처음에 5 bar 정도였던 리시버 탱크의 압력이 서서히 오르는 것을 확인 할 수 있었다.

압축기 구동 초반에 리시버탱크의 압력이 부족하여 돌아오는 가스양이 매우 적기 때문에 가스를 MFC로 10Nm3 으로 흘리면서 바이패스 밸브를 자동제어하게 하였으며 팽창밸브는 계속해서 수동으로 조작하였다.

팽창된 프로판 액체는 -20℃ 정도까지 내려갔으며, 압축기 입구의 석션 조건을 만족하기 위해서 개도율을 올렸으나, 증발 후의 프로판이 거의 같은 온도로 석션쪽

으로 리턴되고 있었다. 열교환할 수 있는 유체가 필요하다는 판단에 천연가스를 10Nm3 정도로 흘렸으며 그러한 과정이 지속되자 점차 천연가스의 유량을 증가시켰다. 프로판 냉매 사이클이 정상상태를 이루기가 힘들다고 판단하고 곧바로 MR 압축기를 기동하였다. 혼합가스 냉매를 MFC로 공급하면서 서서히 압력을 올렸으며 최종 45 bar 정도의 압력으로 MR 사이클을 구성하였다. MR 사이클까지 구성하였을 때의 HMI 화면이 아래의 그림에 나타난다.

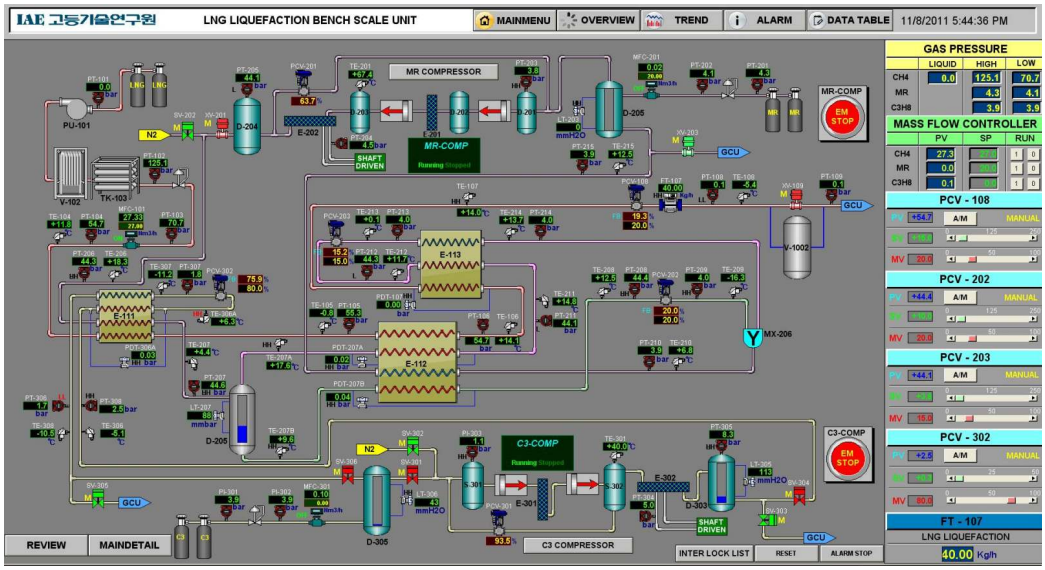


그림 2.2.83. C3사이클과 MR사이클 구성 화면

MR 사이클은 냉매 주입이 완료된 후 비교적 안정적으로 사이클이 구성되는 것을 확인하였으며, 특히 프로판 사이클과는 달리 두 개의 팽창밸브의 opening을 적게 했음에도 불구하고 바이패스 밸브의 opening이 60% 정도에 지나지 않았다. 이것은 프로판 사이클에 비해서 냉매의 공급이 원활하다는 것을 나타내며 설계 압력인 60 bar로 충전하였을 때는 이보다 낮은 바이패스를 나타낼 것을 예상할 수 있다.

본 실험에서 가장 문제가 된 것은 프로판 사이클이었으며 프로판 사이클의 문제점을 나열하면 다음과 같다.

프로판 리시버 탱크의 압력이 충분치 않다. 설계 압력은 16.5 bar인데 비해서 리시버탱크의 압력은 10 bar를 넘지 않았다.
프로판의 증발이 원활치 않다. Pre-cooler에서 프로판이 충분히 증발하여 압축기 석션부로 돌아와야 하지만 증발이 충분히 되지 않고 돌아와서 온도가 팽창 후의 온도와 거의 다를바가 없었으며 이것으로 인해 냉매압축기의 냉매 주입이 원활치 않았다고 판단된다.
Pre-cooler에서의 열교환 유체끼리의 열교환이 잘 안되었다. 프로판 냉매는 냉열을

다 잃지 않고 영하의 온도로 압축기 석션으로 주입되는데 반해 이와 열교환하는 MR 냉매나 천연가스는 충분히 냉열을 가져오지 못하였다. 즉 냉매는 충분히 차갑고 유량이 충분한데 이와 열교환 되는 유체와 열교환이 안된다는 것으로 원인을 파악하는데는 상당한 시일이 걸릴 것으로 판단된다.

이 외에도 HMI의 수치에 이상이 있는 문제와 냉매의 팽창 후 온도가 충분히 떨어지지 않는 점 등의 문제가 발생하였다.

다음 실험에 앞서 보완 사항은 지금까지 구성이 단순하였던 C3 사이클부터 구성을 하였는데, C3 사이클의 과냉 문제 때문에 열교환될 유체가 필요하다는 판단으로 MR 사이클부터 구성하고 다음 천연가스를 흘리고 마지막으로 C3 사이클을 구성하는 것으로 하였다. 그리고 프로판 냉매의 압력이 올라가지 않는 문제의 해결책으로 현재 리시버 탱크의 냉매가 많이 충전되어 있어서 압축된 고온의 프로판이 리시버 탱크의 프로판 상태에 미치는 영향이 미미하다는 판단으로 다음실험에 앞서서 현재 충전된 프로판 냉매를 절반정도 Vent해서 운전하기로 하였다.

다. 팽창밸브 성능 확인 및 2차 실험 보완

3차 시운전에서의 실험 내용은 2차 시운전에서 문제점이 되었던 프로판의 과냉을 막기 위해서 기존의 프로판 사이클을 먼저 구성하는 대신에 MR 사이클부터 구성해서 MR의 압축 온도를 충분히 올린뒤에 프로판 사이클을 구성하는 것으로 프로판 냉매를 충분히 열교환 시키는 것이며, 또 하나는 프로판 리시버 탱크의 프로판 양을 반 정도로 줄여서 온도 및 압력에 대한 보상을 빠르게 하는 것이다.

최초 MR 압축기 기동 조건은 충전되어 있던 MR 리시버 탱크의 압력은 26.5 bar였으며 리시버 탱크 후단의 온도는 4℃로 압축기를 기동하면서 MFC를 이용해서 MR의 양을 점차 증가시키면서 압축기를 기동하였다. 압축기를 기동하면서 리시버 탱크의 압력은 최초 배관 및 HP MR separator에 흡입이 되면서 줄다가 점차적으로 늘게 되었으며, 압축기의 2nd snubber의 온도와 리시버 탱크 후단의 토출 온도 역시 점차 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 압축기 토출 온도의 증가율이 극히 작아서 온도를 올리는데 시간이 오래 걸렸었고 MR 압축기를 기동한지 2시간이 되어서도 MR 리시버 탱크 후단의 토출 온도는 15℃를 넘지 않았다.

아래 그림은 운전 시작부터 마칠 때까지의 압축기 2nd snubber의 온도를 나타낸다.

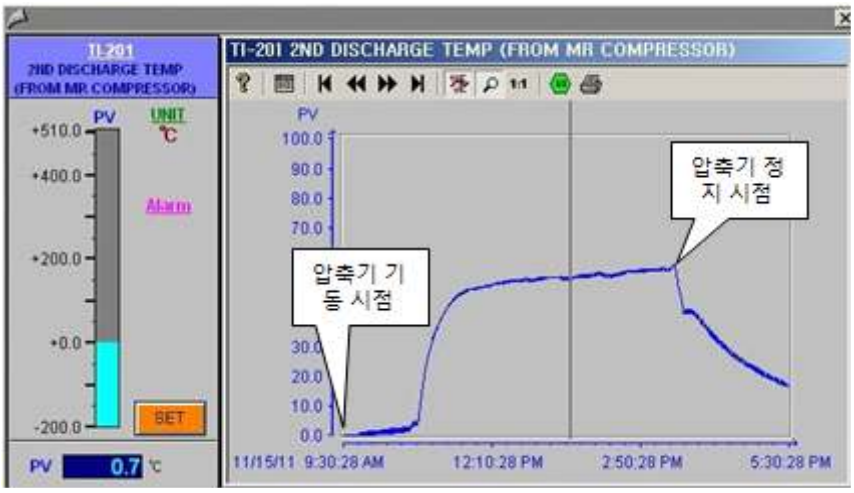



그림 2.2.84. 2nd snubber temperature

MR 압축기 후단의 온도는 계속해서 증가할 것이라는 예상을 하고 프로판 압축기를 기동하여서 프로판 사이클을 구성하였다. 충전된 프로판 액체의 양은 45 mmH2O로 이전에 충전양인 140 mmH2O 보다도 현격히 적은 양이었다. 리시버 탱크 후단의 온도는 2.5℃ 였다. 프로판 사이클을 구성하면서 열교환을 원활히 하기 위해서 천연가스를 동시에 10 Nm3 의 유량으로 공급하였다.

프로판 사이클에서 한 가지 문제점은 대기 온도 및 저장된 프로판의 영향으로 압축기 후단의 리시버 탱크의 압력이 설계압력으로 오르지 않는 문제점이 있었다. 따라서 이번 실험에서 냉매의 유량을 앞서 언급했듯 대폭 줄이고 MFC로 프로판 가스를 충전해가면서 실험을 하였다. 압축기 운전 결과 압축기 석션 가스의 부족으로 인해서 압축기의 bypass 밸브는 90~100% 사이를 오가며 운전을 하였고 이것은 냉매의 순환이 적다는 의미로 실제 리시버 탱크의 압력이 오르는 속도는 매우 느렸다. 프로판 냉매의 순환을 위해서 압축기의 권장 석션 압력인 1.1 bar에 미치지 못하는 값으로 세팅을 하고 bypass 밸브의 opening을 줄여보았으며 그 결과 리시버 탱크의 압력이 이전에 비해서 월등히 빠르게 오르는 것을 확인하였다. 리시버 탱크의 압력의 상승 곡선은 아래와 같다.




그림 2.2.85. C3 receiver tank pressure

그림 2.2.85에서 나타난 바와 같이 압력이 서서히 오르다가 어느 순간 급격히 올라간 것을 확인할 수 있었다. 계속해서 압력을 높이고 싶었지만 계속해서 떨어지는 압축기 석션의 압력을 감당하지 못해서 다시 석션쪽 압력을 높게 세팅을 하였다. 그림 2.2.85 왼쪽에 나타난 바와 같이 다시 압력이 떨어졌다. 또한 MR의 온도가 -12℃ 정도였던 것이 점차 올라가는 것을 확인하였다. 이는 냉매의 유량이 줄면서 냉각 효과 역시 줄어들게 된 것이라고 판단된다.

이번 실험에서 역시 C3의 과냉 문제는 해결되지 않았다. 실험이 되는 전 과정에서 C3의 과냉이 일어났으며, 그 온도는 -12℃까지 내려갔으며 이는 현장에서도 배관에 서리가 낄 정도였고 나중에는 석션 드럼에 액화 프로판이 쌓이는 것을 확인할 수 있었다. 압축기의 bypass 밸브를 많이 오픈할수록, 팽창밸브를 적게 오픈 할수록 온도는 올라갔으며 반대의 경우에 온도는 강하하였다. 온도의 지나친 강하를 막기 위해서 팽창밸브 및 bypass 밸브를 조절하였는데, 밸브 조절에 따른 증발 온도를 나타내주는 그림이 아래와 같다.

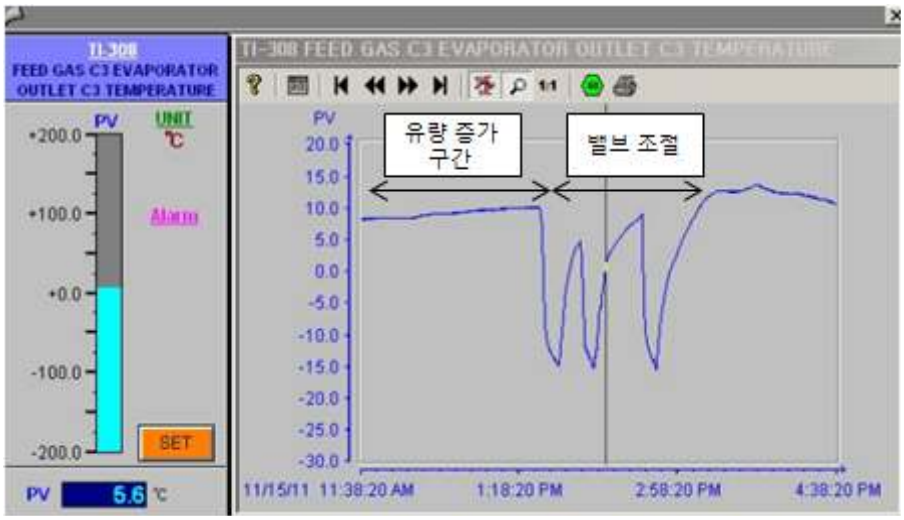


그림 2.2.86. C3 evaporation temperature

그림 2.2.36에서 나타난 바와 같이 밸브의 opening을 조절함에 따라서 온도의 응답임에도 불구하고 비교적 빠른 속도로 변화되는 것을 알 수 있다. 이는 프로판 냉매의 열교환이 원활이 이루어지지 않았음을 의미하며, 프로판 냉매의 열교환이 원활이 이루어지지 않는 원인에 대해서는 여러 각도에서 조사해 볼 필요성이 있다고 판단된다.

이번 실험은 이전 실험에 비해서 크게 개선된 점은 없었다. 단지 C3 리시버 탱크의 양을 적절히 조절해서 압축기의 bypass 밸브의 opening을 줄여서 토출쪽을 늘렸을 때 빠르게 압력이 반영되는 것을 확인 할 수 있어 향후 실험에서 적절한 C3 냉매량을 가늠해 볼 수 있었다.

다음의 실험에서의 우선시 되는 과제는 C3 압축기의 안정적인 가동을 위해서 입출구 조건을 맞춰서 사이클을 구성하는 것이며, 그것을 위해서 압축기 석션에서의 가스 유량을 충분히 확보해야 할 것으로 보인다. 압축기 석션의 가스량을 충분히 공급하기 위해서 해결해야 할 과제는 몇 가지가 있는데 정리하면 다음과 같다.

압축기 토출 온도를 충분히 올려서 압축기의 리시버 탱크의 압력을 설계 압력까지 끌어올릴 수 있어야 한다.

프로판 액체가 팽창 후에 증발하면서 충분히 열을 가져올 수 있도록 하여 증발 온도를 설계 온도까지 올릴 수 있어야 한다.

압축기 bypass 밸브의 opening을 지금까지 해왔던 90%~100% 사이가 아닌 최소 30~100%까지 자유자재로 조절을 하여도 사이클 구성에 문제가 없어야 한다.

운전 초기 혹은 순간적인 과냉을 방지하기 위해서 과냉을 보상해 줄 수 있는 장치를 마련해야 한다.

본 실험을 성공적으로 수행하기 위해서 기본적으로 프로판 사이클의 안정적인 구성이 필수며 시작이므로 이 부분에 초점을 맞추어서 다음 실험에 임할 수 있도록 해야하며, 위에서 나온 결과로부터 다음 실험에서 보완해야 할 사항을 다음과 같이 정리 하였다.

압축기의 토출 온도를 충분히 올리기 위해서 최초 10℃ 이하로부터 원하는 온도인 100℃ 이상을 얻기 위해서는 너무 많은 시간을 필요로 하므로 초반 운전시에는 after-cooler의 냉각수 공급을 중단하고 설계온도에 가까워지면 다시 가동하는 방식을 취해본다.

프로판 냉매의 과냉을 한시적으로 막기 위해서 증발 후 배관 온도를 높일 수 있는 열선을 감아서 온도를 보상 할 수 있도록 해본다. 여기에 쓰이는 열선은 최대 30℃까지 올릴 수 있는 일반 동파용으로 따로 제어가 필요 없는 것으로 선택한다.

라. 프로판 냉매 과열도 측정 및 3차 실험 보완

이번 실험에서의 주요 내용은 프로판 사이클의 구성을 위해서 압축기 리시버 탱크의 압력을 올리기 위해서 최초 압축기 기동에서 after-cooler의 냉각수 공급을 차단한다. 그리고 프로판 냉매의 증발 온도를 안정화하기 위해서 증발 후의 배관에 히팅밴드를 감아서 온도를 보상해준다.

이전 실험과 마찬가지로 MR 사이클을 먼저 구성하여 MR의 온도를 충분히 올리고 천연가스를 흘리면서 프로판 압축기를 기동하는 방식으로 진행하였다. 이전 실험에서 MR 사이클에서 압축기 후단의 온도를 15℃까지 올리는데 2시간 정도의 시간이 소요되었음을 감안해서 MR 압축기의 after-cooler 역시 차단한 상태로 기동하였다. 그 결과 3차 실험 때 보다 더 빠른 속도로 온도가 올라가는 것을 확인할 수 있었다.

실험 당시 외기 온도가 비교적 높았으며 14℃에서 20℃ 이상의 온도를 얻는데 1시간이 채 걸리지 않았다. MR 리시버 탱크의 토출 온도가 20℃를 넘었을 때 프로판 압축기를 기동하여 프로판 사이클을 형성하였으며 프로판 압축기 역시 시작하면서 after-cooler의 냉각수 공급을 차단하였다.

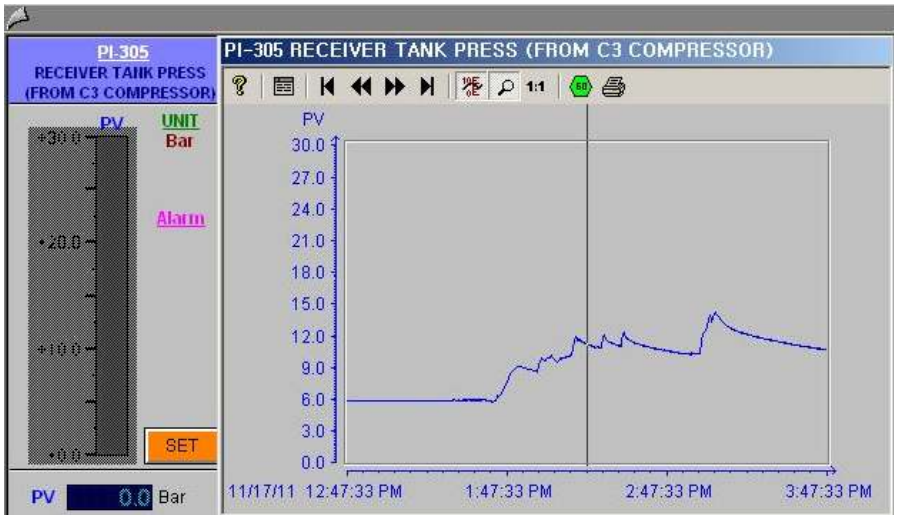



그림 2.2.87. C3 receiver tank pressure

운전 중에 bypass 밸브 및 팽창밸브의 조절로 원만한 그래프의 형상은 아니지만 최고 13 bar까지 승압이 되었다. 이는 설계조건인 16.5 bar에 근접한 조건으로 현재까지의 실험에서 가장 높은 압력이었다. 하지만 압력이 높아지면서 냉매의 순환이 빨라져 석션쪽의 가스공급이 원활히 될 것이라는 예상과 다르게 전과 같이 bypass 밸브를 90% 이상 열지 않으면 압력은 떨어지는 현상은 계속되었다. 이것은 프로판 냉매의 과냉으로 충분히 증발이 되지 않으면서 가스의 공급이 부족해졌기 때문이라

는 판단이다. 프로판 냉매의 증발 온도가 다음 그림에 나타나며 이것은 이전 것과 비교해 크게 다르지 않았다.

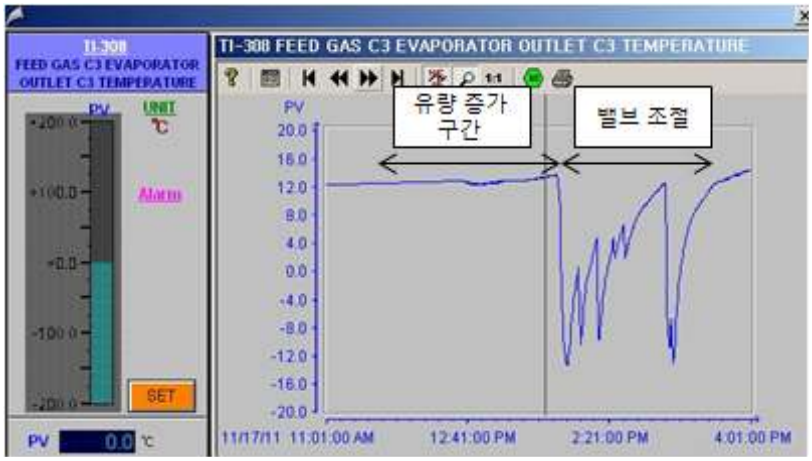



그림 2.2.88. C3 evaporation temperature

프로판 냉매의 과냉은 냉매를 흘렸을 때 계속해서 진행되었으며 이를 막기 위해서 팽창밸브 및 bypass 밸브의 개폐를 반복적으로 수행하게 되었다. 과냉을 막기위해서 배관에 히팅밴드를 설치하였지만 그 효과는 거의 없었고 이는 단열이 되지 않은 상태였기 때문인 것으로 파악된다.

한 가지 의문스러운 점은 프로판 냉매의 과냉은 일반적으로 냉매의 유량이 열교환되는 유체의 양에 비해서 많을 때 발생하게 되고 반대로 과냉일 때 열교환이 되는 유체는 충분히 열교환이 될 것이라 생각이 되는데, 결과는 그렇지 않았다.

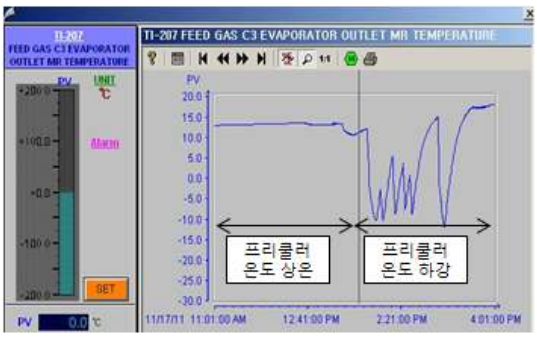



그림 2.2.89. MR pre-cooled temperature

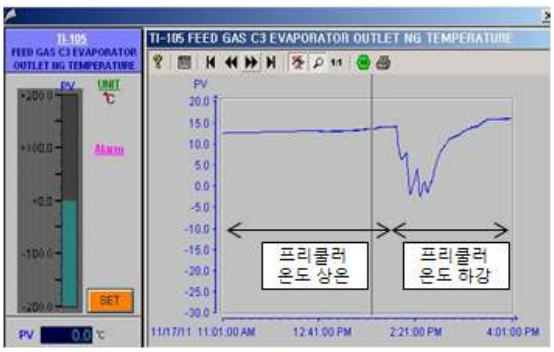



그림 2.2.90. Natural gas pre-cooled temperature

그림 2.2.89와 그림 2.2.90에서 보는바와 같이 두 유체의 설계 온도는 -35℃ 부근이나 그에 미치지 못하고 특히 천연가스의 경우에는 -5℃가 한계였다. MR 같은 경우는 그보다는 더 온도가 떨어지는 것을 확인 할 수 있었으나 만족할 만한 수치는 아니었다.

실험 도중 밸브의 작동에 이상이 생겨서 실험은 중도에 그만하였다. 이것은 냉매 중 수분의 영향으로 막힘 현상으로 잠정 결론 지었다. 이번 실험은 2차 실험부터 계속 같은 냉매를 충전하고 사용하는 것을 반복하였으며, 압축기쪽의 기밀을 다 유지하지 못한 상태라 외부 수분의 침투가 있었을 것으로 판단된다.

압축기 after-cooler의 냉각수를 초반에 중단한 것은 효과가 있었다. 실제로 이전보다 빠르게 온도가 상승하는 것을 확인했고, 압력이 상승하는 효과도 함께 확인할 수 있었다. 반면 프로판 증발 배관에 히팅밴드를 감아서 과냉을 보상하는 것은 효과가 없었다. 단열을 하지 않고서는 외기 온도로 인해서 온도가 유지 되지 않았었다.

무엇보다도 이번 실험에서 제어밸브의 오작동으로 더 이상 실험이 힘들어지게 되어 실험을 중단하였는데, 이는 냉매에 수분 및 이물질로 인해서 밸브에 막힘현상이 일어난 것으로 보인다. 지금까지 냉매는 실험종료 후 리시버탱크에 보관하고 다음 실험에서 다시 사용하는 것을 반복하였는데, 그 과정에서 수분 및 이물질의 침투가 있었을 것으로 보고 차후 실험에서 질소 퍼지와 진공을 다시 해야 할 것으로 결론 내렸다.

다음 실험에 앞서 배관의 단열공사를 해서 온도 데이터의 신뢰성을 높이고 배관 보온 설비도 구축해서 과냉이 되었을 때 해결할 수 있는 조치를 취해야 한다. 또한 단열 전에 장비의 모든 가스를 밴트하고 질소로 퍼지하여 배관 및 열교환기를 깨끗이하고 단열에 들어가서 실험전에 진공을 잡고 실험을 해야 한다.

마. 단열 후 전체 사이클 시운전

이전 실험까지의 결과를 토대로 개선한 내용은 다음과 같다.

a. 배관 및 탱크에 단열재 설치

이전까지의 실험은 단열을 하지 않은 상태에서 단열 효과를 무시하고 실험을 하였다. 따라서 Pre-cooler 이후의 온도가 이후 열교환기에 어떻게 작용을 하는지 알 수 없었다. 단열 공사는 4차 시운전이 끝나고 시행하였으며 총 9일의 시간이 소요되었다. 단열재는 고무발포 단열재를 사용하였으며, 타 단열재에 비해서 단열 효과가 1.25배 정도로 높다고 알려져 있으며 비교적 시공이 쉽고 단열 후에 수정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 단열을 한 범위는 콜드박스 스키드 프로세스라인 전체와 압축기 석션드럼, 리시버 탱크 및 1st snubber 그리고 이것들과 연결된 배관이었으며, 상온 범위에서는 25mm 두께로 시공하였으며 -35℃ 이하의 온도에서는 50mm, -100℃ 까지는 75mm, -125℃ 이하의 온도 배관에서는 100mm의 두께로 단열 시공을 하였다. 그림 2.2.91에서 해당 단열 공사를 마친 뒤 BSU의 모습이다.



그림 2.2.91. 단열 후 BSU

b. 냉매 증발 온도 보상을 위한 열선 설치

냉매의 과냉을 막기 위한 방법으로 열선을 설치하고 단열 작업을 하였다. 이전 실험에서의 열선은 단열을 하지 않았기 때문에 발열 효과가 거의 없었으며, 이번 실험에서는 열선을 배관에 감은 뒤에 고무발포 단열재를 이용해서 열선을 감싸 증발 온도가 내려갔을 때의 압축기 석션의 온도가 내려가는 것을 방지하도록 하였다. 해당 열선은 실리콘 재질의 열선이며, 열선의 온도를 제어할 수 있도록 배관에 온도 측정 장치와 제어 장치를 함께 설치하였다.

c. 압축기 개방 플랜지 밸브 설치

압축기 내에 개방된 플랜지에 밸브를 설치하여 운전중이 아닐 때는 밸브를 잠그고 기밀을 유지할 수 있도록 했다. 또한 이 부분으로 인해서 진공도가 낮게 나오는 것으로 판단했기 때문에 좀 더 나은 진공도를 위한 수단이기도 하다. 그림 2.2.92는 해당 부분의 밸브 모습이다. 이러한 밸브는 총 6개가 있으며 모든 부분에 그림과 같은 형태로 밸브를 설치하였다.



그림 2.2.92. 개방된 플랜지 밸브 설치

d. WinCC Data Monitor 설치

실험 결과를 보다 정확하고 용이하게 분석하기 위해서 데이터 수집 S/W인 “WinCC Data Monitor”를 서버 컴퓨터에 설치하였다. 이전 실험에서의 운전 데이터 분석은 HMI의 캡쳐 화면과 Trend화면으로 분석을 하였는데 이것은 분석하는데 한계가 있고 사용자가 원하는 분석 화면을 볼 수 있는데 어려움이 있었다. S/W를 설치함으로써 원하는 시간의 운전 데이터를 엑셀 형식으로 가져와서 데이터를 분석 및 가공 할 수 있게 되었다. 설치를 하게 되면 엑셀 화면에 Excel Workbook Wizard 아이콘이 생겨나며 이것을 클릭하게 되면 다음과 같은 화면이 나타난다.

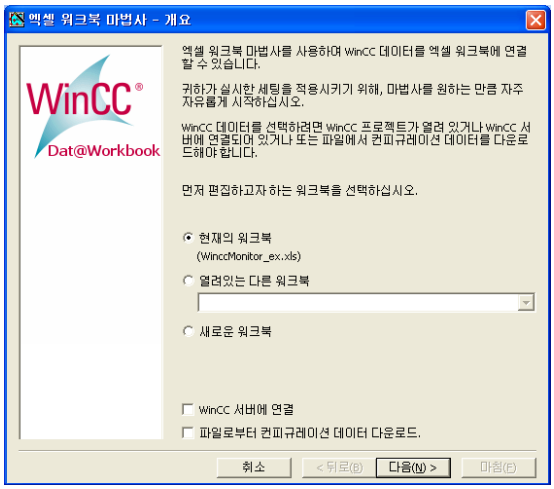



그림 2.2.93. Excel Workbook 실행화면

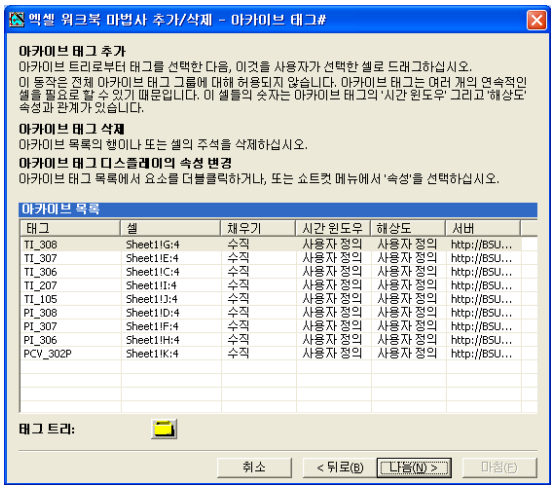



그림 2.2.94. 아카이브 태그 입력

그림 2.2.94는 다음의 화면으로 엑셀에서 디스플레이 하고자 하는 아카이브 태그를 지정할 수 있으며 이것은 HMI의 태그 내용과 같다. 원하는 아키아브 태그를 엑셀로 드래그하여 그림과 같이 화면상에 나타나고 해당 태그에 대한 속성들을 사용자가 기입함으로써 원하는 데이터 값을 모니터 할 수 있다.

그림 2.2.95와 같은 화면이 나타나면 “발행”을 클릭하여 해당 워크시트를 발행한다.

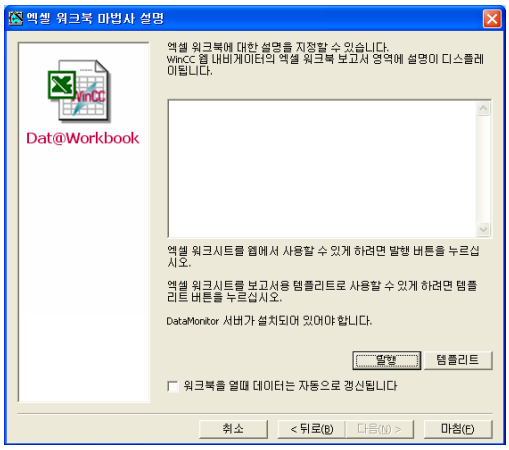



그림 2.2.95. 워크시트의 발행

워크시트의 발행을 완료하면 Excel Workbook Wizard 아이콘 옆의 Excel Workbook을 클릭한다. Excel Workbook을 클릭하면 다음과 같은 화면이 나오는데 “연결”을 누르면 로그인 대화상자가 열리고 로그인을 하게 되면 태그를 읽어 올 수 있는 준비가 끝난다.

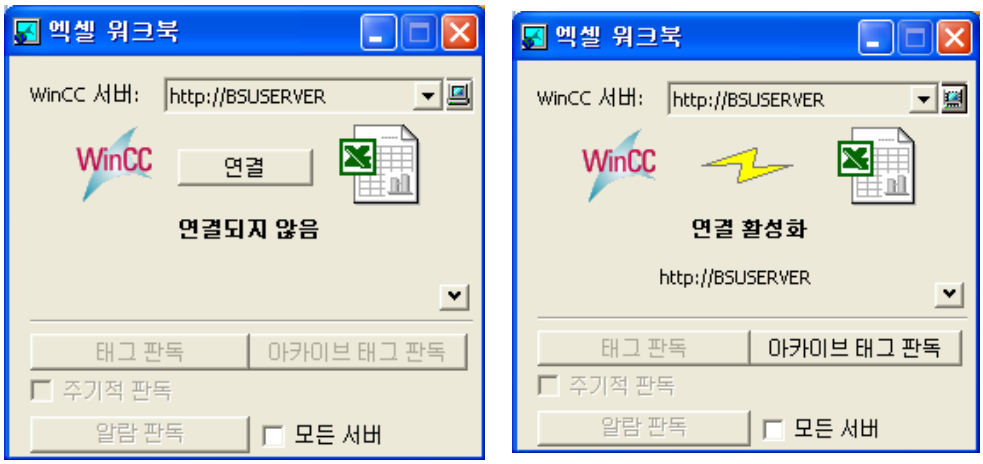



그림 2.2.96. Excel Workbook 서버 연결

이로써 모든 세팅이 끝나고 아카이브 태그 판독 버튼을 누르면 앞서 지정 했던 태그들의 정보가 엑셀 시트에 반영되어 디스플레이 된다. 사용자 지정에 따라서 실시간 정보를 볼 수도 있으며, 지정된 시간 내에서의 데이터들을 볼 수도 있다.

본격적인 실험에 앞서 이전 실험에서 잔류하고 있는 가스들을 모두 Vent 및 Purge 하였으므로 설비의 진공을 시도하였다. 이전과 마찬가지로 천연가스 배관, 프로판 냉매 배관 및 혼합냉매 배관을 모두 연결시키고 한꺼번에 진공을 잡았다. 진공 펌프를 가동하고 빠르게 진공도가 내려가는 것을 확인하였다. 이전 실험에서 진공도는 2 Torr 이하로 내려가지 않았으나, 이번 실험에서는 0.1 Torr까지 내려갔으며 아주 천천히 더 내려갈 수 있었다. 이것은 설비의 Vent 이후에 추가로 기밀 시험을 시행해서 한군데 새는 곳을 바로 잡은 것과 압축기 개방된 플랜지의 밸브 설치가 주효했다고 판단된다.

진공 게이지가 0.1 Torr를 가리켰을 때 진공 펌프를 중지하고 동시에 혼합냉매와 프로판 냉매의 주입장치(MFC)를 가동하여 1～2 bar 정도의 냉매로 채워 놓았다. 이것은 진공의 유지가 쉽지 않기 때문에 빠른 시간에 냉매를 상압 이상으로 채워놓아 대기 중의 물질이 침입하지 못하도록 하는 것이다. 냉매를 배관에 채워놓은 뒤에 프로판 액체를 리시버 탱크에 60mm까지 채우고 이전과 마찬가지로 혼합냉매 압축기부터 기동하였다. 혼합냉매 주입은 47L 용기를 사용했으며 약 30병을 사용해서 최종 40 bar 정도의 운전조건을 가질 수 있었다. 대기의 온도가 0℃ 부근이라서 리시버 탱크의 온도가 오르는데 상당한 시간이 소요되었으며, 혼합가스 리시버탱크의 토출 온도가 15℃가 되었을 때 프로판 냉매 압축기를 기동하고 서서히 천연가스를 흘렸다. 흘린 천연가스는 5 Nm3부터 진행하였다.

프로판 압축기를 기동하고 압축기 석션의 압력 보상을 위해서 팽창밸브의 개도율을 85% 정도로 하였고, 팽창 후 온도는 -14℃정도였으며, 증발온도는 -10℃ 정도로 나왔다. 프로판 냉매의 증발 온도가 더 이상 올라가지 않아 프로판 냉매 증발 후 지나가는 배관에 설치해 놓은 열선을 통한 온도 보상을 시도 하였다. HMI 상에서 증발 온도 표시기가 열교환기 부근에 설치가 되어 있기 때문에 증발온도는 -10℃ 이하에서 머물렀으나, 1st snubber 온도 게이지를 통해 확인한 결과 상온을 유지하는 것을 확인 할 수 있었다.

열선의 효과로 인하여 비록 증발온도가 낮게 나오더라도 배관에서 충분히 보상해서 압축기 석션측에 설계온도보다 낮은 온도로 유입되는 것을 방지 할 수 있기 때문에 이 전 실험과는 다르게 프로판 냉매의 팽창밸브 및 bypass 밸브의 개도율을 자유롭게 가져갈 수 있었디. 이전 실험에서는 90%에 머물렀던 bypass 밸브의 개도율을 50%까지 가져갔으며 팽창밸브 역시 30%～100%까지 조절이 가능했다.

이와 같이 제어 밸브의 조작이 용이해 짐에 따라 시간을 오래두고 온도 변화를 관찰할 수 있었으며, 실험 시작에서 Pre-cooler는 압축된 프로판 냉매와 팽창된 프로판 냉매의 열교환이 활발한 것으로 관찰되었다. 반면 혼합냉매 및 천연가스의 온도변화는 미미하였으며, 프로판 냉매 자신의 온도 변화가 안정 상태에 접어들자 혼

합냉매의 온도 강하가 서서히 일어 났으며, 이후 천연가스의 온도 강하도 시작되었다. 프로판 냉매의 팽창 온도는 -20℃~30℃ 사이를 나타냈으며, 혼합냉매의 예냉 온도는 -25℃, 천연가스는 -20℃ 부근을 나타내었다.

실험당시 배관 및 탱크류의 단열은 끝난 상태였지만 열교환기와 HP separator의 단열은 하지 않은 상황이라 예냉된 혼합냉매와 천연가스가 MCHE1까지 지속되지 못하고 약 10℃ 정도의 온도 차이를 나타내었다.

반면 낮은 온도는 아니지만 MCHE1과 MCHE2를 지난 혼합냉매는 팽창 후 온도가 떨어지기 시작하였고 처음 -30℃ 정도이던 혼합냉매의 팽창 온도는 나중에는 -100℃ 이하를 가리키게 되었다. 혼합냉매의 팽창온도가 -100℃ 정도이기 때문에 천연가스 온도도 비슷하게 떨어지리라 생각했지만 -70℃까지만 확인하였다. 시간을 두고 지켜보았다면 온도는 계속 내려가고 있었기 때문에 더 강하되는 것을 확인할 수 있었으나, 프로판 냉매의 부족과 온도 강하하는 정도가 점점 더 미미해 짐에 따라 이번 실험은 이정도 확인 하는 것으로 접어두었다.

이번 실험에서 의미 있었던 점 중 하나는 온도 강하가 이전보다 잘 되었다는 점과 지속되지는 않았지만 프로판 사이클이 안정상태로 어느정도 지속되었다는 점이었다. 프로판 사이클이 안정될 수 있는 조건을 찾는다면 이 후 혼합냉매 사이클에 따라서 원하는 온도를 맞출 수 있을 것이라 기대한다.

WinCC data monitor system을 통해서 이번 실험에서 프로판 사이클을 분석해 보면 시간에 따라서 1~5분 간격으로 Pre-cooler의 온도 및 압력 분포를 볼 수 있으며 안정된 상태를 확인할 수 있었다.

분석 결과 압축된 프로판 냉매의 압력이 높을수록, 팽창 압력이 낮을수록 원하는 결과에 가깝게 나온 것을 확인 할 수 있었다. 프로판 냉매를 설계 압력인 16.5 bar로 올리는 것은 어렵지 않은 일이나 팽창 압력을 낮추는 것은 쉽지 않은 일이다. 팽창 압력을 낮추기 위해서는 팽창 밸브의 개도율을 줄여야하고 팽창 밸브의 개도율을 줄이면 압축기 석션쪽의 공급 압력이 낮아져서 압축기를 구동하는데 문제가 발생하기 때문이다. 실제 그림에서 노란색 바로 표시된 부분에서 1st snubber의 압력이 압축기 설계 압력에 비해서 낮게 나오는 것을 알 수 있으며, 또한 팽창 직전의 압력이 그대로 압축기 쪽으로 전해지는 것이 아니라 약 0.3~0.5 bar의 차압을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

본 실험에서 알 수 있었던 것은 무엇보다 각 유체의 열교환은 비교적 안정되게 진행되었던 점이 있었으며, 그에 대한 운전조건을 대략 유추 할 수 있었다. 뿐만 아니라 열교환기의 스트림별 열교환이 한꺼번에 이루어지기보다는 각 스트림별로 순차적으로 이루어졌음을 알 수 있었다. 또한 본 실험을 통해서 개선해야 할 사항은 최초 운전시에 압축기 후단 온도 조건을 맞추어야 하는데 시간을 절약하기 위해서 처음부터 After-cooler의 냉각수 공급을 차단하고 원하는 온도에 달했을 때 냉각수의 공급을 시작하는 것이 좋겠다는 판단이었으며, 또한 실험중 프로판이 증발이 원활이 되지 않았던 시점에서 액상의 프로판이 석션드럼에 머물게 되어서 냉매의 절

대량이 부족했던 점을 개선하기 위해서 해당 부분을 감안하여 냉매의 공급을 해야 한다는 점이다. 이 외에도 열교환기와 Separator의 단열을 통해서 열손실을 줄이고 각 부분별 건도 파악이 필요할 것으로 판단된다.

마. 최종 개선도

2011년 11월 완성검사 후 최조 시운전부터 5차에 걸친 시운전을 통해서 설비를 개선하고 운전 기능 향상을 위한 S/W 설치 등의 작업을 완료하고 운전의 개선 정도를 평가하였다. 앞서 설비를 개선한 주요 내용을 정리하면 아래의 표와 같다.

표 2.2.19 시운전 결과 개선 내용

| No. | 내용 | 효과 |
|---|---|---|
| 1 | 압축기 리시버 탱크 차단 밸브 설치 | 운전 startup 시간 단축과 냉매의 효과적인 사용이 가능 |
| 2 | 냉매 사이클 구성 절차 변경 | 기존의 프로판 냉매 사이클 구성을 첫 번째로 하는 방법 대신 MR 사이클을 먼저 구성함으로써 순간적인 과냉 현상을 방지 |
| 3 | 냉각수 유량 조절 | 냉각수 유량을 조절함으로써 압축기 토출 후의 냉매 압력과 온도를 조절함으로써 안정적인 운전 가능 |
| 4 | 압축기 밴트 밸브 설치 | 압축기에서 밴트 배관에 차단밸브를 설치하여 설비 진공 구간에 진공도를 높일 수 있어 냉매 순도 확보 |
| 5 | 설비 단열 | BSU 전체 설비 단열을 통한 설비 전체 열손실 감소 |
| 6 | 데이터 분석 S/W 설치 | 운전 후 효과적인 데이터 분석을 시행함으로써 운전 문제점 분석 및 향후 실험 준비 등에 도움 |

◦ Precooler 온도 개선

C3MR 공정에서 가장 처음에 문제점으로 인식하였으며, 공정의 시작 지점이라 할 수 있는 프로판 냉동 사이클로 인한 예냉 온도에 대해서 비교해보면, 그림에서 보는 바와 같이 눈에 띄게 향상된 결과를 확인할 수 있다.

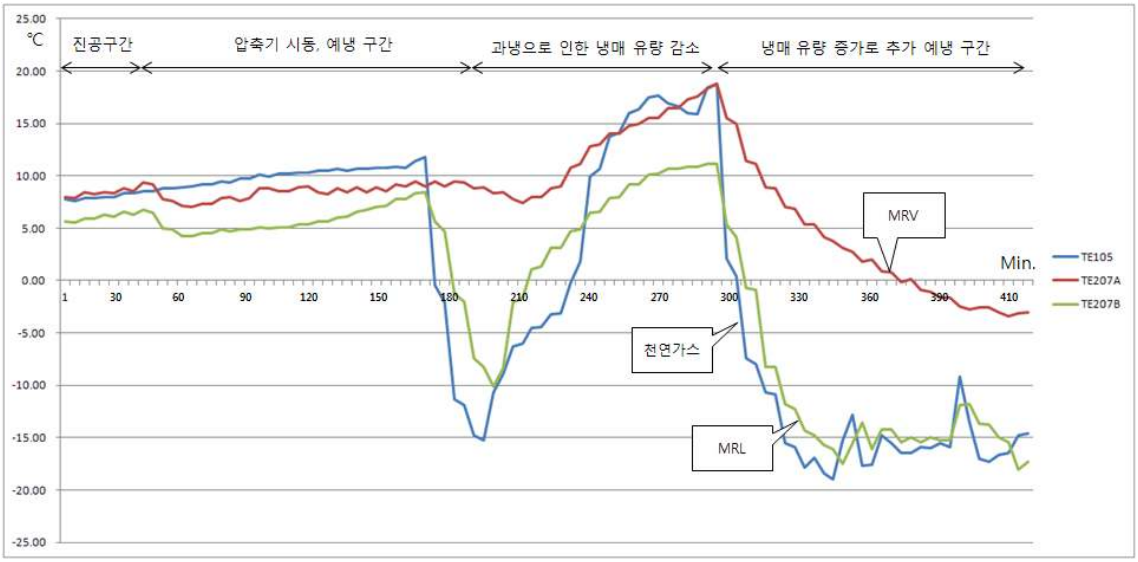



그림 2.2.97. 시운전에서의 예냉 온도 트랜드

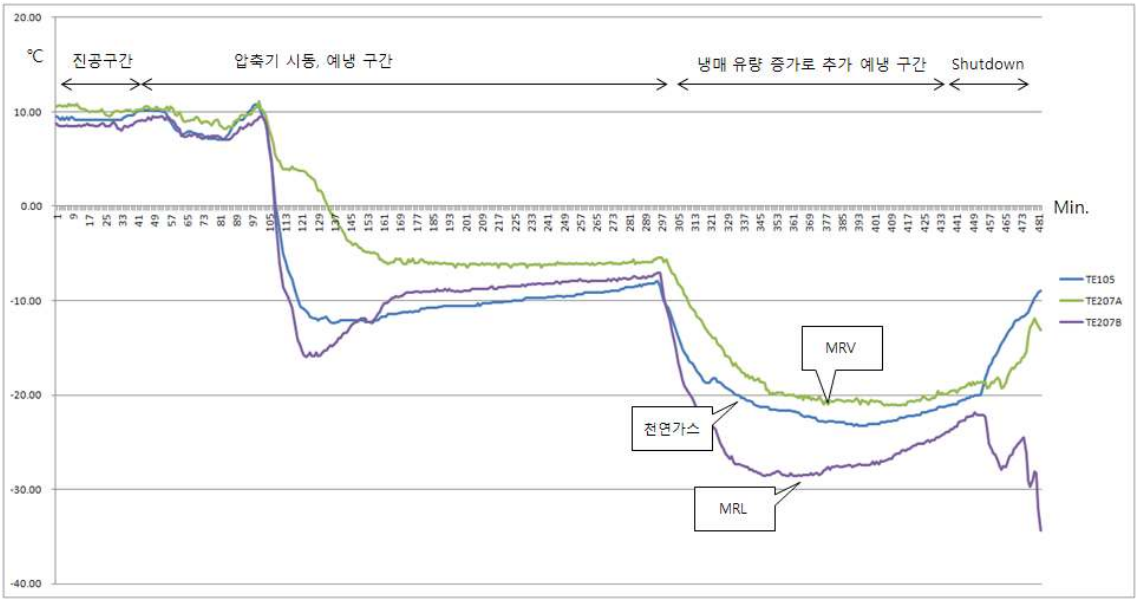



그림 2.2.98. 시운전 결과 보완 후 예냉 트랜드

시운전 당시의 예냉온도는 안정 상태를 유지하는 것도 어려웠을 뿐 아니라 설계 온도인 -32℃에 못미치는 -15℃에서 -17℃에서 머물렀으며 그에 따라서 이 후의 온도 변화에도 영향을 미쳤다. 특히 예냉 사이클의 주 목적 중의 하나인 혼합냉매의 기액 분리에 영향을 주게 되어서 이 후의 시스템 성능이 좋지 않았다. 반면 이와 같은 결과를 통해서 설비의 보완 및 운전 절차 개선을 통해서 그림 2.2.98과 같이 비교적 안정된 예냉 사이클을 획득 할 수 있을 뿐 아니라 이전의 -15℃ 정도의 예냉 결과에서 최저 -29℃까지 예냉 온도를 유지함으로써 이 후 공정의 성능 향상

에 기여 하였다.

◦ MCHE1 온도 개선

본 액화 공정의 냉각에서 가장 큰 역할을 하는 것이 MCHE1인데, 이 열교환기를 통해서 가장 중요한 냉각 과정이 이루어지게 된다. 특히 이 부분에서는 혼합냉매의 상이 분리 되면서 각각의 스트림이 냉각에 관여하게 되고 그 흐름이 결국 천연가스 액화에 중대한 영향을 미치게 된다. 마찬가지로 시운전 당시의 온도 트랜드와 개선 이후 트랜드를 비교해 보면 아래 그림과 같다.

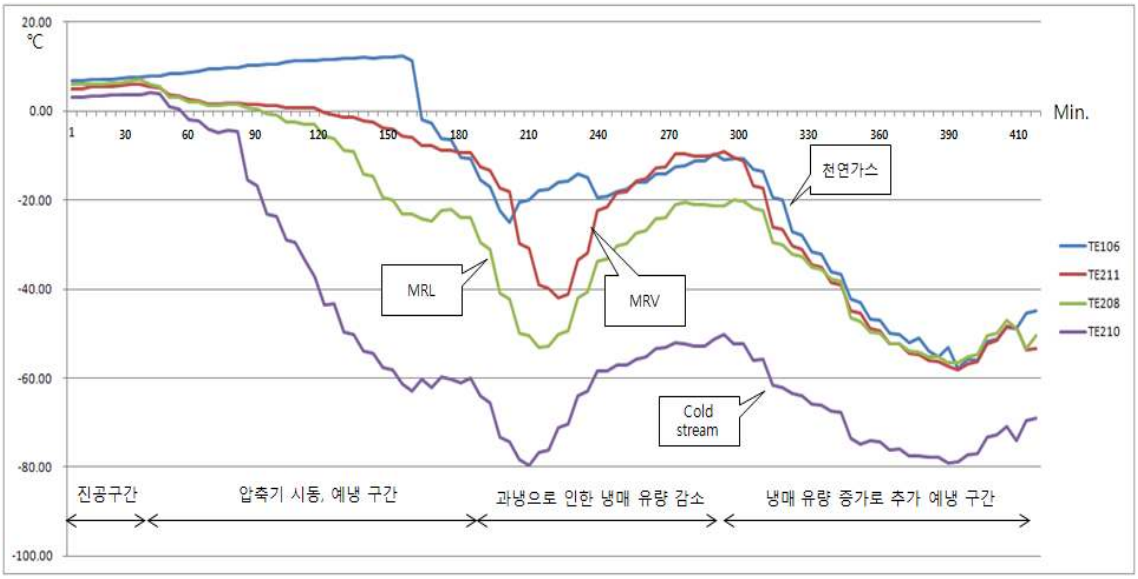



그림 2.2.99. 시운전에서의 MCHE1 outlet 온도 트랜드

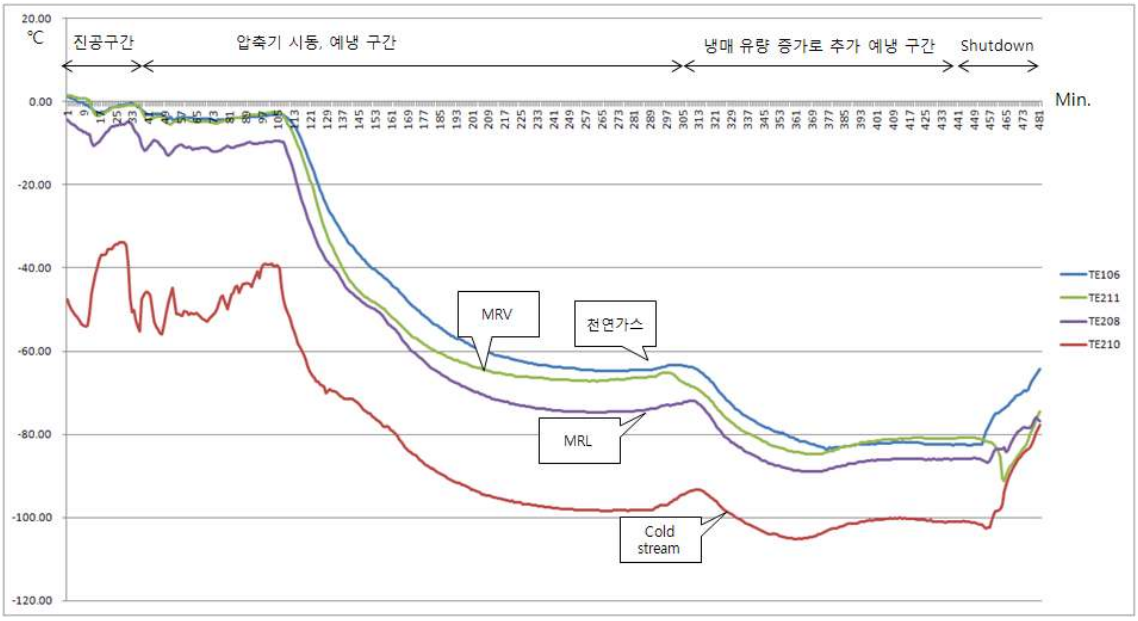


그림 2.2.100. 시운전 결과 보완 후 MCHE1 outlet 온도 트랜드

그림에서 알 수 있듯이 시운전 결과에 비해서 완만하게 안정상태를 유지하는 것을 볼 수 있으며, MCHE1 outlet의 최저 온도가 시운전 당시에는 -58℃가 최저인데 비해서 -85℃까지 하강하였다. 그리고 MCHE1의 온도 근접성도 향상되어 시운전에서 약 25℃정도의 온도 근접성이 약 18℃ 정도로 좁혀진 것을 볼 수 있다. 이것은 냉매의 액화 상태가 향상되어 일어난 결과로 볼 수 있다.

◦ MCHE2 온도 개선

MCHE2의 온도 변화에 대해서 비교를 해본다. MCHE2는 최종 LNG가 생산되는 역할을 하는 열교환기로 sub-cooling을 하게 된다. 시운전 당시의 트랜드와 이 후 개선된 BSU의 트랜드를 아래의 그림에 나타내었다.

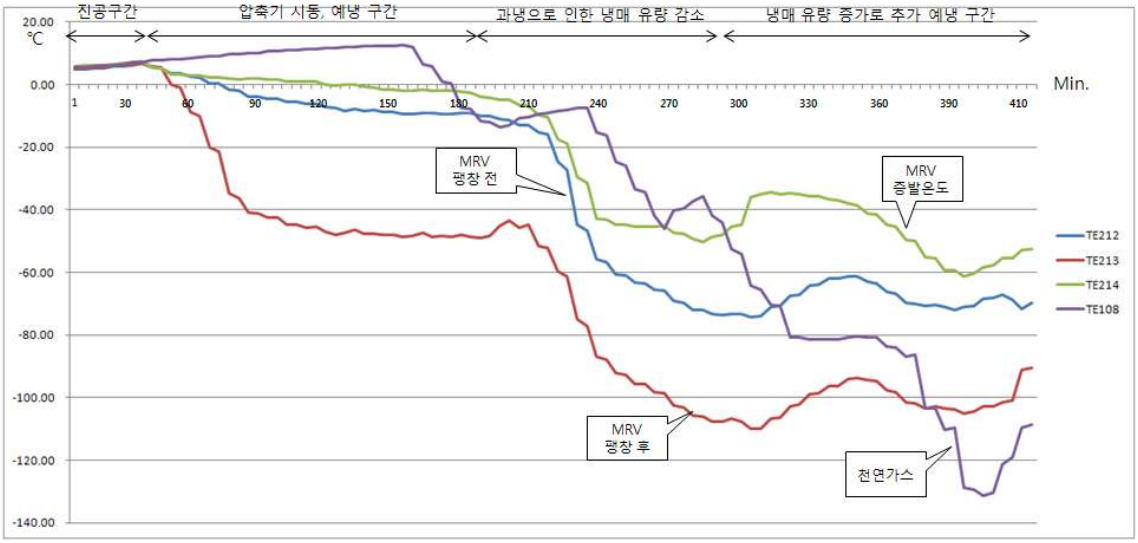



그림 2.2.101. 시운전에서의 MCHE2 outlet 온도 트랜드

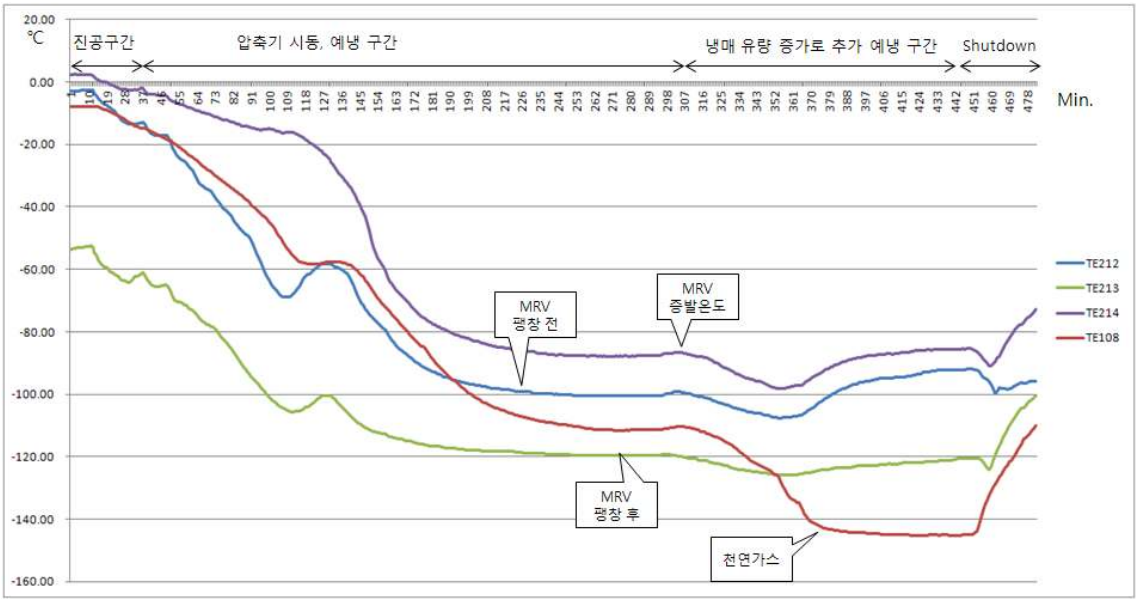



그림 2.2.102. 시운전 결과 보완 후 MCHE2 outlet 온도 트랜드

시운전 당시에 혼합냉매의 cold stream 온도와 hot stream의 온도를 보면 상호간의 많은 갭이 존재하였고 팽창 후의 MRV 온도가 -110℃ 미만의 온도로써 그 이하로 온도 강하가 불가능 하였다. 따라서 천연가스의 팽창 후 온도 역시 -120℃ 부근이었다. 반면 개선 조치를 하고 난 결과는 상호간 온도 갭이 많이 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 팽창 후의 MRV 온도가 -125℃까지 하강하여 최종 천연가스의 팽창 후 온도는 -145℃에 이르렀다.

시운전 당시의 온도 트랜드는 예냉 절차부터 많은 문제점이 존재하였으므로, 그 결과가 후단의 MCHE1, MCHE2까지 영향을 미치기 때문에 뒤로 갈수록 성능은 더 악화 되는 경향을 보이는 것을 알 수가 있다. 따라서 설비 보완 관점에서 예냉 부분에서 많은 수정을 하였으며 그 결과 이 후 성능의 안정성을 확보 할 수 있었다. 위의 결과를 토대로 성능 지표를 표로 나타내 보면 아래의 표와 같다.

표 2.2.20 시운전 보완 결과 향상 결과

| 항목 | | 시운전 결과 | 보완 결과 | 향상률 |
|---|---|---|---|---|
| 예냉 온도 | 프로판 냉매 (Cold stream) | -22℃ | -34℃ | **54%** |
| | MR 냉각 (Hot stream) | -15℃ | -28℃ | **53%** |
| | 천연가스 | -13℃ | -26℃ | **100%** |
| MCHE 1 온도 | MRL | -56℃ | -88℃ | **57%** |
| | MRV | -55℃ | -84℃ | **34%** |
| | MR (Cold stream) | -78℃ | -105℃ | **34%** |
| | 천연가스 | -55℃ | -83℃ | **51%** |
| MCHE 2 온도 | MRV (Cold stream) | -105℃ | -123℃ | **17%** |
| | MRV (Hot stream) | -70℃ | -97℃ | **38%** |
| | LNG | -120℃ | -145℃ | **21%** |

※ *향상률 = 시운전 결과/수정후 결과 × 100*

(4) LNG BSU 연속운전 특성 도출

가. LNG BSU 연속운전 내역

| 실험 | 일시 | 내용 | 운전시간 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 1차 | 2012.5.30 | 냉매 사이클 구성 시도와 천연가스 액화 여부 확인 | 8시간 | 열교환기 제작 업체(동화엔텍) 2인 참관 |
| 2차 | 2012.6.13. | 냉매 사이클 구성 시도와 액상 천연가스 생성 및 저장 | 8시간 | |
| 3차 | 2012.6.27. | 시연회 대비 냉매 사이클 구성 시도와 액상 천연가스 추출 시도 | 9시간 | 시연회 대비 연속운전 |
| 4차 | 2012.7.4. | 시연회 대비 냉매 사이클 구성 시도와 액상 천연가스 추출 시도 | 6시간 | GS 건설 및 사업단 관계자 참관 |
| 5차 | 2012.7.25. | 냉매 사이클 구성 시도와 액상 천연가스 추출 시도 | 4시간 | |
| 6차 | 2012.8.16. | 프로판 사이클 구성 및 프로판 액면계 설치 후 결과 확인 | 3시간 | 프로판 사이클 구성 실패로 실험 중단 |
| 7차 | 2012.8.31. | 프로판 사이클 구성 및 예냉 온도 도달 후 혼합냉매 온도 및 천연가스 온도 확인 | 4시간 20분 | |
| 8차 | 2012.10.19 | 건기평(現 국토진흥원) 원장님 현장방문 참관 액화 공정 설비 연속운전 | 8시간 | |
| 9차 | 2012.11.1. | 실험 장비 수정 후 동작 및 성능 테스트 | 9시간 | |
| 10차 | 2012.12.21 | 실험 장비 수정 후 동작 및 성능 테스트 | 3시간 50분 | |
| 11차 | 2013.2.28. | 테스트베드(Train-1) 제어로직 구현 및 실험 | 12시간 20분 | |
| 12차 | 2013.10.29 | MCHE 설계 인자 도출 및 가스성분 분석 | 12시간 40분 | |
| 13차 | 2014.8.11. | 신규 열교환기 설치에 따른 열교환기 성능 테스트 | 12시간 10분 | |
| 14차 | 2014.11.4 | 신규 열교환기 설치에 따른 열교환기 성능 테스트, 유량 변동에 따른 결과 확인 | 13시간 | |

※ *운전시간 = 냉매순도유지구간+ 예냉 구간+ 안정상태운전구간*

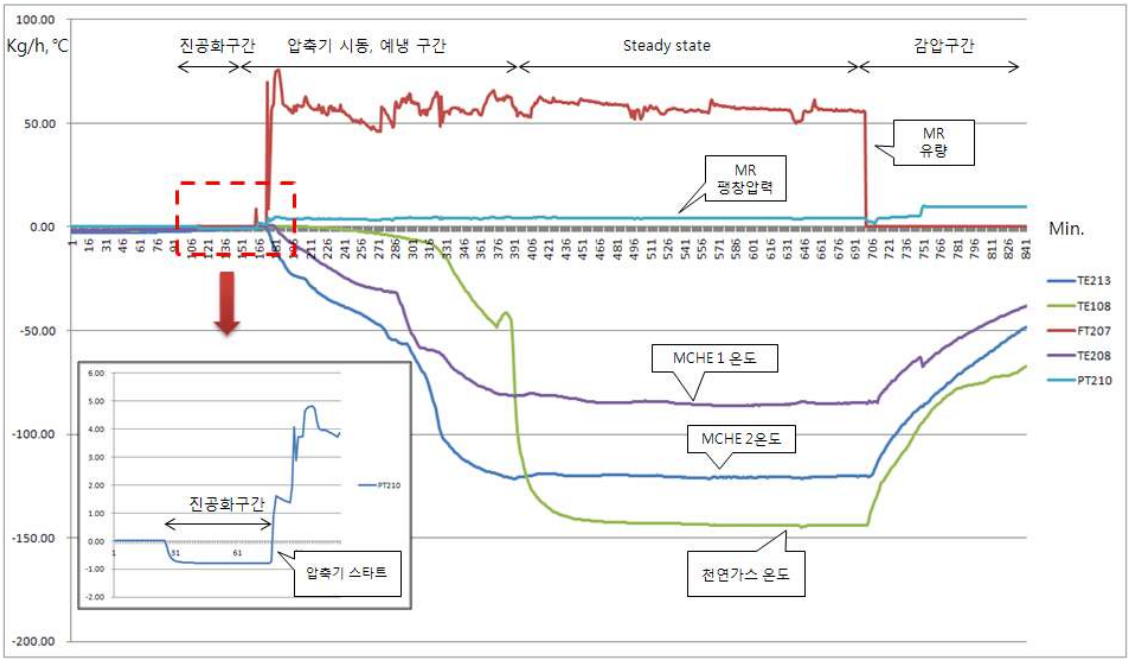



그림 2.2.103 11차 연속운전 트랜드(2013.2.28. 운전)

진공구간이 끝나자마자 압축기를 기동해야 하는데, 그것은 BSU 설비가 진공을 유지할 수 있는 장치가 아니기 때문이다. 기본적으로 압축기 자체가 진공에 적합하지 않게 제작된 것이며, 기타 밸브 및 피팅류도 고압 설비지만 진공설비는 아니기 때문에 진공 펌프를 중지시키자 마자 진공도는 서서히 내려가기 때문에 진공펌프를 중지하자마자 냉매를 충진하고 압축기를 기동하여 진공 손실을 최소화 해야한다.

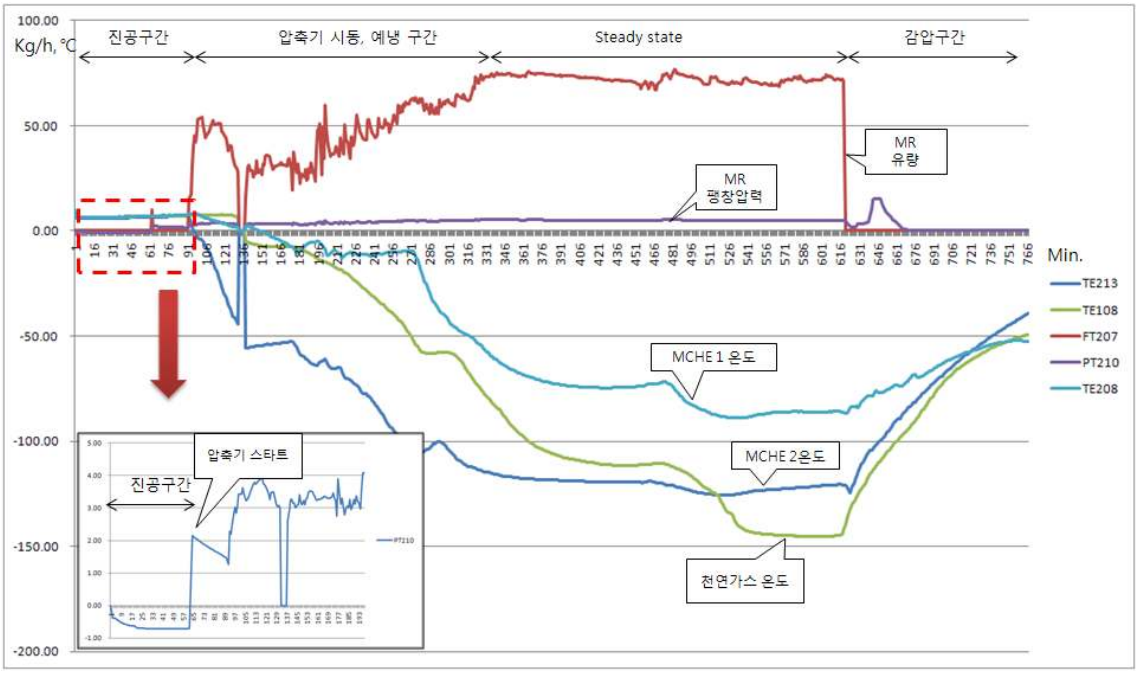



그림 2.2.104. 12차 연속운전 트랜드(2013.10.29 운전)

11차와 12차 연속운전은 12시간 이상 연속운전 트랜드로 크게 냉매의 순도 유지를 위한 설비 진공 부분과 진공 후 냉매 충진을 통한 압축기 기동부터 안정상태 운전까지의 예냉구간, 그리고 안정상태 운전으로 크게 나뉜다. 설비 진공은 0.1Torr 혹은 압력 트랜스미터의 압력이 -0.7이하가 될 때까지 진공 후 진공펌프를 끄고 바로 냉매를 충진해서 냉매의 순도를 유지한다. 냉매의 충진하면서 압축기 흡입쪽의 압력이 설정압력 이상이 되면 압축기를 기동하는데, 압축기 기동과 동시에 냉매 충진의 양을 늘려서 흡입측 압력이 설정압력 이하로 떨어지지 않게 한다. 압축기는 프로판 압축기와 혼합냉매 압축기 2개의 압축기가 있는데, Hot stream에 해당하는 혼합냉매 압축기부터 기동한다. 프로판 압축기부터 기동하여 프로판 사이클을 먼저 형성할 경우에는 프로판 사이클에서 Hot stream이 없기 때문에 과냉현상이 우려되기 때문이다. 압축기의 토출 압력이 설정 압력에 도달하게 되면 냉매의 충진을 멈추고 사이클을 형성한다. 보통 압축기 토출압력이 설정 압력에 다다르더라도 냉매의 온도가 계속 내려가는 중이기 때문에 냉매의 밀도 변화에 따라서 압력이 점차 줄어드는 경향을 보이기 때문에 안정상태로 접어들기 전에 냉매를 지속적으로 충진하게 된다. 보통 이 시간이 200분에서 250분가량 소요되며 더 이상 온도 변화가 없으면 안정상태에 도달한 것으로 판단하고 제어 변수 변화를 통한 실험을 진행하게 된다.

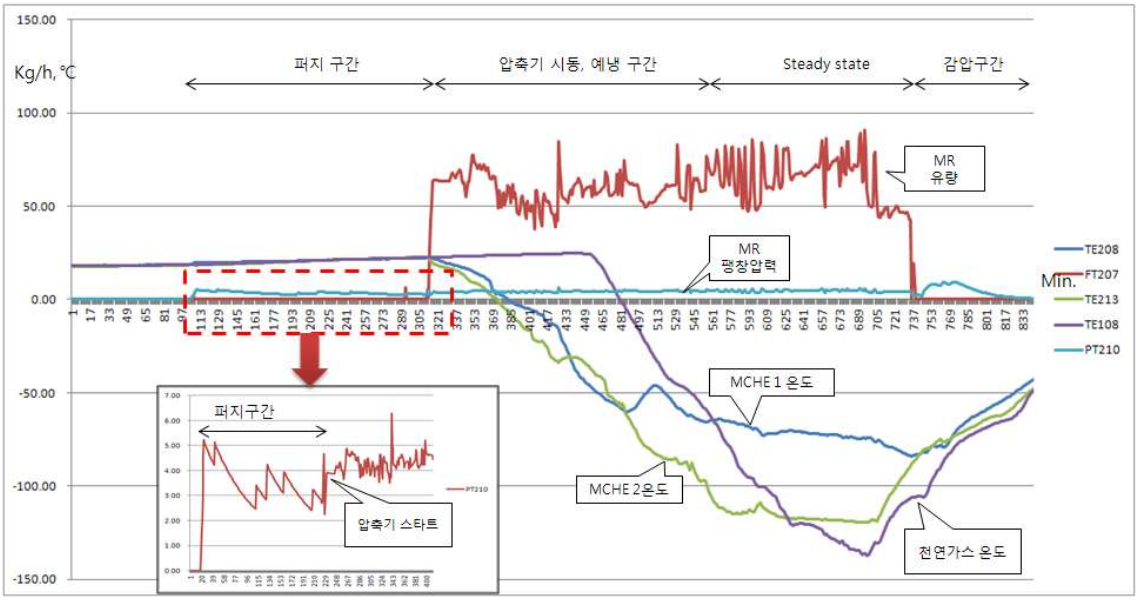



그림 2.2.105. 13차 연속운전 트랜드(2014.8.11 운전)

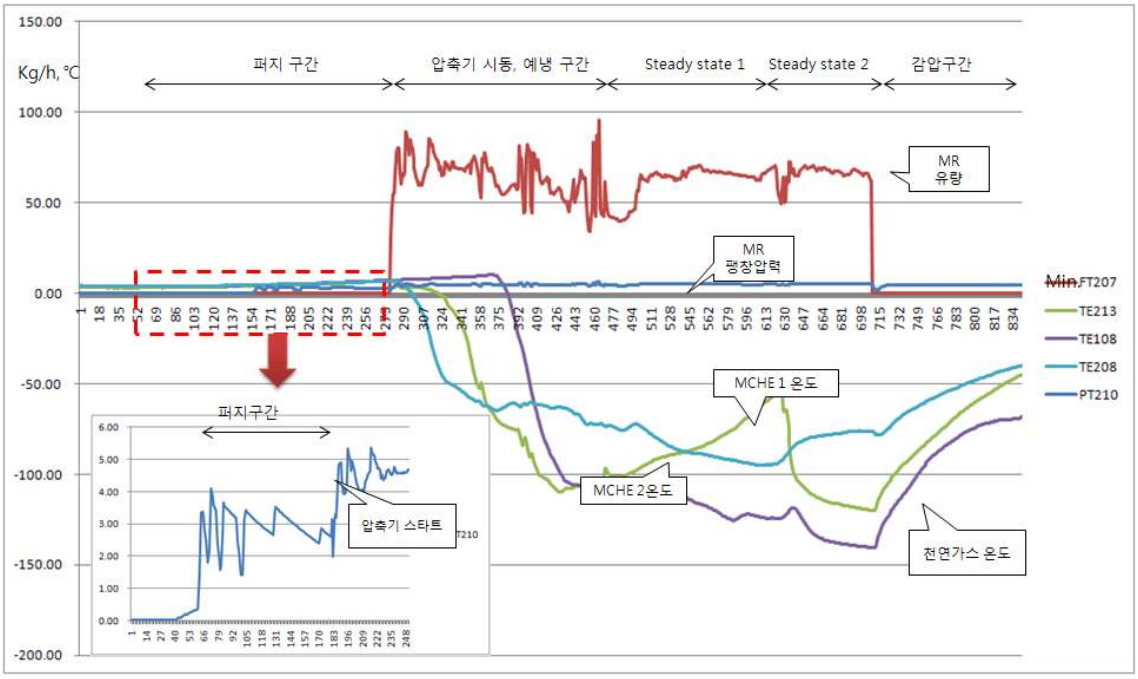



그림 2.2.106. 14차 연속운전 트랜드(2013.11.4 운전)

13차 및 14차 연속운전에서는 기존의 냉매 순도 유지 방법을 진공에서 퍼지타입으로 바꿔서 실험을 진행하였다. 왼쪽 하단의 그래프는 각 냉매를 배관에 충진한 후 퍼지하는 절차를 약 10회에 걸쳐 진행하고, 이후 냉매를 계속해서 충진하고 압축기를 기동하였다. 기존의 진공을 통해서 냉매의 순도를 유지하는 방법은 절차가 까다롭고 완벽한 진공을 유지하기가 힘든 조건이었기 때문에 퍼지를 통한 순도유지 방법으로 전환하였고 그 결과 진공을 통한 startup 보다 퍼지를 통한 것이 더 좋은 순도를 유지한다는 것을 GC 분석 결과를 통해서 알 수 있었다.

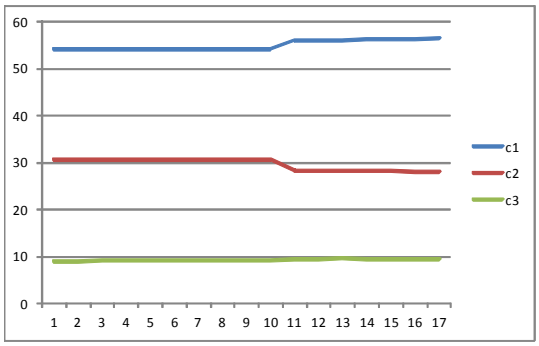



그림 2.2.107. 진공을 통한 냉매성분 분석

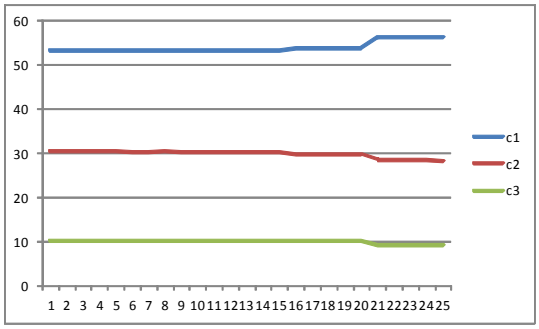



그림 2.2.108. 퍼지를 통한 냉매성분 분석

나. 냉매 성분 분석 방법. 목적

◦ 목적

LNG BSU 운전 결과 분석과 설비 개선 방안 도출을 위해 배관내 유체 가스의

실시간 성분 비율 분석이 필요하다. 운전중 외부 가스의 배관내 침투, 가스의 손실, 외부 온도에 의한 상변화 등 여러 가지 이유로 배관내 유체 가스 성분이나 그 비율이 변경될 수 있다. 공정 사이클상 여러 곳의 측정 포인트로부터 가스 성분을 분석하면 어느 스트림 (stream) 구간에서 성분이 변하였는지를 파악할 수 있다. 가스 성분이 변경된 위치 주위의 배관이나 장비를 검사하고 수정하면 문제의 원인을 진단하고 문제를 해결할 수 있다.

◦ 분석 대상 가스 및 측정 위치

측정 대상 가스는 프로판 (C3), 혼합냉매 (MR), 혼합냉매 기체 (MRV), 천연가스 (NG) 등 4개이며 측정 위치는 그림과 같다. 측정 위치 선정 기준은 사이클상에서 측정 온도 범위 0~450℃에 속하는 스트림 구간중에서 운전 조건 파악이 중요하다고 판단되는 지점으로 결정했다. 실험 설비로부터 가스 분석기까지 가스 이송용 배관 작업의 용의성도 고려하였다. 프로판 (C3)는 단일 조성이기 때문에 성분 비율의 의미가 없지만 운전중 외부 요인으로 조성 비율 변화가 가능하므로 측정 대상에 포함시켰다.

가스 성분을 측정하려면 실험 설비 배관상에 있는 가스를 가스 분석기로 이송하는 배관이 필요하다. 가스 분석기 시료 주입부 입구 배관 직경은 1/16 인치이며, 실험 설비의 압력과 가스 분석기 사용 압력에 차이가 있기 때문에 가스 분석기 사용 압력에 맞추기 위해서 압력 강하용 레귤레이터 (regulator) 설치가 필요하다. 레귤레이터의 위치는 가능한 실험 설비에 가까운 지점, 가스 분석기에서 먼 지점에 설치해야 압력 강하로 인한 가스 유체의 흔들림으로 인한 신호 노이즈 발생을 최소화할 수 있다. LNG BSU 가스 측정 위치의 압력 범위는 60~70 bar이며 레귤레이터는 3.5 bar에 맞추고 가스 분석기의 사용 압력은 1.5~13 bar이다. 가스 분석기의 사용 압력은 대기압 보다 약간 높은 1.5 bar 정도가 가장 좋다.

가스 분석기는 2개 가스를 동시에 측정 가능하다. 시료 주입부를 추가하고 가스 분석기 원리에서 설명되는 컬럼 (column)과 검출기를 추가하면 가능하다. 본 장비에서는 2개 가스의 실시간 동시 측정까지는 불필요하고, 1회 측정에 약 10분 정도 소요되므로, 10분 간격으로 4개 가스를 측정하면 한 개의 가스를 40분마다 한번씩 분석할 수 있다. 2개 동시 측정 기능은 향후 필요시 추가할 수 있다.

가스 분석기 작동에 사용될 47 liter 용기의 초고순도 99.999% 산소 (H2), 공기 (zero air), 헬륨 (He)이 필요하다. 산소와 공기는 검출기에서 불꽃을 형성해서 시료를 태우기 위해 필요하고 헬륨은 시료 가스를 컬럼으로 이동시키기 위해서 필요하며 carrier gas라고 불린다. 또한 측정하고자 하는 샘플 가스에 대한 표준 가스가 필요하다. 먼저 표준 가스를 가지고 성분 비율을 측정하고, 이를 기준으로 같은 성분의 다른 성분 비율을 가진 샘플 가스를 측정해서 샘플 가스의 성분 비율을 결정한다. 측정 결과인 곡선의 각 피크 아래 면적은 성분 비율과 비례하는 원리를 기반으로, 상대적인 피크 면적 비율을 가지고 계산한다. 예를 들면, 성분 비율이 50%,

30%, 20%인 표준 가스의 각 성분 피크 아래 면적 비율이 5:3:2라고 가정하면, 샘플 가스 측정 결과 각 피크 아래 면적 비율이 4:4:2로 측정되면 그 성분비는 40%, 40%, 20%라고 계산된다.

LNG BSU의 사용 가스는 메탄 (CH4), 에탄 (C2H6), 프로판 (C3H8) 성분으로 이루어져 있기 때문에, 표준 가스는 같은 성분을 가지고 가스를 선택한다. 아래는 본 장비에서 사용된 표준 가스의 성분 비율이다.

- 메탄 (CH4) 46.951%
- 에탄 (C2H6) 34.072%
- 프로판 (C3H8) 13.115%

2.5 MPa (25 bar) at 35℃

가스 분석기는 주위 환경이나 가스 불순물에 대한 민감한 장치이므로 수분이나 산소가 검출기에서 시료를 태우기 위한 가스나 carrier gas에 미량이라도 섞이면 정확하지 못한 분석 결과를 보이므로, 이를 방지하기 위해 가스 분석기와 가스 용기 사이에 아래와 같은 수분 및 산소 제거용 전처리 장치를 설치한다.

- moisture trap
- oxygen trap

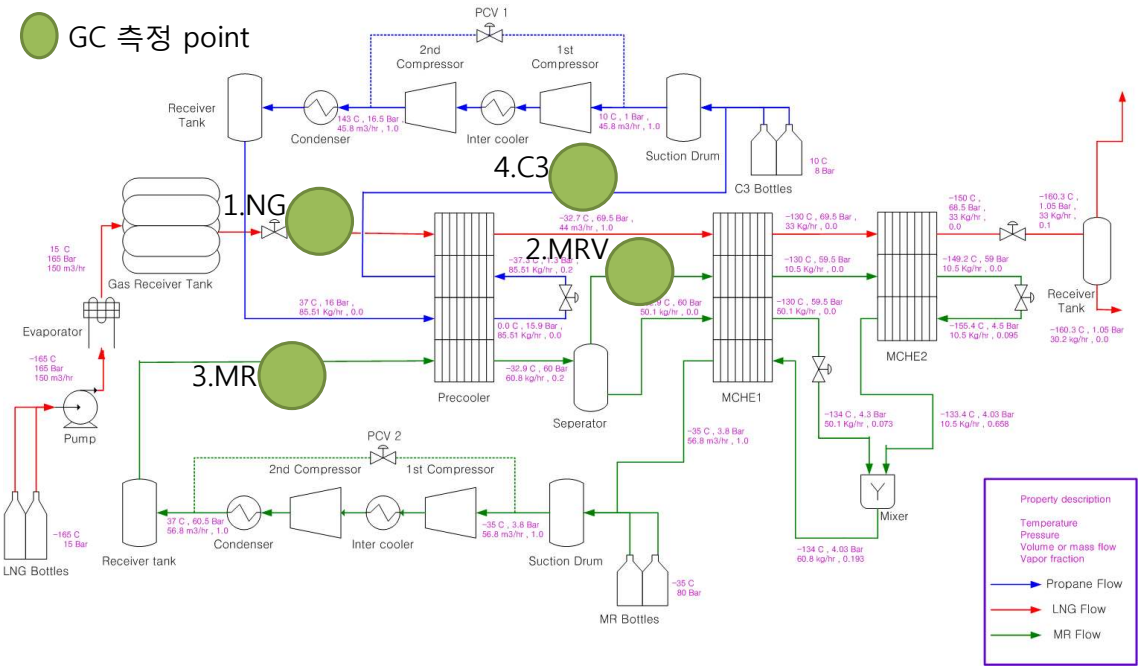



그림 2.2.109. 분석 대상 가스 측정 위치

| | 1. 천연가스 (NG) | 2. 혼합냉매 기체 (MRV) | 3. 혼합냉매 (MR) | 4. 프로판 (C3) |
|---|---|---|---|---|
| 설계 온도 | 15℃ | -32.9℃ | 37℃ | 10℃ |
| 설계 압력 | 70bar | 60bar | 60.5bar | 1bar |
| 설계 유량 | 44$m^3$/h | 12$m^3$/h | 56.8$m^3$/h | 45.8$m^3$/h |
| 설계 성분 비율 | $CH_4$ 88.1%<br>$C_2H_6$ 5.0%<br>$C_3H_8$ 4.9%<br>$C_4H_{10}$ 1.8%<br>$C_5H_{12}$ 0.1%<br>$N_2$ 0.1% | $CH_4$ 67.2%<br>$C_2H_6$ 16.3%<br>$C_3H_8$ 13.9%<br>$N_2$ 2.6% | $CH_4$ 46.9%<br>$C_2H_6$ 33.9%<br>$C_3H_8$ 13.3%<br>$N_2$ 5.9% | $C_3H_8$ 100% |

◦ 가스 분석기 원리 및 구성

복합 성분의 시료가 이동상 (mobile phase)에 의해 이동하면서 컬럼 (column)의 고정상 (stationary phase)과의 상호 물리 화학적인 작용에 의하여 각각의 단일 성분으로 분리되는 현상을 이용하여 분석하는 장치로서, 혼합물을 분리하기 위해서는 최소한 두 상 (정지상과 고정상)이 있어야 하며, 이 두 상 (phase)은 서로 섞이지 않아야 하고 각기 다른 특성을 가져야 한다.

시료 주입부는 분석하고자 하는 시료를 주입하여 기화시킨 후 분리관 컬럼으로 보내는 역할을 한다. 시료의 종류가 많거나 여러번 자주 주입을 할 경우에는 auto sampler를 사용하여 주입 작업을 자동화할 수 있다. 본 장비에서는 시료의 종류가 많지 않으므로 수동으로 주입하였다.

분리관 컬럼은 시료 혼합물이 단일 성분으로 분리되어지는 곳으로 가스 분석기의 가장 중요한 부분이다. 컬럼은 그 특성이 민감하고 제조 방법이 까다롭기 때문에 현재 국산 제품이 없으며 전량 외국 제품을 수입하여 사용하며 재료비 대비 비교적 고가의 가격을 지불한다. 본 장비에서는 모세관 (capillary column) 형태의 컬럼을 사용하며 아래와 같은 특성을 가진다.

- 얇은 액체상 막을 관의 내벽에 입힌 모세관
- 긴 분리관 사용 가능 (압력 강하가 작기 때문)
- 시료 수용 능력이 적고, 분해능 우수 (복잡한 혼합물 분석에 널리 사용)

검출기의 종류에는 분석하고자 하는 시료의 종류와 농도 등의 특성에 따라 여러

가지의 모델을 사용한다.

- Thermal Conductivity Detector (TCD)
- Flame Ionization Detector (FID)
- Electron Capture Detector (ECD)
- Flame Thermoionic Detector (FTD)
- Flame Photometry Detector (FPD)
- Helium Ionization Detector (HID)

본 장비에서는 불꽃 이온화 검출기 (Flame Ionization Detector, FID)를 사용한다. FID는 컬럼에서 나오는 시료가 수소와 공기에 의해 형성된 불꽃에 의해 태워져 생성된 전하를 띤 이온의 양을 측정한다. 전하를 띤 이온의 농도에 비례하여 전류의 흐름에 변화가 생긴다.

시료를 이동시키는 운반 기체 (carrier gas)의 조건으로 아래를 들 수 있으며, 주로 수소, 헬륨, 질소, 아르곤이 사용되며 본 장비에서는 헬륨을 사용한다.

- 시료 분자나 고정상에 대해서 화학적 비활성
- 분리관 내에서 시료 분자의 확산을 최소로 줄일 수 있어야 함
- 사용되는 검출기의 종류에 적합
- 순수 기체, 건조 기체 (순도 99.995% 이상)

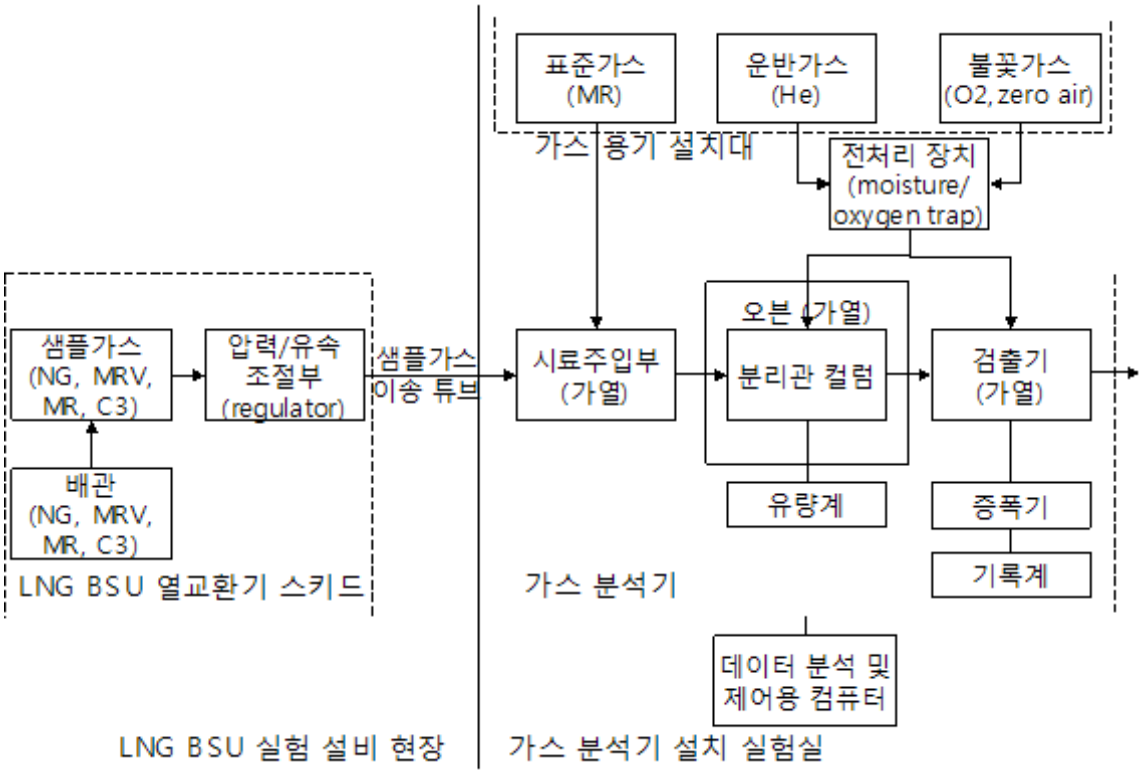



그림 2.2.110. 가스 분석 장비 구성

가스 분석기의 성분 비율 분석 정밀도는 수소점이하 2자리의 % 단위이고 재현성 오차 범위는 1% 이내이다. 즉, 같은 가스를 측정했을 때의 오차 범위가 1% 이내이다. 컬럼 오븐의 온도 범위는 (주변온도+ 4℃)~450℃이며 온도 프로그래밍으로 가열하는 속도는 0.1℃/min~100℃/min이다. 시료 주입부, 컬럼 오븐, 검출기의 온도 범위는 200℃~250℃이다.

◦ 가스 분석기 및 샘플 가스 이송용 튜브 설치

가스 분석기 및 가스 용기 지지대와 분석 대상 가스 측정 위치에 의거하여 실험 설비로부터 가스 분석기까지의 샘플 가스 이송용 튜브를 설치하였다. 상세한 사항은 그림과 함께 설명한다.



그림 2.2.111. 가스분석기 전면

가스 분석기 전면에 컬럼 오븐 도어가 있고 윗면에 검출부가 있다. 전면 오른쪽에 제어기 버튼이 있지만 최근에는 소프트웨어인 제어 프로그램을 주로 사용하므로 많이 사용하지는 않는다.

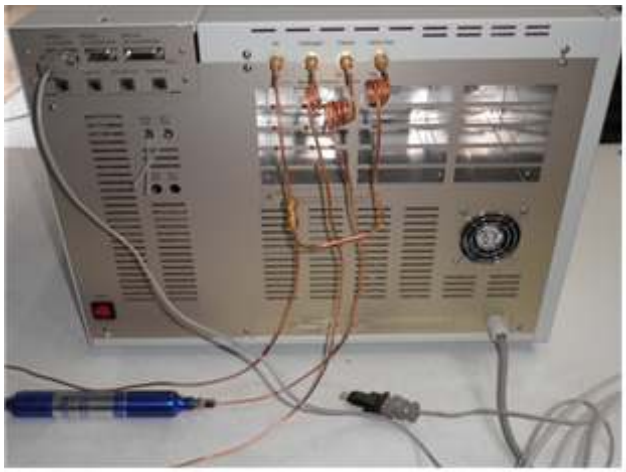


그림 2.2.112. 가스분석기 후면

가스 분석기 후면 상단에 시료 태우기용 불꽃 형성 가스 2개, carrier gas 1개, 표준 가스 1개 등 총 4개의 가스 주입 동관 및 주입구가 있다. 제어 프로그램과의 데이터 통신을 위한 RS232 케이블과 그 끝에 USB 변환기가 부착되어 있다.

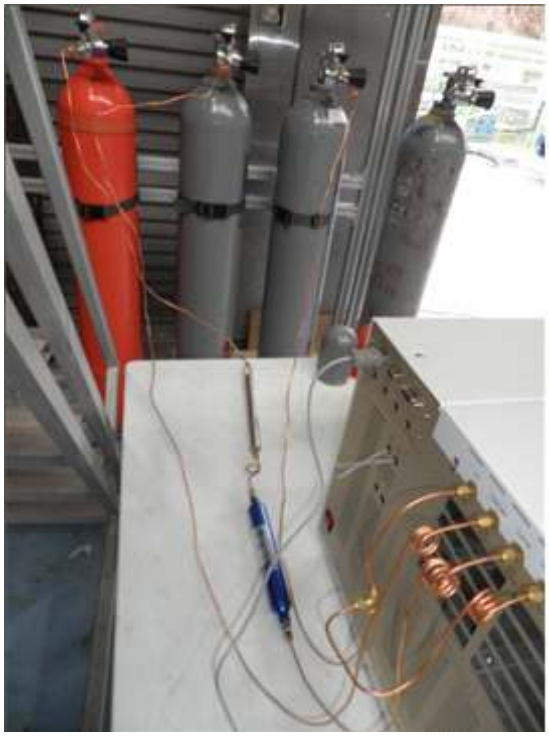


그림 2.2.113. 시료 태우기용 불꽃 형성 가스 및 carrier gas 용기 4개 및 지지대

고압가스 안전을 위한 용기 지지대를 설치했으며 수분 및 산소 제거용 전처리 장치인 moisture trap과 oxygen trap 등 2개가 시리얼로 연결되어 있다.




그림 2.2.114. 혼합냉매 표준 가스 용기 및 성분 비율

혼합냉매(MR) 표준 가스 용기에 혼합 가스 성분 비율이 명시되어 있다.



그림 2.2.115. 샘플 가스 이송용 Teflon 튜브 및 밸브

샘플 가스 이송용 튜브에 실험 설비로부터의 샘플 가스를 구분하기 위한 번호가 적혀있다.

1: 천연가스 (NG)
2: 혼합냉매 기체 (MRV)
3: 혼합냉매 (MR)
4: 프로판 (C3)



그림 2.2.116. 샘플 가스 압력 강하 레귤레이터

실험 설비쪽에 설치된 샘플 가스 압력 강하용 레귤레이터는 2차 압력이 3.5 bar로 설정되어 있으며, 왼쪽부터 오른쪽으로 아래와 같은 순서로 배열되어 있다.

1: 천연가스 (NG)
2: 혼합냉매 기체 (MRV)
3: 혼합냉매 (MR)

4. 프로판 (C3)



그림 2.2.117. 혼합냉매(MR) 샘플 가스의 배관 추출부

혼합냉매 (MR) 샘플 가스 추출부이다. 본 실험에서 가장 많이 측정하는 것이 혼합냉매 (MR)이며 표준 가스도 혼합냉매이므로 중요한 부분이다. 나머지 C3, MRV, NG 배관 추출부는 생략한다.




그림 2.2.118. 가스 분석기 제어 프로그램

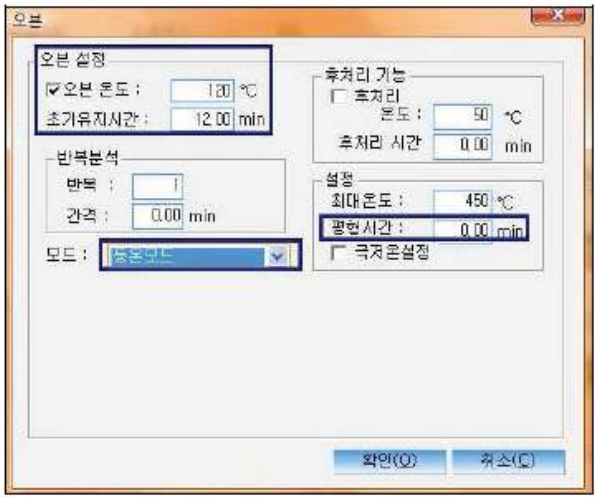



그림 2.2.119 오븐 제어 설정




그림 2.2.120. 컬럼 주입구 제어 설정

가스 분석기 제어 프로그램으로 컬럼 오븐, 주입구, 검출기의 운전 온도, 압력, 유량을 설정해준다. 여기에 설정되어있는 모든 운전 조건을 만족시켜야만 가스 분석기가 ready 상태가 되어 그때부터 측정 및 분석할 수 있게 된다. 이밖에도 측정 데이터 분석 툴이 있으며 성분 비율 계산시 사용된다. 데이터 관리 기능, 리포트 생성 기능 등도 있다.

◦ 표준 가스 재현성 테스트 및 샘플 가스 분석 테스트

가스 분석기를 사용하여 가스 성분 비율을 측정하려면, 측정하려는 가스와 성분이 같지만 성분 비율은 다른 표준 가스를 대상으로 성분 비율을 먼저 측정한다. 이 표준 가스의 성분 비율을 기준으로해서 성분은 같지만 성분 비율은 다른 실험 장치로부터의 샘플 가스의 성분 비율 측정이 가능해진다.



그림 2.2.121. 혼합냉매(MR) 표준 가스 분석 테스트 결과

분석 정밀도는 오차 범위 1%이며 3회에 걸친 재현 테스트를 수행한 결과 오차 범위 1% 이내에 측정되었다. 이는 LNG BSU 시운전시 가스 성분 분석용 표준 가스로 사용되어도 좋다는 의미이다.

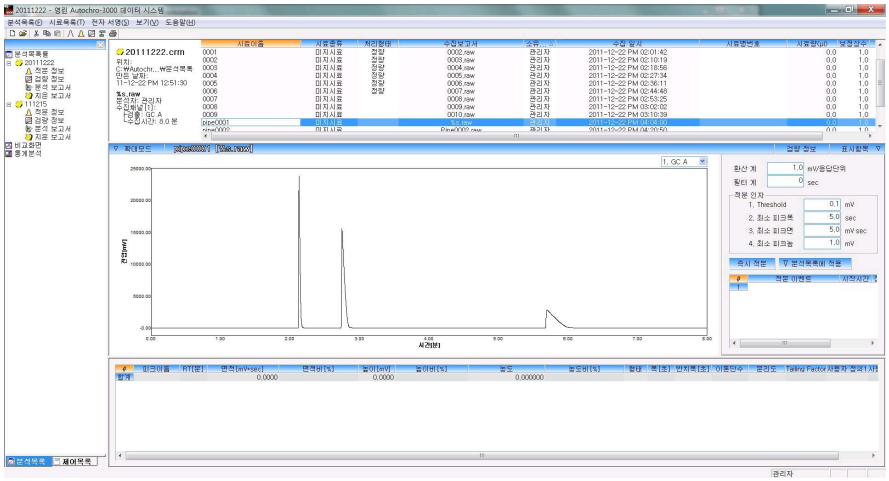


그림 2.2.122. 혼합냉매(MR) 샘플 가스 분석 테스트 결과

표준 가스 성분을 기준으로 정한 다음에는, 실제 측정 대상인 LNG BSU 열교환기 스키드 배관 내부에 흐르는 샘플 가스를 분석하였다. 재현성 테스트를 위해 3회 연속 측정하였으며 표준 가스와 유사한 피크가 측정되었으며 성분 비율도 오차 범위 1% 이내에 든다. 표준 가스와 피크 및 성분 비율이 거의 유사한 이유는 같은 혼합냉매(MR)를 사용하였기 때문이며, 오차 범위 2%내의 차이를 보일 수 있으나 이는 최초에 혼합냉매(MR)를 제조할 때부터 소수점 이하 3자리 %나 더 정확한 수준의 혼합 비율을 맞추기란 사실상 어렵기 때문이다. 본 장비를 사용해서 순수하게 1회 측정에 드는 소요 시간은 8분이지만, 데이터 저장 및 샘플 가스 이송 튜브 변경

등 다음 가스 측정 준비에 필요한 시간을 고려하면 최소한 10분이 소요된다. 총 4종류의 가스를 측정하므로 한 종류의 가스를 측정하려면 최소한 40분 간격으로 측정이 가능하다. 즉, 여러 종류 가스의 실시간 측정 및 분석은 사실상 어렵지만, 본 실험에서는 이 정도의 기능만으로도 충분하다.

◦ GC 측정 결과

실험을 진행하는 동안 이산적으로 혼합냉매의 GC 측정을 시도하고 몰분율로 나타내는데, 예냉의 온도 변화에 따라서 MRL과 MRV의 조성이 달라지게 되고, 또 그 조성변화에 따라서 후단의 LNG 온도 변화에 영향을 미치게 된다. GC 측정 포인트별로 예냉 및 LNG 온도를 나타내보면 아래의 표와 같다.

표 2.2.21 MRL 조성과 냉매 및 천연가스 온도 비교

| 시간 2014.11.4 | 혼합냉매 액상(MRL) 조성 (mole %) | | | | 예냉온도 (℃) | 천연가스 최종온도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | C1 | C2 | C3 | N2 | | |
| 17:09 | 11.9 | 46.5 | 37.5 | 4.1 | -22.1 | -115.5 |
| 17:13 | 11.6 | 46.4 | 37.8 | 4.2 | -21.6 | -116.2 |
| 19:39 | 8.4 | 40.9 | 46.6 | 4.1 | -23.3 | -139.9 |
| 19:43 | 7.2 | 35.5 | 55.1 | 4.2 | -23.5 | -140.2 |

시간이 지나면서 예냉온도가 점점 낮아지고 천연가스의 온도 역시 점차 내려가게 된다. MRL은 혼합냉매가 기액이 분리된 후 액체 상태의 혼합냉매이기 때문에 예냉온도가 낮을수록 프로판과 같이 무거운 성분이 많아짐을 알 수 있다.

나. 프로판 냉동사이클 성능 분석

액화공정의 예냉 과정으로서 프로판 냉동사이클은 플랜트의 기동방법, 물질평형과 직접적으로 관계되어 있고 예냉 결과가 본냉 사이클에 큰 영향을 주기 때문에 중요하다. 이에 LNG플랜트 C3MR공정의 프로판 냉동사이클 성적계수에 대해 압축기의 등엔트로피 효율과 과열도 등 운전조건의 가정을 통한 해석결과에서 A Mortazavi et al.은 ASPEN Plus 프로그램 사용에 의해서 2.645로 계산하였고3) Abdullah Alabdulkarem et al.은 동일조건에서 앞의 결과 외에 ASPEN HYSYS에 의한 2.648을 제시하였다.4) 단, 상기 두 논문에서는 공정설계에서 사이클 전 과정에 대한 상

세한 열역학적 조건이 명시되어 있지 않아 검증에 어려움이 있고 실험결과와도 비교가 되어있지 않다. 이에 시간당 20kg급 규모의 LNG액화플랜트 실험설비를 구축해서 프로판 냉동사이클 성능실험을 수행한 바 그 용량이 실 플랜트에 비해 아주 작지만 냉동사이클 특징과 성적계수는 냉매의 절대적 유량에 따른 큰 변화는 없으므로 향후 이 분야에 관심을 지니는 학자나 기업에게 타당한 자료를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

a. 소형의 LNG 액화공정 시험설비

그림 2.2.123에는 실험에 사용된 시간당 20kg급 LNG액화플랜트에 대한 PFD(Process Flow Diagram)을 도시하였다. LNG는 대기압 조건에서 약 -162℃ 근방에서 액화되기 때문에 극저온 냉동을 위해서 프로판 냉매와 MR 냉매를 사용하는 C3MR공정의 2원 냉동 시스템을 적용하였다. 실험을 위한 냉매충진과 가스공급은 NG(Natural Gas, 천연가스)의 경우 LNG를 용기에 받아와서 펌프에서 가압한 후에 기화해서 고압으로 저장한 다음 감압해 공급되어 지고 프로판과 MR 냉매도 유사하게 저장용기로부터 질량유량계를 통해 정확히 필요한 양을 충진한다. NG와는 달리 프로판과 MR 냉매의 경우 폐회로 상에서 순환되고 각각의 냉매는 압축기, 응축기, 열교환기와 팽창밸브를 순차적으로 지나면서 냉동사이클을 형성한다.

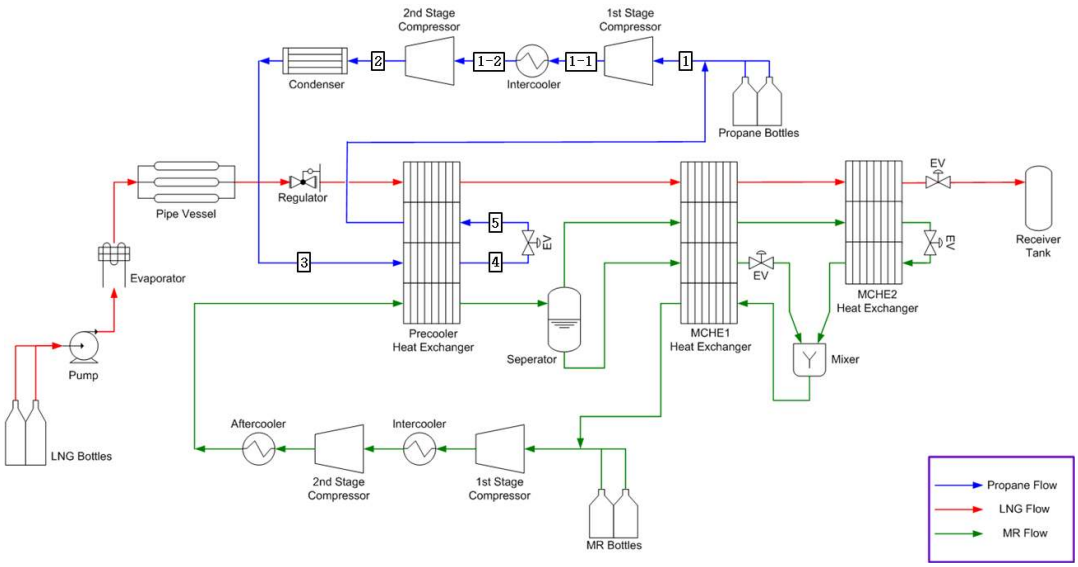



그림 2.2.123. 20kg/h급 LNG BSU 공정 흐름도

그 후 프로판 사이클에 해당하는 예냉 공정의 열교환기 Precooler를 통해서 NG와 MR이 -35℃ 근방까지 일차적으로 냉각되고 MR 사이클에 해당하는 본냉 공정 열교환기 MCHE1(Main Cryogenic Heat Exchanger, 주 극저온 열교환기)과 MCHE2에 의해서 NG는 -130℃와 -162℃로 냉각되어 LNG를 얻게 된다.

b. LNG 액화공정 성능 실험

◦ 실험조건

프로판 냉매의 용기로부터 충진은 압축기 설계조건에 맞게 약 2bar(a)이고 MR의 경우는 4.8bar(a)이다. 그러나 냉매 충진의 완료 후에는 각각의 냉동사이클에 의해 압축기 1단의 압력이 결정되는 바 정확한 제어는 쉽지 않다. 온도의 경우도 설계조건에 의해 프로판은 약 10℃, MR은 -35℃ 근방이 적합하나 외기온도의 영향을 무시할 수 없다. 냉매와 달리 NG의 경우 감압기를 통해 사용압력의 조절은 쉬우나 저장된 용기에서의 소진에 의한 공급압력이 감소함에 따라서 감압정도와 외기온도에 따라 Precooler 입구온도는 달라진다. 그림2.2.124에는 실험에 사용되는 유량계, 압력계 그리고 온도계 등을 상세히 명기하였고 표1에는 액화공정의 운전범위를, 표 2.2.18에는 냉매 유량변화에 따른 세 종류의 실험조건을 상세히 나타내었다.

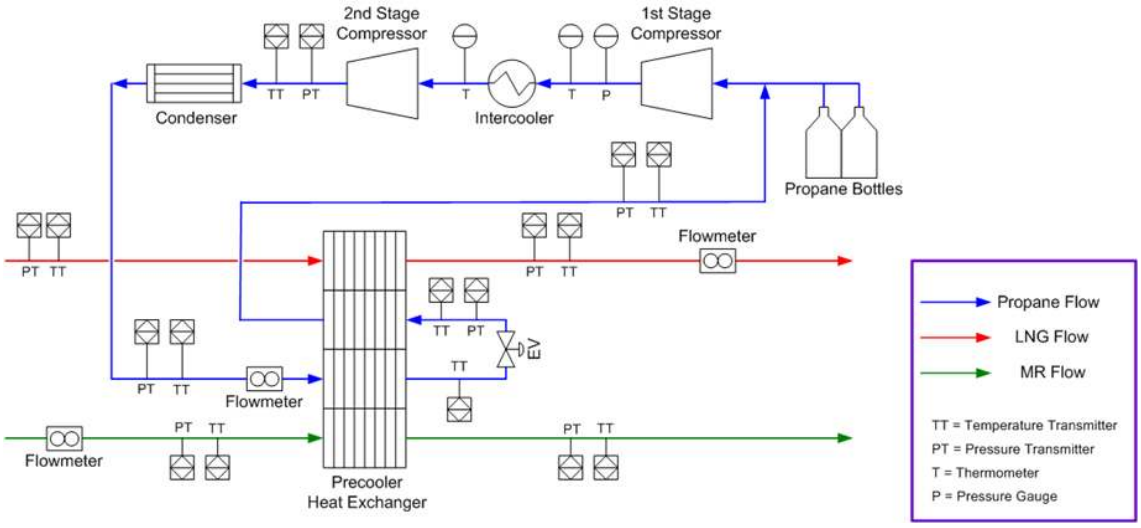



그림 2.2.124. C3MR 공정 BSU의 계기 설치도

표 2.2.22 LNG 액화 공정에서 계기 측정 범위

| 종류 | 공정 | 유량(kg/hr) | 압력(bar(a)) | 온도(℃) |
|---|---|---|---|---|
| 프로판 | 프로판 압축기 1단 입구 | 80~100 | 2~2.5 | −10~2 |
| MR | MR 압축기 1단 입구 | 50~90 | 4~6 | −46~−36 |
| NG | Precooler 입구 | 18~22 | 22~25 | −11~10 |

표 2.2.23 실험에서 LNG, MR, C3 유량 변화

| | 프로판 유량, | MR 유량, | NG 유량, | 비교 조건 |
|---|---|---|---|---|

| | $Q_p$ (kg/hr) | $Q_{mr}$ (kg/hr) | $Q_{ng}$ (kg/hr) | |
|---|---|---|---|---|
| CASE1 | 99.27 | 57.12 | 21.08 | $Q_p > Q_{mr} + Q_{ng}$ |
| CASE2 | 96.98 | 80.34 | 19.51 | $Q_p \simeq Q_{mr} + Q_{ng}$ |
| CASE3 | 83.44 | 87.28 | 19.55 | $Q_p < Q_{mr} + Q_{ng}$ |

◦ 열역학적 물성계산을 위한 도구

실험에서 얻은 압력과 온도의 결과로부터 엔탈피와 건도 등을 계산하기 위해서 상용 프로그램 ASPEN HYSYS을 사용했으며 적용된 열역학적 모델은 탄화수소계 냉매의 물성 계산에 비교적 정확하다고 알려진 식(1)의 Peng-Robinson 상태방정식이다. 프로판 냉매의 경우 단일물질이기 때문에 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 물성 데이터를 프로그램에서 직접 불러올 수 있지만 혼합냉매의 경우 사이클이 안정화 될 때까지 냉매조성비가 계속 변화하게 되고 실험에서 계측되는 압력과 온도 등의 물성과 냉매조성비의 타당성이 식(1)이 적용된 프로그램 알고리즘에 의해서 검증되게 된다.

$$P = \frac{RT}{(v-b)} - \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)}$$

(1)

$where$

$$a = 0.45724\frac{R^2 T_c^2}{P_c}\left\{1 + k\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^{0.5}\right]\right\}^2$$

$$b = 0.07780\frac{RT_c}{P_c}$$

$$k = 0.37464 + 1.5422\omega - 0.26922\omega^2$$

$P$ = Pressure
$T$ = Absolute temperature
$v$ = Molar volume
$R$ = Ideal gas constant
$P_c$ = Critical pressure
$T_c$ = Critical temperature
$\omega$ = Acentric factor

◦ 실험 불확실도

본 실험에서 계측되는 유량, 압력 그리고 온도 등은 제어실로 PLC(Programmable Logic Controller)에 의해 실시간으로 데이터 전송이 이루어진

다. 그리고 본 논문에서 사용된 데이터는 모든 사이클이 안정화상태(Steady State)가 이루어져서 더 이상 물성에 변화가 없는 시점에서 선택이 되어졌기에 평균을 한 것이 아니라 특정 시점에서의 데이터이다. 또한 실험 데이터의 보정 또한 하지 않았기에 이 경우 불확실도는 계측장비의 오차범위 내에 있다고 판단된다. 유량의 경우 Emerson사의 Coriolis Mass Flow Meters, 압력은 Autrol 그리고 온도는 Wise 제품이 사용되었고 실험 조건에서 모두 오차범위 1% 내이다. 다만 프로판 압축기 1단과 2단 사이에 있는 Intercooler의 전후에서는 트랜스미터가 없는 게이지의 사용으로 사람이 직접 눈으로 보고 수기로 적는 과정이 이루어져서 오차범위를 명확히 제시하기 힘들지만 게이지의 눈금자 범위를 통해 압력은 0.1bar, 온도는 2도 내에 있다고 단정할 수 있다. 그 외에 물성을 통한 엔탈피는 상용 프로그램의 데이터베이스 혹은 알고리즘에 의해 수학적 계산이 되기 때문에 오차가 없다고 할 수 있다.

◦ 실험결과

냉매의 유량변화에 의한 세 경우의 실험결과를 표3에 상세히 정리하였다. 프로판 냉매의 경우 압축 후 팽창하기 전까지 압력강하는 없으나 Precooler 열교환기를 지나 냉동사이클의 한 주기를 순환하면서 약간의 압력강하를 보이고 있다. 또한 NG, MR의 경우도 Precooler 열교환기 전후에서 유사한 특성이 나타나는 바 0.3bar내의 압력강하는 플레이트-핀 타입 Precooler 열교환기에 의해 발생되는 것으로 판단된다.

표 2.2.24. 3가지 조건에서의 실험 결과

| | | CASE1 | | CASE2 | | CASE3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 압력 bar(a) | 온도 (℃) | 압력 bar(a) | 온도 (℃) | 압력 bar(a) | 온도 (℃) |
| 프로판 | 압축기 1단 전 | 2.3 | −8.2 | 2.0 | 1.5 | 2.1 | −7.3 |
| | 압축기 1단 후 | 4.4 | 58.0 | 4.2 | 60 | 4.1 | 58.5 |
| | 압축기 2단 전 | 4.4 | 12.5 | 4.2 | 13.5 | 4.1 | 12.4 |
| | 압축기 2단 후 | 19.3 | 62.5 | 19.1 | 60.7 | 18.5 | 62.7 |
| | 응축기 후 | 19.3 | 27.0 | 19.1 | 25.9 | 18.5 | 27.5 |
| | 팽창밸브 전 | 19.3 | −15.5 | 19.1 | −13.7 | 18.5 | −15.2 |
| | 팽창밸브 후 | 2.5 | −37.5 | 2.1 | −37.2 | 2.3 | −34.3 |
| MR | Precooler 전 | 57.3 | 18.1 | 58.6 | 19.2 | 61.3 | 16.6 |
| | Precooler 후 | 57.1 | −30 | 58.3 | −26.4 | 60.9 | −25.8 |
| NG | Precooler 전 | 24.1 | −10.2 | 24.0 | 9.1 | 22.8 | 1.4 |
| | Precooler 후 | 23.8 | −27.4 | 23.8 | −25.8 | 22.6 | −24.5 |

c. 프로판 냉동사이클 특성

◦ 냉동선도

압력과 온도의 실험결과를 바탕으로 엔탈피를 계산해서 그림4에 압력-엔탈피 선

도를 도시하였다. 선도에 표시되어진 번호는 공정흐름도의 과정과 동일하다. 비교된 세 경우에서 큰 차이점을 보이지는 않으나 공통적으로 압축기 입구에서 과열도가 작음을 알 수 있다. 일반적으로 압축기의 경우 기계적 내구성과 파손방지 등의 안정적 운전을 위해서 어느 정도의 과열도 유지는 필요하므로 Case2의 경우가 압축기 입구의 과열도가 적합한 경우라 할 수 있다. 또한 프로판 냉동사이클의 각 과정별 엔탈피 변화를 비교한 결과, Case2는 다른 경우에 비해서 압축과정에서의 소요에너지는 적으면서 증발열은 크게 나타났다.

◦ 열교환기 성능

프로판 냉동사이클에서 프로판 냉매의 증발이 일어나는 Precooler 열교환기는 MR과 NG의 온도를 하강시키는 냉각효과를 한다. 따라서 프로판 사이클의 냉동성능은 상호 열전달을 하는 MR과 NG의 열역학적 상태와 열교환기의 성능에 의해서 크게 영향을 받는다고 할 수 있다. 그림2.2.125은 프로판 Cold Stream이 3개의 Hot Stream에 열을 흡수하는 비율을 나타낸 것으로서 열전달 과정에서 외기에의 손실이 공통적으로 약 10%정도이다. MR, NG를 모두 고려했을 때는 Case2가 가장 높은 냉각효과를 보이고 Case1의 경우 MR에서 열을 많이 흡수하는 반면에 Case2는 NG의 온도를 크게 떨어뜨리는 특성이 나타난다.

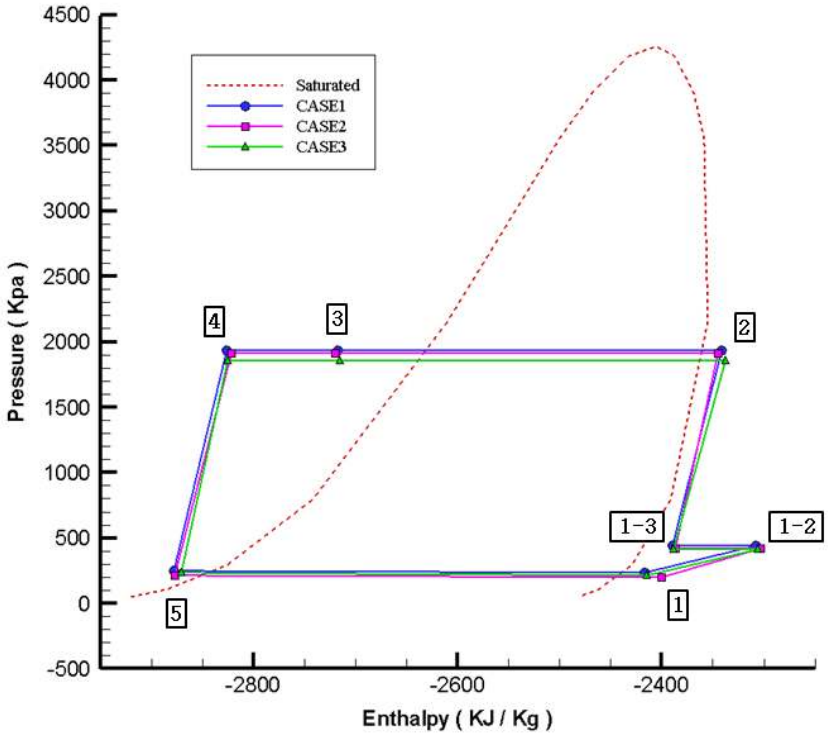



그림 2.2.125. 3가지 케이스에 대한 C3MR 압력-엔탈피 선도

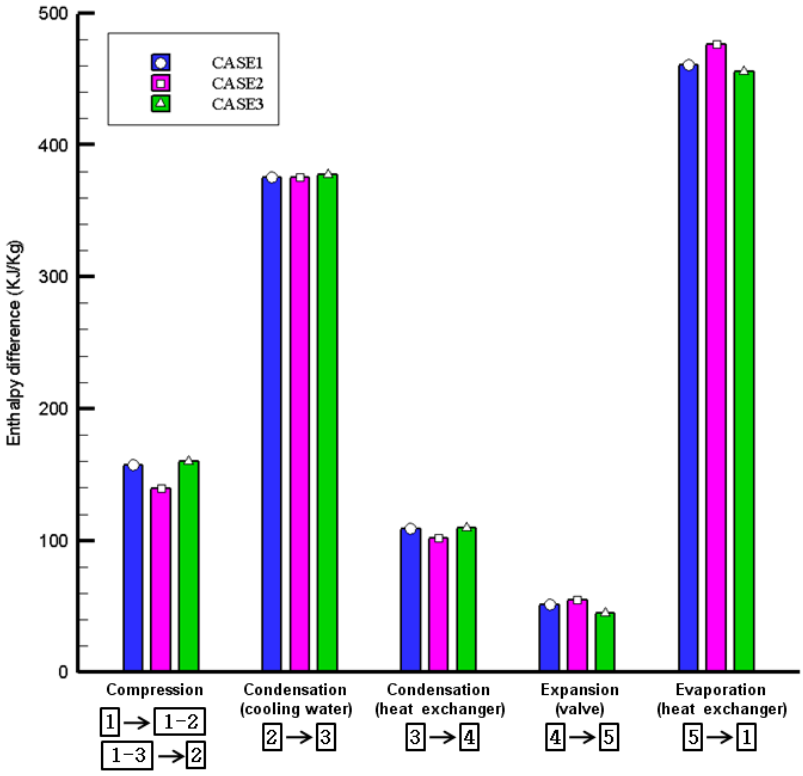



그림 2.2.126. 3가지 케이스에 대한 압력-엔탈피 편차

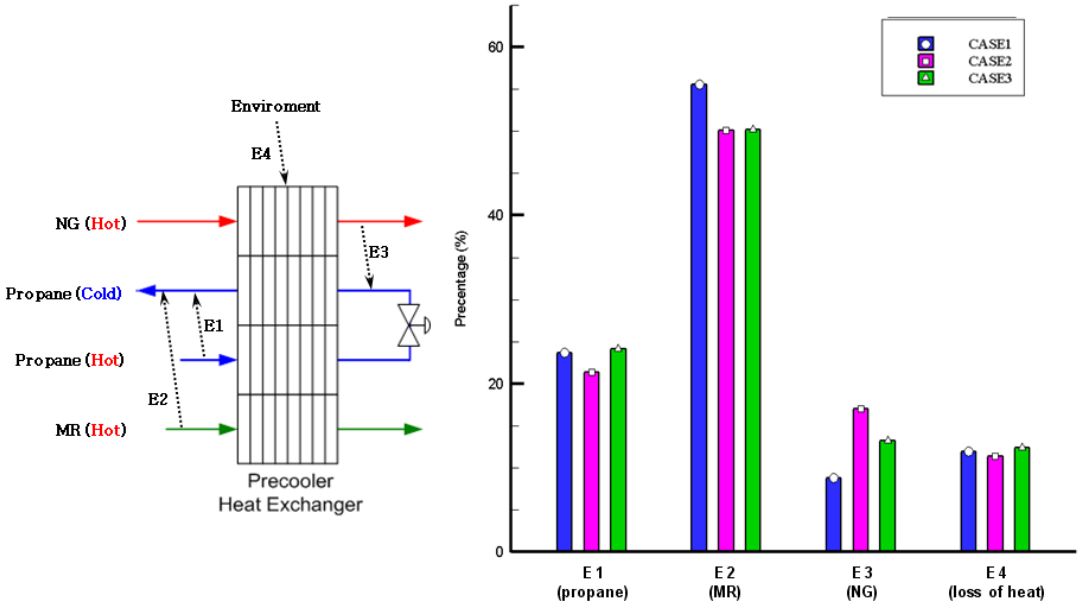



그림 2.2.127. 예냉용 열교환기 성능

◦ 냉동사이클의 성적계수

냉동사이클에서 성적계수(COP, Coefficient of Performance)는 통상적으로 압축기에 공급된 소요에너지에 대한 증발과정에서의 흡수한 열에너지의 비로서 정의된다. 그러나 본 실험에서 적용된 냉동사이클의 경우 상태3에서 상태4로의 과냉각과정이 존재하고 이는 실제 Propane(Cold) 스트림이 Propane(Hot) 스트림으로 부터 흡수하는 열에너지이다. 따라서 프로판 냉매를 통한 MR, NG의 냉각능력은 Precooler 열교환기가 외기로부터 완전 단열이 되어 열손실이 없다는 이상적 가정에서 프로판 냉매의 증발열에서 과냉각과정에서 전달된 열에너지를 제외한 것이 된다. 즉 프로판 냉동사이클에서 증발열을 기준으로 한 성적계수[A]는 표4에, 순환하는 프로판 냉매에 의한 MR과 NG의 냉각능력을 기준으로는 성적계수[B]로 구분해서 표5에 정리하였다. 성적계수[A]와 [B]의 절대적 크기는 다르지만 CASE1,2,3 세 조건을 비교했을 때 상대적 변화 정도는 유사해서 둘의 큰 의미차이는 둘 수 없으며 LNG액화플랜트 분야에서 성적계수[B]를 기반으로 비교하는 것을 선호하므로 이 경우에 CASE2는 CASE1에 비해서 16.952% 증가되었고 CASE3과의 비교에서는 19.448% 증가되어 CASE2의 성적계수[B]는 2.684로서 다른 두 운전조건에 비해서 에너지효율이 월등히 우수하다는 것을 알 수 있다.

표 2.2.25 프로판 냉동 사이클의 COP[A]

(Calculated by Evaporation Heat of Propane / Required Work of Compressor)

| | 압축기 소요에너지 (kJ/kg) | 증발열 (kJ/kg) | 성적계수[A] (증발열 / 압축기 소요에너지 ) |
|---|---|---|---|
| CASE1 | 157.647 | 460.628 | 2.922 |
| CASE2 | 139.607 | 476.562 | 3.414 |
| CASE3 | 159.856 | 455.603 | 2.850 |

표 2.2.26 프로판 냉동 사이클의 COP[B]

(Calculated by Cooling Capacity of Propane / Required Work of Compressor)

| | 압축기 소요에너지 (kJ/kg) | 냉각능력 (kJ/kg) | 성적계수[B] (냉각능력 / 압축기 소요에너지) |
|---|---|---|---|
| CASE1 | 157.647 | 351.389 | 2.229 |
| CASE2 | 139.607 | 374.669 | 2.684 |
| CASE3 | 159.856 | 345.566 | 2.162 |

◦ 결 론

시간당 20kg급 소형의 LNG액화를 위한 공정에서 예냉의 역할을 하는 프로판 냉동사이클의 특성을 냉매유량 변화의 관점에서 실험적으로 탐구하였으며 그 결과 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- 프로판 냉매의 유량이 Hot Stream의 NG와 MR의 합보다도 많을 경우(CASE1) MR의 온도를 크게 하강시켜 본냉 사이클을 위한 예냉 사이클의 역할 수행에는 문

제가 없으나 에너지효율이 낮고 프로판 압축기 입구에서 과열도가 작아져 장시간 운전시에 압축기의 기계적 손상을 일으킬 우려가 존재한다.

- MR과 NG의 유량이 프로판 보다 많을 경우(CASE3)에는 MR의 온도가 -25.8℃ 밖에 도달하지 못해서 예냉의 역할을 완전히 수행할 수 없다고 볼 수 있으며 이 경우 에너지효율이 가장 낮다는 단점 외에도 본냉 사이클을 정상적으로 운전할 수 없게 된다.

- 프로판 유량이 NG와 MR의 합과 비슷할 경우(CASE2) 프로판 압축기 입구에서 적절한 과열도를 유지하고 NG, MR의 온도도 낮아서 예냉 사이클로서 전혀 문제가 없으며 또한 에너지효율 관점에서 성적계수[B]는 2.684로서 가장 높게 나타난다.

다. 혼합냉매 냉동사이클 성능 분석

a. 냉매 성분비

그림 2.2.129에는 LNG 액화공정의 PFD를 도시하였고, 사용되는 냉매는 프로판, 혼합냉매(MR), MRV, MRL 4종류로 세분화 될 수 있다. 단 MRV, MRL의 경우 기액분리기 입구에서 MR의 열역학적 상태에 의해 결정되어지는 종속변수이다. 프로판 냉매는 순도 99.9%이고 혼합냉매의 성분비는 한국가스안전공사(KGS)에서 분석한 결과를 그림 2.2.130에 MR성분만을 고등기술연구원(IAE)에서 직접 분석한 후 MRV, MRL은 해석을 통해 얻어낸 결과를 그림2.2.130에 상세히 나타내었다. 두 기관의 분석결과를 비교했을 때 MR, MRV의 성분비는 비슷하나 MRL은 다소 차이를 보이고 있다. 다만 KGS의 분석결과는 이론적으로 존재할 수 없는 상태이기에 이후 열교환기 성능의 비교를 위해서 그림2.2.129의 결과를 따르기로 한다.

| | Methane | Ethane | Propane | Nitrogen |
|---|---|---|---|---|
| MR(COLD) - 15:05 | 0.5400 | 0.2946 | 0.0809 | 0.0845 |
| MRV(HOT) - 14:30 | 0.6587 | 0.2045 | 0.0310 | 0.1058 |
| MRL(HOT) - 15:43 | 0.1537 | 0.5185 | 0.2539 | 0.0739 |

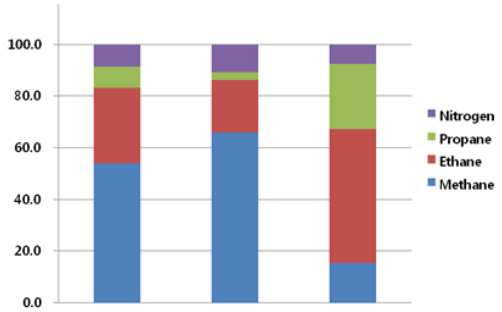



그림 2.2.129. Refrigerant mole fraction by KGS

| | Methane | Ethane | Propane | Nitrogen |
|---|---|---|---|---|
| MR(COLD) - 15:05 | 0.539970 | 0.294620 | 0.080945 | 0.084465 |
| MRV(HOT) | 0.624060 | 0.233084 | 0.036085 | 0.106771 |
| MRL(HOT) | 0.299321 | 0.470723 | 0.209325 | 0.020631 |

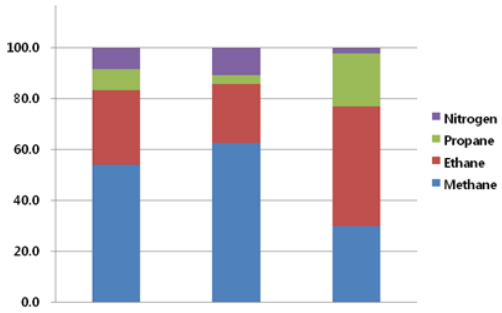



그림 2.2.130. Refrigerant mole fraction by IAE

b. Feed gas 성분비

Feed gas로 사용되는 NG는 200BarG.로 압축된 CNG를 압력조정기에 의해서 감압해 약 28.5BarG.로 공급되어졌고 상세한 성분비는 표1에 나타내었다. 원래 설계한 성분비와 비교했을 때 에탄은 약 2% 증가하고 반대로 프로판과 메탄은 1%내에서 감소했으나 성분비 변화에 따른 엔탈피 변화의 폭은 0.5%내에 있기에 무시할만한 수준이다.

표 2.2.27 천연가스의 몰 분율

| | 설계안 | 실험 | 변화율(%) |
|---|---|---|---|
| methane | 0.91330274 | 0.90684900 | -0.6454 |
| ethane | 0.05360016 | 0.07254200 | 1.8942 |
| propane | 0.02140006 | 0.01209600 | -0.9304 |
| nitrogen | 0.00220001 | 0.00139800 | -0.0802 |
| i-butane | 0.00460001 | 0.00351100 | -0.1089 |
| n-butane | 0.00480001 | 0.00343600 | -0.1364 |
| i-pentane | 0.00009700 | 0.00015000 | 0.0053 |
| n-pentane | 0.00000000 | 0.00001800 | 0.0018 |
| sum | 1.00000000 | 1.00000000 | 0.0000 |

c. 실험 결과

열교환기 3기에 대한 입출구에서의 스트림별 온도, 압력, 유량 조건을 표2, 3, 4에 정리하였다. 예냉 과정의 경우 콜드 스트림에 해당하는 프로판 냉매의 유량이 부족해서 본냉 사이클을 형성하는 혼합냉매의 온도가 -22도 밖에 도달하지 못했다.

표 2.2.28 예냉용 열교환기의 실험 결과

| Stream | Description | P(BarG.) | T(C) | Flow(Kg/hrs) |
|---|---|---|---|---|
| NG(HOT) | Suction | 28.45 | -4.30 | 25.39 |
| NG(HOT) | Out | 28.88 | -24.39 | 25.39 |
| MR(HOT) | Suction | 47.85 | 17.86 | 57.65 |
| MR(HOT) | Out | 48.17 | -22.14 | 57.65 |
| PROPANE(HOT) | Suction | 20.17 | 24.93 | 43.63 |
| PROPANE(HOT) | Out | 20.17 | 0.72 | 43.63 |
| PROPANE(COLD) | Suction | 0.48 | -43.07 | 43.63 |
| PROPANE(COLD) | Out | 0.39 | 17.28 | 43.63 |

표 2.2.29 MCHE 1의 실험결과

| Stream | Description | P(BarG.) | T(C) | Flow(Kg/hrs) |
|---|---|---|---|---|
| NG(HOT) | Suction | 28.88 | -24.39 | 25.39 |
| NG(HOT) | Out | 28.46 | -51.57 | 25.39 |
| MRV(HOT) | Suction | 46.89 | -18.24 | 29.58 |
| MRV(HOT) | Out | 46.89 | -51.68 | 29.58 |
| MRL(HOT) | Suction | 47.95 | -22.72 | 28.83 |
| MRL(HOT) | Out | 47.95 | -53.85 | 28.83 |
| MR(COLD) | Suction | 4.33 | -75.94 | 58.41 |
| MR(COLD) | Out | 4.31 | -20.17 | 58.41 |

MCHE1에서 콜드 스트림 MR과 핫 스트림 MRV, MRL, NG의 온도는 20도 이상 큰 차이를 보이나 핫 스트림 간의 온도는 균일한 특성을 보이고 있다. 또한 MRV, MRL의 유량비에 있어서 MRL의 유량이 매우 커야 함에도 비슷한 것은 예냉 사이클의 온도가 -32도 정도되어야 하나 이보다 10도 정도 부족함으로서 본냉 사이클에서 MR이 기액분리 될 때 그 조성비가 다름에 기인한다. 결과적으로 MCHE2를 지나서 MCHE1으로 오는 MR의 온도가 설계조건에 도달하지 못하게 되고 MCHE1내 열평형 조건이 맞지 않아서 온도 근접성에도 영향을 주는 것을 알 수 있다.

표 2.2.30 MCHE 2의 실험 결과

| Stream | Description | P(BarG.) | T(C) | Flow(Kg/hrs) |
|---|---|---|---|---|
| NG(HOT) | Suction | 28.46 | -51.97 | 25.39 |
| NG(HOT) | Out | 28.46 | -77.75 | 25.39 |
| MRV(HOT) | Suction | 46.89 | -51.68 | 29.58 |
| MRV(HOT) | Out | 46.89 | -78.12 | 29.58 |
| MRV(COLD) | Suction | 4.44 | -118.33 | 29.58 |
| MRV(COLD) | Out | 4.44 | -59.36 | 29.58 |

결과적으로 LNG를 생산해야 되는 혼합냉매 사이클의 마지막 공정 MCHE2에서는 콜드스트림과 핫스트림의 온도 격차는 더욱 큰 40도 정도 되어서 NG가 액화되기에는 부족한 -80도 근방에 이르기 되었다.

(5) 국산기자재 성능평가

가. 압축기 성능

액화공정에서 유일하게 에너지를 필요로 하는 압축공정은 냉매를 압축시킨 후 적절하게 냉각 시킴으로서 저장된 잠열을 통해 냉동사이클 팽창과정에서 방열을 함으로서 궁극적으로 타 가스의 온도를 내리는 소스 역할을 달성하게 하는 가장 중요한 기자재 중 하나이다. 따라서 압축기의 성능은 요구되는 에너지 입력분에 대해서 압력 상승이 설계에 도달하고 압력상승에 대한 온도상승이 비대해지는 것을 막도록 제작되어진 것이 성능평가의 핵심이라고 할 수 있다. 따라서 이러한 성능평가는 냉동사이클 내에서 압축과정의 역할을 통해 명백해질 수 있으며 프로판과 혼합냉매의 냉동사이클에 대한 설계조건과 설계와 실험과의 비교를 살펴보도록 한다.

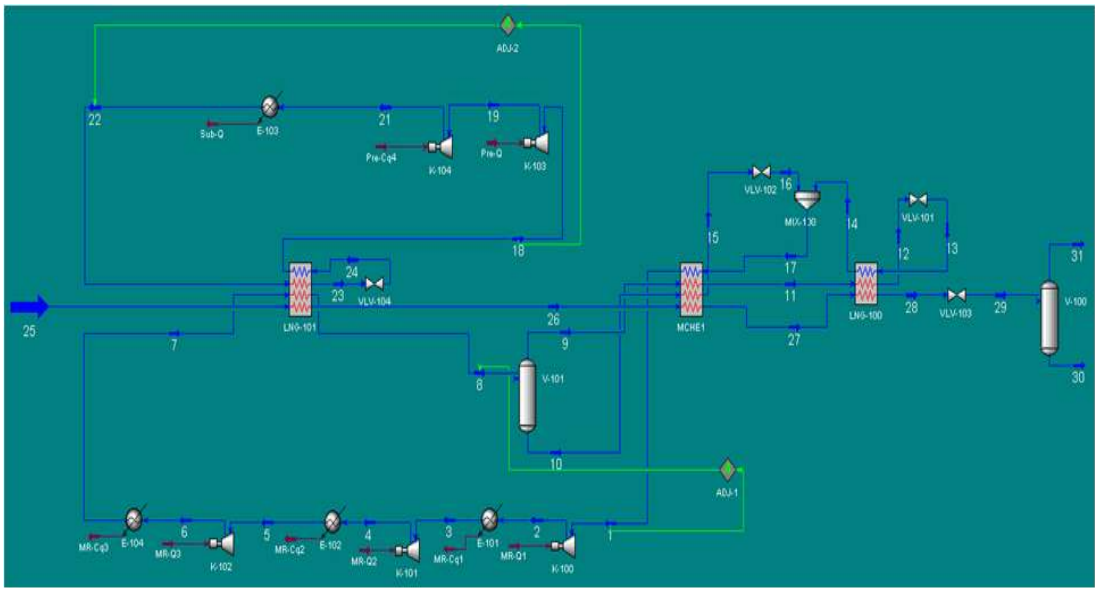



그림 2.2.131 냉동사이클 분석을 위한 공정흐름도

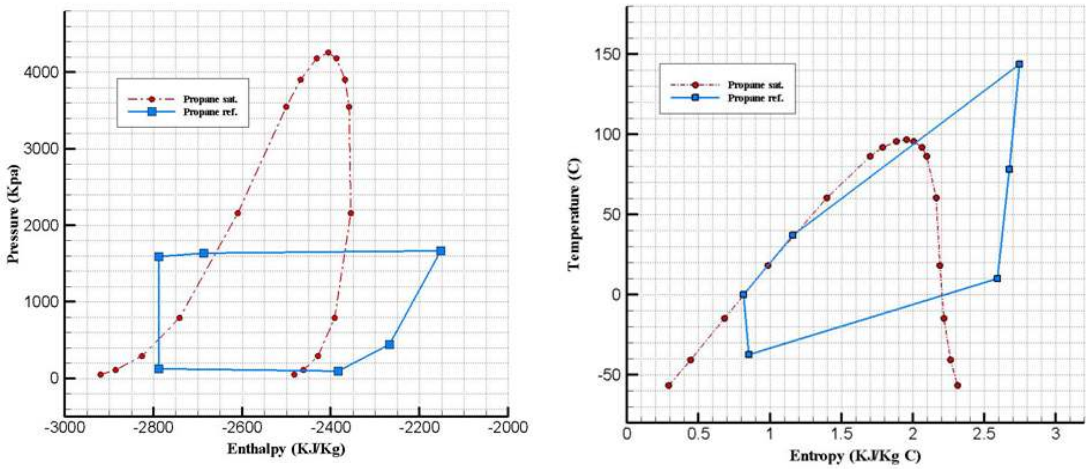



그림 2.2.132 프로판 냉동사이클 설계 조건(좌: P-h선도, 우:T-S선도)

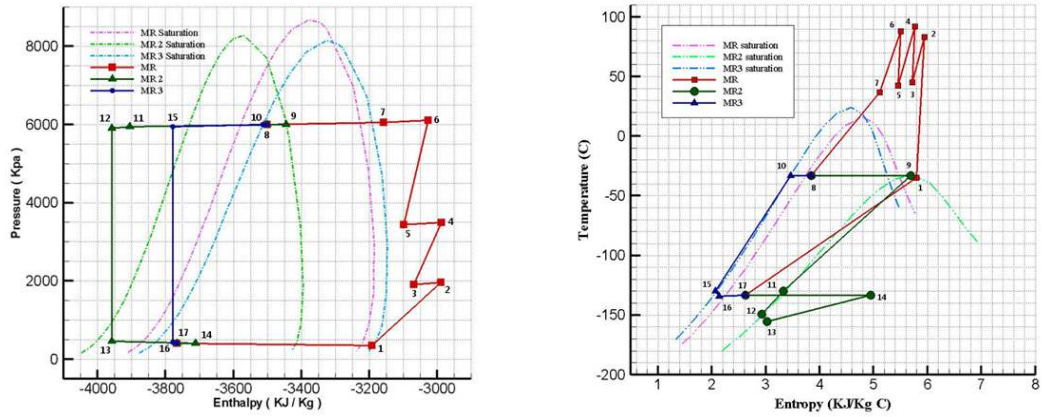



그림 2.2.133 혼합냉매 냉동사이클 설계 조건(상: P-h선도, 하:T-S선도)

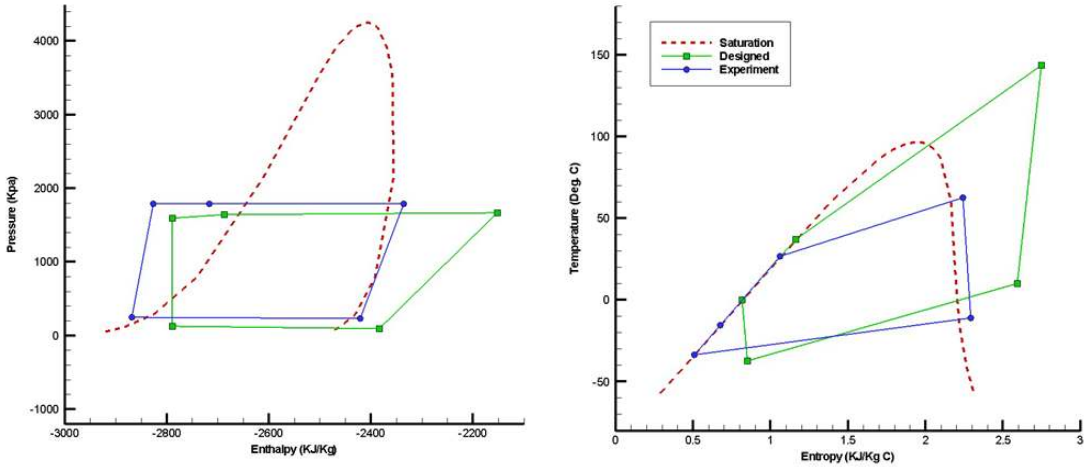



그림 2.2.134 프로판 냉동사이클 설계, 실험 비교

(좌: P-h선도, 우:T-S선도 Green Line 설계 조건, Blue Line 실험 결과 )

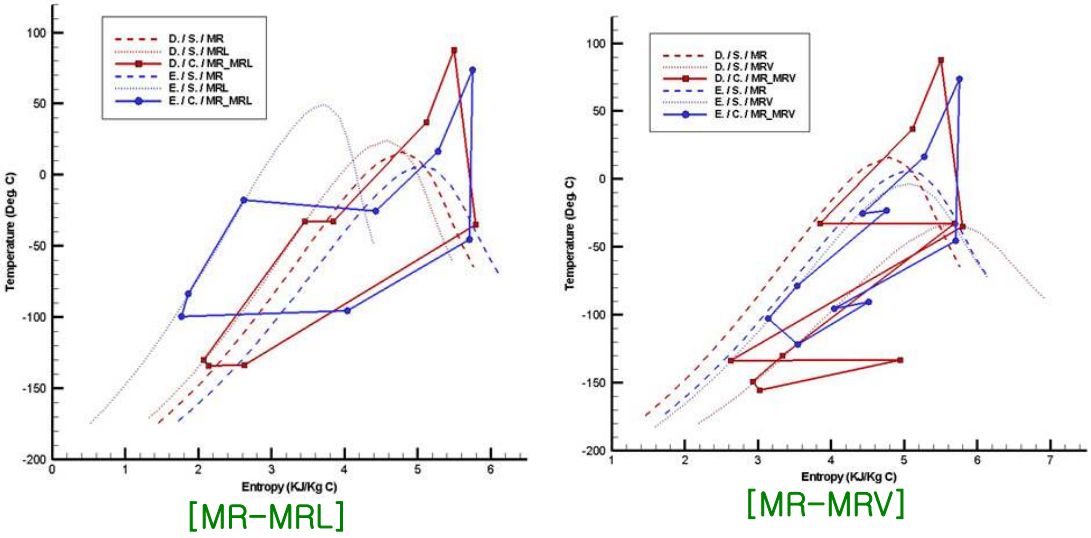



그림 2.2.135 혼합냉매 냉동사이클 설계, 실험 비교

(좌:MR-MRL T-S선도, 우:MR-MRV T-S선도 Red Line 설계 조건, Blue Line 실험 결과)

그림 2.3.134-135 냉동사이클 선도에서 알 수 있듯이 액화공정에서 압축기 입구조건이 실험에서는 설계조건과 달라서 압축기 토출부분에서도 영향을 받고 있다. 프로판 압축기의 경우 설계조건과 비교에서 압축기 입구에서 과열도가 낮아서 포화선도에 근접하고 있어 토출압력은 상승하고 압축과정에서도 냉각수 유량이 더 많아서 전반적으로 압축과정만을 볼 때 문제가 전혀 나타나고 있지 않으나 혼합냉매 압축기는 과열도가 낮음에도 불구하고 토출압력이 부족함을 알 수 있다. 선도에서 압축기 입구는 완전 포화되지 않은 상태로 보일 수 있으나 이는 실제 열교환기 출구에

있는 온도트랜스미터를 반영한 결과로서 실제 1단 압축기 입구에는 완전 기화된 상태이다. 결론적으로 프로판 압축기는 성능을 100% 발휘하고 있으며 혼합냉매 압축기는 냉매의 조성과 순도 그리고 입구조건 때문에 설계조건의 80-90% 밖에 성능이 발휘되지 않으나 기자재의 단순 문제는 없는 것으로 판단된다.

나. 열교환기 성능

LNG 액화플랜트에 활용되어지는 열교환기 종류는 Precooler는 Kettle 형태이고 MCHE의 경우 Spiral Wound 타입이다. 두 종류의 열교환기는 온도 근접성에서 오랫동안 검증이 되었으나 비교적 큰 부피에 의한 공간제약이 많기에 소형의 플랜트에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 이에 시간당 30Kg급 LNG 액화플랜트(LNG BSU)를 구현하기 위해서 공간제약이 적고 다중 유동을 구현할 수 있는 플레이트 핀 방식의 열교환기를 Precooler 1기와 MCHE 2기에 전부 적용하였고 이를 통해 2013/04/25일 실험에서 냉매조성비, 압력, 유량 등의 운전조건에 따라서 열교환기 성능을 분석하게 되었다.

다. 열교환기 성능평가 결론

Precooler, MCHE1, MCHE2에서의 실험결과에 따른 열전달율 평형을 우선 계산하고 이를 통해 hot stream의 상대적 비율을 파악해 궁극적으로 열교환기 별 열손실 비율를 알게되었다. 또한 이를 그림2.2.136에 도시화해서 표현하였다.

**Balance of heat rate**

$$Q'_{Cold\ Stream} = Q'_{propane} = 6.271Kw$$

$$Q'_{Hot\ Streams} = Q'_{NG}(-0.345Kw) + Q'_{MR}(-2.820Kw) + Q'_{Propane}(-0.773Kw) = -3.938Kw$$

$$Q'_{Loss} = Q'_{Cold\ Stream} + Q'_{Hot\ Streams} = 2.333Kw$$

**Percentages of hot stream**

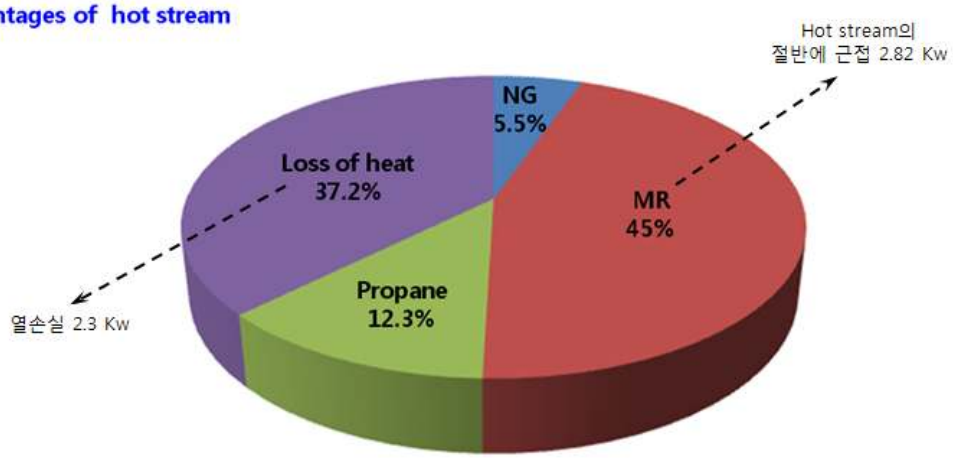



그림 2.2.136 Balance of heat rate and percentages of hot stream in Precooler

세부적으로 Precooler의 경우 열용량이 3기 열교환기 중에서 가장 큰 6.271kw이 되나 열손실을 감안했을 때 37.2% 감소한 3.938kw가 된다. 열손실 비율면에서는 MCHE1에 비해 적으나 절대적 열용량은 2.333kw로서 가장 크다고 볼 수 있다. 콜드 스트림 프로판에 대한 3종류의 핫 스트림 프로판, NG, MR의 열전달 용량은 MR이 45%(2.82kw)로서 절반에 근접한다. MCHE1의 경우 용량이 3기 열교환기 중에서 가장 높아야 하나 실험결과는 반대로 가장 적었다. 이는 열손실을 떠나서 열교환기에서 냉각기능이 절대적으로 부족하다는 것을 의미하고 주된 이유는 MCHE2에서 열손실이 매우 크다는 것과 Precooler에서의 열손실이 MRV, MRL의 성분비를 변화시켜 열전달 효율을 떨어뜨리기 때문이다. 따라서 열용량은 3.642kw가 되고 열손실 비율면에서 가장 적은 0.8kw로서 우수하게 나타났다. 콜드 스트림 MR에 대한 3종류의 핫 스트림 NG, MRV, MRL의 열전달 용량은  MRV, MRL을 합한 용량이 63%로서 2.3kw에 해당된다.

**Balance of heat rate**

$$Q'_{Cold\ Stream} = Q'_{MR} = 3.642Kw$$

$$Q'_{Hot\ Streams} = Q'_{NG}(-0.539Kw) + Q'_{MRV}(-1.543Kw) + Q'_{MRL}(-0.752Kw) = -2.834Kw$$

$$Q'_{Loss} = Q'_{Cold\ Stream} + Q'_{Hot\ Streams} = 0.8Kw$$

**Percentages of hot stream**

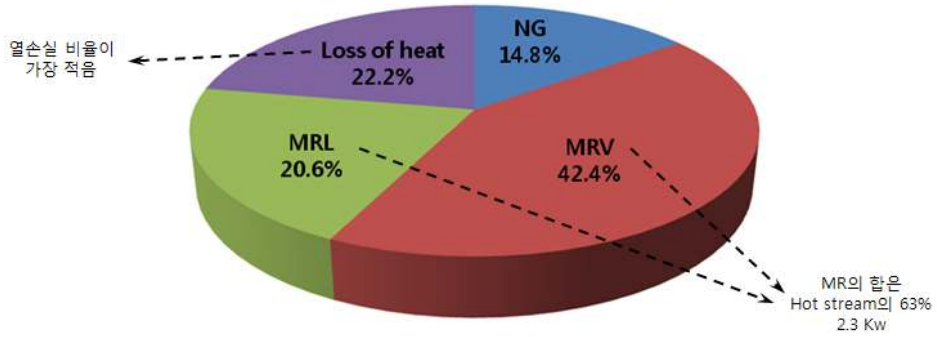



그림 2.2.137 Balance of heat rate and percentages of hot stream in MCHE1

hot stream의 비율을 볼 때 MRL보다 MRV의 비율이 크다는 것은 MRV의 유량이 MRL보다 많다는 것에 의존하는 바 이는 이상적인 운전조건에서 MRV유량에 대한 MRL유량이 약 4정도 됨을 감안했을 때 매우 비정상적인 조건에서 얻어진 결과이고 실제 MRV의 유량이 적을 때는 앞선 결과보다 열손실이 높을 수 있다고 판단되어진다. 마지막으로 MCHE2의 경우 열용량이 3기 열교환기 중에서 2번째인 4.512kw이 되나 열손실을 감안했을 때 50% 감소한 2.254kw가 된다. 열손실 비율면에서 가장 크고 절대적 열용량은 가장 적다고 볼 수 있다. 콜드 스트림 MRV에 대한 2종류의 핫 스트림 NG, MRV의 열전달 용량은 NG 비율이 19.2%(0.865kw)로서 가장 커서 LNG를 얻는데 공헌하는 정도 역시 제일 높다고 할 수 있다. 결론적으로 그림에서 알 수 있듯이 열교환기 용량(Duty)의 감소에서는 Precooler, MCHE2, MCHE1 순으로 높게 나타났고 열손실에 대한 상대적 비율에서는 MCHE2, Precooler, MCHE1 순이었다. 상대적 열손실 비교에서 MCHE1이 양호하지만 20% 이상의 열손실은 결코 적다고 할 수 없다. 따라서 3기 열교환기 중 단 하나라도 제 성능을 발휘하지 못할 경우 액화플랜트는 정상 운전이 힘들고 이를 방지하기 위해서는 Precooler, MCHE1, MCHE2 순서로 실험을 통한 성능검증 후 하나씩 교환해서 테스트를 수행하는 재설계 과정이 요구되어진다고 판단된다.

**Balance of heat rate**

$$Q'_{Cold\ Stream} = Q'_{MRV} = 4.512Kw$$

$$Q'_{Hot\ Streams} = Q'_{NG}(-0.865Kw) + Q'_{MRV}(-1.389Kw) = -2.254Kw$$

$$Q'_{Loss} = Q'_{Cold\ Stream} + Q'_{Hot\ Streams} = 2.258Kw$$

**Percentages of hot stream**

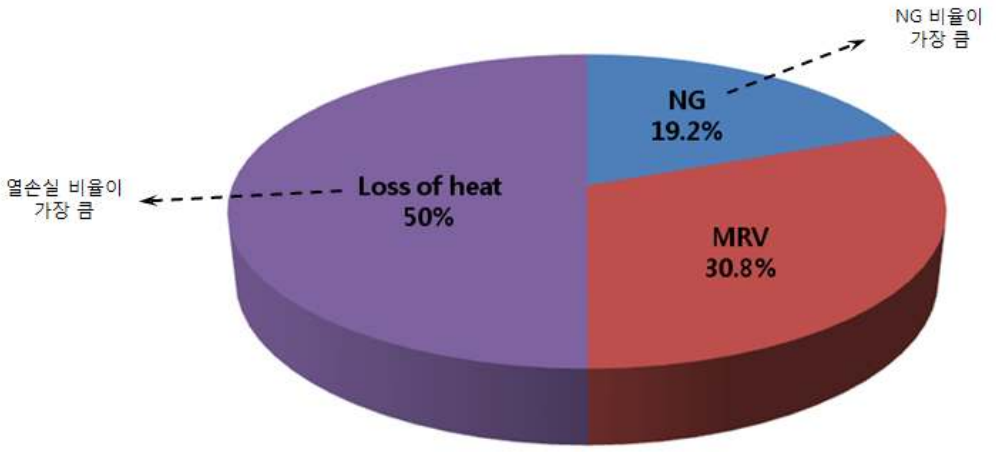



그림 2.2.138 Balance of heat rate and percentages of hot stream in MCHE2

라. 신규 열교환기 MCHE1_R 성능

◦ 설계 조건

기존 MCHE1 설계조건과 비교해서 신규 제작되는 MCHE1_R의 설계조건은 실험 결과를 반영해서 스트림별 조건이 변경되었다. 우선 Feed Gas에 해당하는 NG의 압력은 24BarG.로 줄어들었으며 온도는 -23도로 상승되었다. 그리고 유일한 콜드 스트림에 해당하는 MR의 압력은 5BarG., 온도는 -132.7도로 약간의 변화가 있으며 그 외 MRV와 MRL의 경우 외기에서의 열전달에 따른 온도구배를 고려해서 -20도와 -25도로 차이를 두었고 유량비 역시 1/1.5 비율로 유량에서의 차이를 현저하게 줄였다. 이러한 설계조건에서의 차이를 반영한 결과를 표2.3.5에 상세히 나타내었다.

표 2.2.31 신규 열교환기의 설계 조건

| Stream | Description | P(BarG.) | T(C) | Flow(Kg/hrs) |
|---|---|---|---|---|
| NG(HOT) | Suction | 24 | -23 | 20 |
| NG(HOT) | Out | 24 | -130 | 20 |
| MRV(HOT) | Suction | 59 | -20 | 30 |
| MRV(HOT) | Out | 59 | -130 | 30 |
| MRL(HOT) | Suction | 59 | -25 | 45 |
| MRL(HOT) | Out | 59 | -130 | 45 |
| MR(COLD) | Suction | 5 | -132.7 | 75 |
| MR(COLD) | Out | 5 | -38 | 75 |

◦ 설계된 MCHE1_R의 스펙

사이즈는 그림2.3.139에서 보듯이 단면적에서는 뱐화가 없으나 2개의 부품으로 구성된 것을 1개의 부품으로 합하여지면서 길이 방향으로는 크게 증가되어 결과적으로 전열면적이 상승하게 되어 용량이 크게 증가되었다. 또한 열교환기 내부의 판의 구성은 적층방법과 판의 수는 12장으로 동일하나 설계조건 변화에 따라서 그림 2.3.140에서 알 수 있듯이 스트림별 판의 수는 NG의 경우 유량 감소로 1장이 줄게 되었고 반면에 유량이 증가된 MRV는 1장이 증가하게 되었다.

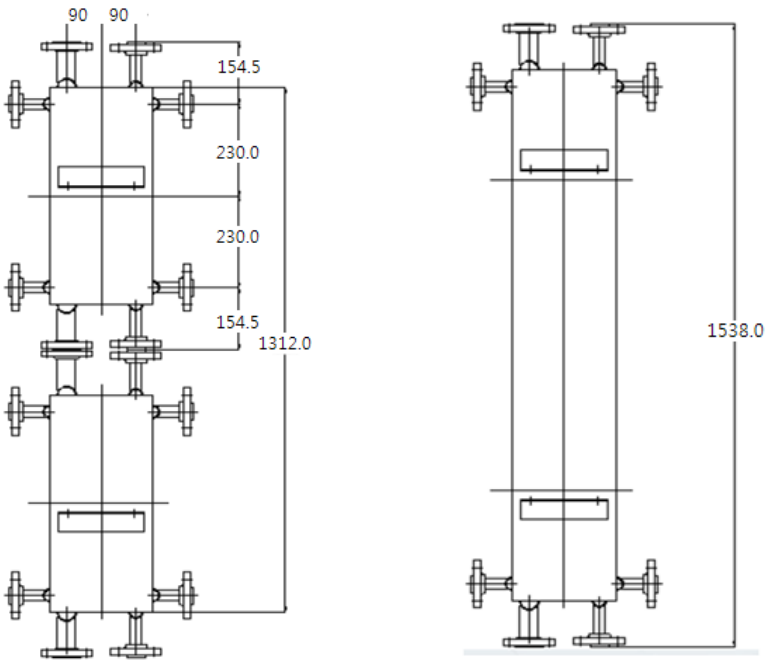



그림2.2.139 Size of MCHE1 and MCHE1_R

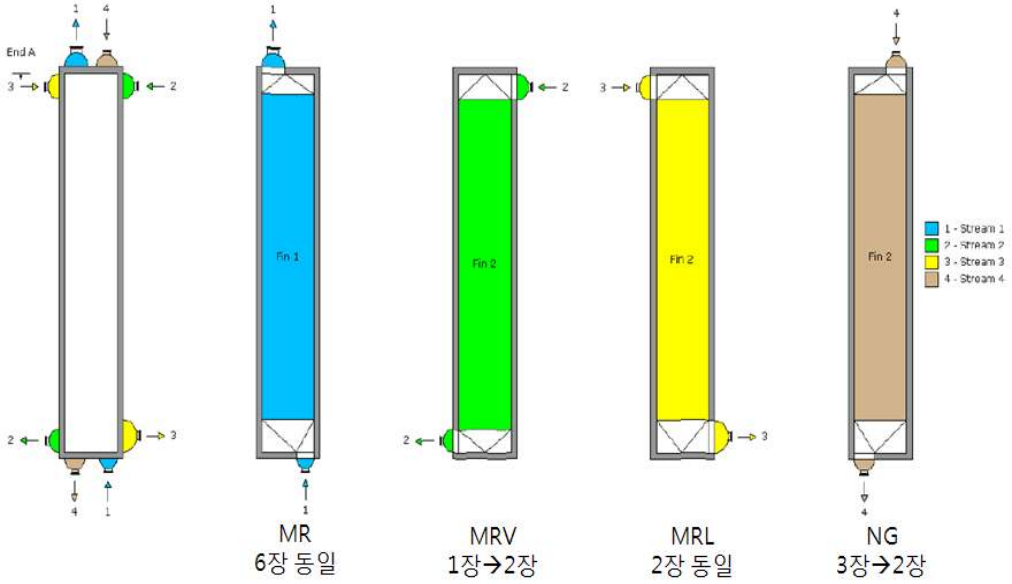



그림2.2.140 Geometry and plate layer number of MCHE1_R

◦ MCHE1_R 성능 실험

신규로 제작된 열교환기를 기존의 MCHE1을 콜드박스에서 제거하고 그 자리에 설치해서 단열 후 기존의 실험과 동일한 조건하에서 실험 진행하였다. 실험에서 가장 중요시하게 여긴 것은 기존의 운전조건과 동일하게 진행해서 기존의 열교환기인 MCHE1과 새로 제작된 MCHE1_R의 비교를 하는 것이었다.

구체적으로 이전 실험에서 가장 안정적으로 실험을 진행하였던 2013년 10월 29일 실험 내용을 바탕으로 예냉온도, 혼합냉매의 유량과 압력, 천연가스의 유량과 압력 그리고 MRL과 MRV의 비율을 기존의 실험과 같은 환경으로 맞추기 위해 노력하였으며, 온도와 같은 경우는 거의 근사하게 진행하였으며, 압력은 5 bar 미만의 차이를 보였고, 유량도 5kg/h 미만의 차이를 보이게 실험을 진행하였다. 다음의 그림은 전체 실험을 진행한 운전 트랜드 화면을 나타낸다.

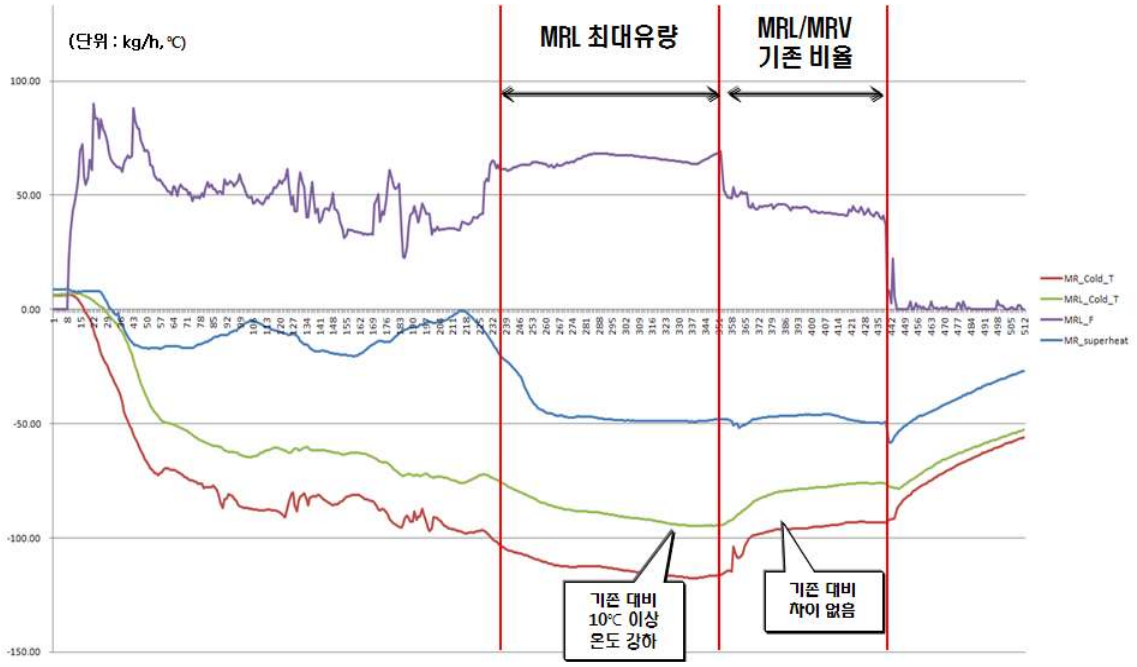



그림2.2.141 MCHE_R의 성능 실험 전체 트랜드

실험은 두 가지의 형태로 진행하였는데, 기존의 실험 방향과 유사하게 진행한 것과 MCHE_R의 성능을 알아보기 위해서 MCHE_R에 MRL의 유량을 최대로 하였을 때의 변화에 대해 알아보았다.

그림에서 MRL 최대유량 구간은 MRV의 유량의 0으로 하고 나머지 유량을 모두 MRL로 흘렸을 때의 변화를 보이는데, 이때는 이전 실험에서 MCHE1을 지난 Hot_end의 온도의 최저점이 -85℃ 미만이었던데 비해서 약 10℃ 이상 온도 강하를 하여 -95℃의 온도 강하를 보였는데, 이 수치는 설계치인 -120℃에는 많이 부족하나 이전 실험에서 보이지 않았던 온도 강하를 했다는데 의의를 둘 수 있다. 게다가 MRV의 유량을 0으로 한 것을 감안한다면, 만일 MRV 쪽에서의 스트림과 더 해졌을 때 연쇄적인 온도를 생각한다면 더 많은 온도를 내릴 수 있을 것으로 판단

된다.

반면, 기존의 실험과 동일하게 진행하였을 때의 트랜드인 MRL/MRV 기존 비율 구간을 보면 다시 MCHE_R Hot_end의 온도가 상승하는 것을 볼 수 있으며, -80℃ 이상 상승하여 기존의 실험에 비해서 나아진 것이 없었다. 이와 같은 내용을 정리하면 아래의 그림과 같다.

| | 기존 MCHE (2013.10.29) | 신규 MCHE 기존 비율 (2014.11.4) | 신규 MCHE MRL 유량 최대 (2014.11.4) |
|---|---|---|---|
| 예냉 온도 | -25℃ | -25℃ | -25℃ |
| 혼합냉매 유량/압력 | 70kg/h / 53 bar | 65kg/h / 51 bar | 65kg/h / 51 bar |
| 천연가스 유량/압력 | 15kg/h / 15 bar | 15kg/h / 15 bar | 15kg/h / 15 bar |
| MRL 유량/MRV 유량 | 45kg/h / 25kg/h | 42kg/h / 23kg/h | 65kg/h / - |
| MCHE1 후단 온도 | -85℃ | -76 ℃ | -95 ℃ |
| 유량대비 MCHE1 과열도 | -49℃ | -49 ℃ | -49 ℃ |
| 온도 근접성 | 15℃ (-100/-85) | 17℃(-93/-76) | 22℃(-117/-95) |

그림2.2.142 MCHE_R의 성능 실험 결과

위의 그림에서 보라색으로 표현된 위쪽 네 개의 셀은 운전 조건으로 설정해서 맞춘 값이 되는 것이며, 노란색으로 표현된 아래 3개의 셀은 그에 대한 운전 결과를 나타낸다. 앞서 말했듯 MRL의 유량을 최대로 하였을 때, 온도 강하가 기존에 비해서 많이 일어나는 것을 확인 할 수 있는데, 반면 온도 근접성은 다소 차이가 있었다. 전체 MR 유량은 같았기 때문에 MR의 과열도는 같게 나온 것으로 판단 할 수 있으나, 전체 설비의 설계치에서 벗어나는 운전을 할 수가 없어서 더 많은 유량을 보낼 수 없기 때문에 그 이상은 확인이 불가하였다.

실험결과 냉매의 유량을 충분히 하였을 경우에 원하는 온도까지 내릴 수는 있겠으나, 먼저 냉매의 과냉현상에 대한 부분을 해결해야하며 또한 열교환기의 온도 근접성이 설계 보다는 나쁘기 때문에 성능의 저하가 우려되는 점은 해결해야 할 부분이라 판단된다.

C3MR의 기본 설계를 참조하면 MRL과 MRV의 비는 3:1 에서 4:1 정도 되는데, 이번 실험과 같이 MRL에 65kg/h의 유량을 흘리면 MRV에는 20kg/h정도가 되어 총 유량이 85kg/h정도로 설계에 비해서 40%정도 초과하고 원하는 온도까지 가기 위해서는 60% 이상 초과될 것으로 판단된다.

(6) BSU trouble shooting

가. 혼합냉매 필요량이 지나치게 크며, 비용이 많이 들어가는 문제 해결

◦ 문제 현상

혼합냉매를 운전 중 충진하여 최종 60BAR까지 승압을 하게 되는데, 혼합냉매의 공급은 47L 용기에서 100% 가스 상태로 공급한다. 이 때 47L 용기 하나당 가격이 40만원 이상이며, 2차 시운전 결과 한번 운전할 때 사용되는 냉매량은 30병이 넘게 사용되어 혼합냉매 비용만으로 1200만원 이상이 사용되게 되는 문제점이 발생

◦ 원인 분석

BSU 설비에서 용적을 많이 차지하는 부분은 압축기와 압축기 사이사이의 SNUBBER 그리고 리시버 탱크들인데, 특히 혼합냉매의 리시버 탱크의 용량이 0.5 m3로 가장 많은 부분을 차지하게 된다. 실제 프로세스에서 사용하게 되는 냉매량은 0.1이 되는 않는 점을 감안하면, 매우 큰 양이며, 불필요한 부분이다.

◦ 조치 사항

냉매 충전을 위한 밸브 설치

냉매의 보관을 위해서 냉매 리시버 탱크 전·후단에 매뉴얼 밸브를 설치하였으며, 설치된 그림은 다음과 같다.



그림 2.2.143 혼합냉매 및 프로판 냉매 리시버 탱크 전 후단 차단밸브 설치

프로판 리시버 탱크 전단의 차단밸브는 압축기 스키드에 있는 액 역류 방지용 On-off 밸브가 있어 그것으로 대체하기로 하였다.

나. 프로판 사이클 운전 시 컨덴서에서 100% 액상이 아닌 문제 해결

◦ 문제 현상

프로판 사이클에서 프로판 냉매는 열교환기를 진입하기 전 100% 액상이 되어야 하지만, 운전 화면상에서 나타난 프로판 물성을 볼 때, 100% 액상이 아님.

◦ 원인 분석

프로판 사이클에서 압축기를 통해 압축된 프로판이 컨덴서를 통해서 응축되게 되는데, 응축되는 속도 보다 냉매의 흐름 속도가 더 빠르게 되어서 열교환기 진입할 때, 100% 액상이 아니게 되는 현상이 발생

◦ 조치 사항

프로판 냉매의 느린 기화 속도를 해결하기 위해서 리시버 탱크에 액상의 프로판을 바로 주입하였다. 이전의 프로판 용기로는 액을 주입할 수 없으므로 액을 주입할 수 있는 용기(Siphon 용기)를 이용해서 프로판 리시버 탱크에 액상의 프로판을 주입한다. 아래의 그림은 1차 시운전에 사용했던 프로판 용기와 2차 시험에서 액충전에 사용한 siphon 용기 그림을 나타낸다.



그림 2.2.144. 교체 전의 프로판 용기(좌)와 교체 후의 프로판 용기(우)

실험에 앞서 액상의 프로판을 리시버 탱크에 주입하는 작업부터 시작하였다. 프로판 리시버 탱크의 가스부분을 밴트하면서 압차이로 액상 프로판을 주입하였다. 이날 주입한 액상 프로판의 양은 전체 리시버 탱크 볼륨(0.1 m3)의 절반정도를 충전하였다.

2차 실험에서는 먼저 프로판 사이클을 구성하고 천연가스를 열교환기로 주입하고 마지막으로 MR 사이클까지 구성하는 것을 목표로 하였다. 프로판 사이클을 구성하

기 위해서 압축기 시동전 프로판 압축기의 공압을 공급하여 리시버 탱크의 전단의 On-off 밸브를 개방하고 리시버 탱크 후단의 밸브를 개방하여 액체인 프로판 가스를 열교환기의 팽창밸브까지 흘린 후 팽창밸브를 수동으로 조절해서 압축기 석션 조건에 다다랐을 때 압축기를 기동하였다. 압축기를 기동하고 처음에 5 bar 정도였던 리시버 탱크의 압력이 서서히 오르는 것을 확인 할 수 있었다.

압축기 구동 초반에 리시버탱크의 압력이 부족하여 돌아오는 가스양이 매우 적기 때문에 가스를 MFC로 10Nm3 으로 흘리면서 바이패스 밸브를 자동제어하게 하였으며 팽창밸브는 계속해서 수동으로 조작하였다.

팽창된 프로판 액체는 -20℃ 정도까지 내려갔으며, 압축기 입구의 석션 조건을 만족하기 위해서 개도율을 올렸으나, 증발 후의 프로판이 거의 같은 온도로 석션쪽으로 리턴되고 있었다. 열교환할 수 있는 유체가 필요하다는 판단에 천연가스를 10Nm3 정도로 흘렸으며 그러한 과정이 지속되자 점차 천연가스의 유량을 증가시켰다. 프로판 냉매 사이클이 정상상태를 이루기가 힘들다고 판단하고 곧바로 MR 압축기를 기동하였다. 혼합가스 냉매를 MFC로 공급하면서 서서히 압력을 올렸으며 최종 45 bar 정도의 압력으로 MR 사이클을 구성하였다. MR 사이클까지 구성하였을 때의 HMI 화면이 아래의 그림에 나타난다.

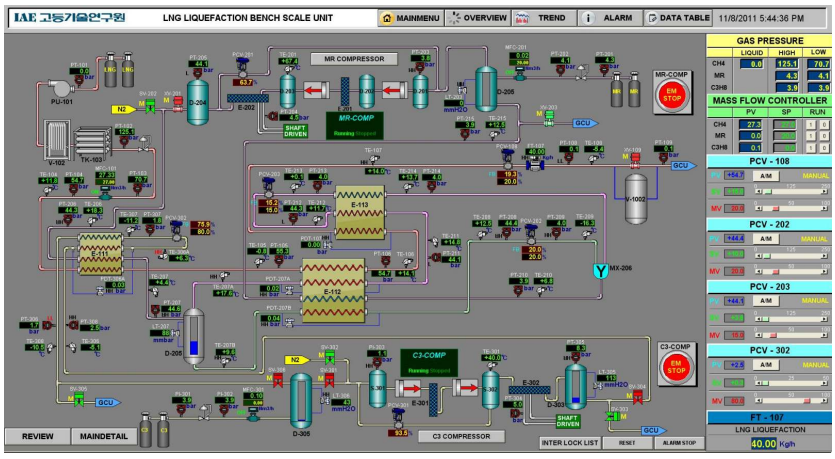


그림 2.2.145 C3사이클과 MR사이클 구성 화면

MR 사이클은 냉매 주입이 완료된 후 비교적 안정적으로 사이클이 구성되는 것을 확인하였으며, 특히 프로판 사이클과는 달리 두 개의 팽창밸브의 opening을 적게 했음에도 불구하고 바이패스 밸브의 opening이 60% 정도에 지나지 않았다. 이것은 프로판 사이클에 비해서 냉매의 공급이 원활하다는 것을 나타내며 설계 압력인 60 bar로 충전하였을 때는 이보다 낮은 바이패스를 나타낼 것을 예상할 수 있다.

본 실험에서 가장 문제가 된 것은 프로판 사이클이었으며 프로판 사이클의 문제점을 나열하면 다음과 같다.

프로판 리시버 탱크의 압력이 충분치 않다. 설계 압력은 16.5 bar인데 비해서 리시버탱크의 압력은 10 bar를 넘지 않았다.
프로판의 증발이 원활치 않다. Pre-cooler에서 프로판이 충분히 증발하여 압축기 석션부로 돌아와야 하지만 증발이 충분히 되지 않고 돌아와서 온도가 팽창 후의 온도와 거의 다를바가 없었으며 이것으로 인해 냉매압축기의 냉매 주입이 원활치 않았다고 판단된다.
Pre-cooler에서의 열교환 유체끼리의 열교환이 잘 안되었다. 프로판 냉매는 냉열을 다 잃지 않고 영하의 온도로 압축기 석션으로 주입되는데 반해 이와 열교환하는 MR 냉매나 천연가스는 충분히 냉열을 가져오지 못하였다. 즉 냉매는 충분히 차갑고 유량이 충분한데 이와 열교환 되는 유체와 열교환이 안된다는 것으로 원인을 파악하는데는 상당한 시일이 걸릴 것으로 판단된다.

이 외에도 HMI의 수치에 이상이 있는 문제와 냉매의 팽창 후 온도가 충분히 떨어지지 않는 점 등의 문제가 발생하였다.

다음 실험에 앞서 보완 사항은 지금까지 구성이 단순하였던 C3 사이클부터 구성을 하였는데, C3 사이클의 과냉 문제 때문에 열교환될 유체가 필요하다는 판단으로 MR 사이클부터 구성하고 다음 천연가스를 흘리고 마지막으로 C3 사이클을 구성하는 것으로 하였다. 그리고 프로판 냉매의 압력이 올라가지 않는 문제의 해결책으로 현재 리시버 탱크의 냉매가 많이 충전되어 있어서 압축된 고온의 프로판이 리시버 탱크의 프로판 상태에 미치는 영향이 미미하다는 판단으로 다음실험에 앞서서 현재 충전된 프로판 냉매를 절반정도 Vent해서 운전하기로 하였다.

다. 운전 시동시 프로판 과냉현상 해결

◦ 문제현상
운전을 시작하고 프로판 사이클을 기동했을 때, 프로판의 압력이 올라가면서 점차 온도가 하강하고 밸브 후단의 온도가 -40℃ 근처가 되었을 때 쯤 열교환기를 지나서 과냉현상이 일어남.

◦ 원인분석
C3MR 사이클을 운전하면서, 예냉 사이클을 먼저 운전하고, 이후 혼합냉매 사이클을 운전하였는데, 이렇게 운전 할 시 최초 프로판 사이클이 구성이 되면, 프로판이 클링해야 할 HOT STREAM 중에 천연가스와 혼합냉매가 없고, 프로판 냉매만 쿨링하기 때문에 시간이 갈수록 과냉되는 현상이 나타남

◦ 조치사항

3차 시운전에서의 실험 내용은 2차 시운전에서 문제점이 되었던 프로판의 과냉을 막기 위해서 기존의 프로판 사이클을 먼저 구성하는 대신에 MR 사이클부터 구성해서 MR의 압축 온도를 충분히 올린뒤에 프로판 사이클을 구성하는 것으로 프로판 냉매를 충분히 열교환 시키는 것이며, 또 하나는 프로판 리시버 탱크의 프로판 양을 반 정도로 줄여서 온도 및 압력에 대한 보상을 빠르게 하는 것이다.

최초 MR 압축기 기동 조건은 충전되어 있던 MR 리시버 탱크의 압력은 26.5 bar 였으며 리시버 탱크 후단의 온도는 4℃로 압축기를 기동하면서 MFC를 이용해서 MR의 양을 점차 증가시키면서 압축기를 기동하였다. 압축기를 기동하면서 리시버 탱크의 압력은 최초 배관 및 HP MR separator에 흡입이 되면서 줄다가 점차적으로 늘게 되었으며, 압축기의 2nd snubber의 온도와 리시버 탱크 후단의 토출 온도 역시 점차 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 압축기 토출 온도의 증가율이 극히 작아서 온도를 올리는데 시간이 오래 걸렸었고 MR 압축기를 기동한지 2시간이 되어서도 MR 리시버 탱크 후단의 토출 온도는 15℃를 넘지 않았다.

아래 그림은 운전 시작부터 마칠 때 까지의 압축기 2nd snubber의 온도를 나타낸다.

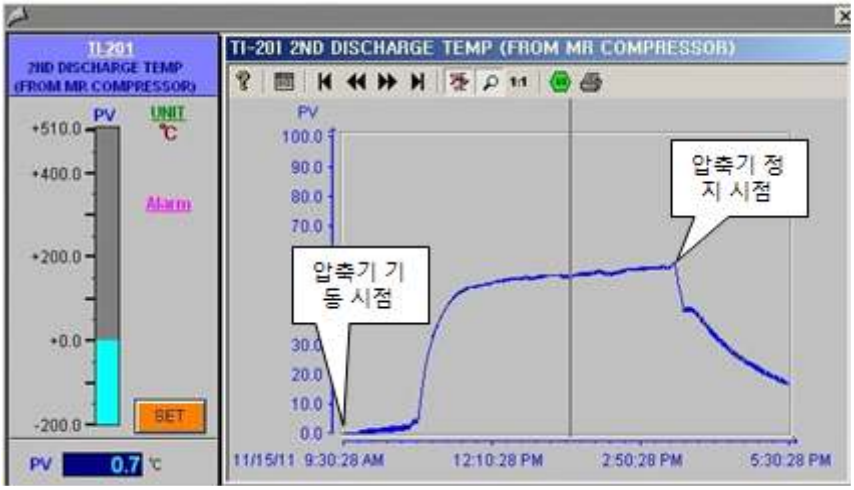



그림 2.2.146 2nd snubber temperature

MR 압축기 후단의 온도는 계속해서 증가할 것이라는 예상을 하고 프로판 압축기를 기동하여서 프로판 사이클을 구성하였다. 충전된 프로판 액체의 양은 45 mmH2O로 이전에 충전양인 140 mmH2O 보다도 현격히 적은 양이었다. 리시버 탱크 후단의 온도는 2.5℃ 였다. 프로판 사이클을 구성하면서 열교환을 원활히 하기 위해서 천연가스를 동시에 10 Nm3 의 유량으로 공급하였다.

프로판 사이클에서 한 가지 문제점은 대기 온도 및 저장된 프로판의 영향으로 압축기 후단의 리시버 탱크의 압력이 설계압력으로 오르지 않는 문제점이 있었다. 따라서 이번 실험에서 냉매의 유량을 앞서 언급했듯 대폭 줄이고 MFC로 프로판 가스를 충전해가면서 실험을 하였다. 압축기 운전 결과 압축기 석션 가스의 부족으로

인해서 압축기의 bypass 밸브는 90~100% 사이를 오가며 운전을 하였고 이것은 냉매의 순환이 적다는 의미로 실제 리시버 탱크의 압력이 오르는 속도는 매우 느렸다. 프로판 냉매의 순환을 위해서 압축기의 권장 석션 압력인 1.1 bar에 미치지 못하는 값으로 세팅을 하고 bypass 밸브의 opening을 줄여보았으며 그 결과 리시버 탱크의 압력이 이전에 비해서 월등히 빠르게 오르는 것을 확인하였다.

압력이 서서히 오르다가 어느 순간 급격히 올라간 것을 확인할 수 있었다. 계속해서 압력을 높이고 싶었지만 계속해서 떨어지는 압축기 석션의 압력을 감당하지 못해서 다시 석션쪽 압력을 높게 세팅을 하였다. 그림 왼쪽에 나타난 바와 같이 다시 압력이 떨어졌다. 또한 MR의 온도가 -12℃ 정도였던 것이 점차 올라가는 것을 확인하였다. 이는 냉매의 유량이 줄면서 냉각 효과 역시 줄어들게 된 것이라고 판단된다.

이번 실험에서 역시 C3의 과냉 문제는 해결되지 않았다. 실험이 되는 전 과정에서 C3의 과냉이 일어났으며, 그 온도는 -12℃까지 내려갔으며 이는 현장에서도 배관에 서리가 낄 정도였고 나중에는 석션 드럼에 액화 프로판이 쌓이는 것을 확인할 수 있었다. 압축기의 bypass 밸브를 많이 오픈할수록, 팽창밸브를 적게 오픈 할수록 온도는 올라갔으며 반대의 경우에 온도는 강하하였다. 밸브의 opening을 조절함에 따라서 온도의 응답임에도 불구하고 비교적 빠른 속도로 변화되는 것을 알 수 있다. 이는 프로판 냉매의 열교환이 원활이 이루어지지 않았음을 의미하며, 프로판 냉매의 열교환이 원활이 이루어지지 않는 원인에 대해서는 여러 각도에서 조사해 볼 필요성이 있다고 판단된다.

이번 실험은 이전 실험에 비해서 크게 개선된 점은 없었다. 단지 C3 리시버 탱크의 양을 적절히 조절해서 압축기의 bypass 밸브의 opening을 줄여서 토출쪽을 늘렸을 때 빠르게 압력이 반영되는 것을 확인 할 수 있어 향후 실험에서 적절한 C3 냉매량을 가늠해 볼 수 있었다.

다음의 실험에서의 우선시 되는 과제는 C3 압축기의 안정적인 가동을 위해서 입출구 조건을 맞춰서 사이클을 구성하는 것이며, 그것을 위해서 압축기 석션에서의 가스 유량을 충분히 확보해야 할 것으로 보인다. 압축기 석션의 가스량을 충분히 공급하기 위해서 해결해야 할 과제는 몇 가지가 있는데 정리하면 다음과 같다.

압축기 토출 온도를 충분히 올려서 압축기의 리시버 탱크의 압력을 설계 압력까지 끌어올릴 수 있어야 한다.
프로판 액체가 팽창 후에 증발하면서 충분히 열을 가져올 수 있도록 하여 증발 온도를 설계 온도까지 올릴 수 있어야 한다.
압축기 bypass 밸브의 opening을 지금까지 해왔던 90%~100% 사이가 아닌 최소 30~100%까지 자유자재로 조절을 하여도 사이클 구성에 문제가 없어야 한다.
운전 초기 혹은 순간적인 과냉을 방지하기 위해서 과냉을 보상해 줄 수 있는 장치

를 마련해야 한다.

본 실험을 성공적으로 수행하기 위해서 기본적으로 프로판 사이클의 안정적인 구성이 필수며 시작이므로 이부분에 초점을 맞추어서 다음 실험에 임할 수 있도록 해야하며, 위에서 나온 결과로부터 다음 실험에서 보완해야 할 사항을 다음과 같이 정리 하였다.

압축기의 토출 온도를 충분히 올리기 위해서 최초 10℃ 이하로부터 원하는 온도인 100℃ 이상을 얻기 위해서는 너무 많은 시간을 필요로 하므로 초반 운전시에는 after-cooler의 냉각수 공급을 중단하고 설계온도에 가까워지면 다시 가동하는 방식을 취해본다.
프로판 냉매의 과냉을 한시적으로 막기 위해서 증발 후 배관 온도를 높일 수 있는 열선을 감아서 온도를 보상 할 수 있도록 해본다. 여기에 쓰이는 열선은 최대 30℃까지 올릴 수 있는 일반 동파용으로 따로 제어가 필요 없는 것으로 선택한다.

라. 겨울철 프로판 냉매의 압력 강하 효과 해결

◦ 문제현상
겨울철 실험에서 프로판의 압력이 설계치 만큼 올라가지 않고, 10 BAR 이하에서 승압되는 않는 문제

◦ 원인분석
프로판 가스는 상온에서 10 BAR이하의 압력에서도 액화가 되는 성질이 있다. 이때 말하는 상온은 보통 20℃ 정도를 통상 말하는데, 겨울철 야외에서 실험할 경우 프로판의 온도는 실험결과 0도 부근까지 내려가게 된다. 이렇게 되면 프로판의 액화는 더 낮은 압력에서 일어나게 되며, 이에 따라 압력이 더 이상 상승하지 않게 된다.

◦ 조치사항
프로판 사이클의 구성을 위해서 압축기 리시버 탱크의 압력을 올리기 위해서 최초 압축기 기동에서 after-cooler의 냉각수 공급을 차단한다. 그리고 프로판 냉매의 증발 온도를 안정화하기 위해서 증발 후의 배관에 히팅밴드를 감아서 온도를 보상해 준다.
이전 실험과 마찬가지로 MR 사이클을 먼저 구성하여 MR의 온도를 충분히 올리고 천연가스를 흘리면서 프로판 압축기를 기동하는 방식으로 진행하였다. 이전 실험에서 MR 사이클에서 압축기 후단의 온도를 15℃까지 올리는데 2시간 정도의 시

간이 소요되었음을 감안해서 MR 압축기의 after-cooler 역시 차단한 상태로 기동하였다. 그 결과 3차 실험 때 보다 더 빠른 속도로 온도가 올라가는 것을 확인할 수 있었다.

실험 당시 외기 온도가 비교적 높았으며 14℃에서 20℃ 이상의 온도를 얻는데 1시간이 채 걸리지 않았다. MR 리시버 탱크의 토출 온도가 20℃를 넘었을 때 프로판 압축기를 기동하여 프로판 사이클을 형성하였으며 프로판 압축기 역시 시작하면서 after-cooler의 냉각수 공급을 차단하였다.

운전 중에 bypass 밸브 및 팽창밸브의 조절로 원만한 그래프의 형상은 아니지만 최고 13 bar까지 승압이 되었다. 이는 설계조건인 16.5 bar에 근접한 조건으로 현재까지의 실험에서 가장 높은 압력이었다. 하지만 압력이 높아지면서 냉매의 순환이 빨라져 석션쪽의 가스공급이 원활히 될 것이라는 예상과 다르게 전과 같이 bypass 밸브를 90% 이상 열지 않으면 압력은 떨어지는 현상은 계속되었다. 이것은 프로판 냉매의 과냉으로 충분히 증발이 되지 않으면서 가스의 공급이 부족해졌기 때문이라는 판단이다. 프로판 냉매의 증발 온도가 다음 그림에 나타나며 이것은 이전 것과 비교해 크게 다르지 않았다.

프로판 냉매의 과냉은 냉매를 흘렸을 때 계속해서 진행되었으며 이를 막기 위해서 팽창밸브 및 bypass 밸브의 개폐를 반복적으로 수행하게 되었다. 과냉을 막기위해서 배관에 히팅밴드를 설치하였지만 그 효과는 거의 없었고 이는 단열이 되지 않은 상태였기 때문인 것으로 파악된다.

한 가지 의문스러운 점은 프로판 냉매의 과냉은 일반적으로 냉매의 유량이 열교환되는 유체의 양에 비해서 많을 때 발생하게 되고 반대로 과냉일 때 열교환이 되는 유체는 충분히 열교환이 될 것이라 생각이 되는데, 결과는 그렇지 않았다.

두 유체의 설계 온도는 -35℃ 부근이나 그에 미치지 못하고 특히 천연가스의 경우에는 -5℃가 한계였다. MR 같은 경우는 그보다는 더 온도가 떨어지는 것을 확인 할 수 있었으나 만족할 만한 수치는 아니었다.

실험 도중 밸브의 작동에 이상이 생겨서 실험은 중도에 그만하였다. 이것은 냉매 중 수분의 영향으로 막힘 현상으로 잠정 결론 지었다. 이번 실험은 2차 실험부터 계속 같은 냉매를 충전하고 사용하는 것을 반복하였으며, 압축기쪽의 기밀을 다 유지하지 못한 상태라 외부 수분의 침투가 있었을 것으로 판단된다.

◦ 조치결과

압축기 after-cooler의 냉각수를 초반에 중단한 것은 효과가 있었다. 실제로 이전보다 빠르게 온도가 상승하는 것을 확인했고, 압력이 상승하는 효과도 함께 확인할 수 있었다. 반면 프로판 증발 배관에 히팅밴드를 감아서 과냉을 보상하는 것은 효과가 없었다. 단열을 하지 않고서는 외기 온도로 인해서 온도가 유지 되지 않았

었다.

무엇보다도 이번 실험에서 제어밸브의 오작동으로 더 이상 실험이 힘들어지게 되어 실험을 중단하였는데, 이는 냉매에 수분 및 이물질로 인해서 밸브에 막힘현상이 일어난 것으로 보인다. 지금까지 냉매는 실험종료 후 리시버탱크에 보관하고 다음 실험에서 다시 사용하는 것을 반복하였는데, 그 과정에서 수분 및 이물질의 침투가 있었을 것으로 보고 차후 실험에서 질소 퍼지와 진공을 다시 해야 할 것으로 결론 내렸다.

마. 프로세스 내에서 온도 유지가 되지 않는 문제점 해결

◦ 문제현상

한 라인에서도 유체가 지나면서 온도가 다시 올라가는 현상 또는 맞지 않는 현상이 발생.

◦ 원인분석

실제로 위치한 배관의 위치에 따라서 직사광선을 받는다던지, 라인 자체가 상대적으로 길어서 온도 유지가 되지 않는 원인으로 문제가 발생

◦ 조치사항

이전까지의 실험은 단열을 하지 않은 상태에서 단열 효과를 무시하고 실험을 하였다. 따라서 Pre-cooler 이후의 온도가 이후 열교환기에 어떻게 작용을 하는지 알 수 없었다. 단열 공사는 4차 시운전이 끝나고 시행하였으며 총 9일의 시간이 소요되었다. 단열재는 고무발포 단열재를 사용하였으며, 타 단열재에 비해서 단열 효과가 1.25배 정도로 높다고 알려져 있으며 비교적 시공이 쉽고 단열 후에 수정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 단열을 한 범위는 콜드박스 스키드 프로세스라인 전체와 압축기 석션드럼, 리시버 탱크 및 1st snubber 그리고 이것들과 연결된 배관이었으며, 상온 범위에서는 25mm 두께로 시공하였으며 -35℃ 이하의 온도에서는 50mm, -100℃ 까지는 75mm, -125℃ 이하의 온도 배관에서는 100mm의 두께로 단열 시공을 하였다.

바. 운전 분석 방법 향상

◦ 문제현상

액화 플랜트 운전이 끝나고 스크린샷 또는 기억에 의존한 운전 분석으로 분석에 한계가 있음

◦ 원인분석

운전에 사용하는 HMI는 진행하였던 운전의 트랜드를 제공하지만, 데이터 가공에 한계가 있고, 다른곳으로 임포트를 못시키는 한계가 있어 실제로 운전 후에는 HMI의 트랜드를 통해서 운전을 분석하기 보다는 스크린샷에 의존한 기억으로 분석하는 것이 대부분으로 이는 운전 분석의 불확실성을 가져옴

◦ 조치사항

실험 결과를 보다 정확하고 용이하게 분석하기 위해서 데이터 수집 S/W인 “WinCC Data Monitor”를 서버 컴퓨터에 설치하였다. 이전 실험에서의 운전 데이터 분석은 HMI의 캡쳐 화면과 Trend화면으로 분석을 하였는데 이것은 분석하는데 한계가 있고 사용자가 원하는 분석 화면을 볼 수 있는데 어려움이 있었다. S/W를 설치함으로써 원하는 시간의 운전 데이터를 엑셀 형식으로 가져와서 데이터를 분석 및 가공 할 수 있게 되었다.

WinCC Data Monitor를 이용해서 엑셀에서 디스플레이 하고자 하는 아카이브 태그를 지정할 수 있으며 이것은 HMI의 태그 내용과 같다. 원하는 아키아브 태그를 엑셀로 드래그하여 해당 태그에 대한 속성들을 사용자가 기입함으로써 원하는 데이터 값을 모니터 할 수 있다.

이와 같은 절차를 마치고 마지막 화면에서 “발행”을 클릭하여 해당 워크시트를 발행한다.

워크시트의 발행을 완료하면 Excel Workbook Wizard 아이콘 옆의 Excel Workbook을 클릭한다. Excel Workbook을 클릭하면 다음과 같은 화면이 나오는데 “연결”을 누르면 로그인 대화상자가 열리고 로그인을 하게 되면 태그를 읽어 올 수 있는 준비가 끝난다.

이로써 모든 세팅이 끝나고 아카이브 태그 판독 버튼을 누르면 앞서 지정 했던 태그들의 정보가 엑셀 시트에 반영되어 디스플레이 된다. 사용자 지정에 따라서 실시간 정보를 볼 수도 있으며, 지정된 시간 내에서의 데이터들을 볼 수도 있다.

본격적인 실험에 앞서 이전 실험에서 잔류하고 있는 가스들을 모두 Vent 및 Purge 하였으므로 설비의 진공을 시도하였다. 이전과 마찬가지로 천연가스 배관, 프로판 냉매 배관 및 혼합냉매 배관을 모두 연결시키고 한꺼번에 진공을 잡았다. 진공 펌프를 가동하고 빠르게 진공도가 내려가는 것을 확인하였다. 이전 실험에서 진공도는 2 Torr 이하로 내려가지 않았으나, 이번 실험에서는 0.1 Torr까지 내려갔으며 아주 천천히 더 내려갈 수 있었다. 이것은 설비의 Vent 이후에 추가로 기밀 시험을 시행해서 한군데 새는 곳을 바로 잡은 것과 압축기 개방된 플랜지의 밸브 설치가 주효했다고 판단된다.

진공 게이지가 0.1 Torr를 가리켰을 때 진공 펌프를 중지하고 동시에 혼합냉매와 프로판 냉매의 주입장치(MFC)를 가동하여 1～2 bar 정도의 냉매로 채워 놓았다. 이것은 진공의 유지가 쉽지 않기 때문에 빠른 시간에 냉매를 상압 이상으로 채워놓아 대기 중의 물질이 침입하지 못하도록 하는 것이다. 냉매를 배관에 채워놓은 뒤에 프로판 액체를 리시버 탱크에 60mm까지 채우고 이전과 마찬가지로 혼합냉매 압축기부터 기동하였다. 혼합냉매 주입은 47L 용기를 사용했으며 약 30병을 사용해서 최종 40 bar 정도의 운전조건을 가질 수 있었다. 대기의 온도가 0℃ 부근이라서 리시버 탱크의 온도가 오르는데 상당한 시간이 소요되었으며, 혼합가스 리시버탱크의 토출 온도가 15℃가 되었을 때 프로판 냉매 압축기를 기동하고 서서히 천연가스를 흘렸다. 흘린 천연가스는 5 Nm3부터 진행하였다.

프로판 압축기를 기동하고 압축기 석션의 압력 보상을 위해서 팽창밸브의 개도율을 85% 정도로 하였고, 팽창 후 온도는 -14℃정도였으며, 증발온도는 -10℃ 정도로 나왔다. 프로판 냉매의 증발 온도가 더 이상 올라가지 않아 프로판 냉매 증발 후 지나가는 배관에 설치해 놓은 열선을 통한 온도 보상을 시도 하였다. HMI 상에서 증발 온도 표시기가 열교환기 부근에 설치가 되어 있기 때문에 증발온도는 -10℃ 이하에서 머물렀으나, 1st snubber 온도 게이지를 통해 확인한 결과 상온을 유지하는 것을 확인 할 수 있었다.

열선의 효과로 인하여 비록 증발온도가 낮게 나오더라도 배관에서 충분히 보상해서 압축기 석션측에 설계온도보다 낮은 온도로 유입되는 것을 방지 할 수 있기 때문에 이 전 실험과는 다르게 프로판 냉매의 팽창밸브 및 bypass 밸브의 개도율을 자유롭게 가져갈 수 있었디. 이전 실험에서는 90%에 머물렀던 bypass 밸브의 개도율을 50%까지 가져갔으며 팽창밸브 역시 30%～100%까지 조절이 가능했다.

이와 같이 제어 밸브의 조작이 용이해 짐에 따라 시간을 오래두고 온도 변화를 관찰할 수 있었으며, 실험 시작에서 Pre-cooler는 압축된 프로판 냉매와 팽창된 프로판 냉매의 열교환이 활발한 것으로 관찰되었다. 반면 혼합냉매 및 천연가스의 온도변화는 미미하였으며, 프로판 냉매 자신의 온도 변화가 안정 상태에 접어 들자 혼합냉매의 온도 강하가 서서히 일어 났으며, 이후 천연가스의 온도 강하도 시작되었다. 프로판 냉매의 팽창 온도는 -20℃～30℃ 사이를 나타냈으며, 혼합냉매의 예냉 온도는 -25℃, 천연가스는 -20℃ 부근을 나타내었다.

실험당시 배관 및 탱크류의 단열은 끝난 상태였지만 열교환기와 HP separator의 단열은 하지 않은 상황이라 예냉된 혼합냉매와 천연가스가 MCHE1까지 지속되지 못하고 약 10℃ 정도의 온도 차이를 나타내었다.

반면 낮은 온도는 아니지만 MCHE1과 MCHE2를 지난 혼합냉매는 팽창 후 온도가 떨어지기 시작하였고 처음 -30℃ 정도이던 혼합냉매의 팽창 온도는 나중에는 -100℃ 이하를 가리키게 되었다. 혼합냉매의 팽창온도가 -100℃ 정도이기 때문에 천연가스 온도도 비슷하게 떨어지리라 생각했지만 -70℃까지만 확인하였다. 시간을 두고 지켜보았다면 온도는 계속 내려가고 있었기 때문에 더 강하되는 것을 확인

할 수 있었으나, 프로판 냉매의 부족과 온도 강하하는 정도가 점점 더 미미해 짐에 따라 이번 실험은 이정도 확인 하는 것으로 접어두었다.

이번 실험에서 의미 있었던 점 중 하나는 온도 강하가 이전보다 잘 되었다는 점과 지속되지는 않았지만 프로판 사이클이 안정상태로 어느정도 지속되었다는 점이었다. 프로판 사이클이 안정될 수 있는 조건을 찾는다면 이 후 혼합냉매 사이클에 따라서 원하는 온도를 맞출 수 있을 것이라 기대한다.

WinCC data monitor system을 통해서 이번 실험에서 프로판 사이클을 분석해 보면 아래의 그림과 같은 데이터를 얻을 수가 있다. 시간에 따라서 1~5분 간격으로 Pre-cooler의 온도 및 압력 분포를 나타내었으며 화면에서 노란색 바로 표시된 부분이 비교적 안정된 상태라 할 수 있다.

분석 결과 압축된 프로판 냉매의 압력이 높을수록, 팽창 압력이 낮을수록 원하는 결과에 가깝게 나온 것을 확인 할 수 있었다. 프로판 냉매를 설계 압력인 16.5 bar로 올리는 것은 어렵지 않은 일이나 팽창 압력을 낮추는 것은 쉽지 않은 일이다. 팽창 압력을 낮추기 위해서는 팽창 밸브의 개도율을 줄여야하고 팽창 밸브의 개도율을 줄이면 압축기 석션쪽의 공급 압력이 낮아져서 압축기를 구동하는데 문제가 발생하기 때문이다. 실제 그림에서 노란색 바로 표시된 부분에서 1st snubber의 압력이 압축기 설계 압력에 비해서 낮게 나오는 것을 알 수 있으며, 또한 팽창 직전의 압력이 그대로 압축기 쪽으로 전해지는 것이 아니라 약 0.3~0.5 bar의 차압을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

사. 기액 분리기 온도 편차 문제 해결

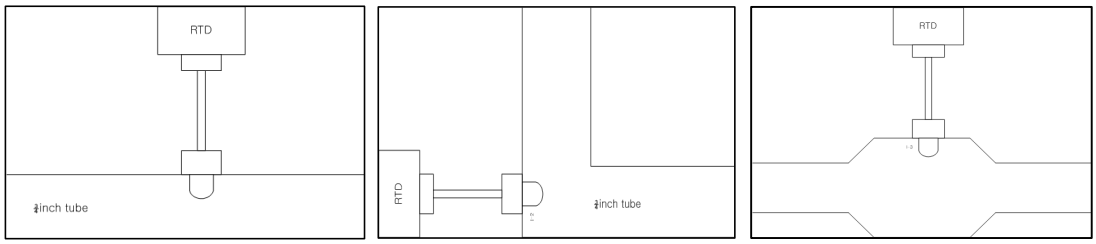
◦ 문제현상

기액 분리기를 기준으로 입구쪽의 온도와 기액의 온도의 편차가 5℃이상 크게 나타나는 현상이 발생

◦ 원인분석

천연가스 액화 BSU 실험에서 기존의 열전대 위치를 그림 2.2.147과 같이 수정하여 실험한 결과를 비교하였다. 기존의 실험에서 기액분리기의 전후의 온도 차이가 5℃이상 차이가 나는 현상이 있어서 실험결과 분석에 에로 사항이 있었다. 프로판 예냉 사이클을 통해서 쿨링된 MR의 온도는 설계온도인 -32℃ 부근임에도 불구하고 기액분리기 후단의 온도는 5 ℃이상 높은 것으로 나와 성능 분석이 힘든 점이 있었다.

◦ 조치사항




(a) (b) (c)

그림 2.2.147. 열전대 조치사항

그림에서 (a)는 기존의 열전대의 위치이며, (b)는 새로 설치한 열전대의 위치이다. 일반적으로 열전대의 설치는 (c) 와 같은 형상으로 설치하는 것을 권장한다. 하지만 이미 설치된 BSU에서 (c) 와 같은 형상으로 바꾸는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 (b)와 같은 방법으로 설치하였다.

◦ 조치결과

그림 2.2.148은 기존의 방법 즉, (a)와 같은 형태로 열전대를 설치하였을 때 실험했던 결과를 보여주고 있다.

그림 2.2.148에서 보는바와 같이 실험이 진행되면서 온도가 서서히 하강하는데, 일정 시점부터 온도차이가 약 5~10℃ 정도 나타나는 것을 확인할 수 있다. 실험 전의 온도는 같은 온도를 나타내는데 반해 실험이 진행되고 유체가 흐르면서 점차 차이가 나는 것이 온도가 떨어질수록 그 차이가 멀어지는 현상을 확인 할 수 있다.

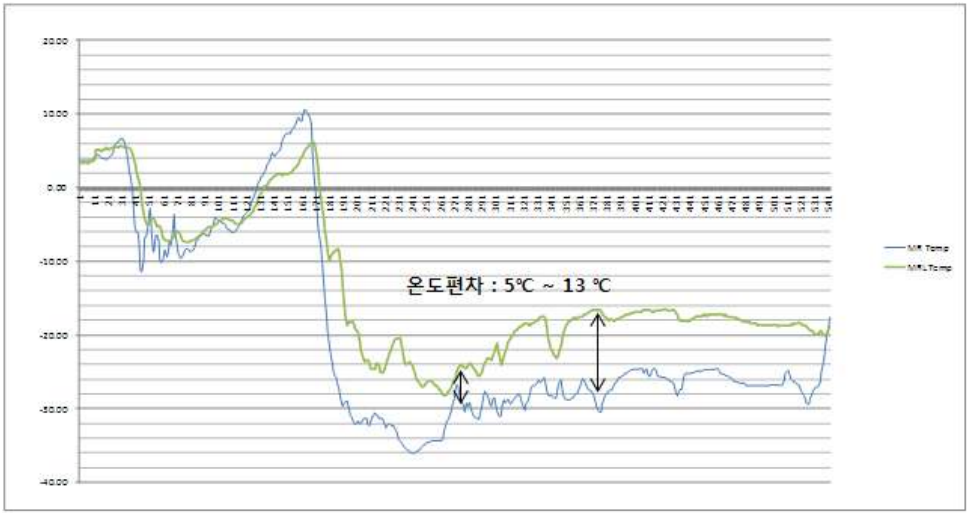



그림 2.2.148 기존의 실험에서 기액 분리기 전후단의 온도분포

그림 2.2.151은 그림 2.2.149의 (b)와 같이 열전대의 위치를 변경하고 실험하였을 때 나타난 온도 분포이다.

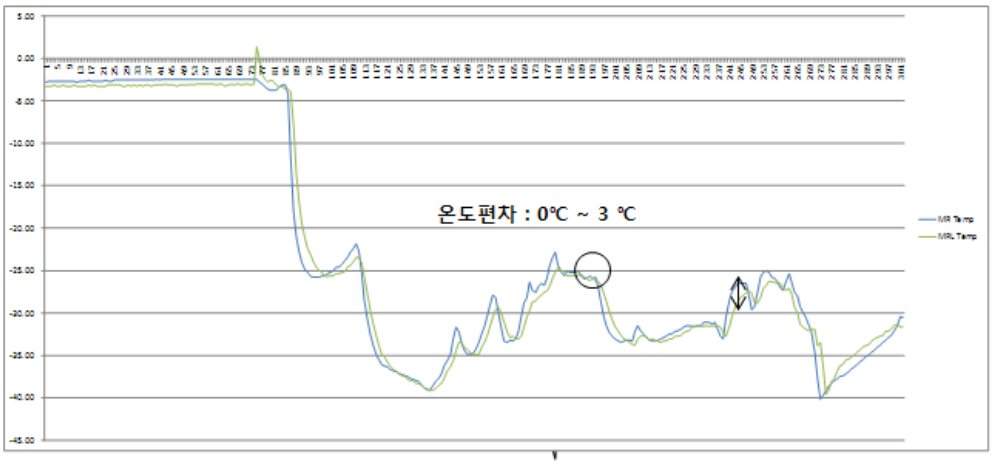



그림 2.2.149 열전대 수정 후 전후단 온도 분포

그림에서 보는 바와 같이 시작부터 실험이 끝날 때 까지 일정하게 같은 온도를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 실험 데이터의 신뢰성을 확보 할 수 있으며 실험 분석 및 해석에도 큰 도움이 될 수 있을 것이다.

(7) 운전결과 DB 구축

가. 제어시스템의 구성

BSU의 제어시스템은 Fig. 7과 같이 구성되어 있다. 옥외에 BSU가 위치하고 있으며, 직선거리로 약 10 m 거리에 PLC(Programmable Logic Controller)가 포함된 제어판넬이 위치하고 제어실에서 LAN 통신을 통해 BSU를 제어하였다.

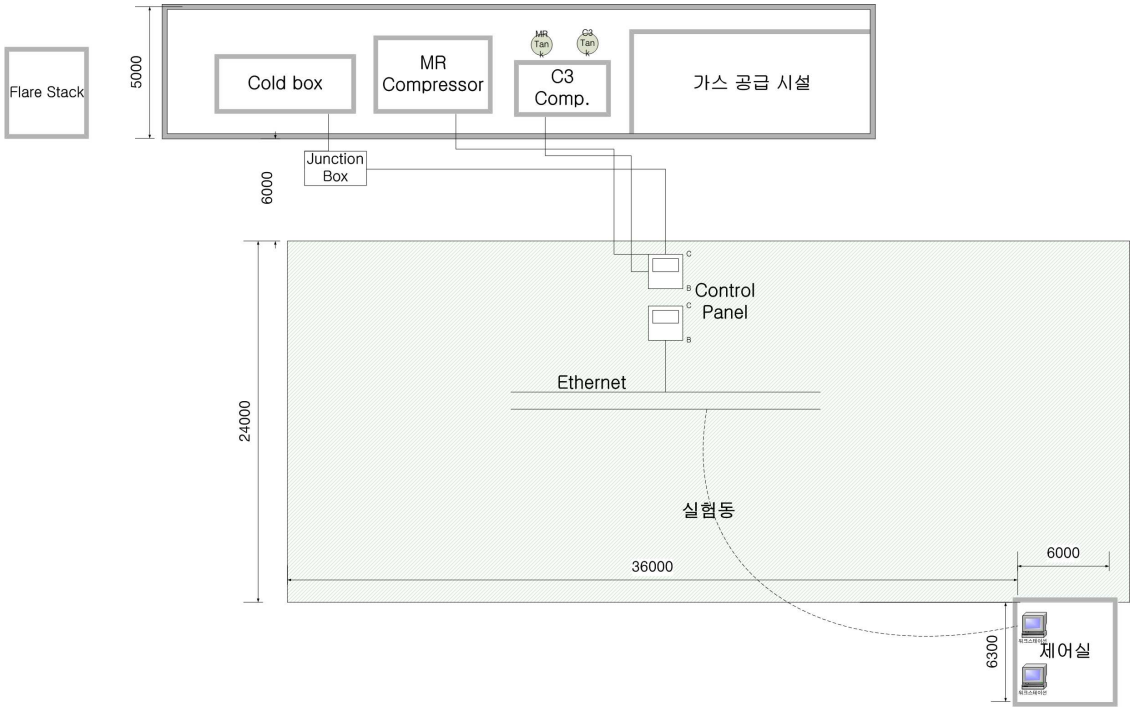



그림 2.2.150 BSU control system general arrangement

BSU의 운전을 하면서 실시간으로 각 트랜스미터로부터 운전데이터가 PLC를 통해서 제어실로 전송되는데, 이렇게 전송된 운전데이터는 HMI를 통해서 저장되어 관리하였다. 이와 같은 방법으로 저장된 데이터는 가공되지 않은 형태로 남게 되는데, 이러한 형태로 운전 내용을 이해하고 분석하는 것은 한계가 있기 때문에 별도의 데이터 가공 툴을 사용하였다. 사용한 데이터 가공 툴은 WinCC Data Monitor로 원하는 시간동안에 저장된 데이터를 샘플링 해서 MS office Excel 형태로 나타낼 수 있다. Fig. 8은 운전한 데이터를 Data Monitor를 이용해서 가공하는 것을 나타낸다.

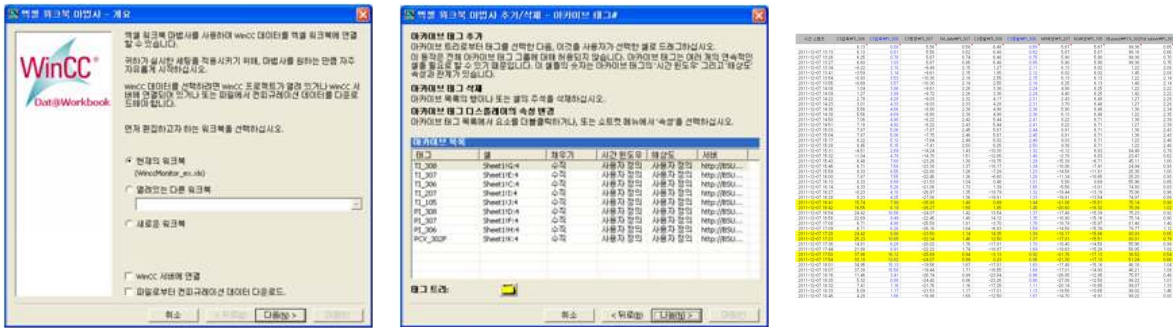



그림 2.2.151 Data monitor application

나. 데이터베이스 관리

BSU를 운전하면서 일어나는 모든 데이터들은 WinCC 자체 DB에 기록되어지게 된다. 여기서 말하는 모든 데이터라 함은 HMI 상에 나타난 모든 전기적 신호에 의해서 송신 받은 데이터들이다. WinCC 자체 DB는 BSU 운전 서버에 설치되어 있는데, 서버에 설치된 DB 관련 파일들이 그림과 같이 설치되어 있다.

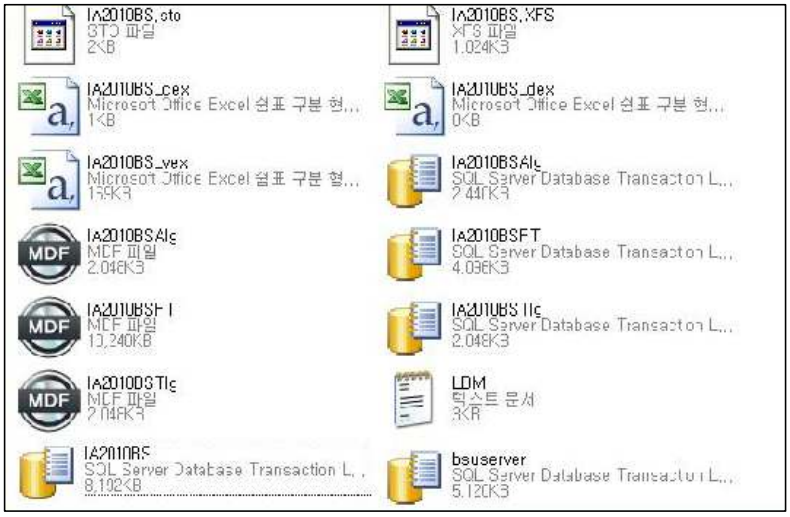



그림 2.2.152. BSU 운전 데이터베이스

이와 같이 데이터베이스를 이용해서 분 단위 운전데이터를 원하는 만큼 추출 할 수 있고, HMI 자체 프로그램으로 인해서 트랜트 등을 만들 수도 있다. 다음의 그림은 BSU 운전 DB로부터 HMI로 요청받아 운전 트랜드 화면을 구성한 경우이다.

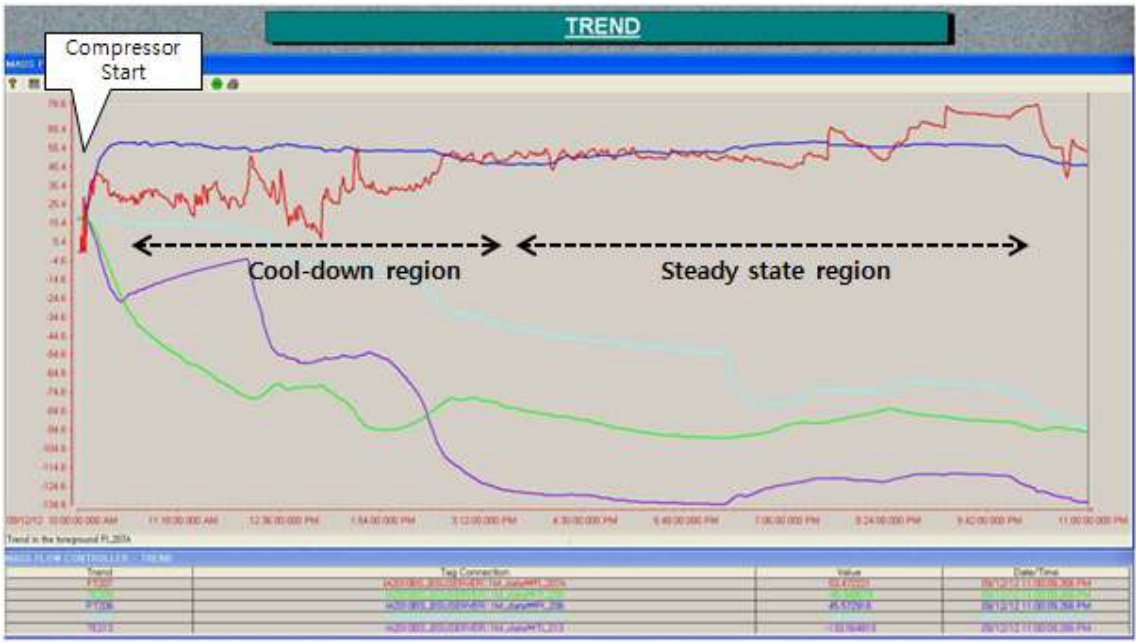



그림 2.2.153. DB로부터 HMI로 운전 트랜드 구성

3. LNG 액화 공정 제어 설계 패키지 개발

(1) 테스트베드(Train-1) 제어로직 검증 모델 개발

가. 일반적인 LNG 공정 구성

가스공에서 생산되는 천연가스를 수송을 용이하게 하기 위해서는 약 대기압, 160도에서 액체상태로 만드는 것이 필요하다. 천연가스를 액화시키는 과정은 많은 에너지를 필요로 하는 공정이다. 주된 공정과 유틸리티를 포함하는 일반적인 LNG 플랜트를 구성하는 공정도를 나타내면 다음과 같다.

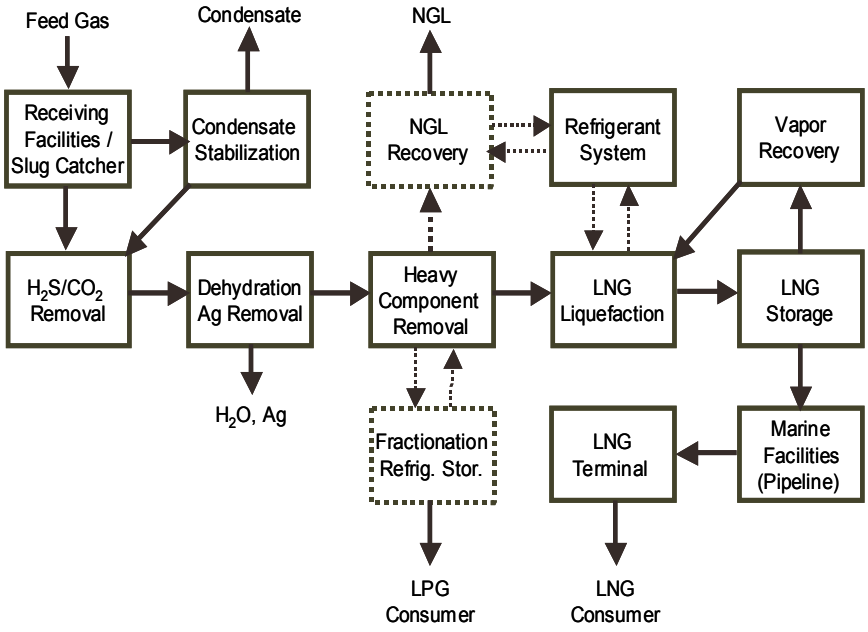



그림 2.2.154. 전형적인 LNG 플랜트의 공정흐름도.

천연가스 중 지표에 나와 감압할 때 응축하는 Condensate Gas전의 가스는 비교적 무거운 성분을 함유하지만 건조가스전 또는 수용성 가스로서 지하에 존재하는 것은 메탄가스가 대부분으로 메탄이상의 무거운 성분을 거의 함유하지 않는다. 또 수반가는 석유와 함께 존재하기 때문에 가스의 조성은 메탄에서 고분자탄화수소까지의 폭넓은 성분을 함유하고 있다.

이러한 천연가스는 다량의 탄산가스, 황화수소, 물 등의 불순물을 함유하고 있다. 이들 중 탄산가스, 황화수소는 장치에 부식을 일으키고 물은 공정 중에 가스수화물을 생기게 하여 운전 중의 장애원인도 되므로 이들 불순물들은 천연가스를 정제할 때 미리 제거한다.

천연가스는 산지에 따라 조성이 다른 것이 보통이다. 일반적으로 메탄(CH4)이 대

부분이며 에탄(C2H6), 프로판(C3H8), 부탄(C4H10) 등의 중질분을 많이 포함하고 있으나 질소, 탄산가스, 유황화합물을 다량 포함한 것도 있다. 그러나 쉽게 액체화하는 중질분과 연료로서의 질을 떨어뜨리는 원인이 되는 불순물은 액화되기 전에 제거하여야 한다.

나. 천연가스 액화 공정

가스전에서 LNG 플랜트로 공급되는 천연가스의 압력은 보통 40bar ~ 70bar, 온도는 20℃~40 ℃ 정도 이다. 액화된 천연가스의 주성분은 메탄이 주성분이고 공급되는 열량을 조절하기 위한 고분자 탄화수소 성분이 포함되어 있다. 원료가스는 여러 가스의 혼합물이기 때문에 일정한 온도범위에 걸쳐서 액화가 진행된다. 천연가스의 임계온도는 약 -85 ℃~ -62 ℃ 이며, 대기압에서 -165 ℃~-155 ℃에서 액화되는 것으로 알려져 있다.

천연가스를 액화시키기 위한 다수의 냉동싸이클이 개발되고 있지만, 오늘날 주로 이용되고 있는 방법은 다수의 단일 냉매를 이용하는 캐스케이드 싸이클, 고압에서 저압으로 팽창시 온도저하를 이용하는 팽창싸이클, 플레이트-핀타입이나 스파이럴 타입의 극저온 열교환기를 이용하는 혼합냉매싸이클 등의 3가지가 주류를 이루고 있다. 대부분의 시스템이 이 세 가지를 바탕으로 일부 변형이나 혼합하여 개발되고 있다.

본 LNG설비연구에서는 프로판을 이용하여 약 -35 ℃ 까지 예냉을 한 후에 혼합냉매이용 냉동 액화하는 것으로 구성되어 있다. 혼합냉매는 메탄, 에탄, 프로판, 질소 등으로 구성되어 있다. 이 시스템의 특징은 주열교환기내에서 일정한 온도범위에서 액상 및 기상의 2가지 상(相) 변화를 다룰 수 있는 초저온 열교환기를 사용한다. 단일 성분의 냉매시스템보다는 천연가스의 상변화곡선에 더 근접하게 되기 때문에 좀 더 효율적인 시스템 설계가 가능하다.

실제 상업용 플랜트는 원료가스에 포함된 많은 불순물을 ppm 수준까지 제거하기 위한 전처리 설비를 사용하나, 본 연구에서는 비용상 전처리 설비는 생략하였다. 수분이나 CO2 성분 등은 piping plugging이나 열교환기에 손상을 미칠 수 있으며, 특히 수은 성분은 알미늄 재질로 되어 있는 열교환기에 부식 등의 문제를 야기할 수도 있다. 또한 많은 양의 질소성분도 후처리 과정에서 제거되야만 한다.

현재까지 천연가스 액화 공정으로 많은 공정들이 미국, 일본 등의 선진 플랜트 업체를 중심으로 개발되어 왔다. 그 중에서 본 테스트베드 Train-1에 사용된 공정은 상용급으로 사용되고 있는 APCI의 C3/MR 액화 공정의 제어로직을 기술한다.

아래의 그림 2.2.155은 현재 APCI사에서 상용화하여 사용되고 있는 Propane precooling mixed refrigerant (이하 C3MR) 공정을 나타내고 있다. C3MR 공정은 천연가스를 다단의 압력 레벨을 이용한 프로판 냉매로 약 -40℃까지 예냉각을 시킨 후 다시 천연가스의 주성분인 질소, 메탄, 에탄, 프로판 4가지 성분으로 이루어진 혼합냉매를 이용하여 -160℃ 이하로 냉각 시켜 액화하는 공정이다. LNG 생산량은 4.7~5 MTPA이다. 이 공정은 APCI 사에서 개발하여 높은 액화 효율로 현재 LNG 플랜트 설비의 60%이상을 차지하고 있다.

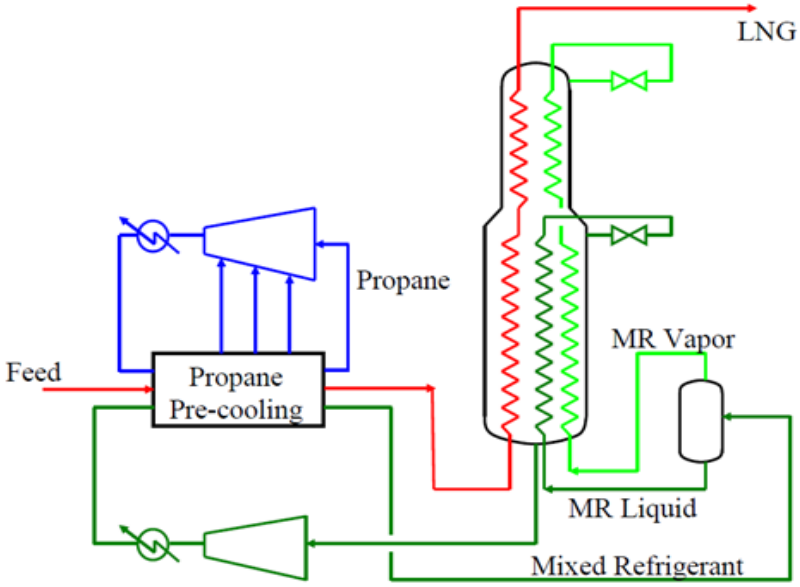



그림 2.2.155. propane precooling mixed refrigerant process

외부 변화에 대한 대처 능력이나 LNG 생산량의 증감 변화요구에 대응하기 위해서 LNG 플랜트의 적절하고 효율적인 제어시스템의 설계 및 구현이 중요하다. 예를 들면 LNG 생산량 및 LNG 생산온도의 독립적인 운전제어는 LNG 플랜트 운전에 매우 중요한 요소이다. 플랜트 운전원은 LNG 생산량 요구에 대응하여 스케줄에 적합한 LNG 생산량 운전조건을 유지할 수가 있다.

일반적인 LNG 액화 공정은 천연가스가 열교환기에 공급되어 액화된후, 과냉되는 과정을 거친다. 액화과정중에 혼합냉매(multicomponent refrigerant, MR)는 Precooling 과정을 거치면서 기액분리기(phase separator)에서 액체냉매(MRL)과 기체냉매(MRV)로 분리되어 MRL은 초저온 열교환기에서 증발잠열을 제공함으로써 천연가스액화에 필요한 냉동부하를 공급하며, MRV는 과냉(subcooling)부하를 담당하면서 기액 분리된 MR의 기체 냉매부분의 응축하는 역활도 담당한다. LNG 플랜

트의 LNG 생산량 및 생산온도제어는 냉매량을 조절함으로써 이루어진다. 일반적인 LNG 플랜트 제어목표치(set point)는 시간당 LNG 생산량, LNG 생산온도, MRL/MRV 비 등이다. 이에 대응하는 조작변수는 MR 압축기 속도 및 MR/LNG 비이다.

다. 시스템 조절 변수 및 자유도 분석

플랜트의 제어자유도 개수는 조절 변수(manipulated variables)의 수와 같다. 제어자유도의 개수 은 보통 공정에서의 독립변수 개수로 쉽게 구할 수 있고, 보통 조정 가능한 밸브의 개수 및 조정 가능한 전기적 기계적 변수들의 합이다. 자유도 최적화(optimization degrees of freedom) 의 정의로 자유도는 운전 경비에 영향을 미친다. 대부분의 경우에서 경비는 단지 정상상태에만 좌우된다. 는 정상상태에서의 자유도 와 같다. 정상상태에서의 자유도 는 다음의 식에 의해 구해진다.

$$N_{ss} = N_m - (N_{0m} + N_{0y})$$

$N_{0m}$ : 정상상태의 영향을 받지 않는 조절변수(ex. 열교환기에서의 bypass)
$N_{0y}$ : 정상상태의 영향을 받지 않는 제어변수(ex. Tank에서 Liquid level)

변수의 개수를 정하는 것은 중요한 일이다. 그것만큼 중요한 일 중 하나가 그 변수의 범위를 지정해 주는 일이다. 예를 들어 BSU의 경우 밸브의 총 개수를 20개라 하면(임의의 값), 압축기의 buffer tank 2개, receiver tank 2개, MR separator 1개, mixer 1개, LNG separator 1개 총 7개 이므로 =13이 된다. 따라서 자유도 최적화 개수 역시 13개가 된다.

이를 바탕으로 작성한 Train-1 제어로직은 다음 그림에 표시한다.

라. 테스트베드(Train-1) 제어로직 검증 모델

제안된 제어 시스템의 특성 분석을 위해서 HYSYS나 UNISIM과 같은 공정 동적해석 프로그램을 이용하여 모델링을 실시하였다. 테스트베드의 Train-1에 적용되는 압축기 및 열교환기 제작자 설계데이터를 이용하여 동적해석을 하는 것이 원칙이겠으나, 현 연구단계에서 데이터 획득의 어려움으로 인하여 LNG BSU에 적용된 실 데이터를 사용하여 동적공정 모델링을 실시하여 분석하였다.

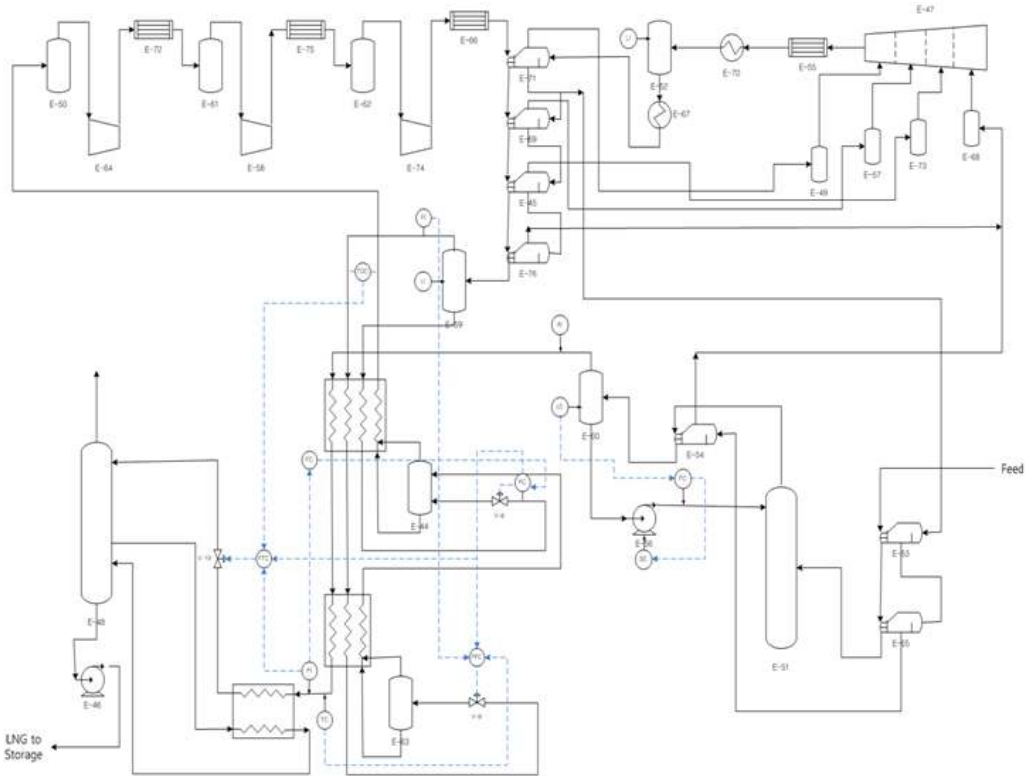



그림 2.2.156. 테스트베드 Train-1 제어로직 설계(안)

아래 그림 2.2.157 은 주열교환기중심의 콜드박스를 모델링한 예이다.
그림 2.2.158 및 그 이하는 APCI 제어로직과 달리 J-T 밸브의 압력차 및 주요 공정온도를 캐스케이드 형태로 제어하는 구조이며 200분정도 경과시 시스템의 거동을 나타내주는 결과를 나타내 준다.

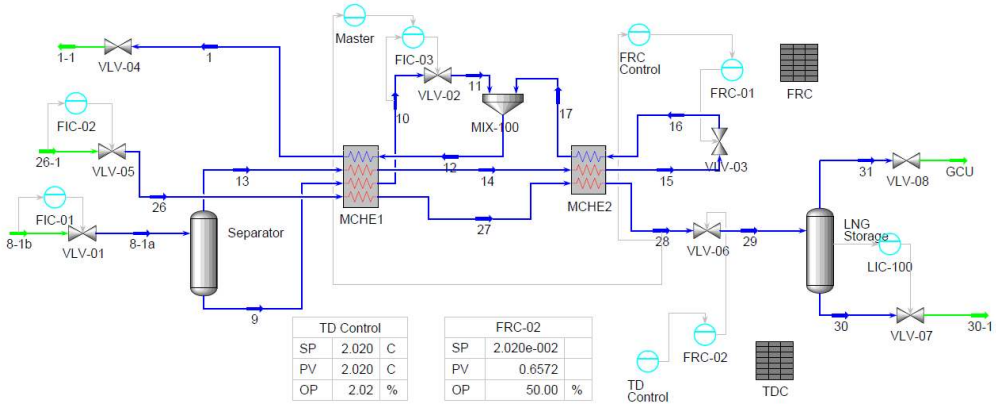



그림 2.2.157. Control structure of the BSU cryogenic heat exchanger

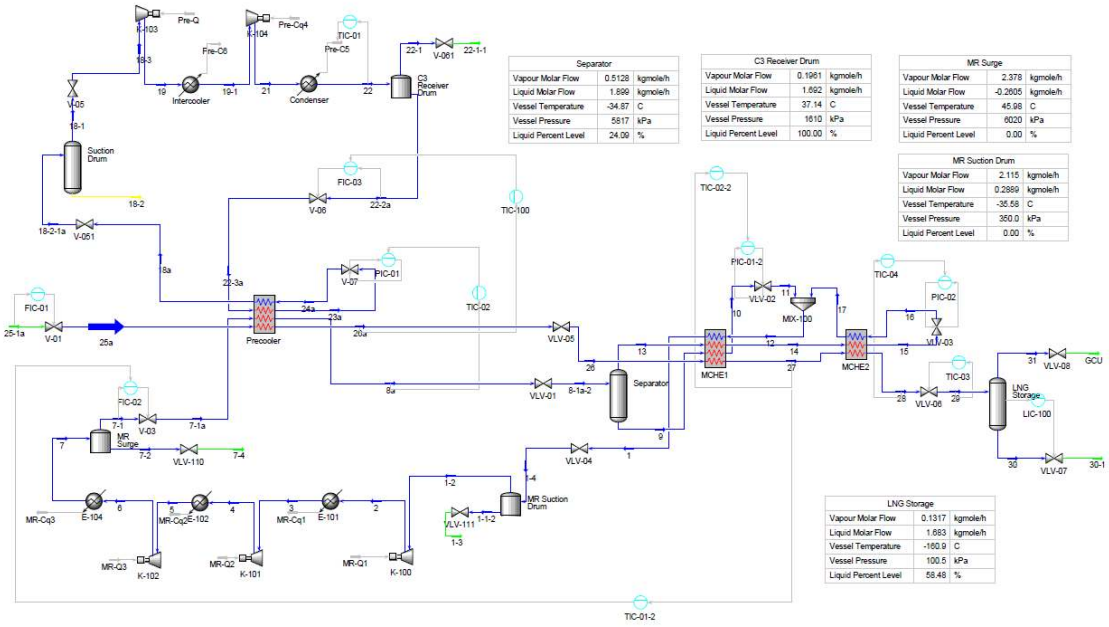



그림 2.2.158. Control structure of the BSU System

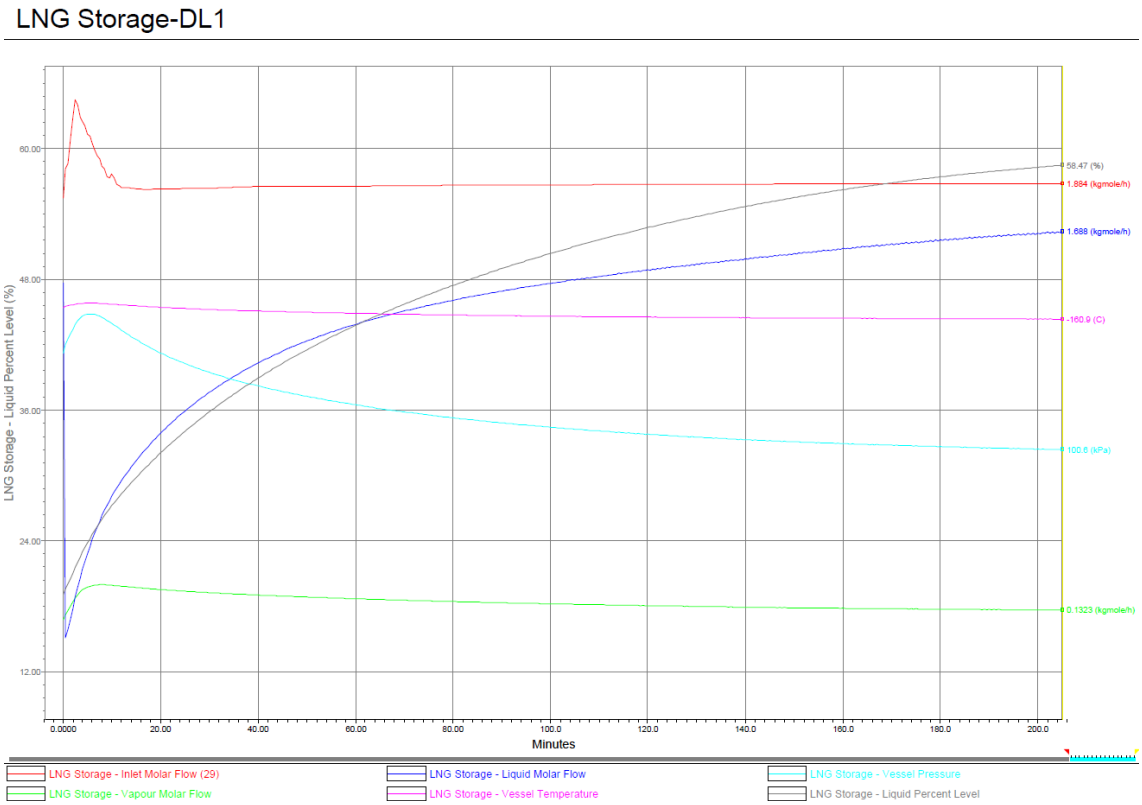



그림 2.2.159. Simulation of LNG Production(time=200 min)

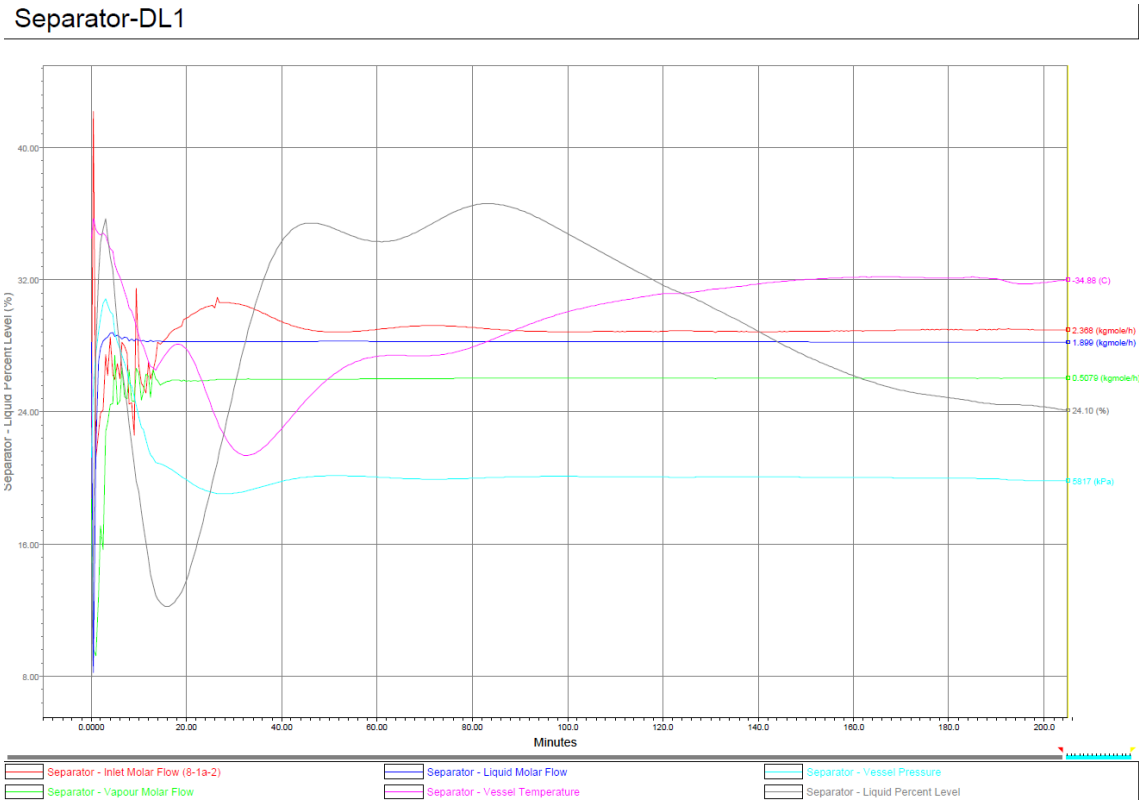



그림 2.2.160. Simulations of MR Separator(time=200 min)

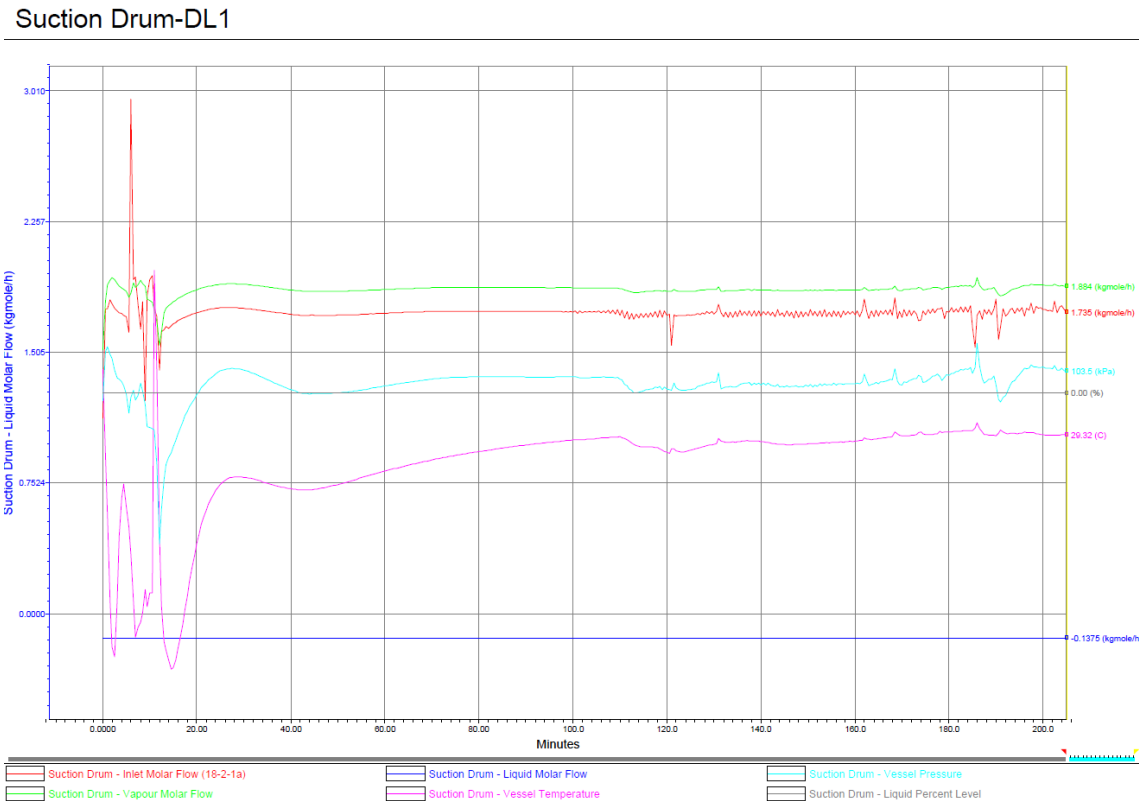



그림 2.2.161. Simulations of Propane Cycle Suction Drum(time=200 min)

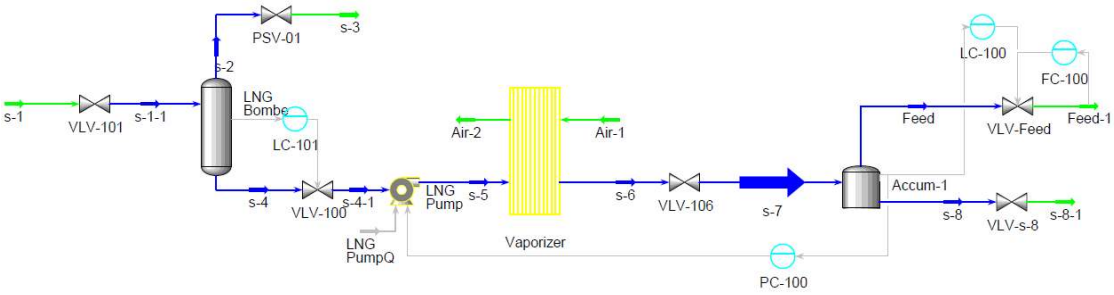



그림 2.2.162. NG Supply Model from LNG bottle

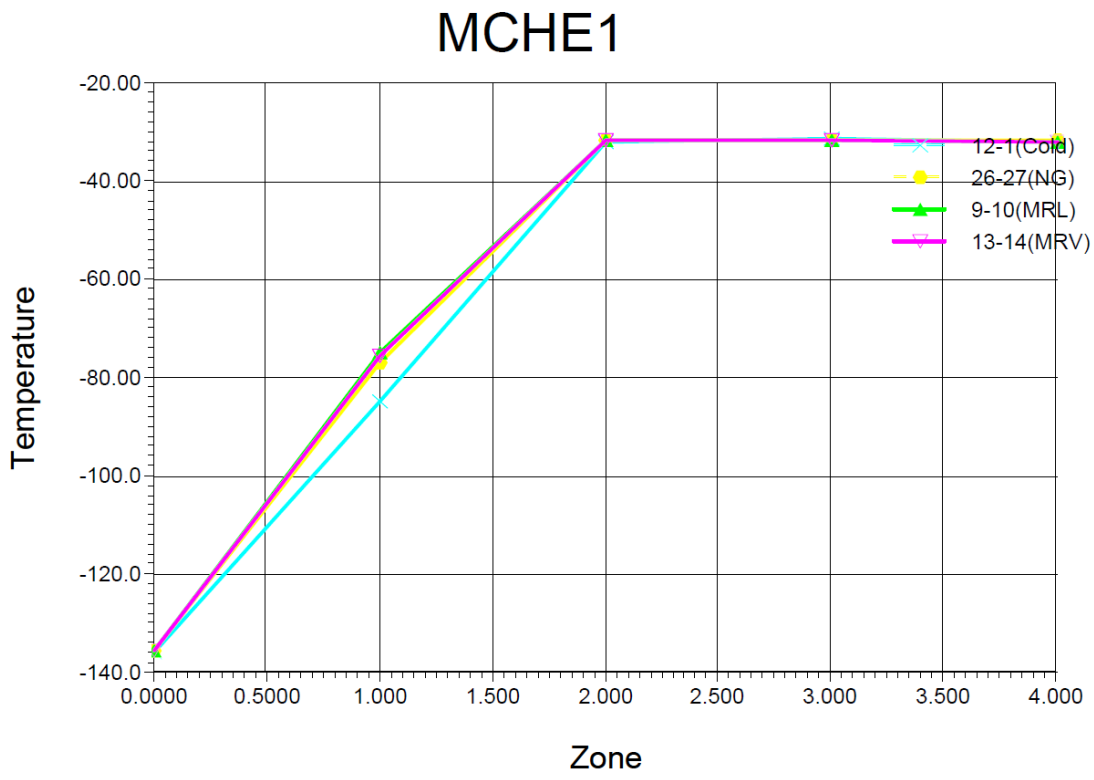
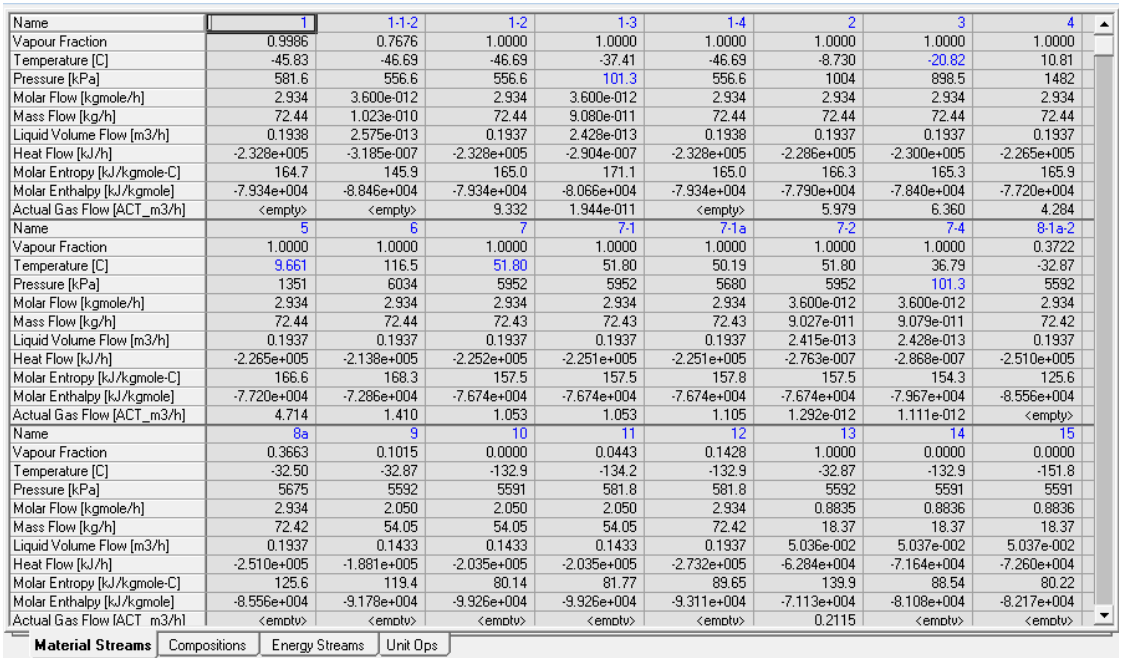



그림 2.2.163. Simulation of MCHE1 Temperature Distribution (time=2days)

BSU 정적 모델에서 동적 모델로 변환해서 기자재 및 밸브를 사이징하고 컨트롤러를 추가해서 제어부를 구성 및 튜닝해서 동적 모사를 실행시킨다. 동적 모사가 안정상태로 접어들면 그 때의 스트림별 상태를 나타낸 그림이 아래와 같이 나타난다.



| Name | 1 | 1-1-2 | 1-2 | 1-3 | 1-4 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vapour Fraction | 0.9986 | 0.7676 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Temperature [C] | -45.83 | -46.69 | -46.69 | -37.41 | -46.69 | -8.730 | -20.82 | 10.81 |
| Pressure [kPa] | 581.6 | 556.6 | 556.6 | 101.3 | 556.6 | 1004 | 898.5 | 1482 |
| Molar Flow [kgmole/h] | 2.934 | 3.600e-012 | 2.934 | 3.600e-012 | 2.934 | 2.934 | 2.934 | 2.934 |
| Mass Flow [kg/h] | 72.44 | 1.023e-010 | 72.44 | 9.080e-011 | 72.44 | 72.44 | 72.44 | 72.44 |
| Liquid Volume Flow [m3/h] | 0.1938 | 2.575e-013 | 0.1937 | 2.428e-013 | 0.1938 | 0.1937 | 0.1937 | 0.1937 |
| Heat Flow [kJ/h] | -2.328e+005 | -3.185e-007 | -2.328e+005 | -2.904e-007 | -2.328e+005 | -2.286e+005 | -2.300e+005 | -2.265e+005 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 164.7 | 145.9 | 165.0 | 171.1 | 165.0 | 166.3 | 165.3 | 165.9 |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -7.934e+004 | -8.846e+004 | -7.934e+004 | -8.066e+004 | -7.934e+004 | -7.790e+004 | -7.840e+004 | -7.720e+004 |
| Actual Gas Flow [ACT_m3/h] | <empty> | <empty> | 9.332 | 1.944e-011 | <empty> | 5.979 | 6.360 | 4.284 |
| Name | 5 | 6 | 7 | 7-1 | 7-1a | 7-2 | 7-4 | 8-1a-2 |
| Vapour Fraction | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.3722 |
| Temperature [C] | 9.661 | 116.5 | 51.80 | 51.80 | 50.19 | 51.80 | 36.79 | -32.87 |
| Pressure [kPa] | 1351 | 6034 | 5952 | 5952 | 5680 | 5952 | 101.3 | 5592 |
| Molar Flow [kgmole/h] | 2.934 | 2.934 | 2.934 | 2.934 | 2.934 | 3.600e-012 | 3.600e-012 | 2.934 |
| Mass Flow [kg/h] | 72.44 | 72.44 | 72.43 | 72.43 | 72.43 | 9.027e-011 | 9.079e-011 | 72.42 |
| Liquid Volume Flow [m3/h] | 0.1937 | 0.1937 | 0.1937 | 0.1937 | 0.1937 | 2.415e-013 | 2.428e-013 | 0.1937 |
| Heat Flow [kJ/h] | -2.265e+005 | -2.138e+005 | -2.252e+005 | -2.251e+005 | -2.251e+005 | -2.763e-007 | -2.868e-007 | -2.510e+005 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 166.6 | 168.3 | 157.5 | 157.5 | 157.8 | 157.5 | 154.3 | 125.6 |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -7.720e+004 | -7.286e+004 | -7.674e+004 | -7.674e+004 | -7.674e+004 | -7.674e+004 | -7.967e+004 | -8.556e+004 |
| Actual Gas Flow [ACT_m3/h] | 4.714 | 1.410 | 1.053 | 1.053 | 1.105 | 1.292e-012 | 1.111e-012 | <empty> |
| Name | 8a | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Vapour Fraction | 0.3663 | 0.1015 | 0.0000 | 0.0443 | 0.1428 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| Temperature [C] | -32.50 | -32.87 | -132.9 | -134.2 | -132.9 | -32.87 | -132.9 | -151.8 |
| Pressure [kPa] | 5675 | 5592 | 5591 | 581.8 | 581.8 | 5592 | 5591 | 5591 |
| Molar Flow [kgmole/h] | 2.934 | 2.050 | 2.050 | 2.050 | 2.934 | 0.8835 | 0.8836 | 0.8836 |
| Mass Flow [kg/h] | 72.42 | 54.05 | 54.05 | 54.05 | 72.42 | 18.37 | 18.37 | 18.37 |
| Liquid Volume Flow [m3/h] | 0.1937 | 0.1433 | 0.1433 | 0.1433 | 0.1937 | 5.036e-002 | 5.037e-002 | 5.037e-002 |
| Heat Flow [kJ/h] | -2.510e+005 | -1.881e+005 | -2.035e+005 | -2.035e+005 | -2.732e+005 | -6.284e+004 | -7.164e+004 | -7.260e+004 |
| Molar Entropy [kJ/kgmole-C] | 125.6 | 119.4 | 80.14 | 81.77 | 89.65 | 139.9 | 88.54 | 80.22 |
| Molar Enthalpy [kJ/kgmole] | -8.556e+004 | -9.178e+004 | -9.926e+004 | -9.926e+004 | -9.311e+004 | -7.113e+004 | -8.108e+004 | -8.217e+004 |
| Actual Gas Flow [ACT_m3/h] | <empty> | <empty> | <empty> | <empty> | <empty> | 0.2115 | <empty> | <empty> |

Material Streams | Compositions | Energy Streams | Unit Ops

그림 2.2.164. BSU 동적모사 워크북

동적 모사기를 통해 추출된 주요 스트림의 상태와 BSU 설계 데이터와의 차이를 알아보면 다음의 표와 같다.

표 2.2.32 주요 데이터 설계치 비교

| 항목 | BSU 설계안 | 동적 모사 결과 | 오차율 |
|---|---|---|---|
| 예냉온도 | -32.7℃ | -32.5℃ | 0.6% |
| MCHE 1 냉각온도 | -130℃ | -133℃ | 2.3% |
| MCHE 2 냉각온도 | -149.2℃ | -151.9℃ | 1.8% |
| LNG 최종온도 | -158.6℃ | -160.3℃ | 1.1% |
| 혼합냉매 토출 압력 | 60.0 bar | 57.1 bar | 5.0% |
| 천연가스 압력 | 70.0 bar | 70.2 bar | 0.3% |

BSU 설계안에서는 Train-1 설계안을 기반으로 해서 초저온 열교환기 기액분리기에 공급되는 혼합냉매의 설계온도를 -32.9℃로 설계되어 있으나, 프로판 예냉시스템(precooler)에서 압축기 흡입측 압력을 0.5 barg 이하로 운전하는 것이 필요하다. 압축기 흡입측 압력의 기본적인 설계요구조건인 공기침투를 막기위해서는 대기압이상으로 운전하는 것이 필요하므로 운전범위가 대단히 좁아질 수 있다. 따라서 기본적인 시운전조건을 좀더 완화할 필요가 있어 혼합냉매 기액분리기 입구 온도 -25℃의 설계 조건에 대해서 비교평가를 실시하였다.

| 구 분 | | 1(MR) | 9(MRV) | 10(MRL) | 비고<br>(프로판 증기압) |
|---|---|---|---|---|---|
| -25℃<br>경우 | Mass<br>Flow(kg/h) | 69.68 | 18.53 | 51.14 | 1 Barg |
| | Act. Vol.<br>Flow(m³/h) | 13.86 | 0.195 | 0.137 | |
| -32.9℃<br>경우 | Mass<br>Flow(kg/h) | 60.74 | 10.49 | 50.24 | 0.5 Barg |
| | Act. Vol.<br>Flow(m³/h) | 12.07 | 0.109 | 0.133 | |

위는 하이시스/Unisim 등의 공정해석 프로그램을 이용한 결과이며 -25℃ 경우에는 약 MR 유량이 15% 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 곧 에너지 효율은 나빠지지만, BSU와 같은 플레이트-핀타입 precooler를 사용할 경우 압축기 흡입측의 안전한 운전을 위해서는 일정부문 감안해서 시운전할 때 변화를 나타내었다.

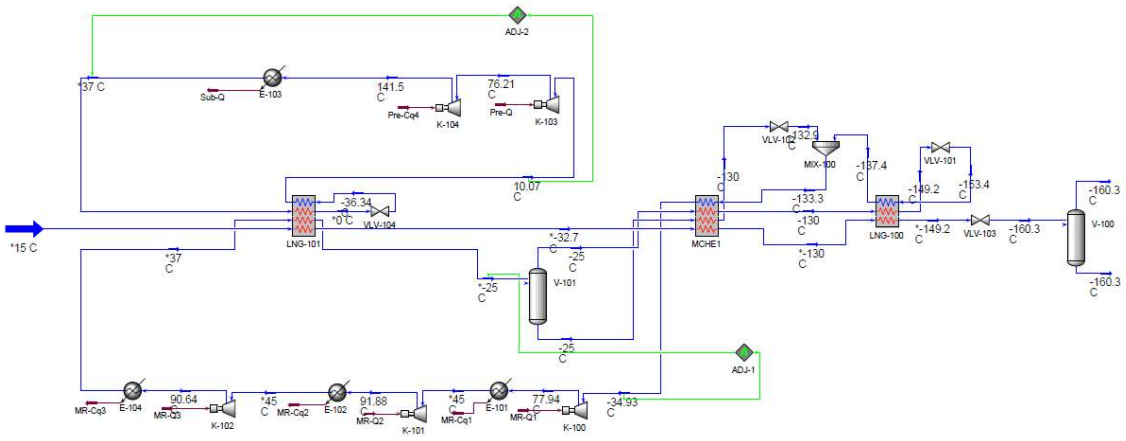



그림 2.2.165. MR 기액 분리기입구 온도가 -25℃ 인 경우 온도 분석

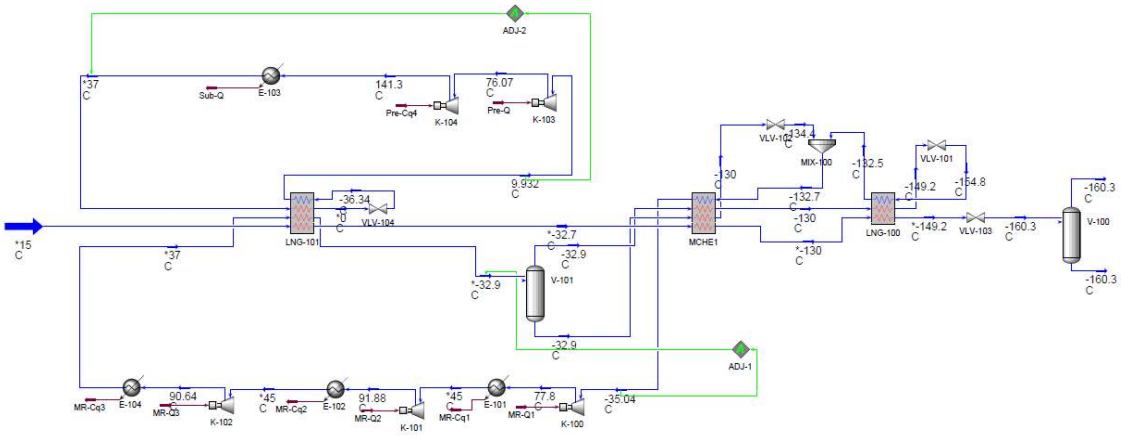



그림 2.2.166. MR 기액 분리기입구 온도가 -32.9℃ 인 경우 온도 분석

(2) 테스트베드(Train-1) regulatory 제어 최적화

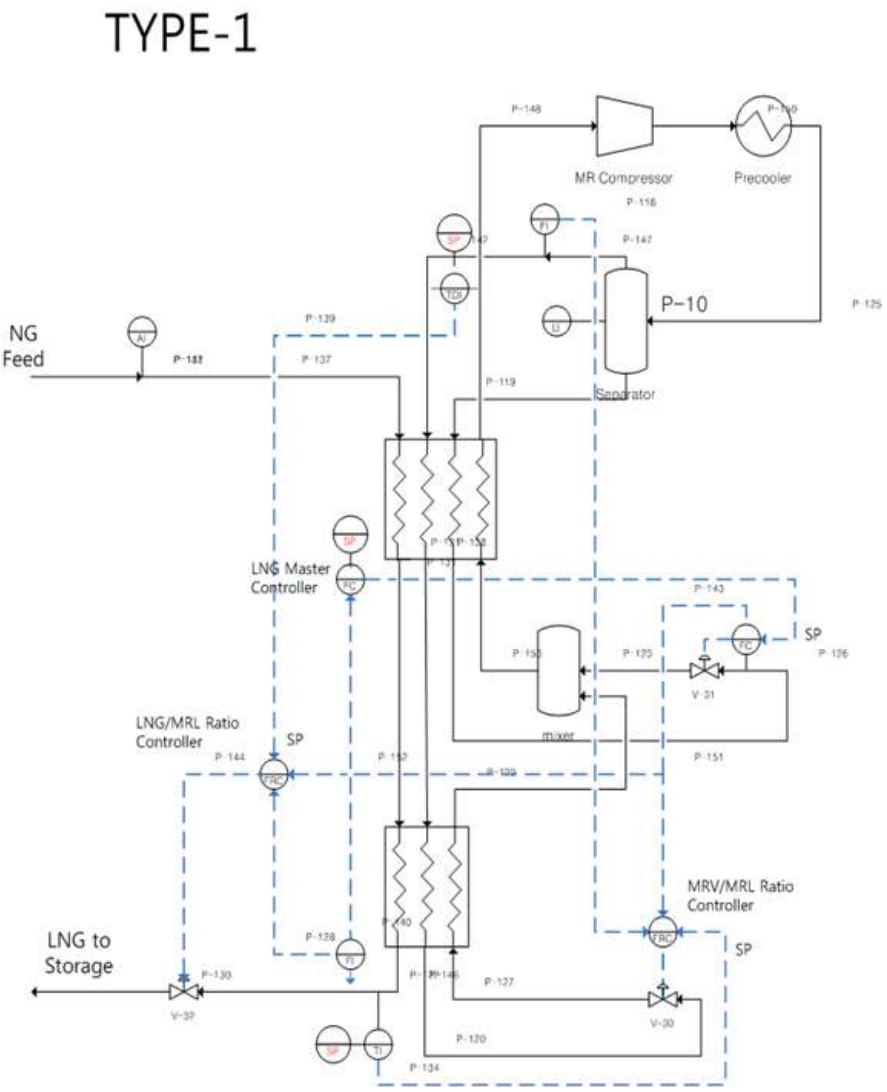



그림 2.2.167 MCHE Conrol Logic Structure-I

위 그림 2.2.167에서 set point는 LNG 생산량을 나타내는 LNG Master Controller, LNG 생산온도(T1), MRV와 MR 압축기 흡입측 온도차(TDI)의 3 군데로 운전자가 목표로 하는 지정값이다. 플랜트 운전원은 이 3개의 set point가 정해지면 플랜트 운전에 필요한 나머지 set point는 cascade ratio 방식에 의해서 모두 정해지게 된다.

아래 그림은 운전원에 의해서 주어지는 set point는 동일하나 캐스케이드구성을 달리해서 생각해 볼 수 있는 제어 구조이다.

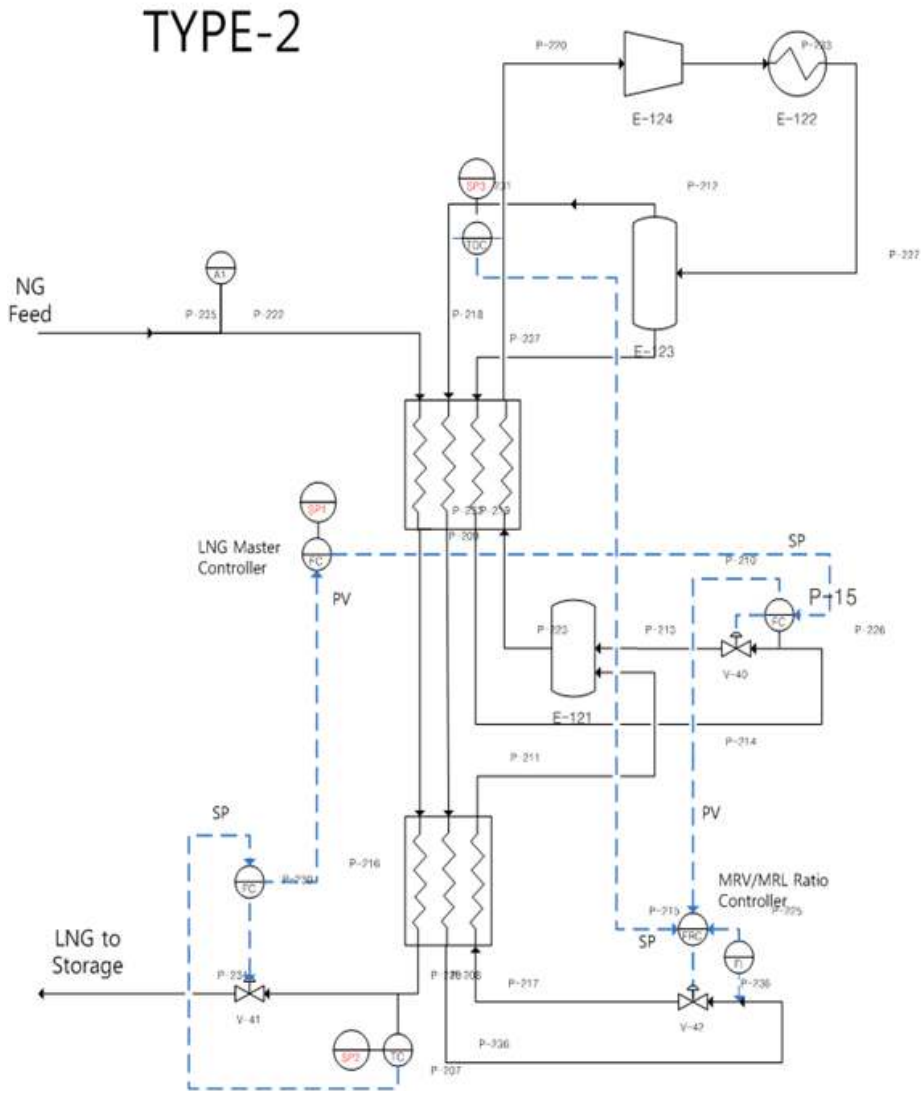
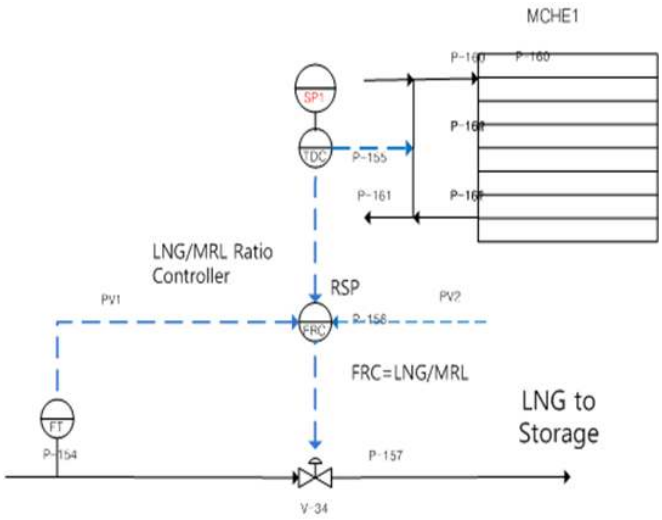



그림 2.2.168 MCHE Control Logic Structure-II

위 그림에서 보여주는 Ratio Controller를 좀 더 자세히 표현하면 다음 그림과 같다.

1)LNG/MRL Ratio Control

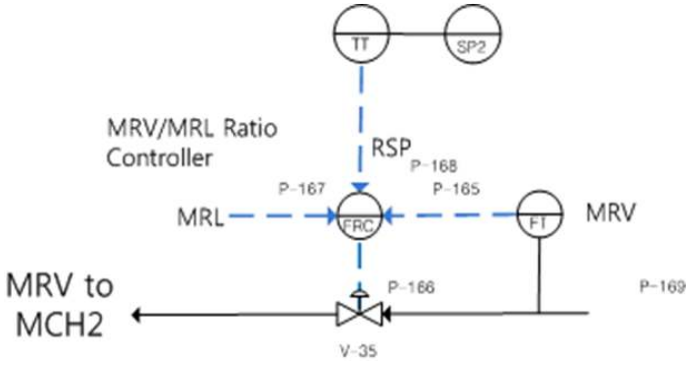



PV1=LNG

PV2=MRL

TDC=WETD

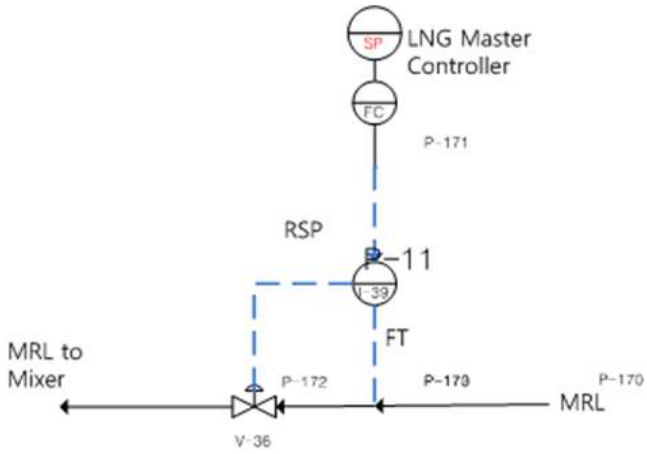
2)MRV/MRL Ratio Control




FRC=MRV/MRL

TT=LNG Product Temperature

3)MR Flow Control




PV = MRL flow

SP = LNG Master controller output

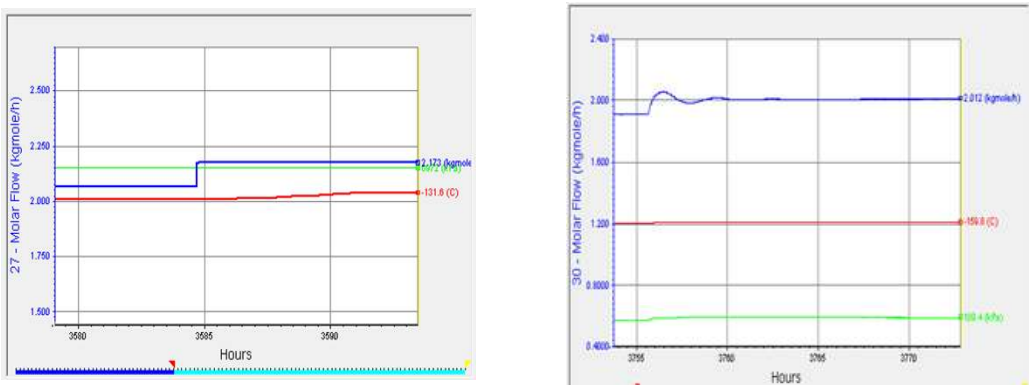
이와 같이 LNG/MRL 및 MRV/MRL ratio control을 사용해서 어떤 외란이 일어났을 때, 어떤 변수에 대한 하나의 스트림에 과도한 부하를 줄일 수 있을 뿐 아니라 급격한 변화가 일어난다고 하더라도 세 스트림에 대해서 분할해서 부하를 분배할 수 있으므로, 시스템의 안정성에 효과를 볼 수 가 있다.

테스트베드(Train-1)의 제어 검증 모델을 활용하여 위의 두 경우에 대해서 외란에 대한 응답 특성을 알아보고, 어떤 제어 로직이 최적의 제어로직인가를 판단 할 수 있다.

◦ LNG 유량 변화에 따른 수율 및 온도 변화

LNG 액화 공정에서의 외란은 주위의 온도 변화, 냉매의 순환 및 압력 변화, Feed 유량 및 압력의 변화 등 여러 가지가 있으나, 시스템에 가장 많은 변화를 줄 수 있는 Feed 유량의 변화에 대해서만 살펴보았다. Feed의 유량 변화에 따라서 시스템이 능동적으로 대처하지 못한다면, 시스템의 불안정을 야기 할 수 있을 뿐 아니라 생산물인 LNG의 품질을 저하 시킬 수 있으므로, 가장 중요시하게 여겨 질 수 있는 변수라 할 수 있다.

Type 1에 대해서 제어로직을 구성하고, 모든 컨트롤러를 auto 모드로 세팅 한 후, 정상상태에서 Feed 유량에 대한 외란을 주었을 때의 LNG 생산량에 대한 응답 특성이다.




(a) (b)

그림 2.2.169 Type 1 계단 응답 (a) Feed 유량 변화, (b) 계단 응답 특성

다음의 그림은 Type 2에 대해서 제어로직을 구성하고 Feed 유량에 대한 외란을 주었을 때 LNG 생산량 변화에 대한 내용을 나타낸다.

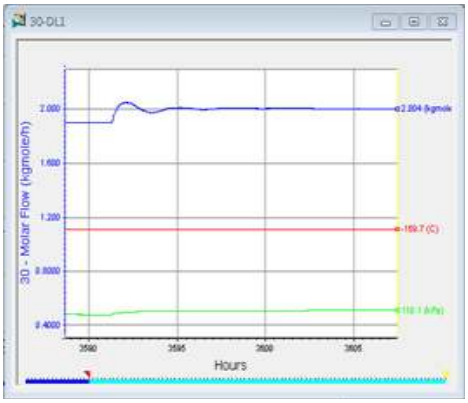



그림 2.2.170. Type 2의 계단 응답 특성

겉보기에 Type 1과 Type 2는 비슷한 응답을 보이는 것으로 나타났지만, 계단 변화에 대한 응답과 안정상태까지의 시간이 Type 1이 Type 2에 비해서 근소하게 빠르며, 최종 생산물인 LNG의 생산량도 근소하게 많이 생산되는 것으로 나타났다.

◦ LNG 변화에 따른 압축기 응답

다음 그림은 Type 1에 대한 혼합냉매 압축기의 특성을 나타낸다. 나타난 것은 압축기 흡입쪽 압력 및 토출 압력 그리고 소요 동력 및 분당 회전수 등이 나타나 있다. 마찬가지로 천연가스 유량이 일부 증가하였을 때의 모습이다.

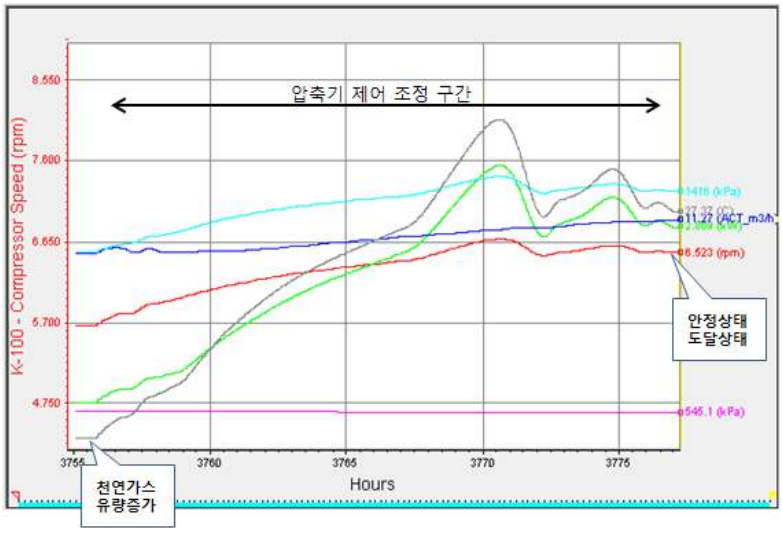



그림 2.2.171. Type 1 압축기 응답 곡선

같은 방법으로 Type 2에 대한 압축기 응답 곡선을 나타내 보았다. 천연가스 유량이 36kg/h에서 39kg/h로 증가하였을 때 압축기 제어기에 따른 응답이 아래와 같다.

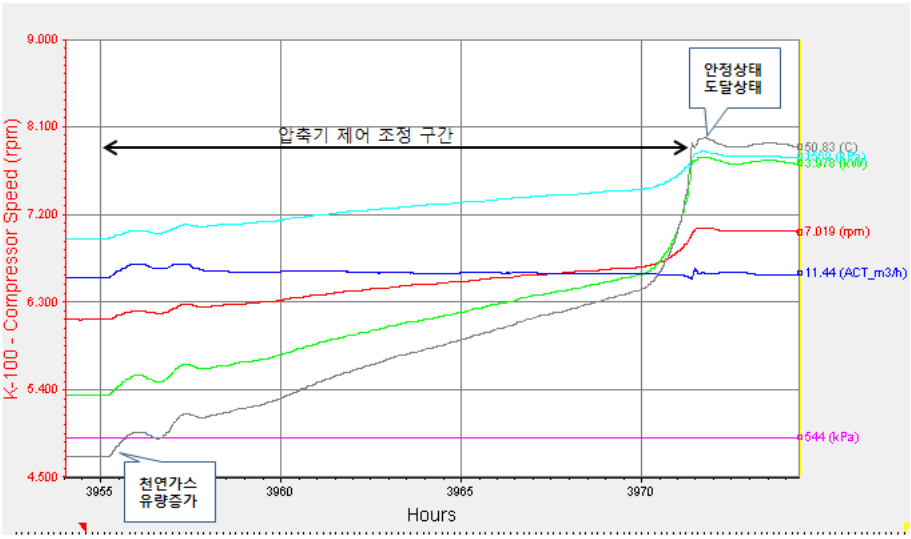



그림 2.2.172. Type 2 압축기 응답 곡선

Type 1에 대한 압축기 응답 곡선을 보면 Type 2에 비해서 전체적으로 압축기 효율면에서 좋은 양상을 나타낸다. 즉 제어 결과 최종 안정상태에서 Type 2에 비해서 낮은 분당회전수 및 소요전력을 나타내고 있다. 그리고 Type 2에 비해서 완만한 응답을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 다만 Type 2에서는 Type 1에 비해서 근소하게 빠른 안정상태를 찾아가는 것을 확인 할 수 있었는데, 이것은 실제 LNG 플랜트 설계 시 좋은 자료로 활용 될 수 있을 것이라 판단된다.

◦ 주요 기자재 응답

LNG 액화 공정에서 중요한 위치를 차지하는 것 중에 하나가 MR 기액 분리기이다. 원하는 유량의 MRL과 MRV를 내 보낼 수 있는 버퍼 장치라 할 수 있다. 이 기액분리기 상태가 불안정해지면 전체 시스템의 냉매 공급에 지장을 초래할 수 있으므로 그 상태를 확인 하는 것이 필요하다. 아래 그림은 Type 1에서 LNG 유량을 증가 스켰을 때의 기액분리기 변화 트랜트이다.

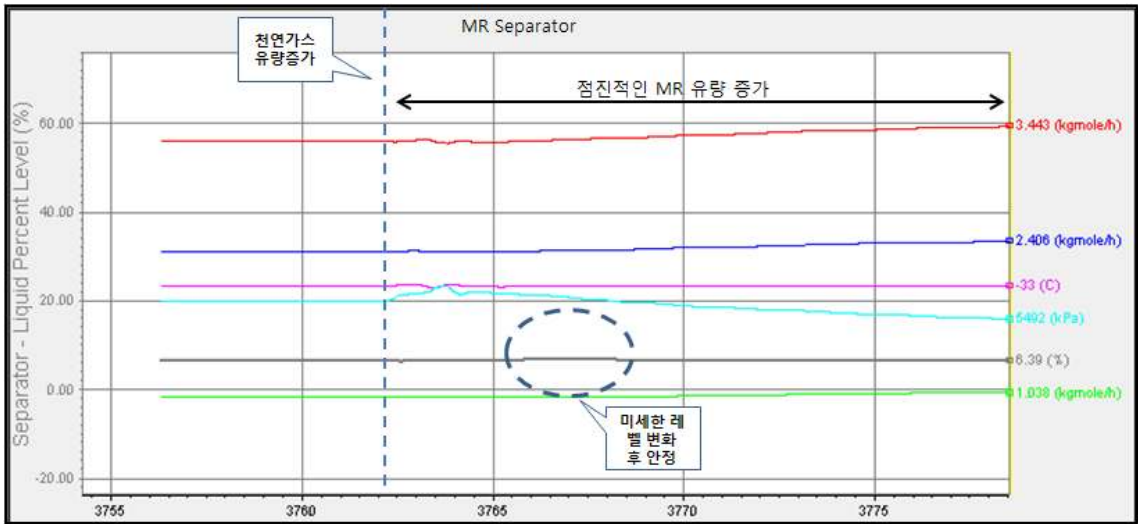



그림 2.2.173. Type 1 기액 분리기 응답 곡선

천연가스의 유량이 증가하면서 제어기로부터 선형적으로 혼합냉매의 비율을 증가시키는 결과를 확인할 수 있으며, 기액분리기의 레벨은 미세하게 변화가 잠시 있다 다시 안정을 되찾았다. Type 2에 대한 같은 변화는 아래 그림과 같다.

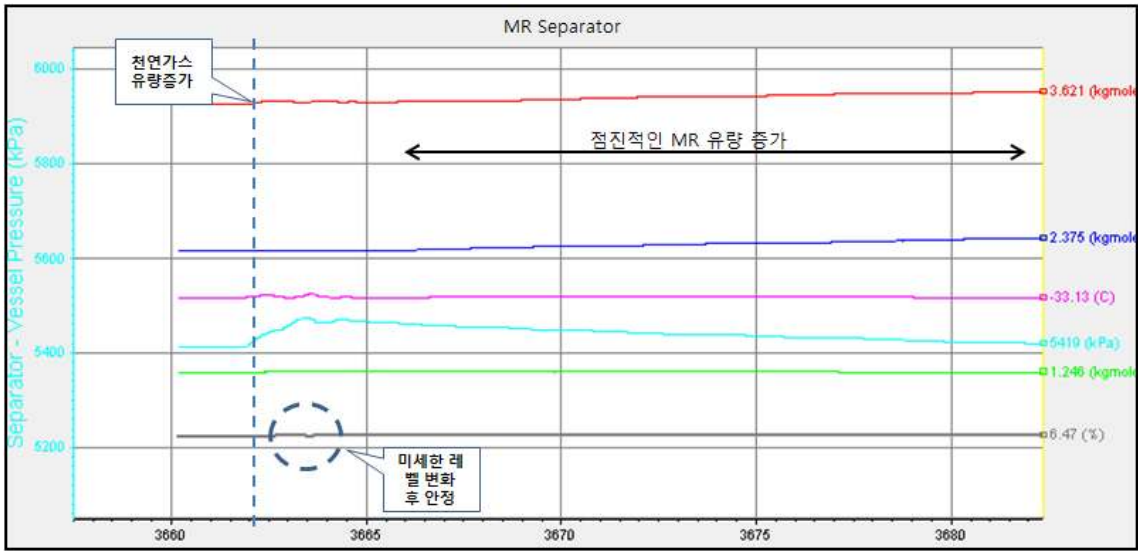



그림 2.2.174. Type 2 기액분리기 응답 곡선

Type 2에 대해서도 거의 비슷한 양상을 보이고 있으며, Type 1 보다는 약간 빠르게 레벨의 안정을 볼 수 있으나, 이는 전체적인 영향을 미치지 못한다.

다음으로 MRL의 제어밸브에 대한 변화를 살펴보았다. MRL의 제어밸브는 전체 유량을 제어하는 역할을 함과 동시에 차압을 이용한 JT효과를 볼 수 있게 해주는 아주 중요한 기자재라 할 수 있다. 제어기의 명령에 따라 천연가스 유량 증가에 따라서 MRL의 유량을 증가시키기 위해 밸브를 여는 동작을 할 것이 예상되며, 그에 따른 응답은 아래 그림과 같다.

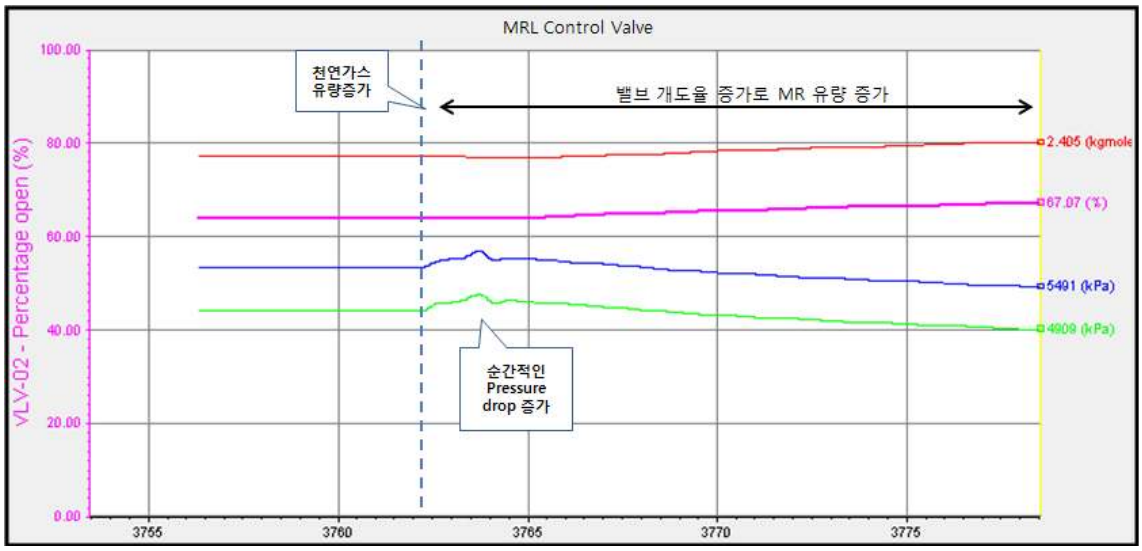



그림 2.2.175. Type 1 MRL 제어밸브 응답곡선

Type 1에 대한 제어밸브 응답 곡선을 살펴보면 앞서 언급한 바와 같이 밸브의 개도를 통해서 유량이 점차 증가되는 것을 확인할 수 있으며, 마찬가지로 천연가스의 유량 증가로 인해서 밸브의 개도가 열리는 것을 확인할 수 있다. 최초 천연가스의 유량 증가에 따른 혼합냉매의 유량 증가로 차압이 일시적으로 커지는 것을 확인 할 수 있으며 이 후에 다시 안정 상태를 찾는 것을 확인 할 수 있다. 마찬가지로 Type 2에 대해서도 살펴보면 아래 그림과 같다.

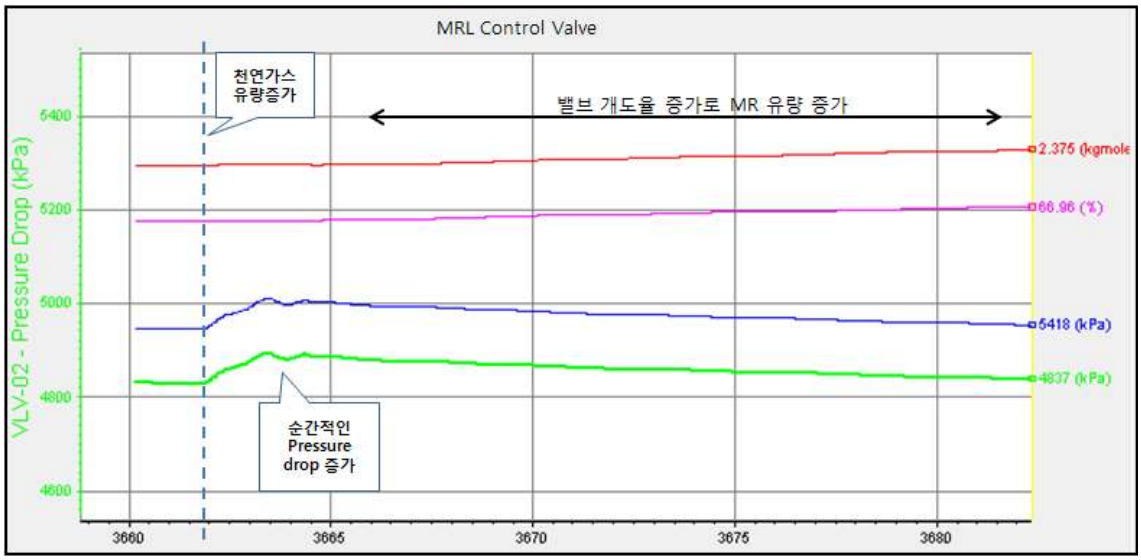



그림 2.2.176. Type 2 MRL 제어밸브 응답곡선

전체적으로 비슷한 양상을 보이고 있으며, 제어밸브 차압의 정도가 Type 1에 비해서 크고 안정되는 시간이 좀 더 길어진 것을 확인 할 수 있다.

다음은 MCHE1 주위의 온도 변화에 대해 살펴볼 필요가 있다. C3MR 공정에서 MCHE1의 온도 강하는 시스템 전체에서 가장 비중있는 부분을 차지하며 모든 혼합냉매가 관여하는 곳으로 MCHE1에서의 온도 강하가 설계에 미치지 못한다면 전체 시스템의 불안정을 야기할 수 있다. MCHE1의 온도를 살펴볼 때 가장 관심있게 지켜볼 사항은 Hot end 부분의 온도 변화이겠지만 아래의 그림을 보면 알 수 있지만, Hot end 이전에 이미 과열도의 온도가 먼저 반응을 보이고 있다. 즉 온도에 변화를 미치는 어떤 변수의 변화에 가장 민감하게 대응하는 것이 과열도라 할 수 있다.

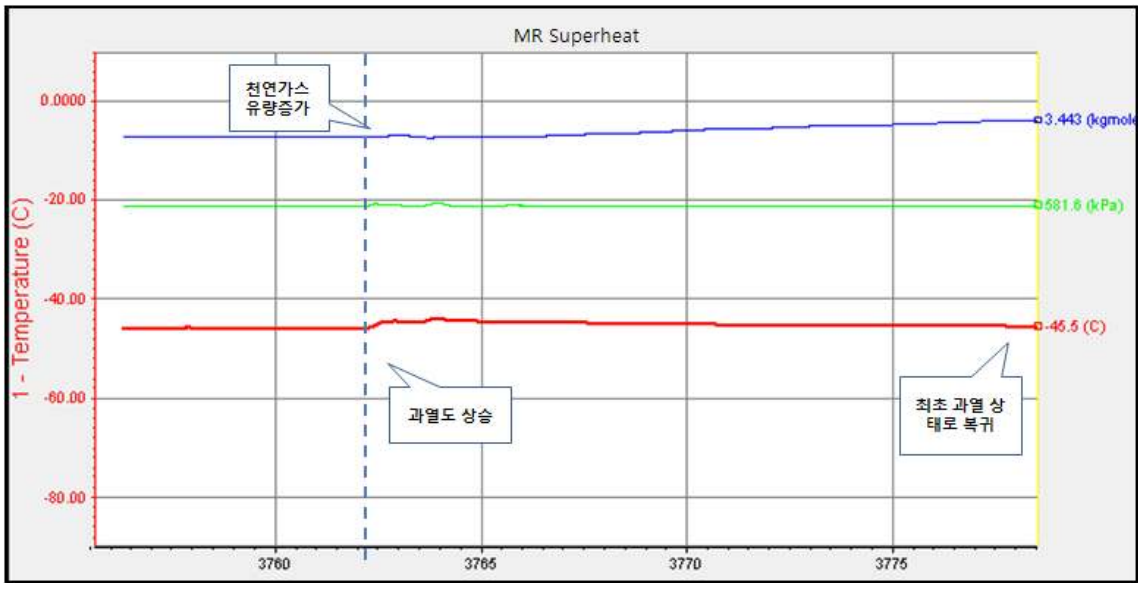


그림 2.2.177. Type 1 과열도 응답곡선

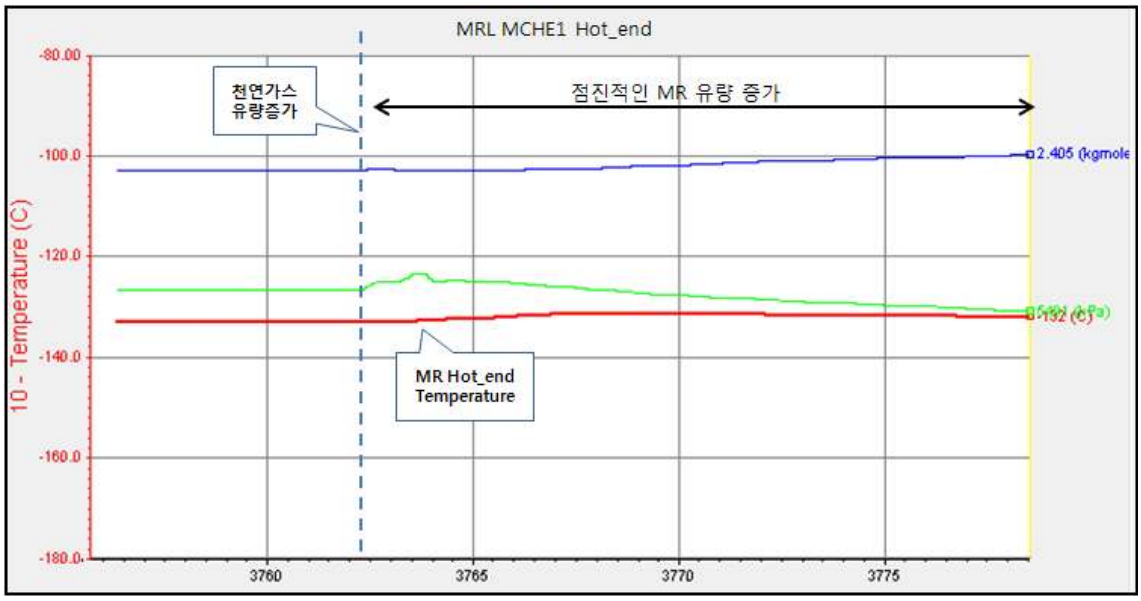



그림 2.2.178. Type 1 MR Hot end 응답곡선

그림을 보면 천연가스의 유량 변화가 일어나고 가장 먼저 과열도에서 변화가 보인다. 즉 핫 스트림의 유량이 늘어나면서 과열도가 커지고 그것에 대해 냉매의 보상이 있으면서 다시 원래의 과열도를 찾아가는 것을 볼 수 있다. 반면 MCHE1의 Hot end와 같은 경우에는 아주 반응이 느리게 천천히 온도의 변화가 있었다 차츰 원래의 온도로 돌아가는 형태를 가진다. 만일 과열도에 대한 적절한 제어가 되지 않는다면, Hot end의 온도 변화를 제대로 제어 할 수 없을 것이다.

Type 2에 대한 변화를 비교해 보면 아래의 그림과 같다.

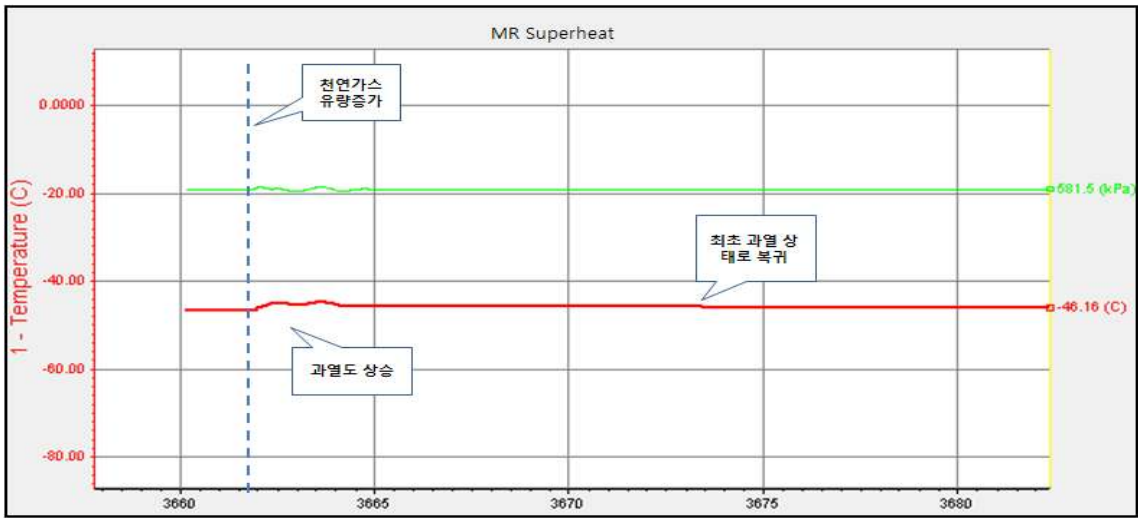



그림 2.2.179. Type 2 과열도 응답곡선

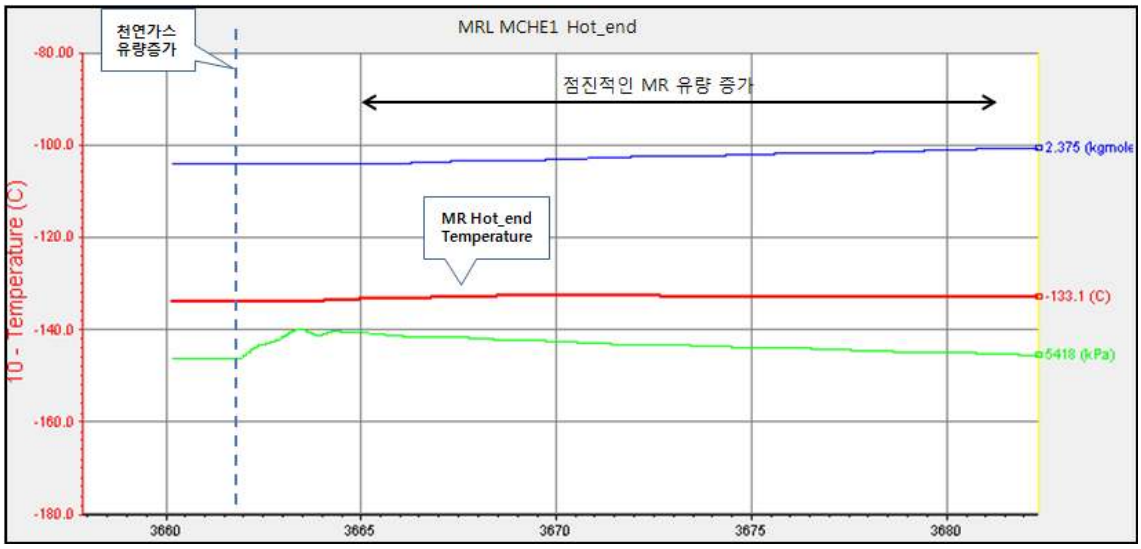



그림 2.2.180. Type 2 MR Hot end 응답곡선

여기서 MCHE1에서의 온도 변화는 Type 1과 Type 2의 확연한 차이는 보이지 않으며 다만 과열도의 변화폭은 Type 1이 미세하게 적다는 것 정도로 볼 수 있는데, 이것은 그만큼 더 빠른 대응을 할 수 있는 제어방법임을 의미한다. 지금의 응답은 3kg/h 정도의 변화를 주었을 때 나타나는 응답이므로 이보다 더 큰 변화에서는 이 차이가 더 커질 것으로 예상되므로, 비록 지금의 차이가 크지 않더라도 과열도의 폭이 더 적은 쪽으로 선택하는 것이 좋다고 판단된다.

(3) 테스트베드 공정별 계측/제어 표준정립

가. 계측 기기의 선정

◦ 계측기기는 계측 목적, 계측 기간, 계측 항목, 계측 대상, 계측 방법, 계측 환경 등을 고려하여 선정하여야 한다.
◦ 계측 기기는 품질 인증이 된 제품을 사용하여야 하며, 특히 천연가스를 취급하는 플랜트이기 때문에 방폭 인증이 된 제품을 써야한다. 또한 냉매를 측정하는 계측기인 경우에는 고압을 계측해야 하는 경우가 많으므로 고압에서는 그에 맞는 계측기를 사용해야 한다.
◦ 계측 기기는 자료의 정밀도, 기기특성, 현장 조건 등을 고려하여 계측 항목에 따라 적절한 것을 선정해야 한다.
◦ 각종 계측기의 작동방식은 가능한 같은 형식으로 선정하고, 설치 후 제어화면을 통해서 사전 시험 후 사용하도록 한다.
◦ 계측 목적에 적합한 정확도를 가져야하며 최대 예상 변화량 이상의 측정범위를 가져야 한다. 특히 냉매 유량계 같은 경우에는 비정상상태일 때, 2 phase 구간에서 유량의 변동이 크게 될 수 있으므로 설계 유량의 200% 이상 측정 할 수 있어야 한다.

나. 계측 항목의 선정

◦ 플랜트 건설 중 P&ID(Piping & Instrument Diagram)상의 계측 항목은 설계자가 많은 요소들을 고려하여 선정하였으므로 특별한 사유가 없는 한 P&ID를 따라야 한다.
◦ P&ID에 명시된 계측기를 모두 적용하였음에도, 시운전 및 연속운전 등에서 나타날 수 있는 필요한 부분이 있을 수 있으므로 운전자가 필요로 했을 때는 계측 항목을 추가하여 현장에 적용하고 P&ID에 반영한다.
◦ 계측 항목을 설계 시에 선정할 때에는 열유체 해석, 시공 방법, 계측 결과 활용 목적 등을 명확히 이해하고 계측 대상, 계측 기간, 계측 장비 등을 고려하여 선정하여야 한다.
◦ 냉매가 흐르는 배관을 측정하는 계측기인 경우, 2 phase가 빈번히 일어나고 혹은 계속해서 2 phase인 구간에서는 설계상으로 같은 조건이지만 특히 유량의 경우 흐르면서 구간 구간마다 그 유량이 변동 될 수 있으므로, 만약 배관이 일정이상 긴 경우에는 둘 이상의 같은 목적의 계측기를 설치해야 한다.

다. 계측 기기의 배치

◦ 계측 대상 플랜트의 규모나 위험도를 기준으로 계측기기 배치 밀도를 설정하는 것이 바람직하며, 중요 포인트에는 계측기기를 수 개소에 배치하여 상호의 계측자료를 검토하여야 한다.
◦ 구체적인 계측기기의 배치에 대해서는 상세한 현장조사, 기존 자료 등을 참고하고 각각의 원인별로 계측 항목과 계측기기의 관련성을 검토한 다음 배치 계획을 수립하여야 한다.
◦ 계측 목적을 고려하여 각 계측기기는 서로의 연관성을 유지하도록 하며, 계측 수량의 산정은 계측 목적, 결과 분석, 공사 상황, 계측 기기의 고장 등을 고려하여 수행되어야 한다.

라. 계측 시스템의 구성

◦ 계측 시스템은 크게 자료 수집시스템 및 전송 시스템으로 구성한다. 자료 수집 시스템은 계측기기, PLC, 자료 저장 및 제어를 위한 컴퓨터, 분석을 위한 워크 스테이션, 그 밖의 주변 기기들을 말한다. 전송 시스템은 데이터 전송을 위한 송신, 수신 장치를 말한다.

a. 자료 수집 시스템(Data Logger) : 자료 수집 시스템은 계측 시스템의 핵심으로 브릿지 전원, 신호증폭기, A/D 변환기 등의 기본 기능 외에 각 밸브의 제어와 컴퓨터와의 인터페이스 등의 기능을 가지고 있는 장치이다.
b. 계측 기기 : 센서 및 게이지 등
c. 제어 및 분석을 위한 컴퓨터 : 측점수가 많은 실험 및 계측을 하는 경우, 측정기만으로 측정 결과를 실시간으로 분석하는 것은 한계가 있다. 따라서, 측정기와 연결하여 계측을 제어하고 분석하는 컴퓨터 시스템.
d. 저장 장치 : 계측된 자료를 저장하는 장치로 보통 저장 장치를 따로 두지 않고 제어 분석을 위한 컴퓨터에 저장 혹은 DB(Database) 형태로 관리할 수도 있다.
e. 접지 (Earth End) : 보호함, 내부 기기, 전원 접지 단자, 차폐 케이블의 실드 등은 적절하게 접지를 하여 유입된 노이즈를 흘려보낼 수 있는 경로를 마련해 주는 것을 접지라 한다. 접지는 또한 기기 누전 시 사람을 보호할 수 있다. 접지는 검토를 충분히 하고, 접지의 품질을 파악하여 적절히 설치하여야 하며, 잘못된 접지는 오히려 노이즈 유입원이 되는 경우도 있다.

◦ 계측 시스템에서 또 하나의 중요한 부분이 가스 안전 관련 시설이다. 천연가스 및 탄화수소계열의 냉매를 사용할 때에는 가스가 가연성이며 고압이므로, 누출이 되었을 경우 누출된 가스를 감지하고 알려줄 수 있는 시스템

이 필요하다. 가연성가스를 감지할 수 있는 가스 감지 센서를 센서 범위를 벗어나지 않는 거리에 다수 설치하고, 가스가 누출 되었을 때, 농도 및 그 위험성을 알릴 수 있는 알람 시스템이 필요하다. 사용되는 가스 감지 센서는 방폭 인증을 받은 제품을 사용하도록 한다.

마. 계측기의 종류 및 범위

◦ LNG 액화 플랜트에서 사용되는 계측기기는 아래와 같이 사용될 수 있으며, 각 계측기기의 범위도 다음 표와 같이 사용된다.

표 2.2.33 LNG 액화 플랜트 계측기기 용도 및 범위

| 계측 기기 | 용도 | 범위 | 비고 |
|---|---|---|---|
| Pressure transmitter | 10 bar 이상의 천연가스 및 냉매 압력 측정 | 1 bar ~ 100 bar | 방폭 인증 필요 |
| | 10 bar 이하의 천연가스 및 냉매 압력 측정 | - 1 bar ~ 1 bar | 방폭 인증 필요 |
| Resistance Temperature Diode | 초저온 온도 측정 | -200 ℃ ~ 200 ℃ | 방폭 인증 필요 |
| Mass Flow Meter | 천연가스 유량 측정 | 설계 유량의 + 30% | 방폭 인증 필요 |
| | 프로판 냉매 유량 측정 | 설계 유량의 + 100% | 방폭 인증 필요 |
| | 혼합냉매 유량 측정 | 설계 유량의 + 30% | 방폭 인증 필요 |
| Analyzer | 천연가스 및 냉매 성분 측정 | H2, CH1, CH2, CH3, CH4 | |
| Pressure Gage | 10 bar 이상의 천연가스 및 냉매 압력 측정 | 1 bar ~ 100 bar | |
| | 10 bar 이하의 천연가스 및 냉매 압력 측정 | - 1 bar ~ 1 bar | |
| Temperature Gage | 압축기 및 상온에서의 온도 측정 | -50 ~ 50℃ | |
| Level transmitter | 혼합냉매의 기액 분리기 레벨 측정 | 0 ~ 100% | 방폭 인증 필요 |

(4) 테스트베드 공정제어 최적화 설계

가. 테스트베드(Train-1) 제어로직 분석

테스트베드(Train-1)의 제어로직을 BSU(Bench Scale Unit)를 통해 검증하기 위해서 먼저 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 분석하고, BSU를 통한 검증 가능성을 살펴보았다. 테스트베드(Train-1)은 가스 저장 시설에서부터 전처리, 액화공정 및 후처리 공정까지를 포함하지만, BSU 적용 대상은 액화 공정 중에서 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger) 부분에 국한하였다. 이것은 BSU가 LNG 플랜트의 액화 공정에 해당하는 부분을 scale down한 것이며, 해당 공정인 C3MR(Propane Pre-cooled Mixed Refrigerant)에서 프로판 사이클이 테스트베드와 틀리기 때문이다. 그림 2.2.181에 나타난 것이 테스트베드(Train-1) 기본설계 패키지에 나타난 MCHE 부분의 제어 로직이다.

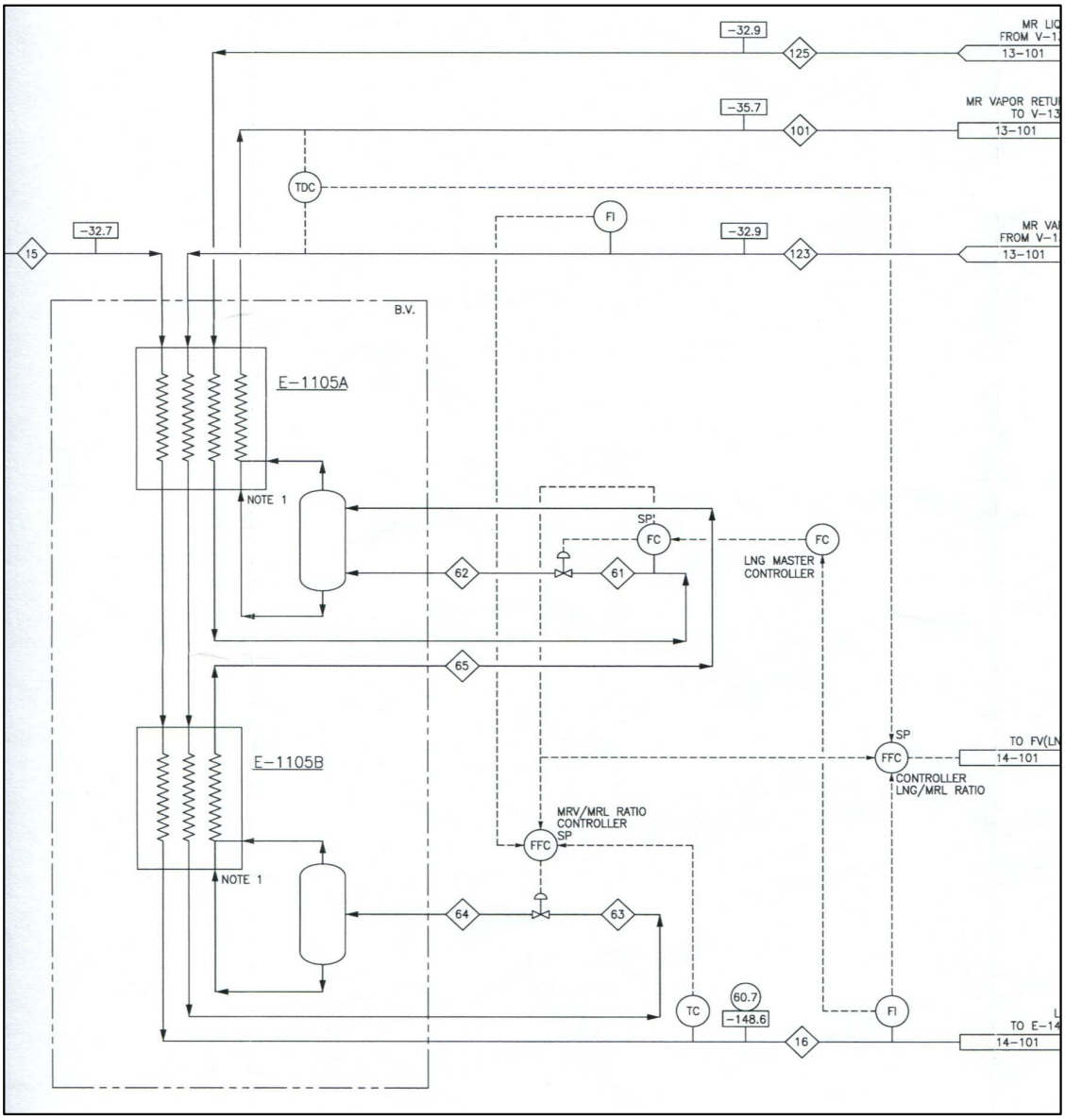



그림 2.2.181. 테스트베드(Train-1)의 MCHE 제어 전략

Fig 1에서 보는바와 같이 3개의 조절변수는 각각 두 개씩의 제어변수를 통해 조절이 되는 캐스케이드 식의 제어 로직 형태를 가진다. 각각의 제어 루프가 어떤 형식으로 작동되는지 분석하였다.

Fig 1에 표시된 LNG master controller는 MRL 제어밸브가 조절변수(Manipulated Variable)가 되며, MRL의 유량이 secondary controller의 제어변수, LNG 유량이 Primary controller의 제어변수가 되는 cascade 제어 루프를 형성하고 있다. 이와 같은 제어 구조는 LNG의 유량에 따라서 MRL의 유량을 증가시킬 목적으로 설계되었으며, MRL의 자체 유량 변화에 따라서 설정치를 가변 할 수 있도록 설계되었다.

Fig 1에서 MRV/MRL ratio controller라고 표시된 부분은 MRV 제어밸브가 조절

변수가 되며, MRV와 MRL 유량비가 secondary controller의 제어변수, LNG 온도가 primary controller의 제어 변수가 되는 cascade 제어 방식이다. 이것은 LNG의 온도를 제어하는 목적으로 MRV 밸브를 이용해 MRV 유량을 조절한다. MRV의 자체 유량 변화에 따라서 설정치를 가변 할 수 있도록 설계되었다.

마지막으로 LNG/MRL ratio controller라고 된 부분은 LNG 제어밸브가 조절변수이며, LNG와 MRL 유량비가 secondary controller의 제어변수, WETD(Warm End Temperature Difference)가 primary controller의 제어변수이다. WETD는 MCHE의 Warm End 부분에서 hot stream인 MRL의 온도와 혼합냉매의 증발온도의 차이로 냉매의 과열도를 제어하기 위한 것으로 판단된다. 즉 WETD를 제어하기 위해서 MRL 제어밸브를 조절하는데, 마찬가지로 LNG와 MRL의 유량비에 따라서 설정치가 가변되도록 설계되었다.

나. 테스트베드(Train-1) 제어로직 BSU 적용

기본적으로 3-1-2과제의 3차년도 성과물이었던 BSU는 테스트베드(Train-1)의 기본설계를 바탕으로 제작되어진 파일럿 플랜트이기 때문에 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 적용하는데 적합한 모델이라 할 수 있다. Fig 2는 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 BSU에 구현하기 위한 설계안이다. 서두에 언급했듯이 프로판 예냉 사이클은 테스트베드와 구조가 틀리기 때문에 자체 제어로직을 적용하였고, MCHE 부분을 테스트베드(Train-1)과 일치하게 구성하였다.

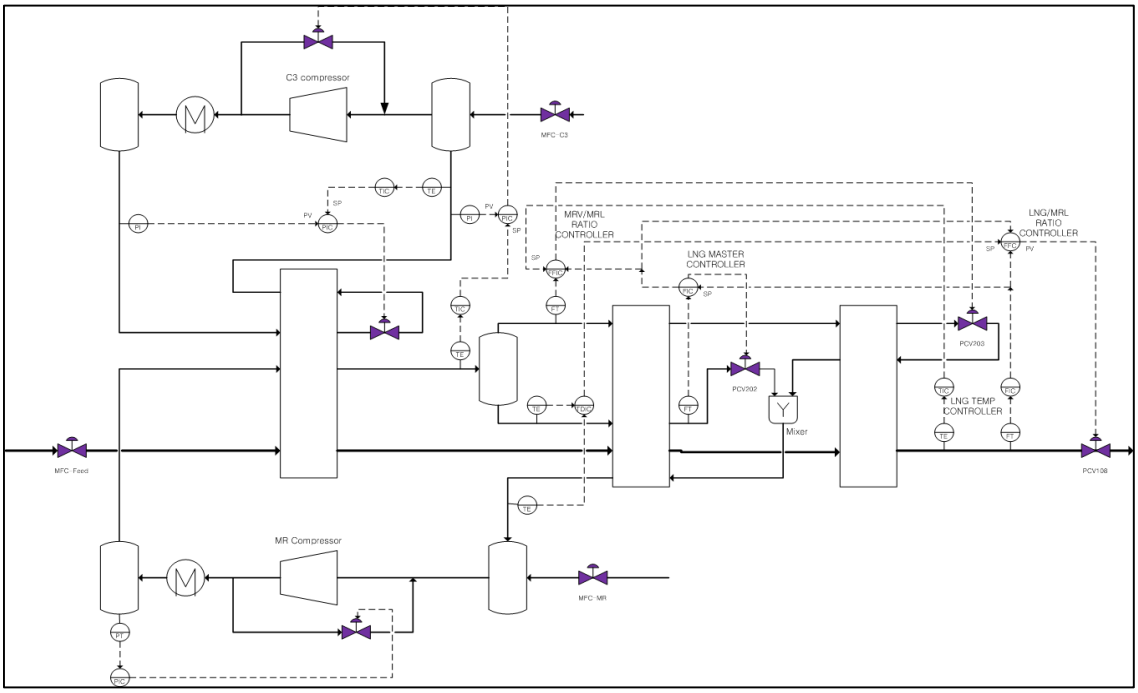



그림 2.2.182. BSU 제어 전략

BSU의 LNG master controller는 테스트베드(Train-1)과 마찬가지로 Fig. 2의 PCV-202로 나타난 MRL 제어밸브가 조절변수가 되며 MRL 유량이 secondary controller의 제어변수, LNG 유량이 primary controller의 제어변수가 되는 cascade 제어로 구성하였다.

각 제어기의 동작을 살펴보면 먼저 Primary controller의 제어변수인 LNG 유량은 사용자의 설정치와의 차이에 따라서 동작하게 되는데, 설정치보다 제어변수 값이 클 경우 MRL의 유량이 증가해야 하므로 밸브는 열려야 한다. 따라서 direct 동작을 한다. secondary controller의 제어변수인 MRL 유량은 설정치보다 클 경우 반대로 밸브를 닫아야 하므로 reverse 동작을 취한다.

Cascade 제어는 각기 다른 두 가지의 제어 변수를 적절히 참조해서 조절 변수에 출력을 가해주는 것인데, 여기서 어떤 제어변수가 얼마나 영향을 미치는 가를 보통 테이블로 표현을 해주는데, 이는 다음의 Table 1과 같으며, PLC에 구현하기 위한 전체 블록 다이어그램을 Fig. 3에 나타내었다.

표 2.2.34. LNG 마스터 제어기 케스케이드 매트릭스

| PV1 | SP1 | PV2 | output | SP2 |
|---|---|---|---|---|
| LNG Flow rate | 30kg/h | MRL Flow rate | 0 | 60(kg/h) |
| | | | 10 | 56 |
| | | | 20 | 52 |
| | | | 30 | 48 |
| | | | 40 | 44 |
| | | | 50 | 40 |
| | | | 60 | 36 |
| | | | 70 | 32 |
| | | | 80 | 28 |
| | | | 90 | 24 |
| | | | 100 | 20 |

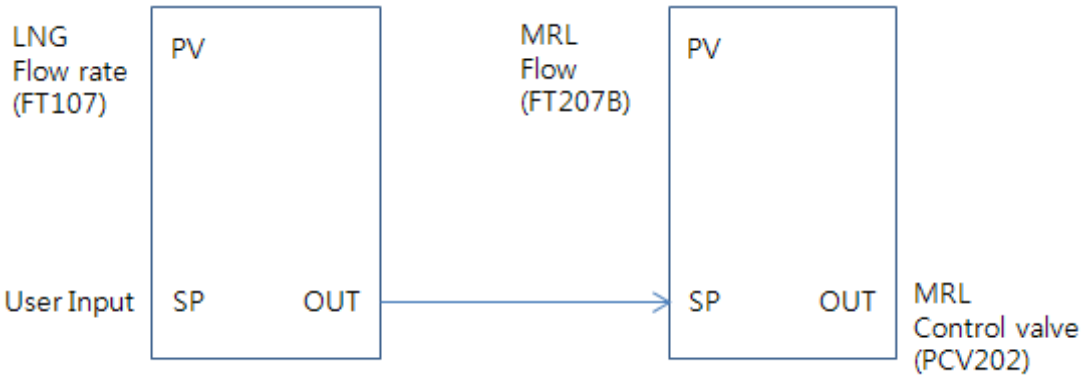



그림 2.2.183. LNG 마스터 제어기 블록 다이어그램

Table 1에서 PV1와 SP1은 primary controller의 제어변수와 설정치이며 output은 primary controller에서의 출력을 나타낸다. Secondary controller는 이 출력 신호에 따라서 설정치를 달리하게 되며 그에 따라서 조절 변수의 움직임이 결정된다. SP1의 값은 초기 설계치가 되고, output이 0일 때의 SP2 역시 설계치이다. output이 10~100까지는 실제 실험을 통해 나온 데이터를 토대로 범위를 잡아서 선형적으로 나눈 값이다.

BSU에서 MRV/MRL ratio controller는 MRV 제어밸브가 조절변수이며, MRV와 MRL의 유량비가 secondary controller의 제어변수, LNG 온도가 primary controller의 제어변수가 되는 cascade 제어이다.

각 제어기의 동작을 살펴보면 먼저 Primary controller의 제어변수인 LNG 온도는 사용자의 설정치와의 차이에 따라서 동작하게 되는데, 설정치보다 제어변수 값이 클 경우 MRV 유량이 증가해야 하므로 밸브는 열려야 한다. 따라서 direct 동작을 한다. secondary controller의 제어변수인 MRV/MRL의 비는 설정치보다 클 경우 반대로 밸브를 닫아야 하므로 reverse 동작을 취한다.

Cascade 제어는 각기 다른 두 가지의 제어 변수를 적절히 참조해서 조절 변수에 출력을 가해주는 것인데, 여기서 어떤 제어변수가 얼마나 영향을 미치는 가를 보통 테이블로 표현을 해주는데, 이는 다음의 Table 2과 같으며, PLC에 구현하기 위한 전체 블록 다이어그램을 Fig. 4에 나타내었다.

표 2.2.35 MRV/MRL 비율 제어기 케스케이드 매트릭스

| PV1 | SP1 | PV2 | output | SP2 |
|---|---|---|---|---|
| LNG Temperature | -162℃ | MRV/MRL Ratio | 0 | 0.3 |
| | | | 10 | 0.6 |
| | | | 20 | 0.9 |
| | | | 30 | 1.2 |
| | | | 40 | 1.5 |
| | | | 50 | 1.9 |
| | | | 60 | 2.3 |
| | | | 70 | 2.7 |
| | | | 80 | 3.1 |
| | | | 90 | 3.5 |
| | | | 100 | 3.9 |

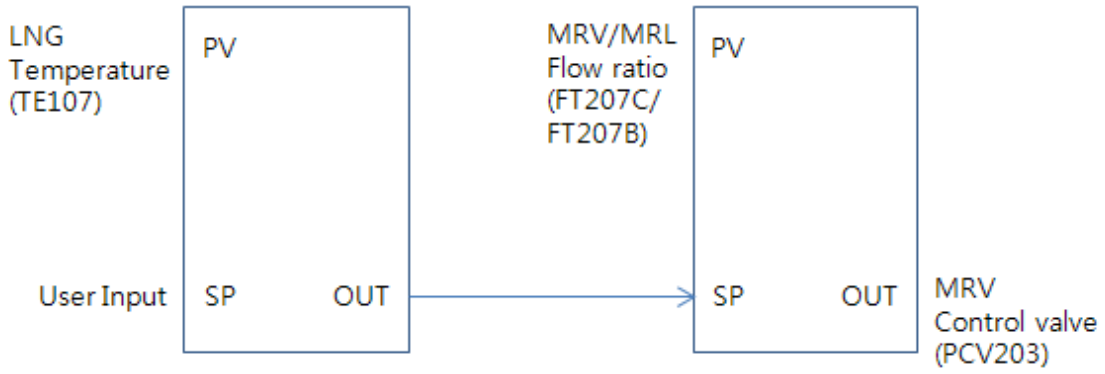



그림 2.2.184. MRV/MRL 비율 제어기 블록 다이어그램

마지막으로 LNG/MRL ratio controller는 LNG 제어밸브가 조절변수이며 LNG와 MRL의 유량비가 secondary controller의 제어변수, WETD(Warm End Temperature Difference)가 Primary controller의 제어변수가 되는 cascade 제어이다.

각 제어기의 동작을 살펴보면 먼저 Primary controller의 제어변수인 WETD는 사용자의 설정치와의 차이에 따라서 동작하게 되는데, 설정치보다 제어변수 값이 클 경우 LNG 유량이 증가해야 하므로 밸브는 열려야 한다. 따라서 direct 동작을 한다. secondary controller의 제어변수인 LNG/MRL의 비는 설정치보다 클 경우 반대로 밸브를 닫아야 하므로 reverse 동작을 취한다.

Cascade 제어는 각기 다른 두 가지의 제어 변수를 적절히 참조해서 조절 변수에 출력을 가해주는 것인데, 여기서 어떤 제어변수가 얼마나 영향을 미치는 가를 보통 테이블로 표현을 해주는데, 이는 다음의 Table 3과 같으며, PLC에 구현하기 위한

전체 블록 다이어그램을 Fig. 5에 나타내었다.

표 2.2.36 LNG/MRL 비율 제어기 케스케이드 매트릭스

| PV1 | SP1 | PV2 | output | SP2 |
|---|---|---|---|---|
| Warm End Temperature Difference | 0℃ | LNG/MRL Ratio | 0 | 0.46 |
| | | | 10 | 0.44 |
| | | | 20 | 0.42 |
| | | | 30 | 0.40 |
| | | | 40 | 0.38 |
| | | | 50 | 0.36 |
| | | | 60 | 0.33 |
| | | | 70 | 0.30 |
| | | | 80 | 0.27 |
| | | | 90 | 0.24 |
| | | | 100 | 0.20 |

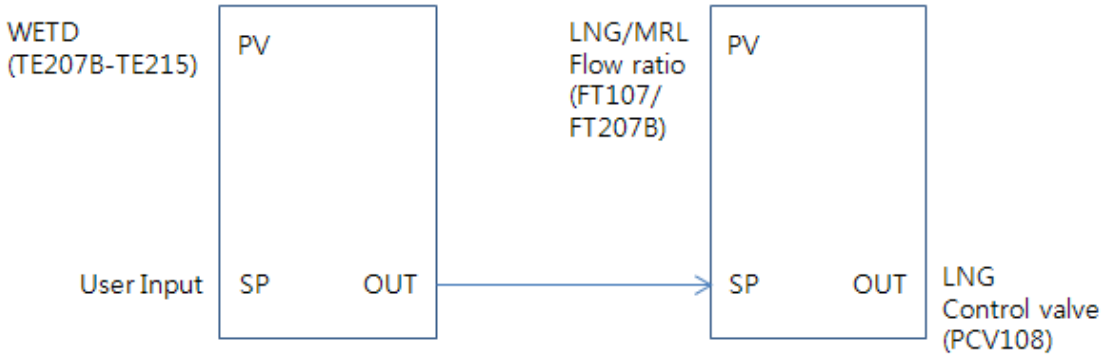



그림 2.2.185. LNG/MRL ratio controller block diagram

다. HMI 적용

앞에서 설명한 제어로직을 PLC 프로그램 업로드를 마치고 HMI(Human Machine Interface)에 구현하였다. 사용한 HMI는 WinCC ver6.2이며 각 제어밸브를 더블클릭 함으로써 제어의 모드를 변경할 수 있다.

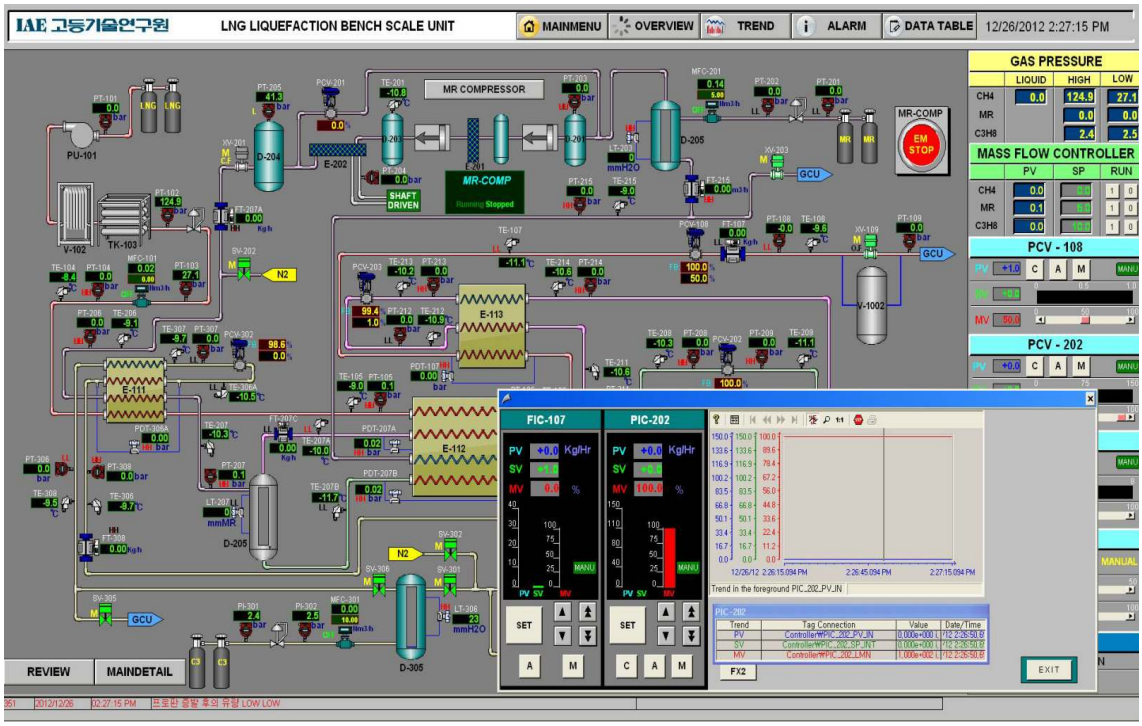



그림 2.2.186 BSU human machine interface

Fig. 6에서 보이는 화면은 HMI 상에서 제어밸브인 PCV202를 더블클릭해서 생성된 화면이다. 나머지 제어밸브도 마찬가지로 꾸며져 있으며, 그림에서 팝업 창 왼쪽의 FIC-107이 cascade control에서 Primary controller이며 옆의 PIC-202가 secondary controller이다. 아래쪽의 C는 cascade mode, A는 auto mode, M은 manual mode이며 이것은 운전중에 언제든지 전환이 가능하다. 수동 운전을 하고 운전이 안정상태에 접어들면 cascade mode로 전환하는 방법으로 운전을 한다.

라. 실험 결과

앞서 구현된 테스트베드 제어로직을 PLC를 통해서 구현하고, 제어 성능을 알아보기 위해서 cool-down부터 안정상태까지 실험한 결과가 아래의 그림과 같이 나타난다.

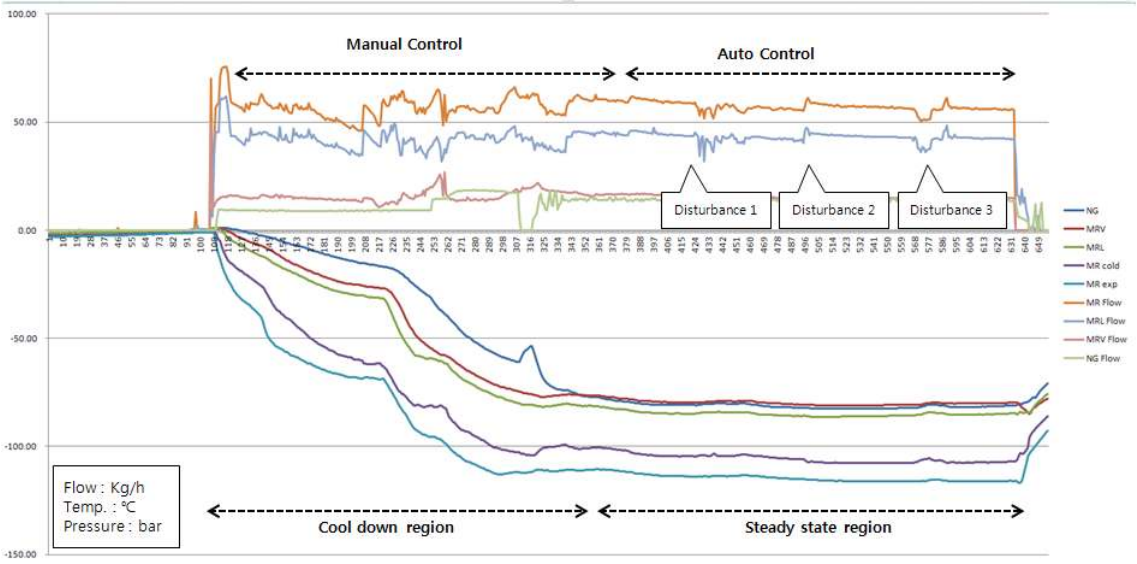



그림 2.2.187. 테스트베드 제어로직 실험 트랜드

그림 2.2.187은 실험 startup에서부터 shutdown까지 모든 트랜트를 나타내는데, 본 실험에서 약 360분이 지난 이후부터 안정상태에 접어들었다고 가정하고 3번의 외란 실험을 진행하였다. 그 부분을 확대해서 설명하면 아래의 그림에서 1번 부분은 열교환기 후단의 온도 설정치를 3℃ 낮추었을 때, 냉매 유량의 변화를 나타내는 그림이고 2번 부분은 천연가스 유량이 갑자기 급격하게 줄었을 때의 응답이며, 세 번째 부분은 프리쿨러 후단, 즉 MCHE 1으로 들어오는 스트림의 온도가 상승하였을 때, 일어나는 응답을 보이고 있다.

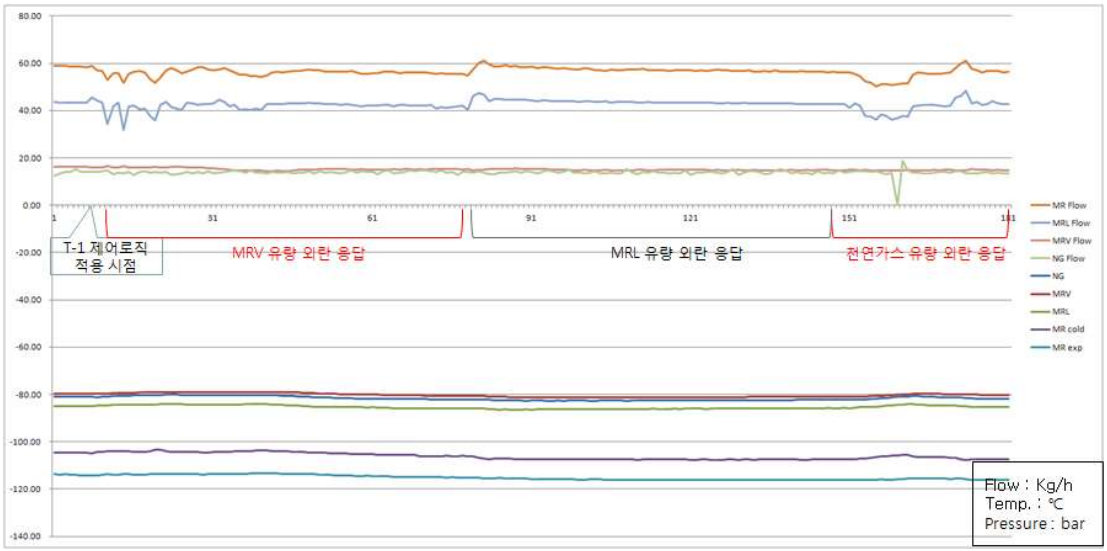



그림 2.2.188. 테스트베드 제어로직 외란 응답 트랜드

(5) 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계 최적화

테스트베드(Train-1)의 제어 로직 분석과 검증을 통하여 상용급 LNG 액화 공정에서의 제어시스템 설계를 진행하였다. 상용급 LNG 플랜트는 본 연구의 총괄 주관기관인 가스공사에서 진행한 내용으로 테스트베드(Train-1)의 설계 및 제작 그리고 운전을 통해서 얻은 경험과 기술을 기반으로 사업단 자체 LNG 액화 공정인 KSMR(Korea Single Mixed Refrigerant)의 개발 내용을 적용한 테스트베드(Train-2)를 기반으로 한 LNG 플랜트로서 5MTPA 급 LNG 플랜트이다.

가. KSMR process

KSMR 액화 공정은 LNG 플랜트 사업단에서 가스공사연구원 외 다수 전문가들이 개발한 LNG 액화 신 공정으로서 테스트베드(Train-1)에서 사용한 C3MR을 대체해서 국내 기술로 만들어진 액화 공정이다. 테스트베드(Train-1)을 통한 설계 및 건설 그리고 운전 기술을 습득하여 궁극적으로 테스트베드(Train-2)를 완성하기 위한 핵심 공정이라 할 수 있다. 기본적인 KSMR의 개략도는 아래의 그림과 같다.

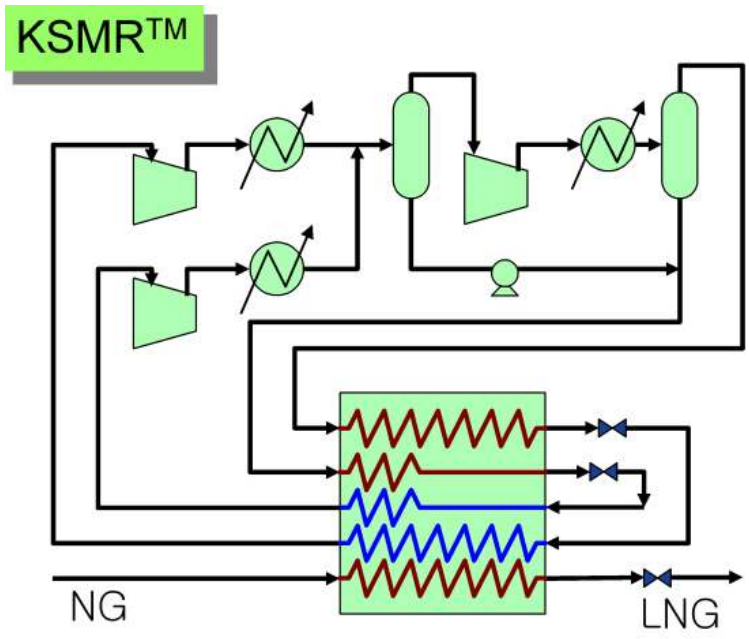



그림 2.2.189 KSMR process

그림과 같이 KSMR의 특징은 하나의 열교환기에서 예냉과 액화를 동시에 진행할 수 있는 것으로 구조가 간단하고, SMR 공정에 비해서 효율이 높다는 것이다.

나. 상용급 LNG 액화 공정

상용급 LNG 액화 공정은 기본적으로 KSMR을 기초로 설계하였는데, 차이점은

기존의 하나의 열교환기를 분리해서 두 개로 한 것이며, 같은 공정을 병렬형태로 구성하여 용량을 늘렸다는 것이다. 하나의 열교환기를 나누어 설계한 것은 예냉 공정과 천연가스 액화 공정을 구분해서 설계 한 것으로 아래 그림과 같이 하나의 혼합냉매를 이용하여, 혼합냉매의 조성에 따라서 예냉공정에 사용되고, 천연가스 액화에 사용되는 형태이다.

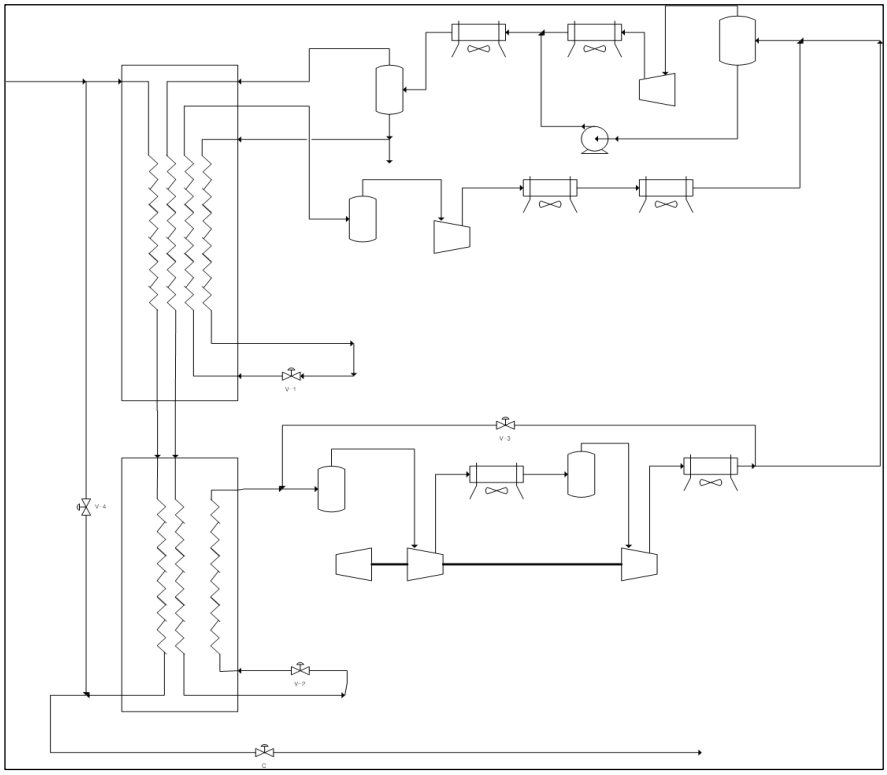


그림 2.2.190. 상용급 LNG 액화 공정도

상용급 LNG 액화 공정도에서 위쪽의 열교환기는 예냉 공정에 사용되는 열교환기로 하나의 혼합냉매가 온도에 따라서 그 성분이 나뉘게 되는데, 상대적으로 저온부분의 무거운 성분들이 주로 구성된 혼합냉매가 일정 부분의 온도까지 천연가스를 예냉한다. 이후 좀 더 낮은 온도의 가벼운 성분들로 이루어진 혼합냉매가 아래쪽 열교환기를 통해서 천연가스 액화 온도까지 냉각하게 되는 것으로 기본적으로 KSMR 공정을 기초로 만들어진 공정이라 할 수 있다.

다. 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계

테스트베드(Train-1)의 제어로직 분석과 BSU 구현 및 실험결과를 토대로 상용급 제어설계에 반영해서 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계를 하게 되면 다음과 같은 구성이 된다.

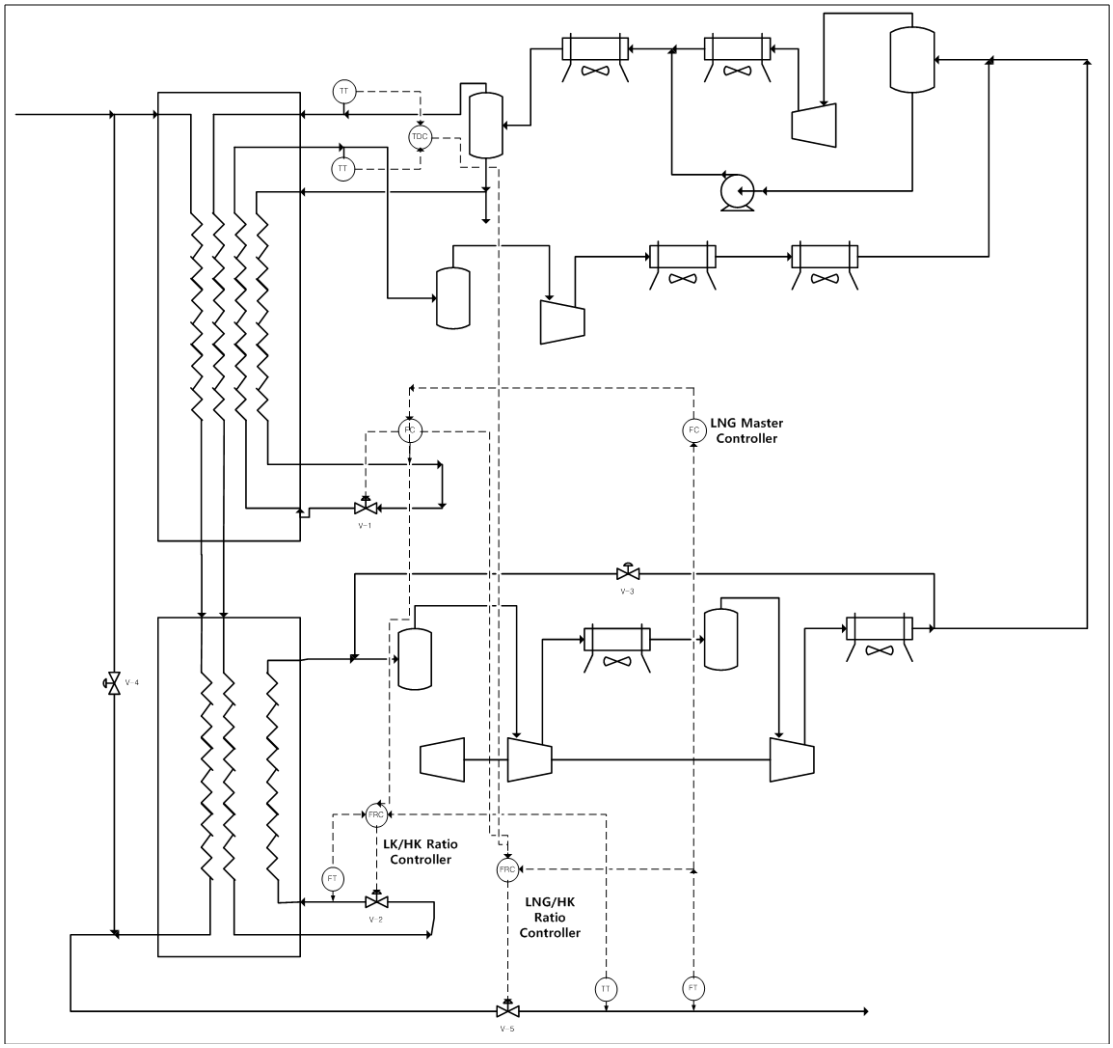



그림 2.2.191. 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 방법

상용급 LNG 액화 플랜트 제어 방법에서 테스트베드(Train-1)의 제어로직(Type 1)과 같은 방법으로 총 세 개의 메인 컨트롤러로 구성된다. LNG Master Controller는 LNG 유량을 제어변수로 하여 HK의 유량을 조절함으로써 천연가스의 유량이 변동될 때, 앞쪽의 열교환기에서 냉매의 유량을 조절함으로써, 후단까지 영향을 미치는 것을 최소화 할 수 있어서 전체 시스템의 안정성 향상을 가져다준다. LNG/HK Ratio Controller는 LNG의 유량 변화에 따른 HK의 유량 변화에 비율제어를 사용하는 방법으로 설정치는 WETD(Warm End Temperature Difference)에서 결정하는 케스케이드 제어 방식이다. 테스트베드(Train-1)과 마찬가지로 WETD의 값에 따라서 현재 냉매의 유량이 부족한지 과한지를 판단 할 수 있으므로, 그에 따라서 LNG와 HK의 유량 비를 결정하게 하는 방법이다. 마지막 LK/HK Ratio Controller는 LK와 HK의 비를 결정하는 제어변수로 LNG의 유량을 사용하는데, LNG의 유량값에 따라서 LK와 HK의 비를 일정하게 하여 어떤 외란에 대해서 하나의 냉매량의 큰 변화를 억제하고 시스템 안정화를 도모할 수 있다.

(6) LNG 액화 공정의 APC 적용

가. APC(Advanced Process Control) 기술

국내외 정유 및 석유화학업계의 경쟁이 심화되면서 1980년대 초 국내 석유화학업계의 공정제어 생산성 향상을 위한 고급 공정제어 기법인 APC 기술이 소개되었으며, 1980년대 중반 이후 국내 신규 플랜트 설립이 급증하면서 외국 선진 엔지니어링사인 ABB, KBR, UOP 등을 통해 본격적으로 APC 기술이 도입되어 적용되기 시작했다. 그러나 APC 기술에 대한 이해 부족 및 운전 인력의 공감대 부족 등으로 기대 수준에 못 미치는 적용 효과를 보였기 때문에 1990년대 초 국내 업계의 APC 적용이 감소하였으나 지속적인 APC 기술 개발 및 석유화학 업계의 경쟁 심화 등으로 다시 APC 기술이 공정제어 경쟁력 강화 기술로 인식되기 시작했으며 이에 따른 성공적인 APC 적용 사례가 보고되었다.

공정제어에서 APC란 산업 공정제어 시스템에서 다양한 기술을 포괄한다. APC는 공정에서 기본 공정제어의 추가적인 옵션으로 구현되며 기본 공정제어는 공정 자체의 운전, 제어 및 자동화를 위해 설계 및 구현된다. APC는 공정상 특정 성능이나 경제성 향상을 위해 다년간에 걸쳐 단계적으로 추가된다. APC는 DCS나 PLC와 같은 제어 시스템상에서 구현된다.

가장 많이 사용되는 APC 종류는 다음과 같다.

Advanced Regulatory Control (ARC)는 feedforward, override, adaptive gain과 같은 검증된 고급 제어 기술을 말한다. ARC는 DCS 레벨에서 함수 블록 (function block)이나 프로그래밍을 통해 구현되거나 제어 컴퓨터 레벨에서 구현되기도 한다.

Multivariable Model Predictive Control (MPC)는 가장 많이 사용되는 기술로서, 제어 컴퓨터에서 구현되며 주요 독립 공정 변수와 종속 공정 변수를 추출하고 변수간 동적 관계 모델을 구현하고 매트릭스 기반 제어 및 최적화 알고리즘을 사용하여 다수의 공정 변수를 동시에 제어한다. MPC는 1980년대부터 제어 컴퓨터의 급격한 계산 성능 향상으로 APC의 가장 중요한 기술이 되었다.

Inferential Control (유추 제어)은 측정이 복잡하고 비용이 많이 드는 온라인 분석기나 실험실의 분석기를 활용하는 대신에 온도와 압력과 같은 가장 쉽게 측정할 수 있는 데이터로부터 공정 스트림의 특성을 계산하는 개념이다. inferential control은 운전자에게 또는 공정제어 변수에 cascade로 정보를 제공하기 위해 온라인 분석기대신에 사용될 수 있다.

Sequential Control (순차 제어)은 연속 공정에서 일어나는 비연속적 시간 및 이벤트 기반의 자동화 시퀀스이다. 커스터마이징이 가능한 알고리즘이나 순차적 함수 차트 방법론을 사용하여 시간과 로직 함수 블록의 조합으로 구현된다.

압축기에는 반드시 anti-surge 및 성능 제어기가 포함된다.

APC중에서 가장 많이 사용되는 MPC에 대해 보다 자세히 기술한다. MPC는 시스템 분석을 통해 얻은 선형 동적 공정 모델에 기반하며 복잡한 동적 시스템 특성을 반영한다. 단순한 시스템을 제어하기 위해서는 MPC의 복잡한 알고리즘이 필요없으며 단순한 PID 제어기로서 충분하다. 장시간 지연이나 고차원 동특성 등 일부 동적 특성을 묘사하기에는 PID 제어기로는 어렵다.

MPC 모델은 독립 변수의 변화에 의해 발생하는 시스템 종속 변수의 변화를 예측한다. 화학 공정에서 제어기에 의해 조정이 가능한 독립 변수는 PID 제어기의 온도, 압력, 유량, 레벨과 같은 set point이거나 최종 제어 대상인 제어 밸브이다. 제어기에 의해 조정이 불가능한 독립 변수는 교란 (disturbance)으로 쓰인다. 종속 변수는 제어 대상이나 공정 제한 조건 (constraint)을 표시하는 측정값이다.

MPC는 현재 플랜트의 동적 공정 상태, MPC 모델, 공정 변수 목표와 제한 조건을 사용해서 종속 변수의 변화를 예측한다. 종속 변수를 목표치에 놓고 독립 및 종속 변수의 제한 조건을 만족시킴으로써 변화를 계산한다. 실제 공정은 비선형이지만 좁은 범위에서는 선형과 비슷하다. 모델과 공정간의 구조적 오차로 인해 발생하는 예측 오류를 보전하기위한 feedback을 사용하는 대부분의 응용 분야에서 선형 MPC가 사용된다. 선형 모델이 실제 공정의 비선형 특성을 표현하지 못하는 경우, 다양한 방법이 사용된다. 비선형성을 줄이기 위해서 공정 변수가 선형 MPC 모델 전후에 변환된다. 비선형 모델은 실험적 데이터 fit이거나 mass and energy balance 기반 고정밀 동적 모델 형태를 띌 수 있다.

MPC는 플랜트 모델의 반복적 유한 최적화에 기반한다. 특정 시간 t에 플랜트의 상태를 샘플링하고 그 이후의 상대적으로 짧은 시간 간격 [t, t+T] 동안의 Euler-Lagrange 공식의 솔루션을 구하는 등 최적화 알고리즘에 의해서 비용을 최소화하는 제어 전략이 계산된다. 제어 전략의 첫 번째 단계만 구현되고 다음에는 플랜트 상태를 샘플링하여 새로운 현재 상태로부터 다시 계산하면 새로운 제어 전략이 계산되고 새로운 플랜트 상태를 예측한다. 이렇게 계속해서 진행함으로해서 향후 플랜트 상태를 예측하게 되며 플랜트 현장 실무적으로도 좋은 예측 결과를 보여준다. 학술적으로는 Euler-Lagrange 공식과 같은 타입의 보다 빠른 솔루션을 얻고, MPC의 국부적 최적화 결과의 시스템 전체 안정성 특성을 이해하고, 일반적 MPC 방법을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다.

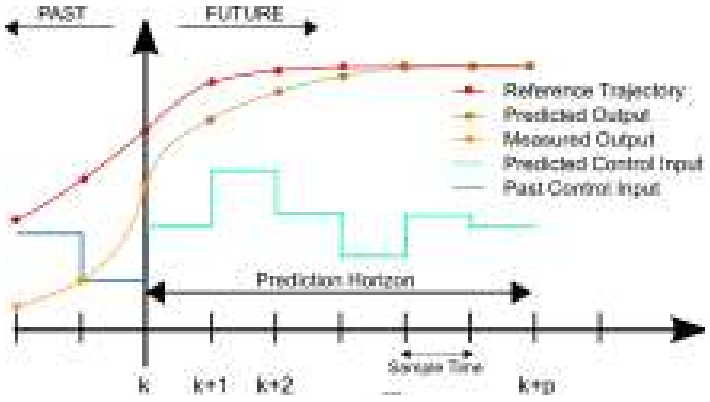


그림 2.2.192 일반적인 MPC scheme

MPC는 다음을 사용해서 최적 제어를 계산한다.
- 내부의 동적 공정 모델
과거의 제어 기록
최적화 비용 함수

상하 제한 조건을 만족시키는 최적화 비용 함수는 다음과 같다.

$$J = \sum_{i=1}^{N} w_{x_i}(r_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^{N} w_{u_i} \triangle u_i^2$$

xi: controlled variable (CV), 예: 측정 온도
ri: reference variable (RV), 예: 목표 온도
ui: manipulated variable (MV), 예: 제어 밸브
wxi: xi의 상대적 중요성을 반영한 weighting coefficient
wui: ui의 상대적 변화에 대한 penalty를 반영한 weighting coefficient

비선형 MPC (Nonlinear MPC, NMPC)는 MPC의 한 종류이며 비선형 시스템 모델을 예측하는데 사용한다. 선형 MPC에서와 같이 NMPC는 유한 예측의 최적 제어 문제의 반복적 솔루션을 필요로 하는데 이러한 문제가 선형 MPC에서는 convex하는데 반해 NMPC에서는 convex하지 않을 수 있다. 이 문제는 NMPC의 안정성과 솔루션을 구하는데 문제를 일으킨다.

NMPC 솔루션은 direct single shooting, direct multiple shooting, direct collocation과 같은 Newton 타입의 최적화 scheme을 사용한 직접적인 최적화 제어 방법에 기반해서 구한다. NMPC는 연속적인 최적 제어 문제는 유사하다는 점을 최대한 활용한다. 이전에 계산된 최적값으로부터 유추된 값을 Newton 타입 솔루션을 초기화하는데 사용함으로써 컴퓨터의 계산 시간을 많이 절약할 수 있다. Path following 알고리즘 (real-time iteration)은 솔루션에 수렴하려고 하지 않고 가장 최

신의 NMPC 문제에 대한 솔루션에 접근하기 위한 다음 반복으로 넘어가기 전에 적절히 초기화된 하나의 반복만 한다.

NMPC는 과거에 대부분 비교적 샘플링 속도가 느린 화학 공정 산업에서 사용되었는데 근래에는 자동차 산업과 같이 샘플링 속도가 빠른 곳에도 응용되며, 최근에는 공간적으로 분산된 시스템에서도 사용되기 시작했다. 상용 MPC 소프트웨어는 시중에 많이 출시되고 있으며, 모델 인식 및 분석, 제어기 설계 및 튜닝, 제어기 성능 평가와 같은 도구를 대부분 제공한다.

나. APC 기술 적용 사례

a. Oman LNG Plant

2000년부터 사용된 Oman Plant는 2기의 트레인으로 구성되어있고 SMOC, RQE 등의 APC모델을 포함하는 아래 그림의 Shell Global Solutions를 사용했다. APC를 적용 전 19일과 적용 후 41일 동안의 운전결과를 비교한 결과 LNG생산량 증가 효과를 거두었다.

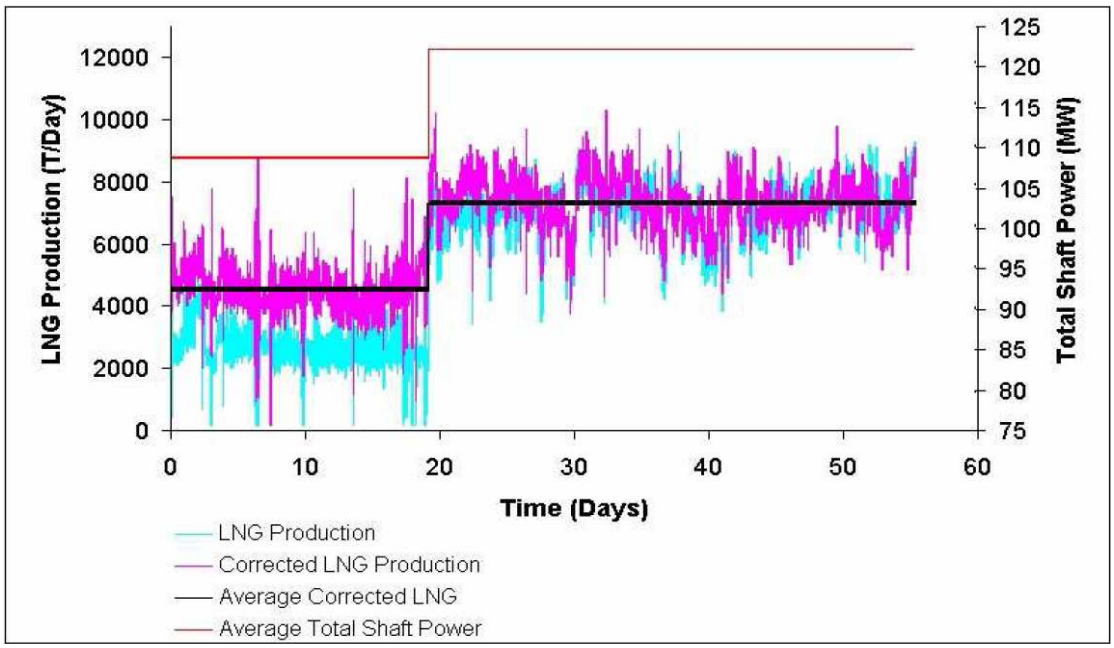



그림 2.2.193. LNG production increase after APC start (t=19 days)

b. Qatar Gas Plant

3개의 LNG 트레인에 Honeywell사 APC를 적용해서 LNG 생산량이 평균 4.5%정도 증가되었고 겨울과 여름의 기후변화에 따라서 다소 3%정도 변동이 존재했다. 이

결과는 Robust Multi Predictive Controllers Technology를 적용했을 경우에 비해 1%, Profit Optimizer를 사용했을 경우보다 0.5% 높게 나왔다.

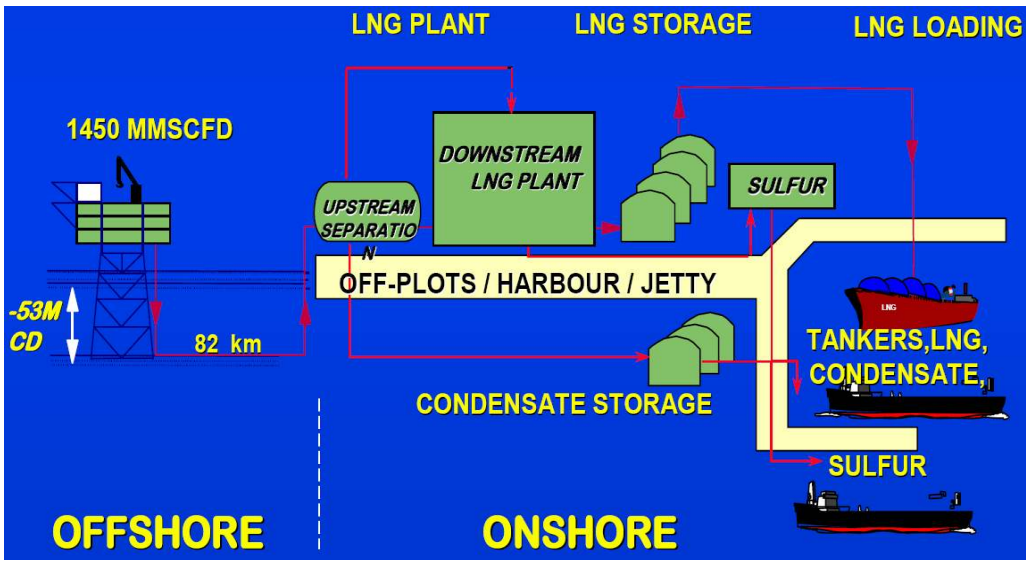



그림 2.2.194. Qatar Liquefied Gas Company Plant General Overview

표 2.2.37. Performance results conducted during six days

| APC Phase I | Winter Test | Summer Test | Guaranteed Values |
|---|---|---|---|
| % LNG Increase | + 6.5 | + 3.5 | + 1.5 |

표 2.2.38. Comparison results from 2004 to 2006 year

| APC Phase I | 2004 To 2006 | Guaranteed Values |
|---|---|---|
| % LNG Increase | + 4.6 | +1.5 |

c. NORTH WEST SHELF LNG PLANT

NORTH WEST PLANT의 구성요소는 전형적이다. 프로판, 혼합냉매 등의압축기를 구동하기 위해서 GE Frame 5 gas turbines을 사용했고, 열교환기는 APCI''s main cryogenic heat exchangers 그리고 공기냉각방식의 설비 등이 동원되었다. 이 플랜트는 3개의 LNG 트레인에 Woodside사 APC를 적용해서 LNG 생산량이 1-3% 정도 증가되었고 혼합냉매의 온도 또한 정상화 되면서 평균 1-2도 이상의 하락을 나타내었다.

다. APC 적용 모델

6차년도에 APC 알고리즘 개발 및 검증을 하기 위해서 천연가스 액화 플랜트에서 APC 적용 모델은 BSU 기반으로 하였으며, 실험 결과를 토대로 독립변수와 그에 따른 종속변수를 선정하고 과거의 실험데이터를 토대로 각 종속변수의 weight를 계산한다.

표 2.2.39. Independent variables and dependent variables

| | control loop 1 | control loop 2 | control loop 3 |
|---|---|---|---|
| Independent variables | FT-207B | FT-207C | FT-107 |
| Dependent variables | TE-209<br>TE-210<br>TE-215<br>TE-106<br>TE-211<br>TE-107<br>PT-209<br>PT-210<br>PT-203 | TE-212<br>TE-213<br>TE-214<br>TE-210<br>TE-107<br>TE-215<br>PT-213<br>PT-214<br>PT-215 | TE-105<br>TE-106<br>TE-107<br>TE-108<br>TE-208<br>TE-209<br>TE-210<br>TE-212<br>TE-213<br>TE-214<br>PT-106<br>PT-108 |
| Manipulated variables | PCV-202 | PCV-203 | PCV-108 |

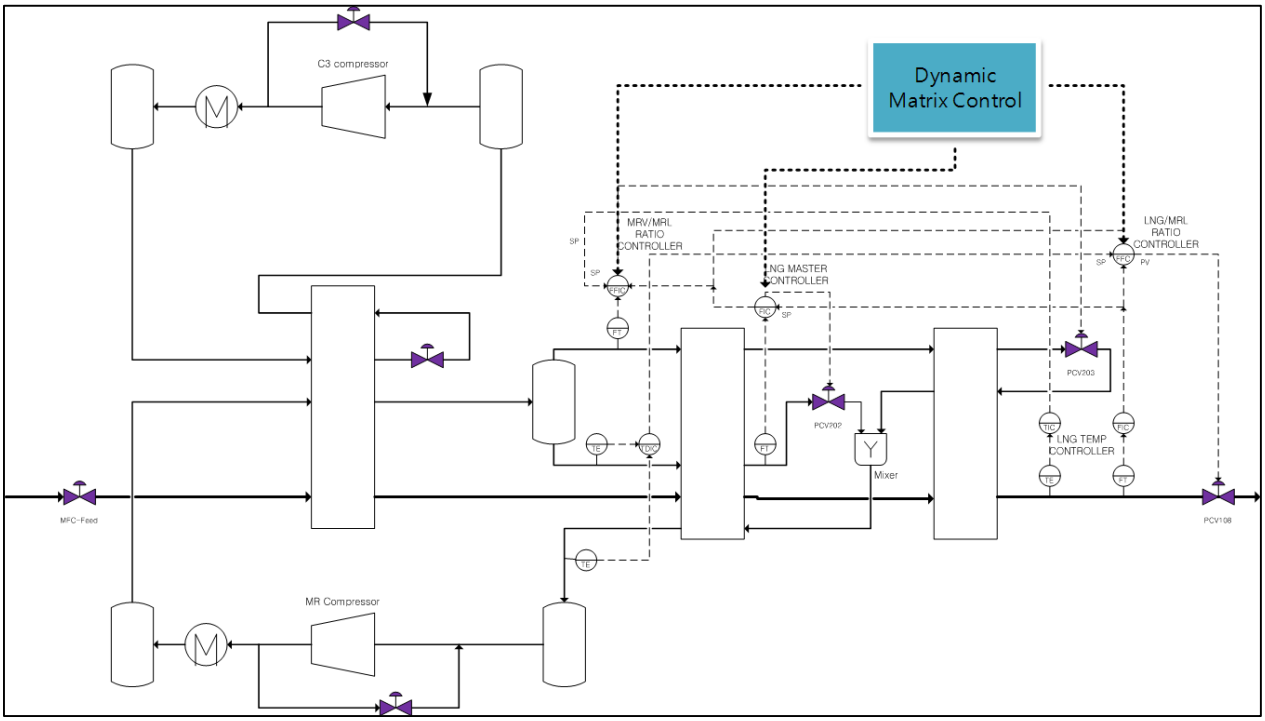



그림 2.2.195. Applied APC in BSU

BSU에서 APC를 적용하기 위해 기존의 regulatory control에 Dynamic matrix control을 이용해서 실정치를 조절한다. 각 세 개의 Manipulated variable에 MRL, MRV, LNG의 유량을 독립변수로, 그에 따른 온도 및 압력을 종속변수로 놓고, 이전 실험 데이터를 토대로 다음과 같은 메트릭스를 통해서 APC를 구현한다.

$$\begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ . \\ . \\ . \\ x(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s(2) & s(1) & 0 & \dots & 0 \\ s(3) & s(2) & s(1) & \dots & 0 \\ . & . & . & & . \\ . & . & . & & . \\ . & & & & \\ s(N) & s(N-1) & s(N-2) & \dots & s(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \triangle m(i) \\ \triangle m(i+1) \\ \triangle m(i+2) \\ . \\ . \\ . \\ \triangle m(i+N-1) \end{bmatrix}$$

x는 $\triangle m$의 동작으로 얻어지는 기대값이며, $\triangle m$는 현재부터 앞으로 행해질 제어 행위에 대한 값이다. Dynamic matrix를 구함으로써 제어변수를 예측하고 그에 맞는 설정치를 제어기에 전달한다.

라. APC 적용 결과

a. 기본 설계

적용 Objectives

외란에 대한 안정적 운전

원단위(Energy/LNG Kg)의 최적화

LNG 생산 증대

Controller Strategy

C3 Refrigerant Compressor Load조정 (Suction Throttling)

Worm End Diff Temp(LNG MCHE1 Inlet Minus MR Refrigerant Comp Inlet Temp)의 최소화 (Refrigerant Efficiency)

외란(LNG Feed Temp or Flowrate)시 LNG Stream Temp. 변화최소화

제한요소(Constraint)와 Refrigerant Usage Optimization

LNG Product의 온도제어(Hi/Lo Limit관리)

Refrigerant사용량 최적화(최소화)

MR Liquid/Vapor Control Valve Opening

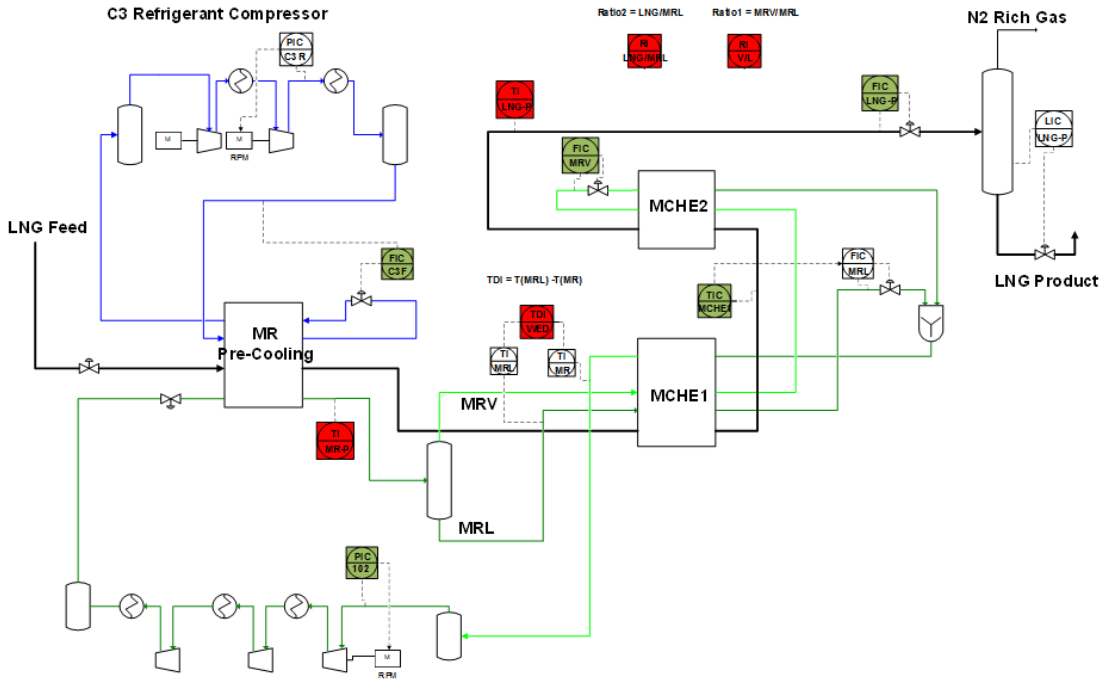



그림 2.2.196. 대상 공정의 PFD

b. Pre-Test실시

Control Scheme확정위한 외란 Test를 아래와 같이 실시하였다.

LNG Product 제어 Loop변경: TIC에서 FIC변경

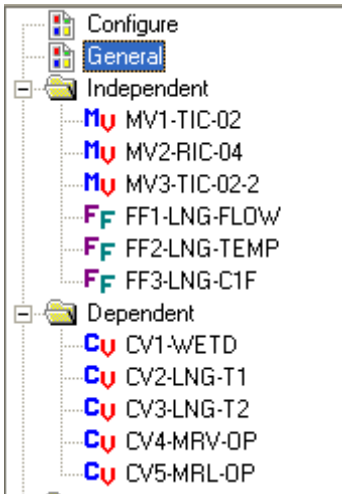
Feed-Rate변화: 33 36.3Kg/Hr

C3 Refrigerant Discharge Temp변화

: 37→ 40→ 35℃

: Sine Wave추가

c. 제어 전략(조절 변수 및 제어 변수)




MV: Manipulated variables

| No | Tag Name | Description | Note |
|---|---|---|---|
| MV01 | FIC_PC | Precooler C3 Refregerant Flow | |
| MV02 | PIC_MRS | MR Compressor Suction Flow | |
| MV03 | FIC_MRV | MRV Flow | |
| MV04 | TIC_MCHE1 | MCHE1 Outlet Temperature | |
| MV05 | FIC_LNG | LNG Product Flow | |

DV: Disturbance variables

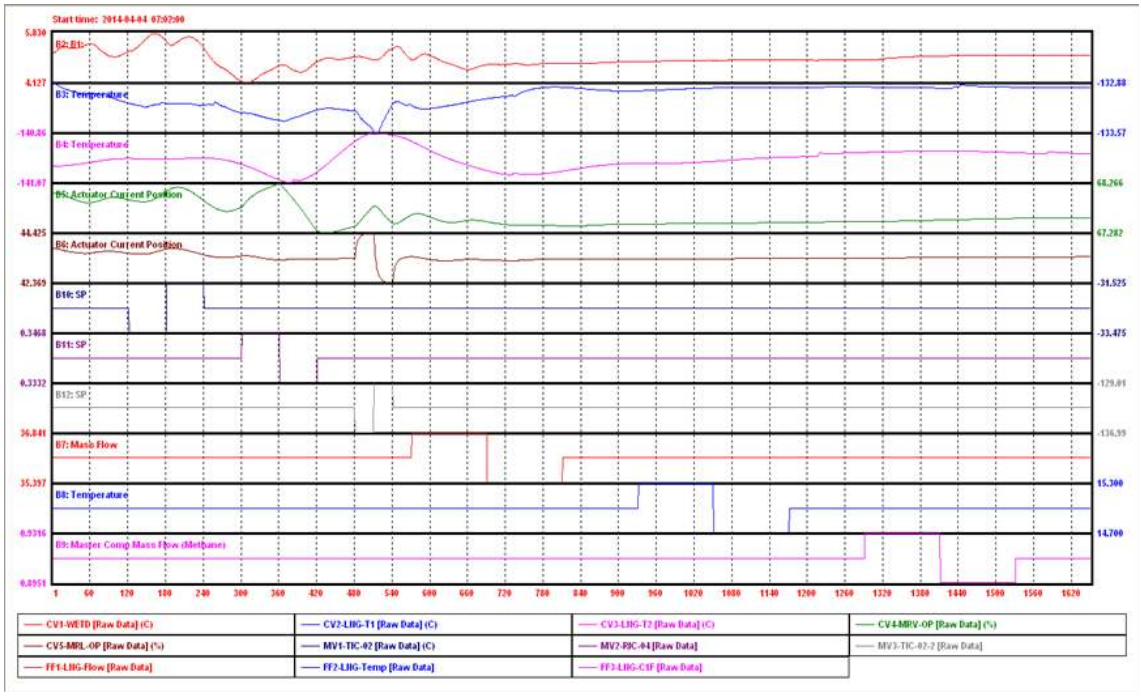
| No | Tag Name | Description | Note |
|---|---|---|---|
| DV01 | PI_25a | LNG Feed Pressure | |
| DV02 | TI_25a | LNG Feed Temperature | |

CV: Controlled variables

| No | Tag Name | Description | Note |
|---|---|---|---|
| CV01 | TIC-02 | MR Precooler Outlet Temperature | |
| CV02 | WEDT | Warm End Delta Temperature | |
| CV03 | MRV/(MRL + MRV) | Ratio | |
| CV04 | LNG/MRL | Ratio | |
| CV05 | TI_LNG Product | LNG Product Temperature | |
| CV06 | FIC_MRV.OP | MRV Flow Controller Opening | |
| CV07 | FIC_MRL.OP | MRL Flow Controller Opening | |

d. 공정 테스트 결과

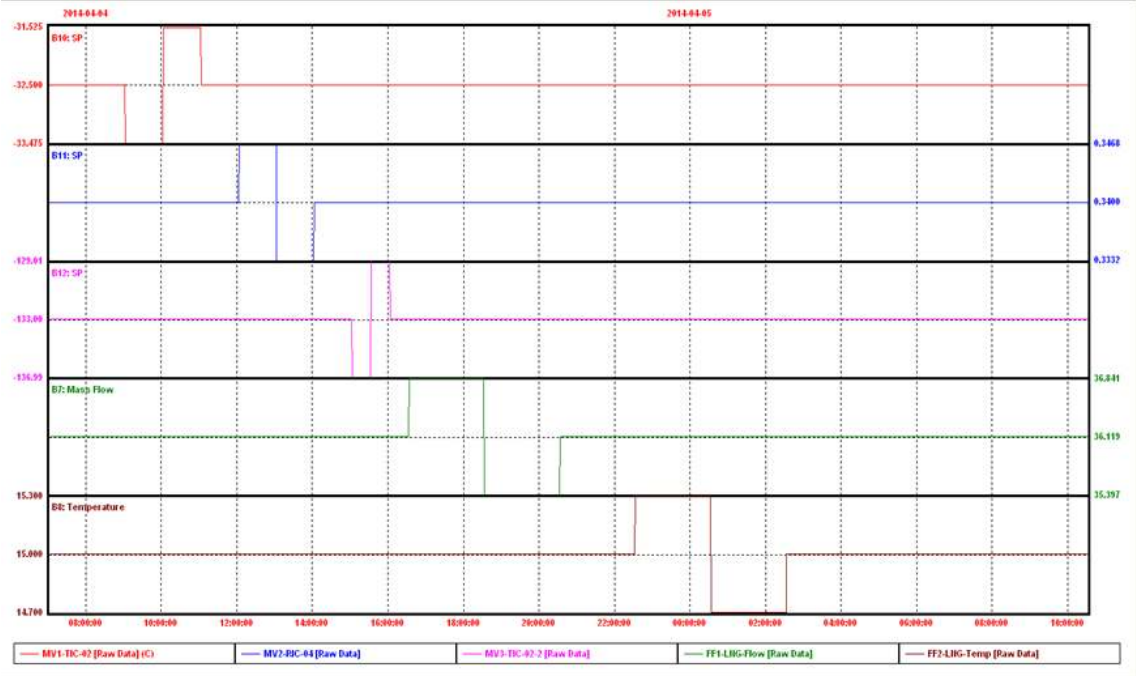
공정의 동특성을 파악하기 위한 테스트를 시행하였으며 본 프로젝트중 가장 많은 시간과 노력이 필요한 과정이다.




Step Test (MVs 와 FFs 각 4회씩 Step변경)

Control Scheme확정 후 조절변수 Test

MV1~MV3의 크기를 1.5%로 조정하여 One-By-One Step Test실시(첨부참조)

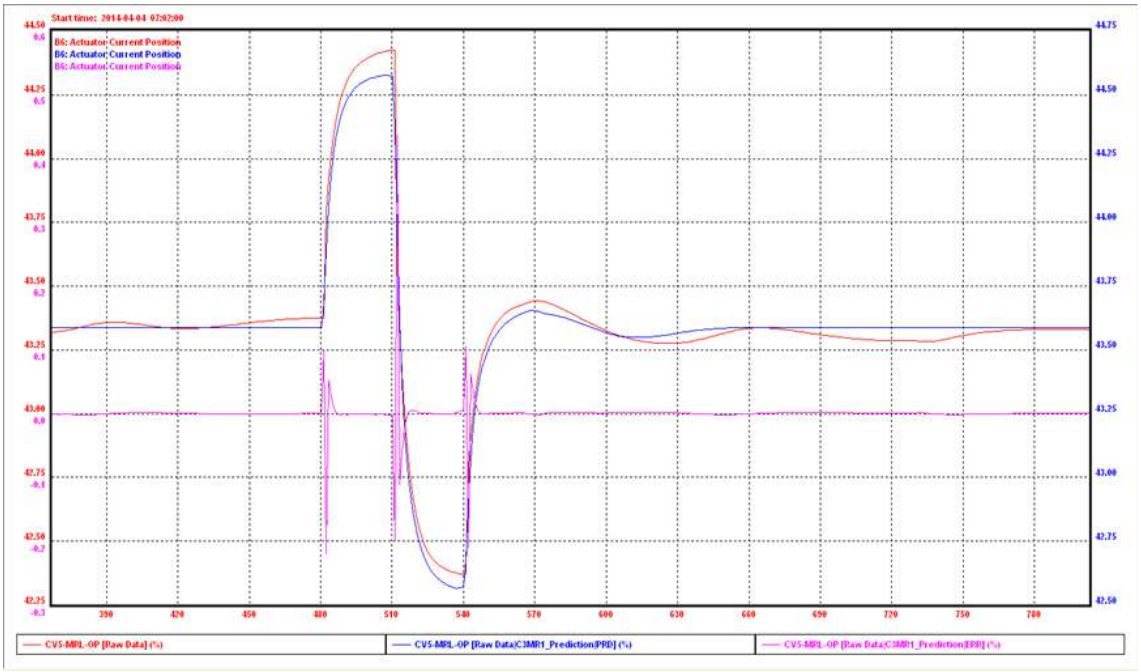


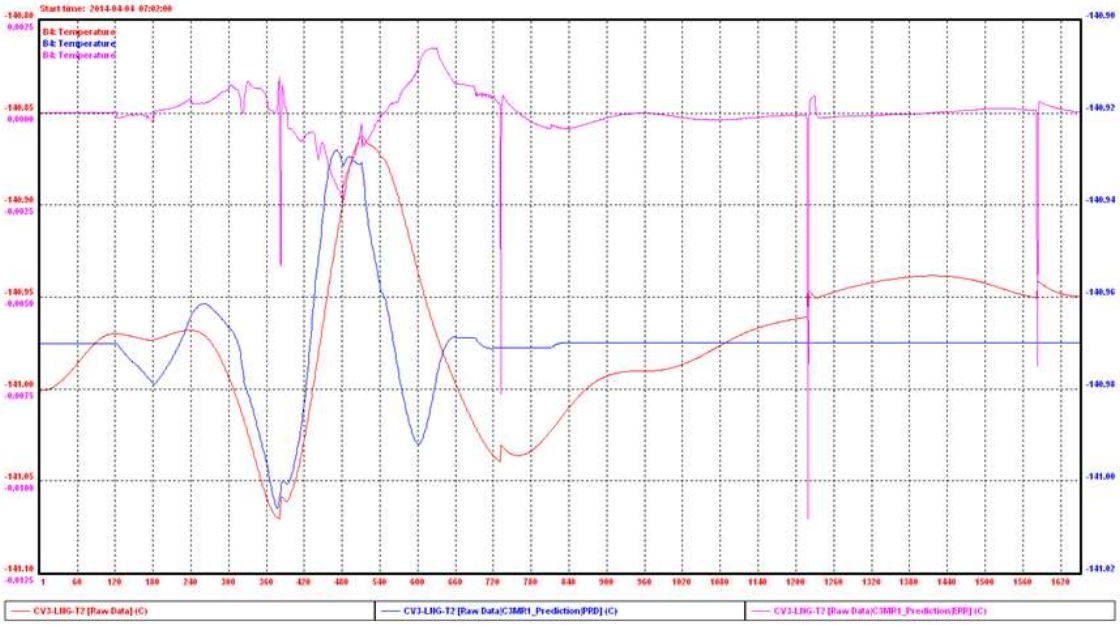

Model Identification

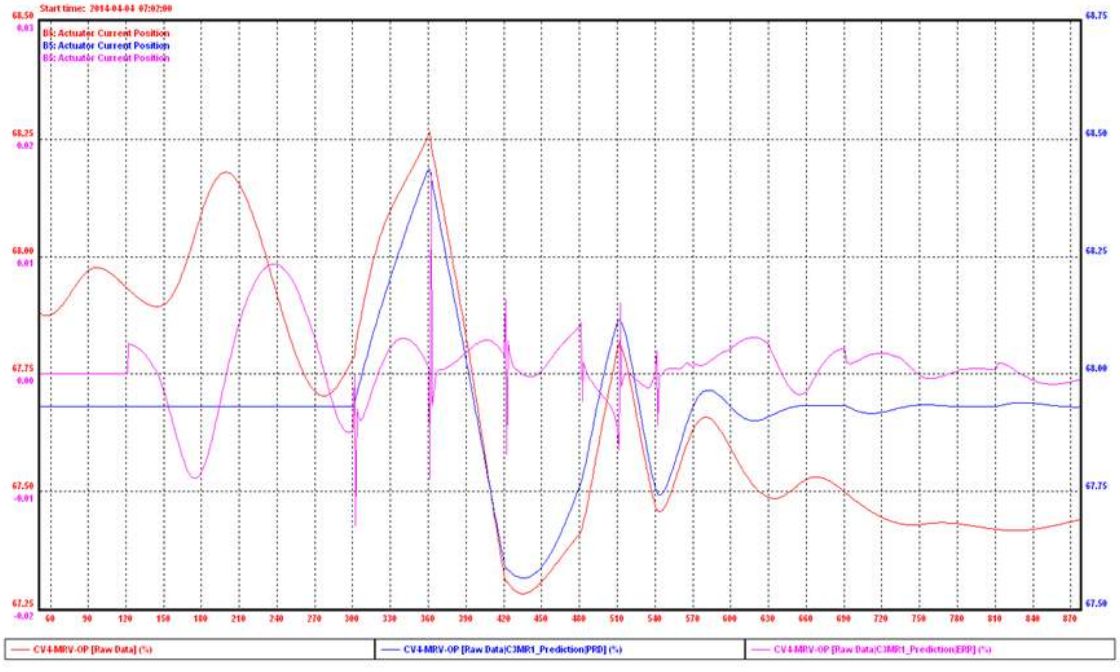
Prediction Result - LNG MCHE1 Outlet Temp

Prediction(Blue Color)와 Actual Response(Red)와의 차이의 Plot임

- 두개의 Color차이가 없는 것으로 보아 Prediction 모델이 양호한 것으로 판단됨

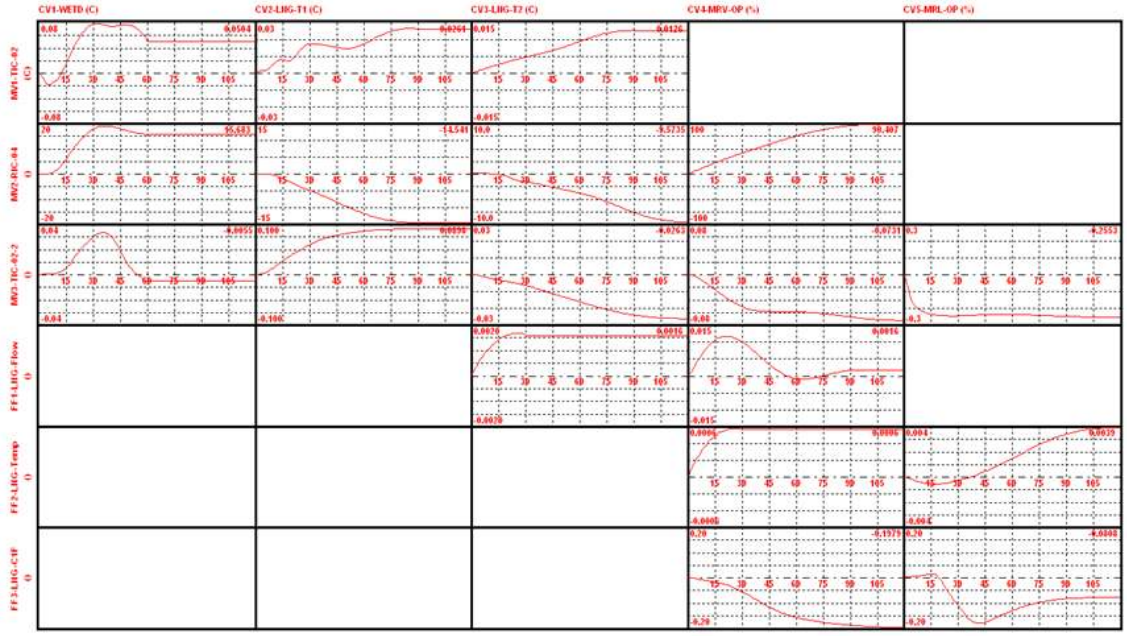



Start time: 2014-04-04 07:02:00
B4: Temperature
B4: Temperature
B4: Temperature
CV3-LHG-T2 [Raw Data] (C)
CV3-LHG-T2 [Raw Data](C3MR1_Prediction)[PRD] (C)
CV3-LHG-T2 [Raw Data](C3MR1_Prediction)[EPD] (C)


Start time: 2014-04-04 07:02:00
B5: Actuator Current Position
B5: Actuator Current Position
B5: Actuator Current Position
CV4-MRV-OP [Raw Data] (%)
CV4-MRV-OP [Raw Data](C3MR1_Prediction)[PRD] (%)
CV4-MRV-OP [Raw Data](C3MR1_Prediction)[EPD] (%)

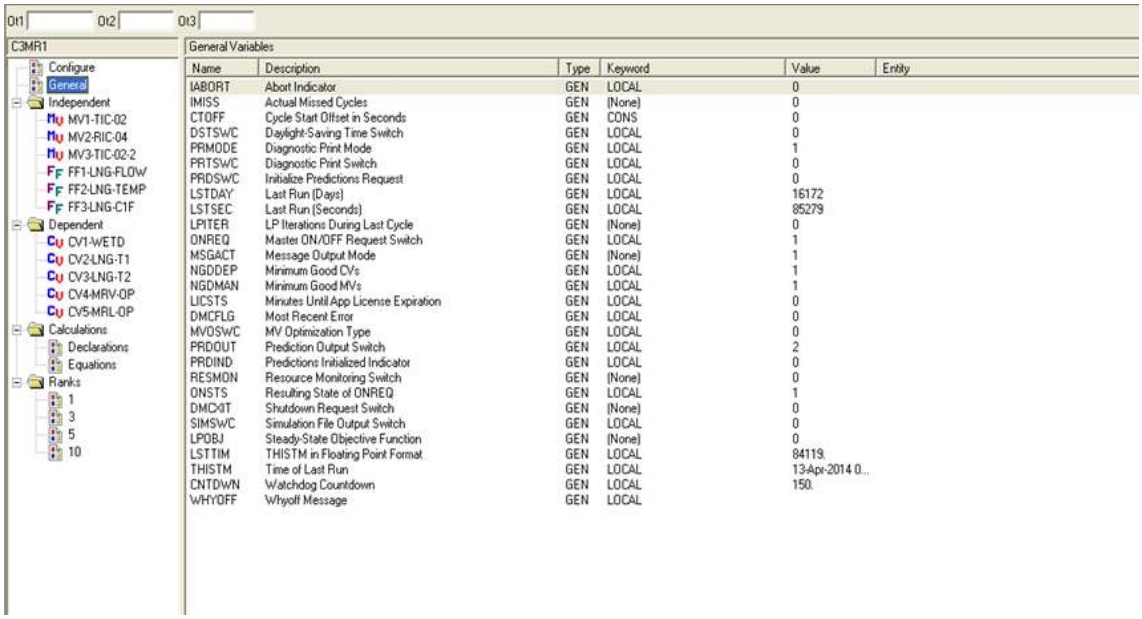
e. Final Model Sets

APC를 가동하기 위한 주요Part인 모델파일이 아래와 같다. 위의 Prediction 및 Engineer의 감으로 공정 모델의 정확도를 확인하고 아래와 같이 공정모델를 확정(Assembling)하고 mdl화일을 생성한다.



f. CCF(Configuration file) 생성

APC가동을 위한 주요 Part인 ccf화일을 생성사는 과정이다.




Simulate가동

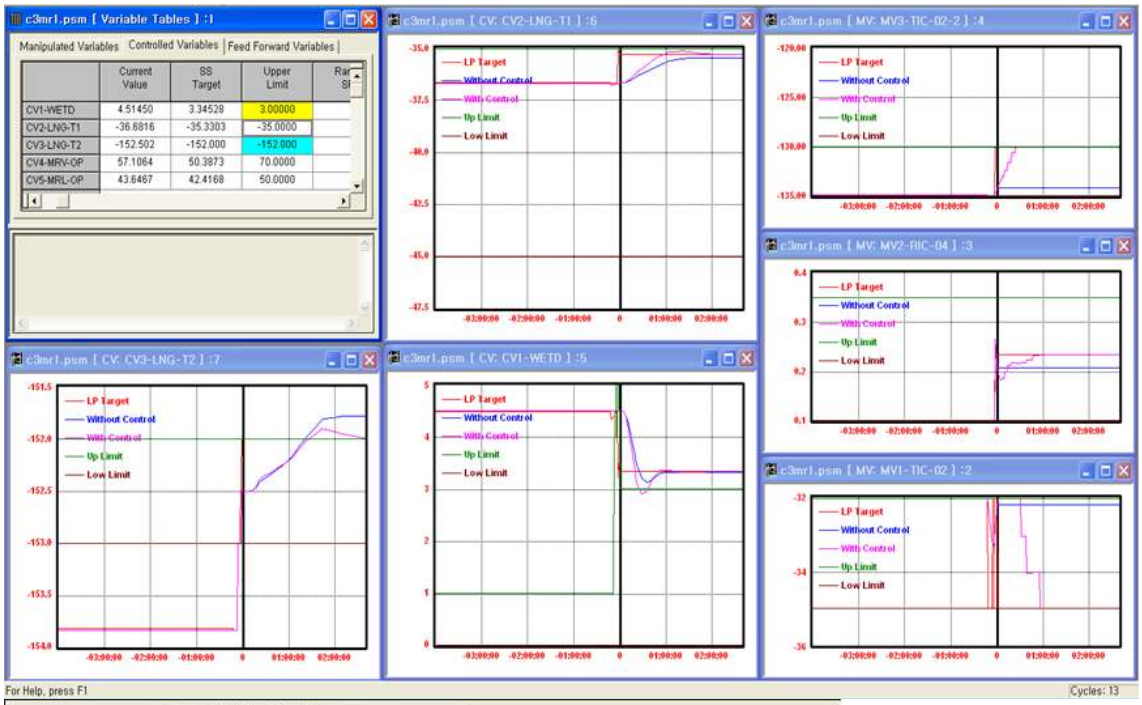
Off-line Simluate는 Model화일과 CCF화일로 실제 공정에 설치 전 Off-line 상태에 서 테스트를 수행한다.

입력 값은 실제 운전시 사용되는 각 변수의 Hi/Low Limit, 각 Controller 의 tuning Parameter등이 입력되어 여러 가지 운전 시나리오를 만들어서 움직임을 파 악하고 Tuning한다.

또한 본 작업 완료 후 실제공정에 설치한다 이 작업을 Commissioning이라고 함

Result: C3/MR간 차이 최소화 Target시 TIC02-2를 높이고 TIC-02온도를 낮춘다


c3mr1.psm [ Variable Tables ] :1
Manipulated Variables
Controlled Variables
Feed Forward Variables
Service Status
Lower Limit
Current Value
MV1-TIC-02
MV2-RIC-04
MV3-TIC-02-2
Good
13-Apr-2014 23:05:31 PREDS 12050 Prediction Initializ
c3mr1.psm [ CV: CV2-LNG-T1 ] :6
c3mr1.psm [ MV: MV3-TIC-02-2 ] :4
c3mr1.psm [ MV: MV2-RIC-04 ] :3
c3mr1.psm [ CV: CV3-LNG-T2 ] :7
c3mr1.psm [ CV: CV1-WETD ] :5
c3mr1.psm [ MV: MV1-TIC-02 ] :2
LP Target
Without Control
With Control
Up Limit
Low Limit




Manipulated Variables | Controlled Variables | Feed Forward Variables

| | Current Value | SS Target | Upper Limit | Ramp SP | Active Constr | SS Error | Oper Srv Switch |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CV1-WETD | 4.50674 | 3.34528 | 3.00000 | | Above Hi | 0.345284 | ON |
| CV2-LNG-T1 | -36.6768 | -35.3303 | -35.0000 | | | 0.000000 | ON |
| CV3-LNG-T2 | -152.504 | -152.000 | -152.000 | | Hi Limit | 0.000000 | ON |
| CV4-MRV-OP | 56.8156 | 50.3873 | 70.0000 | | | 0.000000 | ON |
| CV5-MRL-OP | 43.5829 | 42.4168 | 50.0000 | | | 0.000000 | ON |

Manipulated Variables | Controlled Variables | Feed Forward Variables

| | Service Status | Lower Limit | Current Value | SS Target | Upper Limit | Current Move | Active Constr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MV1-TIC-02 | Good | -35.0000 | -32.0000 | -34.9998 | -32.0000 | 0.000000 | Lo Limit |
| MV2-RIC-04 | Good | 0.100000 | 0.185622 | 0.234063 | 0.350000 | -0.00703632 | |
| MV3-TIC-02-2 | Good | -135.000 | -133.789 | -130.000 | -130.000 | 0.200000 | Hi Limit |

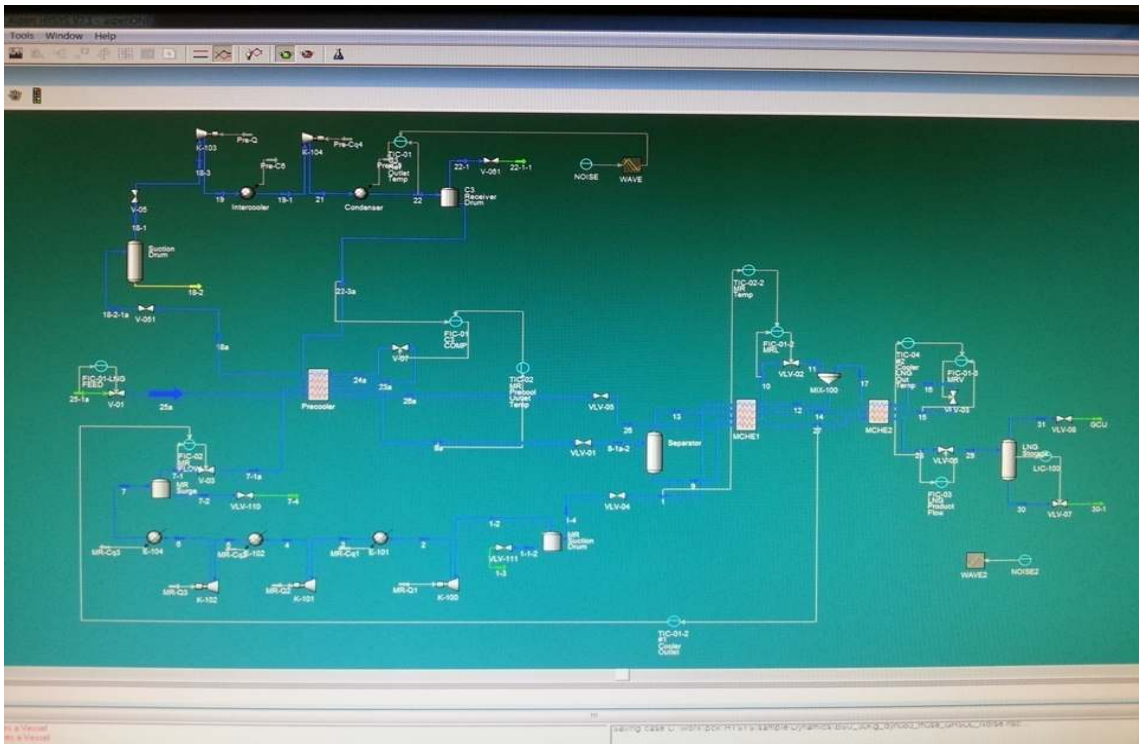
Manipulated Variables | Controlled Variables | Feed Forward Variables

| | Current Value | SS Target | Upper Limit | Ramp SP | Active Constr | SS Error | Oper Srv Switch |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CV1-WETD | 4.49781 | 3.49659 | 5.00000 | | | 0.000000 | ON |
| CV2-LNG-T1 | -36.6735 | -35.2519 | -35.0000 | | | 0.000000 | ON |
| CV3-LNG-T2 | -152.505 | -152.000 | -152.000 | | Hi Limit | 0.000000 | ON |
| CV4-MRV-OP | 56.6437 | 50.3872 | 70.0000 | | | 0.000000 | ON |
| CV5-MRL-OP | 43.5458 | 42.4168 | 50.0000 | | | 0.000000 | ON |

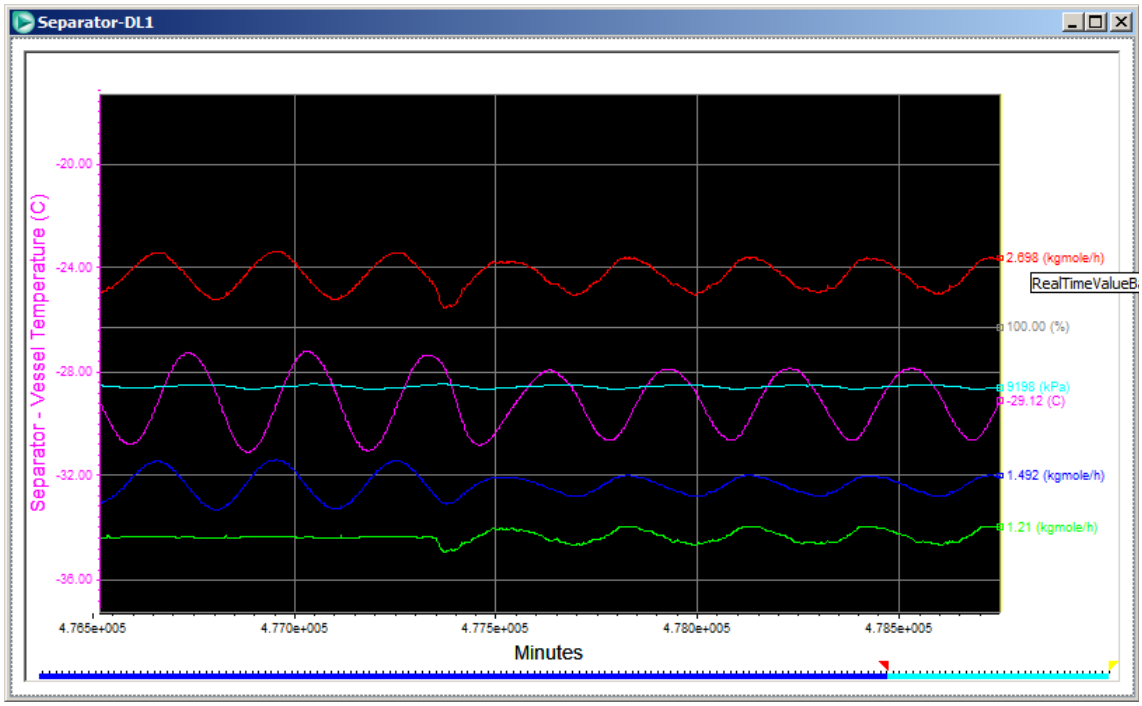
Manipulated Variables | Controlled Variables | Feed Forward Variables

| | Service Status | Lower Limit | Current Value | SS Target | Upper Limit | Current Move | Active Constr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MV1-TIC-02 | Good | -35.0000 | -32.0000 | -32.0000 | -32.0000 | 0.000000 | Hi Limit |
| MV2-RIC-04 | Good | 0.100000 | 0.174890 | 0.234062 | 0.350000 | -0.0107326 | |
| MV3-TIC-02-2 | Good | -135.000 | -133.589 | -130.000 | -130.000 | 0.200000 | Hi Limit |

g. 공정 PDF(Hysys Dynamic Model)

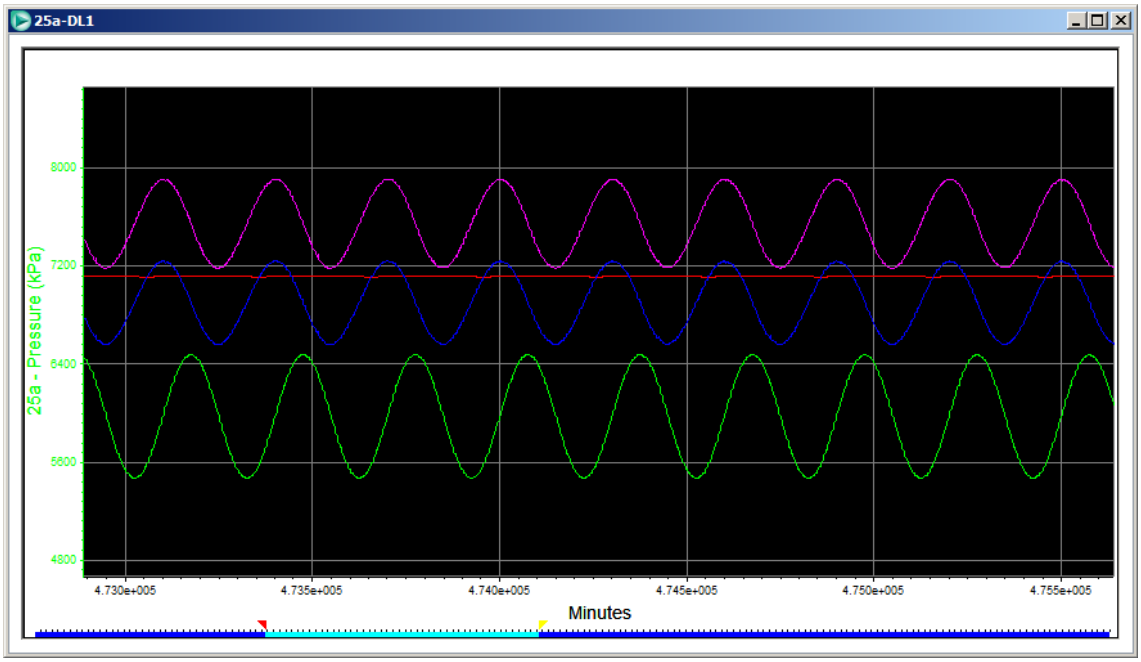


h. APC 적용 결과

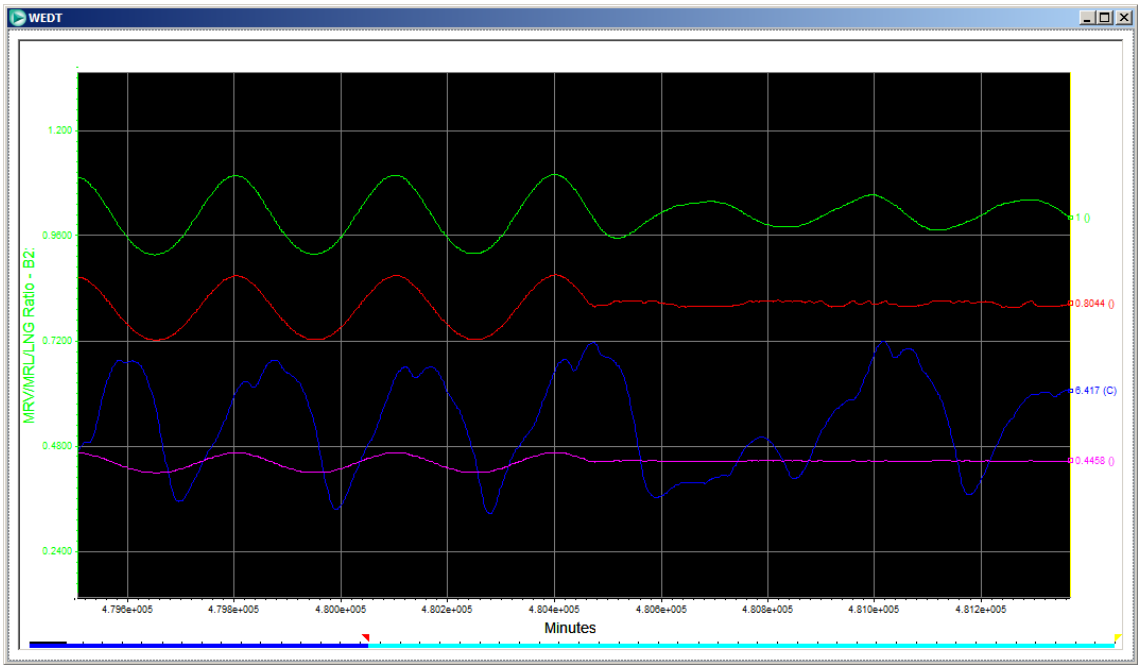



REG: -30 ~ -27

APC : -29.6 ~ -27.8




Inlet Gas Disturbance (압력 및 온도, +-5%)




파란색 : WETD (MCHE1 입구 및 압축기 입구 온도차이)
빨간색 : MRV/MRL
초록색 : MRL/LNG

APC Benefit

원단위 및 Balance(C3MR - LNG Temp) 최소화

Disturbance(Feed Temperature변화 등)에 대한 대처능력향상

## 3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법

| 과제명 | | 성과목표 | | 성과지표 | | 성과검증 기준 | | | 가중치 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 목표치 | 측정방법 | 검증방법 | |
| 1 | LNG 플랜트 공정제어 설계기술 개발 | 1-1 | BSU 플랜트의 공정제어 기준 정립 및 기본설계 | ① | 선진 액화 플랜트 자료 조사 | 100 | 특허조사 | 전문가활용 | 10% |
| | | | | ② | LNG 플랜트 BSU 기본 설계 | 100 | 테스트베드 설계 비교 | 주관기관 검증 | 10 |
| | | 1-2 | BSU 플랜트 구축 | ① | BSU 플랜트 단위 장치 및 현장계기 선정과 상세설계 | 100 | 테스트베드 설계 비교 | 설계 오차 ±5% | 5 |
| | | | | ② | LNG 플랜트 BSU 제작 | 100 | 테스트베드 설계 비교 | 설계 오차 ±5% | 5 |
| | | | | ③ | 테스트베드(Train-1) 제어로직 검증모델 개발 | 100 | 공정모사기를 통한 검증 | 설계 오차 ±5% | 5 |
| | | | | ④ | BSU 시운전 및 단위설비 운전 특성 도출 | 100 | 운전 결과 | LNG 생산 여부 | 10 |
| | | 1-3 | BSU 운전을 통한 테스트베드 공정제어 기술 연구 | ① | BSU 시운전 결과 보완 및 연속운전 설비 보완 | 100 | 시운전 대비 개선도 | 시운전 결과 대비 10% 향상 | 5 |
| | | | | ② | BSU touble shooting 자료 확보 | 100 | 자료확보 완성도 | touble shooting 자료 활용 여부 | 5 |
| | | | | ③ | LNG 플랜트 BSU 연속운전 특성 도출 | 100 | 연속운전 달성도 | 총 운전시간 12시간 이상 | 5 |
| | | | | ④ | 테스트베드(Train-1) regulatory 제어 최적화 | 100 | 공정모사기를 이용한 regulatory 최적 제어 검증 | 안정화 시간 향상 | 5 |
| | | | | ⑤ | 국산기자재(LNG 열교환기) 성능 평가 | 100 | 실험결과 분석 및 설계치 비교 | 설계 대비 90% 이상 일치 | 5 |
| | | 1-4 | 테스트베드 공정제어 기술 최적화 | ① | 테스트베드 공정별 계측/제어 표준정립 | 100 | 표준완성도 | 전문가 자문 신뢰도 80% | 5 |
| | | | | ② | 테스트베드 공정제어 최적화 설계 | 100 | 최적화 완성도 | 선진기술 달성도 90% | 5 |
| | | 1-5 | 상용급 LNG 플랜트 공정제어 기술정립 | ① | 상용급 LNG 플랜트 제어시스템 설계 최적화 | 100 | 제어시스템 설계 완성도 | 선진기술 달성도 90% | 5 |
| | | | | ② | 운전결과 DB 구축 | 100 | 데이터베이스 구축 | DB 구축 여부 | 10 |
| | | | | ③ | 상용급 제어시스템 설계 패키지 개발 | 100 | 선진기술대비 완성도 | 기술완성도 90% 이상 | 10 |
| 계 | | | | | | | | | 100% |

## 제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절 LNG 액화 공정 제어시스템 기본설계 패키지

| 연구성과 | | LNG 액화 공정 제어시스템 기본설계 패키지 |
|---|---|---|
| 주요 연구 성과 | 학술적 연구성과 | ◦학술지 게재 2건<br>- 김형진, 박찬국, 이재용, 이춘식, “천연가스 액화 플랜트 건설을 위한 제어 시스템 사전 점검 정보 처리 플랫폼 개발”, 한국건설IT융합학회, 2011<br>- 이재용, 김문현, 박찬국, “혼합냉매를 이용한 천연가스 액화 공정의 제어변수 분석”, 한국가스학회, 2013<br><br>◦학술대회 발표<br>- 이재용, 김원배, 박찬국, 최광호, “Bench Scale급 LNG 액화플랜트의 제어시스템에 관한 연구”, 한국에너지공학회<br>- 김형진, 박찬국, 이춘식, 이재용, “LNG 초저온 액화 공정의 최적화 모델링 : 제어변수 CASE STUDY”, 대한조선학회<br>- 박찬국, 이재용, “혼합냉매를 이용한 중소형 LNG 액화시스템 동적모사연구”, 대한조선학회<br>- 이재용, 김형진, 박찬국, “LNG 액화플랜트를 위한 냉동사이클 제어시스템 구성”, 한국화학공학회<br>- 이재용 외 6, “1-Ton/day급 LNG 액화 플랜트 기본설계 및 제어로직 연구<br>- 이재용, 김원배, 김형진, 박찬국, “선박용 LNG 액화 플랜트와 대규모 LNG 액화 플랜트 공정의 비교”, 대한조선학회<br>- 이재용, 이춘식, 김형진, 박찬국, “왕복동형 압축기를 이용한 천연가스 액화 공정의 제어방법”, 한국공업화학회<br>- 이재용, 김문현, 박찬국, “천연가스 액화 플랜트에서 APC 적용을 위한 공정분석”, 한국공업화학회 |

| | | |
|---|---|---|
| | | - 박찬국, 김형진, 이재용, 이춘식, “LNG BSU APC 적용을 위한 동적 모델 개발 연구”, 한국기계학회<br>- 김형진, “천연가스 액화 공정 벤치 스케일 유닛 제어 기능 연구”, 한국기계학회 |
| | 기술적 연구성과 | ◦ 특허 등록 4건<br>- 특허 제 10-1370940호, “이원냉동시스템과 이의 기동 방법”<br>- 특허 제 10-1357720호, “천연가스 액화용 냉동 시스템 및 방법”<br>- 특허 제 10-1336679호, “천연가스 액화 시스템과 이의 기동 방법”<br>- 특허 제 10-1361001호, “천연가스 액화 시스템의 정지 방법”<br><br>◦ 산학연 협력 1건<br>- 김문용(영남대학교), 박찬국 외 5명(고등기술연구원) “천연가스 액화 공정의 제어 로직 개발 방향과 선진 사례 분석 및 향후 협력 방안의 모색”<br><br><br>◦ 기술지원 1건<br>- 광신기계공업 연구원 4인 대상 천연가스 액화 플랜트의 기본 방향과 Bench scale unit 설계 및 운전 기술 교육 |

- 기술교육 내용

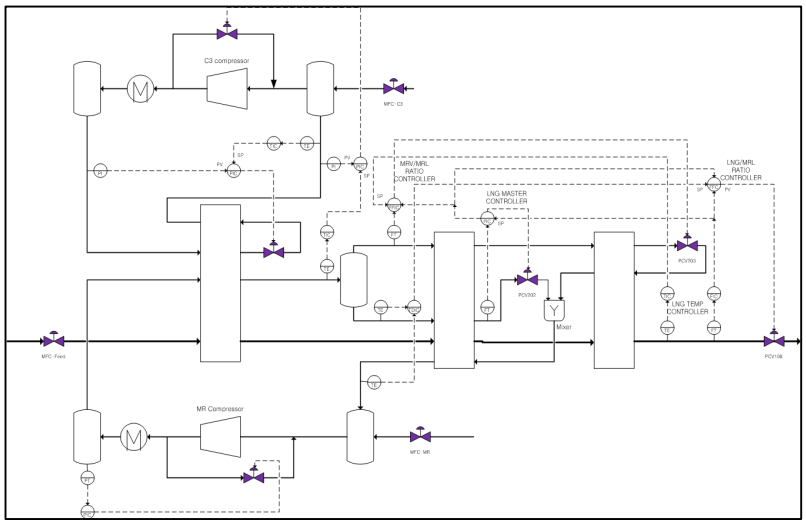
IAE 고등기술연구원 Institute for Advanced Engineering

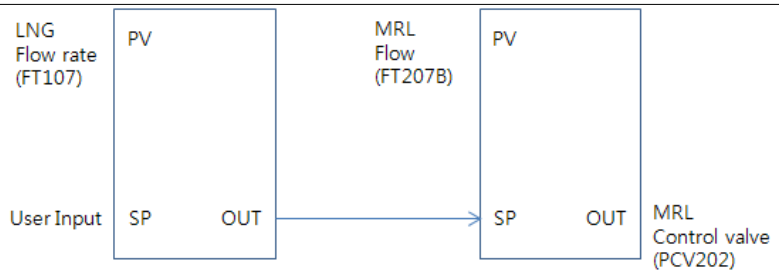
**중소형 LNG 플랜트 초저온 액화 공정 기술 교육**

| 구 분 | 시 간 | 내 용 | 발표자 | 장 소 |
|---|---|---|---|---|
| 2/1 (수) | 13:50 - 14:00 | 참석자 소개 및 향후 일정 설명 | 박찬국 박사 | LNG BSU 제어실 |
| | 14:00 - 16:00 | 중소형 LNG 플랜트 소개 및 초저온 액화 공정 | 박찬국 박사 | |
| | 16:00 - 17:00 | 중소형 LNG 플랜트 안전 및 인허가 | 이춘식 연구원 | |
| | 17:00 - 18:00 | 중소형 LNG 플랜트 시운전 결과 해석 | 이재용 연구원 | |
| | 저녁 식사 및 휴식 (18:00 - ) | | | |
| 2/2 (목) | 09:00 - 10:30 | 중소형 LNG 플랜트 설계 및 제작 사례<br>중소형 LNG 플랜트 주요 기자재 | 박찬국 박사 | LNG BSU 제어실 |
| | 10:30 - 12:00 | 중소형 LNG 플랜트 시뮬레이터 | 김형진 수석 | |
| | 점심 식사 (12:00 - 13:00) | | | |
| | 13:00 - 18:00 | LNG BSU 시운전 참관 | 전체 | LNG BSU 현장 |
| | 저녁 식사 및 휴식 (18:00 - ) | | | |
| 2/3 (금) | 09:00 - 12:00 | Review Meeting | 전체 | LNG BSU 제어실 |
| | 12:00 - 12:10 | 교육 정리 및 해산 | 박찬국 박사 | |

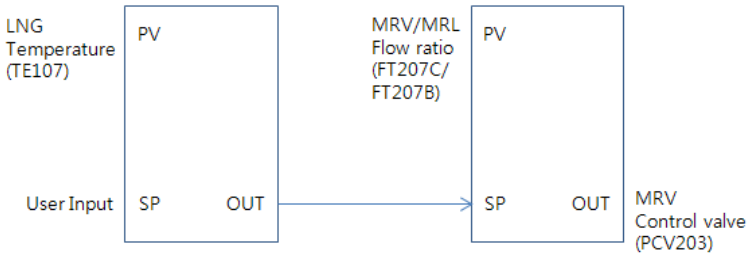
◦ 기술홍보 1건

- 한미 플랜트 기술교류회 “LNG 액화 공정 제어 시스템 연구 개발” 기술 홍보, 2013년 6월 13일
- 홍보대상 : 플랜트 업종 종사자 및 학계인사 200여 명

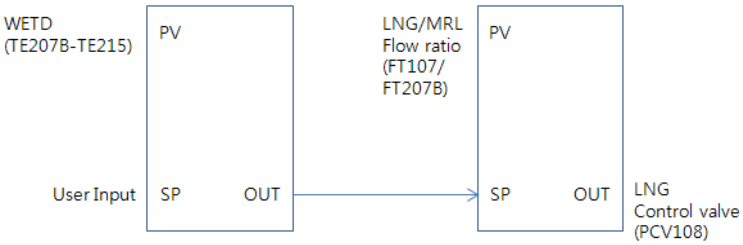
| | | |
|---|---|---|
| | |    |
| 기술실시 및 현장적용 사례 | | ◦테스트베드(Train-1) 제어로직 BSU 현장 적용<br>- 상용급 LNG 플랜트 설계의 바탕이 된 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 BSU에 구현해서 운전함으로써 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 검증<br>- 실험 내용<br>a. 테스트베드(Train-1)의 액화공정 제어로직을 분석하여 BSU에 적용할 수 있는 설계안 확정  <br>b. 설계안의 내용을 BSU에 구현하기 위해서 해당 제어로직을 BSU 제어를 위한 PLC에 프로그램 후 업로드 |




<LNG master controller block diagram>

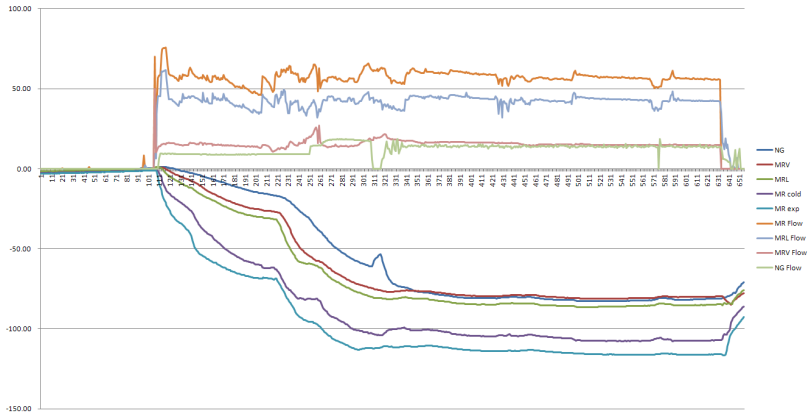



<MRV/MRL ratio controller block diagram>




<LNG/MRL ratio controller block diagram>

c. 구현된 테스트베드(Train-1)의 제어로직을 BSU 실험을 통해서 검증



| | |
|---|---|
| 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 | ◦ 본 성과 내용인 상용급 LNG 플랜트 제어시스템 기본설계 패키지는 상용급 LNG FEED 패키지 내용 중에서 제어 시스템에 관한 부분으로 핵심 요소 중 하나임<br>◦ 현재 에너지 시장에서 천연가스의 비중은 점차 늘어나고 있으며, 반대로 전통적인 석탄 및 석유의 소비량은 점점 줄어드는 추세이다. 또한 전통적인 천연가스 생산 방법 외에 쉐일가스로 대표되는 비전통 천연가스 시장이 급격하게 커졌기 때문에 앞으로의 천연가스 시장은 계속해서 팽창해 나갈 것이며, 그에 따른 LNG 플랜트의 수요도 꾸준하게 증가할 것이다.<br>◦ LNG 플랜트에서 액화 공정이 차지하는 cost 비용은 전체의 40% 이상으로 핵심적인 부분이며, 그에 따른 에너지 절감 및 효율개선의 연구개발도 계속해서 발전할 것이다. 때문에 국외 시장 진출 시에 천연가스 액화 부분의 기술력이 전체 LNG 플랜트의 핵심 기술로 고려되어 시장 진출에 핵심적인 요소가 될 것이다.<br>◦ 국내에서는 현재까지 LNG 플랜트 FEED를 수행한 전례가 없기 때문에 당장의 시장 진출은 쉽지 않겠지만 테스트베드를 시작으로 시장을 점차 확대해 나간다면, FEED 뿐만 아니라 침체된 국내 초저온 기자재 시장에도 활기를 찾을 수 있을 것이다. |

2절 LNG 액화 공정 BSU 시작품

| 연구성과 | | LNG 액화 공정 BSU 시작품 |
|---|---|---|
| 주요 연구 성과 | 학술적 연구성과 | ◦학술지 게재 1건<br>- 이춘식, 임동렬, 김형진, “시간당 20kg급 LNG 액화 플랜트에서 냉매 유량변화에 따른 프로판 냉동사이클 성능의 실험적 분석”, 한국에너지기후변화학회, 2013<br><br>◦학술대회 발표 |

| | | |
|---|---|---|
| | | - 김형진, 박찬국, 이재용, 김원배, “LNG FPSO 적용 검토를 위한 초저온 액화 공정의 과열도 최적화 연구”, 대한조선학회<br>- 박찬국, “가스액화 초저온공정 및 LNG BSU 실험 설비”, PLANT CONFERENCE 2010<br>- 박찬국, 김원배, 김형진, 이재용, “혼합냉매이용 LNG BSU 설계 및 특성분석”, 대한조선학회<br>- 박찬국, 김원배, 김형진, 이재용, “냉매이용 LNG BSU 설계 및 특성 분석”, 대한조선학회<br>- 박찬국, 이재용, 이춘식, 김문현, “프로판 및 혼합냉매를 이용한 LNG 초저온 이원냉동시스템 냉동 특성”, 대한설비공학회<br>- 이춘식, 이재용, 김형진, 박찬국, “소형의 가스액화 공정에서 냉동시스템의 엑서지 해석”, 대한설비공학회<br>- 이춘식, 이재용, 김형진, 박찬국, “기액분리기 입구 조건에 따른 4성분 비공비혼합냉매의 기액분리와 냉동특성 연구”, 대한설비공학회<br>- 이재용, 김문현, 박찬국, “천연가스 이용확대를 위한 실험용 액화 시설의 구성과 실험”, 한국에너지기후변화학회<br>- 박찬국, 김형진, 임동렬, 이재용, 이춘식, 김문현, “혼합냉매를 이용한 이원냉동싸이클의 초저온액화 LNG BSU의 실험적 고찰”, 대한기계학회<br>- 이재용, 김형진, 이춘식, 박찬국, “천연가스 액화를 위한 Bench Scale Unit의 기동 및 정지”, 대한기계학회<br>- 김형진, 박찬국, 이재용, 이춘식, 임동렬, 김문현, “LNG 액화 공정 프랜트 벤치규모 유닛 시운전 결과 분석”, 대한설비공학회<br>- 이춘식, 임동렬, 김형진, “시간당 20kg/h급 LNG 액화 플랜트에서 플레이트 핀 열교환기 성능의 실험적 분석”, 한국에너지기후변화학회 |
| | 기술적 | ◦ 특허 등록 3건 |

| | | |
|---|---|---|
| | 연구성과 | - 특허 제 10-1325586 호, “천연가스 액화 시스템”<br>- 특허 제 10-1436851 호, “이중 유로 글로브 밸브”<br>- 특허 제 10-1180314 호, “순환식 LNG 액화 시스템”<br><br>◦ 산학연 협력 1건<br>- 문흥만(대성산업가스), 박승하, 김일환, 엄인섭, 김창수, 박봉우,(동화엔텍), 박찬국 외 4명(고등기술연구원) “한국 산업에서 초저온 산업이 차지하는 비중과 향후 발전 방향 모색”<br><br><br>◦ 기술홍보 1건<br>- 한국건설교통기술평가원 웹진 “LNG BSU 초저온 실험실” BSU 설비 및 실험 내용 홍보<br>- 홍보대상 : 한국건설교통기술평가원 웹진 구독자 |

| | | |
|---|---|---|
| | | <br>작다고 깔보지 마라…<br>LNG 액화 기술 국산화는 우리 손으로<br>플랜트엔지니어링센터 LNG BSU 초저온 실험실<br><br>- 플랜트 이엔씨 저널 책자 홍보 “천연가스 초저온 액화 플랜트 기술”<br>- 홍보대상 : 플랜트 이엔씨 저널 구독자 |
| 기술실시 및 현장적용 사례 | | ◦BSU 시작품을 이용한 현장적용<br>- 왕복동형 프로판 압축기 시운전 및 프로판 사이클 구성 실험<br>- 왕복동형 혼합냉매 압축기 시운전 및 혼합냉매 사이클 구성 실험<br>- 국내에서 제작한 MCHE(Main Cryogenic Heat Exchanger)를 BSU 현장에 적용해서 온도 강하 테스트<br>- 국내에서 제작한 초저온 제어밸브(J-T 효과용) BSU 적용 및 온도 강하 및 유량 조절 테스트 |

| | |
|---|---|
| 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 | ◦ 본 성과 내용인 LNG 액화 플랜트의 Bench Scale Unit은 테스트베드(Train-1)의 제어로직 검증 차원에서 제작한 시작품으로 용량은 30kg/h 정도로 전 세계적으로도 많지 않은 초소형 액화 플랜트임.<br>◦ 전통적인 가스전에서 사용하는 LNG 플랜트 외에 가스전 중에서 파이프라인 매설이 되지 않는 지역이나 작은 규모 가스전 개발을 위해서 소형 액화 플랜트 시장은 전망이 밝음.<br>◦ 미국의 GE사에서는 소규모 액화 플랜트를 모듈화하여 Mini LNG™ 라는 이름으로 개발하여 판매를 시작하고 있으며, 그 외에도 소규모 LNG 시장을 겨냥한 회사들이 해당 제품 개발에 박차를 가하고 있다.<br>◦ 동남아 및 중국 등지에서 소규모 혹은 LNG 플랜트를 건설하기 지리적으로 어려운 가스전이 상당 수 존재하고 있고, 이러한 가스전의 개발에 소규모 모듈 형태의 플랜트 수요가 증가할 것이다. |

## 제4장 연구목표 달성 및 효과

1절 연구개발 최종목표 달성도

| 목 표 | 달 성 도 (%) | 내 용 |
|---|---|---|
| 상용 LNG 액화플랜트 구성 및 제어방식 분석 | 100 | -상용 LNG 액화 플랜트 구성 정보 수집<br>-상용 LNG 액화 플랜트 제어 시스템 조사<br>-액화 공정 특허 분석 |
| Test-bed(Train 1) 제어로직 분석 | 100 | -테스트베드(Train 1)의 제어 방식 분석<br>-테스트베드(Train 1) 제어시스템 타당성 조사 |
| Scale-up을 고려한 BSU 플랜트의 기본설계 | 100 | -BSU 기본 설계서<br>* PFD & P&ID<br>* 단위 설비 사양서<br>-공정 모사(Steady stete) |
| BSU 플랜트의 제어시스템 기본설계 | 100 | -BSU 제어포인트 선정<br>-BSU 제어시스템 기본 설계 |
| BSU 플랜트 제작 | 100 | - 테스트베드(Train-1)를 고려한 스키드형 제작<br>- 완성검사 및 안전테스트 |
| BSU 시운전 및 단위설비 운전특성 도출 | 100 | - BSU 단위설비 시운전<br>- BSU 단위 설비 특성 도출 |
| BSU 시운전 결과 보완 및 연속운전 설비 보완 | 100 | - 프로판 압축기 시운전<br>- 혼합냉매 압축기 시운전<br>- 전체 사이클 시운전 및 보완 |
| LNG BSU 연속운전 특성 도출 | 100 | - 전체 사이클 유지<br>- 천연가스 액화<br>- 안정상태 유지 및 운전 특성 분석 |
| 국산 기자재 성능 평가 | 100 | - 냉매 압축기 성능평가<br>- 열교환기 성능평가 |
| BSU DB 구축 및 trouble shooting | 100 | - 운전데이터 DB화<br>- trouble shooting 보고서 |

| | | |
|---|---|---|
| 테스트베드(Trin-1)<br>제어로직 검증 모델개발 | 100 | - 테스트베드(Train-1) 제어로직 분석<br>- 테스트베드(Train-1) 검증 모델 개발 |
| 테스트베드(Train-1)<br>regulatory 제어 최적화 | 100 | - 테스트베드 제어 설계안 2가지 type 설계<br>- 두 type에 대한 공정 모사 및 분석 |
| 테스트베드 공정별<br>계측/제어 표준정립 | 100 | - 계측기기 선정 기준 정립<br>- 계측 시스템 구성 기준 마련<br>- 계측/제어 종류 및 범위 정립 |
| 테스트베드(Train-1)<br>공정제어 최적화 설계 | 100 | - 테스트베드(Train-1) 제어로직 BSU 구현<br>- BSU 운전을 통한 설계 성능 검증 |
| 상용급 LNG 액화 플랜트<br>제어설계 패키지 개발 | 100 | - 상용급 LNG 플랜트 공정 분석<br>- 상용급 LNG 액화 플랜트 제어 설계 |

## 2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

### 1) LNG BSU 시작품 제작을 통한 검사 방법, 기술 정립

LNG BSU는 고압가스 일반제조시설로서 주요기자재 압축기, 열교환기 등은 냉동특정설비에 해당한다. 그 동안 국내에서 LNG 파일럿 플랜트를 사용한 적이 없었기에 주요부품이나 설비에 대한 명확한 검사기준이 없어 LNG BSU를 통해 한국가스안전공사와의 협력 하에 검사를 진행하였다. 아직도 테스트베드나 상용급 LNG 플랜트와 관련해서는 수입 기자재의 수요가 많고 국제적으로 ASME 기준을 따르고 있기 때문에 ASME 검사방법을 택하고 있으나 향우 국내 LNG 산업의 부흥을 전망할 때 중소기업의 부품개발 과정에서의 국내 검사기준의 정립 또한 기술의 진보에 큰 도움을 주리라 전망된다. 이에 본 LNG BSU 설비를 통한 한국가스안전공사와의 검사과정을 소개하기로 한다. 우선 시스템의 냉동능력은 압축기에 의해서 결정되며 3RT 이상일 경우 냉동제조 규정을 따르게 된다. 표4.2.1에서 알 수 있듯이 LNG BSU는 2대의 압축기에 의해 7RT를 넘어 냉동제조로 구분되나 고압가스일반제조와 냉동제조가 중복될 경우 냉동제조에 해당하는 부분은 고압가스일반제조시설 내 냉동특정설비로 분류되어 이를 표4.2.2에 정리하였다.

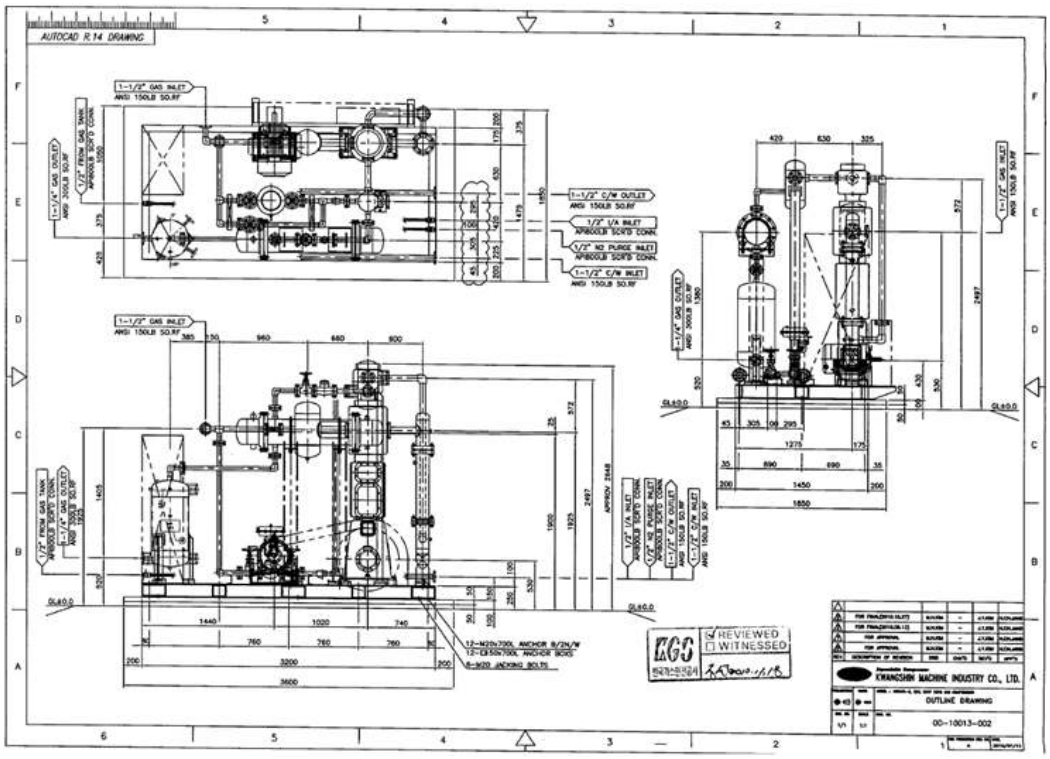
표4.2.1 LNG BSU 냉동능력

| 구 분 | 제조(처리) 능력 및 저장능력 | | 비 고 |
|---|---|---|---|
| 제조(처리) 능력 | 압축가스(㎥) | 150Nm³/hr×1기×24hr<br>= 3,600Nm³/Day | CRYOGENIC PUMP |
| 저 장 능 력 | 액화가스(kg) | 61,636kg × 4EA = 246,544kg | LNG 용기 |
| 냉 동 능 력 | MR 콤프레샤<br>(혼합냉매) | 11,569 ÷ 3,1 = 3,73RT | 부속냉동설비 |
| | C3 콤프레샤<br>(프로판냉매) | 32,07 ÷ 9,6 = 3,34RT | 부속냉동설비 |

표4.2.2 LNG BSU 주요 설비

| 설비명 | | | 용량 | 수량 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|
| LNG 저장용기 | 저장용기 모델 | | XL-45 | 4 BT | 검사품 |
| | 내용적 | | 165ℓ | | |
| | 저장능력 | | 61,636kg | | |
| | 설계압력 | | 1,577MPa | | |
| VAPORIZER | 기화기 모델 | | TC-AAV-LNG-150 | 1 SET | 검사품 |
| | 처리능력 | | 150Nm³/hr | | |
| | 설계압력 | | 18,0MPa | | |
| CRYOGENIC PUMP | 펌프모델 | | GSK-PR-600H | 1 SET | 압축펌프 |
| | 처리능력 | | 150m³/hr | | |
| | 설계압력 | | 18,0MPa | | |
| 열교환기 | E-11 PRECOOLER | 내용적 | 0,00698m³ | 1 SET | 검사품 (부속냉동설비) |
| | | 설계압력 | 7,1MPa | | |
| | E-12A MCHE 1 | 내용적 | - | 2 SET | |
| | | 설계압력 | 7,0MPa | | |
| | E-12B MCHE 2 | 내용적 | - | 1 SET | |
| | | 설계압력 | 7,0MPa | | |
| 냉매용 압축기 | 프로판 냉매용 | 1일냉동능력 | 3,34RT | 1 SET | 검사품 (부속냉동설비) |
| | 혼합 냉매용 | 1일냉동능력 | 3,73RT | 1 SET | |

사용된 냉매용 압축기의 경우 단품이 아닌 조립식 형태로 되어 있고 압축과정에서 냉매의 압력과 온도가 변하기 때문에 검사 시에는 구간을 나누어서 수행되어지며 프로판 압축기는 3구간, 혼합냉매 압축기는 5구간을 구분지어서 검사수행이 되었다. 그림4.2.1에는 프로판 압축기의 검사과정을 그림4.2.2에는 혼합냉매 압축기의 검사과정을 나타내었다.



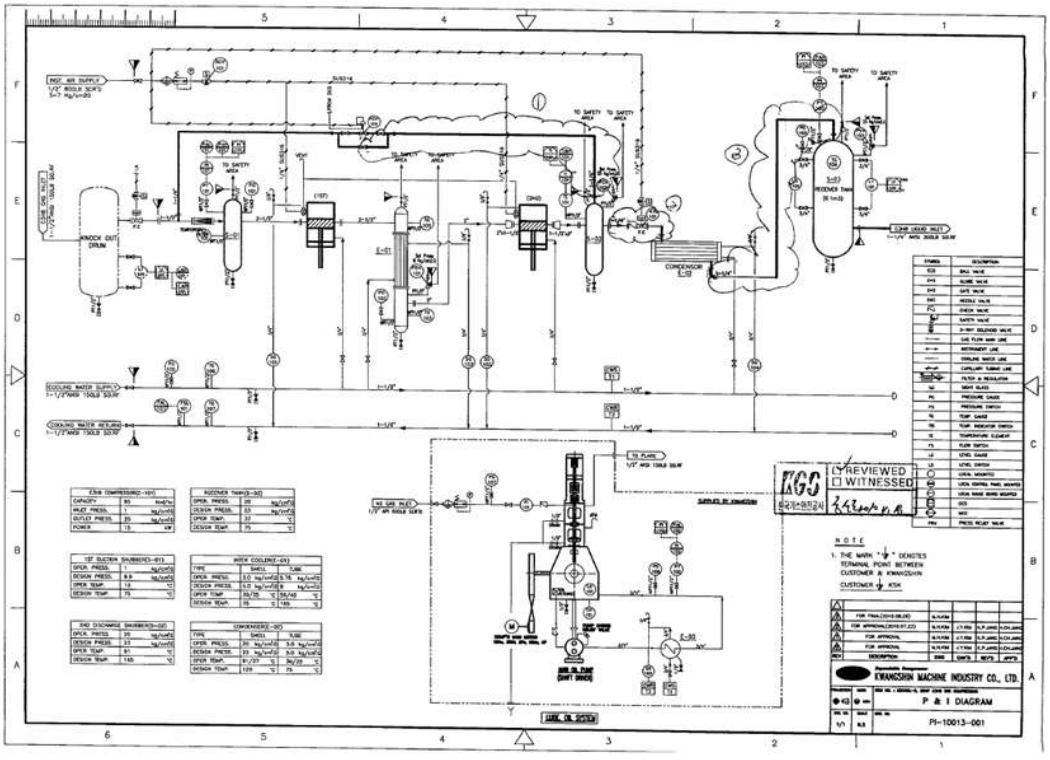
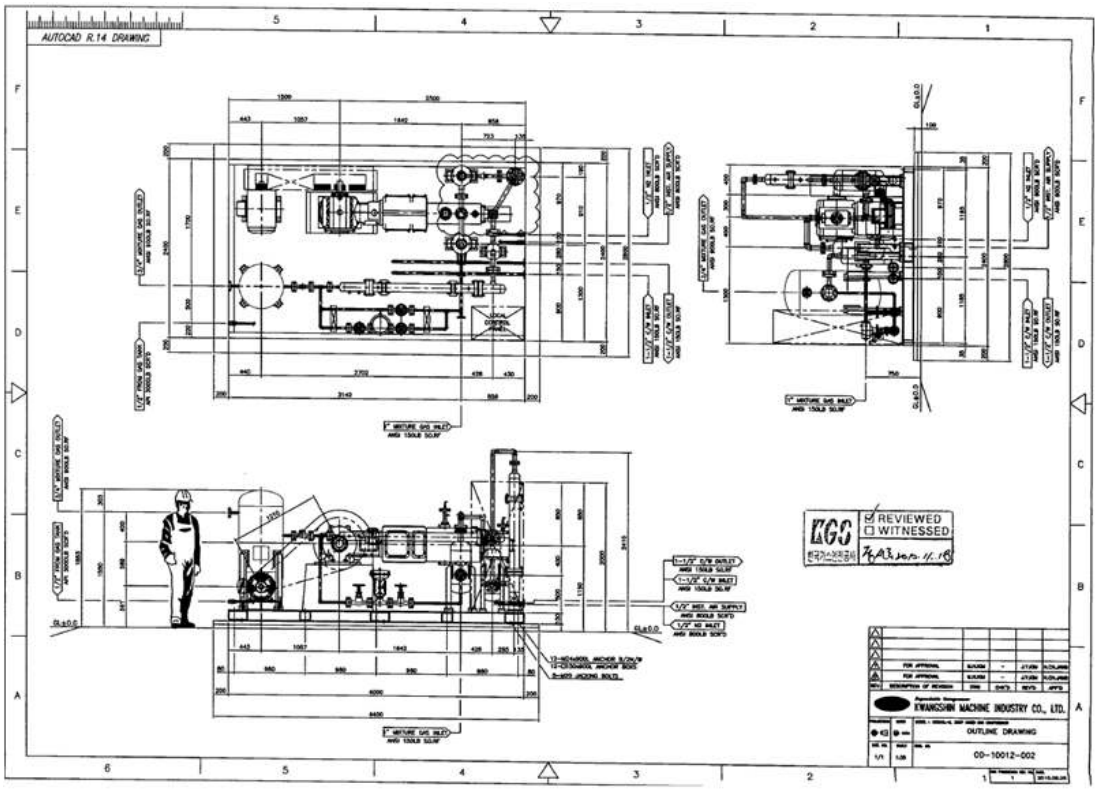




그림 4.2.1 프로판 압축기 검사



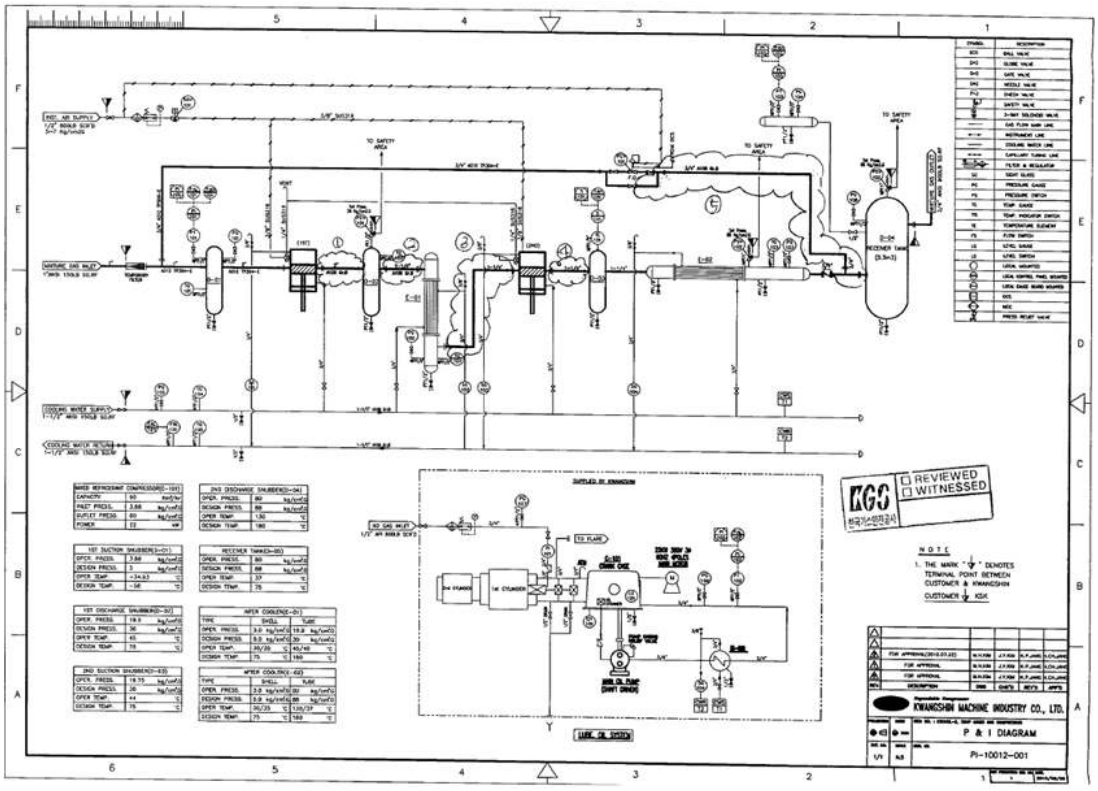




그림 4.2.2 혼합냉매 압축기 검사

2) LNG BSU 시작품 제작을 통한 주요기자재 성능 테스트

LNG BSU에 사용된 주요기자재 압축기, 열교환기, 팽창밸브 등은 국내 제조사에서 처음으로 제작되어 BSU를 통해 성능 확인을 할 수 있었으며 향후 부품제조사가 유사한 플랜트 산업에 판로를 개척하고자 할 때 Track Record를 제공하는 역할을 하였다. 우선 압축기의 경우 성능이 만족스럽게 나타났으며 열교환기는 성능이 약간 부족하나 시스템적으로 결합이 되어있어 열교환기만의 단독 성능특성으로는 간주할 수 없었다. 팽창밸브는 성능이 많이 부족했으며 주된 이유는 LNG 설비에서 세계적으로 유례없는 너무 작은 사이즈 플랜트에 기인한 배관직경에 따른 Cv Coefficient가 너무 적기 때문이었다. 실험결과를 기자재 제조사에 피드백 함으로서 LNG플랜트 기자재에 요구되는 기술에 대해 제공할 수 있었다.

3) LNG 액화공정 제어시스템 기본설계 패키지에 의한 제어로직 확보

LNG BSU에 적용된 제어로직은 Testbed Train1에 사용된 제어로직을 기반으로 설계되어 시작품으로 제작된 BSU의 하드웨어적 구성품에 맞게 수정되었다. BSU 운전결과를 바탕으로 제어로직 시뮬레이션 결과와 비교함으로서 공정제어 관점에서 중요한 제어변수 도출과 제어변수에 대한 동적특성을 테스트 함으로서 향후 중, 소형급 상용 LNG 플랜트에 대한 기본설계 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

본 연구과제를 기반으로 한 100톤/일급 테스트베드 공정기술의 성공을 통하여 해외 플랜트 건설 사업 참여시 수억 달러의 엔지니어링 및 건설 수입이 예상된다. 2015년 기준으로 LNG플랜트의 건설수요를 High case와 Low case의 중간 정도로 감안하면, 20조원 정도로 파악되며, 이중에서 5%의 시장점유율을 가정하면, 연간 약 1조원 규모의 시장에 진입할 수 있을 것으로 파악된다.

또한 해외시장 참여시 국내 플랜트산업 활성화 및 신규 고용 효과 창출이 가능하다. 그리고 천연가스로부터 합성석유 제조기술의 확보에 의한 해외 미개발 가스전(주로 0.5~5 Tcf 규모의 가스전)에서의 사업 참여시 막대한 기술료 지출 절감 및 사업 참여 기회 증대될 것으로 판단된다.

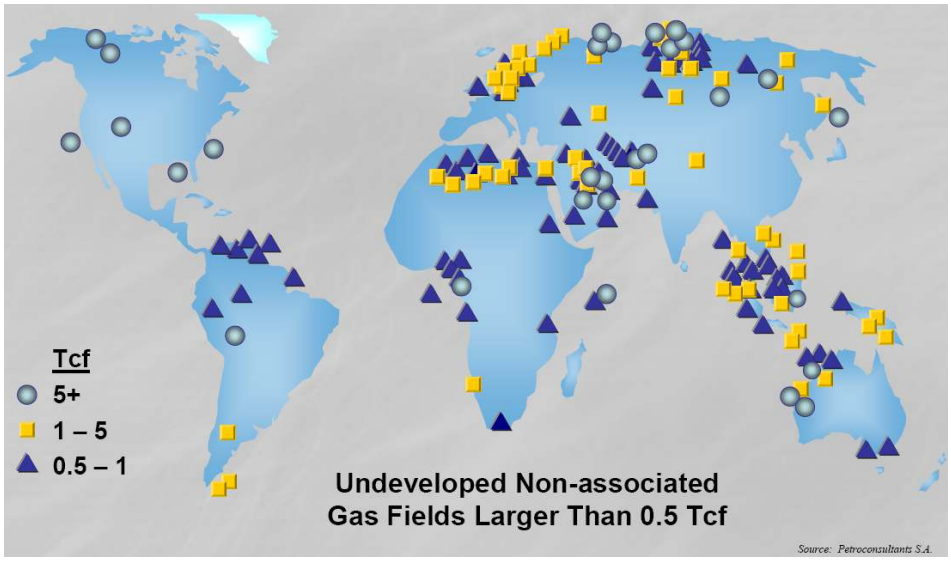



그림 4.2.3. 세계 가스전 현황
(연산 3.3 백만톤 (MTPA)의 LNG를 생산하는 플랜트에 필요한
가스전의 규모는 5~6 Tcf (trillion cubic feet)임)

본 과제의 수행으로 거둘 수 있는 파급효과를 아래 그림으로 정리하였다.




그림 4.2.4. 과제 성과 및 파급효과

○ 해외 LNG 프로젝트 수주시 설계 및 건설비의 수익 창출이 예상. LNG 플랜트 EPC 사업비의 경우 5MTPA 용량 기준으로 50억불에 달하고 엔지니어링 설계비는 EPC 사업의 3%를 적용할 경우 1억 5000만 불에 달함
○ 국가적 주요 에너지인 LNG의 안정적 확보가 가능해지고 국내 기업의 천연가스 생산 경쟁력 확보 및 해외 자원 개발을 촉진 할 수 있을 것으로 기대
○ 테스트베드 보유 및 운영을 통한 LNG 프랜트의 기술력 홍보 및 LNG 플랜트 기자재의 국산화 촉진 가능
○ 테스트베드 건설과 운영을 통한 국내 초저온액화(LNG)분야 전문인력 양성
○ 플랜트업체의 국산기자재 사용비율을 평균 51% 수준으로 담수분야는 70 ~ 90%의 높은 국산화율을 보이는 반면, LNG 분야는 10~30%에 불과하여, 본 과제를 통해 50% 수준 이상으로 끌어올리면 중소기업 관련 플랜트 부품 소재 산업의 내수 유발 효과를 거둘 수 있음
○ 향후 액화플랜트 기술개발 시에 동반되는 타 유관산업 분야에 긍정적인 파급효과를 얻을 수 있음
○ 국내 LNG 약화플랜트 기술 경쟁력 강화 및 기술 수출
○ 고유의 핵심 엔지니어링 기술력 확보에 따른 경쟁력 강화와 기술 수출효과
○ 생산수율 및 에너지 효율성 향상에 따른 경제적 이득 효과
○ 독자적 제어기술의 확보에 따른 효율적인 유지와 보수, 개선이 가능
○ 해외 license 수입비용 절감 및 외국기술 의존 일변도에서 탈피

## 4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

우리나라는 석유 의존도를 낮추기 위한 에너지공급 다변화 정책에 부합하는 LNG 비중을 높이는 정책을 적용하고 있다. 제2차 에너지기본계획(산업통상자원부, 2014. 1)의 해외 자원개발 정책에 의하면 해외 자원개발의 자주 개발률을 획기적으로 제고 (‘30년 목표: 40%)하는 정책을 수립하였다. 기존의 양적 성장 중심에서 탐사·운영권 확보 등 질적 성장에 주력하고, 공기업-민간부문의 역할분담을 통한 동반성장을 추진하고 있다. 해외 자원개발 사업중 운영권 사업의 비중은 37.6% (205개중 77개)이며 가스공사에서 14%를 수행하고 있다.

해외 자원개발은 공기업 중심의 양적성장에 치중한 결과, 공기업 부채는 급증한 반면, 개발역량은 아직 미흡한 수준이다. 자원개발 역량강화 정책으로서, 공기업은 리스크가 높고 장기투자가 필요한 분야를 중점 추진하고, 시장성이 큰 분야는 민간 중심으로 추진한다. 공기업은 M&A·단순지분참여에서 운영권 확보·탐사·개발 중심으로 전환하고, 민간투자 활성화를 위한 지원 확대, 플랜트 등 연관산업 동반진출을 촉진한다.

본 과제는 30kg/h급 LNG 액화 공정 Bench Scale Unit의 설계, 건설, 운전을 통하여 100톤/일 규모 테스트베드(Train-1)의 단위공정 구성 적합성과 제어로직의 사전점검을 연구 목표로 한다. 최종적으로는 LNG 액화플랜트의 최적 공정 제어 기술과 고도 공정 제어를 포함하는 대용량 LNG 플랜트의 공정제어 설계기술 확립에 목표를 두고 있다.

따라서, 대형 천연가스전 대비 비교적 개발이 덜 되고 있는 틈새시장인 중국, 동남아 (인도네시아, 태국 등) 등 해외 중소형 천연가스 자원 개발 시장 진출을 위한 중소규모 LNG 플랜트 설계, 건설, 운영 실적 확보를 통한 수주 경쟁력 제고 정책 수립에 활용 가능하다.

## 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

### 1절 연구성과 향후 활용방안

본 과제의 성과는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 30kg/h급 LNG BSU 구축 및 운전기술과 LNG 액화 공정제어 설계 기술이다. 30kg/h급 LNG BSU 구축 및 운전 기술에서는 천연가스 액화 공정의 설계 및 운전 기술 개발을 위해 30kg/h급 small scale 장비를 설계 및 제작하여 운전하고, 이를 통해 축적한 데이터를 통해서 액화 공정의 제어기술 및 운전 기술을 개발하였으며, LNG 액화 공정 제어 설계 기술에서는 동적 모사를 통한 LNG 액화 공정의 제어기술 연구와 BSU의 운전을 통한 운전 데이터 분석 등으로 고급 공정 제어(APC)를 포함한 최적의 LNG 액화 공정의 제어기술을 개발하였다. 주요 정량적 성과로는 특허 등록 7건, 논문 게재 3건, 시제품 제작 1건, 현장 시험 5건 등이 있다.

성과 활용방안으로 LNG BSU를 구성하는 핵심 기자재 (플레이트 핀형 초저온 열교환기, 냉매 압축기) 개발 기업과의 기술 실시 계획을 가지고 있다. 기자재 단품만의 성능 검증뿐만이 아니라 플랜트 시스템 운영 경험을 보유하고 있으므로 기술실시가 가능할 것으로 판단된다. 상용급 플랜트에 적용하기 위해서는 scale-up 및 검증 기술을 추가적으로 보완해야 할 부분이다. 열교환기와 압축기는 LNG 플랜트 분야뿐만 아니라 조선해양 등 타 분야에서도 핵심 기자재이므로, 본 연구 성과를 활용할 수 있을 것으로 보인다.

플랜트 시스템 활용방안으로 해외 중소형 LNG 플랜트 시장 진출 사업화가 가능하다. 중국, 동남아 (인도네시아, 태국 등)에 상당수의 개발되지 않은 소형 가스전을 개발하는 틈새시장 사업에 본 과제의 LNG BSU 설계, 건설, 운전 경험과 실적을 활용할 수 있다. 중국의 천연가스는 2007년 약 70bcm이 생산되었으며, 중국국영석유공사 (CNPC)가 대부분을 생산했고 그밖에 중국석유화공 (Sinopec), 중국해양석유총공사 (CNOOC)가 주요 가스 생산기업이다. 외국 기업을 포함한 타 기업이 아직까지 가스 생산에 진출하지 못하고 있는 실정이다. 인도네시아는 2009년 기준 세계 10위의 천연가스 생산국이며, 매장량 기준으로는 세계 11위, 아시아-태평양 지역 1위이다. 2009년 기준 연간 719억 $m^3$의 가스를 생산하여 LNG 형태 또는 가스 수송관을 통해 수출하고 있다. 2009년 기준 천연가스 매장량은 약 3.2조$m^3$이며, 새로운 가스 공급원이 개발됨에 따라 장기적으로 안정적인 매장량을 확보할 수 있을 것으로 보인다. 인도네시아 정부는 국내 수요를 충당하기 위해 외국인 투자 유치를 장려하고 있다. 가스전 탐사뿐만 아니라 플랜트, 파이프라인, 터미널, 인프라 건설 부문에도 사업 기회가 확대되고 있다.

참여기업인 압축기 개발 업체는 해외 판매 유통망을 넓게 보유하고 있으며 사업화 의지를 과제 수행 기간중에도 밝힌 바 있다. 이 부분은 LNG플랜트사업단 및 핵심주관기관의 해외 LNG 플랜트 건설 시장 진출 계획과 연계하여 대기업-중견기업

이 동반하여 사업화를 추진할 수 있다.




그림 5.1.1. 소규모 LNG 플랜트 및 공급망

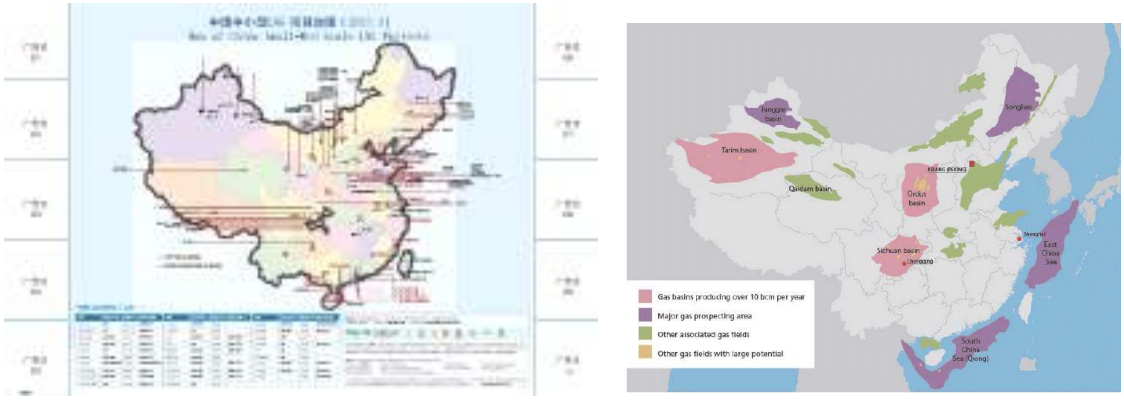



그림 5.1.2. 중국의 대규모 및 중소규모 천연가스전

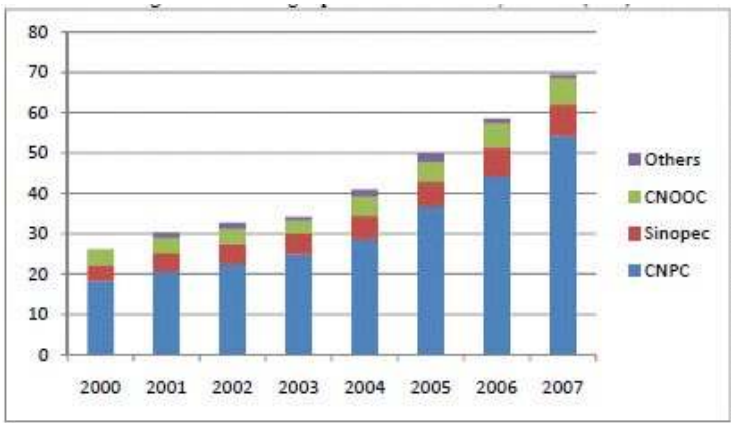



그림 5.1.3. 중국의 천연가스 생산량, 2000-2007년 (단위: bcm)




그림 5.1.4. 인도네시아의 천연가스전

## 2절 추가연구 필요성

본 세부 과제에서는 LNG 플랜트의 공정제어연구를 수행하기위해서 소형 파일럿 BSU를 제작/실험을 수행 하였다. 국내에서 최초로 개발된 플레이트-핀 타입의 극저온 용 열교환기의 천연가스와 상업용 플랜트와 유사한 혼합냉매 및 공정 조건을 사용하여 수차례 실험을 실시하였다. 또한 국내 제작된 극저온용 제어밸브도 같이 사용하였다.

비록 MCHE2 후단의 온도가 설계치에는 도달하지 못했지만, 국내 최초 극저온용 열교환기의 매우 귀중한 실험데이터 및 제어기술를 확보하였으며, 실험설비 데이터를 이용한 동적공정 시뮬레이터/APC 등을 개발하였다.

구축된 실험설비 및 동적시뮬레이터를 이용한 다음의 추가 연구 분야를 통하여 LNG 액화 등의 초저온 분야의 국내 기술 자립 및 관련 분야 해외시장 진출에 대단히 중요한 필요하다고 하겠다.

(1) 국내 초저온 기자재 국산화 기술
- 냉매 압축기 개발 및 국산화
- Flate-fin 열교환기 국산화 및 해외 시장 진출
- 마이크로채널 열교환기 개발

(2) 이동식 중소형 가스전 액화 기술
- 30 ton/day급 소형 액화 플랜트 설계 및 제작 기술
- GE 등 기존의 개발된 소형 액화 플랜트와 차별화된 기술 개발

(3) 수소액화 기술
- 수소 인프라 확출을 위한 수소 액화 기술 개발
- 수소 액화 공정 개발 및 실증을 통한 해외 시장 진출

## 참고문헌


1. International Energy Outlook, 2006, DOE (USA)
2. World Energy Investment Outlook, 2004, 국제에너지기구(IEA)
3. 가스 플랜트 사업단 상세 기획 보고서, 2008, 국토해양부
4. NATURAL GAS LIQUEFACTION PROCESSES COMPARISON COMPARAISON ENTRE PROCEDES DE LIQUEFACTION DE GAZ NATUREL, Pierre-Yves Martin, Jérôme Pigourier Axens
5. ADVANCES IN PLANT-WIDE DESIGN AND CONTROL BY PROCESS DYNAMIC SIMULATION
6. Natural Gas Liquefier Gas Clean Up System, 2006, GTI report
7. A Gas-Fired Stirling-Stirling Natural Gas Liquefier For Vehicle Fuel
8. Coal Mine Methane And LNG, 2008, EPA
9. Annual Report, 2005, ConocoPhillips Co.
10. LNG 액화 플랜트 최신 기술, www.reseat.re.kr
11. Modeling for the LNG Value Chain, 2005, LNG INDUSTRY
12. Dossat, R. J. (1991), Principles of refrigeration, 3rd ed., Prentice - Hall International Editions, London.
13. Flynn, Th. (1997), Cryogenic Engineering, Marcel Dekker, Inc., New York.
14. Haselden, G. G. (ed.), Cryogenic fundamentals, Academic Press, London.
15. Grandum, S. and Eriksen, K. (2000), Control system minimizes energy use in a meat-processing factory, CADDET Energy Efficiency News Bulletin, No.3, pp. 16-17
16. Inghams Enterprises (2002), Advanced Food Refrigeration Control, CADDET web page, http://www.caddet-ee.org
17. Rainier Cold Storage, Inc. (2000), Improved Refrigeration Control System in A Food Cold Storage Facility, CADDET web page, http://www.caddet-ee.org
18. The Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) The energy folder 2002, http://www.nve.no/
19. Balchen, J. G. and Mummé, K. I. (1988), Process control. Structures and applications., Van Nostrand Reinhold, New York
20. Balchen, J. G., Telnes, K. and Di Ruscio, D. (1989), Frequency response adaptive control of a refrigeration cycle, Modeling, Identification and Control (MIC), Vol.10, No.1, pp. 3-11.
21. Esnoz, A. and Lopez, A. (2003), Fuzzy logic PI controller with on-line optimum intermediate pressure for double stage refrigeration system, 21st IIR International Congress of Refrigeration, August 17-22, 2003, Washington, DC, USA.
22. Goldfarb, S. and Oldham, J. (1996), Refrigeration loop dynamic analysis using PROTISS, ESCAPE-6, 26-29 May 1996, Rhodes, Greece; Supplement to Computers & Chemical Engineering, Vol. 20, pp. S811-S816
23. Langley, B. C. (2002), Fine tuning Air Conditioning & Refrigeration Systems,

The Fairmont Press Inc., Lilburn, GA.

24. Lensen, B. A. (1991), Improve control of cryogenic gas plants, Hydrocarbon Processing, May, 1991, pp. 109-111

25. Marshall, S.A. and James, R. W. (1975), Dynamic analysis of an industrial refrigeration system to investigate capacity control, Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol. 189, No.44/75, pp. 437-444

26. Wilson, J.A. and Jones, W.E. (1994), The influence of plant design on refrigeration circuit control and operation, ESCAPE-4, Dublin March 28-30, '94, pp. 215-221.

27. Chen, J. (1997), Optimal Performance analysis of irreversible cycles used as heat pumps and refrigerators, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 30, pp. 582-587

28. D'Accadia, M. D., Sasso, M. and Sibilio, S. (1997), Optimum performance of heat engine-driven heat pumps: A finite-time approach, Energy Convers. Vol. 38, No. 4, pp. 401-413

29. Diaz, S., Tonelli, S., Bandoni, A. and Biegler, L.T. (2003), Dynamic Optimization for Switching Between Operating Modes in Cryogenic Plants, FOCAPO 2003. 4th Int. Conf. of Computer-Aided Process Operations, Proceedings of the Conference held at Coral Springs, Florida, January 12-15, 2003, pp. 601-604

30. Leducq, D., Guilpart, J. and Trystram, G. (2003), Application of a reduced dynamic model to the control of a refrigeration cycle, 21st IIR International Congress of Refrigeration, August 17-22, 2003, Washington, DC, USA.

31. Mandler, J.A. (1998), Modeling for Control Analysis and Design in Complex Industrial Separation and Liquefaction Processes, DYCOPS-5, 5th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, Corfu, Greece, June 8-10, 1998, pp. 405-413.

32. Schenk, M., Sakizlis, V., Perkins, J.D. and Pistikopoulos E.N. (2002), Optimization-Based Methodologies for Integrating Design and Control in Cryogenic Plants, European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 12, 26-29 May 2002, The Hague, The Netherlands, pp.331-336.

33. Svensson, Ch., M. (1994), Studies on on-line optimizing control, with application to a heat pump, Ph.D. thesis, Dept. of Refrigeration and Air Conditioning, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

34. Alvarez, G. and Trystram, G. (1995), Design of a new strategy for the control of the refrigeration process: fruit and vegetables conditioned in a pallet, Food Control, Vol. 6, No. 6, pp. 347-355

35. Andersen, J. (2002), Temperature control in the large Hadron Collider at CERN, M.Sc. Thesis, Dept. of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

36. Cho, C. H. and Norden, N. (1982), Computer Optimization of Refrigeration Systems in a Textile Plant: A Case History, Automatica, Vol.18, No. 6, pp. 675-683.

37. Flemsæter, B. (2000), Investigation, modelling and control of the 1.9K cooling loop for superconducting magnets for the large hadron collider, Ph.D. thesis, Dept. of Refrigeration and Air Conditioning, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

38. Hokanson, D. A., Houk, B.G. and Johnston, Ch., R. (1989), DMC Control of a complex refrigerated fractionator, Adv. Instum. Control, pp. 541-552.

39. Kaya, A. (1991), Improving efficiency in existing chillers with optimization technology, ASHRAE Journal, October 1991, pp. 30-38

40. Luong, T.T.H. and Pham, Q.T. (2003), Multi-objective optimization of food refrigeration processes, 21st IIR International Congress of Refrigeration, August 17-22, 2003, Washington, DC, USA

41. Martin, M., Gannon, J. Rode, C. and McCarthy, J. (1981), Quasi-optimal algorithms for the control loops of the FERMILAB energy saver satellite refrigerator, IEEE Transactions of Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 3, June, pp. 3251-3253

42. Olson, R.T. and Liebman, J.S.(1990), Optimization of a chilled water plant using sequential quadratic programming, Eng.Opt., Vol. 15, pp.171-191.

43. Skimmeli, T. (1994), Control of Refrigeration Process at Dalgård (Indoor) Ice Rink, Master thesis, Department of Engineering Cybernetics, Norwegian University of Science and Technology

44. Trelea, I.-C., Alvarez, G. and Trystram, G. (1997), Nonlinear predictive optimal control of a batch refrigeration process, J. Food Process Engn., Vol. 21, pp.1-32.

45. Mandler, J.A. and Brochu, P.A. (1997), Controllability Analysis of the LNG Process, Presented at 1997 AIChE Annual Meeting, Los Angeles, CA (Paper 197a)

46. Mandler, J.A., Brochu, P.A., Fotopoulos, J. and Brochu, P.A. (1998), New Control Strategies for the LNG Process, Presented at LNG 12 Conference, Perth, Australia, May 1998

47. Zaïm, A. (2002), Dynamic optimization of an LNG plant. Case study: GL2Z LNG plant in Arzew, Algeria, Ph.D. Thesis, Rheinisch-Westfälishen Technischen Hochschule (RWTH), Aachen, Shaker Verlag, Aachen.

[부록 1] BSU Heat & Mass Balance

| STREAM NUMBER | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TOTAL PROPERTIES | | | | | | |
| Temperature | ℃ | -35.00 | 37.00 | -32.90 | -32.90 | -130.00 |
| Pressure | bar | 3.80 | 60.50 | 60.00 | 60.00 | 59.50 |
| Mass Flow | kg/h | 60.70 | 60.70 | 60.70 | 10.50 | 10.50 |
| Vapor Fraction | | 1.00 | 1.00 | 0.21 | 1.00 | 0.0 |
| Act. Volume Flow | m3/h | 12.07 | 0.74 | 0.24 | 0.11 | 0.02 |
| Std. Volume Flow | m3/h | 56.93 | 56.93 | 56.93 | 11.98 | 11.98 |
| VAPOR PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 60.70 | 60.70 | 10.50 | 10.50 | |
| Enthalpy | kJ/kgmol | -3193 | -79650 | -71360 | -71360 | |
| Entropy | kJ/kgmolC | 5.769 | 129.00 | 119.9 | 119.9 | |
| Density | kg/m3 | 5.032 | 82.18 | 96.09 | 96.09 | |
| Viscosity | cP | 8.655e-3 | 0.013 | 0.012 | 0.012 | |
| LIQUID PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | | | 50.25 | | 10.50 |
| Enthalpy | kJ/kgmol | | | -92850 | | -3444 |
| Entropy | kJ/kgmolC | | | 91.44 | | 5.691 |
| Density | kg/m3 | | | 378.1 | | 96.09 |
| Viscosity | cP | | | 0.057 | | 0.013 |
| TOTAL COMPOSITION | | | | | | |
| Nitrogen | | 5.86 | 5.86 | 5.86 | 13.92 | 13.92 |
| Methane | | 46.93 | 46.93 | 46.93 | 67.18 | 67.18 |
| Ethane | | 33.93 | 33.93 | 33.93 | 16.33 | 16.33 |
| Propane | | 13.28 | 13.28 | 13.28 | 2.56 | 2.56 |
| Isobutane | | | | | | |
| Butane | | | | | | |
| Isopentane | | | | | | |
| Pentane | | | | | | |

| STREAM NUMBER | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TOTAL PROPERTIES | | | | | | |
| Temperature | ℃ | -149.2 | -154.80 | -132.5 | -32.90 | -130.00 |
| Pressure | bar | 59.0 | 4.80 | 4.3 | 60.00 | 59.50 |
| Mass Flow | kg/h | 10.50 | 10.50 | 10.50 | 50.25 | 50.25 |
| Vapor Fraction | | 0.00 | 0.09 | 0.65 | 0.00 | 0.00 |
| Act. Volume Flow | m3/h | 0.02 | 0.10 | 0.84 | 0.13 | 0.09 |
| Std. Volume Flow | m3/h | 11.98 | 11.98 | 11.98 | 44.95 | 44.95 |
| VAPOR PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | | 1.111 | 6.159 | 50.25 | |
| Enthalpy | kJ/kgmol | | -26730 | -64000 | -92850 | |
| Entropy | kJ/kgmolC | | 96.56 | 124.5 | 91.44 | |
| Density | kg/m3 | | 13.12 | 7.371 | 378.1 | |
| Viscosity | cP | | 0.069 | 6.3e-3 | 0.057 | |
| LIQUID PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 10.50 | 9.386 | 4.338 | | 50.25 |
| Enthalpy | kJ/kgmol | -82030 | -87430 | -99870 | | -99870 |
| Entropy | kJ/kgmolC | 60.68 | 59.20 | 59.90 | | 54.67 |
| Density | kg/m3 | 507.8 | 500.8 | 529.5 | | 553.7 |
| Viscosity | cP | 0.1287 | 0.1508 | 0.1882 | | 0.2093 |
| TOTAL COMPOSITION | | | | | | |
| Nitrogen | | 13.92 | 13.92 | 13.92 | 3.71 | 3.71 |
| Methane | | 67.18 | 67.18 | 67.18 | 41.53 | 41.53 |
| Ethane | | 16.33 | 16.33 | 16.33 | 38.62 | 38.62 |
| Propane | | 2.56 | 2.56 | 2.56 | 16.14 | 16.14 |
| Isobutane | | | | | | |
| Butane | | | | | | |
| Isopentane | | | | | | |
| Pentane | | | | | | |

| STREAM NUMBER | | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TOTAL PROPERTIES | | | | | | |
| Temperature | ℃ | -134.40 | -132.7 | 10.00 | 37.00 | -36.34 |
| Pressure | bar | 4.30 | 4.30 | 1.00 | 16.40 | 1.30 |
| Mass Flow | kg/h | 50.25 | 60.74 | 85.70 | 85.70 | 85.70 |
| Vapor Fraction | | 0.07 | 0.18 | 1.00 | 0.00 | 0.21 |
| Act. Volume Flow | m3/h | 0.44 | 1.23 | 44.87 | 0.18 | 5.96 |
| Std. Volume Flow | m3/h | 44.95 | 56.93 | 45.95 | 45.95 | 45.95 |
| VAPOR PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 2.85 | 8.681 | 85.70 | 85.70 | 17.71 |
| Enthalpy | kJ/kgmol | -53870 | -59690 | -1.051e+5 | -1.185e+5 | -1.083e+5 |
| Entropy | kJ/kgmolC | 119.0 | 122.3 | 113.9 | 51.21 | 99.36 |
| Density | kg/m3 | 8.103 | 7.658 | 1.909 | 474.3 | 3.034 |
| Viscosity | cP | 6.64e-3 | 6.47e-3 | 7.75e-3 | 0.089 | 0.006 |
| LIQUID PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 47.40 | 52.07 | | | 67.92 |
| Enthalpy | kJ/kgmol | -1.035e+5 | -1.031e+5 | | | -1.268e+5 |
| Entropy | kJ/kgmolC | 51.61 | 53.41 | | | 21.39 |
| Density | kg/m3 | 558.6 | 552.0 | | | 574.7 |
| Viscosity | cP | 0.2401 | 0.2263 | | | 0.1852 |
| TOTAL COMPOSITION | | | | | | |
| Nitrogen | | 3.71 | 5.86 | | | |
| Methane | | 41.53 | 46.93 | | | |
| Ethane | | 38.62 | 33.93 | | | |
| Propane | | 16.14 | 13.28 | 100 | 100 | 100 |
| Isobutane | | | | | | |
| Butane | | | | | | |
| Isopentane | | | | | | |
| Pentane | | | | | | |

| STREAM NUMBER | | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TOTAL PROPERTIES | | | | | | |
| Temperature | ℃ | 15.00 | -32.70 | -130.00 | -160.30 | -160.30 |
| Pressure | bar | 70.00 | 69.50 | 69.00 | 1.05 | 1.05 |
| Mass Flow | kg/h | 33.00 | 33.00 | 33.00 | 33.00 | 30.16 |
| Vapor Fraction | | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.09 | 0.00 |
| Act. Volume Flow | m3/h | 0.51 | 0.32 | 0.08 | 1.57 | 0.07 |
| Std. Volume Flow | m3/h | 43.78 | 43.78 | 43.78 | 43.78 | 39.65 |
| VAPOR PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 33.00 | 33.00 | | 2.838 | |
| Enthalpy | kJ/kgmol | -78470 | -81240 | | -79910 | |
| Entropy | kJ/kgmolC | 128.0 | 117.5 | | 134.1 | |
| Density | kg/m3 | 64.41 | 5.679 | | 1.880 | |
| Viscosity | cP | 0.013 | 0.013 | | 25.81 | |
| LIQUID PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | | | 33.00 | 30.16 | 30.16 |
| Enthalpy | kJ/kgmol | | | -90260 | -92550 | -95080 |
| Entropy | kJ/kgmolC | | | 71.26 | 58.21 | 58.21 |
| Density | kg/m3 | | | 418.3 | 458.7 | 458.7 |
| Viscosity | cP | | | 0.083 | 47.68 | 0.1454 |
| TOTAL COMPOSITION | | | | | | |
| Nitrogen | | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 0.05 |
| Methane | | 91.33 | 91.33 | 91.33 | 91.33 | 90.61 |
| Ethane | | 5.36 | 5.36 | 5.36 | 5.36 | 5.91 |
| Propane | | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.14 | 2.36 |
| Isobutane | | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.50 |
| Butane | | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.53 |
| Isopentane | | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| Pentane | | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

| STREAM NUMBER | | 21 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TOTAL PROPERTIES | | | | | | |
| Temperature | ℃ | -160.30 | | | | |
| Pressure | bar | 1.05 | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 2.838 | | | | |
| Vapor Fraction | | 1.00 | | | | |
| Act. Volume Flow | m3/h | 1.510 | | | | |
| Std. Volume Flow | m3/h | 4.128 | | | | |
| VAPOR PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | 2.838 | | | | |
| Enthalpy | kJ/kgmol | -79910 | | | | |
| Entropy | kJ/kgmolC | 134.1 | | | | |
| Density | kg/m3 | 1.880 | | | | |
| Viscosity | cP | 25.81 | | | | |
| LIQUID PROPERTIES | | | | | | |
| Mass Flow | kg/h | | | | | |
| Enthalpy | kJ/kgmol | | | | | |
| Entropy | kJ/kgmolC | | | | | |
| Density | kg/m3 | | | | | |
| Viscosity | cP | | | | | |
| TOTAL COMPOSITION | | | | | | |
| Nitrogen | | 1.76 | | | | |
| Methane | | 98.22 | | | | |
| Ethane | | 0.01 | | | | |
| Propane | | | | | | |
| Isobutane | | | | | | |
| Butane | | | | | | |
| Isopentane | | | | | | |
| Pentane | | | | | | |

## [부록 2] BSU Equipment List

### 1) Heat Exchanger

| ITEM NO. | Q`TY | SERVICE NAME | TYPE | SURFACE AREA | MAT`L | REMARK |
|---|---|---|---|---|---|---|
| E-11 | 1 | Pre-cooler | Brazed Aluminium Plate-fin | 3.08 m2 | SS 400 | |
| E-12A | 1 | MCHE 1 | Brazed Aluminium Plate-fin | - | SS 400 | |
| E-12B | 1 | MCHE 2 | Brazed Aluminium Plate-fin | 5.54 m2 | SS 400 | |

### 2) Vessel

| ITEM NO. | Q`TY | SERVICE NAME | TYPE | CAPACITY | MAT`L | REMARK |
|---|---|---|---|---|---|---|
| V-1001 | 5 | Feed Gas Mixing Drum | High Pressure | 0.15 $m^3$ | A106 | |
| V-1002 | 1 | LNG Tank | Low Pressure | 0.18 $m^3$ | SS 304 | |
| V-1003 | 4 | LNG Bottle | Low Pressure | 0.18 $m^3$ | SS 304 | |
| V-1004 | 4 | N2 Bottle | Low Pressure | 0.18 $m^3$ | SS 304 | |
| V-1010 | 4 | C3 Bottle | High Pressure | 0.047 $m^3$ | - | |
| V-1101 | 1 | MR Suction Drum | Middle Pressure | 0.5 $m^3$ | - | |
| V-1102 | 1 | MR Accumulator | High Pressure | 0.3 $m^3$ | - | |
| V-1103 | 1 | MR Separator | High Pressure | 0.24 $m^3$ | A312-304 | |
| V-1305 | 1 | C3 Suction Drum | Low Pressure | 0.5 $m^3$ | - | |
| V-1306 | 1 | C3 Accumulator | High Pressure | 0.1 $m^3$ | - | |
| V-1307 | 4 | MR Bottle | High Pressure | 0.047 $m^3$ | - | |
| V-1009 | 1 | Vaporizer | Ambient Vaporizer | 150 $m^3/h$ | A6063S-TS | |

### 3) Compressor

| ITEM NO. | Q`TY | SERVICE NAME | TYPE | CAPACITY | MAT`L | REMARK |
|---|---|---|---|---|---|---|
| K-1301, K-1302 | 1 | MR Compressor | Reciprocating | 22 kW | - | |
| K-1304, K-1305 | 1 | C3 Compressor | Reciprocating | 11 kW | - | |
| K-1306 | 1 | Liquid Pump | Cryogenic | 15 HP | - | |

[부록 3] BSU Instrument List

1) Programmable Logic Controller Unit

| No | MF'G | Model No. | Description | Item | Q'ty |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | SIEMENS | 6ES7400-2JA10-0AA0 | SIMATIC S7-400, UR2-H RACK ALU, CENTRALIZED AND DISTRIBUTED WITH 2 X 9 SLOTS | RACK | 1 |
| 2 | SIEMENS | 6ES7405-0KR02-0AA0 | SIMATIC S7-400, POWER SUPPLY PS 405: 10A, WIDE RANGE, 24/48/60V DC, DC, 5V DC/10A, FOR REDUNDANT USE ATEX APPROBATIONIDENTIFICATION | P/S | 2 |
| 3 | SIEMENS | 6ES7412-3HJ14-0AB0 | SIMATIC S7-400H, CPU 412-3H CENTRAL UNIT FOR S7-400H AND S7-400F/FH, 3 INTERFACES: 1 MPI/DP AND 2 FOR SYNC MODULES 768 KB MEMORY | CPU | 2 |
| 4 | SIEMENS | 6ES7952-1KK00-0AA0 | SIMATIC S7, MEMORY CARD FOR S7-400, LONG VERSION, 5V FLASH-EPROM, 1 MBYTE | MEMORY | 2 |
| 5 | SIEMENS | TL-5903 | LITHUM BACKUP BATTERY | BATTERY | 4 |
| 6 | SIEMENS | 6ES7960-1AA04-5AA0 | SIMATIC S7-400H, PATCH CABLE FO 1M FOR SYNC-MODULE | PATCH CABLE | 4 |
| 7 | SIEMENS | 6ES7960-1AA04-0XA0 | SIMATIC S7-400H, SYNC SUBMODULE FOR PATCH CABLES UP TO 10M | SYNC MODULE | 2 |
| 8 | SIEMENS | 6GK7443-1EX11-0XE0 | SIMATIC NET, CP 443-1 COMMUNICATIONS PROCESSOR FOR CONNECTING SIMATIC S7-400 TO INDUST. ETHERN. VIA ISO, TCP/IP AND UDP, S7-COMM, | CP443 | 2 |
| 9 | SIEMENS | 6GK1161-3AA01 | COMMUNICATION PROCESSOR CP 1613 A2 PCI CARD (32BIT;33MHZ/66MHZ; 3.3V/5V UNIVERSAL KEY) FOR CONNECTION TO IND. ETHERNET (10/100MBIT/S) | CP1613 | 2 |
| 10 | SIEMENS | 6GK1716-0HB64-3AA0 | SIMATIC NET, S7-REDCONNECT/2006 INCL. S7-OPC-SRVR, S7-1613/2006 ,SW FOR FAIL SAVE S7-COM; SINGLE LICENSE F.1 INSTALLATION R-SW, SW + ELECTR. | RED CONNECT | 1 |
| 11 | SIEMENS | 6ES7972-0BB41-0XA0 | SIMATIC DP, BUS CONNECTOR FOR PROFIBUS UP TO 12 MBIT/S WITH TILTED CABLE OUTLET, 15,8 X 54 X 39,5 MM (WXHXD), TERMINAT. RESIST. WITH ISOLAT. | DP CONN | 6 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 12 | SIEMENS | 6XV1830-0EN20 | SIMATIC NET, PB FC STANDARD CABLE GP, 2-WIRE, SHIELDED, SPECIAL DESIGN FOR RAPID INSTALLATION, MAX. CONSIGNMENT: 1000 M, MIN. ORDERINGQUANTITY: | DP CABLE | 1 |
| 13 | SIEMENS | ES7195-1GA00-0XA0 | SIMATIC DP, RAIL FOR ET 200M 483 MM LONG F. MAX. 5 BUS MOD. FUNCTION: INSERT/REMOVE | RACK | 2 |
| 14 | SIEMENS | 6ES7153-2BA02-0XB0 | SIMATIC DP, ET 200M INTERFACE IM 153-2 HIGH FEATURE FOR MAX. 12 S7-300 MODULES, WITH REDUNDANCY, TIME STAMPING FIT FOR ISOCHRONE MODE NEW FEATURES: | IM153 | 4 |
| 15 | SIEMENS | 6ES7195-7HD10-0XA0 | SIMATIC DP, BUS UNIT FOR ET200M FOR INTEGRATING 2 IM153-2 RED. FUNCTION: INSERT/REMOVE WHILE OPERATING MODE RUN | ACTI, BUS FOR IM | 2 |
| 16 | SIEMENS | 6ES7331-7KF02-0AB0 | SIMATIC S7-300, ANALOG INPUT SM 331, OPTICALLY ISOLATED, 8AI, RESOLUTION 9/12/14 BITS, U/I/THERMOCOUPLE/RESISTANCE INTERRUPT, DIAGNOSTICS | AI | 8 |
| 17 | SIEMENS | 6ES7332-5HD01-0AB0 | SIMATIC S7-300, ANALOG OUTPUT SM 332, OPTICALLY ISOLATED, 4 AO, U/I; DIAGNOSTICS; RESOLUTION 11/12 BITS, 20 PIN, REMOVE/INSERT W. ACTIVE, BACKPLANE BUS | AO | 2 |
| 18 | SIEMENS | 6ES7322-5GH00-0AB0 | SIMATIC S7-300, DIGITAL OUTPUT SM 322, OPTICALLY ISOLATED, 16 DA (SOLID STATE RELAY), AC/DC 24 - 48V; 0.5A; 1.5A SURGE CURRENT, ONE CHANNEL PER COMMON, | DO | 2 |
| 19 | SIEMENS | 6ES7321-7BH01-0AB0 | SIMATIC S7-300, DIGITAL INPUT SM 321, GALVANICALLY ISOLATED, 16 DI, DC 24V, 1 X 20 PIN, PROCESS INTERRUPT, DIAGNOSTICS, FIT FOR ISOCHRONE MODE | DI | 1 |
| 20 | SIEMENS | 6ES7392-1AM00-0AA0 | FRONT CONNECTOR 392, WITH SCREW CONTACTS 40-PIN | 40PIN CONNECT | 2 |
| 21 | SIEMENS | 6ES7392-1AJ00-0AA0 | SIMATIC S7-300, FRONT CONNECTOR FOR SIGNAL MODULES WITH SCREW CONTACTS, 20-PIN | 20PIN CONNECT | 12 |
| 22 | SIEMENS | 6ES7195-7HB00-0XA0 | SIMATIC DP, BUS UNIT FOR ET200M F. THE INTEGR.OF TWO 40 MM WIDE I/O SUBMODULES FOR INSERT/REMOVE | ACTI, BUS | 8 |
| 23 | SIEMENS | 6ES7341-1CH02-0AE0 | SIMATIC S7-300, CP341 COMMUNICATION PROCESSOR WITH | CP 341 | 1 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | RS422/485 INTERFACE INCL. CONFIG. PACKAGE ON CD | | |
| 24 | SIEMENS | 6ES7870-1AB01-0YA1 | SIMATIC S7, MODBUS SLAVE V3.1 SINGLE LICENSE F.1 INSTALLATION R-SW, WITHOUT SW AND DOCU., HW-DONGLE, CLASS A, 3 LANGUAGES (G,E,F), EXECUTABLE U. | LICENSE | 1 |
| 25 | GM | D1012Q | Quadruple Repeater Power Supply DIN-Rail 4 channels, Analog Input | BARRIER | 7 |
| 26 | GM | D1072D | SIL2 Temperature Converter DIN-Rail Duplicator; Adder and Subtractor 2channels, Temperature Input | BARRIER | 9 |
| 27 | GM | D1020D | SIL2 Powerd Isolating Driver Smart-Hart Compatible DIN-Rail 2channels, Analog Output | BARRIER | 3 |
| 28 | GM | D1042Q | SIL2/SIL3 Digital Out Loop/Bus Powered to drive Solenoid/LED/Horn DIN-Rail 4Channels, Digital Output | BARRIER | 6 |
| 29 | GM | D1033Q | SIL2 Switch/Proximity Detector Repeater Transistor output DIN-Rail Models 4channels. Digital Input | BARRIER | 1 |
| 30 | OMRON | S82J-60024 | POWER SUPPLY | P/S | 1 |
| 31 | Merlin Gerin | CURRENT BREAK, 24337 | 220VAC/10kA MULTI 9 C 60N 2P 16A | BREAK | 2 |
| 32 | DELL | | Dell™ VOSTRO™ 230s | DESKTOP | 1 |
| 33 | DELL | | Dell Ultrasharp 1909W | MONITOR | 1 |
| 34 | SIEMENS | 6ES7810-4CC08-0YA5 | SIMATIC S7, STEP7 V5.4, FLOATING LICENSE FOR 1 USER | LICENSE | 1 |
| 35 | SIEMENS | 6AV6381-1BE06-0DV0 | WINCC SYSTEM SOFTWARE V6.0+SP3 | LICENSE | 1 |

2) Pressure Transmitter

| No. | Tag. | Type | MF'G | Range | Unit | Setting | Purge | Connect | Q'ty | Cert |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | P01 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 70.00<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 70 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 2 | P02 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 69.50<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 69.5 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 3 | P03 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 69.00<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 69 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 4 | P04 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 1.05<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 1.05 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 5 | P05 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 1.05<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 1.05 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 6 | P06 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 16.40<br>0.00 ~ 50.00 | Bar | 16.4 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 7 | P07 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 1.30<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 1.3 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 8 | P08 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 1.00<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 1 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 9 | P09 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 60.50<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 60.5 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 10 | P10 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 60.00<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 60 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | P11 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 59.50<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 59.5 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 12 | P12 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 59.00<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 59 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 13 | P13 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 4.80<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 4.8 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 14 | P14 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 4.30<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 4.3 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 15 | P15 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 59.50<br>0.00 ~ 250.00 | Bar | 59.5 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 16 | P16 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 4.30<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 4.3 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 17 | P17 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 4.30<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 4.3 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 18 | P18 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 3.80<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 3.8 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |
| 19 | P19 | APT3200-G 6M11K11S 1-M1BA | AUTROL | 0.00 ~ 7.00<br>-1.00 ~ 15.00 | Bar | 7 | 10 | 8Ø SUS TUBE | 1 | KOSHA Ex D |

3) Temperature Transmitter

| No. | Tag | Type | MF'G | Range | Unit | L | D | Conn | E | Lead | Boss | Pipe info | Q'ty |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | T01 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 50 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 2 | T02 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 65 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 3 | T03 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 4 | T04 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 5 | T05 | 7MC9004-1 AD52-4AA6 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 50 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 6 | T06 | 7MC9004-1 AD52-4AA7 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 56 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 7 | T07 | 7MC9004-1 AD52-4AA8 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 50 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 8 | T08 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 50 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 9 | T09 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 65 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 10 | T10 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 11 | T11 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 12 | T12 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 13 | T13 | 7MC9004-1 AD52-4AA0 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 14 | T14 | 7MC9004-1 AD52-4AA1 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 15 | T15 | 7MC9004-1 AD52-4AA5 | Siemens | '-200.0 ~ 100..0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 16 | T16 | 7MC9004-1 AD52-4AA4 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 102 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |
| 17 | T17 | 7MC9004-1 AD52-4AA2 | Siemens | '-200.0 ~ 100.0 | ℃ | 65 | 12 | PT3/4 | 20 | 35 | 40 | 3/4" | 1 |

4) Cryogenic Cotrol Valve

| No. | Tag | Type | Description | Temp | Press | Conn | MF'G | Q'ty | Cert |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CV1 | COTROL VALVE | JT-C3 | -36.34 | 75 | 3/4" | KORVAL | 1 | KTL |
| 2 | CV2 | COTROL VALVE | JT-MR2 | -134.4 | 75 | 3/4" | KORVAL | 1 | KTL |
| 3 | CV3 | COTROL VALVE | JT-MR1 | -154.8 | 75 | 3/4" | KORVAL | 1 | KTL |
| 4 | CV4 | COTROL VALVE | JT-NG | -160.3 | 75 | 3/4" | KORVAL | 1 | KTL |

5) Valves

| No. | Tag | Type | Model | Temp | Setting | Purge | Max.P | conn | MF'G | Q'ty | Cert |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | V01 | CHECK VALVE | VCV5-H12 T-10 | 15 | 70 | 10 | 70 | 3/4" | Hy-Lok | 1 | |
| 2 | V02 | NEEDLE VALVE | V16C-D-12 T-GF | 15 | 70 | 10 | 70 | 3/4" | 전일산업 | 1 | |
| 3 | V03 | NEEDLE VALVE | V16B-D-8T -GF | 15 | 70 | 10 | 70 | 1/2" | 전일산업 | 1 | |
| 4 | V04 | NEEDLE VALVE | | -130 | 69 | 10 | 10 | 3/4" | | 1 | |
| 5 | V05 | NEEDLE VALVE | | -160.3 | 7.05 | 10 | 10 | 3/4" | | 1 | |
| 6 | V06 | NEEDLE VALVE | | -160.3 | 69 | 10 | 10 | 3/4" | | 1 | |
| 7 | V07 | QCV | | -160.3 | 1.05 | 10 | 10 | 3/4" | 전일산업 | 1 | KTL |
| 8 | V08 | BALL VALVE | | -160.3 | 1.05 | 10 | 10 | 3/4" | 전일산업 | 1 | |
| 9 | V09 | BALL VALVE | | -160.3 | 1.05 | 10 | 10 | 3/4" | 전일산업 | 1 | |
| 10 | V10 | NEEDLE VALVE | | -160.3 | 1.05 | 10 | 10 | 1/2" | | 1 | |
| 11 | V11 | NEEDLE VALVE | | -160.3 | 1.05 | 10 | 10 | 1" | | 1 | |
| 12 | V12 | GLOBE | VNV4H-8T | -30 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |
| 13 | V13 | SOLENOID | | 10 | 1 | 10 | 10 | 1 1/2" | 신텍 | 1 | KOSHA |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | V14 | SOLENOID | 7321BDN00 | 37 | 16.4 | 10 | 20 | 1" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 15 | V15 | SOLENOID | 7321BCN00 | 37 | 16.4 | 10 | 20 | 3/4" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 16 | V16 | CHECK VALVE | VCV5-H12T-10 | 37 | 16.4 | 10 | 20 | 3/4" | Hy-Lok | 1 | |
| 17 | V17 | SOLENOID | 7321BDN00 | 10 | 1 | 10 | 10 | 1" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 18 | V18 | SOLENOID | 7321BCN00 | 10 | 1 | 10 | 10 | 3/4" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 19 | V19 | SOLENOID | 7321BAN00 | 37 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 20 | V20 | CHECK VALVE | VCV3-H8T-10 | 37 | 16.4 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |
| 21 | V21 | GLOBE | VNV4H-16T-R | -35 | 7 | 10 | 10 | 1" | Hy-Lok | 1 | |
| 22 | V22 | CHECK VALVE | VCV3-H8T-10 | -35 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |
| 23 | V23 | NEEDLE VALVE | V16B-D-8T-GF | -35 | 3.8 | 10 | 10 | 1/2" | 전일산업 | 1 | |
| 24 | V24 | NEEDLE VALVE | V16C-D-16T-GF | 37 | 60.5 | 10 | 10 | 1" | 전일산업 | 1 | |
| 25 | V25 | QCV | V86B-D-12T-GF | 37 | 60.5 | 10 | 10 | 3/4" | 전일산업 | 1 | KTL |
| 26 | V26 | SOLENOID | 7321BAN00 | 37 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 27 | V27 | CHECK VALVE | VCV3-H8T-10 | 37 | 60.5 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |
| 28 | V28 | NEEDLE VALVE | V16B-D-8T-GF | 37 | 60.5 | 10 | 10 | 1/2" | 전일산업 | 1 | |
| 29 | V29 | QCV | V86C-D-16T | -35 | 3.8 | 10 | 10 | 1" | 전일산업 | 1 | KTL |
| 30 | V30 | CHECK VALVE | VH36C-D-12T-EP | -35 | 3.8 | 10 | 10 | 3/4" | 전일산업 | 1 | |
| 31 | V31 | NEEDLE VALVE | V16C-D-12T-GF | -35 | 3.8 | 10 | 10 | 3/4" | 전일산업 | 1 | |
| 32 | V32 | GLOBE | VNV4H-8T | 30 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |
| 33 | V33 | SOLENOID | 7321BAN00 | 30 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | 신텍 | 1 | KOSHA |
| 34 | V34 | CHECK VALVE | VCV3-H8T-10 | 30 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35 | V35 | GLOBE | VNV4H-8T | 30 | 7 | 10 | 10 | 1/2" | Hy-Lok | 1 | |

### 6) Other Instrument

| No | DESCRIPTION | MODEL NO. | TYPE | Q'TY | MFG | Cert |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Natural Gas Chromatograph with Rack | FA-7890A-FID | | 1 | 영린기기 | 비방폭 |
| 2 | Micro Motion Mass Flowmeter (Micro Motion Coriolis Elite sensor, Micro Motion Coriolis MVD single variable flow transmitter, Transmitter pipe mount kit) | | Coriolis | 1 | Emerson | KOSHA EX D |
| 3 | Gas Detector (LN GAS, Propane GAS) | TX-1100Ex | Transmitter | 5 | Geaco | KTL |
| 4 | Electric junction box | | | 1 | | |
| 5 | Level Transmitter | 7MF4433-1DA02-1BB6-Z, A40+B11+C11+D12+Y01 | DIFF. PT | 1 | Siemens | KOSHA EX IA |

### 7) Fittings

| No. | Item | | Model | EndConnection 1 | EndConnection 2 | Process | Q'ty | Remark |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Tee | for PT | H-STA-8N + ACMC10M-8N | 1/2" | 1/2" | ∅10 Union | 1 | |
| | | | H-STA-12N + ACMC10M12N | 3/4" | 3/4" | ∅10 Union | 19 | |
| | | for TT | ACBTF12-12R | 3/4" | 3/4" | PT3/4 Female | 19 | |
| 2 | Union Tee | for Line | ACTA-8 | 1/2" | 1/2" | 1/2" | 4 | For Process Line |
| | | | ACTR12-8 | 3/4" | 3/4" | 1/2" | 6 | |
| 3 | Union | | CUA12-S316 | 3/4" | 3/4" | | 13 | Flexible Hose용 |
| 4 | Union Elbow | | ACLA-12 | 3/4" | 3/4" | | 70 | SKID 용 |
| 5 | Male Connector | | CMC12-12N-S316 | 3/4" | NPT 3/4" | | 8 | CV용 |
| | | | CMC24-24G-S316 | 1 1/2" | PF 1 1/2" | | 2 | Sol. Valve용 (신텍) |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | CMC16-16R-S316 | 1" | PT 1" | | 4 | Sol. Valve용 (신텍) |
| | | CMC8-8R-S316 | 1/2" | PT 1/2" | | 6 | Sol. Valve용 (신텍) |
| | | CMC12-12R-S316 | 3/4" | PT 3/4" | | 4 | Sol. Valve용 (신텍) |
| 6 | ASMEFlange | BLIND. RF #150 3/4" NPT 3/4" | Flange - Tube fitting | | | 6 | |
| | | BLIND. RF #300 3/4" NPT 3/4" | Flange - Tube fitting | | | 2 | |
| | | BLIND. RF #600 3/4" NPT 3/4" | Flange - Tube fitting | | | 20 | |

# 제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘LNG플랜트 건설 및 운영유지관리 기술개발’(연구개발 기간 : 2012.04.18 ~ 2020.12.17)
과제의 최종보고서 OOO부를 제출합니다.

2020 . 12 . 23 .

주관연구기관명 : 지에스건설(주) (대표자) 임 병 용 (인)

주관연구기관책임자: 김 동 윤

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

# 보 고 서 요 약 서

| 과제 고유 번호 | 08가스플랜트D02 | 해당 단계 연구 기간 | 2008.09.10.~ 2020.12.17 | 단계구분 | (3단계)/(3단계) |
|---|---|---|---|---|---|
| 연구사업명 | 중사업명 | 플랜트기술 고도화 사업 | | | |
| | 세부사업명 | LNG플랜트사업단 | | | |
| 연구과제명 | 대과제명 | 대용량 LNG플랜트 설계 및 건설기술 개발 | | | |
| | 세부과제명 | LNG플랜트 건설 및 운영유지관리 기술 개발 | | | |
| 연구책임자 | 김 동 윤 | 해당단계 참여연구원 수 | 총: 90명<br>내부: 85명<br>외부: 05명 | 해당단계 연구비 | 정부:16,668,875천원<br>민간: 6,541,355천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:23,210,230천원 |
| | | 총 연구기간 참여연구원 수 | 총: 227명<br>내부: 222명<br>외부: 005명 | 총 연구비 | 정부:30,552,875천원<br>민간:12,182,000천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:42,734,875천원 |
| 연구기관명 및 소속 부서명 | 지에스건설(주) | | | 참여기업명 : 코밸, 지성엔지니어링 | |
| 국제공동연구 | 상대국명: | | | 상대국 연구기관명: | |
| 위탁연구 | 연구기관명: | | | 연구책임자: | |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

| 연구개발성과의 보안등급 및 사유 | 일반 |
|---|---|

9대 성과 등록·기탁번호

| 구분 | 논문 | 특허 | 보고서 원문 | 연구시설·장비 | 기술요약 정보 | 소프트웨어 | 화합물 | 생명자원 | | 신품종 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | 생명정보 | 생물자원 | 정보 | 실물 |
| 등록·기탁 번호 | | | | | | | | | | | |

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설·장비명 | 규격 (모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격 (천원) | 구입처 (전화) | 비고 (설치장소) | NTIS 등록번호 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| 요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다) | 보고서 면수 |
|---|---|



## 요약문

### 연구의 목적 및 내용

**1. 연구개발의 목적**

본 3-2-1 과제는 천연가스 액화공정기술을 기반으로 LNG플랜트를 시공, 유지관리 기술을 개발하기 위한 과제이다. 따라서 이 핵심과제는 응용기술의 성격을 가지고 있으며, 각 핵심과제(제1, 2 핵심 과제)에서 개발된 기술의 검증을 위하여 테스트베드를 건설하며, 이를 실제 현장에 개발 기술로 시공하여 시운전을 통한 검증 및 보완과정 등을 주요 연구내용으로 한다.

**2. 연구개발의 필요성**

○ EPC 수행 능력의 확보

제 2핵심 과제의 공정기술 및 3-1-1과제의 설계 기술과 연계하여 테스트베드 실증을 기반으로 FEED 능력과 해외시장에서 요구되는 EPC(Engineering, Procurement and Construction) 수행 능력의 확보가 필요하다.

○ 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화

국내의 기존 플랜트 상세설계, 기자재 조달 및 건설 관련 역량과 전문 인적 자원을 활용하여 프로젝트 초기 단계에서 수행되는 FEED 수주를 위한 종합적인 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화가 요구된다.

**3. 연구 범위**

○ 본 과제에서는 각 핵심과제(제1, 2 핵심 과제)에서 개발된 기술의 검증을 위하여 일산 100톤급 테스트베드 2기(Train-1, 2)를 건설한다. Train-1은 3-1-1과제에서 수행한 해외 선진사의 상용공정 설계를 바탕으로 건설을 진행하며, Train-2는 3-1-1과제에서 수행한 한국형 신액화공정(KSMR : Korea Single Mixed Refrigerant Process)을 적용한 설계를 바탕으로 건설한다.

○ 또한 LNG플랜트를 운영하기 위한 통합운전 시스템 및 운영유지관리 시스템 개발과 LNG플랜트 관련 국내 기자재 산업의 육성을 위해 LNG플랜트 주요 설비에 대한 안전성 평가 기준 개발이 병행 된다

### 연구개발성과

**1. LNG 플랜트 테스트베드 구축**

가. Train-1

(1) 기자재 구매

○총 24종 품목 구매

- 기계 : 9종, 계장 : 13종, 전기 : 2종
- 국산화율 : 약 78% (구매비용 기준, Bulk성 기자재 제외)

○총 25종 품목 검사

- 기계 : 9종, 계장 : 14종, 전기 : 2종
- 검사품목 전량 IRN(검사 합격) 발행완료(불합격 기자재(NCR Issue) 없음)
- 해당 검사 품목에 대한 검사관 검사보고서 작성/제출(기계 : 51건, 계장 : 18건, 전기 : 2건)

○ 특이사항

- 삼성테크윈 연구개발 압축기(C3/MR) 적용 → Test Bed 사양의 Compressor 구매 불가, 삼성테크윈에서 개발하여 납품
- Fives Cryogenic사 MCHE 적용 → Plate-fin type MCHE 국내 수급 불가

(추후 Train-2에서 국산화)

(2) 공사

○ 목적:

- 상용 액화공정 건설 기술 습득
- 선진사 공정을 적용한 국내 액화 공정 관련 Test 시설 확보

○ 적용공정 : APCI Process(프로판 혼합냉매공정)

○ 설비규모 : 일산 100톤급 액화설비

○ FEED / 설계 : GS건설 (3-1-1과제)

○ 주요 건설 설비

- 공용설비: Intake Facility, LNG Flash, Refrigerant Storage, Control Room
- Train-1 설비: Fractionation, Refrigeration

○ 고압가스 제조허가 : 2011. 3.

○ 착공 : 2011. 5.

○ 완공 : 2013. 2.

나. Train-2

(1) 기자재 구매

○총 23종 품목 구매

- 기계: 8종, 계장: 14종, 전기: 1종
- 국산화율 : 약 80% (구매비용 기준, Bulk성 기자재 제외)

○총 19종 품목 검사

- 기계 : 5종, 배관 : 6종, 계장 : 6종, 전기 : 2종
- 검사품목 전량 IRN(검사 합격)발행 완료(불합격 기자재(NCR Issue) 없음)
- 해당 검사 품목에 대한 검사관 검사보고서 작성/제출(기계 : 16건, 배관 : 12건, 계장 : 7건, 전기 : 2건)

○ 특이사항

- 동화엔텍(2-3과제) 개발 MCHE 적용
- K-Turbo(2-4과제) 개발 Compressor 적용(Compressor 미입고)

(2) 공사

○ 목적 : 개발 액화공정에 대한 설계 검증을 위한 건설

○ 적용공정 : KSMR Process(KOGAS 개발, 한국형 신액화공정)

○ 설비규모 : 일산 100톤급 액화설비

○ FEED / 설계 : GS건설 (3-1-1과제)

○ 기술검토서 : 2012. 9.

○ 고압가스제조 변경허가 : 2013. 3.

○ 공작물 축조 신고 : 2013. 4.

○ 착공 : 2013. 4.

○ 중간검사 : 2014. 5.

○ 완성검사 : 미수검(현재)

**2. LNG 플랜트 테스트베드 시운전 및 성능 평가**



가. Train-1

○ 목적

- 선진 기술 Benchmarking
- Train-2 비교를 위한 Reference Data 확보

○ 진행 상황

- 1차 시운전 Final Cool-down 시 압축기 파손으로 2차 시운전 시행
- 2차 시운전 정상 진행
- 2차 시운전 일정

.Preliminary (2013.12.19～2014.01.16)

.Pre-commissioning (2014.02.03～2014.02.13)

.Commissioning (2014.01.07～2014.02.21)

.Start-up (2014.02.24～2014.03.05)

.Performance Test (2014.03.05～2014.03.12)

○ 결과

- LNG Product Quantity

.LNG 생산량: 목표값 도달

.3/6～3/8, 72 Hours Average 대체로 4.5 ton/hr이상 유지

| Description | Unit | Design Figures | Design Figures without N2 Injection | Actual Figures | Relevant Tag |
|---|---|---|---|---|---|
| LNG Product | Kg/hr | 4936.5 | 4600 | 4773.9 | FIC-061 |

○ 결론

- LNG 생산량에 대해서 MCHE Outlet 기준 -140℃이하의 LNG를 100 ton/day 이상 생산 성공
- LNG의 Quality 측면에서 Design Basis 상 HHV 충족

나. Train-2

○ 목적

- KSMR 공정 실증

○ 진행 상황

- 1차 시운전 : 송도 주민 민원으로 인한 시운전 중단 (2017)
- 2차 시운전 : 열교환기 내부 문제로 인한 시운전 연기 (2018)
- 3차 시운전 :

.장비점검 (2020.06.15～2020.08.30)

.Start-up (2020.08.31.～2020.10.15.)

.Performance Test (2020.10.09.～2020.10.12)

○ 결과

- LNG Product Quanity

.LNG 생산량 : 목표값 도달

.10/09～10/12, 72 Hours Average 대체로 4.17 ton/hr 이상 유지

| Description | Unit | Design Figures | Actual Figures | Relevant Tag |
|---|---|---|---|---|
| LNG Product | Kg/hr | 4771.2 | 4169.4 | FIC-061 |

○ 결론

- LNG 생산량에 대해서 MCHE Outlet 기준 -150℃ 이하의 LNG를 100 ton/day 이상 생산 성공
- KSMR 공정 검증 완료

**3. LNG 플랜트 최적통합운전환경 기술개발**

○ LNG 플랜트 최적통합운전 시스템 구축

○ LNG 플랜트 생산 현장에서 발생하는 운전 데이터를 실시간으로 수집 분석, 공유 함으로써 분석 및 비상대응능력 향상

○Test Bed Train-1 성능시험을 통해 성능 검증 및 문제점 보완 완료

**4. LNG 플랜트 유지/보수관리시스템 기술개발**

○ LNG 플랜트 운전 지원 및 유지/보수관리시스템 구축

○ 테스트베드에 적용된 설계정보 및 각종 도면 등 운전 시 필요한 Data 제공

○ 유지 보수에 필요한 Spec. 기자재 발주서 등의 Data 제공 및 유지보수 이력 관리

**5. 시험/평가기준 및 인증체계 개발**

(1) 상세 기준 제정(안)

○ LNG테스트베드의 시설・기술・검사 기준

○ 조정기 부착형 안전밸브의 시설・기술・검사 기준

○ 초저온 안전밸브의 시설・기술・검사 기준

○ LNG테스트베드 용 글로브밸브 설계・제작 및 시험방법 절차서

○ LNG테스트베드 용 볼밸브 설계・제작 및 시험방법 절차서

○ LNG테스트베드 용 초저온밸브 설계・제작 및 시험방법 절차서

(2) 상세 기준 개정(KGS Code 개정)

KGS 가스기술기준정보시스템(http://www.kgs.or.kr/kgscode/index.do) 고시

○ KGS AA231 가스용 전기절연이음관 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA331 그 밖의 배관용밸브 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA332 매몰용접형 가스용 볼밸브 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA335 그 밖의 배관용밸브 중 글로브밸브 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA632 가스누출경보차단장치 제조의 시설・기술・검사기준

| | |
|---|---|
| 연구개발성과의 활용계획 (기대효과) | ○ 본 사업단과제를 통해 개발된 신액화공정의 개선 검증을 위한 Test 시설 뿐 아니라 향후 새롭게 개발 될 LNG액화 공정의 기본 Data제공 및 개조를 통해 Test 설비로 활용 가능<br>○ 공정개발 이외에도 각종 LNG관련 초저온 기자재를 적용 Test 가능하므로 국내 기자재 개발에 활용<br>○ LNG Plant 시장에 진출 하고자 하는 국내 업체의 인력 양성을 위한 교육 자료로 활용<br>○ 해외 LNG Plant 수주 영업 시 Reference 실적으로 활용<br>○ 각종 국제 행사 및 귀빈 방문 시 국내 기술력 과시를 위한 홍보물로 활용 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 국문핵심어 (5개 이내) | 천연가스 액화 | 액화플랜트 | 조달 | 건설 | 운영 유지 |
| 영문핵심어 (5개 이내) | Natural Gas Liquefaction | Liquefaction Plant | Procurement | Construction | Operation & Maintenace |

# 목 차

**1. 연구개발과제 개요 ····· 11**
가. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 11
나. 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 11
다. 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 15
라. 연구개발 결과가 관련분야에서 차지하는 위치 ····· 38
**2. 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 41**
가. 연구수행 전략 및 방법론 ····· 41
나. 연구수행과정 및 내용 ····· 45
다. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 ····· 48
다. 테스트베드 건설 준비 ····· 50
라. Test Bed Train-1 기자재 구매 ····· 57
마. Test Bed Train-1 공사 ····· 59
바. Test Bed Train-1 시운전 및 평가 ····· 60
사. Test Bed Train-2 기자재 구매 ····· 69
아. Test Bed Train-2 공사 ····· 72
자. 테스트베드 Train-2 시운전 ····· 74
차. LNG 플랜트 최적통합운전환경 기술개발 ····· 82
카. 웹기반 LNG 플랜트 유지/보수관리시스템 기술개발 ····· 84
타. 시험/평가기준 및 인증체계 ····· 85
**3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 88**
가. 목표 ····· 88
나. 연구개발 내용 및 산출성과물 ····· 88
나. 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 91
다. 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 92
라. 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 93
**4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 94**
가. 연구성과 향후 활용방안 ····· 94

# 1. 연구개발과제 개요

## 가. 연구개발의 목적 및 필요성

### (1) 연구개발의 목적

본 3-2과제는 천연가스 액화공정기술을 기반으로 LNG플랜트를 시공, 유지관리기술을 개발하기 위한 과제이다. 따라서 이 핵심과제는 응용기술의 성격을 가지고 있으며, 각 핵심과제(1, 2 핵심과제)에서 개발된 기술의 검증을 위하여 테스트베드를 건설하며, 이를 실제 현장에 개발 기술로 시공하여 시운전을 통한 검증 및 보완과정 등을 주요 연구내용으로 한다.

### (2) 연구개발의 필요성

#### (가) EPC 수행 능력의 확보

2핵심과제의 공정기술과 연계하여 테스트베드 실증을 기반으로 FEED 능력과 해외시장에서 요구되는 EPC(Engineering, Procurement and Construction) 수행 능력의 확보가 필요하다.

#### (나) 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화

국내의 기존 플랜트 상세설계, 기자재 조달 및 건설 관련 역량과 전문 인적 자원을 활용하여 프로젝트 초기 단계에서 수행되는 FEED 수주를 통한 종합적인 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화가 요구된다.

## 나. 연구개발의 정의, 범위, 특징

### (1) 연구개발의 정의

액화천연가스(LNG : Liquefied Natural Gas)는 천연가스를 -162℃로 냉각하여 부피를 1/600 압축하여 저장 및 운송을 용이하게 한 것으로, 그림 1과 같은 value chain을 구성한다.




그림 1. LNG Value Chain

3-2과제는 천연가스 액화공정기술을 기반으로 LNG플랜트 건설 및 운영유지관리 기술을 개발하기 위한 과제이다. 본 과제에서는 각 핵심과제(1,2 핵심과제)에서 개발된 기술의 검증을 위하여 일산 100톤급 테스트베드 2기(Train-1, 2)를 건설한다. Train-1은 3-1과제에서 수행한 해외선진사의 상용공정 설계를 바탕으로 건설을 진행하며, 2호기는 3-1과제에서 수행한 한국형 신액화공정(KSMR : Korea Single Mixed Refrigerant Process)을 적용한 설계를 바탕으로 건설한다.

LNG플랜트의 대표적인 액화 공정의 구성은 아래의 그림과 같다.

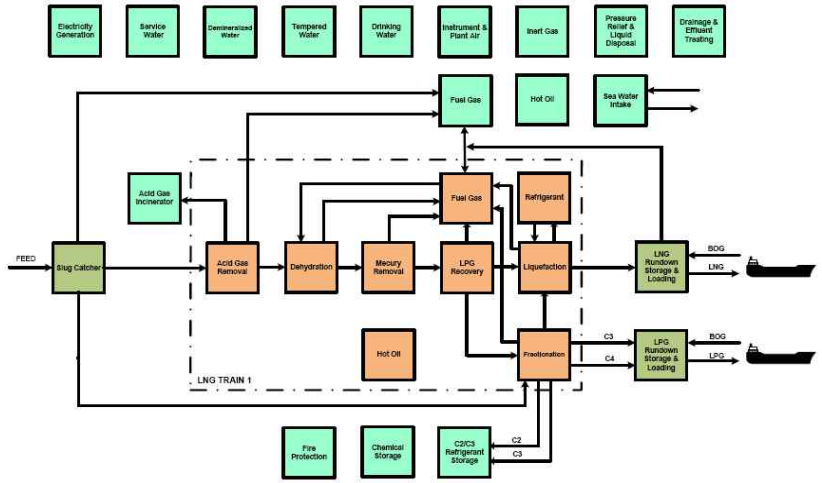



그림 2. 대표적인 천연가스 액화공정 구성도

### (2) 연구개발의 범위

3-2과제의 핵심이 되는 기술은 LNG플랜트의 건설 및 운영유지 관리 기술이며, 3-1-1과제에서 개발된 기술을 테스트베드의 건설에 실제 적용하는 실용화 기술이다.

① 3-1-1과제에서 개발한 설계 기술을 실증하기 위한 일산 100톤급 2기(Train-1, 2) 테스트베드 건설 및 운전

② LNG플랜트 통합운전환경 및 웹 기반 LNG플랜트 유지/보수관리시스템 구축을 통한 운영 및 유지관리

위의 2가지의 핵심 기술을 개발하기 위해서 구체적인 기반기술의 범위를 구성하여야 하며 이를 아래의 표 1에 요약하여 나타내었다.

**표 9. 기술개발 범위**

| 과제명 | 연구범위 |
|---|---|
| LNG플랜트 건설 및 운영유지관리 기술 개발 | ■ 200톤/일(100톤/일 2기)급 테스트베드 구축<br>■ 테스트베드 운전 및 평가 피드백<br>■ 모듈화 시공기술<br>■ LNG플랜트 통합운전환경 구축<br>■ 웹 기반 LNG플랜트 유지/보수관리시스템 구축<br>■ LNG플랜트 주요설비에 대한 안전성 평가기준 마련 |

### (3) 연구개발의 특징

#### (가) 연구의 비전

LNG플랜트 산업은 일본의 에너지 자원 확보 정책에 의하여 실질적으로 현실화되었다. 에너지 자원 분야에서 자원이 부족하고 산업 구조가 일본과 비슷한 한국은 일본과 마찬가지로 LNG 분야에 진출하였으나 건설 분야는 이미 선진 업체들끼리 협력하여 후발 주자들이 참여하지 못하도록 방해하고 있는 상황이다. 이러한 상황은 LNG의 주요 수입처로써 프로젝트를 개발하고 안정적인 자원 확보를 하는 데에 장애 요소로 작용하고 있다. 이에, LNG 플랜트 건설 기술 및 운영 기술을 국산화하여 해외 시장에 진출함과 동시에 국내 소재/부품 업체들의 동반 진출을 꾀하면서 LNG 시장에서의 위상을 제고하고 장기적으로는 국가적인 에너지 자원의 확보 정책에 기여하는 것이 당 과제의 주요한 목표이다.

LNG 플랜트 사업은 1990년대 중반 이후로 본격화되었으며 BP Statistical Review of World Energy 2011에 따르면 2010년 기준으로 아시아 지역은 전체 수출량의 약 32%, 수입량의 약 60%를 차지하고 있다. 국가별로 보았을 때는 2010년 기준으로 일본에 전세계 수입량의 약 31%를 차지하고 있고 한국은 약 15%로 전세계의 2위를 차지하고 있다. LNG 수입 시장에서는 주요한 역할을 수행하고 있지만 EPC 시장에는 일본의 JGC, Chiyoda와 미국의 Bechtel, KBR 프랑스의 technip 등만이 참여하고 있는 상황이다. GS건설은 그동안 전세계 EPC 시장에서 정유, 석유화학, 가스 산업 분야에서 큰 역할을 하고 있으면서 LNG 시장에 진출하고자 하였으나 선진업체들의 조직적인 방해로 진출이 어려운 상황이다. 이는 GS건설에 국한된 문제가 아니라 한국의 모든 EPC 업체에게 해당되는 상황이다.

GS건설은 LNG 분야에 진출하기 위하여 2008년도 LNG플랜트사업단이 발주한 과제에 참여하여 설계 기술을 성공적으로 완성하였고 1핵심과제의 모듈화 시공 및 2핵심과제의 공정 설계 기술을 적용하여 본 과제에서 건설 기술 및 운영 기술을 습득하여 이를 바탕으로 해외 시장에 적극적으로 참여할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 3-2과제는 그림 3에 도시한 바와 같이 비전은 2015년 이후 선진기업과 경쟁이 가능한 설계 및 시공기술을 보유한 국가로 진입하는 것이며, 이러한 설계 및 건설기술을



기반으로 해외시장 진출을 추진하는 것이다.

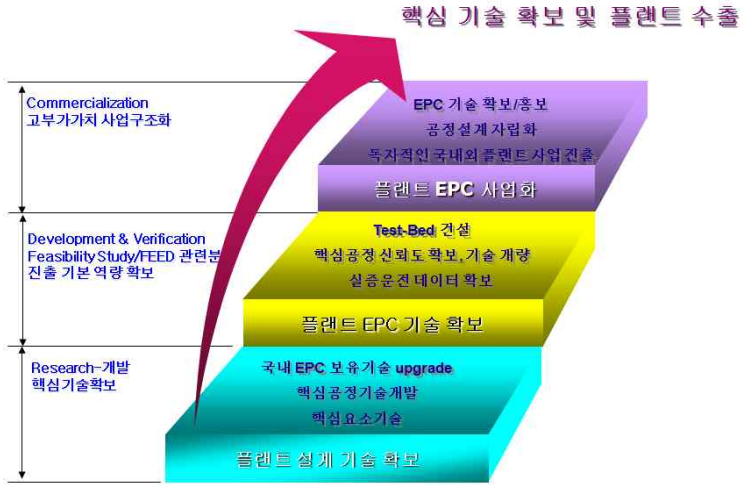



**그림 3. 플랜트 산업의 국가 차원의 로드맵**

#### (나) 발전방향

현재 LNG플랜트는 점점 대형화되는 추세이며, 한 트레인당 규모는 7.8MTPA(연간 7백 8십만 톤 생산)까지 성장하였다. 이는 대규모 가스전이 있는 곳을 중심으로 운영 및 유지 관리 비용을 낮추기 위하여 트레인 용량의 대형화가 이루어지고 있기 때문이다.

GIIGNL(International Group of Liquefied Natural Gas Importers)의 2010년도 보고에 따르면 2010년 말 현재 전세계 18개국에서 25기의 LNG 시설이 가동되고 있으며, 2010년 Qatargas III, RasGas III(Qatar), Yemen(Balhaf), Peru(Pampa Melchorita) 등 4개의 신규 Train이 시운전될 예정이다. 2010년 현재 전세계 모든 LNG Plant(94개 액화 Train)의 액화 용량은 LNG 부피 기준으로 년산 $594.1\times10^6$㎥으로 중량으로 환산시 269.6MTPA이며, LNG 총생산량은 $484.1\times10^6$㎥으로 전체 생산 능력 대비 80%이다.(2009년 74%)

LNG플랜트의 대형화에 가장 적극적으로 기술을 개발하는 곳은 APCI인데 APCI에서 개발된 AP-X 공정은 실증된 것이 7.8MTPA이고 10MTPA까지 가능하다고 알려져 있다. 하지만 LNG 플랜트의 용량은 가스전의 규모와 밀접한 관계가 있다. 통상 가스전의 규모가 10TCF(10조 입방 피트) 이상의 규모가 되어야 LNG 프로젝트가 가능하다고 알려져 있다. 현재까지 세계에서 규모가 거대한 가스전의 경우, 대부분 개발이 되었고 중형 가스전(10TCF ~ 100TCF)이 개발되고 있는 추세이다. 따라서, 개발하고자 하는 곳의 가스전 규모에 따라 LNG 플랜트의 용량이 결정되어야 한다.

GS건설은 LNG 분야에 진출하기 위하여 2008년에 LNG플랜트 사업단에서 발주한 3-1과제

에 참여하여 설계 기술을 습득하였고 2009년에 이란에서 Linde와 협업하여 LNG EPC 프로젝트에 참여하였다. LNG플랜트사업단은 3-1-1과제를 통하여 설계 기술을 확보하였고 1핵심 과제와 2핵심 과제를 통하여 주요 설비의 국산화와 시공 기술을 확보하였다. 이를 바탕으로 건설 기술 및 운영 기술을 확보하여 해외 프로젝트에 본격적으로 참여할 수 있는 발판을 마련하고자 한다.

따라서, GS건설은 본 과제에 참여하여 기존에 완성한 설계 기술을 바탕으로 1핵심과제와 2핵심과제와 연계하여 건설 기술 및 운영 기술을 확보할 것으로 기대되며, 이를 바탕으로 향후 해외 프로젝트에 참여할 때 기존의 정유, 석유화학, 가스 분야에서의 강점을 접목하여 최고의 시너지를 낼 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 과제는 국내 업체의 기술력 향상 및 해외 시장 동반 진출을 이룰 수 있을 것으로 기대된다.




그림 4. QGPC Project Facility Ras Laffan, Qatar

## 다. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

### (1) 해외 관련기술 및 시장 동향

#### (가) 해외 기술동향

LNG플랜트의 천연가스 액화능력 증가에 따라 대형, 고효율 액화 공정을 제공하는 APCI, ConocoPhillips와 Statoil/Linde 기술의 시장 점유율이 증가하고 있으며, 또한 이들 액화공정을 이용하여 열효율과 생산성을 최대화할 수 있는 종합 설계/건설 기술력이 지속적으로 요구되고 있다.

이에 따라, 천연가스 액화플랜트의 EPC 업체의 선택은 이미 사전에 정해진 경우가 대부분으로 Phillips의 Optimized Cascade기술이나 Statoil-Linde의 Mixed Fluid Cascade (MFC®) 기술의 경우 EPC Contractor로 각각 Bechtel과 Linde로 정해져 있는 상황임. 반면 APCI 공정 기술은 다수의 EPC contractor에게 라이센스가 부여되지만, 이 경우도 JGC/KBR과 Chiyoda가 형성한 카르텔에 의해 여타 EPC 업체의 기술 사용 자체가 어려운 상황이다.

설계, 시공 등 EPC 종합기술이 기획·개발형 사업의 성공요인이다.

① 선두기업의 경우에 시장 카르텔 형성을 통하여 후발기업의 핵심영역 진출을 배제하고 기술혁신과 비용절감을 통한 우위 확보전략



② 후발기업의 경우에 경쟁기술 개발을 통하여 선진기업과 제휴하거나 독자사업에 적용하는 전략을 구사(일본, 프랑스, 이탈리아 등)

③ 일본의 사례: 경쟁/특화기술 확보 ⇒ 기술제휴, 해외 컨소시엄 참여

- Chiyoda(과거) : 우수한 액화·제조설비, LNG 인수설비 설계기술
- JGC(현재) : Biomass, DME 등 신에너지 독자기술 개발에 투자
- JOGMEC(현재) : GTL 개발 컨소시엄 주도

세계 1위의 LNG 수입국인 일본은 1970년대부터 액화천연가스(LNG)를 기본적인 에너지원으로 채택하고, 이후 국가적이 차원에서의 관심과 지원을 바탕으로 LNG 생산/저장 분야에 필요한 원천설비기술을 개발하는 한편으로 자국 내 엔지니어링 기업들이 플랜트 설계/설비구매/건설 등의 전 분야에 참여하도록 하여 현재의 LNG 관련 플랜트 건설경기에 편승하여 고수익을 창출하고 있다.

그림 5는 주된 공정과 유틸리티를 포함하는 일반적인 LNG플랜트를 구성하는 공정도이다. 소요 공정과 유틸리티는 입지 조건과 천연가스의 질과 궁극적인 LNG 제품사양에 크게 의존한다.

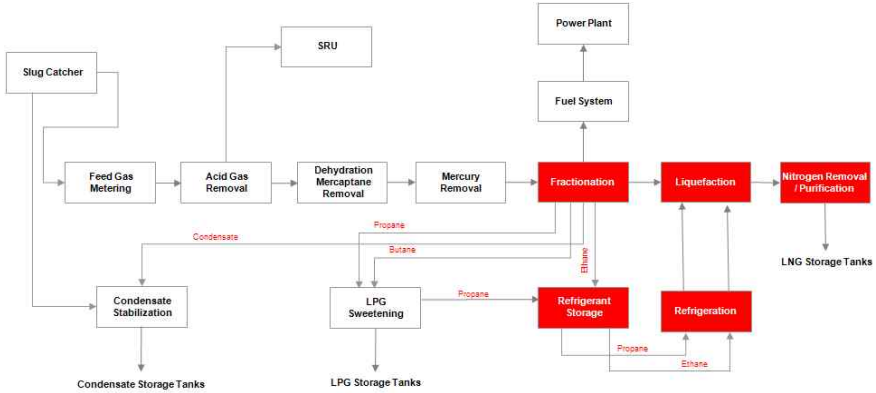



그림 5. LNG플랜트의 공정 흐름도

① 천연가스 전처리기술

천연가스는 산지에 따라 조성이 다른 것이 보통이다. 일반적으로 메탄(CH4)이 대부분이며 에탄(C2H6), 프로판(C3H8), 부탄(C4H10) 등의 중질분을 많이 포함하고 있으나 질소, 탄산가스, 유황화합물을 다량 포함한 것도 있다. 그러나 쉽게 액체화하는 중질분과 연료로서의 질을 떨어뜨리는 원인이 되는 불순물은 액화되기 전에 제거하여야 한다.

㉮ 가스 하이드레이트

LNG가 수상에 누출되면 물과의 큰 온도차 때문에 폭발적으로 기화한다. 또한 LNG에 물

이 들어가면 하이드레이트(Hydrate)나 얼음을 생성하여 장치 내에서 막히는 일이 있으므로 취급상 주의해야 한다. 메이저 오일/가스 업체를 중심으로 가스 하이레이트를 억제하기위한 다양한 연구 및 내부시험의 결과 각자 독특한 특성의 억제제 (inhibitor)를 보유하고 있다.

최근에는 개발된 억제제를 천연가스 액화 및 수송과정 뿐만 아니라 가스전 및 생산라인에도 직접 주입하는 기법이 현장 테스트에서도 상당한 효과를 보이고 있다. 효과적인 가스 하이드레이트 억제제 선정 및 이용을 위해서 다양한 환경에서 장기간의 테스트가 이루어지고 있다.

부식방지제, 거품방지제 등의 첨가제 등과 혼합된 억제제의 영향을 현장테스트 하는 사실이 알려져 있으나 구체적인 물질 정보는 특허를 통해서 알 수밖에 없고, 공개된 물질이 매우 다양하여 실제 이용되는 물질을 확인 할 수 없다. 가스 하이드레이트 발생 억제효과를 보이는 물성기를 갖는 유사 화합물을 천연물질 (심해 어패류 체내 물질) 로부터 얻어내거나 인공합성 하려는 연구도 시도되고 있다. 국내 가스 하이드레이트 연구 인력은 그 숫자가 매우 적으며, 플랜트에 적용할 수준의 개발 연구나 공정 모사, 데이터베이스 구축 등 경험자는 거의 없는 상태이다. 가스 하이드레이트 억제제를 연구, 개발하기에는 선진국과의 격차가 현저하므로 저급 알콜류의 열역학적 억제제 이용을 최소화하는 방향, 혹은 기 공개되어 업계에 일반화된 만료특허의 억제제를 조합하여 효과를 극대화 할 수 있는 방향의 연구개발이 이루어져야 한다. 조합 및 최적화 기술은 국내 연구자들의 능력이 매우 뛰어나므로 공정모사와 더불어 억제제 조합 및 다양한 상황에 대처하는 기법을 개발한다면 실제적 성과를 이룰 수 있다고 판단된다.

㉰ NGL 회수

감압된 천연가스는 각각의 액화공정으로 공급되며, LNG플랜트 공정설비로는 이산화탄소 제거설비, 물과 수은의 제거설비, 액화설비, 분류설비, 냉매의 저장 및 보충 설비 등으로 구성된다. 천연가스 중 제거되어지는 불순물로는 CO2, H2S, 수분과 수은이다. 이들이 제거된 가스는 냉매를 이용하여 냉각되어 에탄 이상의 무거운 성분(Heavier Hydrocarbons)을 분리한다. 무거운 성분의 가스가 분리된 가스의 성분은 주로 메탄이며, 이 후 가스는 극저온 (-162℃ 정도) 공정을 통하여 액화된다. 액화된 천연가스(LNG)는 대기압 하에서 탱크에 저장되고, 냉각 공정에서 분리된 무거운 가스 성분인 에탄, 프로판 그리고 부탄은 각각의 분리 공정을 통하여 회수된다. 에탄은 일반적으로 다시 주입되어 액화된다. 프로판과 부탄은 주로LPG(Liquefied Petroleum Gas)로 전환된다. 나머지 이들 보다 더 무거운 성분인 펜탄 이상의 가스는 가솔린 제품으로 판매된다.

플랜트 공정상 요구되어지는 유틸리티로는 1) 전력 생산을 위한 연료가스, 2) 냉각매체(물 혹은 공기), 3) 가열매체(스팀 혹은 오일 시스템) 그리고 4) 기타 계장에 이용되는 공기와 질소로 구성된다. 육상에 설치되는 대형 LNG플랜트에 있어서 1) 액화공정(Liquefaction) 2) 열교환기(Heat exchanger technology) 그리고 3) 드라이버와 드라이버의 구성은 매우 중요하며 기술적으로 충분히 고려되어야 한다.

㉱ NGL Recovery Unit형식과 위치



Fractionation설비의 위치는 크게 Stand Alone 형식과 Integrated 형식으로 나누어진다. 지금까지의 연구 결과를 보면 양자가 장단점이 있어서 어느 것이 바람직하다고 결론적으로 이야기 곤란하며 경우에 따라 적절한 설계 방식을 택하는 것이 일반적이다. Stand Alone형식은 냉동사이클과는 별개로 사전에 원료가스로부터 Fractionation을 해서 NGL을 추출하고 난 후 냉동 사이클로 보내서 액화시키는 방식을 말한다. 반면에 Integrated 형식은 냉동 사이클과 NGL 추출설비가 서로 연계된 설비로 일반적으로 많이 볼 수 있는 공정이다. Stand Alone은 미리 NGL을 추출시킨 다음 냉각 공정으로 보내기 때문에 초저온 주 열교환기의 부하가 줄어든다. 다시 표현하면 같은 주 초저온 열교환기로 더 많은 LNG를 생산할 수 있다.

반면에 에너지 효율적 측면에선 Integrated 보다 다소 떨어지고 조금 더 많은 에너지가 소요된다. Integrated형식은 에너지 효율은 높으나 주 초저온 열교환기의 생산능력에 한계가 있을 경우 추가 LNG 생산이 어렵다. 설비운영과 설계조건에 따라 어느 것을 선택할 것인가를 검토할 수 있고 각각의 경우에 따른 운전성, 기술적 비교, 경제성 비교를 할 수 있는 기술력을 보유하는 것이 필요하다.

② 천연가스 액화

냉각과 액화 공정은 LNG플랜트의 핵심으로 적용 대상 및 경험이 다른 다수의 라이센스 공정이 있다. 냉매를 사용한 천연가스의 냉각과 액화의 기본은 LNG 단위 생산량 대비 적은 양의 에너지가 요구되어지는 보다 열역학적으로 효과적인 공정을 얻는 것이다. 액화공정 (Liquefaction)은 일반적으로 LNG 전체 플랜트 설비금액의 30 ~ 40% 정도를 차지하며, 전체 공정의 효율(efficiency) 운전용이성(operability), 신뢰성(reliability)을 결정하는 주된 요소이다. 주된 설비 항목으로 1) 냉매를 순환시키기 위한 compressor와 2) compressor driver 그리고 3) 냉매간의 열교환과 가스의 냉각과 액화를 위한 열교환기가 있다.

천연가스는 혼합물로서 광범위한 온도 범위에서 액화된다. 냉각되는 가스와 냉매 흐름간의 온도차를 최소화하기 위하여 주어진 온도 범위 내에서 하나 이상의 냉매를 사용하거나 온도 범위를 분할시킴으로 온도차를 좀 더 근접시키기 위하여 서로 다른 압력에 있는 냉매를 사용할 수 있다. 공정상 가스는 일상적으로 높은 압력(40 ~ 55 bar)으로 운전되는데, 이는 설비의 사이즈를 줄이고 보다 효율적인 냉각을 위한 것이다. 냉매로는 순수한 성분만을 쓸 수도 있고 다양한 성분의 혼합물을 쓸 수 있으므로, 냉매의 조성도 하나의 중요한 조절변수로 고려되어짐. 혼합 냉매(mixed refrigerant, MR)의 조성은 공정 조건에 맞게 조절될 수 있다.

LNG 생산에는 플랜트의 생산규모가 경제성에 많은 영향을 미치며 일반적으로 액화능력의 크기가 커질수록 설비 투자 비용이 줄어든다. 이 때 한계 사항으로 작용하는 것은 compressor를 운전하기 위한 combustion gas turbine의 크기이다. Propane Precooled Mixed Refrigerant Process의 경우에는 spiral-wound 열교환기의 size가 플랜트의 사이즈를 결정하는 한계 사항으로 작용한다.

천연가스는 풍부한 매장량과 완전연소로 Clean 에너지의 대명사로 일컬어지지만 가스 수송상의 어려움으로 파이프라인 가설이 경제적인 생산지 인근국이 주요 고객이었다. 그러나

선박을 이용한 LNG 수송의 경제성이 입증되면서 지역적 제약을 벗어남으로써 세계 에너지 시장의 총아로 거듭나게 되었다. 전문가들의 분석에 의하면 세계 LNG 생산량은 연 4% 대로 증가하며 2040년까지 현재의 2배로 증가할 것으로 전망되고 있다. LNG는 천연가스를 섭씨 -162℃ 에서 액화한 것으로 부피가 가스의 1/600로 압축되어, 수송용 특수선박을 통해 세계 어디에든 공급이 가능하다.

**표 10. 천연가스 액화 공정 기술 현황**

| Licensor | Air Product | COP | Black & Veach | Statoil/ Linde | Axens | Shell |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Process Name | MCR | Optimized Cascade Process | PRICO | MFCP | Liquefin | DMR |
| Max. 단위 Train당 생산량(백만톤/년) | 4.7 | 3.3 | 1.3 | 4 | 6 | 4.8 |
| 열교환기 Type | Kettle + MCHE | PFHE | PFHE | PFHE + SWHE | PFHE | SWHE + SWHE |
| 냉매 | Propane / MR (N2,C1,C2,C3) | C3 / C2 / C1 | SMR(N2,C2,C3,iC5) | DMR(C1,C2,C3, N2) | DMR(C1,C2,C3,C4, N2) | DMR(C1,C2,C3, N2) |
| 장단점 및 특징 | Proprietary Heat Exchanger 사용 Flexible 운전 가격이 비쌈 | Cascade방식 간단한 운전 효율이 낮음 Module 설계 | 비교적 간단한 공정 비싼 단위투자비 소규모가스전 유리 | 기본적으로 APCI/Shell 등과 유사 높은 비용 소요 비교적 안정적 확보 가능 | 현재 설치예 없음. 큰 Capacity의 설계가 용이함. | 선열처리를 Mixed Refrigerant를 사용 상대적 열효율 높음 |
| References | 시장 지배적인 Process | Egypt, Trinidad | Algeria | Ekofisk, Norway | N/A | Sakhalin |
| Total Capacity, MTPA(2003) | 104.5 | 4.3 | 3.6 | 4.3 | | |
| Total # of Trains (2003) | 52 | 2 | 3 | 1 | | |

㉮ Feed Gas 조성의 표준화

Feed Gas 조성과 조건들(즉 압력과 온도 조건 등)은 프로젝트 별로 달라진다. 어느 설계조건일 경우 어느 프로세스가 가장 적합하다는 공식이 존재하지 않을뿐더러 간단하게 정의할 경우 프로세스 선정을 잘못 오도할 수 있기 때문에 프로젝트별로 가장 적합한 프로세스 선정은 가장 중요한 연구 목적물중의 하나이다.

이런 것을 조사한 논문도 찾아볼 수가 없는데 그 이유는 각 설계조건과 요구사항이 다르기 때문에 먼저 설계조건을 확인한 다음 거기에 맞는 최적의 프로세스를 찾기 위한 연구가 필요하며, 각기 Feed 별 공정 선택 및 주요 기기의 타입 및 운전 조건에 대한 통합적인 표준으로 만들어져서 DB화 하여야 할 것으로 생각된다. 2020년 현재 전세계에 가동 되고 있는 LNG 플랜트 현황을 아래 표에 나타내었다.



**표 11. LNG플랜트 가동 현황(2010년 기준)**

| Country | Site | Liquefaction | | Owner | Operator | Start-up Date |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Number of Train | Nominal Capacity per year | | | |
| **ATLANTIC BASIN** | | | | | | |
| Algeria | Arzew GL 4Z | 3 | 0.93 | Sonatrach | Sonatrach | 1964 |
| | Arzew GL 1Z | 6 | 8.19 | Sonatrach | Sonatrach | 1978 |
| | Arzew GL 2Z | 6 | 7.98 | Sonatrach | Sonatrach | 1981 |
| | Skikda-GL 1 | 3 | 3.13 | Sonatrach | Sonatrach | 1972 |
| Egypt | Damietta | 1 | 5 | SEGAS | SEGAS SERVICES | 2005 |
| | Idku | 2 | 7.2 | Egyptian LNG(EGPC, EGAS, BG, GDF SUEZ, Petronas) | Egyptian LNG(EGPC, EGAS, BG, GDF SUEZ, Petronas) | 2005 |
| Equatorial Guinea | Bioko Island | 1 | 3.7 | Marathon | Marathon | 2007 |
| Libya | Marsa-el-Breg | 3 | 0.6 | Sirte Oil Co. | Sirte Oil Co. | 1970 |
| Nigeria | Bonny Island | 3 | 9.6 | Nigeria LNG Ltd | Nigeria LNG Ltd | 1999-2000 |
| | | 2 | 8.1 | Nigeria LNG Ltd | Nigeria LNG Ltd | 2006 |
| | | 1 | 4 | Nigeria LNG Ltd | Nigeria LNG Ltd | 2008 |
| Norway | Hammerfest | 1 | 4.3 | StatoilHydro | StatoilHydro | 2007 |
| Trinidad & Tobago | Point Fortin | 4 | 5.1 | Atlantic LNG(BP, BG, Repsol, GDF SUEZ, NGC) | Atlantic LNG(BP, BG, Repsol, GDF SUEZ, NGC) | 1999 |
| **MIDDLE-EAST** | | | | | | |
| Abu Dhabi | Das Island | 3 | 5.6 | Adgas(ADNOC, BP, TOTAL, Mitsui) | Adgas | 1977 |
| Oman | Qalhat | 2 | 7.1 | Oman LNG(Oman gvt, Shell, TOTAL, Korea LNG, Mitsubishi, Mitsui, Partex, Itochu) | Oman LNG | 2000 |
| | | 1 | 3.6 | Qalhat LNG(Oman gvnt, Oman LNG, Itochu, Mitsubishi, Union Fenosa Gas, Osaka Gas) | Oman LNG | 2006 |
| Qatar | Ras Laffan (Qatargas 1-T1&2) | 2 | 6.4 | QatarGas (QP, ExxonMobil, TOTAL, Marubeni, Mitsui) | Qatargas I | 1999 |
| | Ras Laffan (Qatargas 1-T3) | 1 | 3.1 | QatarGas (QP, ExxonMobil, TOTAL, Marubeni, Mitsui) | Qatargas I | 1999 |
| | Ras Laffan (Qatargas 2-T1) | 1 | 7.8 | (Qatar Petroleum, ExxonMobil) | Qatargas II | 2009 |
| | Ras Laffan (Qatargas 2-T2) | 1 | 7.8 | (Qatar Petroleum, TOTAL, ExxonLMobil) | Qatargas II | 2009 |
| | Ras Laffan (Qatargas 3-T1) | 1 | 7.8 | Qatar Petroleum, Conoco, Mitsui | Qatargas III | 2010 |
| | Ras Laffan (RasGas 1- T1&2) | 2 | 6.6 | RasGas 1(QP, ExxonMobil, Kogas, Itochu, Nissho Iwai, LNG Japan) | RasGas I | 1999-2000 |
| | Ras Laffan (RasGas 2- T1) | 1 | 4.7 | Rasgas 2(Qatar, Petroleum, Exxon Mobil) | RasGas II | 2004 |
| | Ras Laffan (RasGas 2- T2) | 1 | 4.7 | Rasgas 2(Qatar, Petroleum, Exxon Mobil) | RasGas II | 2005 |
| | Ras Laffan | 1 | 4.7 | Rasgas 2(Qatar Petroleum, Exxon Mobil) | RasGas II | Mar-07 |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (RasGas 2- T3) | | | | | |
| | Ras Laffan (Rasgas 3 - T1) | 1 | 7.8 | Rasgas 3(Qatar Petroleum, Exxon Mobil) | RasGas III | Aug-09 |
| | Ras Laffan (Rasgas 3 - T2) | 1 | 7.8 | Rasgas 3(Qatar Petroleum, Exxon Mobil) | RasGas III | April 2010 |
| Yemen | Balhaf-Train 1&2 | 2 | 6.7 | Yemen LNG(TOTAL, Kogas, Yemen Gas Co., Hunt Oil Co., SK Corporation, Hyundai, GASSP1) | Yemen LNG | 2009-10-01 & April 2010 |
| PACIFIC BASIN | | | | | | |
| Australia | Withnell Bay | 4 | 12.1 | NWS LNG JV (Woodside, Shell, BHP, BP Australia, Chevron, Mitsubishi/Mitsui) | Woodside | 1989 |
| | | 1 | 4.3 | Woodsie, Shell, BHP, BP, Chevron, Australia Japan LNG(16.67% each) | Woodside | 2008 |
| | Darwin | 1 | 3.4 | Darwin LNG (ConocoPhillips, ENI, Santos, Inpex, TEPCo, Tokyo Gas) | ConocoPhillips | 2006 |
| Brunei | Lumut | 5 | 7.2 | Brunei LNG(Brunei gvnt, Shell, Mitsubishi) | Brunei LNG Sdn Bhd | 1973 |
| U.S.A. | Kenai | 2 | 1.4 | ConocoPhillips, Marathon | ConocoPhillips, Marathon | 1969 |
| Indonesia | Blang Lancang Arun | 3 | 4.75 | Pertamina | PT Arun NGL Co.(Pertamina, ExxonMobil, JILCO) | 1978-1979 |
| Malaysia | Bontang - Badak | 8 | 22.2 | Pertamina | PT Badak NGL Co.(Pertamina, VICO, TOTAL, JILCO) | |
| | Bontang Badak A,B | 2 | | | | 1977 |
| | Bontang Badak C,D | 2 | | | | 1983 |
| | Badak E | 1 | | | | 1990 |
| | Badak F | 1 | | | | 1994 |
| | Badak G | 1 | | | | 1998 |
| | Badak H | 1 | | | | 1998 |
| | Tangguh | 2 | 7.6 | Government of Indonesia | BP | 2009 |
| | Bintulu MLNG 1(Satu) | 3 | 8.1 | Malaysia LNG Sdn Bhd(Petronas, Shell, Mitsubishi) | Malaysia LNG Sdn Bhd | 1983 |
| | Bintulu MLNG 2(Dua) | 3 | 7.8 | Malaysia LNG Dua(Petronas, Shell, Mitsubishi, Sarawak state Gvnt) | Malaysia LNG Dua | 1995 |
| | Bintulu MLNG 3(Tiga) | 2 | 6.8 | Malaysia LNG Tiga(Petronas, Shell, Nippon Oil, Diamond Gas, Sarawak state Gvnt) | Malaysia LNG Tiga | 2003 |
| Peru | Peru LNG | 1 | 4.45 | Hunt Oil(50%), Marubeni(10%), Repsol YPF(20%), SK Corp(20%) | Hunt Oil | 2010 |
| Russia | Sakhalin 2 | 2 | 9.55 | Sakhalin Energy Invest Co.(Gazprom, Shell, Mitsui, Mitsubishi) | Sakhalin Energy Invest Company | 2009 |
| | TOTAL | 94 | 269.58 | | | |

㉰ 주요 기기의 성능 및 핵심 요구 사항



신규 LNG플랜트 시장으로서, 새로운 기술들은 바지선(Barge)이나 수송선(Ship)에 공정을 설치하기 위하여 소규모화 (miniaturization) 되고 있다. Statoil Linde의 MFCP 공정은 건설을 용이하게 하기 위한 바지선위에 설치되는(Bargemounted) 공정이 대표적인 사례로 가스전이 원거리에 있어서 바지선이 공정설비의 영구적인 기초가 된다. Power와 Process heat 공급을 위해 aero-derivative gas turbines이 사용되고 compressor로는 electric drive compressors가 사용된다.

Shell은 부유 LNG플랜트(FLNG)에 DMR 공정을 도입하려 하고 있다. LNG technology licensor들이 공정상 중점적으로 관심을 갖는 내용은 냉각 순환 공정에서 요구되어지는 압축량(Compression)과 냉각 순환 공정을 운전하기 위한 Power 그리고 주 액화공정에 적용되는 열교환기의 선택과 설계 및 제작사항이다.

Kenai plant를 제외한 거의 모든 초기의 플랜트에서는 steam turbine driven compressor를 사용하였다. 현재는 combustion gas turbine(CGT)을 일반적으로 사용하고 있다. 일부 라이센서는 거대한 frame turbine을 사용하려는 반면에 일부는 LM6000나 Rolls Royce Trent와 같은 aero-derivative CGT가 고려 되어지고 있다. 이와 더불어 연도(flue stack) 폐열 회수 시스템을 이용하여 steam turbine을 구동하는 것도 고려되어지고 있다.

최근까지 Spiral-wound heat exchanger(SWHE)를 디자인하고 생산하는 APCI가 초저온열교환기 분야를 주도해왔다. Linde 역시 MCHE 설비를 생산했으며 Woodside에 의해 운전되는 Australia의 North-West Shelf LNG플랜트의 계열 IV에 적용되었다. Brazed aluminum plate-fin heat exchangers(PFHE)가 새로운 선택사항으로 시장에 선보이고 있다. Bank에서 조립될 수 있는 장점이 있는 PFHE는 항공산업에서 최초로 설계된 것으로 가스 processing 플랜트의 극저온 냉각 공정에 적용되고 있다.

LNG플랜트의 실적(liquefaction process등 핵심 공정)이 있는 엔지니어링 기업은 일본의 JGC(Kellog), Chiyoda 화공건설, 미국의 KBR, Bechtel이다. 천연가스 액화플랜트의 EPC 업체의 선택은 기술사에 따라 이미 사전에 정해진 경우가 대부분으로 Phillips의 Optimized Cascade 기술이나 Statoil-Linde의 Mixed Fluid Cascade(MFC®) 기술의 경우 EPC Contractor로 각각 Bechtel과 Linde로 정해져 있는 상황이다. 반면 APCI 공정 기술은 다수의 EPC contractor에게 라이센스가 부여되나, 이 경우도 JGC/KBR과 Chiyoda가 형성한 카르텔에 의해 여타 EPC 업체의 기술사용 자체가 어려운 상황이다. 다만, 2010년대 중후반에 들어오면서 단기간 급격한 LNG 액화플랜트 건설이 집중되며 기존의 카르텔을 형성해온 EPC 업체들의 업무 과부하로 인해 CB&I 등 신규 player가 등장하는 사례도 나타나고 있다.

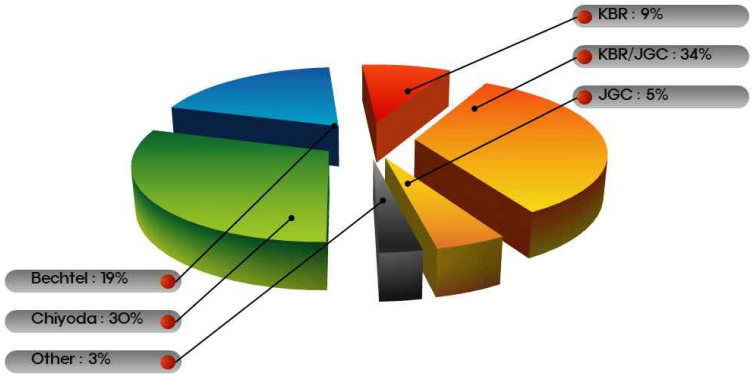



**그림 6. 천연가스 액화플랜트 EPC업체**

③ 특허 동향

LNG플랜트 관련 연도별 출원추이를 살펴보면, 1970년대 초부터 기술 개발이 시작되어 90년대 중반이후에는 활발한 특허 출원이 이루어지고 있으며, 특히 최근 2~3년의 증가세가 두드러진다.

또한, 2001년 이후 해외출원을 포함한 패밀리특허의 건수가 통합 건수 대비 확연한 차이를 보이고 있어, 최근 해외 지재권 확보가 활발한 분야로 추정된다.

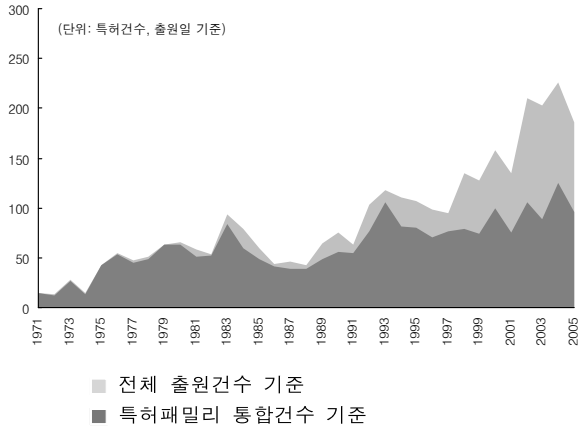



**그림 4. LNG플랜트 기술의 연도별 출원 추이**

LNG플랜트의 전처리, 액화, 수송, 저장 부문으로 나뉘어 연도별 추세를 보면 아래와 같다.



- Open Technology로 활용되고 있는 천연가스 전처리 기술을 제외한 액화, 수송 및 저장 부문의 기술은 최근 개발이 활발한 분야이다.
- 다만 수송 부문의 경우 80년대 중반 Hitachi사가 LNG선을 활용한 수송 기술에 대한 특허를 다수 출원한 바 있다.

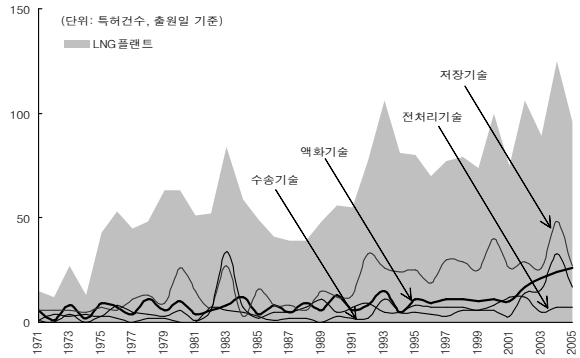



**그림 5. LNG플랜트 분야 가치사슬 기술의 연도별 추이**

LNG플랜트 관련 특허의 제목과 초록에 포함된 keyword를 이용한 Text mining기법을 통해 Landscape 분석을 실시하면, 아래 그림과 같이 천연가스 액화기술, 저장탱크 기술, BOG 액화기술 및 전처리 기술 등이 큰 군집을 형성하고 있다.

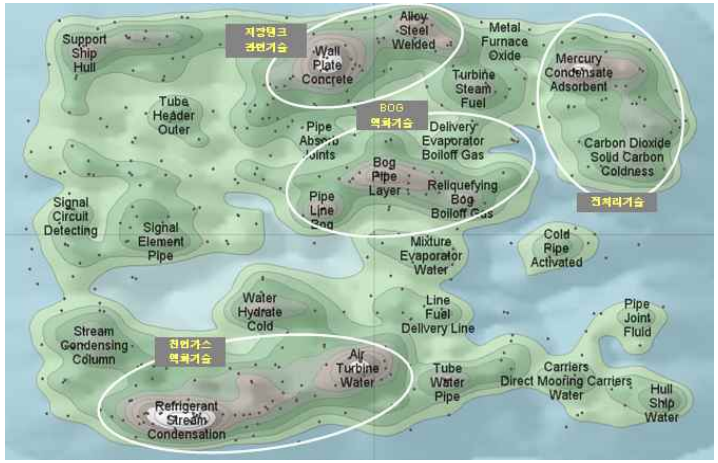



**그림 8. LNG플랜트 관련 기술에 대한 Landscape 분석(1971~현재)**

앞서 연도별 추이에서 2000년 이후 총 특허 건수 및 패밀리통합 건수가 큰 증가세를 보이고 있으므로, 2000년 이후 출원된 특허에 대해 다시 Landscape 분석을 실시하면, BOG액화, 액화공정의 가압용기, 압축기 및 저장탱크/수송파이프 등에 대한 특허의 출원이 활발한 것을 알 수 있다.

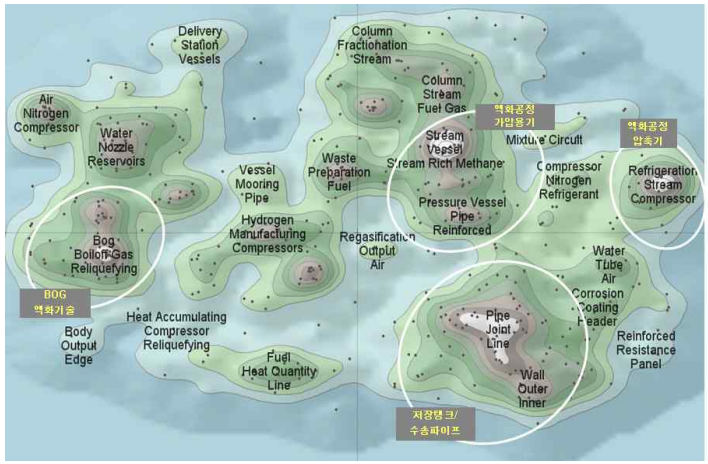



그림 9. LNG플랜트 관련 기술에 대한 Landscape분석(2000～현재)

반면 LNG플랜트 관련 기술의 국가별 전체 출원추이를 살펴보면 2000년 이후 미국, 유럽 및 PCT특허가 주도적으로 출원되고 있으며, 일본의 경우 꾸준한 기술개발이 이루어지고 있는 것으로 추정된다.

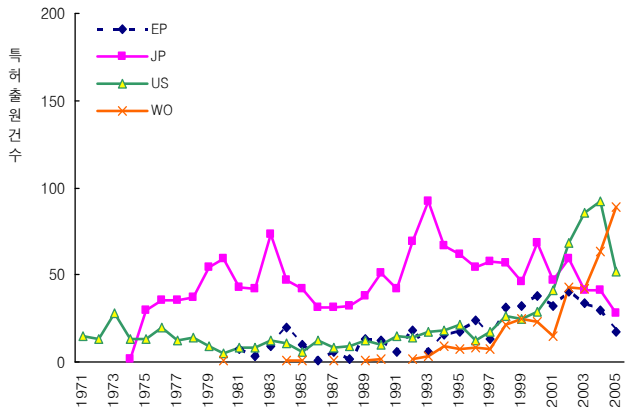



그림 10. LNG플랜트 기술의 국가별 출원추이



LNG플랜트 관련 주요 출원인으로는 Ishikawajima중공업, MHI 등이 있으며, 출원건수 기준으로는 주로 일본의 중공업체, 가스업체, 철강업체 등에서 상위권을 차지하고 있다. 반면 연평균 피인용도 상위 20% 보유건수를 기준으로 보면 ExxonMobil, Conocophillips 및 APCI(Air Products & Chemical, Inc)사가 주요 출원인으로 분석된다.

표 12. 액화공정 특허 현황

| 세부기술 | 업체명 | 보유 기술 또는 특허 | 기술 수준 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 천연가스 액화공정 기술 | Air Product | MCR(Propane/MR) | 104.5 | 시장 지배 Process |
| | COP | Optimized Cascade Process (C3/C3/C1) | 4.3 | |
| | Black& Veach | PRICO(SMR) | 3.6 | |
| | Staoil/ Linde | MFCP(DMR) | 4.3 | |
| | Axens | Liquefin(DMR) | 0 | |
| | Shell | DMR(DMR) | 0 | |
| 액화공정 최적화 기술 | Process Integration Limited | 액화공정 최적화 기술 | - | |

④ 세계 주요 LNG프로젝트 현황 (2019 말 기준)

- 현재 전세계 22개국에서 42기의 LNG 시설이 가동되고 있음.
- 2020년 4개의 신규 Train이 시운전될 예정임.(Qatargas III, RasGas III(Qatar), Yemen(Balhaf), Peru(Pampa Melchorita))
- 모든 LNG Plant(123개 액화 Train)의 액화 용량은 년산 430.5백만 톤임.
- 2019년 LNG 총생산량은 년산 350.4백만 톤으로 전체 생산 능력 대비 81.4%임.
- 전세계 수입터미널의 저장탱크 용량은 약 25일분 생산 능력인 65백만 ㎥임.




그림 11. LNG 프로젝트 현황(2010년)



(가) Bonny Island, Nigeria



그림 12. Bonny Island Import Terminal

- 위치 : Finima, Bonny Island
- 운영개시 : 1999년
- 운영자 : Nigeria LNG Ltd(Nigerian National Petroleum(NNPC, 49%), Shell(25.6%), Total(15%), Eni(10.4%)
- 수요처 : 동유럽, 북미, 터키
- 용량 : 21.8 mmtpa
- Train-1, 2 : 6.4 mmtpa(1999년 2000년 각각 완료)
- Train-3 : 2002년 완료
- EPC Contractor : TSKJ(Technip, Snamprogetti, MW Kellogg, Japan Gas Corporation)
- Train-4, 5 : 8.1 mmtpa, C3-MR공정(2005년 2006년 각각 완료
- Train-6 : 4.1 mmtpa (2008년)
- Train-7 : 2012년 예정(FEED Contractor: Foster Wheeler, Chiyoda Corporation)

(나) Greater Gorgon(Australia)



그림 13. Gorgon LNG Site

- 위치 : Western Australia
- Owner : Gorgon JV(Chevron, Shell, ExxonMobil, Osaka Gas, Chubu Electric
- FEED : Kellogg JV(2005, Kellog Brown and Root, Clough, Hatch, JGC)
- Train : 5mmtpa, 3기
- Gorgon LNG 수요처
  - Petronet(India) - 1.5mmtpa
  - Kyushu Electric Power(Japan) - 0.3mmtpa
  - Osaka Gas(Japan) - 1.357mmtpa
  - Tokyo Gas(Japan) - 1.1mmtpa
  - Petrochina(China) - 2.25mmtpa
  - Chubu Electric(Japan) - 1.5mmtpa

(다) Angola LNG Project



그림 14. Angola LNG Project

- Owner : Angola LNG Limited (Sonangol Gas Natural, 36.4%; Chevron, 36.4%; BP, 13.6%; Total, 13.6%)
- Location : Soyo Angola
- 2005년 FEED 착수(Bechtel, JV(KBR, JGC, Technip)
- 용량 : 5.2mmtpa

(라) Ichthys LNG




그림 15. Ichthys LNG

- Owner : INPEX and Total
- Location : Darwin, Northern Territory Australia
- 2000년 INPEX사는 티모르해의 Brown Basin의 가스전 발견
- 2008년 9월 Ichthys joint venture(INPEX Browse, Ltd., operator; Total E&P Australia) Ichthys Project 발표
- 가스전 크기 : 12.8 tcf 천연가스, 527 million condensate.
- 용량 : 8.4mmtpa X 2기 LNG, 100,000 barrels/day condensate
- 운전 : 2016 예정
- FEED Contractor : AMEC Engineering

(마) Queensland Curtis LNG



그림 16. Queensland Curtis

- Owner : BG Group plc; Queensland Gas Co. Ltd.(QGC)
- Location : Curtis Island, Queensland Australia
- 주요기기 : pipeline; LNG processing plant and export terminal
- 용량 : 1 train당 3-4M tonnes per year
- Contractors : Bechtel Oil, Gas and Chemicals, Inc.(FEED)



(나) 해외 시장동향

① 현황

2016년에서 2020년 사이에 140mmtpa 이상의 액화 설비가 건설되었다. 2019년 글로벌 액화 용량은 지난해 대비 약 11% 성장하였으며 호주, 러시아, 미국, 아르헨티나에서 42.5mmtpa의 신규 액화설비가 추가되어 총 430.5mmtpa 규모이다. 현재 미국, 인도네시아, 말레이시아, 러시아에서 신규 액화설비를 건설 중에 있어 2020년 말에는 약 454.8 mmtpa에 달할 것으로 예상되며 이 외에도 미국, 모잠비크, 러시아, 나이지리아에서 신규 FID가 승인되어 70.8 mmtpa가 추가될 전망이다. 또한 907.4 mmtpa의 프로젝트가 pre-FID 단계에서 검토중에 있는 등 향후 전세계 LNG 액화플랜트 규모는 계속 확대될 것으로 기대된다.

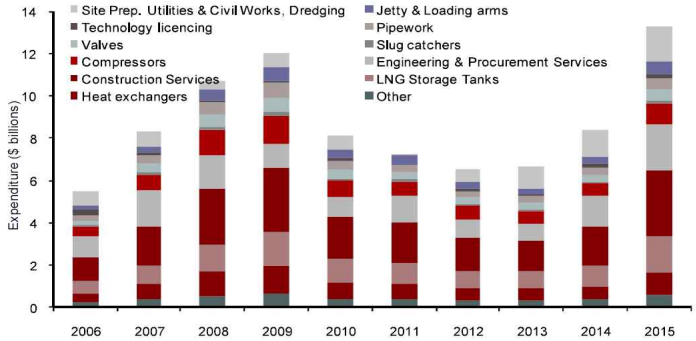



그림 17. Liquefaction Cost Breakdown(Douglas Westwood, 2011)

년간 생산량에 따른 EPC비용은 아래 표와 같다.

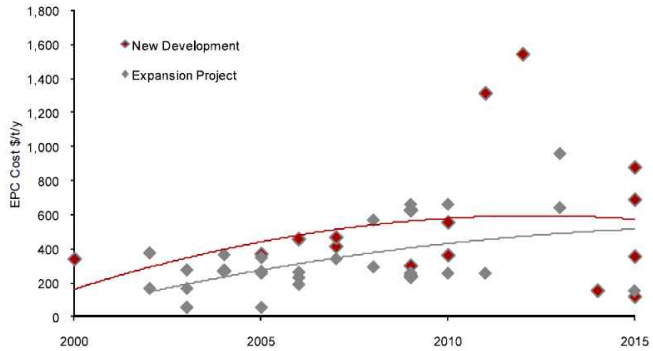



그림 18. EPC Cost for Liquefaction Terminals 2000-2014(Douglas Westwood, 2011)

2005년까지 기술발전과 대형화 그리고 업체 간의 경쟁으로 인해 건설비용은 200$/t/y(년간 1톤 생산을 위한 공사비)까지 감소하였다. 그러나 인건비와 원자재 비용 상승 등으로

인해 2005년에서 2008년 사이에 공사시용이 상승되었다. 이 시기 많은 프로젝트에서 400$/t/y이상의 공사비가 소요되었다. 2010-1014 기간에는 약정된 주요 프로젝트 90mmtpa)의 50% 이상이 호주에서 발생하였다. 이에 노동력 부족으로 인한 건설비용이 사상 최고 수준으로 상승하였다. 2015년 이후에는 대형 프로젝트의 건설비용이 대략 1000$/t/y 수준을 이루는 것으로 보고 있다. 향후 인건비가 낮은 지역에서 생산해 현장으로 운반 후 공사를 하는 모듈화 기술이 발전됨에 따라 공사비의 감소가 예상되고 있다. 이러한 모듈화 시공은 현재 아시아에서 제작되어 호주, 미국 등의 액화 프로젝트에 적용되어 진행되고 있다.

현재, LNG 플랜트의 주계약 업체로는 아래표의 Bachtel, 치요다 화공건설, KBR & JGC 그리고 Technip 정도이다. 이 업체들은 2017년 기준 전세계 액화 용량의 86%의 점유율을 차지했다. 이에 따라 경쟁이 적은 시장임에도 불구하고 플랜트 가격 인하 경쟁이 치열하다. 최근 들어 LNG 플랜트의 주요 기기인 압축기의 성능이 향상되어 LNG 플랜트의 계열당 생산량은 증가 경향에 있다. 트레인 1계열 당 년간 200만 톤 규모였던 생산 능력은 최근에는 780만톤까지 증대되고 있다. 이로 인해 톤 당 단가를 상당 수준 내려도 채산성을 확보할 수 있게 되었고, 기술력 고도화가 LNG 플랜트의 사업 효율성을 향상시키고 있다.

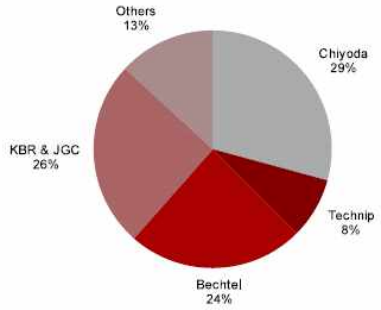



그림 19. LNG플랜트 건설사(2010, Douglas Westwood)

표 18. LNG플랜트 계약 사례와 수주 가격 추이

| 수주시기 | Contractor | 국가 | 규모 (톤/년) | 수주액 (원) | 단가 (원/톤) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1992.4 | JGC-Kellog | 말레이시아 | 260만 X 3계열 | 1조 5,200 | 194,750 |
| 1993.5 | Chiyoda | 카타르 | 200만 X 2계열 | 1조 7,100 | 427,500 |
| 1995.8 | Chiyoda | 카타르 | 200만 | 5,700 | 285,000 |
| 1996.1 | JGC-Kellog, chnip-Snamprogetti | 나이지리아 | 590만 | 1조 9,000 | 194,750 |
| 1996.3 | JGC-Kellog | 카타르 | 250만 X 2계열 | 9,500 | 190,000 |
| 1996.6 | Chiyoda, Foster-Wheeler | 오만 | 350만 X 2계열 | 9,500 | 144,400 |
| 1997.6 | JGC-Kellog | 카타르 | 250만 | 3,800 | 152,000 |
| 1999.8 | JGC-KBR | 말레이시아 | 증강공사 | 3,800 | |
| 2000.1 | JGC-KBR | 말레이시아 | 380만 | 1조 3,537 | 356,250 |
| 2001.4 | Chiyoda, Snamprogetti | 카타르 | 235만 X 2계열 | 5,700 | 121,600 |
| 2001.4 | JGC-KBR | 오스트레일리아 | 210만 X 2계열 | 9,872 | 235,600 |
| 2001.12 | JGC-Kellog | 이집트 | 250만 X 2계열 | 9,120 | 182,400 |
| 2002.3 | JGC-Kellog, Technip-Snamprogetti | 나이지리아 | 200만 X 2계열 | 9,500 | 95,000 |
| 2002.3 | Chiyoda, Snamgetti | 카타르 | 235만 X 2계열 | 5,462 | 114,950 |
| 2003.1 | Chiyoda, 영Foster-Wheeler | 카타르 | 330만 | 4,655 | 138,700 |

표 19. LNG 플랜트 건설 계획 및 발주 현황

| COUNTRY | PROJECT NAME | OWNER | NUMBER OF TRAINS | TRAIN CAPACITY MTPA | TOTAL CAPACITY MTPA | CAPEX US$ BILLION | LIQUEFACTION TECHNOLOGY | EPC CONTRACTOR | COMMISIONING DATE |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Indonesia | Abadi LNG | Inpex | 1 | 4.5 | 4.5 | 9.5 | | | 2016 |
| Angola | Angola LNG | Angola LNG | 1 | 5.2 | 5.2 | 8.0 | ConocoPhilips | Bechtel/Petromar | 2012 |
| Algeria | Arzew LNG | Sonatrach | 1 | 4.5 | 4.5 | 2.8 | APCI | Chiyoda/Saipem | 2013 |
| Trinidad | Atlartic LNG 1 | BP | 1 | 3.3 | 3.3 | 0.97 | ConocoPhilips | Bechtel | 1999 |
| Trinidad | Atlartic LNG 2 | BP | 1 | 3.5 | 3.5 | 0.52 | ConocoPhilips | Bechtel | 2002 |
| Trinidad | Atlartic LNG 3 | BP | 1 | 3.5 | 3.5 | 0.51 | ConocoPhilips | Bechtel | 2003 |
| Trinidad | Atlartic LNG 4 | BP | 1 | 5.2 | 5.2 | 1.2 | ConocoPhilips | Bechtel | 2005 |
| Australia | Australia Pacific | ConocoPhilips | 2 | 3.5 | 7.0 | 7.5 | ConocoPhilips | Bechtel | 2015 |
| Yemen | Balhaf LNG | Yemen LNG Coy | | | 0.0 | 4.0 | APCI | JGC/KBR/Techrip | 2009 |
| Australia | Bonaparte | GDF Suez/ Santos | 1 | 2.0 | 2.0 | N/A | FLNG | N/A | 2012 |
| Indonesia | Bontang LNG-Train-1 | Pertamina | 1 | 2.95 | 3.0 | N/A | APCI | KBR | 1999 |
| Indonesia | Bontang LNG-Trains A-G | Pertamina | 7 | 2.75 | 19.3 | N/A | APCI | Chiyoda | 1997 |
| Nigeria | Brass LNG | NNPC | 2 | 5.0 | 10.0 | 8.5 | ConocoPhilips | Bechtel | 2013 |
| Australia | Browse | Woodside | 2 | 7.5 | 15.0 | 10 · 15 | TBA | TBA | 2015 |
| Egypt | Damietta LNG-Train-1 | SEGAS | 1 | 6.3 | 5.3 | 1.3 | APCI | JGC/Chiyoda/TR | 2005 |
| Australia | Darwin LNG | ConocoPhilips | 1 | 3.4 | 3.4 | 1.8 | ConocoPhilips | Bechtel | 2006 |
| Venezuela | Delta Caribe LNG | PDVSA | 2 | 4.7 | 9.4 | 11.8 | APCI | TBA | 2014 |
| Indonesia | Donggi-Senoro LNG | Pertamina | 1 | 2 | 2.0 | 2.0 | TBA | TBA | 2012 |
| Equatorial Guines | EG LNG Train-1 | Marathon | 1 | 3.7 | 3.7 | 1.4 | ConocoPhilips | Bechtel | 2007 |
| Equatorial Guines | EG LNG Train-2 | Marathon | 1 | 4.4 | 4.4 | 3.0 | ConocoPhilips | Bechtel | 2011 |
| Egypt | Eygptian LNG-Train-1 | El Behera NGL Coy | 2 | 3.6 | 7.2 | 0.9 | ConocoPhilips | Bechtel | 2005 |
| Egypt | Eygptian LNG-Train-2 | El Behera NGL Coy | 1 | 3.6 | 3.6 | 1.9 | ConocoPhilips | Bechtel | 2014 |
| Australia | Fisheman's Landing LCSG Train 1 | Gladstone LNG | 1 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | | SKEC? | 2010 |
| Australia | Fisheman's Landing LCSG Train 2 | Gladstone LNG | 1 | 1.5 | 1.5 | TBA | | TBA | 2015 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Australia | Gladstone-Santos | Santos/Petronas | 2 | 3.5 | 7.0 | 7.1 | ConocoPhilips | Bechtel | 2014 |
| Australia | Gladstone-Shell | Shell | 1 | 3.5 | 3.5 | N/A | N/A | N/A | 2015 |
| Australia | Gorgon LNG | Chevron | 3 | 5 | 15.0 | 17.6 | APCI | KBR/JGC/CLOUGH/HATCH | 2014 |
| Australia | Ichthys LNG | Inpex | 2 | 4.2 | 8.4 | 12.0 | APCI | KBR/JGC/Chiyoda | 2015 |
| Iran | Iran LNG | NIOC | 2 | 4.25 | 8.5 | 5.5 | Linde | GS E&C | 2012 |
| Canada | Kitimat LNG | Kitimat LNG | 1 | 5 | 5.0 | 3.25 | N/A | N/A | 2014 |
| Papua New Guinea | Liquid Niugini Gas LNG | Liquid Niugini Gas | 1 | 4.5 | 4.5 | 6.0 | ConocoPhilips | Bechtel | 2015 |
| Indonesia | MLNG Dua | MLNG | 3 | 2.6 | 7.8 | 2.2 | APCI | KBR/JGC | 1995 |
| Indonesia | MLNG Tiga | MLNG | 2 | 3.4 | 6.8 | 1.85 | APCI | Chiyoda | 2003 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 1 | NNPC | 1 | 3.3 | 3.3 | 1.45 | APCI | Technip/Snamprogetti/KBR/JGC | 1999 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 2 | NNPC | 1 | 3.3 | 3.3 | 1.45 | APCI | Technip/Snamprogetti/KBR/JGC | 2000 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 3 | NNPC | 1 | 3.4 | 3.4 | 1.3 | APCI | Technip/Snamprogetti/KBR/JGC | 2002 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 4 | NNPC | 1 | 4.0 | 4.0 | 1.05 | APCI | Technip/Snamprogetti/KBR/JGC | 2005 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 5 | NNPC | 1 | 4.0 | 4.0 | 1.05 | APCI | Technip/Snamprogetti/KBR/JGC | 2006 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 6 | NNPC | 1 | 4.0 | 4.0 | 1.6 | APCI | Technip/Snamprogetti/KBR/JGC | 2008 |
| Nigeria | Nigeria LNG Train 7 | NNPC | 1 | 8.4 | 8.4 | ? | APCI | - | 2012 |
| Norway | Nordic(Skangass) LNG | Nordic LNG AS | 1 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | Linde | Linde | 2010 |
| Australia | North West Shelf Train 4 | Woodside | 1 | 4.4 | 4.4 | 10.5 | APCI | KBR/JGC/Kaiser | 2004 |
| Australia | North West Shelf Train 5 | Woodside | 1 | 4.4 | 4.4 | 2.19 | APCI | Foster Wheelen/ Worley Parsons | 2008 |
| Nigeria | Olokola LNG Phase 1 | NNPC | 2 | 5.5 | 11.0 | 12 | APCI | TBA | 2013 |
| Nigeria | Olokola LNG Phase 2 | NNPC | 2 | 5.5 | 11.0 | 12 | APCI | TBA | 2014 |
| Oman | Oman LNG - Train 1&2 | OLNG | 2 | 3.3 | 6.6 | 1.8 | APCI | Chiyoda/FW | 2000 |
| Oman | man LNG - Train 3 | OLNG | 1 | 3.7 | 3.7 | 0.7 | APCI | Chiyoda/FW | 2005 |
| Iran | Pars LNG | Pars LNG Coy | 2 | 5 | 10.0 | 11.5 | Axens | Saipem/Others | 2013 |
| Iran | Pars LNG | NIGEC | 2 | 8.1 | 16.2 | 18.0 | Shell | TBA | 2015 |
| Peru | Peru LNG | Peru LNG | 1 | 4.2 | 4.2 | 3.8 | APCI | CB&I | 2010 |
| Australia | Pluto Train 1 | Woodside | 1 | 4.3 | 4.3 | 4.5 | APCI | Foster Wheeler/ WorleyPersons | 2011 |
| Australia | Pluto Train 2 | Woodside | 1 | 4.3 | 4.3 | 4.1 | APCI | Foster Wheeler/ WorleyPersons | 2014 |
| Papua New Guirea | PNG LNG | ExxonMobil | 2 | 3.3 | 6.6 | 9.0 | ConocoPhilips | Bechtel | 2014 |
| Qatar | Qatargas-Train 6-7 | Qatargas III&IV | 2 | 7.8 | 13.5 | 4.0 | APCI | Chiyoda/Technip | 2011 |
| Qatar | Qatargas-Trains 1-3 | Qatargas | 3 | 3.2 | 9.6 | 2.8 | APCI | Chiyoda | 1999 |
| Qatar | Qatargas-Trains 4-5 | Qatargas II | 2 | 7.8 | 15.6 | 4.0 | APCI | Chiyoda/Technip | 2009 |
| Australia | Queensfand Curtis LCSG | BG | 2 | 3.7 | 7.4 | 6.6 | ConocoPhilips | Bechtel | 2015 |



| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Qatar | Rasgas-Train 1-2 | Rasgas | 2 | 3.3 | 6.6 | 3.0 | APCI | JGC/MMK | 2000 |
| Qatar | Rasgas-Train 3-5 | Rasgas | 3 | 4.7 | 14.1 | 6.5 | APCI | Chiyoda/Snamprogetti/Mitsui | 2005 |
| Qatar | Rasgas-Train 6-7 | Rasgas | 2 | 7.8 | 15.6 | 13.0 | APCI | Chiyoda/Technip | 2009 |
| Russia | Sakhalis LNG | SEIC | 2 | 4.8 | 9.6 | 5.5 | Shell | Chiyoda/Toyo | 2009 |
| Australia | Scarborough(Pilbare)LNG | ExxonMobil/BHP Billiton | 1 | 6 | 6.0 | 5.0 | TBA | TBA | 2015 |
| Russia | Shtokman LNG | SDC | 2 | 7.5 | 15.0 | 20.0 | TBA | TBA | 2014 |
| Norway | Snohvit LNG | Snohvit LNG | 1 | 4.1 | 4.1 | 7.8 | Linde | Linde | 2007 |
| Indonesia | Tangguh LNG | BPMigas | 2 | 3.8 | 7.6 | 6.5 | APCI | KBR/JGC | 2009 |
| Australia | Wheatstone LNG | Chevron | 2 | 4.3 | 8.6 | N/A | ConocoPhilips | Bechtel | 2016 |
| Yemen | Yemen LNG | Yemen LNG | 2 | 3.35 | 6.7 | 4.5 | APCI | Technip/JGC/KBR | 2010 |

② 시장예측

Shell Engergy Outlook(2020)에 발표된 수요전망에 따르면, 2040년의 전세계 LNG 수요는 연간 4%로 증가하여 2020년 수요의 약 2배에 달하는 650 ~ 750mmtpa에 이를 것으로 전망된다. LNG는 현재 공급과잉 상태이나 최근 3~4년간 신규 액화플랜트의 FID가 대부분 지연/취소되면서 2020년 이후부터 수급이 차츰 균형을 되찾다가 2025년 이후부터는 수요부족이 있을 것으로 예상된다. 2040년까지 아시아 지역의 LNG 수요 증가분이 전체의 74%를 차지하며 타 지역의 수요 증가분을 훨씬 상회할 것으로 전망하고 있다.

**표 20. 전세계 LNG 수요 전망**

(단위 : 천연가스 10억㎥)

| 구분 | 2001 | 2002 | 2010 | 2015 | 2020 |
|---|---|---|---|---|---|
| 전세계 LNG 수요 | 143 | 150 | 245 ~ 320 | 298 ~ 428 | 363 ~ 521 |
| 아시아 태평양 LNG 수요 | 102 | 104 | 136 ~ 184 | 165 ~ 246 | 201 ~ 300 |
| 대서양지역 수요(잔여분) | 41 | 44 | 109 ~ 136 | 133 ~ 182 | 161 ~ 221 |
| 아 ~ 태 지역 수요 증가 | - | +2 | +34 ~ +82 | +29 ~ +82 | +36 ~ +53 |
| 대서양 지역 수요 증가 | - | +3 | +68~+95 | +24~+46 | +29 ~ +39 |

LNG 수요 증가 요인은 다음과 같다.

㉮ 가격요인

- 2011년 후쿠시마(일본) 원전사태로 인하여, 원자력 대체재로 LNG 사용
- 기술의 발달과 첨단장비의 출현으로 가스의 탐사·발견 비용이 계속 감소
- 가스전에서 생산된 가스를 플랜트까지 수송하는 해저배관망 건설비용 하락

- 트레인당 생산능력 증가를 통한 규모경제 실현
- LNG수송선의 대형화 및 수송선 건조회사들의 경쟁으로 건조비용 하락
- 전 세계적인 저금리 추세로 금융비용 감소
- 기술발달과 액화설비의 표준화로 LNG프로젝트 완공기간 단축
- 온화한 기후와 공급과다로 인해 천연가스 가격 지속 하락

㉯ 비가격 요인

전 세계의 전체 국민소득이 증가하게 되면서 사용이 간편한 연료인 천연가스에 대한 선호도, 즉 편리성의 상대가치가 증가할 것이라는 점과 현재 지구온난화 방지를 위한 기후변화협약의 추진으로 직접적인 환경규제가 강화될 것이라는 점이다.

㉰ 전세계 LNG플랜트 수요전망

온실가스 감축을 위한 대체에너지원으로 천연가스 수요는 지속 증가할 전망이며 특히 산업 및 발전부문이 수요를 주도할 것으로 예상된다. 세계 석유 메이저들은 LNG 수요 증가에 대비해 대책 마련에 나서고 있으며, 그림 XX에 도시한 바와 같이 2040년 LNG 수요가 650-750mmtpa까지 증가할 것으로 예상되며 천연가스 전체에서 차지하는 비중도 10%대에서 40%로 높아질 전망이다. 대형 프로젝트 EPC 비용 기준을 대략 $1,000 ~ 1,100/TPA으로 하여 LNG플랜트의 건설 수요 투자비용을 분석해보면, 2040년 연간 10조원에서 15조원 수준으로 예측된다 (물가상승률은 고려하지 않음).

**표 21. 천연가스 액화플랜트 소요 자재/설비 수요현황 및 예측**

(단위 : 억원)

| 천연가스 액화플랜트 소요 자재/설비 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2010 |
|---|---|---|---|---|---|
| Actuators | 19 | 28.5 | 28.5 | 28.5 | 66.5 |
| Cold Boxes | 5415 | 5814 | 7039.5 | 9158 | 10,659 |
| Cryogenic system components | 2375 | 2403.5 | 2451 | 3486.5 | 3562.5 |
| Electric control units | 19 | 28.5 | 57 | 47 | 76 |
| Expanders | 6764 | 7505 | 7714 | 8550 | 11,400 |
| Fittings | 19 | 28.5 | 28.5 | 38 | 66.5 |
| Flanges and piping | 95 | 114 | 142.5 | 161.5 | 190 |
| Gauges | 38 | 47.5 | 38 | 57 | 76 |
| Heat exchangers/heat transfer technology | 12,949 | 13,205 | 13,471 | 15,039 | 19,285 |
| Hoses | 133 | 161.5 | 199.5 | 247 | 323 |
| Instrumentation | 199.5 | 218.5 | 237.5 | 256.5 | 332.5 |
| Insulation systems | 1330 | 1444 | 1558 | 2622 | 3249 |
| Metering/measurement systems | 38 | 47.5 | 47.5 | 57 | 123.5 |
| Pipe supports | 114 | 123.5 | 152 | 180.5 | 266 |
| Pressure vessels(Cryogenic) | 693.5 | 950 | 741 | 912 | 1330 |
| Pretreatment systems | 256.5 | 294.5 | 351.5 | 361 | 418 |
| Process components | 627 | 655.5 | 826.5 | 893 | 1178 |
| Refrigeration/Liquefaction systems | 6707 | 7505 | 7657 | 9405 | 11,438 |
| Safety equipment | 4845 | 5434 | 5700 | 6868.5 | 8645 |
| Sensors, detectors, monitoring systems | 123.5 | 142.5 | 133 | 152 | 209 |
| Solvents, lubricants and other chemicals | 104.5 | 114 | 123.5 | 152 | 190 |
| Tanks (field-erected storage) | 408.5 | 541.5 | 779 | 912 | 1168.5 |
| Tubes/tubing | 237.5 | 503.5 | 551 | 636.5 | 712.5 |
| Turbines | 4750 | 5054 | 5310.5 | 6849.5 | 8550 |
| Valves (Cryogenic)/Regulations | 133 | 142.5 | 152 | 180.5 | 218.5 |
| 합계 | 48,393.5 | 52,506.5 | 55,489.5 | 67,250.5 | 83,733 |



**(다) 국내 관련기술 및 시장 동향**

① 국내 기술동향

국내 LNG 관련 산업은 주로 해외에서 생산된 LNG를 도입하여 공급하는 구조로 천연가스 공급을 위한 인수터미널과 저장탱크, 공급망 건설로 국한되어져 있다. 국내의 LNG 플랜트 관련 기술개발 사례로 LNG 저장탱크 및 재기화 관련 분야를 제외한 천연가스 액화 공정과 이의 응용기술 분야에 대한 연구 실적은 전무한 실정이다. 국내 LNG 플랜트 관련 기술개발사례는 Value Chain 상에서 수송, 저장, 공급 분야에 국한되어 왔다. LNG 플랜트 분야의 국내 업체는 세계시장에 진입하기 위한 기술력 확보 및 검증된 실적이 필요하다.

㉮ 세부기술별 국내 주요업체 현황

| 세부기술 | 업체명 | 보유 기술 또는 특허 | 최고기술보유기관 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 저장탱크 건설 | 한국가스공사 | LNG탱크 기술 도입 및 기반확충 단계 | 한국가스공사 | |
| LNG플랜트 건설 | 국내 주요 건설사 | 보유기술 없음 | - | |

㉯ 세부기술별 국내 전문가 및 연구기관 현황

| 세부기술 | 전문가 | 소속기관 | 기술개발현황 | 해외의 최고 기술보유기관 | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|
| 설계기술 | 없음 | 국내 주요 건설사 | 유사 플랜트 상세설계 | 일본/Chiyoda | |
| | 없음 | 국내 주요 엔지니어링사 | 유사 플랜트 상세설계 | 일본/Chiyoda | |
| 시공기술 | 없음 | 국내 주요 건설사 | 유사 플랜트 시공 | 미국/Bechtel | |
| LNG 탱크 | | 한국가스공사 | LNG 탱크 기술 도입 및 국산화 | | |

㈐ 국내 기술개발 수준

한국가스공사를 중심으로 LNG 저장탱크 및 인수기지 등에 대한 연구개발이 되어 왔으며, LNG 플랜트의 핵심인 액화공정과 관련 응용기술 분야는 미진한 상태이다. 또한 국내 건설업체는 LNG 플랜트 실적을 위하여 시공 분야 등을 중심으로 수주를 하고 있는 실정으로 매우 미약하다.

LNG 생산 단계별 추진되는 현황은 다음과 같다.

- 전처리공정 : 국내의 EPC 업체에서는 다수의 프로젝트 경험을 보유하고 있으며, 생산된 가스의 수분을 Dehydration 공정으로 없애고 CO2, H2S 등의 불순물을 제거하는 공정으로 일반화된 기술(Open Technology)로 평가함.
- 액화공정 : 국내 업체는 천연가스 액화공정에 대한 원천기술과 응용설계기술에 관한 연구 실적이 없으며, EPC 프로젝트 수행 경험도 필요한 상황임 : 현재 산업자원부 주관 사업인 LNG 선박에서 발생하는 BOG(boil-off gas)의 재액화시스템 기술개발사업이 진행 중임.
- 저장탱크 : LNG 저장탱크의 경우에 시공 및 일부 상세 설계에 참여한 경험 및 이를 바탕으로 자체적인 기본설계 능력을 갖춘 국내업체도 있으나 아직 미흡한 수준임 : 대외적으로 이에 대한 객관적인 검증이 이루어지지 못하였거나 독립적인 설계 수행능력 부족으로 인하여 해외 시장 진출은 어려운 상황임.

LNG 저장탱크의 경우 특허를 가진 액화공정과는 달리 국제적 규격 및 코드에 따라 설계, 시공 및 안전성이 확보될 경우 원가 경쟁력을 갖추기만 한다면 약 50여기에 이르는 국내 LNG 저장탱크 시공경험을 갖춘 국내 업체들이 충분히 해외 EPC 턴키 시장에 진출 할 수 있는 기회를 창출 할 수 있다. 최근 들어 LNG 저장탱크 관련 핵심기술의 발전으로 인하여 저장탱크의 용량은 대형화 되어가는 추세이며, 이는 LNG 저장탱크의 용량을 증가시키는 것이 저장용량대비 상대적인 시공비용을 절감할 수 있는 방안으로 평가되고 있다.

플랜트산업을 가치사슬(value chain) 단계별로 선진국과 기술수준을 비교하면 우리 기업들은 상세설계와 시공분야에 경쟁력을 확보하고 있는 것으로 나타난다. 그러나 기획 및 기본설계, 시운전, 유지관리 분야에 있어서 수준차이가 크게 나타나고 있어 이 분야에 대한 기술경쟁력 확보가 필요하다. 선진업체의 경우, 고부가가치 분야인 기획, 기본설계 등에



대한 높은 기술수준을 보유하고 있다.

| 세부기술 | 현재 기술수준 | | | 기술개발 완료시 국내 기술수준 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 기술 수준 (%) | 기술 격차 (년) | 비고 | 기술 수준 (%) | 기술 격차 (년) | 비고 |
| 설계 기술 | 75 | 3년 | 성숙단계 | 90 | 1~2년 | 경쟁단계 |
| 시공 기술 | 75 | 3년 | 성숙단계 | 95 | 1년 | 경쟁단계 |
| 운전 및 유지관리 기술 | 75 | 3년 | 성숙단계 | 95 | 1년 | 경쟁단계 |

㈑ 국내연구 인프라 수준

| 기술분야 | 인프라 항목 | 선진국 대비 인프라 수준 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 부족 | 다소부족 | 동등 | 우월 | 보다우월 |
| 설계 기술 | 전문인력 보유정도 | | | ✓ | | |
| | 인프라 구축정도 | | ✓ | | | |
| | 지원 수준 | ✓ | | | | |
| EPC 표준화 | 연구인력 | | ✓ | | | |
| | 연구시설 | ✓ | | | | |
| | 지원수준 | ✓ | | | | |

② 국내 시장동향

㉮ 현황

- 해당사항 없음

㉯ 시장예측

- 해당사항 없음

(현재 수급 및 시장 현황을 볼 때 향후 LNG 관련 국내 시장 형성을 어려울 것으로 판단된다. 하지만 LNG 관련 플랜트 설계 및 건설 등에 관한 국내 기술력이 확보되었을 경우 해외 주요 산유국으로부터 가스 플랜트 용역 발주는 기대된다.)

## 라. 연구개발 결과가 관련분야에서 차지하는 위치

### (1) 연구개발의 중요성

#### (가) 기술적 측면

① 국내에 LNG 플랜트 분야의 가치사슬과 산업기반이 취약한 관계로 투자비가 큰 연구 개발 사업에 민간 주도의 추진과 사업화에 한계를 가지고 있다.

㉮ LNG 플랜트의 가치사슬(value chain)은 유전 탐사/개발 → 가스액화(초저온, 합성) → 수송 → 저장/보급 등으로 구성되나 우리나라는 현재 한국가스공사를 중심으로 '수입 저장과 보급' 분야만 관여하고 있는 실정이다.

㉯ 반면에 우리나라와 여건이 유사한 일본은 전략적으로 에너지확보/해외시장 진출을 위하여 Pilot/Demo. Plant 건설을 단계적으로 지원하고 있다.(JOGMEC 프로젝트를 통하여 약 67%를 정부지원)

② 국내의 LNG 플랜트 참여 형태는 대체로 전처리 및 시공분야가 주류를 이루고 있으며, 고도의 기술력과 경험을 요구하는 엔지니어링 분야의 타당성 조사, 기본설계를 포함하는 FEED와 전체 사업관리를 주도하는 PMC(Project Management Consultancy) 역무의 수주에는 많은 제약조건을 안고 있다.

③ 보수적인 LNG 플랜트 건설시장의 특성상 해당분야의 신뢰성 있는 기술의 보유 및 건설 경험 유무가 시장 진입의 중요한 요소이다.

㉮ 과거 정유·석유화학, 발전 분야 공정기술은 선진기업과의 기술 제휴·도입이 가능하였으나 대규모, 고부가가치 플랜트사업인 LNG, GTL분야의 경우에 선진기업의 기술이전 기피로 기술제휴·도입이 사실상 어려운 실정이다.

㉯ 우리의 여건에서 경쟁기술 개발을 통하여 선진사와 기술을 제휴, 해외사업 공동 진출을 위한 전략적 도구를 마련할 필요가 있다.

④ 기술제휴, 사업진출 등에 활용 가능한 전략적 도구 확보가 필요하다.

㉮ 공정데이터는 사업의 기획, 설계, 조달, 시공, 운영/유지 등 수행과정에서 필수적으로 요구되는 데이터이다.

㉯ 완성품으로 공정개발을 배제하더라고 기술체계상 공정데이터의 확보과정은 EPC 기술개발 과정에서 기본적으로 다룰 수밖에 없다.

㉰ 우리의 여건에서 경쟁기술 개발을 통하여 선진사와 기술을 제휴, 해외사업 공동 진출을 위한 전략적 도구로 활용할 필요가 있다.

⑤ LNG플랜트는 다양한 학제와 원천기술, 응용기술이 집적되어 있는 Complex로서 해외시장 진입을 위한 EPC 필수기술(핵심기반 +공정 + 설계 + 건설)의 개발을 위한 연구사업 추진이 필요하다.

**(나) 경제·산업적 측면**

① LNG 플랜트는 성장사업으로서 산업의 전후방 연관효과가 94% 이상이며, 건설사업 건당 사업비가 1 ~ 10억 달러 이상으로 외화 획득과 고부가가치 및 고용창출에 미치는 효과가 매우 크다.

㉮ 세계적으로 천연가스의 수요는 2030년까지 2002년 대비 약 2배 수준 증가할 것으로 전망된다.



㉯ 가스부문의 투자액은 향후 2030년까지 연평균 약 1000억 달러로 전망된다.

② 제2핵심과제의 공정기술과가 연계하여 효율적인 LNG 플랜트 설계 및 시공기술을 병행하여 확보할 필요가 있으며, 특히 테스트베드 실증을 기반으로 FEED (front end engineering and design) 능력과 해외시장에서 요구되는 EPC (engineering, procurement and construction) 능력을 확보하는 것이 시장진입 경쟁력 확보에 매우 중요하다.

③ 플랜트엔지니어링 분야에서 향후 예상되는 샌드위치 상황을 타개하기 위해서는 우리 기업이 플랜트 산업 초기부터 확보해 온 상세설계, 기자재 조달 및 건설 관련 역량과 전문 인적 자원을 활용하여 프로젝트 초기 단계에서 수행되는 FEED 수주를 통한 종합적인 엔지니어링 기술의 경쟁력 강화가 요구된다.

# 2. 연구개발 수행 내용 및 결과

## 가. 연구수행 전략 및 방법론

○ 국내 여건을 감안하여 국외 선진기관과 공동연구 추진

- 원천, 핵심기술에 대한 전략적인 공동연구 추진
- 개발기술을 기반으로 선진기업과 전략적 제휴방안 추진
- 선진기술개발체계/관련 지식 습득을 통한 독자 연구기반 마련

○ 새로운 아이디어와 우수한 기술의 접목을 통한 융·복합 특화기술 추진

- 각종 요소 및 시스템에 IT, 자동화 등 우수한 기술을 접목하여 특화 경쟁력을 가지는 융·복합기술을 개발

○ LNG 플랜트 사업수행에 중요한 핵심 가치사슬(Value Chain)에 연관된 기술을 중심으로 로드맵을 마련하고 사업전략과 연계하여 R&D로 추진

- 원천/일반/보유/중간진입/경쟁기술을 전략적 특화기술로 재분류하여 선택과 집중을 실천
- 기존 LNG 인프라 활용하고 위험회피전략으로 기술경쟁체계(실증기술 중심 + 특화/기반기술)를 도입

○ 성과목표를 구체적으로 제시하고 성과지표 달성을 증명할 수 있는 연구, 시험평가, 테스트베드와의 연계를 반드시 포함하여 추진

○ 실용화 및 사업화 성과를 구체적으로 명시하고, 테스트 베드와의 연계를 포함하여 추진하며 이를 위해 사업단 및 핵심1, 2주관기관과의 협조체계를 구축

### (1) 연구개발 추진체계

시장 ⇔ 가스플랜트 ⇔ 기술 ⇔ 기반 인프라 간의 연계성을 동시에 고려한 연구 추진 체계를 구성함으로써 연구 추진 방향과 전략의 연계성을 확보할 수 있다.

○ 본 과제의 핵심주관기관(핵심연구책임자)은 3핵심과제의 총괄 및 조정 역할 수행

○ 선도적 위치에 있는 해외 및 국내 주요 기관 및 전문가와 공동연구 추진

○ 타 핵심주관기관과의 협업을 통한 기술 개발 과제 연계성 확보 및 협조체계를 구축하여 추진할 것

#### (가) 추진방안

3-2과제의 연구개발 기간은 총 5년으로, 효과적인 기술개발과 성과관리를 위하여 단계별 2년씩 단계로 구분하여 진행한다. LNG 플랜트는 해외 지향적인 사업으로서 제2핵심과제의 공정기술을 기반으로 EPC 능력 확보가 관건이며, 이를 기반으로한 테스트베드의 실증은 필수적이다.

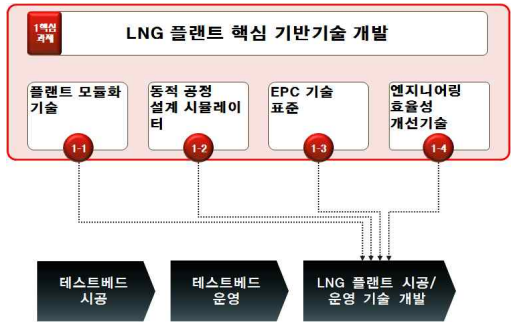
- LNG 플랜트사업 EPC 기술을 정의하고 전략기술과 중간진입기술을 구분하여 추진



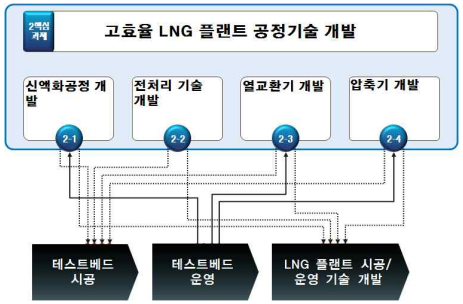
- 200톤/일(100톤/일 2기) 급 테스트베드 구축을 통하여 개발기술의 실증적 검증을 전제

당 과제는 1핵심의 기반기술, 2핵심의 공정기술, 3핵심의 설계기술을 바탕으로, LNG 플랜트 건설기술을 개발하는 과제로서, 실증적인 성격을 띄고 있다.

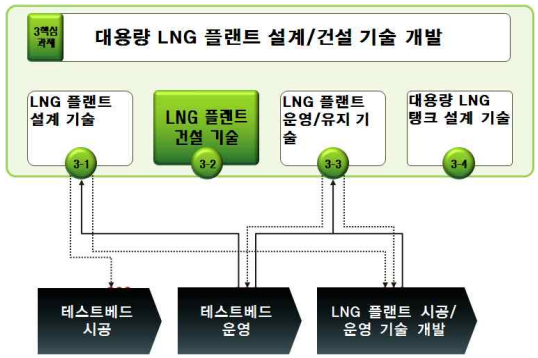
- 1핵심과제 : LNG 플랜트의 핵심 기반기술을 개발하는 과제로서 LNG플랜트 시공/운영 기술 개발과 밀접한 관계를 가지고 있다.




- 2핵심과제 : LNG플랜트의 주요 성과인 신액화공정 및 주요 기자재의 개발을 목표로 하고 있는 과제로서, 2-1과제에서 개발된 신액화공정은 3핵심의 1과제에서 설계를 완성하며, 이를 기반으로 당과제에서는 Train-2에 적용한다. 2-3, 4 과제에서는 LNG 플랜트 액화공정에서 가장 중요한 설비인 압축기와 열교환기를 개발하며, 당과제에서 이를 테스트베드에 적용하여, 그 내용을 Feed back 한다. 또한 2-2과제에서 개발된 전처리 기술은 향후 LNG 플랜트 시공/운영기술 개발에 적용된다.




- 3핵심과제 : 3-1과제에서는 LNG 플랜트의 상용공정 및 신액화공정을 설계한후, 당과제에서는 구매/건설의 진행 및 운영하여, 주요 내용들에 대해 Feed back 하여, 완성도 높은 설계를 진행한다. 3-3과제에서는 당과제의 테스트베드 운영기술을 기반으로 하여, LNG 플랜트 운영관리기술을 개발한다.




앞서 설정한 추진방향에 따라 제3-2의 구체적인 추진전략은 다음과 같다.

○ 테스트베드 시공을 통한 LNG플랜트 시공 & 운영 기술 확보

- LNG플랜트 설계기술 검증(2-1, 3-1)
- 선진 시공사례 검토를 통한 연구기반 마련
- 선진사례/우수사례 벤치마킹 (Chiyoda, JGC, KBR, TECHNIP 등)
- 2단계 시공기술 확보, 3단계 LNG 플랜트 실용기술 확보

○ 해외전문가 그룹의 예상 역할과 자문의 범위 및 내용

- 기초 기반 기술의 결과에 대한 검증과 이의 설계 활용을 위한 검토
- 상업적으로 획득이 가능한 기존 공정 검토 및 개발 방향 제시

○ 테스트베드 구축 및 활용

- 200 톤/일(100 톤/일 2기) 급 테스트베드 시공 및 운영
- 설계기술의 성능평가 및 보완
- 설계기술의 신뢰성 확보

○ LNG 플랜트 건설 기술 개발을 통한 EPC 수행능력 확보

- 건설 know-how 확보(공기단축/현장관리/운영기술)
- 건설 전문가 양성
- 필요인력, 건설소요시간
- 현장관리 전문가 양성
- 안전관리 전문가 양성
- 액화공정 담당공무 전문가 양성
- 국내 최초 액화공정 운영 전문가 양성



**(나) 기술혁신 방안**

목표 지향적이고 성공 가능성을 높이기 위하여 가스플랜트 Value Chain에 직접 관련된 기술을 선정하며 목표달성에 영향을 미치는 중심기술을 도출하는 연구 전략을 추진하며 또한 해외의 선진 기술을 습득하기 위하여 Benchmarking, Commissioned Engineering, Reverse Engineering 등의 기술 혁신 방안을 모색하여 연구 수행을 한다.

| 방안 | 전략 및 방법 |
|---|---|
| 과제 추진에서의 기술 혁신 방안 | -선진 연구사례 Benchmark 심화<br>-관련 사업간 정보 교류 시스템 구축<br>-국내외 연구기관 및 간행물 활용<br>-철저한 시장조사/사업성 분석<br>-국제컨퍼런스(GasTech. LNG 17, WEC 등) 교류<br>-분야별 전문가 그룹 의견수렴 |
| 과제 수행에서의 생산성 극대화 | -타 사업과의 결과 교류를 통한 활용 극대화<br>-기 개발 솔루션 및 신기술 개방 동향 활용<br>-상시 평가 및 Feedback 체제 유지<br>-요소기술별 전문업체 아웃소싱 추진<br>-협회 보유자원 최대한 활용 |

**(다) 진도 및 성과관리방안**

당 과제는 연구과제로서의 성격도 있으나, 주요 내용이 테스트베드 건설 및 운영 등의 사업적인 부분이 큰 부분을 차지하므로 기존의 연구관리 시스템과 병행하여 협동기관에서 사용하고 있는 프로젝트 관리 시스템을 이용하여 과제의 진도 및 성과를 관리할 예정이다.

| | 협동기관 시스템 | 사업단 시스템 |
|---|---|---|
| 프로젝트 관리(테스트베드 건설 및 운영) | TPMS | LNG Plant EPC System |
| 연구관리 | TIMS | LNG Plant 연구관리 시스템 |
| Schedule 관리 | Premavera | |

## 나. 연구수행과정 및 내용

### (1) 연구 수행과정

#### (가) 일정




#### (나) 테스트베드 주요 진행 내용

○ 2010.07 : 테스트베드 건설지 협약체결(한국가스공사)

○ 2010.10 : 테스트베드 건설기관 선정(GS건설)

○ 2011.05 : LNG 액화플랜트 테스트베드 착공식

○ 2011.09 : 테스트베드 Train-1 공사(토목・기계・배관・전기・계장) 착공

○ 2013.01~05 : 테스트베드 Train-1, 1차 시운전

※ 압축기 가동축 결함으로 시운전 정지

○ 2013.04 : 테스트베드 Train-2 공사 착공

○ 2014.01~03 : 테스트베드 Train-1 2차 시운전

○ 2014.06 : 테스트베드 Train-2 공사 완료 (냉매압축기 제외)

○ 2016.04 : 테스트베드 변경구축 추진(2016.4.1~2017.12.17)

○ 2017.10 : 테스트베드 Train-2 공사 완료

○ 2017.11 : 테스트베드 Train-2, 1차 시운전

※ 인천기지본부 소각탑 민원으로 정지 (사업단 기간 2018.12까지 1년 연기)

○ 2018.10~2018.12 : 테스트베드 Train-2, 2차 시운전



※ 주열교환기 제작결함 발견으로 정지(사업단 기간 2020.06까지 1.5년 연기)

○ 2020.04 : 코로나-19 로 시험운전 6개월 연기(사업단 기간 2020.12까지 6개월 연기)

○ 2020.07.01. : 주열교환기 교체

○ 2020.09.01. : 테스트베드 Train-2, 3차 시운전 시작(NG 투입)

○ 2020.10.09.~2020.10.12 : LNG 100t/d, 72 hr 시험운전 완료

### (2) 연구 수행 내용

| 단계 | 년차 | 연구내용 | 연구범위 |
|---|---|---|---|
| 2 | 3 | 테스트베드 부지조사 | ● 토질조사보고서 검토 |
| | | 테스트베드 건설준비 | ● 설계내용 검토<br>● 테스트베드 제조시설 인허가 승인<br>● 테스트베드 건설 Schedule 작성<br>● Temporary Facility 준비<br>● Site Development<br>● Site Mobilization<br>● 건축물 소방 승인, 인허가 기관 승인 |
| | 4 | 테스트베드 구성 기자재 구매/제작 (Train-1) | ● Long Lead Item 구매/제작<br>-압축기 RQ 검토, 견적, 구매<br>-열교환기(MCHE) RQ 검토, 견적, 구매<br>● Equipment 구매/제작<br>(Column/Vessel, 열교환기, Air Cooler, Electric Heater, Pump, 기타)<br>● 철골 구매/제작<br>● 배관 재료 구매/제작<br>● 계장 구매/제작<br>(DCS, Control Valve / Safety Valve, Analyser, 계장 Cable Tray / Cable)<br>● 전기 구매/제작<br>(Substation Equipment, 전기 Cable Tray / Cable) |
| | | 테스트베드 시공 (Train-1) | ● 파일 시공<br>● 콘크리트 시공<br>● 철골 구조물 시공<br>● 건물 시공 (Substation/Control Room)<br>● Equipment Erection<br>● 배관 공사<br>● 계장 공사<br>● 전기 공사<br>● 보냉/페인팅/소방 |
| | | 테스트베드 구성 기자재 구매/제작 (Train-2) | ● Long Lead Item 구매/제작<br>-압축기 성능 검토 및 적용 (2-3과제)<br>-열교환기(MCHE) 성능 검토 및 적용(2-4과제) |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 3 | 5 | 테스트베드 구성 기자재 구매/제작 (Train-1) | ● Long Lead Item 구매/제작 마무리<br>- 일부 납품 지연 기자재 |
| | | 테스트베드 시공 (Train-1) | ● 철골 구조물 시공마무리<br>● Equipment Erection 마무리<br>● 배관 공사<br>● 계장 공사<br>● 전기 공사<br>● 보냉/페인팅/소방 |
| | | 테스트베드 구성 기자재 구매/제작 (Train-2) | ● Long Lead Item 구매/제작 마무리<br>-압축기 RQ 검토, 견적, 구매<br>-열교환기(MCHE) RQ 검토, 견적, 구매<br>● Equipment 구매/제작<br>(Column/Vessel, 열교환기, Air Cooler, Electric Heater, Pump, 기타)<br>● 철골 구매/제작<br>● 배관 재료 구매/제작<br>● 계장 구매/제작<br>(DCS, Control Valve / Safety Valve, Analyser, 계장 Cable Tray / Cable)<br>● 전기 구매/제작<br>(Substation Equipment, 전기 Cable Tray / Cable) |
| | | 테스트베드 시공 (Train-2) | ● 파일 시공<br>● 콘크리트 시공<br>● 철골 구조물 시공<br>● 건물 시공 (Substation/Control Room)<br>● Equipment Erection<br>● 배관 공사<br>● 계장 공사<br>● 전기 공사<br>● 보냉/페인팅/소방 |
| | | 테스트베드 시운전 (Train-1) | ● 단동테스트<br>● 장치 가압테스트<br>● 장치 수압테스트<br>● 시운전<br>● Start-up/Shut-down 절차 확립/매뉴얼 작성 |
| | | 테스트베드 운영유지관리/평가 (Train-1) | ● Train-1 정상운전<br>● 조건별 운전 효율 평가<br>● 테스트베드 운전 매뉴얼 작성<br>● 테스트베드 통합운전환경 구축<br>● 테스트베드 유지보수 관리시스템 구축 |
| | | LNG플랜트 시험/평가 표준구축 및 인증체계 개발 | ● LNG플랜트 주요설비 안전성평가기준 마련<br>- 국내자료 수집 및 검토 |



| | | | |
|---|---|---|---|
| | 6 | 테스트베드 시운전 (Train-2) | ● 단동테스트<br>● 장치 가압테스트<br>● 장치 수압테스트<br>● 시운전<br>● Start-up/Shut-down 절차 확립/매뉴얼 작성 |
| | | 테스트베드 운영유지관리/평가 (Train-2) | ● Train-2 정상운전<br>● 조건별 운전 효율 평가<br>● 테스트베드 운전 매뉴얼 작성<br>● 테스트베드 통합운전환경 구축<br>● 테스트베드 유지보수 관리시스템 구축 |
| | | LNG플랜트 시험/평가 표준구축 및 인증체계 개발 | ● LNG플랜트 주요설비 안전성평가기준 마련<br>- 주요설비별 안전성 평가기준 마련 |

## 다. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법

**(1) 연구수행 결과**

**(가) Test Bed Train-1**

- Test Bed 건설 준비
- Test Bed Train-1 기자재 구매
- Test Bed Train-1 공사
- Test Bed Train-1 시운전 및 평가

**(나) Test Bed Train-2**

- Test Bed Train-2 기자재 구매
- Test Bed Train-2 공사

**(다) LNG 플랜트 최적통합운전환경 기술개발**

- LNG 플랜트 생산 현장에서 발생하는 운전 데이터를 실시간으로 수집 분석, 공유함으로써 분석 및 비상대응능력 향상
- Test Bed Train-1 성능시험을 통해 성능 검증 및 문제점 보완 완료

**(라) 웹기반 LNG 플랜트 유지/보수관리시스템 기술개발**

- 테스트베드에 적용된 설계정보 및 각종 도면 등 운전 시 필요한 Data 제공
- 유지 보수에 필요한 Spec. 기자재 발주서 등의 Data 제공 및 유지보수 이력 관리

**(마) 시험/평가기준 및 인증체계**

- LNG플랜트 관련 국내 자료 수집 및 검토 완료
- LNG플랜트 설비 안전성 검토 완료
- LNG플랜트 주요설비 안전성 평가 기준 확립

**(2) 검증 방법**

| 연구목표 | 성과목표 | 성과지표 | 목표치 | 측정방법 | 검증방법 |
|---|---|---|---|---|---|
| LNG플랜트 테스트베드 건설 및 운영 | 1) 상용 공정 테스트베드 건설 및 운전 완료 | ① 기자재 구매 | 테스트베드 기자재 구매 | 1.테스트베드적용여부<br>2.기자재국산화율 | 1.기자재납기확인<br>2.기자재국산화율 |
| | | ② 테스트베드 건설 | 테스트베드 1기 | 1.관련허가획득<br>2.완공 | 1.기술검토서승인<br>2.완성검사수검 |
| | | ③ 정상 운전 | 정상운전 48시간 이상 | 테스트베드 운전 기록 확인 | 1.테스트베드운전기록검토<br>2.테스트베드생상량확인 |
| | 2) 신액화공정 테스트베드 건설 및 운전 완료 | ① 기자재 구매 | 테스트베드 기자재 구매 | 1.테스트베드적용여부<br>2.기자재국산화율 | 1.기자재납기확인<br>2.기자재국산화율 |
| | | ② 테스트베드 건설 | 테스트베드 1기 | 1.관련허가획득<br>2.완공 | 1.기술검토서승인<br>2.완성검사수검 |
| | | ③ 정상 운전 | 정상운전 48시간 이상 | 테스트베드 운전 기록 확인 | 1.테스트베드운전기록검토<br>2.테스트베드생상량확인 |
| | 3) LNG플랜트 운영 및 관리시스템 개발 | ① 테스트베드 통합 운전 시스템 | 테스트베드 통합운전 시스템 1기 | 1. 테스트베드 시운전 적용 | 1.정상작동여부<br>2.운전기록분석 |
| | | ② 테스트베드 유지보수 시스템 | 테스트베드 유지보수 시스템 1기 | 1. 정상 여부 확인 | 1.정상작동여부<br>2.저장데이터확인 |
| | | ③ LNG플랜트 KGS-code 및 주요설비 안전성 평가기준 | LNG플랜트 관련법 개정 3건 이상 | 1. 관보고시 여부 | 1.KGS관보확인<br>2.테스트베드인허가획득 |



# 다. 테스트베드 건설 준비

**(1) 테스트베드 부지 조사**

- 테스트베드 후보지에 대한 설계담당자들의 설계 관점에서의 부지 적정성 조사 및 검토 수행
- 상세설계를 진행하는 과정에서 담당 실무자간 협의를 통해 일부 설계를 변경할 경우 테스트베드 부지로서 적정함 결론

**(가) 테스트베드 후보지 위치**

○ 가스공사 LNG 인천기지 내 종합연구센터 부지(인천시 연수구 동춘동 981번지)

**(나) 테스트베드 후보지 기본 요구조건**

| 항목 | 요구조건 | 요구내용 |
|---|---|---|
| 기능 | 종합 연구기반 기능보유 | ▶ 공정개발, 설계/건설 성과에 대한 실증실험 및 실용화 기술과 핵심 국산화 기술에 대한 현장 연구 기능을 보유하거나 연구시설 조성계획이 있어야 함 |
| 원료가스 수급 | 원료가스 공급 용이성 | ▶ 테스트베드의 저비용, 효율적인 운전을 위한 원료가스인 LNG의 공급이 주변 여건에 영향을 받지 않고 원활하게 이뤄져야 함<br>▶ 테스트베드에 공급되는 원료가스의 적정압력 및 유량이 유지되어야 함 |
| 생산품 처리 | LNG 저장/처리 용이성 | ▶ 생산된 LNG의 효율적인 저장/ 처리가 가능해야 함 |
| 인허가 사항 | 건설시 인허가 취득 용이성 | ▶ 고압가스에 따른 건설관련 인허가 취득에 문제가 없어야 함 |
| 부지 크기 | 부지 규모 확보 | ▶ 최소 50X60m 공간이 확보되어야 함 |

**(다) 설계 분야별 후보지 검토 및 결과**

GS건설의 각 분야별 핵심 연구담당자들이 테스트베드 후보지를 방문하여 내용을 실무적인 측면에서 검토한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

① 공정 설계팀

○ 검토 사항

- 공정 관련 유체에 대한 필요사이즈에 대한 검토

| 유체종류 | 필요사이즈 | 가능사이즈 | 결과 |
|---|---|---|---|
| Feed gas | 4″ | 3″ | 3″ 가능여부 검토 필요 |
| LNG | 11/2“ | > 11/2″ | 활용 가능함 |
| BOG | 4″ | 8″ | 활용 가능함 |
| Flare | 6″ | 8″ | 활용 가능함 |
| N2 | 2″ | 3″ | 활용 가능함 |
| Instrument Air | 3″ | 2″ | IA Consumption 재산정하여 2“ 가능여부 재확인 예정 |
| Plant Air | 2″ | 2″ | 활용 가능함 |
| FG | 2″ | 2″ | 활용 가능함 |
| Industrial Water | 6″ | 2″ | Cooling Tower로의 Initial Make-up 기간이 길어짐 |
| Potable Water | 3″ | 2″ | Eye Shower 1기 기동기준인 경우 OK |
| Steam | 3″ | 3″ | 활용 가능함 |
| Cond. | 1″ | 1″ | 활용 가능함 |

Note) 1) 각 필요사이즈는 One Train 공급기준임
2) Cooling Water는 Cooling Tower설치하여 자체공급
3) GS Scope은 Test Bed B/L Connection Point부터임.
4) Steam은 normal operation시 필요한 양은 없으나 equipment steam purge에 공급 필요

○ 검토 결과

- N2 Removal Column에서 OVHD쪽 Flash gas stream(N2 35%, Oper. Press. : 0.4 barg, Oper. Temp. : -37℃, Flowrate : 650 kg/hr)은 가스수요가 적은 하절기에는 Flare로 연결하고 가스수요가 큰 동절기에는 BOG Header를 통해 회수할 수 있도록 설계요망
- 기존 Flare Stack의 Capa.는 100 Ton/hr 이상으로 Test Bed의 Flare Gas가 기존 Flare Stack으로 연결되어도 문제없음
- LNG Day Tank는 사용 가능하며, Test Bed에서의 생산되는 LNG를 약 5일 저장 가능
- LPG Separator Vent Gas(9.6 kg/hr, -32.8℃ 이하)를 BOG Header로 연결 가능함
- Utility Station 설치기준은 추후 검토가 필요하며, 공급 Utility 사이즈는 3/4″ IA, 3/4″ IW, 3/4″ N2, 3/4″ PA 사이즈로 사용 가능함.

② 계장 설계팀

○ 검토 사항

- 기존 DCS, ESD, F&G System 구성 및 Manufacturer 확인



- 기존 Control Room Operation Console Q'ty 및 배치 확인
- 기존 Rack Room Spare Space 및 확장 가능 여부 확인
- 기존 Main Cable Duct Spare Space 확인
- 기존 Main Cable Entry 위치 확인

○ 검토 결과

- LNG Test Bed용 System은 기존 System과 마찬가지로 DCS, ESD, F&G 등으로 구성될 예정이며, Maintenance Shutdown 등을 고려하여, 기본적으로 기존 System과는 별개의 독립된 System으로 운영되어야 함.
- LNG Test Bed용 Operation Console의 효율적인 운영을 위해서 기존 System의 Operation Console(총 5 Sets)의 위치 변경이 필요(180도 회전)
- 기존 Rack Room은 LNG Test Bed용 System Panel을 모두 수용하기에 Spare Space가 충분하지 않은 것으로 판단되며 확장이 필요. 확장에 필요한 공간은 확보할 수 있을 것임. 정확한 내용을 파악하려면 System I/O Set-up이 필요. 추후, P&ID 및 기타 Design의 진행후 실행
- 기존 Main Cable Duct는 LNG Test Bed용 Cable을 수용하기에 Spare Space가 충분하지 않음. 따라서, LNG Test Bed용 Main Cable Duct를 신규로 설치해야 함.
- 기존 Main Cable은 MCC Room을 통과하여 Rack Room으로 들어오게 되어있으며, 기존 Main Cable Entry를 확장해서 LNG Test Bed용 Main Cable Entry로 이용하는 것보다는 기존 Rack Room으로 직접 들어올 수 있는 Main Cable Entry를 신규로 만드는 것이 적절하다고 판단됨.

③ 전기 설계팀

○ 검토 사항

- 전력 공급을 위한 변전소
- Main Cable Route

○ 검토 결과

- 기존 Pilot Plant 운영을 위한 기존 변전소가 테스트후보지 가까운 곳에 위치하였으며 이곳에서 전력을 공급 받을 수 있으나, Panel 증설을 위한 공간이 부족하여 변전소를 확장이 요구됨. Plant 운전시 기존 Pilot Plant와 신설 테스트 베드를 개별운전 조건으로 전력공급이 가능함.
- 변전소에서 테스트 후보지까지 기존 Cable Tray가 설치되어 있으며 이곳에 추가로 Cable Tray를 설치하여 각 Motor까지 전력을 공급할 수 있음.

④ 배관 설계팀

○ 검토 사항

- Cooling Water System 위치 검토

- 전기, 계장 Cable의 인입 위치 확인
- 나머지 Battery Limit의 Exist Pipe Line Connection Point 검토

○ 검토 결과

- Cooling Water System는 Air Receiver Tank 주변에 설치 가능
- 전기, 계장 Cable의 인입은 Main Pipe Rack 서쪽으로, Elevation은 Ground + 5,000 로 가능
- Exist Pipe Line Connection Point는 남쪽에서 연결 가능
- 추후 검토해야 할 사항들

 * 기존 인접시설과의 최소 이격거리 검토 필요

 * Train-2의 소요부지 크기 검토 필요

- Train-1의 각종 Equipment Outline 등의 변경에 따른 Plot 변경 검토 필요
- Process Requirement에 따른 Plot 추가 검토

⑤ 기계 설계팀

○ 검토 사항

- Compressor와 같이 control system이 필요한 기기의 경우, Vendor가 PLC panel을 공급할지, 아니면 Control building내의 DCS에서 모든 control을 할 지 확인함.

○ 검토 결과

- 부지크기는 물론, 배관이나 기타 equipment도 고려가 되어야겠지만 기계 equipment의 전체 치수를 고려했을 때, 적합한 것으로 판단됨.

⑥ 토건 설계팀

○ 검토 사항

- 한국가스공사로부터 접수한 지질 조사보고서는 기존 LNG TANK(1,000m$^3$) Foundation을 설치하기 위한 지질조사 보고서로서 이번 LNG Test Bed 예정 부지에 대한 지질보고서는 아니지만, LNG Test Bed 예정 부지가 인접 지역에 위치하고 있어 이를 기반으로 검토.

○ 검토 결과

- 지질 조사 보고서 검토 결과 : 지질 조사 보고서에 의하면 Clay층이 15m~20m 깊이에서 형성된 것을 제외하고는 지반이 양호한 상태로 판단함. 또한 Clay층이 두껍지 않고 Foundation이 설치되는 Depth와 충분한 간격이 존재하여 압밀 침하가 크지 않을 것으로 예상함. 따라서 Compressor Foundation, Main Structure 용 Foundation 에는 Pile 기초를 적용하고, 기타 equipment foundation에는 Non-Pile 기초가 가능할 것으로 판단함. Pile 기초는 선단 지지층으로 예상되는 기반암층이 51m 이하 깊이에 위치해 선단지지 Pile로는 설계하지 않고 마찰 말뚝으로 설계를 진행하고자 함. 그러기 위해서는 Detail한 지질조사가 요구되며, 또는 기존 설계



자료가 필요함.

- 지하수의 영향 : 기존 LNG TANK(1,000m$^3$) Foundation 위치에서 조사한 지하수위 LEVEL은 Ground Level 로부터 8.4m 이하에서 지하수위가 측정되었으며, 직접 기초를 위한 터파기 시 지하수로 인한 작업의 어려움은 없을 것으로 판단함.
- 예정 부지 내 기존 U/G(Underground) Line LNG Test Bed 예정 부지 내 U/G Line 에 대한 자료는 현재 입수 되지 않았으며 추후 이에 대한 조사나 자료 수집이 필요할 것으로 판단됨.
- 기존 C/R(Control Room) 확장 : 기존 C/R 건물에 LNG Test Bed용 System Panel 설치를 위한 Room 확장 시 계획된 확장 AREA 내에 요구되어지는 전기 및 계장 Panel들을 모두 수용 가능한 지에 대한 여부는 유관부서(전기팀, 계장팀)의 확인이 필요할 것으로 보이며, 기존 C/R 건물의 구조상, 건물 확장 시 구조적으로 어려움은 없을 것으로 판단됨. 아울러 설계/공사 Scope에 대해 가스공사와 협의 후 확정 필요함.

**(라) 최종 평가 결과**

현재 Train-1에 대한 상세 설계가 진행되고 있는 상황에서 테스트베드의 후보지에 대한 설계 관점에서의 조사 및 검토를 진행하였다. 짧은 시간 내에 조사를 진행하여 자세한 검토가 이뤄지지는 않았지만 설계 담당자들의 설계적인 측면을 고려한 전체적인 의견은 다음과 같이 후보지가 테스트베드를 설치하는데 적합하다는 의견이다.

| 설계 분야 | 분야별 최종 평가 내용 |
|---|---|
| 공정 | 공정 유체관련 사항에 대한 검토결과 대부분 설계 기준치를 만족하고 있어 테스트베드 부지로 사용하기 적합한 것으로 판단됨. |
| 계장 | 테스트베드 부지로 적합한 것으로 판단되나, 계기실내 계장판넬 추가에 필요한 공간 이 부족하여 이에 대한 확장이 필요함. |
| 전기 | 전기 설비는 검토에 따라 기존 변전소에서 전기를 공급하여 테스트베드 부지로 적합하나, 기존 전기실 내 공간이 부족하여 판넬 증설을 위해 전기실 확장이 필요함. |
| 배관 | 배관 및 유틸리티 시설이 테스트베드와 연결이 가능하여 테스트베드부지로 적합 것으로 판단됨 |
| 기계 | 기기 설치를 고려했을 때 충분한 공간이며, 기타 주변 환경도 기기 설치 및 운전에 적합하여 테스트베드 부지로 적합한 것으로 판단됨 |
| 토건 | 테스트베드 부지로 적합한 것으로 판단되나, 전기시설 내 전기 및 계장 판넬 수용을 위한 공간확장이 필요함 |

조사과정에서 확인되지 않은 사항들에 대해서는 상세설계를 진행하는 과정에서 후보지 담당실무자들과 협의를 통하여 실제 상황에 맞게 일부 설계를 변경할 경우 무리없이 적용이 가능할 것으로 예상된다. 따라서 인천기지 내 후보지에 대한 설계 담당자들의 측면에서 적합한 것으로 최종 판단된다.

### (2) 테스트베드 지반조사

- Test Bed 건설을 위한 지반 조사를 실시하여 경제성, 안전성을 고려한 기초 설계를 목적으로 함
- 모든 지층이 수평적으로 연속성이 있으며, 퇴적층의 두께가 약 47.0m로 매우 깊게 분포
- 허용 지지력을 초과하는 Equipment, Structure, Compressor에는 Pile을 적용하고 나머지 기초에 대해서는 얕은기초를 적용함

#### (가) 조사 목적

본 과업은 LNG Plant 설계기술개발 Project 부지에 대한 지반조사를 통해 대상부지의 전체적인 성층상태와 각 지층의 물리적, 공학적 특성을 파악하여 각종 계획 시설물 기초의 설계 및 안전성 검토(예상 침하량 산정, 허용 지지력 등)에 필요한 기본자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

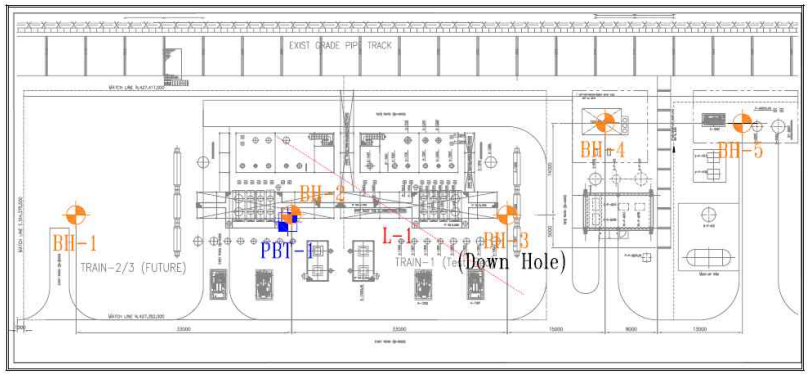
#### (나) 조사 위치

이러한 목적을 위하여 총 5개소의 시추조사가 수행되었으며 조사지역의 위치는 인천 연수구 송도동 한국가스공사 인천생산기지 내에 위치하였다.

<시추공 좌표 및 지반고>

| 시추공번 | 시추공 좌표 | | 지반고 (EL +m) | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| | N | E | | |
| BH-1 | 427,398 | 164,383 | 현지반고 | |
| BH-2 | 427,398 | 164,417 | 현지반고 | |
| BH-3 | 427,398 | 164,450 | 현지반고 | |
| BH-4 | 427,412 | 164,465 | 현지반고 | |
| BH-5 | 427,412 | 164,486 | 현지반고 | |

<조사위치 평면도>






#### (다) 조사내용

본 조사는 시험부지를 대상으로 시추조사, 현장시험을 실시하고 현장에서 채취된 시료를 대상으로 실내시험을 실시하였다. 금회 조사에서 시행된 조사내용을 요약하면 다음과 같다.

| 구 분 | 조 사 공 종 | 시 행 횟 수 | 비 고 |
|---|---|---|---|
| 시추조사 | 지 반 시 추 (NX) | 5 공 | |
| 현장시험 | 표 준 관 입 시 험 | 206 회 | |
| | 다 운 홀 탐 사 | 1 개소 | |
| | 전 기 비 저 항 | 1 개소 | |
| | 평 판 재 하 시 험 | 1 개소 | |
| 실내토질시험 | 함 수 비 | 7 회 | |
| | 비 중 | 7 회 | |
| | 액 성 한 계 | 7 회 | |
| | 소 성 한 계 | 7 회 | |
| | 체 분 석 | 7 회 | |
| | 입 도 | 7 회 | |
| | 압 밀 | 2 회 | |

#### (라) 조사 결과

본 조사 부지는 대용량 LNG Plant 구조물이 계획되어 있으나 구체적인 구조물의 하중이나 설계 기준(예를 들어 허용 침하량) 등이 주어지지 않은 상태이므로 현재 상태에서의 지반의 지지력을 산정하고 이를 토대로 직접 기초 및 말뚝 기초의 예상 지지층을 추정하였다.

본 검토에서 적용된 지지력 식의 산정 조건이 실제 설계 조건을 만족하고 산정된 허용 지지력이 구조물의 하중을 지지하는데 충분하다면 직접기초로 설계하는 것이 가장 경제적이고 효율적인 방법이지만 지반이 연약하거나 하중이 큰 구조물 또는 중요한 구조물일 경우 말뚝 기초를 고려하는 것이 바람직하다.

### (3) 테스트베드 설계 검토 및 현장 설명회

- 테스트베드 건설을 위한 설계 검토, 공사 일정 작성, BM 작성 및 Specification 작성 등을 진행함.
- 공사업체를 대상으로 토목/기계/배관/소방 및 전기/계장 관련 현장 설명회를 개최함

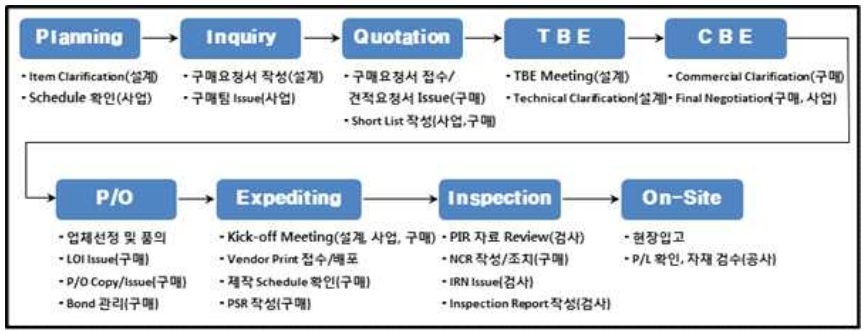
## 라. Test Bed Train-1 기자재 구매

### (1) 연구 목적

- LNG플랜트 상용공정(C3/MR, 프로판 혼합냉매공정)에 적합한 기자재 구매
- 액화공정에 필요한 초저온 계기류 등에 대한 국산화율 제고

### (2) 연구 내용

- 연구기관 사내 Procedure에 따른 구매 업무(GS건설 플랜트 구매 시스템)




#. 구매 Procedure

- Technical Bid Evaluation Meeting 진행 (Short List Vendor 대상)
- Vendor Print 검토
- 기자재 제작 검사 시행

### (3) 연구 결과

○ 총 24종 품목 구매

- 기계 : 9종, 계장 : 13종, 전기 : 2종
- 국산화율 : 약 78% (구매비용 기준, Bulk성 기자재 제외)

| Item | | Vendor | Country |
|---|---|---|---|
| 기계 | Centrifugal Compressor | Samsung Techwin | Korea |
| | Centrifugal Pump | Hyosung Goodsprings | Korea |
| | Proportioning Pump | LEWA PTE | Germany |
| | Cooling Tower | Kiturami-Bumyang | Korea |
| | Vessel & Heat Exchanger | DKT | Korea |
| | Aluminium Brazed Heat Exchanger | Fives Cryo | France |
| | Electric Heater | Watlow Korea | USA |
| | Air Cooled Heat Exchanger | Dongwha Entec | Korea |
| | Column Internal | GTC | USA |
| 계장 | DCS | Yokogawa Electric Korea | Japan |
| | SIS | Yokogawa Electric Korea | Japan |
| | Flow Element | Wise Tech | Korea |
| | Flowmeter (Rotameter) | Krohne Korea | Germany |
| | Level Gauge | Wise Tech | Korea |
| | PT and DP Transmitter | KIE Systems | USA |
| | PG and TG(Pressure & Temperature Gauge) | Wise Tech | Korea |
| | Temperature Element & Transmitter | Wise Tech | Korea |
| | Control Valve | KIE Systems | Korea |
| | Pressure Safety & Relief Valve | KIE Systems | Korea |
| | Analyzer | KIE Systems | Germany |
| | Gas Detector | Wise Tech | Korea |
| | CCTV | KIE Systems | Korea |
| 전기 | Switchgear & MCC | Woojin Electric Machine | Korea |
| | AC UPS | Maxcom | Korea |

#. 주요 구매 Item

○ 총 25종 품목 검사

- 기계 : 9종, 계장 : 14종, 전기 : 2종
- 검사 품목 전량 IRN(검사 합격) 발행 완료(불합격 기자재(NCR Issue) 없음)
- 해당 검사 품목에 대한 검사관 검사보고서 작성/제출(기계 : 51건, 계장 : 18건, 전기 : 2건)

○ 특이사항

- 삼성테크윈 연구개발 압축기(C3/MR) 적용 → Test Bed 사양의 Compressor 구매 불가, 삼성테크윈에서 개발하여 납품
- Fives Cryogenic사 MCHE 적용 → Plate-fin type MCHE 국내 수급 불가(추후 Train-2에서 국산화)

## 마. Test Bed Train-1 공사

○ 목적:

- 상용 액화공정 건설 기술 습득
- 선진사 공정을 적용한 국내 액화 공정 관련 Test 시설 확보

○ 적용공정 : APCI Process(프로판 혼합냉매공정)

○ 설비규모 : 일산 100톤급 액화설비

○ FEED / 설계 : GS건설(3-1-1과제)

○ 주요 건설 설비

- 공용설비: Intake Facility, LNG Flash, Refrigerant Storage, Control Room
- Train-1 설비: Fractionation, Refrigeration

○ 고압가스 제조허가 : 2011. 3.

○ 착공 : 2011. 5.

○ 완공 : 2013. 2.


















## 바. Test Bed Train-1 시운전 및 평가

### (1) General

○ 3-1과제에서 상용기술인 프로판 혼합냉매 공정을 기반으로 Train-1을 설계하였으며, 이를 기반으로 본 과제에서 기자재의 구매와 건설을 진행하였다.

○ 이렇게 완성된 테스트베드 Train-1의 시험운전을 수행하였고, 이에 대한 결과를 기술하였다.

### (2) Executive Summary

○ 분석 시점은 운전이 안정화된 상태에서 LNG 생산량이 100 ton/day이상으로서 Cold Box Outlet 기준 -140℃ 이하의 온도를 유지한 3일(2014년3월 6일 0시에서 2014년 3월8일 24시)동안 Test 현황을 바탕으로 작성함.

○ Test 결과, LNG 생산량에 대해서 MCHE Outlet 기준 -140℃ 이하의 LNG를 100 ton/day 이상 생산하는데 성공함. LNG의 온도는 실제로 Pilot Tank 쪽의 Inlet Stream Point에서 LNG 생산모드 운전시 약 -157℃ 정도로 유지되고 있었고, BOG는 소량 발생됨. 또한, LNG의 Quality 측면에서 보았을 때는 Design Basis상에 나타난 HHV를 도달하였음을 확인할 수 있었음.

○ MR Refrigerant Circuit에서는 MCHE Warm Section 에서 MRL의 Liquid를 많이 사용하게 되어 V-1304 MR liquid level이 일정 이상 생성되지 않음. 즉, LNG Stream과 별도로 MR Circuit Stream의 운전에서 MCHE Cold Section에서 Hydrate생성으로 추정되는 현상이 발견되었음. 본 문서에서는 Test 결과 및 상기 사항에 대한 분석을 위해 Steady 및 Dynamic Simulation을 실시하여 판단해 보았음.

○ Steady Simulation에서는 Cold Section 쪽으로의 흐름이 저해되어 Mixed Refrigerant의 Flow에 있어 MRV 및 MRL 의 유량 및 조성이 실제로 어떻게 되어 운전되었는가를 계산해 보았고, 이에 따른 Test 결과를 분석해 보았음. 또한, 3일간의 LNG 생산모드 운전에 포함되는 3월8일의 Test인 Point Case B를 Hydrate가 없을 경우로 Simulation해보았으며, 그 결과 설계조건과 유사한 결과를 얻을 수 있었음.

○ Dynamic Simulation에서는 Test의 주요 Parameter를 Test와 유사한 조건으로 Simulation했을 때 대체적으로 Test 결과를 그대로 반영하는 결론을 보여주었음. 즉, Hydrate 추정현상으로 인해 Cold Section 쪽으로의 흐름이 저해되어 MRL의 유량을 줄이지 못하는 경우 V-1304의 Level이 생성되지 못하는 내용을 그대로 반영하는 결과를 볼 수 있었고, 현 Test 조건에서 LNG 생산에 문제가 없었던 결과도 확인할 수 있었음. 또한, Hydrate가 없다고 가정할 경우 실제 MRL의 Level 형성되기 위한 운전을 모사하였고 실제로 Level이 쉽게 형성됨을 확인할 수 있었음.

### (3) Feedstock Analysis

**[MCHE Feed Gas Analyzing]**

○ Analyzer의 측정에 따르면 Test 기간 동안 MCHE로 공급되는 Feed Gas의 조성은 아래와

같은 이유로 인하여 설계값과 다소 차이를 보이고 있음.

→ HP N2의 미주입에 따른 N2 조성 감소

→ KOGAS 인수기지 공급의 Natural Gas의 조성 차이

| Description | Unit | Design FG Comp. @ BL | Design FG Comp. @ MCHE inlet | Actual FG Comp. @ AI-001 | Relevant online Analyzer Tag. |
|---|---|---|---|---|---|
| N2 | Mol % | 0.22 | 4.98 | 0.15 | AI-001A |
| C1 | Mol % | 91.33 | 87.07 | 91.5 | AI-001B |
| C2 | Mol % | 5.36 | 5.07 | 5.61 | AI-001C |
| C3 | Mol % | 2.14 | 1.97 | 1.63 | AI-001D |
| i-C4 / n-C4 | Mol % | 0.46/ 0.47 | 0.88 | 3.49 (C4) | AI-001E |
| i- C5 / n-C5 | Mol % | 0.01/ 0.01 | 0.02 | 0.009 (C5+) | AI-001F |

[KOGAS PK-311 Point Data]

○ 아래 조성은 KOGAS의 GC Daily Report 중 PK-311 Point로 이 값은 KOGAS 인수기지의 20개의 Tank 전체에 대한 Vaporized Gas의 측정치이나 본 Test Facility의 Feed Gas는 10개 Tank의 Header로 부터 공급되므로 다소 차이가 있을 수 있음. 따라서, 아래의 조성은 참고값으로만 활용하였음.

| Description | Unit | Analytical Method | 2월28일 ~ 3월12일 평균 | 3월8일 | Relevant online Analyzer Tag. |
|---|---|---|---|---|---|
| N2 | Mol % | Gas Chromatograph | 0.20 | 0.17 | AI-001A |
| C1 | Mol % | Gas Chromatograph | 92.12 | 92.19 | AI-001B |
| C2 | Mol % | Gas Chromatograph | 5.78 | 5.78 | AI-001C |
| C3 | Mol % | Gas Chromatograph | 1.34 | 1.32 | AI-001D |
| C4 | Mol % | Gas Chromatograph | 0.55 | 0.53 | AI-001E |
| C5 | Mol % | Gas Chromatograph | 0.01 | 0.01 | AI-001F |

○ 인수기지 PK-311의 GC 분석결과는 정확히 Test Bed Train-1으로 오는 Header의 Point는 아니나 어느 정도 Reasonable한 수치일 것으로 판단됨. 따라서 Analyzer 측정결과와 비교해 볼 때 Analyzer 측정값 중의 C4 조성은 Analyzer 계기의 오차가 다소 있는 것으로 추측됨.

→ Feed Gas의 Source가 Regasified LNG라는 점을 감안, 상기 Feed가 Liquefaction Unit의 Feed로 문제가 없을 것으로 판단됨.



(4) Performance Result

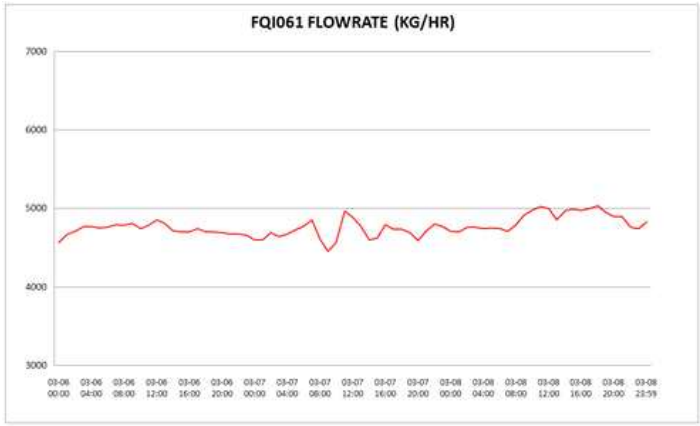
[LNG Product Quantity]

| Description | Unit | Design Figures | Design Figures without N2 Injection | Actual Figures | Relevant Tag |
|---|---|---|---|---|---|
| LNG Product | Kg/hr | 4936.5 | 4600 | 4773.9 | FIC-061 |

→ 100 Ton/day의 LNG Capacity = 4,167 kg/hr

→ LNG 생산량: 목표값 도달

→ 3/6~3/8 72 Hours Average 대체로 4.5 ton/hr이상 유지




[LNG Product Quality]

<LNG Specification>

| Description | Unit | Analytical Method | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| High Heating Value (HHV) | kcal/Nm$^3$ | Note. 1 | 9860<br>10980 (max) | Avg. 10,257.6 | NOTE. 2 |
| C1 | Mol % | Gas Chromatograph | 85 (min) | Avg. 90.43<br>Max. 91.15<br>Min. 87.72 | NOTE. 2 |
| C2 | Mol % | Gas Chromatograph | - | Avg. 6.05<br>Max. 7.94<br>Min. 5.61 | NOTE. 2 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| C3 | Mol % | Gas Chromatograph | - | Avg. 1.69<br>Max. 2.29<br>Min. 1.42 | NOTE. 2 |
| C4 + | Mol % | Gas Chromatograph | 1.75 max | Avg. 0.64<br>Max. 0.97<br>Min. 0.53 | NOTE. 2 |
| C5 + | Mol % | Gas Chromatograph | 0.1 max | Note. 3 | |
| N2 | Mol % | Gas Chromatograph | 1 max | Avg. 0.16<br>Max. 0.46<br>Min. 0.05 | NOTE. 2 |
| H2O | ppm Wt | 1 | 1 max | Note.4 | |

Notes:

1. LNG의HHV (Higher Heating Value)와 LHV (Lower Heating Value) 계산식

Hv = Σ (Xi x Hi)

Hv = Volumetric HHV (or LHV)

Xi = Molar fraction of component i

Hi = HHV (or LHV) of component i

HHV and LHV of Pure Components

| *Component* | *HHV (kcal/Nm3)* | *LHV (kcal/Nm3)* |
|---|---|---|
| $C_1$ | *9480* | *8540* |
| $C_2$ | *16610* | *15200* |
| $C_{3^-}$ | *23620* | *21730* |
| $i\text{-}C_4$ | *30530* | *28170* |
| $n\text{-}C_4$ | *30630* | *28260* |
| $i\text{-}C_5$ | *37560* | *34720* |
| $n\text{-}C_5$ | *37640* | *34800* |
| $C_6$ | *44650* | *41340* |
| $N_2$ | *0* | *0* |

2. LNG 생산하는 2014년 3월 6일0시 부터 3월8일 24시 까지 72시간 동안의 평균 조성을 기준으로 산정
3. Online analyzer의 측정 범위의 한계로 C5+의 조성은 제외
4. LNG Sampling 부재로 인하여 LNG 의 water contents 부재

## <LNG Specification 만족 판단근거>

○ HHV: LNG Spec.상의 HHV값 만족

○ C1: LNG Spec.상의 최소 함유량 조건 만족

○ N2: LNG Spec.상의 최대 함유량 조건 만족

○ C4+: LNG Spec.상의 최대 함유량 만족

○ C5+:

- Test 상의 Data 를 통한 확인 어려움



- 다음의 이유로 LNG off-spec과는 상관이 없는 것으로 판단됨.
  a. Feed Gas가 Regasified LNG
  b. Feed Line C3 Recycle 미주입

○ H2O:

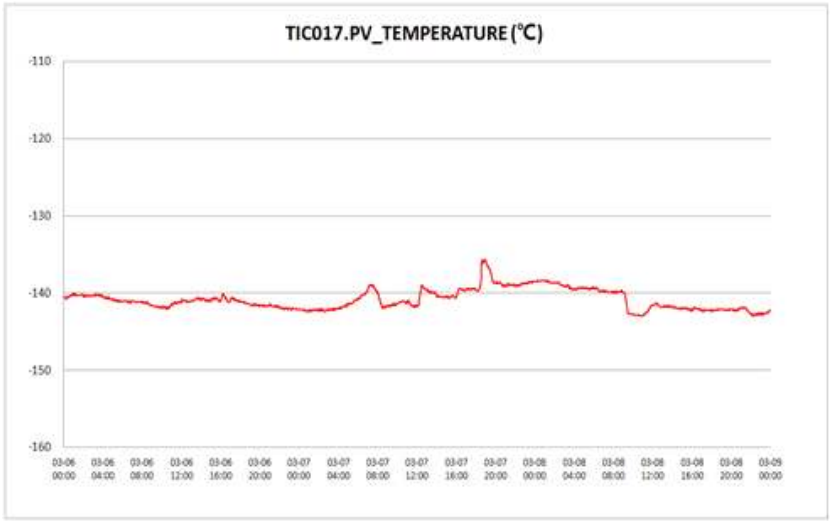
- Test상의 Data를 통한 확인 어려움.
- 다음의 이유로 LNG off-spec과는 상관이 없는 것으로 판단됨.
  a. KOGAS측 Online Analyzer (Feed Gas line)의 측정값: 0.5ppm 이하
  b. Dew point -60℃까지 Defrosting 실시 완료
  c. Test 초기 Feed Gas Disposal
  d. Feed Gas가 Regasified LNG임

## <LNG Product Quality (72시간 Test 결과)>

| Description | Unit | Design Figures | Actual Figures | Relevant Tag |
|---|---|---|---|---|
| LNG Product | ℃ | -149 | -140.8 | TIC-017 |

→ MCHE 출구 LNG 온도: Avg. -140℃ 미만으로 유지

→ 3/6~3/8 72시간 평균 Pilot Tank Inlet: 약 -157℃



[Equipment Performance]

<MCHE Performance 분석>

| Description | Unit | Design Figure | Actual Figures | Relevant Tag. |
|---|---|---|---|---|
| LNG Flow | Kg/hr | 4940.1 | 4546.9 | FIC-008 |
| Feed Gas Temp. | ℃ | -32.7 | -29.69 | TI-019 |
| Feed Gas Press. | Bar G | 60.7 | 62.15 | PI-010 |
| MRV Flow rate | Kg/hr | 2176.9 | 2111.1 | FIC-009 |
| MRV Temperature | ℃ | -32.9<br>-149.1<br>-154.1 | -25.5<br>-142.9<br>-142.0 | TI-026<br>TI-020<br>TI-021 |
| MRV Pressure | Bar G | 58.9<br>58.0 | 44.2<br>34.9 | PI-015<br>PI-012 |
| MRL Flow rate | Kg/hr | 7013.9 | 6272.3 | FI-010 |
| MRL Temperature | ℃ | -32.9<br>-127.7<br>-130.2 | -25.5<br>-137.4<br>-138.3 | TI-025<br>TI-022<br>TI-023 |
| MRL Pressure | Bar G | 58.9<br>58.5 | 44.2<br>41.9 | PI-014<br>PI-051 |
| MR Return Temp. | ℃ | -35.9 | -37.4 | TI-024 |
| MR Return Press. | Bar G | 2.9 | 3.2 | PI-042 |
| LNG outlet Temp. | ℃ | -149.1 | -140.8 | TIC-017 |
| LNG outlet Press. | Bar G | 59.7 | 61.9 | PI-009 |

Flow

○ Simulation의 Net MRV Flow through MRV Line의 유량은 Test MRV 측정값과 동일

○ Simulation의 Net MRL Flow through MRL Line의 유량은 Test MRL 측정값과 Deviation 존재

○ Overall MR Flow

- Test 측정값 < Simulation 계산값 (Actual로 추정) < Design 값



- ASV의 상시 Open으로 인해 상기 Compressor의 Load를 상승이 어려움

- 즉, ASV Full Close 시 추가적인 MR Load 상승 가능 è LNG 유량 증가 및 온도 추가 강하가능

Duty

○ Hydrate에 의한 E-1105B로의 MRV의 흐름이 방해 받아, MCHE Cold Section의 Duty가 많이 줄어듦. 즉, MCHE Warm section이 설계치 보다 상대적으로 전체 Duty의 더 많은 부분을 Cover하게 됨.

○ MCHE로 유입되는 MRL의 Net Stream에 MRV의 일부가 Mixing되어 들어감.

○ 따라서, 분자량이 낮은 성분 일부 합쳐 더 낮은 온도영역까지 Cooling할 수 있게 됨. LNG Mid의 Test 측정 온도는 이러한 결과를 보여줌.

Temperature

○ Test의 일부 Point 에서 온도 역전 현상 / Test의 일부 Point 에서 -150℃ 이하

○ Test시 Performance를 기대 이상으로 발휘함. Design Margin, 내구성 (Leak Test 이상 무)

○ Hydrate 추정 현상으로 Cold section의 Duty가 떨어지고, Warm Section의 Performance 증가

<C3 Compressor Performance>

| Description | Unit | Design Figures | Actual Figures | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Flow rate | Nm3/hr | 1401/613<br>2397/2156<br>7567 | 2069.53/1400.03<br>1861.13/2203.58<br>6767.9 | 1stSuction(FI-211)/1stSide(FI-223):<br>2ndSide(FI-233)/3rdSide(FI-243):<br>4thDischarge(FI-242) |
| Suction Temp | ℃ | -36.71/-12.93<br>5.24/25.06 | -3.94/7.69<br>17.37/32.89 | 1stSuction(TI-211)/2ndSuction(TI-221):<br>3rdSuction(TI-231)/4thSuction(TI-241): |
| Suction Press. | Bar G | 0.14/1.23<br>2.97/6.24 | 0.21/1.20<br>2.60/4.44 | 1stSuction(PI-211)/2ndSuction(PI-221):<br>3rdSuction(PI-231)/4thSuction(PI-241) |
| Discharge Temp | ℃ | -4.32/12.72<br>32.16/71.40 | 26.18/30.56<br>40.08/79.01 | 1stDischarge(TI-212)/2ndDischarge(TI-222):<br>3rdDischarge(TI-232)/4thDischarge(TI-065A) |
| Discharge Press. | Bar G | 1.35/3.07<br>6.34/17.00 | 1.21/2.62<br>4.49/13.41 | 1stDischarge(PI-212)/2ndDischarge(PI-222):<br>3rdDischarge(PI-232)/4thDischarge(PI-242): |
| IGV Opening | % | 67/67<br>67/67 | 52.62/31.57<br>24.78/65.03 | 1stStage(PI-211)/2ndStage(PI-221):<br>3rdStage(PI-231)/4thStage(PI-241): |
| ASV Opening | % | 0/0<br>0/0 | 54.43/0.67<br>0.11/3.85 | 1stStage(ASV-213)/2ndStage(ASV-223):<br>3rdStage(ASV-233)/4thStage(ASV-243): |

Notes
ANTI Surge Control: Surge MARGIN이 20% 적용
IGV: 각 단 Suction Pressure Control

**<C3 Compressor Performance 분석>**

○ Recycle Flow가 존재: Anti Surge Control에 의해 Recycle Flow 존재

○ 각 단의 Temperature 높음, 4th Discharge Pressure 낮음.

○ 낮은 4th Discharge Pressure: Design값보다 낮지만 Cooling Water Temperature 또한 Design보다 낮게 유지됨.

○ 운전상의 문제 없음

○ 1st Anti Surge Valve의 Manual Bypass 추가: Total Recycle Mode에서 Start-up시 1단 Surge를 방지하고, Compressor의 Flow Control을 용이하도록 함.

○ C3 Compressor Normal Operation을 위한 추가 작업: MR측 Load 증가에 따라 C3 Compressor의 Recycle Flow를 줄여나감

○ Inlet / Outlet Pressure, Temperature의 정상화

○ C3상의 Heavier Impurity 및 운전 Load로 인해 LLP Evaporator의 온도가 조금 높은 것으로 추정

**<MR Compressor Performance>**

| Description | Unit | Design Figures | Actual Figures | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Flow rate | Nm3/hr | 8,116<br>8,116 | 11,080.93<br>9,515.99 | 1st Suction(FI-261)<br>5th Suction(FI-281) |
| Suction Temp | ℃ | -36.020<br>44.90 | -38.29<br>42.17 | 1st Suction(TI-261)<br>5th Suction(TI-281) |
| Suction Press. | Bar G | 2.79<br>43.90 | 3.01<br>19.59 | 1st Suction(PI-261)<br>5th Suction(PI-281) |
| Discharge Temp | ℃ | 110.86<br>104.44 | 95.33<br>110.41 | 4th Discharge(TI-274)<br>6th Discharge(TI-284) |
| Discharge Press. | Bar G | 28.98<br>61.54 | 21.05<br>45.32 | 4th Discharge(PI-274)<br>6th Discharge(PI-284) |
| IGV Opening | % | 67 | 28.97 | 1st Stage(PV-261) |
| ASV Opening | % | 0 | 5.31<br>8.31 | 1st ASV(ASV-263)<br>2nd ASV(ASV-283) |
| Composition | Mol % | 5.86<br>46.93<br>33.93<br>13.28<br>0.00 | 6.52<br>43.26<br>32.62<br>16.77<br>0.32 | N2 (AI-004A)<br>C1 (AI-004B)<br>C2 (AI-004C)<br>C3 (AI-004D)<br>C4+ (AI-004E) |

**Notes)**
**Anti Surge Control은 Surge Margin 이 20% 적용**
**IGV는 1단 Suction Pressure Control**



**<MR Compressor Performance 분석>**

○ ASV Recycle Flow 항상 존재

- Anti-surge valve가 모든 경우에 항상 Open
- Vendor 삼성테크윈 측에서 Compressor의 SCL Margin을 10%가 아닌 20%로 설정
- Surge로 인한 문제에서 좀 더 안전할 수 있으나 동일한 운전 Load에서도 Power 및 Current 증가

○ MCHE Bypass Line 사용

- MCHE의 Cool down Rate의 제약을 극복하기 위해 설치 함으로 써, MR Compressor Suction Temperature의 Control이 용이 하도록 함.

○ MR Compressor Normal Operation을 위한 추가 작업

- Final Cool Down 지속적 진행: MR Composition Make-up과 LNG 생산량 증가, MR Circulation 증가, Recycle Flow감소 & Inlet / Outlet Pressure, Temperature의 정상화

**(5) Conclusion**

○ Required Design HHV를 만족하는 LNG 생산

LNG Quantity Design Capacity 달성

LNG Quality Design HHV 충족

- LNG 생산량에 대해서 MCHE Outlet 기준 -140℃ 이하의 LNG를 100 ton/day 이상 생산 성공
- LNG의 Quality 측면에서 Design Basis상 HHV 충족
- Hydrate 생성 관련 사항에 대해서는 C3 Refrigerant를 Impurity가 낮은 등급의 공급 필요
- Impurity 낮은 C3가 공급될 경우 Simulation 분석 결과 설계 조건을 상회하는 결과
- 추후 상용급 공장의 설계나 Test시에 위의 결과를 바탕으로 활용한다면 좀 더 안정적인 운전에 도달하는데 도움이 될 것으로 기대

## 사. Test Bed Train-2 기자재 구매

**(1) 연구 목적**

- LNG플랜트 신액화공정(KSMR)에 적합한 기자재 구매
- 액화공정에 필요한 주요 설비의 개발 및 적용

**(2) 연구 내용**

- 연구기관 사내 Procedure에 따른 구매 업무(GS건설 플랜트 구매 시스템)
- Technical Bid Evaluation Meeting 진행(Short List Vendor 대상)
- Vendor Print 검토
- 기자재 제작 검사 시행

**(3) 연구 결과**

○ 총 23종 품목 구매

- 기계: 8종, 계장: 14종, 전기: 1종
- 국산화율 : 약 80% (구매비용 기준, Bulk성 기자재 제외)
- 주요구매

| Item | | Vendor | Country |
|---|---|---|---|
| 기계 | Centrifugal Compressor | K-Turbo | Korea |
| | Proportioning Pump | Pulsafeeder | USA |
| | Vessel & Heat Exchanger | Wonil T&I | Korea |
| | Aluminium Brazed Heat Exchanger | Dongwha Entec | Korea |
| | Electric Heater | Watlow Korea | USA |
| | Air Cooled Heat Exchanger | Dongwha Entec | Korea |
| | Column Internal | GTC | USA |
| | Static Mixers | Samwon Eng. | Korea |
| 계장 | DCS | Yokogawa Electric Korea | Japan |
| | SIS(ESD+F&G) | Yokogawa Electric Korea | Japan |
| | Flow Element(Orifice RO) | Samil Industry | Korea |
| | Flowmeter (Rotameter) | Tokyo Keiso | Japan |
| | Level Gauge | Samil Industry | Korea |
| | Pressure & D/P Transmitter | Duon System | Korea |
| | Pressure & Temperature Gauge | Wise Tech | Korea |
| | Temperature Element & Transmitter | Wise Tech | Korea |
| | Control Valve | Jinwha Control | Japan |
| | Pressure Safety & Relief Valve | Jokwang | Korea |
| | On-off Valve(Ball) | Myoungjin Valvetec. | Japan |
| | Gas Detector | Wise Tech | Korea |
| | CCTV | KIE Systems | Korea |
| | Instrument | Oticom Corp. | Korea |
| 전기 | Switchgear & MCC | Woojin Electric Machine | Korea |

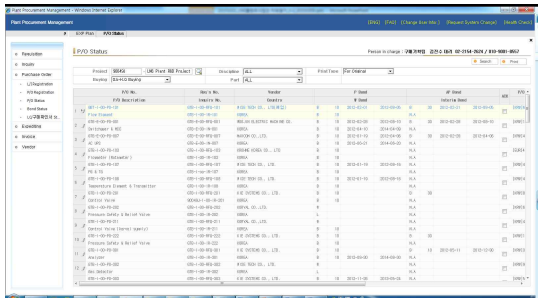
○ 총 19종 품목 검사

- 기계 : 5종, 배관 : 6종, 계장 : 6종, 전기 : 2종
- 검사 품목 전량 IRN(검사 합격) 발행 완료(불합격 기자재(NCR Issue) 없음)
- 해당 검사 품목에 대한 검사관 검사보고서 작성/제출(기계: 16건, 배관: 12건, 계장: 7건, 전기: 2건)
- 검사 Procedure




○ 특이사항

- 동화엔텍(2-3과제) 개발 MCHE 적용
- K-Turbo(2-4과제) 개발 Compressor 적용(Compressor 미입고)
- GS건설 구매관리 시스템



- 기자재 제작 검사





- 기자재 입고







## 아. Test Bed Train-2 공사

○ 목적 : 개발 액화공정에 대한 설계 검증을 위한 건설

○ 적용공정 : KSMR Process(KOGAS 개발, 한국형 신액화공정)

○ 설비규모 : 일산 100톤급 액화설비

○ FEED / 설계 : GS건설 (3-1-1과제)

○ 기술검토서 : 2012. 9.

○ 고압가스제조 변경허가 : 2013. 3.

○ 공작물 축조 신고 : 2013. 4.

○ 착공 : 2013. 4.

○ 중간검사 : 2014. 5.

○ 완성검사 : 미수검(현재)

* 압축기 관련 설계도서 Issue 및 기자재 입고 지연으로 Train-2 공사 지연 발생(2014.06 이후 Hold)



Test Bed Train-2






# 자. 테스트베드 Train-2 시운전

**(1) 목적 :**

○ 2-1과제에서 개발한 한국형 신액화공정 및 3-1과제에 본 공정에 대한 설계를 기반으로 본 과제에서 기자재의 구매와 건설을 진행하였다. 또한, 2핵심 3세부, 4세부에서 개발한 압축기 및 열교환기를 적용하였다.

○ 이렇게 완성된 테스트베드 Train-2의 시험운전을 수행하였고, 이에 대한 결과를 기술하였다.

**(2) 결과 분석**

**(가) 요약**

① 분석시점

㉮ Performance Guarantee Test (PGT) 수행 기간 : 10/9 13:00 ~ 10/12 13:00

㉯ LNG 생산량 = PGT 기간 평균 100 ton/day 이상 생산

② 시운전 결과

: PGT 기간 평균 100 ton/day 이상의 LNG 생산 확인

㉮ LNG Flash Drum Bottom 기준으로 평균 100.14 ton/day LNG 생산

㉯ Design Basis상의 LNG specification 충족

③ 시운전 주요 사항

㉮ HK MR Return 온도가 낮게 운전되는 제약 발생

- 시운전 기간 중, MCHE HK MR Return 온도가 HK MR Compressor의 Dew Point인 14.5℃에 가깝게 운전되어 Compressor 기기 보호 차원에서 HK MR 유량을 Design 값인 9,763kg/hr까지 증가시킬 수 없는 제약 발생

- HK MR 유량이 Design 유량에 도달하지 못함에 따라 LK MR의 온도 또한 Design 값인 -154℃까지 낮게 운전되지 못하였으며 LNG Target 생산량에 도달하지 못하는 제약 발생으로 연결됨.

- Compressor 기기 보호 및 HK MR 유량을 증가하여 LNG Target 생산량 도달을 목적으로 HK MR Suction Line 배관 및 Suction Vessel에 Heating Coil 설치

- Heating Coil을 통한 Heating을 통해 HK MR Return 온도를 PGT 기간 평균 약 17.6℃로 운전하여 HK MR 유량을 약 8,223kg/hr까지 증가

㉯ LK MR 유량 증가하여 운전

- HK MR Return 온도 문제로 인해 HK MR 유량 제약이 발생하여 LNG Target 생산량에 도달하지 못함에 따라 LK MR 유량을 PGT 기간 평균 11,052kg/hr 수준으로 Load up 하여 운전 실시

- 개조된 LK MR Compressor(K-2301N)의 안전 운전 범위 안에서 평균 100.14 ton/day 생산만으로 운전 종료

### (나) MCHE Feed gas 분석

① Feed gas 조성

| Description | Unit | Analytical Method | Design FG Comp. @ BL | Design FG Comp. @ MCHE inlet | Actual FG Comp.(*1) @ AI-001 | KOGAS LAB (*2) | Relevant online analyzer Tag. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N2 | Mol % | Gas Chromatograph | 0.22 | 4.97 | 0.13 | HOLD | AI-001A |
| C1 | Mol % | Gas Chromatograph | 91.33 | 86.90 | 89.61 | HOLD | AI-001B |
| C2 | Mol % | Gas Chromatograph | 5.36 | 5.10 | 5.65 | HOLD | AI-001C |
| C3 | Mol % | Gas Chromatograph | 2.14 | 2.13 | 1.71 | HOLD | AI-001D |
| C4 | Mol % | Gas Chromatograph | 0.46/ 0.47 | 0.89 | 2.89 | HOLD | AI-001E |
| C5 | Mol % | Gas Chromatograph | 0.01/ 0.01 | 0.02 | 0.01 (C5+) | HOLD | AI-001F |

Note)
1. Train-2에 설치된 Online Analyzer 기준 (10/9 14:23 측정 값
2. KOGAS LAB의 GC Daily Report 중 PK-311 Point(KOGAS 인수기지의 20개의 Tank 전체에 대한 Vaporized Gas의 측정치)
본 Test Facility의 Feed Gas는 10개의 Tank의 Header로 부터 공급되므로 다소 차이 존재함으로 참고값으로만 활용

② MCHE Feed 조성 차이 이유

㉮ HP N2 미주입에 따른 N2 함량 감소

㉯ KOGAS 인수기지 공급의 Natural Gas의 조성 차이

→ Feed Gas가 Regasified LNG이므로, lean gas feed로써 Liquefaction Unit의 Feed로 문제가 없음으로 판단됨.

### (다) LNG Product Quantity

100 Ton/day = 4,169 kg/hr
(PGT : 2020년 10월 9일~12일, Note. 3)

| Description | Unit | Design Figures | Actual Figures (Daily Average) | Relevant Tag |
|---|---|---|---|---|
| LNG Product | Kg/hr | 4,771.2 | 4,169.4 | FIC-061 |

| Description | Unit | Analytical Method | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| High Heating Value (HHV) | kcal/Nm3 | NOTE.1 | 9,860<br>10,980 (max) | 10,725 | |
| C1 | Mol % | Sample Analysis | 85 (min) | 89.61 | NOTE. 2 |
| C2 | Mol % | Sample Analysis | - | 5.65 | NOTE. 2 |
| C3 | Mol % | Sample Analysis | - | 1.71 | NOTE. 2 |
| C4 + | Mol % | Sample Analysis | 1.75 max | 2.89 | NOTE. 2 |
| C5 + | Mol % | Sample Analysis | 0.1 max | 0.01 | NOTE. 2 |
| N2 | Mol % | Sample Analysis | 1 max | 0.13 | NOTE. 2 |
| H2O | ppm Wt | Sample Analysis | 1 max | N/A | |

Note)
1. Online Analyzer : 2020년 10월 9일
2. PGT 기간 내에 LNG Product의 별도 Sampling은 진행되지 않았으며, BOG가 거의 발생하지 않는 조건으로 운전되었기 때문에 Feed Gas 조성과 거의 일치할 것으로 예측됨에 따라 PGT 기간 Online Analyzer로 측정한 AI001의 값을 Product Specification 분석에 사용함.
3. LNG생산량은 V-1401 Bottom Liquid 유량이며, V-1401 Operating Pressure : 2.5 BarG
4. C4+의 함량이 Spec.을 초과하였으며 KOGAS 제공 Feed gas 조성의 차이 및 Scrub Column Operation을 실시하지 않은 결과로 판단됨.

### (라) MCHE Performance

① MCHE Performance

: MCHE HK MR Return 온도가 낮게 운전되는 제약 발생

㉮ 현황 : HK MR Return 온도가 Design 수준으로 높게 운전되지 않음.

- HK MR Return온도는 Design 기준 31.7℃이며 후단의 HK MR Compressor (K-2303N) Suction으로 연결되기 때문에 Dew Point인 14.5℃ 이상으로 일정 이상의 Margin을 가지고 운전하여 Compressor 기기 보호가 필요함.

- 시운전 기간, HK MR Return 온도는 Dew Point인 14.5℃에 가깝게 운전되어 HK MR 유량을 Design 만큼 증가시키기 어려워 LK MR 온도 및 LNG 생산량 등에 영향을 주게 되는 등 운전 제약이 발생되었음.

㉯ 예상 원인

- MCHE 내부 구조적 문제로 인한 HK MR의 냉열 분배가 충분히 이루어지지 않고 열교환기를 빠져나오는 문제

㉰ 성능 개선을 위한 추가 작업(by 동화엔텍)

- Compressor 기기 보호 및 HK MR 유량을 증가하여 LNG Target 생산량 도달을 목적으로 HK MR Suction Line 배관 및 Suction Vessel에 Heating Coil 설치

- Heating Coil을 통한 Heating을 통해 HK MR Return 온도를 PGT 기간 평균 약 17.6℃로 운전하여 HK MR Compressor 기기 보호를 위한 Margin 확보 및 HK MR 유량을 약 8,223 kg/hr까지 증가

② MCHE Performance Data

| Description | | Unit | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|---|
| LNG Flow | | kg/hr | 4,973 | 4,404 | FIC-061 |
| Feed Gas Temp. | | ℃ | 12.1 | 17.8 | TI-310 |
| Feed Gas Pres. | | Bar G | 62.4 | 62,2 | PI-310 |
| LK Flow Rate | | kg/hr | 9,474 | 10,997 | FI-305 |
| LK Temp. | MCHE in | ℃ | 40.9 | 40.4 | TI-321 |
| | JTV in | ℃ | -151.0 | -136.9 | TI-330 |
| | JTV out | ℃ | -154.0 | -146.5 | TI-331 |
| | MCHE out | ℃ | 36.0 | 29.3 | TI-320 |
| LK Pres. | JTV in | Bar G | 50.0 | 53.2 | PI-330 |
| | JTV out | Bar G | 1.3 | 1.2 | PI-335 |
| HK Flow Rate | | kg/hr | 9,763 | 8,261 | FIC-381 |
| HK Temp. | MCHE in | ℃ | 40.9 | -40.1 | TI-325 |
| | JTV in | ℃ | -46.7 | -64.4 | TI-328 |
| | JTV out | ℃ | -51.0 | -59.4 | TI-329 |
| | MCHE out | ℃ | 31.7 | 17.4 | TI-322 |
| HK Pres. | JTV in | Bar G | 50.5 | 53.3 | PI-328 |
| | JTV out | Bar G | 10.5 | 10.5 | PI-329 |
| LNG Outlet Temp. | | ℃ | -150.7 | -147.6 | TIC-319 |
| LNG Outlet Pres. | | Bar G | 60.0 | 62.1 | PI-319 |

| Analyzer | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mol% | LK MR (AE-305) | | LK (AE-303) | | HK (AE-304) | |
| | K-2301N 3rd Discharge | | V-2306 OVHD | | K-2303N Discharge | |
| | Design Figures | Actual Figures | Design Figures | Actual Figures | Design Figures | Actual Figures |
| N2 | 5.31 | 3.98 | 5.31 | 5.05 | 1.23 | 0.86 |
| C1 | 40.60 | 40.72 | 40.60 | 49.16 | 16.74 | 16.29 |
| C2 | 17.63 | 18.31 | 17.63 | 19.29 | 17.00 | 14.74 |
| C3 | 34.46 | 36.99 | 36.46 | 26.50 | 65.02 | 68.11 |
| MW | 29.38 | 29.10 | 29.38 | 26.40 | 36.82 | 37.03 |

③ 시운전 Data 기반 분석 결과

㉮ Flow



- Feed Flow는 Normal flow의 89%, LK / HK MR은 Normal flow 대비 116% / 85%로서, HK MR의 유량 증가 제한으로 인한 운전 결과.

㉯ Temperature

- HK MR Return 온도가 낮게 운전되는 제한 발생
- HK MR 유량 제한에 의한 열교환 영향으로 LK MR JTV 전후단 온도가 Design 대비 높게 운전됨.
- LNG Outlet 온도 또한 LK MR의 온도가 높은 영향으로 인해 높게 운전됨.

㉰ Pressure Profile

- 전반적으로 압력은 Design과 유사하게 운전되었으나, HK MR 유량 증가 제한에 따라 LK / HK MR의 Performance를 높이는 방법으로 냉매의 압력을 다소 높게 운전하였음.

㉱ MW of MR

- LK / HK MR의 조성의 경우, Design과 전반적으로 유사한 조성을 유지하여 Make-up 실시 및 운전 진행하였음.

### (㉮) LK MR Compressor Performance

① LK MR Compressor Performance Data

| Description | Unit | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Flow Rate | Nm3/hr | 7,376 | 8,629 | 1st Suction (FI-641) |
| | | 7,376 | 8,788 | 3rd Suction (FI-541) |
| | | 7,376 | 8,645 | 5th Suction (FI-551) |
| Suction Temp. | ℃ | 34.6 | 27.1 | 1st Suction (TI-341A) |
| | | 40 | 37.4 | 3rd Suction (TI-551) |
| | | 40 | 38.7 | 5th Suction (TI-561) |
| Suction Pres. | Bar G | 0.3 | 0.55 | 1st Suction (PI-541) |
| | | 2.6 | 2.72 | 3rd Suction (FI-551) |
| | | 9.1 | 9.11 | 5th Suction (FI-561) |
| Discharge Temp. | ℃ | 105.2 | 93.1 | 2nd Discharge (TI-345A) |
| | | 109.1 | 104.3 | 4th Discharge (TI-355A) |
| | | 116.3 | 112.6 | 6th Discharge (TI-365A) |
| Discharge Pres. | Bar G | 3.1 | 3.3 | 2nd Discharge (PI-346A) |
| | | 9.6 | 9.6 | 4th Discharge (PI-356A) |
| | | 27.5 | 27.1 | 6th Discharge (PI-366A) |
| IGV Opening | % | 60 | 60 | 1st Stage (IGV-661) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ASV Opening | % | 0 | 0 | 1st Section ASV (AZI-541) |
| | | 0 | 0 | 2nd Section ASV (AZI-551) |
| | | 0 | 0 | 3rd Section ASV (AZI-561) |
| Power | kw | 1,390 | 1,211 | JI-001 |

② 시운전 Data 기반 분석 결과

㉮ Flow

- HK MR 유량제한으로 인해 LK MR의 유량을 증가시켜 운전을 진행하였으므로 Normal flow보다 약 17~19% 정도 증가된 유량으로 운전하였음.

㉯ Temperature

- 상대적으로 Feed gas 유량과 와 Design LK MR 유량 대비 운전시의 LK MR 유량이 많기 때문에 LK MR Return temp(1st Suction temp)가 낮은 경향을 보임

㉰ Pressure Profile

- Normal condition과 크게 차이를 보이지 않음.

㉱ MW of MR

- LK MR의 조성의 경우, Normal 과 매우 유사한 조성을 유지하고 있음.

③ 분석

: Train-1의 MR Compressor Motor를 재사용하여 Design이상의 유량으로 운전시 Load-up의 제약이 있었으며 LNG Target 생산량을 확보하기까지만 Load-up 진행하였음.

### (바) HP/HK MR Compressor Performance

① HP/HK MR Compressor Performance Data

■ K-2302N HP MR Compressors

| Description | Unit | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Flow Rate | Nm3/hr | 11,412 | 12,833 | 1st Suction (FI-671) |
| Suction Temp. | ℃ | 31.75 | 31.3 | 1st Suction (TI-571) |
| Suction Pres. | Bar G | 27 | 26.2 | 1st Suction (PI-571) |
| Discharge Temp. | ℃ | 77.61 | 79.3 | 2nd Discharge (TI-375A) |
| Discharge Pres. | Bar G | 52 | 53.7 | 2nd Discharge (PI-376A) |
| IGV Opening | % | - | 75.5 | ITV (ZI-611), 작동불가 |
| ASV Opening | % | 0 | 0 | ASV (AZI-571) |



■ K-2303N HK MR Compressors

| Description | Unit | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Flow Rate | Nm3/hr | 5,940 | 8,312 | 1st Suction (FI-561) |
| Suction Temp. | ℃ | 31.74 | 19.1 | 1st Suction (TI-591) |
| Suction Pres. | Bar G | 10 | 10.2 | 1st Suction (PI-591) |
| Discharge Temp. | ℃ | 91.9 | 75.5 | 2nd Discharge (TI-395A) |
| Discharge Pres. | Bar G | 28 | 27.1 | 2nd Discharge (PI-396A) |
| IGV Opening | % | - | 75.3 | ITV (ZI-631), 작동불가 |
| ASV Opening | % | 0 | 33 | ASV (AZI-591) |

■ K-2302N /2303N Compressors

| Description | Unit | Design Figures | Actual Result | Remark |
|---|---|---|---|---|
| Power | kw | 810 | 743.4 | JI-002 |

② 시운전 Data 기반 분석 결과

㉮ Flow

- HK MR 유량 제한으로 인해 LK MR의 유량을 증가시켜 운전을 진행하여 HP MR Compressor 또한 Normal flow보다 약 12% 정도 증가된 유량으로 운전하였음.

- K-2303N의 경우 HK MR Return 온도가 낮은 제약 사항으로 인해 Recycle Flow를 통한 온도 조절로 기기 보호 목적의 운전을 진행하였음. 이에 따라 Recycle 유량이 포함되어 유량이 매우 크게 운전되었음

㉯ Temperature

- HK MR Return 온도가 낮게 운전되는 제약사항으로 인해 HK MR Compressor의 Suction 온도도 낮게 운전되었음.

㉰ Pressure Profile

- HP MR Compressor는, HK MR 유량 증가 제한에 따라 LK / HK MR의 Performance를 높이는 방법으로 냉매의 압력을 다소 높게 운전하였음.

- Normal condition과 크게 차이를 보이지 않음.

㉱ MW of MR

- Normal 과 매우 유사한 조성을 유지하고 있음.

③ 분석

㉮ 낮은 HK MR Return temp에 의해 K-2303N의 ASV를 Close할 수 없는 운전상의 제약

발생. K-2303N Suction Vessel과 배관에 Heating Coil 설치를 통해 Compressor 기기보호를 위한 Margin 확보.

㉰ Train-1의 C3 Compressor의 Motor를 재사용하였기에 Design 이상의 유량으로 운전시에 Load-up에 제약이 있었으며 LNG Target 생산량을 확보하기까지만 Load-up 진행

**(사) 결론**

① MCHE Performance

- HK MR Return 온도가 낮게 운전되는 제약사항으로 인하여 Design 수준의 HK MR 유량 증가가 어려웠으며, 해당사항이 LK MR의 온도 및 LNG 생산량에 영향을 주는 요인으로 이어졌음.

- HK MR Compressor(K-2303N) Suction Vessel 및 배관에 Heating Coil을 설치하여 Compressor 기기 보호 및 운전 Margin을 확보하였으며, 이후 LK MR 유량 증가를 통하여 Target LNG 생산량인 100 Ton/day을 달성하였음.

② MR Compressor Performance

- Train-1의 기존 C3/MR Compressor를 각각 개조하여 Motor 상에 제약이 있었으나, LK MR의 유량 및 압력 조절에 제약이 발견되지 않았음. 단 HK 유량은 HK MR Return 온도 제약으로 자유로운 조절에는 한계가 있었음.

③ LNG Product

- HK MR Return 온도가 낮게 운전되는 제약사항에도 불구하고, Target LNG 생산량인 100 Ton/day은 만족하였음.

- LNG Product의 Quality 관련, 가장 중요한 Heating Value를 만족하였기에 Target Quality를 달성하였다고 판단됨.



## 차. LNG 플랜트 최적통합운전환경 기술개발

**(1) 목적**

○ LNG Plants의 생산 현장에서 발생하는 데이터 소스로부터 운전 데이터를 실시간으로 수집하고 공유함으로써 인적 자원의 효율적 활용과 신속한 의사결정을 통한 비상대응 능력 향상을 가능하게 하며,

○ 사용자가 DCS단에서 올라오는 모든 Tag 정보를 감시할 수 있으며, 수집된 운전정보 및 데이터를 통하여 보고서 작성 및 분석함으로써 통계적 품질관리 기능을 구현,

○ 운전원, 엔지니어 및 경영자가 모두 동일한 정보시스템에 직접 접근하여 실시간으로 대용량 운전데이터를 정확하게 일관성 있게 제공 받아 현재와 과거의 이력정보제공을 통해 실제 상황 관점에서 분석할 수 있게 하여, 이상 상황 등을 빠르고 손쉽게 발견하고 조치하게 하여 업무의 효율성을 증대하기 위함에 있습니다.

**(2) 기대 효과**

○ 기술적 효과
- 운영 시스템의 Open 시스템화
- 통신제어기술 및 Real Time 데이터 전송기술 확보
- 내장된 보안 기능을 통해 데이터를 보호

○ 경제적 효과
- 현장과 사무실의 운용 자원 활용도 극대화
- 지식기반 경제 이행과 정보가치 증대로 인한 생산성 향상

○ 경영적 효과
- 정보 활용도의 효율화로 비용 절감
- 실시간 정보 공유와 신속한 의사결정지원
- 설계부서, 사무실 및 현장의 안전관리 능력 향상

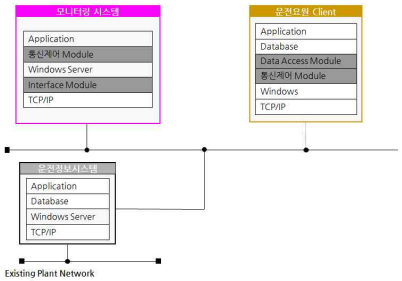
**(3) 시스템 구성**

**(가) 시스템 개요**



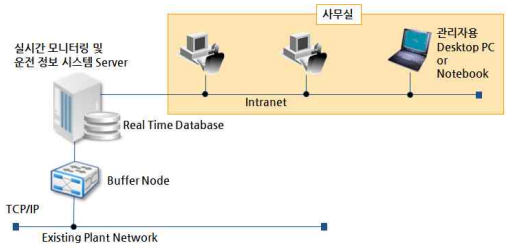

DCS와 실시간으로 연계하여 실시간 운전 정보들을 수집하고, 고성능의 실시간 데이터베이스(Real-Time Database)에 장기간 보관하여, 실시간 감시, 추이(Trend) 분석, 통계 및 각종 계산 및 보고서 자동화 등 다양한 분야에서 정보 활용이 가능하고, 나아가서는 다양한 사용자에게 실시간 정보를 제공

(나) SW 구성도



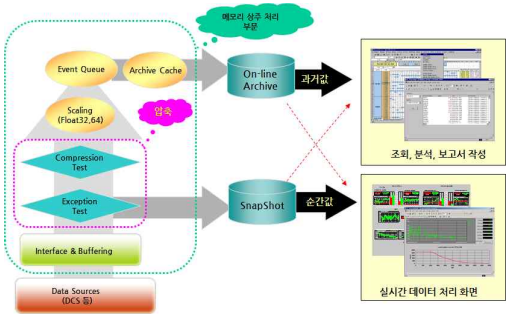

DCS와 실시간 연계를 통해 DCS의 Tag 정보를 운전정보시스템에 생성하며, 실시간 제어 인터페이스를 통해 모니터링 시스템에서 운전요원은 Client 프로그램을 통해 확인할 수 있게 구성.

(다) H/W 구성도




DCS와 데이터 송수신을 위한 Buffer Node를 구축하며, 통합운전환경시스템 서버에 RTDB를 구축

(라) 데이터 흐름도



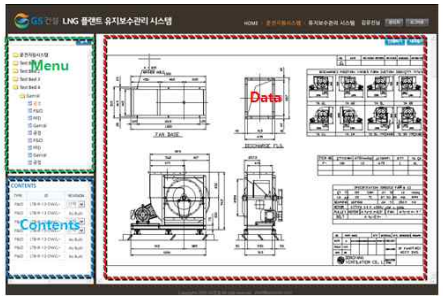

DCS의 Data Sources를 인터페이스 모듈을 통해 실시간으로 수집한 후 1단계(Exception Test) 압축과 2단계(Compression Test) 압축을 통해 대량의 데이터를 최소/최적의 공간에 저장

(4) 구축 결과 : 테스트베드 Train-1 & Train-2 적용

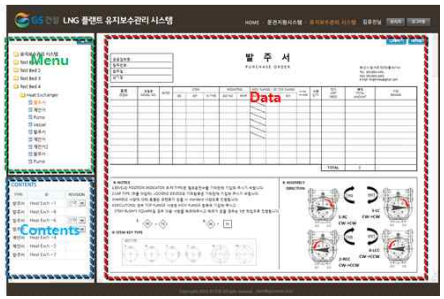


## 카. 웹기반 LNG 플랜트 유지/보수관리시스템 기술개발

- 테스트베드에 적용된 설계정보 및 각종 도면 등 운전 시 필요한 Data 제공
- 유지 보수에 필요한 Spec. 기자재 발주서 등의 Data 제공 및 유지보수 이력 관리




운전지원 시스템




유지보수 관리 시스템

## 타. 시험/평가기준 및 인증체계

### (1) 배경

LNG플랜트의 해외시장 진출을 위하여 국제경쟁력 확보가 시급한 상황에서 LNG플랜트 건설기술 개발 경험이 전무한 국내 여건에서 인력, 지원여건, 개발인프라 수준 등이 전박적으로 낮게 평가되어 대외적으로 이에 대한 개선이 절대적으로 필요한 상황에서, 국가적인 차원의 국내 표준을 국제법을 기반으로 확립하고 직·간접적으로 플랜트 건설기술에 대한 표준화 연구개발을 추진하여 국내기업의 시장참여에 기여하고자 본 연구를 실시 하였다.

### (2) 연구목표

LNG플랜트 KGS-Code(안) 제정(시험연구용)하여 테스트베드의 시운전을 통하여 안전성을 확인하고 추후 플랜트에 대한 안전성 검증 후 코드 보완 등을 통하여 상용급 LNG플랜트 코드 제정 및 LNG플랜트 주요설비 별 설계조건 및 사용범위에 따른 제품의 구조에 대한 기준, 제품 재료에 대한 기준, 제품 성능에 대한 기준 등의 안전성 평가기준을 마련하고자 한다.

### (3) 기대효과 및 활용방안

○ 기대효과

- LNG플랜트의 경우 해외 선진 업체가 시장을 점유하고 있으며, 보수적인 시장성 및 선진기업의 기술이전 회피로 인해 기술 제휴 및 도입이 어려운 실정이다. 따라서 추후 원천기술 조기 확보와 기존 기술과 차별화된 특화 기술 개발의 초석으로 삼을 수 있다.
- 첨단기술과 융합, 성능 혁신과 고부가가치를 당성하는 기반기술에 선행투자가 필요하며, LNG플랜트의 다양한 데이터베이스 구축 환경 및 제도적 지원 체계의 하나가 될 수 있다.
- 국내 LNG플랜트의 인적 및 연구개발 인프라가 선진국에 비하여 상당히 취약하다. 향후 많은 투자와 기반기술 발굴 지원여건의 구축을 위한 지원여건 중 제도적인 지원요건으로 활용이 가능하다.
- 주변국가의 LNG플랜트 수요가 증대됨에 따라 국내에서도 LNG플랜트 관련 기술 개발로 세계시장의 진출 기회를 모색하고 있다. 따라서 본 연구의 일환으로 표준화된 체계를 가지고 해외시장 진출의 기초자료가 될 수 있다 생각된다.

○ 활용방안

- 기존 자가발전기 대비 저소음, 저진동으로 환경 친화적인 설비로 활용
- 개정된 코드를 이용하여 국내의 다양한 초저온 제품의 검사 및 품질 인증 자료로 활용

### (4) 연구 결과

#### (가) 상세 기준 제정(안)



○ LNG테스트베드의 시설·기술·검사 기준

- 이 기준은 「고압가스 안전관리법 시행령」(이하 “영”이라 한다) 제3조제1항제2호에 따른 고압가스일반제조 시설 중 시험연구용으로 사용하는 액화천연가스 제조의 시설·기술·검사에 대하여 적용한다.
- 기준은 「고압가스 안전관리법」(이하 “법”이라 한다) 제22조의2제2항에 따라 가스기술기준위원회의 심의·의결(안건번호 제2012-0호, 2012년 0월 0일)을 거쳐 지식경제부장관의 승인(지식경제부 공고 제2012-000호, 2012년 0월 00일)을 받은 것으로 법 제22조의2제1항에 따른 상세기준으로서의 효력을 가진다.
- 이 기준을 지키고 있는 경우에는 법 제22조의2제4항에 따라 「고압가스 안전관리법 시행규칙」(이하 “규칙”이라 한다) 별표 4 제2호에 적합한 것으로 본다.

○ 조정기 부착형 안전밸브

압력조정기 일체형 용기부속품 제조의 시설·기술·검사 기준

- 이 기준은 「고압가스 안전관리법」(이하 “법”이라 한다) 제3조제2호에 따른 용기에 부착되는 부속품(이하 “용기부속품”라 한다)으로 조정기가 일체형으로 부착되어 있는 용기부속품의 제조의 시설·기술·검사에 대하여 적용한다.
- 이 기준은 법 제22조의2제2항에 따라 가스기술기준위원회의 심의·의결(안건번호 제2012-8호, 2012년 12월 11일)을 거쳐 지식경제부장관의 승인(지식경제부 공고 제2012-549호, 2012년 12월 28일)을 받은 것으로 법 제22조의2제1항에 따른 상세기준으로서의 효력을 가진다.
- 이 기준을 지키고 있는 경우에는 법 제22조의2제4항에 따라 「고압가스 안전관리법 시행규칙」(이하 “규칙”이라 한다) 별표10의2에 적합한 것으로 본다.

○ 초저온 안전밸브

초저온가스용 용기부속품(안전밸브)제조의 시설·기술·검사기준

- 이 기준은 「고압가스 안전관리법」(이하 “법”이라 한다) 제3조제2호에 따른 초저온 용기에 부착되는 안전밸브(이하 “용기부속품”라 한다) 제조의 시설·기술·검사에 대하여 적용한다.
- 이 기준은 법 제22조의2제2항에 따라 가스기술기준위원회의 심의·의결(안건번호 제2012-8호, 2012년 12월 11일)을 거쳐 지식경제부장관의 승인(지식경제부 공고 제2012-549호, 2012년 12월 28일)을 받은 것으로 법 제22조의2제1항에 따른 상세기준으로서의 효력을 가진다.
- 이 기준을 지키고 있는 경우에는 법 제22조의2제4항에 따라 「고압가스 안전관리법 시행규칙」(이하 “규칙”이라 한다) 별표10의2에 적합한 것으로 본다.

○ LNG테스트베드 용 글로브밸브

LNG TEST BED 글로브/게이트밸브 설계·제작 및 시험방법 절차서

- 이 규격은 LNG TEST BED의 시설 및 제품에 장착되는 배관용 밸브중 글로브/게이트

밸브의 설계・제작 및 시험방법에 대하여 적용한다.

○ LNG테스트베드 용 볼밸브

LNG TEST BED 배관용 밸브 설계・제작 및 시험방법 절차서

- 이 규격은 LNG TEST BED의 시설 및 제품에 장착되는 배관용 밸브중 볼밸브의 설계・제작 및 시험방법에 대하여 적용한다.

○ LNG테스트베드 용 초저온밸브

LNG TEST BED 초저온밸브 설계・제작 및 시험방법 절차서

- 이 기준은 「고압가스 안전관리법」(이하 “법”이라 한다) 제3조제2호에 따른 초저온용기에 부착되는 안전밸브(이하 “용기부속품”라 한다) 제조의 시설・기술・검사에 대하여 적용한다.
- 이 기준은 법 제22조의2제2항에 따라 가스기술기준위원회의 심의・의결(안건번호 제2012-8호, 2012년 12월 11일)을 거쳐 지식경제부장관의 승인(지식경제부 공고 제2012-549호, 2012년 12월 28일)을 받은 것으로 법 제22조의2제1항에 따른 상세기준으로서의 효력을 가진다.
- 이 기준을 지키고 있는 경우에는 법 제22조의2제4항에 따라 「고압가스 안전관리법 시행규칙」(이하 “규칙”이라 한다) 별표10의2에 적합한 것으로 본다.

**(나) 상세 기준 개정**

아래 기술된 KGS Code에 대해 LNG 플랜트에 적용 가능하도록 Code개정이 2014년 4월 3일 완료. 상세 개정 내역은 KGS 가스기술기준정보시스템(http://www.kgs.or.kr/kgscode/index.do)에서 확인 가능.

○ KGS AA231 가스용 전기절연이음관 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA331 그 밖의 배관용밸브 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA332 매몰용접형 가스용 볼밸브 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA335 그 밖의 배관용밸브 중 글로브밸브 제조의 시설・기술・검사기준

○ KGS AA632 가스누출경보차단장치 제조의 시설・기술・검사기준



개정 KGS Code(2014. 4. 3.)



# 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

## 가. 목표

| | |
|---|---|
| **연구개발 목표** | ■ 200톤/일(100톤/일 2기)급 테스트베드 구축 |
| | ■ 테스트베드 운전 및 평가 피드백 |
| | ■ LNG플랜트 통합운전환경 구축 |
| | ■ 웹기반 LNG플랜트 유지/보수관리시스템 구축 |
| | ■ LNG플랜트 주요설비에 대한 안전성 평가기준 마련 |

## 나. 연구개발 내용 및 산출성과물

| 연구내용 | | (연계)산출성과물 |
|---|---|---|
| 연구개발내용 | **■ LNG플랜트 건설기술 개발** | |
| | - 테스트베드 설치 부지 조사 및 타당성 평가 | ① 테스트베드부지조사보고서 |
| | - 테스트베드 건설 준비 (법규, 기준, 유틸리티 등) | ② 테스트베드 Train-1 구매<br>③ 테스트베드 Train-1 공사<br>⑤ 테스트베드 Train-2 구매<br>⑥ 테스트베드 Train-2 공사<br>⑩ 시험/평가기준 및 인증체계 |
| | - 테스트베드 구성 기자재 구매, 제작 | ② 테스트베드 Train-1 구매<br>⑤ 테스트베드 Train-2 구매<br>⑩ 시험/평가기준 및 인증체계 |
| | - 핵심 기자재 테스트베드 적용 | ② 테스트베드 Train-1 구매<br>③ 테스트베드 Train-1 공사<br>⑤ 테스트베드 Train-2 구매<br>⑥ 테스트베드 Train-2 공사<br>⑩ 시험/평가기준 및 인증체계 |
| | - LNG플랜트 모듈화 시공체계 개발 | ③ 테스트베드 Train-1 공사<br>⑥ 테스트베드 Train-2 공사 |
| | - 테스트베드 시공 및 시운전 | ③ 테스트베드 Train-1 공사<br>⑩ 시험/평가기준 및 인증체계<br>④ 테스트베드 Train-1 시운전 |

| | | |
|---|---|---|
| | | ⑦ 테스트베드 Train-2 시운전 |
| | - LNG플랜트 공기개선 | ③ 테스트베드 Train-1 공사<br>⑥ 테스트베드 Train-2 공사 |
| | - LNG플랜트 현장 관리기술 개발 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑩ 시험/평가기준 및 인증체계 |
| | **■ LNG플랜트 운영/유지관리 기술개발** | |
| | - 통합운영 환경시스템 구축 | ⑧ LNG플랜트 최적통합운전 환경 시스템 |
| | - 유지/보수 관리시스템 구축 | ⑨ 웹기반 LNG플랜트 유지/보수관리 시스템 |
| | - 통합운전정보관리 및 원격모니터링 시스템 구축 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑧ LNG플랜트 최적통합운전 환경 시스템 |
| | - 유지보수/안전관리 DB 구축 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑨ 웹기반 LNG플랜트 유지/보수관리 시스템 |
| | - 운전지원시스템 개발 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑧ LNG플랜트 최적통합운전 환경 시스템 |
| | - 현장 센서진단 및 보정 시스템 구축 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑧ LNG플랜트 최적통합운전 환경 시스템 |
| | - 운전 최적화 시스템 구축 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑧ LNG플랜트 최적통합운전 환경 시스템 |
| | - 원격모니터링 시스템과 연계된 웹기반 시스템 개발 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑨ 웹기반 LNG플랜트 유지/보수관리 시스템 |
| | - 개발시스템 테스트베드 성능평가 | ④ 테스트베드 Train-1 시운전<br>⑦ 테스트베드 Train-2 시운전<br>⑧ LNG플랜트 최적통합운전 환경 시스템<br>⑨ 웹기반 LNG플랜트 유지/보수관리 시스템 |



### (2) 질적 성과

| 성과목표 | 성과지표 | 목표치 | 검증방법 | 가중치 | 달성도 | 가중 달성도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1) 상용 공정 테스트베드 건설 및 운전 완료 | ① 기자재 구매 | 테스트베드 기자재 구매 | 1.기자재납기확인<br>2.기자재국산화율 | 10% | 100% | 10% |
| | ② 테스트베드 건설 | 테스트베드 1기 | 1.기술검토서승인<br>2.완성검사수검 | 10% | 100% | 10% |
| | ③ 정상 운전 | 정상 운전 48시간 이상 | 1.테스트베드운전기록검토<br>2.테스트베드생상량 확인 | 15% | 100% | 15% |
| 2) 신액화공정 테스트베드 건설 및 운전 완료 | ① 기자재 구매 | 테스트베드 기자재 구매 | 1.기자재납기확인<br>2.기자재국산화율 | 10% | 100% | 10% |
| | ② 테스트베드 건설 | 테스트베드 1기 | 1.기술검토서승인<br>2.완성검사수검 | 10% | 100% | 10% |
| | ③ 정상 운전 | 정상 운전 48시간 이상 | 1.테스트베드운전기록검토<br>2.테스트베드생상량 확인 | 15% | 100% | 15% |
| 3) LNG플랜트 운영 및 관리시스템 개발 | ① 테스트베드 통합운전 시스템 | 테스트베드 통합운전 시스템 1기 | 1.정상작동여부<br>2.운전기록분석 | 10% | 100% | 10% |
| | ② 테스트베드 유지보수 시스템 | 테스트베드 유지보수 시스템 1기 | 1.정상작동여부<br>2.저장데이터확인 | 10% | 100% | 10% |
| | ③ LNG플랜트 KGS-code 및 주요설비 안전성 평가기준 | LNG플랜트 관련법 개정 3건 이상 | 1.KGS관보확인<br>2.테스트베드인허가 획득 | 10% | 100% | 10% |
| 합계 | | | | 100% | - | 100% |

## 나. 연구개발 성과의 기술적 효과분석

**(1) LNG플랜트 시장 상황**

○ LNG 플랜트 건설은 국내 업체들이 한번도 경험하지 못한 분야로써, 해당 분야에 진출하려는 시도는 지속적으로 시도되고 있으나 선진 업체들의 조직적인 방해로 진출이 불가능한 상황이다.

○ 전세계적으로 LNG 사용량은 점차 증가하고 있으며 원유의 대체 에너지로서 그 중요성이 부각되고 있는데 이러한 LNG 시장에 진출하기 위하여서는 기술의 국산화가 반드시 필요한 상황이다.

○ 전략적으로 에너지 자원 확보를 위하여 국내에 LNG 플랜트 분야의 가치사슬과 산업기반이 취약한 관계로 투자비가 큰 연구개발사업에 민간주도의 추진과 사업화에 한계를 가지고 있다.

○ 반면에 우리나라와 여건이 유사한 일본은 전략적으로 에너지확보/해외시장 진출을 위하여 파일롯/데모 플랜트 건설을 정부가 주도적으로 지원하여 자국 기업들이 LNG 시장에 진출하여 성공적으로 안착하였다.

○ 국내 업체는 LNG 플랜트에 참여하기 위하여 다각도로 참여를 추진하나 대량 생산 기술을 가진 업체와의 협업 불가능, 발주처의 신뢰 부족 등의 이유로 참여 자체가 불가능한 상황이다.

○ 본 과제를 통하여 건설 기술 및 운영 기술을 확보하여 해외 발주처의 신뢰를 확보하여 해외 시장에 진출할 수 있는 발판을 마련할 수 있을 것으로 예상된다.

○ 또한 본 과제를 통하여 조달, 시공, 운영의 경험을 축적할 것이며 이를 바탕으로 GS건설 및 국내 관련 업체들의 동반 해외 진출을 이룰 것이다.



## 다. 연구개발 성과의 경제적 효과분석

○ LNG 산업은 수출 위주의 성장 동력 사업이라는 측면과 국가 에너지 지원 확보에 기여하는 전략적 측면이 공존하고 있어 국가경쟁력 강화 측면과 에너지 지원의 안정적 확보에 커다란 기여를 할 것으로 예상됨.

○ 2015년 기준으로 계획된 프로젝트는 600억불 이상으로 한국가스공사가 현재의 소비량(세계 소비량의 15%)을 유지한다고 가정하고 이 양에 대한 LNG 플랜트 공사를 한국에서 수주한다고 가정하면 100억불 정도되는 엄청난 금액임.

○ 본 과제를 수행한 결과, 매년 3~4MTPA 규모의 플랜트 1개 정도씩 수주 한다고 가정하면 매년 50억불 이상 수주할 것으로 기대됨.

○ 현재 세계에서 가장 경쟁력 있는 기술선인 APCI는 EPC 업체와 협업하는 데에 제약이 없으므로, 발주처의 신뢰와 장기 공급 계약자의 신뢰를 얻으면 EPC 시장에 진출할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 따라서, 발주처에게 신뢰를 받을 수 있다면, 장기공급계약자인 한국가스공사와 개발 기술로 LNG 플랜트 시장에 진출할 수 있을 것으로 기대됨.

○ 과제 수행 기간 동안에는 LNG 플랜트 건설 전문가 및 운영 전문가가 양성되었으며 해외 진출 시에는 국산 기자재 업체의 동반 진출 및 건설, 운영 전문가의 동반 진출로 고용 창출 및 외화 획득에 중요한 역할을 할 것으로 예상됨.

○ LNG 플랜트 사업은 다양한 분야의 기술이 종합적으로 융합되어 있는 사업으로서 플랜트 건설은 화공, 건설, 토목, 환경, 전기, 기계 등 분야가 유기적으로 연계됨.

○ 여기에 전형적인 수출 산업에 선진 업체만이 수행하는 분야로써, 외화 획득과 국가 경쟁력 강화에 커다란 기여를 할 것으로 예상됨.

## 라. 연구개발 성과의 정책적 효과분석

○ 본 과제를 통하여 플랜트 건설부터 LNG 장기 공급 계약을 통한 발주 국가와의 밀접한 관계 구축에 기여할 것으로 예상되고 국가적으로는 천연가스 자원의 안정적인 수급에도 기여할 것으로 예상됨.

○ 현재 전세계적으로 자원을 확보하기 위한 경쟁이 매우 치열한 상황임. 이러한 상황에서 천연가스전의 개발을 위하여 필수적인 LNG 플랜트 기술을 보유하고 있는 것은 국가적으로 자원 외교를 하는데 많은 도움을 줄 것으로 예상됨.

○ 특히 개발이 잘 되고 있지 않은 중소 가스전을 보유한 국가와의 협력에 많은 도움이 될 것으로 예상됨. 더욱이 본 과제를 통하여 해외 진출 시, 연관 산업의 동반 진출이 예상되는 만큼 국가에서 전반적인 지원을 하는 것이 반드시 필요함.

○ 해외 LNG 플랜트 사업 참여 기회에 대한 지원 : 한국가스공사에서 장기 공급 계약을 하거나 가스전의 지분 계약을 하는 경우, 당사업에 참여한 업체들의 EPC 참여 기회를 부여할 수 있도록 협상함.

○ 이러한 구도가 성립되기 위해서는 기술선 선정 시부터 독점적으로 기술을 제공하는 기술선들(예,Conocophilips-Becthel)을 제외하도록 유도하는 것이 필요함.

○ 관련 인력 양성 : LNG plant 운영에 대한 전문 인력 양성이 필요함. 본 과제를 통하여 양성된 인력인 대규모 플랜트 수주 시 운영할 수 있는 인력의 일부일 것으로 예상됨. 따라서, 본 과제를 통하여 양성된 인력을 통하여 전문 교육 과정을 만들어 추가로 운영 인력을 양성하여야 함.



# 4. 연구개발성과의 활용 계획 등

## 가. 연구성과 향후 활용방안

**(1) 관련 산업 Test 설비**

○ 본 사업단과제를 통해 개발된 신액화공정의 개선 검증을 위한 Test 시설 뿐 아니라 향후 새롭게 개발 될 LNG액화 공정의 기본 Data제공 및 개조를 통해 Test 설비로 활용 가능

○ 공정개발 이외에도 각종 LNG관련 초저온 기자재를 적용 Test 가능하므로 국내 기자재 개발에 활용

**(2) LNG Plant 교육 설비**

○ LNG Plant 시장에 진출 하고자 하는 국내 업체의 인력 양성을 위한 교육 자료로 활용

**(3) LNG Plant 영업 시설**

○ 해외 LNG Plant 수주 영업 시 Reference 실적으로 활용

○ 각종 국제 행사 및 귀빈 방문 시 국내 기술력 과시를 위한 홍보물로 활용

**(4) 국가 경쟁력 제고**

○ 해외 LNG 플랜트 사업 수주로 고용 창출

○ 프로젝트 수행 시 국산 기자재 적극 활용

○ 가스공사와 연계된 가스전 LNG 프로젝트 진행으로 국내 LNG 공급 안정성 확보

주의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 플랜트기술고도화사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

# 제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 “대용량 LNG 플랜트 설계 및 건설기술 개발”과제(세부과제 “초대용량 LNG 저장탱크 설계기술 개발”)의 보고서로 제출합니다.

2015 . 12 .

협동연구기관명 : 한국가스공사
협동연구책임자 : 윤 인 수
공동연구기관명 : 한국가스안전공사
공동연구책임자 : 김 영 구
위탁연구기관명 : 한양대학교에리카산학협력단
위탁연구책임자 : 하 성 규
위탁연구기관명 : 연세대학교산학협력단
위탁연구책임자 : 임 윤 묵

# 보 고 서 요 약 서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>08가스플랜트D05</td><td>해 당 단 계<br>연 구 기 간</td><td>2009.04.18~<br>2015.12.17</td><td>단 계 구 분</td><td>3단계/<br>3단계</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">플랜트연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위<br>과 제 명</td><td colspan="4">대용량 LNG 플랜트 설계 및 건설기술 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">초대용량 LNG 저장탱크 설계기술 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>윤 인 수</td><td>총연구기간<br>참 여<br>연구원수</td><td>총 : 21명<br>내부 : 8명<br>외부 : 13명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 1,500,000천원<br>기업 : 2,058,876천원<br>계 : 3,558,876천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및<br>소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국가스공사<br>가스기술연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">한국가스공사 외 3개 기관</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">- LNG 저장탱크 사례 및 동향 분석 : 건설사례, 표준, 지침, 기술 개선 사례<br>- 공정 및 용량 분석: 액화플랜트용 저장탱크 공정 분석 / 저장탱크 최적 용량 분석<br>- 대형화 및 용량에 미치는 변수 분석 : 설계조건, 코드의 개선 및 평가<br>- 공정설계 개선방안 수립 및 내부탱크 최적화 설계<br>- 관통파이프 등 요소 개선사항 도출<br>- 단열재 및 계장 분야 신기술 발굴<br>- 특수하중 설계 개선 및 평가 / 파일 및 기초 설계 개선<br>- LNG저장탱크 요소기술 설계 : 관통파이프 등 기계요소 설계개선 및 최적화<br>- 개선사항 검증 및 상용화 : 전기, 배관분야 개선 사항 검증 / 단열재 및 계장 분야 신기술 검증 및 상용화 방안 도출<br>- 외조부 시공법 개선 방안 도출<br>- Roof Rafter Frame구조의 설계 개선, Roof Rafter구조의 설계 최적화<br>- LNG 저장탱크 최적화 표준설계 : 기계, 전기, 배관, 계장, 토목 설계 / 표준설계 도면, 계산서 등 성과품 작성<br>- 국제 공인기관 설계인증 획득, 평가 의견을 반영한 설계 개선<br>- 전용 설계프로그램 코딩 / 설계/시공 검토용 3D 모델링<br>- 물량산정을 통한 경제성 분석</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어<br>(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">LNG 저장탱크, 초대용량, 설계최적화, 수명 평가, 설계인증</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">LNG Storage, Tank,Extra-large Capacity, Design Optimization, Lifetime assessment, Certification of Design</td></tr>
</table>

# 요 약 문

Ⅰ. 제 목

초대용량 LNG 저장탱크 설계 기술 개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

청정연료로 각광받고 있는 LNG는 석유 에너지의 의존도를 낮추고 에너지 사용의 다변화를 위해 1986년 인도네시아로부터 처음 도입된 이래로 산업의 성장과 더불어 그 수요량이 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 최근에는 여러 가지 환경적인 문제의 대안으로 아시아 지역에서 수요 잠재력이 급속히 늘어나고 있으며 신규 가스전 개발에 소요되는 시간을 감안할 때 세계적인 공급부족이 우려되는 상황이다.

천연가스는 석유에 비해 매장량이 풍부하고 환경 친화적이며 사용의 편리성이 뛰어나기 때문에 국내의 천연가스 수요 역시 지속적으로 증가할 것으로 전망되고 있다. 증가하는 수요에 맞춰 신규 LNG 생산설비 확충 필요성도 증가할 것으로 전망되어 대용량 저장설비의 개발의 필요성이 증가하고 있다.

LNG 저장설비의 공사비는 전체 LNG터미널 공사비의 절반 이상을 차지할 정도로 큰 비중을 가지므로 LNG 저장탱크의 대형화와 공사비 절감이 주요 이슈가 되고 있다. LNG 저장탱크의 설계기술이 발전함에 따라 기술적 제약이 완화되면서 시공비용을 절감할 수 있고 부지 이용의 효율성을 증대시킬 수 있는 초대형 LNG 저장탱크의 설계기술 개발이 세계적인 추세가 되고 있다.

국내의 LNG 저장탱크의 설계 및 건설관련 연구는 풍부한 경험을 가지고 있는 시공관련 기술에 비해 주로 극저온재료의 물질관련 연구에 치중해 왔고, 핵심 기반기술 위주의 개발 정책에 따라 부분적으로 취약한 설계분야가 있는 것이 현실이다. 또한, 액화기지내 LNG저장탱크에 대한 설계 경험이 전무한 것도 상대적으로 취약한 부분이라 할 수 있다. 따라서 기존의 국산화한 기술을 활용하는데 그치지 않고 그동안 많은 건설 경험에서 쌓은 노하우를 적극 활용하고 시공 상의 문제점을 감안하여 초대형화시 발생할 수 있는 여러 변수들을 종합해 독자적인 차세대 초대형 LNG 저장탱크 설계기술을 확보하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

- LNG 저장탱크 사례 및 동향 분석 : 건설사례, 표준, 지침, 기술 개선 사례
- 공정 및 용량 분석: 액화플랜트용 저장탱크 공정 분석 / 저장탱크 최적 용량 분석
- 대형화 및 용량에 미치는 변수 분석 : 설계조건, 코드의 개선 및 평가
- 공정설계 개선방안 수립 및 내부탱크 최적화 설계
- 관통파이프 등 요소 개선사항 도출
- 단열재 및 계장 분야 신기술 발굴
- 특수하중 설계 개선 및 평가 / 파일 및 기초 설계 개선
- LNG저장탱크 요소기술 설계 : 관통파이프 등 기계요소 설계개선 및 최적화

- 개선사항 검증 및 상용화 : 전기, 배관분야 개선 사항 검증 / 단열재 및 계장 분야 신기술 검증 및 상용화 방안 도출
- 외조부 시공법 개선 방안 도출
- Roof Rafter Frame구조의 설계 개선, Roof Rafter구조의 설계 최적화
- LNG 저장탱크 최적화 표준설계 : 기계, 전기, 배관, 계장, 토목 설계 / 표준설계 도면, 계산서 등 성과품 작성
- 국제 공인기관 설계인증 획득, 평가 의견을 반영한 설계 개선
- 전용 설계프로그램 코딩 / 설계/시공 검토용 3D 모델링
- 물량산정을 통한 경제성 분석

## Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

- 대용량 저장탱크의 설계 및 시공기술 개발로 기술력 제고와 경쟁력을 향상시킬 수 있음
- 기존 LNG 탱크의 설계 및 시공법과 더불어 설계의 정밀도를 극대화함으로써 최적화되고 경제적인 단면을 도출할 수 있는 기반 기술을 확보
- 해외의 사례 또는 기타 구조물들의 사례로부터 공법 개선방안을 도출하여 LNG 탱크의 공기 및 시공비를 절감할 수 있는 근거를 마련
- 해외 시장으로의 진출시 후발주자로서 요구되는 차별화된 기술력 보유라는 면에서 막대한 기술적 파급효과가 있음
- LNG 탱크 시공, 설계, 해석, 신공법관련 기술, 전문인력 양성, 연구 인프라 구축 등의 면에서 전체적인 기술적 향상 효과가 있음
- 초대용량 LNG 저장탱크 개발을 통한 탱크 건설비 및 운영비를 절감할 수 있음
- 저장탱크 건설부지의 이용효율을 제고하고 저장시설의 용량을 증대시킬 수 있음
- 세계 최대용량 LNG 저장탱크의 개발로 국내기술의 위상을 제고할 수 있음

## Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

- 국내외 주요 사례를 검토하고 보고서 작성
- 액화플랜트 및 인수기지용 공정설계 자료 작성(도면)
- 25만 kl급 이상 LNG 저장탱크에 대한 최적용량 검토하고 변수를 분석하여 보고서 작성
- 저장탱크 설계에 필요한 주요 코드 검토 보고서 작성
- 저장탱크 기본설계 자료 작성
  - 공정, 기계, 토목 분야
  - 도면, 계산서, 사양서 등 작성

## Ⅵ. 연구성과 활용계획

- 초대용량 LNG 저장탱크의 설계 기술을 독자적으로 개발하면 국내 LNG인수기지에서도 적용 가능

- 해외에서 완전히 인정받지 못하고 있는 저장탱크 기술력의 확보로 해외 EPC 공사 수주시 기술력 홍보 효과 및 경쟁력 확보 가능
- 기존 LNG 저장탱크의 설계 및 시공기술과 합하여 비용 최적화와 신공법 적용으로 인한 공사비 절감 가능
- 에너지 확보경쟁으로 불안한 국제사회에서 해외 EPC 분야의 기술력 확보와 사업 진출은 국가적 수익창출 및 국가 에너지 안보에 중요

# S U M M A R Y


I. Title

Development of Design Technology for Super Large-Scale LNG Storage Tank

II. Purpose and need of Development

Since the construction cost of LNG storage facilities takes more than half of total construction cost of LNG terminal, it has been a major issue to reduce construction cost of LNG storage tank by designing bigger tank. Therefore, it is a global trend to develop large scale LNG storage tank to increase the efficiency of the limited site and to reduce the construction cost as the development of design technology alleviates technological limitation.

Although our country have plenty of experiences in construction of LNG storage tanks, domestic researches about the design and construction of LNG storage tank have been stressed on material base, especially on cryogenic materials because of the policy which focused on the development of base technology. Therefore, there is some design area which is considered to be relatively weak. In addition, there is not any design experience of LNG storage tank which is located in LNG liquefaction plant. Thus, it is our aim to develop and secure the design technology of large scale LNG storage tank of next generation considering all the variables imaginable that can be occurred when a large scale LNG storage tank has been built.

III. Contents and scopes of the study

- Analysis of case study and trend of LNG storage tank
- Analysis of process and capacity
- Analysis of variables according to the increase of tank size and capacity
- Improvement and evaluation of design conditions and each codes
- Basic design of LNG storage tank with a capacity of 250,000kl or larger
- Data survey and analysis of core materials and their deteriorating mechanism
- Survey and analysis of life evaluation technologies for the facilities of oversees and domestic nuclear power plant and petrochemical plant
- Establishment of development concept for life evaluation technology of LNG storage tanks

IV. Results of the research & development

- Case study and report preparation

- Process design for LNG liquefaction plant and receiving terminal - Study of optimum capacity of LNG storage tank with more than 250,000kl and analysis of their variables

- Making a report after examining the major codes for design LNG storage tank

- Making basic design of LNG storage tank

  - . Process, Mechanical and civil area
  - . Drawings, Calculation documents etc

- Making reports of survey and analysis for core materials and their deteriorating mechanism

- Making road-map of life evaluation technologies for LNG storage tank

V. Application plan for results of research & development

- Continuous effort to attain patent in and outside of the countries.

- Continue to offer technology instruction by cooperation with related schools

- Establish the standards and technology for life evaluation of LNG storage tank and apply them to life extension and examination interval of LNG storage tanks

# C O N T E N T S


**Chapter 1. Introduction ····· 12**

Paragraph 1. Purpose and need of Development ····· 12

Paragraph 2. Definition, Scope and Characteristics of main technology ··· 14

Paragraph 3. State of domestic & international technology development · 16

Paragraph 4. Plan for Study ····· 22

**Chaper 2. Contents and Results of Study ····· 25**

Paragraph 1. Analysis of examples and trends for LNG storage tank ····· 25

Paragraph 2. Analysis of optimum capacity for LNG storage tank ····· 31

Paragraph 3. optimum Design of Stiffner ····· 36

Paragraph 4. Finite element Analysis of Anchor strips ····· 48

Paragraph 5. Finite element Analysis of Pipe ····· 64

Paragraph 6. optimum Design of Corner Protection ····· 80

Paragraph 7. Analysis of LNG Storage tank with seismic load ····· 111

Paragraph 8. Test for Measuring Deformation of Sub-scale LNG Tank Model ····· 119

Paragraph 9. Improvement of Design Method for Accidetnal load ····· 124

Paragraph 10. Feasibility study of Practical Seismic analysis Method ····· 167

Paragraph 11. Optimum Design for Seismic Load ····· 206

Paragraph 12. Study on Thermal distribution considering Material Properties depending on Temperature ····· 247

Paragraph 13. Analysis for Vehicle Impact Load ····· 278

Paragraph 14. Analysis for impact load and fire Load ····· 304

Paragraph 15. Improvement of Design of Foundation ····· 361

Paragraph 16. Improvement of Construction Method of Outer tank ····· 386

Paragraph 17. Analysis of Outer Tank Behaviour considering Tendon Slip Mechanism according to Temporary Opening existence ····· 403

Paragraph 18. Improvement of Design Method for Roof Frame ····· 431

Paragraph 19. Factors Determining Outer Tank section ····· 444

Paragraph 20. Optimum Design Procedure for Large LNG Tank ····· 452

Paragraph 21. Development of Design Program for LNG storage tank ···· 455

**Chaper 3. Achievement and Effect of Study Object** ····· 459
Paragraph 1. Technical Effect analysis of Achievement ····· 459
Paragraph 2. Economical Effect analysis of Achievement ····· 459
Paragraph 3. Polytical Effect analysis of Achievement ····· 459
Paragraph 4. Target Achievement Rate ····· 461

**Chaper 4. Application of Study ····· 462**
Paragraph 1. Application of Study ····· 462

Reference ····· 464

# 목 차

**제1장 연구개발과제 개요 ····· 12**
1절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 12
2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 13
3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 14
4절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 22

**제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 25**
1절 LNG 저장탱크 사례 및 동향분석 ····· 25
2절 저장탱크 최적용량 분석 ····· 31
3절 좌굴해석을 이용한 스티프너의 구조해석 및 최적설계 ····· 36
4절 앵커스트립의 유한요소해석 ····· 48
5절 관통파이프의 유한요소해석 ····· 64
6절 열전달, 열응력 해석을 이용한 코너프로텍션의 최적설계 ····· 80
7절 지진하중을 받는 LNG 탱크의 구조해석 ····· 111
8절 Sub-scale LNG 탱크 모형의 변형 측정 실험 ····· 119
9절 특수하중(온도/지진 등) 설계 개선 및 평가 ····· 124
10절 특수 지진 해석기법의 적용성 검토에 관한 연구 ····· 167
11절 지진하중에 대한 최적설계기법 타당성 분석 및 기법 정리에 관한 연구 ·206
12절 온도하중에 의한 벽체최적기법 확립을 위한 온도의존적 물성을 반영하는 온도분포에 관한 연구 ····· 247
13절 차량충돌하중을 받는 LNG 외부탱크의 해석적 거동 평가 ····· 278
14절 LNG 저장탱크 외조(outer tank)의 특수하중 (충돌/외부 화재)에 대한 해석적 거동 평가 ····· 304
15절 파일 및 기초 설계 개선 ····· 361
16절 외부탱크 시공법 개선 방안 도출 ····· 386
17절 긴장재의 슬립거동을 고려한 LNG외부탱크 임시 개구부 여부에 따른 해석적 거동 평가 ····· 403
18절 Roof Frame 설계 개선 및 평가 ····· 431
19절 저장탱크 외조 단면결정인자 도출 ····· 444
20절 초대형 저장탱크의 설계기준 작성을 위한 최적 설계기법 작성 ····· 452
21절 LNG저장탱크 설계프로그램 개발 ····· 455

**제3장 연구목표 달성 및 효과 ····· 459**

1절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 459
2절 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 459
3절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 459
4절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 461

**제4장 연구성과의 활용방안** ····· 462
1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 462

**참고문헌** ····· 464

# 1장 연구개발과제 개요

## 1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

LNG로 공급되는 천연가스는 주성분이 메탄가스로서 프로판 가스보다 안정적이고 폭발성이 적으며, 사용의 편리성이 뛰어나기 때문에 국내의 천연가스 수요 역시 꾸준히 증가할 것으로 전망된다. LNG 저장탱크의 대용량화를 통하여 저장용량대비 시공비율을 절감하고 부지의 효유적인 이용 역시 도모할 수 있다. 또한 설계기술과 소재기술의 발전에 따른 기술적 제약의 완화를 통하여 실제로 전 세계적으로 LNG 탱크의 대형화가 추진되고 있다.

일반적으로 LNG는 -162℃를 유지해야 하는데 평상시 상온을 유지하는 외부 탱크의 안쪽 면이 내부 탱크 파괴시 -162℃의 LNG에 의해 극저온에 노출되어 급격한 온도변화로 인한 큰 단면력 또는 응력이 발생하게 되어 균열을 유발하고 수밀성을 저하시킬 수 있다. 따라서 LNG 저장탱크는 일반 토목구조물과 달리, 평상시 -162℃의 초저온 상태를 유지하기 위한 보냉구조뿐만 아니라 LNG 누수시의 비상시에 충분한 기밀성과 안전성 확보가 필요하다. 그동안 국내에서도 극저온재료의 역학적 특성평가에 관한 연구가 실시되어 왔지만 외국에 비하여 초보적인 단계에 머무르는 수준이었으나 LNG 수요가 급증함에 따라 극저온 관련 연구도 점차 활발해지고 있다. 국내의 LNG 저장탱크 시공관련 기술은 지금까지의 많은 건설경험을 바탕으로 세계적인 수준에 도달한 반면, LNG 탱크의 설계는 외국의 기술에 대한 의존도가 높아 LNG 탱크 설계기술의 자립화를 위한 노력이 필요하다. 이에 본 연구에서는 25만 kl급 이상의 대용량 저장탱크의 설계 최적화 기술 및 안전성 평가기술을 개발하였다.

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

○ 개발된 LNG 저장탱크의 대용량화와 설계기술은 극저온 환경에 노출되는 다양한 액화가스 저장시설의 설계와 시공기술에 도입이 가능하다.

○ 냉동식품의 급속한 확산으로 각 제조회사 및 유통기관에서 냉동 저장시설의 증가가 두드러지고 있으며 이러한 시설의 대부분이 콘크리트 구조물로서 약 -40~-50℃의 저온 환경에 노출되고 있다.

나. 경제·산업적 측면

○ LNG 소비량의 계절적 차이를 처리하기 위해 많은 양의 LNG가 저장되어 있어야 한다. 때문에, 인수기지들은 다수의 저장탱크를 보유할 수밖에 없는데, LNG 인수기지 건설시 건설비용을 절감하기 위해서는 건설비의 많은 부분을 차지하는 저장탱크를 경제적으로 건설해야 한다. 저장탱크의 경제성은 내조 9% 니켈, 외조 콘크리트/텐던 및 단열재 물량 등으로 결정되며 대용량일수록 경제적인 것으로 알려져 있다.

LNG 저장탱크의 용량이 증가함에 따라 공사비 역시 증가하지만, LNG 체적당 건설비를 고려할 경우 LNG 저장탱크의 용량이 증가할수록 오히려 공사비가 감소함을 알 수 있다. 100,000㎥급 탱크와 비교하여 200,000㎥급은 20%의 저장용량대비 시공비용 절감 및 40%의 부지효율성 증가 효과를 거둘 것으로 예측된다.

표 1-1. 각종 액화가스의 물리적 성질

| 액화가스 종류 | 비등점(℃) | 체적감소율(배) |
|---|---|---|
| Butane | -11 | 1/240 |
| Ammonia | -33 | 1/950 |
| Propane | -42 | 1/310 |
| Ethane | -89 | 1/430 |
| Methane | -162 | 1/620 |
| Oxygen | -183 | 1/800 |
| Nitrogen | -196 | 1/690 |

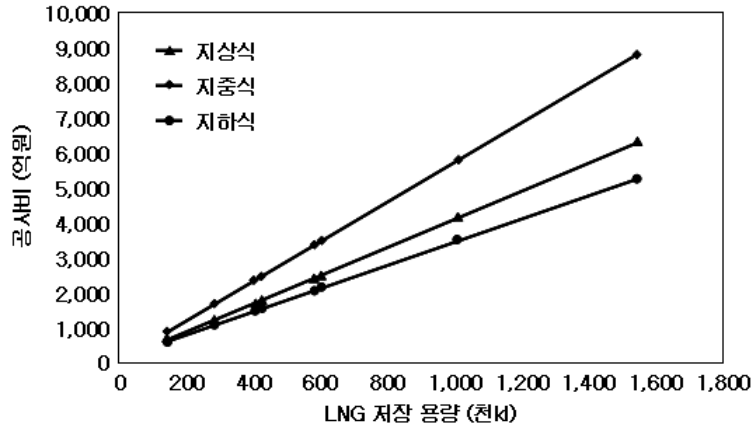



그림 1-1. 천연가스 저장방식 및 규모별 건설비용 추정

○ 천연가스 공급규모 감소율 예측에 따른 비축시스템의 규모를 Monte Carlo 시뮬레이션으로 분석할 경우, 분석기간('06~'35) 사이에 약 1.30백만 톤에서 2.25백만 톤 규모의 천연가스 비축시스템이 필요한 것으로 산정되며, 비축시스템의 운영으로 인한 경제적 기대효과는 10조 9억 원에서 17조 7억 원의 천연가스 공급교란에 따른 피해 회피비용과 3조 4천억 원에서 5조 6천억 원의 소요비용이 발생된다. 이를 통하여 총 7조 5천억 원에서 12조 1천억 원의 순편익 발생을 유도할 수 있다는 것을 알 수 있다.

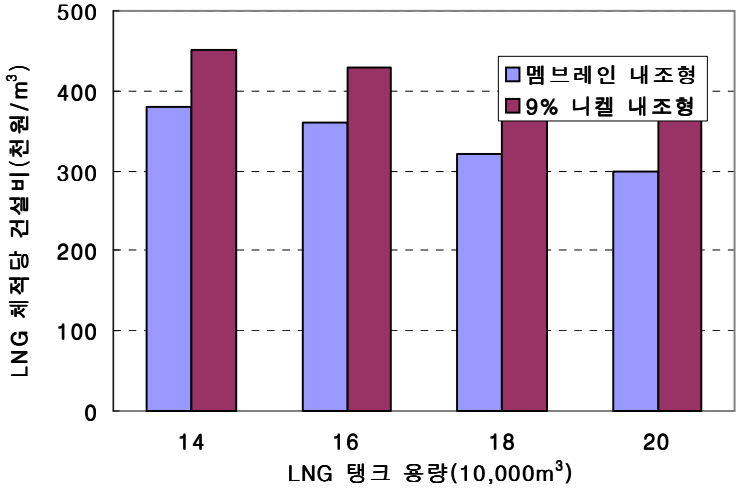



그림 1-2. 대용량 LNG 저장탱크의 시공비절감 효과

## 2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

### 1. 핵심기술 또는 기반기술의 정의 및 범위

가. 정의

LNG 저장탱크는 완전방호식과 멤브레인식으로 크게 구분된다. 멤브레인식에 비해 보다 국제적으로 통용화 되고 있는 완전방호식 LNG 저장탱크는 유럽과 미국의 기술표준에 따라 설계 및 시공되고 있는 기술로서 크게 내부탱크와 외부탱크로 구분할 수 있다.

완전방호식 LNG 저장탱크는 현재 국제적으로 최대용량 20만 kl급을 적용하고 있으나 LNG 선박의 용량 증가, 사업비 절감 및 운영 효율성 증대 등의 사유에 따라 초대용량 저장탱크의 필요성이 점차 증가됨에 따라 25만 kl급 이상의 완전방호식 LNG 저장탱크를 세계 최초로 설계하고자 한다.

나. 범위

LNG 저장탱크는 공정, 기계, 토목, 전기, 계장, 배관 등 거의 모든 엔지니어링 분야가 참여하여 수행하는 종합엔지니어링 설계분야이다. 세계 최대 용량의 LNG 저장탱크의 설계는 기존의 설계방법과 동일한 절차를 거치되 최적화를 위한 과정을 반복적으로 수행함에 의해 경제적이고 효율적인 설계를 수행하는 것이 최대 과제이다.

공정, 전기, 배관 등의 분야는 LNG 저장탱크의 중요부분으로 반드시 검토하고 반영해야할 부분이나 14만 kl급부터 20만 kl급에 이르는 과정에서 이미 상당부분 설계 최적화가 진행되었고 용량의 변화에 따른 설계개선부분이 크게 발생하지 않을 것으로 보인다. 결국 용량의 변화에 따른 설계 검토는 주로 기계설계분야와 토목설계분야에 집중될 것이다.

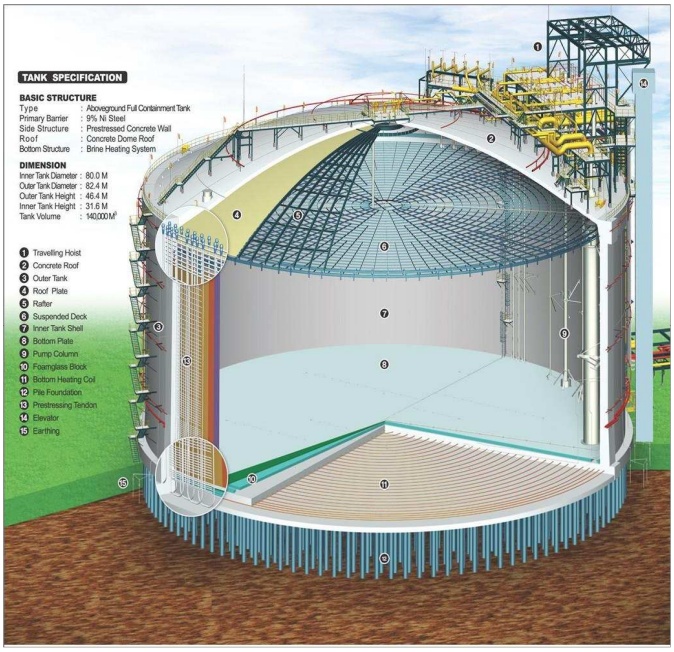



그림 1-3. 완전방호식 LNG 저장탱크의 구조

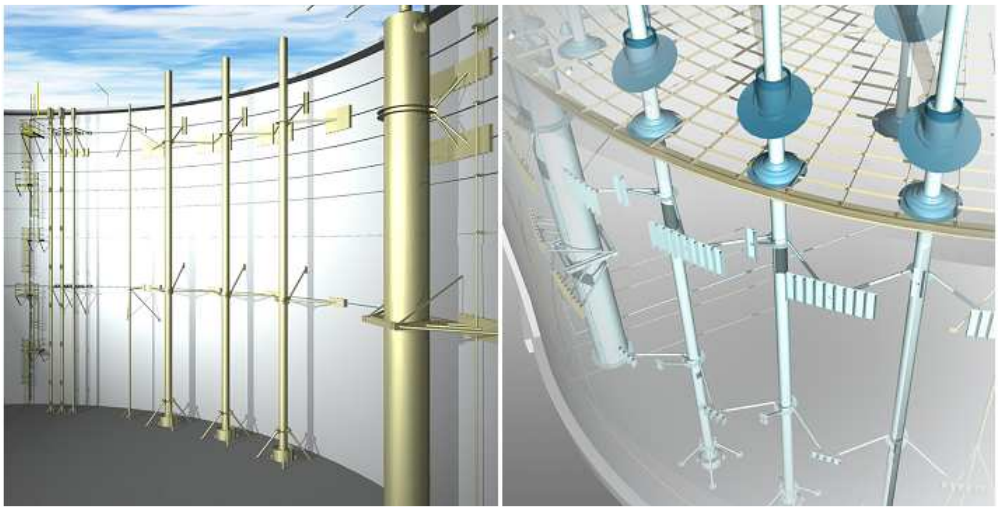


그림 1-4. LNG 저장탱크용 관통파이프

기계설계는 주로 내부탱크의 주요 부분에 대한 최적화로 진행될 것이다. 최적용량 결정, 코너 프로텍션 및 관통파이프의 최적화 등이 주요핵심 설계대상이다. 최적용량의 결정이 내부탱크 설계에 있어 가장 핵심적인 부분으로 향후 전체적인 설계 방향에 가장 큰 영향을 미치며 본 프로젝트의 성패에 결정적인 요소로 작용하게 된다.

토목설계는 기존의 설계방법과 동일한 과정을 거치게 될 것이나 용량의 증대에 따른 벽체 단면 최적화 및 시공방법, 지붕 콘크리트 두께 및 시공방법 등이 주요 설계항목으로 검토될 것이다. 특히 대용량화에 따른 벽체시공방법은 기존의 시공방법을 탈피하여 시공기간을 개선하고 공사비를 절감할 수 있는 방안을 찾아 설계에 반영하는 것이 가장 핵심적인 부분이다.

## 3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

### 1. 해외 관련기술 및 시장 동향

#### 가. 해외 기술 동향

국내 LNG 저장탱크가 대용량화에 중점을 맞춘 것에 비해 국외 설계사는 특수 LNG 저장설비에 대해 주로 기술개발을 추진하고 있는 추세로서, LNG 선박을 응용한 해상 LNG 저장설비, 이중 콘크리트 저장설비, 지하암반 LNG 저장설비 등의 연구가 진행되고 있거나 상용화되어 있다.

LNG 저장탱크의 특수성에 의해 활발하게 LNG 저장탱크를 건설 중인 미국과 일본 등은 자국의 설계사가 대부분의 사업을 수행하고 있는 추세이므로 주요 설계사가 없는 국가인 중동, 호주, 동남아, 남미, 러시아, 스페인 등의 시장이 전략적 목표 대상이 될 수 있을 것이다. 이들 지역의 LNG 저장탱크는 LNG 터미널에 약 2기 내외의 LNG 저장탱크를 건설하는 것이 일반적인 사례로서 연간 발주량을 약 2~3기 정도로 판단할 수 있다.

##### (1) 현황

LNG 저장탱크에 대한 설계 기술은 시공 기술과 병행하여 발전하고 있다. 동시에 여러 기를 같이 시공하는 국내의 경우와는 달리 해외 플랜트는 대부분 1기 또는 2기를 건설하는 경우가 대부분으로 이에 따른 시공 과정 또한 차이를 보이고 있다. 또한 계절적인 요인 등에 의해 외부탱크 벽체를 한번에 시공하는 Slip Form 공법을 국내에 적용이 어려운 반면 최근 해외 플랜트에서는 대부분 적용하고 있는 실정이다. 또한 국가별로 안전성 기준이 다소 차이를 보이고 있고 법규가 다르기 때문에 기술 적용 방법에 차이가 있는 것이 현실이다.

기계분야 설계에 대해서는 대부분 대동소이하나 세부적인 기술 적용 차이가 전체 경제성에 미치는 영향을 무시할 수 없는 요소에 대해서는 개별적으로 최적화 기술을 보유하고 있다.

LNG 저장탱크에 대한 국제 특허는 이미 오래전에 시효가 만료되었거나 이미 국제기준에 반영되어 있는 상태이다.

##### (2) 기술예측

본 과제의 연구개발에 따라 세계 최대용량의 LNG 저장탱크 설계기술을 확보하게 되며, 세부적으로 설계 기술의 최적화에 의한 국제 경쟁력을 보다 향상 시킬 수 있을 것이다. 이미 전 세계적으로 선진국들이 보유하고 있는 기술이 대동소이한 상태에서 기술적 우위와 경제성 확보를 바탕으로 진입장벽을 허물고 해외 플랜트 수주에 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

#### 나. 해외 시장 동향

##### (1) 현황

최근 5년간 LNG 저장탱크 분야는 그 이전과 마찬가지로 꾸준하게 성장을 지속하고 있는 분야이다. 2009년 실적에 대한 집계는 아직 예상할 수 없으나 향후 5~10여 년간의 추세도 2008년의 규모를 유지할 것으로 판단할 수 있다.

표 1-2. LNG 저장탱크에 대한 국제 특허 현황

| 세부기술 | 업체명(국적) | 보유 기술 또는 특허 | 기술 수준 |
|---|---|---|---|
| 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 | CB&I (미국) | 단일방호식, 이중방호식, 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 18만 kl급 이상 실적보유 | 18만 kl급, 100% |
| | TKK, KHI, IHI 등 (일본) | 멤브레인식, 단일방호식, 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 18만 kl급 이상 실적보유 | 18만 kl급, 100% |
| | Whessoe (영국) | 단일방호식, 이중방호식, 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 14만 kl급 이상 실적보유 | 14만 kl급, 100% |
| | Technigaz (프랑스) | 멤브레인식, 단일방호식, 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 14만 kl급 이상 실적보유 | 14만 kl급, 100% |

표 1-3. LNG 저장탱크 분야의 해외 시장 동향(최근 5년)

(단위 : 억원)

| 구 분 | | 연도별 시장 규모 | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2004년 | | | 2005년 | | | 2006년 | | | 2007년 | | | 2008년 | | |
| | | 설계 | 시공 | 소계 | 설계 | 시공 | 소계 | 설계 | 시공 | 소계 | 설계 | 시공 | 소계 | 설계 | 시공 | 소계 |
| LNG 저장 탱크 | 미국 | 50 | 1,000 | 1,050 | 50 | 1,000 | 1,050 | 100 | 2,000 | 2,100 | 100 | 2,000 | 2,100 | 120 | 2,000 | 2,100 |
| | 동남아 | 100 | 2,000 | 2,100 | 100 | 2,000 | 2,100 | 150 | 3,000 | 3,150 | 150 | 3,000 | 3,150 | 150 | 3,000 | 2,100 |
| | 유럽 | 50 | 1,000 | 1,050 | 50 | 1,000 | 1,050 | 100 | 2,000 | 2,100 | 100 | 2,000 | 2,100 | 120 | 2,000 | 2,100 |

프랑스의 GdF는 Oxand SA의 원자력 수명평가기술을 기반으로 하는 시스템으로 1970년대 초에 건설된 저장탱크를 대상으로 수명평가를 통해 수명연장을 실시한 바 있다.

일본도 동경가스의 노후 탱크에 대해서 정부기관과 협력하여 수명평가를 실시하고 지속사용 가능여부를 진단한 사례가 보고되고 있다.

미국의 경우도 탱크설계 전문회사인 CB&I 연구소 등을 중심으로 탱크의 수명평가 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

(2) 시장예측

국내 시장과 마찬가지로 LNG 저장탱크는 터미널 기본설계 초기부터 저장용량을 결정한 상태에서 사업 추진이 이루어지므로 25만 kl급 LNG 저장탱크에 대한 시장 전망을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 해외 대용량 LNG 저장탱크에 대한 실질적인 성과를 얻기 위해서는 우선적으로 본 연구과제의 적절한 국내외 홍보를 통해 25만 kl급 LNG 저장탱크의 경제성과 안전성을 각국의 사업주에게 각인 시키려는 노력이 필요하다. 설계기술을 마무리하고 국제 컨퍼런스 등을 통한 2~3년간의 국제적 검토 기간이 지나야만 공감대가 형성되어 사업이 가능할 것이다.

개발된 기술의 해외 시장 진출 방안으로는 우선 국제적인 홍보가 선행되어야 하며 이를 통

해 각국의 사업주가 초대용량 LNG 저장탱크 사업을 수행할 수 있도록 가능성을 확보하는 것이 우선적으로 필요하다. 기술 개발을 선점한 국내 기술은 이러한 사업에 참여할 경우 외국 설계사에 비해 상대적으로 경험과 설계능력에서 좋은 평가를 받을 수 있고 는 결국 사업화의 가능성을 높이는 계기가 될 것이다.

## 2. 국내 관련기술 및 시장 동향

### 가. 국내 기술 동향

LNG 저장탱크 관련기술은 크게 설계기술과 시공기술로 구분할 수 있으며, 시공기술의 경우 국내 LNG 저장탱크 도입 초기부터 국내 건설업체의 적극적인 참여와 기술개발로 국제 경쟁력을 갖춘 수준에 올라 있다고 볼 수 있다. 시공기관 또한 대부분의 대형건설업체 모두가 실적을 보유하고 있을 정도로 다양한 것도 특징이라 볼 수 있다.

그러나 설계기술의 경우 LNG 저장탱크를 20여기 이상 건설한 후에 국산화 기술이 개발될 정도로 상대적으로 상당히 뒤쳐진 것은 국제적으로 기술 공개를 기피하는 분위기와 함께 실적이 동반되지 못하면 인정받을 수 없는 에너지 업계의 관행이 큰 요인이라 할 수 있다. 한국가스공사가 Pilot LNG 저장탱크라는 소규모 LNG 저장탱크를 설계, 시공한 후에 국내 LNG 저장탱크 설계에 참여했다는 것도 이러한 이유에서 비롯된 것이다.

14만 kl급 LNG 저장탱크인 통영 6호기를 시작으로 국내 기술로 LNG 저장탱크를 설계한 이후에는 광양 LNG 터미널에 영국의 Whessoe사가 10만 kl급 LNG 저장탱크 2기를 설계 수행한 것을 제외하고는 더 이상 외국 기술에 의한 설계가 국내에 진입할 수 없었다. 최근에 광양 LNG 터미널의 16만 kl급 LNG 저장탱크가 순수 국내 설계기술로 시공 중인 것은 실질적인 설계, 시공비에서 국내 기술이 충분한 경쟁력을 갖춘 것으로 판단할 수 있는 좋은 사례라 할 수 있다.

(1) 세부기술별 국내 주요업체 현황

표 1-4. 세부기술별 국내 주요업체 현황

| 세부기술 | 업체명 | 보유 기술 또는 특허 | 최고기술 보유기관 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 | 한국가스공사 | LNG 저장탱크 기본 및 상세설계(멤브레인식 및 완전방호식) | 20만 kl급, 100% | |
| | 한국가스기술공사 | LNG 저장탱크 상세설계 (완전방호식) | 20만 kl급, 100% | |
| | 다산컨설턴트 | LNG 저장탱크 토목설계 | 20만 kl급, 100% | |
| LNG 저장탱크 시공 | 디에이치아이 | LNG 저장탱크 기계분야 시공 | 20만 kl급, 100% | |
| | 국내 주요 대형 건설사 | LNG 저장탱크 종합 시공 | 20만 kl급, 100% | |
| 단열재 | 한국가스공사<br>화인텍<br>한국화이바 | 한국가스공사의 소재 개발 연구를 통해 PUF 단열재 등을 국산화하였고, 국내 기업에서 자체기술 또는 | 100% | 단열재 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 한국가스공사로부터 기술을 이전받아 생산하고 있음. | | |
| 강판 | POSCO | 9% Ni강판(후판) 및 STS강판(박판)의 경우 현재 POSCO에서 개발한 강판을 사용하고 있음. | 80% | 강판 (9%Ni, STS) |
| 건설(시공) | 대우건설<br>대림건설<br>삼성건설<br>LG건설<br>대아건설 등 | LNG 시공실적은 대우건설과 대림산업이 수주수량에 있어 가장 많음.<br>대우건설의 경우 멤브레인식과 9%Ni강식에 대한 시공 실적과 기술을 보유하고 있음. | 100% | 건설 (시공) |
| 운전 | 한국가스공사 (3개 기지, 44 탱크)<br>POSCO (1개 기지, 2 탱크) | 한국가스공사에서는 1980년대 후반부터 LNG 인수기지를 운전해오고 있어 풍부한 유지관리 기술을 확보하고 있고, POSCO 등 대형소비자 및 발전사 등에 기술을 이전하고 있음. | 100% | 운전 (운영) |
| 검사(감리) | 한국가스안전공사<br>한국가스기술공사 | 특정설비로서 한국가스안전공사에서 설계기술 검토, 전 시공공정에 대한 주요 시험 및 검사를 수행하고 있음.<br>최근 설계기술을 확보한 한국가스기술공사에서 설계에 대한 제3자 시공감리를 수행하고 있음 | 90% | 검사 (감리) |

(2) 세부기술별 국내 전문가 및 연구기관 현황

표 1-5. 세부기술별 국낸 전문가 및 연구기관 현황

| 세부기술 | 전문가 | 소속기관 | 기술개발현황 | 해외의 최고 기술보유기관 |
|---|---|---|---|---|
| 저장탱크 설계 | 양영명 | 한국가스공사 | LNG저장탱크, LNG 터미널, LNG 선박 | CB&I 등 |
| | 윤인수 | 한국가스공사 | LNG저장탱크, LNG 터미널, LNG 선박 | CB&I 등 |
| | 이상협 | 한국가스기술공사 | LNG저장탱크 종합 설계 | CB&I 등 |
| | 김국현 | 다산컨설턴트 | LNG저장탱크 토목 설계 | CB&I 등 |
| 저장탱크 시공 | 구익서 | 디에이치아이 | LNG저장탱크 기계 분야 시공 | |

(3) 세부기술별 국내 전문가 및 연구기관 현황

LNG 저장탱크의 설계 및 시공은 이미 국제적인 경쟁력을 갖추고 있는 수준이나 후발주자로서 국제적인 홍보와 사업 인프라가 부족한 상화이다. 따라서 본 기술 개발 결과에 따른 기술력 홍보를 통해 사업 참여 기회가 확대 될 것으로 기대된다.

표 1-6. 국내 현 기술수준 및 기술개발 완료 후 기술수준 예측

| 세부기술 | 현재 기술수준 | | | 기술개발 완료시 국내 기술수준 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 기술 수준 (%) | 기술 격차 (년) | 비고 | 기술 수준 (%) | 기술 격차 (년) | 비고 |
| LNG저장탱크 기본설계 | 100 | 0 | | 100 | 0 | 경쟁 단계 |
| LNG 저장탱크 상세설계 | 100 | 0 | | 100 | 0 | 경쟁 단계 |

(4) 국내연구 인프라 수준

국내 LNG 저장탱크 분야는 세계적으로 가장 활발하게 건설이 진행되는 곳으로서 설계 및 시공에 대한 인프라는 이미 갖추어져 있다고 볼 수 있다. 다만, 해외 설계 경험이 부족하여 다양한 경험을 가지고 있지 못한 점에 의해 안전성 평가 분야에 대해 기술 수준이 취약한 것이 현실이다.

가. 국내 시장 동향

(1) 현황

LNG 저장탱크는 국내의 경우 한국가스공사와 POSCO가 보유하고 있을 뿐이며, 최근 5년간 기본 설계의 경우에는 한국가스공사가 모두 수행하였고, 상세설계의 경우에는 한국가스기술공사가 모두 수행하였다. 배관, 계장 등 분야별 설계의 경우에는 중소기업 다수가 설계 실적을 보유하고 있으나 종합설계사는 한국가스공사와 한국가스기술공사만이 보유하고 있다.

저장탱크 시공의 경우에는 기계분야는 디에이치아이와 같은 전문시공사가 실적을 보유하고 있으나 종합시공 측면에서는 국내 대다수의 대형건설사가 모두 실적을 가지고 있을 정도로 인프라가 구축되어 있다.

최근 5년간 국내 LNG 저장탱크는 POSCO 1기를 제외한 10여기가 모두 한국가스공사에 설치되고 있으며, 향후 5년간의 추이를 예상할 때 동일한 결과를 보일 것이다.

한국은 세계 2위의 LNG 수입국이고 또한 LNG 저장탱크 보유국이다. 2007년 기준 총 44기의 LNG 저장탱크가 운전 중에 있고 향후에도 에너지 안보 측면에서 지속적인 기지 및 탱크 건설이 예상된다.

세계적으로 LNG 저장탱크 건설 현황을 살펴보면 약 400여기의 LNG 저장탱크가 운전 중에 있다. 초기 8만 kℓ급 단일방호식 저장탱크에서 최근에는 안전성이 높은 완전방호식 20만 kℓ급 탱크로 용량 및 수량 면에서 지속적인 증가를 보이고 있다.

(2) 시장예측

한국가스공사의 삼척 LNG 인수기지에 적용하는 것 이외에 향후 5년간 27만 kl급 초대용량 LNG 저장탱크 적용은 어려운 실정이다.

설계 프로그램의 경우에는 소형 LNG 기지 또는 광양 POSCO LNG 터미널 추가 탱크에 적

용할 가능성이 있다.

10년 이후의 시점에는 한국가스공사의 제5기지 건설 또는 기지 확장을 통해 27만 kl급 초대용량 LNG 저장탱크 적용이 가능하다.

표 1-7 국내 LNG 저장탱크 운전 현황(2007년 기준)

| 기 지 | 탱크수 | 내부탱크/외부탱크 | Dike | 위치 | 용량 (kℓ) | 설계사 | | 시공사 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 기계 | 토목 | | |
| KOGAS 평 택 (14기) | 10기 | Mem./ P・C | Yes | 지상 | 10만 | TGZ | TGZ | 한양 | 운전중 |
| | 4기 | 9%Ni/ P・C | No | 지상 | 14만 | KGM | KGM | 대림 | 운전중 |
| KOGAS 통 영 (10기) | 10기 | 9%Ni/ P・C | No | 지상 | 14만 | KHI TKK | Obayashi Diwidag | 대우 대림 | 운전중 |
| KOGAS 인 천 (18기) | 10기 (#1～10) | 9%Ni/ P・C | Yes | 지상 | 10만 | TKK | Diwidag | 대림 대우 | 운전중 |
| | 2기 (#11,12) | Mem./ R・C | No | 지중 | 14만 | MHI | Kajima | 현대 한양 | 운전중 |
| | 6기 (#13～18) | Mem./ R・C | No | 지중 | 20만 | IHI KHI | Taisei Obayashi | 대우 삼성 한양 | 운전중 |
| POSCO 광 양 (2기) | 2기 | 9%Ni/ P・C | No | 지상 | 10만 | KGM | KGM | 대림 | 운전중 |
| 계 | 총 44기 | | | | | | | | |

표 1-8 LNG 저장탱크 건설 현황 및 향후 전망

| 운영기관 | 기지명 | 탱크 크기 (kl급) | 탱크 수 | 탱크 형태 | 현 상태 | 설계 구분 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 한국가스공사 | 평택기지 | 10만 | 10 | 지상식 멤브레인형 | 운영중 | 외국 기술 |
| | | 14만 | 4 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| | | 20만 | 9 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| | 인천기지 | 10만 | 10 | 지상식 완전방호식 | 운영중 | 외국 기술 |
| | | 14만~20만 | 8 | 지중식 멤브레인형 | 운영중 | 외국 기술 |
| | | 20만 | 2 | 지중식 멤브레인형 | 건설중 | 부분 국내 기술 |
| | | 20만 | 3 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| | 통영기지 | 14만 | 5 | 지상식 완전방호식 | 운영중 | 외국 기술 |
| | | 14만 | 7 | 지상식 완전방호식 | 운영중 | 국내 기술 |
| | | 20만 | 4 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| | | 14만 이상 | 1 | 지상식 완전방호식 | 예정 | |
| | 삼척기지 | 20만 | 9 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| | | 27만 | 3 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| 포스코 | 광양기지 | 10만 | 2 | 지상식 완전방호식 | 운영중 | 외국 기술 |
| | | 16만 | 1 | 지상식 완전방호식 | 건설중 | 국내 기술 |
| | | 16만 | 1 | 지상식 완전방호식 | 예정 | |

## 4절 연구수행 전략 및 방법론

1. 세부핵심기술 또는 세부기반기술의 상관관계

LNG 저장탱크는 공정, 기계, 토목, 배관, 전기, 계장 등 다양한 엔지니어링 업무를 추진하므로 각 기술의 진행에 있어 상호 조화를 이루어야 한다. 기본적인 개념을 설정하는 공정설

계는 이미 14만 kl급과 20만 kl급 LNG 저장탱크 설계에서 상당한 진척이 있었으나 초대용화에서 발생하는 문제를 최소화하고 기계 및 토목설계의 원활한 추진을 위해서는 정확하고 향후 수정 사항이 발생하지 않도록 꼼꼼한 검토가 필요하다.

기계설계는 공정설계를 바탕으로 설계 초기 단계에 기본틀을 설정하는 분야이다. 물론 토목설계 등 타분야 설계에 따라 조정되는 부분이 있기는 하지만 기본적으로 내부탱크 설계는 탱크 전체 설계에서 파급효과가 큰 부분이다.

토목설계는 시공 첫 단계이나 설계에서는 마지막 단계라고 볼 수도 있다. 타분야 설계 자료를 바탕으로 마지막에 최종 검토를 수행하는 부분이 상대적으로 많다. 따라서 타분야 설계 조건이 제대로 설정되지 않는다면 전체적인 설계일정에 지장을 초래할 수 있다.

기타 전기, 계장, 배관 설계는 독자적인 수행이 가능한 부분이 있는 반면 타분야와 긴밀하게 연계되어 수행되는 부분도 있다.

LNG 저장탱크 설계에 있어 기본적인 핵심기술인 기계설계 및 토목설계라는 것은 맞지만 공정, 전기, 계장, 배관 등 기타 설계 부분이 서로 융화되어 설계 최적화를 이루는 것이므로 상호 연계하여 추진하는 것이 바람직하다.

2. 세부핵심기술 또는 세부기반기술의 비전

LNG 저장탱크의 설계는 총저장량 기준 20만 $m^3$급을 국내 기술만으로 설계/시공할 만큼 국제적인 경쟁력을 갖추고 있으나 해외 적용실적이 전무하고 날로 대형화하는 국제 시장 추세에 부응해야 할 필요성, 그리고 액화플랜트용 LNG 저장탱크에 대한 설계기술을 100% 확보하지 못한 점 등에 의해 기술 개발의 필요성이 중요한 부분이다.

LNG 저장탱크의 경우 특허를 가진 액화공정과는 달리 국제적 규격 및 코드에 따라 설계하고 안전성이 확보될 경우 시공 기술과 접목하여 원가 경쟁력을 갖추기만 한다면 충분히 국제 EPC 턴키 시장에 진출 할 수 있는 기회를 창출 할 수 있다.

3. 단계별 기본 추진전략

초대용량 LNG 저장탱크 설계 기술 개발과제는 3단계 5차년에 걸쳐 연구개발이 수행된다. 1단계에서는 대용량 LNG 저장탱크의 설계기반을 구축하고, 2단계에서는 대용량 LNG 저장탱크의 설계 및 최적화 모델을 제시하며, 최종적으로 3단계에서 토목/기계 통합 설계 프로그램을 구축하고, 전문기관의 인증을 확보하는 것을 목표로 하고 있다.

1단계는 초대용량 LNG 저장탱크의 자료조사, 요소기술 확보 등을 통한 대용량 LNG 저장탱크의 설계 기반기술을 구축하는 단계이다. 1차년도에서는 주로 기계분야의 코너 프로텍션, 관통파이프 및 스티프너 관련 논문, 특허 및 기술 자료의 조사 및 분석을 통해 해당기술의 동향 분석 및 기술 확보 방안을 검토한다. 토목분야의 경우 신개념 시공 방안 수립을 최우선 목표로 추진할 것이다. 또한 대용량 LNG 저장탱크의 주요 설계 요소들의 조사 및 분석을 바탕으로 설계인자를 설정하고 효율적인 설계안 제시를 위한 구조 최적화 기법을 구축하는 것이 목표이다.

2단계에서는 이러한 기반기술을 바탕으로 기계분야의 경우 초대용량 LNG 저장탱크의 핵심설계 요소인 코너 프로텍션(2차년도), 관통파이프 및 스티프너(3차년도)의 설계인자를 최종

결정하여 구조 최적화 모델(안)을 도출하고, 기존 설계의 개선 및 새로운 모델을 창출한다. 토목분야의 경우 특수하중조건에 대한 설계개념을 정립하고 시공 개선방안에 대한 최종 정립이 주 대상 목표로 설정되어 있다. 또한 우선 사업화 전략에 따라 최적화가 미반영된 기본설계 자료를 전 분야(공정, 기계, 토목, 전기, 배관, 계장, 안전)에 걸쳐 성과물로 작성할 예정이다.

3단계에서는 대용량 LNG 저장탱크의 토목/기계 통합설계 프로그램을 개발하고(4차년도), 국제 공인기관의 인증을 획득한다(5차년도). 외부 프로그램 개발 업체와 원활한 협조를 통해 기계분야 인터페이스를 구축하여 코너 프로텍션, 관통파이프 및 스티프너의 설계 기술이 토목분야의 기술과 잘 접목되도록 한다. 이러한 통합 프로그램을 통해 국제 공인기관의 인증 획득 시 필요한 여러 설계안이나 구조해석 결과에 대해 체계적이고 빠르게 대응해 나아가고자 한다.

# 2장 연구개발 수행 내용 및 결과

## 1절 LNG 저장탱크 사례 및 동향분석

LNG 저장탱크는 1960년대 저온액화가스를 저장하기 위한 지상식 강재저장탱크가 건설되기 시작한 것이 그 시초라고 할 수 있다. 이 시기에는 주로 1만 kℓ 내외의 탱크가 제작되었으나 1970년대로 넘어오면서 3만에서 8만 kℓ로 용량이 증대되었으며, 특별한 경우, 10만 내지 15만 kℓ의 용량을 가진 탱크가 건설되기도 하였다.

이러한 발달 과정을 거친 LNG 저장탱크는 크게 두 세대로 구별할 수 있다. 먼저, 1977년까지 지어진 형식으로 액체를 저장하는 저장탱크 주변에 방류둑을 설치하는 단일방호식 탱크(single containment tanks)를 1세대로 보며 1차적인 액체저장용기 외에 저장시설의 누출 및 손상시 액화저장물이 주변으로 유입 되는 것을 방지를 위하여 인접한 위치에서 2차 저장용기로 감싸안은 구조의 이중방호식탱크(double containment tanks) 그리고 탱크내의 2차 저장용기가 유출되는 액화저장물의 중간 차단성 및 증발가스에 대한 기밀성을 모두 지닌 완전방호식탱크(full containment tanks)를 2세대로 볼 수 있다. 전술한 내용을 아래의 표 8에 나타내었다.

즉, LNG 저장탱크는 단일방호식, 이중방호식 및 완전방호식으로 나눌 수 있으며, 이중 완전방호식이 가장 발전된 형태로 볼 수 있다.

대체로 1970년대 후반까지는 단일방호식이 1970년대 중반~1980년대 후반까지는 이중방호식이 꾸준히 건설되었다. 주로 1980년대 중반부터 건설되기 시작한 완전방호식은 우수한 안전성 및 9% Ni의 제작기술 발전 등에 힘입어 이후 지상식 LNG 탱크의 대용량화를 주도하고 있다. 또한, LNG 저장탱크는 설치 위치에 따라 지상식(above-ground type), 지중식(in-ground type), 그리고 지하식(under-ground type) 등으로 나뉠 수 있다.

표 2-1-1. LNG 저장탱크 발전 단계 및 적용 기준

| **1세대**<br>(1960 ~ 1976/77)<br>: 단일방호식 탱크 | | **2세대**<br>(1976/77 ~ 현재)<br>: 이중 및 완전방호식 탱크 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BS 4741<br>(1971) | - Single Wall Tank<br>(-50℃이하) | EEMUA<br>147<br>(1986) | ➡ | BS 7777<br>(1993)<br>BS 8110<br>(1997) | ➡ | EN<br>1473<br>(1996)<br>(2007) | ➡ | EN<br>14620<br>(2006) |
| BS 5387<br>(1976) | - Double Wall Tank<br>(-196℃이하) | | | | | | | |

1. LNG 저장탱크 발전에 따른 설계기준 개발 과정

가. 유럽의 설계기준 발전 과정

1964년 세계 최초의 LNG 상업무역이 시작된 이후 LNG 저장탱크의 발달이 본격화되었는데 1976~1977년까지는 단일방호(single-containment) 형식의 1세대 탱크가 주류를 이루었다. 이에 따라 영국을 중심으로 한 유럽에서는 저온액화가스 저장탱크(단일방호식 탱크)를 위한 기준이 제정되었는데 1971년 BS 4741(저온용 수직원통형 강재용접저장탱크를 위한 사양서)과 1976년 BS 5387(저온용 수직원통형 용접저장탱크를 위한 사양서)이 제정되어 이들 기준이 당시의 탱크 건설의 표준 역할을 하였다. 그러나 1977년 카타르에서 단일방호식 액화프로판 저장탱크가 취성에 의해 손상된 사고가 발생한 이후 이중 및 완전방호식 탱크 시스템의 2세대 탱크가 등장해 일반적으로 건설되기 시작하였다. 이러한 시대적 흐름속에 이중 및 완전방호식 탱크에 대한 기준의 필요성이 절실히 대두되었고 1983년에 런던에 EEMUA(the Engineering Equipment and Materials User's Association)가 조직되었다. 이들의 연구하에 1986년 EEMUA 147(저온액화가스저장탱크의 설계시공지침)이 제정되어 단일, 이중 및 완전방호식탱크에 대한 유럽 최초의 기준역할을 담당하게 되었다. 영국의 BSI에서는 1993년에 이미 제정된 EEMUA 147을 근간으로 기존의 BS 4741과 BS 5387을 대체할 새로운 기준 BS 7777(저온용 평저, 수직원통형 저장탱크)을 제정하였다. 그러나 BS 7777은 저장탱크 대형화 설계에는 많은 제약을 규정하고 있어 새로운 합리적인 기준을 제정하기 위한 작업이 CEN/TC 265에서 이루어지고 있으며 현재는 EN 14620의 제정이 완료되어 BS 7777을 대체할 것으로 예상된다. 한편, EU에서는 유럽의 단일 시장화와 세계시장의 효과적인 공략의 필요성이 제기되면서 1996년 9월에 미국의 NFPA 59A와 같은 안전에 관한 사항들을 위주로 LNG 터미널 시스템에 대한 사항들을 전반적으로 규정한 유럽 공통의 기준안 EN 1473(LNG용 시설 및 설치)을 포괄적으로 완성하여 전 유럽국가에서 쓰여질 수 있는 기준안을 마련하였다. 유럽 기준안인 EN 1473은 설계보다는 LNG의 운영체계에 관련된 안전성 위주로 작성되어있다. LNG 관련 유럽의 선진가스기술을 기반으로 유럽 공통의 단일안의 개발을 통하여 개방화와 경쟁 추구로 세계시장을 확보하고자 노력하고 있다.

(1) 1세대 설계기준

- BS 4741 : 저온용 수직원통형 강재용접저장탱크를 위한 사양서(1971)

Specification for vertical cylindrical welded steel storage tanks for low temperature service : single wall tanks for temperatures down to -50℃

- BS 5387 : 저온용 수직원통형 용접저장탱크를 위한 사양서(1976)

Specification for vertical cylindrical welded storage tanks for low temperature service : double wall tanks for temperatures down to -196℃

(2) 2세대 설계기준

- EEMUA 147 : 저온액화가스저장탱크의 설계시공지침(1986)

Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks

- BS 7777 : 저온용 평저, 수직원통형 저장탱크(1993)

Flat-Bottomed, Vertical, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service

- EN 1473 : LNG용 시설 및 설치(1996, 2007)

Installation and Equipment for Liquefied Natural Gas - Design and Onshore Installations

- EN 14620 : 5℃에서 -165℃사이의 저온액화가스 저장을 위한 수직원통평저 강재탱크의 설계시공설치지침(2006)

Specification for the design, construction and installation of sit built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between -5℃ and -165℃

표 2-1-2 LNG 저장탱크 유럽 설계기준

| 기준명 | 제목 | 내용 | 특징 |
|---|---|---|---|
| BS 4741 (1971) | Specification for vertical cylindrical, welded steel storage tanks for low temperature services: single wall tanks for temperatures down to -50℃ | - 온도 : -50℃<br>- 단일방호벽 | 사양서 |
| BS 5387 (1976) | Specification for vertical cylindrical welded storage tanks for low-temperature service: double-wall tanks for temperatures down to -196℃ | - 온도 : -196℃<br>- 이중방호벽 | 사양서 |
| EEMUA 147 (1986) | Recommendations for the Design and Construction of Refrigerated Liquefied Gas Storage Tanks | - 온도 : -165℃<br>- 재료, 설계, 시공, 하중 | 유럽최초 완전방호식 설계지침 |
| BS 7777 (1993) | Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service | - 온도 : -165℃<br>- 재료, 설계, 시공, 시험, 개방<br>- 단일, 이중, 완전 방호식 | 완전방호식 설계기준 (기본 설계코드) |
| BS 8110 (1997) | 1) Structural use of concrete (Parts 1 and 2) | - RC 및 PC 콘크리트 설계코드 | 기본 설계코드 |
| EN 1473 (2007) | Installation and equipment for liquefied natural gas(Design of onshore installations) | - 온도 : -165℃<br>- 단일, 이중, 완전, 멤브레인 방호식<br>- 단일 방호식 및 구형탱크에 대해서 방류둑과 impounding area 설치 규정 | 설치, 장비 안전기준 |
| EN 14620 (2006) | Specification for the design, construction and installation of sit built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between -5℃ and -165℃ | - 온도 : 0℃ ~ -165℃<br>- 단일, 이중, 완전, 멤브레인 방호식<br>- 재료, 설계, 시공, 시험, 조사, 개방<br>- BS 7777의 한계 보완(동체 최대두께, 수압시험 액위 등)<br>- corner protection 규정 명문화 | 설계시공설치 유럽통합지침 |

이중에서도 특히 완전방호식 LNG 저장탱크와 관련되어 국제적으로 적용되고 있는 기준은 외조의 경우는 BS 7777/BS8110이며 최근에는 EN14620으로 대체되고 있는 과정에 있다. 내조의 경우는 API 620 App.Q를 기본으로 하고 있다.

나. 일본의 설계기준 발전 과정

일본에서는 1962년 LNG 도입 계획이 수립된 이후 동경 네기시 기지가 건설되어 1969년부터 본격적으로 LNG가 수입되면서 LNG 저장탱크의 역사가 시작되었다. 그 후 지진 등 자국내의 특수한 환경을 고려하여 LNG 저장탱크 산업기술을 활성화시키고자 통산성의 주도로 지침서 개발에 착수하여 1979년 "LNG 지하식 저조지침(RPIS; Recommended Practice for LNG Inground Storage)"과 1981년에 "LNG 지상식 저조지침(RPAS; Recommended Practice for LNG Aboveground Storage)"을 일본가스협회(JGA)에 위탁하여 제정·적용해 오고 있다. 이 기준안에는 LNG 저장탱크의 설계에 대한 구체적인 데이터가 명시되어 있으며, 지진에 관련된 설계와 규제를 강조하고 있다. 또한 일본의 설계 기준안은 여러 시방서를 참조하여 설계하도록 된 외국의 기준안과 달리 지중식 LNG 저장탱크에 대한 일괄적인 설계를 할 수 있도록 별도의 기준안이 마련되어 있다.

그러나 보다 대용량의 LNG 저장을 위한 PC탱크(Prestressed Concrete Tanks)에 대한 필요성이 대두되면서 "천연가스도입촉진센터"내에 기준제정을 위한 조사위원회와 전문위원회를 두고 1988년부터 1990년에 걸쳐 기술조사 및 각종 실험을 실시하여 그 결과를 바탕으로 1990년에 『PC LNG 지상식 저장탱크 지침 초안』을 완성하였으며, 방류둑 일체형 저장탱크인 'PC LNG 저장탱크'관련 기술사항, 신소재 개발사항, 최신 내진설계 기준 등을 반영하여 한 차례 개정작업(2002년)을 하였다. 내용 면에서도 현재 세계적인 코드의 추세인 '성능기준화'를 꾀하고 있으며, 가스 신기술 개발과 유럽과의 기술 우위를 경쟁하기 위한 새로운 가스 안전 기준안을 연구하고 있다. 이를 통해 국내외 시장 확보를 위한 자국시장의 개방화와 최소한의 안전규제를 추구하고 있다. 최근에는 발전된 기술사항과 『PC LNG 지상식 저장탱크 지침 초안』을 바탕으로 "LNG 지상식 저조지침"을 개정중에 있다.

표 2-1-3. LNG 저장탱크 일본 설계기준

| 기준명 | 제목 | 내용 | 특징 |
|---|---|---|---|
| JGA RPIS (1979) | JGA RPIS(Recommended Practice for LNG Inground Storage; LNG 地下式貯槽指針) | - 멤브레인 탱크용<br>- 재료, 설계, 시공, 시험, 유지 | 지중식 설계코드 |
| JGA RPAS (1981) | JGA RPAS(Recommended Practice for LNG Above-ground Storage; LNG 地上式貯槽指針) | - 재료, 설계, 시공, 시험, 유지<br>- 이중벽, PC 이중SHELL탱크<br>- 9%Ni형, 36%Ni형 | 지상식 설계코드 |

다. 미국의 설계기준 발전 과정

미국에서는 기름 탱크용 API 650에 이어 탄화수소가스용 저압저장탱크를 위한 기준으로

API 620이 제정되었고 NFPA 59A를 중심으로 기준안을 채택하고 있으나 통일되고 일관된 설계지침서 없이 저장탱크를 건설하고 있다. 또한, 탱크 설계시 필요로 하는 세부적인 사항으로 콘크리트에 대해서는 ACI 318, 사용재료의 물리적 특성에 대해서는 ASTM, Steel에 대해서는 ASD, 하중에 대해서는 ASCE-7 등을 참조로 설계하고 있다.

표 2-1-4. LNG 저장탱크 미국 설계기준

| 기준명 | 제목 | 내용 | 특징 |
|---|---|---|---|
| API 620 (1996) | Design and Construction of large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks | - 재료, 설계, 설치, 시험<br>- 부록 Q : 저압액화저장탱크설계<br>- 부록 L : 지진설계 | 내조탱크 설계코드 |
| NFPA 59A (1996) | Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas(LNG) | - 설계, 위치, 시공, 운영, 유지 | 설치,장비 안전기준 |

라. 기타 적용 기준

이 외에도 다음과 같은 코드들을 적용하고 있다.

표 2-1-5. LNG 저장탱크 기타 적용 기준

| 기준명 | 제목 | 설명 | 비고 |
|---|---|---|---|
| BS 4447 | 2) Specification for the performance of prestressing anchorages for posttensioned construction | 프리스트레싱 기준 | |
| BS 5337 | 3) Design and construction of reinforced and prestressed concrete structures for the storage of water and other aqueous liquids | RC 및 PC 콘크리트 설계코드 | |
| BS 5896 | 4) Specification for high tensile steel wire and strand for prestressing of concrete | 프리스트레싱 기준 | |
| BS 8004 | 5) Foundations | 기초관련 기준 | |
| BS 4449 | 6) Specification for carbon steel bars for the reinforcement of concrete | 철근시방 기준 | |
| ASTM A416 | 7) Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete | 텐던시방 기준 | |
| API 650 App.E | 8) | 지진해석 | |

마. 국내 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 기준

종래에는 국내에 완전방호식 LNG 저장탱크에 대한 기준이 없어 설계, 시공 및 검사시 내부탱크의 경우 API 620 App.Q를, 외조의 경우 BS 7777의 '프리스트레스트 콘크리트 외부탱

크'를 적용하여 왔다. 이에 대한 문제점을 인식하고 한국가스안전공사는 '완전방호식 LNG 저장탱크 기준'을 제정하였고 이것이 현재 "한국가스공사 표준"으로 채택되어 적용되고 있다.

국내에 건설되었거나 건설중인 완전방호식 LNG 저장탱크의 경우 설계 및 시공시 적용된 기준을 보면 아래와 같다.

표 2-1-6. 국내 완전방호식 LNG 저장탱크 설계 기준

| 구성 목차 | 벤치마킹 기준 및 내용 |
|---|---|
| **제 1장**<br>일반기준 | - **BS 7777 Part.1(일반기준)**<br>・적용범위, 용어정의, 설계조건, 하중조건 및 설계시 고려사항, 지질조사, 압력방출 등 |
| **제 2장**<br>9% Ni강식 내부탱크 기준 | - **API 620 App.Q** 재료, 설계, 용접절차, 시험 등<br>- **BS 7777 Part.2 / Pat.3** ・공장제작, 현장설치, 단열재<br>- **Kogas ITB** ・현수천정 |
| **제 3장**<br>외부탱크 및 기초 기준 | - **BS 7777 Part.3(콘크리트 기준)**<br>・설계조건, 재료, PC 외부탱크, 기초 등<br>- **EN 14620 Part.3(콘크리트 요소)** ・라이너 및 코팅<br>- **Kogas ITB** ・콘크리트 지붕 |

현재 국내 LNG 저장탱크와 관련된 기준으로는 지상식의 경우 BS7777/BS8110 및 API620 부록 Q가, 지중식 및 지상식으로 일본의 RPIS와 RPAS가 각 부문에 전반적으로 적용되고 있다.

## 2절 저장탱크 최적용량 분석

초대용량 LNG 저장탱크의 용량을 결정하기 위해서 기본적인 공정 개념은 저장탱크 1기 설치와 펌프 4기 설치를 기준으로 하였다. 현재 주로 건조되고 있는 LNG 선박이 24만 kl급 인 것을 감안하고 기존 최대 용량이 20만 kl급 인 것을 고려하여 25만 이상의 최대 용량을 평가하였다. 가장 중요한 설계 조건인 지진하중과 온도하중은 일단 국내기준을 적용하고 향후 설계 프로그램 제작시 확장하는 개념으로 추진하고자 한다.

다음은 초대용량 탱크의 최적용량 산정을 위한 기본 기준을 설정한 것이다.

- 저장탱크의 내조 쉘의 두께를 현재 공급가능 범위에서 선정
- 저장탱크 코너 부위의 Anchor Strap 적용 배제
- 설계용량은 총 저장량 기준으로 기존 50% 범위 내에서 결정
- 용량 선정은 대형화에 따른 경제성만 고려
- 외부탱크 벽체 Taper 구간은 설계관점에서 최소화
- 저장탱크 직경에 따른 경제성 고려(직경 최소화)

### 1. 지진하중을 고려한 Anchor Strap 적용한계 분석

Anchor Strap은 LNG 저장탱크의 내부탱크가 지진하중에 의해 움직이는 것을 방지하기 위해 설치하며, Inner Tank Shell과 콘크리트 바닥을 적절한 크기의 9% Ni 재질의 강판으로 연결하는 구조로 되어 있다.

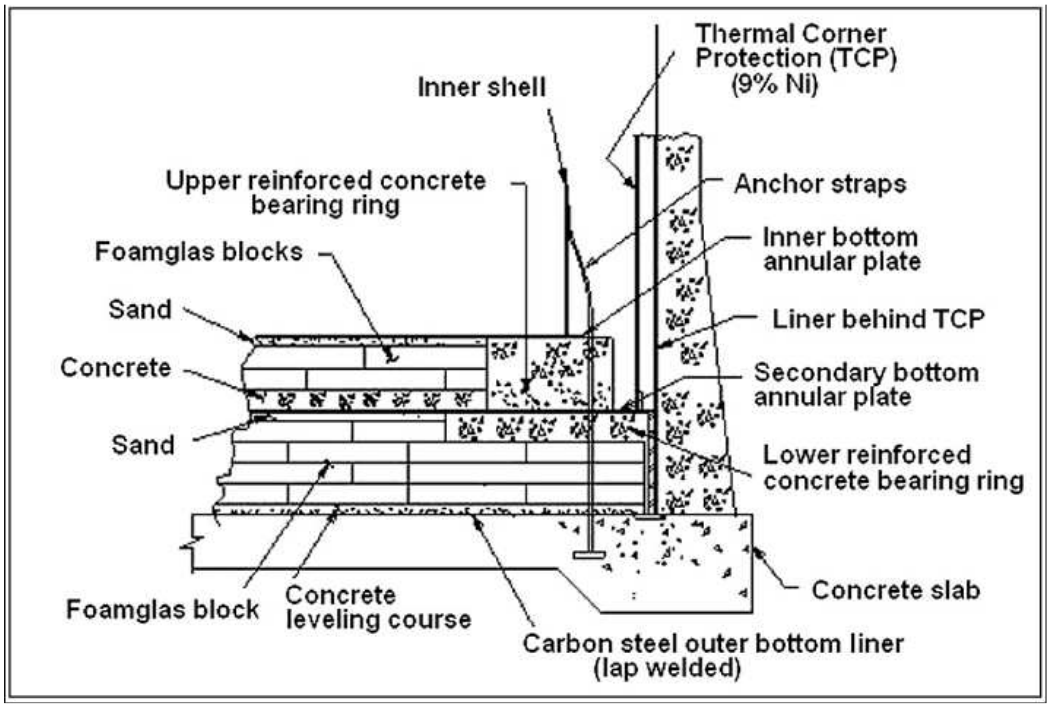



그림 2-2-1. Anchor Strap의 일반적인 구조

Anchor Strap을 적용할 경우 저장탱크의 안전성이 떨어지고 시공비가 크게 증가하며 설계

에 과도한 인력이 투입되게 되는 단점이 발생한다. 따라서 일반적인 설계에서는 가급적 Anchor Strap 설치가 필요하지 않도록 구성하는 것이 필수이다. 다음 그림의 분석에 따라 Anchor Strap의 배제를 위해서 필요한 내부탱크의 최대 두께는 40mm로 판단할 수 있다.

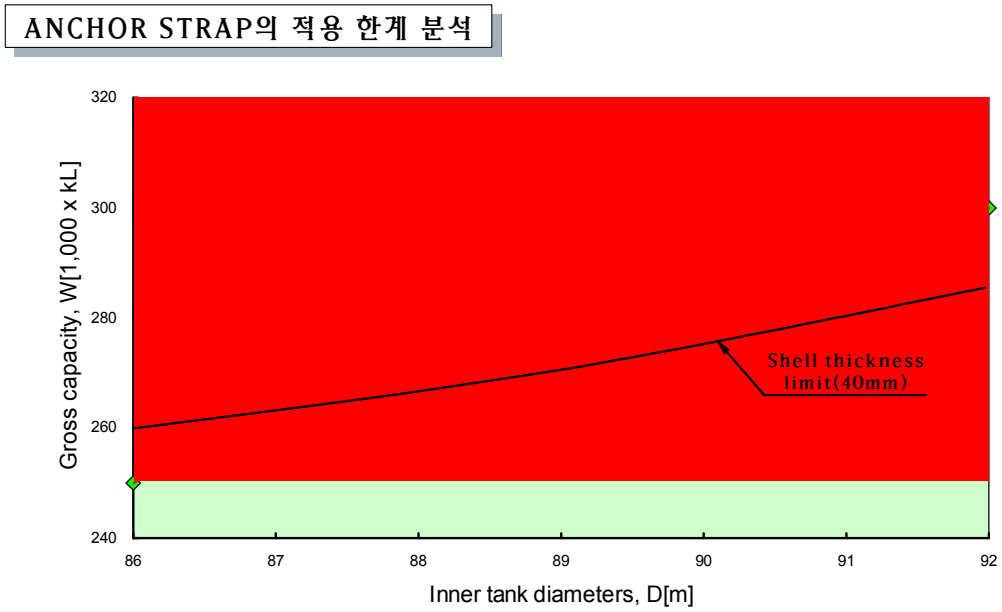



그림 2-2-2. Anchor Strap의 적용 한계 분석

2. 내부탱크 두께 영향 분석

**Gross 260K (Net 246K)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Diameter (m) | 88 | 90 | |
| Height (m) | 43.77 | 41.84 | |
| Annular THK (mm) | 33.6 | 28.9 | |
| Annular Width (mm) | 3101 | 3168 | |
| Course | 12 | 12 | |
| Inner Tank THK (mm) | 38.8 | 37.9 | |
| | 35.5 | 34.7 | |
| | 32.2 | 31.5 | |
| | 29.1 | 28.6 | |
| | 26.2 | 25.8 | |
| | 23.3 | 22.9 | |
| | 20.2 | 19.8 | |
| | 17 | 16.7 | |
| | 13.7 | 13.5 | |
| | 10.3 | 10.1 | |
| | 10 | 10 | |
| | 10 | 10 | |
| Average THK. (mm) | 22.192 | 21.792 | |

**Gross 270K (Net 256K)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Diameter (m) | 90 | 92 | 94 |
| Height (m) | 43.44 | 41.61 | 39.86 |
| Annular THK (mm) | 31.6 | 27 | 23 |
| Annular Width (mm) | 3170 | 3030 | 2647 |
| Course | 12 | 12 | 11 |
| Inner Tank THK (mm) | 39.4 | 38.6 | 37.8 |
| | 36.1 | 35.3 | 34.3 |
| | 32.7 | 32.1 | 30.8 |
| | 29.6 | 29.1 | 27.9 |
| | 26.7 | 26.2 | 24.8 |
| | 23.6 | 23.3 | 21.6 |
| | 20.5 | 20.2 | 18.2 |
| | 17.3 | 17 | 14.7 |
| | 13.9 | 13.7 | 11.1 |
| | 10.5 | 10.3 | 10 |
| | 10 | 10 | 10 |
| | 10 | 10 | |
| Average THK. (mm) | 22.525 | 22.150 | 21.927 |

그림 2-2-3. 26만 kl급 및 27만 kl급 LNG 저장탱크의 내부탱크 두께

26만 kl급 LNG 저장탱크와 27만 kl급 LNG 저장탱크의 내부탱크 두께는 상기 그림과 같이 계산되어 진다. 이를 도식적으로 표현하면 다음 그림과 같이 분석할 수 있다.

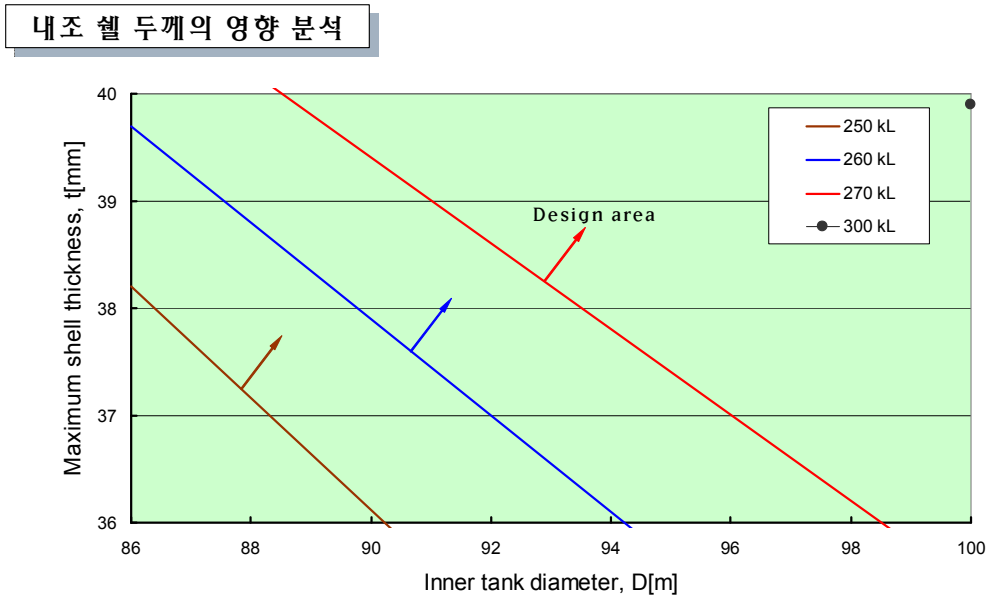



그림 2-2-4. 내부탱크 직경에 따른 shell 두께 영향 분석

결국 25만 kl급 이상 LNG 저장탱크 최적용량은 저장탱크 직경의 함수라는 것으로 결론을 내릴 수 있을 것이다.

3. 외부탱크 물량 분석

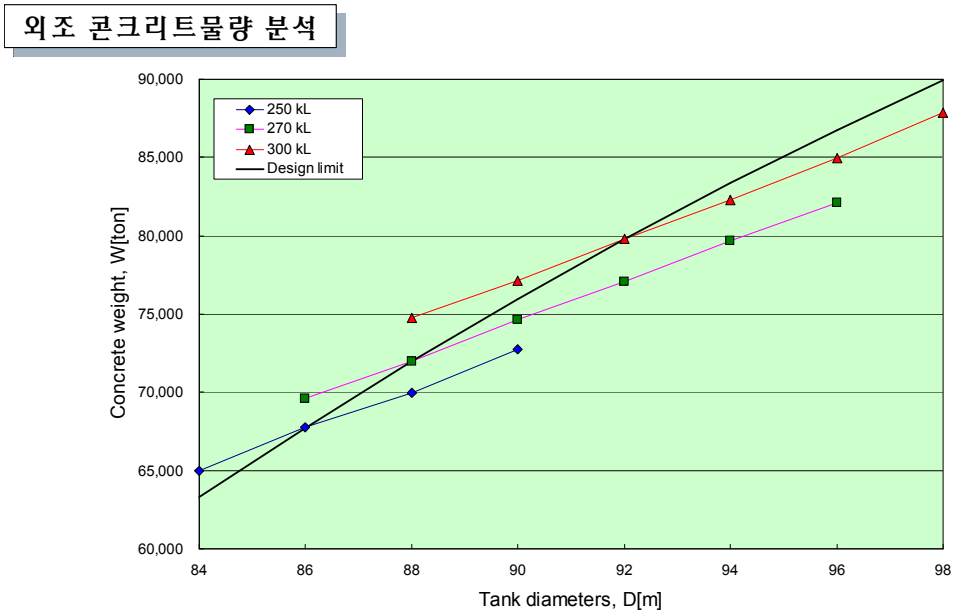



그림 2-2-5. 외부탱크 직경에 따른 콘크리트 물량

콘크리트 물량은 내부탱크 물량과 함께 저장탱크의 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 요소로서, 이 부분을 최적화하는 것이 저장탱크 경제성에 직결된다고 할 수 있다. 상기그림과 같은 분석에 따라 각 용량별 경제성을 판단할 수 있다.

4. 저장탱크 증발가스 발생률

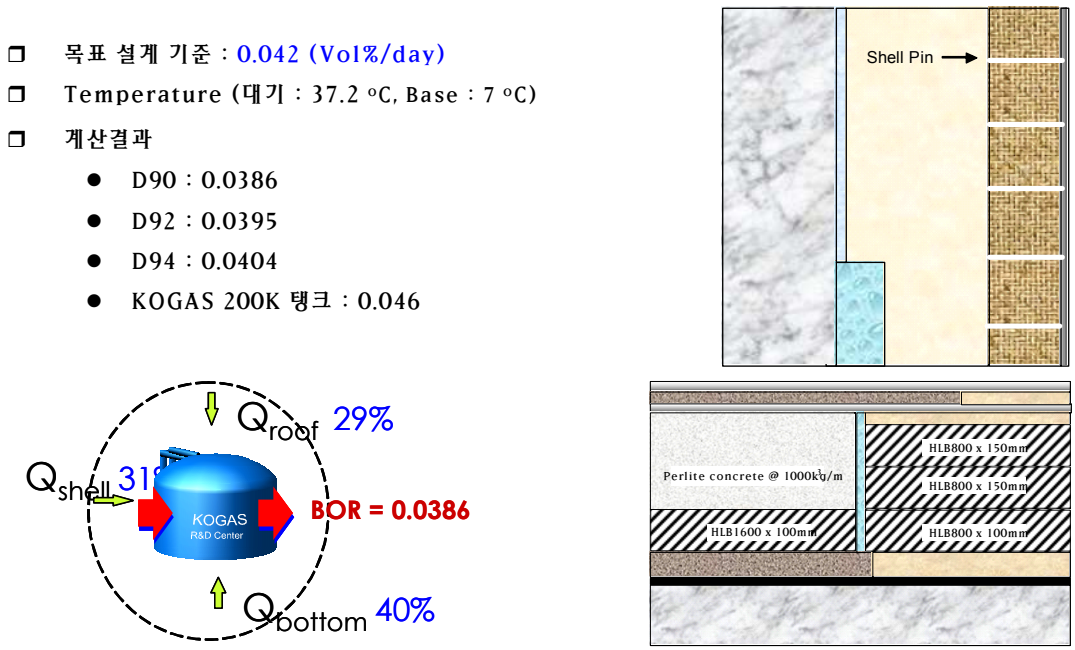



그림 2-2-6. 직경별 저장탱크 증발가스 발생률

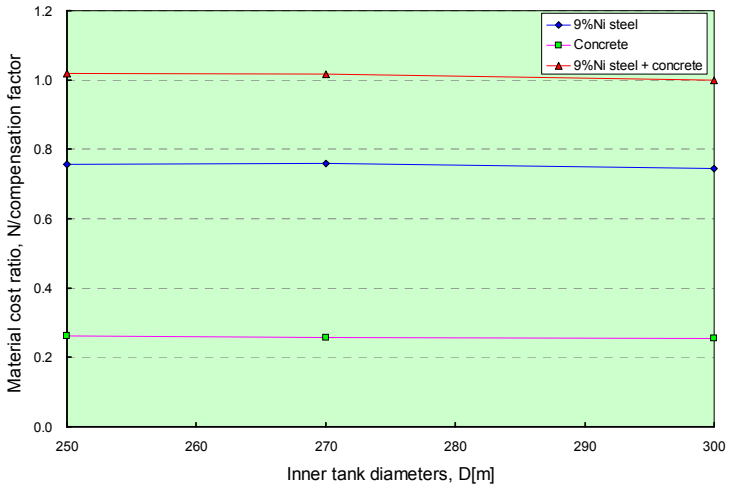
LNG 저장탱크의 증발가스 발생률은 설계 기본 요건으로 최소화하는 것이 가장 경제적이고 최적화한 것이다. 저장탱크의 직경 변화에 따른 설계 도면을 기초로 계산한 증발가스 발생률은 직경 90m의 경우 0.0386으로 기존 20만 kl급 저장탱크에 비해 약 84% 수준으로 매우 우수한 것으로 판정되었다. 직경이 보다 큰 저장탱크를 분석에서 제외한 것은 직경의 최소화와 내부탱크 40mm 두께 조건에 부합하지 않기 때문에 검토대상에서 제외하였다.

5. 저장탱크 최적용량 선정 결과

LNG 저장탱크 용량이 증가하면 시공 경제성이 우수해지는 장점이 있는 반면 부지 면적 증가에 따른 경제성은 감소하게 된다. Anchor Strap 배제 조건과 내부탱크 최대 두께 40mm에 모두 적합한 조건에서 직경이 가장 작은 저장탱크는 직경이 90m인 27만 kl급 저장탱크로 최종 분석되었다. 다음 그림은 저장탱크 전체 공사비를 토대로 최적용량을 선정한 결과에 대해 도식화한 것이다.

**분석결과 정리**

- ❒ 경제성의 주요 핵심은 내조 설계 높이에 있음.
- ❒ 용량은 증가될수록, 직경은 클수록 경제적임.
- ❒ 외조 지붕의 적정한 시공가능 범위에서 직경 선정함..
- ❒ 내조의 anchor strap을 설치하지 않는 조건에서 직경을 결정하여야 함.
- ❋ 현단계에서 지붕의 시공성은 고려하지 못함.




**<u>설계용량</u>**은 270 kL로 하고, 직경은 **시공 가능한 최대 직경**으로 <u>9%Ni강의 공급 가능범위</u>를 고려함.

그림 2-2-7. 저장탱크 최적용량 분석 결과

# 3절. 좌굴해석을 이용한 스티프너의 구조해석 및 최적설계

## 1. 개요

본 연구에서는 펄라이트의 압력을 고려한 스티프너의 설계 및 유한요소해석을 이용한 스티프너의 최적 설계를 수행하였다.
스티프너는 내벽의 안쪽 또는 바깥쪽에 원주 방향으로 “ㄱ”자 또는 “ㄴ”자 형태로 형성되며 저장탱크가 바람, 진공 또는 다른 특정하중의 영향을 받을 때 좌굴에 의해 변형되는 내조의 진원도를 유지하기 위하여 설치되는 구성요소이므로 저장탱크의 내부 압력에 내조벽이 견딜 수 있도록 해야 하고, 탄성적인 내벽의 단열재로 인한 압력에도 견딜 수 있어야 한다(그림 3.1.1). LNG 저장탱크가 초대형화 될수록 진원도를 유지하기 어려워지므로 이를 고려한 스티프너의 설계가 이루어져야 하므로 본 연구에서는 스티프너의 설계에 대한 연구를 수행하고자 한다.

### 가. 스티프너의 필요성

한국가스공사에서 운영하고 있는 9% 니켈강형 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas) 저장탱크는 완전방호식 LNG 저장탱크(Full containment LNG storage tank)이다. 완전방호식이란 내조(inner tank)와 외조(outer tank)가 각각 독립적으로 LNG를 저장할 수 있는 기능을 갖는 이중구조의 탱크를 말한다.
그림 2.1은 LNG 저장탱크의 단면도이다. 반경이 약 40m인 내조의 경우에는 두께 10mm에서 30mm의 9% 니켈강이 사용되고 있고, 내조 바깥쪽은 스프링 성질을 갖는 블랑켓(blanket)이 감싸고 있다. 이 블랑켓은 9% 니켈강 내조의 수축과 팽창을 흡수하여 열응력이 발생하지 않게 하는 역할을 하고 있다. 그러므로 내조의 설계할 때에는 열응력은 고려하지 않고 단지 액체의 하중을 견딜 수 있도록 설계한다. 또한 블랑켓과 외조 사이의 빈 공간에 펄라이트(perlite)를 충진하여 LNG의 극저온이 외조에 전달되지 않도록 한다.
펄라이트의 압력은 블랑켓을 통해 내조에 전달되는데 이로 인해 내조의 좌굴 현상을 초래하게 된다. 이러한 좌굴현상을 막기 위해 스티프너(stiffener)가 내조의 안쪽 또는 바깥쪽에 원통을 따라서 설계되며 저장탱크가 바람, 진공, 펄라이트의 압력 또는 다른 특정 하중의 영향을 받을 때 좌굴에 의한 내조의 진원도를 유지해 주는 작용을 한다.

### 나. 기존 설계와의 구별점

스티프너의 경우, 우선 높이에 따른 펄라이트의 하중 분포를 구하고 스티프너가 결합된 내조의 좌굴 임계하중(critical bucking load)이 펄라이트 하중보다 크게 설계한다. 현재 스티프너의 설계에 적용되는 “L. P. Zick paper”코드는 펄라이트의 압력이 높이에 무관하게 일정하다고 가정하였다. 이는 내조의 상단에 설치되는 스티프너의 과도한 설계를 초래하였다.
따라서 본 연구에서는 높이에 따른 펄라이트의 압력식을 구하고, 펄라이트의 물성치들이 압력

에 미치는 영향을 알아보고, 스티프너의 최적 설계를 수행하였다.

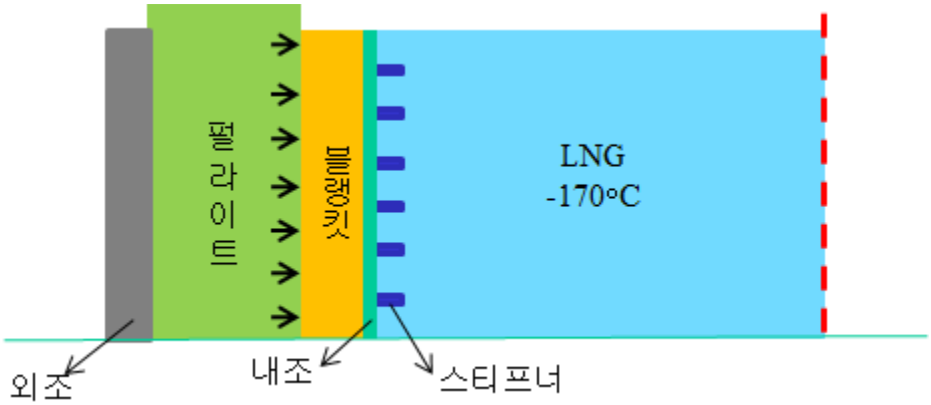



그림 2-3-1. LNG 저장탱크의 단면도

2. 하중의 전달경로 분석, 펄라이트 압력

펄라이트의 압력은 블랑켓을 통하여 내조에 전달된다. 블랑켓은 내조의 수축과 팽창을 흡수하여 열응력을 방지하는 작용을 하며 스프링 성질을 갖고 있어 외부압력이 작용하면 변형을 일으키고, 외부압력이 사라지면 원래의 상태로 복원하려는 특성이 있다. 내조가 수축하거나 팽창했을 때, 내조와 외조 사이에 채워지는 펄라이트의 양에 따라 블랑켓의 두께는 변화한다. 그림 3.1.2는 펄라이트 압력이 블랑켓에 작용할 때의 하중-압축률 그래프이다. 이를 통해 최종적으로 내조가 받는 압력을 얻을 수 있다.

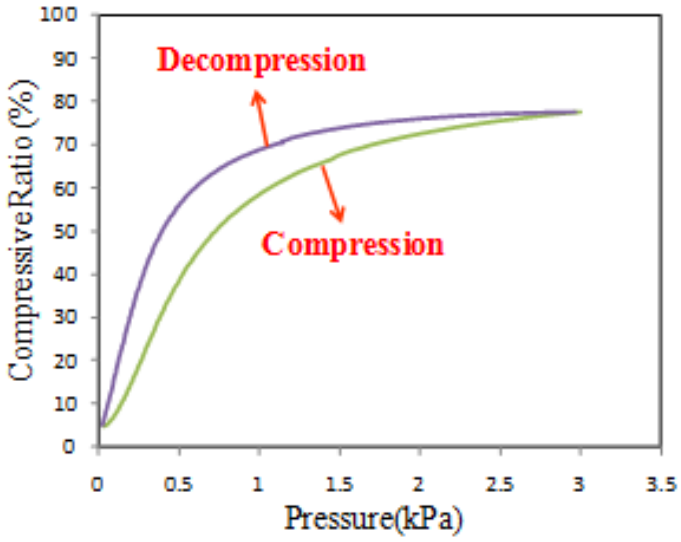



그림 2-3-2. 블랑켓의 압력-압축률 그래프

기존 스티프너의 설계에 사용되는 Zick 코드에서는 아래의 식을 이용하여 펄라이트 압력을 구하였다.

$$P = \rho g \times \frac{R_o^2 + \left[ R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right]^2}{4 R_E \mu} \qquad \text{식 (1)}$$

여기서, ρ는 펄라이트의 밀도, g는 중력가속도, R0는 탱크외조의 반경, Ri 는 탱크내조의 반경, Δr는 탱크의 총 이동량, A는 블랑켓의 복원력, t는 blanket의 초기두께, c는 블랑켓의 압축율, RE는 유효반경, μ는 펄라이트와 내조 사이의 마찰계수이다. 식 (1)에서 보면 펄라이트 압력은 내조 높이에 무관하게 일정하다.

본 연구에서는 펄라이트와 같이 작은 입자의 특성들을 고려한 Janssen method(3)를 적용하였고 그 식은 다음과 같다.

$$P(y) = \frac{R_o^2 - \left[ R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right]^2}{4 R_E \mu} \times \rho g \left[ 1 - \exp\left( - \frac{4 R_E \mu K (y+h)}{R_o^2 - (R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c))^2} \right) \right] \qquad \text{식 (2)}$$

여기서, K는 펄라이트의 수평과 수직 압력의 비례계수, h는 내조 상단에 있는 여분의 펄라이트 높이이다. 식 (2)에서 보면, 압력 P는 높이 y에 따라 변한다. 만약 내조와 펄라이트 사이의 마찰계수 μ를 무시하면 식 (2)는 식 (1)과 동일하다. Janssen method 에서는 높이에 따라 펄라이트의 밀도가 일정하다고 가정하였다. 하지만 실제로는 높이에 따라 수직 압력이 다르고, 이 압력에 의해 펄라이트의 밀도변화가 생기게 된다. 본 연구에서는 높이에 따른 펄라이트의 밀도 변화를 고려한 압력식을 다음과 같이 유도하였다.

$$P_k(y) = \frac{K \rho_0 g}{s} \left[ 1 - e^{-s(y+k)} \right]$$

$$s = \frac{4 R_E \mu K}{R_o^2 - \left[ R_i - \frac{\Delta r}{A} + t(1-c) \right]^2} - \rho_0 g \frac{1+K}{E'} \qquad \text{식 (3)}$$

$$E' = \frac{E_p}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

여기서, Ep는 펄라이트의 탄성계수이다. 만약 Ep가 무한히 크다고 가정하면 압력에 의한 밀도의 변화를 무시할 수 있으므로 식 (3)은 식 (2)와 같게 된다. 식 (3)에서 K, μ, Ep등 펄라이트의 물성과 관계되는 인자들은 펄라이트 압력에 영향을 주므로 스티프너 설계에 영향을 미치게 된다.

3. 스티프너의 설계변수, 스티프너의 최적설계를 위한 정식화

식 (4)에서 좌굴 임계하중 qcr가 외부하중과 같을 때, 내조의 좌굴을 방지할 수 있는 최소 관성모멘트를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$I_{\min} = \frac{qR^3}{3E}$$
$$q = \int_{s_1}^{s_2} P(s)ds \qquad \text{식 (4)}$$

그림 2.3.3은 내조에 스티프너가 결합된 모양이다. 각 내조 마디의 스티프너는 일정한 부분의 좌굴을 방지하고 있다. 이 때, 내조 마디에 해당하는 관성모멘트로부터 좌굴 임계하중을 구할 수 있다.

그림 2.3.4와 같이 마디의 길이를 L1, 내조두께를 t1, 스티프너의 길이를 L2, 두께를 t2, 라고 하면, x, y 축을 기준으로 한 좌표계에서 마디의 기하적 중심의 x좌표는 다음과 같다.

$$x_c = \frac{L_2 t_2 (L_2/2 + t_1/2)}{L_1 t_1 + L_2 t_2} \qquad \text{식 (5)}$$

평행축 정리를 이용하면, yc축을 기준으로 한 전체 관성 모멘트 I는 내조의 마디에 해당하는 I1과 스티프너에 해당하는 I2의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \frac{1}{12} t_1^3 L_1 + x_c^2 t_1 L_1 \;;$$
$$I = I_1 + I_2 \;\; I_2 = \frac{1}{12} L_2^3 t_2 + \left( \frac{L_2}{2} + \frac{t_1}{2} - x_c \right)^2 L_2 t_2 \qquad \text{식 (6)}$$

위의 식들에서 보면 스티프너를 설계하는 주요 인자들로는 마디의 길이 L1, 스티프너의 길이 L2 및 스티프너의 두께 t2가 있다. 스티프너의 위치가 결정되면 매개 스티프너가 감당하는 마디의 길이 L1 은 결정되므로 본 연구에서는 L2 와 t2를 설계 변수로 정하였다.

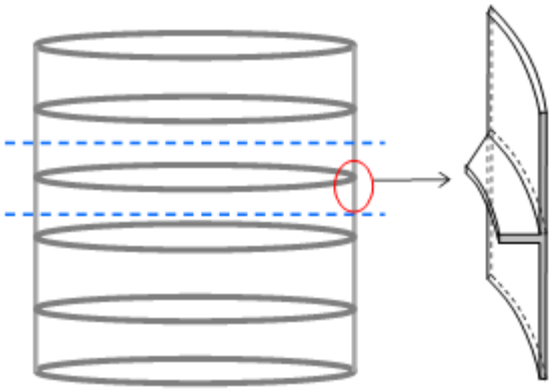


그림 2.3.3 스티프너를 가진 내조의 일부분

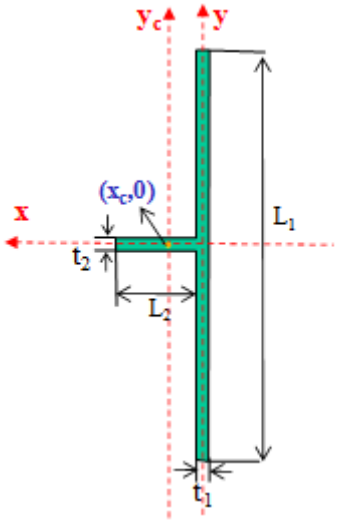



그림 2.3.4 스티프너와 내조의 파라미터

본 연구의 목적은 탱크의 내조에 스티프너를 설계하여 좌굴을 방지함과 동시에 스티프너의 크기를 최소화 하는 것이므로, 표 3.1.1에서와 같이 스티프너의 최적설계를 위한 정식화를 하고 최적설계를 수행하였다.

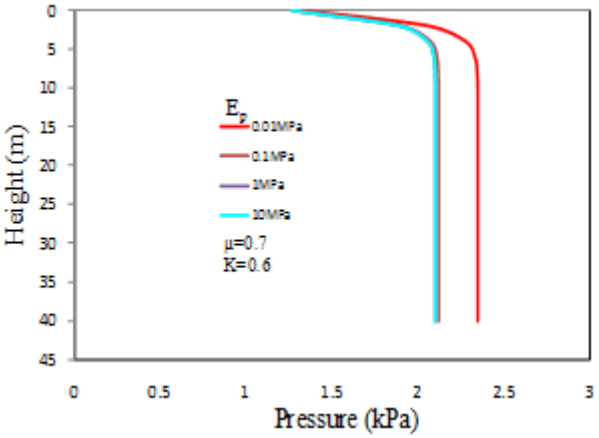
표 2.3.1 설계 문제의 정식화

| | |
|---|---|
| Design variables | Length of stiffener, $L_2$ |
| | Thickness of stiffener, $t_2$ |
| Object | Minimize material cost of stiffener |
| Constraints | $q_{cr}(L_2, t_2) \geq q(E_p, K, \mu)$ |
| | $t_2 \geq 0.01m$ |

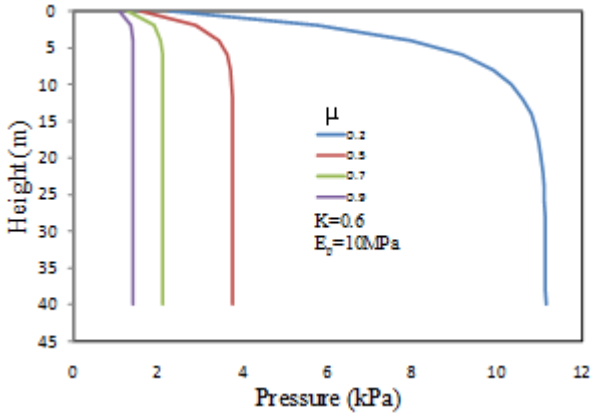
4. 펄라이트 압력에 미치는 요소의 영향

앞서 언급했던 것처럼 내조에 작용하는 펄라이트 압력은 펄라이트의 물성값의 영향을 받는다. 본 연구에서는 K, μ, Ep 값들이 펄라이트 압력에 주는 영향을 알아보았다.

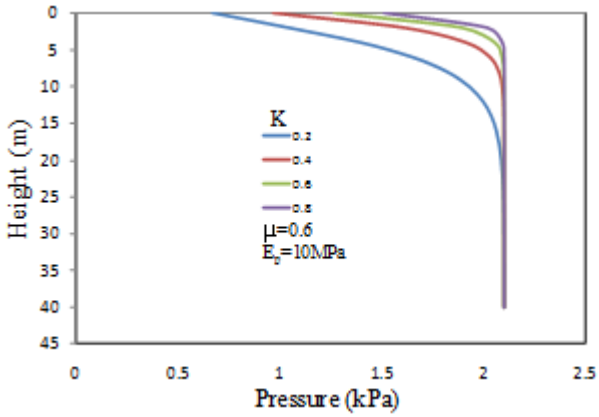
그림 2.3.5(a)는 μ=0.7, K=0.6 일 때의 펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트 탄성계수 Ep의 영향을 나타낸 것이다. Ep가 증가할수록 펄라이트 압력은 작아지고, Ep값이 각각 0.1MPa, 1MPa, 10MPa 일 때에는 압력분포가 거의 일치한다. 이는 펄라이트의 탄성계수가 커질수록 외부압력이 펄라이트의 밀도변화에 주는 영향이 점점 작아지기 때문이다. Ep가 일정한 값보다 크면 펄라이트의 밀도변화는 거의 없으며 펄라이트 압력분포는 일치하게 된다. 펄라이트의 탄성계수가 0.1MPa 보다 클 것으로 예측되므로 Ep가 압력에 주는 영향이 미미하다고 볼 수 있다. 그림 2.3.5(b)는 Ep=10MPa, K=0.6일 때, 펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트와 내조 사이의 마찰계수 μ의 영향을 나타낸다. μ가 클수록 펄라이트 압력이 작아짐을 알 수 있다. 이는 펄라이트와 내조 사이의 마찰 계수가 커지면 내조가 펄라이트를 더 많이 지탱해주기 때문이다. 그림 2.3.5(c)는 Ep=10MPa, μ=0.7일 때, 펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트 수평과 수직 압력의 비례계수 K의 영향을 나타낸다. K가 클수록 수직 방향의 압력으로부터 수평 방향의 압력으로 전달되는 정도가 더 크기 때문에 내조에 가해지는 압력은 커지게 된다. 그리고 K 값은 탱크 상단 부분의 압력 분포에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.




(a)펄라이트 탄성계수 Ep 의 영향




(b)펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트와 내조 사이의 마찰계수 μ의 영향




(c)펄라이트 압력 분포에 대한 펄라이트 수평과 수직 압력의 비례계수 K의 영향

그림 2.3.5 펄라이트 압력 분포에 대한 각 파라미터들의 효과

표 3.1.2는 최적설계에서 사용한 형상 치수 및 물성치이다. 표 3.1.3에서 보면 내조 상단으로부터 약 6m 깊이까지 펄라이트 압력이 변하다가 수렴하게 되므로 스티프너의 위치에 의하면 위로부터 첫 번째 스티프너의 기존 설계가 과도하다는 것을 알 수 있다. 이에 상단으로부터 첫 번째 스티프너에 대해서 최적설계를 수행하였다.

표 2.3.2 최적설계에서 사용한 형상 치수 및 물성치

| | |
|---|---|
| Radius of inner tank (m) | 42 |
| Radius of outer tank ( m) | 43.2 |
| Effective coefficient factor of friction | 0.7 |
| Proportion be tween horizontal pressure and vertical pressure | 0.6 |
| Thickness of blanket (m) | 0.4 |
| Height of upper residual perlite (m) | 1.6 |
| Poisson ratio | 0.3 |
| Young's modulus of 9% Ni steel (GPa) | 210 |
| Blanket compression hysteresis factor | 0.6 |
| Young, modulus of perlite (MPa) | 10 |
| Height of upper residual perlite (m) | 1.6 |
| Parameters | Values |
| Perlite density ( $kg/m^3$) | 60 |

표 2.3.3 내조 상단으로부터의 깊이에 따른 펄라이트 압력

| y (m) | Pressure (kPa) |
|---|---|
| 0 | 1.298 |
| 2 | 1.941 |
| 4 | 2.072 |
| 6 | 2.095 |
| 8 | 2.1 |
| 10 | 2.1 |
| 12 | 2.1 |
| 14 | 2.1 |
| 16 | 2.1 |
| 18 | 2.1 |

5. 스티프너의 최적화

그림 2.3.6은 내조 상단으로부터 첫 번째 스티프너의 길이 L2에 따른 체적의 변화 그래프이다. 모든 길이에서 보면 Zick 코드로 구한 스티프너 체적값이 기존 Janssen 방식으로 구한 스티프너 체적값보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 Zick 코드는 내조상단 부분에 가해지는 펄라이트의 압력이 일정하다고 가정하였기 때문에 펄라이트의 압력 분포가 Janssen 방식으로 구한 압력보다 크기 때문이다. 그리고 스티프너의 길이가 길어짐에 따라 전체적인 체적은 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 크기가 가장 작은 스티프너의 치수는 길이가 0.515m, 두께가 0.01m 이다. 이 때, 스티프너의 체적은 Zick 코드를 이용하여 구한 체적보다 15.3% 줄어들었

다.

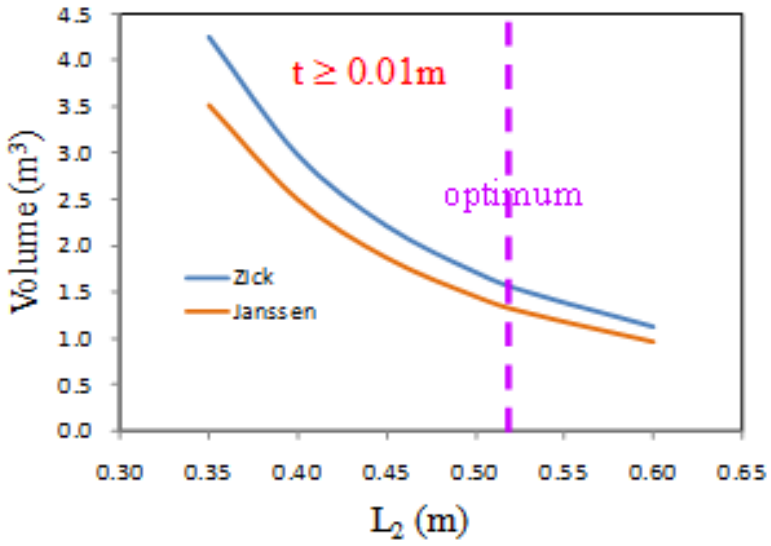



그림 2.3.6 내조 상단으로부터 첫 번째 스티프너의 길이 L2에 따른 체적의 변화 그래프

6. 유한요소해석을 이용한 최적설계

가. 최적설계의 필요성

기존의 LNG 저장탱크를 설계하기 위해서는 여러 가지 구성요소들 각각을 먼저 설계하고, 이를 다음 단계에서 종합하는 방식이 적용된다. 일반적으로 이러한 설계 방법은 각각의 구성요소들을 설계하기 위한 설계식이 포함된 규정을 수식화한 것으로 각각 독립적으로 구성되어 있다. 이로 인해 일부 구성요소는 과도하게 설계는 경향이 있으므로 이들 상호간에 미치는 영향에 대한 분석을 통한 최적설계 과정이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 스티프너를 포함한 내조의 좌굴해석을 통해 스티프너의 위치 및 형상을 결정함으로써 스티프너의 최적설계를 수행하였다.

나. 유한요소해석을 이용한 스티프너의 최적설계

유한요소해석을 이용한 스티프너의 최적설계는 다음 과정으로 수행되었다.

(1). 좌굴해석을 수행하여 좌굴 모드 형상이 가장 큰 위치 파악

(2). 좌굴 모드 형상이 가장 큰 위치에 스티프너를 추가한 후, 다시 좌굴해석을 수행

스티프너를 포함한 내부탱크의 좌굴해석 후에 좌굴 임계 하중과 외부 하중에 의해 계산되는 안전계수를 검토하여 가스공사의 기준에 적합하지 않을 경우, 위 과정을 다시 반복하여 스티프너의 위치 및 크기를 조절하였다. 스티프너의 두께는 내부탱크용 판재의 두께를 고려하여 동일한 범위 내에서 결정하였다. 최종적으로 스티프너의 위치와 형상이 가스공사에서 제시한 기준을 만족할 경우, 좌굴 모드 형상이 가장 큰 위치는 LNG 액압에 의해 안정성이 보장되도록 최하단의 스티프너보다 아래에 위치하게 된다.(LNG 액압에 의해 좌굴 현상 방지)

다. 하중 분석

내부탱크에 작용하는 외부하중을 계산하고 이를 좌굴 임계 하중과 비교함으로써 설계 기준의 만족 여부를 확인할 수 있다. 가스공사에서 제시하는 설계 기준은 다음과 같다.

(1). 설계압력에 대한 안전율 > 2.5

(2). 12% infill 압력에 대한 안전율 > 2

위 설계 기준에서 적용된 설계압력과 12% infill 압력은 각각 1,565Pa, 1,883Pa이다.

마. 유한요소모델

유한요소해석을 수행하기 위한 내부탱크의 형상 치수는 그림 2.3.7과 같다. 형상의 반복성을 고려하여 1/4 모델에 대한 유한요소 모델을 생성하였다.

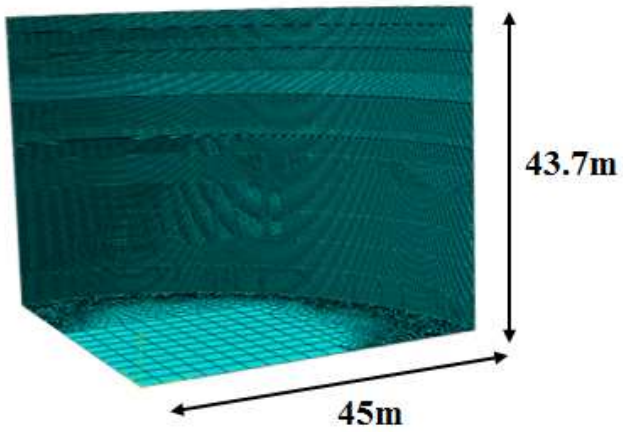



그림 2.3.7 유한요소해석에 사용된 내부탱크의 형상

바. 유한요소해석에 사용된 물성값

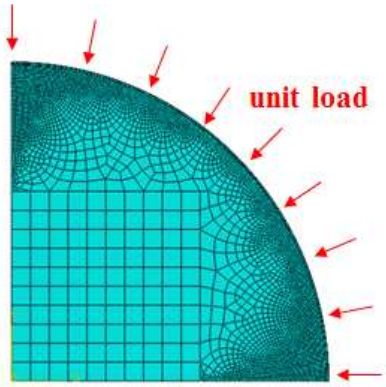
표 2.3.4은 유한요소해석에 사용된 내부탱크와 스티프너의 물성값을 나타낸다.

표 2.3.4 유한요소해석에 사용된 내부탱크와 스티프너의 물성값

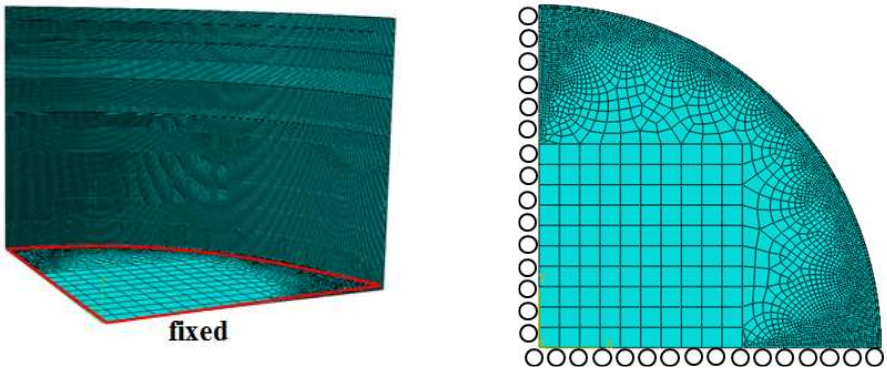
| Material | Young`s modulus (GPa) | Poisson`s ratio |
|---|---|---|
| 9% Nikel steel | 200 | 0.3 |

사. 하중조건과 경계조건

그림 2.3.8는 유한요소해석 시 고려한 하중조건과 경계조건을 나타낸다. 좌굴해석의 경우, 기준하중과 좌굴고유치와의 곱이 좌굴 임계 하중을 나타내므로 단위하중을 적용하였다. 또한 1/4 모델이므로 이를 고려하여 내부탱크 벽면에는 대칭 조건을 적용하였고, 바닥면은 고정하였다.




(a) 하중조건




(b) 경계조건

그림 2.3.8 하중조건과 경계조건

아. 최적설계 결과

스티프너를 포함한 내부탱크의 좌굴해석을 통해 얻어진 좌굴 임계 하중과 외부하중의 비로 안전계수를 계산하여 가스공사의 최소 기준의 만족 여부를 확인하였다. 최적설계된 스티프너의 위치 및 형상을 고려한 내부탱크의 좌굴해석으로 얻어진 좌굴 임계 하중은 3,952Pa로 가스공사에서 제시한 설계 기준을 모두 만족시키는 것을 확인할 수 있다. 최적설계 된 스티프너의 위치 및 형상은 표 3.1.5에 나타내었다. 그림 2.3.9은 최적설계 된 스티프너를 고려한 내부탱크의 좌굴 모드 형상을 나타낸다.

(가). 설계압력에 대한 안전계수 > 2.5 (3,952/1,565=2.53)

(나). 12% infill 압력에 대한 안전계수 > 2 (3,952/1,863=2.12)

표 2.3.5 최적화된 스티프너의 위치 및 형상

| Stiffener | From Top | Position(m) | Thickness(mm) | Width(mm) |
|---|---|---|---|---|
| Top | Horizontal | 0 | 10.0 | 700 |
| | Vertical | 0 | 10.0 | 100 |
| Intermediate | 1 | 2.125 | 10.0 | 200 |
| | 2 | 3.945 | 10.0 | 200 |
| | 3 | 5.766 | 10.0 | 200 |
| | 4 | 7.588 | 10.0 | 200 |
| | 5 | 10.016 | 10.0 | 200 |
| | 6 | 13.354 | 16.7 | 200 |
| | 7 | 18.511 | 19.9 | 200 |

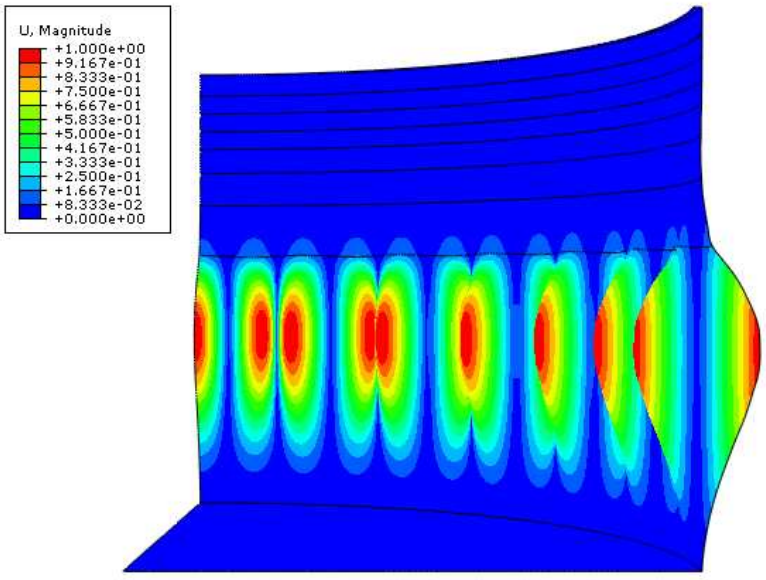



그림 2.3.9 최적 설계된 스티프너를 고려한 내부탱크의 좌굴 모드 형상

7. 결론

본 연구에서는 펄라이트 압력을 고려한 스티프너의 설계 및 유한요소해석을 통한 최적설계가 수행되었다.

스티프너는 내조가 펄라이트의 압력 또는 다른 특정 하중의 영향을 받을 때 발생하는 좌굴 현상에 대해 내조의 진원도를 유지해 주는 작용을 한다. 지금까지 스티프너의 설계에 적용되었던 “L. P. Zick paper” 코드는 높이에 따른 펄라이트의 압력이 일정하다고 가정하였지만, 본 연구에서는 높이에 따라 달라지는 펄라이트의 압력식을 구하고 펄라이트의 물성값들이 압력에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과 높이에 따라 달라지는 펄라이트의 실제 압력 분포를 고려할 경우, 기존의 설계 방식보다 스티프너의 무게를 약 15.3% 절감하는 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

또한, 유한요소해석(좌굴해석)을 통하여 설계기준을 만족시키는 스티프너의 위치 및 형상에

대한 최적설계를 수행하였다. 스티프너 만을 위한 이론식에 근거하여 이루어진 기존의 설계 방법 대신 스티프너와 내부탱크 상호간에 미치는 영향을 고려하여 동시에 모델링하여 유한요소해석을 수행함으로써 보다 실제적인 현상을 고려한 최적설계를 진행하였다.

# 4절. 앵커스트립의 유한요소해석

## 1. 개요

LNG 저장탱크의 내부탱크가 지진하중에 의해 움직이는 것을 방지하기 위하여 내조벽과 콘크리트 바닥을 적절한 크기의 9% 니켈 재질의 강판으로 연결하는데 이를 앵커스트랩(Anchor strap)이라고 부른다. 앵커스트랩의 한쪽 끝은 내조벽과 연결되어 있고, 코너프로텍션을 통하여 외조콘크리트바닥과 연결되어 있으므로 앵커스트랩 설계 시 탱크내조와 코너프로텍션에 고려하여야 한다. 본 연구에서는 ABAQUS를 이용하여 여러 가지 하중조건에서 유한요소해석을 진행하고, 앵커스트랩, 코너프로텍션, 내조의 복합적 거동을 관찰하였으며 앵커스트랩만 모델링하여 해석한 참고자료의 결과와 비교하였다.

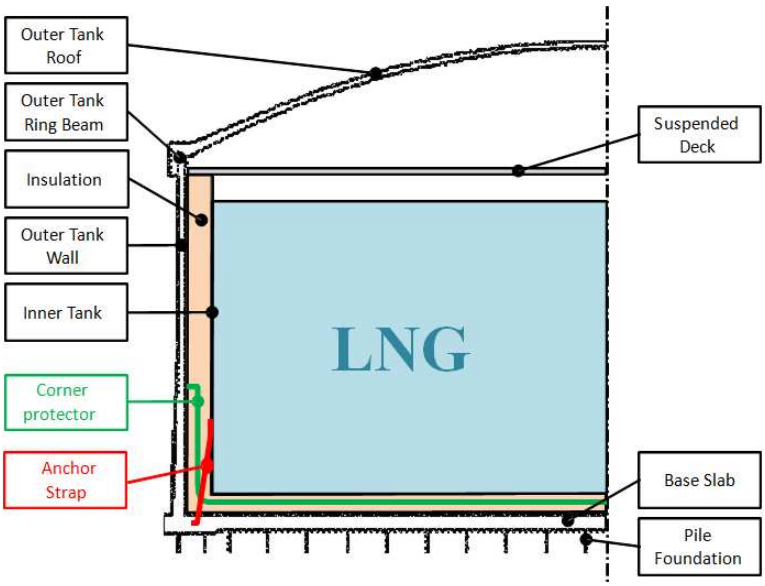



그림 2.4.1 앵커스트랩의 위치(빨간색)

## 2. 앵커스트랩의 유한요소 모델링

### 가. 유한요소모델의 형상치수와 물성값

유한요소해석을 수행할 앵커스트랩의 형상치수는 그림 2.4.2과 같다. 앵커스트랩은 내조를 둘러싸고 균일한 간격으로 분포되어 있기 때문에 형상의 반복성을 고려하여 모델링 하였다(그림 2.4.3, 그림 2.4.4). 표 2.4.1은 유한요소해석 시 사용한 앵커스트랩의 주요물성 값이다.

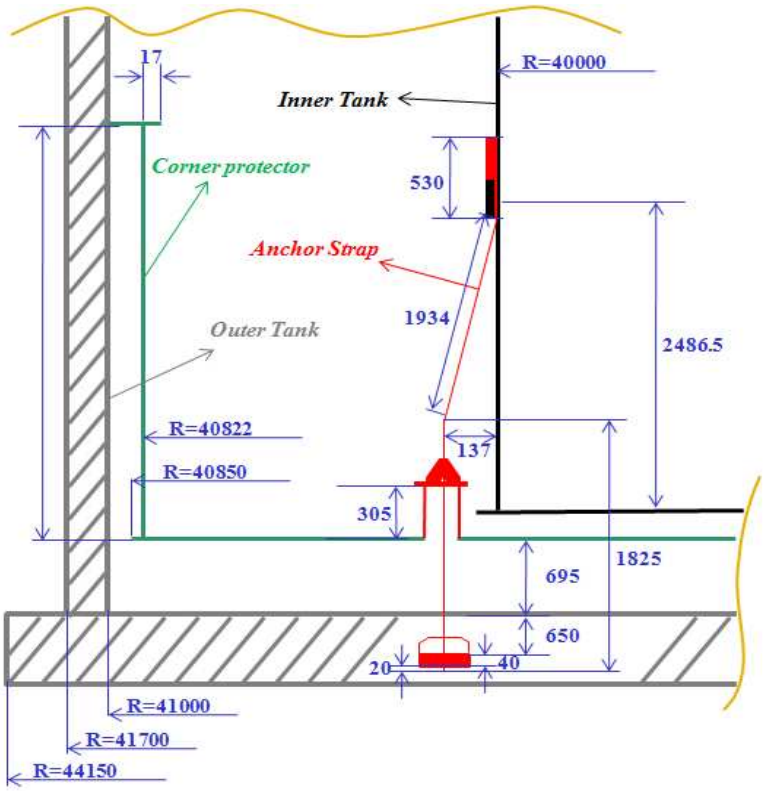



그림 2.4.2 앵커스트랩, 코너프로텍션 및 내조의 실제 치수 (mm)

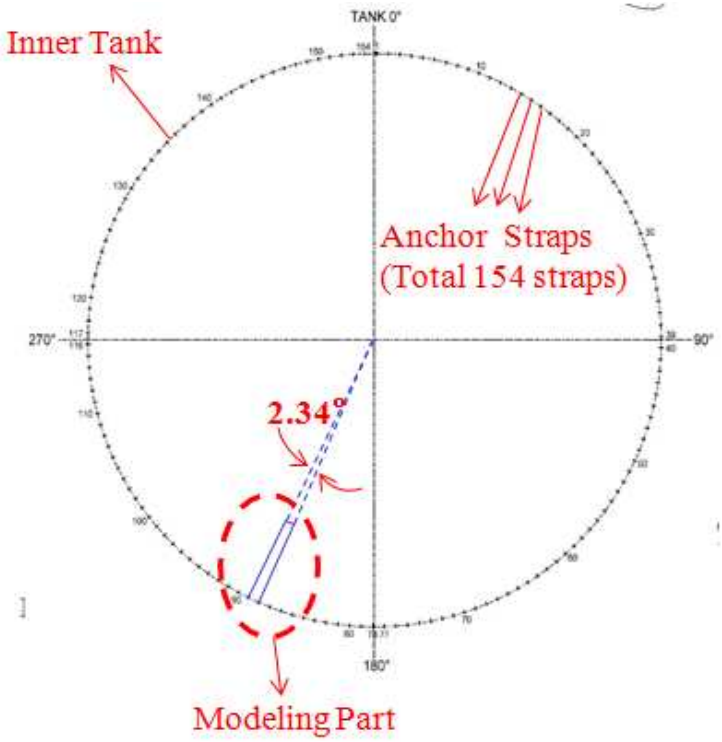



그림 2.4.3 위에서부터 본 내부탱크, 앵커스트랩 형상

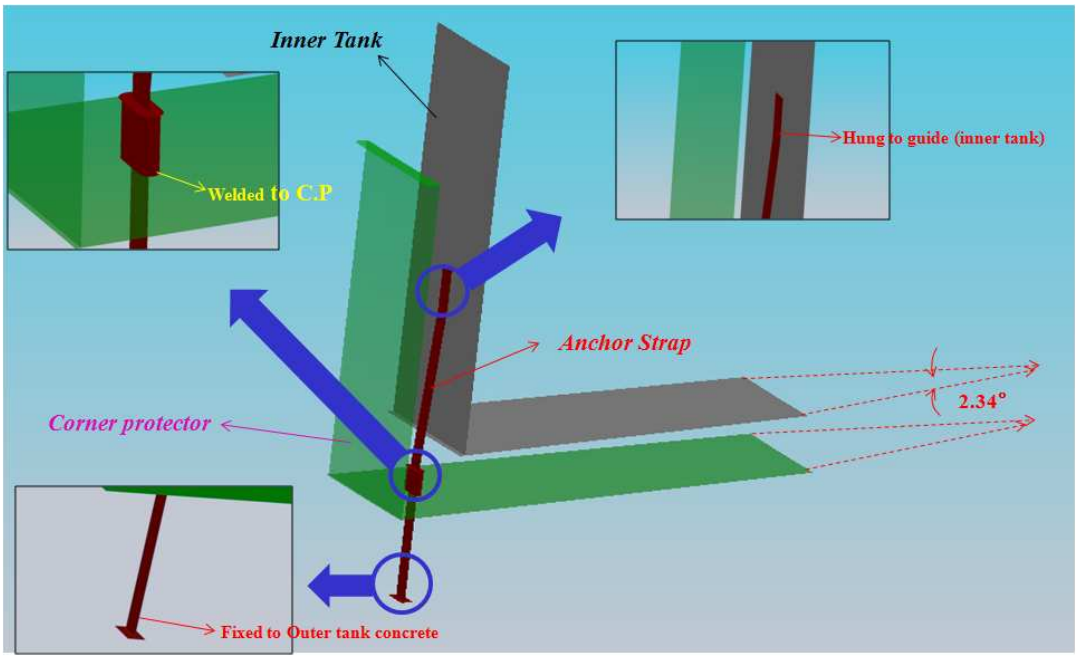



그림 2.4.4 내부탱크, 코너프로텍션, 앵커스트랩의 3-D 모델

표 2.4.1 유한요소해석에 사용한 주요 물성치

| | | |
|---|---|---|
| CTE | at -165°C | 12 X 10 -6 /°C |
| Elastic Modulus | at 15°C | 195 GPa |
| | at -165°C | 204 GPa |
| Minimum yield strength | at 15°C | 585 MPa |
| | at -100°C | 760 MPa |
| | at -170°C | 900 MPa |
| Minimum UTS | at 15°C | 680 MPa |
| | at -100°C | 960 MPa |
| | at -170°C | 1,100 MPa |

나. 하중조건과 경계조건

앵커스트랩 유한요소해석에서 고려한 하중은 다음과 같다.

(1). Normal operation: inner tank full of LNG

(2). Normal operation: inner tank empty of LNG

(3). Hydro test: full of water

(4). SSE earthquake with tank

(5). OBE earthquake with tank

하중조건과 경계조건은 그림 2.4.5~2.4.9에 상세하게 나타내었다.

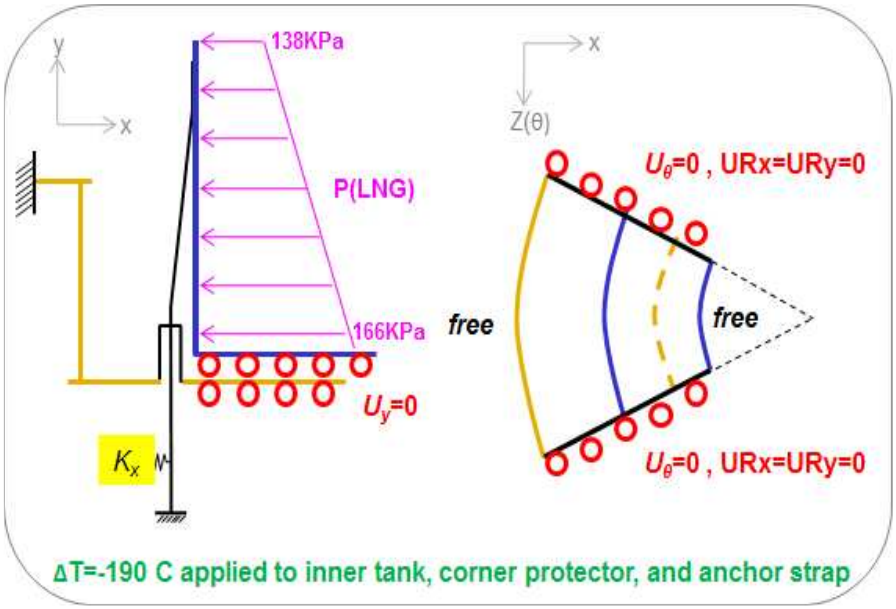



그림 2.4.5 Load and boundary condition for case1

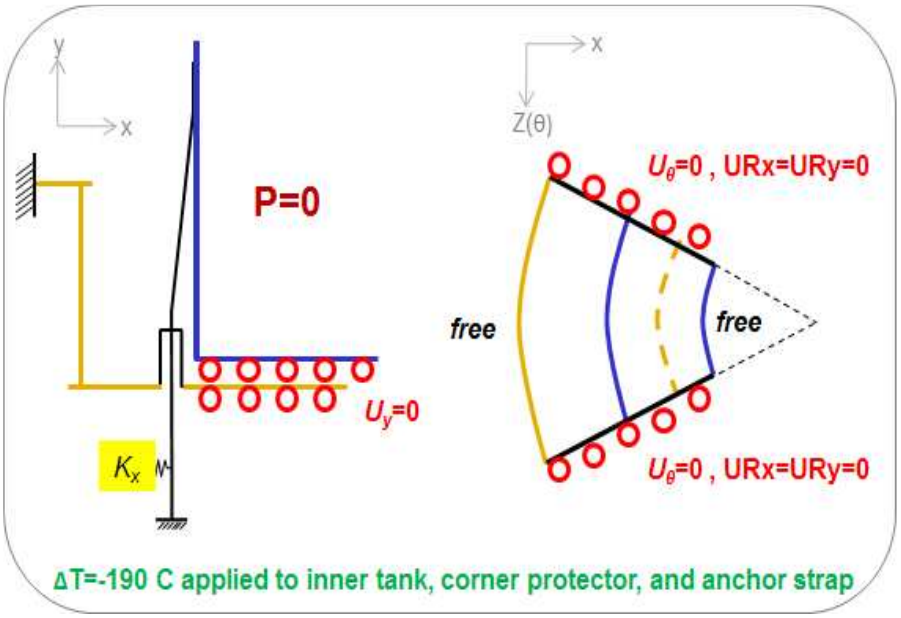



그림 2.4.6 Load and boundary condition for case2

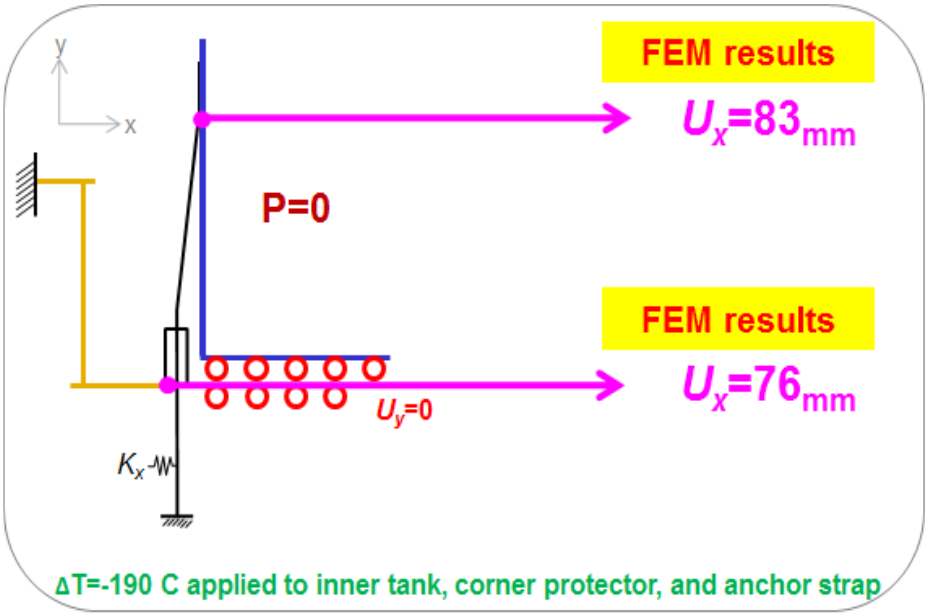



그림 2.4.7 Load and boundary condition for case3

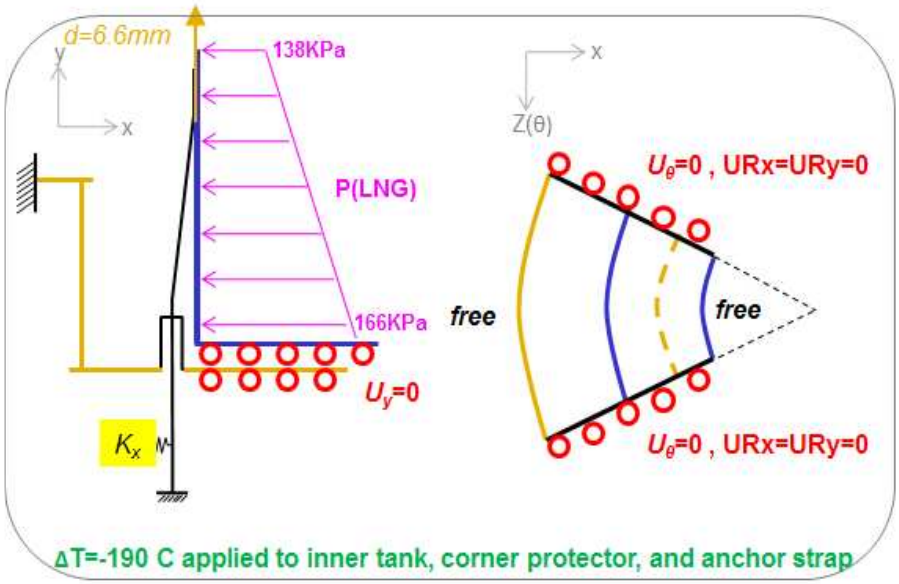



그림 2.4.8 Load and boundary condition for case4

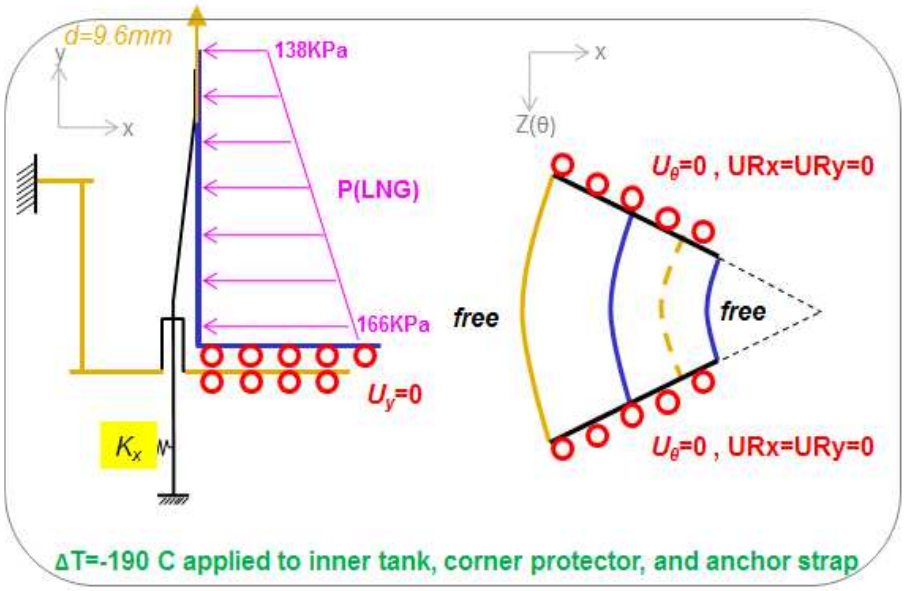



그림 2.4.9 Load and boundary condition for case5

3. 유한요소해석 결과

가. 굽힘 문제에서의 shell 요소와 solid 요소의 비교

앵커스트랩 해석을 진행하기 전에 먼저 유한요소해석의 shell 요소와 solid 요소의 차이점에 대해서 알아보았다(그림 2.4.10). 그림 2.4.11과 같이 외팔보의 자유단에 하중을 가하였을 때, 특정 부분의 두께에 따른 응력분포를 알아보았다. 해석 결과, shell 요소로 해석한 결과가 solid요소로 해석한 결과보다 더 이론값에 가까웠다(그림 2.4.12). 본 연구에서는 shell 요소로 앵커스트랩, 내조벽, 코너프로텍션을 모델링 하였고, 해석한 참고자료와 비교해 보았다.

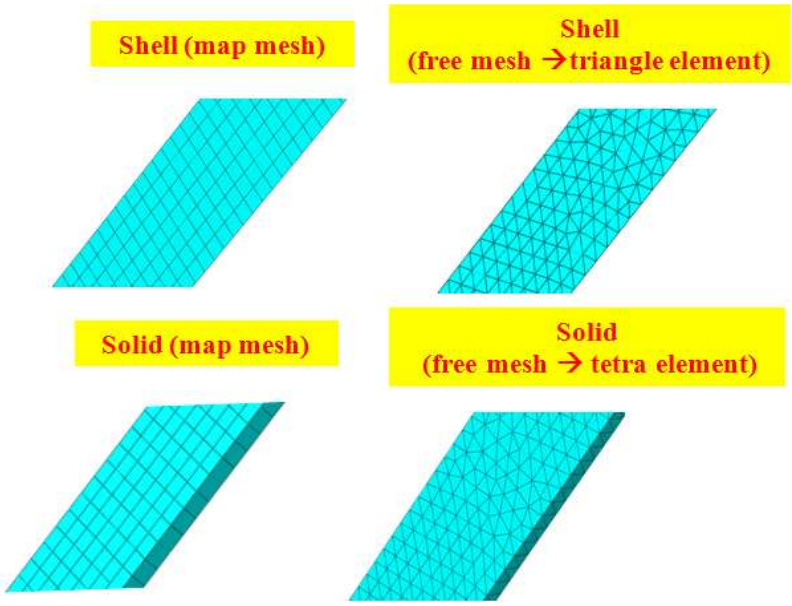



그림 2.4.10 shell 요소와 solid 요소의 기하학적 형상

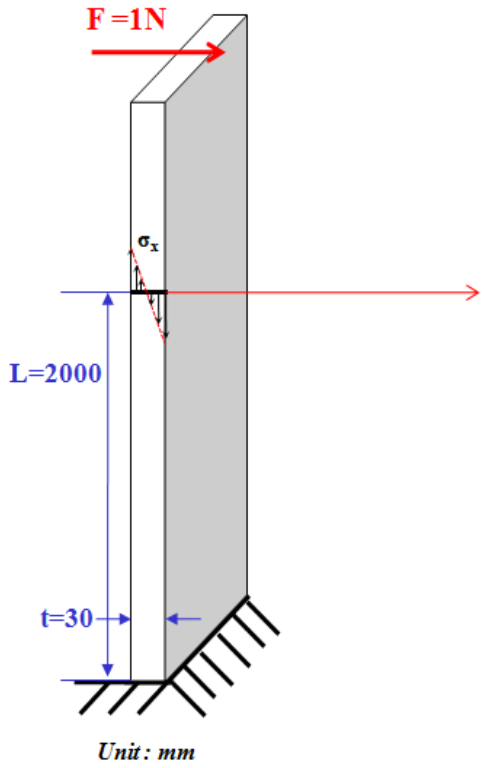



그림 2.4.11 굽힘하중을 받는 외팔보

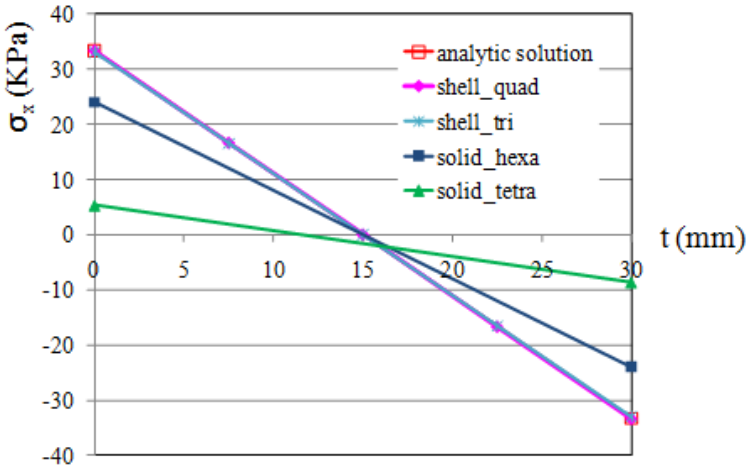



그림 2.4.12 외팔보 고정면으로부터 높이가 2,000mm인 부분의 응력분포

나. 앵커스트립 단일 모델의 해석 결과

그림 2.4.13와 같이 앵커스트랩 단일 모델에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과는 표 2.4.2에 나타내었고, shell 요소로 생성된 앵커스트랩 단일 모델에 대한 해석한 결과를 solid 요소로 생성된 모델을 해석한 참고자료와 비교하였다. 그림 2.4.14~2.4.23는 각 하중조건에 대한 Tresca 응력분포를 나타내는데, 결과에서 볼 수 있듯이 각 하중조건에서 두 가지 서로 다른 요소에 대한 해석 결과들은 유사한 경향을 보인다.

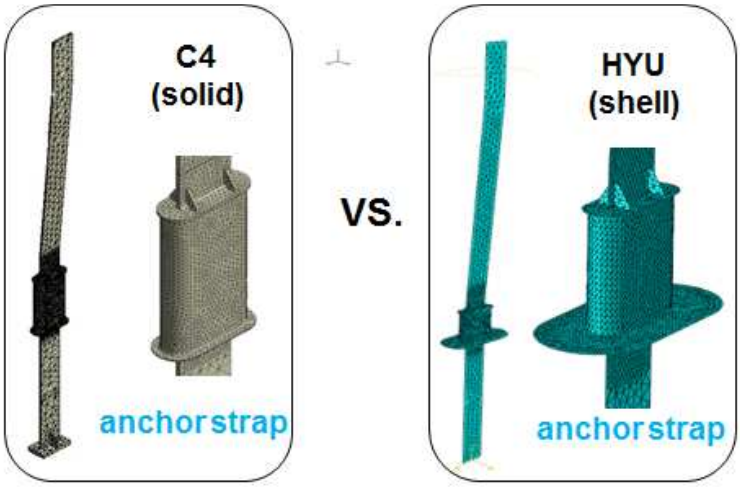



그림 2.4.13 앵커스트랩의 유한요소모델 (solid 요소 & shell 요소)

표 2.4.2 앵커스트랩의 유한요소해석결과 (Tresca stress)

| Case | Part | C4 | Anchor strap (no elastic foundation) | Anchor strap (elastic foundation) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Anchor | 770 | 823 | 811 |
| | Box | 386 | 389 | 390 |
| | 2nd floor | 49 | 54 | 54 |
| 2 | Anchor | 768 | 822 | 810 |
| | Box | 386 | 402 | 403 |
| | 2nd floor | 50 | 102 | 102 |
| 3 | Anchor | 151 | 134 | 134 |
| | Box | 173 | 90 | 90 |
| | 2nd floor | 45 | 60 | 60 |
| 5 | Anchor | 1495 | 1102 | 1102 |
| | Box | 1116 | 1656 | 1656 |
| | 2nd floor | 335 | 1115 | 1115 |
| 6 | Anchor | 795 | 945 | 933 |
| | Box | 553 | 774 | 774 |
| | 2nd floor | 148 | 517 | 518 |

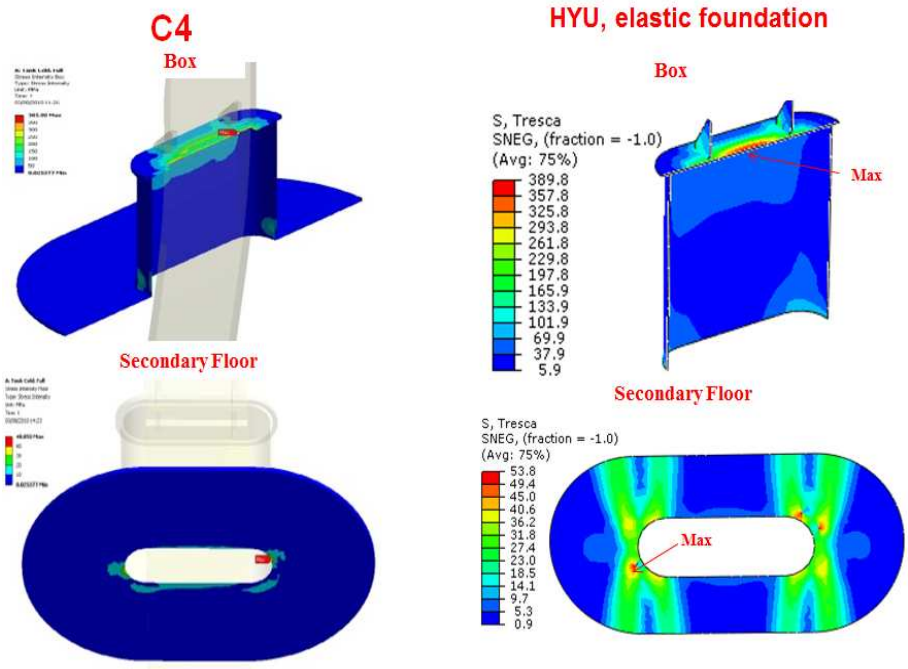



그림 2.4.14 FEM result for case1(1)

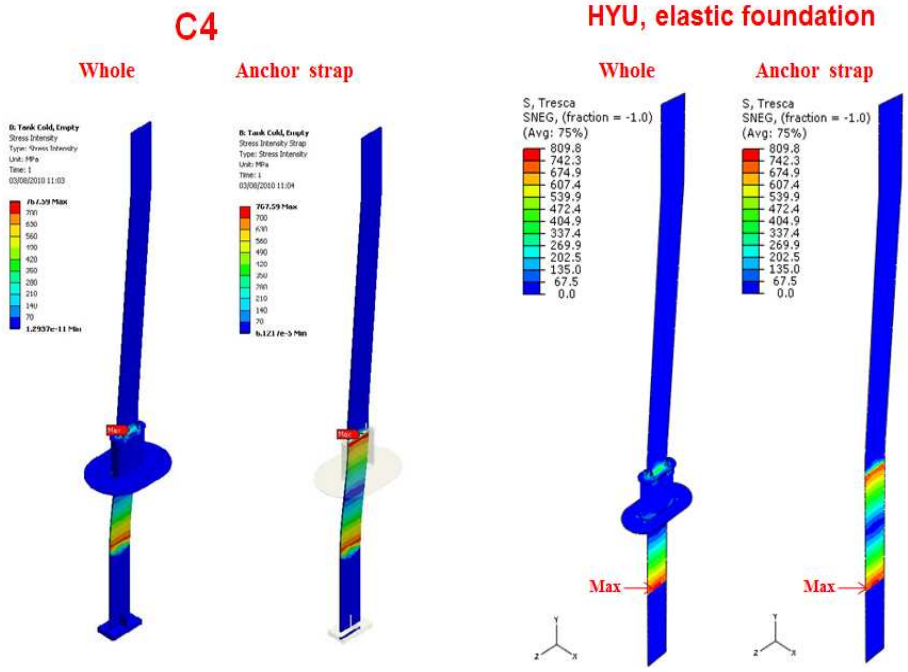



그림 2.4.15 FEM result for case1(2)

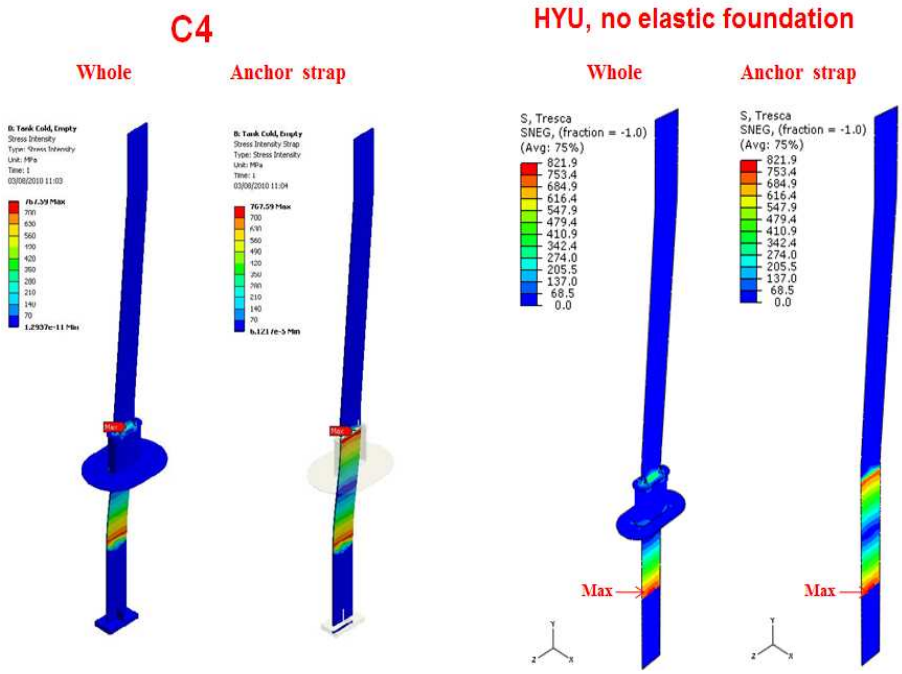



그림 2.4.16 FEM result for case2(1)

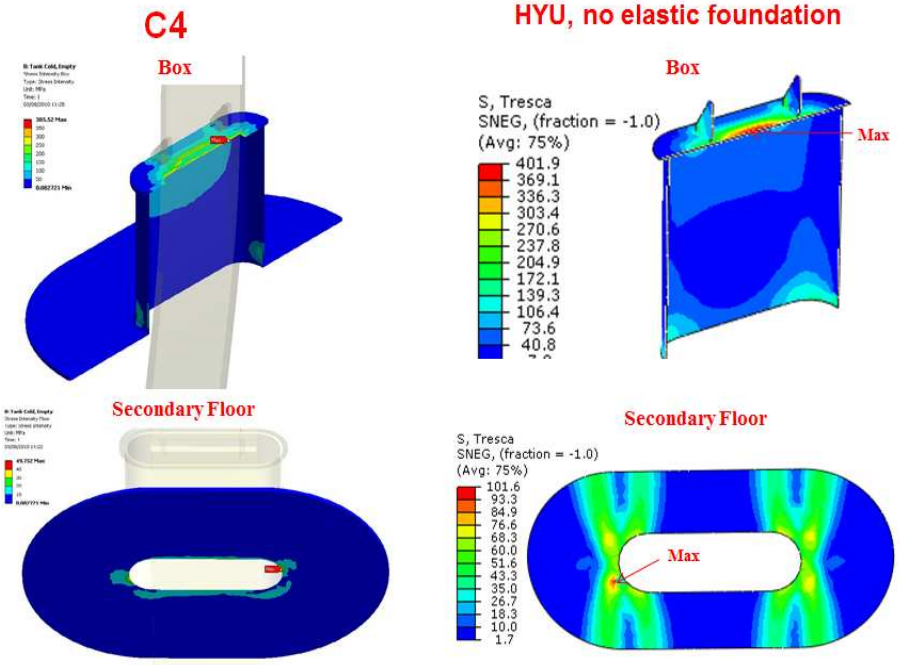



그림 2.4.17 FEM result for case2(2)

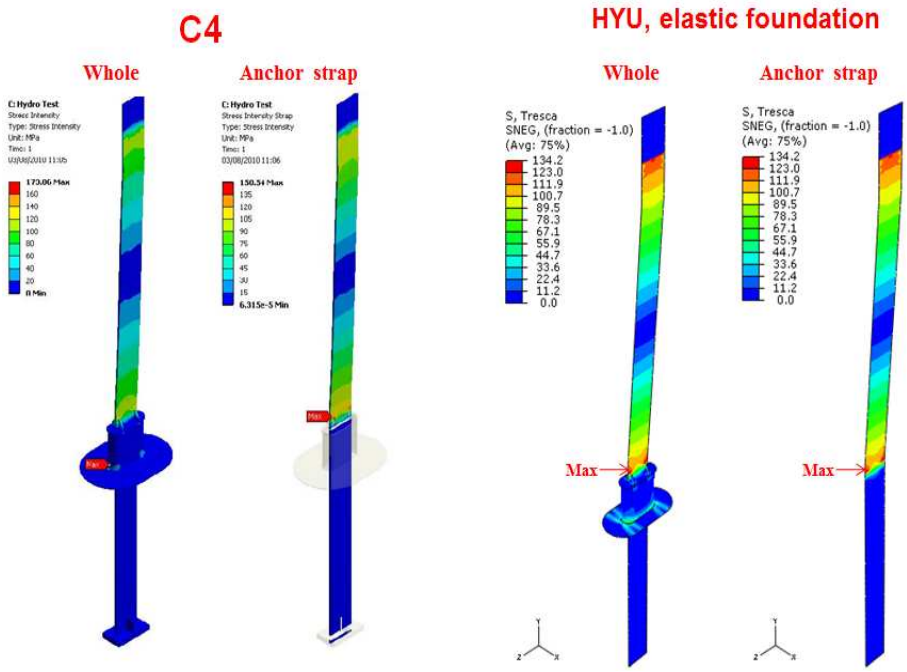



그림 2.4.18 FEM result for case3(1)

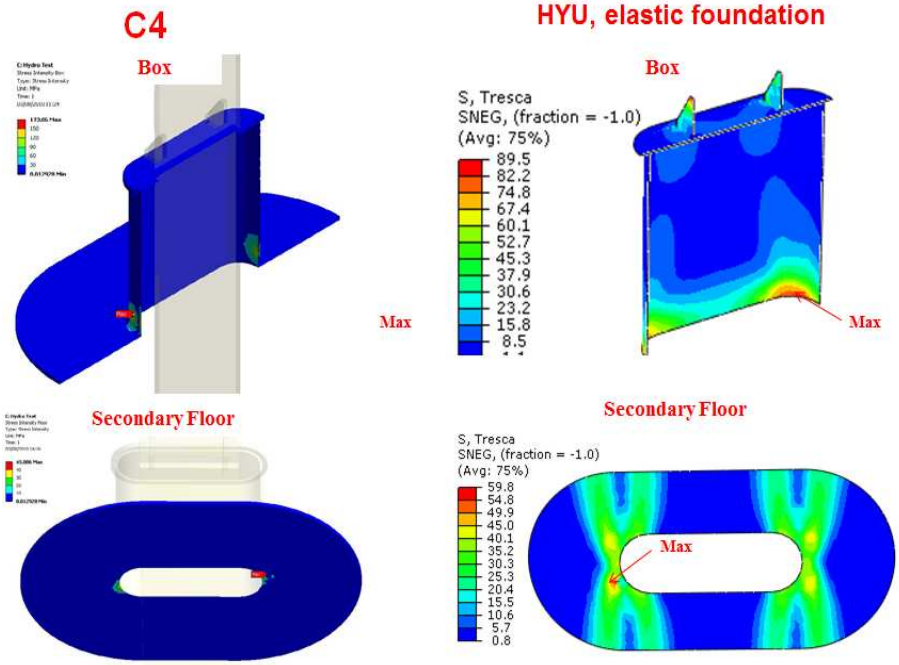



그림 2.4.19 FEM result for case3(2)

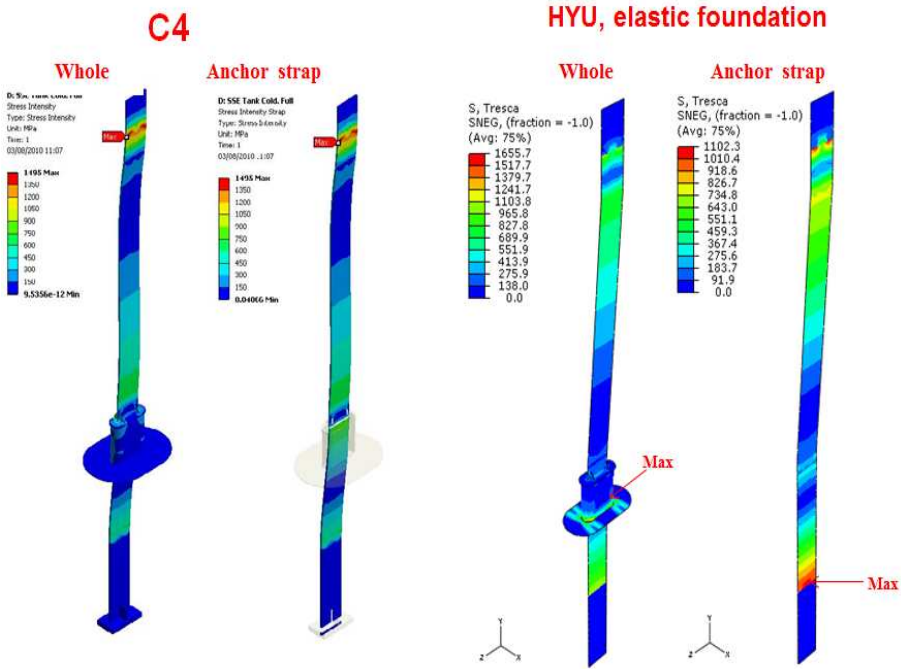



그림 2.4.20 FEM result for case5(1)

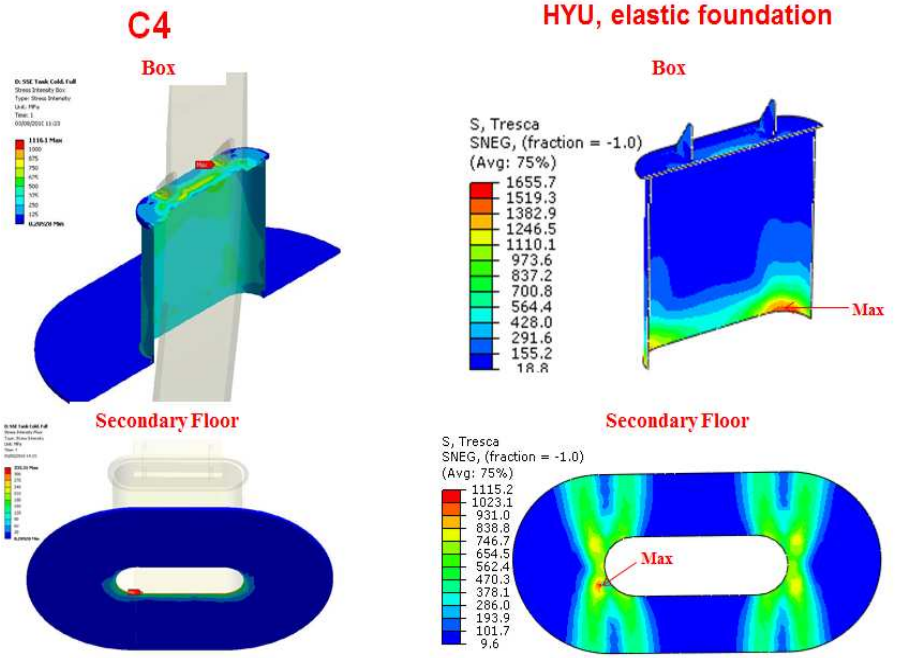



그림 2.4.21 FEM result for case5(2)

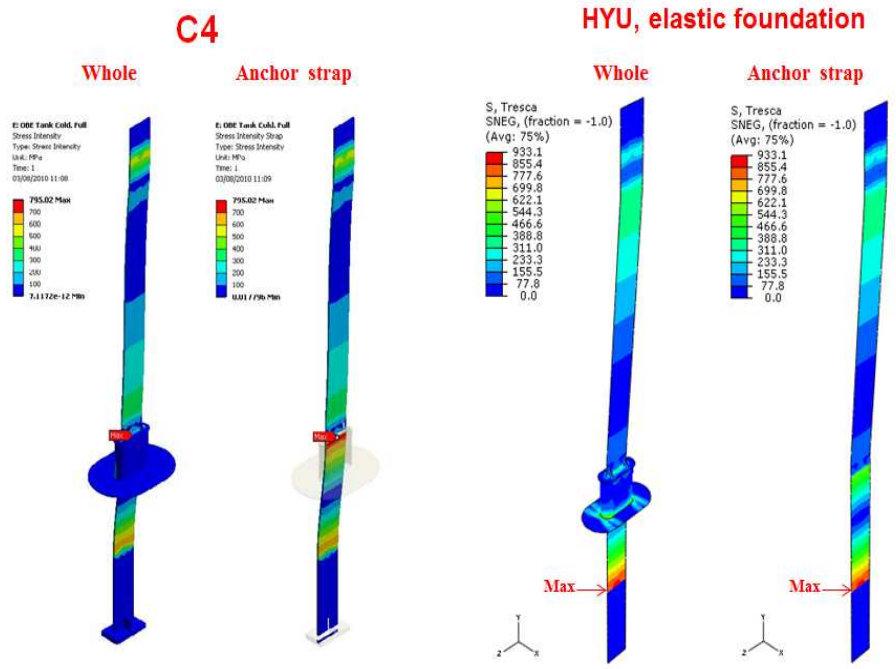



그림 2.4.22 FEM result for case6(1)

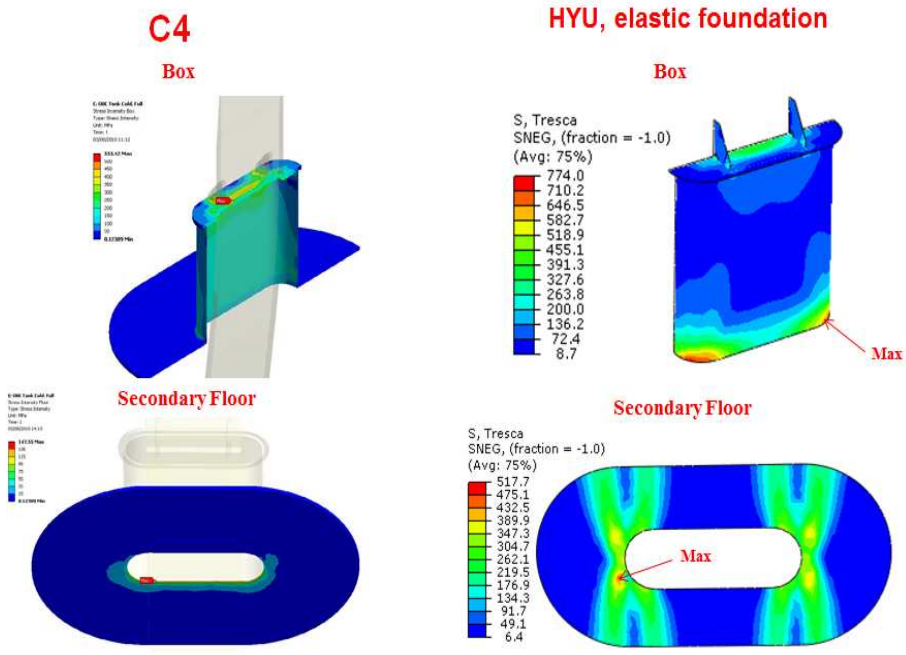



그림 2.4.23 FEM result for case6(2)

다. 내조, 코너프로텍션과 동시에 고려하여 해석한 결과

앵커스트랩의 한쪽 끝은 내조벽과 연결되어 있고 코너프로텍션을 통하여 외조콘크리트 바닥과 연결되어 있기 때문에, 앵커스트랩 설계 시 탱크내조와 코너프로텍션을 동시에 고려할 필요가 있다. 5가지 하중조건에 대해 앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션이 동시에 고려된 모델(그림 2.4.23)에 대해 유한요소해석을 수행하였고, 결과를 표 3.2.3에 정리하였다. 또한 위 결과를

앵커스트랩 단일 모델에 대한 해석 결과(solid & shell)와 비교하였다. 그림 2.4.25~2.4.26에 응력분포를 나타낸다.

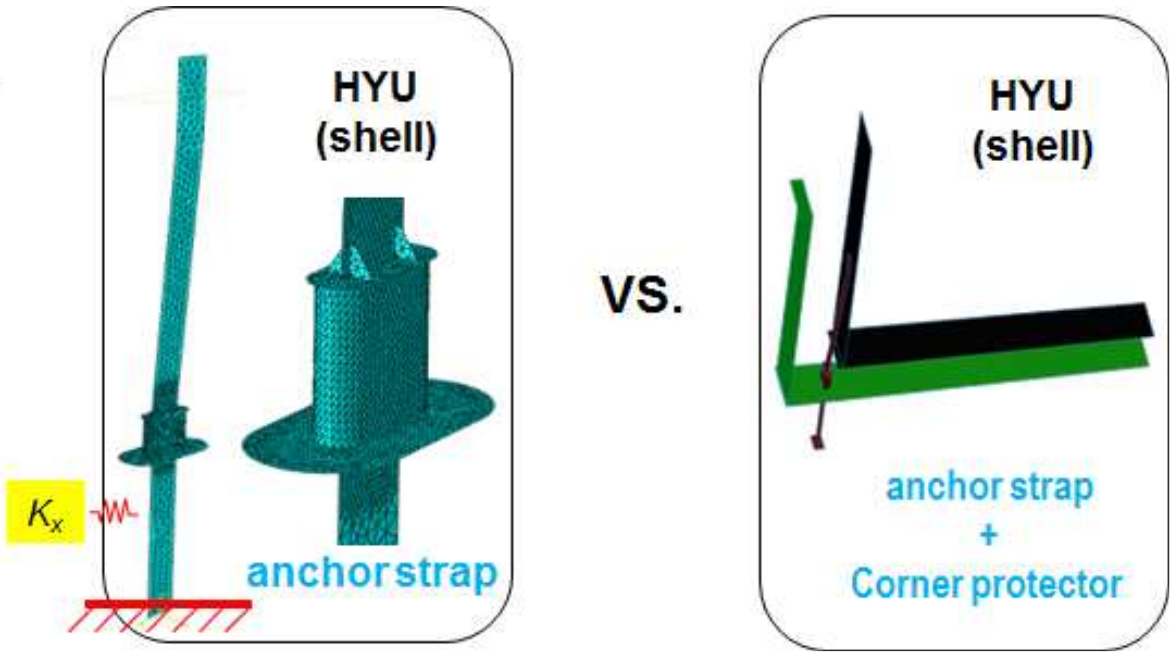



그림 2.4.24 앵커스트랩 단일 모델과 앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션을 함께 고려한 유한요소모델

앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션을 함께 고려한 해석 결과는 앵커스트랩 단일 모델에 대한 해석 결과와 다소 차이를 보이는데, 이는 탱크전체가 하중을 받았을 때, 앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션 사이에 서로 영향을 미치고 있다고 설명할 수 있다. 따라서 앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션을 함께 모델링하여 해석할 경우, 앵커스트랩 단일 모델에 비해 실제적인 거동을 나타낸다고 할 수 있다.

표 2.4.3 앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션을 함께 고려하여 해석한 유한요소해석 결과와 앵커스트랩 단일 모델의 유한요소해석 결과 (Tresca stress)

| Case | Part | C4 | HYU (Anchor strap) | HYU (Full model) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Anchor | 770 | 811 | 920 |
| | Box | 386 | 390 | 433 |
| | Corner protector | N/A | N/A | 627 |
| 2 | Anchor | 768 | 810 | 836 |
| | Box | 386 | 403 | 833 |
| | Corner protector | N/A | N/A | 1137 |
| 3 | Anchor | 151 | 134 | 392 |
| | Box | 173 | 90 | 1367 |
| | Corner protector | N/A | N/A | 1929 |
| 5 | Anchor | 1495 | 1102 | 1523 |
| | Box | 1116 | 1656 | 4045 |
| | Corner protector | N/A | N/A | 5674 |
| 6 | Anchor | 795 | 933 | 1268 |
| | Box | 553 | 774 | 3123 |
| | Corner protector | N/A | N/A | 4373 |

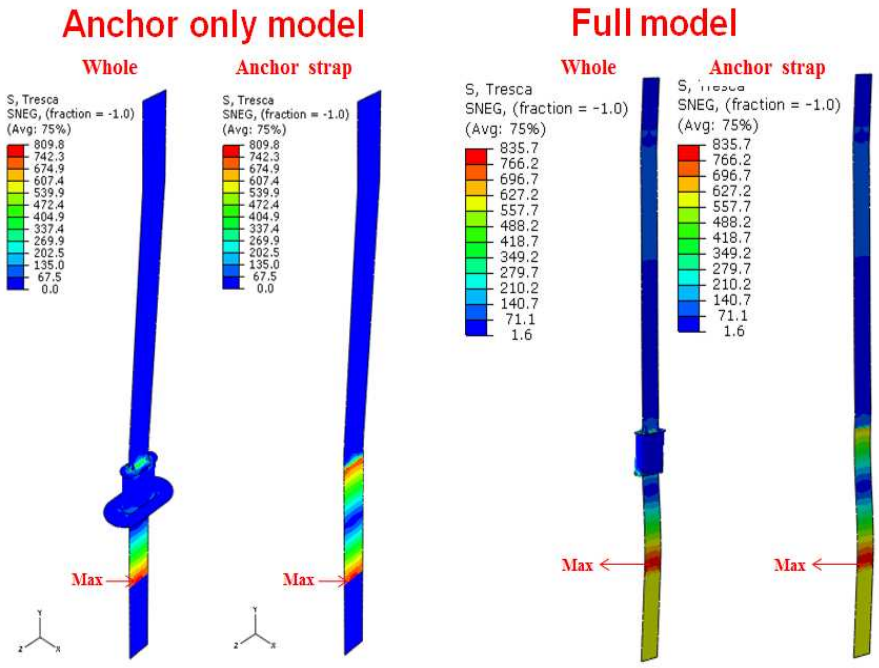



그림 2.4.25 FEM result for case2(1)

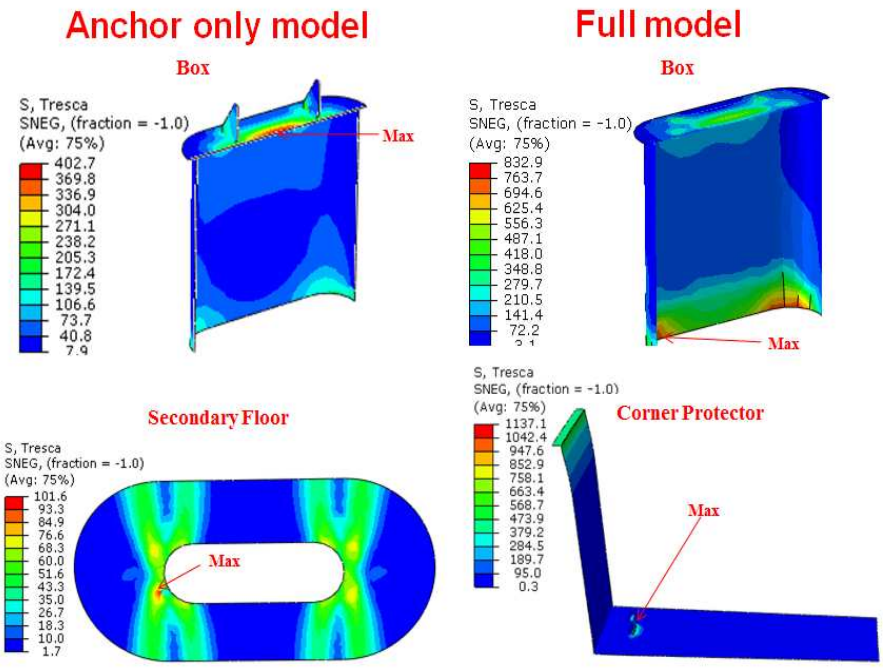



그림 2.4.26 FEM result for case2(1)

4. 결론

앵커스트랩에 대한 유한요소해석결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

가. 굽힘 하중조건에 놓여 있는 구조물의 유한요소해석 시에는 solid 요소에 비해 shell 요소가 보다 정확한 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

나. 앵커스트랩, 내조, 코너프텍션은 구조적으로 서로 연결되어있기 때문에 유한요소해석 시 상호간에 미치는 영향을 고려하기 위해 함께 모델링하여 해석하여야 한다.

다. 앵커스트랩, 내조, 코너프로텍션을 함께 고려하여 해석한 결과 단일 모델에 비해 요소 상호간의 영향이 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 단일 모델에 비해 실제적인 거동을 표현한다고 할 수 있다.

# 5절. 관통파이프의 유한요소해석

## 1. 개요

본 연구에서는 LNG 저장탱크 기계 설계 요소 중 관통파이프의 구조해석을 수행하였다. LNG 저장탱크의 지붕을 관통하는 관통파이프는 저장탱크의 종류 및 크기에 따라 관통파이프의 구조가 변경되므로 LNG 저장탱크의 초대형화를 위해서는 설계 인자를 이용한 설계 기법이 확보되어야 한다. 그림 2.5.1은 관통파이프의 위치 및 구성요소를 나타낸다.

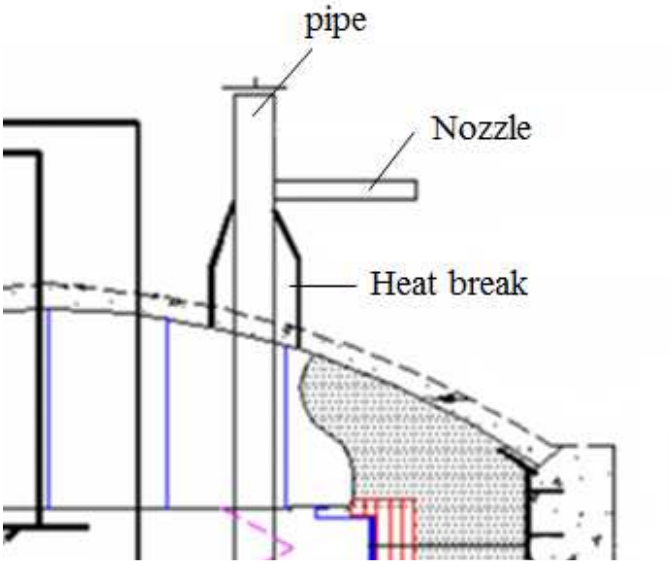



그림 2.5.1 관통파이프의 위치 및 구성요소

관통파이프는 극저온의 LNG가 외부로부터 탱크 내부로 주입하거나 내조 안의 LNG를 외부로 배출하는 작용을 한다. 그림 2.5.2은 LNG 저장탱크 관통파이프의 위치를 나타내는데, 관통파이프는 탱크 상단으로부터 콘크리트 지붕을 통과하여 내부탱크로 들어간다. 관통파이프는 저장탱크의 종류 및 크기에 따라 관통파이프의 구조가 변경되므로 LNG 저장탱크의 초대형화를 위해서는 설계 인자를 이용한 설계 기법이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 두 가지 서로 다른 종류의 관통파이프에 대해 다섯 가지 하중조건에서의 유한요소해석을 수행하였고, 참고자료와 비교해 보았다.

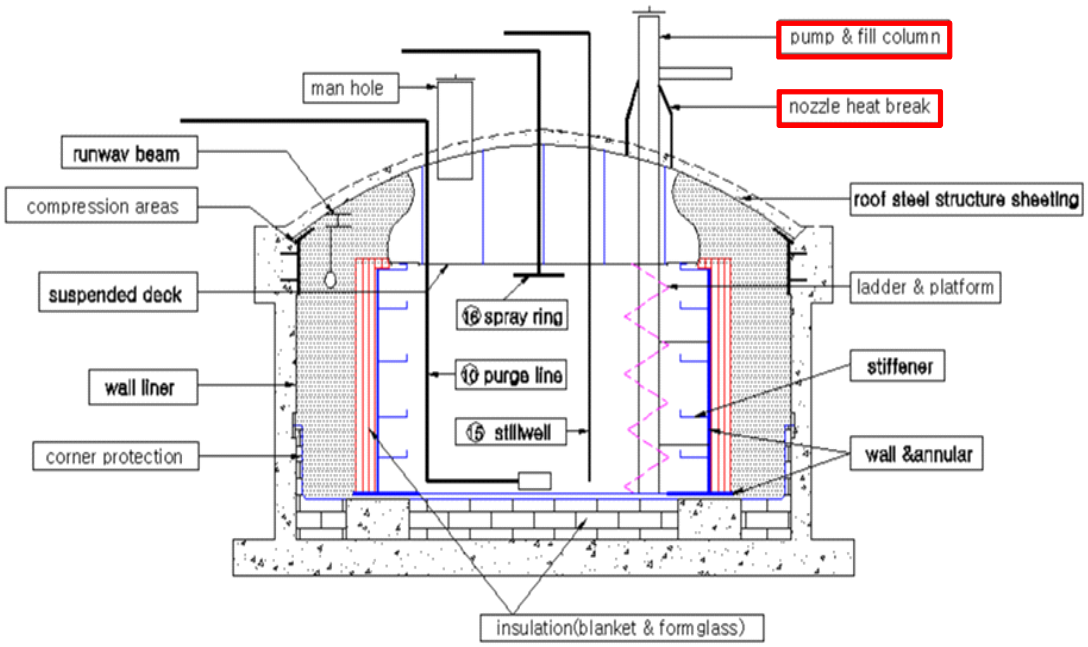



그림 2.5.2 LNG 저장탱크의 단면도 및 관통파이프의 위치

## 2. N1 모델의 유한요소해석

### 가. 유한요소모델

그림 2.5.3은 N1 모델의 유한요소해석에 사용된 형상치수와 설치위치를 나타낸다.

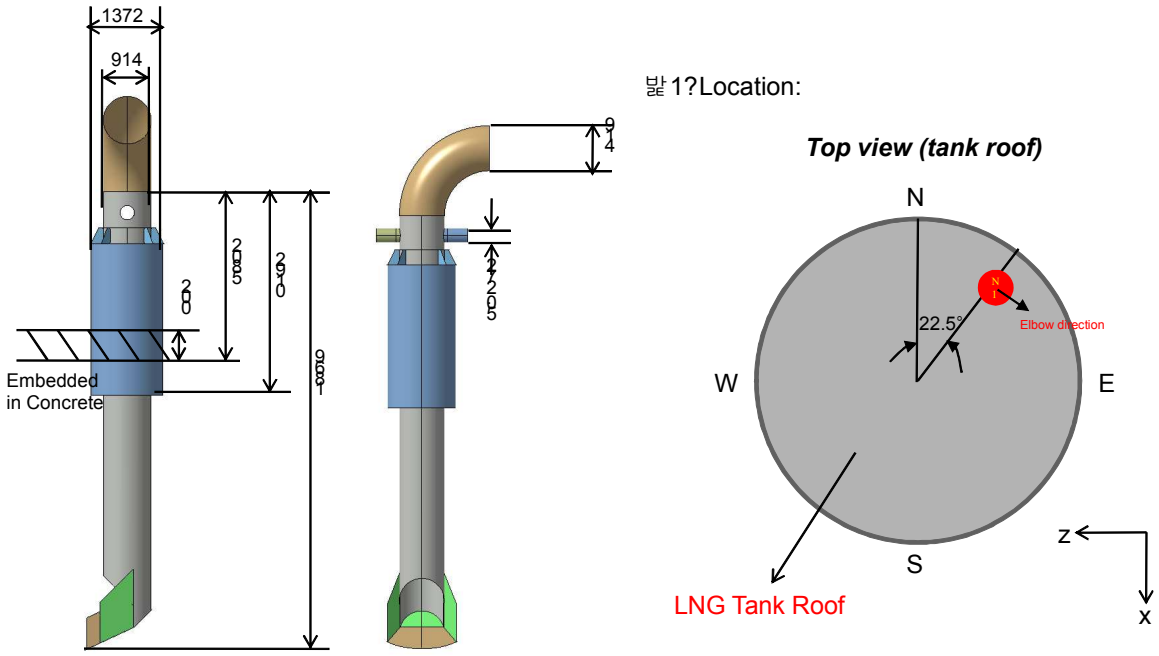



그림 2.5.3 N1 관통파이프의 형상치수 및 설치위치

CATIA를 이용하여 3D 모델링을 생성하였고, ABAQUS를 이용하여 유한요소모델을 생

성하였다(그림 2.5.4). 제 V편에서 수행된 앵커스트랩의 해석을 통해 굽힘 문제에서는 solid 요소보다 shell 요소가 보다 정확하다는 결론을 얻었으므로 관통파이프의 유한요소모델 또한 shell 요소를 사용하였다.



그림 2.5.4 N1 관통파이프의 유한요소모델

참고자료인 C4모델은 solid요소를 사용하였는데, 그림 2.5.5에서 볼 수 있듯이 solid 요소를 이용한 유한요소모델에서는 두께방향으로의 요소 개수에 따라 결과의 정확도가 현저히 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 solid요소 대신 shell 요소를 이용하여 관통파이프의 유한요소모델을 생성하였고 해석한 참고자료와 비교해 보았다.

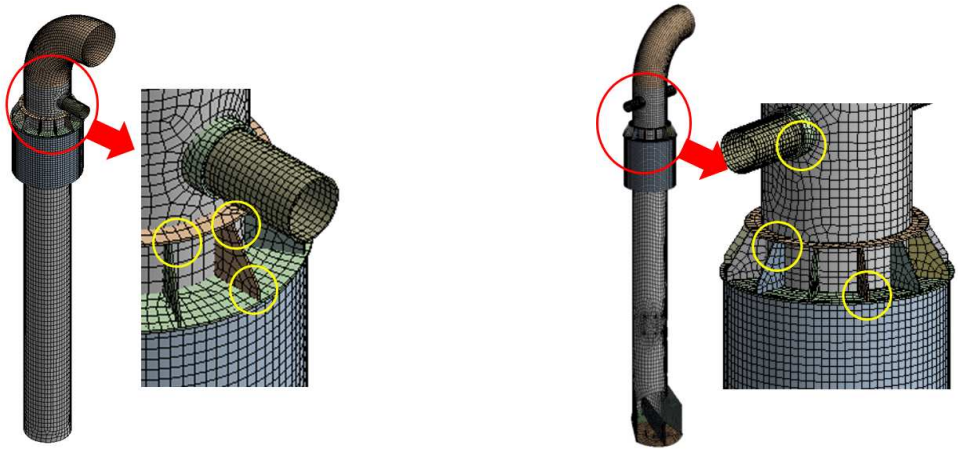


그림 2.5.5 C4 모델(참고자료)의 solid 유한요소모델

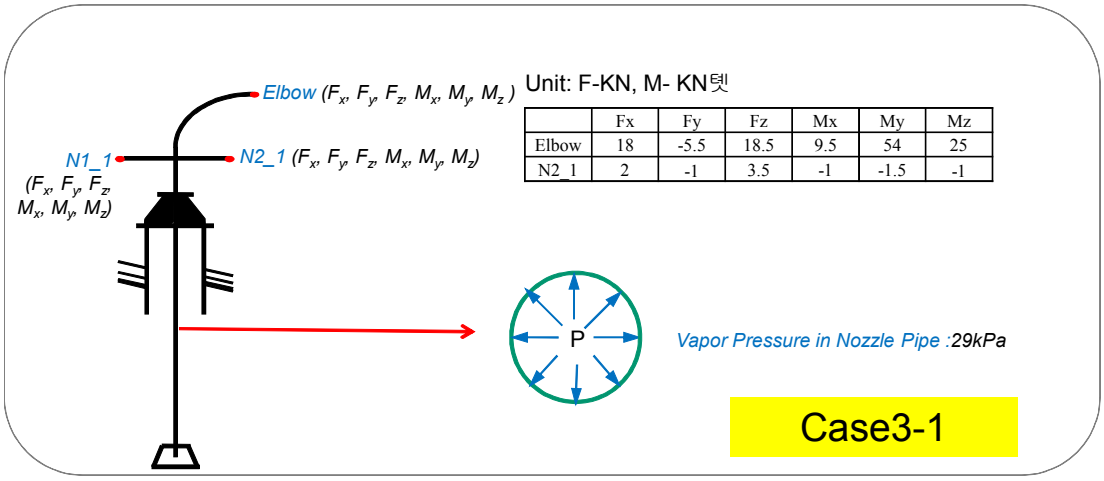
나. 하중조건 및 경계조건

N1 모델의 유한요소해석에서 고려한 하중은 다음과 같다(그림 2.5.6~2.5.9).

(가). Design operating

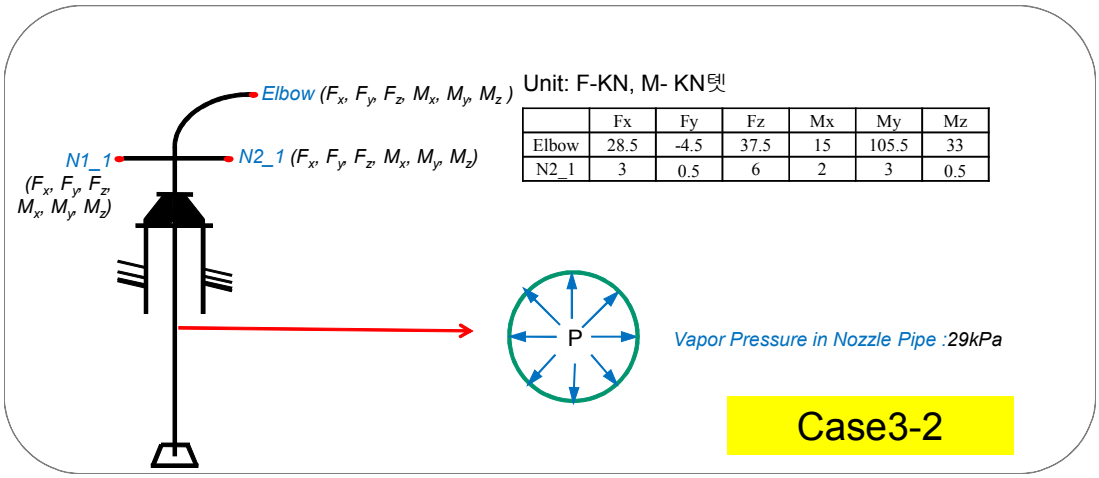
(나). Design operating + wind

(다). Seismic loading (OBE)
(라). Seismic loading (SSE)
(마). Tank piping hydro test
(바). Water hammer



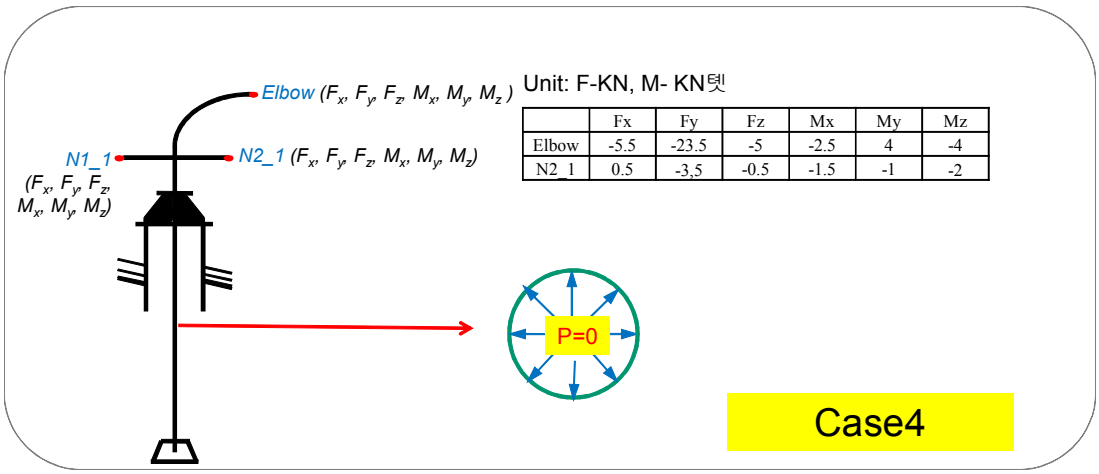

| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | 18 | -5.5 | 18.5 | 9.5 | 54 | 25 |
| N2_1 | 2 | -1 | 3.5 | -1 | -1.5 | -1 |

그림 2.5.6 Seismic loading (OBE) 하중조건



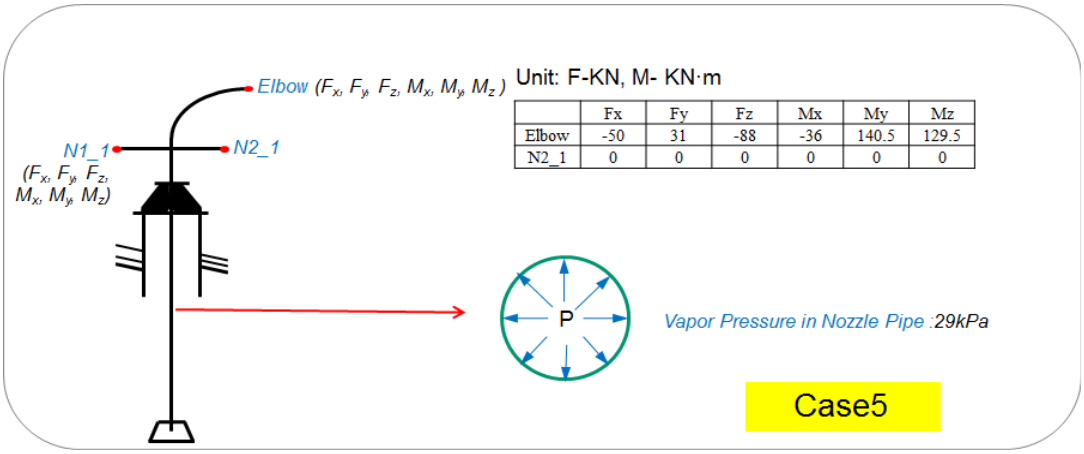

| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | 28.5 | -4.5 | 37.5 | 15 | 105.5 | 33 |
| N2_1 | 3 | 0.5 | 6 | 2 | 3 | 0.5 |

그림 2.5.7 Seismic loading (SSE) 하중조건




| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | -5.5 | -23.5 | -5 | -2.5 | 4 | -4 |
| N2_1 | 0.5 | -3,5 | -0.5 | -1.5 | -1 | -2 |

그림 2.5.8 Tank piping hydro test 하중조건




| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | -50 | 31 | -88 | -36 | 140.5 | 129.5 |
| N2_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

그림 2.5.9 Water hammer 하중조건

다. 유한요소해석 결과

그림 2.5.10~2.5.14는 N1 모델의 각 하중조건에 대한 Tresca 응력 분포를 나타낸다. C4 모델의 결과와 비교 시, shell요소를 사용하여 해석한 결과는 참고자료와 유사한 응력분포 경향을 보인다. 각 하중조건에서의 변위분포도 참고자료의 해석결과와 유사한 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다. 표 2.5.1은 각 하중조건에서의 최대 Tresca 응력과 최대변위를 나타낸다. 본 연구에서 진행한 해석결과는 참고자료와 유사한 거동을 나타낸다. 하지만, 참고자료에서 solid요소를 적용했다는 점을 고려했을 경우, 본 연구에서 수행한 해석결과는 좀 더 정확한 값을 나타낸다고 말할 수 있다.

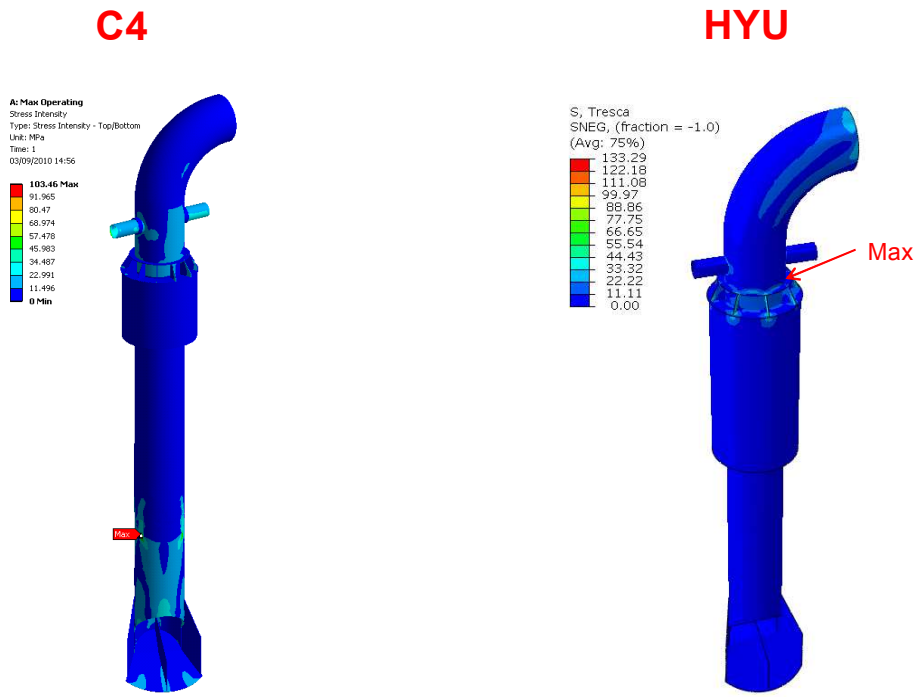



그림 2.5.10 N1모델의 하중조건 1 에서의 Tresca 응력분포

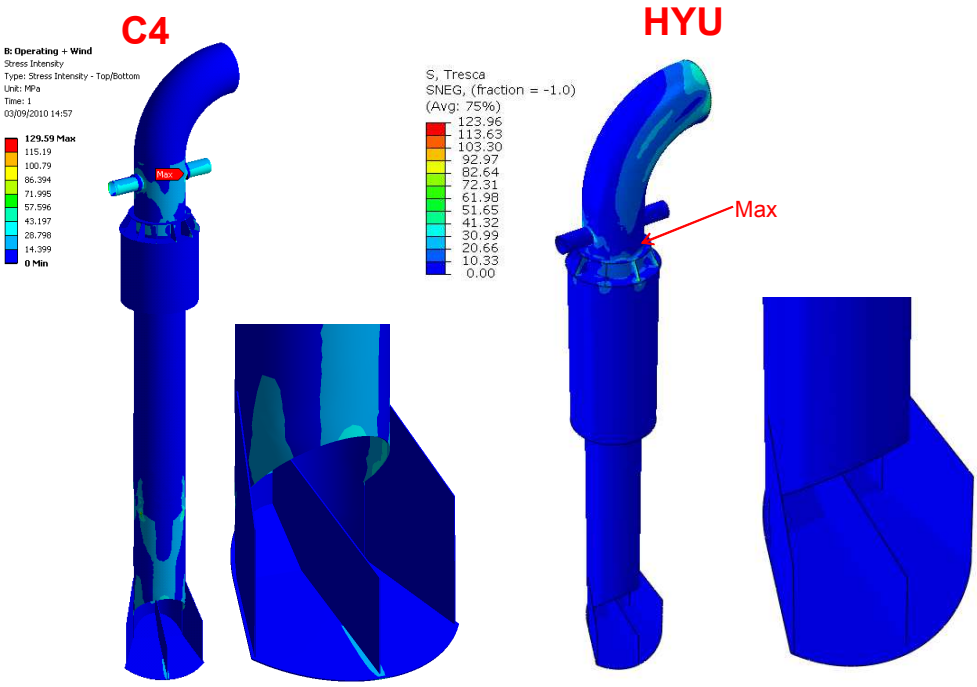



그림 2.5.11 N1모델의 하중조건 2 에서의 Tresca 응력분포

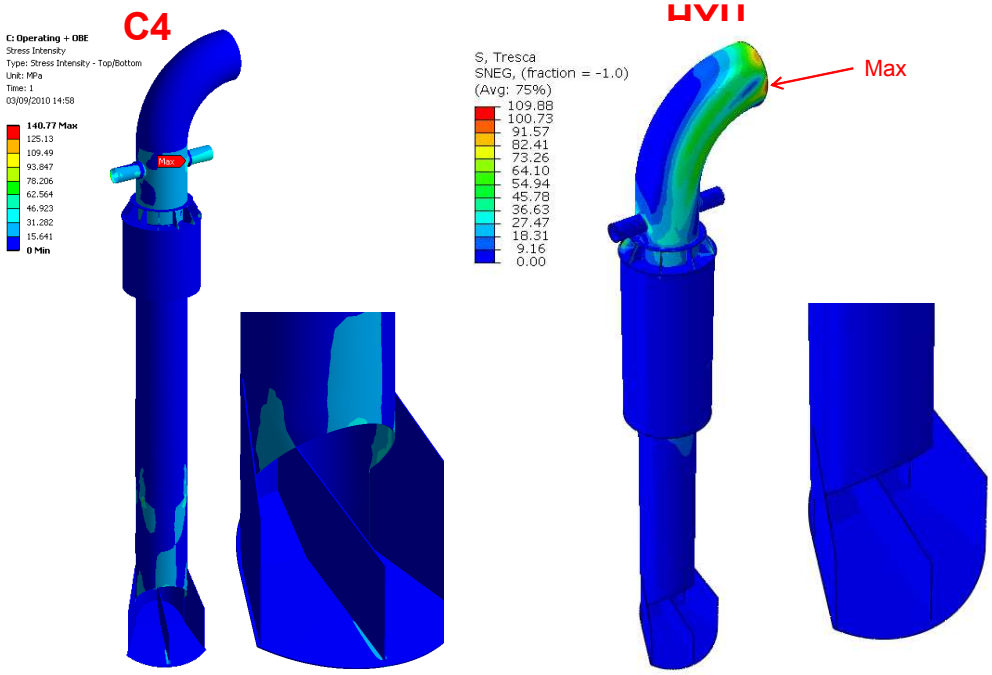



그림 2.5.12 N1모델의 하중조건 3-1 에서의 Tresca 응력분포

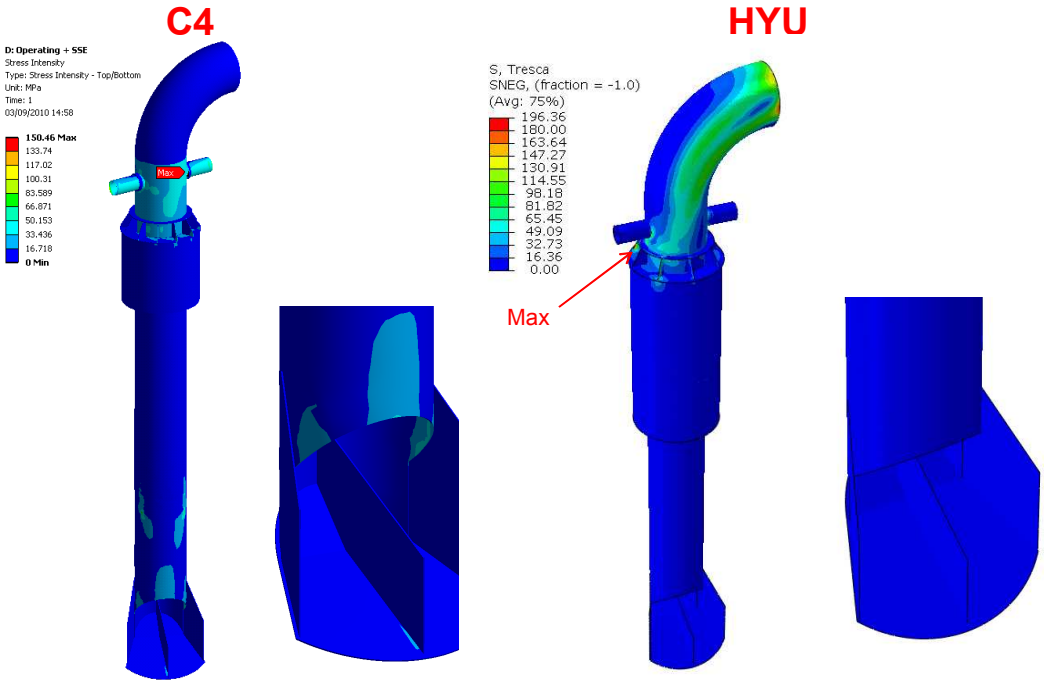



그림 2.5.13 N1모델의 하중조건 3-2 에서의 Tresca 응력분포

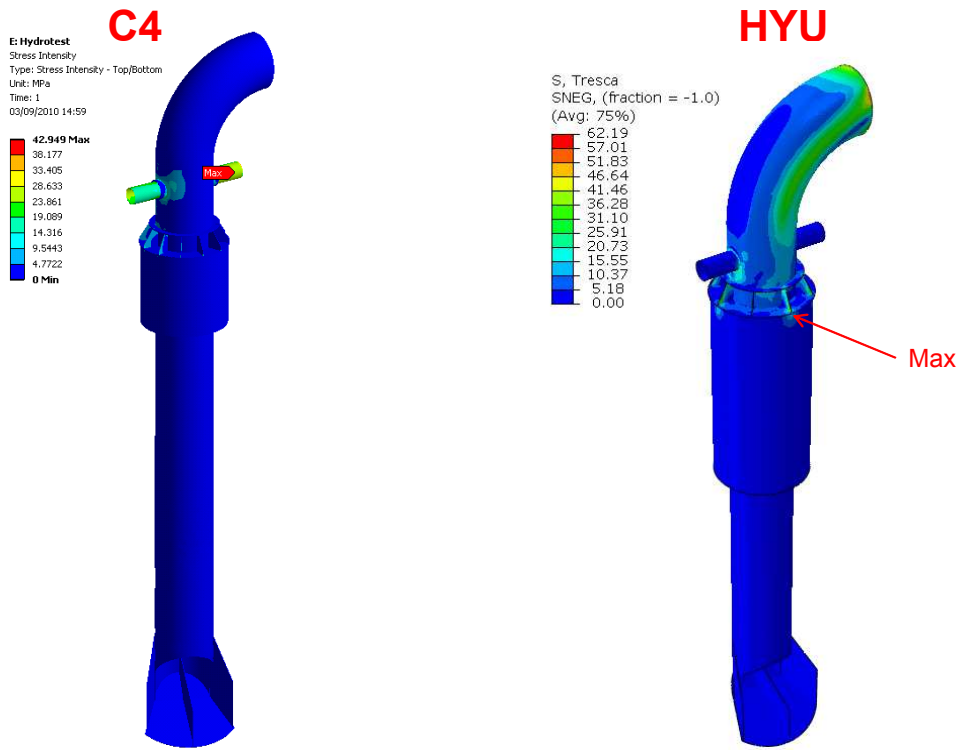



그림 2.5.14 N1모델의 하중조건 4 에서의 Tresca 응력분포

표 2.5.1 N1모델의 유한요소해석 결과

(단위:MPa, mm)

| Case | Max value | C4 (solid) | HYU (shell) |
|---|---|---|---|
| 1 | Tresca | 103.5 | 133 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 2.929 | 7.18 |
| | Location | Deflector Assy. | Deflector assy |
| 2 | Tresca | 129.6 | 123.96 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 2.929 | 6.57 |
| | Location | Deflector Assy. | Deflector assy |
| 3(1) | Tresca | 140.8 | 109.88 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Top elbow |
| | Disp. | 3.063 | 9.21 |
| | Location | Deflector Assy. | Top elbow |
| 3(2) | Tresca | 150.5 | 196.36 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 3.26 | 16.33 |
| | Location | Deflector Assy. | Top elbow |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 4 | Tresca | 43 | 62.19 |
| | Location | N1-1 Nozzle | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 0.449 | 5.09 |
| | Location | N1-1 Nozzle | Top elbow |
| 5 | Tresca | 161.33 | 609.75 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 3.098 | 29 |
| | Location | Deflector Assy. | Top elbow |

3. N2 모델의 유한요소해석

가. 유한요소모델

그림 2.5.15는 N2 모델의 유한요소해석에 사용된 형상치수와 설치위치를 나타낸다.

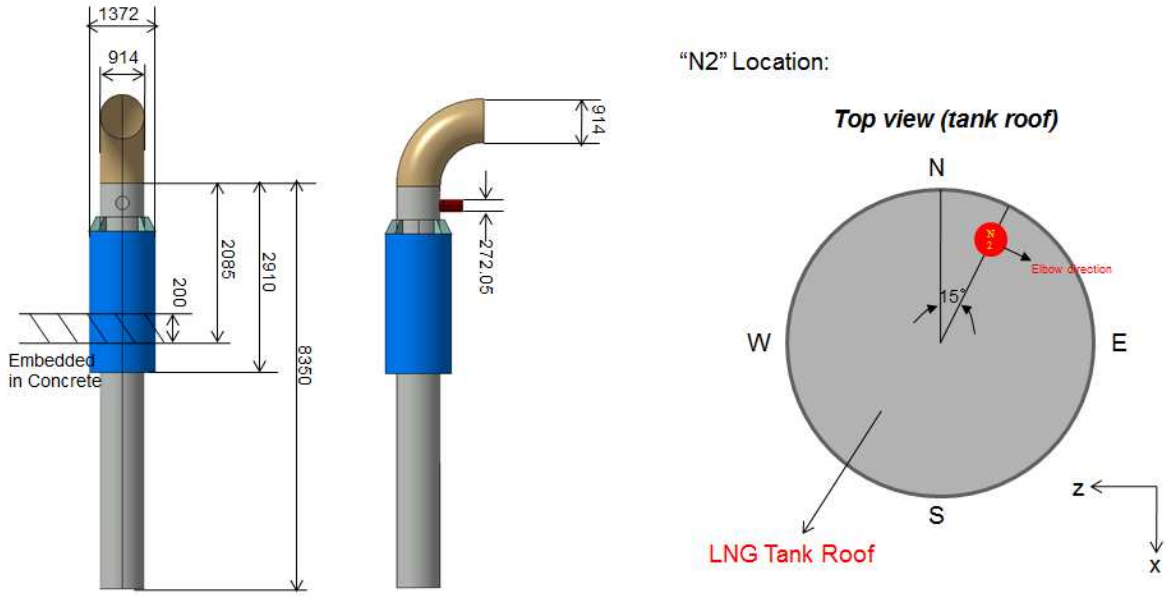



그림 2.5.15 N2 관통파이프의 형상치수 및 설치위치

CATIA를 이용하여 3D 모델링을 생성하였고, ABAQUS를 이용하여 유한요소모델을 생성하였다(그림 2.5.16). 또한 N1 모델과 마찬가지로 shell 요소를 사용하여 모델링하였다.



그림 2.5.16 N2 관통파이프의 유한요소모델

나. 하중조건 및 경계조건

N2 모델의 유한요소해석에서 고려한 하중은 다음과 같다(그림 2.5.17~2.5.22).

(가). Design operating

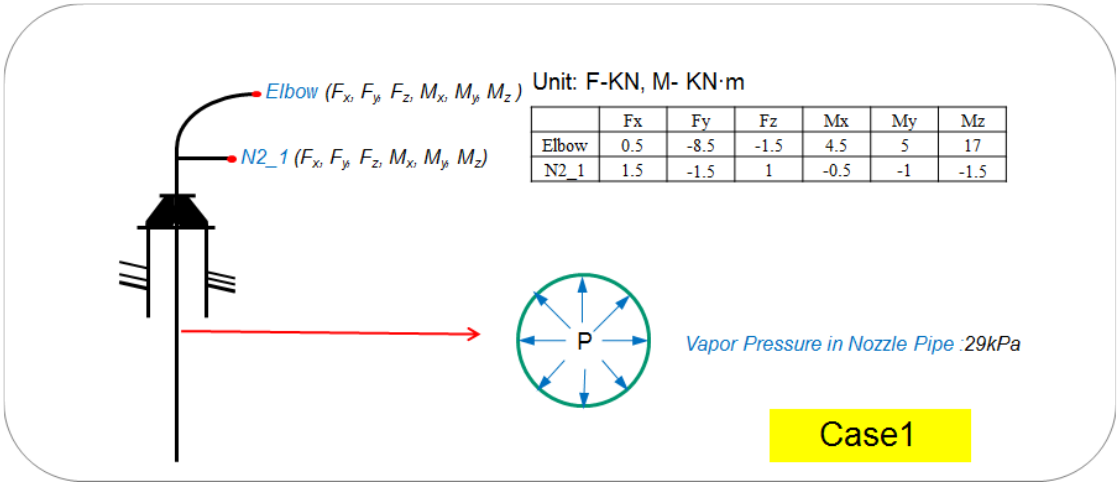
(나). Design operating + wind

(다). Seismic loading (OBE)

(라). Seismic loading (SSE)

(마) Tank piping hydro test

(바). Water hammer




| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | 0.5 | -8.5 | -1.5 | 4.5 | 5 | 17 |
| N2_1 | 1.5 | -1.5 | 1 | -0.5 | -1 | -1.5 |

그림 2.5.17 Design operating 하중조건

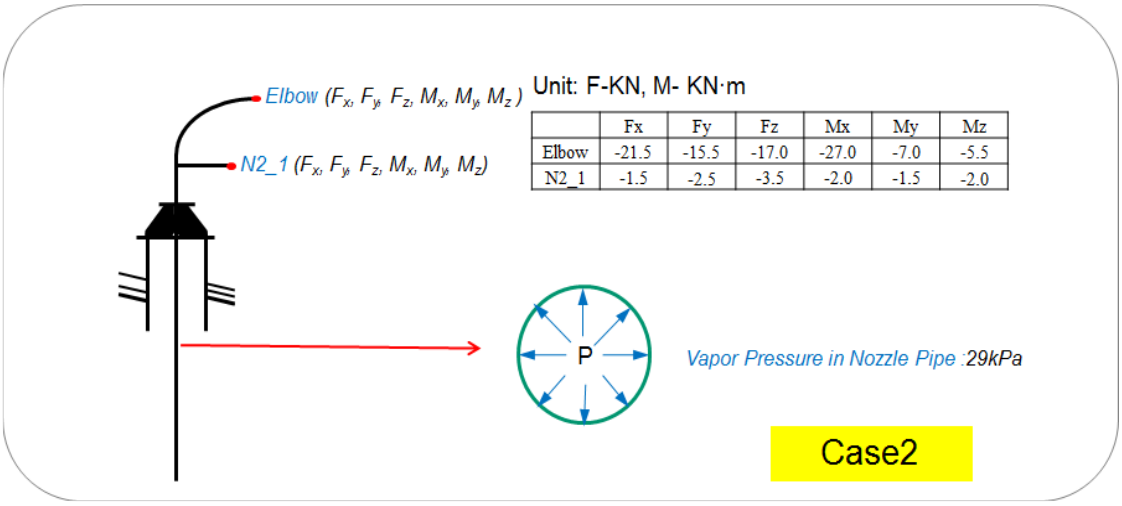



그림 2.5.18 Design operating + wind 하중조건

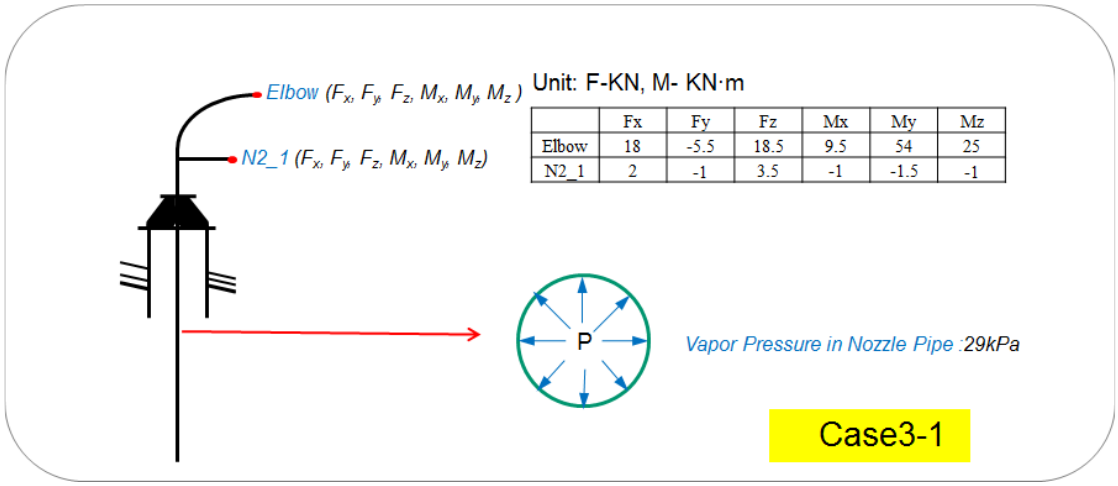



그림 2.5.19 Seismic loading (OBE) 하중조건

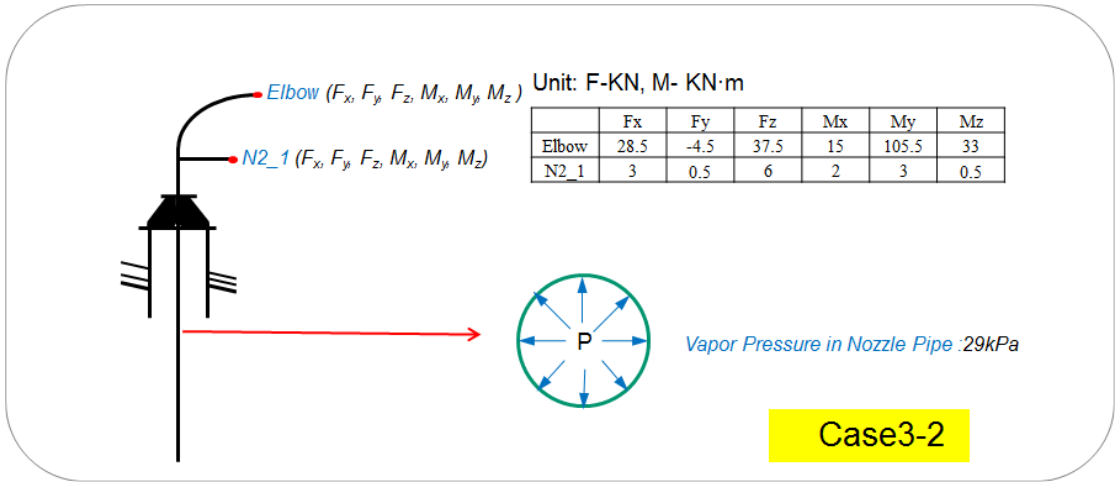
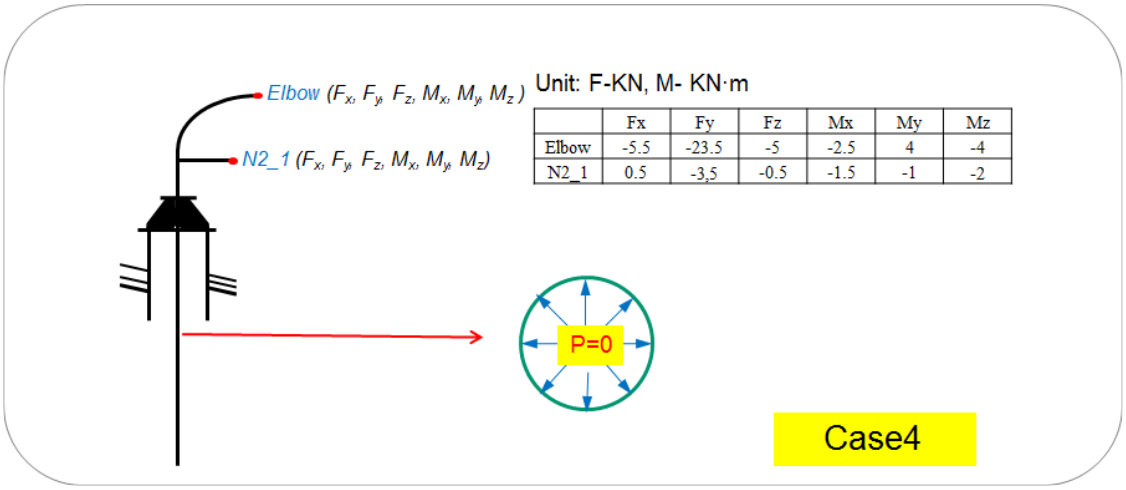
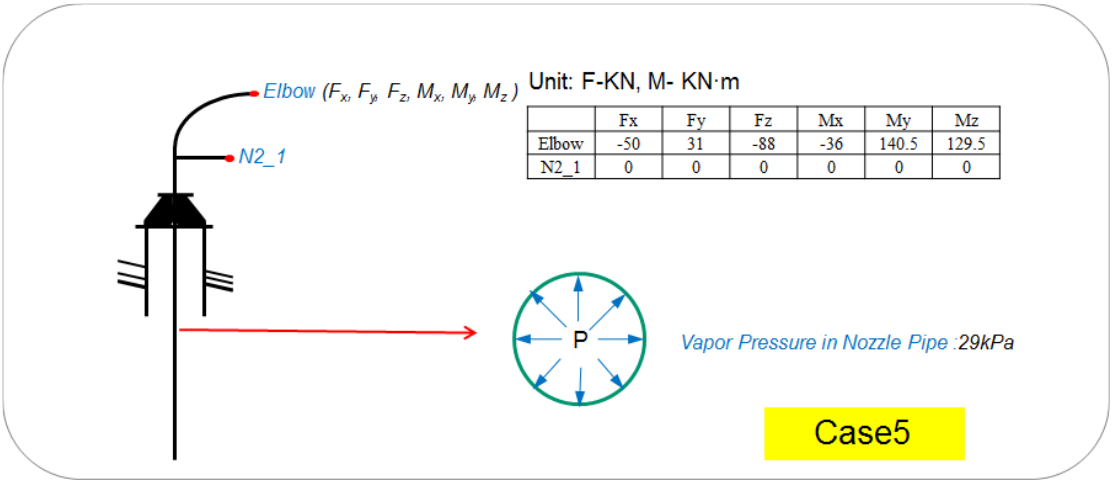



그림 2.5.20 Seismic loading (SSE) 하중조건




| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | -5.5 | -23.5 | -5 | -2.5 | 4 | -4 |
| N2_1 | 0.5 | -3.5 | -0.5 | -1.5 | -1 | -2 |

그림 2.5.21 Tank piping hydro test 하중조건




| | Fx | Fy | Fz | Mx | My | Mz |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elbow | -50 | 31 | -88 | -36 | 140.5 | 129.5 |
| N2_1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

그림 2.5.22 Water hammer 하중조건

다. 유한요소해석 결과

그림 2.5.23~2.5.28은 N2 모델의 각 하중조건에 대한 Tresca 응력 분포를 나타낸다. C4 모델의 결과와 비교 시, shell요소를 사용하여 해석한 결과는 참고자료와 유사한 응력분포 경향을 보인다. 각 하중조건에서의 변위분포도 참고자료의 해석결과와 유사한 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다.

표 2.5.2 는 각 하중조건에서의 최대 Tresca 응력과 최대변위를 나타낸다. 본 연구에서 진행한 해석결과는 참고자료와 유사한 거동을 나타낸다. 하지만, 참고자료에서 solid요소를 적용했다는 점을 고려했을 경우, 본 연구에서 수행한 해석결과는 좀 더 정확한 값을 나타낸다고 말할 수 있다.

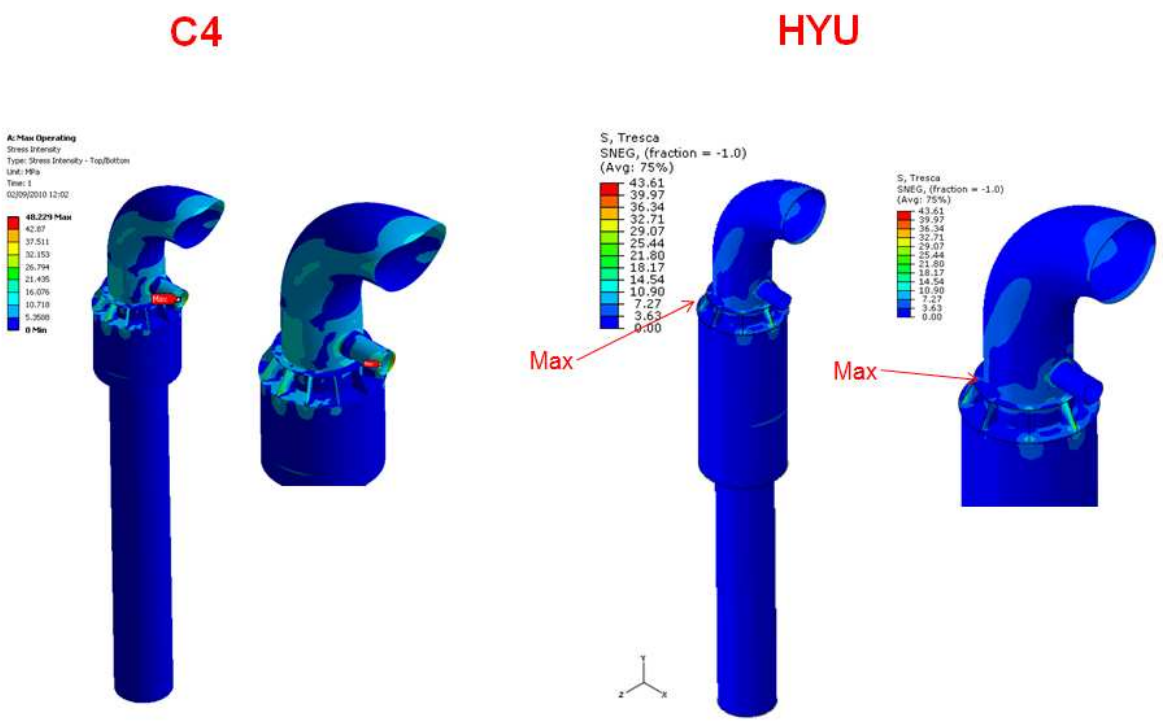



그림 2.5.23 N2 모델의 하중조건 1 에서의 Tresca 응력분포

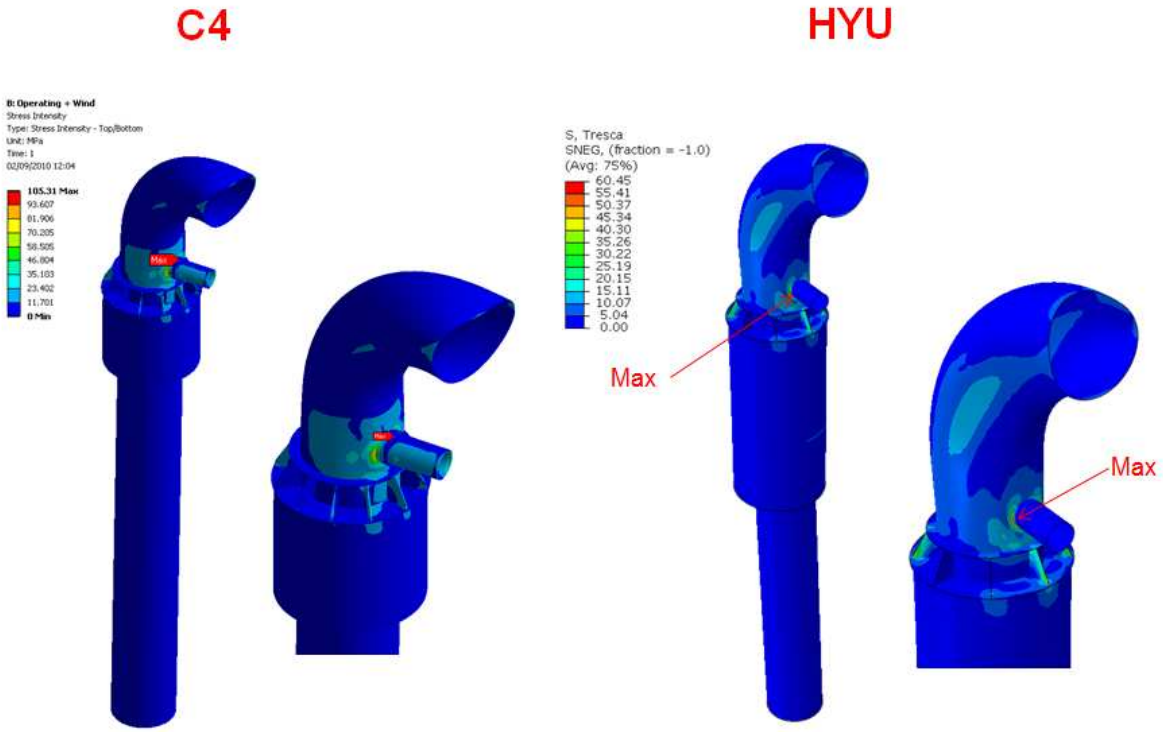



그림 2.5.24 N2 모델의 하중조건 2 에서의 Tresca 응력분포

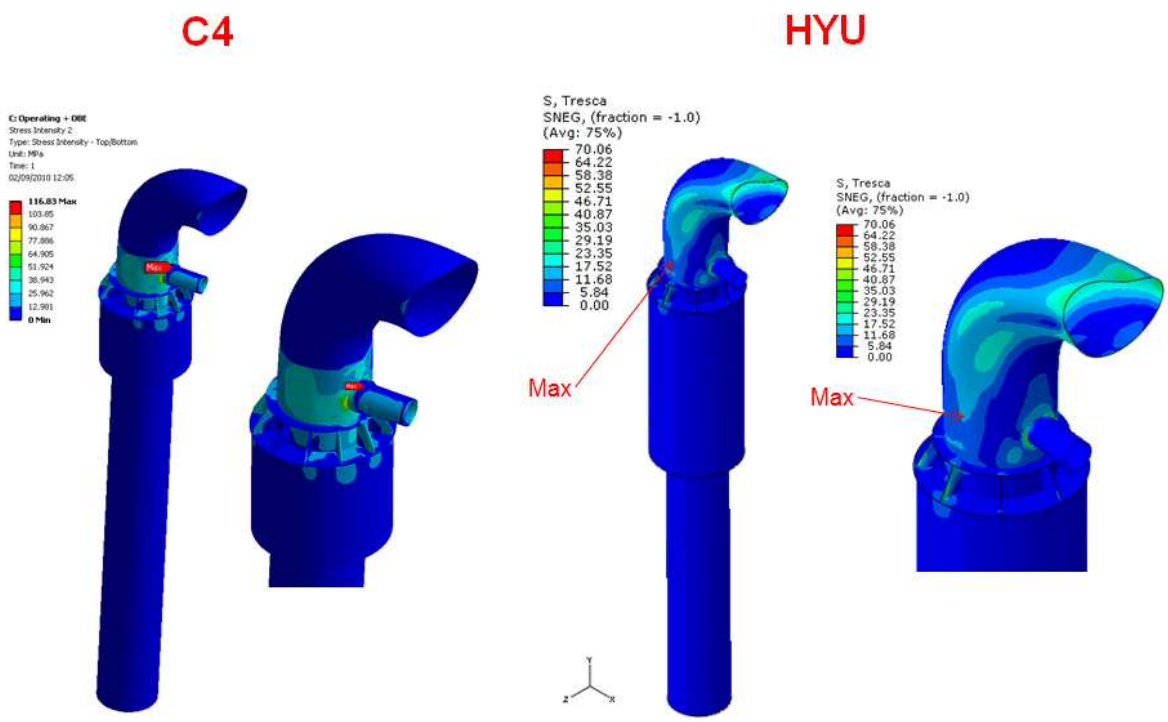



그림 2.5.25 N2 모델의 하중조건 3-1 에서의 Tresca 응력분포

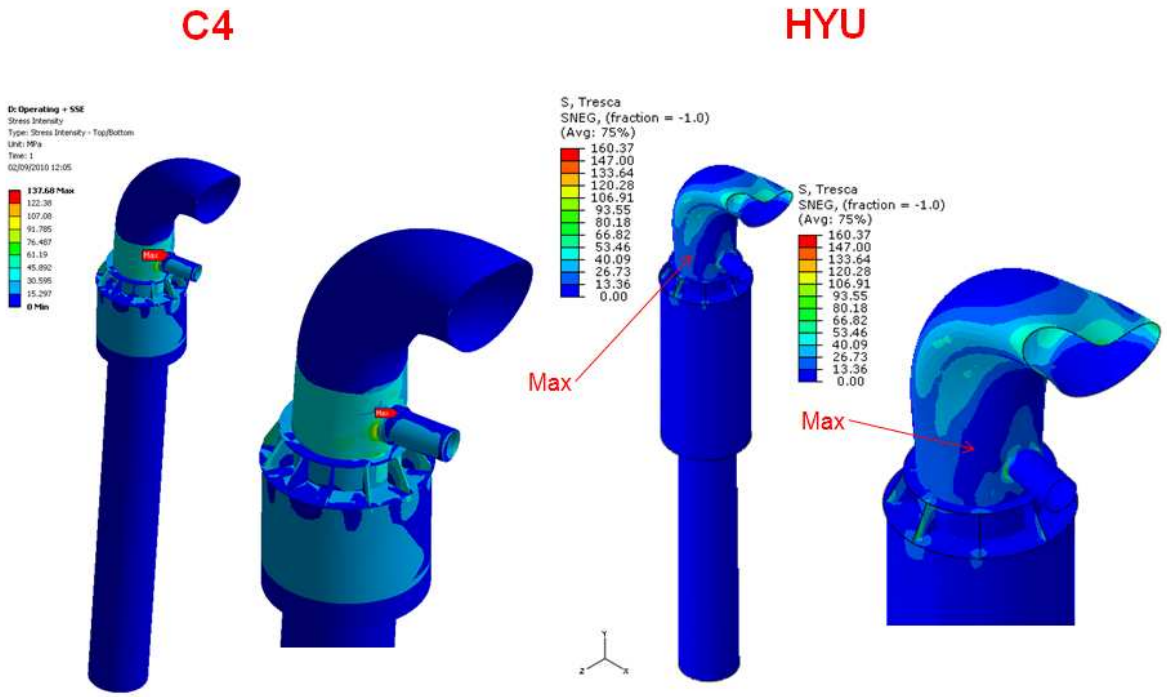



그림 2.5.26 N2 모델의 하중조건 3-2 에서의 Tresca 응력분포

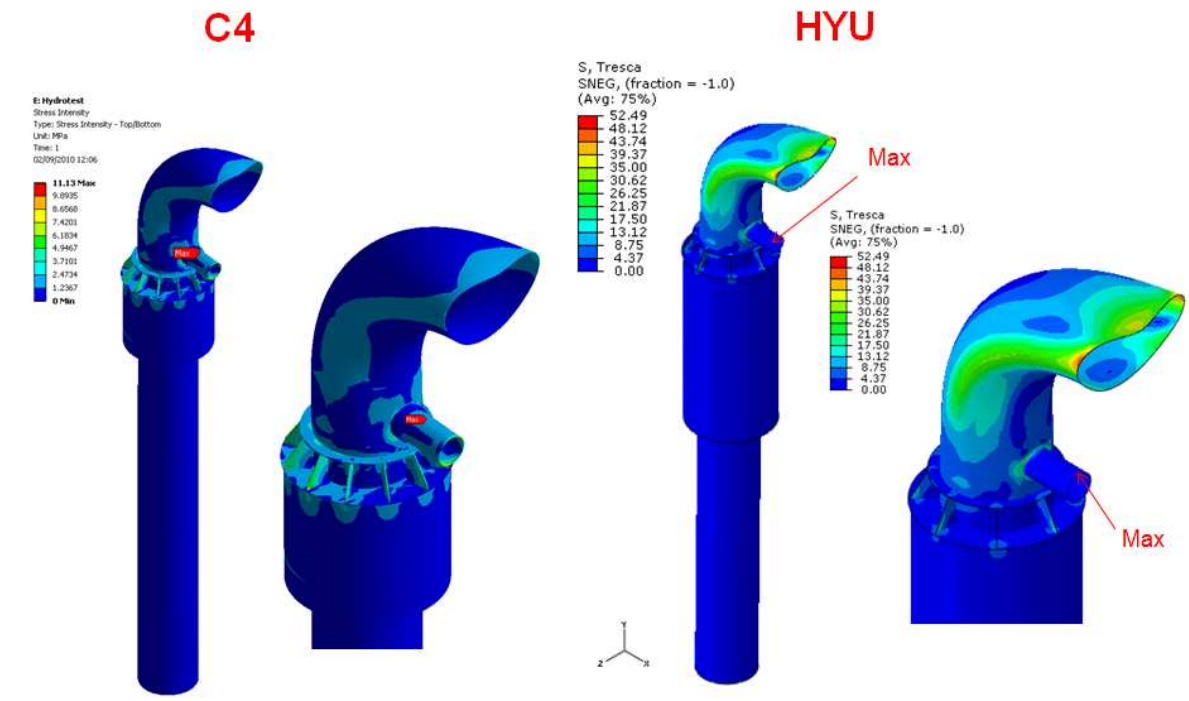
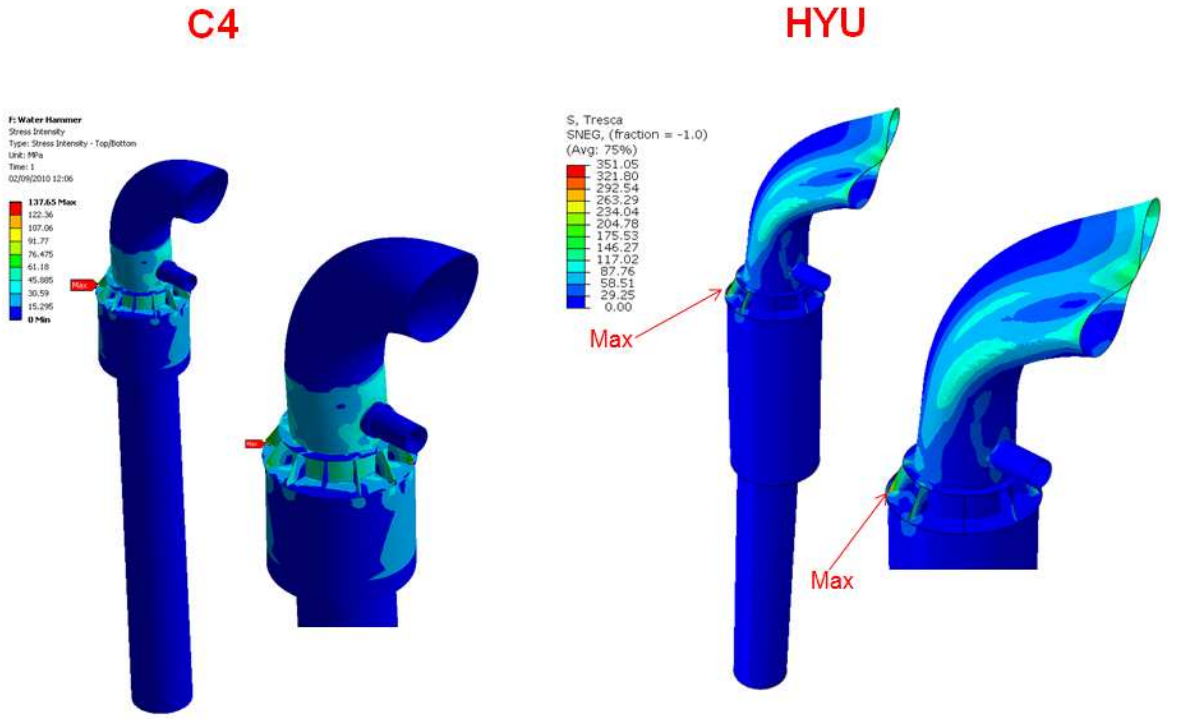



그림 2.5.27 N2 모델의 하중조건 4 에서의 Tresca 응력분포




그그림 2.5.28 N2 모델의 하중조건 5 에서의 Tresca 응력분포

표 2.5.2 N2모델의 유한요소해석 결과

(단위:MPa, mm)

| Case | Max value | C4 (solid) | HYU (shell) |
|---|---|---|---|
| 1 | Tresca | 48.2 | 43.6 |
| | Location | N2-1 Nozzle | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 1.748 | 1.03 |
| | Location | Top elbow | Main Nozzle Pipe |
| 2 | Tresca | 105.3 | 60.48 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Main Nozzle Pipe |
| | Disp. | 2.418 | 1.53 |
| | Location | Top elbow | Top elbow |
| 3(1) | Tresca | 116.8 | 70.1 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 2.754 | 3.46 |
| | Location | Top elbow | Top elbow |
| 3(2) | Tresca | 137.6 | 160.4 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 3.501 | 7.51 |
| | Location | Top elbow | Top elbow |
| 4 | Tresca | 11.1 | 52.5 |
| | Location | N2-1 Nozzle | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 0.318 | 4.5 |
| | Location | Top elbow | Top elbow |
| 5 | Tresca | 137.6 | 351 |
| | Location | Connecting Gusset PL | Connecting Gusset PL |
| | Disp. | 3.287 | 16.3 |
| | Location | Main Nozzle Pipe | Top elbow |

# 6절. 열전달, 열응력 해석을 이용한 코너프로텍션의 최적설계

1. 개요

본 연구에서는 초대용량 LNG 저장탱크를 고려한 내부탱크 코너프로텍션의 최적화설계를 진행하였다.

콘크리트 외조의 경우에 초저온의 LNG을 저장하게 되면 고정되어 있는 바닥과 내면/외면의 온도차에 의해 원통형 하단부에 큰 열적 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력은 원통형 콘크리트 탱크의 설계를 불가능하게 한다. 따라서 높이 5m까지 콘크리트 외조 하단부 내면에 단열재인 폼글라스를 설치하고, 기밀성을 위지하기 위해 5~20mm 두께의 9% 니켈강 라이더를 시공하게 되는데 이를 코너프로텍션(Corner Protection)이라 한다.

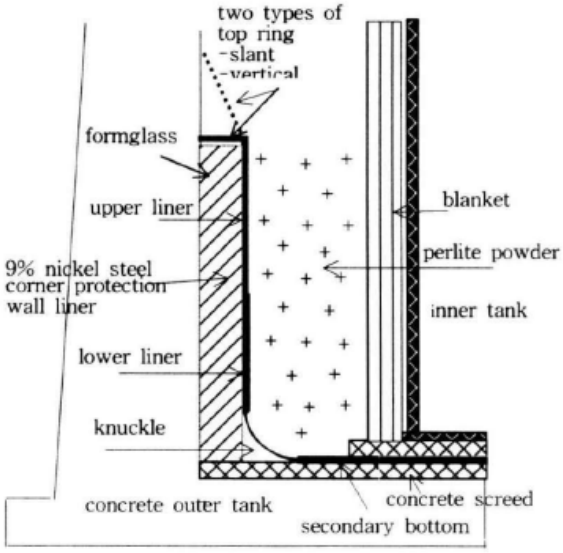



그림 2.6,1 코너프로텍션의 구조

본 연구에서는 다양한 하중조건에서 기존의 코너프로텍션에 대해서 열전달 및 열응력 해석을 진행하여 설계 안전성을 검토하였고, 코너프로텍션 주요 구성부품중 하나인 넉클의 반경과 형상에 대한 최적설계를 진행하였다.

가. 완전방호식 LNG 저장탱크

완전방호식 LNG 저장탱크는 독립적인 액체저장이 가능한 내조탱크와 외조탱크 그리고 내조탱크와 외조탱크 사이의 단열재로 구성되어 있다(그림 2.6.1). 정상상태에서는 내조탱크에서 LNG를 저장하고, 내조의 파손 시(비정상상태)에 2차적으로 콘크리트 외조탱크에서 유출된 LNG를 저장할 수 있어야 한다(그림 2.6.2). 따라서 완전방호식 LNG 저장탱크에서 콘크리트 외조탱크는 LNG 유출에 의한 열하중을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다.

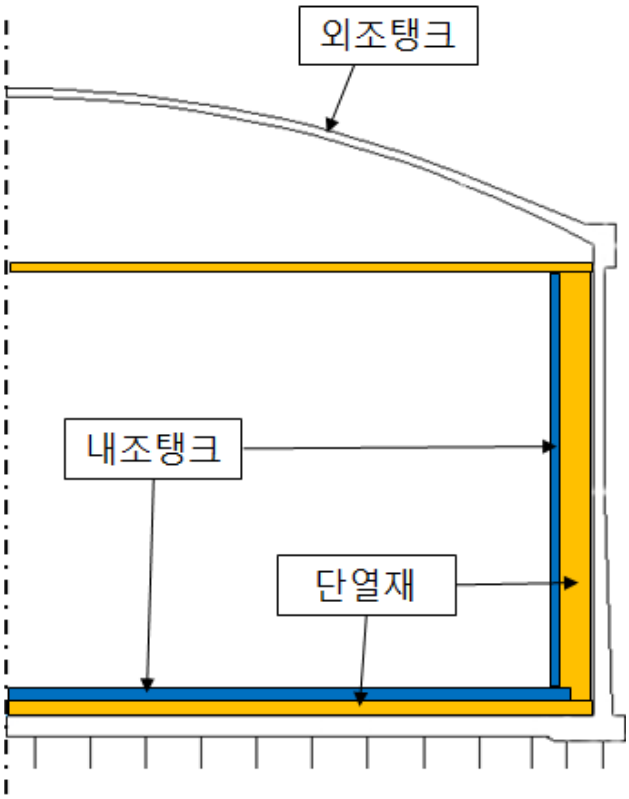
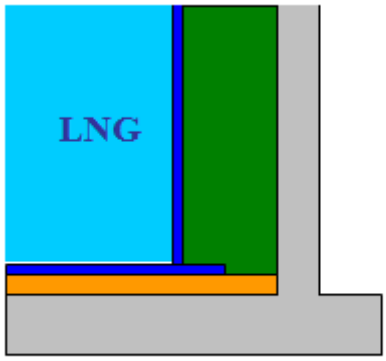
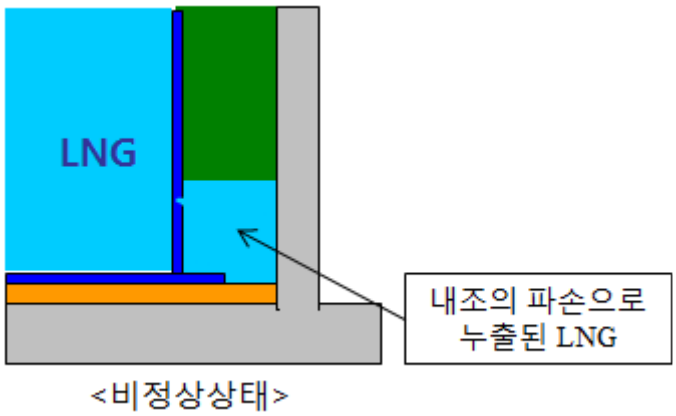



그림 2.6,2 LNG 저장탱크 개략도




<정상상태>

(a) 정상상태에서는 내조탱크에서 LNG를 저장

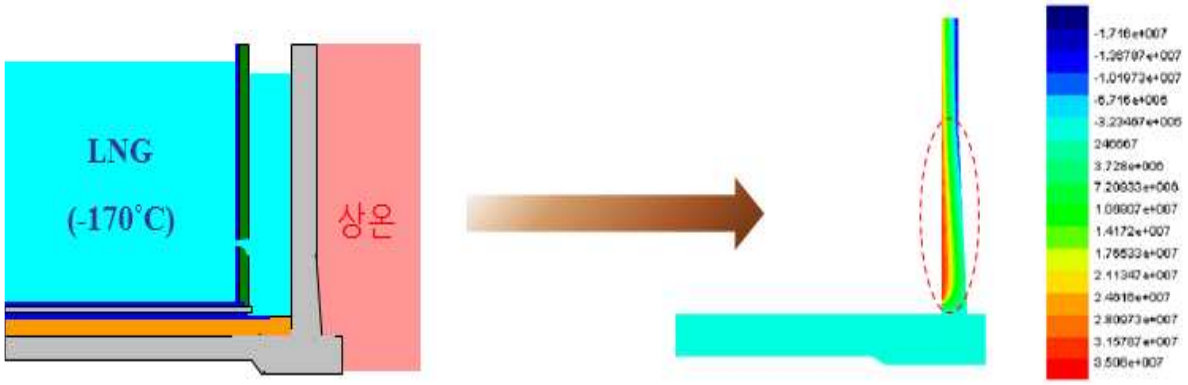



(b) 비정상상태에서는 외조탱크에서 LNG를 저장

그림 2.6.3 정상상태, 비정상상태에서의 LNG 저장상태

나. 코너프로텍션의 필요성

내조의 파손 시(비정상상태) 유출된 LNG는 외조 콘크리트와 직접 접촉하게 된다. 이 때 LNG와 직접 접촉하는 외조 콘크리트의 내부와 상온의 대기와 접해있는 외조 콘크리트의 외부 사이에 큰 온도구배가 발생하게 되고 콘크리트 하단부 코너에 원주방향의 큰 인장응력이 발생하는데, 이 원주방향 인장응력에 의해 외조 콘크리트의 균열이 발생하게 된다. 따라서 외조 콘크리트 하단부 코너 내면에 코너프로텍션을 시공하여 외조 콘크리트 하단부 코너의 온도 구배를 감소시킴으로써 외조 콘크리트의 균열을 방지할 수 있다.




(a) 비정상상태에서 외조 콘크리트의 응력 분포 (코너프로텍션이 없는 경우)

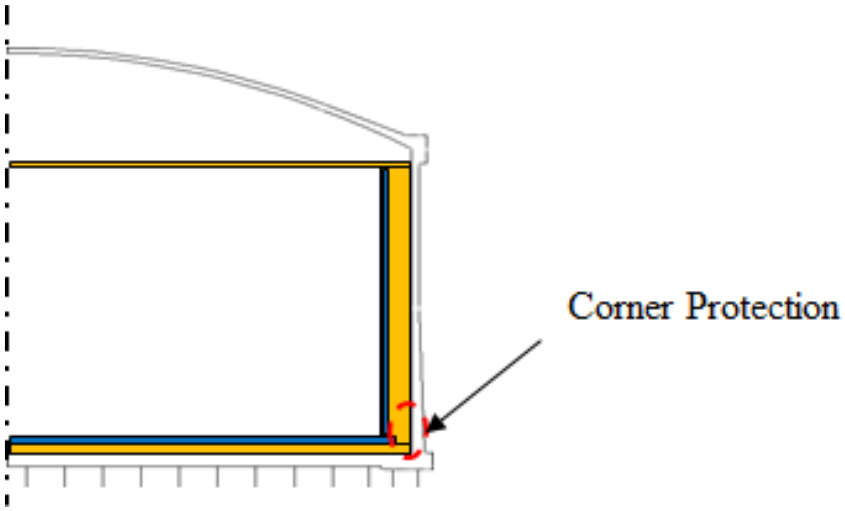



(b) 비정상상태에서 외조 콘크리트의 응력 분포 (코너프로텍션이 있는 경우)

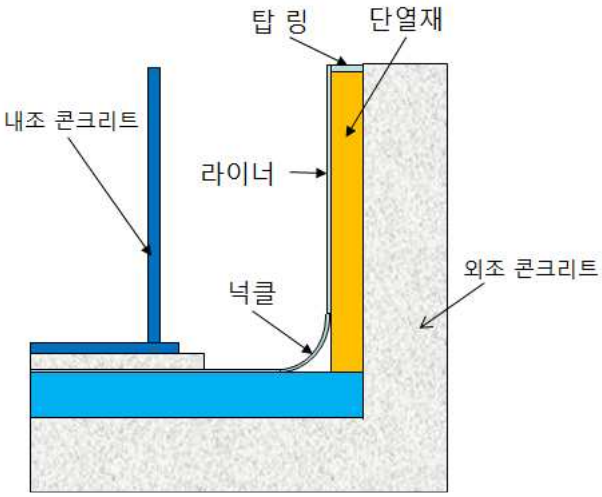
그림 2.6,4 LNG가 누출된 비정상상태에서 코너프로텍션 설치 여부에 따른 외조 콘크리트의 응력분포

다. 코너프로텍션의 구성

코너프로텍션은 그림 2.6.5와 같이 외조 콘크리트의 하단부에 위치하며, 단열재, 탑링, 라이너, 넉클로 구성된다. 라이너는 상부와 하부 라이너로 구분하여 설계하는데, 이는 경제성 향상을 위해 상대적으로 큰 하중을 받는 하부 라이너만을 두껍게 설계하기 위해서이다. 탑링의 경우는 수직형 또는 경사형으로 설계되고, 넉클은 일정한 반경을 같는 원형으로 설계하는데 이는 2차 바닥의 수축을 효과적으로 흡수하기 위해서이다.




(a) 코너프로텍션의 시공 위치




(b) 코너프로텍션의 개략도

그림 2.6,5 코너프로텍션의 위치 및 개략도

2. 코너프로텍션의 유한요소모델, 물성값, 하중조건 및 설계조건

가. 유한요소모델

그림 2.6.6은 코너프로텍션의 유한요소해석을 하기 위한 유한요소모델이다. 내조벽과 콘크리트 외조벽, 및 코너프로텍션이 있으며 내조와 외조사이에 빈 공간에는 단열재가 위치하지만 해석 시에는 단열재들의 압력을 고려한 하중을 적용한다.

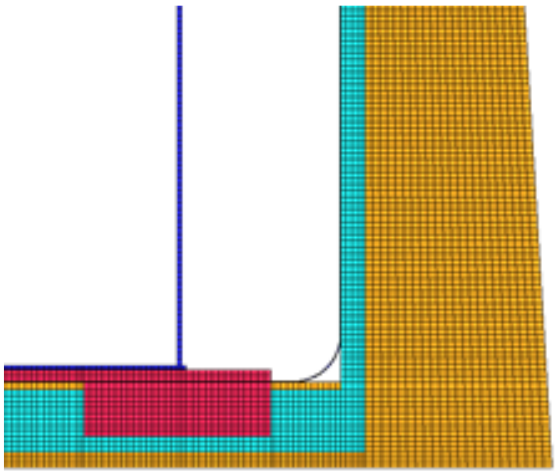


그림 2.6,6 코너프로텍션의 유한요소모델

나. 물성값

표 3.4.1은 코너프로텍션 유한요소해석에 사용된 물성값들을 나타낸다.

표 2.6.1 코너프로텍션 유한요소해석에 사용된 물성값

| material | E | Poisson's ratio | Expansion coef. | Density | Thermal conductivity |
|---|---|---|---|---|---|
| concrete | 2.80E+11 | 0.2 | 1.00E-05 | 2350 | 2 |
| cellular glass type I | 1.20E+09 | 0.2 | 6.97E-06 | 135 | 4.40E-02 |
| glass fiber blanket | 1.20E+06 | 0.2 | 6.97E-06 | 24 | 4.90E-02 |
| Perlite concrete | 2.80E+10 | 0.2 | 1.00E-05 | 1000 | 2.70E-01 |
| Resilent glass fiber blanket | 1.20E+06 | 0.2 | 6.97E-06 | 16 | 5.90E-06 |
| PUF | 2.45E+06 | 0.4 | 6.50E-05 | 55 | 2.32E-02 |
| Perlite | 1.00E+09 | 0.2 | 1.00E-05 | 64 | 4.20E-02 |
| 9% Nikel steel | 2.10E+11 | 0.3 | 9.21E-06 | 8000 | 3.01E+01 |

다. 하중조건

(1). 열 하중조건

(가). 정상상태

그림 2.6.7는 정상상태일 때의 온도 조건으로 내조는 LNG에 접해있으므로 -170°C의 저온이고, 외조는 대기와 접해있으므로 상온이므로 37°C인 상태이다. 그리고 외조 콘크리트 바닥과 내, 외조사이의 단열재는 히터에 의해 5°C의 온도를 유지한다.

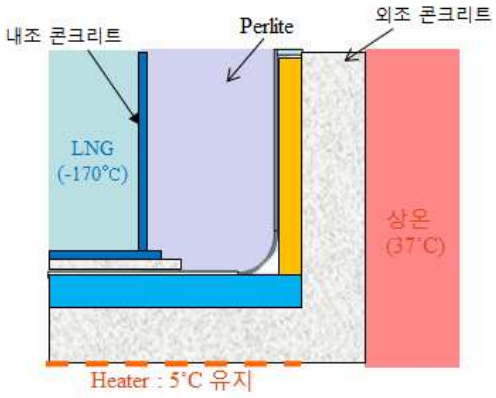



그림 2.6,7 정상상태에서의 온도 조건

(나). 비정상상태

① 부분유출

LNG가 부분적으로 유출되었을 때에는 그림 2.6.8과 같이 탑링 아랫방향으로 1m까지 LNG가 차 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 코너프로텍션은 -170°C의 저온상태로 볼 수 있다.

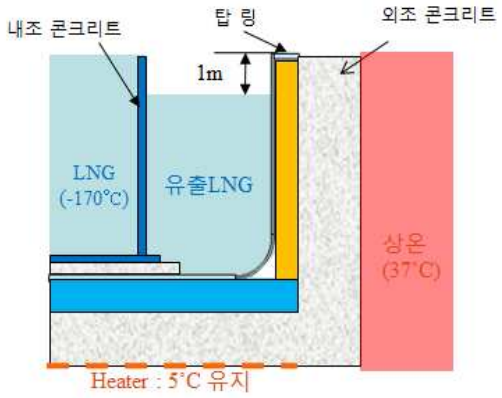



그림 2.6,8 비정상상태에서의 온도 조건 (부분유출)

②. 중대유출

LNG가 과도하게 유출되어 있을 경우에는 그림 2.6.9와 같이 2차 바닥으로부터 28.41m 까지 LNG가 차 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 코너프로텍션 및 같은 높이까지의 외조 콘크리트는 -170℃의 저온상태로 볼 수 있다.

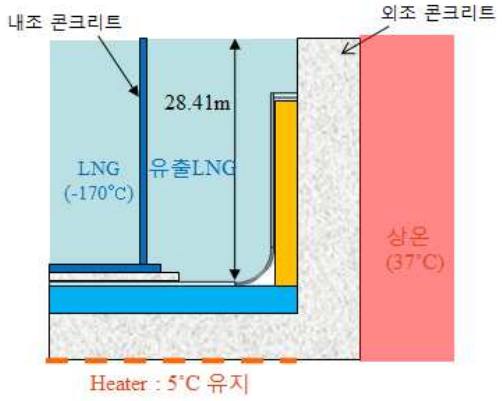
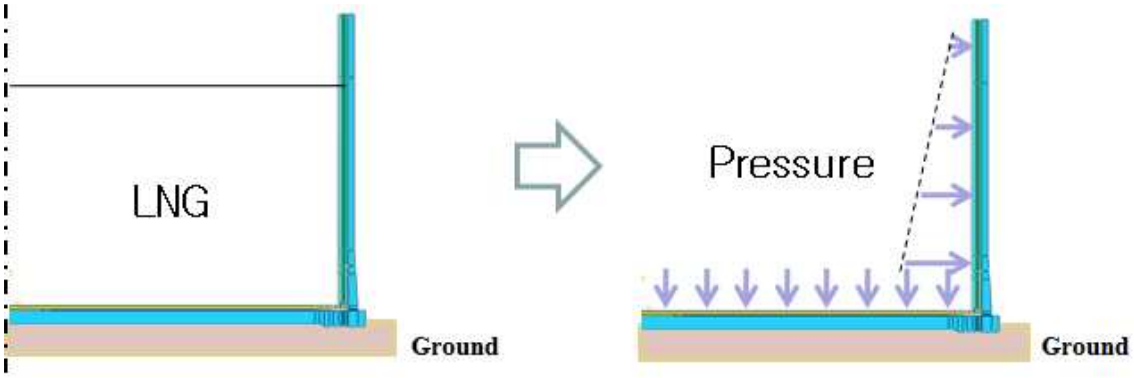



그림 2.6.9 비정상상태에서의 온도 조건 (중대유출)

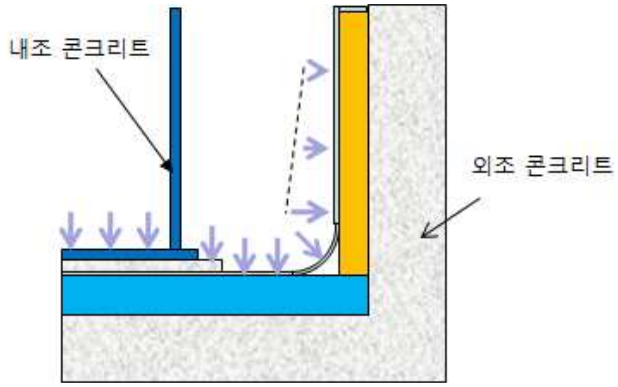
(1). 역학적 하중조건

(가). LNG 자중

정상상태 시 그림 2.6.10와 같이 LNG 자중은 압력으로 대체하고, 비정상상태 시의 자중은 유출공간에 유출된 LNG의 자중을 계산하여 적용한다. 표 3.4.2는 각 상태에서의 LNG 압력값이다.




(a) 정상상태 시의 LNG 자중




(b) 비 정상상태 시의 LNG 자중

그림 2.6,10 LNG의 자중 적용

표 2.6.2 각 상태에서의 LNG 압력

| | 정상상태 | 부분유출 | 중대유출 |
|---|---|---|---|
| 내부탱크 내 LNG 높이(m) | 34.9 | 34.7 | 33.2 |
| 유출높이(m) | 0 | 4 | 28.41 |
| 내부탱크 Max. pressure(Pa) | 164,337 | 163193 | 156,210 |
| 유출공간 Max. pressure(Pa) | 0 | 18,835 | 133,777 |

(나). Blanket, perlite 자중

정상상태 시 blanket, perlite 자중 또한 압력으로 대체한다. Blanket 압력은 5,962Pa이고, perlite 압력은 23,848Pa이다, 비정상상태에서는 blanket과 perlite가 LNG에 잠겨 있으므로 압력을 고려하지 않는다.

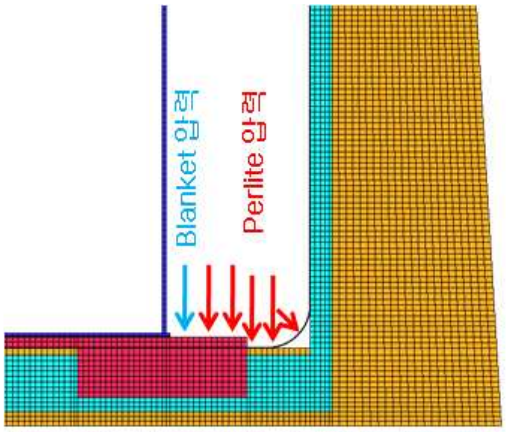



그림 2.6,11 Blanket과 perlite의 자중을 고려한 하중조건

(다). Gas pressure

Gas pressure는 모든 상태에서 고려하며 29,000Pa이다.

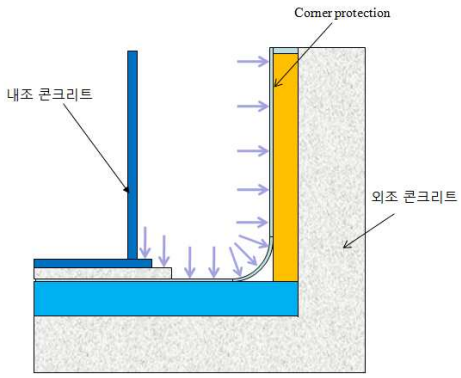



그림 2.6,12 Gas pressure를 고려한 하중조건

라. 설계조건

표 2.6.3은 각 유출상태에서 탱크의 허용응력들을 표시한 것이다. 유한요소해석결과는 이 값들을 기준으로 탱크의 파손 여부를 판단할 것이다. 코너프로텍션의 설계 기준은 ASME sec. Ⅷ div.2, Appendix 4의 높은 허용응력을 사용하는 소성설계를 사용하였다.

표 2.6.3 탱크의 허용응력

| 조건 | Sm (MPa) | Stress Intensity Factor | Allowable Stress(MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Mechanical (1차 하중) | | Total (1+2차 하중) |
| | | | Pm (K*Sm) | Pm+Pb (1.5K*Sm) | Pm+Pb (3K*Sm) |
| 정상 | 195.3 | 1 | 195.3 | 293.0 | 585.9 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 부분유출 | 195.3 | 1.2 | 234.3 | 351.5 | 585.9 |
| 중대유출 | - | - | 340.0 | 585.9 | 585.9 |

3. 유한요소해석 결과 및 코너프로텍션의 설계 안전성 검토

유한요소해석 시, LNG 유출의 수준을 정상상태, 부분유출상태, 중대유출상태 3가지 경우로 나누었고, 하중 조건을 역학적 하중만 고려한 경우와 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 두 가지로 나누어 수행하였다. 따라서 결과는 LNG 유출의 수준과 하중 조건의 조합을 통해 모두 6가지에 대해서 정리할 수 있다.

가. 정상상태에서의 유한요소해석 결과

(1). 역학적 하중

그림 2.6.13은 정상상태에서 역학적 하중만 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델을 나타내고, 그림 2.6.14, 표 2.6.4은 해석결과를 나타낸다. 표 2.6.4을 보면 전반적으로 안전 영역에 있지만 탑링에서 상대적으로 높은 응력값을 확인할 수 있다. 탑링의 변형 형상을 보면 높은 응력이 굽힘 현상에 의한 것임을 확인할 수 있다.

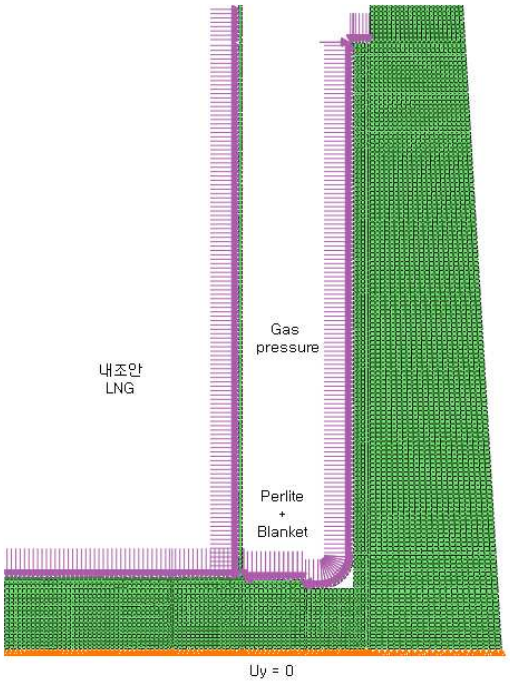
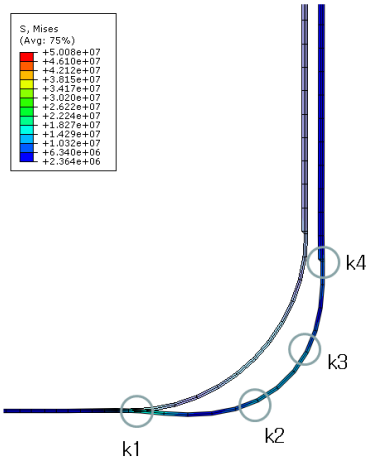
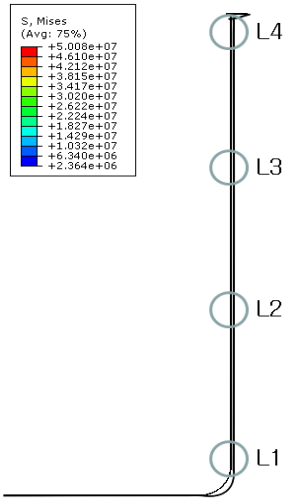


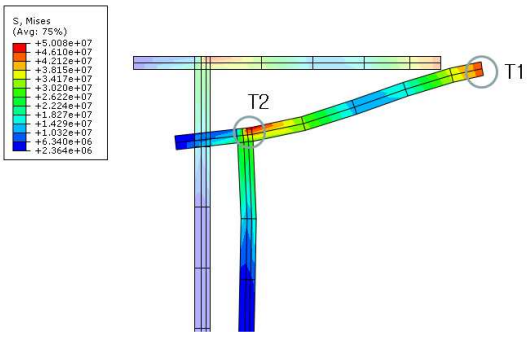

그림 2.6,13 정상상태에서 역학적 하중만 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델




(a) 넉클의 해석 결과




(b) 라이너의 해석 결과




(c) 탑링의 해석 결과

그림 2.6,14 코너프로텍션의 해석 결과 (정상상태, 역학적 하중)

표 2.6.4 코너프로텍션의 해석 결과 (정상상태, 역학적 하중)

(단위 : MPa)

| 위치 | Section | Mechanical (1차 하중) | | Total (1+2차 하중) |
|---|---|---|---|---|
| | | **Pm** | **Pm+Pb** | Pm+Pb |
| knuckle | K1 | **2.8** | **22.0** | - |
| | K2 | **3.8** | **10.4** | - |
| | K3 | **4.8** | **13.2** | - |
| | K4 | **3.0** | **10.6** | - |
| Liner | L1 | **3.3** | **10.7** | - |
| | L2 | **3.3** | **3.3** | - |
| | L3 | **3.5** | **3.5** | - |
| | L4 | **4.5** | **24.5** | - |
| Top ring | T1 | **4.1** | **75.4** | - |
| | T2 | **21.6** | **73.1** | - |
| 허용응력 | 정상상태 | **195.3** | **293.0** | 585.9 |
| 검토 | | **OK** | **OK** | - |

(2). 역학적 + 열 하중

그림 2.6.15은 정상상태에서 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 코너프로텍션의 유한요소 모델을 나타내고, 그림 2.6.16, 표 2.6.5는 해석결과를 나타낸다. 열하중을 추가로 고려할 경우, 열응력에 의하여 2차 바닥이 수축함에 따라 굽은 모양의 넉클이 곧게 펴지면서 큰 굽힘 응력이 발생시키기 때문에 넉클 부분이 가장 취약해진다. 설계압력은 이를 완화하는데 큰 도움이 되지 않지만, 부분누출과 중대누출 시에는 누출된 LNG의 압력이 넉클의 형상을 유지하여 굽힘 응력을 완화시킨다.

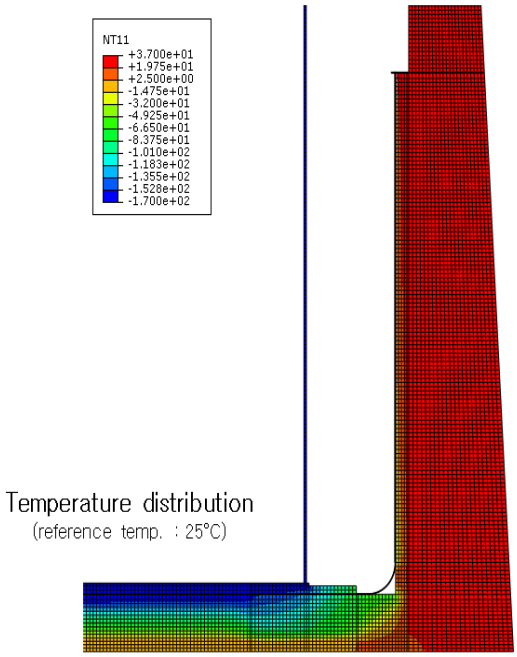
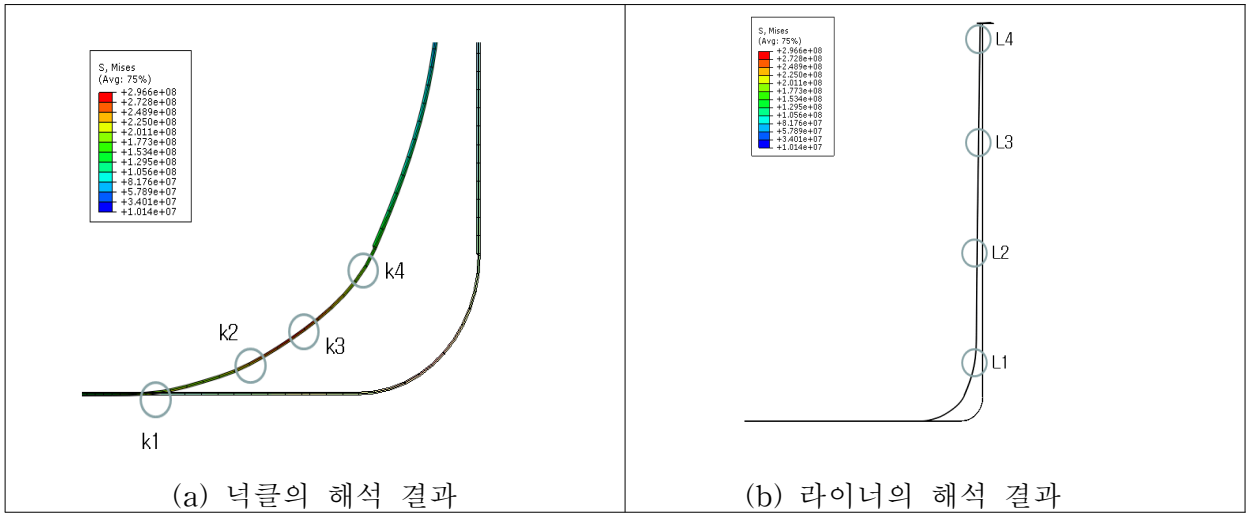
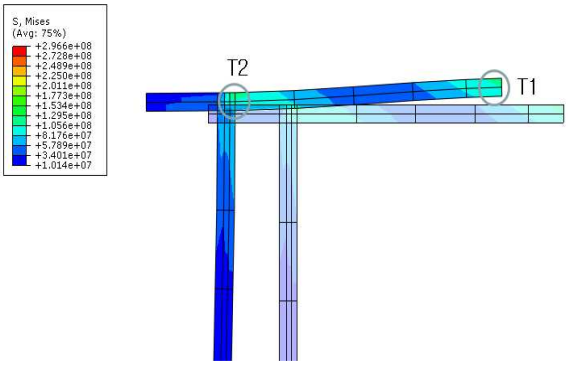



그림 2.6,15 정상상태에서 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델




(a) 넉클의 해석 결과 (b) 라이너의 해석 결과




(c) 탑링의 해석 결과

그림 2.6,16 코너프로텍션의 해석 결과 (정상상태, 역학적 하중+열하중)

표 2.6.5 코너프로텍션의 해석 결과 (정상상태, 역학적 하중+열하중)

(단위 : MPa)

| 위치 | Section | Mechanical (1차 하중) | | **Total (1+2차 하중)** |
|---|---|---|---|---|
| | | Pm | Pm+Pb | **Pm+Pb** |
| knuckle | K1 | | | **220.0** |
| | K2 | | | **402.0** |
| | K3 | | | **430.0** |
| | K4 | | | **181.0** |
| Liner | L1 | | | **187.0** |
| | L2 | | | **29.6** |
| | L3 | | | **26.4** |
| | L4 | | | **62.0** |
| Top ring | T1 | | | **143.0** |
| | T2 | | | **173.0** |
| 허용응력 | 정상상태 | 195.3 | 293.0 | **585.9** |
| 검토 | | | | **OK** |

가. 부분유출상태에서의 유한요소해석 결과

(1). 역학적 하중

그림 2.6.17는 LNG가 탑링 아래 1m 높이까지 유출된 부분유출상태에서 역학적 하중만 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델을 나타내고, 그림 2.6.18, 표 2.6.6는 해석결과를 나타낸다. 표 2.6.6에서 여전히 탑링에서 상대적으로 높은 응력을 확인할 수 있다.

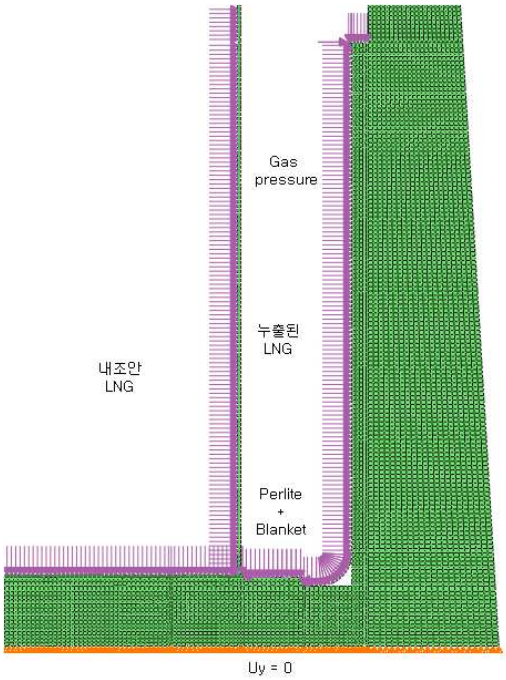
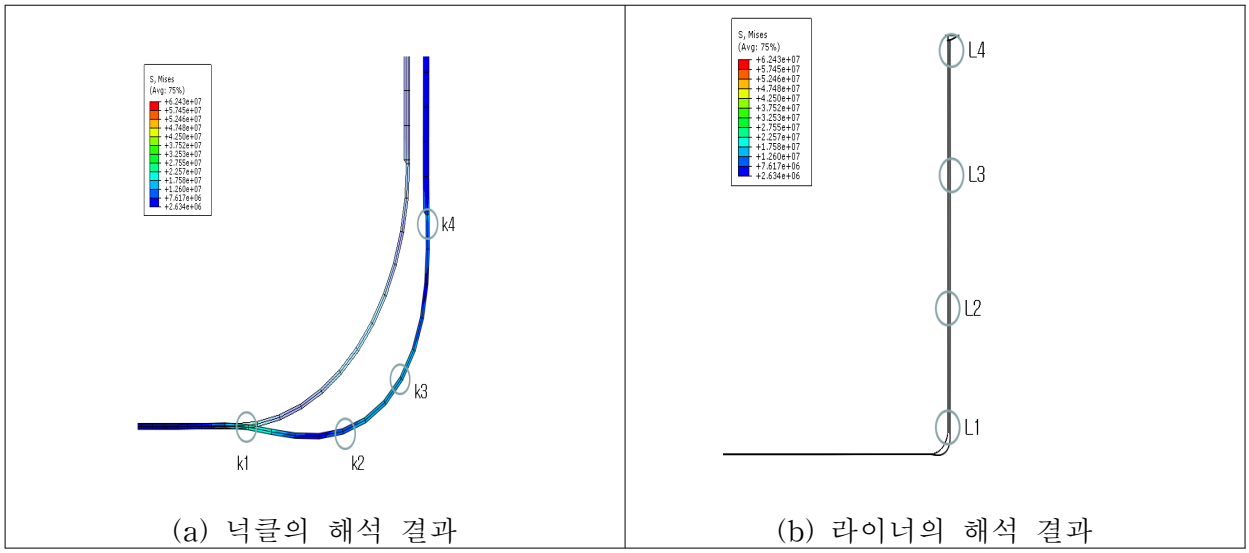
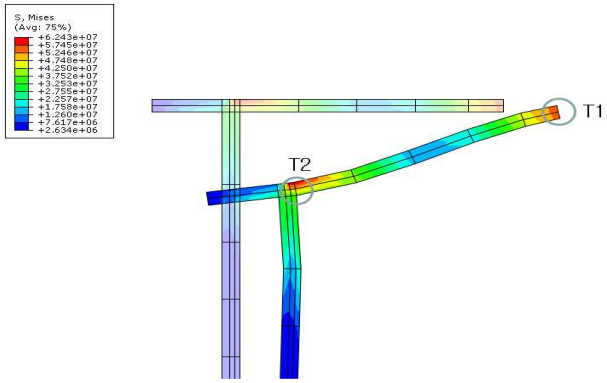



그림 2.6,17 부분유출상태에서 역학적 하중만 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델




(a) 넉클의 해석 결과 (b) 라이너의 해석 결과




(c) 탑링의 해석 결과

그림 2.6,18 코너프로텍션의 해석 결과 (부분유출상태, 역학적 하중)

표 2.6.6 코너프로텍션의 해석 결과 (부분유출상태, 역학적 하중)

(단위 : MPa)

| 위치 | Section | **Mechanical (1차 하중)** | | Total (1+2차 하중) |
|---|---|---|---|---|
| | | **Pm** | **Pm+Pb** | Pm+Pb |
| knuckle | K1 | **3.5** | **27.7** | - |
| | K2 | **4.1** | **5.8** | - |
| | K3 | **6.0** | **19.8** | - |
| | K4 | **3.7** | **12.9** | - |
| Liner | L1 | **4.2** | **13.4** | - |
| | L2 | **4.2** | **4.2** | - |
| | L3 | **4.1** | **4.1** | - |
| | L4 | **5.3** | **30.4** | - |
| Top ring | T1 | **4.8** | **93.1** | - |
| | T2 | **27** | **91.2** | - |
| 허용응력 | 부분누출 | **234.3** | **351.5** | 585.9 |
| 검토 | | **OK** | **OK** | |

(2). 역학적 + 열 하중

그림 2.6.19은 부분유출상태에서 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델을 나타내고, 그림 2.6.20, 표 2.6.7는 해석결과를 나타낸다. LNG의 부분유출 시에는 코너프로텍션이 단열재와 분리되어 스스로 LNG를 지탱하는 형상이므로 넉클, 라이너, 탑링에 모두 굽힘 응력을 발생시키지만 전반 설계규격으로 보면 전체 구조물은 안전하다.

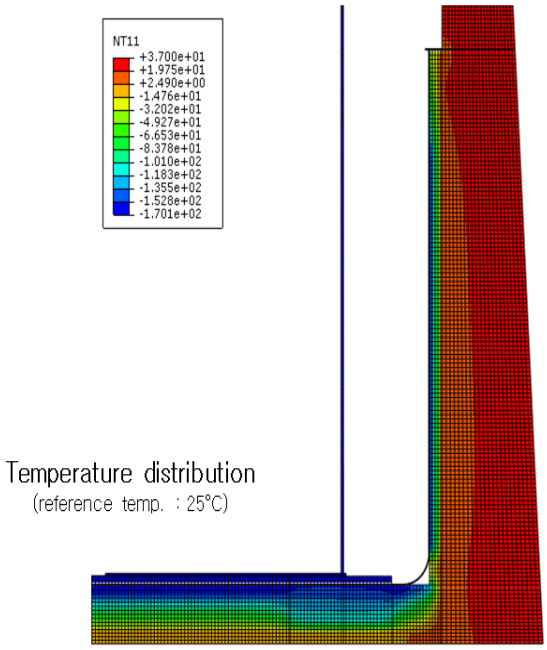
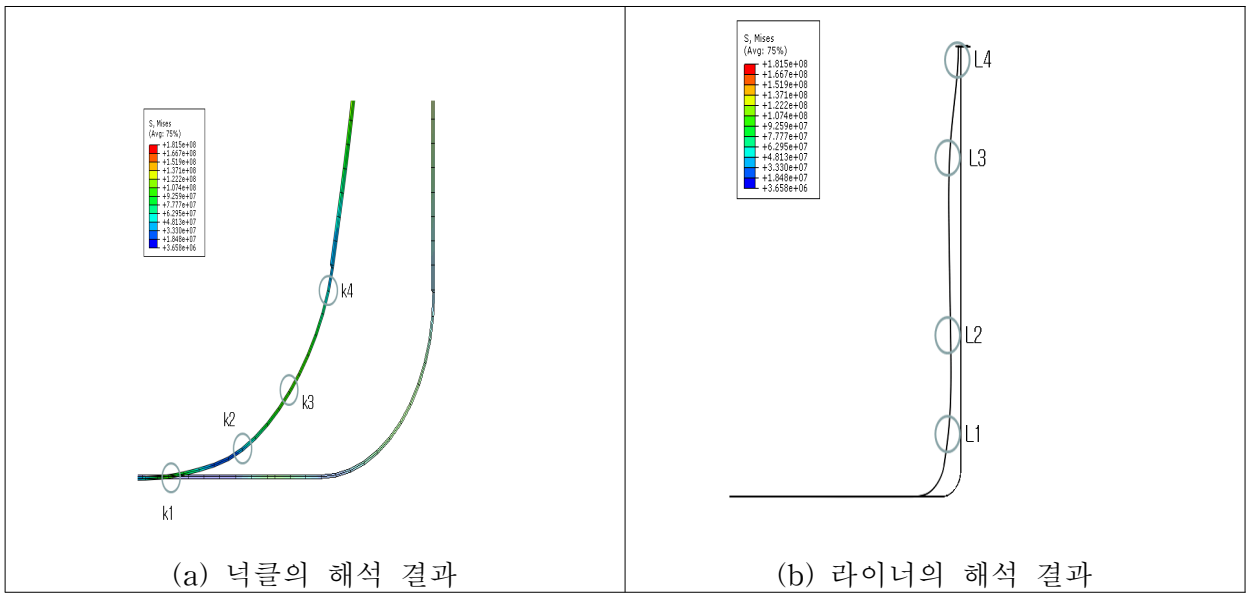
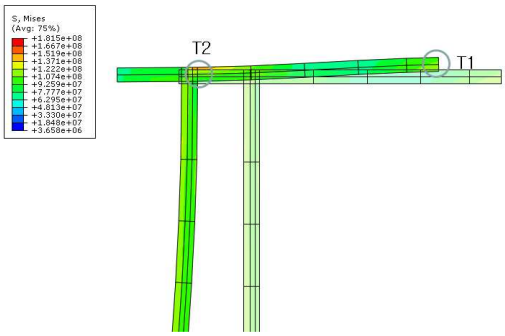



그림 2.6.19 부분유출상태에서 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델




(a) 넉클의 해석 결과 (b) 라이너의 해석 결과




(c) 탑링의 해석 결과

그림 2.6.20 코너프로텍션의 해석 결과 (부분유출상태, 역학적 하중+열하중)

표 2.6.7 코너프로텍션의 해석 결과 (부분유출상태, 역학적 하중+열하중)

(단위 : MPa)

| 위치 | Section | Mechanical (1차 하중) | | Total (1+2차 하중) |
|---|---|---|---|---|
| | | Pm | Pm+Pb | Pm+Pb |
| knuckle | K1 | | | 32.3 |
| | K2 | | | 79.3 |
| | K3 | | | 180.0 |
| | K4 | | | 38.4 |
| Liner | L1 | | | 47.6 |
| | L2 | | | 188.0 |
| | L3 | | | 170.0 |
| | L4 | | | 154.0 |
| Top ring | T1 | | | 187.0 |
| | T2 | | | 207.0 |
| 허용응력 | 부분누출 | 234.3 | 351.5 | 585.9 |
| 검토 | | | | OK |

다. 중대유출상태에서의 유한요소해석 결과

(1). 역학적 하중

그림 2.6.21는 중대유출상태에서 역학적 하중만 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델을 나타내고, 그림 2.6.22, 표 2.6.8는 해석결과를 나타낸다. 표 2.6.8에서 여전히 탑링에서 상대적으로

높은 응력을 확인할 수 있다.

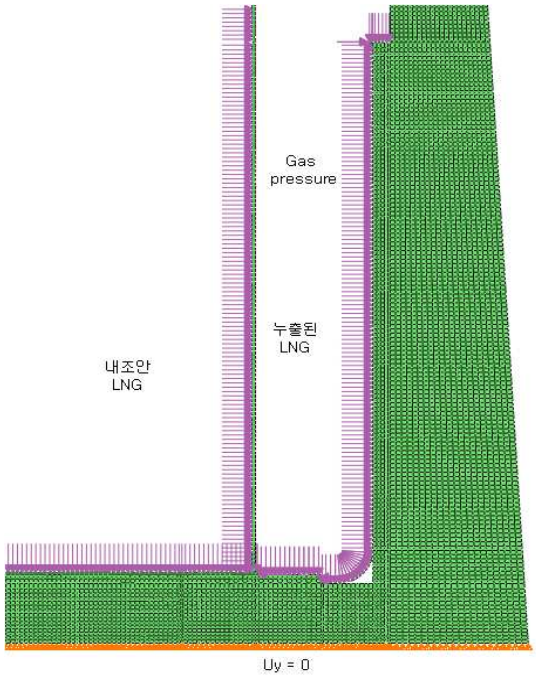
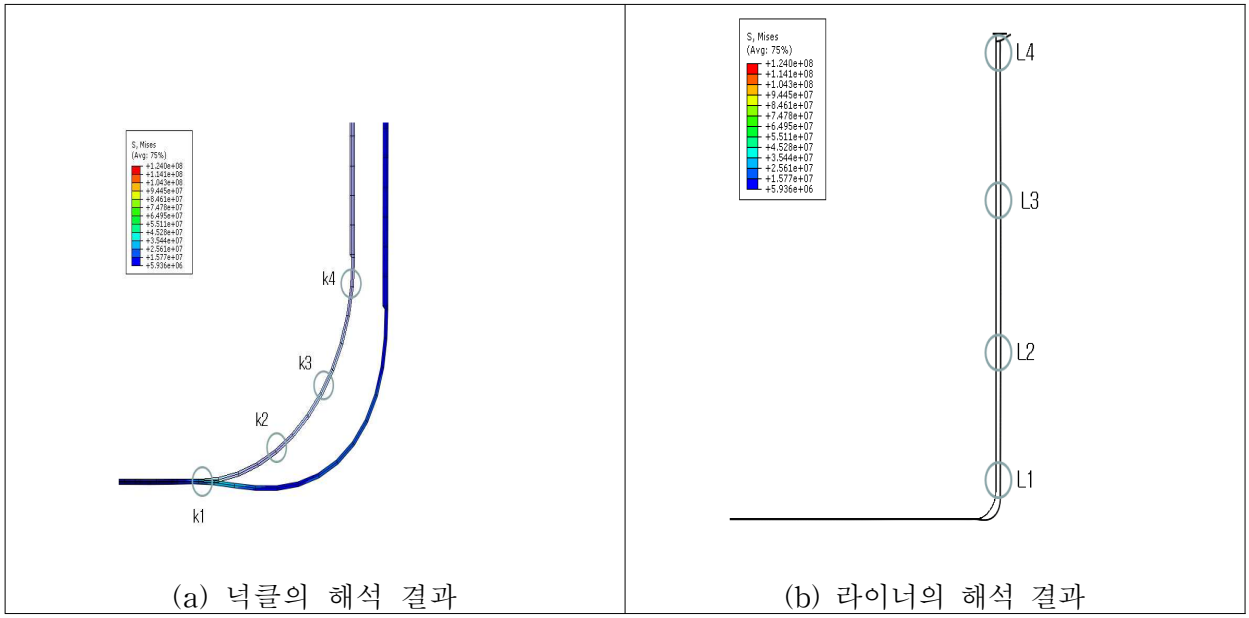
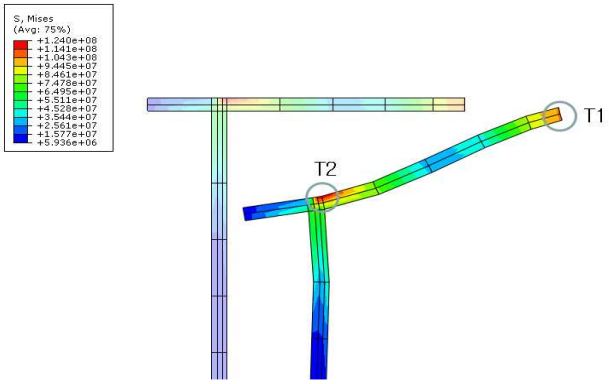



그림 2.6.21 중대유출상태에서 역학적 하중만 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델




(a) 넉클의 해석 결과 (b) 라이너의 해석 결과




(c) 탑링의 해석 결과

그림 2.6.22 코너프로텍션의 해석 결과 (중대유출상태, 역학적 하중)

표 2.6.8 코너프로텍션의 해석 결과 (중대유출상태, 역학적 하중)

| 위치 | Section | Mechanical (1차 하중) | | Total (1+2차 하중) |
|---|---|---|---|---|
| | | Pm | Pm+Pb | Pm+Pb |
| knuckle | K1 | 7.7 | 44.9 | |
| | K2 | 9.7 | 16.1 | |
| | K3 | 12.8 | 29.3 | |
| | K4 | 13.3 | 14.6 | |
| Liner | L1 | 12.4 | 13.1 | |
| | L2 | 12.8 | 12.8 | |
| | L3 | 12.8 | 13.0 | |
| | L4 | 14.5 | 59.0 | |
| Top ring | T1 | 14.4 | 14.6 | |
| | T2 | 53 | 180 | |
| 허용응력 | 중대누출 | 340.0 | 585.9 | 585.9 |
| 검토 | | OK | OK | |

(단위 : MPa)

(2). 역학적 + 열 하중

그림 2.6.23은 중대누출상태에서 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델을 나타내고, 그림 2.6.24, 표 2.6.9은 해석결과를 나타낸다. 중대누출로 인해 코너프로텍션 전체는 -170°C 의 저온상태가 되어 강하게 수축하여 매우 큰 굽힘 응력을 발생시킨다.

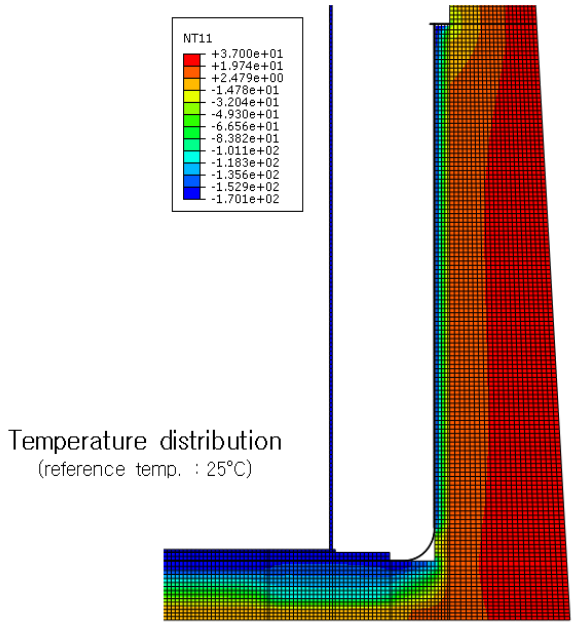
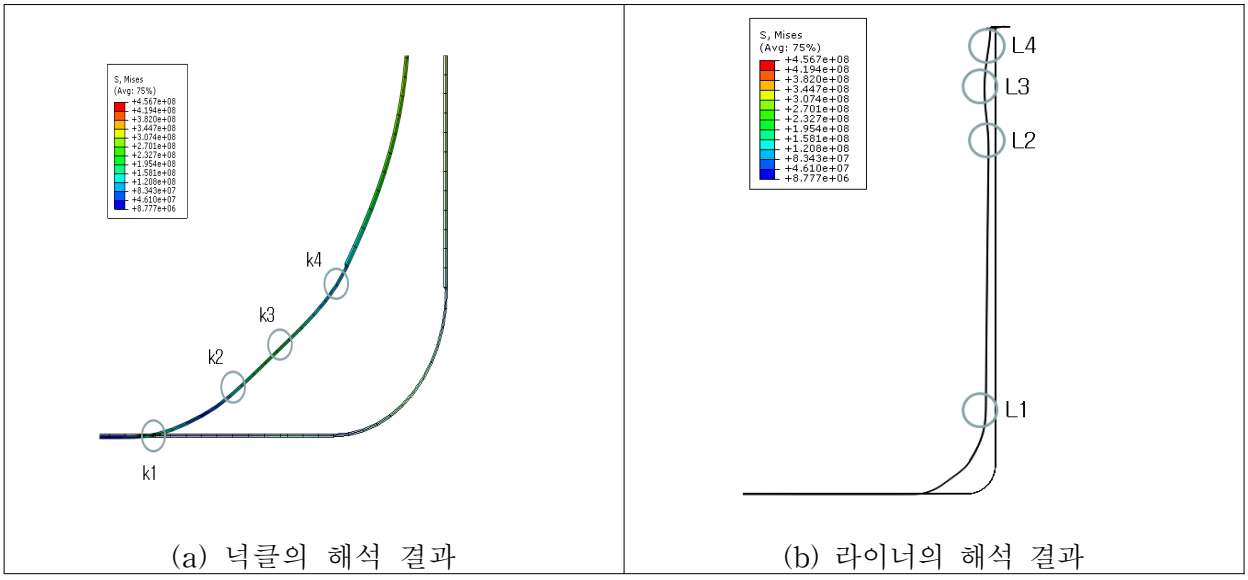
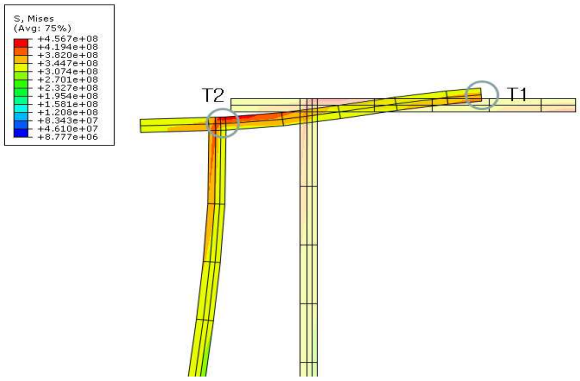



그림 2.6.23 중대유출상태에서 역학적 하중과 열하중을 동시에 고려한 코너프로텍션의 유한요소모델




(a) 넉클의 해석 결과 (b) 라이너의 해석 결과




(c) 탑링의 해석 결과

그림 2.6.24 코너프로텍션의 해석 결과 (중대유출상태, 역학적 하중+열하중)

표 2.6.9 코너프로텍션의 해석 결과 (중대유출상태, 역학적 하중+열하중)

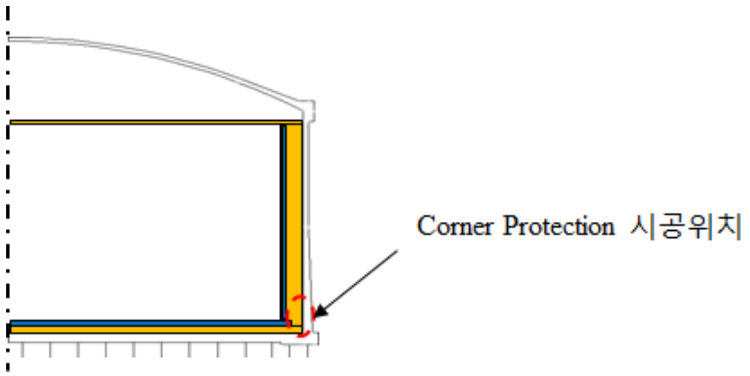
(단위 : MPa)

| 위치 | Section | Mechanical (1차 하중) | | **Total (1+2차 하중)** |
|---|---|---|---|---|
| | | Pm | Pm+Pb | **Pm+Pb** |
| knuckle | K1 | | | **30.2** |
| | K2 | | | **286** |
| | K3 | | | **244** |
| | K4 | | | **87.1** |
| Liner | L1 | | | **191** |
| | L2 | | | **336** |
| | L3 | | | **314** |
| | L4 | | | **456** |
| Top ring | T1 | | | **537** |
| | T2 | | | **570** |
| 허용응력 | 중대누출 | 340.0 | 585.9 | **585.9** |
| 검토 | | | | **OK** |

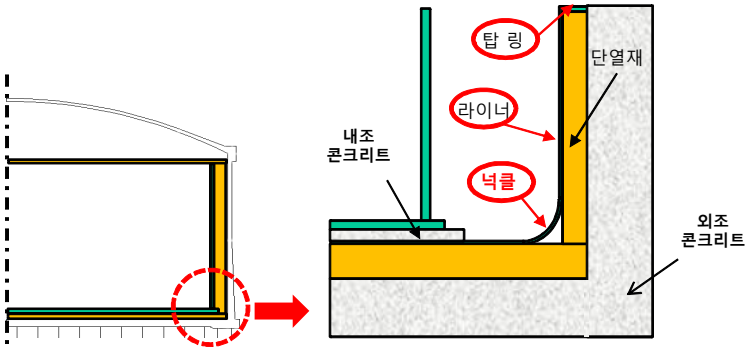
4. 넉클반경에 따른 코너프로텍션의 최적설계

코너프로텍션은 그림 2.6.25와 같이 외조 콘크리트의 하단부에 위치하며, 단열재, 탑링, 라이너, 넉클로 구성된다. 그 중 넉클의 형상과 반경의 크기는 전체 코너프로텍션의 역할에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 LNG 유출이 없는 정상상태에서 넉클의 반경 크기에 변화를 주면서 전체 코너프로텍션에 대해서 유한요소법을 이용한 열전달, 열응력 해석을 진행하였다. 또한 설계 기준과 비교하면서 허용응력을 초과하지 않게 하는 최적의 넉클 반경을 도출하였

다.




(a) 코너프로텍션의 시공 위치




(b) 코너프로텍션의 개략도

그림 2.6.25 코너프로텍션의 위치 및 개략도

그림 2.6.26에서는 넉클 반경 R=0.2m 일 때, 열전달 해석 결과와 열응력 해석 결과를 비교하였다. 두 해석결과를 보면 온도 분포가 동일한 것으로 보아 열전달 해석 결과가 열응력 해석 모델에 정확히 입력된 것을 확인할 수 있다.

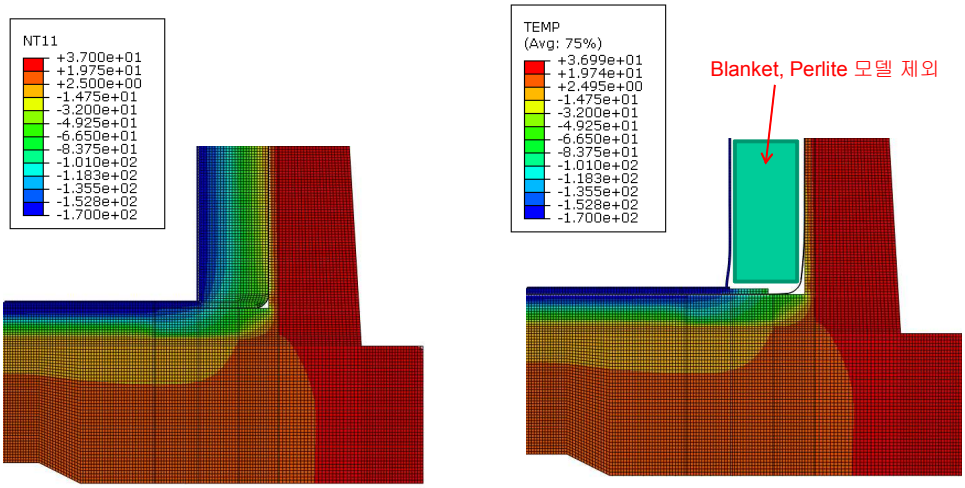
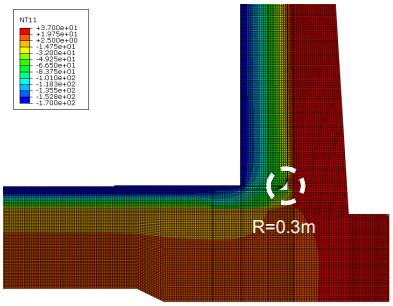
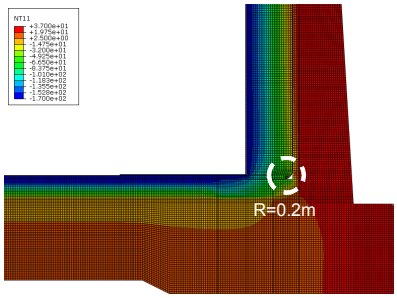



그림 2.6.26 열전달 해석 결과(좌)와 열응력 해석 결과(우) 비교: R=0.2m

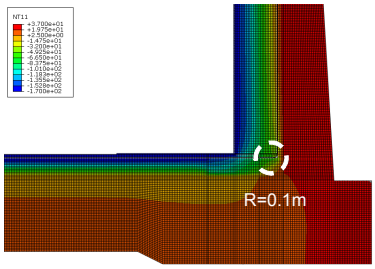
그림 2.6.27은 넉클 반경변화에 따른 유한요소 열전달 해석결과를 나타낸다. 특히 반경이 0인 경우는 원형넉클이 아닌 직각넉클의 형상을 나타낸다. 그림 2.6.28에서는 넉클 반경변화에 따른 유한요소 열을력해석의 응력분포 변화를 보여준다. 넉클 반경이 크면 클수록 코너부의 응력집중을 더 유효하게 완화시키기 때문에 최대응력은 더 작다.



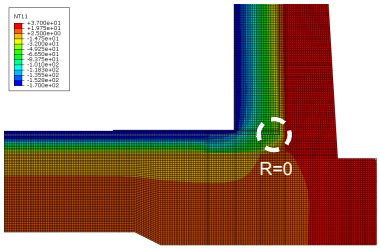

(a) R=0.3




(b) R=0.2

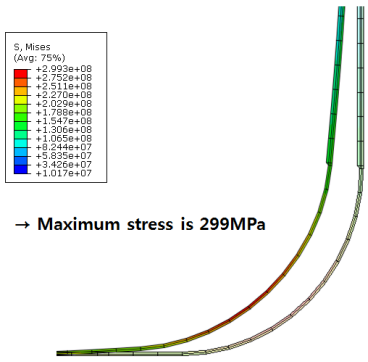



(c) R=0.1m

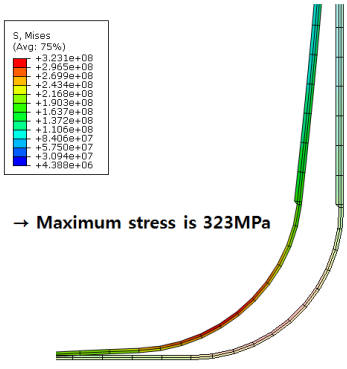



(d) R=0

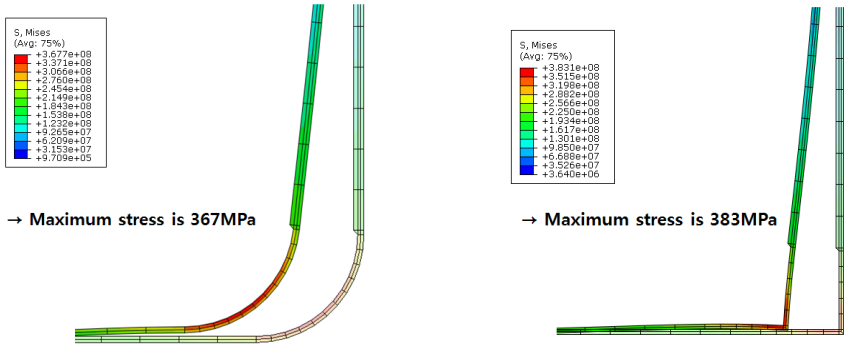
그림 2.6.27 네가지 넉클 반경에 대한 열전달 해석 결과




(a) R=0.3




(b) R=0.2




(c) R=0.1m (d) R=0

그림 2.6.28 넉클 반경변화에 따른 코너프로텍션의 응력분포 변화

유한요소해석 결과와 설계기준에 근거하여 코너프로텍션의 최적설계를 수행하였다. 9% 니켈강 넉클의 강도는 520MPa 이고 1.5의 안전계수를 고려하면 넉클의 최대 허용응력은 347MPa 이다. 그림 2.6.29에서 보면 최적의 넉클반경은 0.15m임을 보여준다.

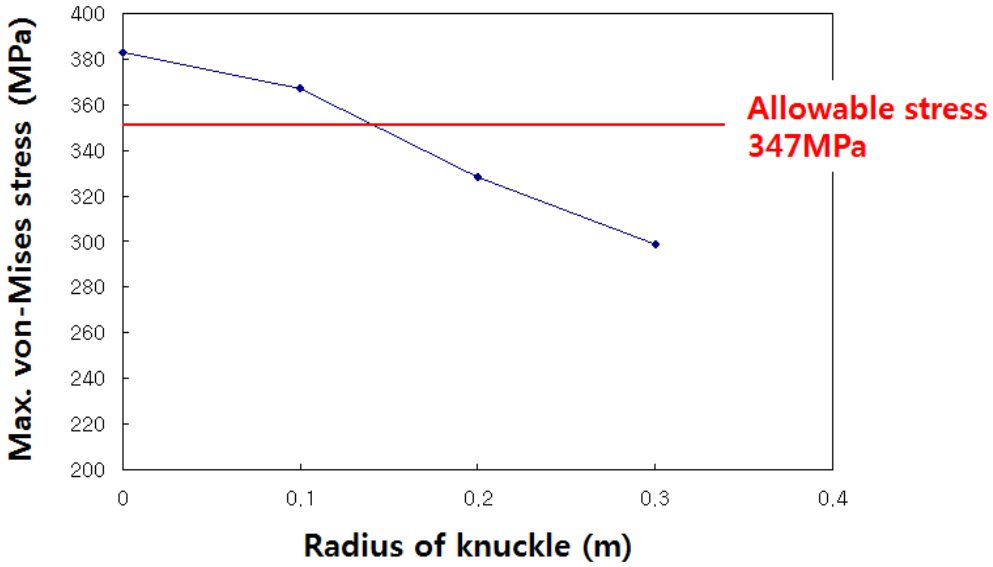



그림 2.6.29 코너프로텍션의 최대 응력과 최대허용응력 비교도

5. 넉클형상에 대한 최적설계

본 연구에서는 넉클 형상이 원형이 아닌 다양한 형상을 고려하여 최적설계를 수행 하였다. 기존의 넉클은 원형모양(R type)인데 시공할 때 탱크의 원주방향과 코너부에 대한 bending 작업을 필요로 하기 때문에 시공에 어려움을 주고 있다. 6차년도에 새로 제안한 넉클은 원형모양이 아닌 직선모양(D type)으로 시공이 상대적으로 쉬운 장점이 있다(그림 2.6.30참조). 새로 제안한 넉클형상의 구조적 안정성을 검토하기 위하여 열전달, 열응력 유한요소해석을 진행하였고 기존 R type 넉클의 유한요소해석 결과와 비교하였다.

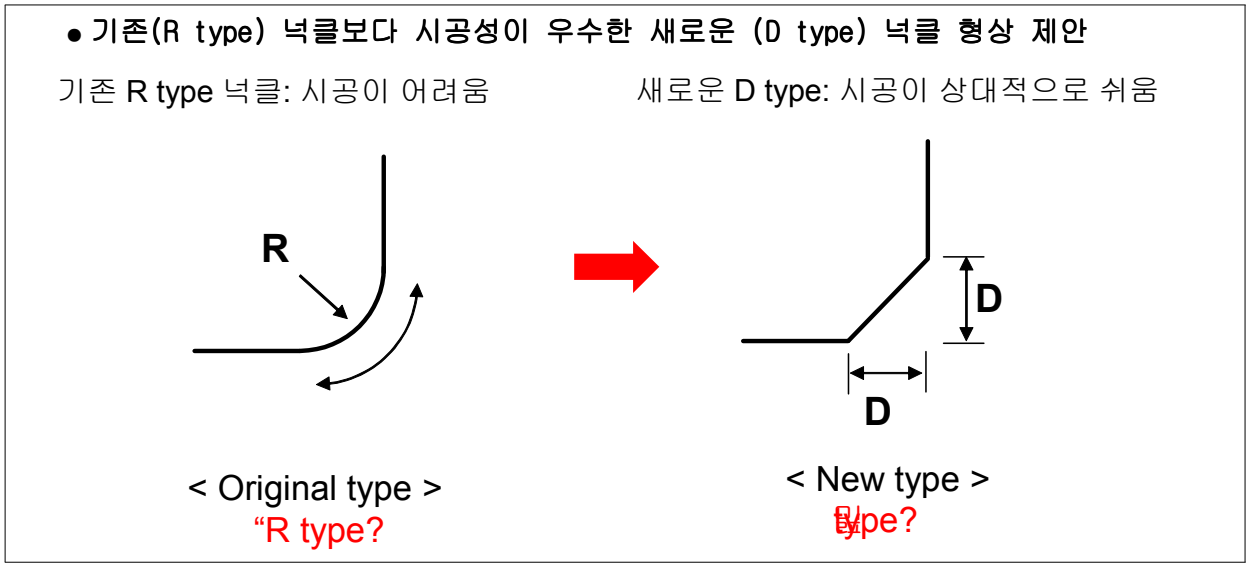



그림 2.6.30 기존 넉클보다 시공성이 더 쉬운 새로운 형상 제안

그림 2.6.31, 그림 2.6.32는 코너프로텍션의 형상 치수 및 유한요소해석 모델을 각각 보여준다. 열전달 유한요소모델과 비교했을 시, 열응력 유한요소모델에서는 단열재를 모델링하지 않았다.

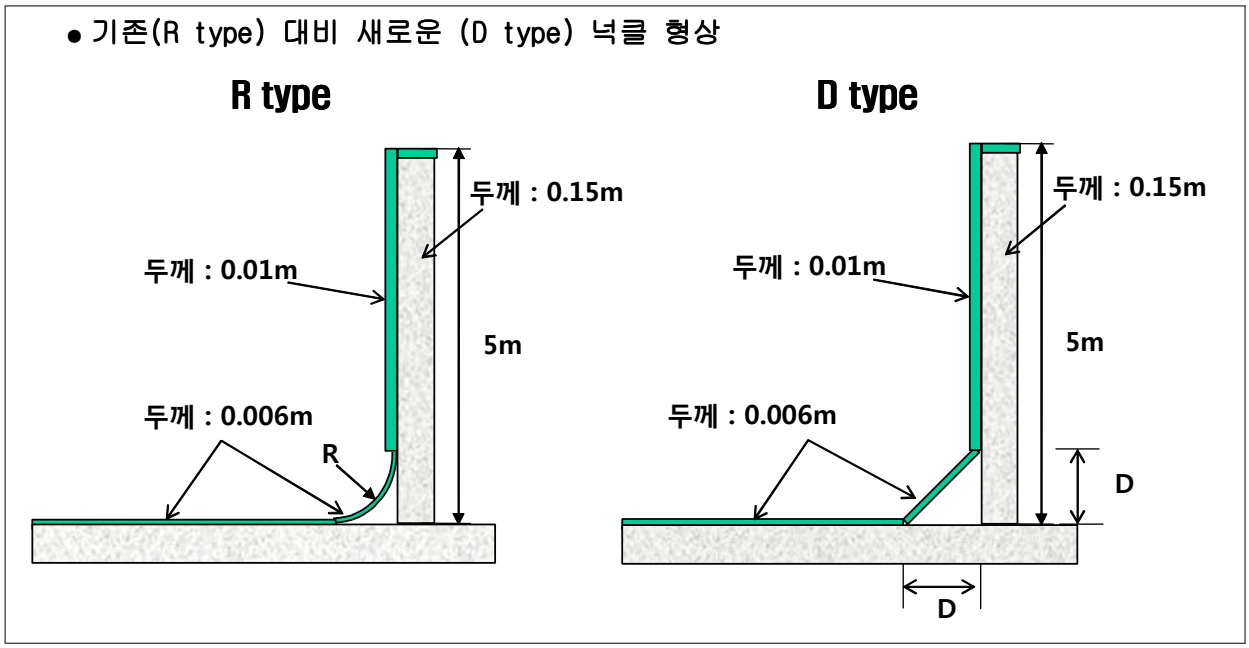



그림 2.6.31 코너프로텍션의 형상 치수

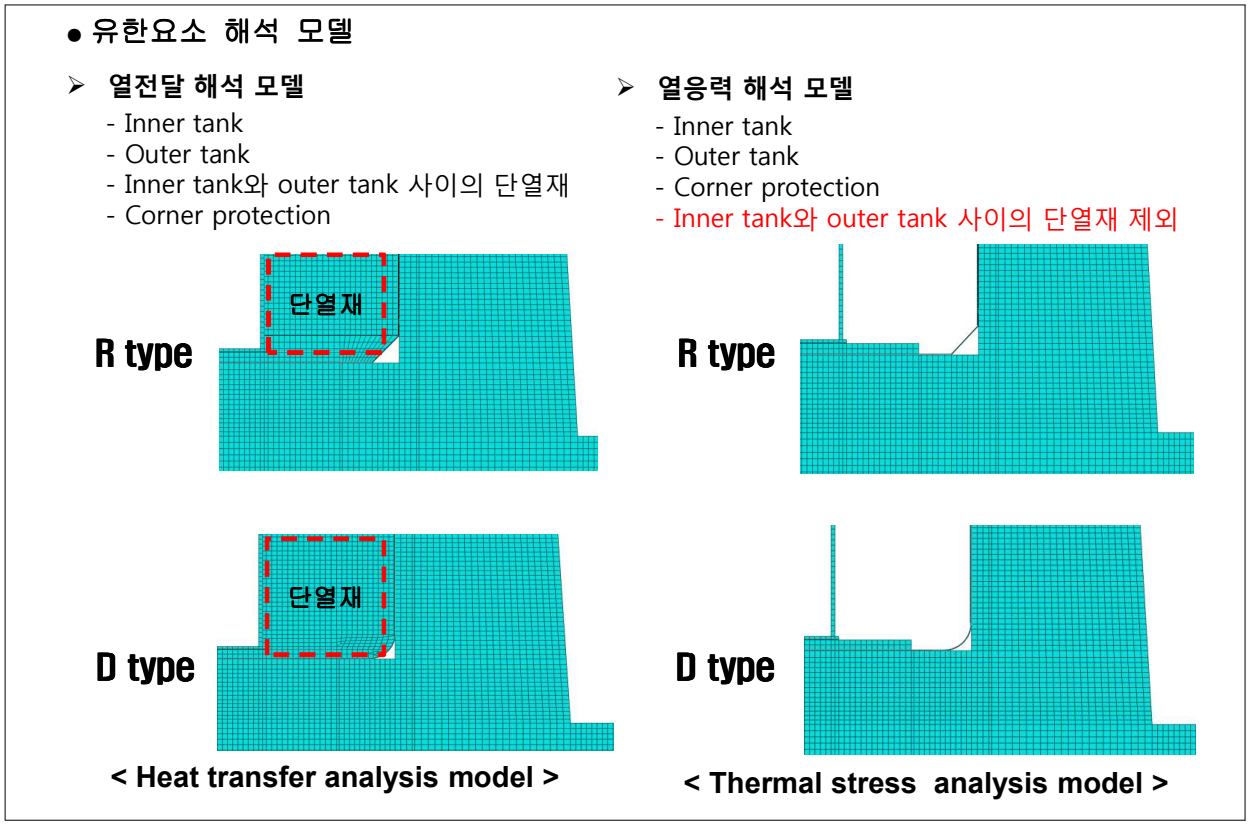



그림 2.6.32 코너프로텍션의 열전달, 열응력 유한요소모델

그림 2.6.33, 그림 2.6.34은 코너프로텍션의 열전달 해석 결과를 나타낸다. R (또는 D) 치수가 0.3m, 0.2m, 0.1m에 대해서 각각 해석을 진행하였고 두 해석결과를 보면 온도 분포가 동일한 것을 확인할 수 있다.

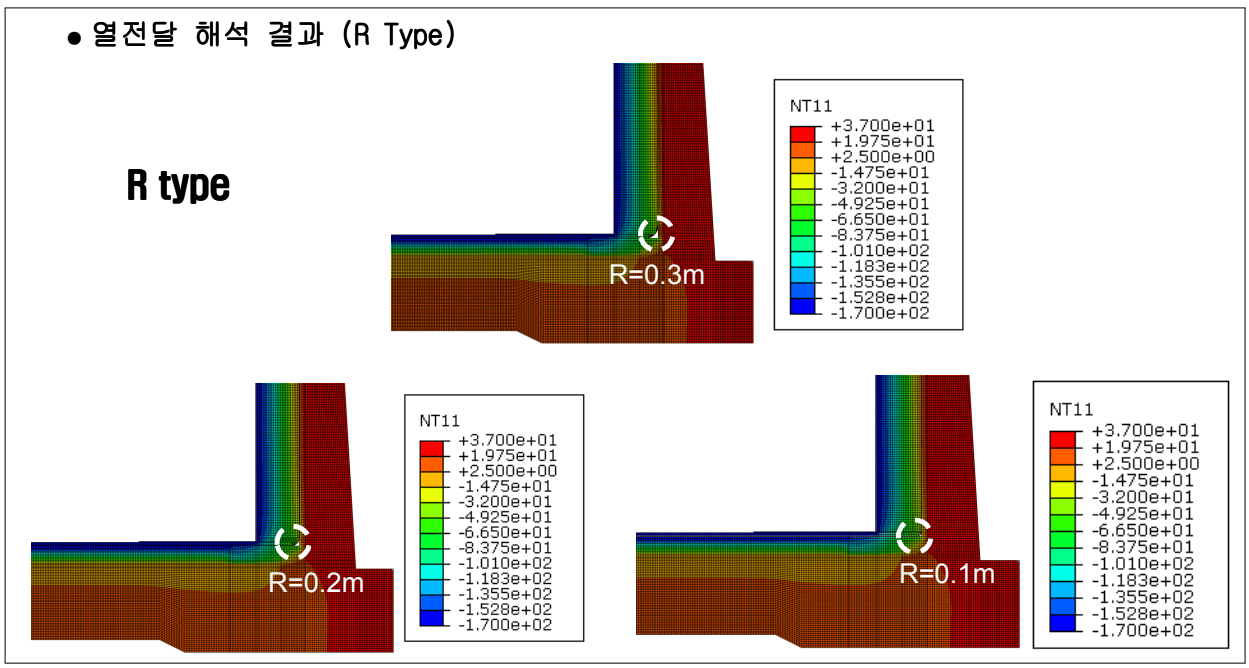



그림 2.6.33 기존 R type 넉클의 열전달 해석결과

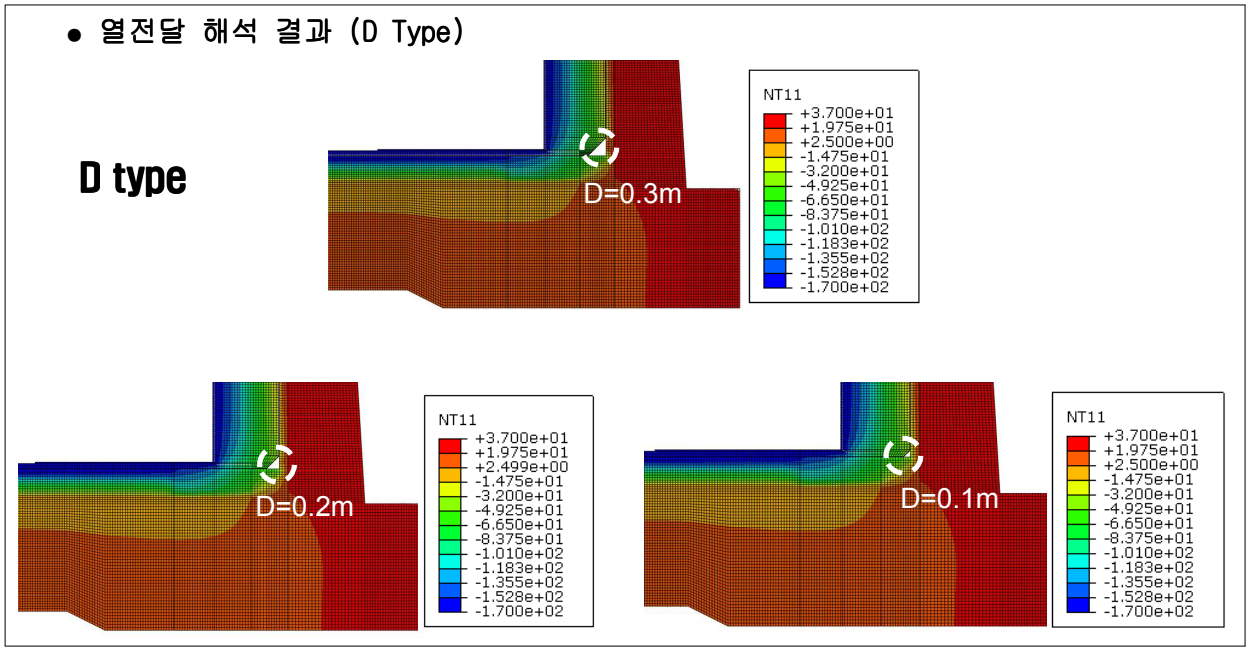
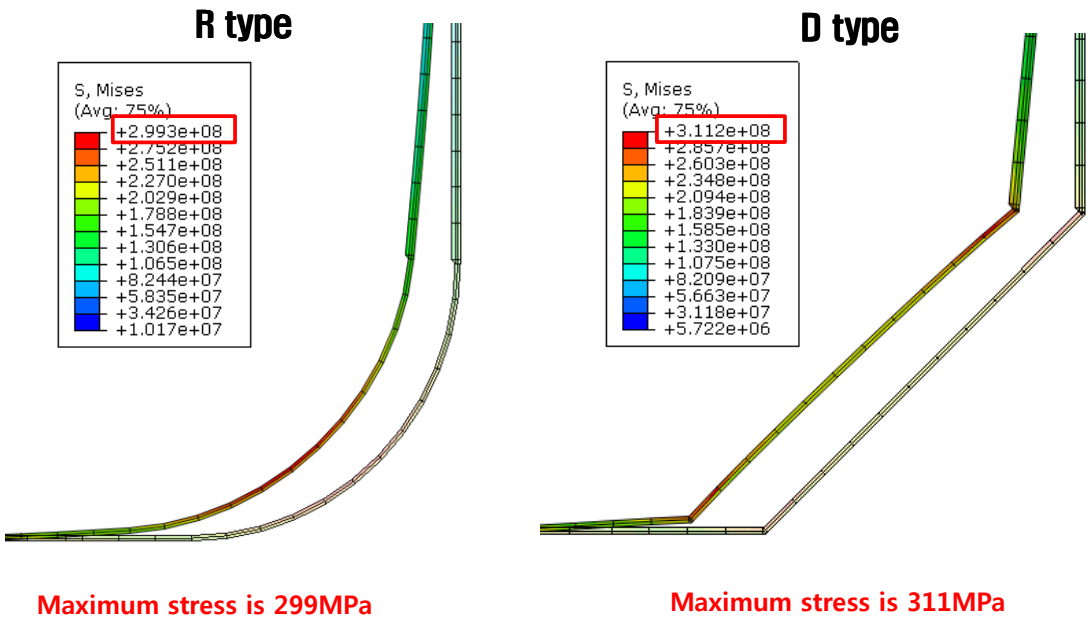



그림 2.6.34 새로 제안한 D type 넉클의 열전달 해석결과

그림 2.6.35, 그림 2.6.36, 그림 2.6.37는 코너프로텍션의 열응력 해석 결과를 나타낸다. R=D=0.3m 일 때, R type의 최대응력은 299MPa이고, D type의 최대응력은 311MPa으로서 R type 최대응력보다 약 4% 높다. R=D=0.2m 일 때, R type의 최대응력은 323MPa이고, D type의 최대응력은 327MPa으로서 R type 최대응력보다 약 1% 높다. R=D=0.1m 일 때, R type의 최대응력은 367MPa이고, D type의 최대응력은 360MPa으로서 R type 최대응력보다 약 2% 낮다.

● 열응력 해석 결과 비교 (R=D=0.3m)



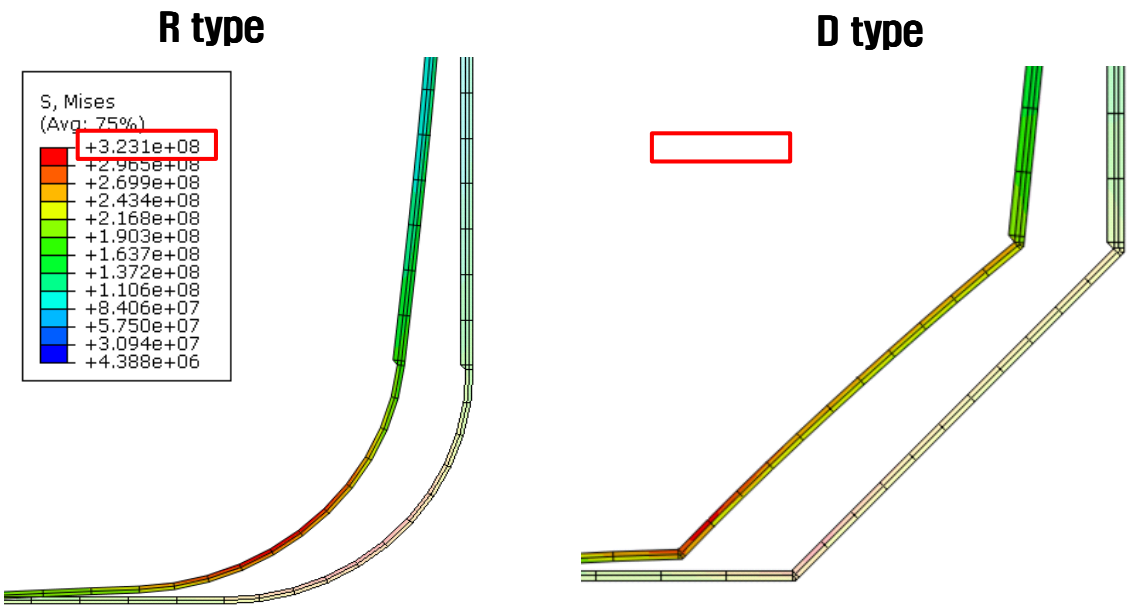

Maximum stress is 299MPa

Maximum stress is 311MPa

→ D type knuckle has about 4% higher maximum stress than R type.

그림 2.6.35 열응력 해석결과 : R=D=0.3m

● 열응력 해석 결과 비교 (R=D=0.2m)




→ D type knuckle has about 1% higher maximum stress than R type.

그림 2.6.36 열응력 해석결과 : R=D=0.2m

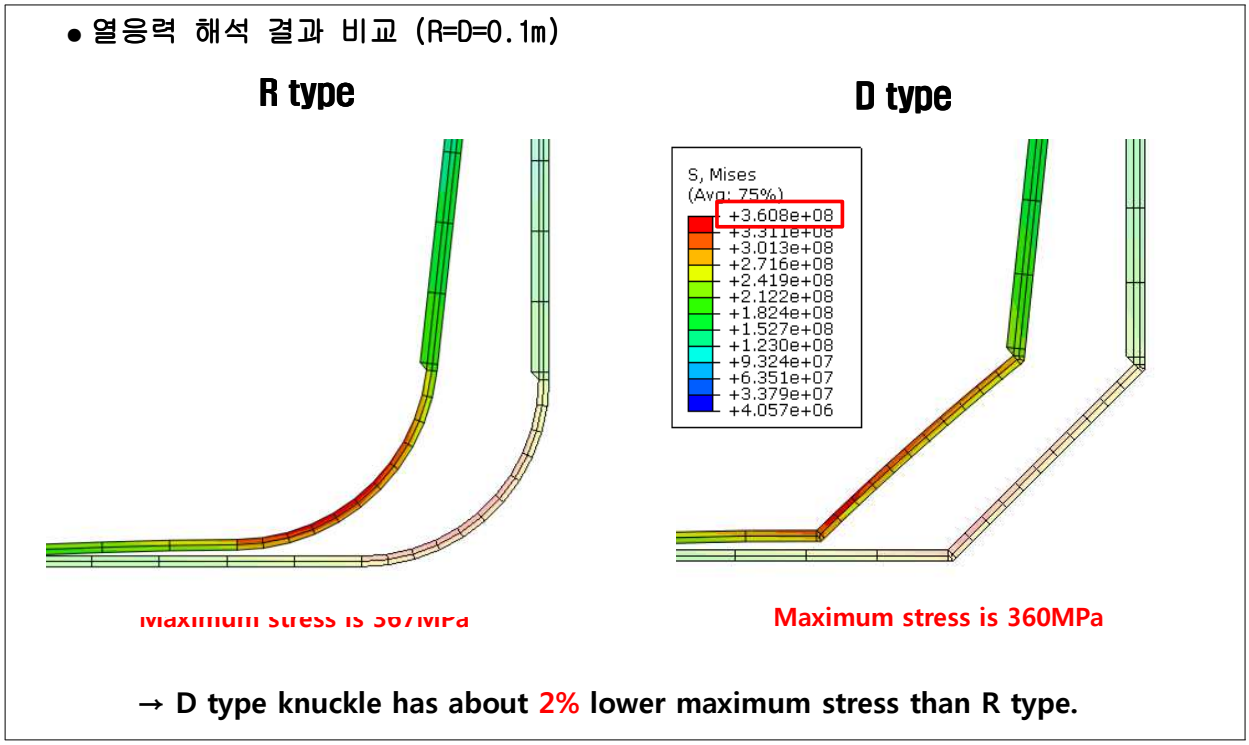



그림 2.6.37 열응력 해석결과 : R=D=0.1m

그림 2.6.38에 기존 넉클과 새로 제안한 넉클에 대해서 다양한 치수에 따른 응력해석결과와 최대 허용 응력 값을 비교하였다. 다양한 넉클 형상 치수에서 R type과 D type의 응력은 거의 비슷함을 확인할 수 있고 설계 기준을 만족하는 최소 치수는 R=D=0.15m 이다. 따라서 본 연구는 설계 기준을 만족하는 동시에 시공 어려움을 극복할 수 있는 넉클 형상을 제시하였다.

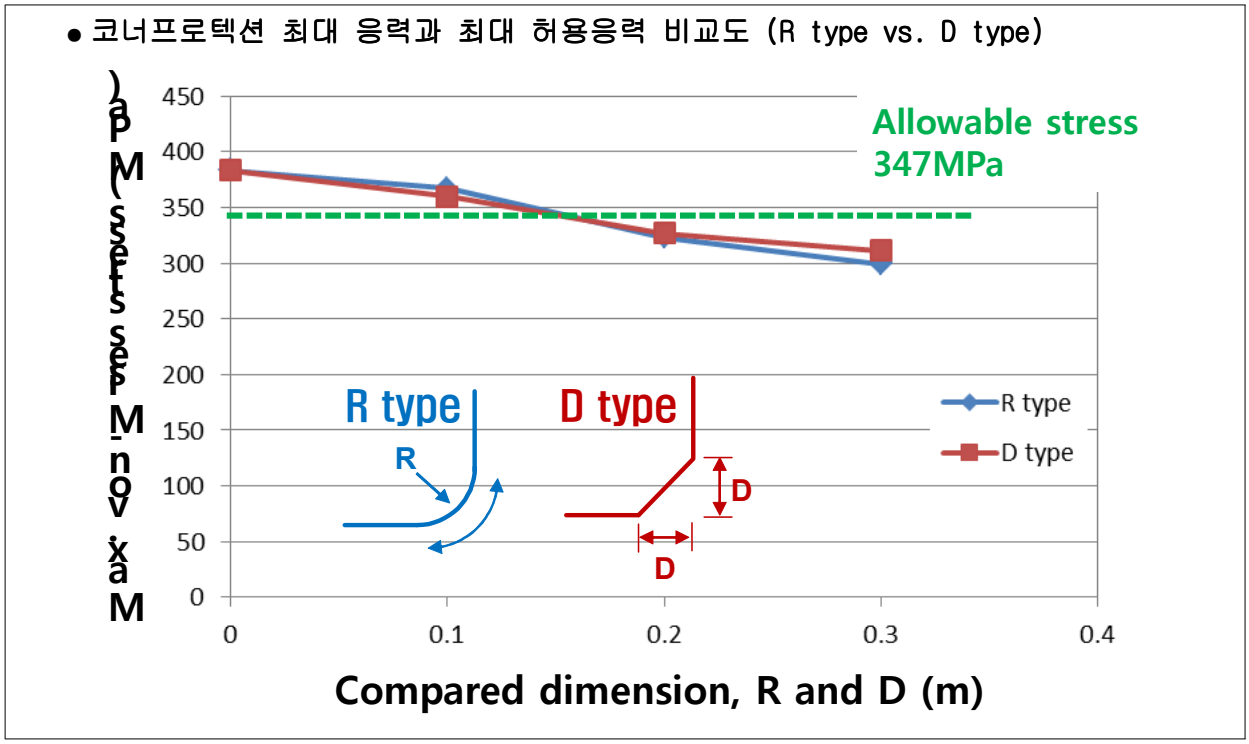



그림 2.6.38 코너프로텍션의 최대 응력과 최대 허용응력 비교도

6. 결론

LNG 유출의 수준에 따라 정상상태, 부분노출상태, 중대노출상태에서 코너프로텍션에 대하여 유한요소해석을 수행하였고 얻어진 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

가. 코너프로텍션의 설계 검토를 위해 2D Axisymmetric 요소모델을 만들어 열전달과 구조해석을 수행하였다.

나. 코너프로텍션의 설계 기준은 ASME sec. Ⅷ div.2, Appendix 4 의 높은 허용응력을 사용하는 소성설계를 사용하였다.

다. 6가지의 하중조건에서 코너프로텍션의 넉클, 라이너, 탑링 부분의 응력분포를 관찰해보고 최대허용응력과 비교를 하였다.

라. 현재의 코너 프로텍션은 정상상태와 중대누출일 경우 큰 응력을 발생하였다. 하지만 모든 경우에서 넉클, 라이너, 탑링 모두 설계 기준을 만족하였다.

유한요소해석 결과와 설계기준에 근거하여 코너프로텍션의 최적설계를 수행한 결과, 최적의 원형 넉클의 반경은 0.15m임을 얻을 수 있었다. 또한 직각 넉클을 사용하면 설계 기준을 만족하는 동시에 시공 어려움을 극복할 수 있음을 제시하였다.

# 7절. 지진하중을 받는 LNG 탱크의 구조해석

1. 개요

3차년도, 4차년도에 코너프로텍션, 앵커스트랩, 관통파이프에 대한 지진해석을 수행하였는데, LNG유체를 직접 모델링 하지 않고 유체가 내조 벽에 주는 압력을 계산하여 입력 값으로 하였고 지진하중도 등가변위로 대체하였다(그림 2.7.1; 그림 2.7.2). 5차년도 에는 LNG가 내부에 담긴 저장탱크의 지진 시 동적거동을 관찰하기 위해 LNG를 모델링하고 Modal Analysis를 이용한 응답스펙트럼 해석을 수행하였다.

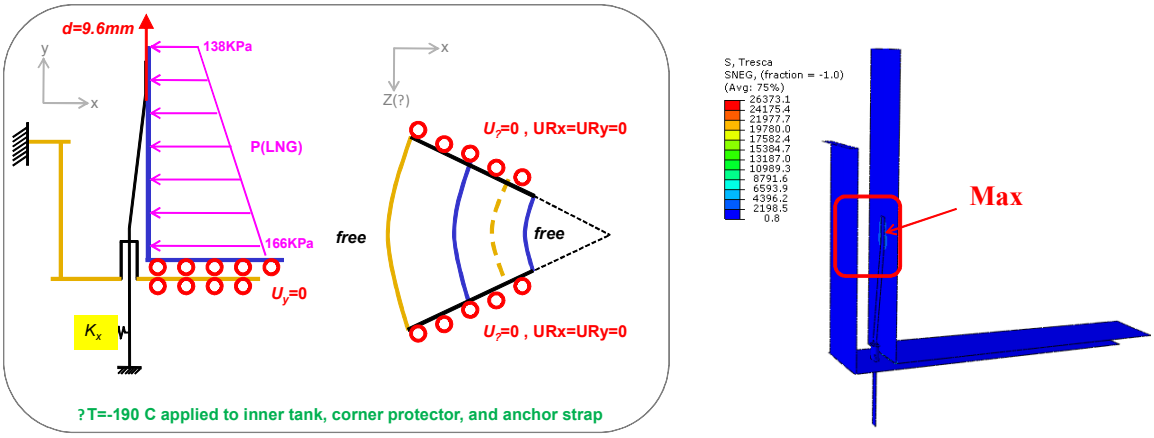
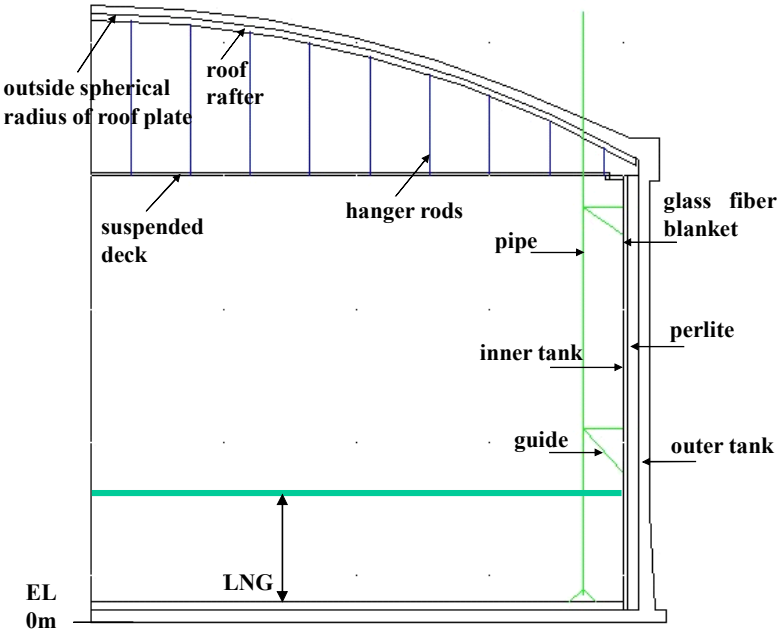


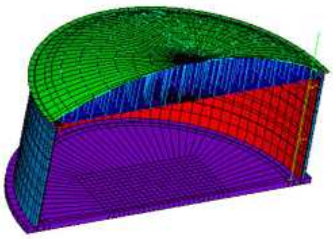

그림 2.7.1 앵커스트랩, 코너프로텍션의 지진해석: 지진하중을 등가변위로 고려

2. LNG 유체를 고려한 탱크의 유한요소 모델링

그림 2.7.3에 LNG 탱크의 단면도를 보여주었다. 본 연구에서는 반경이 40m이고 용량이 20kL인 탱크에 대해서 지진해석을 진행하였다.

그림 2.7.4은 탱크 전체의 유한요소 모델을 보여준다. 탱크모델은 그림 2.7.5 ~그림 2.7.7처럼 base, wall, ringbeam, roof, LNG, 그리고 pile 로 이루어진다.



구성요소
(내조, 외조)

? 지붕
? 현수천정
? 내벽
? 외벽
? 바닥
? 파이프/가이드

그림 2.7.2 LNG 탱크 단면도

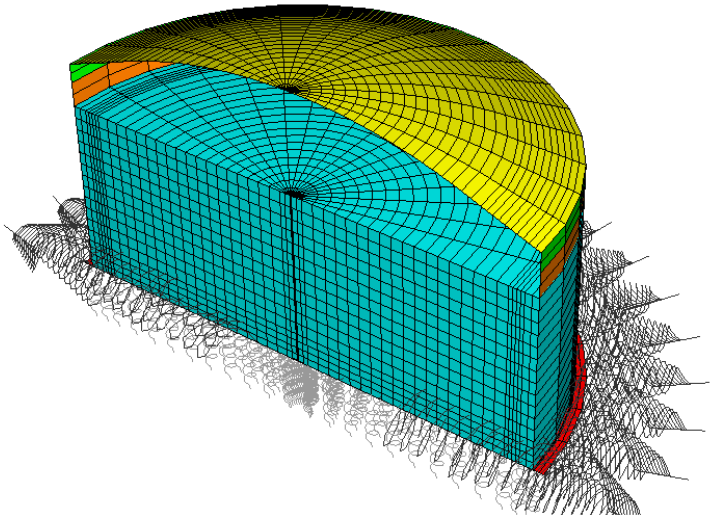


그림 2.7.3 전체 유한요소 모델

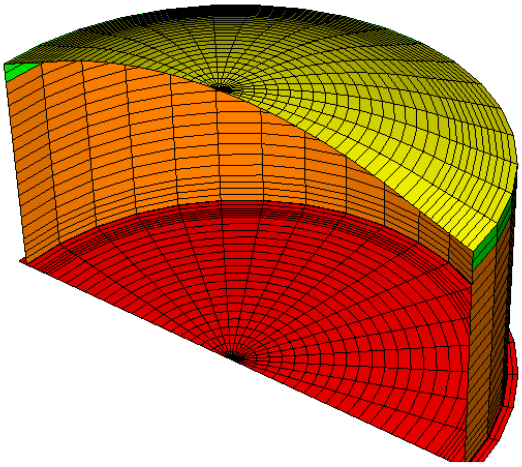


그림 2.7.4 Base, Wall, RingBeam, Roof 모델

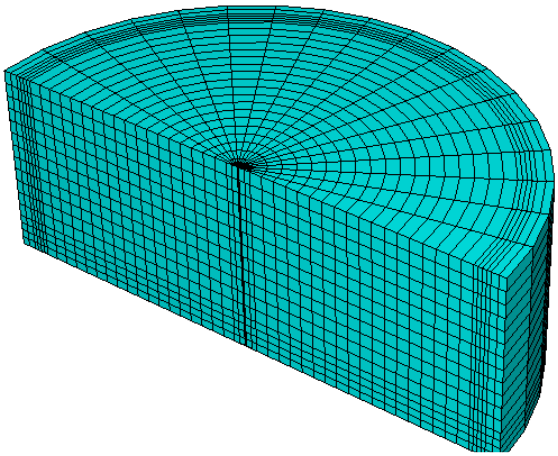


그림 2.7.5 45 LNG 모델

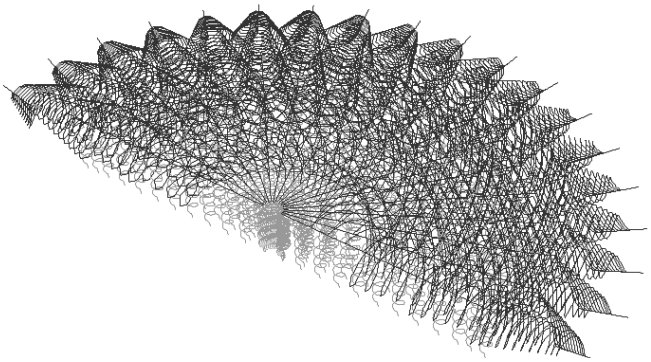


그림 2.7.6 Pile (Spring) 모델

Pile은 SPRINGA 요소로 Axial spring between two nodes element를 사용하였다. 표 2.7.1과 표 2.7.2에는 스프링 요소 입력 값들과 Pile에 관한 변수 값들을 각각 표시하였다. 그리고 내부에 저장된 LNG는 C3D8 요소로 8-node linear brick element를 사용하였고, Base, Wall, RingBeam, Roof는 S4 요소로 4-node doubly curved general-purpose shell element를 사용하였다. 표 2.7.3에는 해석 시 사용 될 물성치를 표시하였다.

표 2.7.1 Pile에 관한 스프링요소 정보

| Spring constant and location of Piles | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| No. of spring | radius R [m] | $R_a$ $R_i$ [m] | $(Ra^2-Ri^2)\pi$ = An [m2] | number of piles [-] | Kv [MN/m] | Kh [MN/m] |
| 12 | 40.800 | - | - | 112 | 64421.2 | 6646.6 |
| 11 | 38.350 | - | - | 108 | 62120.4 | 6409.3 |
| 10 | 35.900 | - | - | 100 | 57518.9 | 5934.5 |
| 9 | 32.121 | 34.011 | 762.677 | | 57867.7 | 5970.5 |
| 8 | 28.342 | 30.232 | 672.950 | | 51059.8 | 5268.1 |
| 7 | 24.563 | 26.453 | 583.223 | | 44251.8 | 4565.7 |
| 6 | 20.784 | 22.674 | 493.497 | | 37443.8 | 3863.3 |
| 5 | 17.005 | 18.895 | 403.770 | | 30635.9 | 3160.9 |
| 4 | 13.226 | 15.116 | 314.043 | | 23827.9 | 2458.4 |
| 3 | 9.447 | 11.337 | 224.317 | | 17019.9 | 1756.0 |
| 2 | 5.668 | 7.558 | 134.590 | | 10212.0 | 1053.6 |
| 1 | 1.889 | 3.779<br>0 | 44.863 | | 3404.0 | 351.2 |

표 2.7.2 Pile에 관한 변수

| Pile Parameters | | |
|---|---|---|
| l | 15 | pile length(m) |
| D | 0.8 | pile dia.(m) |
| Ap | 0.03941 | net cross sectio of pile (m) |
| Ep | 2.10E+11 | elastic modulus of pile body (N/m2) |
| ip | 0.00302 | sectional secondary moment of figure axis of the cross section of pile (m4) |
| Bn | 0.286 | property value of pile (m-1) ; normal load |
| Bs | 0.34 | property value of pile (m-1) ; seismic load |
| R_outer | 40.8 | |
| R_pile | 35.9 | |
| n_div | 19 | |

표 2.7.3 유한요소해석에 사용된 재료 물성치

| Definition of Materials | | | |
|---|---|---|---|
| numbers of materials | | | 3 |
| material number | E (Gpa) | nu | rho (kg/m3) |
| 1 | 3.0E+10 | 0.2 | 2500 |
| 2 | 2.8E+10 | 0.2 | 2500 |
| 3 | 1.0E+02 | 0.3 | 480 |

3. 유한요소해석 결과

가. 모드 해석 결과

모드 해석에 대해서는 Lanczos eigensolver를 사용하였고, 초반의 LNG가 흔들리는 모드 형상의 아주 작은 고유치는 생략하고 저장 탱크의 형상이 변화하는 모드만 고려하였다.

LNG 저장탱크 외조만 고려한 모델, 외조와 내조를 고려한 모델, 그리고 외조, 내조, LNG 유체를 함께 고려한 모델에 대해서 각각 모드해석을 하였다. 그림 2.7.7~그림 2.7.9은 세 가지 모델의 1차, 2차, 3차 모드 형상을 나타내고, 표 2.7.4는 외조, 내조, LNG를 함께 고려한 고유진동수 값을 보여준다.

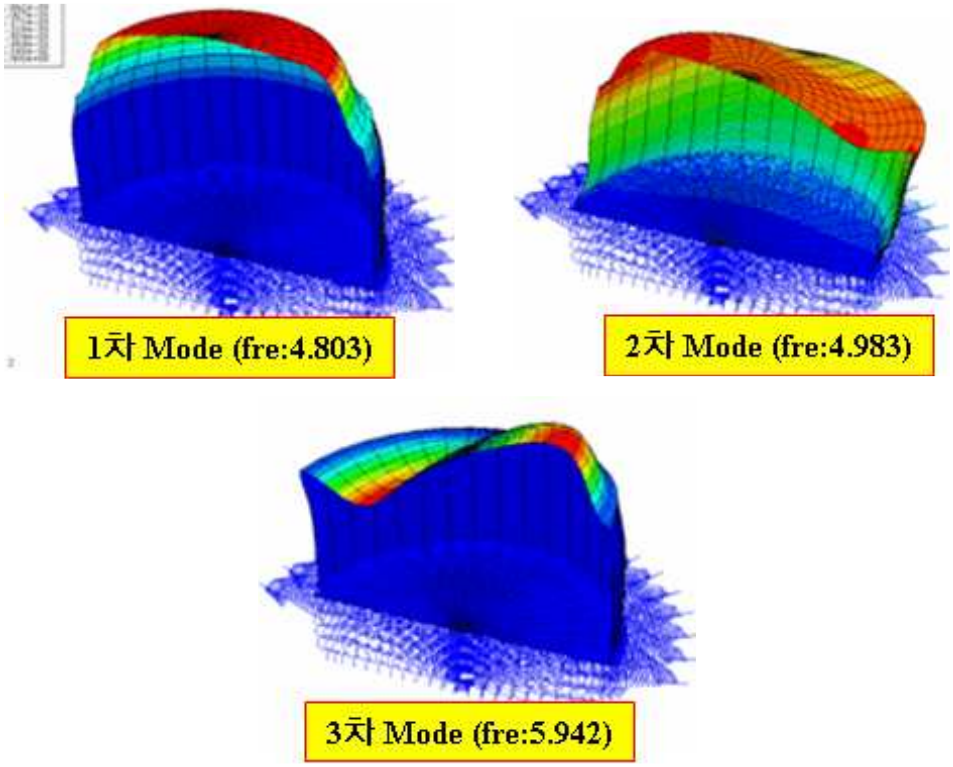
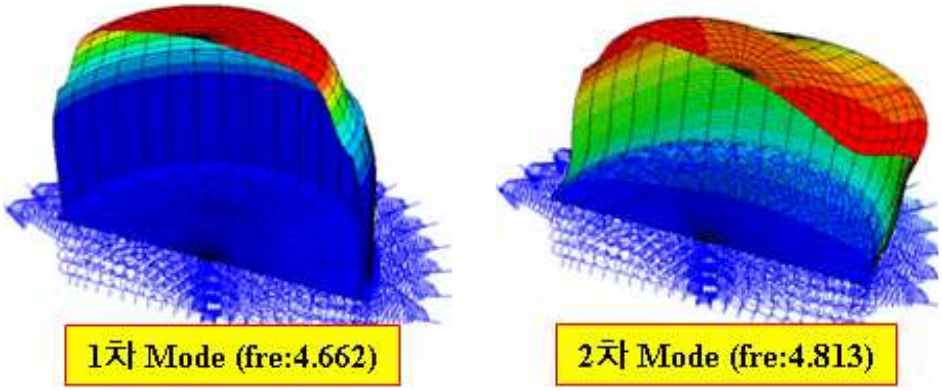



그림 2.7.7 주요 모드 형상: 외조만 고려



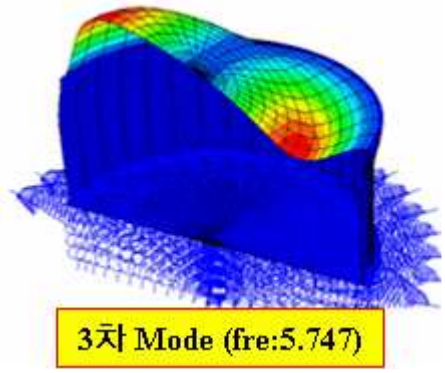
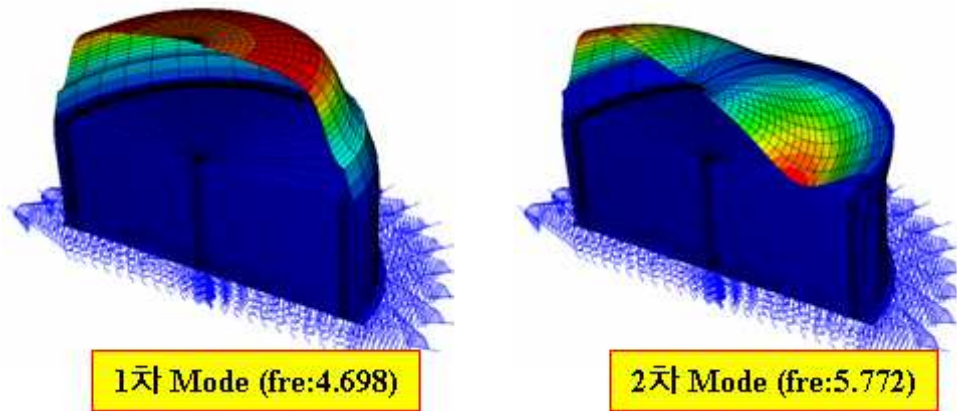



그림 2.7.8 주요 모드 형상: 외조 + 내조 고려



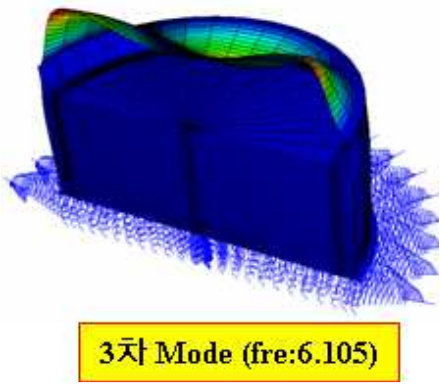




그림 2.7.9 주요 모드 형상: 외조 + 내조 + LNG 고려

표 2.7.4 LNG 저장탱크의 고유치 해석 결과 (단위:Hz)

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1차 | 4.6982 | 11차 | 6.7514 | 21차 | 8.9773 |
| 2차 | 4.8867 | 12차 | 7.1708 | 22차 | 9.1285 |
| 3차 | 5.7690 | 13차 | 7.2934 | 23차 | 9.6896 |
| 4차 | 6.0938 | 14차 | 7.5193 | 24차 | 9.8495 |
| 5차 | 6.1026 | 15차 | 7.5531 | 25차 | 10.149 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 6차 | 6.1246 | 16차 | 7.6036 | 26차 | 10.643 |
| 7차 | 6.3108 | 17차 | 7.9637 | 27차 | 10.740 |
| 8차 | 6.6373 | 18차 | 8.3279 | 28차 | 10.935 |
| 9차 | 6.6474 | 19차 | 8.3465 | 29차 | 11.217 |
| 10차 | 6.7032 | 20차 | 8.5393 | 30차 | 11.869 |

나. 지진하중에 대한 해석 결과

본 연구에서는 LNG가 내부에 담긴 저장탱크의 지진 시 동적거동을 예측하기 위해 Modal Analysis를 이용한 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 표 2.7.5는 응답스펙트럼 해석에 사용된 수평방향의 가속도 입력 값들을 보여준다.

표 2.7.5 응답스펙트럼 가속도 입력값

| Response Spectrum Input (Horizontal) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % of critical damping | acceleration(m/s2) | | | | | | | | |
| | 33Hz | 9Hz | 5Hz | 2.5Hz | 1Hz | 0.5Hz | 0.2Hz | 0.1Hz | 0.05Hz |
| 0.5 | 1.962 | 9.73152 | 10.58499 | 11.6739 | 5.09139 | 2.71737 | 1.45188 | 0.23544 | 0 |
| 1 | 1.962 | 8.3385 | 9.05463 | 10.0062 | 4.44393 | 2.40345 | 1.29492 | 0.20601 | 0 |
| 2 | 1.962 | 6.94548 | 8.10306 | 8.3385 | 3.76704 | 2.0601 | 1.12815 | 0.17658 | 0 |
| 3 | 1.962 | 6.14106 | 6.69042 | 7.36731 | 3.37464 | 1.87371 | 1.03986 | 0.16677 | 0 |
| 5 | 1.962 | 5.12082 | 5.58189 | 6.14106 | 2.90376 | 1.63827 | 0.93195 | 0.14715 | 0 |
| 7 | 1.962 | 4.45374 | 4.83633 | 5.33664 | 2.57022 | 1.48131 | 0.85347 | 0.13734 | 0 |
| 8 | 1.962 | 4.17906 | 4.54203 | 5.01291 | 2.46231 | 1.43226 | 0.82404 | 0.12753 | 0 |

해석은 수평방향과 수직방향 가진으로 나누어 수행하였으며 수직방향의 가진은 수평방향의 가진의 2/3배하여 수행하였다. 하중조합은 1.0Fx + 0.4Fy + 0.4Fz를 적용하였고 수평방향 가진 시 탱크의 형태가 원통형이므로 X방향 하중과 Y방향 하중이 동일하다고 가정하여 해석결과를 조합하였다.

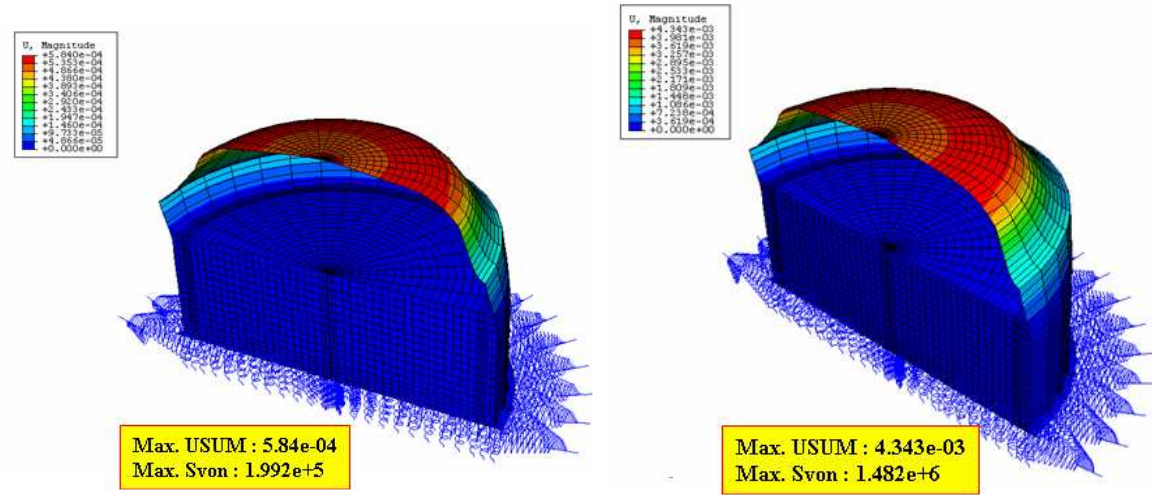



그림 2.7.10 수평방향(왼쪽)과 수직방향(오른쪽)의 가진에 의한 탱크의 변형

4. 결론

LNG가 내부에 담긴 저장탱크의 지진 시 동적거동을 관찰하기 위해 탱크 외조, 내조 그리고 LNG 유체를 모델링하고 Modal Analysis를 이용한 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 모드해석 에서는 외조에만 대해서, 그리고 외조와 내조에 대해서 해석을 수행했으며, 외조, 내조, 그리고 LNG 유체를 같이 고려하여 해석을 진행하였다. 지진 해석 에서는 수평방향과 수직방향 가진으로 나누어 각각 구조해석을 하였다.

# 8절. Sub-scale LNG 탱크 모형의 변형 측정 실험

1. Sub-scale 탱크 축소 모형, 실험 방법, 실험 장비

6차년도에는 sub-scale 탱크 모형에 대해서 액압하중, 진동하중을 가하고 탱크 모형의 변형을 측정하였다.( 그림 2.8.1 참조) 직경이 2m이고, 높이가 0.9m인 탱크 축소 모형은 실제 탱크를 1:45의 비례로 축소 한 것으로써 내조, 외조, 코너 프로텍션, 스티프너, 앵커스트랩 등 주요 부품들을 모두 포함한다.

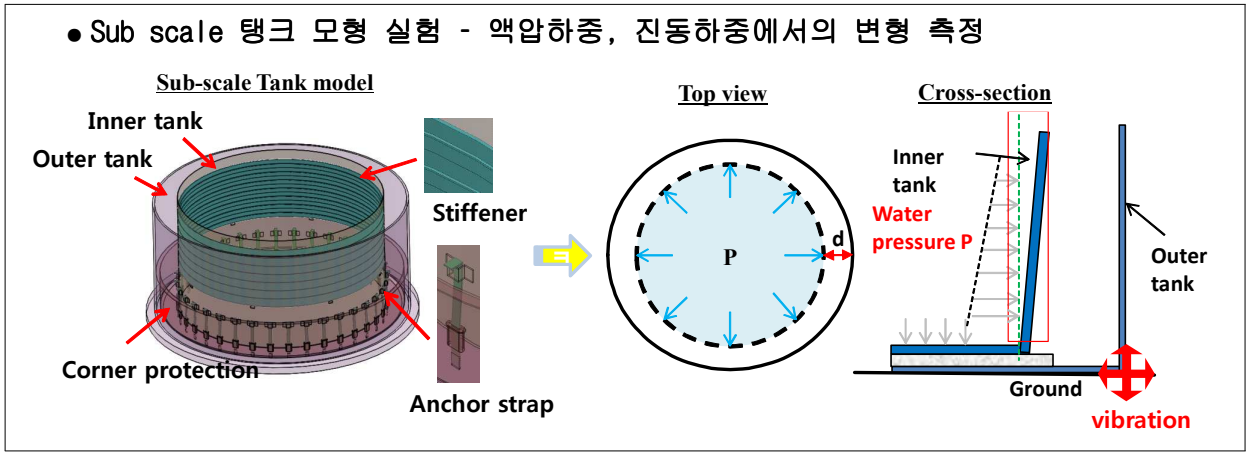



그림 2.8.1 Sub-scale 탱크 모형 실험 개략 설명도

탱크의 변형율은 strain gauge로 측정한다. 탱크 모형 실험을 수행하기 전에 먼저 strain gauge의 신호 정확성을 검증하기 위하여 간단한 실험을 진행하였다. 그림 2.8.2에 보면 외팔보에 변형율 측정장치를 연결하여 외팔포에 변형을 가했을 시, 변형율을 측정하였다.

그림 2.8.3에 보면 외팔보 끝단으로부터 200mm 떨어진 위치에서 굽힘하중을 가했고, 변형율은 외팔보 끝단으로부터 70mm 떨어진 위치에서 측정하였다. 외팔보에 다양한 크기의 굽힘하중을 가했을 시 측정된 변형율을 그림 2.8..4의 그래프에 표시하였다. 실험결과와 이론값이 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

● Strain gauge 신호 정확성 검증 : 외팔보의 변형률 측정하여 이론값과 비교

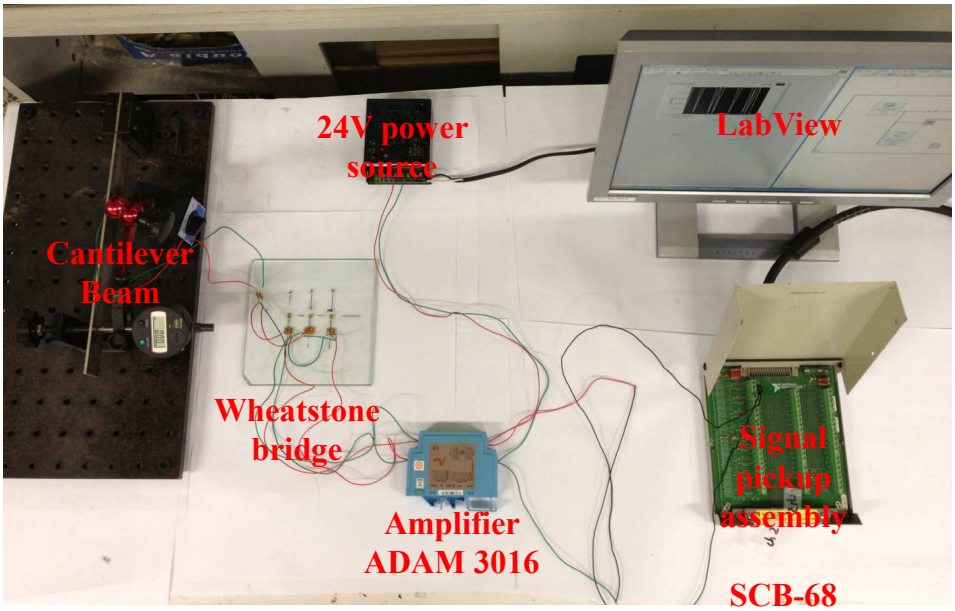
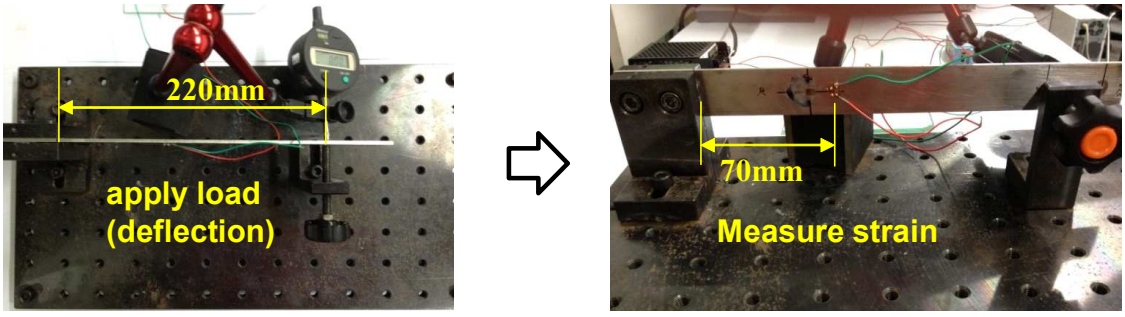



그림 2.8.2 Strain gauge 신호 정확성 검증 실험 장비

● strain gauge 신호 검증: 외팔보의 변형률 측정, 이론값과 비교



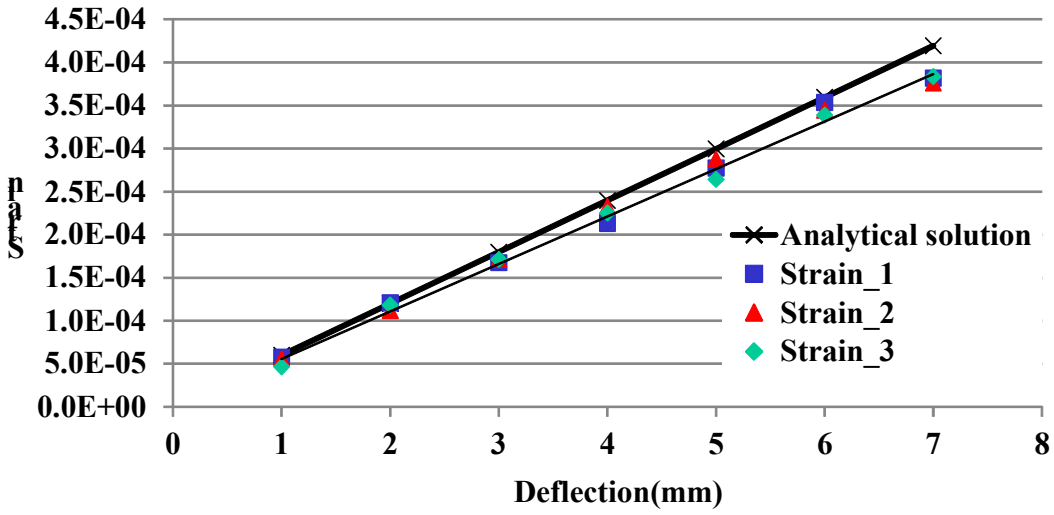




그림 2.8.3 Strain gauge 신호 검증 실험 결과

그림 2.8.4에 탱크 모형 실험 장비를 보여주었다. 주로 탱크 모형, 변형율 측정 장치, 가진장치로 이루어 졌다. 변형율 측정 장치는 주로 strain gauge, amplifier adam 3016, lab view를 이용한 wheastone bridge 회로로 구성되었다. 가진 장치로는 HSRV 042 모델을 사용하였고 출력이 0.4Kw, 3600RPM이다. 탱크에 진동하중을 가하기 위하여 탱크 하단에 스프링을 장착하였다.

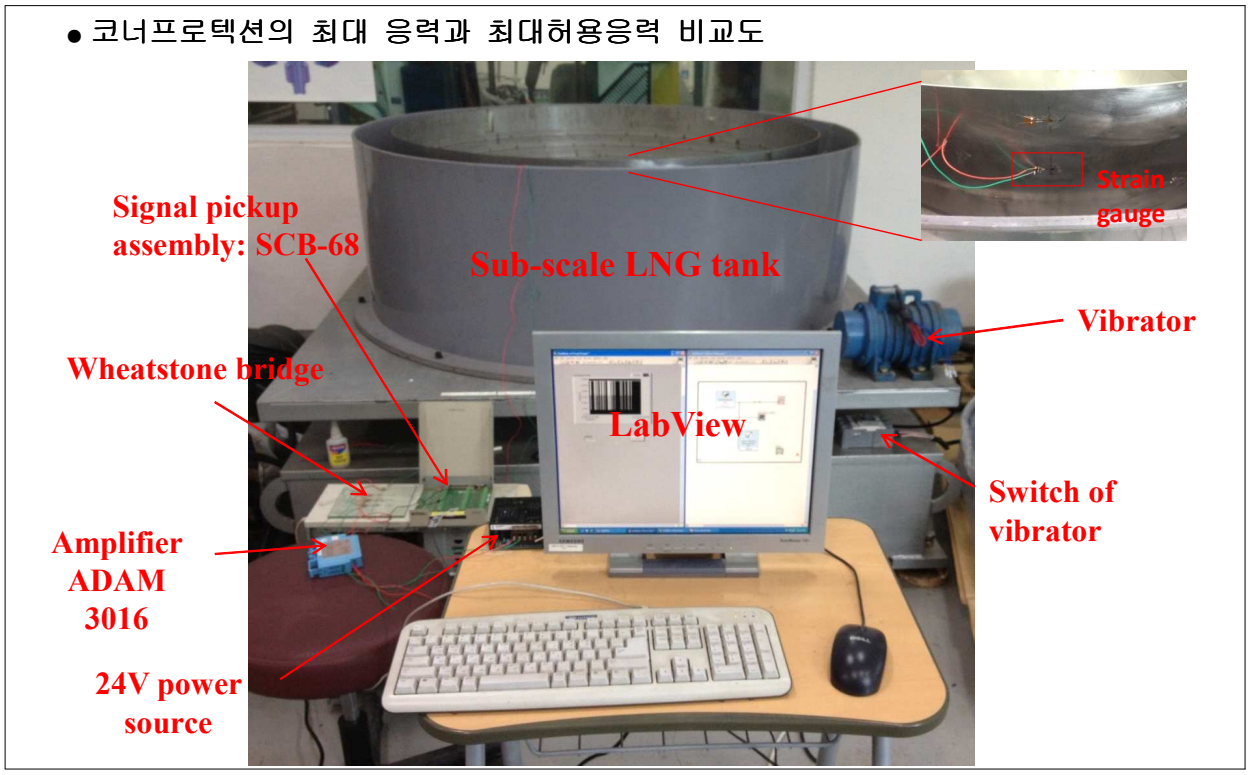



그림 2.8.4 Sub-scale 탱크 모형 실험 장비

2. 실험 결과

그림 2.8.5 ~ 그림 2.8.7에 탱크 모형 실험 결과를 보여주었다. 탱크 상단으로부터 100mm 떨어진 곳에 strain gauge 부착했으며, 서로 다른 위치에서 총 3개의 strain gauge를 부착하여 신호 정확성을 판단하였다. 그림 2.8.5는 액체높이가 200mm이고 진동하중이 가했을 시 변형율 측정결과를 보여준다. 진동이 시작될 때와 끝날 때 변형율이 40~60 micro strain 이고 진동 시에는 20 micro strain 보다 작은 값을 나타낸다. 가진장치의 진동수(120rad/s)가 탱크모형의 진동수(31.6rad/s)보다 커서 진동 시작 시와 끝날 시점에 공진현상이 발생하기 때문에 탱크가 상대적으로 크게 흔들리는 것을 보여준다. 액체높이가 300mm일 때는 200m일 때보다 공진현상이 변형율에 대한 영향이 작아졌으며 탱크가 상대적으로 안전한 것을 확인할 수 있다. 액체높이가 450mm일 때는 공진현상의 영향을 거의 받지 않은 것을 확인할 수 있다. 이번 탱크 모형 실험은 액체높이가 크면 클수록 탱크가 공진에 대한 저항력이 더 커지며 더 안전하다는 것을 보여 주었으며, 실제 탱크의 고유진동수와 지진의 진동수를 미리 예측하여 공진현상에 대한 탱크 파손을 방지할 수 있음을 제시하였다.

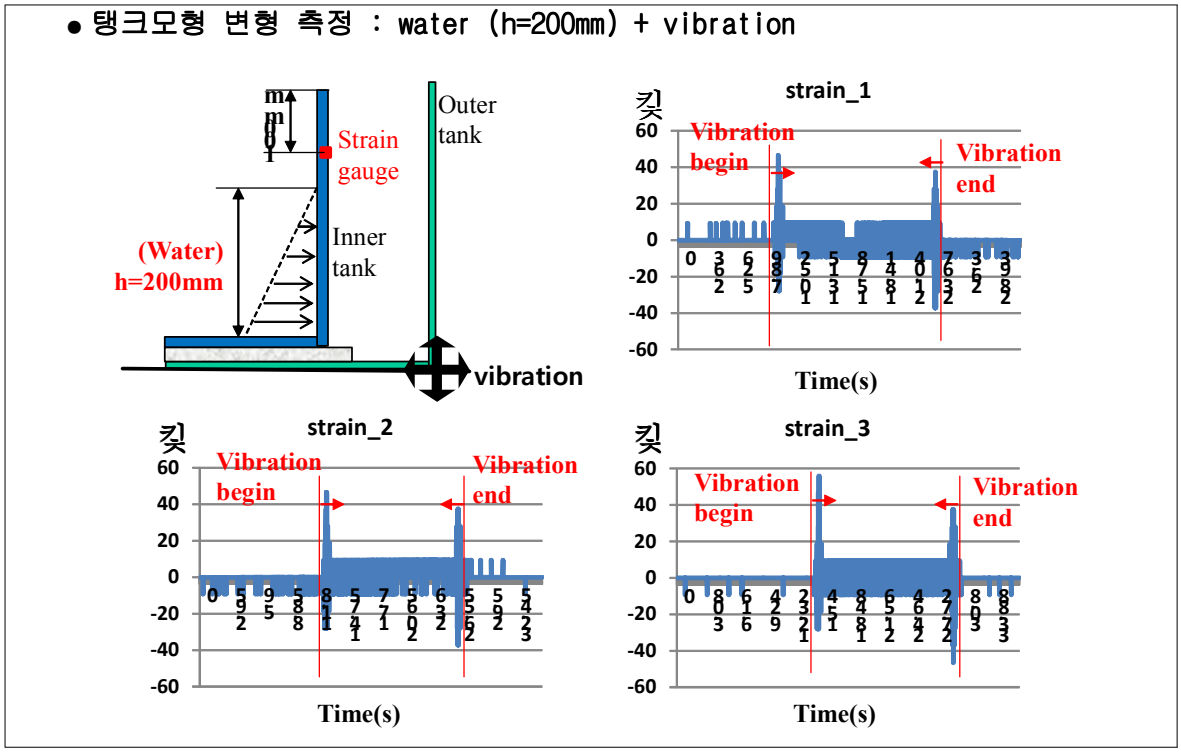



그림 2.8.5 Sub-scale 탱크 모형 실험 결과: water(h=200mm) + vibration

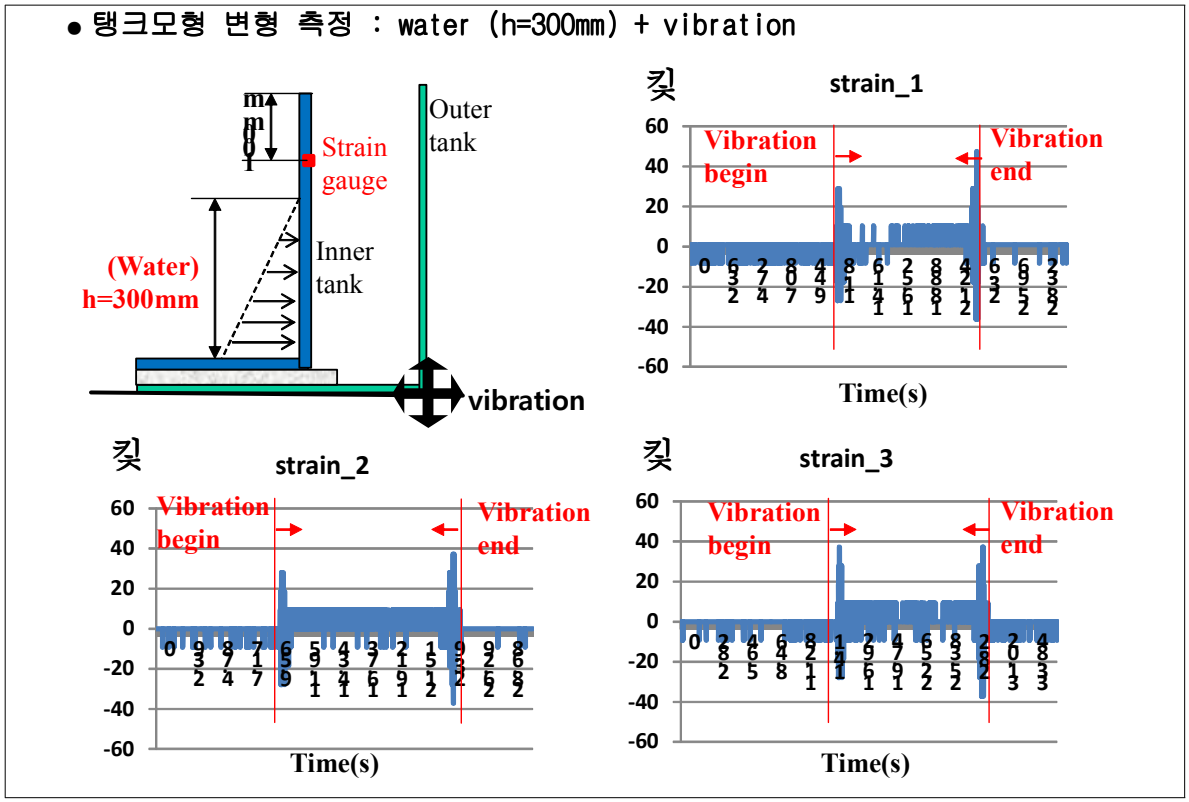



그림 2.8.6 Sub-scale 탱크 모형 실험 결과: water(h=300mm) + vibration

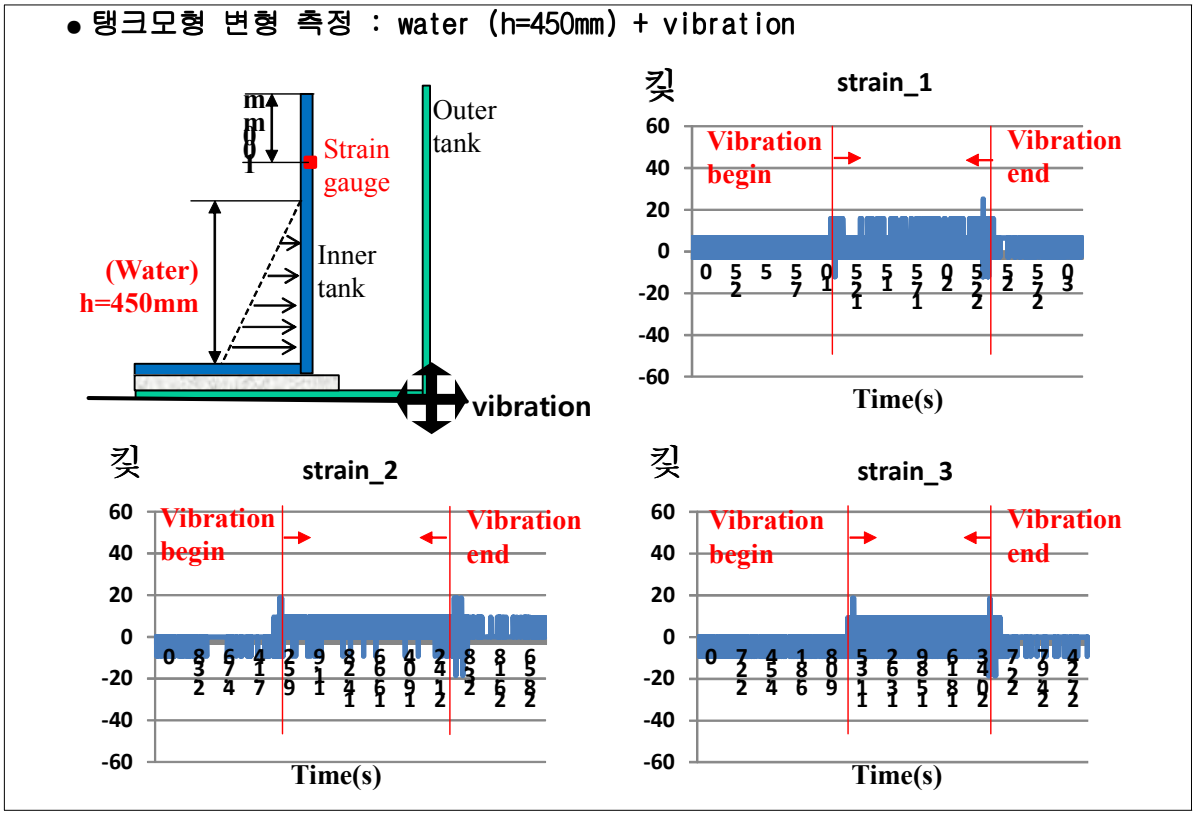



그림 2.8.7 Sub-scale 탱크 모형 실험 결과: water(h=450mm) + vibration

# 9절. 특수하중(온도/지진 등) 설계 개선 및 평가

1. 기존 기술 개선사항

시간이 지남에 따라서 기술이 개선되고 새로운 기술로 발전되는 일련의 흐름은 LNG 저장탱크에 적용된 기술도 예외일 수 없다. 국내에 1986년도에 LNG를 처음 도입한 이후 지금까지 26년 동안 LNG 저장탱크에 관련된 기술들도 기본 개념 안에서 계속 개선이 이루어져 왔다. 설계법의 변화, 다양한 하중 조건의 고려, 기존 연구에 대한 심층적인 연구 등이 이러한 개선을 뒷받침 하고 있다.

본 보고서는 초대용량 LNG 저장탱크 설계 기술 개발 과제 중 특수하중(온도/지진 등) 설계 개선 및 평가에 관한 내용으로 기존의 특수하중 설계를 개선할 수 있는 방법을 모색해보았으며, 그에 대한 구체적인 내용을 다루고자 한다.

가. 설계 코드의 변화

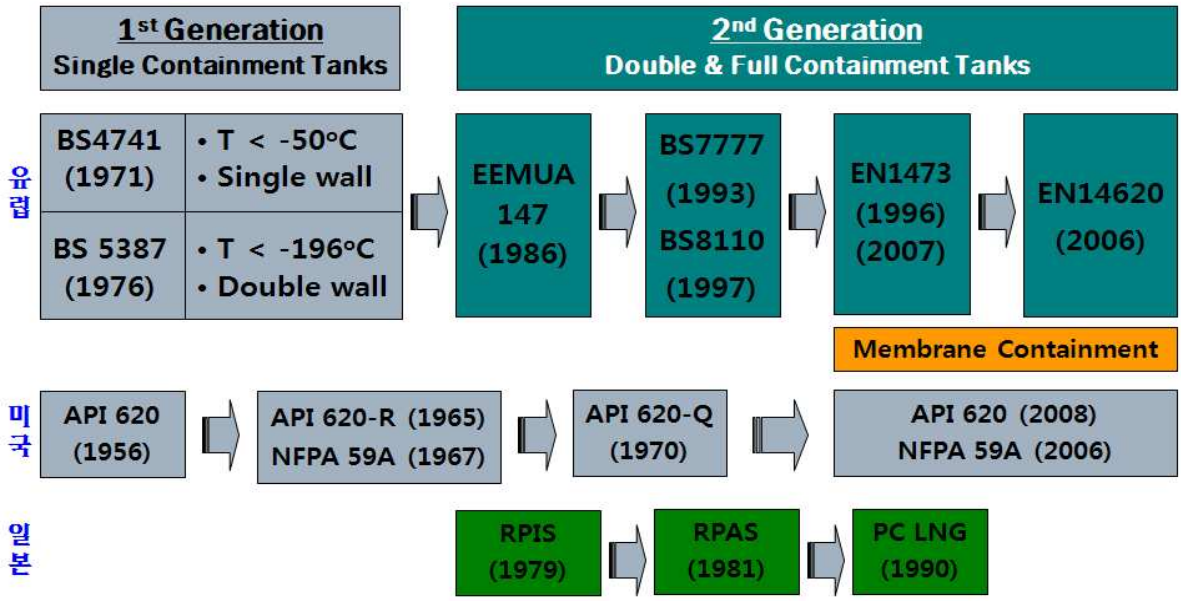



그림 2.9.1 설계기준 발전 과정

국내 LNG 저장탱크는 그 동안 일본의 RPIS, RPAS코드 또는 미국의 API코드를 적용하여 대부분 설계되었다. 하지만 자국 코드를 사용하는 일본과 미국을 제외하면 국제적인 인지도를 가지고 있는 LNG 저장탱크 설계사들이 보편적으로 사용하는 설계코드는 유럽의 BS 코드와 BS 코드를 기반으로 한 EN 코드이다. 최근에 국내 기술로 설계하여 시공 중인 탱크는 BS 코드를 도입하여 설계하고 있는 상황이다. 세계최대 용량인 27만 kl급 LNG 저장탱크는 LNG 저장탱크 설계기술을 선도하고자 하는 목적을 가지고 국내에서는 처음으로 가장 최신의 설계코드인 EN 코드를 도입하여 설계를 국산화하였다.

나. 온도 조건의 개선

LNG 저장탱크는 -170℃에 이르는 초저온의 LNG를 저장하기 때문에 저장탱크 내부와 외기의 온도차이가 극심하다. 특히나 LNG 유출이 일어난 상황에서는 이러한 온도차이로 인하여 콘크리트 구조물에 상당한 응력이 발생하게 된다. 외기 온도 기준에 따라 발생 응력이 변화하므로, 설계온도의 기준 정립이 필요하다. 지금까지는 최고 온도와 최저 온도를 설계에 적용하였지만, 본 과제에는 외기온도의 기준 정립 방법을 좀 더 개선하여 적용하였다.

다. 재료비선형성

일반 구조물 설계는 콘크리트 재료의 강도나 탄성계수 등의 물성치를 상온에서 확인된 값으로 일괄 적용하여 설계한다. 현재까지 국내의 LNG 저장탱크 설계기술도 일반 구조물 설계와 크게 다르지 않게 상온에서의 물성치를 적용하고 있다. 하지만 LNG 저장탱크는 초저온의 LNG를 다루며, 또한 콘크리트 외부 탱크는 LNG의 초저온에 영향을 받게 된다. 유출이 일어날 경우에는 콘크리트에 LNG가 직접 접촉할 가능성도 배재할 수 없다. 온도에 따라서 콘크리트는 비선형적인 특성을 가지고 있으며, 27만 kl급 LNG 저장탱크 설계 기술 개발에는 이러한 온도에 따른 콘크리트 재료의 비선형성을 고려하였다.

라. 지진해석의 개선

최근 몇 년간 규모 6.0이상의 강진이 세계적으로 연이어 발생하여 아이티, 칠레, 터키, 일본 등에 큰 피해를 가져왔다. 역사적으로 지진은 주로 판 경계에서 발생했지만 최근에는 미국 찰스턴·뉴마리드(1800년대), 중국 탕산(1976년), 쓰촨성(2008년)등 판내부에서도 지진이 발생하고 있어 우리나라도 지진에 대하여 안전지대가 아니다. 또한 발생했던 역사 지진을 근거로 보면 한반도 대지진은 역사적으로 200년을 주기로 발생해 왔으나, 최근 200년간 대규모의 지진이 아직 발생하지 않았다. 그러나 국내에서도 5~6년에 한번 꼴로 규모 5.0 정도의 지진이 발생하고 있다. 따라서 지금까지 지진해석에 적용한 지진규모의 상향이 필요하다고 판단하여 본 연구에서는 기존의 지진규모 6.5에 상응하는 첨두지반가속도(Peak Ground Acceleration) 0.2g를 지진규모 7.0에 상응하는 0.3g로 상향하여 연구에 반영하였다. PGA 0.3g는 설계지반운동을 결정하는 방법인 확률론적 방법에 따라 계산될 수 있으며,이는 EN 14620에서 제시한 재현주기 5,000년에 상응하는 값을 구한 것이다. 우리나라는 역사 지진에 대한 자료와 분석이 매우 부족하여 확률론적 방법을 적용하는데 한계가 있어 한수원의 자료를 근거로 하는 결정론적 방법에 따라 설계지반운동을 결정한다. 이에 따라 본 연구는 결정론적 방법에 따라 상향 규모 7.0에 해당하는 지반가속도 0.3g를 적용하여 연구를 진행하였다.

또한 기존 LNG 탱크는 미국원자력 학회에서 원자력 구조물에 적용할 목적으로 만든 NRC 스펙트럼으로 설계하여 지반 등급이 고려되지 않았던 단점이 존재하였다. 원자력 구조물은 암반에 그 기초를 두기 때문에 지반 등급을 고려하지 않아도 되는 것과 비교하여, LNG 탱크는 지반에 그 기초를 두기 때문에 지반의 등급을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 원자력 이외의 모든 구조물에 적용 가능하고, 지반등급을 고려 할 수 있는 UBC 스펙트럼을 적용하였다. 결과적으로 본 연구에서 진행된 모든 지진해석은 위에서 언급한 지진규모 상향 및 스펙트럼 변경을 적용하여 진행됨을 다시 한 번 강조하고자 한다.

기존 LNG 저장탱크의 지진해석과정은 2D모델로부터 지진 단면력을 산출하고, 이를 3D모

델의 등가하중으로 재하하여 저장탱크에 발생하는 최종 지진 단면력을 산출하는 과정에 따라 이루어진다. 이때 2D모델 해석은 각 절점에 질량을 집중시키고 각 부재를 하나의 뼈대로 이상화시켜 해석을 진행하는 Beam stick 해석을 실시한다. 본보고서는 이러한 과정에서, LNG 저장탱크를 지지하고 있는 기초부의 파일 강성을 산출하는 방법과 발생하는 전도모멘트를 부담하는 부가보(Additional Beam)의 적용 여부에 따라 기존방법보다 합리적인 결과를 도출할 수 있다고 판단하여 기존 지진해석 방식을 개선하였다. 이는 파일이 모두 탱크 중심에 위치하고 있다고 이상화하여 계산하던 파일의 강성 계산 방법을 개선하여 탱크 중심에서부터 실제 분포되어 있는 위치까지의 거리를 고려하여 전체 파일의 실제 강성을 계산하였고, 전도모멘트를 부담하기 위해 적용했던 원환부 파일의 강성을 따로 고려하지 않도록 지진해석을 개선하였다. 또한 국내의 경우 3D모델에 하중으로 재하되는 2D 지진 단면력을 앞서 기술한  Beam stick 해석을 통해 구하는 반면, 해외의 경우는 코드에 제시된 식을 이용하여 지진 단면력을 산출하고 있다. 국내 방식은 일반적으로 flexible한 거동을 보이는 내조 벽체가 실제로 반영되지 못하며, 수평해석과 수직해석 그리고 지붕모드해석을 반영해야하므로 그 절차와 과정이 복잡해 작업소요 시간이 길어지는 단점이 있다. 반면 해외의 코드 적용 방법에 의하면 유체를 포함하고 있는 내조의 밑면 전단력과 전도모멘트의 계산이 식을 통해 이루어지고, 외조의 경우 단순히 내부가 빈 상태의 외조 탱크를 3차원 구조해석하기 때문에 작업소요 시간이 단축되는 장점이 있다. 따라서 본 보고서에서는 해외의 지진해석 경향에 맞추어 별도의 구조해석 없이 EN 1998-4에 제안되어 있는 지진해석방법으로부터 지진 단면력을 산출하였다. 또한 지반과 구조물 사이의 상호작용을 고려하여 지진해석을 실시하는 해외의 흐름에 따라 본 연구과제에서도 Soil-Structure-Interaction 해석 즉, SSI 해석을 실시하여 지진해석 부분을 개선하였다. 앞에서 언급한 개선된 지진해석에 대한 자세한 소개와 개선 결과에 대해서는 본보고서 3장에서 자세히 기술하도록 한다.

2. 온도하중 설계기법 개선

LNG 저장탱크는 -170℃의 초저온 LNG를 저장하는 구조물이므로, 온도는 LNG 저장탱크의 단면을 결정할 정도로 중요한 변수 중 하나이다. 본 온도하중 설계기법 개선에서는 초대용량 LNG 저장탱크의 온도해석을 통한 설계 개선점과 그에 따른 안전성에 대하여 설명하고자한다.

가. 온도해석 개요

LNG 저장탱크 -170℃에 이르는 초저온상태의 LNG를 저장하는 구조물이다. 비록 평상시에는 초저온에 견딜 수 있는 9% 니켈을 함유한 철재 내부탱크에 저장되어 있어 콘크리트 외부탱크에 영향이 거의 없다. 하지만 LNG가 내부탱크에서 유출이 된다면 외부탱크에 직접적인 영향을 준다. LNG 유출상태에서 탱크와 외기의 온도 차이는 심할 경우 200℃를 넘게 되는데, 구조물은 이 극심한 온도 차이에 의해서 변형을 일으켜 압축력과, 인장력을 받게 된다. 또한 초저온에서는 콘크리트 재료의 물성치가 변화하기 때문에 해석에서 이를 반영하는 것이 필요하다.

LNG와 외기온도차이로 인한 영향을 구조해석에 반영하기 위해서 열전달해석과 열응력해석

을 수행한다. 열전달해석에서는 저장탱크 내부와 외부의 온도차이로 인한 외부탱크의 온도경사와 온도장을 구하게 되며, 열응력해석에서는 이 열전달해석의 온도장으로 인하여 발생하는 응력, 변형률, 변위 등을 확인한다. 그리고 이러한 발생 부재력을 구조물이 견딜 수 있는지 검토한다.

나. 온도해석 모델

(1) 모델링

LNG 유출로 인한 콘크리트 벽체내의 온도경사가 구조물에 미치는 영향이 지대하기 때문에 벽체의 두께를 모델링 할 수 있도록 구조해석 요소와 열해석 요소를 사용하여 3차원 Solid 모델을 구성하였다.

LNG 탱크는 중심축을 기준으로 하나의 단면을 회전한 형태의 원통형 구조이다. 재하되는 하중 또한 축 대칭이므로 연속면에 경계조건을 부여한 부분 모델을 통해 검토한다.

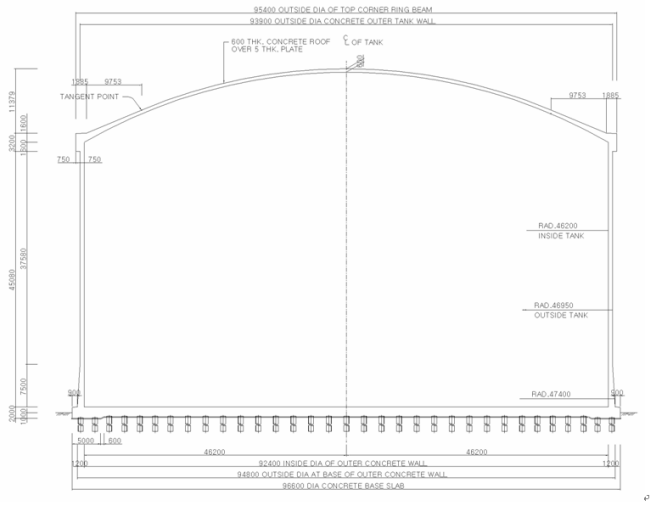



그림 2.9.2 실제 구조물 단면

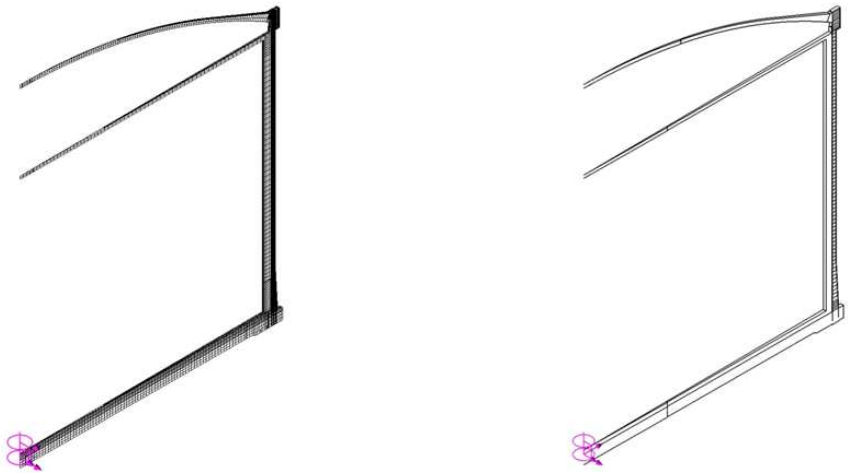


그림 2.9.3 모델링 형상

해석 순서는 다음의 3단계로 정의할 수 있다.

- Initial Condition : 초기 상태로써 전체 구조물에 외기온도 12.5℃를 적용, 이때 발생하는 응력이 0인 Stress Free상태이다.
- Operation Condition : 정상상태에 대한 정의로 LNG가 내부 탱크에 담겨있는 상태에서 외부탱크 콘크리트 벽체에 미치는 영향을 검토한다.
- Spillage Condition : LNG 유출상태에 대한 정의로 총 4단계의(5.7m, 13.9m, 20.8m, 41.692m) LNG 유출 수위에 대하여 검토한다.

(2) 해석 조건

(가) 온도경계 조건

열해석의 경계조건으로 외기 또는 LNG와 직접 닿는 면에 해당 온도를 지정한다. 외기 온도는 12.5℃, LNG 온도는 -170℃ 그리고 탱크 내·외부에 대류계수를 적용하였다.

표 2.9.1 열해석의 경계조건

| 해석 단계 | 구 분 | 하중종류 | 입력 값 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 온도 | 대류계수 |
| Initial Condition | Initial Temperature | Prescribed Temperature | 12.5℃ | - |
| Operation Condition | LNG Temperature | Environmental Temperature | -170℃ | 60W/m$^2$℃ |
| | External Temperature | Environmental Temperature | 12.5℃ | 10W/m$^2$℃ |
| | Base heating | Prescribed Temperature | 7.5℃ | - |
| Spillage Condition | Spillage Temperature | Environmental Temperature | -170℃ | 60W/m$^2$℃ |

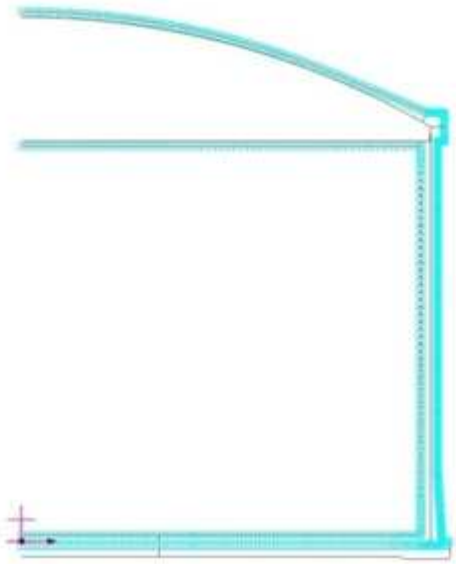


그림 2.9.4 열해석 경계조건 모델링

(나) 콘크리트와 철근의 재료 물성치

콘크리트는 C30과 C40의 두 가지 강도의 콘크리트가 사용하였다. 지붕과 바닥판 원환부는 C30을 사용하였고, 나머지 부분에는 강도가 높은 C40을 사용하였다. PUF를 적용하지 않기 때문에 보강철근으로는 일반철근이 아닌 초저온에 견딜 수 있도록 초저온 철근을 사용하였다. 해석에 사용된 콘크리트와 철근의 재료 물성치는 다음과 같다.

표 2.9.2 콘크리트의 재료 물성치

| Properties | C30 | C40 |
|---|---|---|
| Young's Modulus($kN/mm^2$) | 27.60 | 31.75 |
| Poisson's Ratio | 0.2 | 0.2 |
| Density ($kg/m^3$) | 2500 | 2500 |
| Coefficient of Thermal Expansion ($a_c$) | $10x10^{-6}$ | $10x10^{-6}$ |
| Uniaxial Compressive Strength($N/m^2$) | 30,000,000 | 40,000,000 |
| Uniaxial Tensile Strength($N/m^2$) | 3,000,000 | 4,000,000 |
| Applied Position | Base, Roof | Wall |

표 2.9.3 초저온 철근의 재료 물성치

| Properties | Value | Unit |
|---|---|---|
| Yield stress | 500 | $N/mm^2$ |
| Elasticity modulus | 200 | $kN/mm^2$ |
| Passion Ratio | 0.3 | |
| Thermal coefficient of expansion($a_c$) | 0.00001 | /° C |
| Mass Density | 7800 | $kg/m^3$ |

(다) 온도에 따른 재료특성

초대용량 LNG 저장탱크는 PUF를 적용하지 않는 경우를 고려하게 된다. 특히 LNG 유출이 발생할 경우 초저온의 LNG가 콘크리트 벽체에 직접 닿게 되는데, 초저온 상태에서 콘크리트는 재료 특성이 변화하게 된다. 이러한 재료 특성을 해석에 반영하여 설계하였다.

① 압축강도

극저온 상태의 콘크리트는 압축강도가 커지게 되는데, -120 oC 이하의 경우 초기 압축강도의 약 2배가 되는 것으로 알려져 있으며, 다음의 식에 따라 값을 계산하여 적용하였다. 단, 콘크리트 함수율 W=5%로 가정한다.

$$\sigma_{CL} = \triangle\sigma_C + \sigma_{C0} \qquad (1)$$

여기서, $\sigma_{CL}$ : 극저온에서의 압축강도 (MPa)

$\triangle\sigma_C$ : 온도저하에 따른 압축강도 증가량 (MPa)

$\sigma_{C0}$ : 상온에서의 압축강도 (MPa)

다음 그래프는 콘크리트 함수량별 온도변화에 따른 콘크리트 압축강도의 변화를 나타낸 것이다.

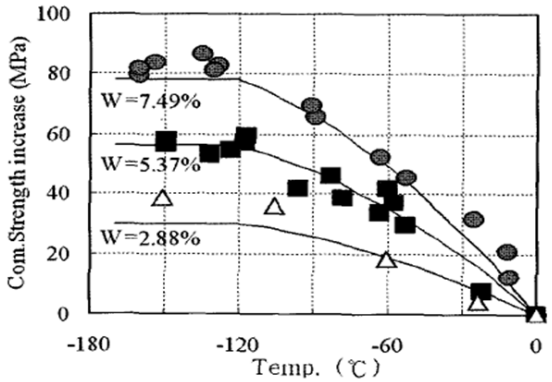



그림 2.9.5 함수량과 온도변화에 따른 콘크리트 압축강도

위의 그래프를 통해 콘크리트 함수량이 압축강도에 미치는 영향은 지배적임을 알 수 있다. 따라서 온도저하에 따른 압축강도 증가량은 다음과 같이 구할 수 있다.

**T> -120℃의 경우**

$$\triangle\sigma_C = 9.8\times10^{-2}\left\{120-\frac{1}{270}(T+180)^2\right\}\cdot W \qquad (2)$$

**T<-120℃의 경우**

$$\triangle\sigma_C = 9.8\times10^{-2}\times107\cdot W \qquad (3)$$

여기서, $\triangle\sigma_C$ : 압축강도 증가량 (MPa)

T : 콘크리트 온도 (℃)

W : 함수율 (%)

② 인장강도

극저온 하에서 콘크리트 인장강도도 압축강도와 동일하게 온도가 낮고 함수량이 높을수록 증가한다는 것이 알려져 있다. 그러나 압축강도는 -120℃까지 강도가 서서히 증가하는데 반

해 인장강도는 약 -60℃까지 급격히 증가하지만 그 이하에서는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

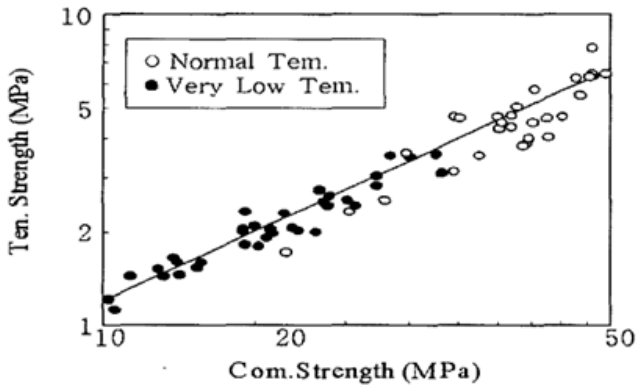



그림 2.9.6 온도에 따른 압축강도와 인장강도의 관계

위의 그림은 압축강도와 인장강도의 관계를 나타내며 해석에 사용된 콘크리트의 인장강도는 다음의 식을 통해 계산하였다.

$$\sigma_T = 0.627\,W \qquad (4)$$

$$\sigma_T = 0.213\,\sigma_C^{3/4} \qquad (5)$$

여기서, $\triangle\sigma_T$ : 인장강도 증가량 (MPa)

$\sigma_T$ : 저온에서의 인장강도 (MPa)

W : 함수율(%)

③ 탄성계수

초저온에서의 콘크리트 탄성계수는 압축강도와 마찬가지로 온도가 저하될수록 커지는 경향이지만 그 증가율은 압축강도에 비하여 작은 것으로 나타났다. 다음의 온도에 따른 탄성계수 변화 그래프를 통해 약 -100℃까지는 선형으로 증가하지만 -100℃ 이하에서는 증가율이 매우 작은 것을 확인하였다.

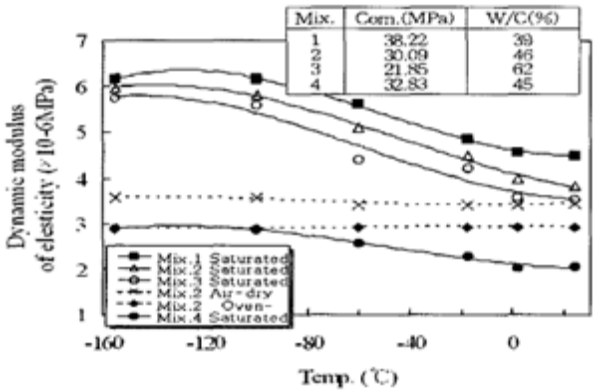



그림 2.9.7 온도에 따른 탄성계수 변화

④ 콘크리트 및 단열재의 열전달 계수

단열재와 콘크리트의 열전달 계수 역시 온도에 따라서 변하는 값을 갖기 때문에 이를 해석에 적용하였다. 해석에 사용된 콘크리트 및 단열재의 열전달 계수는 다음과 같다.

표4 콘크리트 및 단열재의 온도에 따른 열전달계수

| Material | Temperature (℃)<br>Thermal Conductivity (k, W/m℃) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Concrete (Base,Wall,Ringbeamand Roof) | 50 | 20 | 0 | -20 | -50 | -100 | -150 |
| | 1.94 | 2 | 2 | 2.05 | 2.09 | 2.15 | 2.21 |
| Dry Sand | 50 | 20 | 0 | -20 | -50 | -100 | -150 |
| | 0.79 | | | | | | |
| Cellular Glass Type I | 40 | 20 | 0 | -20 | -50 | -100 | -170 |
| | 0.0479 | 0.0446 | 0.0414 | 0.0385 | 0.0346 | 0.0296 | 0.0244 |
| Perlite Concrete | 50 | 20 | 0 | -20 | -50 | -100 | -170 |
| | 0.27 | | | | | | |
| Loose Fill Expanded Perlite | -10 | -60 | -100 | -140 | | | |
| | 0.0411 | 0.0384 | 0.0382 | 0.0342 | | | |
| Glass Fiber Blanket | -10 | -60 | -100 | -140 | | | |
| | 0.0372 | 0.0333 | 0.032 | 0.032 | | | |
| Resilient Glass Fiber Blanket | -10 | -60 | -100 | -140 | | | |
| | 0.0372 | 0.0333 | 0.032 | 0.032 | | | |
| 9% Ni Steel | 100 | 0 | -50 | -100 | -150 | -200 | |
| | 32 | 28 | 28 | 28 | 19 | 12.5 | |

(라) 구조 경계 조건

연직방향의 구속으로는 파일 배치도에 따라 바닥판 하부에 파일의 연직 및 수평방향 지지력을 스프링상수로 하는 스프링 지점을 구성하였다. 부분 모델이므로 전체 단면을 대표할 수 있도록 단위 길이당 스프링 상수로 환산하여 적용하였다.

수평방향의 구속으로는 연속되는 면의 직각방향으로 경계조건을 정의하기 위하여 회전중심축을 기준으로 하는 Cylindrical Local Coordinate를 경계면에 적용하였다.

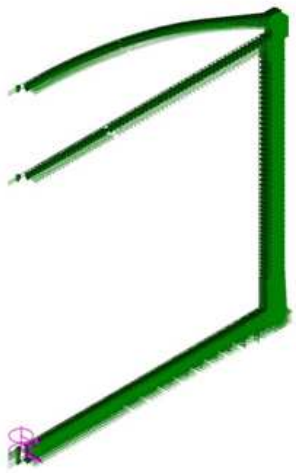


그림 2.9.8 구조 경계 조건 모델링

(마) 하중 조건

각 해석에 따라서 적용하는 하중이 차이가 있다. 아래의 표는 Initial, Operation, Spillage해석에서 고려한 하중을 나타낸다.

표 2.9.5 해석별 적용 하중

| 구 분 | 해석단계 | | |
|---|---|---|---|
| | Initial | Operation | Spillage |
| Structural Support | ✔ | ✔ | ✔ |
| Self Weight | | ✔ | ✔ |
| Prestressing | | ✔ | ✔ |
| Wall liner | | ✔ | ✔ |
| Bottom liner | | ✔ | ✔ |
| Roof liner | | ✔ | ✔ |
| Steel Structures | | ✔ | ✔ |
| Pressure from insulation | | ✔ | ✔ |
| LNG Filling | | ✔ | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Design Gas Pressure | | ✔ | ✔ |
| Live load | | ✔ | ✔ |
| Snow load | | ✔ | ✔ |
| Hydrostatic loading<br>(Spillage 높이별) | | | ✔ |

(3) 정상상태 온도해석

(가) 기존 LNG 저장탱크 해석

기존의 LNG 저장탱크는 콘크리트 벽체 표면에 PUF(Poly Urethane Form)를 수cm두께로 도포하며, 이를 반영하여 해석을 수행한다. PUF는 단열성능이 대단히 우수하여, 다른 단열재와 함께 벽체에 대한 초저온 LNG의 영향을 최소화한다.

아래의 그림들은 PUF가 적용되어있는 탱크의 겨울철 열전달 해석 결과와 벽체단면의 온도분포를 나타낸다.

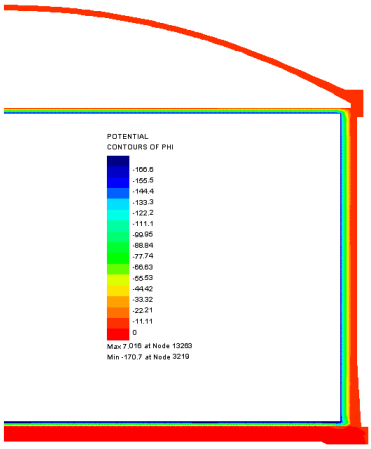



그림 2.9.9 기존 LNG 저장탱크의 열전달해석 결과 (겨울, PUF 적용)

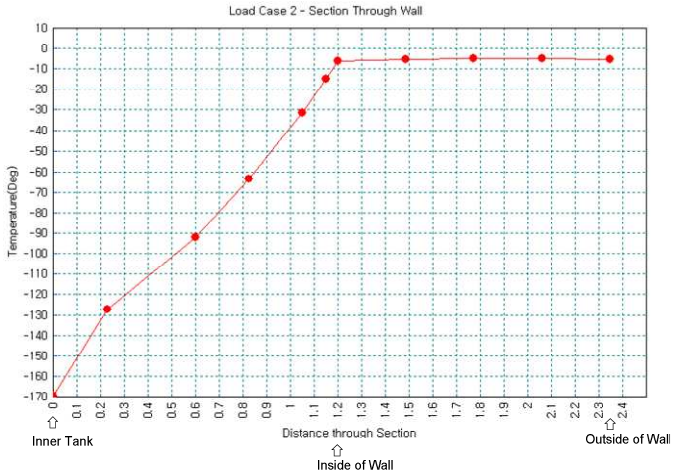



그림 2.9.10 벽체단면의 온도분포 (겨울, PUF 적용)

그림을 보면 콘크리트 벽체의 온도가 초저온으로 내려가지 않는 것을 확인할 수 있다.

(나) 초대용량 LNG 저장탱크 해석

초대용량 LNG 저장탱크는 국내 뿐만 아니라 해외에서의 건설을 염두에 두고 설계하고 있다. 해외에서는 벽체에 PUF를 적용하지 않기 때문에 해석에서도 이를 반영하여 PUF를 적용하지 않은 상태를 고려하였다.

Initial Condition 해석에서는 전체 구조에 12.5℃의 온도하중을 적용하여 초기상태를 정의하였으며, 이때 구조물의 응력이 0 이 되는 Stress Free 상태가 되도록 하였다. 또한 탱크의 바닥판 내부에 위치한 heating system의 영향을 고려하기 위해 heating line에 7.5℃의 고정 온도하중을 재하하였다.

Operation Condition 해석에서는 -170℃의 LNG 온도, 12.5℃의 외기온도, 7.5℃의 바닥판 온도를 정의하였으며, 이는 해석 결과를 통해 사용상태에서 평형상태에 있는 온도 분포를 구조 해석으로 전달하게 된다.

(4) 유출상태 온도해석

평상시 LNG 탱크의 내부는 단열재로 구성이 되어있어 -170℃ 의 LNG가 직접 콘크리트에 닿지 않지만 내부 탱크의 균열 등으로 인하여 LNG가 유출되면 외부 콘크리트 탱크에 영향을 미치게 되며, 탱크 외부와 내부의 급격한 온도차로 인하여 콘크리트에 균열 발생이 예상된다. 이때의 발생한 균열의 폭과 응력을 통해 구조물의 안정성을 검토한다.

Spillage에 의한 콘크리트 탱크의 온도 및 구조 영향을 확인하기 위해 Semi-Coupled Thermo-Mechanical 해석을 수행하였다. Coupled 해석은 열해석과 구조해석이 순차적으로 수행되며 열해석 결과로부터의 온도분포가 구조해석모델에 적용되어 해당 온도로 인해 발생하는 응력, 변형률, 변위 등의 결과를 확인할 수 있다.

(가) 기존 LNG 저장탱크 해석

기존 LNG 저장탱크에는 콘크리트 벽체 표면에 단열성능이 우수한 PUF(Poly Urethane Form)가 적용되어 있다. 이로 인하여 LNG가 유출된 경우에도 콘크리트 벽체에 LNG가 직접적으로 닿지 않으며, 벽체가 초저온 상태에 놓이는 것을 방지한다.

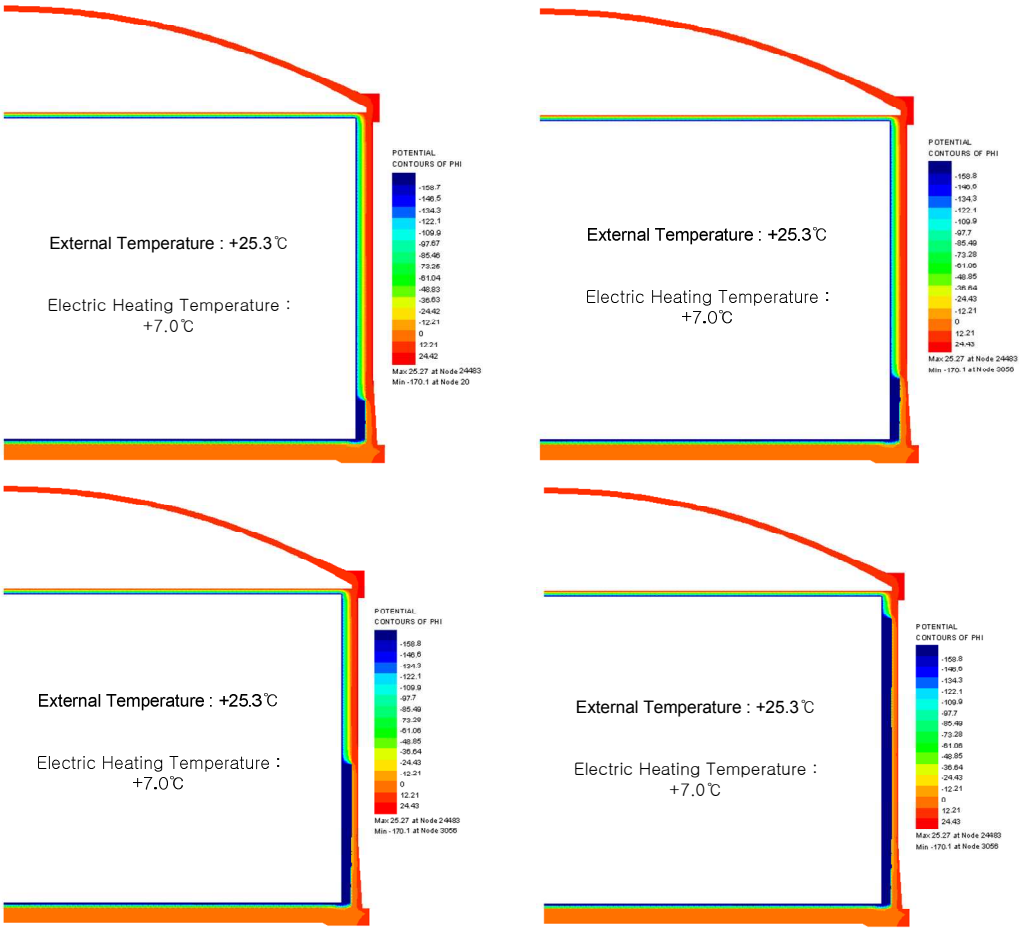



그림 2.9.11 LNG 저장탱크의 유출 수위별 온도 분포도 (PUF 적용)

(나) 초대용량 LNG 저장탱크 해석

정상상태 해석과 마찬가지로 Initial Condition으로 구조물을 Stress Free 상태로 만든다. 그 이후 LNG 유출상태에 대한 정의로 모든 사용상태의 구조하중을 적용하고, 총 4단계의(5.7m, 13.9m, 20.8m, 41.692m) Spillage 높이에 대하여 검토하게 된다.

다. 온도해석 결과

(1) 온도해석

(가) 초대용량 LNG 저장탱크의 온도분포

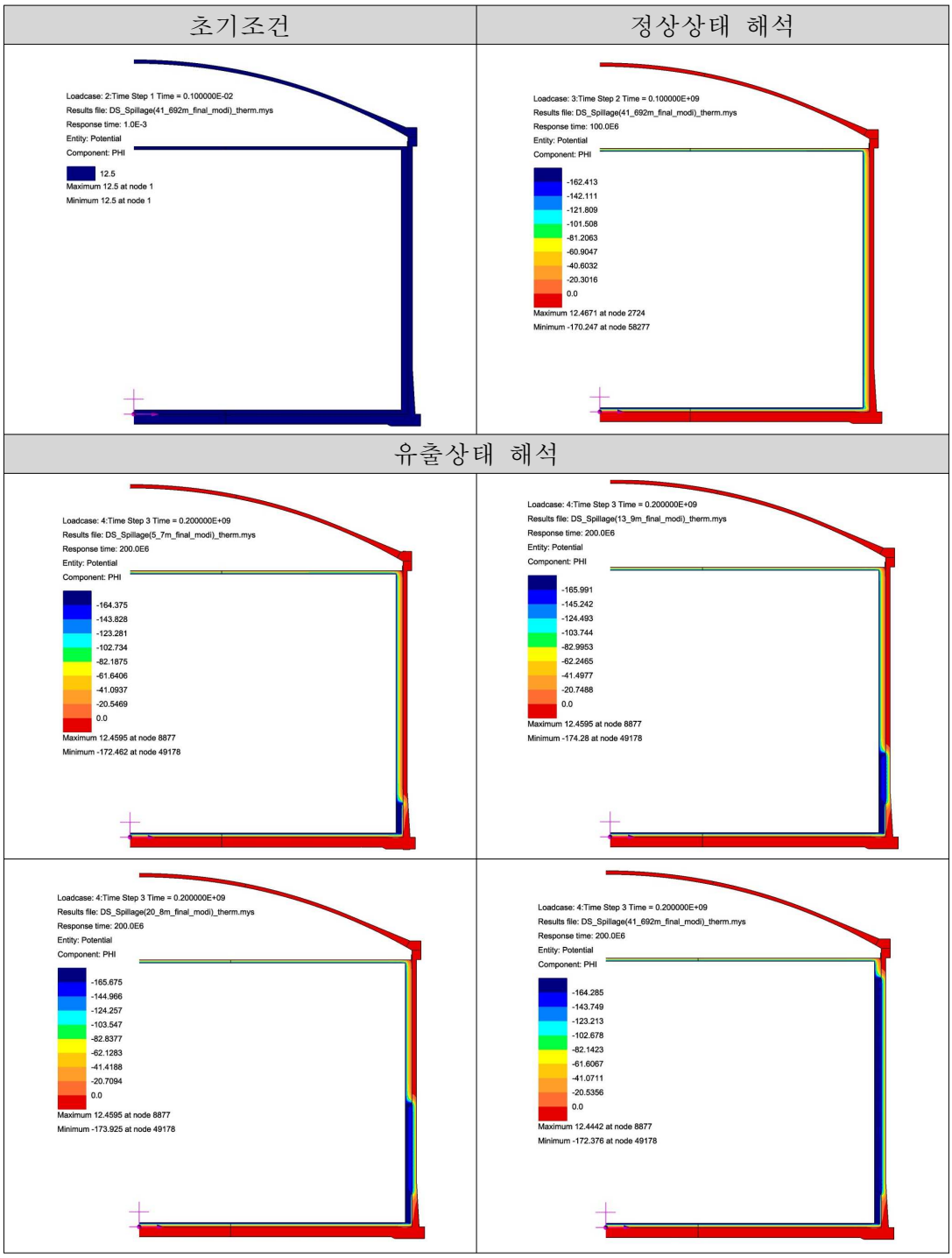



그림 2.9.12 각 해석별 온도분포

(2) 구조 해석

(가) 벽체 단면의 압축영역

LNG의 유출이 발생하여도 콘크리트 벽체 단면에 적절한 압축영역이 존재한다면 LNG가 외부로 유출되는 상황은 피할 수 있을 것이다. 콘크리트 벽체단면의 응력 분포를 확인하여 각 Spillage 단계별 압축 구간을 검토 하였다. 아래의 그림들은 벽체단면에서 발생하는 압축 응력과 인장응력을 나타낸다. 파란색은 압축, 빨간색은 인장이다.

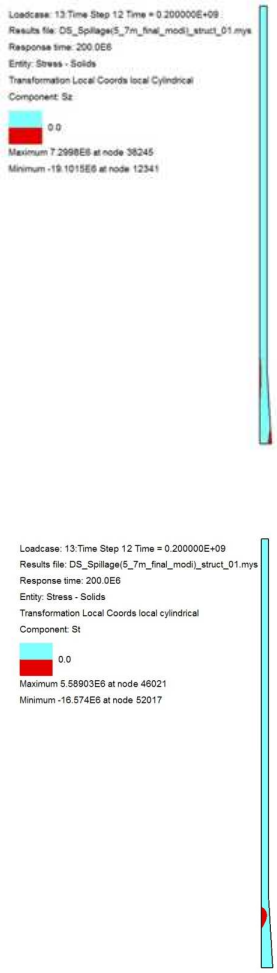



그림 2.9.13 압축응력, 인장응력 분포도 - Spillage 1 (위 : 수직방향, 아래 : 수평방향)

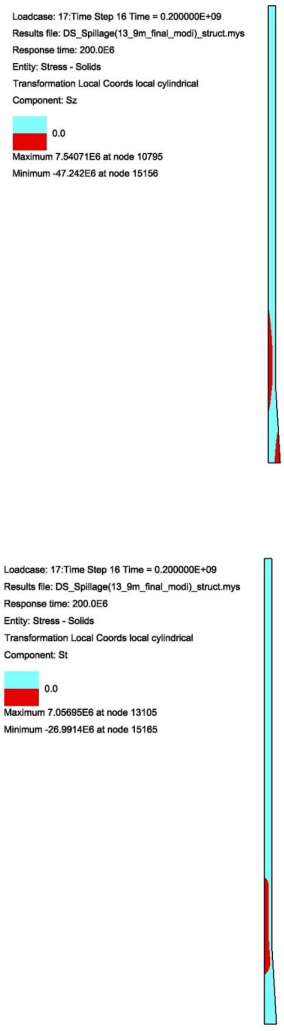



그림 2.9.14 압축응력, 인장응력 분포도 - Spillage 2 (위 : 수직방향, 아래 : 수평방향)

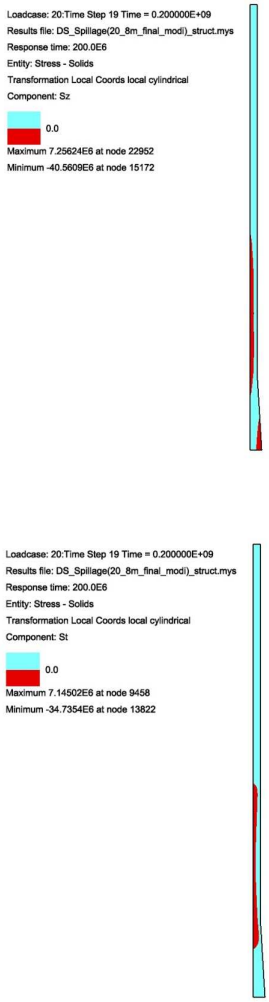



그림 2.9.15 압축응력, 인장응력 분포도 - Spillage 3 (위 : 수직방향, 아래 : 수평방향)

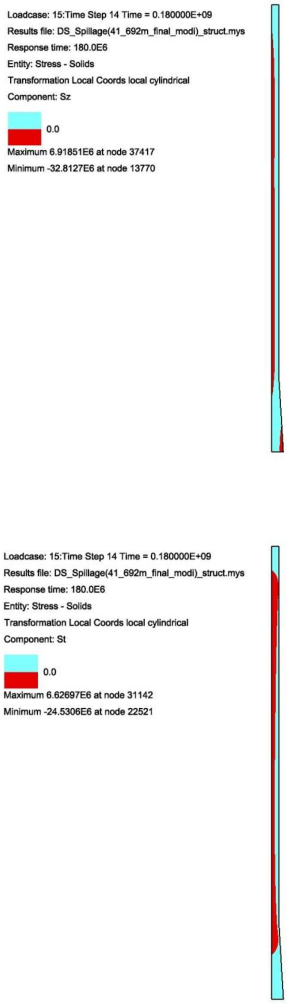



그림 2.9.16 압축응력, 인장응력 분포도 - Spillage 3 (위 : 수직방향, 아래 : 수평방향)

(나) 콘크리트의 균열

표시된 균열의 크기는 실제 균열 폭이나 깊이를 의미하는 정략적 개념은 아니지만 벽체 안쪽에서 발생한 균열의 위치와 상대적인 크기와 깊이는 시각적으로 확인할 수 있다. 벽체 내측에서 균열은 수직방향으로 발생하고 있으며, 균열의 폭은 벽체의 기본 제원 및 철근 배근 상태, 그리고 해석 결과로부터 얻은 응력과 변형률 등을 조합하여 EN1992 기준에 따라 아래와 같이 계산되었다. 균열의 방향이 수직방향이므로, 균열폭 산정은 Hoop 방향의 철근을 대상으로 하며, 응력과 변형률 모두 Hoop 방향에 대한 값을 적용하였다. 모든 Spillage 높이에서 발생하는 균열은 허용균열폭인 0.3mm 이내로 확인되었다.

표 2.9.6 벽체단면의 균열폭 검토

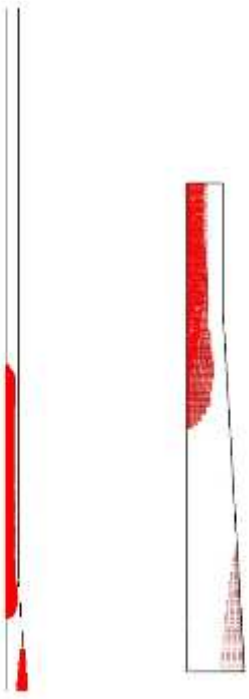
| Variables | Spill 1 | Spill 2 | Spill 3 | Spill 4 |
|---|---|---|---|---|
| 균열폭 (m) | 0.00008 | 0.00022 | 0.00023 | 0.00006 |
| 균열 허용 기준 (m) | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0003 |
| 검토 결과 | OK | OK | OK | OK |



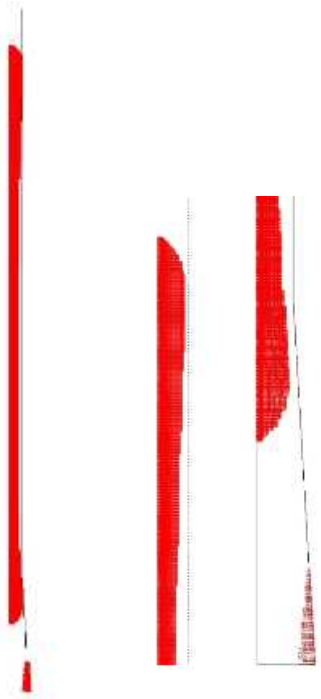
**Spillage 1 (5.7m)**



**Spillage 2 (13.9m)**



**Spillage 3 (20.8m)**



**Spillage 4 (41.692m)**

그림 2.9.17 유출 높이별 균열 양상

(다) 철근의 응력

철근의 온도분포는, 벽체의 내측 철근은 대략 -148°C, 외측 철근은 -40~12°C의 온도분포를 보인다. 초저온 철근의 항복응력은 500MPa이며, 벽체의 내측 철근에서 발생하는 최대 인장응력은 약 367.15MPa, 벽체의 외측 철근에서 발생하는 최대 인장응력은 약 279.94MPa 이므로 철근에 발생하는 최대 응력은 허용 응력 내 값으로 확인되었다. 아래의 그림은 각각의 해석단계에서 철근의 응력을 나타낸다.

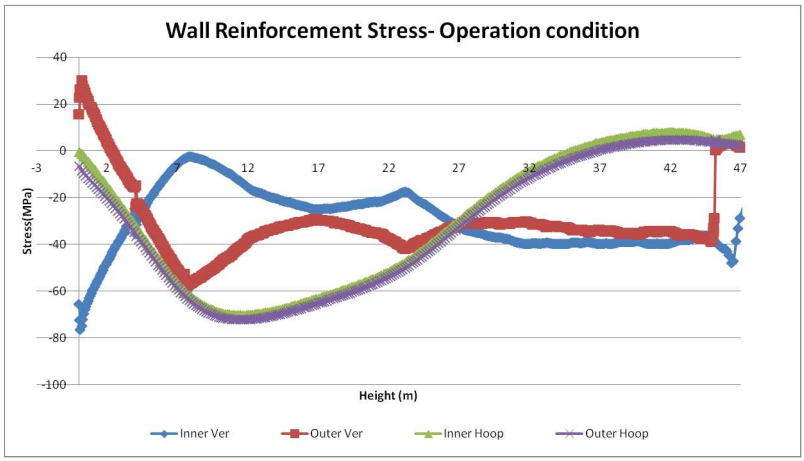



그림 2.9.18 철근의축방향응력- 상시해석

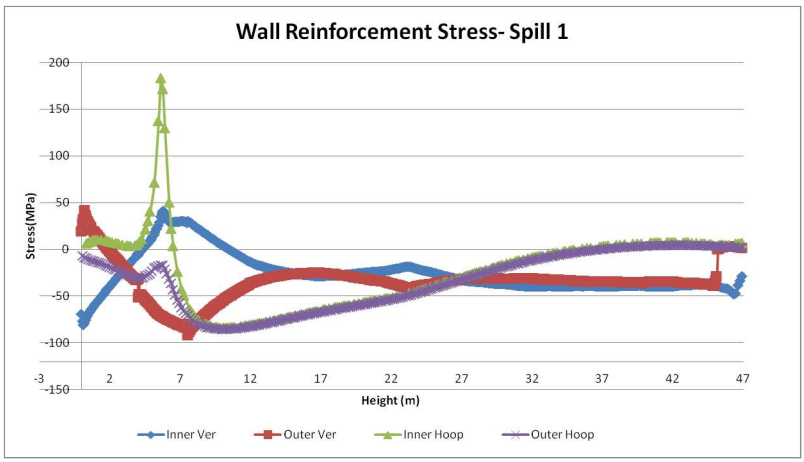



그림 2.9.19 철근의축방향응력- 유출해석 spillage 1

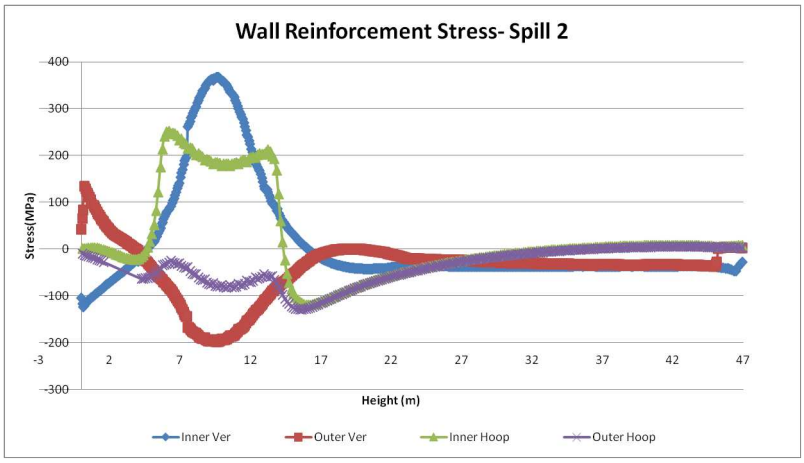



그림 2.9.20 철근의축방향응력- 유출해석 spillage 2

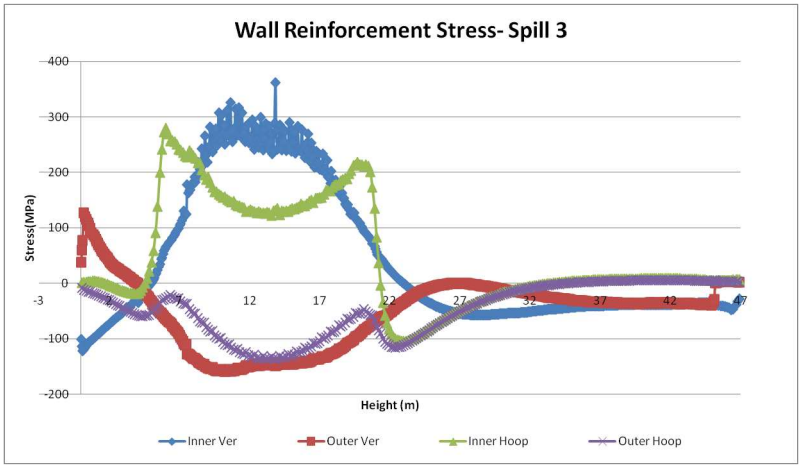



그림 2.9.21 철근의축방향응력- 유출해석 spillage 3

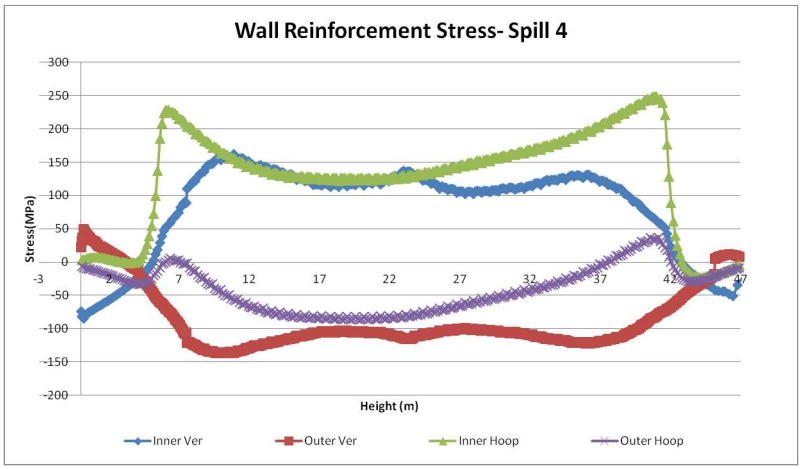



그림 2.9.22 철근의축방향응력- 유출해석 spillage 4

라. 결론

Spillage 상태에서 LNG 저장탱크의 온도분포와 LNG 유출로 발생하는 콘크리트 벽체의 비

선형 거동을 확인하기 위하여 3D solid 모델을 구성, 비선형 시간이력 해석을 수행하였다.

• 콘크리트 압축 응력

콘크리트에 발생하는 압축응력은 50MPa을 넘지 않으며, 압축영역의 깊이가 모든 Spillage 상태에 대하여 80mm를 넘는 것으로 확인되었다.

• 균열폭

콘크리트 벽체에 발생하는 균열은 허용균열 폭인 0.3mm 이내의 값이다.

• 철근응력

벽체의 내측 철근에서 발생하는 최대 인장 응력은 약 367.15MPa, 벽체의 외측 철근에서 발생하는 최대 인장응력은 약 279.94MPa 이므로 철근에 발생하는 최대 응력은 허용 응력 이내 값이다.

3. 지진해석

지진해석은 표2.9.12와 같이 지진규모 7.0에 상응하는 PGA값 0.3g로 지진수준을 상향하여 적용하였고, UBC 스펙트럼을 적용하여 연구를 수행하였다. 본 장에서는 기존 지진해석에 대한 설명과 기존 뻐대해석의 개선, 그리고 해외 지진해석의 흐름에 따른 개선으로써 EN코드의 적용과 SSI 해석에 대하여 기술하고, 그 결과를 비교 및 분석하고자 한다. 이상의 2차원 해석 결과 분석을 통하여 본 연구의 결론을 도출하고자 한다.

가. 기존 뻐대해석 기법

기존 지진해석 방법은 2D모델로부터 지진 단면력을 산출하고, 이를 3D모델의 등가하중으로 재하하여 지진 단면력을 구한다. 본 절에서는 기존에 사용해왔던 지진해석 기법에 대한 설명과 기존 방법에 따른 해석 결과를 기술한다. 기존 2D 뻐대해석은 수평해석과 수직해석, 그리고 지붕모드해석을 포함하여 진행된다. 이처럼 기존 해석은 수평방향, 수직방향, 그리고 3차원 지붕을 각각 모델링하여 해석에 적용해야하므로 해석절차가 다소 복잡하고 그에 따라 시간이 많이 소요된다.

(1) 2D Beam-stick 해석

2D모델은 외조와 내조 및 유체 등의 질량을 하나의 절점에 집중시키고 각 절점들을 뻐대, 즉 beam으로 이어 연결하는 beam-stick모델을 사용한다. 또한 LNG 저장탱크 하부에 위치하고 있는 파일은 바닥 절점을 하나의 수직 beam으로 연결하여 모델링하며, 수평방향으로 스프링을 연결하여 지반 damping을 묘사하였다. 2D 뻐대해석은 구조해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 사용하였으며, 수평해석과 수직해석을 각각 나누어 진행한다. 이때 수직해석에서 지붕모드해석 결과가 적용되므로 LUSAS를 이용하여 지붕모드해석을 하였다.

(가) 수평해석

내조와 외조의 nodal masses를 구하기 위하여 식 (6)으로부터 전단 단면적을 구하며, 유체의 경우 거동특성에 따라 크게 충격성분과 대류성분으로 구분하여 질량과 작용위치를 구한다. 충격성분은 저장탱크 내부의 유체가 질량체로서 구조물과 같이 운동할 때 발생하게 되며, 대류성분은 유체 자유수면이 진동으로 인해 출렁이는 현상 즉, 슬러싱 현상에 의해 발생하게 된다.

$A_{shear}$은 식 (6)으로부터 구하며, $k_{shear}$ 및 $k_{membrane}$은 각각 식 (7)과 식 (8)에 의해 구한다.

$$A_{shear} = A \times (1+\nu)/[6 \times (k_{shear} + k_{membrane})] \quad (6)$$

$$k_{shear} = (1+\nu)/3 \quad (7)$$

$$k_{membrane} = (1/24) + \alpha^2/8 \quad (8)$$

여기서, $A_{shear}$은 전단 단면적, A는 각 부재의 면적, $\nu$는 poisson's ratio, $k_{shear}$는 전단계수, $k_{membrane}$은 membrane 계수, $\alpha$는 외조 벽체 중심까지의 반경과 외조 벽체의 높이의 비를 의미한다.

단면적과 전단 단면적 및 관성모멘트를 각각 계산하여 이 값들을 구조해석에 적용하고, 전단 단면적과 요소 질량을 이용하여 내조 및 외조의 nodal masses를 구한다. 또한, 유체의 nodal masses를 계산하여 이를 구조해석 모델의 절점에 집중질량으로 대입한다. 내조와 외조를 각각 모델링하여 이를 perlite concrete로 연결하고 탱크 파일 기초 계산에서 정해진 파일배치에 따라 절점에 입력할 집중질량을 계산한다. 이때, 탱크 하부에 위치하고 있는 파일 전체가 모두 탱크 중심부에 위치하고 있다고 이상화하여 파일의 강성을 계산하며, 이는 식 (9)와 같다.

$$I = N \times I_O \quad (9)$$

여기서, N 은 전체 파일의 수, $I_O$는 파일 한본의 관성모멘트를 의미한다.

또한 원환부 파일을 고려하여 전도모멘트의 영향을 부담하도록 식 (10)으로부터 부가보의 강성 $I_A$를 구하여 해석에 반영한다.

$$I_A = N_a \times (R_i^2 + R_o^2)/4 \quad (10)$$

여기서, $N_a$는 원환부에 위치한 파일의 수, $R_i$는 탱크중심으로부터 최내단 원환부 파일까지의 거리, $R_o$는 탱크중심으로부터 최외단 원환부 파일까지의 거리를 의미한다.

아래의 그림 2.9.23은 2D 수평방향 지진해석 모델링도이며, 그림 24는 2D 수평방향 뼈대해석 모델로 부가보가 고려된 상태이다.

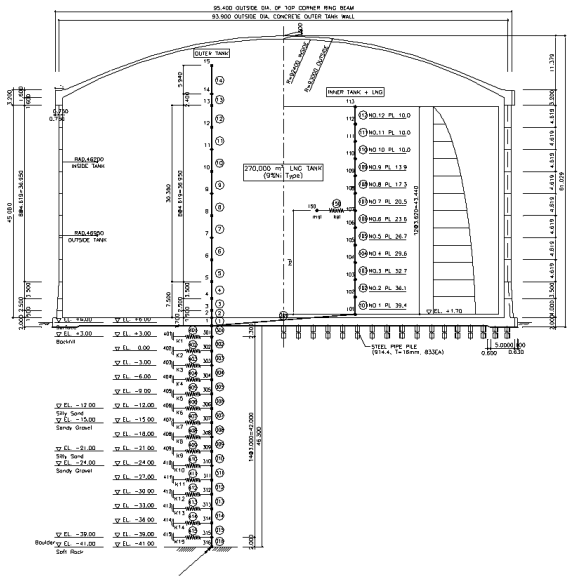


그림 2.9.23 2D 수평방향의 지진해석 모델링도



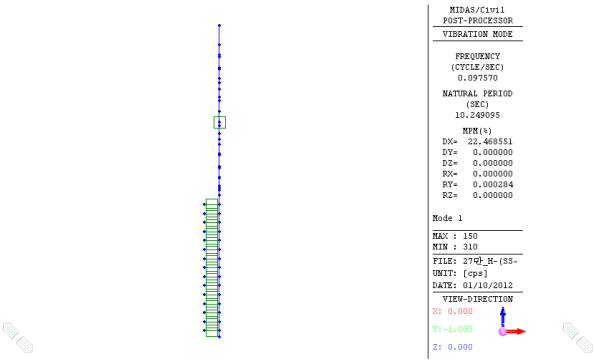
그림 2.9.24 2D 수평방향 뼈대해석 모델

수평방향의 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과를 표 2.9.7에 나타내었다.

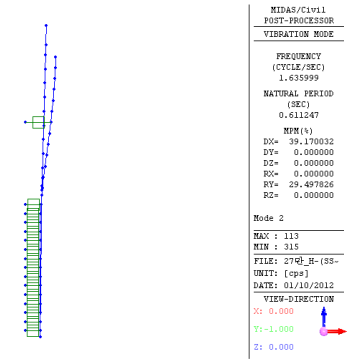
표 2.9.7 수평방향 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과

| Mode | Frequency (Hz) | Period (sec) | M.P.M X(%) | Modal Damping Ratio(SSE) | Modal Damping Ratio(OBE) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.098 | 10.249 | 22.469 | 0.005 | 0.005 |
| 2 | 1.636 | 0.611 | 39.170 | 0.030 | 0.018 |
| 3 | 2.847 | 0.351 | 7.537 | 0.034 | 0.018 |
| 4 | 4.713 | 0.212 | 1.759 | 0.048 | 0.029 |
| 5 | 7.340 | 0.136 | 1.497 | 0.048 | 0.028 |
| 6 | 9.774 | 0.102 | 3.135 | 0.044 | 0.026 |
| 7 | 11.288 | 0.089 | 4.454 | 0.041 | 0.022 |
| 8 | 13.035 | 0.077 | 0.587 | 0.048 | 0.028 |
| 9 | 15.153 | 0.066 | 0.001 | 0.049 | 0.029 |
| 10 | 16.393 | 0.061 | 0.651 | 0.048 | 0.023 |
| 11 | 17.442 | 0.057 | 0.711 | 0.047 | 0.027 |
| 12 | 17.870 | 0.056 | 4.448 | 0.009 | 0.005 |
| 13 | 19.057 | 0.052 | 0.002 | 0.049 | 0.030 |
| 14 | 20.348 | 0.049 | 0.004 | 0.050 | 0.030 |
| 15 | 20.851 | 0.048 | 0.000 | 0.050 | 0.030 |
| 16 | 21.950 | 0.046 | 0.001 | 0.049 | 0.030 |
| 17 | 24.380 | 0.041 | 0.340 | 0.022 | 0.013 |
| 18 | 27.488 | 0.036 | 0.100 | 0.053 | 0.025 |
| 19 | 32.422 | 0.031 | 5.677 | 0.004 | 0.003 |
| 20 | 34.995 | 0.029 | 0.787 | 0.015 | 0.009 |
| 21 | 38.136 | 0.026 | 0.655 | 0.038 | 0.018 |
| 22 | 38.422 | 0.026 | 0.898 | 0.030 | 0.015 |
| 23 | 43.286 | 0.023 | 0.762 | 0.024 | 0.014 |
| 24 | 45.706 | 0.022 | 0.039 | 0.012 | 0.006 |
| 25 | 49.808 | 0.020 | 0.073 | 0.048 | 0.020 |

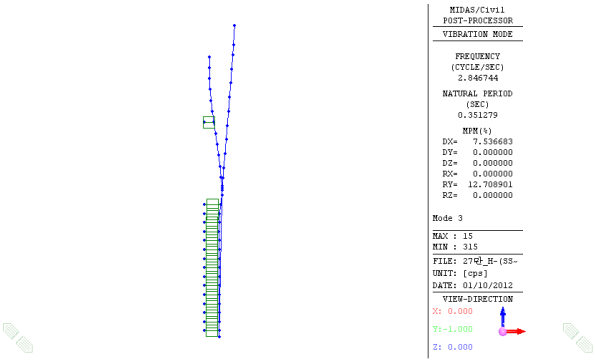
해석 결과로부터 1차 모드는 유체에서 발생하며, 2차 모드이상 부터는 내조 및 외조에서 발생함을 확인할 수 있다. 각 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화는 그림 2.9.25와 같고, 그림 2.9.26과 그림 2.9.27은 각각 수평력과 모멘트를 나타낸 그림이다.



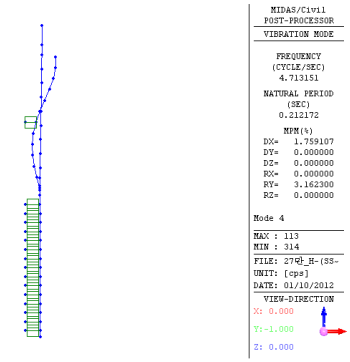

(a) 1차 모드



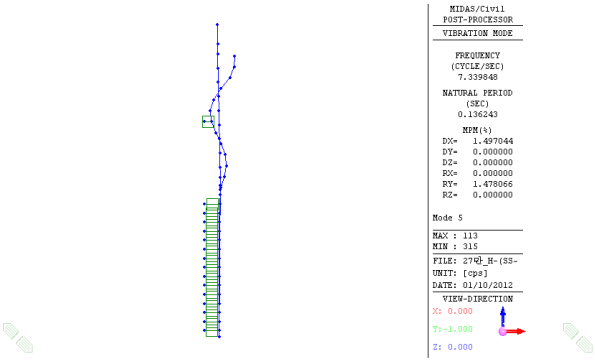

(b) 2차 모드



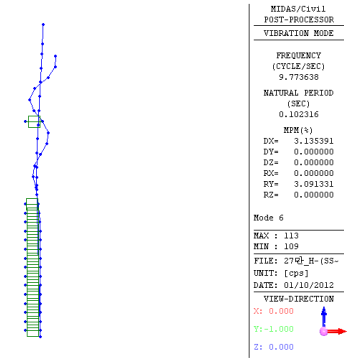

(c) 3차 모드



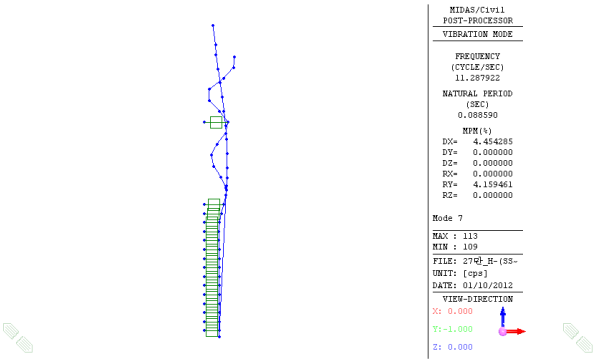

(d) 4차 모드



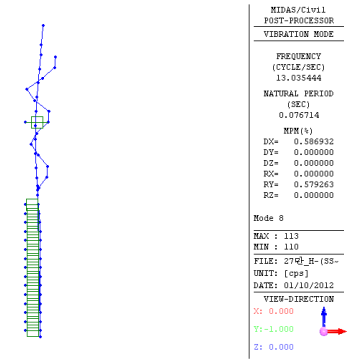

(e) 5차 모드




(f) 6차 모드

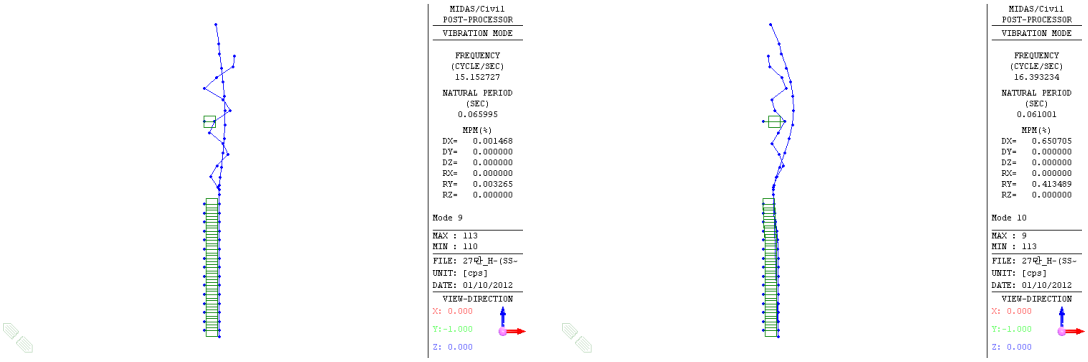



(g) 7차 모드



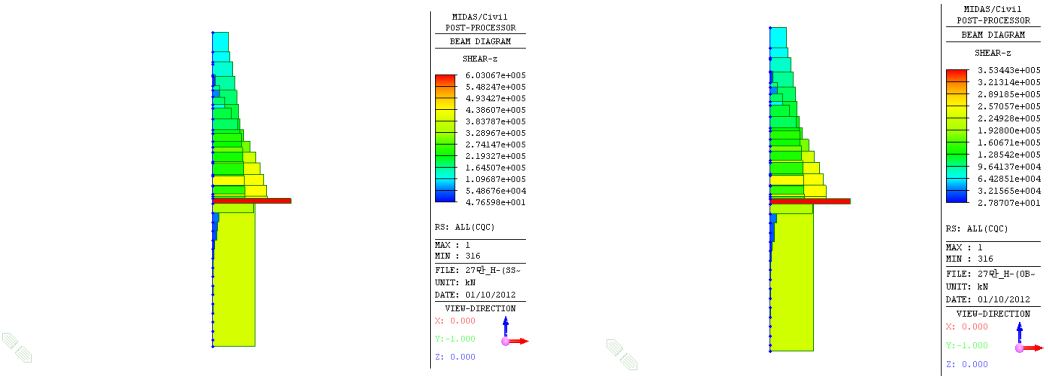

(h) 8차 모드

그림 2.9.25 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화 (수평방향)



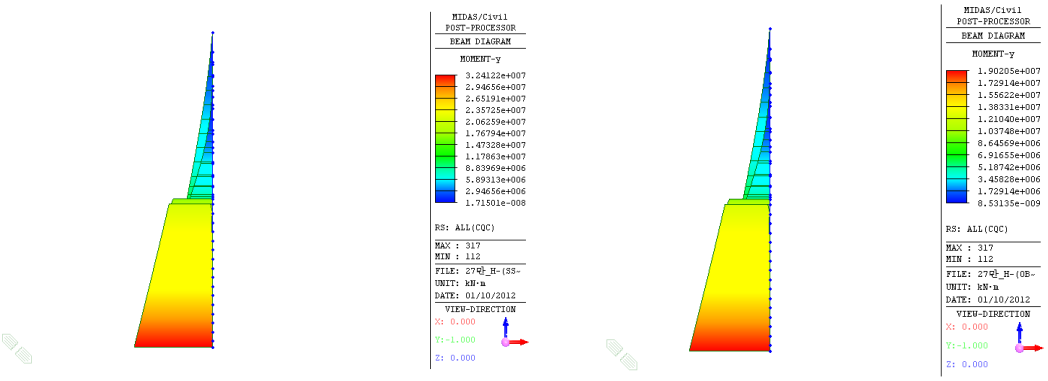

(i) 9차 모드 (j) 10차 모드

그림 2.9.25 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화 (수평방향-계속)




(a) SSE (b) OBE

그림 2.9.26 수평력도




(a) SSE (b) OBE

그림 2.9.27 모멘트도

그림 2.9.26과 같이 수평력은 탱크 bottom 부분의 값이 가장 크게 나타나며, 그림 2.9.27의 모멘트도 또한 파일 지지부를 제외하고 탱크 본체만 고려해볼 때, bottom 부분에서 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다.

(나) 수직해석

수직해석은 외조의 바닥 슬래브와 벽체, 지붕 그리고 유체 충격성분의 질량을 구하여 이를 절점에 집중질량으로 입력하여 구한다. 또한 flexible part와 지붕 및 파일의 강성을 구하여 해석을 수행하는데, 이때 지붕의 강성을 구하기 위해서는 지붕 1차 모드에서의 고유주기가 필요하다. 따라서 수직해석은 지붕모드해석을 포함하여 해석을 진행하게 된다. 지붕모드해석은 구조해석 프로그램 LUSAS를 이용하였으며, 그림 2.9.28은 지붕모드형상을 나타낸 그림이다.

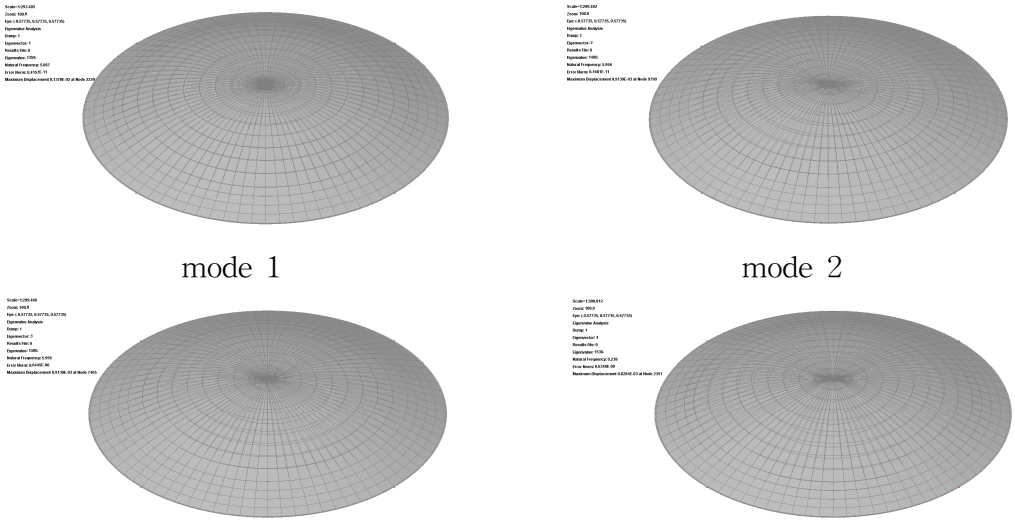



그림 2.9.28 지붕모드형상

그림 2.9.29는 2D 수직방향 지진해석 모델링도이며, 그림 2.9.30은 2D 수직방향 뼈대해석 모델이다.

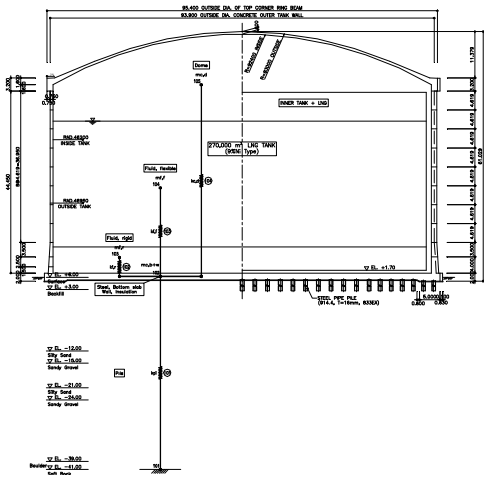


그림 2.9.29 2D 수직방향의 지진해석 모델링도

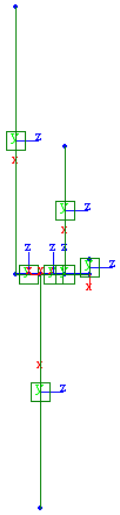
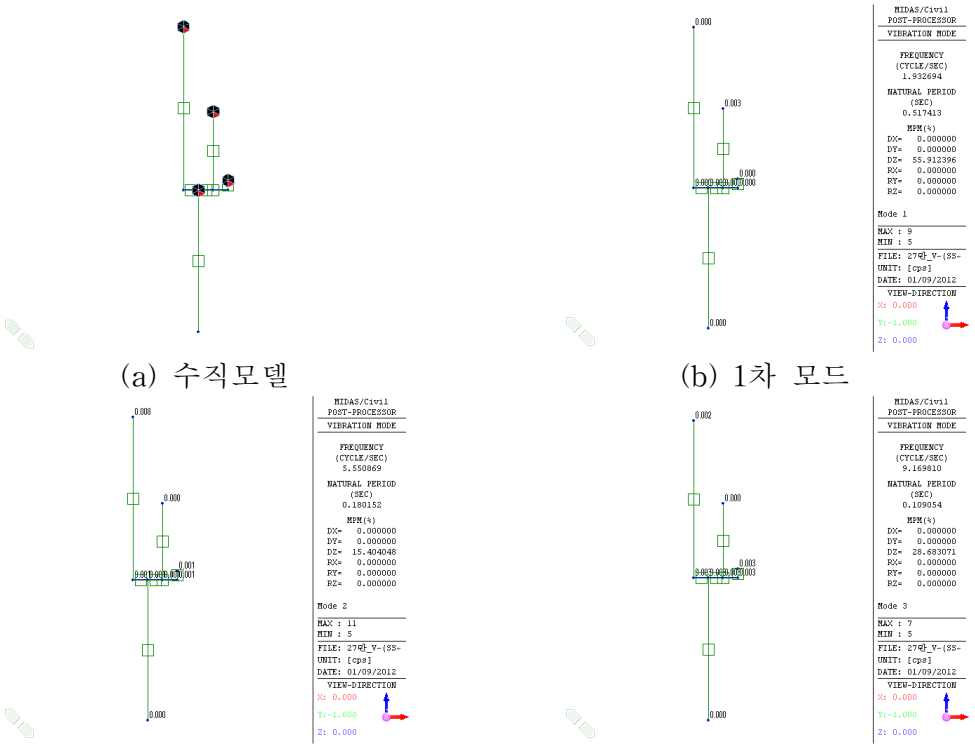


그림 2.9.30 2D 수직방향 뼈대해석 모델

수직방향의 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과를 표 2.9.8에 나타내었다. 해석 결과로부터 1차 모드는 유체에서 발생함을 확인할 수 있다. 각 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화는 그림 31과 같고, 여기서 1차 모드는 유체 성분인 flexible 모드이며, 2차 모드는 지붕 모드, 3차 모드는 외조와 rigid 모드이다.

표 2.9.8 수직방향 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과

| Mode | Frequency (Hz) | Period (sec) | M.P.M Z(%) | Modal Damping Ratio(SSE) | Modal Damping Ratio(OBE) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.933 | 0.517 | 55.912 | 0.050 | 0.030 |
| 2 | 5.551 | 0.180 | 15.404 | 0.067 | 0.038 |
| 3 | 9.170 | 0.109 | 28.683 | 0.053 | 0.032 |




(a) 수직모델 (b) 1차 모드

(c) 2차 모드 (d) 3차 모드

그림 2.9.31 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화 (수직방향)

나. 지진해석 개선 사항

본 절에서는 기존 뼈대해석의 개선사항에 대하여 설명하고, 그 결과를 비교·검토하여 개선된 지진해석의 특징을 기술하고자 한다. 해석은 구조해석 프로그램 MIDAS CIVIL을 사용하여 진행하였으며, 지진해석 개선 사항이 반영되는 수평해석만을 대상으로 하여 SSE 및 OBE에 대하여 수행하였다. 또한 해외 지진해석 흐름에 따라 EN 코드를 적용하고, SSI 해석을 수행하여 지진해석을 개선하고자 한다.

(1) 기존 뼈대해석의 개선

앞서 기술한 기존 뼈대해석의 수평해석 과정에서, 전도모멘트에 대하여 고려하던 원환부 파일의 영향을 고려하지 않도록 부가보를 모델링에서 제외시키고 해석을 수행한다. 또한 탱크 하부에 위치하고 있는 파일 전체가 모두 탱크 중심부에 위치하고 있다고 이상화하여 파일의 강성을 계산하던 기존 방식을 실제 파일배치에 따라 각 위치를 고려하도록 해석 방법을 개선하였다. 자세한 개선 절차는 다음과 같다.

(가) 지진해석 개선 절차

식 (9)로부터 구하던 파일의 강성을 식 (11)을 이용하여 구하도록 기존 방법을 개선하였다. 식 (11)은 탱크 중심에서부터 실제로 분포되어 있는 파일까지의 거리를 고려하여 파일의 강성을 구하는 방법을 묘사한 것이다. 이외의 사항들은 모두 기존의 방법과 동일하게 진행된다.

$$I = N \times I_O + \Sigma(N_i \times y^2) \times A \qquad (11)$$

여기서, N 은 전체 파일의 수, $I_O$는 파일 한본의 관성모멘트, $N_i$는 i열에 위치하는 파일 수, $y_i$는 탱크 중심에서부터 i열에 분포되어있는 파일까지의 거리, A는 파일의 단면적을 나타낸다.

아래의 그림 2.9.32는 2D 지진해석을 위하여 스케치한 수평방향의 모델링도이며, 그림 2.9.33은 각각 기존 방법과 개선 방법에 의한 뼈대해석 모델링 삽도이다. 그림 2.9.33에서와 같이 개선모델은 기존 모델에서 부가보를 제외한 것임을 확인할 수 있다.

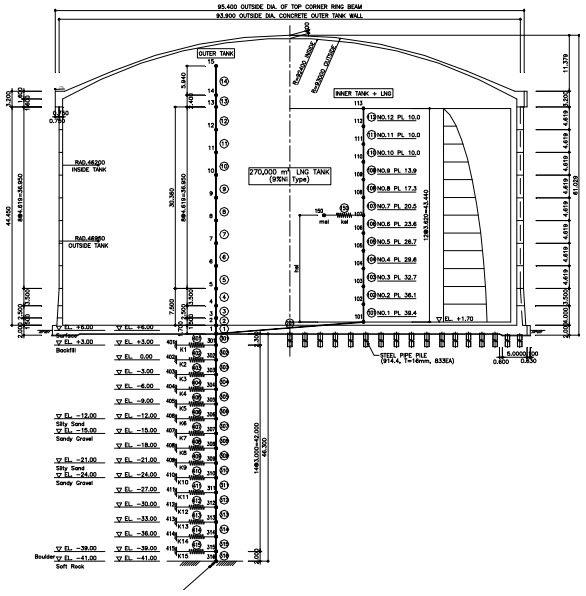



그림 2.9.32 개선된 2D 수평방향의 지진해석 모델링도



(a) 기존 모델 (b)개선 모델

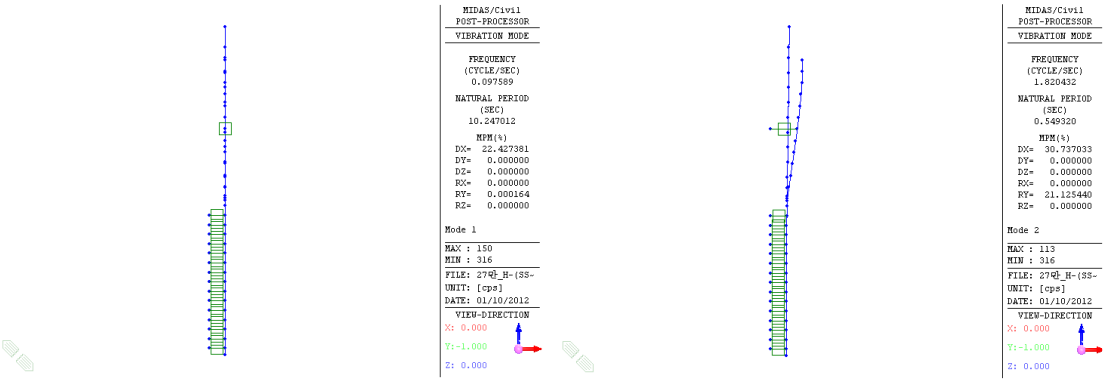
그림 2.9.33 2D 수평방향 뼈대해석 모델

(나) 개선된 지진해석 결과

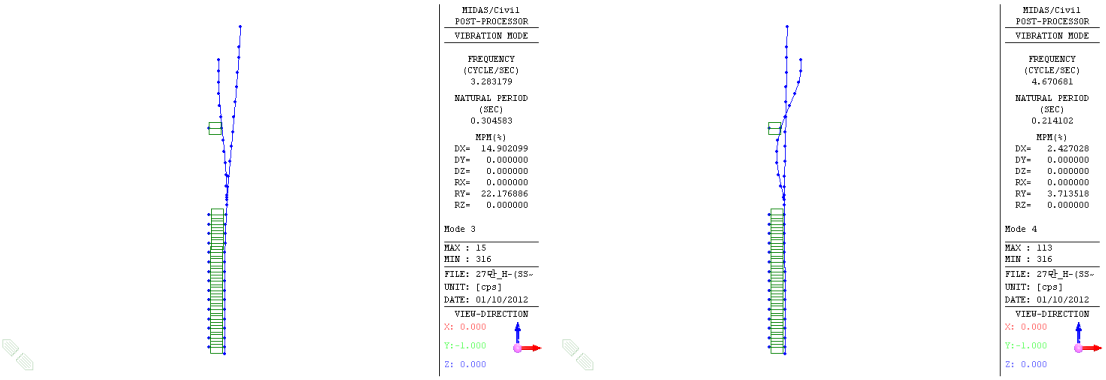
개선된 수평방향 지진해석의 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과를 표9에 나타내었다. 해석 결과로부터 1차 모드는 유체에 의하여 발생하며, 2차 모드이상 부터는 내조에서 발생함을 확인할 수 있으며 따라서 표 2.9.7과 표 2.9.9의 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과가 유사한 경향을 가짐을 알 수 있다. 각 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화는 그림 2.9.34와 같고, 그림 2.9.35와 그림 2.9.36은 각각 수평력과 모멘트를 나타낸 그림이다.

표 2.9.9 개선된 지진해석의 모드별 고유진동수 및 지진응답 결과

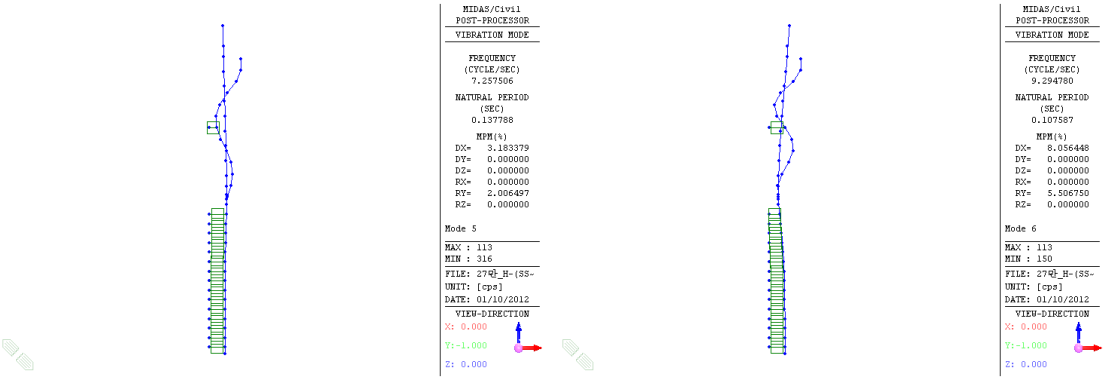
| Mode | Frequency (Hz) | Period (sec) | M.P.M X(%) | Modal Damping Ratio(SSE) | Modal Damping Ratio(OBE) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.098 | 10.247 | 22.427 | 0.005 | 0.005 |
| 2 | 1.820 | 0.549 | 30.737 | 0.046 | 0.028 |
| 3 | 3.283 | 0.305 | 14.902 | 0.046 | 0.023 |
| 4 | 4.671 | 0.214 | 2.427 | 0.048 | 0.029 |
| 5 | 7.258 | 0.138 | 3.183 | 0.047 | 0.028 |
| 6 | 9.295 | 0.108 | 8.056 | 0.042 | 0.024 |
| 7 | 10.752 | 0.093 | 3.236 | 0.046 | 0.027 |
| 8 | 12.932 | 0.077 | 0.292 | 0.049 | 0.029 |
| 9 | 15.152 | 0.066 | 0.000 | 0.049 | 0.029 |
| 10 | 16.253 | 0.062 | 0.589 | 0.050 | 0.024 |
| 11 | 17.387 | 0.058 | 0.144 | 0.049 | 0.029 |
| 12 | 19.041 | 0.053 | 0.031 | 0.049 | 0.030 |
| 13 | 20.335 | 0.049 | 0.016 | 0.050 | 0.030 |
| 14 | 20.850 | 0.048 | 0.002 | 0.050 | 0.030 |
| 15 | 21.942 | 0.046 | 0.014 | 0.050 | 0.030 |
| 16 | 27.143 | 0.037 | 0.339 | 0.052 | 0.024 |
| 17 | 32.335 | 0.031 | 6.704 | 0.024 | 0.014 |
| 18 | 38.233 | 0.026 | 0.074 | 0.052 | 0.023 |
| 19 | 44.506 | 0.022 | 2.290 | 0.018 | 0.011 |
| 20 | 46.326 | 0.022 | 1.272 | 0.020 | 0.011 |
| 21 | 49.865 | 0.020 | 0.070 | 0.049 | 0.021 |
| 22 | 53.618 | 0.019 | 0.000 | 0.050 | 0.030 |
| 23 | 58.835 | 0.017 | 0.968 | 0.034 | 0.019 |
| 24 | 60.912 | 0.016 | 0.068 | 0.049 | 0.021 |
| 25 | 70.792 | 0.014 | 0.310 | 0.044 | 0.021 |



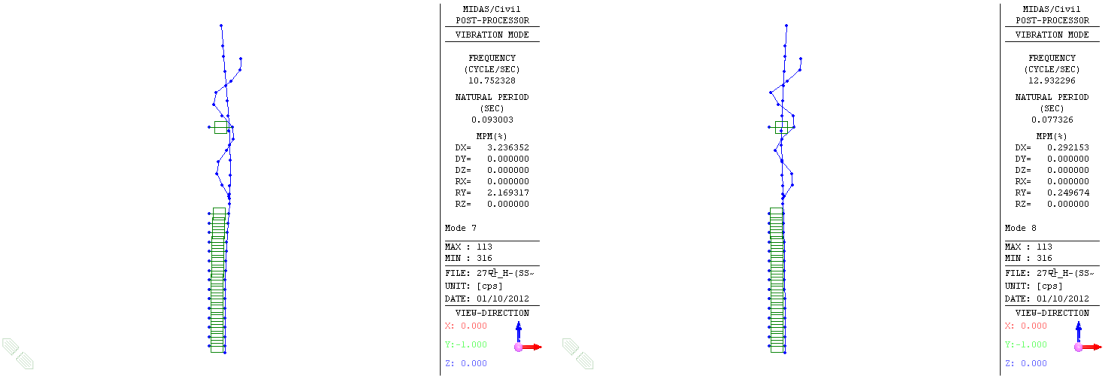

(a) 1차 모드 (b) 2차 모드




(c) 3차 모드 (d) 4차 모드

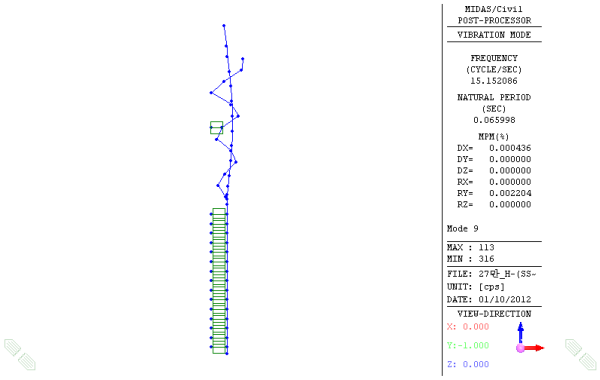



(e) 5차 모드 (f) 6차 모드

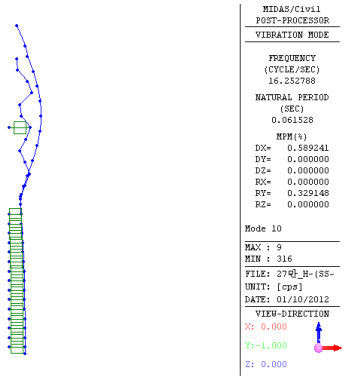



(g) 7차 모드 (h) 8차 모드

그림 2.9.34 개선된 지진해석 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화

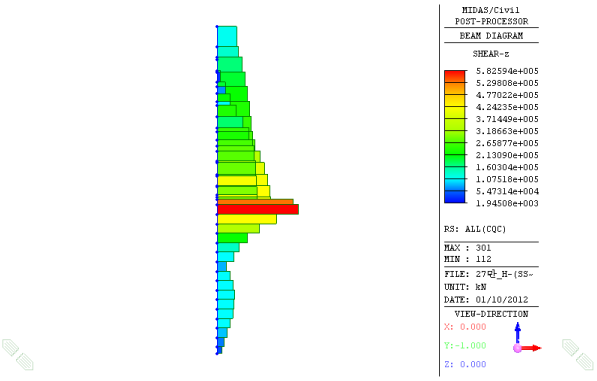



(i) 9차 모드

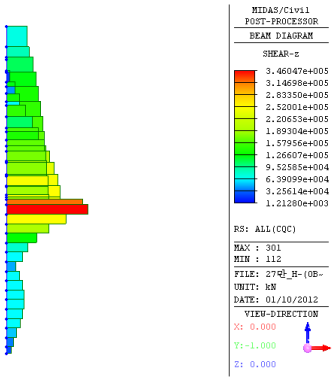



(j) 10차 모드

그림 2.9.34 개선된 지진해석 모드에 따른 뼈대 모델의 형상 변화 (계속)

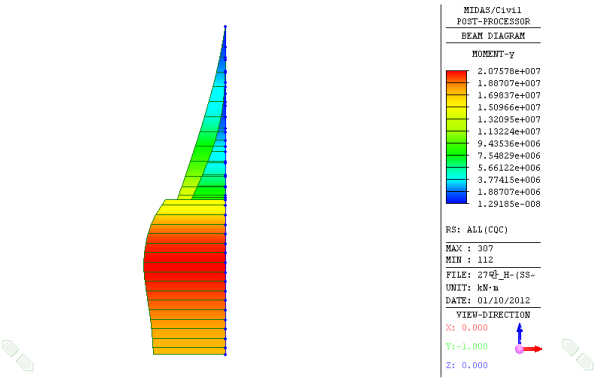



(a) SSE

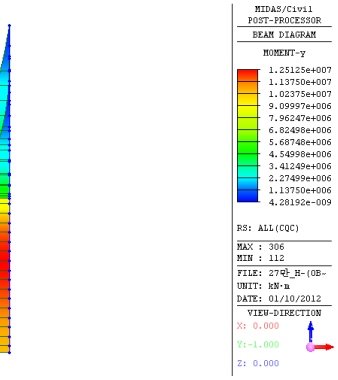



(b) OBE

그림 2.9.35 개선된 지진해석 수평 수평력도




(a) SSE




(b) OBE

그림 2.9.36 개선된 지진해석 모멘트도

그림 2.9.35에서와 같이 수평력은 탱크 바닥 부분에서 가장 크게 나타난다. 반면 파일부의 결과가 기존 지진해석의 수평력도 그림 2.9.26과 달리 나타남을 알 수 있으며, 이는 모델링에서 부가보가 제외되었기 때문이다. 또한 그림 2.9.36의 모멘트 값 또한 기존 지진해석의 모멘트도와 달리 파일 중간층에서 가장 크게 나타남을 확인할 수 있다. 지진력은 지반의 파일을

통해 탱크에 전달되면서 탱크 바닥에서 가장 큰 영향을 주고, 외조 벽체를 통해 내조 하단부에 전달되면서 그 영향이 약해짐을 알 수 있다.

(다) 기존 Beam-stick 해석과의 결과 비교

기존 방법과 개선 방법의 결과는 각각 다음과 같다. 표 2.9.10은 각 부재(Bottom, Outer Tank, Inner Tank, Pile)별로 작용하는 수평력과 모멘트 및 변위를 정리한 표이다.

표 2.9.10 기존 지진해석 및 개선된 지진해석의 결과

| Member | | 기존 방법 | | | 개선 방법 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fx (MN) | Mx (MN·m) | Ux (mm) | Fx (MN) | Mx (MN·m) | Ux (mm) |
| Bottom | 上 | 603.07 | 17167.28 | 11.85 | 545.04 | 16139.39 | 5.49 |
| | 下 | 603.07 | 16186.98 | 12.65 | 545.04 | 15285.28 | 5.82 |
| Outer Tank | | 251.49 | 10582.94 | 12.65 | 287.77 | 12257.09 | 5.82 |
| Inner Tank | | 416.38 | 9121.59 | 14.24 | 379.75 | 8427.01 | 7.00 |
| Pile | | 316.94 | 841.46 | 11.85 | 582.59 | 16139.39 | 5.49 |

결과로부터 기존 방법에 의한 결과 값이 개선 방법의 결과 값보다 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 기존 방법의 경우 전체파일의 수를 모두 고려하여 파일강성을 구하고, 지진시 발생하는 전도모멘트에 대해서 다시 별도로 원환부 파일의 영향을 고려하여 설계함으로써 파일의 영향이 중복으로 고려되기 때문이다. 이와 같은 이유로 표 2.9.10에서와 같이 기존 방법에 의한 결과가 개선 방법에 의한 결과보다 약 5 ~ 10 % 이상의 큰 지진 단면력을 얻게 되어, 단면 설계에 있어서도 보수적인 설계를 도출하게 된다. 따라서 개선 방법에 따라 지진해석을 실행할 경우, 지진에 의해 발생하는 지진 단면력의 감소로 기존 방법 보다 효율적인 단면 설계가 가능하며 이는 경제성 측면에서도 이점이 될 것으로 보인다.

(2) 해외 지진해석 흐름에 따른 개선

해외의 경우 코드에 의한 방법에 따라 2D 지진 단면력을 산정하고 있으며, 지진 단면력을 구하는 식은 IBC, API, Eurocode 등으로 다양하다. 그러나 코드별 계산 결과는 식의 형태와 상관없이 대동소이하다. 본 보고서에서는 Eurocode 8을 토대로 지진 단면력을 산출하였다.

(가) 코드(EN1998-4)에 의한 지진력 산정

기존 2D Beam stick 해석의 경우, 2D 수평해석과 수직해석을 실시하여야 하며 지붕모드해석을 별도로 진행해야 하므로 해석 시간과 계산 과정이 다소 복잡하다. 그러나 코드에 의한 방법은 별도의 모델링과 해석 없이 코드에 의해 내조의 유체 고유주기를 계산하고, 그에 따른 가속도응답을 산출하여 내조 바닥 밑면에 작용하는 수평력과 모멘트를 구할 수 있다. 따라서 본 보고서에서는 EN 1998-4의 공식에 따라 LNG 탱크의 내조 바닥면에 작용하는 지진 단면력을 계산하고 외조 탱크의 관성력을 구하여 코드에 의한 지진력을 산정하고자 한다.

① 유체의 분류 및 내조 밑면 전단력과 모멘트 산정

내조 밑면 전단력과 모멘트는 EN 1998-4에 의하여 아래의 식 (12)와 식 (13)으로부터 구할 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 유체의 경우 거동특성에 따라 크게 충격성분과 대류성분으로 구분되며, 충격성분은 저장탱크 내부의 유체가 질량체로서 구조물과 같이 운동할 때 발생하며 대류성분은 슬러싱 현상에 의해 발생하게 된다. 따라서 충격성분과 대류성분 각각의 고유주기로부터 스펙트럼 가속도를 구하여 식에 대입한다.

$$Q=(m_i+m_w+m_r)\times S_e(T_{imp})+m_c\times S_e(T_{con}) \quad (12)$$

$$M=(m_ih_i+m_wh_w+m_rh_r)\times S_e(T_{imp})+m_ch_c\times S_e(T_{con})$$

$$M'=(m_ih_i'+m_wh_w+m_rh_r)\times S_e(T_{imp})+m_ch_c'\times S_e(T_{con}) \quad (13)$$

여기서, $Q$는 수평력, $M$은 기초부 위의 전도모멘트, $M'$는 기초부 아래의 전도모멘트, $m_i$와 $m_c$는 각각 충격성분의 질량과 대류성분의 질량, $h_i$와 $h_i'$, $h_c$와 $h_c'$는 각각 충격성분과 대류성분의 높이, $m_w$는 벽체 질량, $h_w$는 벽체 높이, $m_r$은 지붕 질량, $h_r$은 지붕 높이, $S_e(T_{imp})$와 $S_e(T_{con})$는 각각 충격성분과 대류성분의 고유주기에 따른 스펙트럼 가속도이다.

아래의 표 2.9.11은 내조의 밑면 전단력과 모멘트를 구하기 위하여 필요한 내조 탱크 및 유체의 제원을 나타낸 표이며, 해당 값들은 식 (14) ~ 식 (19)로부터 각각 구할 수 있다.

표 2.9.11 내조 탱크 및 유체 제원

| 구분 | 제원 | 구분 | 제원 |
|---|---|---|---|
| 내조 반경 (r) | 45 m | 내조 높이 (h) | 43.70 m |
| 내조 직경 (D) | 90 m | 유체 높이 (H) | 42.70 m |
| 철근 탄성계수 (E) | 200,000 MPa | 유체 밀도 ($\rho$) | 480 kg/m3 |
| 중력가속도 (g) | 9.806 (m/sec2) | $D/H$ | 2.11 |
| $m_i$ | 67,817,850 kg | $m_c$ | 59,440,689 kg |
| $h_i$ | 16.013 m | $h_c$ | 25.579 m |
| $h_i'$ | 35.711 m | $h_c'$ | 34.097 m |

$$m_i/m_l=\frac{\tanh(0.866\times D/H)}{0.866\times D/H} \quad (\text{for } D/H>1.33)$$

$$m_i/m_l=1-0.218\times D/H \quad (\text{for } D/H<1.33) \quad (14)$$

$$m_c/m_l=0.23\times D/H\times\tanh\left(\frac{3.67}{D/H}\right) \quad (15)$$

$$h_i/H = 0.375 \qquad (\text{for } D/H > 1.33)$$
$$h_i/H = 0.5 - 0.094 \times D/H \qquad (\text{for } D/H < 1.33) \tag{16}$$

$$h_c/H = 1 - \frac{(\cosh(\frac{3.67}{D/H}) - 1)}{\frac{3.67}{D/H} \times \sinh(\frac{3.67}{D/H})} \tag{17}$$

$$h_i^{'}/H = 0.375 \times (1 + 1.33 \times (\frac{0.866 \times (D/H)}{\tanh(0.866 \times D/H)} - 1)) \tag{18}$$

$$h_c^{'}/H = 1 - (\frac{\cosh(\frac{3.67}{D/H}) - 1.97}{\frac{3.67}{D/H} \times \sinh(\frac{3.67}{D/H})}) \tag{19}$$

여기서, D는 내조 탱크 직경, H는 유체의 높이를 의미한다.

$T_{imp}$와 $T_{con}$는 식 (20)과 식 (21)에 따라 구할 수 있으며, $C_i$ 및 $C_c$는 식 (22)와 식 (23)으로부터 구할 수 있다. 또한, 식 (12)와 식 (13)의 $S_e(T_{imp})$와 $S_e(T_{con})$는 구조물과 유체 자유수면의 시간이력에 따른 감쇠효과를 위해 각각 5 %와 0.5 %로 하여 응답스펙트럼 가속도를 정하며, 수평 응답스펙트럼 가속도는 표 2.9.12에 나타내었다.

$$T_{imp} = C_i \times \frac{H\sqrt{\rho}}{\sqrt{\frac{s}{r}} \times \sqrt{E}} \tag{20}$$

$$T_{con} = C_c\sqrt{r} \tag{21}$$

$$C_i = \frac{2}{\sqrt{\frac{H}{r}}\,[0.46 - 0.15 \times H/r + 0.017 \times (H/r)^{2}]} \tag{22}$$

$$C_c = \frac{2 \times \pi}{4.2} \tag{23}$$

여기서, $C_i$와 $C_c$는 각각 충격성분과 대류성분 계수이며, $H$는 유체 높이, $\rho$는 유체의 밀도, $s$는 내조 벽체의 등가 단일두께, $r$은 내조 반경, $E$는 철근의 탄성계수이다. 이때, 내조 반경과 내조에 담긴 유체의 높이의 비에 따라 $C_i$와 $C_c$값은 달라진다.

식 (12)와 식 (13)에서와 같이 코드에 의한 지진 단면력 산출 방법은 유체 성분에 따른 고유주기에 따라서 그 결과가 크게 달라지므로 고유주기로부터 얻어지는 응답스펙트럼 가속도의 영향을 크게 받는다. 표 2.9.12는 SSE수준의 수평 UBC 응답 스펙트럼 가속도를 나타낸 표이며, 그림 2.9.37은 이로부터 5% damping에 해당하는 가속도를 그림으로 나타낸 것이다.

표 2.9.12 수평 응답스펙트럼 가속도-SSE (g)

| Damping (%) | 33 Hz | 9 Hz | 5 Hz | 2.5 Hz | 1 Hz | 0.5 Hz | 0.25 Hz | 0.1 Hz | 0.05 Hz |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.5 | 0.564 | 1.410 | 1.410 | 1.410 | 0.564 | 0.282 | 0.141 | 0.056 | 0.028 |
| 1.0 | 0.486 | 1.215 | 1.215 | 1.215 | 0.486 | 0.243 | 0.122 | 0.049 | 0.024 |
| 2.0 | 0.405 | 1.013 | 1.013 | 1.013 | 0.405 | 0.203 | 0.101 | 0.041 | 0.020 |
| 3.0 | 0.360 | 0.900 | 0.900 | 0.900 | 0.360 | 0.180 | 0.090 | 0.036 | 0.018 |
| 5.0 | 0.300 | 0.750 | 0.750 | 0.750 | 0.300 | 0.150 | 0.075 | 0.030 | 0.015 |
| 7.0 | 0.261 | 0.653 | 0.653 | 0.653 | 0.261 | 0.131 | 0.065 | 0.026 | 0.013 |
| 8.0 | 0.247 | 0.617 | 0.617 | 0.617 | 0.247 | 0.123 | 0.062 | 0.025 | 0.012 |

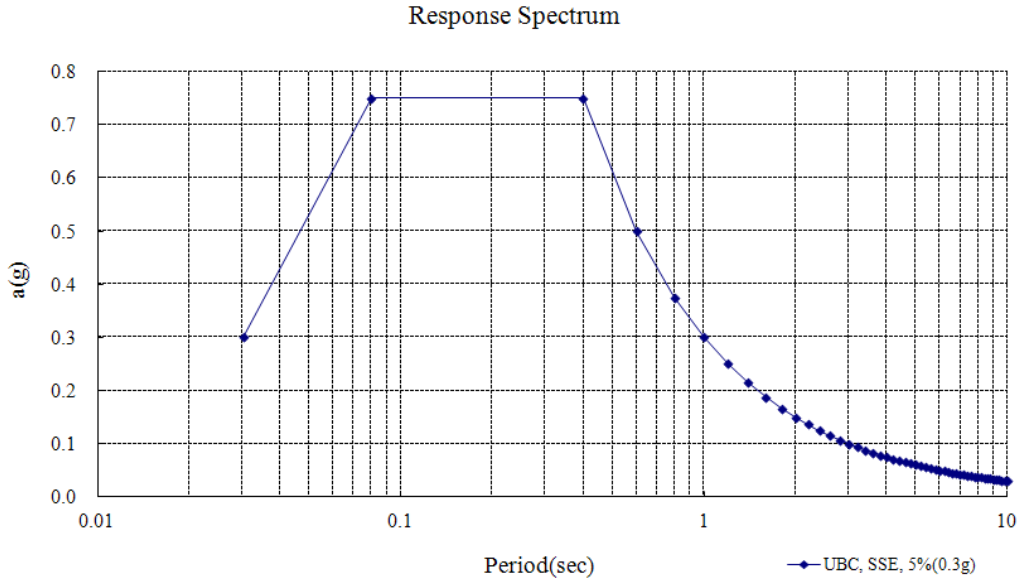



그림 2.9.37 UBC 스펙트럼 (5% damping)

위의 계산식으로부터 구한 내조 밑면 전단력과 전도모멘트는 표 2.9.13과 같다.

표 2.9.13 내조 밑면 전단력과 전도모멘트

| | 밑면 전단력 ($Q$) | 전도모멘트 ($M$) | 전도모멘트 ($M'$) |
|---|---|---|---|
| 코드에 의한 계산 값 | 487.76 MN | 8153.72 MN·m | 17190.08 MN·m |

② 외조 탱크의 관성력 산출

외조 탱크의 관성력을 산출하기 위해서는 먼저 내부가 비어있는 외조 탱크를 모델링하여

eigenvalue 해석을 실시하고 고유주기를 얻는다. 해석으로부터 얻은 외조 탱크의 고유주기 0.22428 sec를 이용하여 표12의 7 % damping에 해당하는 응답스펙트럼 가속도를  결정한다. 정해진 가속도와 외조 탱크의 총 중량의 곱으로부터 외조 탱크의 수평력을 계산하며, 전도모멘트는 외조 탱크 바닥에서부터 수평력이 작용하는 위치까지를 계산하고 이를 수평력과 곱하여 구한다. 그림 2.9.38은 외조 탱크의 구조해석 모델이다.

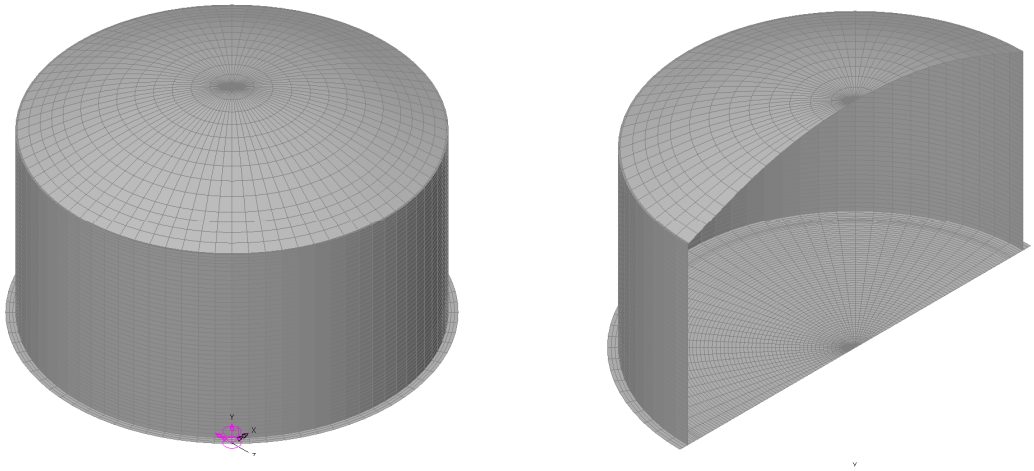


그림 2.9.38 외조 탱크 해석 모델

(나) SSI 해석(Soil-Structure Interaction)

SSI 해석은 지반과 구조물의 상호작용 효과를 고려한 해석으로써 SSI 해석에 의한 구조물 거동의 양상은 다음과 같이 나타난다. 먼저 SSI 해석의 경우 지반을 강체가 아닌 변형체로 해석하기 때문에 구조계의 강성이 감소하게 되어 고유 진동수가 작아지게 된다. 또 구조물의 진동 에너지가 지반을 통한 탄성파 에너지로 방사(Radiation)되기 때문에 구조계의 감쇠가 증가하게 된다. 그리고 지반의 유연성을 고려하기 때문에 기초에서 Rocking이 발생하게 된다.

① SSI 해석의 개요

암반 내 단층으로부터 발생한 지진파는 암반과 지층을 통해 지표면으로 상향 전파되어 간다. 통상적으로 지진파가 상향 전파됨에 따라 밀도(ρ)와 전단파속도($V_s$)가 낮은 지층을 통과하게 되며, 상향 전파 시 지진파 에너지가 보존되기 위해서는 지진파의 입자 속도가 증가되어야 한다. 따라서 지진파가 지층을 통해 지표면에 이르기까지 각 지층의 지반 특성에 따라 파의 가속도와 주파수 대역이 변화하게 되는데, 이러한 영향이 고려된 지진 해석을 위해서는 부지응답해석이 수행되어야 한다. 부지응답해석은 지반 특성 및 지층 구조에 따른 지진파의 특성 변화를 평가하기 위한 해석이라 할 수 있고, 이 해석을 통해서 지반 특성이 반영된 지진 하중을 고려할 수 있게 된다. 부지응답해석은 가장 널리 알려진 1차원 등가 선형 해석 기법을 기반으로 하는 PROSHAKE를 사용하였다. 이 방법은 모든 지층의 경계가 반무한-수평이고, 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하여 해석하는 방법이다. 그림 2.9.39와 같이 전단탄성계수(G), 감쇠비(ξ), 밀도(ρ), 두

께($h_i$)를 갖는 N개의 지층을 수평의 무한한 보로 가정하고, N개 자유도 구조의 주파수 영역 해석을 기반으로 계산한다. 이때, 지반의 비선형 거동은 그림 2.9.40과 같이 지진시 지반의 변형율과 이에 상응하는 전단탄성계수의 차이를 소정의 오차 범위 내에 수렴하도록 반복적으로 계산한다.

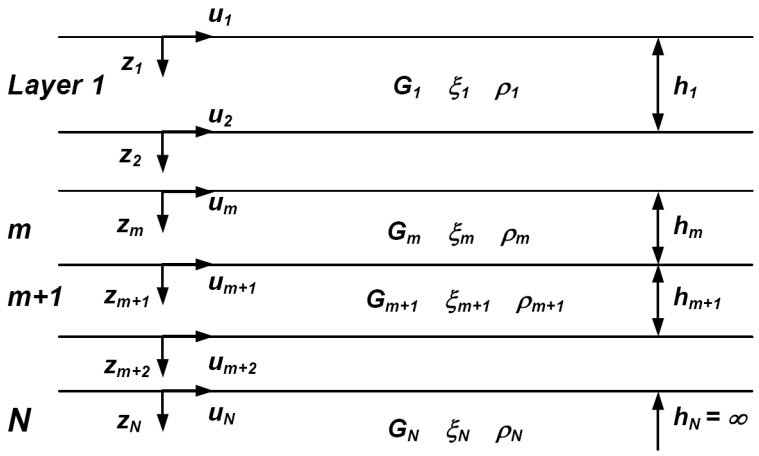



그림 2.9.39 N개 지층의 모형화

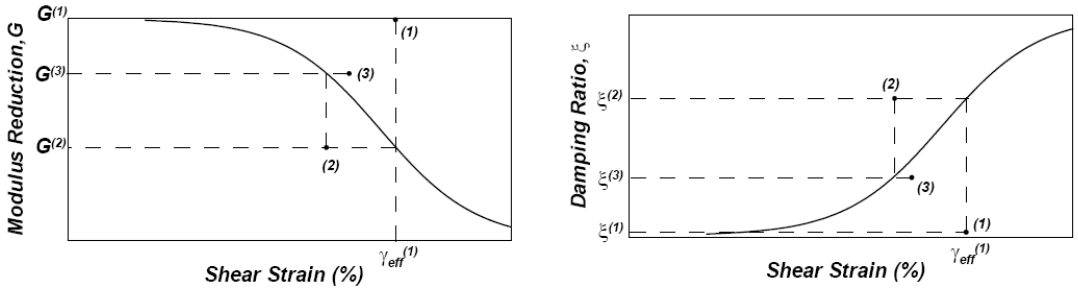


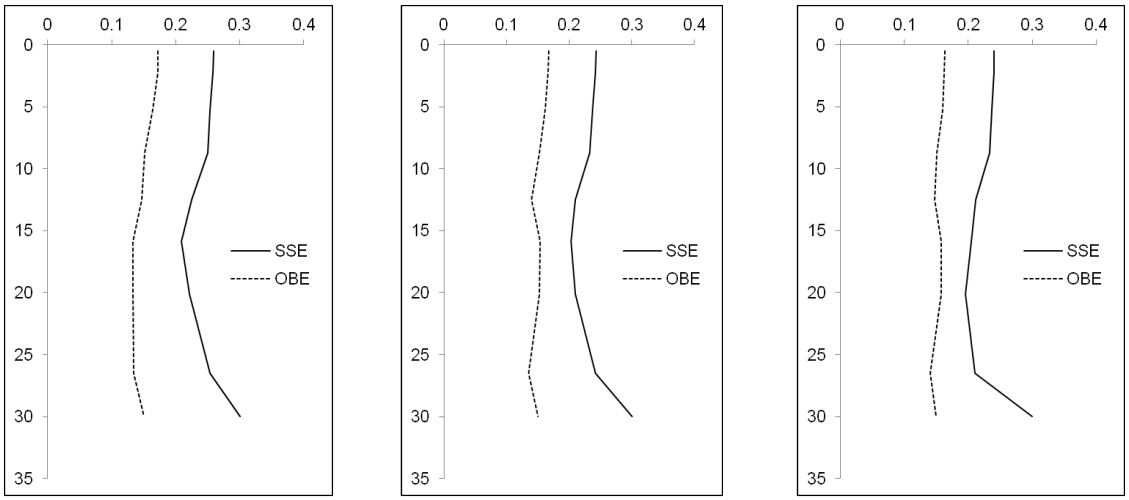

그림 2.9.40 등가 선형 해석의 반복 계산 관계

본 연구의 SSI 해석은 LNG 탱크 상부 구조에 대한 간략 모델을 구현하여 SASSI라는 해석 프로그램으로 진행하는데, 부지응답해석 결과로부터 도출된 지반의 동특성치가 SASSI 해석시 입력 데이터로 사용된다.

대상 지반의 특성에 따른 지진파 증감 효과를 고려하기 위해 실행한 부지응답해석 결과로부터 도출된 기반암 및 지표면 위치에서의 첨두지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)를 표 2.9.14에 정리하였고, 지층별 PGA 값의 변화 양상을 그림 41에 나타내었다. 해석시 입력 지진파는 OBE(PGA=0.15g)와 SSE(PGA=0.3g)에 대한 표준응답스펙트럼에 부합되는 3개의 인공 지진파를 사용하였고, 지진파의 통제점 위치는 안전측의 관점에서 기반암으로 하였다. 결과에 의하면 OBE 경우는 기반암 대비 지표면에서의 PGA 값이 11.3% ~ 14.7% 정도 증가되는 것으로 나타났으며, SSE 경우는 PGA 값이 오히려 80% ~ 86.3% 수준으로 줄어드는 결과를 보였다. 이는 대상 지반의 지층별 특성뿐만 아니라 지진파의 특성에 따라서도 지진 통제점(기반암)의 지진 가속도가 증폭 또는 감소될 수 있음을 보여준다.

표 2.9.14 기반암 및 지표면 위치에서의 PGA 값

| 구 분 | | Peak Ground Acceleration (g) | | Predominant Freq. (Hz) |
|---|---|---|---|---|
| | | 지표면 위치 | 기반암 위치 (입력파) | |
| SSE | Artificial 1 | 0.243 | 0.300 | 1.107 |
| | Artificial 2 | 0.241 | 0.300 | 1.107 |
| | Artificial 3 | 0.259 | 0.300 | 1.078 |
| OBE | Artificial 1 | 0.167 | 0.150 | 0.811 |
| | Artificial 2 | 0.163 | 0.150 | 0.811 |
| | Artificial 3 | 0.172 | 0.150 | 0.773 |




(a) Artificial 1 (b) Artificial 2 (c) Artificial 3

그림 2.9.41 지반 깊이에 따른 PGA 값

② SSI 해석 절차

일반적으로 대규모의 LNG 탱크 구조물은 지반 여건 상 말뚝 기초로 설계되고, 바닥판 직경이 매우 커서 수백개의 말뚝이 필요하게 된다. 그러나 SASSI 알고리즘을 기반으로 수백개의 말뚝을 모두 모델링하여 지반과 말뚝의 상호작용을 고려하기에는 절점수의 제한, 해석시간 등의 문제로 인해 모델 구축이 거의 불가능한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 절점수를 줄이기 위한 방안으로 833개의 말뚝을 24개로 이상화하였고, 이때 833개가 갖는 말뚝의 전체 휨강성(EI)과 축강성(EA)은 유지되도록 함은 물론 지반의 상호 작용과 관련된 말뚝 주변장도 동일한 값이 되도록 등가 사각형 단면을 결정하였다. 모델링에 구현된 말뚝의 길이는 지반 조사 결과를 참조하여 50.0 m로 고려하였다.

그림 2.9.42는 SASSI 프로그램을 사용한 해석 모델의 개요도이다. 그림과 같이 상부 구조는 보요소를 사용하였고, 바닥판과 말뚝, 그리고 지반은 Soild 요소를 사용하여 모델을 구축하였다. 이는 SASSI 프로그램의 해석 방법인 유연체적법으로 지반과의 상호 작용을 구현하기 위해서는 보요소의 사용이 불가능하기 때문이다.

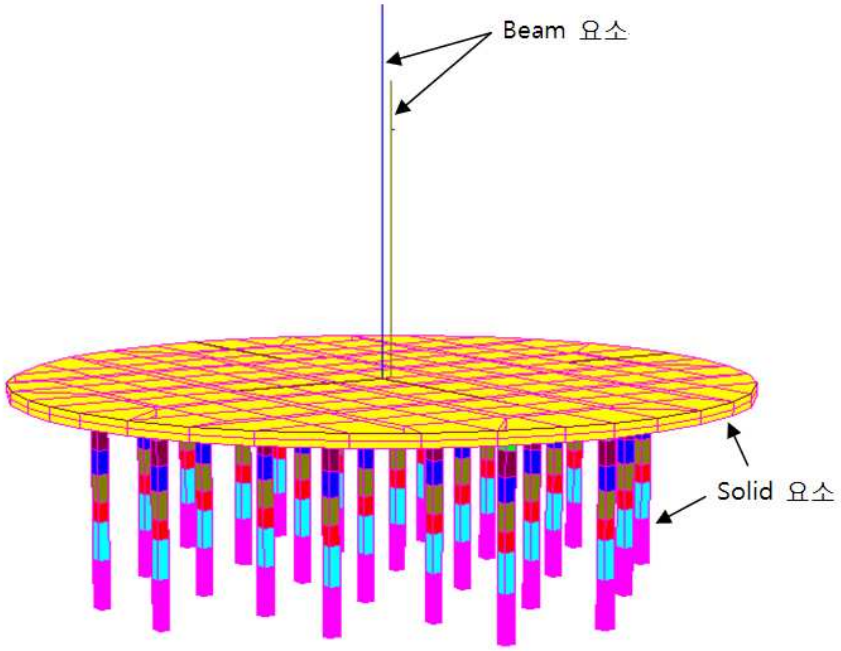



그림 2.9.42 SASSI 프로그램을 사용한 SSI 해석모델 개요도

③ SSI 해석 결과

SASSI 프로그램을 사용하여 구축된 SSI 모델을 대상으로 시간이력해석을 수행하고, 이로부터 도출된 결과에 대하여 분석하였다. 본 절에서 제시한 결과는 SSE에 대한 Artificial 1지진파에 대한 결과이다.

표 2.9.15는 SSI 해석의 밑면 전단력과 전도 모멘트 결과 및 고유주기를 나타낸 표이다. 결과에 의하면 밑면 전단력은 741.139 MN, 전도모멘트는 18397.67 MN·m, 1차 모드 고유주기 및 2차 모드 고유주기는 각각 10.259 sec와 0.518 sec이다.

표 2.9.15 SSI 해석의 시간이력 결과

| 구 분 | 밑면 전단력 (MN) | 전도 모멘트 (MN·m) | 고유 주기 (sec) |
|---|---|---|---|
| SSI 해석 | 741.139 | 18397.67 | 1st : 10.259<br>2nd : 0.518 |

다. 기존 해석 결과와 개선에 따른 결과 비교

기존 해석의 경우 탱크 내조와 외조를 함께 모델링하여 해석하기 때문에 결과 비교의 타당성을 위하여, 본절의 결과 비교는 내조와 외조를 동시에 고려하도록 한다. 이때 코드 해석의 경우, 내조와 외조를 동시에 고려하면 구조체가 mat 기초 위에 놓여있다고 보고 기초부 아래 전도모멘트($M'$)를 이용하여 계산한다.[3] 기존 해석 결과와 코드 및 SSI 해석의 결과는 표2.9.16과 같다

표 2.9.16 기존 해석과 코드 및 SSI 해석 결과

| 지진 단면력 | | 기존 해석 | | 코드 해석 | | SSI 해석 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Fx (MN) | Mx (MN·m) | Fx (MN) | Mx (MN·m) | Fx (MN) | Mx (MN·m) |
| Bottom | 上 | 603.07 | 17167.28 | 996.89 | 29397.98 | 741.139 | 18397.67 |
| 결과 차이 (%) | | - | - | 39.5 | 41.6 | 18.6 | 6.7 |

표 2.9.16의 결과 비교로부터 코드 해석과 기존 해석의 결과가 약 40 % 정도의 차이를 보이며, 코드 해석에 의한 결과가 기존 해석의 결과보다 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 개략계산에 의한 코드 해석이 기존 해석보다 안전율을 더 높게 고려하였기 때문에 나타난 결과로 보이며 또한 기존 beam stick 모델의 경우, 외조 탱크 하부를 지반에 고정하여 모델링함으로써 수평력과 모멘트가 전달되는 과정에서 지진 단면력이 손실되어 나타난 결과로 보인다. 즉, 코드 해석이 복잡한 해석 과정을 거치는 기존 해석에 비하여 노력과 시간 면에서 유리하나 다소 보수적인 설계가 될 수 있다. 그러나 해석 결과의 경향이 합리적이므로 기존 해석 대신 코드 해석을 이용하여 개략적인 지진 단면력을 산출하여도 무방할 것으로 판단된다. 또한 표 2.9.16의 결과 비교로부터 기존 해석과 SSI 해석의 결과 차이가 밑면 전단력의 경우 약 18% 정도, 모멘트의 경우 약 7% 정도의 차이를 보였다. 해석 결과로부터 SSI 해석은 코드 해석에 비하여 단면력이 크게 감소되는 것으로 나타났다. 이는 지반과 구조물의 상호작용 효과에 의하여 단면력이 증감될 수 있음을 보여준다. 결국 단면력의 감소는 LNG 탱크의 내진 설계시 경제적으로 유리할 수 있을 것으로 판단된다. 결과적으로 기존 해석과 코드 및 SSI 해석 결과를 비교하였을 때, 기존 해석에 의한 결과가 가장 작게 나오며, 코드 해석 결과가 가장 크게 나타난다. SSI 해석의 결과는 지반 강성 및 실제 파일과 지반의 상호 작용을 합리적으로 반영함으로써 기존 해석과 비교시 그 결과가 증가 혹은 감소 할 수 있으며, 본 연구에서는 기존 해석보다 다소 증가한 결과를 보였다. 또한 코드 해석의 경우 간단한 수계산으로 이루어지기 때문에 안전율을 가장 크게 고려하고 있기 때문에 해석 결과가 가장 크다.

라. 결론

지진해석의 개선 결과 기존 방법에서 부가보를 개선하여 지진해석을 수행하면 지진에 의해 발생하는 지진 단면력의 감소로 기존 beam-stick 방법 보다 효율적인 단면 설계가 가능하여 경제성 측면에서 이점이 될 것으로 보인다. 또한 코드에 의하여 지진력을 계산하면 복잡한 해석 과정을 거치는 기존 해석에 비하여 노력과 시간 면에서는 유리하나 결과적으로 다소 보수적인 설계가 될 수 있다. 그러나 해석 결과의 경향이 합리적이므로 코드 해석 방법은 개략적인 지진 단면력을 산출하는 경우에 사용 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 SSI 해석으로 지반과 구조물의 상호작용을 해석 모델에 반영하여 실제와 부합하는 해석이 가능하며, 코드 해석에 비하여 단면력이 크게 감소하는 결과로부터 LNG 탱크 내진 설계 시 SSI 구현 방법으로 개선할 경우 기존 설계에 비해 더 합리적인 설계가 이루어질 것으로 판단된다.

# 10절. 특수 지진 해석기법의 적용성 검토에 관한 연구

## 1. 연구 목적 및 동향

유체저장탱크는 석유, LNG 등의 유체를 저장하는 중요한 사회기반시설이다. 저장탱크의 용량은 유체수요의 증가에 따른 시공관련 기술의 발전으로 인하여 점차 대형화되는 추세이다(전세진 외 2002). 이러한 구조물의 대형화로 인하여 유체저장탱크의 파괴는 그 자체의 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 폭발, 화재 등으로 인한 환경파괴나 인명피해와 같은 재해를 발생시킨다. 또한 최근에는 한반도에서 지진의 발생빈도가 증가함에 따라 유체저장탱크의 내진 건전성에 대한 관심이 높아지고 있다(조경환 1998, 김승억, 최동호, 이동원 2000, 김재관, 이진호, 진병무2000, 양태석, 박재균, 김재관 2007). 지진과 같은 외부 동적하중에 의한 유체저장탱크의 응답은 구조물의 독립적 거동으로 나타나는 것이 아니라 유체와 구조물의 접촉을 통해 복합적인 영향으로 인하여 그 양상이 복잡하게 된다. 그러므로 유체저장탱크의 보다 실질적인 동적거동을 파악하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용 효과가 고려된 동적해석이 실시되어야 한다. 이러한 목적을 가지고 해석적방법 및 유한요소해석, 경계요소해석과 같은 수치해석 방법을 이용한 상호작용 해석이 수행되어 왔다. 이처럼 유체저장탱크의 해석방법은 발달되었으나 설계단계에서는 시간과 비용의 제약으로 인하여 이를 도입하는데 문제점이 있다. 그러므로 내진설계에서는 유체와 구조물의 복잡한 상호작용을 고려하여 Housner와 Haroun의 이론을 적용한 단순화된 모델들이 널리 사용되고 있다. 이들 모델은 유체의 거동을 대류성분(convective part)과 충격성분(impulsive part)의 집중질량으로 단순화한다. 하지만 현재 내진설계에서 사용되는 단순화 모델은 유체와 구조물의 상호작용 및 탱크벽체의 유연성을 완벽하게 반영하고 있지 못하며, 대용량화 되어가는 저장탱크의 반지름의 증가 등으로 인하여 적용성이 점차 감소되고 있다. 또한 해석대상을 단순화하는 과정에 대한 기준이 미비하여 정확도에 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 지진하중을 받는 유체저장탱크의 동적거동을 집중질량 모델과 3차원 해석모델을 통해 현재 내진설계에서 사용되는 단순화 모델의 문제점을 분석한다. 이를 통해 설계시 단순화 모델의 정확도 향상을 위한 추가적인 내진설계변수 산출하고, 이를 대형구조물의 실제로 적용하여 유체저장탱크의 대형화에 따른 동적거동특성을 파악한다.

### 가. 연구목적

유체저장탱크에 지진과 같은 동적하중이 가해질 경우 구조물의 바닥전단력, 전도모멘트. 탱크벽체모멘트 등의 증가로 인하여 구조물을 파괴에 이르게 할 수 있다(안성문, 최인길, 전영선 2005, 양태석, 박재균, 김재관 2007). 외부동적하중에 의한 유체저장탱크의 거동은 구조물의 독립적 거동으로 나타나는 것이 아니라 유체와 구조물의 접촉을 통해 복합적인 영향으로 인해 단일 구조물과는 다른 응답특성을 보이기 때문이다. 이러한 유체저장탱크의 정확한 동적거동을 파악하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용 해석이 필요하다. 유체와 구조물 상호작용계의 지배방정식을 구성하고 이를 만족하는 해석적인 해를 구하는 것은 어렵다. 그러므로 수치해석으로 접근하여 해석하는 것이 효과적인 방법이다. 유한요소해석은 일반적으로 통용되는 수치해석 방법 가운데 하나로서 뛰어난 적용성으로 인해 각종 공학적 문제의 수치

해법으로 사용되고 있다(Edwards 1969, 이창근 1985). 그러나 유한요소를 이용해 유체를 모형화할 경우 유체내부까지도 이산화해야 하므로 많은 수의 요소가 필요하여 비효율적이다. 따라서 설계단계에서 단면력 산출을 위한 해석에서는 문제의 차원을 한 단계 낮게하여 자유도를 줄일 수 있는 단순화 모델이 사용된다. 이러한 모델은 유체의 거동을 대류성분(convective part)과 충격성분(impulsive part)의 집중질량으로 단순화한다. 하지만 단순화 모델은 유체와 구조물의 상호작용 및 탱크벽체의 유연성을 완벽하게 반영하고 있지 못하고, 대용량화 되어가는 저장탱크에 대한 적용성이 점차 감소되는 추세이다(진병무, 전세진, 김영진 2004). 또한 유체와 구조물의 단순화 과정에 대한 기준이 미비하여 동적거동에 대한 정확한 응답을 기대하기 힘들지만, 설계단계에서는 시간과 비용을 절약할 수 있는 단순화 모델이 필요하다.

나. 연구동향

유체저장 구조물의 단순화 모델에 대한 연구는 Hoskins와 Jacobsen이 구조물을 강체로 가정하고 유체의 비압축성 가정하여 지반의 횡방향 운동에 대한 유체의 압력을 수치해석 방법과 실험을 통해 해석한 것으로부터 시작되었다(Hoskins and Jacobsen 1934). 그 후 Housner는 한 가지 성분으로 적용되었던 기존의 유체의 동압력을 벽체와 함께 운동하는 충격성분과 자유수면의 슬러싱 운동에 관련된 대류성분으로 분리하여 산출하는 간략해법을 제시하였다(Housner 1975). 그러나 1964년 Niigata 지진, Alaska 지진, 1966년 Parkfiled 지진 등에서 이러한 방법으로 벽체의 유연성이 고려되지 않고 설계된 저장탱크가 지진하중에 의해 큰 손상을 받은 것으로 밝혀졌다. 이에 Veletsos는 간단한 보의 휨 모델을 이용해 구조물을 모형화하고 유체저장 구조물의 동적응답을 해석하였다(Veletsos 1974). 그 결과 구조물을 강체로 가정하는 것은 유체와 구조물의 상호작용을 적절하게 반영하지 못하기 때문에 유체동압력을 과소평가할 수 있다는 결론을 내렸다. 이 후 유체와 구조물 사이의 상호작용에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다.

Veletsos와 Yang은 유체의 운동을 속도 포텐셜을 이용하여 나타내고, 구조물의가정한 모드형상에 Galerkin 방법을 적용해 유체-구조물 상호작용계의 지배 운동방정식을 유도하는 근사해법을 제시하였다(Veletsos and Yang 1976). Fischer는 유체의 부가질량 및 충격성분질량을 구한 후 반복순환 방법을 이용해 유체와 구조물의 상호작용을 해석하는 방법을 제시하였다(Fischer 1979). 이 후 Haroun과 Ellaithy는 비점성, 비압축성 유체의 운동을 표현하는 속도 포텐셜로부터 수평, 수직, 회전운동에 의한 유체동압력 및 전도모멘트 등을 근사적으로 산출할 수 있는 역학적 모델을 개발하였다(Haroun and Ellaithy 1985). 그러나 이러한 해석적 방법은 자유수면 슬러싱에 의한 대류압력성분을 무시하고 충격압력성분만 고려하여 구조물과의 상호작용을 고려했다는 단점이 있다(어준 2004). 유체저장 구조물의 동적거동 해석을 유한요소 해석방법으로 수행한 최초의 연구는 Edwards가 구조물을 축대칭 요소로 모형화하고 유체의 영향은 부가질량행렬을 이용해 고려한 것이다(Edwards 1969). Nash 등은 축대칭 유한요소와 부가질량 접근법을 이용하여 원통형 탱크의 모드와 주파수를 구하였다(Nash et al. 1978). 이 후 Haroun은 경계해법을 사용해 유체의 부가질량행렬을 계산한 후 축대칭 유한요소에 의해 얻어진 구조물의 행렬에 연계하는 방법을 제안했고(Haroun 1980), Housner와

함께 횡방향 지진하중이 가해진 원통형 유체저장탱크내부에 작용하는 유체동압력을 경계적분과 원통형 탱크의 축대칭 모드형상에 기초한 수식에 의해 산출하였다(Haroun and Housner 1981). 그 후로 Balendra 등은 유체의 거동을 속도 포텐셜을 이용하여 표현하는 Laplace 방정식 등으로부터 부가질량을 산출하는 방법으로 유체를 유한요소로 모형화하였다(Balendra et al. 1982). 또한 Sukenobu 등은 구조물의 축방향 변형을 캔틸레버 보의 축방향 모드 형상으로 가정하고 부가질량법에 의해 구조물과 유체사이의 결합 현상을 설명하였다(Sukenobu, Tanake and Hori 1982). 이 후 Maheri 등은 강체기초에 강결된 원통형 탱크의 동특성에 대한 유체와 구조물의 상호작용에 의한 영향을 수치해석과 실험을 통해 연구하였다(Maheri and Severn 1991). 또한 Lay는 축대칭 유한요소를 이용하여 구조물을 모형화하고 유체는 경계요소를 이용하여 모형화한 후 조합하는 방법으로 원통형 유체저장 구조물의 동적거동을 해석하였다(Lay 1992). 국내의 경우, 이창근이 구조물은 축대칭 링 유한요소에 의해 모형화하고, 유체는 부가질량의 형태로 고려한 해석결과를 발표하였다(이창근 1985). 이에 박장호는 2차원 직사각형 유체저장 구조물의 거동을 시간영역에서 유한요소-경계요소 조합기법을 사용해 해석하였다(박장호 1992). 이 후 김영석이 개선된 변위형 유체 유한요소를 개발하여 유한요소에 의한 유체-구조물 상호작용을 해석하였다(김영석1992). 그 후로 박장호가 3차원 직사각형 유체저장 구조물에 유한요소-경계요소조합 해석기법을 적용하여 해석하였다(박장호 1997). 수치해석 방법을 이용해 현재까지 진행된 유체와 구조물의 상호작용에 관한 대부분의 연구는 축대칭 요소를 이용하여 원통형 탱크를 모형화하였다. 이후 조성용은 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 상호작용 프로그램을 개발하여 유체저장탱크의 동적거동을 시간 및 주파수 영역에서 해석하였다(Cho 2002). 또한 한국가스공사 개발연구원에서는 동적하중에 대한유체저장탱크의 설계 및 해석에 중요한 역할을 하는 저장탱크의 고유진동수와 모드형상을 파악하기 위한 현장실험 및 해석을 실시하였다(이강원 외 2003). 지진하중에 대한 응답에 대한 연구로는 김승억 등은 지진하중을 받는 유체저장탱크 거동에 관하여 연구하였다(김승억, 최동호, 이동원 2000). 이러한 경우 비대칭적 하중으로 인한 구조물의 실제 거동을 정확히 묘사 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 한계점을 보완하기 위하여 2차원 모델의 정확도 검증에 대한 연구가 진행되기 시작하였다. 진병무 등은 액체저장탱크의 지진응답해석모델 중 보 모델의 적용성에 대한 연구를 수행하였다(진병무, 전세진, 김영진 2004). 이 후 안성문 등은 지진의 최대 지반가속도에 따른 유체저장탱크의 파괴가능성을 확률적으로 나타내는 지진취약도 분석을 수행하였다(안성문, 최인길, 전영선 2005). 또한 양태석 등은 지진하중을 받는 유체저장탱크의 탄-소성 좌굴해석을 비선형 정적해석을 통하여 비선형 거동특성을 고찰하였다(양태석, 박재균, 김재관 2007).

다. 연구범위

본 연구에서는 유체저장탱크의 단순화 모델의 적용성을 검증하고 정확도 향상을 위한 내진설계변수 산출을 효과적으로 하기 위하여 다음과 같은 제한된 범위에서 연구를 수행한다.

(1) 해석대상은 수평방향 지반가속도만 받는 원통형 모양의 유체저장탱크로 한다.

(2) 구조물의 바닥판은 지반에 강결된 것으로 가정하며 지반과의 상호작용은 고려하지 않는다.

(3) 내부유체는 비점성, 비압축성이며 비회전 운동을 하는 이상유체로 가정한다.
(4) 구조물의 재료는 등방, 균질, 탄성체로 가정한다.

2. 유체저장탱크의 모형화

동적하중에 대한 유체저장탱크의 응답은 유체와 구조물의 상호작용으로 인하여 복잡한 양상이 나타난다. 그러므로 유체저장탱크의 정확한 동적응답을 파악하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용 효과가 고려된 동적해석이 실시되어야 한다. 이러한 목적을 가지고 상호작용 해석에 관한 연구가 수행되며 현재는 다양한 3차원 해석방법까지 발달되고 있다. 하지만 지진하중과 같은 동적하중에 대한 설계단계에서는 시간과 비용의 제약으로 인하여 이를 도입하는데 문제점이 있다. 그러므로 현재 내진설계에서는 유체와 구조물의 복잡한 상호작용을 고려하기 위하여 Housner와 Haroun의 이론을 적용한 단순화 모델이 널리 사용되고 있다. 유체저장탱크는 원통형 구조물로서 형상과 유체를 포함하지 않는 상태에서도 외부하중과 형상에 따른 고유의 거동이 나타난다. 대형화되어가는 저장탱크의 추세에 따라 유체의 거동뿐만 아니라 고체 구조물 자체의 거동도 중요시된다. 현재 유체저장탱크의 내진설계단계에서는 구조물부분 역시 집중질량으로 단순화시켜 동적해석을 실시한다. 그러므로 유체를 포함하지 않은 유체저장탱크의 단순화 모델의 정확도를 집중질량 모델과 3차원 해석모델을 이용하여 검증하고 동적응답을 분석하여 문제점을 파악한다.

가. 수치해석 일반사항

유체를 포함하지 않는 완전저장형식 탱크의 외부탱크에 대한 동적거동을 파악한다. 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 단순화 모델과 3차원 모델로 해석하였다. 해석대상의 제원 및 물성값은 표 2.10.1과 같다(한국가스공사 2008).

표 2.10.1 해석대상의 제원 및 물성값

| 제원 | | 단위 | 값 |
|---|---|---|---|
| 외부탱크 | 반지름 | m | 43.40 |
| | 높이 | m | 지붕 11.38 / 벽체 40.10 |
| | 두께 | m | 지붕(~51.48m)* 0.60<br>링빔(~40.10m)* 1.50<br>벽체(~36.90m)* 0.75<br>벽체(~7.50m)* 0.86<br>벽체(~4.00m)* 1.04<br>벽체(0~1.50m)* 1.16<br>바닥판 2.00 |
| | 밀도 | kg/m3 | 2,500 |
| | 콘크리트 탄성계수 | MPa(MN/m2) | 지붕 및 바닥판 29,000<br>PS벽체 및 링빔 31,750 |
| | 포아송비 | - | 0.20 |

(1) 집중질량 모델

내진설계단계에서는 유체저장탱크의 동적거동을 해석하기 위하여 구조물을 집중질량과 보요소로 단순화하여 모델링한다. 외부탱크의 벽체는 보요소로 변환하여고려한다. 벽체의 강성은 휨강성, 전단강성, 멤브레인강성으로 구성된다. 휨강성에 대해서는 식 1을 통하여 탱크벽체의 단면2차모멘트  를 산정하여 적용하며 $R_0$와 $R_i$은 탱크벽체의 외부와 내부 반경을 나타낸다. 전단강성과 멤브레인강성을 구성된 식 2를 이용하여 탱크벽체의 전단 단면적을 적용한다. 여기서 $A_{shear}$는 전단 단면적, $v$는 포아송비, $R_w$은 탱크벽체의 반경, $H_w$는 탱크벽체의 높이, $k_{shear}$는 전단계수(shear factor), $k_{membarne}$은 멤브레인계수(membrane factor)이다.

$$I = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{4} \qquad (1)$$

$$A_{shear} \approx \frac{A(1+v)}{6(k_{shear} + k_{membrane})} \qquad (2)$$

일반적으로 전단 단면적은 전단력에 의한 변형과 관련된 조건으로 상대적으로 깊은 보라고 할 수 있는 티모센코 보(Timoshenko beam)에서는 이를 고려하여야한다. 전단 단면적은 전단응력이 작용하는 단면형상에 따라 전단 단면계수를 단면적에 곱하여 계산한다. 표 2.10.2는 단면형상에 따른 전단 단면계수를 나타낸다(Cowper 1966).

표 2.10.2 단면형상에 따른 전단 단면계수

| 단면형상 | 전단 단면 계수 |
|---|---|
| 직사각형 단면 | 0.85 |
| 원형 단면 | 0.89 |
| 사다리꼴 단면 | 0.82 |
| 박스 단면 | 0.44 |
| 파이프 단면 | 0.53 |

본 절에서는 유체저장탱크의 콘크리트 외부탱크를 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 집중질량과 보요소로 단순화시켜 모델링한다. 외부탱크를 구성하고 있는 콘크리트의 밀도를 바탕으로 부피에 대한 질량을 집중질량으로 치환하여 각 절점마다 분포시킨다. Abaqus의 보요소 중에서 티모센코 보(Timoshenko beam)요소인 B21요소를 사용하여 전단력에 대한 변형을 고려한다. 그림 2.10.6은 콘크리트 외부탱크를 집중질량과 보요소로 단순화시킨 집중질량 모델을 나타낸다. 여기서  는 집중질량으로 치환된 콘크리트 외부탱크의 질량을 나타내며 크게 바닥판, 벽체, 지붕으로 구분한다. 바닥판, 벽체, 지붕에 대한 질량은 순서대로 1번 절점, 2번에서 14번 절점, 15번 절점에 집중질량으로 치환하여 적용한다. 표 2.10.3은 집중질량으로 치환되어 보요소에 적용된 콘크리트 외부탱크의 집중질량 제원을 나타낸다. 원통형

구조물을 보요소로 변환시 고려되는 탱크벽체의 휨강성에 대한 단면2차모멘트는 바닥판, 벽체, 지붕의 각각 형상에 따라 계산된 값을 보요소의 단면정보에 입력하고, 전단강성과 멤브레인강성은 식 2.10.2를 이용하여 계산된 전단 단면계수를 적용한다. 표 2.10.4는 콘크리트 외부탱크의 휨강성, 전단강성, 멤브레인강성에 대한 계산과정을 나타낸다(한국가스공사 2008).

표 2.10.3 집중질량 모델의 집중질량 제원(200,000 kL급, 유체 미포함)

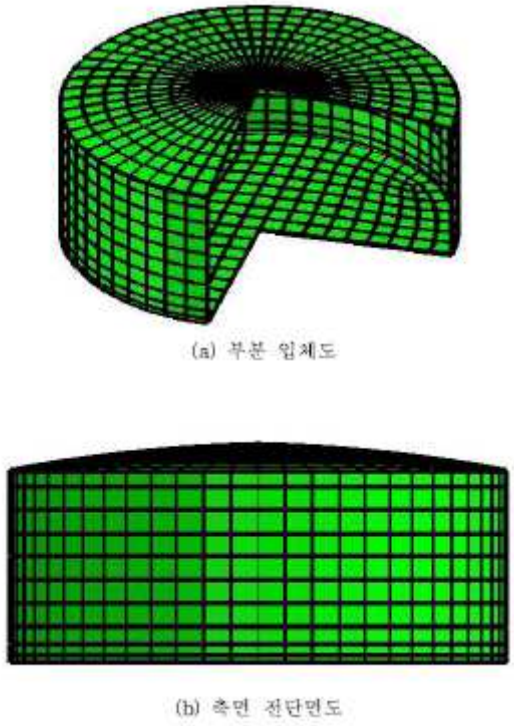
| 위치 | 절점 번호 | 질량 |
|---|---|---|
| 바닥판 | 1 | 2.62E+07 |
| 벽체 | 2~14 | 2.30E+07 |
| 지붕 | 15 | 1.18E+07 |
| 콘크리트 외부탱크질량 합계 | | 6.10E+07 |

표 2.10.4 집중질량 모델의 강성 제원(200,000 kL급, 유체 미포함)

| 위치 | 요소 번호 | 강성 | |
|---|---|---|---|
| 바닥판 | 1 | $A=\pi\times43.40^2$ | $=5890.14\ m^2$ |
| | | $A_{shear}=A$ | $=5890.14\ m^2$ |
| | | $I=\pi\times43.40^4/4$ | $=2.76E+06\ m^4$ |
| 벽체 | 2 | $A=\pi\times(42.45^2-41.30^2)$ | $=302.57\ m^2$ |
| | | $A_{shear}=0.36\times A=0.36\times302.57$ | $=108.93\ m^2$ |
| | | $I=\pi\times(42.45^4-41.30^4)/4$ | $=2.65E+05\ m^4$ |
| | 3 | $A=\pi\times(42.34^2-41.30^2)$ | $=273.27\ m^2$ |
| | | $A_{shear}=0.36\times A=0.36\times273.27$ | $=98.38\ m^2$ |
| | | $I=\pi\times(42.34^4-41.30^4)/4$ | $=2.39E+05\ m^4$ |
| | 4 | $A=\pi\times(42.16^2-41.30^2)$ | $=225.49\ m^2$ |
| | | $A_{shear}=0.36\times A=0.36\times225.49$ | $=81.18\ m^2$ |
| | | $I=\pi\times(42.16^4-41.30^4)/4$ | $=1.96E+05\ m^4$ |
| | 5~12 | $A=\pi\times(42.05^2-41.30^2)$ | $=196.39\ m^2$ |
| | | $A_{shear}=0.36\times A=0.36\times196.39$ | $=70.70\ m^2$ |
| | | $I=\pi\times(42.05^4-41.30^4)/4$ | $=1.71E+05\ m^4$ |
| | 13 | $A=\pi\times(42.80^2-41.30^2)$ | $=396.31\ m^2$ |
| | | $A_{shear}=0.36\times A=0.36\times396.31$ | $=142.67\ m^2$ |
| | | $I=\pi\times(42.80^4-41.30^4)/4$ | $=3.50E+05\ m^4$ |
| 지붕 | 14 | $A$ =12번 요소와 동일 | $=196.39\ m^2$ |
| | | $A_{shear}$ =12번 요소와 동일 | $=70.70\ m^2$ |
| | | $I=0.5\times\pi\times(41.30^4)/4$ | $=1.14E+06\ m^4$ |

(2) 3차원 해석모델

본 절에서는 유체저장탱크의 콘크리트 외부탱크를 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 3차원으로 모델링한다. 표 2.10.1에 해석대상의 제원 및 물성값을 바탕으로 쉘(shell)요소인 S4R요소를 사용한다. 그림 2.10.1은 콘크리트 외부탱크의 3차원 해석모델을 나타내며 1372개의 요소로 구성된다.



(a) 부분 입체도

(b) 측면 전단면도

그림 2.10.1 3차원 해석모델

나. 지진응답 해석

집중질량 모델 및 3차원 해석모델로 모델링한 콘크리트 외부탱크의 지진하중에 대한 거동을 파악한다. 가진하중은 그림 2.10.2의 El Centro 지진의 남북방향 성분을 데이터로 사용하여 시간이력해석을 한다. 시간이력해석은 구조물에 동적특성과 가진 하중에 대하여 임의의 시간에 대한 반력, 변위와 같은 구조물의 동적거동을 계산하는 것이다. 콘크리트 외부탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판은 지반에 강결된 가정에 따라 지반가속도와 동일한 가속도를 갖는다. 시간이력해석을 통한 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥전단력, 바닥전도모멘트, 상대변위을 비교하여 지진하중에 대한 동적거동을 파악한다. 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 해석결과를 바탕으로 내진설계단계에서 단면력 산출을 위하여 사용되는 집중질량 모델의 문제점을 파악하고 적용성을 검토한다.

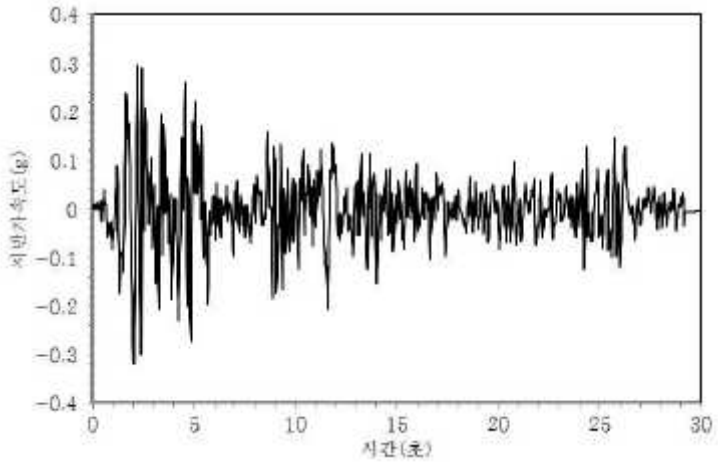



그림 2.10.2 El Centro 지진의 남북방향 성분

집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판에 X축 방향으로 가해진 El Centro 지진하중에 대한 동적거동 파악은 최대전단력, 최대모멘트, 상대변위 비교를 통하여 수행한다. 2차원 모델인 집중질량 모델에서 최대전단력과 최대모멘트는 바닥판 부분에서 반력으로 산출한다. 그림 2.10.3은 3차원 해석모델의 최대전단력과 최대모멘트 산정방법을 설명하기 위한 바닥판 절점형상이다. 3차원 해석모델에서 최대전단력은 바닥판 절점들의 X축 방향의 반력을 합산하여 계산한다. 최대모멘트산정의 경우는 그림 2.10.3에서 점선이 나타내는 Z축을 기준으로 동일한 거리에 있는 바닥판 절점들의 Y축 방향 반력을 합산 후 Z축에 대한 모멘트팔 크기의 거리를 곱하여 계산한다. 지진하중에 대한 상대변위는 각각의 모델의 바닥판 절점 변위와 바닥판을 기준으로 20m 높이의 탱크벽체 절점변위의 차이로 산정한다. 집중질량 모델에 대한 지진해석은 전단변형을 고려하지 않은 모델과 전단 단면계수를 적용한 두 가지 모델을 통하여 수행한다. 표 2.10.6은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 El Centor 지진에 대한 동적응답을 나타낸다. 바닥판에서의 최대전단력과 최대전도모멘트는 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델이 3차원 해석모델에 대하여 28.94 %와 24.43 %의 오차를 갖고, 전단 단면계수를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델은 12.01 %와 11.09 %의 오차를 갖는다. 벽체의 최대 상대 변위를 비교하였을 경우 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델은 3차원 해석모델에 대하여 69.57 %의 오차율을 갖으며 약 3배 이상의 작은 값이 나타난다. 이에 반해 전단변형을 고려한 집중질량 모델의 경우에는 3차원 해석모델에 대하여 22.26 %의 오차율을 갖으며 근소하게 큰 값이 나타난다. 그러므로 내진설계단계에서는 전단 단면계수를 적용하여 보요소로 단순화된 탱크벽체의 전단변형을 고려한 집중질량 모델에 적용이 타당하다. 하지만 최대전단력과 최대전도모멘트와 비교하여 최대상대변위의 오차율이 약 2배 정도 크게 발생하므로 이에 관한 추가적인 검토가 필요하다. 그림 2.10.4, 그림 2.10.5, 그림 2.10.6은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판에서의 지진응답에 대하여 모든 최대값이 발생한 10초까지 나타내는 그래프이다. 지진의 대한 최대응답 이외에 구간에서도 전단변형을 고려한 집중질량 모델과 3차원 해석모델과 유사한 응답이 나타난다.

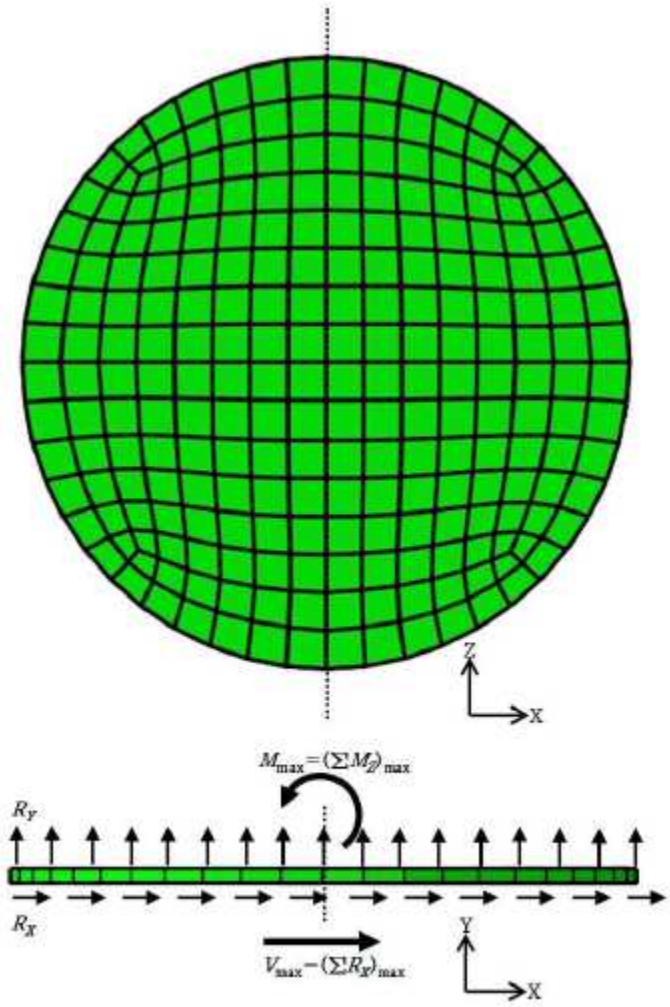



그림 2.10.3 3차원 해석모델의 바닥판 절점(200,000 kL급, 유체 미포함)

표2.10.5 지진응답 해석결과

| 해석모델 | 집중질량 모델Ⅰ[a] | 집중질량 모델Ⅱ[b] | 3차원 해석모델 |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[c] | 2.47E+08 | 3.06E+08 | 3.47E+08 |
| 오차율(%)[f] | 28.94 | 12.01 | 기준 |
| $M_{max}$(N · m)[d] | 7.75E+09 | 1.14E+10 | 1.03E+10 |
| 오차율(%)[f] | 24.43 | 11.09 | 기준 |
| $d_{max}$[e] | 1.26E-03 | 5.07E-03 | 4.15E-03 |
| 오차율(%)[f] | 69.57 | 22.26 | 기준 |

[a] 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

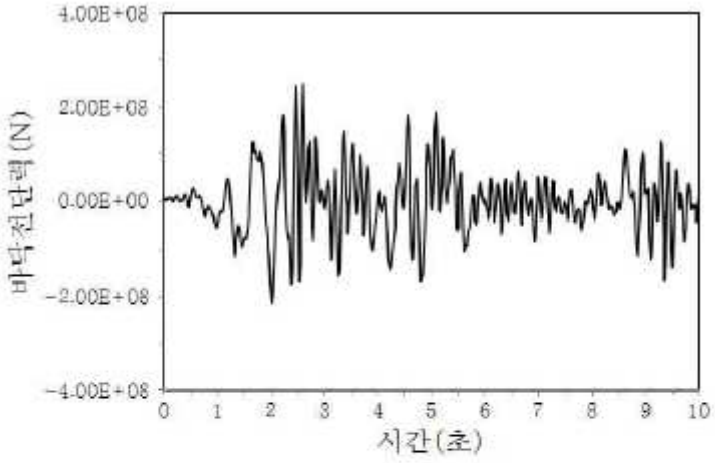
[b] 전단 단면계수 0.36을 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델

[c] 바닥판에서의 최대전단력(N)

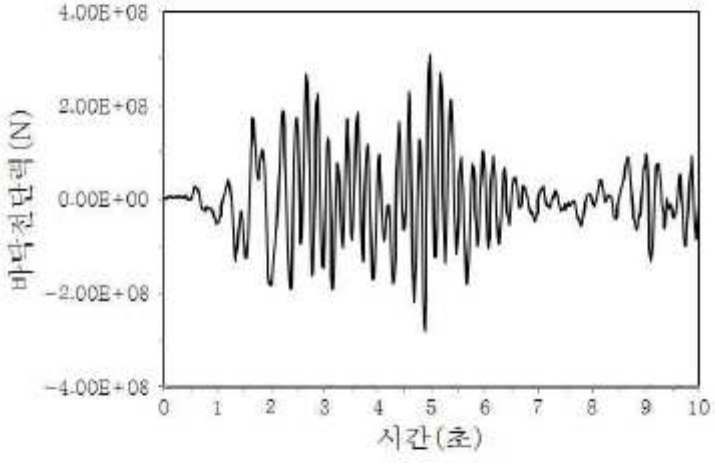
[d] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N · m)

[e] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

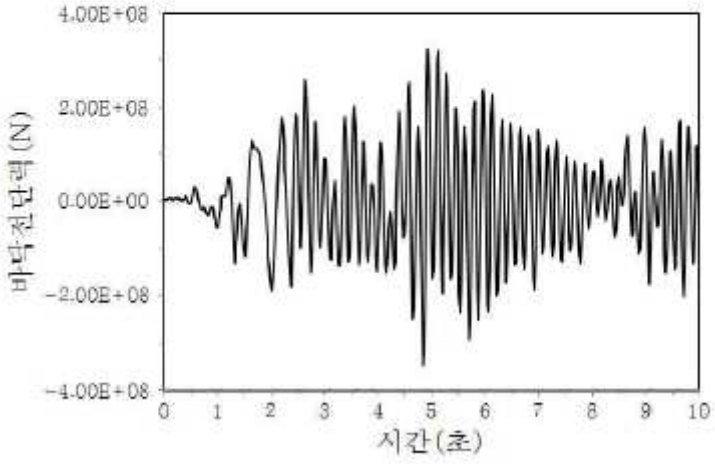
[f] 오차율(%)=(｜기준값-해석값｜)/｜기준값｜×100




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

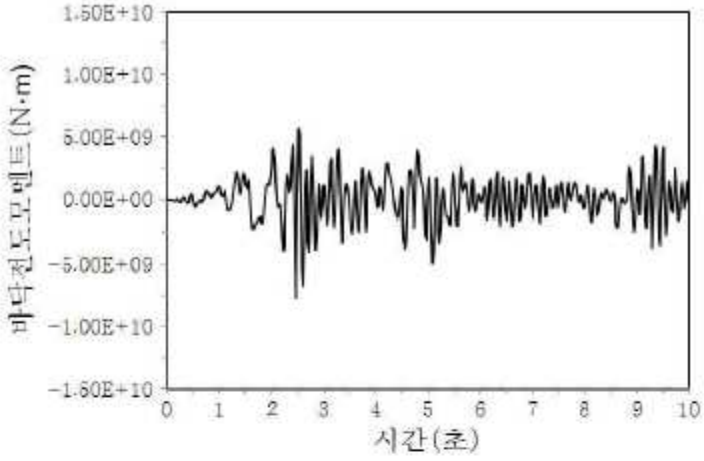



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

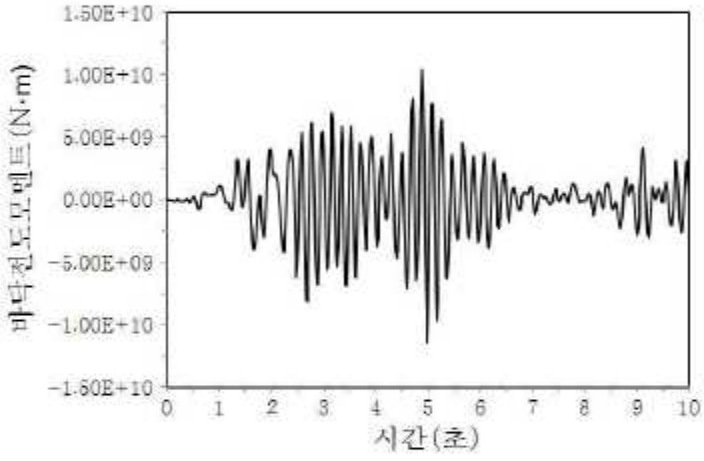



(c) 3차원해석 모델

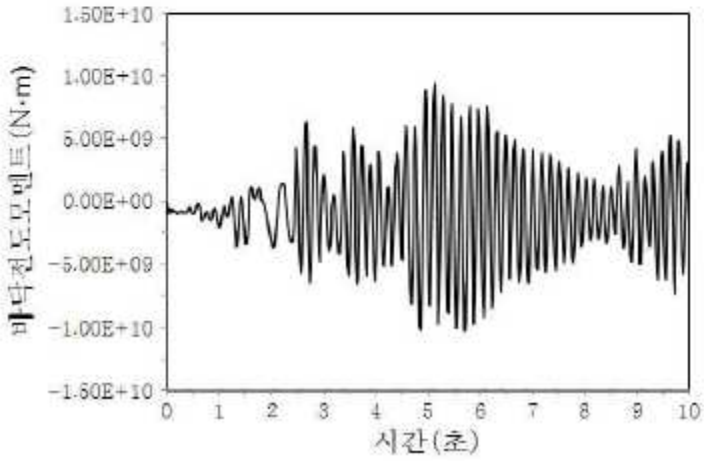
그림2.10.4 지진하중에 대한 전단력




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

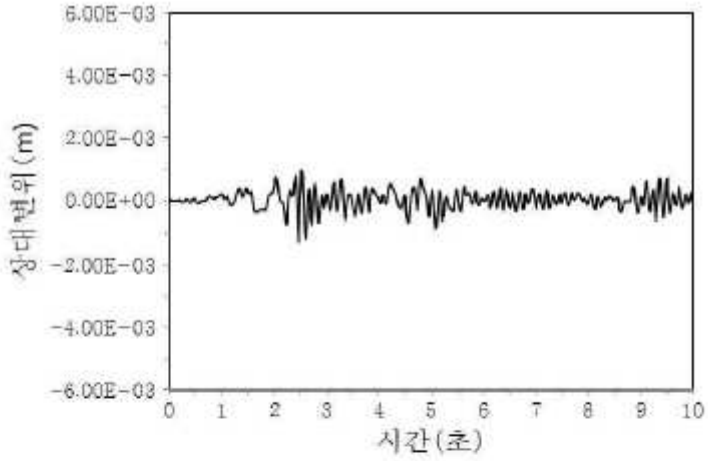



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

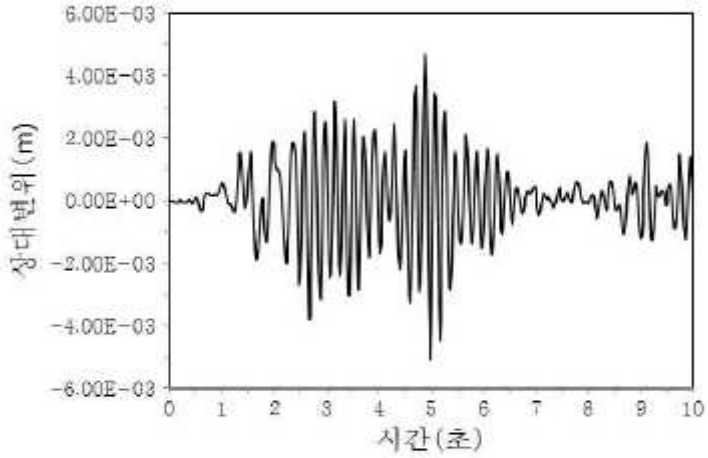



(c) 3차원해석 모델

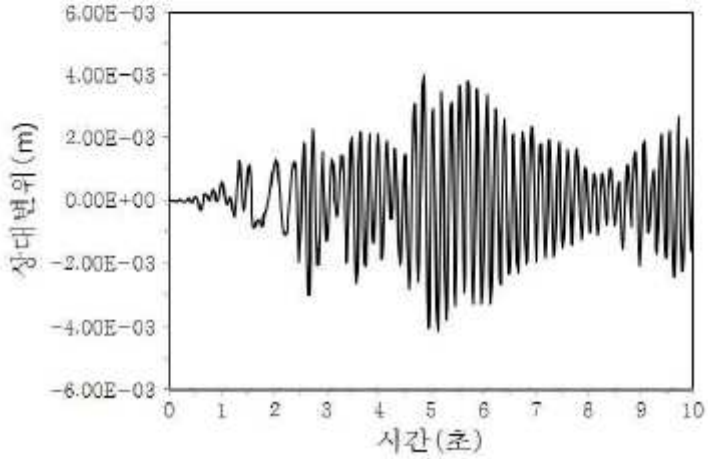
그림2.10.5 지진하중에 대한 전도모멘트




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델




(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델




(c) 3차원해석 모델

그림2.10.6 지진하중에 대한 상대변위

3. 유체와 구조물의 상호작용 해석

유체저장탱크가 외부로부터 지진과 같은 동적하중을 받게 될 경우 유체와 구조물의 상호작용으로 인해 일반적인 구조물과는 상이한 거동을 보이게 된다. 이러한 상호작용은 외부진동에 의해 발생하는 유체동수압과 구조물의 변형이 각각의 계에 입력하중으로 작용하므로 복잡한 양상을 띠게 된다. 이는 거동특성에 따라 크게 대류성분과 충격성분으로 단순화할 수 있다. 대류성분은 유체의 자유수면이 진동으로 인하여 출렁이는 슬러싱 현상에 의해 발생하게 되며, 충격성분은 저장탱크 내부의 유체가 질량으로서 구조물과 같이 운동할 때 발생하게 된다. 따라서 유체저장탱크의 지진응답을 정확하게 예측하기 위해서는 유체의 모형화 및 유체와 구조물의 경계조건이 합리적으로 적용되어야한다. 지진해석시에 유체와 구조물의 이상화 및 경계면에서의 거동을 표현하기 위한 모델링 방법은 다음과 같이 구분할 수 있다. 먼저 Housner와 Haroun의 방법과 이를 기초로 하여 현재설계에서 사용되는 집중질량 모델이 있다. 또한 최근에는 더욱 정밀한 지진응답을 얻기 위하여 3차원 해석모델에 대한 연구가 수행되고 있다. 본 장에서는 지진하중에 대한 각 해석모델의 동적응답을 비교하고 적용성을 검토한다. 이에 앞서 유체와 구조물의 상호작용 해석방식들을 소개한다.

가. 3차원 해석모델

본 절에서는 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크를 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 3차원으로 모델링한다. 이를 지진해석에 적용하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용이 고려된 3차원 해석기법에 대한 적용성 검증이 필요하다. 유체저장탱크의 지진에 대한 3차원 해석기법은 Haroun의 넓은 탱크의 지진응답과 비교하여 검증한다(Haroun 1983). 표 2.10.1은 해석대상인 Haroun의 넓은 탱크의 제원 및 물성값을 나타낸다. 3차원 해석모델에서도 이를 바탕으로 유체저장탱크는 쉘(shell)요소인 S4R요소를 사용하여 1372 개의 요소로 모델링을 하고, 저장탱크 내부의 유체는 Abaqus/Explicit의 뉴턴 유체모델과 선형 EOS(equations of state)옵션을 적용하며, 솔리드(solid)요소인 C3D4요소를 사용하여 2156 개의 요소로 모델링한다. 이는 탱크벽체의 변형과 내부유체의 비점성, 비압축성을 고려하기 위함이다. 내부유체와 저장탱크의 바닥면 및 측면요소 사이에는 Abaqus/Explicit의 suface-to-surface contact 옵션을 적용하여 지진하중에 대한 유체와 구조물의 상호작용을 고려한다. 그림 3.1은 Haroun의 넓은 탱크에 대한 앞선 3차원 해석모델을 나타낸다. 표 2.10.2는 Haroun의 넓은 탱크에 El Centro 지진을 가진하중으로 작용하였을 경우에 대하여 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용한 3차원으로 해석모델과 Haroun의 연구에서의 지진응답 결과비교를 나타낸다. 지진하중에 대한 Haroun의 연구와 3차원 해석모델의 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위 차이는 1.91 %, 1.83 %, 1.50 %이다. 이는 두 모델의 지진응답이 거의 유사하다고 볼 수 있으므로 3차원 해석모델을 이용한 지진해석의 적용성이 검증된다. Haroun의 연구와 비교하여 적용성이 검증된 3차원 해석기법을 이용하여 표 2.10.3의 내부유체의 제원 및 물성값을 바탕으로 유체를 포함하는 콘크리트 외부탱크를 모델링한다. 그림 2.10.7은 내부의 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크의 모델을 나타낸다.

표 2.10.6 3차원 해석모델의 제원 및 물성값(Haroun의 넓은 탱크)

| 제 원 | | 단 위 | 값 |
|---|---|---|---|
| 구조물 | 반지름 | m | 18.30 |
| | 높이 | m | 12.20 |
| | 두께 | m | 0.0254 |
| | 밀도 | $kg/m^3$ | 7840 |
| | 포아송비 | - | 0.3 |
| | 탄성계수 | GPa | 206.7 |
| 유체 | 높이 | m | 12.20 |
| | 밀도 | $kg/m^3$ | 1000 |
| | 점성계수 | Pa · s | 1.3E-03 |

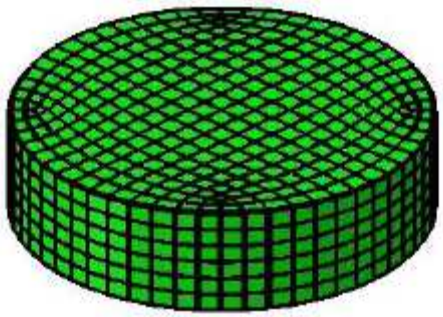


그림 2.10.7 3차원 해석모델

표 2.10.7 지진응답 해석결과(Haroun의 넓은 탱크)

| 해석모델 | Haroun의 연구 | 3차원 해석모델 | 응답 차이(%)[d] |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[a] | 4.24E+07 | 4.16E+07 | 1.91 |
| $M_{max}$(N · m)[b] | 2.13E+8 | 2.09E+8 | 1.83 |
| $d_{max}$[c] | 6.58E+3 | 6.47E+3 | 1.50 |

[a] 바닥판에서의 최대전단력(N)

[b] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N · m)

[c] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

[d] 응답 차이(%)=( | Haroun의 연구-3차원 해석모델 | )/ | Haroun의 연구 | ×100

표 2.10.8 내부유체의 제원 및 물성값(200,000 kL급)

| 제원 | 단위 | 값 |
|---|---|---|
| 반지름 | m | 41.3 |
| 높이 | m | 35.2 |
| 밀도 | $kg/m^3$ | 1,000 |
| 점성계수 | Pa・s | 1.3E-03 |

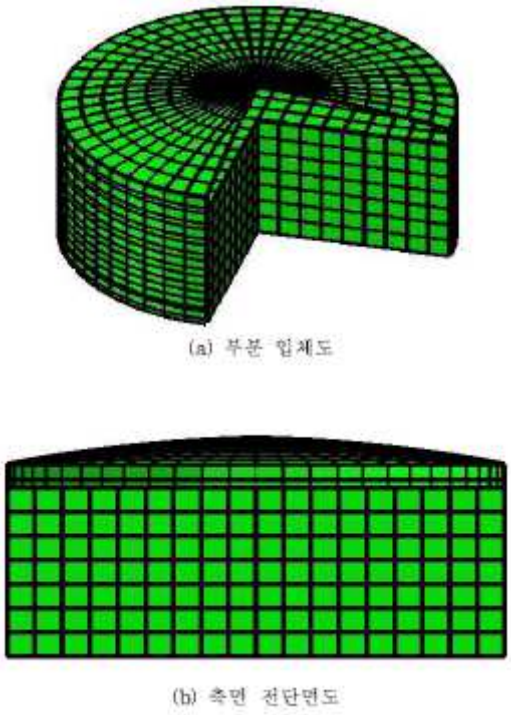



그림 2.10.8 3차원 해석모델 (유체포함)

나. 지진응답 해석

유체를 포함한 유체저장탱크의 지진에 대한 동적거동을 집중질량 모델 및 3차원 해석모델을 이용하여 해석한다. 가진하중은 그림 2.10.9의 El Centro 지진의 남북방향 성분을 사용했으며, 시간이력해석을 통하여 동적거동을 파악한다. 콘크리트 외부탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판은 지반에 강결된 가정에 따라 지반가속도와 동일한 가속도를 갖는다. 유체의 바닥면과 측면은 구조물과 구속시킴으로써 지진하중에 의한 유체와 구조물의 상호작용을 고려한다. 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크를 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥전단력, 바닥전도모멘트, 상대변위 등을 비교하여 지진하중에 대한 동적거동을 비교한다. 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 해석결과를 바탕으로, 구조물 내부에 유체가 있을 경우에 집중질량 모델의 문제점을 파악한다. 또한 내진설계단계에서 집중 질량 모델의 유체와 구조물의 상호작용 효과의 적용성 검토한다.

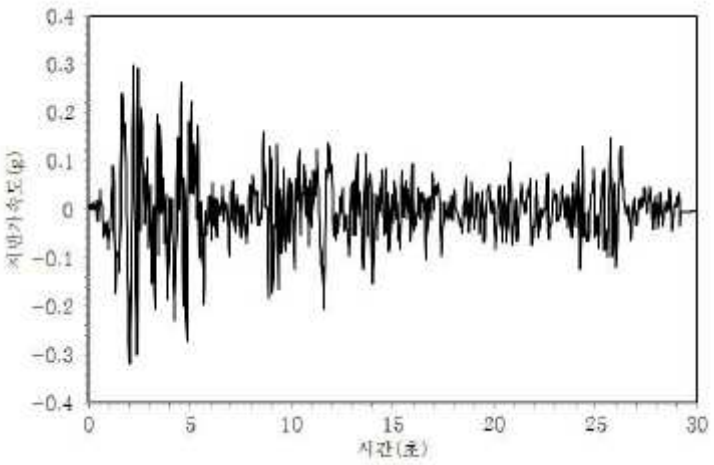



그림 2.10.9 EI Centro 지진의 남북방향 성분

유체를 포함한 콘크리트 외부탱크 바닥판에 X축 방향으로 가해진 El Centro 지진에 대한 동적거동을 최대전단력, 최대모멘트, 상대변위를 비교하여 파악한다. 2차원 모델인 집중질량 모델에서 최대전단력과 최대모멘트는 바닥판부분에서 반력으로 산출한다. 3차원 해석모델의 최대전단력과 최대모멘트 산정은 그림 2.10.8이 나타내는 3차원 해석모델의 바닥판 절점 형상을 통해 설명한다. 최대전단력의 경우 바닥판 절점들의 X축 방향의 반력들의 합을 계산한다. 최대모멘트 산정시에는 Z축을 기준으로 동일한 거리에 있는 바닥판 절점들의 Y축 방향 반력을 더한 후 그림 2.10.8에서 점선이 나타내는 Z축에 대한 모멘트팔 크기의 거리를 곱하여 계산한다. 지진하중에 대한 상대변위는 각각의 모델의 바닥판의 변위와 이를 기준으로 20m 높이의 탱크벽체의 변위차이를 계산하여 산정한다. 유체를 포함한 구조물의 내진해석을 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델과 전단 단면계수를 적용하여 전단을 고려한 집중질량 모델을 통하여 수행한다. 표 2.10.4는 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 El Centor 지진에 대한 동적응답을 나타낸다. 바닥판에서의 최대전단력과 최대전도모멘트는 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델이 3차원 해석모델에 대하

여44.57 %와 41.33 %의 오차를 가진다. 전단 단면계수를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델은 최대전단력과 최대전도모멘트에 대하여 전단 단면계수를 적용하지 않은 모델보다 작은 38.96 %와 22.50 %의 오차를 갖는다. 바닥판과 벽체의 최대상대변위는 3차원 해석모델에 대하여 전단변형을 고려하지 않은 집중질량모델의 오차율은 52.64 %로 약 2배 정도 작은 값을 갖고, 전단변형을 고려한 집중질량 모델의 오차율은 97.26 %로 약 2배 정도 큰 값을 갖는다. 즉 유체와 구조물의 상호작용에 대한 전단 단면계수를 적용한 집중질량 모델은 유체를 포함하지 않을 경우보다 상당히 보수적인 응답을 나타내므로 실제 단면력보다 최소 2배 이상의 큰 값이 산출될 수 있다. 그러므로 유체와 구조물의 상호작용을 고려한 추가적인 내진설계변수 산출이 필요하다. 그림 2.10.9, 그림 2.10.10, 그림 2.10.11은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판에서의 전단력, 전도모멘트 및 벽체의 상대변위를 모든 최대값이 발생한 10초까지 나타내는 그래프이다. 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델은 3차원 해석모델보다 큰 최대응답을 갖지만, 시간이력해석상으로 유사한 거동이 관찰된다. 반면에 전단변형을 고려한 집중질량 모델의 최대응답 값의 오차는 작지만, 3차원 해석모델보다 작은 고유진동수를 갖으며 최대응답의 발생시간에 대한 차이가 확인된다. 이는 내부유체로 인한 질량증가와 전단변형을 고려한 전단 단면계수 적용효과라고 볼 수 있다.

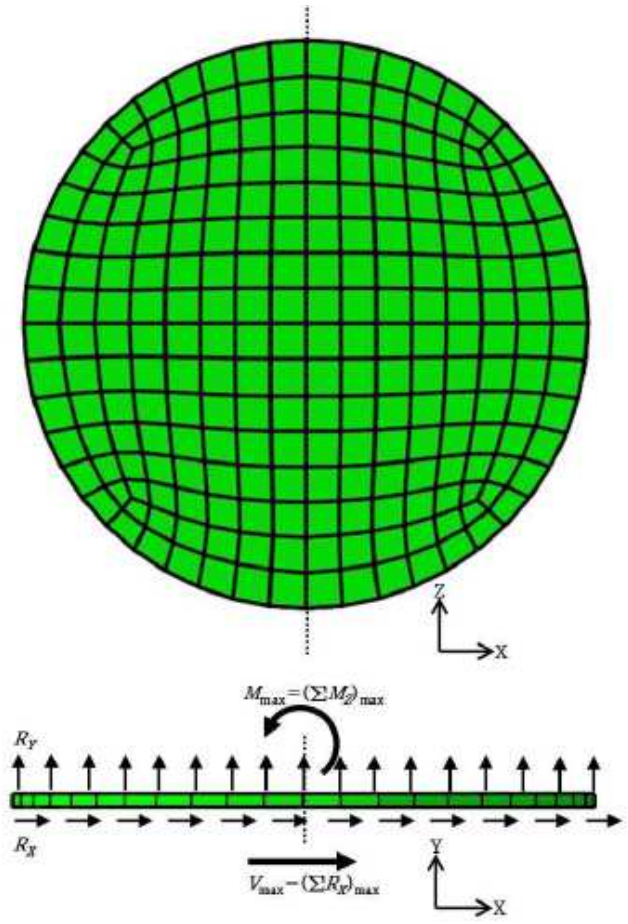



그림 2.10.10 3차원 해석모델의 바닥판 절점

표2.10.9 지진응답 해석결과

| 해석모델 | 집중질량 모델Ⅰ[a] | 집중질량 모델Ⅱ[b] | 3차원 해석모델 |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[c] | 8.35E+08 | 8.02E+08 | 5.77E+08 |
| 오차율(%)[f] | 44.57 | 38.96 | 기준 |
| $M_{max}$(N · m)[d] | 2.39E+10 | 2.07E+10 | 1.69E+10 |
| 오차율(%)[f] | 41.33 | 22.50 | 기준 |
| $d_{max}$[e] | 4.88E-03 | 2.03E-02 | 1.03E-02 |
| 오차율(%)[f] | 52.64 | 97.26 | 기준 |

[a] 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

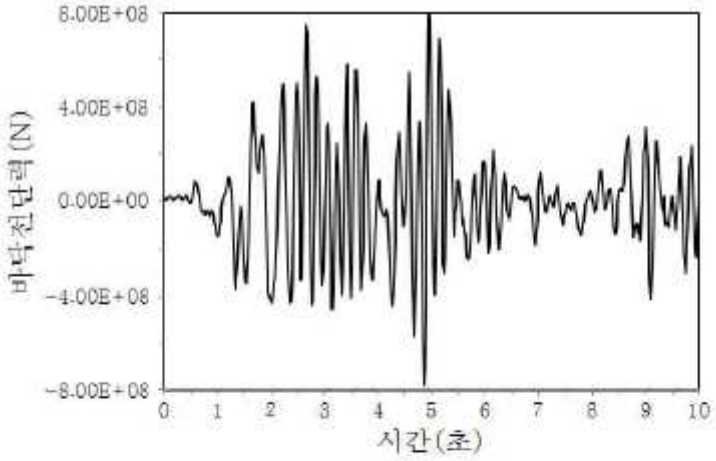
[b] 전단 단면계수 0.2를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델

[c] 바닥판에서의 최대전단력(N)

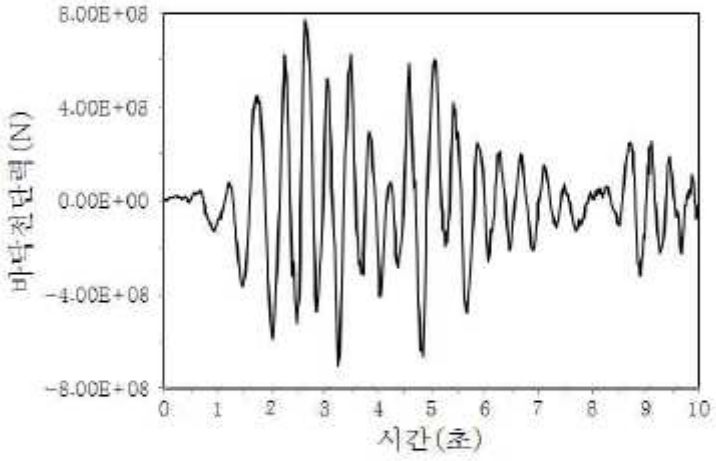
[d] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N·m)

[e] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

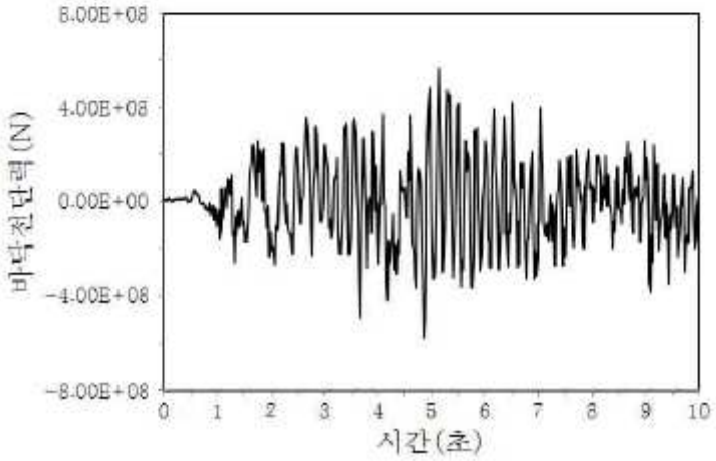
[f] 오차율(%)=(|기준값-해석값|)/|기준값| ×100




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

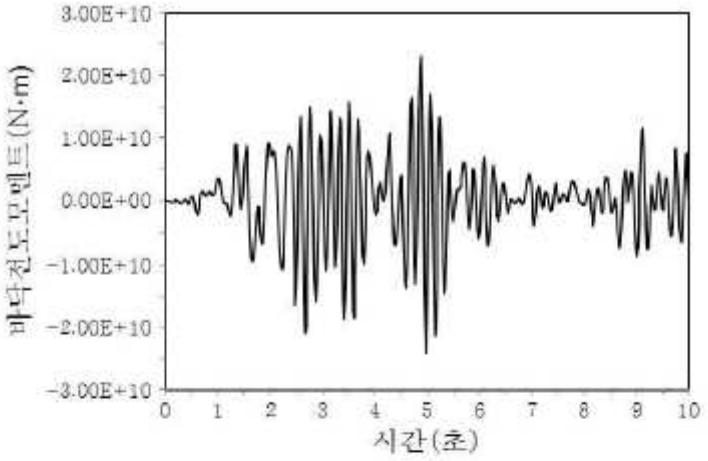



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

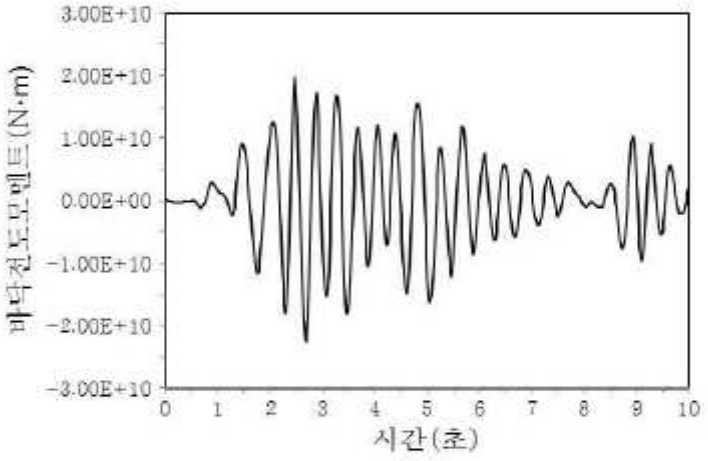



(c) 3차원해석 모델

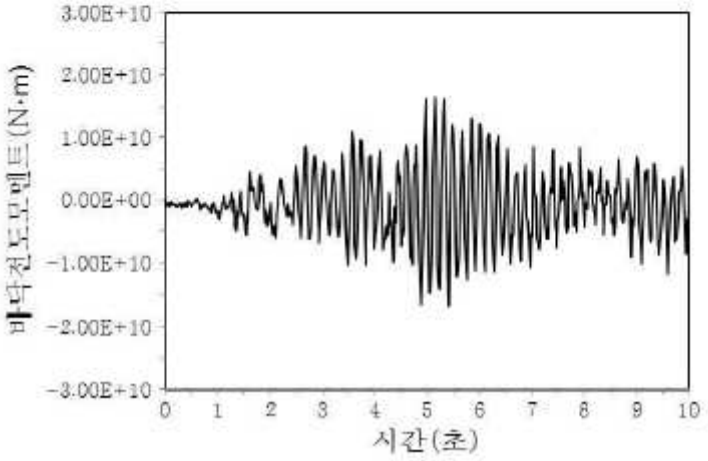
그림 2.10.11 지진하중에 대한 전단력




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

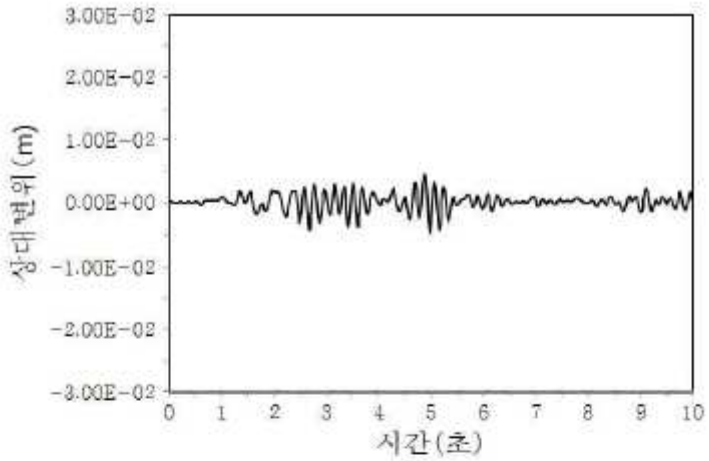



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

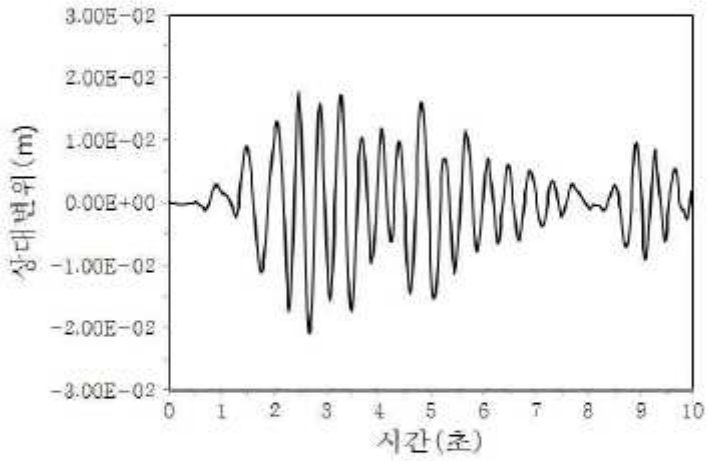



(c) 3차원해석 모델

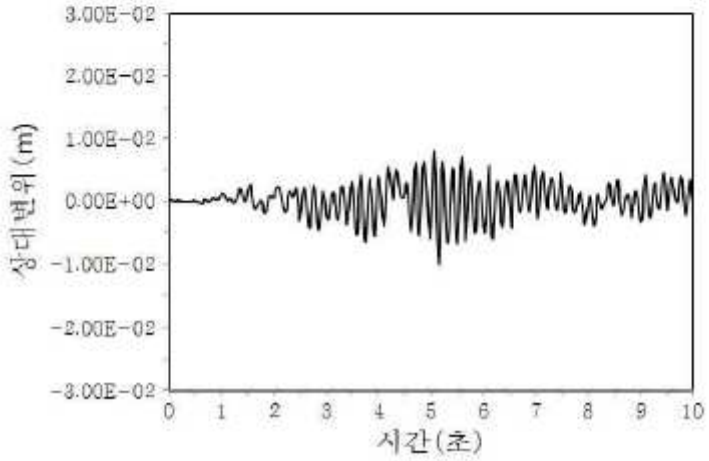
그림 2.10.12 지진하중에 대한 전도모멘트




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델




(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델




(c) 3차원해석 모델

그림 2.10.13 지진하중에 대한 상대변위

4. 단순화 모델의 적용성 검토

유체저장탱크 내부에 유체가 있을 경우, 외부에서 동적하중이 가해지면 유체와구조물의 상호작용으로 인한 복잡한 거동이 나타난다. 또한 저장탱크의 대형화에 따라 원통형 구조물은 지진하중과 같은 동적하중에 대하여 고유의 거동이 나타나므로 내부유체뿐만 아니라 구조물 자체의 동적거동도 점자 중요시된다. 본 장에서는 유체저장탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델에 대한 지진응답을 바탕으로 내진설계에서의 단순화 모델의 적용성을 검토한다.

가. 정확도 향상을 위한 내진설계변수 산출

현재 유체저장탱크의 내진해석에서 사용되는 단순화 모델은 3차원 해석모델보다 큰 지진응답이 계산된다. 따라서 벽체두께가 과다하게 설계되는 등의 문제가 발생 할 수 있다. 또한 내부유체의 질량과 전단 단면계수의 적용으로 인하여 지진응답의 시간이력에서 3차원 해석모델과 차이가 관찰된다. 그러므로 이러한 문제점을 보완하여 단순화 모델의 정확도 향상시킬 수 있는 내진설계변수 산출이 필요하다.

(1) 집중질량 개수 산출

유체를 포함한 콘크리트 외부탱크의 단순화 모델은 16개의 집중질량으로 구성된다. 여기서 보요소와 스프링으로 연결된 1개의 대류성분의 집중질량을 제외한15개의 집중질량 개수 증가에 따른 지진응답을 파악하여 적합한 집중질량 개수를 파악한다. 표 2.10.3은 집중질량 개수 15개를 기준으로 2배 간격으로 증가시켜 기존의 집중질량 개수보다 40배까지 증가된 오차율을 나타낸다. 집중질량 개수 증가에 따른 오차율에 추세를 파악하면 10배 이전에는 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차가 약 10 % 안쪽으로 증가와 감소가 나타나지만 약 10배 이상 값에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉 단순화 모델에서 집중질량 개수에 의한 오차를 줄이기 위해서는 기존의 집중질량 개수보다 10배 이상 큰 값을 사용하는 것이 타당하다.

표 2.10.10 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| 집중질량 개수 | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 기준 | -38.96 | -22.50 | -97.26 |
| 2배 | -43.47 | -21.27 | -101.39 |
| 4배 | -45.22 | -20.47 | -102.99 |
| 6배 | -46.08 | -20.58 | -103.83 |
| 8배 | -46.50 | -20.64 | -104.25 |
| 10배 | -46.46 | -20.27 | -104.19 |
| 20배 | -46.87 | -20.19 | -104.59 |
| 40배 | -46.86 | -19.91 | -104.55 |

[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100

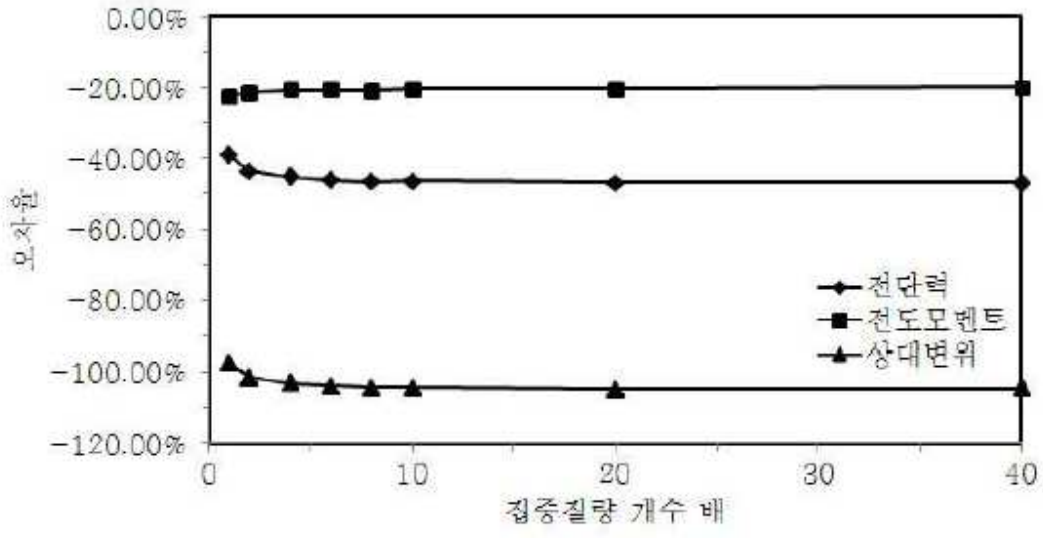



그림 2.10.14 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

(2) 전단 단면 계수 산출

앞 절에서 지진하중에 대한 응답을 비교한 결과를 통해 단순화 모델의 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위가 모두 3차원 해석모델보다 큰 값을 갖는 것을 확인했다. 특히 최대상대변위에서는 다른 두 값보다 더 큰 오차가 발생한다. 또한 내부유체의 질량과 전단 단면계수의 적용으로 인하여 단순화 모델이 3차원 해석모델보다 작은 고유진동수 갖는 것으로 관찰된다. 그러므로 내부의 유체를 포함하고 있는 단순화 모델의 전단 단면계수를 증가시키며 상대변위의 감소에 따른 지진응답의 추세를 파악한다. 집중질량 개수에 의한 오차를 줄이기 위하여 기존의 단순화 모델보다 10배 더 많은 집중질량을 사용한다. 표 4.4는 내부유체 유무에 따른 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답을 나타내고, 이를 그래프로 표현하면 그림 2.10와 같다. 양의 부호를 갖는 오차율은 단순화 모델이 3차원 해석모델보다 작은 지진응답 값을 갖는 경우이고, 음의 부호는 그 반대를 의미한다. 현재 내진설계 방식에 따라 해석대상 구조물의 유체를 포함하는 경우에는 전단 단면계수를 0.2를 사용한다. 이를 단순화 모델에 적용하였을 경우 3차원 해석모델에 대한 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율은 각각 -46.46 %, -20.27 %, -104.19 %이다. 내부의 유체를 포함하는 경우에는 단순화 모델의 모든 지진응답이 3차원 해석모델보다 큰 값을 갖는다. 특히 최대상대변위의 경우 최대전단력과 최대전도모멘트보다 3배 더 큰 오차를 가지므로 이러한 오차를 줄이기 위하여 전단단면계수에 대한 검토가 필요하다. 전단 단면계수를 증가시키며 지진응답에 대한 오차율을 파악한 결과 전단 단면계수 0.6을 적용한 경우 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율이 -28.29 %, 2.15 %, 42.97 %로 가장 작은 값을 갖는다. 내부유체를 고려하여 현재 적용되는 전단 단면계수 0.2를 적용한 경우와 비교하여 최대전단력과 최대상대변위는 약 2배 정도의 차이지만 최대전도모멘트는 약 10배 이상의 큰 차이가 발생된다. 그러므로 해석대상 구조물 내부의 유체를 포함한 경우 단순화 모델의 전단 단면계수를 0.6을 적용하는 것이 합리적이다. 그 밖에 전단 단면계수 증가에 따른 지진응답에 추세를 분석하면 최대상대변

위는 전단단면계수 0.6 이후로 수렴하는 경향을 나타낸다. 최대전단력과 최대전도모멘트의 경우에는 3차원 해석 모델에 대하여 평균 30~40 % 정도의 오차를 가지며 증가와 감소가 반복된다. 즉 내부유체를 포함하는 해석대상의 구조물의 경우 기존의 전단단면계수 0.2보다 큰 전단 단면계수 0.6을 적용하면 더 정확한 지진응답을 얻을 수 있다. 그림 2.10.15은 전단단면계수 0.6을 적용한 집중질량 모델의 지진응답의 시간이력을 나타낸다. 전단 단면계수 0.6을 적용한 집중질량 모델의 고유진동수는 그림 2.10.16, 그림 2.10.17, 그림 2.10.18에 3차원 해석모델과 유사하게 나타나지만 최대응답의 발생시간은 두 모델간의 차이가 확인된다.

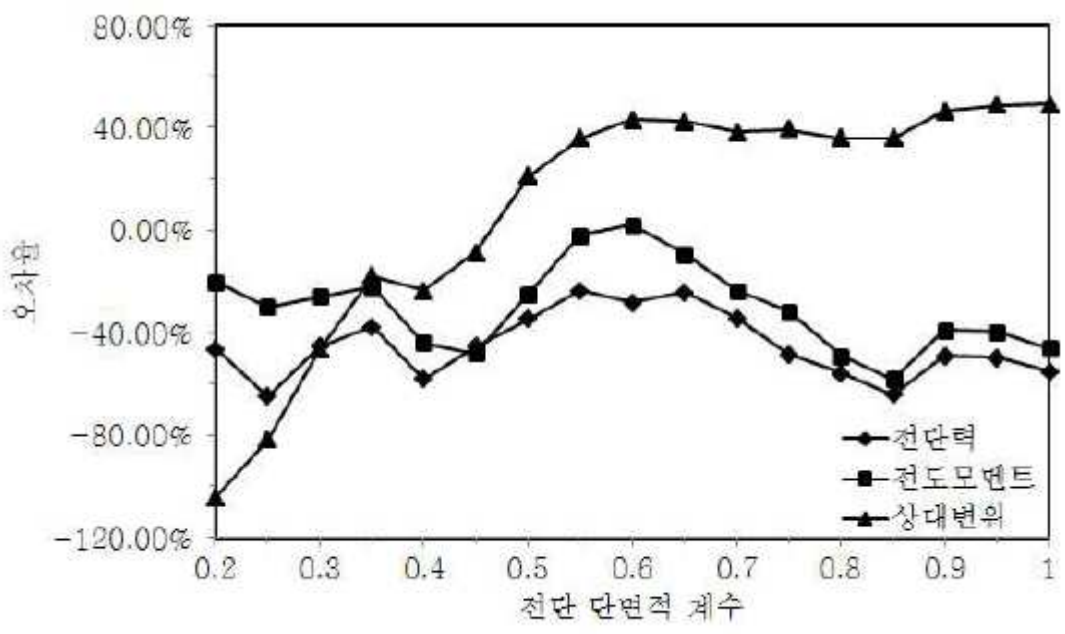
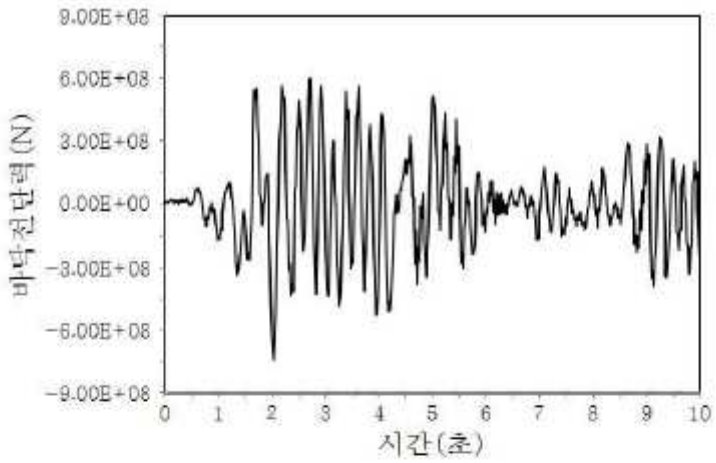



그림 2.10.15 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답

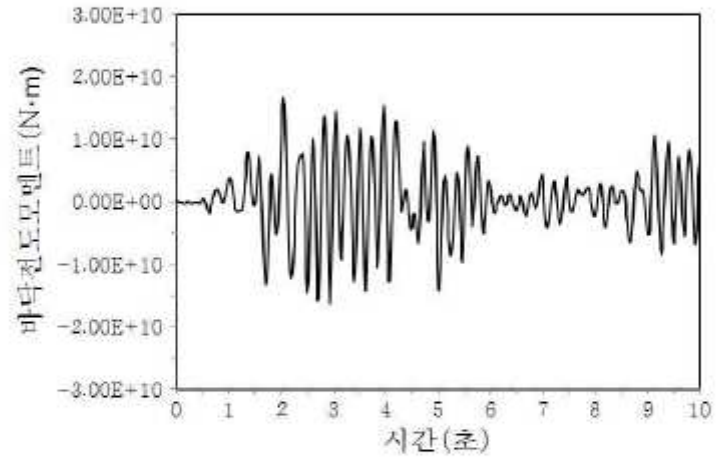
표 2.10.11 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 해석모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| 전단 단면계수 | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 0.2 | -46.46 | -20.27 | -104.19 |
| 0.25 | -65.05 | -29.89 | -81.91 |
| 0.3 | -45.46 | -26.01 | -46.74 |
| 0.35 | -37.54 | -22.25 | -17.92 |
| 0.4 | -58.31 | -44.17 | -23.59 |
| 0.45 | -45.27 | -47.97 | -8.75 |
| 0.5 | -34.62 | -24.77 | 21.17 |
| 0.55 | -23.67 | -2.02 | 36.14 |
| 0.6 | -28.29 | 2.15 | 42.97 |
| 0.65 | -24.23 | -9.31 | 42.36 |
| 0.7 | -34.15 | -23.50 | 38.51 |
| 0.75 | -48.53 | -31.64 | 39.27 |
| 0.8 | -55.82 | -49.08 | 36.04 |
| 0.85 | -64.27 | -58.25 | 36.16 |
| 0.9 | -49.25 | -38.92 | 46.36 |
| 0.95 | -49.66 | -39.71 | 48.86 |
| 1 | -55.04 | -46.10 | 49.32 |

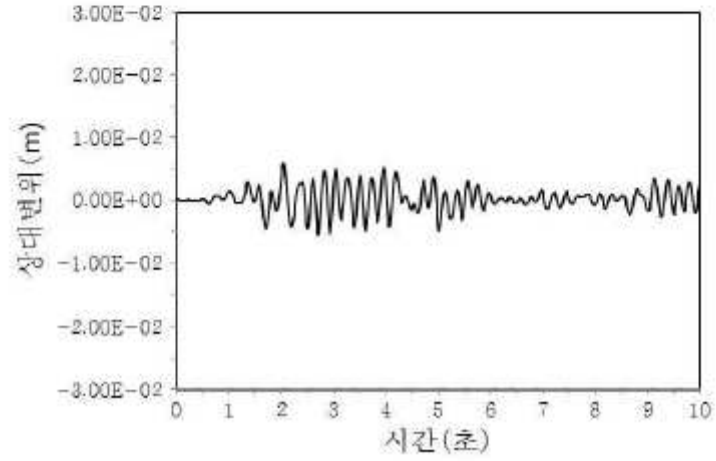
[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100




(a) 바닥판에서의 전단력




(b) 바닥판에서의 전도모멘트




(c) 바닥판과 벽체의 상대변위

그림 2.10.16 산출된 전단 단면계수에 대한 지진응답

나. 산출된 내진설계변수 적용성 검토

단순화 모델의 정확도 향상을 위하여 산출된 내진설계변수의 적용성을 270,000kL급 유체저장탱크의 지진해석을 통하여 검토한다. 본 절의 해석대상인 270,000kL급 유체저장탱크의 형상은 그림 2.10.와 같다. 표 2.10와 표 2.10은 유체저장탱크와 내부유체의 제원 및 물성값을 나타낸다. 이러한 해석대상에 대하여 앞선 3장과 동일한 지진하중과 해석기법을 적용하여 집중질량 모델과 3차원 해석모델로 지진해석을 수행한다. 전단변형을 고려한 집중질량 단순화 모델의 전단 단면계수는 해석대상에 벽체의 반경과 높이를 토대로 산정된 0.22를 사용한다. 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 비교를 바탕으로 앞 절에서 산출한 집중질량 개수와 전단 단면계수에 대한 적용성 검토는 다음과 같다.

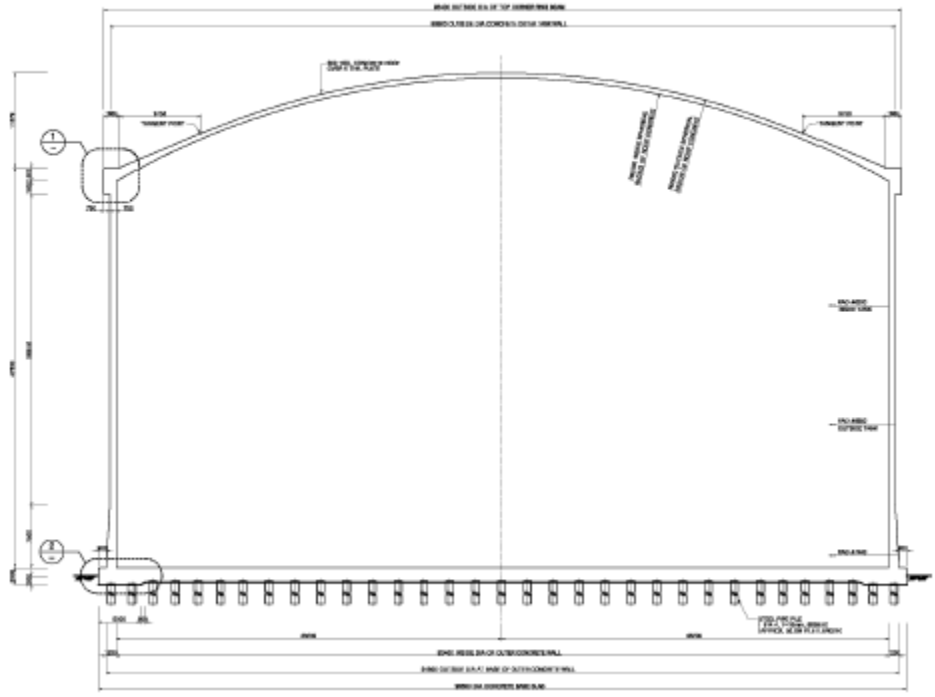


그림 2.10.17 270,000 kL급 유체저장탱크의 단면도

표 2.10.12 해석대상의 제원 및 물성값

| 제원 | | 단위 | 값 |
|---|---|---|---|
| 외부탱크 | 반지름 | m | 48.30 |
| | 높이 | m | 지붕 11.28<br>벽체 47.70 |
| | 두께 | m | 지붕(~58.98m)* 0.60<br>링빔(~47.70m)* 1.50<br>벽체(~44.50m)* 0.86<br>벽체(~7.50m)* 1.04<br>벽체(0~4.00m)* 1.16<br>바닥판 2.00 |
| | 밀도 | $kg/m^3$ | 2,500 |
| | 콘크리트 탄성계수 | $MPa(MN/m^2)$ | 지붕 및 바닥판 29,000<br>PS벽체 및 링빔 31,750 |
| | 포아송비 | - | 0.20 |

* 바닥판 위를 기준으로 각 벽체의 높이

표 2.10.13 내부유체의 제원 및 물성값

| 제원 | 단위 | 값 |
|---|---|---|
| 반지름 | m | 48.30 |
| 높이 | m | 37.70 |
| 밀도 | $kg/m^3$ | 1,000 |
| 점성계수 | Pa・s | 1.3E-03 |

(1) 산출된 집중질량 개수 적용성 검토

270,000 kL급 유체저장탱크의 단순화 모델의 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답을 파악한다. 3차원 해석모델의 지진응답에 대한 전단변형을 고려한 집중질량모델의 오차율은 표 2.10.14과 같고, 그림 2.10.18는 이를 그래프로 나타낸다. 집중질량 개수 증가에 대한 오차율의 변화를 분석하면 200,000 kL급 유체저장탱크와 동일하게 약 10배 이상 값에서 3차원 해석모델에 대한 오차가 수렴하는 것이 관찰된다. 그러므로 오차율에 영향을 미치지 않는 집중질량 개수 기준에 대한 내진설계변수의 적용성이 검증된다.

표 2.10.14 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 해석모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| 집중질량 개수 | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 기준 | -72.63 | -51.41 | -114.85 |
| 2배 | -75.62 | -49.78 | -117.16 |
| 4배 | -76.28 | -48.44 | -118.25 |
| 6배 | -76.85 | -48.34 | -118.99 |
| 8배 | -76.81 | -47.92 | -118.97 |
| 10배 | -76.66 | -47.52 | -118.84 |
| 20배 | -77.67 | -47.94 | -119.89 |
| 40배 | -77.34 | -47.50 | -119.89 |

[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100

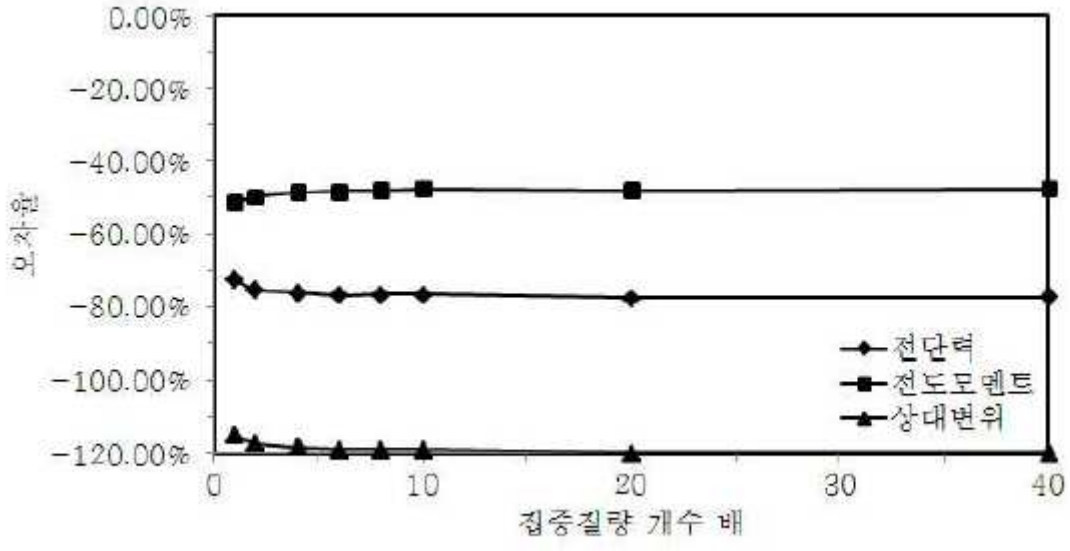



그림 2.10.18 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

(2) 산출된 전단 단면계수 적용성 검토

해석대상에 대하여 내부의 유체를 포함하는 유체저장탱크의 전단 단면계수에 대한 적용성을 검토한다. 표 2.10.15은 270,000 kL급 유체저장탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 비교를 나타낸다. 전단변형을 고려하지 않은 모델의 3차원 해석모델에 대한 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율은 순서대로 80.79 %, 51.15 %, 47.68 %이다. 전단변형을 고려한 집중질량 모델에 경우의 오차율은 각각 76.20 %, 47.15 %, 118.26 %로 최대전단력과 최대전도모멘트는 전단변형을 고려하지 않은 모델과 비슷한 오차를 갖지만 최대상대변위는 약 2배 정도 큰 값을 갖는다. 그림 2.10.19, 그림 2.10.20, 그림 2.10.21은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답의 시간이력을 나타낸 그래프이다. 지진응답의 시간이력에서 전단변형을 고려한 집중질량 모델이 3차원 해석모델보다 작은 고유진동수를 갖는 것이 관찰된다. 그러므로 200,000 kL급 유체저장탱크의 지진응답과 유사한 경향을 나타내므로 내부유체를 고려한 전단 단면계수에 대한 검토가 필요하다. 전단변형을 고려한 단순화 모델의 전단 단면계수를 증가시키며 상대변위의 감소에 따른 지진응답의 추세를 파악한 결과는 표 2.10.15와 같고, 이를 그림 2.10.16는 3차원해석모델의 대한 집중질량 모델의 오차율을 그래프로 표현한다. 이를 참고하여 전단 단면계수 증가에 따른 지진응답의 오차율을 파악한 결과 0.72를 적용한 경우 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율이 -56.57 %, -12.52 %, 45.49%로 가장 작은 값을 갖는다. 내부유체를 고려하여 현재 적용되는 0.2를 적용한 경우와 비교하여 최대전단력과 최대상대변위는 약 2배 정도의 차이지만 최대전도모멘트는 약 4배 정도의 큰 차이가 발생된다. 그러므로 해석대상 구조물 내부의 유체를 포함한 경우에는 전단 단면계수 0.72를 적용하는 것이 합리적이다. 이는 200,000 kL급 유체저장탱크의 수정된 전단 단면계수 0.6과 유사한 값으로 저장용량이 늘어남에 따른 가 증가하였다고 볼 수 있다. 그러므로 유체저장탱크의 용량에 따른 적합한 전단 단면계수의 범위를 제시하는 것이 가능하므로 전단 단면계수 산출에 대한 적용성이 검증된다. 또한 그림 4.10은 전단 단면

계수 0.72를 적용한 집중질량 모델의 지진응답을 나타낸다. 그림 2.10.19, 그림 2.10.20, 그림 2.10.21에 3차원 해석모델의 시간이력과 유사한 고유진동가 확인되지만 최대응답의 발생시간에서는 차이가 나타난다. 단순화 모델의 정확도 향상을 위하여 산출된 내진설계변수를 270,000 kL급 유체저장탱크를 통하여 적용성을 검토한 결과는 다음과 같다. 집중질량 개수에 따른 오차율의 추세에 대해서는 200,000 kL급 유체저장탱크와 마찬가지로 유체저장탱크와 마찬가지로 10배 이상의 값에서 수렴함이 확인된다. 또한 유체를 포함할 경우 270,000 kL급 유체저장탱크의 전단 단면계수인 0.22를 적용하였을 경우 200,000kL급 유체저장탱크의 경우처럼 3차원 해석모델보다 지진응답이 크게 계산된다. 이를 바탕으로 전단 단면계수증가에 따른 지진응답을 파악한 결과 0.72에서 적합한 응답이 확인된다. 이에 따라 유체저장용량에 대한 적합한 전단 단면계수의 범위를 확인하였다. 또한 270,000 kL급 유체저장탱크의 수정된 전단 단면계수 0.72를 적용한 집중질량 모델의 경우 200,000 kL급 유체저장탱크와 마찬가지로 고유진동수는 3차원해석 모델과 유사하지만 지진응답의 시간이력에서 최대응답의 발생시간에 대해서는 차이가 발생한다.

표 2.10.15 지진응답 해석결과

| 해석모델 | 집중질량 모델 I [a] | 집중질량 모델 II [b] | 3차원 해석모델 |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[c] | 1.10E+09 | 1.07E+09 | 6.09E+08 |
| 오차율(%)[f] | 80.79 | 76.20 | 기준 |
| $M_{max}$(N • m)[d] | 3.23E+10 | 3.14E+10 | 2.14E+10 |
| 오차율(%)[f] | 51.15 | 47.15 | 기준 |
| $d_{max}$[e] | 6.110E-03 | 2.55E-02 | 1.17E-02 |
| 오차율(%)[f] | 47.68 | 118.26 | 기준 |

[a] 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

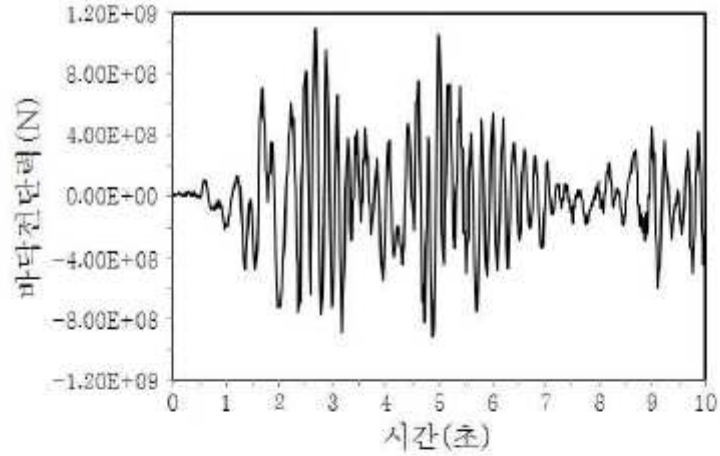
[b] (0.2, 0.22)를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델

[c] 바닥판에서의 최대전단력(N)

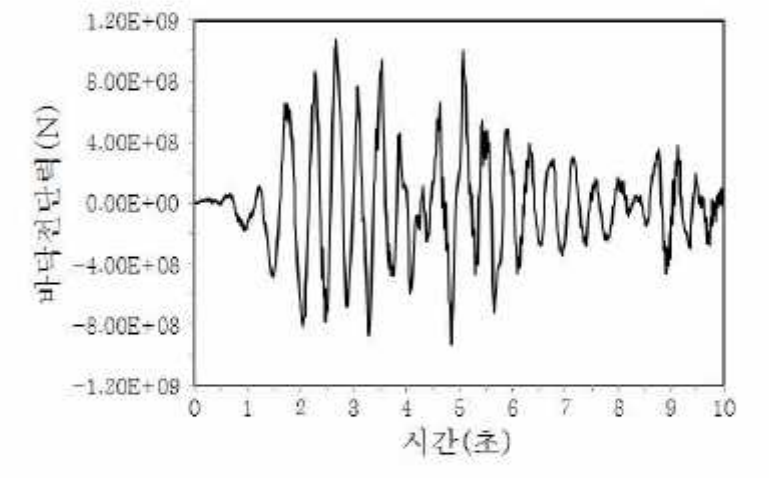
[d] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N・m)

[e] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

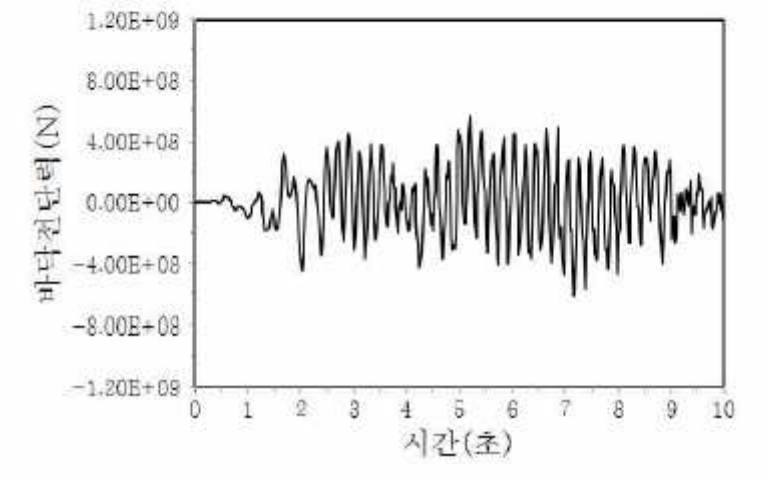
[f] 오차율(%)=(｜기준값-해석값｜)/｜기준값｜×100




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

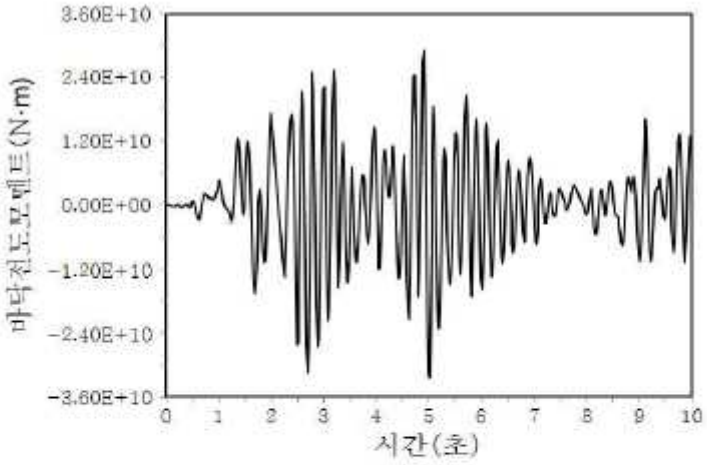



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

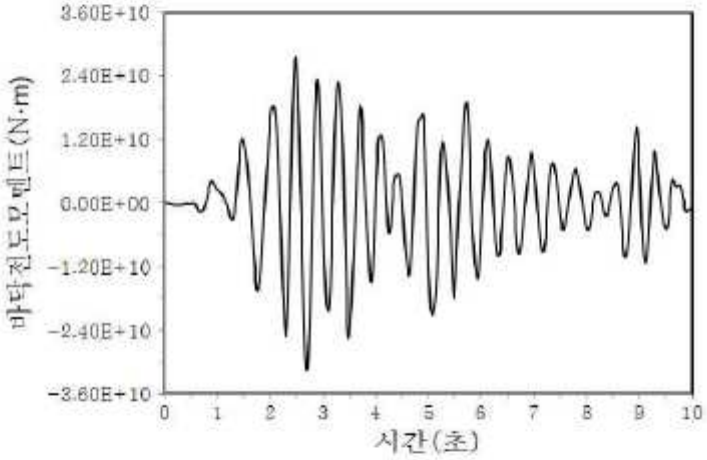



(c) 3차원해석 모델

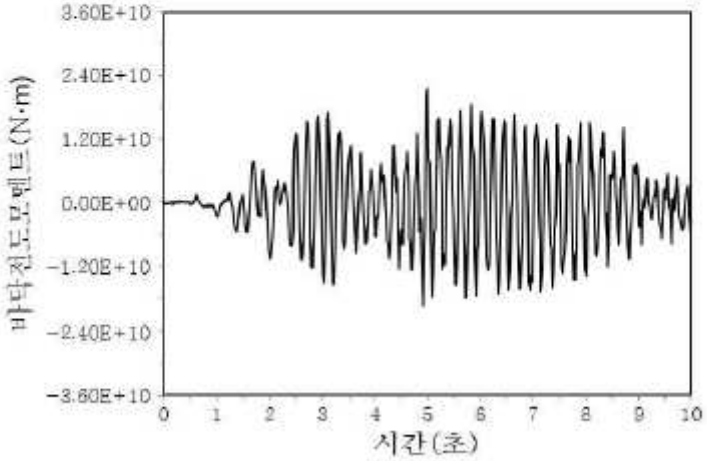
그림 2.10.19 지진하중에 대한 전단력




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

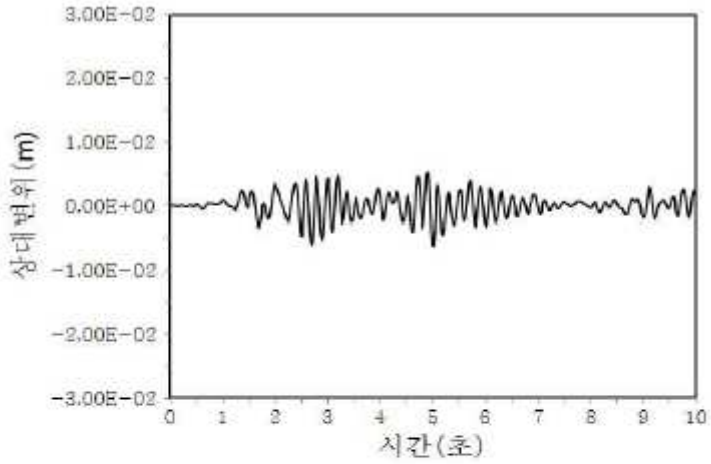



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

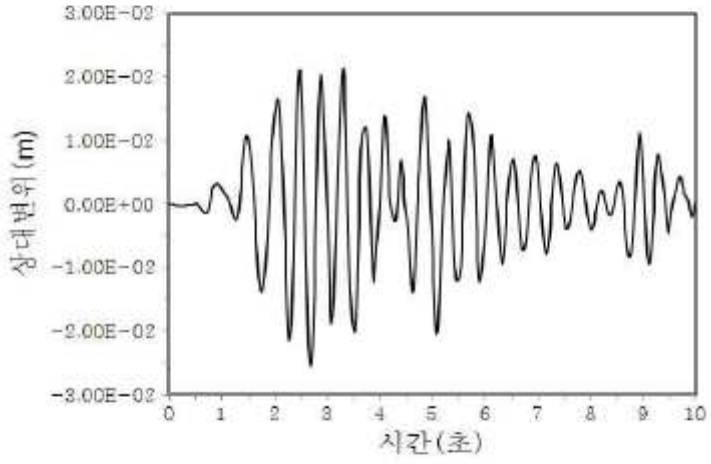



(c) 3차원해석 모델

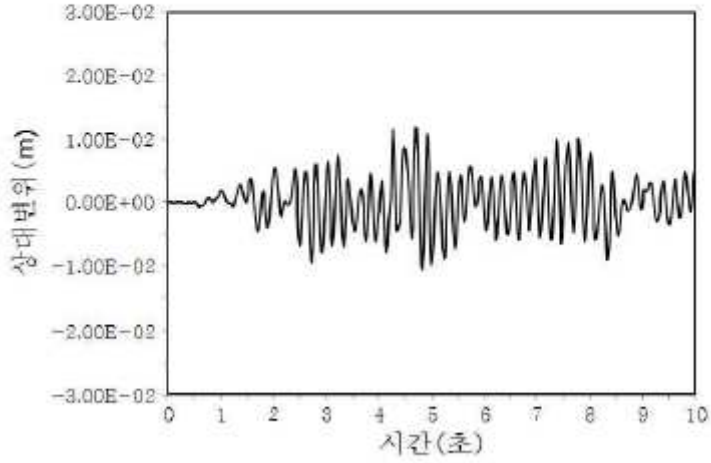
그림 2.10.20 지진하중에 대한 전도모멘트




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델




(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델




(c) 3차원해석 모델

그림 2.10.21 지진하중에 대한 상대변위

표 2.10.16 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 해석모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 0.22 | -76.20 | -47.15 | -118.26 |
| 0.27 | -87.37 | -36.23 | -79.40 |
| 0.32 | -100.97 | -48.16 | -61.54 |
| 0.37 | -86.53 | -46.26 | -40.58 |
| 0.42 | -75.88 | -38.75 | -13.55 |
| 0.47 | -79.06 | -48.58 | -6.01 |
| 0.52 | -100.20 | -68.20 | -7.25 |
| 0.57 | -88.10 | -72.62 | 0.73 |
| 0.62 | -75.46 | -54.81 | 19.60 |
| 0.67 | -58.38 | -29.08 | 36.28 |
| 0.72 | -56.57 | -12.52 | 45.49 |
| 0.77 | -58.59 | -9.64 | 49.15 |
| 0.82 | -53.62 | -16.69 | 50.57 |
| 0.87 | -55.54 | -30.58 | 47.27 |
| 0.92 | -65.95 | -37.83 | 46.86 |
| 0.97 | -78.25 | -45.76 | 47.79 |
| 1 | -80.79 | -51.15 | 47.68 |

[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100

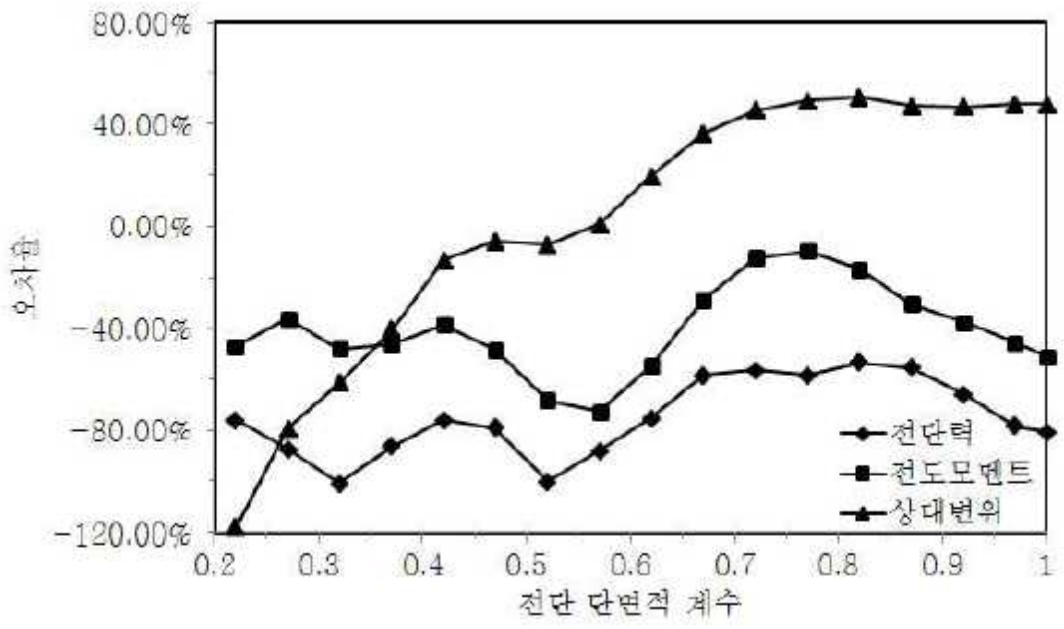
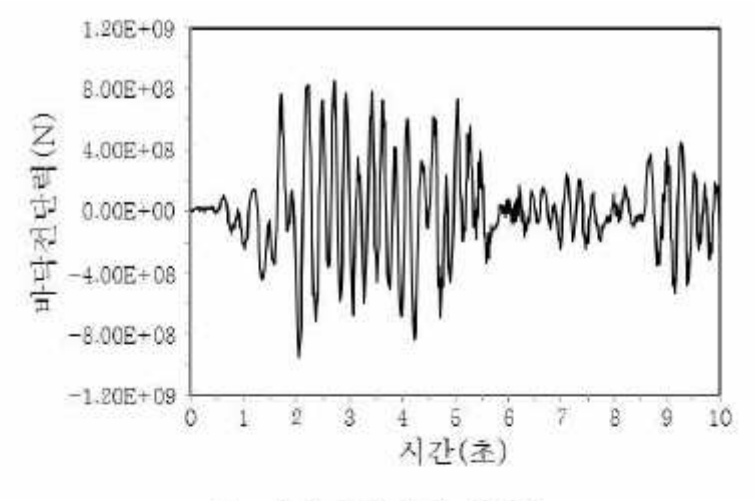
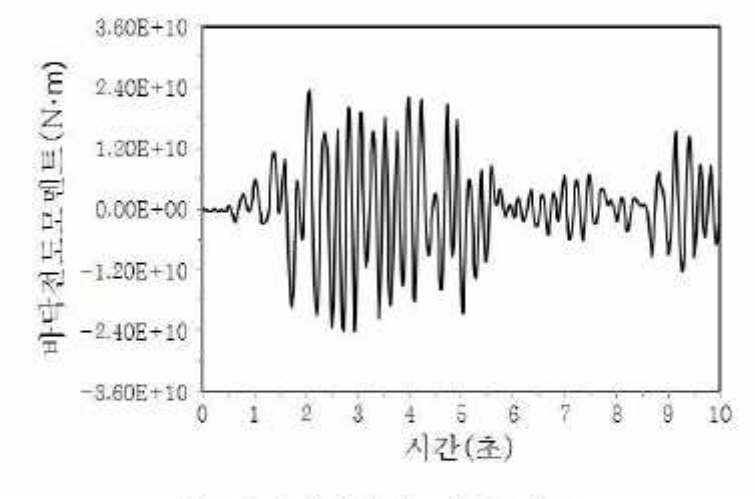


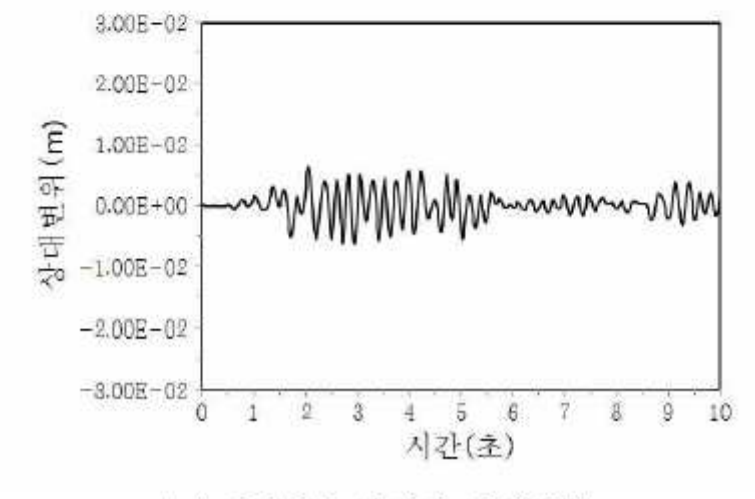

그림 2.10.22 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답




(a) 바닥판에서의 전단력




(b) 바닥판에서의 전도모멘트




(c) 바닥판과 벽체의 상대변위

그림 2.10.23 산출된 전단 단면계수에 대한 지진응답

# 11절. 지진하중에 대한 최적설계기법 타당성 분석 및 기법 정리에 관한 연구

## 1. 연구 목적 및 동향

### 가. 연구목적

외부동적하중에 의한 유체저장탱크의 거동은 구조물의 독립적 거동으로 나타나는 것이 아니라 유체와 구조물의 접촉을 통해 복합적인 영향으로 인해 단일 구조물과는 다른 응답특성을 보이기 때문에 유체저장탱크에 지진과 같은 동적하중이 가해질 경우 구조물의 바닥전단력, 전도모멘트. 탱크벽체모멘트 등의 증가로 인하여 구조물을 파괴에 이르게 할 수 있다(안성문, 최인길, 전영선 2005, 양태석, 박재균, 김재관 2007). 유체저장탱크의 정확한 동적거동을 파악하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용 해석이 필요하나 유체와 구조물 상호작용계의 지배방정식을 구성하고 이를 만족하는 해석적인 해를 구하는 것은 쉽지 않다. 그러므로 수치해석으로 접근하여 해석하는 것이 효과적인 방법이다. 유한요소해석은 일반적으로 통용되는 수치해석 방법 가운데 하나로서 뛰어난 적용성으로 인해 각종 공학적 문제의 수치해법으로 사용되고 있다(Edwards 1969, 이창근 1985). 그러나 유한요소를 이용해 유체를 모형화할 경우 유체내부까지도 이산화해야 하므로 많은 수의 요소가 필요하여 비효율적이다. 따라서 설계단계에서 단면력 산출을 위한 해석에서는 문제의 차원을 한 단계 낮추어 자유도를 줄여 유체의 거동을 대류성분(convective part)과 충격성분(impulsive part)의 집중질량으로 단순화한 모델을 사용한다. 그러나 유체와 구조물의 단순화 과정에 대한 기준이 미비하여 동적거동에 대한 정확한 응답을 기대하기 힘들지만, 설계단계에서는 시간과 비용을 절약할 수 있는 단순화 모델이 필요하다.

### 나. 연구동향

유체저장 구조물의 단순화 모델에 대한 연구는 Hoskins와 Jacobsen이 구조물을 강체로 가정하고 유체의 비압축성 가정하여 지반의 횡 방향 운동에 대한 유체의 압력을 수치해석 방법과 실험을 통해 해석한 것으로부터 시작된다(Hoskins and Jacobsen 1934). 그 후 Housner는 한 가지 성분으로 적용되었던 기존의 유체의 동압력을 벽체와 함께 운동하는 충격성분과 자유수면의 슬러싱 운동에 관련된 대류성분으로 분리하여 산출하는 간략해법을 제시하였다(Housner 1975). 그러나 1964년 Niigata 지진, Alaska 지진, 1966년 Parkfiled 지진 등에서 이러한 방법으로 벽체의 유연성이 고려되지 않고 설계된 저장탱크가 지진하중에 의해 큰 손상을 받은 것으로 밝혀졌다. 이에 Veletsos는 간단한 보의 휨 모델을 이용해 구조물을 모형화하고 유체저장 구조물의 동적응답을 해석하였다(Veletsos 1974). 그 결과 구조물을 강체로 가정하는 것은 유체와 구조물의 상호작용을 적절하게 반영하지 못하기 때문에 유체동압력을 과소평가할 수 있다는 결론을 내렸다. 이 후 유체와 구조물 사이의 상호작용에 대한 연구가 본격적으로 시작되었다. Veletsos와 Yang은 유체의 운동을 속도 포텐셜을 이용하여 나타내고, 구조물의가정한 모드형상에 Galerkin 방법을 적용해 유체-구조물 상호작용계의 지배 운동방정식을 유도하는 근사해법을 제시하였다(Veletsos and Yang 1976). Fischer는 유체의 부

가질량 및 충격성분질량을 구한 후 반복순환 방법을 이용해 유체와 구조물의 상호작용을 해석하는 방법을 제시하였다(Fischer 1979). 이 후 Haroun과 Ellaithy는 비점성, 비압축성 유체의 운동을 표현하는 속도 포텐셜로부터 수평, 수직, 회전운동에 의한 유체동압력 및 전도모멘트 등을 근사적으로 산출할 수 있는 역학적 모델을 개발하였다(Haroun and Ellaithy 1985). 그러나 이러한 해석적 방법은 자유수면 슬러싱에 의한 대류압력성분을 무시하고 충격압력성분만 고려하여 구조물과의 상호작용을 고려했다는 단점이 있다(어준 2004). 유체저장구조물의 동적거동 해석을 유한요소 해석방법으로 수행한 최초의 연구는 Edwards가 구조물을 축대칭 요소로 모형화하고 유체의 영향은 부가질량행렬을 이용해 고려한 것이다(Edwards 1969). Nash 등은 축대칭 유한요소와 부가질량 접근법을 이용하여 원통형 탱크의 모드와 주파수를 구하였다(Nash et al. 1978). 이 후 Haroun은 경계해법을 사용해 유체의 부가질량행렬을 계산한 후 축대칭 유한요소에 의해 얻어진 구조물의 행렬에 연계하는 방법을 제안했고(Haroun 1980), Housner와 함께 횡방향 지진하중이 가해진 원통형 유체저장탱크내부에 작용하는 유체동압력을 경계적분과 원통형 탱크의 축대칭 모드형상에 기초한 수식에 의해 산출하였다(Haroun and Housner 1981). 그 후로 Balendra 등은 유체의 거동을 속도 포텐셜을 이용하여 표현하는 Laplace 방정식 등으로부터 부가질량을 산출하는 방법으로 유체를 유한요소로 모형화 하였다(Balendra et al. 1982). 또한 Sukenobu 등은 구조물의 축방향 변형을 캔틸레버 보의 축 방향 모드 형상으로 가정하고 부가질량법에 의해 구조물과 유체사이의 결합 현상을 설명하였다 (Sukenobu, Tanake and Hori 1982). 이 후 Maheri 등은 강체기초에 강결된 원통형 탱크의 동특성에 대한 유체와 구조물의 상호작용에 의한 영향을 수치해석과 실험을 통해 연구하였다(Maheri and Severn 1991). 또한 Lay는 축대칭 유한요소를 이용하여 구조물을 모형화하고 유체는 경계요소를 이용하여 모형화한 후 조합하는 방법으로 원통형 유체저장 구조물의 동적거동을 해석하였다(Lay 1992). 국내의 경우, 이창근이 구조물은 축대칭 링 유한요소에 의해 모형화하고, 유체는 부가질량의 형태로 고려한 해석결과를 발표하였다(이창근 1985). 이에 박장호는 2차원 직사각형 유체저장 구조물의 거동을 시간영역에서 유한요소-경계요소 조합기법을 사용해 해석하였다(박장호 1992). 이 후 김영석이 개선된 변위형 유체 유한요소를 개발하여 유한요소에 의한 유체-구조물 상호작용을 해석하였다(김영석1992). 그 후로 박장호가 3차원 직사각형 유체저장 구조물에 유한요소-경계요소조합해석기법을 적용하여 해석하였다(박장호 1997). 수치해석 방법을 이용해 현재까지 진행된 유체와 구조물의 상호작용에 관한 대부분의 연구는 축대칭 요소를 이용하여 원통형 탱크를 모형화하였다. 이후 조성용은 유체-구조물-지반 상호작용을 고려한 상호작용 프로그램을 개발하여 유체저장탱크의 동적거동을 시간 및 주파수 영역에서 해석하였다(Cho 2002). 또한 한국가스공사 개발연구원에서는 동적하중에 대한유체저장탱크의 설계 및 해석에 중요한 역할을 하는 저장탱크의 고유진동수와 모드형상을 파악하기 위한 현장실험 및 해석을 실시하였다(이강원 외 2003). 지진하중에 대한 응답에 대한 연구로는 김승억 등은 지진하중을 받는 유체저장탱크 거동에 관하여 연구하였다(김승억, 최동호, 이동원 2000). 이러한 경우 비대칭적 하중으로 인한 구조물의 실제 거동을 정확히 묘사 할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 한계점을 보완하기 위하여 2차원 모델의 정확도 검증에 대한 연구가 진행되기 시작하였다. 진병무 등은 액체저장탱크의 지진응답해석모델 중 보 모델의 적용성에 대한 연구를

수행하였다(진병무, 전세진, 김영진 2004). 이 후 안성문 등은 지진의 최대 지반가속도에 따른 유체저장탱크의 파괴가능성을 확률적으로 나타내는 지진취약도 분석을 수행하였다(안성문, 최인길, 전영선 2005). 또한 양태석 등은 지진하중을 받는 유체저장탱크의 탄-소성 좌굴해석을 비선형 정적해석을 통하여 비선형 거동특성을 고찰하였다(양태석, 박재균, 김재관 2007).

다. 연구방법

본 연구에서는 지진하중에 대한 유체저장탱크의 동적응답을 집중질량 모델과 3차원 해석모델을 통해 해석하여 내진설계단계에서 사용되는 단순화 모델의 정확도를 검증한다. 지진하중이 가해질 경우 차원이 해석모델간의 바닥전단력, 전도모멘트, 탱크벽체의 상대변위와 같은 해석결과비교에 적합한 데이터분석법을 제시하고, 이를 통하여 문제점을 파악한다. 검증된 3차원 해석모델을 바탕으로 단순화 모델의 정확도 향상을 위한 집중질량 모델의 추가적인 내진설계변수를 산출한다. 이를 실제 설계에 적용하여 유체저장탱크의 동적거동특성을 확인한다. 유체저장탱크 모델링은 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 집중질량 모델과 3차원 모델로 해석한다. 구조물의 3차원 모델링시 유체의 물성값은 EOS(equations of state)옵션을 통해 적용하고, 탱크벽체에서 유연성을 고려한다. 동적해석은 El Centro 지진의 NS방향 성분을 데이터로 사용하여 수행한다.

라. 연구범위

본 연구에서는 유체저장탱크의 단순화 모델의 적용성을 검증하고 정확도 향상을 위한 내진설계변수 산출을 효과적으로 하기 위하여 다음과 같은 제한된 범위에서 연구를 수행한다.

(1) 해석대상은 수평방향 지반가속도만 받는 원통형 모양의 유체저장탱크로 한다.
(2) 구조물의 바닥판은 지반에 강결된 것으로 가정하며 지반과의 상호작용은 고려하지 않는다.
(3) 내부유체는 비점성, 비압축성이며 비회전 운동을 하는 이상유체로 가정한다.
(4) 구조물의 재료는 등방, 균질, 탄성체로 가정한다.

2. 유체저장탱크의 모델링

동적하중에 대한 유체저장탱크의 응답은 유체와 구조물의 상호작용으로 인하여 복잡한 양상이 나타난다. 그러므로 유체저장탱크의 정확한 동적응답을 파악하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용 효과가 고려된 동적해석이 실시되어야 한다. 이러한 목적을 가지고 상호작용 해석에 관한 연구가 수행되며 현재는 다양한 3차원 해석방법까지 발달되고 있다. 하지만 지진하중과 같은 동적하중에 대한 설계단계에서는 시간과 비용의 제약으로 인하여 이를 도입하는데 문제점이 있다. 그러므로 현재 내진설계에서는 유체와 구조물의 복잡한 상호작용을 고려하기 위하여 Housner와 Haroun의 이론을 적용한 단순화 모델이 널리 사용되고 있다. 유체저장탱크는 원통형 구조물로서 형상과 유체를 포함하지 않는 상태에서도 외부하중과 형

상에 따른 고유의 거동이 나타난다. 대형화되어가는 저장탱크의 추세에 따라 유체의 거동뿐만 아니라 고체 구조물 자체의 거동도 중요시된다. 현재 유체저장탱크의 내진설계단계에서는 구조물부분 역시 집중질량으로 단순화시켜 동적해석을 실시한다. 그러므로 유체를 포함하지 않은 유체저장탱크의 단순화 모델의 정확도를 집중질량 모델과 3차원 해석모델을 이용하여 검증하고 동적응답을 분석하여 문제점을 파악한다.

가. 해석대상개요

유체를 저장하는 대표적인 원통형 구조물은 LNG(Liquefied Natural Gas ; 액화천연가스)저장탱크이다. 언제 발생할지 모르는 석유위기에 대비하여 석유의존도를 낮추고 석유대체 에너지의 확보를 통해 에너지 공급원을 다변화하려는 정부의정책에 따른 LNG의 도입이 증가로 국내의 저장탱크 설계기술이 점진적으로 발전하고 있는 추세이다. 이러한 추세에 따라 우리나라에서는 평택 LNG인수기지가 처음으로 건설되었으며, 이어서 인천 LNG인수기지와 통영 LNG인수기지가 건설되었다. 최근에는 강원도 삼척과 제주도 애월항에 인수기지 건설추진이 본격화되고 있다. LNG저장탱크는 설치위치에 따라 크게 지상식 저장탱크, 지중식 저장탱크, 지하식 저장탱크로 구분된다. 우리나라에서는 평택, 인천, 통영 LNG 인수기지에서 지상식 저장탱크가 시공되었으며, 인천기지에서 지중식 저장탱크가 시공되었다. 지상식 저장탱크는 탱크를 지표면위에 설치하는 것으로 액화천연가스를 저장하는 방법 중 가장 많이 이용되고 있는 탱크형식이다. 지상식 저장탱크는 구조물이 지표면위로 노출되어 있어 지중식 저장탱크에 비하여 상대적으로 안전성이 더욱 요구되지만, 경제적이면서 공사기간이 짧은 장점이 있기 때문이다. 지상식 저장탱크는 -162℃ 저온의 LNG와 접하고 있는 내부 구조물이 손상을 입었을 경우 저온의 액체가 지표면으로 누출될 가능성이 있다. 이러한 경우를 대비하여 설계기술은 2중 벽체 개념의 구조물로 발전되었으며, British Standard7777: Flat-bottomed, vertical cylindrical storage tanks for low temperatureservice 규준에는 액체의 저장형식에 따라 탱크를 단일저장형식, 이중저장형식 및완전저장형식으로 구분하고 있다(양인환, 정헌정, 김양수 2003).

나. 수치해석 일반사항

유체를 포함하지 않는 완전저장형식 탱크의 외부탱크에 대한 동적거동을 파악한다. 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 단순화 모델과 3차원 모델로 해석하였다. 해석대상의 제원 및 물성 값은 표 2.11.1과 같다(한국가스공사 2008).

표 2.11.1 해석대상의 제원 및 물성 값

| 제원 | | 단위 | 값 |
|---|---|---|---|
| 외부탱크 | 반지름 | m | 43.40 |
| | 높이 | m | 지붕 11.38<br>벽체 40.10 |
| | 두께 | m | 지붕(~51.48m)* 0.60<br>링빔(~40.10m)* 1.50<br>벽체(~36.90m)* 0.75<br>벽체(~7.50m)* 0.86<br>벽체(~4.00m)* 1.04<br>벽체(0~1.50m)* 1.16<br>바닥판 2.00 |
| | 밀도 | kg/m3 | 2,500 |
| | 콘크리트 탄성계수 | MPa(MN/m2) | 지붕 및 바닥판 29,000<br>PS벽체 및 링빔 31,750 |
| | 포아송비 | - | 0.20 |

내진설계단계에서는 유체저장탱크의 동적거동을 해석하기 위하여 구조물을 집중질량과 보요소로 단순화하여 모델링한다. 외부탱크의 벽체는 보요소로 변환하여 고려한다. 벽체의 강성은 휨 강성, 전단 강성, 멤브레인 강성으로 구성된다. 휨강성에 대해서는 식 1을 통하여 탱크벽체의 단면2차모멘트  를 산정하여 적용하며 $R_0$와 $R_i$은 탱크벽체의 외부와 내부 반경을 나타낸다. 전단강성과 멤브레인 강성을 구성된 식 2.2를 이용하여 탱크벽체의 전단 단면적을 적용한다. 여기서 $A_{shear}$는 전단 단면적, $v$는 포아송 비, $R_w$은 탱크벽체의 반경, $H_w$는 탱크벽체의 높이, $k_{shear}$는 전단계수(shear factor), $k_{membarne}$은 멤브레인 계수(membrane factor)이다.

$$I = \frac{\pi(R_0^4 - R_i^4)}{4} \qquad (1)$$

$$A_{shear} \approx \frac{A(1+v)}{6(k_{shear} + k_{membrane})} \qquad (2)$$

일반적으로 전단 단면적은 전단력에 의한 변형과 관련된 조건으로 상대적으로 깊은 보라고 할 수 있는 티모센코 보(Timoshenko beam)에서는 이를 고려하여야한다. 전단 단면적은 전단응력이 작용하는 단면형상에 따라 전단 단면계수를 단면적에 곱하여 계산한다. 표 2.11.2는 단면형상에 따른 전단 단면계수를 나타낸다(Cowper 1966).

표 2.11.2 단면형상에 따른 전단 단면계수

| 단면형상 | 전단 단면 계수 |
|---|---|
| 직사각형 단면 | 0.85 |
| 원형 단면 | 0.89 |
| 사다리꼴 단면 | 0.82 |
| 박스 단면 | 0.44 |
| 파이프 단면 | 0.53 |

표 2.11.3 집중질량 모델의 집중질량 제원(200,000 kL급, 유체 미포함)

| 위치 | 절점 번호 | 질량 |
|---|---|---|
| 바닥판 | 1 | 2.62E+07 |
| 벽체 | 2~14 | 2.30E+07 |
| 지붕 | 15 | 1.18E+07 |
| 콘크리트 외부탱크질량 합계 | | 6.10E+07 |

유체저장탱크의 콘크리트 외부탱크를 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 집중질량과 보요소로 단순화시켜 모델링한다. 외부탱크를 구성하고 있는 콘크리트의 밀도를 바탕으로 부피에 대한 질량을 집중질량으로 치환하여 각 절점마다 분포시킨다. Abaqus의 보요소 중에서 티모센코 보(Timoshenko beam)요소인 B21요소를 사용하여 전단력에 대한 변형을 고려한다. 그림 2.11.6은 콘크리트 외부탱크를 집중질량과 보요소로 단순화시킨 집중질량 모델을 나타낸다. 여기서 는 집중질량으로 치환된 콘크리트 외부탱크의 질량을 나타내며 크게 바닥판, 벽체, 지붕으로 구분한다. 바닥판, 벽체, 지붕에 대한 질량은 순서대로 1번 절점, 2번에서 14번 절점, 15번 절점에 집중질량으로 치환하여 적용한다. 표 2.11.3은 집중질량으로 치환되어 보 요소에 적용된 콘크리트 외부탱크의 집중질량 제원을 나타낸다. 원통형 구조물을 보요소로 변환 시 고려되는 탱크벽체의 휨 강성에 대한 단면2차모멘트는 바닥판, 벽체, 지붕의 각각 형상에 따라 계산된 값을 보요소의 단면정보에 입력하고, 전단강성과 멤브레인 강성은 식 2를 이용하여 계산된 전단 단면계수를 적용한다. 표 2.11.4는 콘크리트 외부탱크의 휨 강성, 전단강성, 멤브레인 강성에 대한 계산과정을 나타낸다(한국가스공사 2008).

표 2.11.4 집중질량 모델의 강성 제원(200,000 kL급, 유체 미포함)

| 위치 | 요소 번호 | 강성 | |
|---|---|---|---|
| 바닥판 | 1 | $A = \pi \times 43.40^2$ | $= 5890.14\ m^2$ |
| | | $A_{shear} = A$ | $= 5890.14\ m^2$ |
| | | $I = \pi \times 43.40^4/4$ | $= 2.76E+06\ m^4$ |
| 벽체 | 2 | $A = \pi \times (42.45^2 - 41.30^2)$ | $= 302.57\ m^2$ |
| | | $A_{shear} = 0.36 \times A = 0.36 \times 302.57$ | $= 108.93\ m^2$ |
| | | $I = \pi \times (42.45^4 - 41.30^4)/4$ | $= 2.65E+05\ m^4$ |
| | 3 | $A = \pi \times (42.34^2 - 41.30^2)$ | $= 273.27\ m^2$ |
| | | $A_{shear} = 0.36 \times A = 0.36 \times 273.27$ | $= 98.38\ m^2$ |
| | | $I = \pi \times (42.34^4 - 41.30^4)/4$ | $= 2.39E+05\ m^4$ |
| | 4 | $A = \pi \times (42.16^2 - 41.30^2)$ | $= 225.49\ m^2$ |
| | | $A_{shear} = 0.36 \times A = 0.36 \times 225.49$ | $= 81.18\ m^2$ |
| | | $I = \pi \times (42.16^4 - 41.30^4)/4$ | $= 1.96E+05\ m^4$ |
| | 5~12 | $A = \pi \times (42.05^2 - 41.30^2)$ | $= 196.39\ m^2$ |
| | | $A_{shear} = 0.36 \times A = 0.36 \times 196.39$ | $= 70.70\ m^2$ |
| | | $I = \pi \times (42.05^4 - 41.30^4)/4$ | $= 1.71E+05\ m^4$ |
| | 13 | $A = \pi \times (42.80^2 - 41.30^2)$ | $= 396.31\ m^2$ |
| | | $A_{shear} = 0.36 \times A = 0.36 \times 396.31$ | $= 142.67\ m^2$ |
| | | $I = \pi \times (42.80^4 - 41.30^4)/4$ | $= 3.50E+05\ m^4$ |
| 지붕 | 14 | $A$ =12번 요소와 동일 | $= 196.39\ m^2$ |
| | | $A_{shear}$ =12번 요소와 동일 | $= 70.70\ m^2$ |
| | | $I = 0.5 \times \pi \times (41.30^4)/4$ | $= 1.14E+06\ m^4$ |

유체저장탱크의 콘크리트 외부탱크를 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 3차원으로 모델링한다. 표 2.11.1에 해석대상의 제원 및 물성 값을 바탕으로 쉘(shell)요소인 S4R요소를 사용한다. 그림 2.11.1은 콘크리트 외부탱크의 3차원 해석모델을 나타내며 1372 개의 요소로 구성된다.

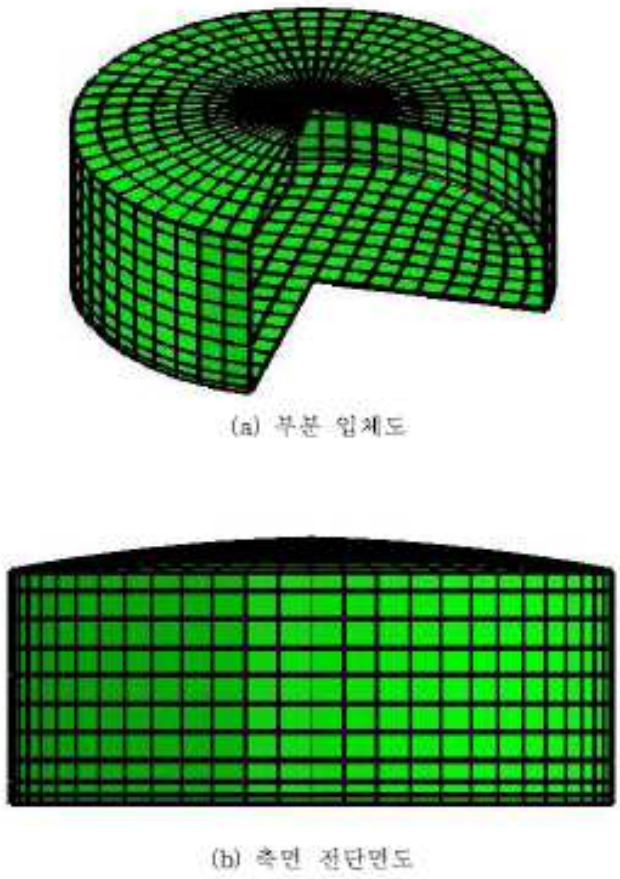



그림 2.11.1 3차원 해석모델

다. 고유모드 해석과 지진응답 해석

콘크리트 외부탱크의 3차원 해석모델에 대하여 고유진동수 및 고유모드형상과 같은 동적특성을 파악하기 위하여 고유모드 해석을 수행한다. 3차원 해석모델의 고유모드 해석결과는 Seismic Response of Base-Isolated Liquid Storage Tanks Considering Liquid-Structure-Soil Interaction(Cho 2002)의 해석자료와 파일럿 LNG저장탱크의 모드형상 파악 실험자료(이강원 외 2003)를 이용하여 타당성을 검토한다. 3차원 해석모델의 고유모드 해석을 실시한 결과는 표 2.4와 같다. 주요 모드는 $\cos n\theta$($n$ = 1,2,...)형 모드형상을 가짐으로서 동적특성 해석자료 및 실험 자료의 모드형상과 일치한다. 고유진동수가 6.11 Hz의 경우에는 상부에서 볼 때 $\cos n\theta$형 모드형상이 나타나고, 측면 벽체에서는 $\cos n\theta$ 형의 변형이 발생한다. 고유진동수가 6.30 Hz의 경우에는 상부에서는 $\cos n\theta$형, 측면 벽체에서는 $\cos n\theta$형의 변형이 나타난다. 이후 고유진동수가 12.37 Hz의 경우까지 상부의 변형은 점차 $\cos n\theta$ 형상으로 단순해지지만, 벽체의 변형은 $\cos n\theta$ 형을 유지한다. 고유진동수가 14.12 Hz의 경우 상

부에서는 다시 cosnΘ형의 변형이 나타나며 벽체에서는 앞선 cosnΘ형의 변형보다 복잡해진 cosnΘ형 변형이 나타난다. 즉 원통형 구조물의 고유모드형상은 cosnΘ(n = 1,2,...)형 변형을 기본으로 상부와 벽체에서 상이한 거동이 발생한다. 집중질량 모델 및 3차원 해석모델로 모델링한 콘크리트 외부탱크의 지진하중에 대한 거동을 파악한다. 가진하중은 그림 2.2의 El Centro 지진의 남북방향 성분을 데이터로 사용하여 시간이력해석을 한다. 시간이력해석은 구조물에 동적특성과 가진 하중에 대하여 임의의 시간에 대한 반력, 변위와 같은 구조물의 동적거동을 계산하는 것이다. 콘크리트 외부탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판은 지반에 강결된 가정에 따라 지반가속도와 동일한 가속도를 갖는다. 시간이력해석을 통한 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥전단력, 바닥전도모멘트, 상대변위을 비교하여 지진하중에 대한 동적거동을 파악한다. 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 해석결과를 바탕으로 내진설계단계에서 단면력 산출을 위하여 사용되는 집중질량 모델의 문제점을 파악하고 적용성을 검토한다.

표 2.11.5 3차원 해석모델의 고유진동수(200,000 kL급, 유체 미포함)

| 모드 번호 | 상부 모드형상 | 벽체 모드형상 | 고유진동수(Hz) |
|---|---|---|---|
| 1 | $\cos 6\theta$ | $\cos\theta$ | 6.11 |
| 2 | $\cos 5\theta$ | $\cos\theta$ | 6.30 |
| 3 | $\cos 4\theta$ | $\cos\theta$ | 6.88 |
| 4 | $\cos 3\theta$ | $\cos\theta$ | 7.83 |
| 5 | $\cos 2\theta$ | $\cos\theta$ | 8.96 |
| 6 | $\cos\theta$ | $\cos\theta$ | 12.37 |
| 7 | $\cos 6\theta$ | $\cos 2\theta$ | 14.12 |

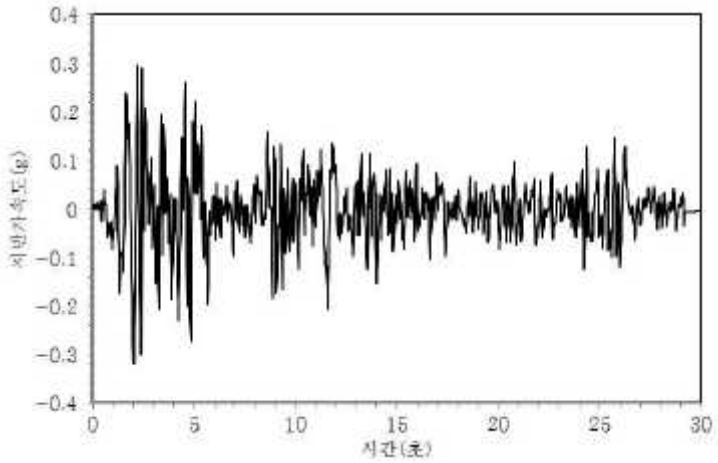



그림 2.11.2 El Centro 지진의 남북방향 성분

집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판에 X축 방향으로 가해진 El Centro 지진하중에 대한 동적거동 파악은 최대전단력, 최대모멘트, 상대변위 비교를 통하여 수행한다. 2차원 모델인 집중질량 모델에서 최대전단력과 최대모멘트는 바닥판 부분에서 반력으로 산출한다. 그림 2.3은 3차원 해석모델의 최대전단력과 최대모멘트 산정방법을 설명하기 위한 바닥판 절점 형상이다. 3차원 해석모델에서 최대전단력은 바닥판 절점들의 X축 방향의 반력( x)을 합산하여 계산한다. 최대모멘트산정의 경우는 그림 2.11.3에서 점선이 나타내는 Z축을 기준으로 동일한 거리에 있는 바닥판 절점들의 Y축 방향 반력( y)을 합산 후 Z축에 대한 모멘트팔 크기의 거리를 곱하여 계산한다. 지진하중에 대한 상대변위는 각각의 모델의 바닥판 절점 변위와 바닥판을 기준으로 20m 높이의 탱크벽체 절점변위의 차이로 산정한다. 집중질량 모델에 대한 지진해석은 전단변형을 고려하지 않은 모델과 전단 단면계수를 적용한 두 가지 모델을 통하여 수행한다. 표 2.6은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 El Centor 지진에 대한 동적응답을 나타낸다. 바닥판에서의 최대전단력과 최대전도모멘트는 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델이 3차원 해석모델에 대하여 28.94 %와 24.43 %의 오차를 갖고, 전단 단면계수를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델은 12.01 %와 11.09 %의 오차를 갖는다. 벽체의 최대 상대 변위를 비교하였을 경우 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델은 3차원 해석모델에 대하여 69.57 %의 오차율을 갖으며 약 3배 이상의 작은 값이 나타난다. 이에 반해 전단변형을 고려한 집중질량 모델의 경우에는 3차원 해석모델에 대하여 22.26 %의 오차율을 갖으며 근소하게 큰 값이 나타난다. 그러므로 내진설계단계에서는 전단 단면계수를 적용하여 보요소로 단순화된 탱크벽체의 전단변형을 고려한 집중질량 모델에 적용이 타당하다. 하지만 최대전단력과 최대전도모멘트와 비교하여 최대상대변위의 오차율이 약 2배 정도 크게 발생하므로 이에 관한 추가적인 검토가 필요하다. 그림 2.11.4, 그림 2.11.5, 그림 2.11.6은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판에서의 지진응답에 대하여 모든 최댓값이 발생한 10초까지 나타내는 그래프이다. 지진의 대한 최대응답 이외에 구간에서도 전단변형을 고려한 집중질량 모델과 3차원 해석모델과 유사한 응답이 나타난다.

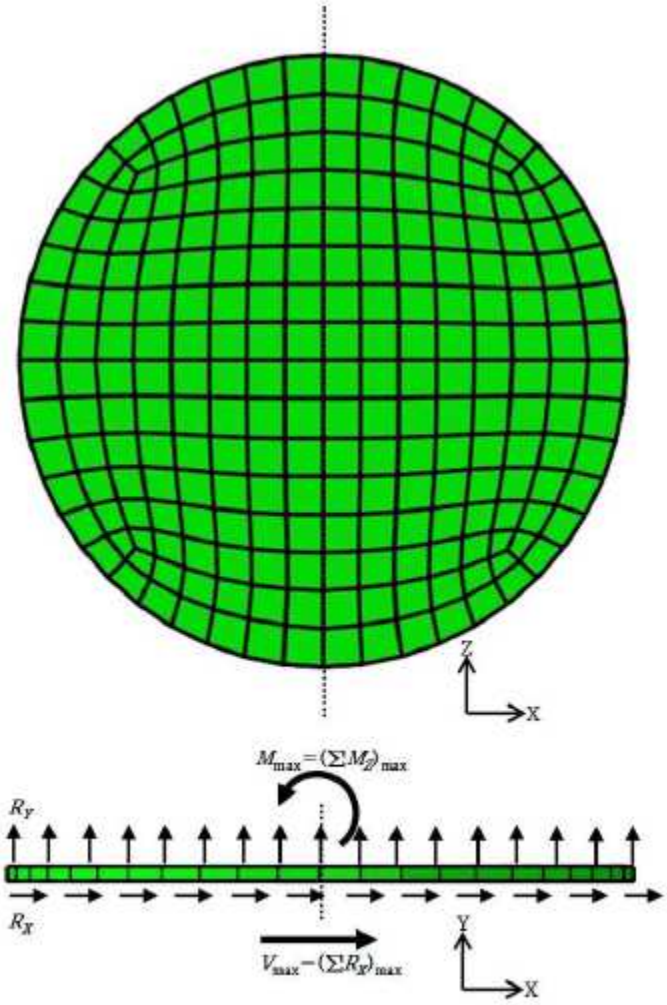



그림 2.11.3 3차원 해석모델의 바닥판 절점(200,000 kL급, 유체 미포함)

표 2.11.6 지진응답 해석결과

| 해석모델 | 집중질량 모델 I [a] | 집중질량 모델 II [b] | 3차원 해석모델 |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[c] | 2.47E+08 | 3.06E+08 | 3.47E+08 |
| 오차율(%)[f] | 28.94 | 12.01 | 기준 |
| $M_{max}$(N · m)[d] | 7.75E+09 | 1.14E+10 | 1.03E+10 |
| 오차율(%)[f] | 24.43 | 11.09 | 기준 |
| $d_{max}$[e] | 1.26E-03 | 5.07E-03 | 4.15E-03 |
| 오차율(%)[f] | 69.57 | 22.26 | 기준 |

[a] 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

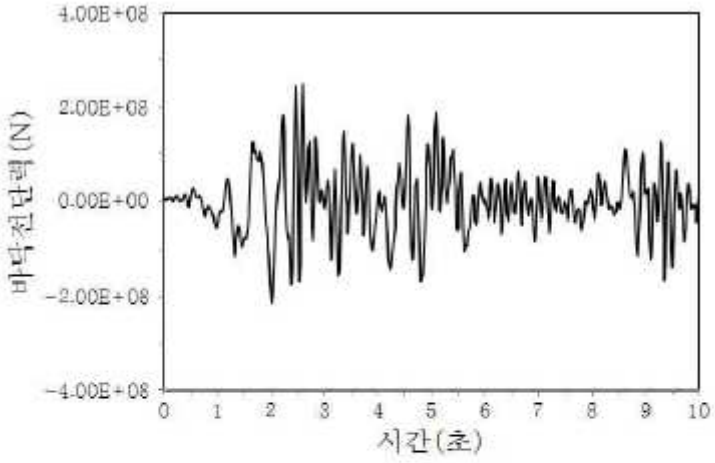
[b] 전단 단면계수 0.36을 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델

[c] 바닥판에서의 최대전단력(N)

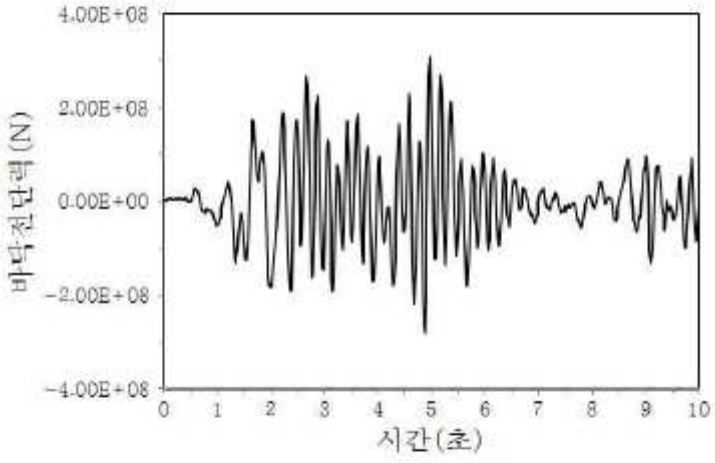
[d] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N · m)

[e] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

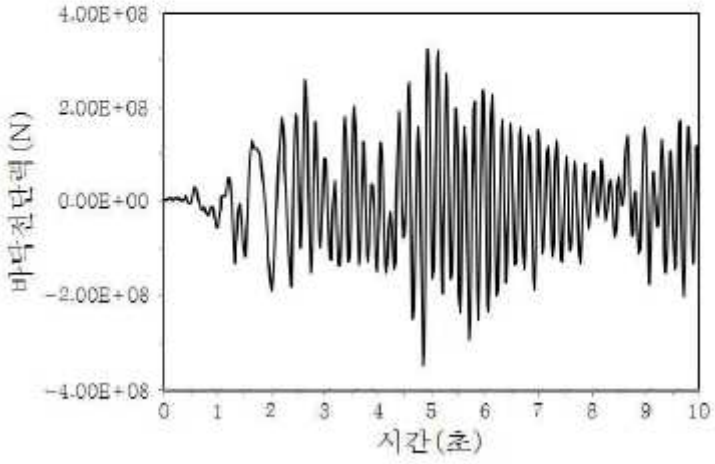
[f] 오차율(%)=(|기준값-해석값|)/|기준값| ×100




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

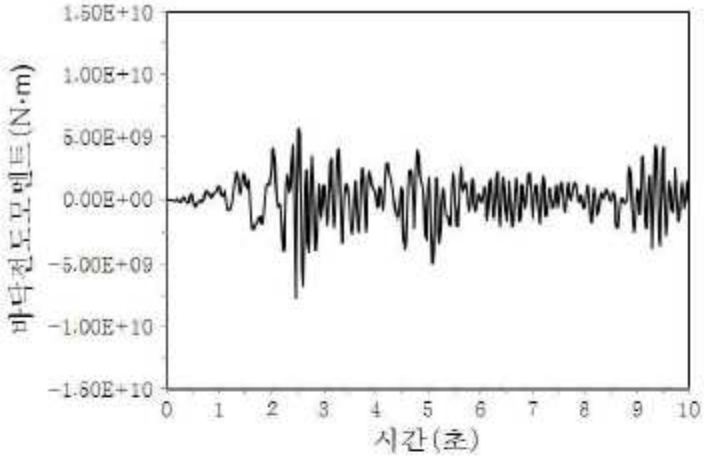



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

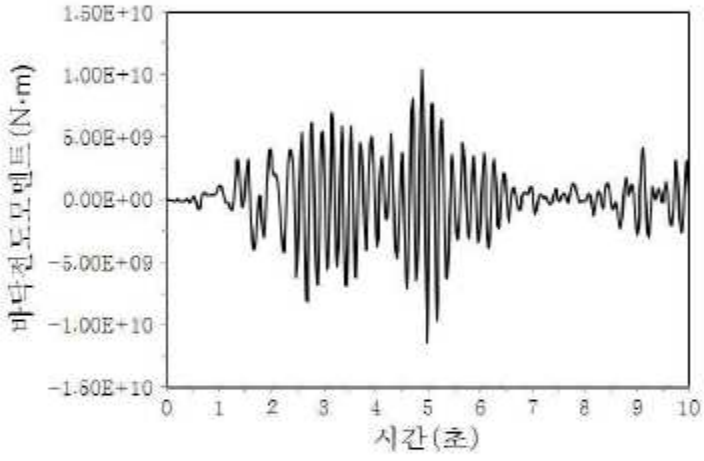



(c) 3차원해석 모델

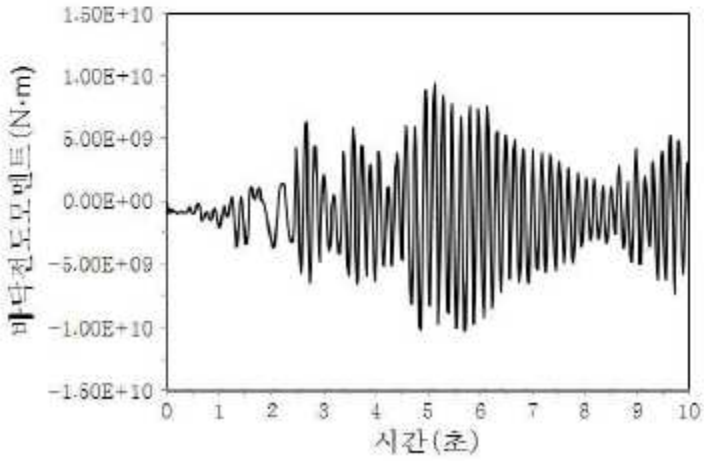
그림 2.11.4 지진하중에 대한 전단력




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

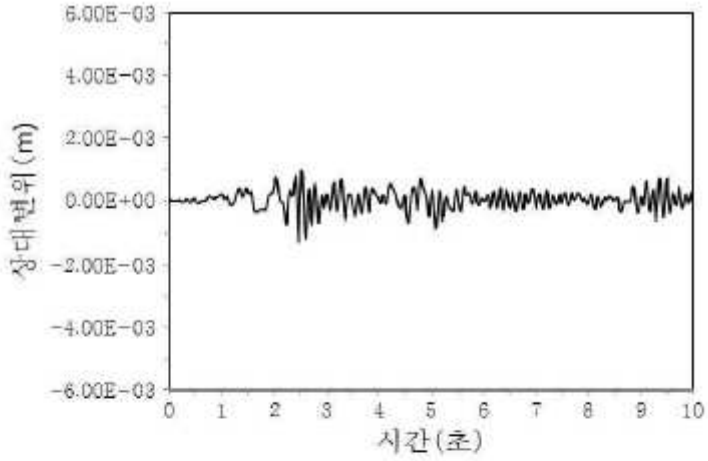



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

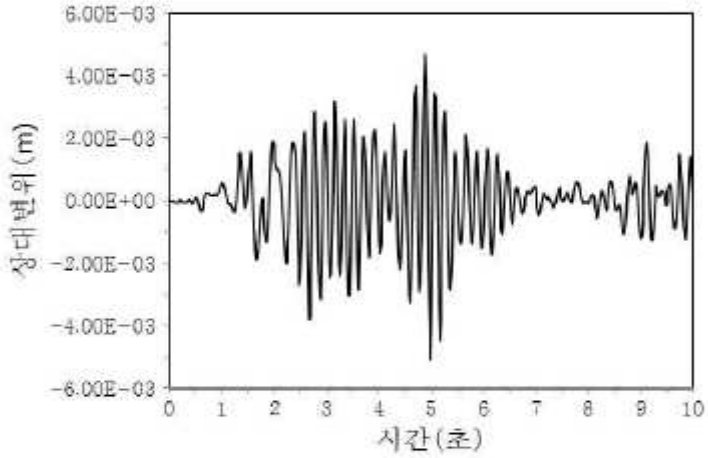



(c) 3차원해석 모델

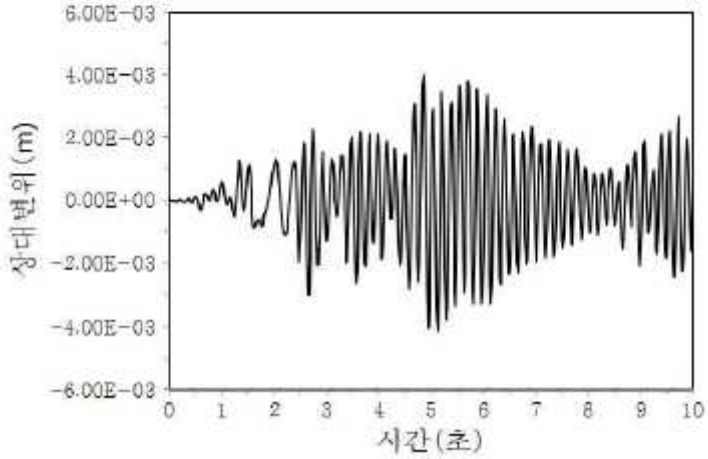
그림 2.11.5 지진하중에 대한 전도모멘트




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델




(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델




(c) 3차원해석 모델

그림 2.11.6 지진하중에 대한 상대변위

3. 유체와 구조물의 상호작용 해석

가. Housner와 Haroun의 방법

Housner는 수평지진하중에 의한 유체 저장탱크 내에서의 유동영향을 자유표면의 거동에 포함되어 진동하는 유체성분인 대류성분(convective part)과 지진에 의 한 벽면의 수평운동과 함께 움직이는 유체성분인 충격성분(impulsive part)으로 구분하였다(Housner 1957). 그림 2.11.7은 각각의 성분에 대하여 등가질량과 등가스프링으로 모형화 하는 간단한 방법을 나타낸다. 그러나 Housner의 모델은 벽체의 유연성을 고려하지 못하여 유체의 동수압을 과소평가하는 문제가 있다. 그림 3.1에서 대류성분질량 ms와 충격성분질량 mr은 식 3.1과 식 3.2를 통하여 산정하며 m은 유체의 전체질량, ρ는 유체의 밀도, R과 H는 각각 유체의 반지름과 높이를 의미한다.

$$m_s = 0.318\left[\frac{R}{H}\tanh(1.84\frac{H}{R})\right]m,\quad m = \rho\pi R^2 H \qquad (3.1)$$

$$m_r = \left[\frac{\tanh(\sqrt{3}\frac{R}{H})}{\sqrt{3}\frac{R}{H}}\right]m \qquad (3.2)$$

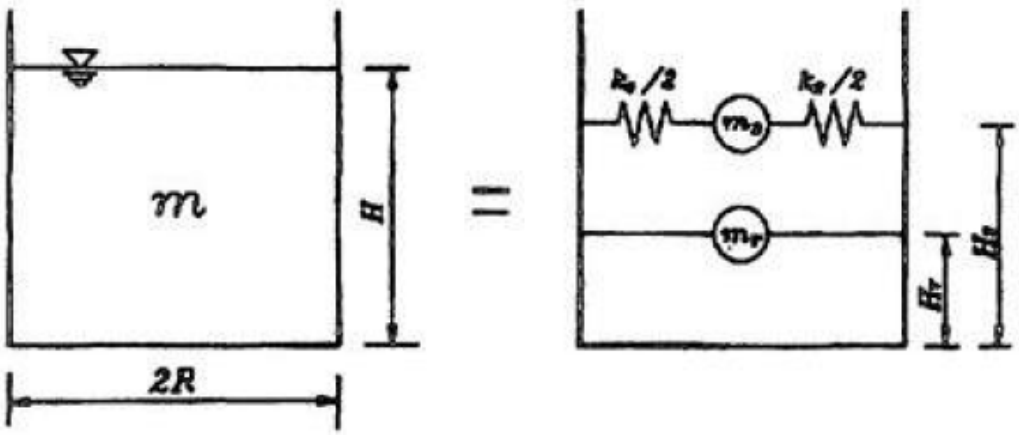



그림 2.11.7 Housner의 유체 모형

나. 3차원 해석모델

본 절에서는 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크를 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용하여 3차원으로 모델링한다. 이를 지진해석에 적용하기 위해서는 유체와 구조물의 상호작용이 고려된 3차원 해석기법에 대한 적용성 검증이 필요하다. 유체저장탱크의 지진에 대한 3차원 해석기법은 Haroun의 넓은 탱크의 지진응답과 비교하여 검증한다(Haroun 1983). 표 2.11.7은 해석대상인 Haroun의 넓은 탱크의 제원 및 물성 값을 나타낸다. 3차원 해석모델에서도 이를 바탕으로 유체저장탱크는 쉘(shell)요소인 S4R요소를 사용하여 1372 개의 요소로 모델링을 하고, 저장탱크 내부의 유체는 Abaqus/Explicit의 뉴턴 유체모델과 선형 EOS(equations of state)옵션을 적용하며, 솔리드(solid)요소인 C3D4요소를 사용하여 2156 개의 요소로 모델링한다. 이는 탱크벽체의 변형과 내부유체의 비점성, 비압축성을 고려하기 위함이다. 내부유체와 저장탱크의 바닥면 및 측면요소 사이에는 Abaqus/Explicit의 suface-to-surface contact 옵션을 적용하여 지진하중에 대한 유체와 구조물의 상호작용을 고려한다. 그림 3.2은 Haroun의 넓은 탱크에 대한 앞선 3차원 해석모델을 나타낸다. 표 2.11.8는 Haroun의 넓은 탱크에 El Centro 지진을 가진하중으로 작용하였을 경우에 대하여 상용해석 프로그램 Abaqus를 이용한 3차원으로 해석모델과 Haroun의 연구에서의 지진응답 결과비교를 나타낸다. 지진하중에 대한 Haroun의 연구와 3차원 해석모델의 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위 차이는 1.91 %, 1.83 %, 1.50 %이다. 이는 두 모델의 지진응답이 거의 유사하다고 볼 수 있으므로 3차원 해석모델을 이용한 지진해석의 적용성이 검증된다. Haroun의 연구와 비교하여 적용성이 검증된 3차원 해석기법을 이용하여 표 2.11.9의 내부유체의 제원 및 물성 값을 바탕으로 유체를 포함하는 콘크리트 외부탱크를 모델링한다. 그림 2.11.9은 내부의 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크의 모델을 나타낸다.

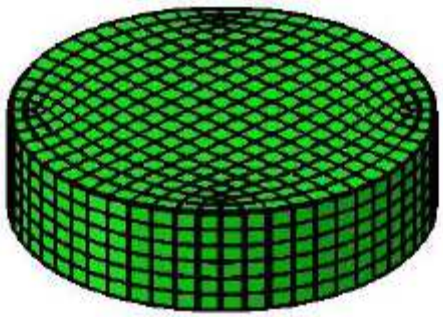


그림 2.11.8 3차원 해석모델

표 2.11.7 차원 해석모델의 제원 및 물성값(Haroun의 넓은 탱크)

| 제 원 | | 단 위 | 값 |
|---|---|---|---|
| 구조물 | 반지름 | m | 18.30 |
| | 높이 | m | 12.20 |
| | 두께 | m | 0.0254 |
| | 밀도 | $kg/m^3$ | 7840 |
| | 포아송비 | - | 0.3 |
| | 탄성계수 | GPa | 206.7 |
| 유체 | 높이 | m | 12.20 |
| | 밀도 | $kg/m^3$ | 1000 |
| | 점성계수 | Pa・s | 1.3E-03 |

표 2.11.8 지진응답 해석결과(Haroun의 넓은 탱크)

| 해석모델 | Haroun의 연구 | 3차원 해석모델 | 응답 차이(%)[d] |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[a] | 4.24E+07 | 4.16E+07 | 1.91 |
| $M_{max}$(N・m)[b] | 2.13E+8 | 2.09E+8 | 1.83 |
| $d_{max}$[c] | 6.58E+3 | 6.47E+3 | 1.50 |

[a] 바닥판에서의 최대전단력(N)

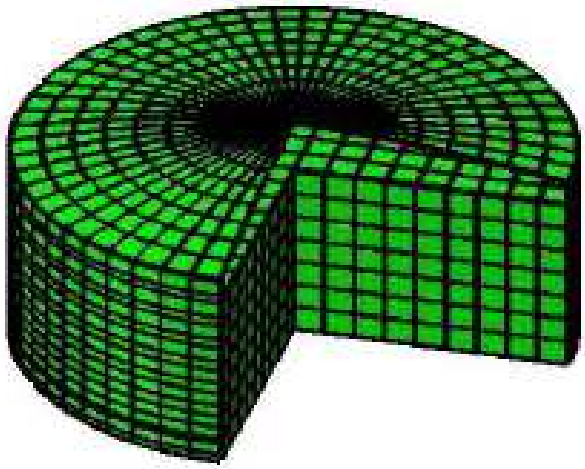
[b] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N・m)

[c] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

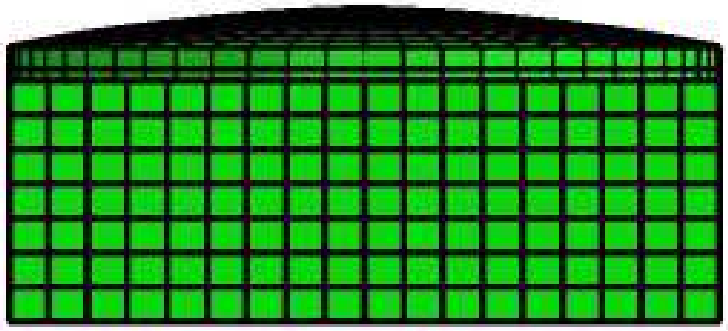
[d] 응답 차이(%)=(｜Haroun의 연구-3차원 해석모델｜)/｜Haroun의 연구｜ ×100

표 2.11.9 내부유체의 제원 및 물성 값 (200,000 kL급)

| 제원 | 단위 | 값 |
|---|---|---|
| 반지름 | m | 41.3 |
| 높이 | m | 35.2 |
| 밀도 | $kg/m^3$ | 1,000 |
| 점성계수 | Pa・s | 1.3E-03 |



(a) 부분 입체도



(b) 측면 전단면도

그림 2.11.9 3차원 해석모델 (유체포함)

다. 지진응답 해석

유체를 포함한 유체저장탱크의 지진에 대한 동적거동을 집중질량 모델 및 3차원 해석모델을 이용하여 해석한다. 가진 하중은 그림 2.11.10의 El Centro 지진의 남북방향 성분을 사용

했으며, 시간이력해석을 통하여 동적거동을 파악한다. 콘크리트 외부탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판은 지반에 강결된 가정에 따라 지반가속도와 동일한 가속도를 갖는다. 유체의 바닥면과 측면은 구조물과 구속시킴으로써 지진하중에 의한 유체와 구조물의 상호작용을 고려한다. 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크를 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥전단력, 바닥전도모멘트, 상대변위 등을 비교하여 지진하중에 대한 동적거동을 비교한다. 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 해석결과를 바탕으로, 구조물 내부에 유체가 있을 경우에 집중질량 모델의 문제점을 파악한다. 또한 내진설계단계에서 집중 질량 모델의 유체와 구조물의 상호작용 효과의 적용성 검토한다.

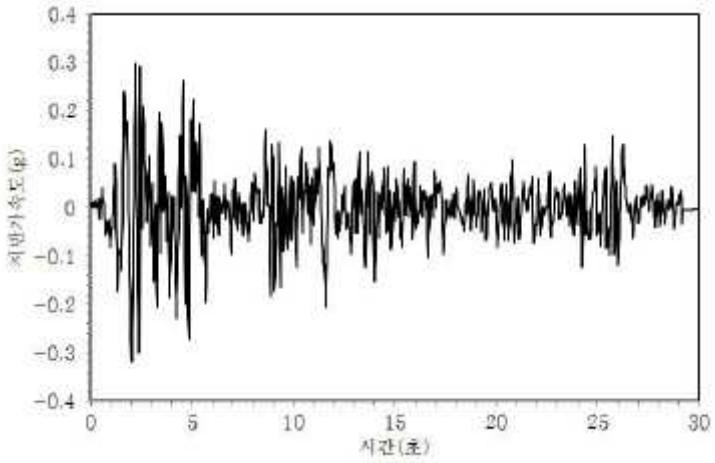



그림 2.11.10 EI Centro 지진의 남북방향 성분

유체를 포함한 콘크리트 외부탱크 바닥판에 X축 방향으로 가해진 El Centro 지진에 대한 동적거동을 최대전단력, 최대모멘트, 상대변위를 비교하여 파악한다. 2차원 모델인 집중질량 모델에서 최대전단력과 최대모멘트는 바닥판부분에서 반력으로 산출한다. 3차원 해석모델의 최대전단력과 최대모멘트 산정은 그림 2.11.11가 나타내는 3차원 해석모델의 바닥판 절점 형상을 통해 설명한다. 최대전단력의 경우 바닥판 절점들의 X축 방향의 반력들의 합을 계산한다. 최대모멘트 산정시에는 Z축을 기준으로 동일한 거리에 있는 바닥판 절점들의 Y축 방향 반력을 더한 후 그림 2.11.11에서 점선이 나타내는 Z축에 대한 모멘트팔 크기의 거리를 곱하여 계산한다. 지진하중에 대한 상대변위는 각각의 모델의 바닥판의 변위와 이를 기준으로 20m 높이의 탱크벽체의 변위차이를 계산하여 산정한다. 유체를 포함한 구조물의 내진해석을 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델과 전단 단면계수를 적용하여 전단을 고려한 집중질량 모델을 통하여 수행한다. 표 2.11.10는 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 El Centro 지진에 대한 동적응답을 나타낸다. 바닥판에서의 최대전단력과 최대전도모멘트는 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델이 3차원 해석모델에 대하여44.57 %와 41.33 %의 오차를 가진다. 전단 단면계수를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델은 최대전단력과 최대전도모멘트에 대하여 전단 단면계수를 적용하지 않은 모델보다 작은 38.96 %와 22.50 %의 오차를 갖는다. 바닥판과 벽체의 최대상대변위는 3차원 해석

모델에 대하여 전단변형을 고려하지 않은 집중질량모델의 오차율은 52.64 %로 약 2배 정도 작은 값을 갖고, 전단변형을 고려한 집중질량 모델의 오차율은 97.26 %로 약 2배 정도 큰 값을 갖는다. 즉 유체와 구조물의 상호작용에 대한 전단 단면계수를 적용한 집중질량 모델은 유체를 포함하지 않을 경우보다 상당히 보수적인 응답을 나타내므로 실제 단면력보다 최소 2배 이상의 큰 값이 산출될 수 있다. 그러므로 유체와 구조물의 상호작용을 고려한 추가적인 내진설계변수 산출이 필요하다. 그림 2.11.12, 그림 2.11.13, 그림 2.11.14은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 바닥판에서의 전단력, 전도모멘트 및 벽체의 상대변위를 모든 최댓값이 발생한 10초까지 나타내는 그래프이다. 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델은 3차원 해석모델보다 큰 최대응답을 갖지만, 시간이력해석상으로 유사한 거동이 관찰된다. 반면에 전단변형을 고려한 집중질량 모델의 최대응답 값의 오차는 작지만, 3차원 해석모델보다 작은 고유진동수를 갖으며 최대응답의 발생시간에 대한 차이가 확인된다. 이는 내부유체로 인한 질량증가와 전단변형을 고려한 전단 단면계수 적용효과라고 볼 수 있다.

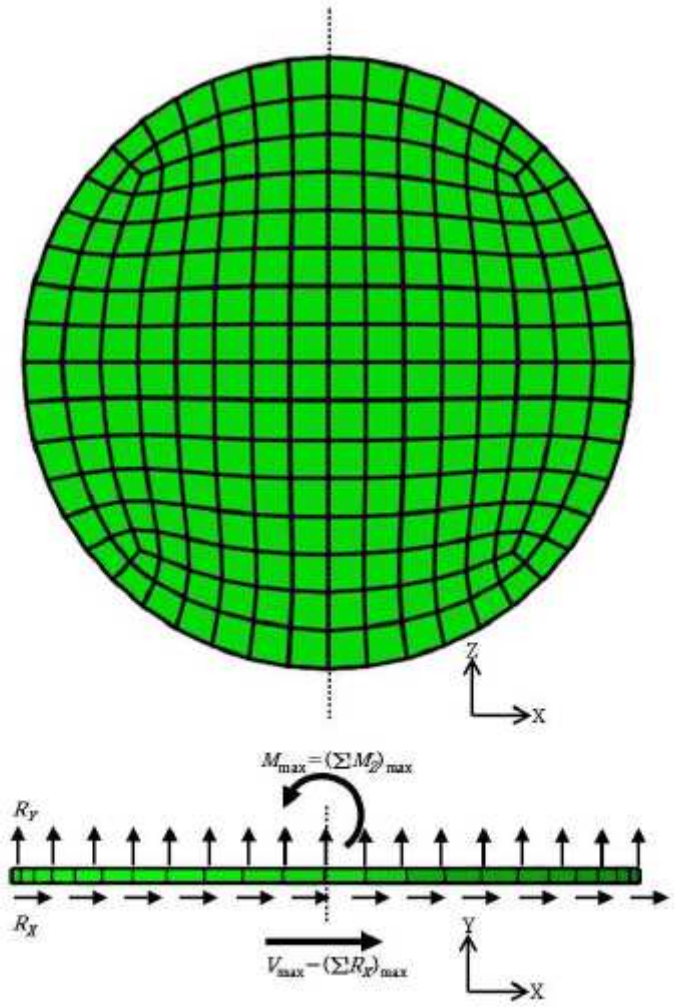



그림 2.11.11 3차원 해석모델의 바닥판 절점

표 2.11.10 지진응답 해석결과

| 해석모델 | 집중질량 모델 I [a] | 집중질량 모델 II [b] | 3차원 해석모델 |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[c] | 8.35E+08 | 8.02E+08 | 5.77E+08 |
| 오차율(%)[f] | 44.57 | 38.96 | 기준 |
| $M_{max}$(N · m)[d] | 2.39E+10 | 2.07E+10 | 1.69E+10 |
| 오차율(%)[f] | 41.33 | 22.50 | 기준 |
| $d_{max}$[e] | 4.88E-03 | 2.03E-02 | 1.03E-02 |
| 오차율(%)[f] | 52.64 | 97.26 | 기준 |

[a] 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

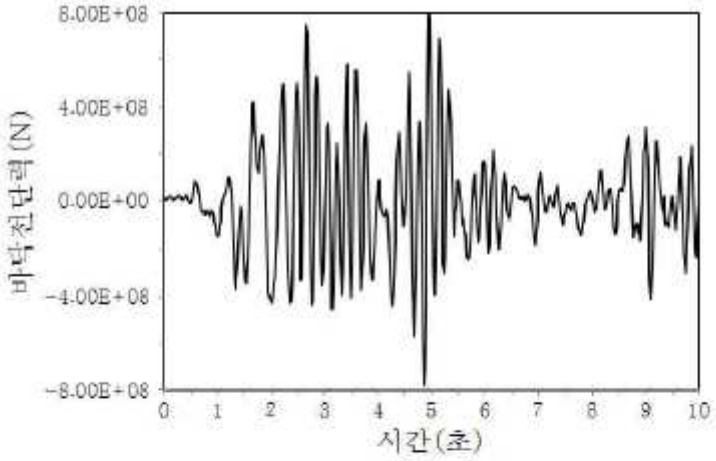
[b] 전단 단면계수 0.2를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델

[c] 바닥판에서의 최대전단력(N)

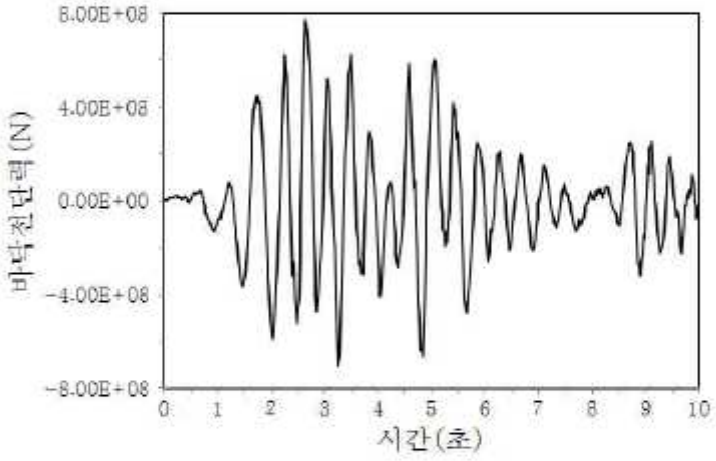
[d] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N · m)

[e] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

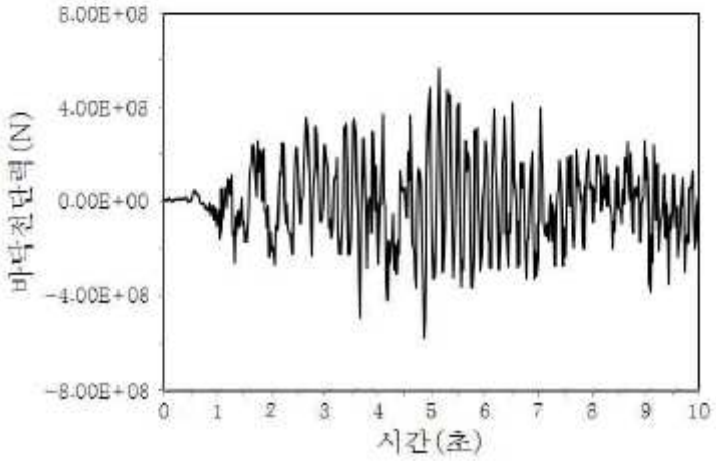
[f] 오차율(%)=(｜기준값-해석값｜)/｜기준값｜×100




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

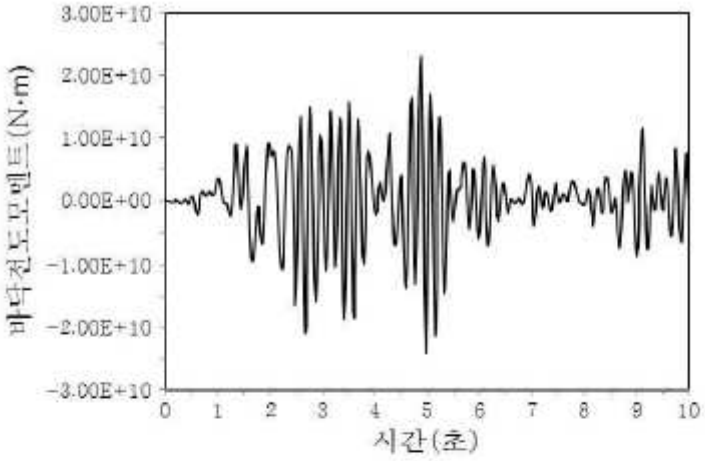



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

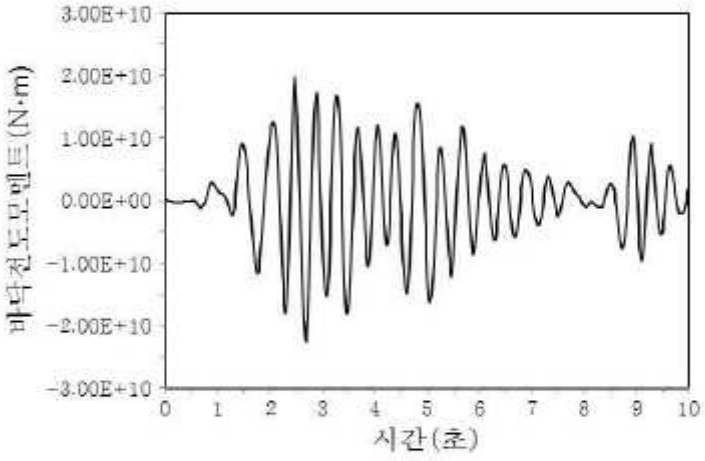



(c) 3차원해석 모델

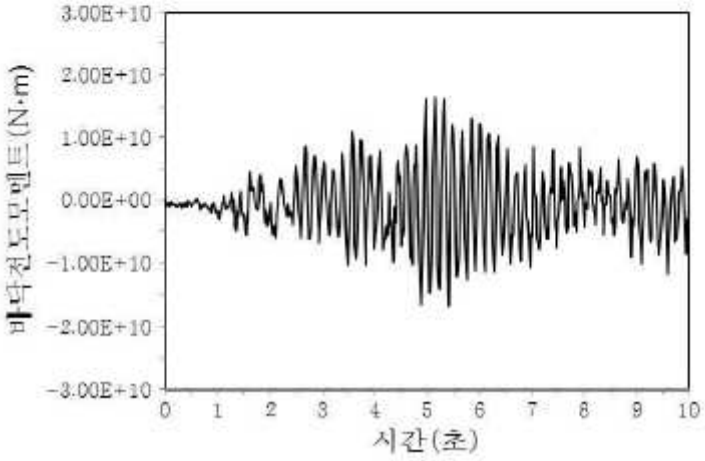
그림 2.11.12 지진하중에 대한 전단력




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

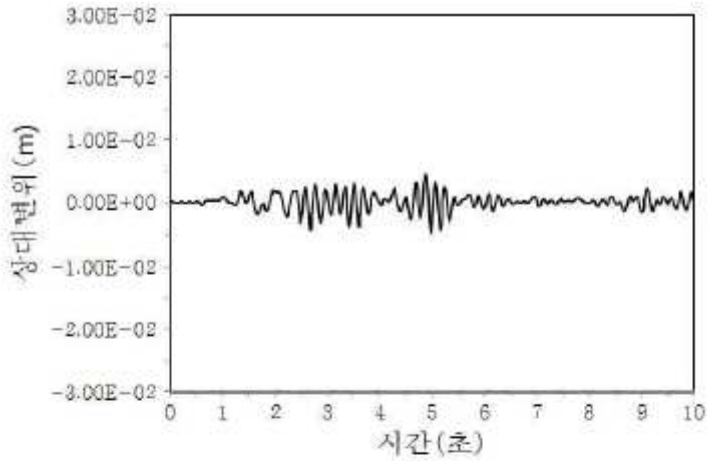



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

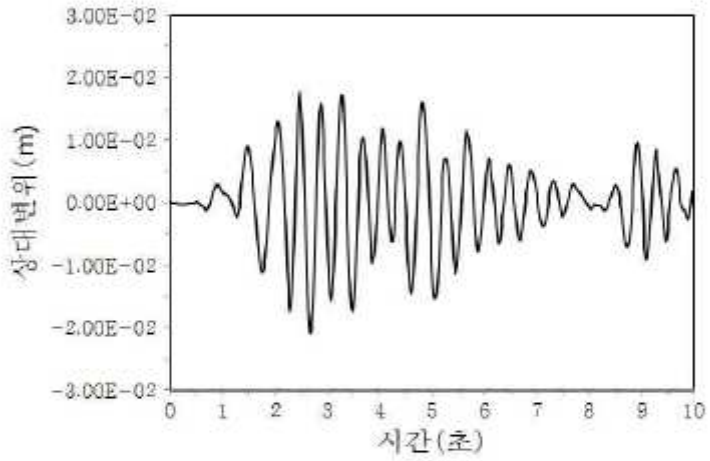



(c) 3차원해석 모델

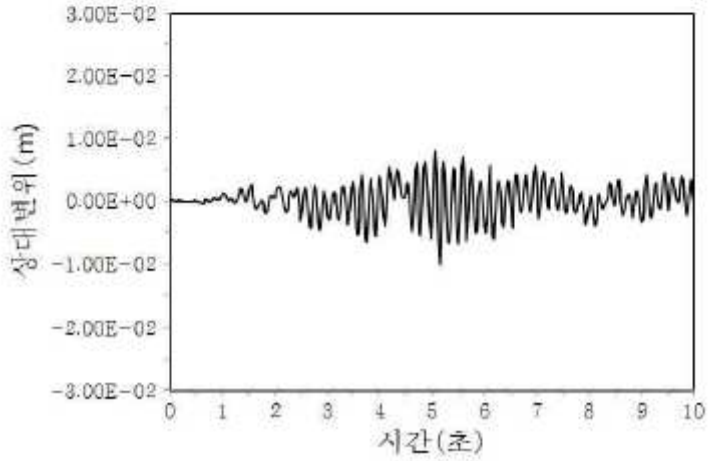
그림 2.11.13 지진하중에 대한 전도모멘트




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델




(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델




(c) 3차원해석 모델

그림 2.11.14 지진하중에 대한 상대변위

4. 최적설계기법 타당성 분석

가. 내진설계변수 산출

현재 유체저장탱크의 내진해석에서 사용되는 단순화 모델은 3차원 해석모델보다 큰 지진응답이 계산된다. 따라서 벽체두께가 과다하게 설계되는 등의 문제가 발생 할 수 있다. 또한 내부유체의 질량과 전단 단면계수의 적용으로 인하여 지진응답의 시간이력에서 3차원 해석모델과 차이가 관찰된다. 그러므로 이러한 문제점을 보완하여 단순화 모델의 정확도 향상시킬 수 있는 내진설계변수 산출이 필요하다. 유체를 포함한 콘크리트 외부탱크의 단순화 모델은 16개의 집중질량으로 구성된다. 여기서 보요소와 스프링으로 연결된 1개의 대류성분의 집중질량을 제외한 15개의 집중질량 개수 증가에 따른 지진응답을 파악하여 적합한 집중질량 개수를 파악한다. 표 2.11.11은 집중질량 개수 15개를 기준으로 2배 간격으로 증가시켜 기존의 집중질량 개수보다 40배까지 증가된 오차율을 나타낸다. 집중질량 개수 증가에 따른 오차율에 추세를 파악하면 10배 이전에는 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차가 약 10 % 안쪽으로 증가와 감소가 나타나지만 약 10배 이상 값에서 수렴하는 것을 알 수 있다. 즉 단순화 모델에서 집중질량 개수에 의한 오차를 줄이기 위해서는 기존의 집중질량 개수보다 10배 이상 큰 값을 사용하는 것이 타당하다.

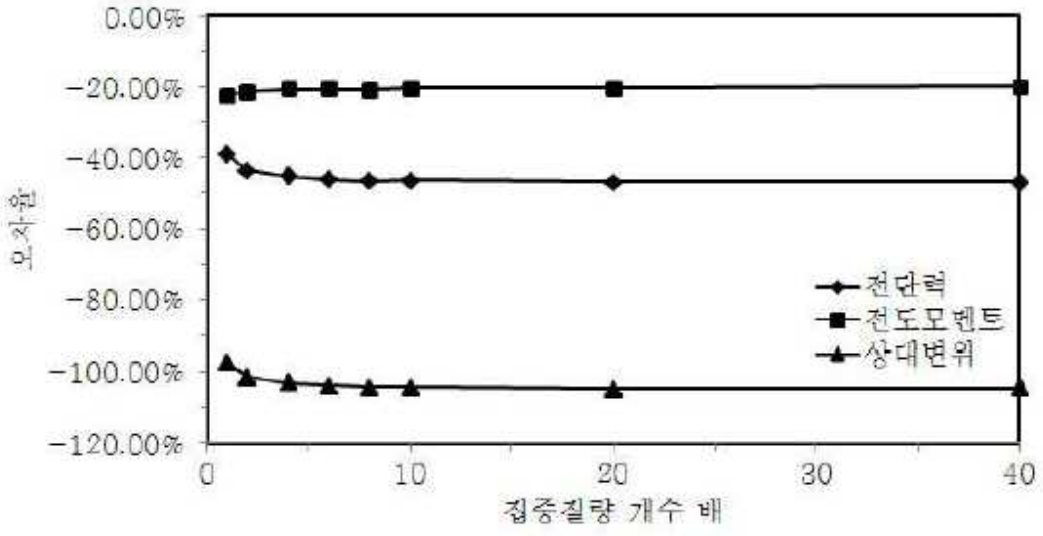



그림 2.11.15 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

표 2.11.11 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| 집중질량 개수 | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 기준 | -38.96 | -22.50 | -97.26 |
| 2배 | -43.47 | -21.27 | -101.39 |
| 4배 | -45.22 | -20.47 | -102.99 |
| 6배 | -46.08 | -20.58 | -103.83 |
| 8배 | -46.50 | -20.64 | -104.25 |
| 10배 | -46.46 | -20.27 | -104.19 |
| 20배 | -46.87 | -20.19 | -104.59 |
| 40배 | -46.86 | -19.91 | -104.55 |

[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100

지진하중에 대한 응답을 비교한 결과를 통해 단순화 모델의 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위가 모두 3차원 해석모델보다 큰 값을 갖는 것을 확인했다. 특히 최대상대변위에서는 다른 두 값보다 더 큰 오차가 발생한다. 또한 내부유체의 질량과 전단 단면계수의 적용으로 인하여 단순화 모델이 3차원 해석모델보다 작은 고유진동수 갖는 것으로 관찰된다. 그러므로 내부의 유체를 포함하고 있는 단순화 모델의 전단 단면계수를 증가시키며 상대변위의 감소에 따른 지진응답의 추세를 파악한다. 집중질량 개수에 의한 오차를 줄이기 위하여 기존의 단순화 모델보다 10배 더 많은 집중질량을 사용한다. 표 2.11.12는 내부유체 유무에 따른 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답을 나타내고, 이를 그래프로 표현하면 그림 4.2와 같다. 양의 부호를 갖는 오차율은 단순화 모델이 3차원 해석모델보다 작은 지진응답 값을 갖는 경우이고, 음의 부호는 그 반대를 의미한다. 현재 내진설계 방식에 따라 해석대상 구조물의 유체를 포함하는 경우에는 전단 단면계수를 0.2를 사용한다. 이를 단순화 모델에 적용하였을 경우 3차원 해석모델에 대한 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율은 각각 -46.46 %, -20.27 %, -104.19 %이다. 내부의 유체를 포함하는 경우에는 단순화 모델의 모든 지진응답이 3차원 해석모델보다 큰 값을 갖는다. 특히 최대상대변위의 경우 최대전단력과 최대전도모멘트보다 3배 더 큰 오차를 가지므로 이러한 오차를 줄이기 위하여 전단단면계수에 대한 검토가 필요하다. 전단 단면계수를 증가시키며 지진응답에 대한 오차율을 파악한 결과 전단 단면계수 0.6을 적용한 경우 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율이 -28.29 %, 2.15 %, 42.97 %로 가장 작은 값을 갖는다. 내부유체를 고려하여 현재 적용

되는 전단 단면계수 0.2를 적용한 경우와 비교하여 최대전단력과 최대상대변위는 약 2배 정도의 차이지만 최대전도모멘트는 약 10배 이상의 큰 차이가 발생된다. 그러므로 해석대상 구조물 내부의 유체를 포함한 경우 단순화 모델의 전단 단면계수를 0.6을 적용하는 것이 합리적이다. 그 밖에 전단 단면계수 증가에 따른 지진응답에 추세를 분석하면 최대상대변위는 전단단면계수 0.6 이후로 수렴하는 경향을 나타낸다. 최대전단력과 최대전도모멘트의 경우에는 3차원 해석 모델에 대하여 평균 30~40 % 정도의 오차를 가지며 증가와 감소가 반복된다. 즉 내부유체를 포함하는 해석대상의 구조물의 경우 기존의 전단단면계수 0.2보다 큰 전단 단면계수 0.6을 적용하면 더 정확한 지진응답을 얻을 수 있다. 그림 4.3은 전단 단면계수 0.6을 적용한 집중질량 모델의 지진응답의 시간이력을 나타낸다. 전단 단면계수 0.6을 적용한 집중질량 모델의 고유진동수는 그림 2.11.16, 그림 2.11.17에 3차원 해석모델과 유사하게 나타나지만 최대응답의 발생시간은 두 모델간의 차이가 확인된다.

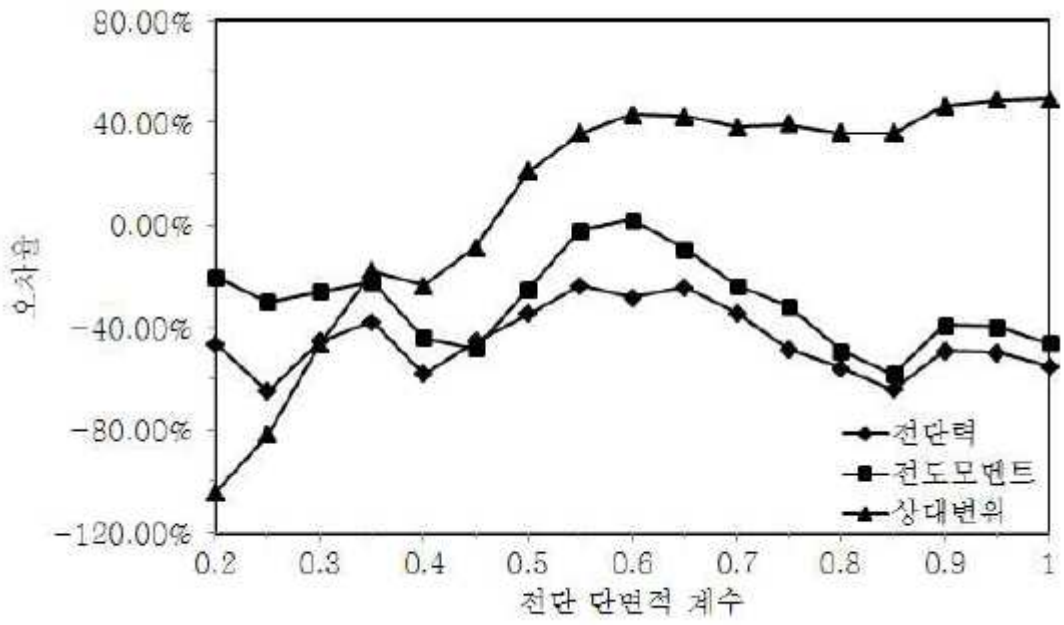
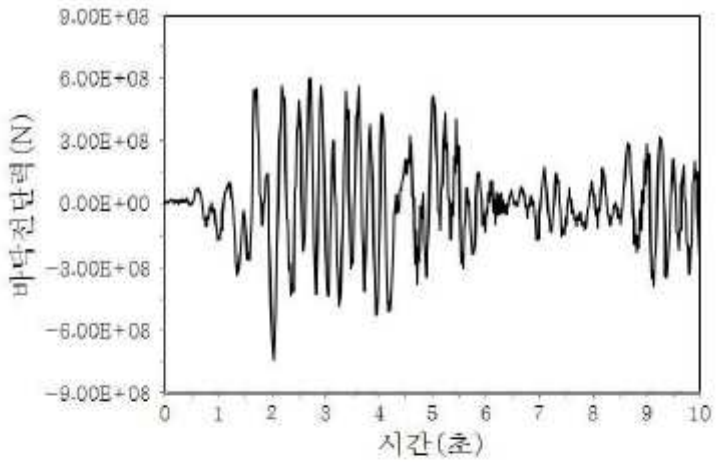



그림 2.11.16 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답

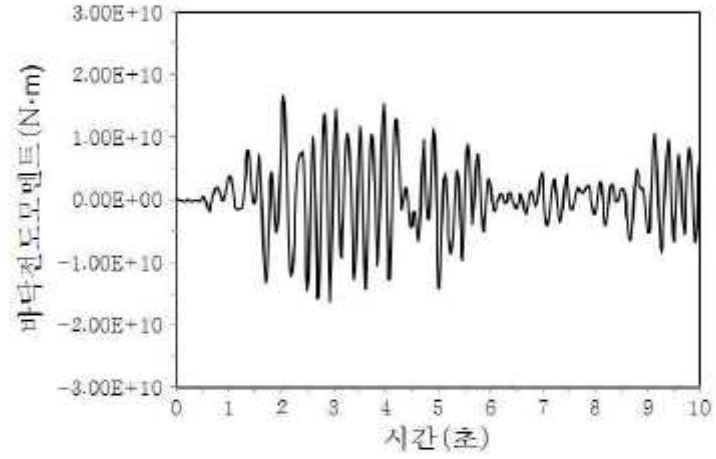
표 2.11.12 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 해석모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| 전단 단면계수 | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 0.2 | -46.46 | -20.27 | -104.19 |
| 0.25 | -65.05 | -29.89 | -81.91 |
| 0.3 | -45.46 | -26.01 | -46.74 |
| 0.35 | -37.54 | -22.25 | -17.92 |
| 0.4 | -58.31 | -44.17 | -23.59 |
| 0.45 | -45.27 | -47.97 | -8.75 |
| 0.5 | -34.62 | -24.77 | 21.17 |
| 0.55 | -23.67 | -2.02 | 36.14 |
| 0.6 | -28.29 | 2.15 | 42.97 |
| 0.65 | -24.23 | -9.31 | 42.36 |
| 0.7 | -34.15 | -23.50 | 38.51 |
| 0.75 | -48.53 | -31.64 | 39.27 |
| 0.8 | -55.82 | -49.08 | 36.04 |
| 0.85 | -64.27 | -58.25 | 36.16 |
| 0.9 | -49.25 | -38.92 | 46.36 |
| 0.95 | -49.66 | -39.71 | 48.86 |
| 1 | -55.04 | -46.10 | 49.32 |

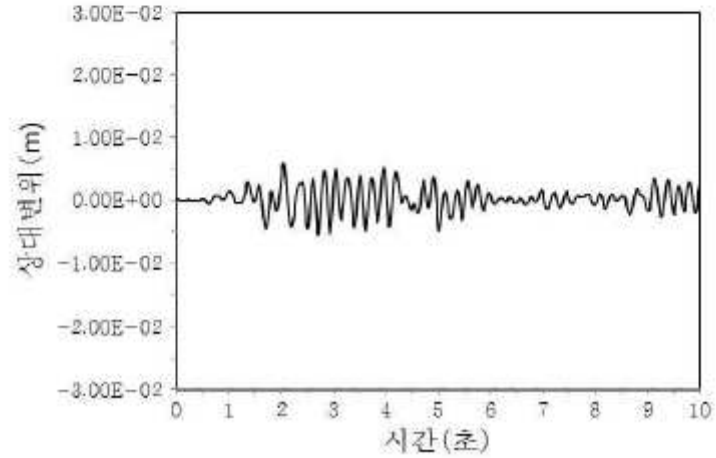
[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100




(a) 바닥판에서의 전단력




(b) 바닥판에서의 전도모멘트




(c) 바닥판과 벽체의 상대변위

그림 2.11.17 산출된 전단 단면계수에 대한 지진응답

나. 내진설계변수 적용성 검토

단순화 모델의 정확도 향상을 위하여 산출된 내진설계변수의 적용성을 270,000kL급 유체저장탱크의 지진해석을 통하여 검토한다. 표 2.11.13와 표 2.11.14은 유체저장탱크와 내부유체의 제원 및 물성 값을 나타낸다. 이러한 해석대상에 대하여 앞선 3장과 동일한 지진하중과 해석기법을 적용하여 집중질량 모델과 3차원 해석모델로 지진해석을 수행한다. 전단변형을 고려한 집중질량 단순화 모델의 전단 단면계수는 해석대상에 벽체의 반경과 높이를 토대로 산정된 0.22를 사용한다. 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 비교를 바탕으로 앞 절에서 산출한 집중질량 개수와 전단 단면계수에 대한 적용성 검토는 다음과 같다.

표 2.11.13 해석대상의 제원 및 물성 값

| 제원 | | 단위 | 값 |
|---|---|---|---|
| 외부탱크 | 반지름 | m | 48.30 |
| | 높이 | m | 지붕 11.28<br>벽체 47.70 |
| | 두께 | m | 지붕(~58.98m)* 0.60<br>링빔(~47.70m)* 1.50<br>벽체(~44.50m)* 0.86<br>벽체(~7.50m)* 1.04<br>벽체(0~4.00m)* 1.16<br>바닥판 2.00 |
| | 밀도 | $kg/m^3$ | 2,500 |
| | 콘크리트 탄성계수 | $MPa(MN/m^2)$ | 지붕 및 바닥판 29,000<br>PS벽체 및 링빔 31,750 |
| | 포아송비 | - | 0.20 |

* 바닥판 위를 기준으로 각 벽체의 높이

표 2.11.14 내부유체의 제원 및 물성값

| 제원 | 단위 | 값 |
|---|---|---|
| 반지름 | m | 48.30 |
| 높이 | m | 37.70 |
| 밀도 | $kg/m^3$ | 1,000 |
| 점성계수 | Pa · s | 1.3E-03 |

270,000 kL급 유체저장탱크의 단순화 모델의 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답을 파악한다. 3차원 해석모델의 지진응답에 대한 전단변형을 고려한 집중질량모델의 오차율은 표 2.11.15과 같고, 그림 2.11.18는 이를 그래프로 나타낸다. 집중질량 개수 증가에 대한 오차율의 변화를 분석하면 200,000 kL급 유체저장탱크와 동일하게 약 10배 이상 값에서 3차원 해석모델에 대한 오차가 수렴하는 것이 관찰된다. 그러므로 오차율에 영향을 미치지 않는 집중질량 개수 기준에 대한 내진설계변수의 적용성이 검증된다.

표 2.11.15 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 해석모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| 집중질량 개수 | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 기준 | -72.63 | -51.41 | -114.85 |
| 2배 | -75.62 | -49.78 | -117.16 |
| 4배 | -76.28 | -48.44 | -118.25 |
| 6배 | -76.85 | -48.34 | -118.99 |
| 8배 | -76.81 | -47.92 | -118.97 |
| 10배 | -76.66 | -47.52 | -118.84 |
| 20배 | -77.67 | -47.94 | -119.89 |
| 40배 | -77.34 | -47.50 | -119.89 |

[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100

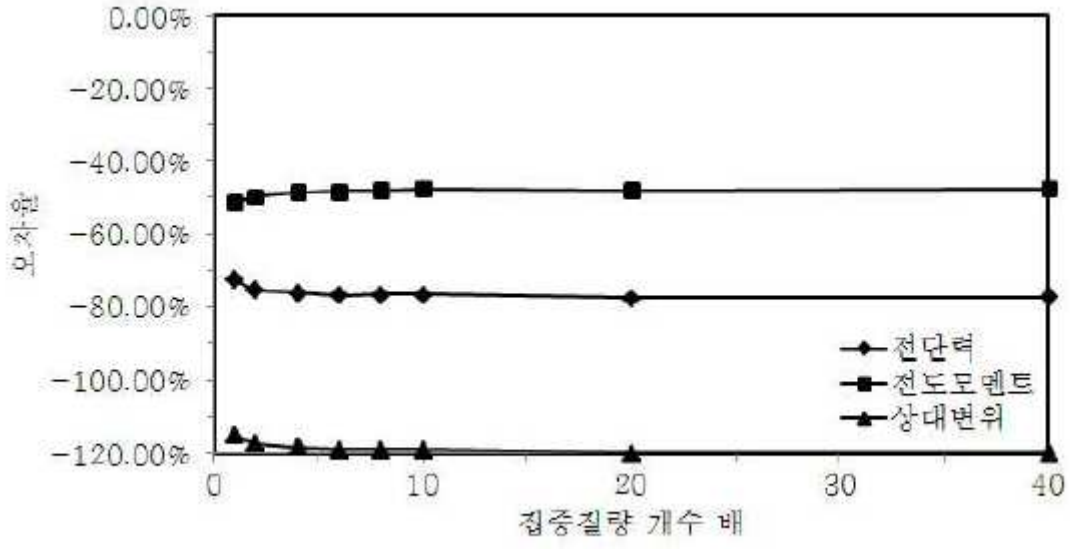



그림 2.11.18 집중질량 개수 증가에 대한 지진응답

내부의 유체를 포함된 유체저장탱크의 전단 단면계수 적용성을 검토한다. 표 2.11.16은 270,000 kL급 유체저장탱크의 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답 비교를 나타낸다. 전단변형을 고려하지 않은 모델의 3차원 해석모델에 대한 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율은 각각 80.79 %, 51.15 %, 47.68 %이다. 전단변형을 고려한 집중질량 모델에 경우의 오차율은 각각 76.20 %, 47.15 %, 118.26 %로 최대전단력과 최대전도모멘트는 전단변형을 고려하지 않은 모델과 비슷한 오차를 갖으나 최대상대변위는 약 2배 정도 큰 값을 갖는다. 그림 2.11.19, 그림 2.11.20, 그림 2.11.21은 집중질량 모델과 3차원 해석모델의 지진응답의 시간이력을 나타낸 그래프이다. 지진응답의 시간이력에서 전단변형을 고려한 집중질량 모델이 3차원 해석모델보다 작은 고유진동수를 갖는 것이 관찰된다. 그러므로 200,000 kL급 유체저장탱크의 지진응답과 유사한 경향을 나타내므로 내부유체를 고려한 전단 단면계수에 대한 검토가 필요하다. 전단변형을 고려한 단순화 모델의 전단 단면계수를 증가시키며 상대변위의 감소에 따른 지진응답의 추세를 파악한 결과는 표 2.11.17와 같고, 이를 그림 2.11.19는 3차원해석모델의 대한 집중질량 모델의 오차율을 그래프로 표현한다. 이를 참고하여 전단 단면계수 증가에 따른 지진응답의 오차율을 파악한 결과 0.72를 적용한 경우 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율이 -56.57 %, -12.52 %, 45.49%로 가장 작은 값을 갖는다. 내부유체를 고려하여 현재 적용되는 0.2를 적용한 경우와 비교하여 최대전단력과 최대상대변위는 약 2배 정도의 차이지만 최대전도모멘트는 약 4배 정도의 큰 차이가 발생된다. 그러므로 해석대상 구조물 내부의 유체를 포함한 경우에는 전단 단면계수 0.72를 적용하는 것이 합리적이다. 이는 200,000 kL급 유체저장탱크의 수정된 전단 단면계수 0.6과 유사한 값으로 저장용량이 늘어남에 따른 가 증가하였다고 볼 수 있다. 그러므로 유체저장탱크의 용량에 따른 적합한 전단 단면계수의 범위를 제시하는 것이 가능하므로 전단 단면계수 산출에 대한 적용성이 검증된다. 또한 그림 2.11.20은 전단 단면계수 0.72를 적용한 집중질량 모델의 지진응답을 나타낸다. 그림 2.11.19, 그림 2.11.20에 3차원 해석모델의 시간이력과 유

사한 고유진동가 확인되지만 최대응답의 발생시간에서는 차이가 나타난다. 단순화 모델의 정확도 향상을 위하여 산출된 내진설계변수를 270,000 kL급 유체저장탱크를 통하여 적용성을 검토한 결과는 다음과 같다. 집중질량 개수에 따른 오차율의 추세에 대해서는 200,000 kL급 유체저장탱크와 마찬가지로 유체저장탱크와 마찬가지로 10배 이상의 값에서 수렴함이 확인된다. 또한 유체를 포함할 경우 270,000 kL급 유체저장탱크의 전단 단면계수인 0.22를 적용하였을 경우 200,000 kL급 유체저장탱크의 경우처럼 3차원 해석모델보다 지진응답이 크게 계산된다. 이를 바탕으로 전단 단면계수증가에 따른 지진응답을 파악한 결과 0.72에서 적합한 응답이 확인된다. 이에 따라 유체저장용량에 대한 적합한 전단 단면계수의 범위를 확인하였다. 또한 270,000 kL급 유체저장탱크의 수정된 전단 단면계수 0.72를 적용한 집중질량 모델의 경우 200,000 kL급 유체저장탱크와 마찬가지로 고유진동수는 3차원해석 모델과 유사하지만 지진응답의 시간이력에서 최대응답의 발생시간에 대해서는 차이가 발생한다.

표 2.11.16 지진응답 해석결과

| 해석모델 | 집중질량 모델 I [a] | 집중질량 모델 II [b] | 3차원 해석모델 |
|---|---|---|---|
| $V_{max}$(N)[c] | 1.10E+09 | 1.07E+09 | 6.09E+08 |
| 오차율(%)[f] | 80.79 | 76.20 | 기준 |
| $M_{max}$(N · m)[d] | 3.23E+10 | 3.14E+10 | 2.14E+10 |
| 오차율(%)[f] | 51.15 | 47.15 | 기준 |
| $d_{max}$[e] | 6.110E-03 | 2.55E-02 | 1.17E-02 |
| 오차율(%)[f] | 47.68 | 118.26 | 기준 |

[a] 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

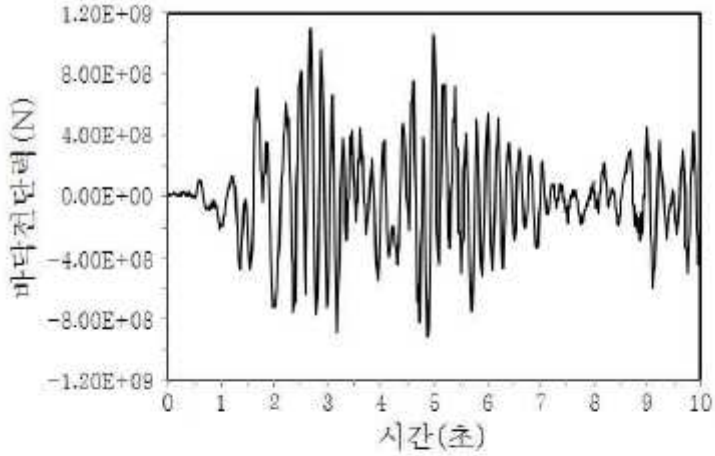
[b] (0.2, 0.22)를 적용하여 전단변형을 고려한 집중질량 모델

[c] 바닥판에서의 최대전단력(N)

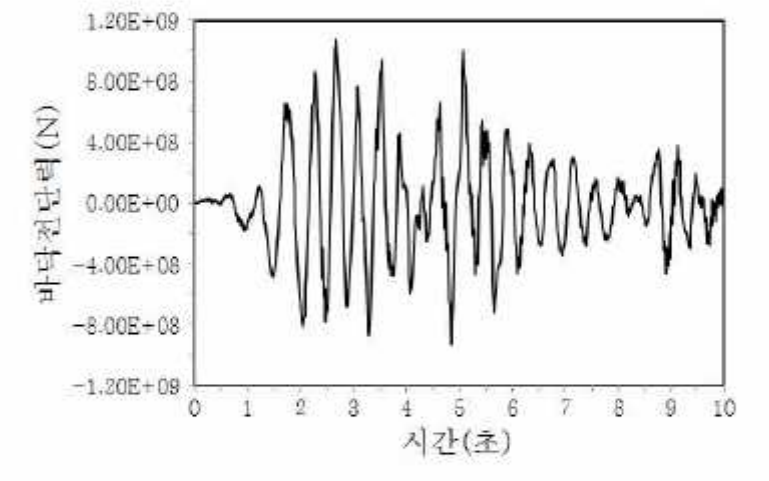
[d] 바닥판에서의 최대전도모멘트(N · m)

[e] 바닥판과 벽체의 최대상대변위(m)

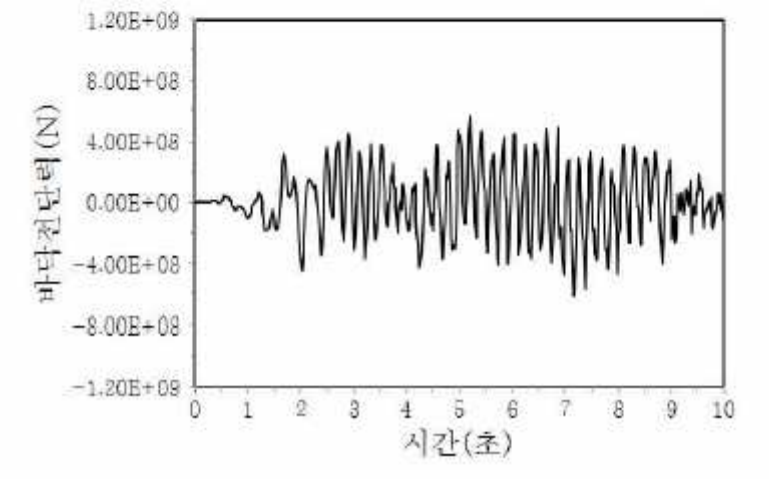
[f] 오차율(%)=( | 기준값-해석값 | )/ | 기준값 | ×100




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

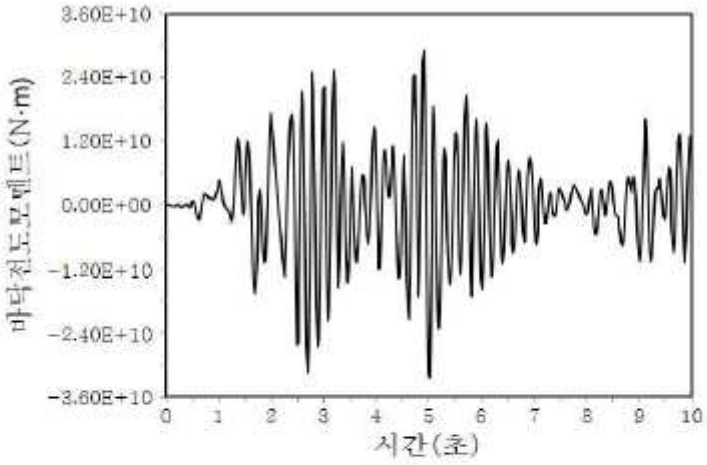



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

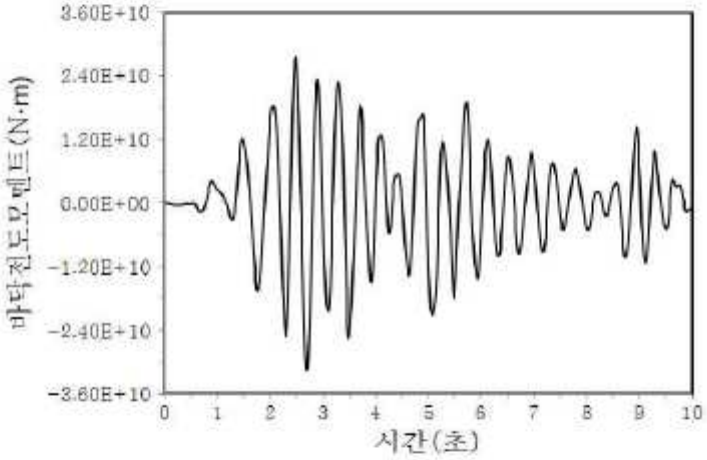



(c) 3차원해석 모델

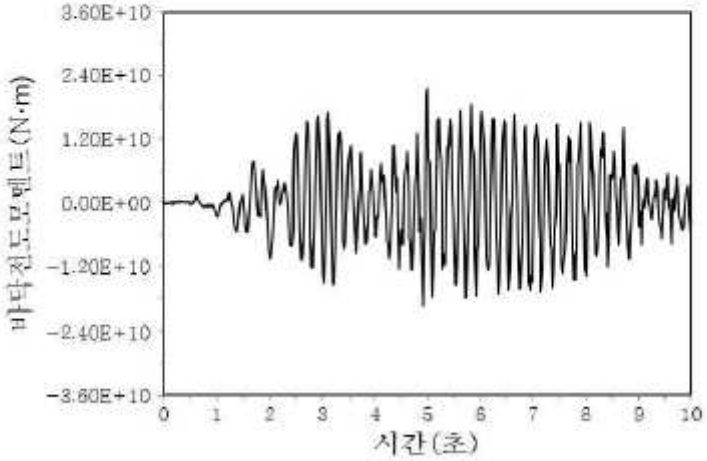
그림 2.11.19 지진하중에 대한 전단력




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델

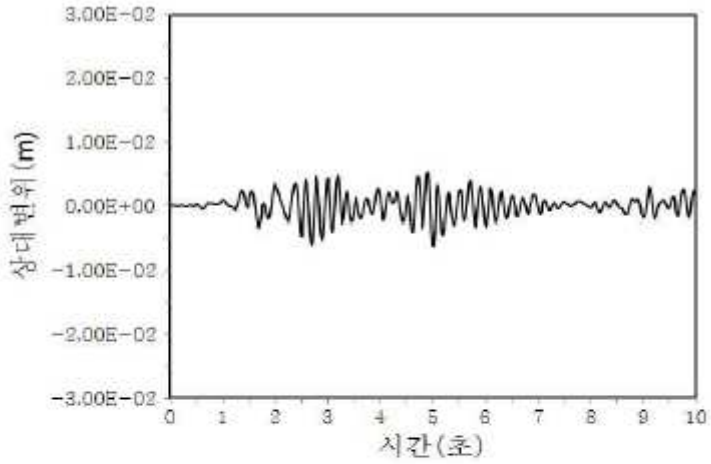



(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델

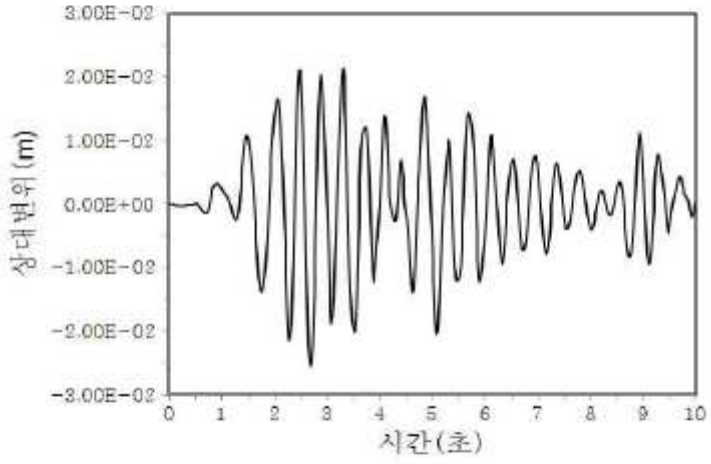



(c) 3차원해석 모델

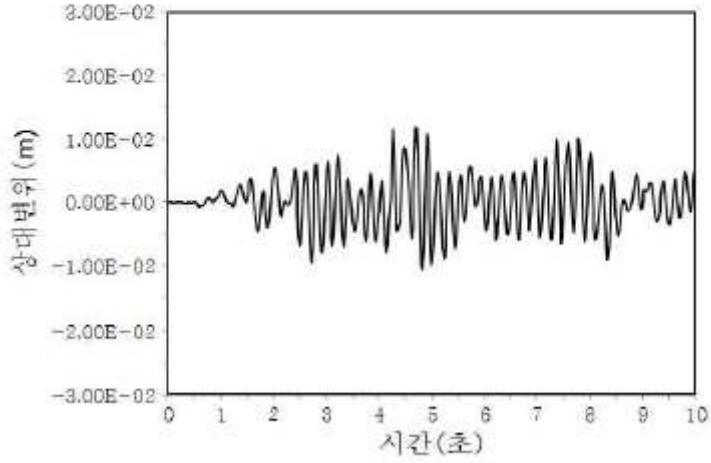
그림 2.11.20 지진하중에 대한 전도모멘트




(a) 전단변형을 고려하지 않은 집중질량 모델




(b) 전단변형을 고려한 집중질량 모델




(c) 3차원해석 모델

그림 2.11.21 지진하중에 대한 상대변위

표 2.11.17 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답

| | 3차원 해석모델에 대한 오차율(%)[a] | | |
|---|---|---|---|
| | 최대전단력 | 최대전도모멘트 | 최대상대변위 |
| 0.22 | -76.20 | -47.15 | -118.26 |
| 0.27 | -87.37 | -36.23 | -79.40 |
| 0.32 | -100.97 | -48.16 | -61.54 |
| 0.37 | -86.53 | -46.26 | -40.58 |
| 0.42 | -75.88 | -38.75 | -13.55 |
| 0.47 | -79.06 | -48.58 | -6.01 |
| 0.52 | -100.20 | -68.20 | -7.25 |
| 0.57 | -88.10 | -72.62 | 0.73 |
| 0.62 | -75.46 | -54.81 | 19.60 |
| 0.67 | -58.38 | -29.08 | 36.28 |
| 0.72 | -56.57 | -12.52 | 45.49 |
| 0.77 | -58.59 | -9.64 | 49.15 |
| 0.82 | -53.62 | -16.69 | 50.57 |
| 0.87 | -55.54 | -30.58 | 47.27 |
| 0.92 | -65.95 | -37.83 | 46.86 |
| 0.97 | -78.25 | -45.76 | 47.79 |
| 1 | -80.79 | -51.15 | 47.68 |

[a] 오차율(%)=(기준값-해석값)/기준값 × 100

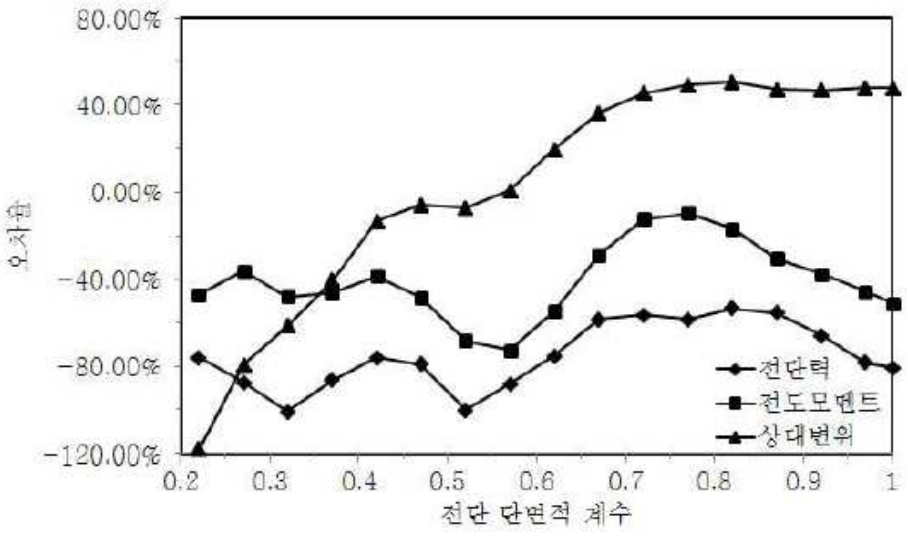
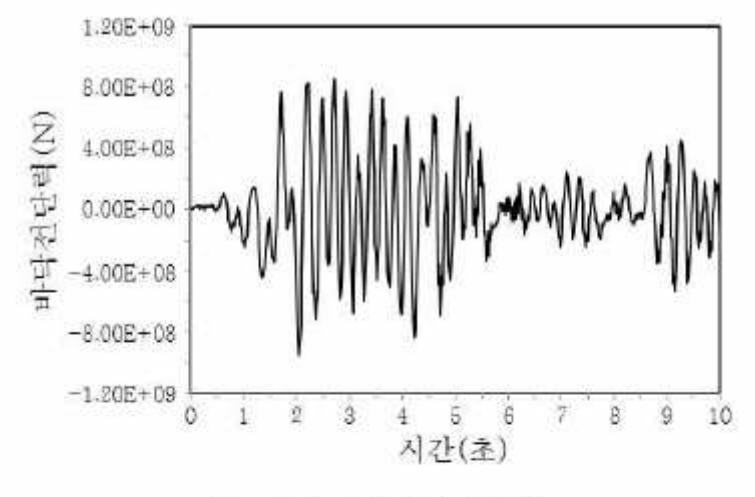
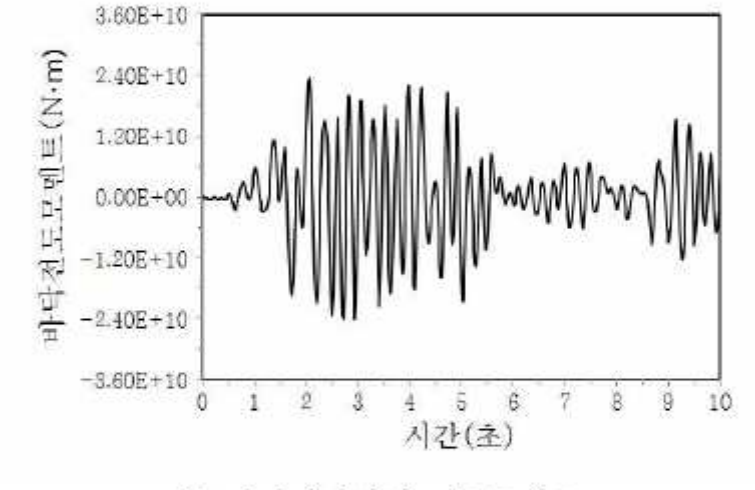


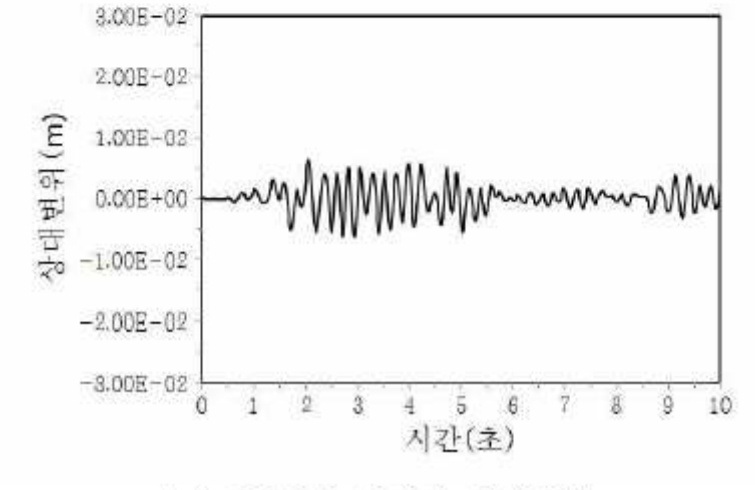

그림 2.11.20 전단 단면계수 증가에 대한 지진응답




(a) 바닥판에서의 전단력




(b) 바닥판에서의 전도모멘트




(c) 바닥판과 벽체의 상대변위

그림 2.11.21 산출된 전단 단면계수에 대한 지진응답

## 5. 결 론

본 연구에서는 유체저장탱크를 집중질량 모델과 3차원 해석모델로 모형화하여 지진해석을 수행하였다. 지진응답을 바탕으로 검증된 3차원 해석모델에 대하여 정확도의 한계를 갖는 단순화 모델의 문제점을 파악하고, 이를 해결하기 위하여 추가적인 내진설계변수를 산출하였다. 나아가서 산출된 내진설계변수의 적용성을 검토하여 단순화모델의 내진설계기준을 제시하였다. 본 연구를 통하여 유체저장탱크의 단순화 모델인 집중질량 모델의 동적거동 특성을 파악한 결론은 다음과 같다.

1. 유체저장탱크의 3차원 해석모델의 고유진동수 및 고유모드형상을 파악하기위하여 고유모드 해석을 수행하였다. 해석대상의 주요모드에서 상부와 벽체는 cosnΘ형의 모드형상이 나타난다. 상부의 모드형상은 고유진동수에 증가에 따라 복잡한 cosnΘ형에서 단순한 cosnΘ형까지 변형의 형상이 반복된다. 하지만 벽체의 경우에는 고유진동수가 증가함에 따라 초기에는 cosnΘ형에서부터 점차 cosnΘ형의 모드형상을 가지는 복잡한 형상이 나타남을 알 수 있었다.

2. 집중질량 모델과 검증된 3차원 해석모델의 지진응답을 이용하여 단순화모델의 적용성을 검토하였다. 내부유체의 유무에 따라 다르게 적용되는 전단단면계수로 인한 지진응답의 차이를 확인 할 수 있었다. 구조물이 유체를 포함하지 않는 경우에는 3차원 해석모델에 대한 전단변형을 고려한 모델의 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위의 오차율은 12.01 %, 11.09 %, 22.26 %로서 거의 유사한 응답이 나타난다. 하지만 유체를 포함할 최대전단력과 최대전도모멘트는 38.96 %와 22.50 %로 유체를 포함하지 않을 경우에 비하여 오차율이 약 3배 증가하며 최대전단력의 오차율은 97.26 %로 5배 정도 증가된다. 또한 3차원 해석모델보다 집중질량 모델의 고유진동수가 감소하며, 지진응답의 시간이력에서 최대응답의 발생시간에 대한 차이가 나타난다. 즉, 유체와 구조물의 상호작용이 고려된 변환된 전단 단면계수가 지진하중에 대한 최대전단력, 최대전도모멘트, 최대상대변위뿐만 아니라 고유진동수 및 지진응답의 시간이력에도 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3. 단순화 모델에서 고체성분과 유체성분의 집중질량 개수에 대한 지진응답을 검토하였다. 집중질량 모델의 집중질량 개수를 증가시켜 오차율의 변화를 파악한 결과 기존의 질량의 개수보다 약 10배 이상 큰 값을 적용할 경우 3차원해석모델에 대한 오차가 수렴하는 것을 확인했다. 즉, 200,000 kL급 유체저장탱크의 단순화 모델에서 집중질량 개수에 의한 오차를 줄이기 위해서는 기존의 집중질량 개수보다 10배 이상 큰 값을 사용하는 것이 적합하다.

4. 유체를 포함한 단순화 모델의 전단 단면계수 증가에 따른 지진응답을 검토를 통하여 200,000 kL급 유체저장탱크에 대하여 기존의 전단 단면계수 0.2 보다 큰 0.6을 적용할 경우 더욱 정확한 지진응답이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전단 단면계수가 증가함에 따라 벽체의 상대변위는 감소하며 점차 수렴하지만 전단력과 전도모멘트는 증가와 감소가 반복된다. 또한 전단단면계수 0.6을 적용한 집중질량 모델은 3차원 해석모델에 대하여 고유진동수는 유사하게 나타나지만 지진응답의 시간이력에서는 차이가 발생한다.

5. 단순화 모델의 정확도 향상을 위하여 산출된 내진설계변수를 270,000 kL급 유체저장탱크를 통하여 적용성을 검토하였다. 먼저 집중질량 개수에 따른 오차율은 200,000 kL급 유체저장탱크와 동일하게 10배 이상의 값에서 수렴함을 알 수 있었다. 전단 단면계수에 대해서도 유체를 포함한 270,000 kL급 유체저장탱크의 전단 단면계수인 0.22를 적용할 경우 200,000 kL급 유체저장탱크와 마찬가지로 3차원 해석모델보다 지진응답이 크게 계산되었다. 이를 바탕으로 전단 단면계수 증가에 따른 지진응답을 파악한 결과 0.72에서 적합한 응답이 확인되었다. 결론적으로, 200,000～270,000 kL급 유체저장탱크의 내진 설계시 집중질량 개수는 약 150개 이상으로 모델링하고, 전단 단면계수는 약 0.6～0.7을 적용하는 것이 타당하다

# 12절. 온도하중에 의한 벽체최적기법 확립을 위한 온도의존적 물성을 반영하는 온도분포에 관한 연구

## 1. 연구 목적 및 동향

### 가..연구목적

친환경 에너지인 LNG는 청정연료이자 탄소배출량이 타 화석연료에 비해 상대적으로 적어 정부의 녹색성장이라는 목표에 가장 부합하며, 그 수요량은 전 세계적으로 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 최근 환경문제의 대안으로 아시아 지역에서 잠재 수요량이 급격히 늘어나고 있으나 신규 가스전 개발은 수요 증가 속도를 따라가지 못하는 점을 감안할 때 전 세계적인 공급부족이 우려된다.

세계에너지기구(IEA)에서 발간한 「세계 에너지전망 2009 보고서」에 따르면, 화석연료 중 최소의 온실가스를 배출하는 효율적인 에너지원으로서의 천연가스가 향후 에너지시장의 전환에 있어서 중요한 역할을 할 것으로 예상되고 향후 복합에너지개발 사업에서 중차대한 역할을 할 것으로 예측된다. 2007～2030년 기간 중 세계 원유수요는 연간 1%증가할 것으로 전망되는 반면에 천연가스는 동일한 기간 연간 1.5% 증가율을 보일 것으로 예상되며, 전 세계 천연가스 수요가 2007년 3tcm(조 입방미터), 연평균 1.5%씩 증가하여 2030년에는 4.3tcm로 약 42%가 증대될 것으로 전망된다.

에너지다소비 비중이 큰 산업이 주축인 우리나라에서 지속적인 경제 발전을 위해서는 에너지의 안정적 공급이 필수적이어서 이를 위해 국가적인 차원에서 해외 유전 개발 강화 및 에너지 이용 다변화 정책이 추진되고 있다. 도시가스 및 화력발전소 등의 기본 에너지 원료로서 사용되는 천연가스는 청정 연료로서의 장점과 석유 대체 에너지로서의 가능성이 크고 국내에서도 그 수요가 계속 증가하고 있다. LNG는 천연가스를 약 - 163℃까지 냉각하여 액화시킨 것으로서 기체에서 액체가 되는 과정에서 부피가 약 1/600로 감소되어 저장이 용이하다. 특히 우리나라에서 천연가스는 도시가스, 복합 화력발전소 등에 쓰이며 자동차 연료 등으로 그 활용분야를 더욱 확장하고 있는 추세이다. 또한, 투기 자본 유입과 석유 생산량 한계 이론 등으로 인하여 유가의 지속적인 상승은 전 세계적으로 석유 자원 위기를 초래할 것으로 예상되며 이로 인해 연료용이나 소재로 쓰일 수 있는 모든 석유 제품의 가격이 급격하게 변동하게 되었다. 이 같은 상황에서 액화천연가스는 연료용으로 이용되는 석유 자원의 대체제로 이용되기에 부족함이 없는 호환성과 약 70년 이상을 사용할 수 있을 것이라고 추측되는 타에너지원에 비해 상대적으로 충분한 매장량으로 주목을 끌고 있다. 이렇듯 천연가스의 중요성이 강조되는 가운데 유체저장탱크는 중요한 사회기반시설이다. 저장탱크의 용량은 유체수요의 증가에 따른 시공관련 기술의 발전으로 인하여 점차 대형화되는 추세이며, 이러한 구조물의 대형화에 따라 유체저장탱크의 파괴라는 문제는 그 자체의 직접적인 경제적 손실뿐만 아니라 폭발, 화재 등으로 인한 환경파괴나 인명피해와 같은 재해를 발생시킨다. 증가하는 LNG 수요와 규모를 고려하였을 때, LNG저장탱크의 안정성 평가는 필연적으로 선행되어야 하는 부분이다. 27만 kL급 LNG 저장탱크의 다양한 안정성 평가분야 가운데에서도 비상시 발생하는 특수하중에 대한 안정성 평가를 통해 특수 하중에 의한 내조 탱크 파손에

따른 LNG 유출시 외조탱크에 미치는 영향에 대한 분석 및 평가가 필요하다.

나. 연구동향

한편 최근에는 초전도 응용기술의 개발과 더불어 핵융합로용 대형 초전도 마그넷과 초전도 발전기의 개발을 비롯한 대형 극저온 기기의 설계를 위한 초전도기술과 주변기술이 비약적으로 진보를 하고 있다. 따라서 극저온에서 사용이 예정되어 있는 구조재료에 과하여는 강도 설계를 위한 데이터베이스 구축뿐만이 아니라 그 시험평가 방법의 표준화 등이 시급한 과제로 생각되어진다. LNG 저장탱크에서 누설이 발생된다는 것은 탱크의 안전성에 심각한 영향을 미치는 중대한 사건으로 최고의 위험신호이다. 따라서, 멤브레인 저장탱크에서는 - 162℃의 초저온 액체가 안전하게 저장되도록 스테인레스 강판에 특별한 형상의 주름을 넣어서 제작한 멤브레인 패널을 용접으로 거대한 내부탱크를 건설한다. 내부탱크를 구성하고 있는 멤브레인 패널은 LNG를 안전하게 저장하도록 설계되었지만, 불행하게도 멤브레인이 파손되는 경우는 단열재와 LNG가 접촉하게 된다. 그러나, 단열재 구조물이 LNG와 접촉하면서 누설 LNG의 복합하중에 의해 파손되면 콘크리트 구조물인 외부탱크와 접촉한다. 최종적으로 외부탱크가 파손되면 내부탱크에서 누설된 LNG는 저장탱크 외부로 방출되면서 초대형 폭발사고를 일으키게 된다. 김청균은 누설 안전성을 유한요소법으로 해석하여 누설 LNG에 의한 온도하중과 액압하중 등은 단열재 구조물을 쉽게 파손하였지만 외부탱크가 이들 하중을 견디면서 10일 이상 누설을 지연시킬 수 있다는 결과를 발표하였다. 그에 이어 9% 니켈강재식 LNG 저장탱크의 누설 안정성에 관한 연구를 통해, 9% 니켈강재로 제작된 코너 프로텍션은 누설 시 발생하는 하중에 대해 안전성을 확보한다는 결론을 얻었다. 김청균은 20만m3 멤브레인식 LNG 저장탱크에 대해 다양한 누설과정을 적용한 유한요소해석을 통하여 외부탱크의 단열재가 온도하중에 대한 안정성을 보장할 수 있으나 누설에 따른 LNG 압력에 의해 파손, 누설 진행을 확인하였다.

다. 연구범위

본 연구에서는 유체저장탱크의 단순화 모델의 온도하중의 적용성을 검증하고 27만 kL급 LNG 저장탱크의 외부탱크의 유한요소해석을 통해 온도에 따른 재료의 비선형성 물성치를 적용한 LNG 누출 시나리오에 따른 온도분포를 구하기 위해 다음과 같은 제한된 범위에서 연구를 수행한다.

(1) LNG 외부 탱크는 상용유한요소해석 프로그램인 Abaqus/CAE v6.10을 사용하여 열전달 해석을 실시한다.
(2) LNG 외부 탱크의 바닥판은 콘크리트 구조물을 포함하여, Dry sand, Cellular glass를 포함한다.
(3) LNG 외부 탱크의 벽면은 콘크리트 구조물을 포함하여, PUF를 포함한다.
(4) 내부유체는 비점성, 비압축성이며 비회전 운동을 하는 이상유체로 가정한다.
(5) 구조물의 재료는 등방, 균질, 탄성체로 가정한다.

2. LNG 저장탱크의 외부탱크의 특성

완전 방호식 LNG 저장탱크는 크게 내부탱크와 외부탱크로 나누어 설계할 수 있다. 일반적으로 내부탱크는 9% 니켈강을 사용하여 -162℃이하에서 액화 가스를 안정적으로 저장 할 수 있도록 하기 위한 구조물로 실제 액화 천연가스의 저장시설이라고 볼 수 있다. 반면 외부탱크는 철근 콘크리트를 사용하여 내부탱크를 감싸고 있는 형태로 존재하며, PSC를 적용하여 보다 안정적인 콘크리트 구조물로 이루어져 있다. 따라서 LNG 저장탱크의 설계는 저장탱크의 종류에 따라 설계특성이 있다. 일반적으로 LNG 저장탱크의 1차탱크(내부탱크)와 2차탱크(외부탱크)로 나누어 설계되는 완전 방호식(full containment) 저장탱크의 종류로서 PSC로 설계 되어진 구조물을 말한다. 이러한 외부탱크의 설계는 콘크리트의 재료특성 및 구조적 성능을 고려하여 설계가 이루어지고 있다.

가. LNG 저장탱크의 외부탱크의 제원

본 연구를 통해 온도하중에 대한 적용성을 검토할 LNG 저장탱크는 최근 한국가스공사가 개발한 27만 kL급의 LNG 저장탱크로서 제원은 표 2.12.1과 같다.

표 2.12.1 해석대상의 기본 제원

| **Tank capacity(Net)** | **270,000 $m^3$** |
|---|---|
| Design Liquid density | 0.480 ton / $m^3$ |
| Design temperature(LNG) | -170℃ |
| Inner tank diameter | 90.0 m |
| Inner tank wall height | 43.74 m |
| Inner diameter of outer tank | 92.4 m |
| Wall height of outer tank wall | 48.28 m (Including Ring beam) |
| Liquid levels(from bottom plate) | 42.7 m |
| Heating system | Electric heating system 500mm under top of base slab |
| Tank foundation type | Pile foundation |

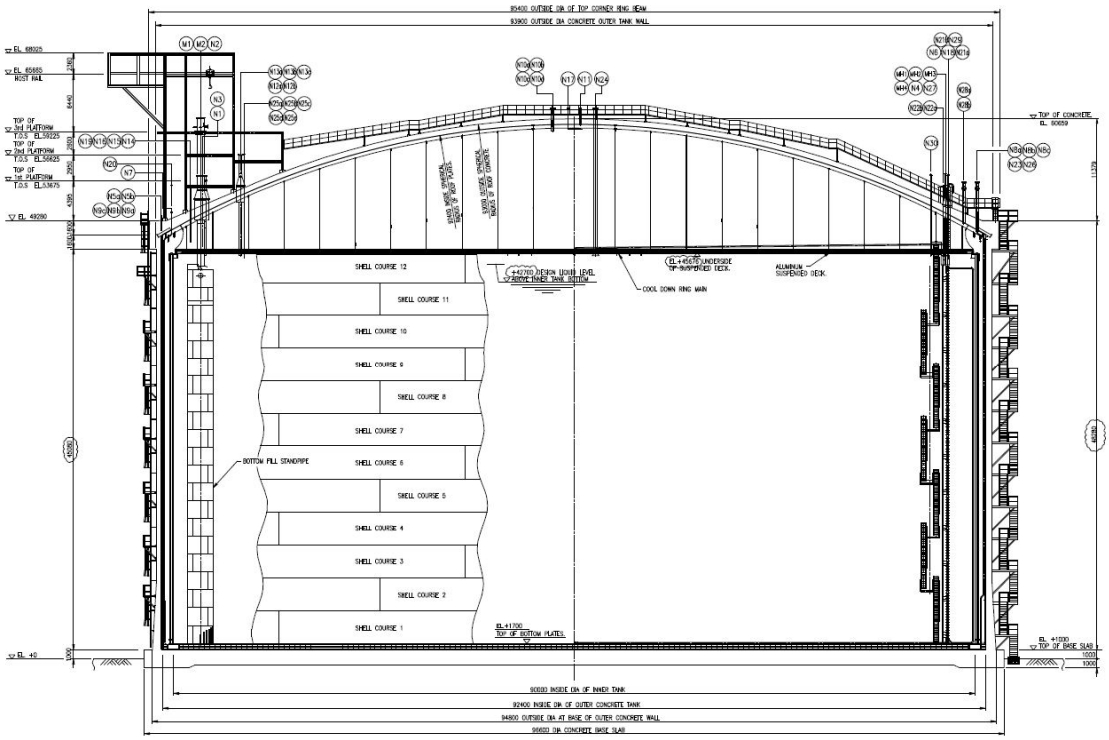



그림 2.12.1 General view

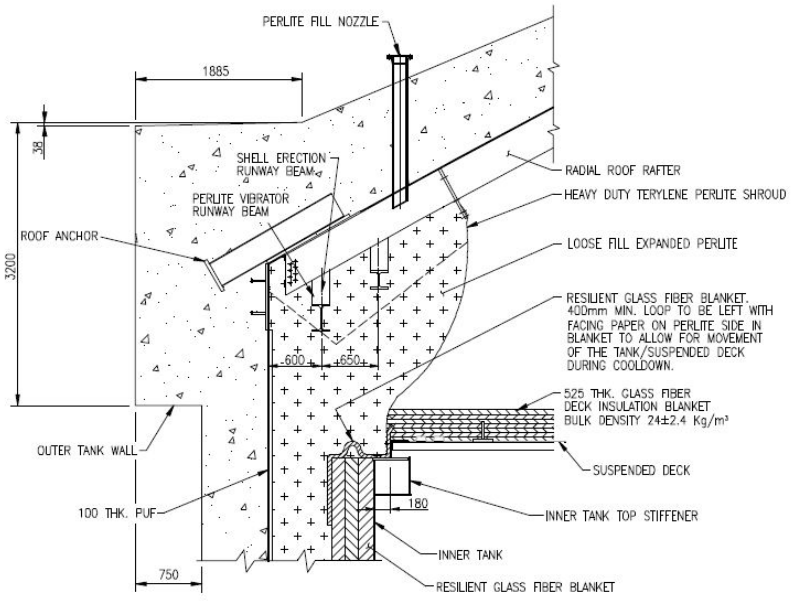



그림 2.12.2 Top corner arrangement

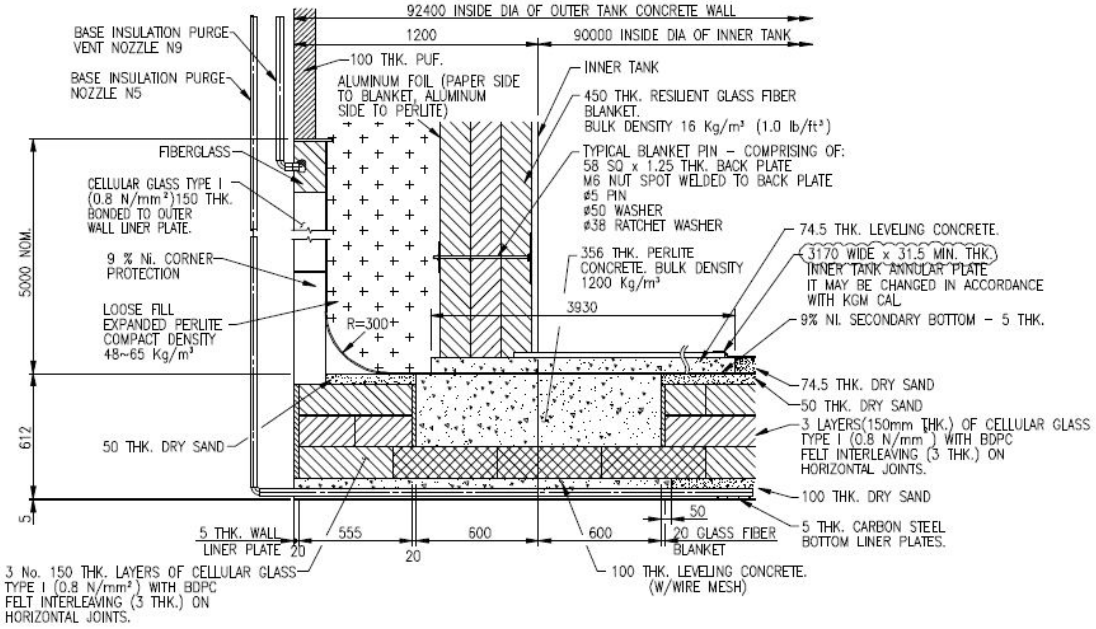



그림 2.12.3 Bottom corner arrangement

그림 2.12.1은 27만 kL급 저장탱크의 General view를 나타낸다. 그림 2.12.2는 27만 kL급 저장탱크의 외조탱크의 상세한 설계를 필요로 하는 Ringbeam을 포함하는 Top corner arragement를 나타내며, 그림 2.12.3은 Bottom corner arragement를 보여준다. 외부탱크는 바닥판, 외부 벽면, 링빔, 지붕으로 구성되어있다. 탱크의 설계는 특수하중 등에 의해 LNG가 외부로 유출되는 위험성을 최소화를 만족해야한다. 이를 위해 원형 콘크리트 벽과 연결되는 철근콘크리트의 탱크 기초, 포스트 텐던의 앵커리지 역할을 하는 6개의 등간격 원호방향의 버트레스 등이 반영된다. 평상시 운영조건에서는, LNG는 내부탱크에 의해 1차적인 유출방지 시스템으로 고려되고, 외부탱크는 내부탱크로부터 LNG 유출사고 시 LNG를 유출방지역할을 수행함으로 고려된다. 탱크는 직경 914mm의 강관 파일기초들에 의해 지지되며 이 강관파일의 강도특성은 SPS 400을 따르고 강관의 두께는 16mm에 해당된다. 외부 탱크의 벽은 최소 원형의 가 40N/mm2와 정방형으로는 50N/mm2 의 극한압축강도를 가지는 포스트텐션이 적용된 콘크리트로 건설되어야한다. 벽면의 안쪽과 바깥쪽으로는 최소 60mm의 커버를 가져야 한다. 프리스트레스 콘크리트 탱크 벽면은 바닥 슬래브 위로 7.5m내에서 1200mm부터 750mm로 일정하게 가늘어져야한다. 이는 아랫부분이 보다 큰 휨에 견디기 위함이다. 이후 높이 7.5m부터 Ringbeam의 바로 아래인 45.08m까지는 시공의 편의를 위해 750mm의 일정한 두께로 시공한다. 벽면 안에서 접착된 프리스트레스 텐던은 탱크의 원호와 수직 양 방향에서 제공된다. 철근콘크리트는 열변형률과 크랙을 유발할 수 있는 인장응력에 대한 저항성을 갖기 위해 사용된다. Ringbeam의 프리스트레스 콘크리트로서, 3.2m의 깊이와 1.5m의 두께를 가진다. 이를 구성하고 있는 콘크리트는 원형으로는 40N/mm2, 정방형으로는 50N/mm2의 최소극한압축강도를 가져야 한다. Ringbeam에서의 콘크리트 피복은 탱크의 내측과 외측면으로 부터 최소 60mm의 두께를 가져야한다. 탱크의 지붕은 철근콘크리트로 건설되어야하

며 최소극한압축강도는 원형으로는 30N/mm2을 가져야한다. 철근콘크리트 지붕의 두께는 최소 600mm이다. 지붕의 기능은 각종 위치에서 발생하는 힘의 전달과 미사일 공격이나 외부화재 효과로부터 내부탱크를 보호하는 것이다.

나. LNG 저장탱크의 외부탱크의 물성

구조물 건설에 주된 재료인 콘크리트의 물성은 설계코드 BS8110 기준을 따라야 한다. 콘크리트의 압축강도는 바닥, 벽면, 링빔 그리고 지붕까지 28일강도의 원형공시체를 사용하며 아래와 같다.

- Reinforced concrete

C37 Fck = 30N/mm$^2$ - Cylinder (2.1)

- Prestressed concrete

C57 Fck = 40N/mm$^2$ - Cylinder (2.2)

포아송 비는 BS8110(Part 1:1997)에 의거하여 0.2이다. 수축 변형은 CEB-FIP 90(1990)에 기초하여, 아래의 관계식으로부터 도출한다.

$$\epsilon_{cs}(t, t_s) = \epsilon_{cso}\beta_s(t - t_s)$$

$$\epsilon_{cso} = \epsilon_s(f_{cm})\beta_{RH}$$

$$\epsilon_s(f_{cm}) = [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cm0})] * 10^{-6}$$

$$\beta_{sc} = \begin{array}{l} 4 : \text{for slowly hardening cement} \\ 5 : \text{for normal or rapid hardening cement} \\ 6 : \text{for rapid hardening high strength cement} \end{array}$$

$$\beta_{RH} = \begin{array}{ll} -1.55\ \beta_{sRH} & \text{for } 40\% \le \text{RH} \le 99\% \\ 0.25 & \text{for } 99\% \ge \text{RH} \end{array}$$

$$\beta_{sRH} = 1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3$$

$$\beta_s(t-t_s) = [\frac{(t-t_0)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t-t_s)/t_1}]^{0.5}$$

where, $\epsilon_{cso}$ : the notional shrinkage coefficient

$\epsilon_{cs}(t,t_s)$ : total shrinkage at time t

$\beta_s$ : the coefficient to describe the development of shrinkage with time

$\beta_s(t-t_s)$ : function to describe the time development of drying shrinkage

$\beta_{sRH}$ : coefficient to take into account the effect of rel. humidity on drying shrinkage

$\beta_{RH}$ : function to describe the time development of autogenous shrinkage

$f_{cm}$ : mean compressive strength of concrete

$f_{cm0}$ : 10MPa

$t$ : age of concrete in (days) at the moment considered

$t_0$ : age of concrete at loading in (days)

$t_1$ : 1 day

$h$ : 2Ac/u → Ac : cross section of the structural member in($mm^2$)

u : perimeter of the structural member in contact with the atmosphere in(mm)

$h_0$ : 100mm

$RH$ : ambient relative humidity(%)

$RH_0$ : 100%

철근콘크리트의 삽입되는 철근은 일반적으로 KS D3504 SD40을 따르는 것이 원칙이나, -20℃ 이하의 온도를 경험하는 구조물의 경우에는 BS7777:Part3을 따라야 한다.
BS8110을 따르는 콘크리트 설계 강도를 정리하면 표 2.12.2와 같다.

아래와 같이 기계적 물질 특성과 함께, -162℃의 천연액화가스의 저장탱크는 온도에 관한 영향과 그 거동을 반드시 반영해야한다. 온도 요소의 해석은 정적인 해석과 동적인 해석으로 나누어 볼 수 있다. 정적인 상태에서의 열전달 해석은 재료의 열전달 계수를 추가하여 해석할 수 있다. 표 2.12.4는 27만 kL급 저장탱크의 온도 해석 시, 열전달 해석에 반영되는 벽면의 물성으로 두께와 열전달 계수를 나타낸다.

표 2.12.2 콘크리트의 설계 강도

| | 바닥판 (Circular part) | 바닥판 (Annular part) | Outer wall | Outer roof |
|---|---|---|---|---|
| Concrete grade | C37 | C50 | C50 | C37 |
| Characteristic compressive cylinder strength fck (N/mm2) | 30 | 40 | 40 | 30 |
| Characteristic compressive cube strength fck (N/mm2) | 37.5 | 50 | 50 | 37.5 |
| Modulus of elasticity Ec (kN/mm2) | 27.5 | 31.75 | 31.75 | 27.5 |

표 2.12.3 철근의 설계 강도

| | Reinforcement steel | Prestressing strand 7-wire strand low relaxation (15.2mm) |
|---|---|---|
| Characteristic Tensile strength fpu (N/mm2) | - | 1,860 |
| Characteristic Tensile yield strength fy (N/mm2) | 400 | 1,670 |
| Modulus of elasticity Es, Ep (kN/mm2) | 200 | 195 |
| Apparent relaxation rate(%) | - | 2.5 |

표 2.12.4 외부탱크의 무께와 열전달 계수

| material conductivity | thickness (mm) | thermal λ (W/mk) |
|---|---|---|
| concrete | 750/1200 | 2 |
| PUF | 100 | 0.0233 |

표 2.12.5는 27만 kL급 저장탱크의 온도 해석 시, 열전달 해석에 반영되는 바닥판의 물성으

로 두께와 열전달 계수를 나타낸다.

표 2.12.5 바닥판의 두께와 열전달 계수

| material conductivity | thickness (mm) | thermal λ (W/mk) |
|---|---|---|
| dry sand | 66.6 / 42 | 0.930 |
| cellular glass | 450 | 0.043 |
| concrete | 1700 | 2 |

다. LNG 저장탱크의 유출 시나리오

내부 탱크로부터의 LNG 유출 효과에 대한 해석은 4가지의 높이를 가진 액화c천역가스가 PUF 단열재를 지나 외부 콘크리트 벽에 미치는 영향을 조사하기 위함이다. 유출 해석 시 적용하는 물성은 가스저장탱크의 기본 설계 제원을 사용한다. 완전 방호 식 저장탱크의 유출 시나리오는 내부탱크 안의 저장되어 있는 액화천연가스양에 의해 서로 다른 4개의 높이로 구분한다. 그 높이는 바닥판으로부터 5m, 13.2m, 20.1m, 41.692m이다. 표 2.12.6은 유출시의 외부탱크에 작용하는 외부 온도 경계 조건이다.

표 2.12.6 유출 시 적용하는 외부 온도 조건

| Initial Conditions | Stress Free Temperature | +12.4℃ |
|---|---|---|
| Spillage Load Condition | Internal Temperature(LNG) | -170.0℃ |
| | External Temperature | +24.0℃ / -2.0℃ |
| | Electric heating Temperature | +7.0℃ |

3. LNG 저장탱크의 유한요소모델

가. 온도해석의 기본적인 이론

등방성이 있는 물체의 온도해석은 다음의 지배 방정식을 따른다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{\lambda_c}=\frac{\rho c_c}{\lambda_c}\cdot\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (1)$$

where, T : temperature

t : time

$\lambda_c$ : Thermal conductivity
$\rho$ : density
$c_c$ : specific heat
$\dot{q}$ : internal heat generation

이러한 지배 방정식을 고정온도조건, 대류조건, 복사조건 등과 같은 경계조건을 입력하여 해석이 가능하다. 온도해석은 크게 정적해석(steady-state analysis)와 동적해석(transient analysis)으로 나눌 수 있다. 정적해석은 식(1)의 우변의 시간에 따른 온도 변화를 '0'으로 가정하여 해석하는 것으로 시간 의존성이 사라졌을 경우에 수행하는 해석이다. 동적해석은 구조물의 불리한 영향이 발생하는 시점을 해석하는 경우에 적용해야 하는 해석방법이나 보통 상당한 해석시간을 요하므로 정상상태의 파악이 목적이라면 정상해석만을 수행하는 것이 바람직하다.

외부탱크의 바깥 면은 공기와 접촉하고 있다. 지속적으로 순환하는 공기와 탱크의 외부 벽면은 지속적인 열전달이 발생하게 되고 이는 다음의 Newton's convection law를 따른다.

$$q = Ah(T_w - T_\infty) \qquad (2)$$

where, A : area of solid
h : thermal transfer coefficient
$T_w$ : temperature of wall
$T_\infty$ : temperature of ambient air
q : heat transfer ratio

$$q = Ah(T_w - T_\infty) = \frac{1}{R_\infty}(T_w - T_\infty) \qquad (3)$$

where, $R_\infty$ : resistance of heat

무한히 길이를 가진 물체와의 접촉으로 가정하여 열전달을 고려하는 방법으로 단면에 열전달계수를 곱한 수를 열 저항의 역수로 보고 전체 구조물의 열전도 방향에 대한 평균 열전달량을 계산하여 대류 면과 접촉하는 경계에서의 온도를 구할 수 있다.

나. 단순화에 따른 적용성 검토

상용프로그램으로 단순화한 1차원 선 요소, 2차원 축대칭 면 요소, 3차원 육면체 요소를 적용한 열전달 해석과 열전달에 지배방정식에 의한 해석적인 해를 비교하여 그 적용성을 검토한다. 각 차원별로 적용한 요소는 표 2.12.7과 같다. 대류를 고려할 수 없는 1차원 모델링 외의 2차원, 3차원 모델링에서 대류 조건의 대류계수는 25W/m2·K를 사용하였다.

표 2.12.7 차원별 적용 요소

| Dimension | element | description |
|---|---|---|
| 1D | DC1D2 | 2-node heat transfer link |
| 2D axisymmetric | DCAX4 | 4-node linear axisymmetric heat transfer quadrilateral |
| 3D | DC3D8 | 8-node linear heat transfer brick |

단순화된 1차원 모델링에서는 DC1D2 선 요소로 외부탱크의 벽면을 PUF의 두께 0.1m, 콘크리트 두께 0.75m로 모델링하였다. 왼편에는 누출 시 작용하는 액화천연가스의 온도인 -170℃를 적용하고, 오른편에는 37℃의 대기온도의 대류 조건을 적용하였다. 정상상태 해석(steady-state analysis)을 통해 그림 2.12.4과 같은 온도 분포를 얻었다. 이를 해석적 해와 비교한 결과가 그림 2.12.5와 같다.

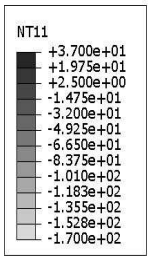



그림 2.12.4 1차원 선 요소의 온도분포

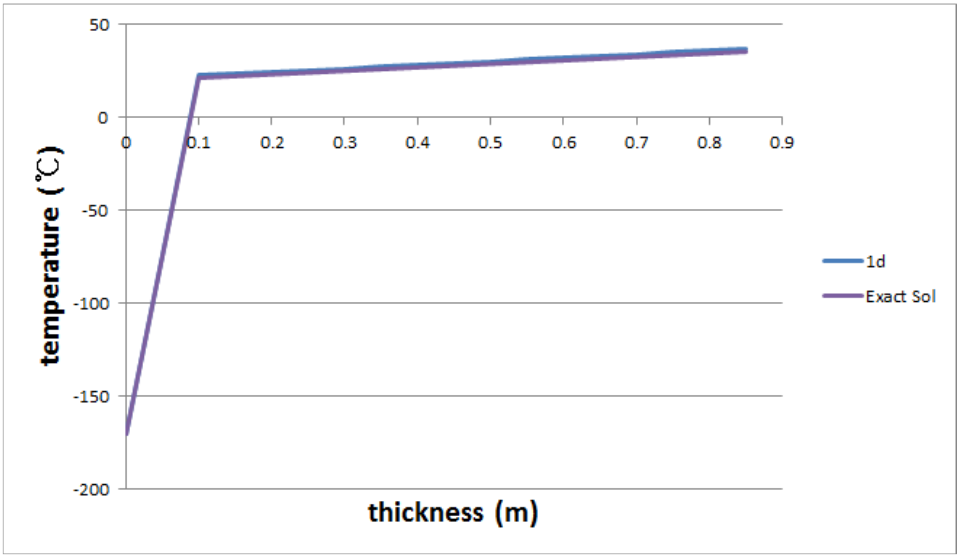



그림 2.12.5 1차원 선 요소의 두께 방향에 따른 온도와 해석 해의 비교

단순화된 2차원 axisymmetric 모델에서는 DCAX4 요소를 사용하여 1차원 모델과 마찬가지로 PUF와 concrete 두께를 각각 0.1m, 0.75m 두께로 모델링하여 외부탱크의 내부에는 -170℃의 온도를 적용하고 외부에는 37℃의 대기온도의 대류 조건을 적용한다. 그림 2.12.6은 온도해석 결과를 도식화한 것이며 그림 2.12.7는 두께방향으로의 온도 분포를 그래프로 나타내어 해석 값과 비교한 것이다.

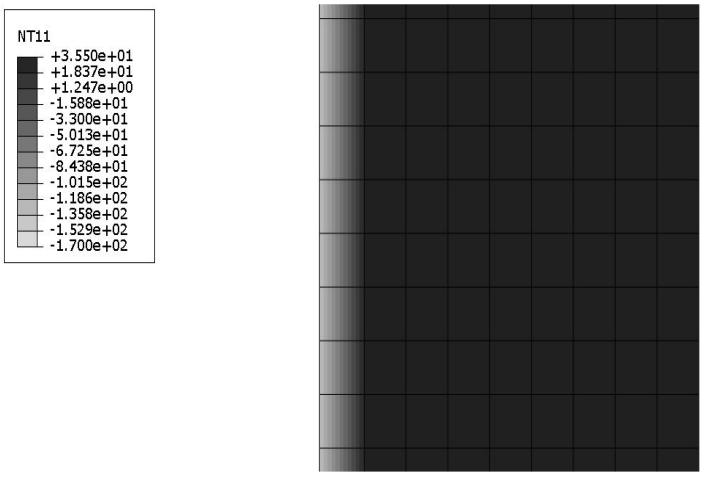



그림 2.12.6 1차원 면 요소의 온도분포

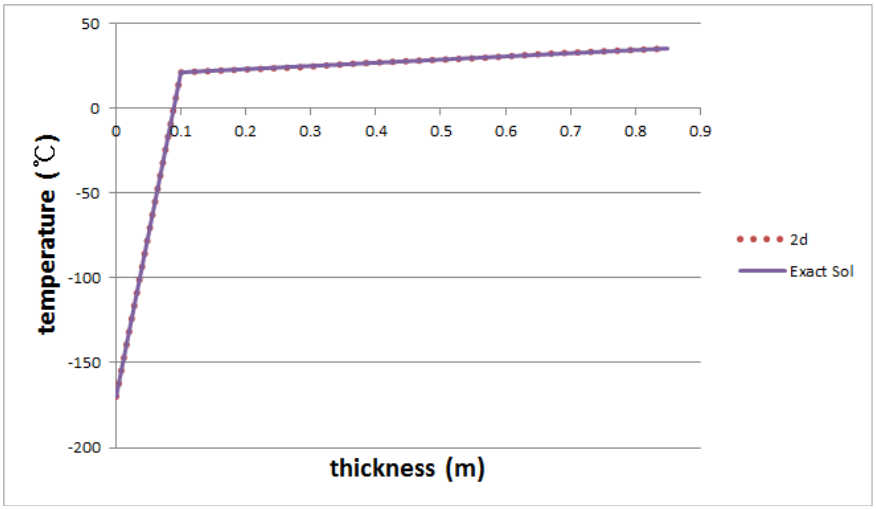
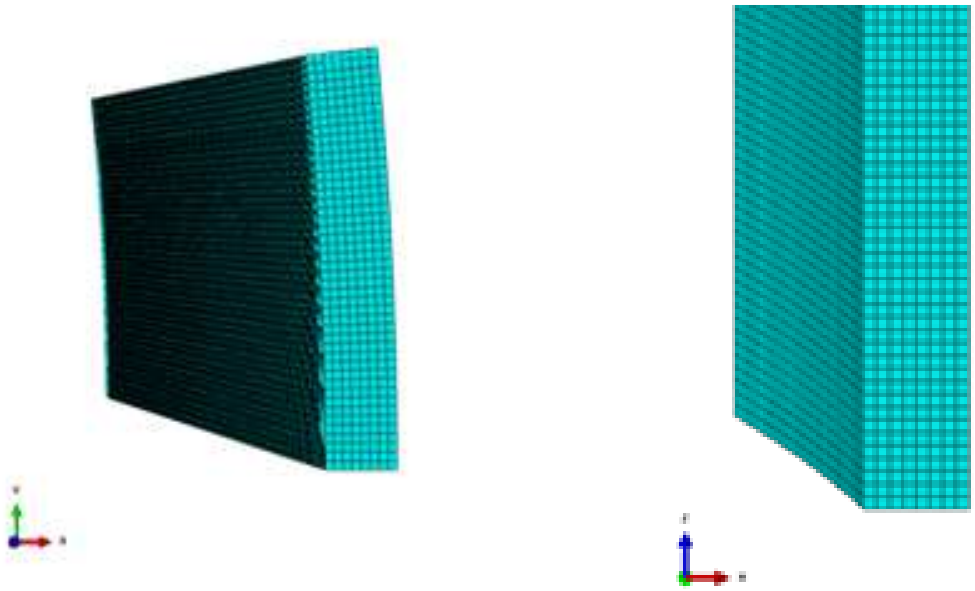


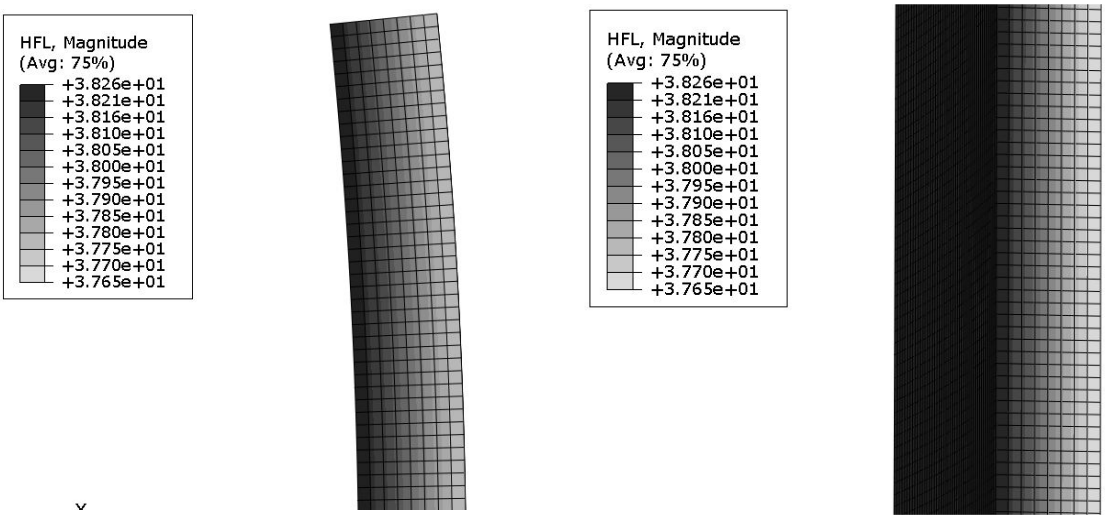

그림 2.12.7 2차원 면 요소의 두께 방향에 따른 온도와 해석해의 비교

단순화된 3차원 모델에서는 육면체 요소인 DC3D8을 이용하여 그림 3.5와 같이 모델링하였다. 마찬가지로 외부탱크의 안쪽에 해당하는 부분은 - 170℃의 경계 조건과 바깥 면은 35℃ 대류 경계 조건을 적용하였다. 0.1m와 0.75m에 해당하는 PUF와 콘크리트의 물성치를 입력하여 해석을 수행하였다. 열 해석의 정상해석 결과, 그림 3.6과 같은 온도분포 결과를 얻었으며 이를 3차원의 해석해와 비교 하여 그림 3.7에 나타내었다. 1차원, 2차원, 그리고 3차원의 해석 결과와 각각의 차원 별 열전달 해석 해를 비교한 결과 정확하게 그 결과가 일치함을 알 수 있다. 또한 이 각 차원 결과를 3차원 결과와 비교한 결과 역시 정확히 일치하며 이 결과는 그림 2.12.8을 통해 나타낼 수 있다.



(a) Top view (b) Side view

그림 2.12.8 3차원 육면체 요소의 모델링




(a) Top view (b) Side view

그림 2.12.9 3차원 육면체 요소의 온도분포

단순화된 대표 모델의 각 차원별 결과와 해석 해를 비교함으로서, 유한요소모델의 적용성을 검증하였다. LNG저장탱크의 외부탱크의 유한요소해석을 통한 열전달 해석의 정확도를 3차원 모델링을 통해 다양한 방향과 다양한 경계조건과 초기 조건을 통해 열전달 해석을 수행할 수도 있다. 하지만 위의 각 차원별 해석결과의 비교를 통하여 축대칭 형태의 구조물에서

는 2차원 axisymmetric 모델링의 해석결과의 신뢰성을 확보하였으며, 이를 이용하여 해석을 수행함으로 3차원 모델링 해석에 소용되는 시간적 경제적 소모를 절감할 수 있다.

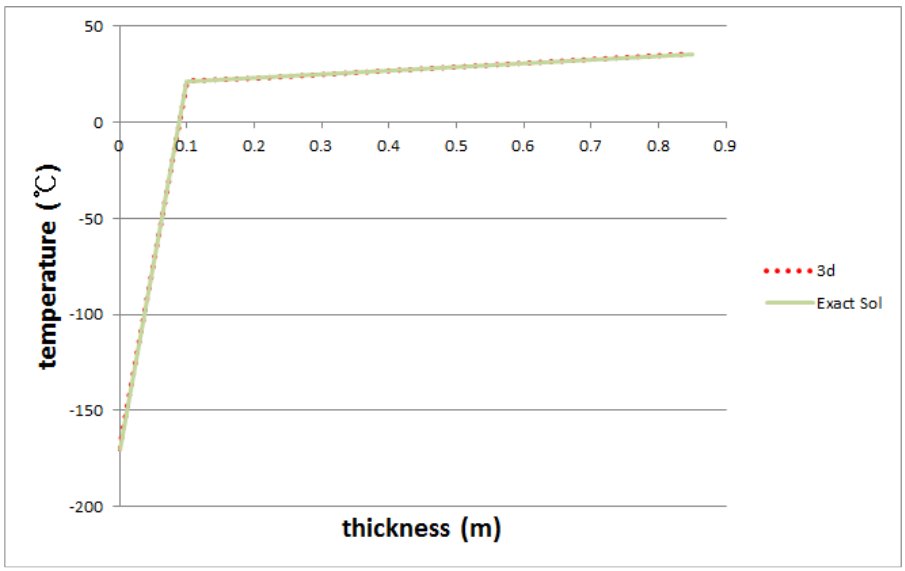



그림 2.12.10 3차원 육면체 요소의 두께 방향에 따른 온도와 해석해의 비교

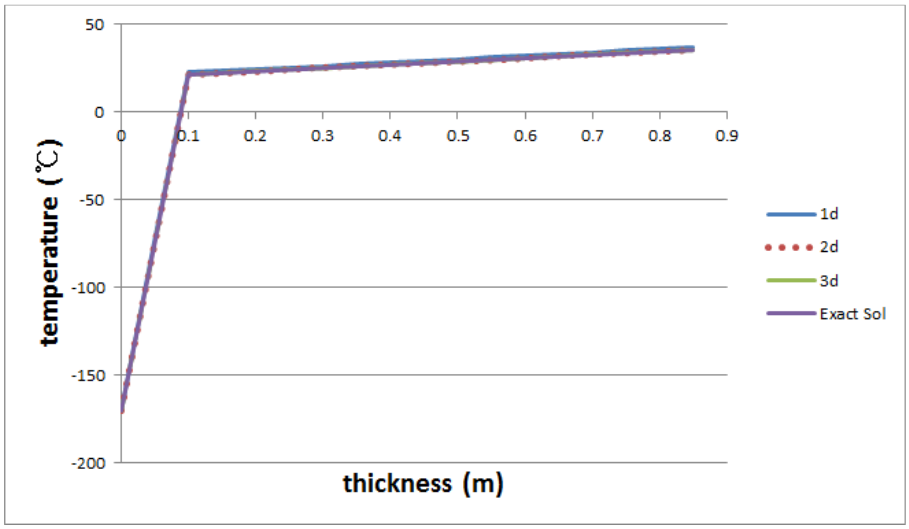



그림 2.12.11 각 차원 별 온도분포와 해석 해의 비교

4. LNG 저장탱크의 유한요소모델

가. LNG 저장탱크의 외부탱크의 유한요소모델

설계 시 고려되는 4단계의 유출 상황을 반영한 유체를 포함하는 27만kL급 LNG 저장 탱크의 외부탱크에 대한 열전달해석을 실시한다. 상용해석 프로그램 Abaqus/CAE v6.10을 이용하여 27만kL급 LNG 저장 탱크의 외부탱크의 설계 도면을 반영한 2차원 axisymmetric모델로 해석하였다.(그림2.12.12) 액화천연가스 유출 시 외부탱크의 열전달 해석을 위해 바닥판은

dry sand, cellular glass, concrete로 구성하였고 벽면은 내부탱크의 파손에 따른 유출하여 내부탱크와 외부탱크의 사이의 단열재는 초저온 온도하중에 의해 파손되어 d외부탱크의 PUF와 콘크리트 벽면에 직접적으로 접촉하는 조건 하에 벽면은 PUF와 concrete를 모델링 하였다. 총 절점 수 7546개로 구성되어 있으며, 열전달 해석을 위한 절점 당 한 개의 자유도를 갖는 DCAX4 요소 6804개로 구성되어 있다.

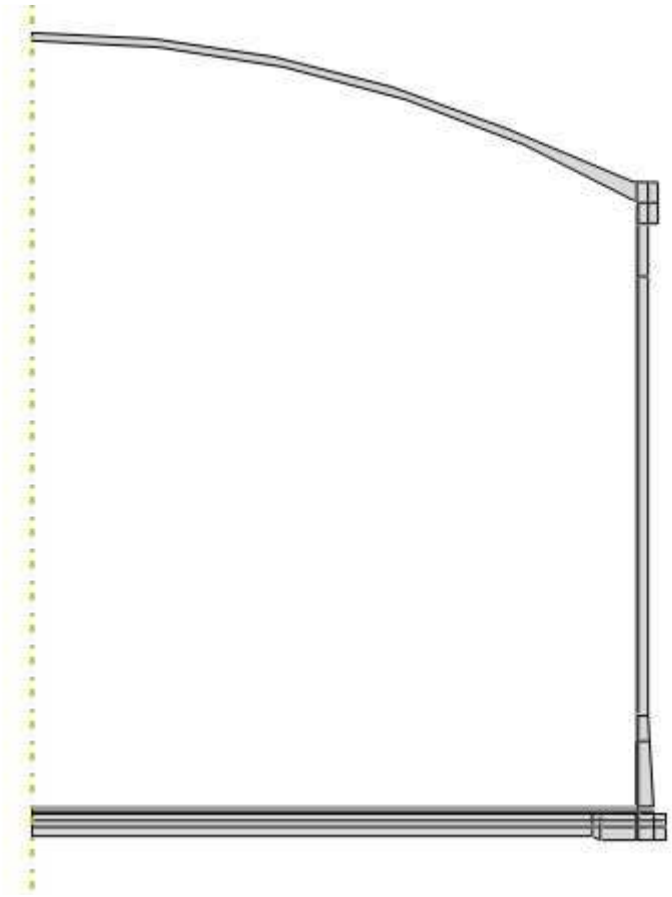
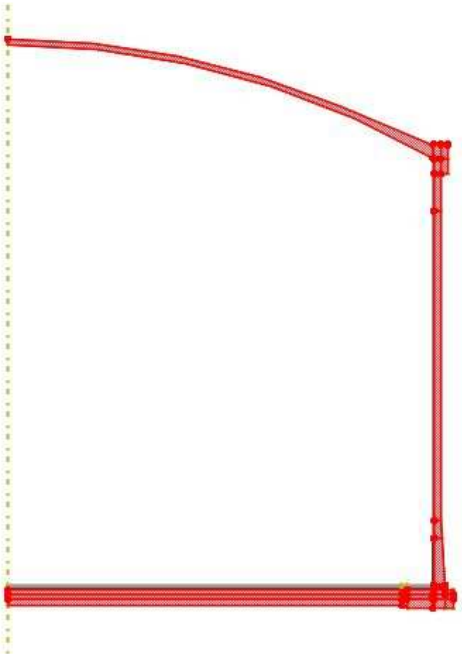
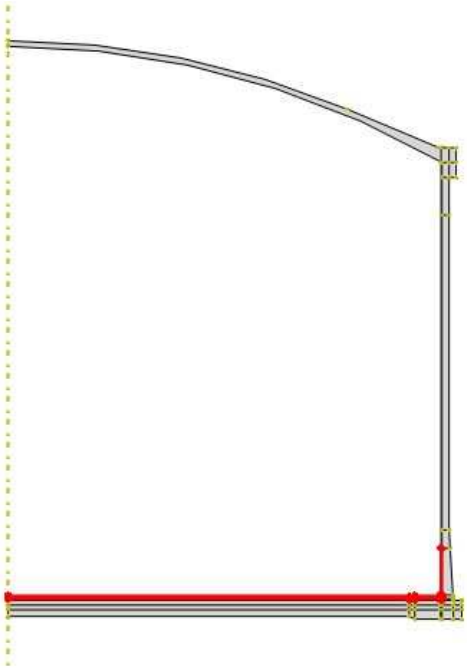


그림 2.12.12 2D axisymmetric model

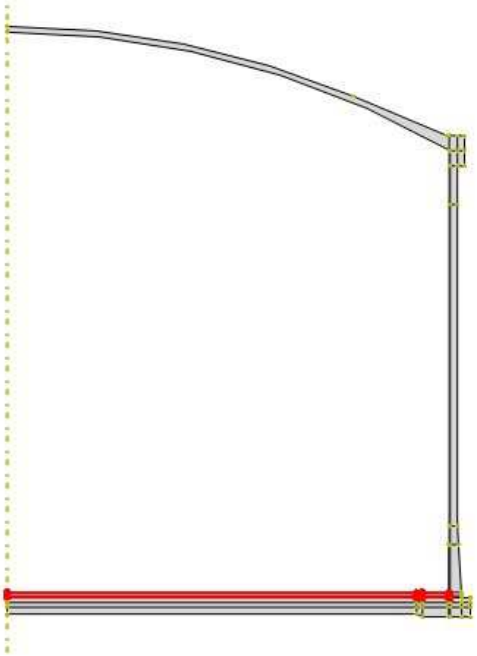
외부탱크의 벽면은 내부지름 46.1m에서 두께 0.1m에 해당하는 PUF와 0.75m의 두께의 콘크리트로 구성되어 있다. 콘크리트는 바닥의 두께 1.2m에서 바닥으로부터 높이 7.5m에 이르는 동안 균일하게 두께가 감소하여 0.75m에 이르는 변단면 부분을 포함하고 있다. 바닥면은 dry sand, cellular glass의 3중 구조, dry sand, concrete로 구성되어 있으며 각각의 두께는 42, 150, 150, 150, 100, 1700mm로 구성되어 있다. 그림 2.12.13는 2차원 모델을 구성하는 콘크리트, Cellular Glass, Dry sand, 그리고 PUF의 위치를 나타낸다.



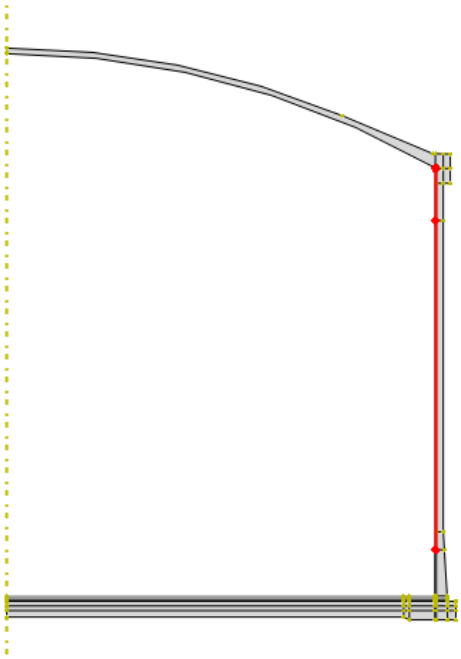
(a) Concrete



(b) Cellular Glass



(c) Dry sand



(d) PUF

그림 2.12.13 콘크리트 외부탱크의 구성

표 2.12.8 열전달 계수

| material | heat conductivity (W/m℃) |
|---|---|
| concrete | 2 |
| cellular glass | 0.0414 |
| PUF | 0.02 |
| dry sand | 0.79 |

열전달 해석 시 필요한 물성은 열전달계수이다. 벽면과 바닥판, 그리고 지붕을 구성하는 콘크리트의 열전달계수는 2(W/m℃)로 입력하였다. 바닥면을 구성하는 cellular glass의 열전달계수는 0.0414(W/m℃), dry sand는 0.79(W/m℃)를 입력하였다. 내부탱크에서 LNG 유출시 외부벽면에 1차적으로 LNG가 접촉하는 PUF의 열전달계수는 0.02(W/m℃)이다. 위의 열전달계수는 표 2.12.8로 정리하였다.

온도해석의 경계조건으로는 탱크 내부의 LNG 유출에 의한 - 170℃와 탱크 외부의 계절별 대류 조건을 기본으로 탱크 바닥판의 Electric heating system에 의한 7.5℃ 조건과 지반의 온도가 있다. heating system의 위치는 바닥판 아래 500mm에 위치하고 그 위치는 그림 4.3과 같다. 또한 바닥판 아래의 지반의 온도를 5℃로 가정하여 구조물과 지반 사이의 온도에 대한 영향에 대한 모델링을 할 수 있다. 그림 2.12.14는 지반의 온도를 반영하고 그 위치를 나타내었다.

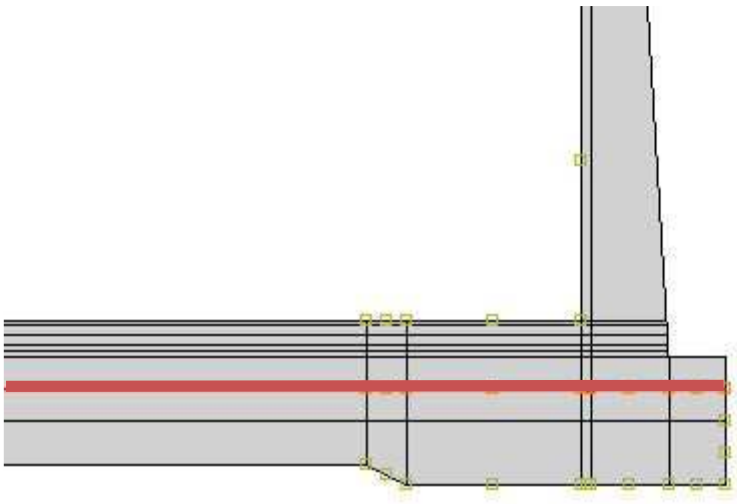


그림 2.12.14 Electric Heating System

공기와 접촉하는 외부 탱크의 바깥쪽의 모든 면은 대류조건을 적용하고 대류계수를 25(W/m2℃)로 적용한다. 대기의 온도는 계절에 따라 다른 온도를 적용하며, 설계 계산서에 따라 여름과 겨울 각각 37℃와 - 7℃를 적용한다. 그림 4.5는 2차원 axisymmetric모델의 대

류조건이 적용된 부분을 나타낸다. 액화천연가스의 내부탱크의 유출 시나리오를 반영하기 위한 온도조건은 4가지로 구분한다. 내부탱크에 저장되어 있는 액화천연가스양을 반영하여 4단계의 유출 시나리오를 작성한다. 각각의 시나리오는 바닥판으로부터 5m, 13.2m, 20.1m, 41.692m 높이의 LNG 유출에 따른 접촉한다고 설정한다. 그림 2.12.17은 각 시나리오별 유출 단계를 나타낸다.

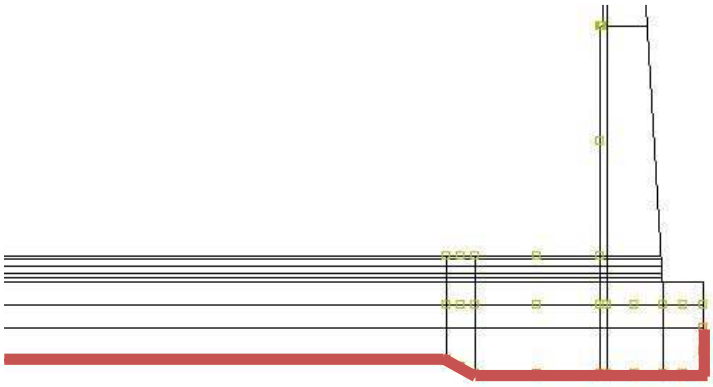


그림 2.12.15 Ground Temperature

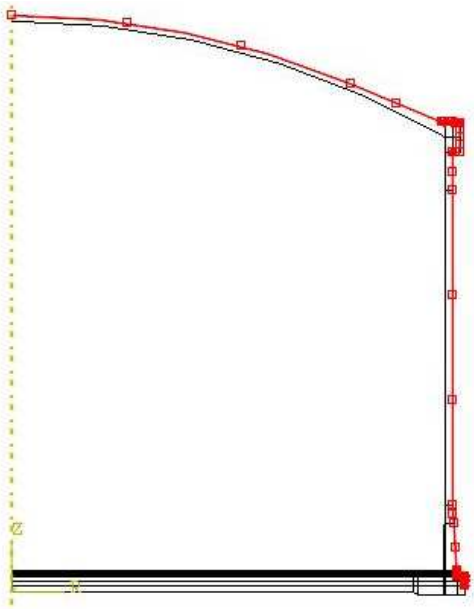
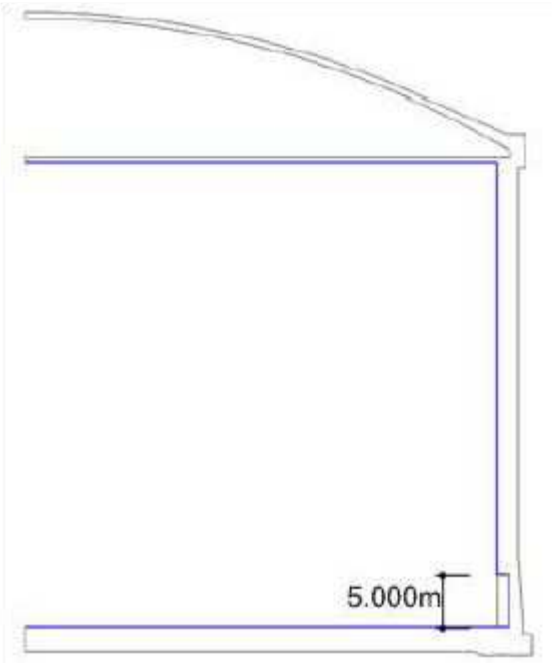
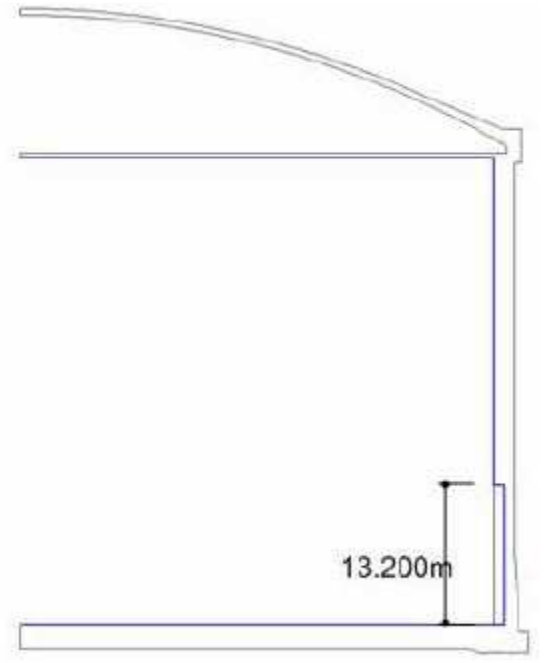


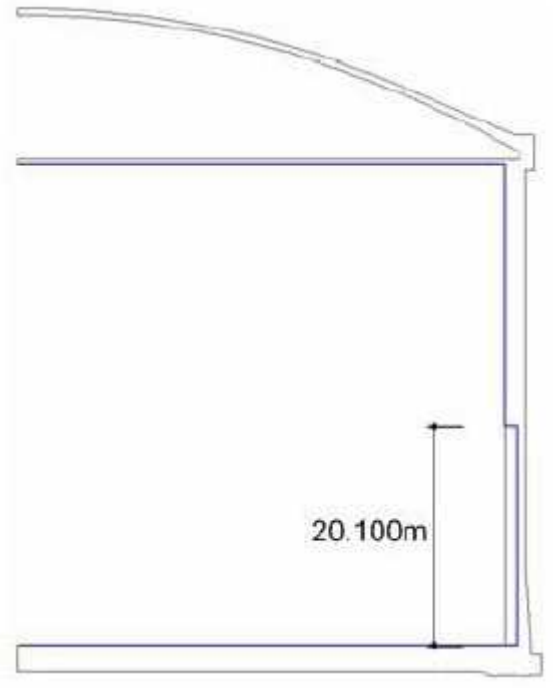
그림 2.12.16 대류조건 적용



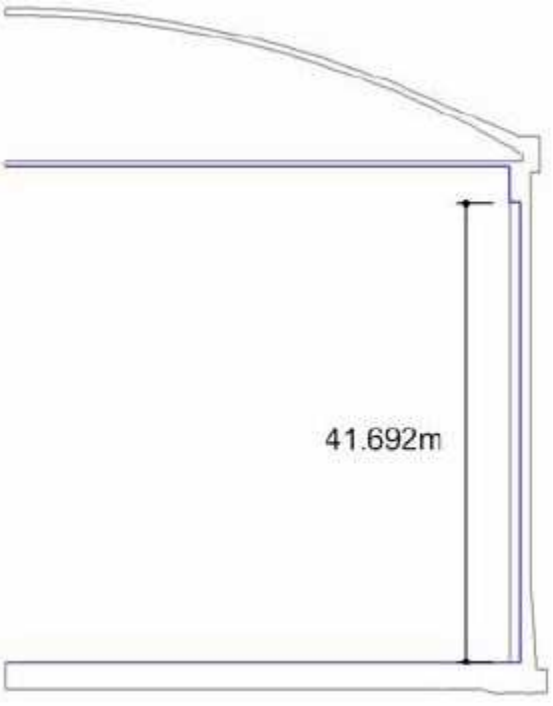

(a) scenario 1




(b) scenario 2




(c) scenario 3




(d) scenario 4

그림 2.12.17 단계별 유출 시나리오

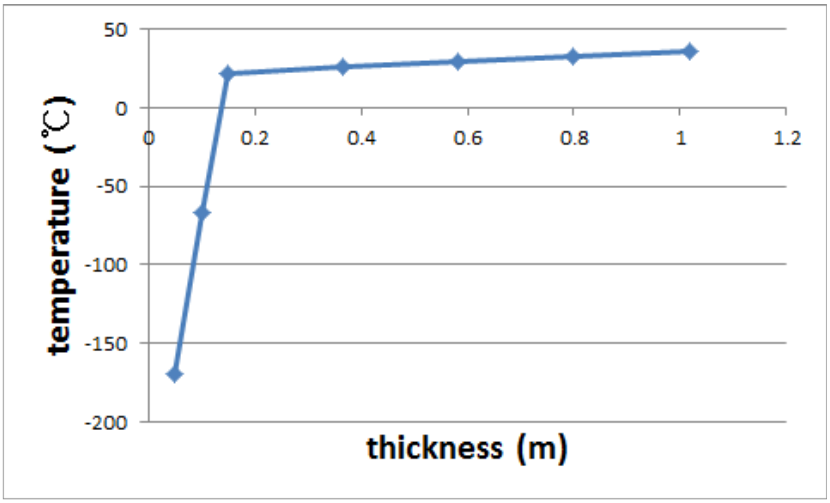
나. 유출시나리오에 따른 해석 결과

(1) 온도 독립적 물성

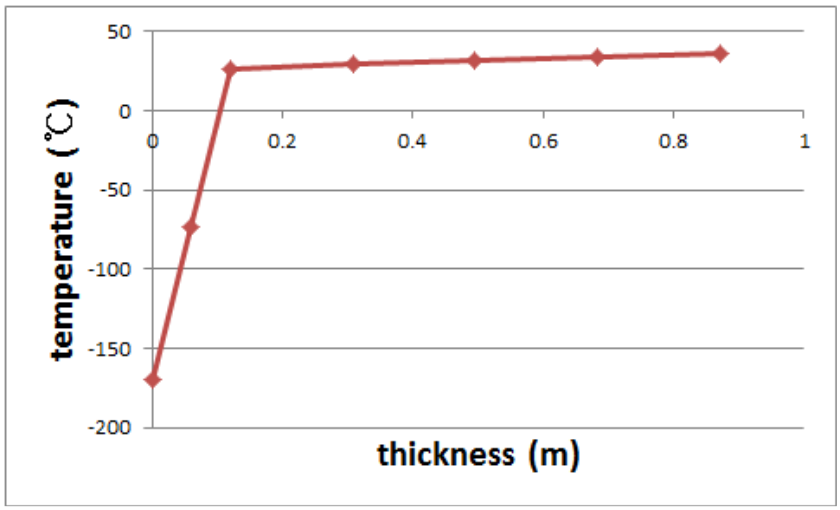
표 2.12.9 여름철 시나리오별 최대 열 유속, 최대 열 유속 발생 높이

| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | 바닥판으로부터 발생높이(m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 36.7631 | 5 |
| 2 | 13.2 | 41.8763 | 13.2 |
| 3 | 20.1 | 47.0819 | 20.1 |
| 4 | 41.692 | 39.3543 | 40.5 |

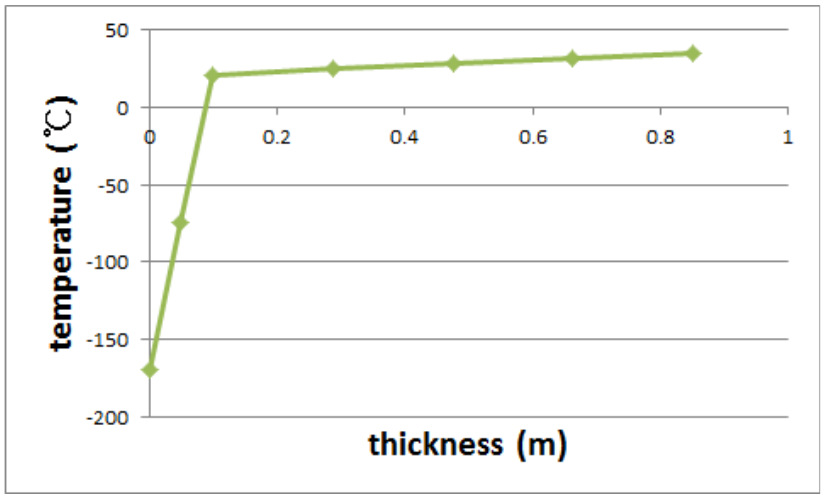
각 시나리오별 해석 후, 최대의 열 유속을 찾고 최대 열 유속이 발생하는 위치에서 해당 높이의 외부탱크의 두께 방향으로 온도분포를 살펴보겠다. 여름철 온도 독립적인 물성이 반영되고 LNG 유출시 외부탱크 접촉 높이가 5m를 적용한 유한요소해석에서는 최대 열 유속은 36.7631(W/m2)이며 최대 열 유속 발생 위치는 외부탱크의 바닥판으로부터 5m에 해당하는 높이이다. LNG 유출 시 외부탱크 접촉 높이가 13.2m인 경우, 최대 열 유속은 41.8753(W/m2)이며, 발생높이는 바닥판으로부터 13.2m 지점에서 발생한다. 접촉 높이가 20.1m, 41.692m인 경우, 최대 열 유속은 각각 47.0819(W/m2), 39.3543(W/m2)이다. 4개의 시나리오에 따른 결과에 의해 발생하는 최대 열 유속과 발생하는 높이를 정리하면 표 2.12.10와 같다. 그림 2.12.18은 최대 열 유속이 발생하는 높이에서의 두께 방향으로의 온도 분포를 나타낸다.



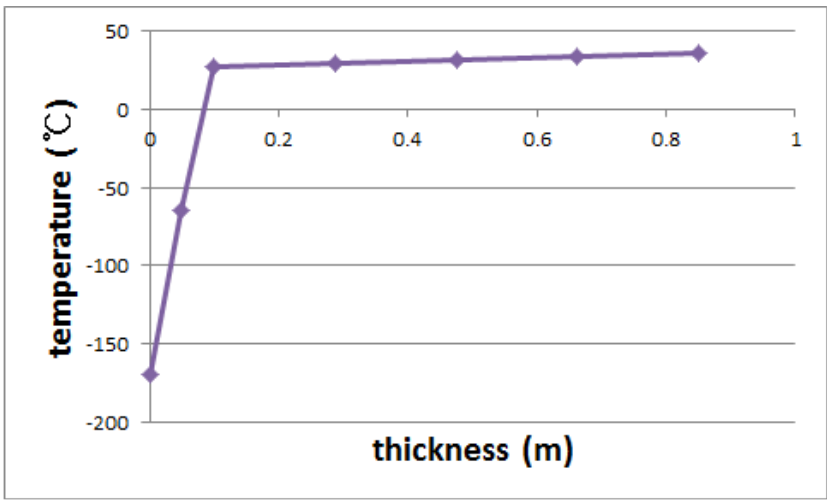

(a) LNG 유출 높이 5m일 때




(b) LNG 유출 높이 13.2m일 때




(c) LNG 유출 높이 20.1m일 때



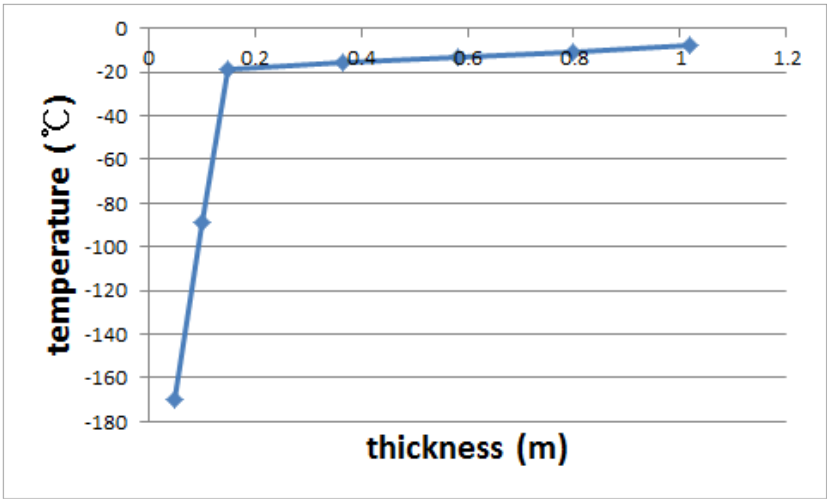

(d) LNG 유출 높이 41.7m일 때

그림 2.12.18 여름철, 최대 열 유속 발생 높이에서의 온도분포

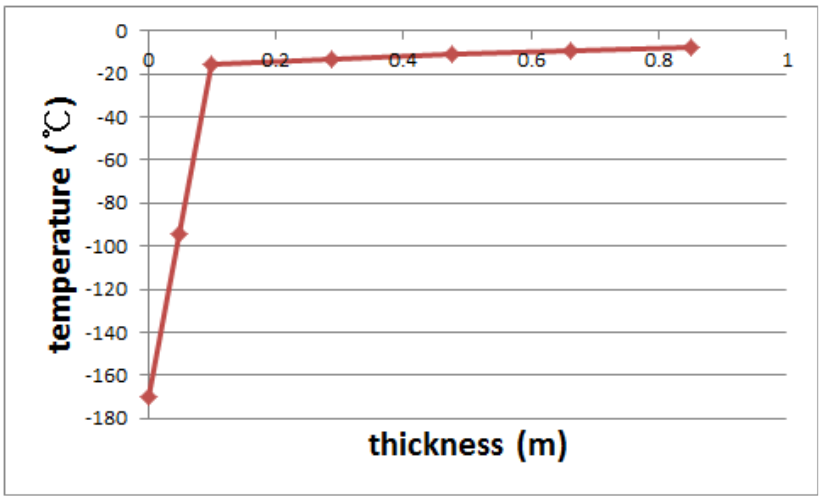
표 2.12.10 겨울철 시나리오별 최대 열 유속, 최대 열 유속 발생 높이

| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | 바닥판으로부터 발생높이(m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 28.9499 | 5 |
| 2 | 13.2 | 32.9751 | 13.2 |
| 3 | 20.1 | 37.0742 | 20.1 |
| 4 | 41.692 | 30.9892 | 40.5 |

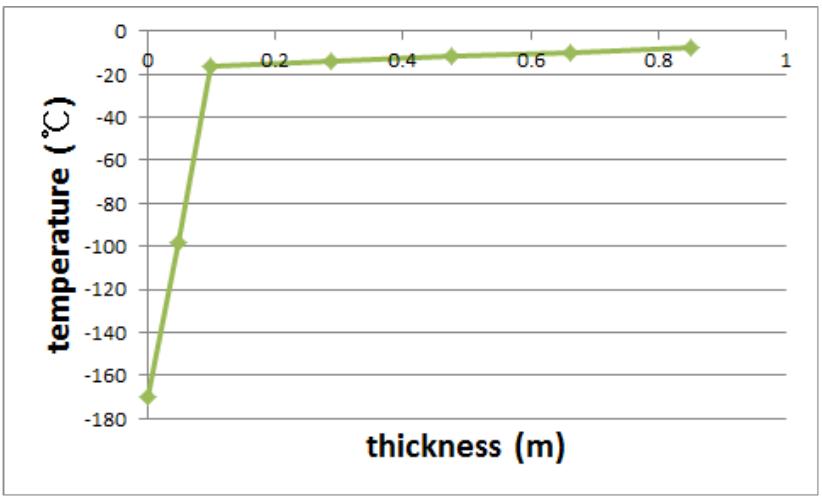
동일한 조건에서 여름철 외부탱크의 열전달 해석을 수행하기 위해 대류 조건을 - 7℃로 설정하고 다른 조건은 동일하게 유지하여 해석을 실시하였다. 표 2.12.11은 유출 시나리오에 따른 최대 열 유속과 최대 열 유속이 발생하는 높이를 나타낸다. 그림 2.12.19은 겨울철, 최대 열 유속이 발생하는 위치의 두께 방향으로의 온도분포를 보여준다. 최대 열 유속이 발생하는 위치는 여름철의 경우와 동일함을 알 수 있고, 최대 열 유속은 전체적으로 감소하였다.



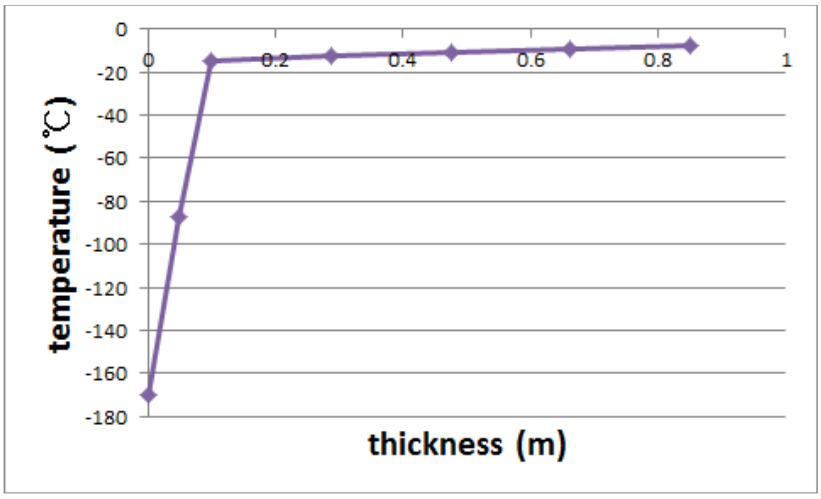

(a) LNG 유출 높이 5m일 때




(b) LNG 유출 높이 13.2m일 때




(c) LNG 유출 높이 20.1m일 때




(d) LNG 유출 높이 41.7m일 때

그림 2.12.19 겨울철, 최대 열 유속 발생 높이에서의 온도분포

표 2.12.11 겨울철과 여름철 시나리오별 최대 열 유속 비교

| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | | 차 이 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 여름 | 겨울 | | |
| 1 | 5 | 36.7631 | 28.9499 | 7.8132 | 21% |
| 2 | 13.2 | 41.8763 | 32.9751 | 8.9012 | 21% |
| 3 | 20.1 | 47.0819 | 37.0742 | 10.0077 | 21% |
| 4 | 41.692 | 39.3543 | 30.9892 | 8.3651 | 21% |

표 2.12.12는 여름과 겨울의 최대 열 유속과 그 차이를 보여준다. 여름철과 겨울철의 온도해석 결과를 비교하면 각 LNG 유출 높이 따른 최대 열 유속은 여름철의 경우, 겨울철에 비해 21%로 상승한다.

(2) 온도 의존적 물성

물질의 온도에 따른 열전도율의 변화를 적용하여 4가지의 유출시나리오와 계절의 영향을 고려한 해석을 수행한다. 온도에 따른 열전도율에 변화가 없는 Dry sand는 0.79(W/m℃)로 적용하고 콘크리트, cellular glass, PUF는 온도에 따라 변화하는 열전달계수를 입력한다. 열전달계수는 물질에 따라 차이를 보이며 표 2.12.12는 유한요소모델에 입력된 콘크리트, cellular glass, PUF의 열전달계수이다. 열전달계수를 적용한 유한요소모델은 4단계의 유출시나리오와 겨울, 여름에 따른 외부탱크 외측의 대류 경계변화 따라 수행한다. 온도에 독립적 물성을 적용한 유한요소모델과 마찬가지로 액화천연가스의 유출 높이는 5m, 13.2m, 20.1m 그리고 41.692m이며, 여름철과 겨울철의 대류조건의 수렴온도는 각각 37℃, -7℃를 적용한다. 표 2.12.13은 여름철의 4가지 시나리오를 적용한 유한요소해석 결과이며 시나리오에 따라 발생되는 최대 열 유속, 최대 열 유속이 발생하는 바닥판으로부터의 높이를 보여준다.

표 2.12.12 온도에 따른 열전달계수

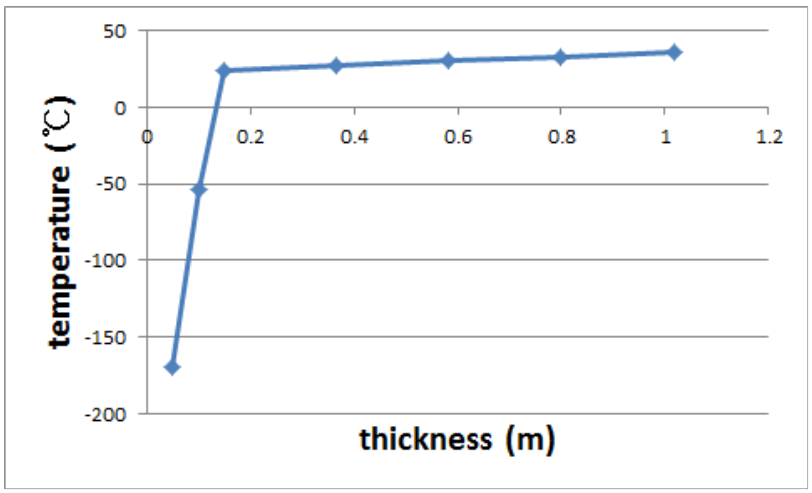
| Concrete | | Cellular glass | | PUF | |
|---|---|---|---|---|---|
| temp.(℃) | conductivity (W/m℃) | temp.(℃) | conductivity (W/m℃) | temp.(℃) | conductivity (W/m℃) |
| -150 | 2.21 | -150 | 0.0259 | -160 | 0.016 |
| -100 | 2.15 | -100 | 0.0298 | -120 | 0.019 |
| -50 | 2.09 | -50 | 0.0346 | -100 | 0.021 |
| -20 | 2.05 | -20 | 0.0385 | -50 | 0.022 |
| 0 | 2 | 0 | 0.0414 | -30 | 0.021 |
| 20 | 1.96 | 20 | 0.0446 | -20 | 0.02 |
| 50 | 1.94 | 40 | 0.0472 | -10 | 0.019 |
| | | | | 0 | 0.019 |

표 2.12.13 여름철 시나리오별 최대 열 유속, 최대 열 유속 발생 높이

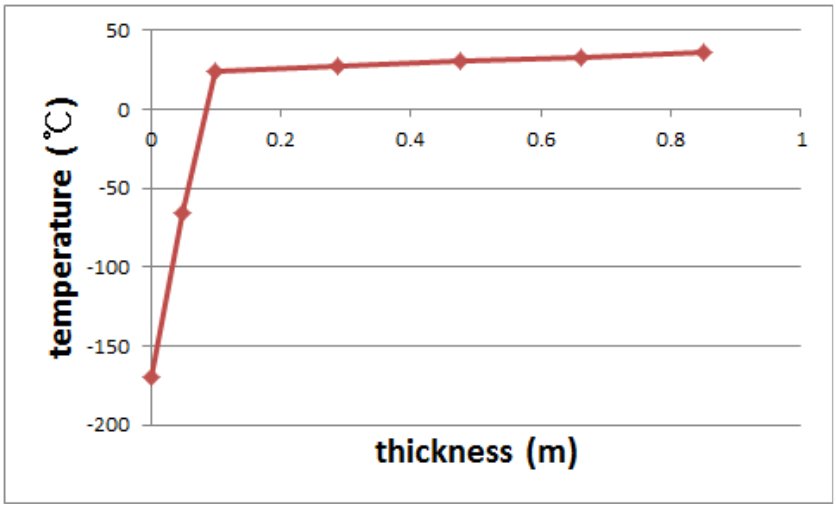
| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | 바닥판으로부터 발생높이(m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 34.1612 | 5 |
| 2 | 13.2 | 42.1425 | 12.97 |
| 3 | 20.1 | 43.8187 | 20.01 |
| 4 | 41.692 | 42.191 | 40.3 |

그림 2.12.20는 각 시나리오별 최대 열 유속이 발생하는 높이에서의 두께방향으로의 온도분포를 보여준다. 5m 지점에서 최대 열 유속이 발생하는 1번 시나리오를 제외하고 3개의 시나리오에서는 PUF의 두께에 해당하는 0.1m까지는 급격한 온도변화를 보이며 그 이후부터는 완만한 온도경사를 나타낸다. 1번 시나리오의 결과의 경우, 최대 열 유속을 보이는 지점이 PUF와 cellular glass와 콘크리트가 만나는 부분에 돌출된 형상이라 온도 분포의 시작이 다른 시나리오에서의 두께방향 온도분포와는 조금 다른 위치의 그래프를 나타내지만 액화천연

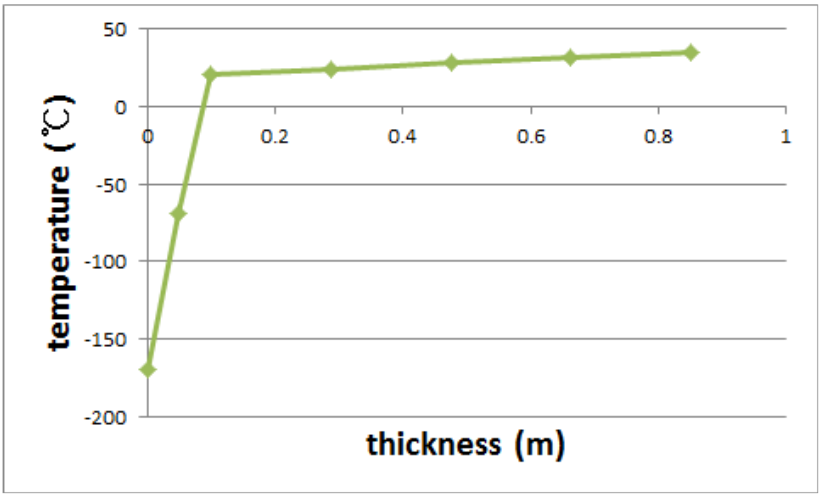
가스에 직접적으로 노출되어 있는 부분과 변단면 콘크리트의 두께를 고려하면 다른 시나리오의 결과와 유사한 결과를 얻었다고 할 수 있다.



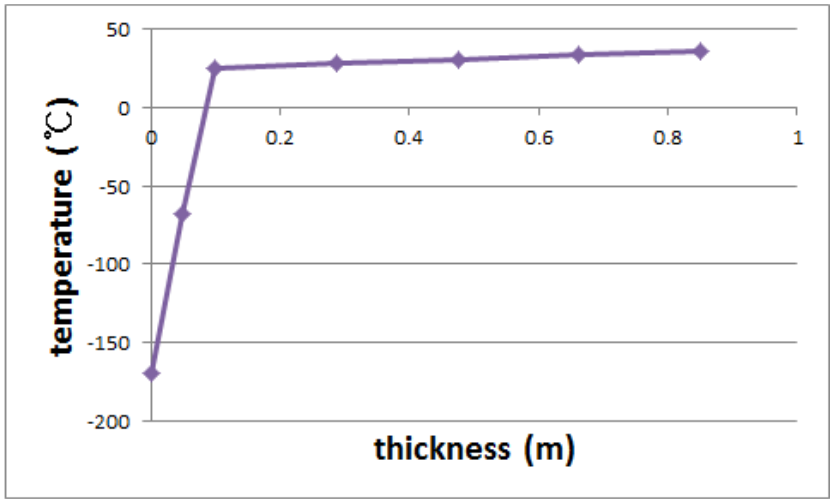

(a) LNG 유출 높이 5m일 때




(b) LNG 유출 높이 13.2m일 때




(c) LNG 유출 높이 20.1m일 때



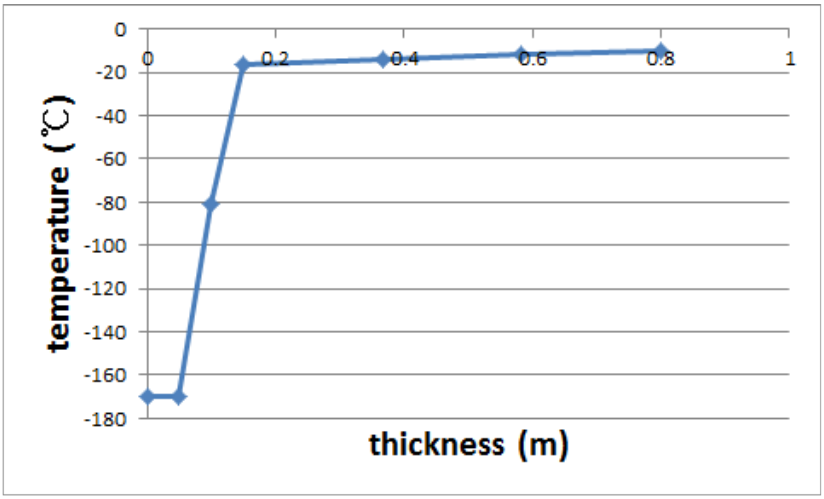

(d) LNG 유출 높이 41.7m일 때

그림 2.12.20 여름철, 최대 열 유속 발생 높이에서의 온도분포

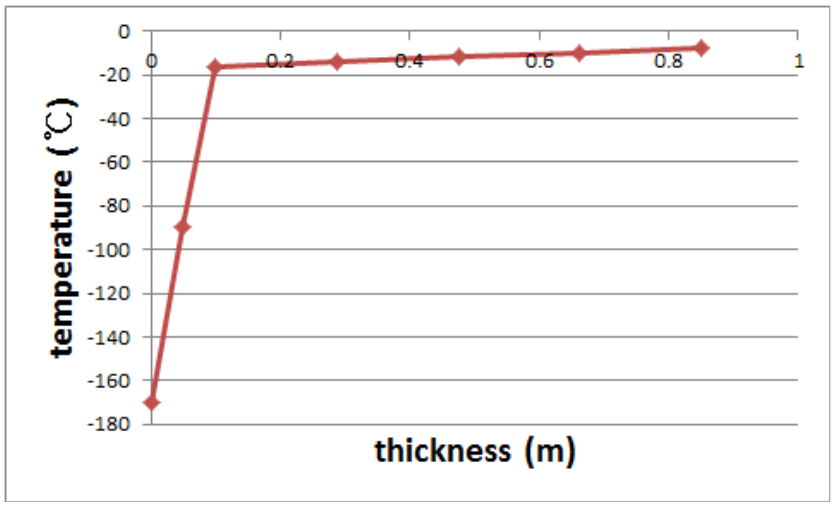
표 2.12.14 겨울철 시나리오별 최대 열 유속, 최대 열 유속 발생 높이

| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | 바닥판으로부터 발생높이(m) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 26.4496 | 5 |
| 2 | 13.2 | 32.5807 | 12.97 |
| 3 | 20.1 | 34.0477 | 20.01 |
| 4 | 41.692 | 32.6373 | 40.3 |

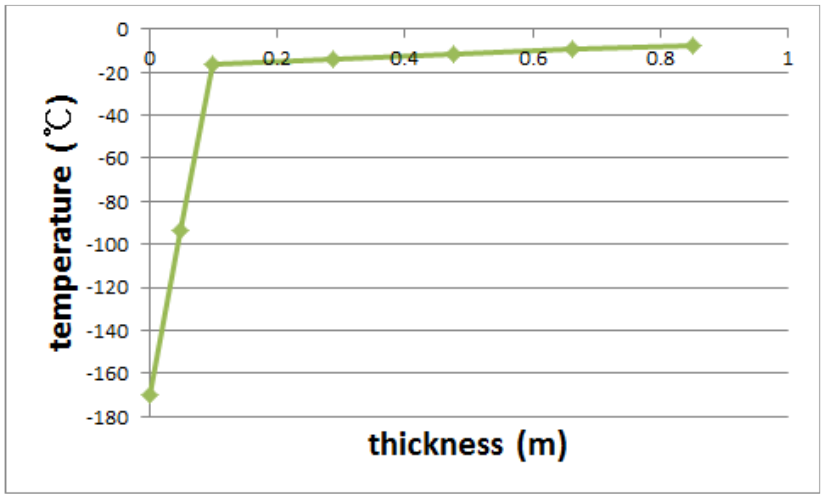
표 2.12.14은 동일한 조건을 적용한 유한요소모델에서 대류의 수렴온도 조건을 겨울철 외기온도인 - 7℃로 입력하여 해석을 수행한 결과이다. 이러한 조건 하에 각 시나리오별로 최대 열 유속이 발생하는 높이에서의 두께방향으로의 온도분포는 그림 2.12.21과 같다.



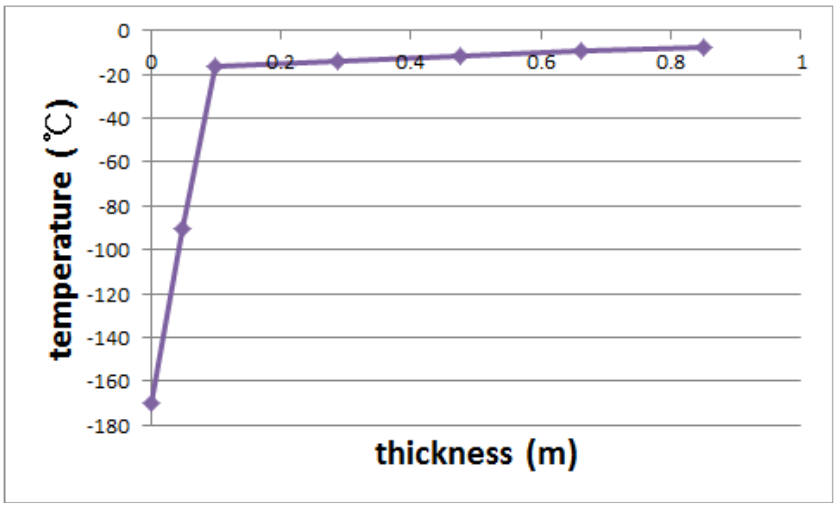

(a) LNG 유출 높이 5m일 때




(b) LNG 유출 높이 13.2m일 때




(c) LNG 유출 높이 20.1m일 때




(d) LNG 유출 높이 41.7m일 때

그림 2.12.21 겨울철, 최대 열 유속 발생 높이에서의 온도분포

표 2.12.15 겨울철과 여름철 시나리오별 최대 열 유속 비교

| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | | 차 이 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 여름 | 겨울 | | |
| 1 | 5 | 34.1612 | 26.4496 | 7.7116 | 23% |
| 2 | 13.2 | 42.1425 | 32.5807 | 9.5618 | 23% |
| 3 | 20.1 | 43.8187 | 34.0477 | 9.771 | 22% |
| 4 | 41.692 | 42.191 | 32.6373 | 9.5537 | 23% |

표 2.12.16 시나리오별 온도 독립적 물성을 반영한 해석과 온도 의존적 물성을 반영한 해석 결과와 차이

| 시나리오 | LNG 유출 높이(m) | 최대 열 유속($W/m^2$) | | | | 오차율 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 온도 독립적 물성을 적용한 경우 | | 온도 의존적 물성을 적용한 경우 | | | |
| | | 여름 | 겨울 | 여름 | 겨울 | | |
| 1 | 5 | 36.7631 | 28.9499 | 34.1612 | 26.4496 | 8% | 9% |
| 2 | 13.2 | 41.8763 | 32.9751 | 42.1425 | 32.5807 | 1% | 1% |
| 3 | 20.1 | 47.0819 | 37.0742 | 43.8187 | 34.0477 | 7% | 9% |
| 4 | 41.692 | 39.3543 | 30.9892 | 42.191 | 32.6373 | 7% | 5% |

표 2.12.16은 여름철과 겨울철 각 시나리오별로 발생하는 최대 열 유속과 그 차이를 보여준다. 여름철과 겨울철의 온도해석 결과를 비교하면 온도 의존적 물성을 반영할 경우, 각 LNG 유출 높이 따른 최대 열 유속은 여름철의 경우, 겨울철에 비해 23%로 상승한다. 표 2.12.16는 온도 독립적인 물성과 의존적인 물성에 따른 최대 열 유속을 나타낸다. 계절에 따른 시나리오별 최대 열 유속을 비교한 결과는 최소 1%에서 최대 9%를 보인다.

# 13절. 차량충돌하중을 받는 LNG 외부탱크의 해석적 거동 평가

## 1. 연구 목적 및 동향

### 가. 연구목적

최근 Liquid Natural Gas(LNG, 천연가스)의 수요량이 증가하면서 대부분 LNG 수요국들은 생산지로부터 선박을 이용한 공급이 활발히 진행되고 있다. 선박에 의한 공급을 위해서는 해안가에 LNG 저장시설이 필수적으로 요구되고 있으며, 기하급수적으로 증가하는 수요를 충당하기 위해 LNG 선박이 초대용량화 되고 있는 추세에 있다. 이러한 천연가스의 효율적인 보관을 위하여 공급선박의 최대용량에 맞추어 저장탱크 또한 점점 초대용량화를 지향하고 있는 실정이다. 최근 국내에서 건설되고 있는 LNG 저장탱크는 외부 프리스트레스 콘크리트(Prestress concrete, PSC) 이중벽과 내부 9% 니켈방호벽 및 벽사이의 효율이 높은 단열재로 구성된 완전방호식이 적용되고 있다. 이는 현재까지 전 세계적으로 적용된 멤브레인 방식보다 대용량화에 보다 안전한 형태의 저장탱크로 판단되기 때문에 완전방호식 저장탱크로 건설이 활발히 진행되고 있다. 완전방호식 저장탱크의 내부탱크는 -162℃의 초저온 액체를 저장하기 위해 초저온에 견딜 수 있도록 고안된 9%니켈을 사용하여 건설되어진다. 반면 외부탱크는 천연가스의 저장보다는 방호 목적을위해 건설 되어지는 것이 일반적이라 할 수 있다.

따라서 외부탱크는 내부탱크의 균열로 인한 가스누출 사고 발생 시 최종 안전을 보장해야 하는 구조물이므로 외부탱크의 안전성 확보는 필수조건 이라고 할 수 있다. 일반적으로 외부탱크는 정상가동시에 LNG에 의한 측압이 내부탱크에만 작용하지만 누출사고시 외부탱크의 콘크리트 벽체의 설계하중으로 작용한다. 또한 벽체의 안전성을 검토하는 과정에서 검토 시점은 시공시와 운전시 두단계에 거쳐 수행되어야하며, 프리스트레스드(prestressed, PS)텐던에 의해 주요 설계하중이 서로 상쇄되는 경우인 운전시점 보다는 프리스트레스드 텐던에 의한 힘만 작용하는 시공시점이 설계를 지배하는 주된 요인이다. 일반적으로 응력이 가장 크게 발생하는 곳은 강성이 큰 바닥판에 의해 구속되어 있는 벽체 하부이다. 이러한 벽체 하부에 차량충돌이나 비행물체가 떨어져 큰 충격하중이 가해지는 연구가 현재까지 진행되어 있지 않고있다.

실제 LNG 저장탱크는 초대형 구조물이기 때문에 외부 하중인자로부터 안전을 확보하기 위해 최신의 건설기술을 집약적으로 사용하여 건설되어진다. 또한 장기적인 측면에서 볼 때 사용연한을 충분히 확보하기 위해 외부하중조건에 대해 만족할 수 있는 설계가 이루어 져야 한다. 따라서 본 보고서에서는 차량의 접근성이 가장 용이한 LNG 외부탱크의 하부를 차량충돌하중에 의한 외부탱크의 해석적 거동을 평가하고자 한다.

### 나. 연구동향

9.11테러당시 충돌하중에 대한 구조물의 손상을 완화 시키고 그에 대한 설계지침을 개발하기 위한 시도가 이루어 졌으며, 이것을 바탕으로 미국 연방정부 내에 국가 비상사태에 대비한 동원·기획등 관련기능을 수행하는 기관으로 대통령 직속의 국토안보부(Department of

Homeland Security)와 국토안보부 산하에 재난관리 업무를 담당하는 연방비상관리청(FEMA)등을 통해 1958년에 제작된 TM 5-855-1이라 명명된 기술편람을 기준으로 대량살상무기에 대한 방호설계의 기본 원칙을 정립하여 규정으로 정하였다. 이전까지의 충격하중에 대한 연구를 살펴보면 McKee와 Sevin(1958)은 충격·압력하중에 대한 조적구조물에 대한 설계방법을 연구하였으며, 본 연구에서 충격하중을 견딜 수 있는 조적 구조물의 설계방법을 제시 하였다. 이후 Norris et al.(1959)는 동적하중에 대한 구조설계를 조사하여 발표하였는데, 구조물의 분포된 질량과 연속시스템을 질량, 하중, 내력변화 인자들을 사용하여 나타내었다(Norris et al., 1959). 또한 Biggs(1964)는 다양한 구조물의 모델링 기법을 제시하는 한편, 동적 하중에 대한 구조물의 응답에 관한 연구를 위하여 고차원의 수학적 기법을 사용하는 대신 실제 구조문제를 이용하여 설계와 해석기법을 강조하였다. 이 과정에서 동적 모델링 작업에 의해 생성된 미분형태의 운동방정식을 풀기 위하여 수치적분법이 사용되었다.

Wiehle와 Buckholdt(1968)는 충격하중을 받는 외부 벽 부재의 붕괴를 예측하기 위한 해석적 과정과 전산 프로그램을 개발하려는 시도를 하였다. 여기서, 다양한 인자에 대한 외부 벽의 붕괴압력 민감성을 결정하기 위하여 임의의 동적하중을 받는 벽체 부재의 거동에 대해 여러가지 조건변수를 변화시켜 그 상관관계를 규명하기 위한 연구를 수행하였으며, 해석적 실험결과와 현장실험을 통해 비교를 검토 하였다. 또한 Wiehle(1974)는 기존 구조물의 평가시 그 과정을 대상 구조물에 대한 지상 충격하중의 결정을 통해 동적응답의 결정 및 각각의 대상 구조부재에 대한 파괴이론의 수립 등으로 나눠 평가과정을 수립하였다. 구조부재에 대한 내력함수를 구하는데 사용되도록 해석적 방법이 제시되어 있으며, 각각의 부재에 등분포된 정적하중을 사용하는 데에 바탕을 두었다.

Forsen(1985)는 충격하중을 받는 일방향 벽체의 응답에 관해 실험적인 연구를 수행하였으며, 실험결과를 해석적 결과와 비교하기 위하여 하중-충격량에 대한 도표와 비교하였다.

Wesevich와 Crawford(1996)는 철근으로 보강된 콘크리트 조적조에 대한 충격하중의 완화방법에 대한 연구를 수행하였으며, Murray(1997)는 유한요소법을 이용하여 충격하중을 받는 철근으로 보강된 벽체 구조부재의 거동을 해석하는 연구를 수행하였다. Coltharp와 Yerushalmi(1997), Whiting와 Coltharp(1997), Purcell et al.(1999)는 충격하중을 받는 구조부재의 손상 완화를 위한 실험적인 연구를 수행하였다.

현재까지 연구되어진 차량에 관한 충격실험은 많았으나, 차량 충격에 따른 LNG 외부탱크의 해석적 거동에 대한 연구는 국내외적으로 전무하다. 그러므로 이 연구에서는 설정한 가상시나리오에 따른 외부탱크의 거동분석을 동적 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA로 수행하였다. LS-DYNA는 1976년 저속 충돌문제를 해석하기 위해 개발되었으며, 주로 폭발, 비선형 충돌, acoustic, 열, 유체 등의 광범위한 해석분야에 사용되고 있다. 본 연구에서는 LS-DYNA 971를 사용하여 LNG 외부탱크벽체의 응력-시간이력 및 충돌면 벽체의 높이-변위에 대해 정밀해석을 수행하였다.

외부탱크의 충돌에 대한 성능을 평가하는 방법은 실제 차량충돌 실험이 가장 확실하나 비용과 시간이 많이 소요된다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 가스탱크의 성능을 평가하는 것이 효과적이다. 국내에서는 원자로 격납고에 대한 비행물체의 충돌에 대한 해석과 가스탱크 지붕에 대한 비산물체의 충격하중에 대한 해석을 실시한 바 있다(이승림, 2009). 이러한

연구에서는 탱크 형상, 충돌속도, 충돌체 중량등은 탱크 설계를 위한 코드의 제안에 따라 설정 되었으나, LNG 외부탱크의 콘크리트 압축강도 변화 및 차량충돌속도 변화에 대한 연구는 되지 않았다. 또한 추후 비행물체 또는 비산물체와의 충돌각도 변화에 따른 거동을 예측하기 위해 필요한 연구라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 LNG외부탱크와 차량충돌하중의 충돌각도 및 충돌속도에 따른 LNG 외부탱크의 거동을 LS-DYNA를 이용한 유한요소 해석을 통해 평가하고 LNG 외부탱크의 안전성을 검토하고자 한다. 또한 165,000kL급 탱크의 프리스트레스 텐던 정착구간을 60°로 축소 모델링 하여 차량 충돌면에 대한 손상정도를 유한요소 파괴형태 및 거동을 평가하고자 한다.

다. 연구범위

본 연구는 차량충돌하중을 받는 LNG 외부탱크의 설계시 안전성을 검토하기 위하여 충돌에 의한 순간적인 충격효과를 반영하여 최대 처짐 부에서의 시간이력에 따른 최대변위를 분석하여 해석적 거동을 평가한다. 본 보고서의 연구범위는 다음과 같다.

(1) LNG 외부탱크는 LS-DYNA를 이용한 차량충돌하중을 받는 정밀해석기법을 사용하도록 한다.

(2) 차량충돌하중은 선정한 차량모델(8ton)과 속도(100km/h, 150km/h)로 National Crash Analysis Center(NCAC)에서 제공하고있는 차량모델을 이용한다.

(3) 외부탱크에 가해지는 충돌하중은 충돌각도에 따라 다르게 적용되므로 차량 충돌각도는 90°로 한다.

(4) 외부탱크 설계시 프리스트레싱 손실 마찰계수를 적용시키며, 프리스트레싱 텐던 배치 각도는 60°로 한다.

(5) 충돌에 의한 하중요소중 파편, 지반효과, 화재, 지진 등의 영향은 고려하지 않으며, 충돌에 의한 하중만을 고려하도록 한다.

(6) LNG 외부탱크에 가해지는 차량충돌하중은 100km/h와 150km/h의 속도에 따른 충격량을 가하도록 한다.

(7) 차량충돌하중을 받는 LNG 외부탱크의 콘트리트 압축강도는 24MPa, 45MPa을 변수로 정한다

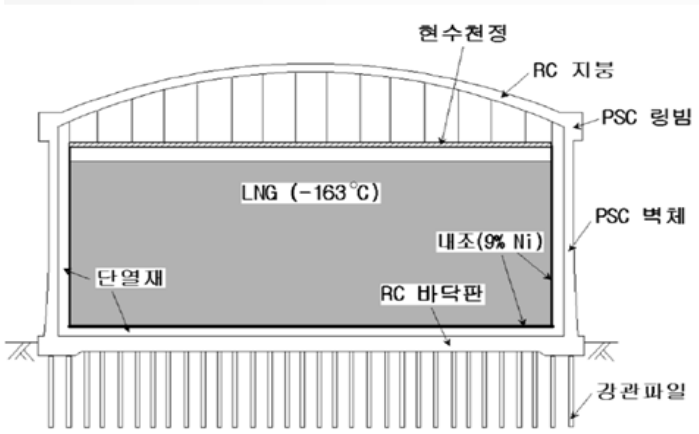
2. LNG 외부탱크 설계특성

완전 방호식 LNG 저장탱크는 크게 내부탱크와 외부탱크로 나누어 설계할 수 있다. 일반적

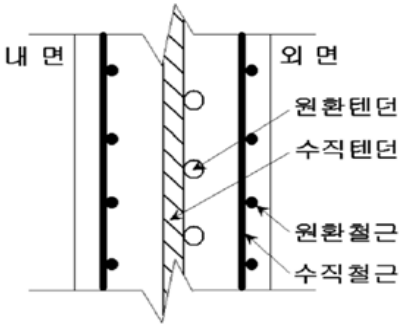
으로 내부탱크는 9% 니켈강을 사용하여 -162℃이하에서 액화 가스를 안정적으로 저장 할 수 있도록 하기 위한 구조물로 실제 액화 천연가스의 저장시설이라고 볼 수 있다. 반면 외부탱크는 철근 콘크리트를 사용하여 내부탱크를 감싸고 있는 형태로 존재하며, PSC를 적용하여 보다 안정적인 콘크리트 구조물로 이루어져 있다. 따라서 LNG 저장탱크의 설계는 저장탱크의 종류에 따라 설계특성이 있는것을 알 수 있다. 일반적으로 LNG 저장탱크의 1차탱크(내부탱크)와 2차탱크(외부탱크)로 나누어 설계되는 완전방호식(full containment) 저장탱크의 종류로서 PSC로 설계 되어진 구조물을 말한다. 이러한 외부탱크의 설계는 콘크리트의 재료특성 및 구조적 성능을 고려하여 설계가 이루어지고 있다.

가. 외부탱크의 설계

본 연구에서는 실제 국내에 건설되어진 ○○ LNG 저장탱크의 설계를 기초로 하여 연구를 수행하였다. 완전방호식 지상식 저장탱크는 내부탱크와 외부탱크로 분리되어져 있으며, 차량충돌하중을 받는 외부탱크의 해석적 거동을 판단하기 위해 재료적, 물리적 재원을 동일하게 적용하였다.




(a) 전체구조




(b) 상세구조

그림 2.13.1 완전 방호식 LNG 저장탱크의 구조

LNG 저장탱크의 전체적인 구조는 그림 2013.2(a)와 동일하며, 실제 철근의 배근과 프리스트레스드 텐던의 배치형상은 2,13.2(b)와 같다.

(1) 설계범위

지상식 LNG 저장탱크의 설계는 내조설계와 외조설계로 이루어진다. 내조설계 시 9%니켈 강구조물과 이의 부속장비 및 기계장치의 설계를 수행한다. 설계조건에 따른 하중에 대하여 구조해석을 수행한 후 하부기초 및 탱크본체 상부구조물의 설계로 이루어진다. 탱크 벽체는 일반하중 조건뿐만 아니라 비상조건에서의 특수하중에 대해서도 구조물의 안전성 검토가 이루어진다. 다음은 본 연구에서의 LNG 가스탱크 설계과정을 나타내고 있다.

1) 설계 기본사항 결정(저장용량, 사용기본 충족조건)
2) 단일하중 결정 및 구조해석(일반하중, 특수하중, 선형탄성해석)
3) 단면력의 선형중첩(하중조건에 따른 단면력 조합)
4) 벽체설계(단면력 산정, PSC)
5) 비상조건 검토(충돌시 해석조건)

(2) 설계조건 및 기준

LNG 저장탱크는 -162℃ 극저온 상태의 액체를 저장한다. 내조는 설계 수명동안 정상 가동조건에서 저온의 액압을 지지해야 한다. 9%니켈을 함유한 특수 합금강은 저온 조건에서 연성 및 인성을 확보하고 있다고 알려져 있다. 안전도 측면에서 9%니켈강의 내조와 프리스트레스트 콘크리트의 외조로 구성되는 탱크시스템이 효율적이며, 본 연구의 대상체인 통영 LNG 저장탱크 인수기지의 지상식 저장탱크는 다음과 같은 조건하에서 한계상태에 만족하도록 설계 되었다.

1) 정상가동 조건
2) 시험하중 조건
3) 비상상황 조건

한계상태는 극한한계상태와  사용한계상태로 구분한다. 극한한계는 부재의 최대 내력에 해당하는 상태로써, 단면파괴, 좌굴, 피로 등에 의한 한계상태로 표현된다. 사용한계는 정상적인 가동상태, 또는 내구성에 관한 한계상태이며 과대한 변형이나 처짐, 균열 등이 유발되는 상황이라고 할 수 있다. 표 2.13.1은 해석에 사용된 OO LNG 저장탱크의 설계기준으로 실제 LNG 탱크 설계 시 다음과 같은 규정에 의해 설계가 되고 있다. 그러나 표 2.13.1의 내용은 현재까지 고려되어진 지진하중, 온도하중 및 화재에 대한 안전성 확보에 대한 기준이며 또한 미사일 충돌은 내부탱크에 대한 기준으로 채택 되며 외부탱크는 해당되지 않고 있으며, 액체충격 또한 내부탱크에 대한 기준으로 본 보고서에서 다루고자 하는 차량 충격 하중에 대한 기준은 없다. 따라서 본 보고서의 결과를 통해 충돌하중에 대한 설계기준 정립이 필요할 것으로 판단된다.

표 2.13.1 OO LNG 지상식 저장탱크 설계기준 (한국가스공사, 2008)

| 조건 | | 적용범위 | 설계기준 |
|---|---|---|---|
| A. 정상가동상태 | | 안전성 | BS8110의 극한한계상태 만족 |
| | | 내구성 | 제한균열폭=0.2mm<br>평균균열폭=0.12mm |
| | | 기밀성 | Steel Liner에 의한 확보 |
| B. 정수압시험<br>(공기압시험 포함) | | 안전성 | BS8110의 극한한계상태 |
| | | 기밀성 | Liner |
| C. 비상상황 | 1.내조LNG유출 | 안전성 | 극한한계상태 만족 |
| | | 사용성 | 잔존압축영역 100mm이상 확보,<br>압축영역에서 압축응력은 2N/mm2 확보 |
| | 2.지진하중 | 가동가능 | |
| | | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | | 기밀성 | 제한균열폭=0.2mm |
| | 3,지진하중(SSE) | 기능안전 | |
| | | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | | 기밀성 | Steel Liner |
| | 4.액체충격 | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | 5.미사일충돌 | 내조의 구조적<br>안전성 유지 | 콘크리트 벽체의 관통은 국부적인 영향만<br>미치도록 방어 |
| | 6.벽체의 저온의<br>온도충격 | | 국부적인 영향<br>균열폭=0.2mm |
| | 7.인접지역의<br>화재발생에 노출시 | -구조적 안전성 확보<br>-탱크와 지붕은<br>복사열에대해<br>2시간동안 유지 | 비선형 해석 검토 |
| | 8.탱크내부의 화재 | 약위이하에서 탱크<br>벽체의 안전성 확보 | 비선형 해석 검토 |

(3) 설계하중

하중은 탱크의 시험 및 정상 가동상태에서 작용하는 일반하중과 비상 상태시 작용하는 특수하중으로 구별된다. 일반하중의 종류는 다음과 같다.

1) 지붕 구조물에 작용하는 하중
2) 벽체 구조물에 작용하는 하중
  - 지붕으로부터 전달되는 하중
  - 풍압력

- 가스압력
- 액체압력
- 온도하중
- PSC 효과
- 벽체 자중
- 단열재 중진에 따른 횡압

3) 특수하중
- LNG 누출사고 시
- 누출 온도하중
- 액체충격
- OBE, SSE
- 인접지역 화재
- 탱크 내 화재
- 비행물체 또는 물체 충돌

정상 가동상태에서 탱크 내부의 가스압력은 일정한 범위 내에서 관리된다. 하지만 비정상적인 경우 가스압력은 커져서 과압력이 작용한다. 또한 내조의 파괴 또는 액체 누출시 외조는 갑작스런 온도저하 즉, 온도충격을 받는다. 내조와 외조 사이의 단열재에 결함이 있을 경우에도 온도충격이 유발된다. 하지만 본 연구에서는 온도에 대한 영향은 고려하지 않으며 단지 차량충돌에 의한 해석을 하고자 한다.

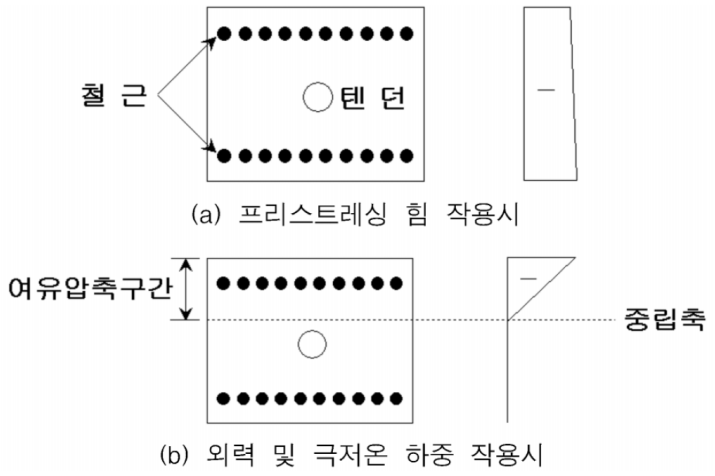



그림 2.13.2 LNG 외부탱크 벽체의 형상 및 응력분포

그림 2.13.2(a)는 LNG 외부탱크의 프리스트레싱 힘이 작용할 때의 응력분포를 나타내고 있으며, 2.13.2(b)는 외력 및 극저온 하중이 작용할 때의 응력분포를 보이고 있다. 실제로 프리스트레스드 긴장력이 작용할 때와 그렇지 않을때 응력분포를 알 수 있다.

나. LNG 외부탱크의 프리스트레싱 텐던의 설계특성

LNG 외부탱크는 가스의 내압 및 하중인자로부터 안전성을 확보하는 1차 방호성능 구조물이다. 외부탱크는 프리스트레스로 보강된 철근콘크리트 구조물로서 고강도 콘크리트 압축강도와 철근의 결합으로 견고하게 이루어진 벽체로 프리스트레싱 텐던 긴장력을 도입하여 보다 안전한 방호구조물로 설계하는 특징이 있다. 프리스트레싱 텐던의 배치각도에 따라 부벽을 위치하여 각도를 결정하며, 원환방향 프리스트레스 긴장력을 도입할 수 있다. 또한 수직방향 프리스트레스드 긴장력은 바닥판으로부터 지붕의 링빔까지 수직방향 텐던을 삽입하여 긴장을 도입하는 방법이 있다.

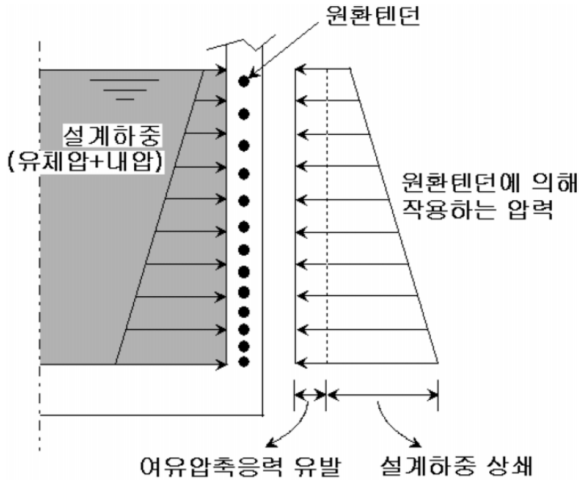



그림 2.13.3 LNG 외부탱크의
프리스트레스드 원환텐던 배치(KOGAS,
2007)

그림 2.13.3와같이 응력집중현상이 발생하는 LNG 외부탱크 하부는 상부보다 상대적으로 더 큰 프리스트레스드 긴장력이 필요로 하게 된다.

(1) 프리스트레싱 텐던 배치각에 따른 LNG 외부탱크

탱크구조물은 내압에 의하여 측벽에 원환방향 인장력과 수직방향의 휨 모멘트를 유발한다. 따라서 원주 방향 인장력에 대한 저항력을 확보하기 위해 원주방향으로 프리스트레스를 도입하며, 수직방향의 휨모멘트에 대한 저항력을 확보하기 위해 수직방향으로 프리스트레스를 도입해야 한다. LNG저장탱크 구조물과 같은 원통형 구조물에서 원환방향으로 도입된 프리스트레스는 원환방향 단면의 압축응력을 유발한다. 프리스트레스에 의해 도입된 압축응력은 구조물 내부의 액압에 의해 발생되는 원환방향의 인장응력을 방지한다. 원주방향의 프리스트레스 도입은 Post-Tensioning 방법에 의해 PS 강재를 내부 긴장 방식으로 설치한다. 원주방향의 텐던은 벽체의 부벽(buttress)에 정착되며, 부벽은 일정한 각도로 배치된다. 부벽의 간격은 60° 또는 90° 간격으로 배치되며, 그림 2.5 및 2.6과 같다.

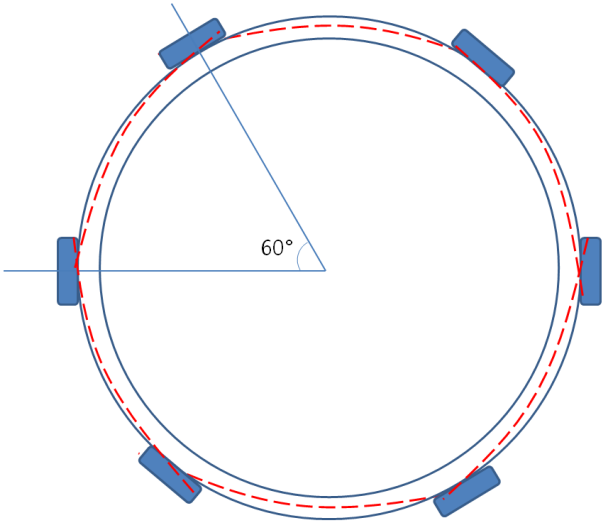



그림 2.13.4 프리스트레싱 텐던 배치각도 60°

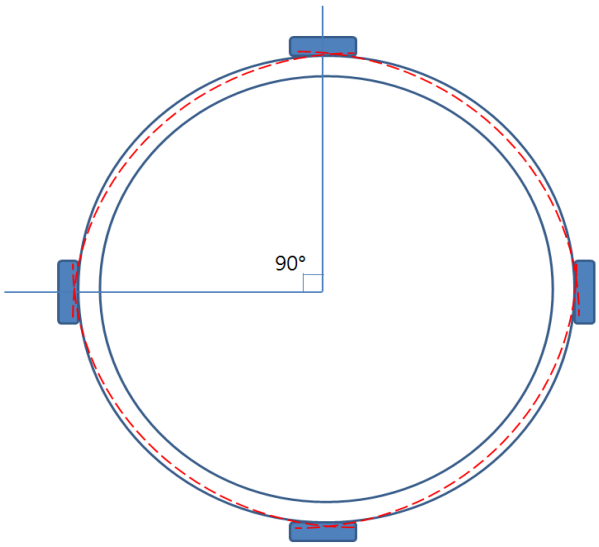



그림 2.13.5 프리스트레싱 텐던 배치각도 90°

(2) LNG 외부탱크의 프리스트레스의 설계

벽체의 수직 텐던은 저부가열식의 경우 탱크의 바닥판이 지면이 접해 바닥판에 텐던 정착부를 설치하기가 곤란하므로 텐던을 U자형으로 배열하여 긴장단과 고정단을 벽체의 상단에 위치시키게 된다. 고상식 탱크의 바닥판은 페데스탈에 의해 지지되어 일정한 높이에 위치하므로 텐던의 정착부를 바닥판 밑면에 위치시킬 수 있다. 본 연구에서는 지상식 저장탱크의 수직 텐던은 모델링절차에서 수직방향으로 배치하여 양쪽 끝단을 모두 고정시켜 모델링을 하도록 하였다. 따라서 텐던을 수직·수평 형태로 배치 가능토록 설계한다. 벽체에 도입되는 원환방식의 프리스트레스를 결정하는 과정은 다음과 같다.

1. 벽체에 작용하는 내압 $F_a$를 계산한다. 내압은 LNG누출시의 액압, 가스압, 단열재다짐에 의한 횡압 및 잔류응력(residual stresses)으로 구성된다.

2. 프리스트레싱에 의한 등가외압Fe의 결정

$$F_e = X \cdot F_a \qquad (2.1)$$

.

여기서 $F_e$ : 프리스트레스에 의한 등가외압(KN)

X : 프리스트레스 수준(prestress level)

$F_a$ : 작용내압(액압+가스압+단열재횡압+잔류응력)(KN)

3. 텐던당 유효 프리스트레스 $f_{pe}$ 계산

4. 유효 프리스트레스에 의한 텐던의 유효하중 산출

$$P_e = A_{pe}\ f_{pe} \qquad (2.2)$$

여기서 $P_e$ : 텐던의 유효하중(KN)

$A_{pe}$ : 텐던의 단면적($mm^2$)

$f_{pe}$ : 텐던의 유효응력(MPa)

5. 벽체 높이별 텐던 구간 L의 구분

6. 벽체 구간별 텐던 개수의 결정

$$n = \frac{F_e r L}{P_e} \qquad (2.3)$$

여기서 n : 텐던갯수

$F_e$ : 프리스트레스에 의한 등가외압(KN)

$P_e$ : 텐던의 유효 프리스트레스하중(KN)

r : 원통형 벽체의 반지름(mm)

L : 벽체구간의 높이(mm)

3. LNG 외부탱크의 유한요소모델

일반적으로 지상식 LNG 저장탱크의 유한요소 해석을 위한 프로그램은 다양하게 이용되어지고 있다. 연구의 목적과 방향에 따라 어떤 프로그램을 이용해야 할지 결정되는데 본 연구에서는 충돌 시뮬레이션을 통한 충격하중과 충격량을 토대로 외부탱크의 안전성을 검토하기 위하여 모델링은 Hypermesh를 이용하였으며, 해석은 LS-DYNA를 통해 수행하였다. 모델링은 대형화를 위해 설계된 165,000kL급 저장탱크이며, 외조의 지름과 높이가 상당히 크기 때문에 충돌면을 보다 크게 확대하여 변화를 관찰해야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 60° 벽체를 유한요소 모델링 하여 차량충돌하중을 가하고자한다. 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 전체 외부탱크의 크기가 대형화된 상태이기 때문에 전체 모델링된 외조와의 차량충돌 모델과 프리스트레스 배치 각도에 따른 모델링이 보다 효과적일 것으로 사료된다.

가. 차량충돌하중의 유한요소 모델

(1) 차량 모델링

미국 차량 충돌 연구센터인 National Crash Analysis Center(NCAC)는 연방 고속도로 관리국(FHWA)과 도로교통 안전 관리국(NHTSA), 워싱턴 대학과 협력하여 만든 곳으로 교통사고 방지와 탑승자의 안전을 위해 차량충돌 시뮬레이션을 수행 하고 있다. NCAC에서는 차량충돌 시뮬레이션을 위해 실제 차량을 세부적으로 모델링 하고 인터넷 홈페이지를 통해 무료로 차량 모델을 제공한다. 13개의 차량모델 중 트럭모델로는 Ford Single Unit Trailer 모델을 선정하였다. 이 트럭 모델은 앞서 선정한 구조 해석 프로그램인 LS-DYNA에 적용이 가능하며 전 세계적으로 차량 충돌 연구에 많이 사용되는 모델이다. 또한 LS-DYNA는 1970년대 저속 충돌 문제를 해석하기위해 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)에서 개발된 것으로서 1980년대 후반 LSTC사의 설립과 함께 다양한 접촉 문제의 해석 결과 충돌해석 분야의 광범위한 적용 등을 통해 안정성이 입증된 프로그램이며 특히 벽체와 차량 부재 모델링에 용이한 요소 들을 가지고 있다. 그림 2.13.6은 LS-DYNA에서의 차량충돌 해석의 예를 보여준다(조판규, 008).

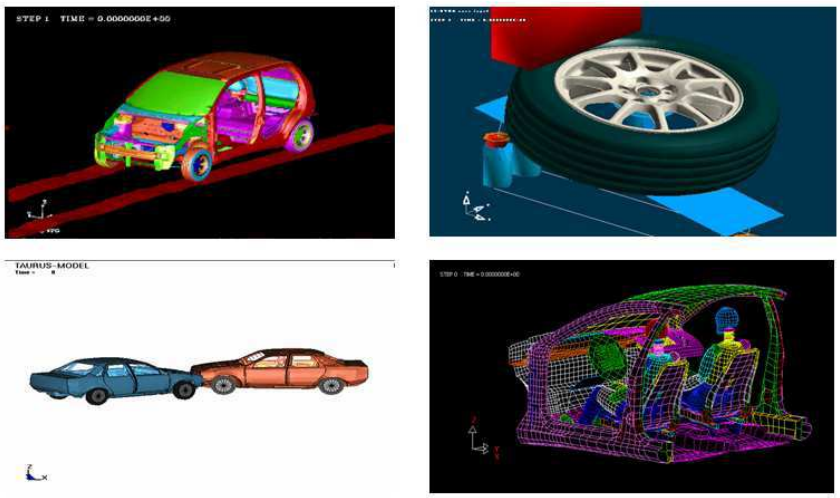


그림 2.13.6 LS-DYNA의 차량 충돌 해석 예(조판규, 2008)

미국의 NCAC가 제공하는 8톤 트럭(Ford Single Unit Truck) 모델을 사용하였으며, 그림 2.13.7는 트럭의 3차원 차량모델을 나타내고 있다. 트럭의 경우 몸체는 19,479개의 쉘 요소로 되어 있으며, 내부부품은 1,248개의 솔리드 요소로 되어 있다. 트럭의 경우 제공된 모델의 중량이 8톤으로 고정하였다. NCAC에서 제공되는 차량의 FEM모델은 승용, 봉고, 트럭모델과 트레일러 모델로 나눠져 있다. 본 연구에서 사용된 트럭모델은 가장 중량이 많이 나가는 모델이기 때문에 본 연구에서 충돌해석을 수행하기에 가장 적합하다고 판단되어 8톤 트럭의 FEM 모델을 사용하였다. 표 2.13.1은 해석에 사용된 트럭 모델 정보를 나타낸다.

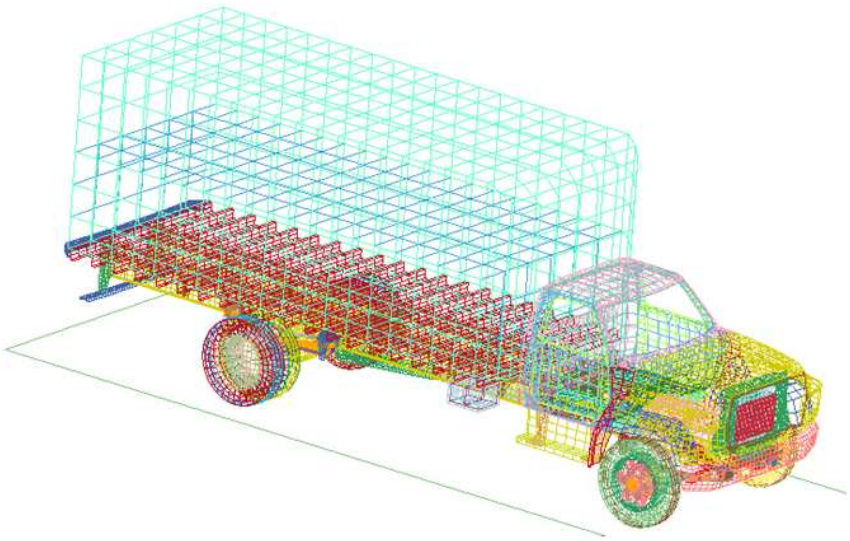


그림 2.13.7 트럭의 FEM 모델(김장호 외, 2010)

표 2.13.1 트럭 모델 정보 (KOGAS, 2008)

| Classification | | Truck model |
|---|---|---|
| Number of element | Shell | 19,479 |
| | Solid | 1,248 |
| | Beam | 124 |
| Weight of car(Ton) | | 8 |
| Yield stress(MPa) | | 270 |
| Elastic Modulus(MPa) | | 205,000 |
| Impact velocity of car(km/h) | | 100 |
| Car geometry (B×H×L, mm) | | 2,400×3,200×8,500 |

(2) 차량 하중조건

차량이 LNG 저장탱크 또는 원자력 발전소와 같은 사회기반시설에 충돌할 확률은 탱크의 위치, 차량의 통행 빈도수, 차량 충돌 사고 발생률 등에 의해서 결정되며, 현행 미국 기준에서는 $10^{-7}$/년 보다 큰 확률을 갖는 차량 및 항공기 충돌사고에 대해서 설계시 고려하도록 규

정하고 있으며(BSI 8110-1, 1997), 국내를 비롯한 여러 나라에서 이 규정을 이용하고 있다. 그러나 차량이 LNG 저장탱크와 충돌할 확률은 구조물의 특성 및 차량충돌 발생률 등에 의해결정 되지만 극히 제한적으로 발생될 상황이라 할 수 있다. 하지만 발생할지 모를 확률로 인한 예방적 측면에서 차량 충돌사고에 대비해 설계시 고려할 수 있도록 하기위해 표 2.13.2와 같은 차량충돌 해석조건을 설정하게 되었다. LNG 외부탱크 벽체의 충격에 대한 안전성 관련 해외 규격 요구사항과 국내외 설계사례 분석을 통해 현실성 있는 차량충돌 해석조건을 도출해 내도록 하였다.

표 2.13.2 차량충돌 해석조건

| | |
|---|---|
| 차량무게 | 8 ton |
| 차량충돌속도 | 100km/h , 150km/h |
| 차량충돌각 | 90° |
| 차량 및 외부탱크의 충돌면 경계조건 | Automatic contact surface to surface |
| 비고 | solid 요소로 모델링 되어진 콘크리트 구조물과 차량 경계면 |

LNG 저장탱크에 충격하중을 가해줄 수 있는 실제 차량 모델 중에서 극한 충격 하중을 나타내기 위하여 8톤 트럭을 차량모델로 선정하였다. 이와 같이 국내외에서 많이 사용되는 트럭 차량모델은 NCAC에서 제공 받았으며, 차량의 모든 모델들은 실제 차량과 동일하게 모델링 하였으며, 엔진 및 변속기와 같은 부품은 탄성재료로, 서로 다른 부품들을 연결해주는 부분은 강체로, 차량 몸체와,(조판규, 2008; Paul. A, et al., 1999) 여기서 차량의 충격속도는 국토해양부에서 규정한 설계속도 중 고속도로의 최대설계속도인 120km/h와 최저설계속도 80km/h의 평균 속도인 100km/h로 설정하였다. 짧은 시간에 큰 변형이 발생 가능한 충격문제에서는 충격차량과 교각의 충격 면에서의 적합한 경계면 처리가 필요하다. 이 연구에서는 접촉 알고리즘(contact algorithm)을 이용하여, automatic contact surface to surface를 사용하여 외부탱크 벽체 하부와 충격차량의 경계면을 구성하였다. 또한 차량충돌시 벽체와의 충돌각도는 그림 2.13.8과 같이 90° 정면충돌을 통해 차량하중을 극대화 하였다.

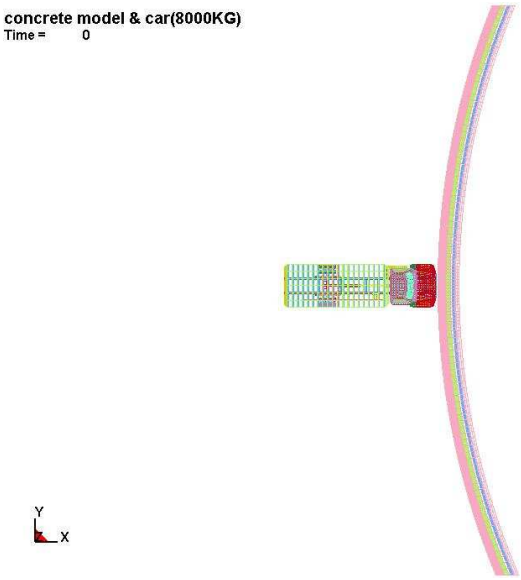



그림 2.13.8 트럭과 외부탱크의 충돌각도(90°)

나. LNG 외부탱크의 유한요소 모델

본 보고서에 사용된 LNG 저장탱크 설계규격은 실제 국내에 건설된 LNG저장탱크로 초대형 저장탱크의 저항성능을 평가하기 위한 해석을 통해 LNG 외부탱크의 차량충돌하중에 대한 해석적 거동 평가를 하고자 하였다. 본 연구에서는 Hypermesh를 사용하여 외조를 모델링 하였으며, 전체탱크를 모델링 하고자 외조의 중심으로부터 60°의 벽체를 모델링 하여 외부탱크 모델링을 완성하였다. 따라서 헤석은 충돌각도 90°와 프리스트레싱 텐던 배치각도 60°에 따른 해석결과를 필요로 하기 때문에 해석을 수행하였다

(1) LNG 외부탱크의 유한요소 해석조건 및 변수

최근 국내에서는 LNG 저장탱크 설계시 내부탱크와 외부탱크를 각각 독립적으로 설계하기 때문에 완전 방호식(Full Containment) 저장탱크가 주로 건설되어지고 있다. 본 연구에서 해석에 사용된 165,000kL 저장탱크의 외부탱크는 실제 건설되어진 것으로서 벽체의 실제 두께와 지름, 높이를 그대로 사용하였다. 다만 콘크리트 내부의 철근에 대한 모델링은 일정 간격을 사이에 두어 실제 철근 배치간격 보다 넓게 모델링 하였으나, 철근의 강성은 정확히 일치하게 적용하였다.

차량 충돌하중이 작용하는 LNG 저장탱크는 프리스트레스 텐던의 배치각도에 따라 다르게 적용될 수 있다. 따라서 텐던 배치 각도가 60°일때 외부탱크는 1/6 모델을 중심으로 각각 프리스트레싱은 도입할 수 있기 때문에 외부탱크의 동적 특성을 갖는 충격하중 하에서의 전반 거동, 균열 진전 상황 및 구조물의 안전성을 평가하기 적합하도록 3차원 유한요소로 모델링 하였다. 여러 종류의 관통부와 부벽은 전체 구조물에 비해 미소하므로 전체 구조물의 거동에 미치는 영향이 작을 것으로 판단하여 무시하였으며, 단면치수는 벽체 하단부 최대 1,200mm, 상부에서는 최소 800mm 두께를 사용하였다. 3차원 유한요소 모델에서 LNG 외부탱크는 콘크리트 solid요소로 모델링 하였으며, 원환철근, 원환텐던, 수직철근(Meridional Rebar) 및 수평텐던(Horizontal Tendon)은 beam요소로 모델링 하였다. 유한요소 모델링의 원주방향으로

충격하중이 작용하는 타격부위 부근에서 벽체 하부 7,500mm까지는 element size를 200×100mm로 제한하였으며, 벽체 7,500mm 상부의 element size는 200×200mm로 고정하여 모델링 하였다. 차량충돌이 직접 발생하게 될 벽체 하부는 보다 정확한 구조거동을 평가하기 위해서 상대적으로 다른 부위보다 작은 요소로 모델링하였다. 총 절점수가 104,856개로 구성되고, 차량충돌로 인해 벽체의 해석적 거동을 파악하고자 한다.

Beam요소로 모델링된 철근의 전체적인 형상은 원주방향의 각 블록 내에 배근된 수직철근(Meridional Rebar)을 집중시켜 단면적을 환산하였으며, 같은 방법으로 벽체 하단부와 상단부를 상세 모델 하였다. 원환철근(Hoop Rebar)은 높이방향으로 분할된 블록 내에 배근된 철근을 집중시켰다. 마찬가지로 Beam으로 모델된 덴던의 전체적인 형상은 그림 3.14와 같으며, 원주방향의 각 블록 내에 수평(Horizontal)텐던을 집중시켜 단면적을 환산하였다. 즉, 원환텐던(Hoop Tendon)은 높이방향으로 분할된 블록 내에 61개의 수평방향 프리스트레스 텐던을 집중시켰다. 모델링된 벽체의 경계조건으로 바닥판은 고정시켰으며, 벽체의 연결부와 상부는 모두 자유단으로 설정하였다. 표 2.13.3 및 표 2.13.4는 차량충돌해석을 위한 8톤트럭과 LNG 외부탱크의 해석조건을 제시하고 있다.

표 2.13.3 LNG 저장탱크의 해석조건(KOGAS, 2008)

| | |
|---|---|
| 방호형식 | 완전방호식 저장탱크 |
| 기초형식 | 지상식 저장탱크 |
| 프리스트레스<br>텐던 배치각도 | 60° |
| 콘크리트 강도 | 45MPa, 24MPa |

표 2.13.4 차량 해석조건

| | |
|---|---|
| 차량모델 | Ford Single Unite Trailer Model |
| 차량종류 | 트레일러(트럭) |
| 차량중량 | 8 ton |
| 차량크기(B×H×L, mm) | 2,400×3,200×8,500 |
| 충돌속도 | 100km/h, 150km/h |
| 차량 충돌각도 | 90° |

또한 외부탱크의 유한요소 모델을 구성하고있는 콘크리트는 솔리드 요소로 설계되어졌으며, 재료에 대한 특성은 일반적으로 극저온 하에서의 시공재료의 거동은 특별하게 균열과 취성

을 고려한 연구가 행해져야 한다. LNG에 의해 직접 접촉되는 것으로 설계된 외조를 위해서 적당한 재료의 선택과 정적해석을 위해 요구되어지는 특별한 재료성질의 판단은 재료성질의 철저한 실험에 기초 하여야 한다. 본 연구에서는 실제 건설되어진 ○○ LNG 저장탱크를 기준으로 했기 때문에 충분한 실험을 통해 검증되어진 재료성질을 사용하였다고 판단된다. 충돌해석을 수행하기 위하여 필요한 물성치 중 콘크리트 강도, 철근량 및 프리스트레스싱 긴장력은 설계시 결정된 값을 적용하였다. 콘크리트의 물성은 콘크리트 표준 시방서의 일반적인 값을 적용하였고, 밀도의 경우 실제 콘크리트 $1m^3$ 당 투입된 단위재료의 중량의 합에 의해 계산된 값을 적용하였다. 또한 철근은 종방향 철근과 횡방향 철근의 특성을 선택적으로 입력 후 해석을 수행하였으며, 프리스트레스 긴장력의 도입은 손실률을 크게 고려하지 않았으며, 프리스트레싱 긴장력을 도입하여 수행하였다.단, 실제프리스트레싱 긴장력 손실률은 일반적으로 30%이기 때문에 30%이하로 계산하여 사용하였다.

표 2.13.5 유한요소해석에 사용된 강도특성 (KOGAS, 2008)

| 구 분 | 외부탱크 벽체 | |
|---|---|---|
| 콘크리트 | 탄성계수(MPa) | 3.89X104 |
| | 포아송비 | 0.15 |
| | 인장강도(MPa) | 3.20 |
| | 압축강도(MPa) | 45.0 |
| | 극한강도(MPa) | 25.6 |
| | 압축변형율 | 0.002 |
| | 극한변형율 | 0.0035 |
| 철 근 | 인장강도(MPa) | 421.8 |
| | 탄성계수(MPa) | 2.04X105 |
| 프리스트레스 텐던 | 긴장력(MPa) | 27.09 |
| | 탄성계수(MPa) | 1.97X105 |

(2) LNG 외부탱크의 모델링

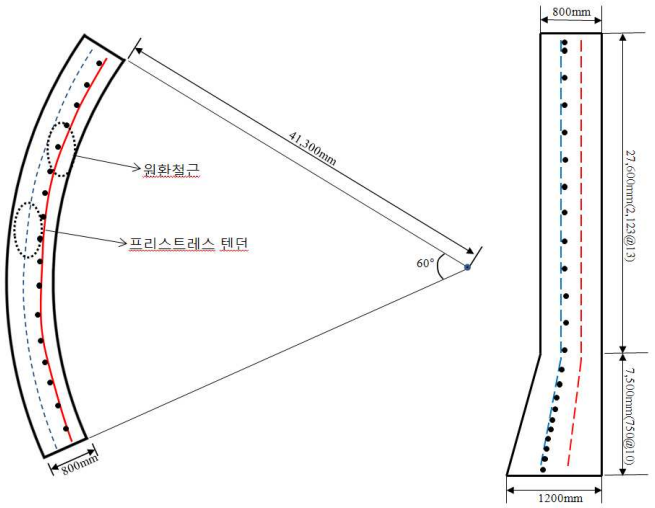
콘크리트 외조는 LNG 유출의 비상사태 시 안전성을 보장하기 위해 원주방향으로 프리스트레스드를 주어야 한다. 프리스트레스드는 LNG의 액압과 가스 과압밀에 견딜 수 있어야 한다. 열에 대한 방호를 할 수 없는 벽을 위하여 온도차가 발생하는 벽체에서 중앙부 수축을 구속할 수 있는 원주방향 인장력에 대해 더 많은 고찰이 필요하다.

수직방향으로 벽체와 지붕의 자중은 압축력을 유발시킨다. 이것은 전체적인 벽깊이를 통해 발생하는 수평균열을 피할 수 있도록 해준다. 반면에 원주방향으로는 서로 다른 수직벽체의 수축에 대해 구속되어 있지 않으므로 수평방향 균열이 발생될 것이다. 그러므로 LNG유출하에서 콘크리트 용기의 보존은 수직방향 긴장이 없이 가능하다.

또 다른 프리스트레싱 설계를 위한 개념은 평상시 사용할 때와 비상사태 하에서 열에 의한

벽체변위에 의해 야기되는 콘크리트 인장강도와 균열에 제한이다. 기본적인 일반철근의 양은 구조적인 고려 및 충격하중과 내조의 공간을 통해 국부적인 LNG 유출로 인한 국부적인 벽체의 냉각에 대한 설계에 의해서 산정된다. 본 연구에서는 벽체와 바닥판 사이의 수직긴장재를 고정시키는 것으로 설계할 것이기 때문에 벽체는 바닥판과 고정시켜 모델링을 수행하였다. 또한 외부탱크에서는 24MPa, 45MPa의 실린더 강도를 가진 Post-Tension 콘크리트로 설계되어지며, 콘크리트 벽체의 피복두께는 최소 60mm로 제한을 둔다. 외부탱크는 철근과 프리스트레스의 배근 위치상 피복두께를 고려하여 벽체의 두께를 산정 하였다. 벽체 두께 산정시 압력은 외벽 하단부에 작용하는 압력으로 고려하며, 내부탱크와 외부탱크 사이의 가스 압력과 보냉재의 압력을 고려한다.

그림 2.13.9은 LNG 외부탱크 벽체의 상세 모델링 제원을 나타내고 있다. 본 논문에서 LNG 외부탱크의 모델링은 전체모델링이 아닌 프리스트레스 텐던의 배치각도인 60°를 기준으로 벽체를 잘라 해석적 거동을 평가하고자 한다. 외부탱크의 두께는 하단의 7,500mm지점까지는 1,200~800mm로 설정하였으며, 그 이상의 상부 벽체두께는 800mm로 일정하게 유지하였다. 그러므로 외부탱크 벽체의 하부에서 응력집중현상이 발생하기 때문에 단면의 보강이 발생하게 된다.




a. 평면도 b, 측면도

그림 2.13.9 벽체 상세 모델링 제원

트럭과 LNG 외부탱크의 재료적 특성차이는 충돌 후 변형에 큰 영향을 미치고 있으며, 강도가 우수한 외부탱크의 변형이 미소하게 발생된다. 차량충돌 후 벽체의 손상정도를 파악하여 충돌하중에 따른 에너지 흡수 및 안전성 확보, 충돌하중에 대한 방호에 대한 정밀 해석을 실시하고자 한다. 벽체 모델링은 그림 2.13.10에서 보는바와 같이 안쪽에 횡방향 및 종방향 철근을 빔요소로 배치하고 있으며, 외부 원환방향으로는 프리스트레싱 텐던이 빔요소로 배치되어 있다. 프리스트레스드 콘크리트 벽체의 모델링은 실제 외부탱크 설계도를 기준으로 철근과 프리스트레스의 배치 및 규격을 엄격히 준수하여 그림 2.13.10 및 2.13.11와 같은 유한요소 모델을 완성하였다.

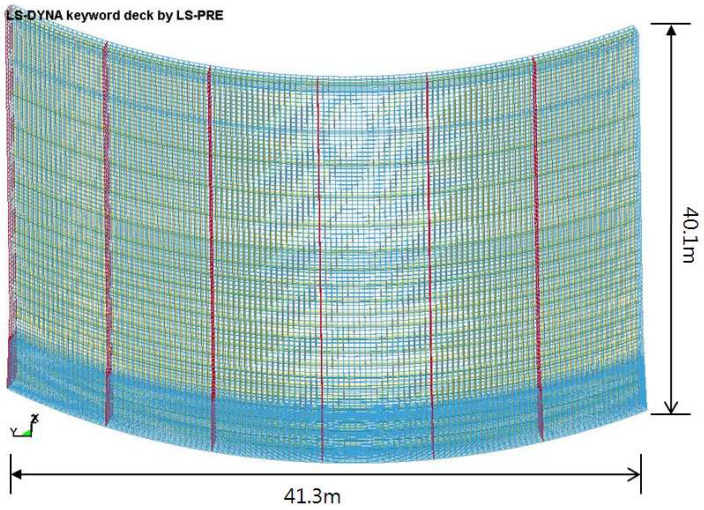



그림 2.13.10 LNG 외부탱크 콘크리트의 유한요소 모델

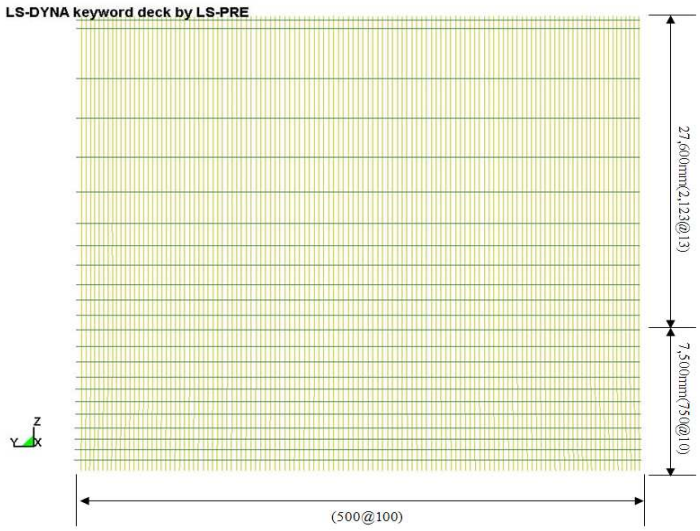



그림 2.13.11 LNG 외부탱크 철근 및 PS의 유한요소 모델

4. LNG 외부탱크의 유한요소해석

가. 100km/h의 차량충돌을 받는 LNG 외부탱크의 거동

차량충돌하중에 의한 LNG 외부탱크 벽체의 시간이력에 따른 처짐거동 을 해석적 기법으로 확보하고, 차량충돌하중을 받는 LNG 외부탱크의 높이에 따른 거동을 평가하였다. 외부탱크 벽체는 100km/h 속력으로 충돌할 때 콘크리트 압축강도를 45MPa과 24MPa로 비교하였다.

(1) 시간이력에 따른 최대변위

차량충돌하중을 100km/h로 할때 LNG 외부탱크의 콘크리트 압축강도에 대한 시간이력에 따른 변위는 그림 2.13.12와 같으며, 최대변형 및 잔류변형에 대한 비교를 할 수 있다.

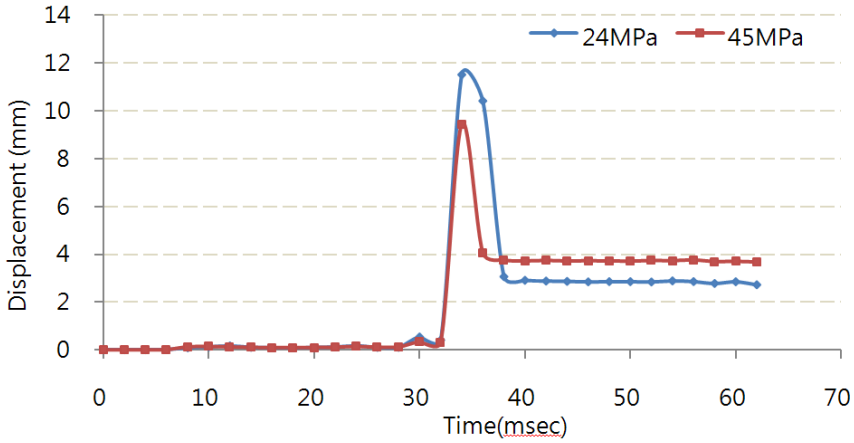



그림 2.13.12 지진하중에 대한 상대변위

결국 그림 2.13.12에서 알 수 있듯이 정확히 차량충돌이 발생하는 시점에서 콘크리트 압축강도에 대한 최대변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 압축강도가 24MPa에서 11.51mm의 최대변형을 발생시켰으며 출돌후 3mm의변형이 지속되고 있다. 또한 콘크리트 압축강도가 높은 45MPa에서도 동일한 콘크리트 거동을 보이고 있으나 최대변형은 10mm이하로 변형이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

(2) 충돌면 높이변화에 따른 LNG 외부탱크의 거동

LNG 외부탱크의 차량충돌하중으로 인한 최대처짐은 그림 2.12.13에서 보는바와 같이 트럭의 범퍼와 본넷트 부분이 충돌하는 벽체의 지점(400~800mm)에서 발생하는것을 알 수 있었다.. 결국 차량충돌하으로 인해 가장 큰 변위를 발생한 지점은 벽체 하부 정중앙으로 바닥으로부터 약 600mm떨어진 지점에서 최대변형 11.51mm를 보였으며 벽체의 높이방향으로 올라갈수록 차량충돌로 인한 변형은 감소하기 때문에 벽체변위는 점점 감소하는것을 알 수 있었다. 즉, 차량에 비해 매우 거대한 LNG 외부탱크는 차량충돌하중으로 인한 손상은 국부적으로 차량충돌면에서 보이고 있으며 콘크리트 압축강도에 따른 거동은 유사하게 보이는 것을 확인할 수 있다. 왜냐하면 최대처짐이 발생한 지점을 중심으로 원형방향으로 차량충돌파가 분산하였기 때문에 최대처짐 발생 후 모든 차량의 운동에너지는 외부탱크의 반발력에 소실되었으며 콘크리트 강도의 차이로 인한 차량충돌파가 분산되는 거동이 비슷하기 때문에 유사한 형상의 거동이 발생하였다고 판단된다.

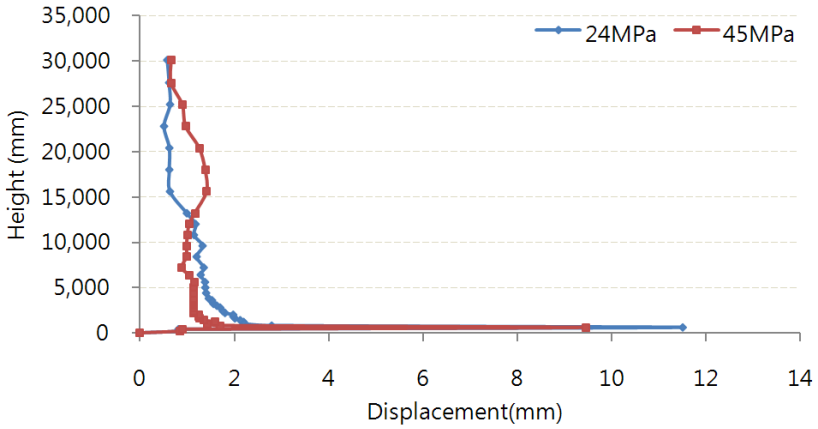



그림 2.13.13 LNG 외부탱크의 벽체높이에 따른 변위(전체모델)

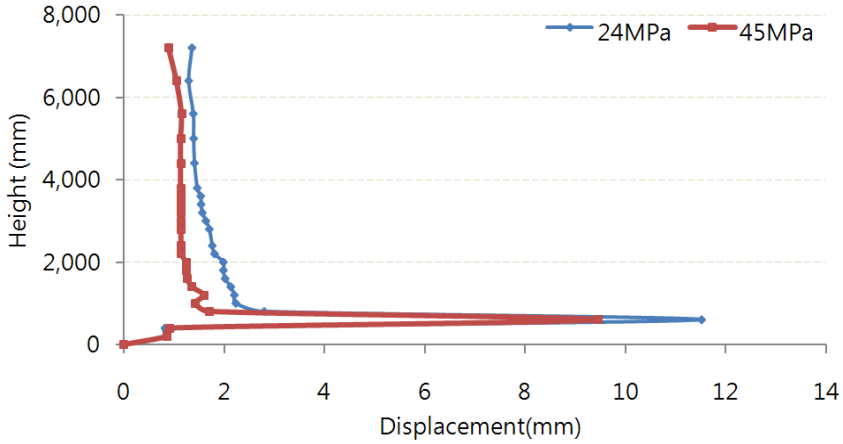
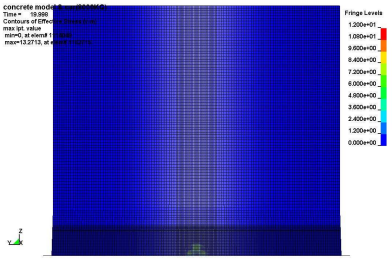
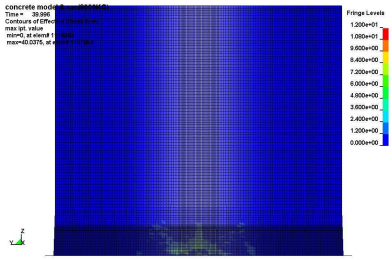



그림 2.13.14 LNG 외부탱크의 벽체높이에 따른 변위(상세모델)

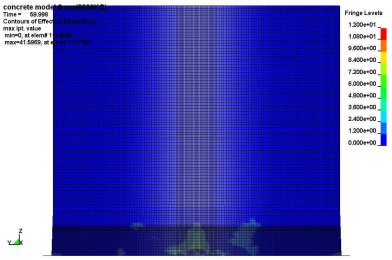
차량충돌하중이 100km/h일때 벽체의 높이에 따른 변위를 통해 LNG 외부탱크의 거동을 예측할 수 있었다. 충돌하중에대한 거동뿐 아니라 해석을 통해 확보된 von-Mises 해석결과를 통해서도 알수있듯이 모델링 되어진 LNG 외부탱크의 벽에 비해 차량의 충돌면이 매우 국부적이기 때문에 그림 2.13.15와 2.13.16에서 보이는것과 같이 매우 국부적인 손상이 발생한것을 알 수 있었다. 또한 LNG 외부탱크의 차량충돌면 벽체두께는 1200~800mm로 대단히 보강되어진 구조를 갖고 있으며, 또한 프리스트레스드 긴장력이 도입되었기 때문에 100km/h의 속력으로 충돌할 때 비교적 안전성을 확보한 설계라고 판단된다.



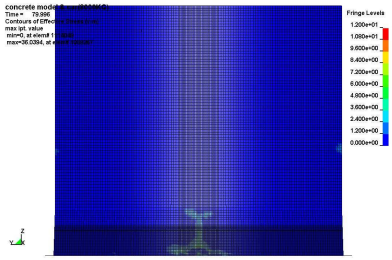
(a) 20msec에서의 von-Mises 응력



(b) 40msec에서의 von-Mises응력

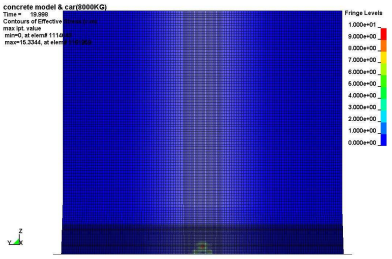


(c) 60msec에서의 von-Mises응력

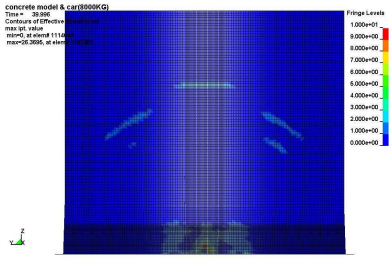


(d) 80msec에서의 von-Mises응력

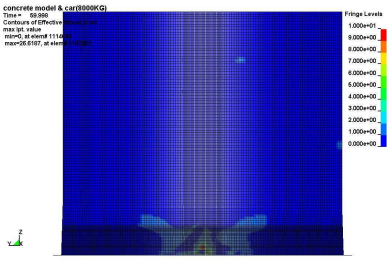
그림 2.13.15 LNG 외부탱크의 해석결과($f_{ck}$=24MPa)



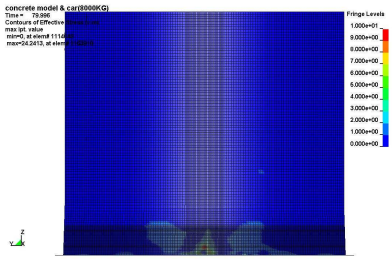
(a) 20msec에서의 von-Mises응력



(b) 40msec에서의 von-Mises응력



(c) 60mse에서의 von-Mises응력



(d) 80msec에서의 von-Mises응력

그림 2.13.16 LNG 외부탱크의 해석결과($F_{ck}$=45MPa)

충돌에너지 해석결과 설계기준 강도 45MPa에 해당하는 LNG 외부탱크의 경우 두께가 1200~800mm에 해당하는 초대형 구조물이므로 차량의 충돌시 8ton의 중량을 가진 트럭이 100km/h의 속력으로 벽체를 충돌할 때 전체 운동에너지를 Total Energy로 볼 수 있다. 충돌 시 Total Energy는 벽체 및 차량으로 빠른 속도로 에너지 흡수가 진행되어 모든 충돌에너지는 벽체와 트럭으로 흡수되어진다. 에너지의 흡수로 인한 차량의 심각한 변형을 발생시킬 수 있으며, 또한 외부탱크의 충돌면에서 국부적인 손상 및 변형이 발생할 수 있다. 그림 2.13.17은 시간에 따른 Total Energy의 변화곡선을 보여주고 있다.

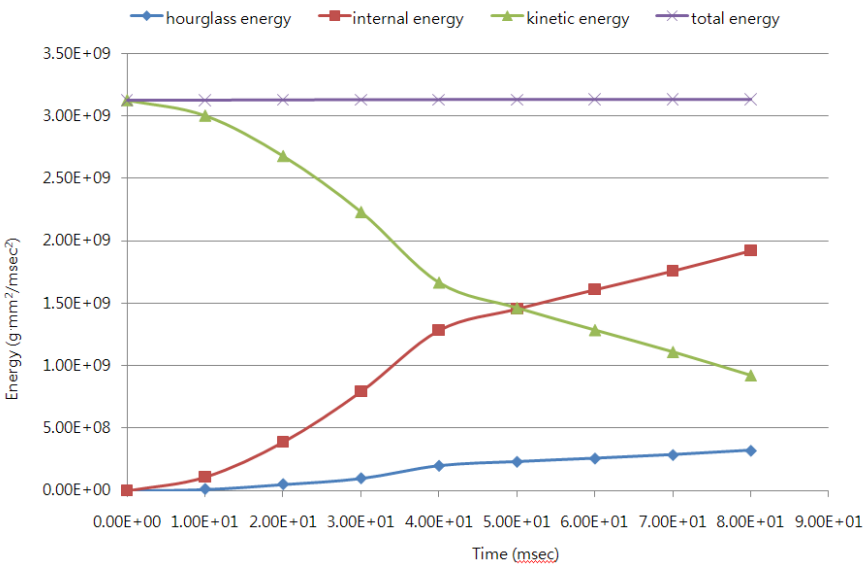



그림 2.13.17 LNG 외부탱크의 차량충돌 에너지 곡선($f_{ck}$=45MPa)

에너지 해석결과 Total Energy에 대한 에너지 흐름을 통해 차량으로 부터의 충돌에너지와 벽체 내부로 흡수되어지는 에너지의 상관관계를 통해 에너지 곡선을 그림 2.13.18과 같이 나타낼 수 있다. 결론적으로 에너지 흐름 관계에서 hourglass energy가 비교적 작게 발생하였다. 하지만 이것은 차량의 변형이 심각할수록 hourglass energy에 대한 정확도는 떨어지기 때문에 본 논문의 결가와 같은 수준의 에너지 흐름은 실제 충돌시와 비슷하다고 판단된다. 따라서 Total Energy 곡선에서 보는바와 같이 전체적인 에너지의 이동과 소멸상태를 파악할 수 있었다.

본 논문의 해석 결과에 대한 정확도는 Zaouk et al.(1996)등 이 제시한 것과 같이, 수행된 해석에 대한 에너지의 손실량을 확인함으로써 정확도를 평가할 수 있다. 이는 에너지 보존법칙에 의하여 차량의 모든 운동에너지는 잔류 운동에너지(residual kinetic energy), 마찰에 의한 손실, 변형된 차량과 벽체 내부에너지와 유한요소 해석시간의 효율성을 위해 사용되는 hourglass mode에 의해 발생되는 에너지의 총 합과 같다.

충돌 모사에 있어서 운동에너지와 내부에너지의 상관관계는 중요하며, 이러한 모사에 있어서 유한요소모델의 강성행렬(stiffness matrix)을 구하기 위한 형상함수(shape function)의 수치적분이 필요하며, 본 논문에서는 reduced Gaussian 적분법을 사용하였다. 그러나 이 경우, 적분계산 시간이 줄어드는 대신 변형에너지가 없어도 변형이 발생하는 문제점이 발생하며,

이를 hourglass(spurious zero energy) mode라고 한다. 이러한 모드의 발생을 억제하기 위해 가상의 에너지를 적용하게 되는데 이 때 사용되는 에너지를 hourglass energy라고 한다. 충돌모사에 있어서 내부에너지의 계산은 변형에너지와 hourglass energy의 합으로 계산되므로 비정상적인 충돌모사인 경우 내부에너지는 발생된 hourglass energy만큼 과도하게 증가된다. 따라서 총에너지의 과도한 증가가 발생하면, 충돌해석 결과의 정확성이 떨어진다고 판단할 수 있다. Zaouk et al.(1996)와 Sherifet et al.(2008)에 의한 연구에 의하면, 총에너지에 대한 hourglass 에너지가 적게 발생하였다면 해석 결과의 신뢰도가 높으며, 동일한 차량에 대하여 총에너지의 17%의 hourglass 에너지가 발생하여 적절한 해석을 수행 하였다고 판단된다. 본 연구의 해석모델에서는 미세한 변형에 의해 발생된 hourglass 에너지는 토탈에너지의 15.2%이며 차량모델이 외부탱크 벽체에 충돌하면서 과도한 변형으로 인해 발생한 hourglass 에너지가 최대 $4.3 \times 10^{8}(g \cdot mm^{2}/msec^{2})$이다. 실제 LNG 외부탱크 벽체에 발생된 hourglass 에너지는 $3.384 \times 10^{7}(g \cdot mm^{2}/msec^{2})$로 차량의 hourglass 에너지에 비해 10배 이하로 작게 나타났다.

나. 150km/h의 차량충돌하중을 받는 LNG 외부탱크의 거동

150km/h의 차량충돌하중에 의한 LNG 외부탱크 벽체의 시간이력에 따른 처짐거동을 평가하고자 100km/h의 속력일때와 동일한 조건으로 해석을 실시 하여 비교하고자 한다. 외부탱크 벽체는 150km/h의 속력으로 충돌할 때 콘크리트 압축강도는 45MPa과 24MPa로 변화하여 비교하였다.

(1) 시간이력에 따른 최대변위

차량충돌하중을 150km/h로 할때 LNG 외부탱크의 콘크리트 압축강도를 45MPa 및 24MPa로 변화시켰으며 최대변위 지점에 대한 시간이력에 따른 거동은 그림 2.13.18 및 2.13.19와 같다. 동일한 차량속도로 충돌하였을때 콘크리트 압축강도가 클수록 충돌시간이 짧아지는것을 알 수 있었다. 콘크리트 압축강도에 따른 시간이력 변위에서 45MPa일 때 80msec지점에서 해석이 종료되었다. 궁국적으로 차량의 충돌속도가 빨라질수록 충돌하는 순간의 하중 또한 최대이기 때문에 차량의 변형이 심하게 발생하여 80msec 이상의 구간에서는 변형을 확인할 수 없던 것으로 판단된다. 즉, 동적해석프로그램인 LS-DYNA에서는 충돌로 인한 구조물의 변형은 해석 종료 후 확인할 수 있는 hourglass energy에 큰 영향을 주기 때문에 반드시 확인해야 한다.

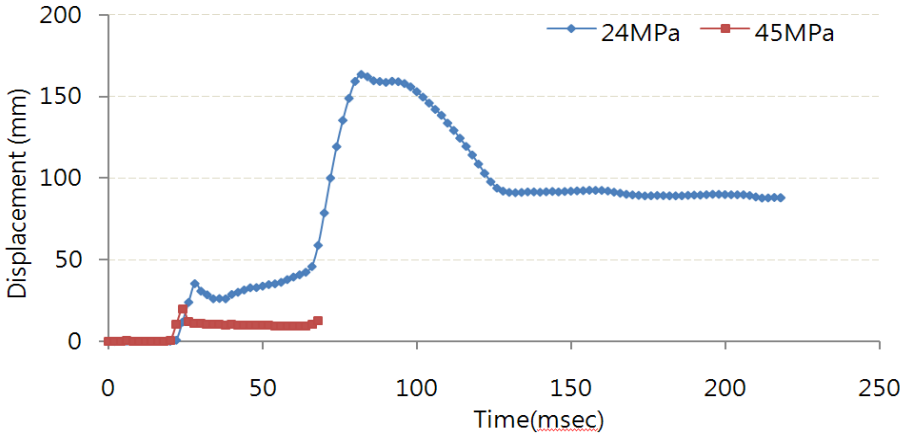



그림 2.13.18 콘크리트 압축강도에 따른 시간이력 변위(220 time step)

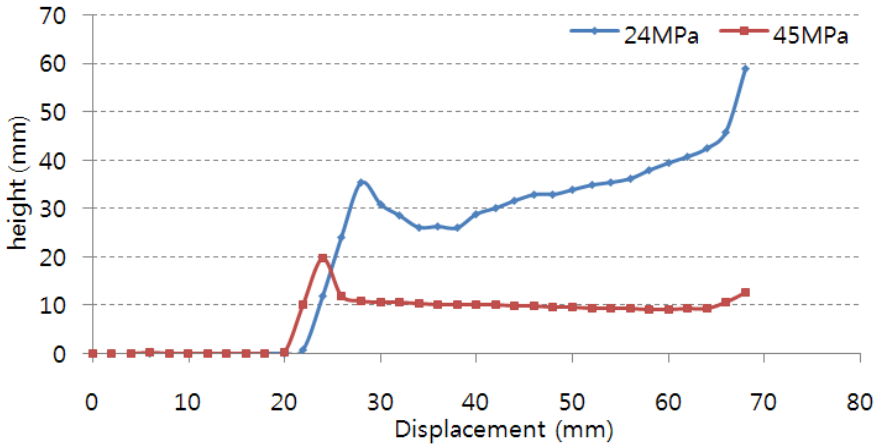



그림 2.13.19 콘크리트 압축강도에 따른 시간이력 변위(80 time step)

(2) 충돌면 높이변화에 따른 LNG 외부탱크의 거동

LNG 외부탱크의 차량충돌하중으로 인한 처짐은 그림 2.13.20 및 2.13.21에서 나타내듯이 트럭과 외부탱크의 국부적인 접촉면에서 최대 변형이 발생하는것을 알 수 있다. 또한 높이에 대한 변위를 100km/h일 때와 비교해보면 상당히 큰 변형을 유발시켰음을 알 수 있었다. 본 연구의 해석결과 콘크리트 압축강도에 따른 해석적 거동 결과 24MPa과 45MPa의 재료모델 차이로 발생하는 최대응력은 대략 140mm의 차를 보이고 있으며 차량의 충돌지점에서 가장 큰 변형이 발생하는것을 알 수 있었다. 45MPa일때 최대처짐은 160mm이며, 24MPa일때는 25mm이하로 처짐이 발생하였다. 하지만 최대처짐이 발생한 지점을 중심으로 원형방향으로 차량충돌파가 분산하였기 때문에 최대처짐 발생 후 모든 차량의 운동에너지는 외부탱크의 반발력에 소실되며 차량의 충돌 후 변형으로 에너지의 이동이 있었다고 판단된다.

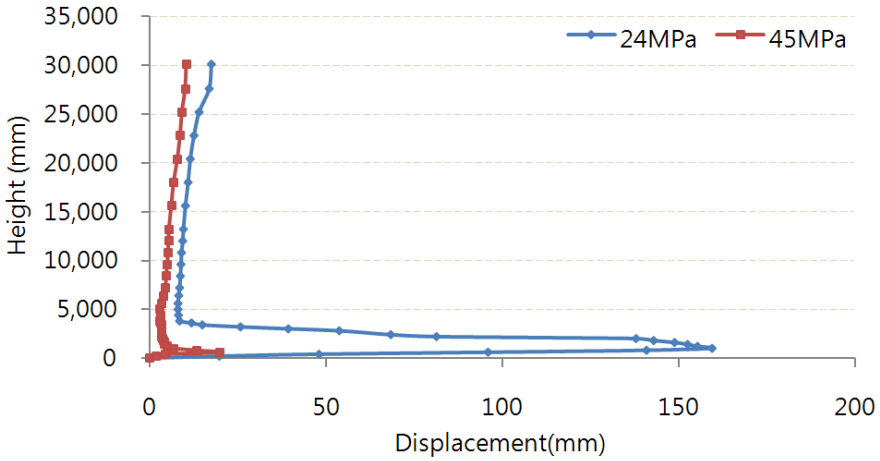



그림 2.13.20 LNG 외부탱크의 전체 벽체높이에 따른 변위

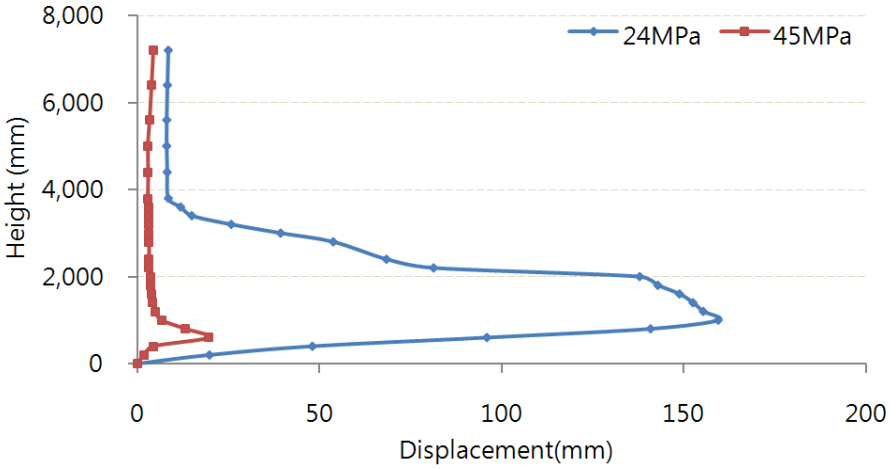
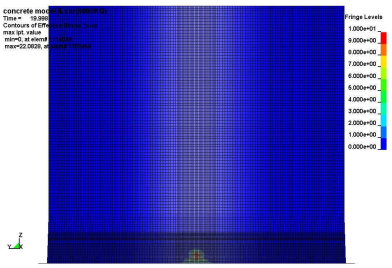
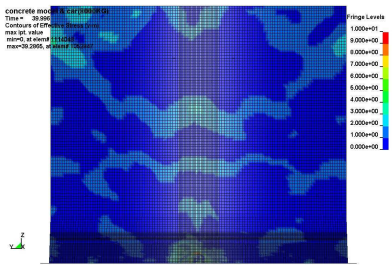


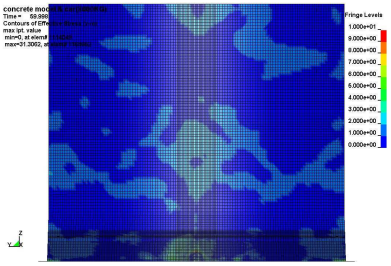

그림 2.13.21 LNG 외부탱크의 충돌면 상세 벽체높이에 따른 변위



(a) 20msec에서의 von-Mises응력

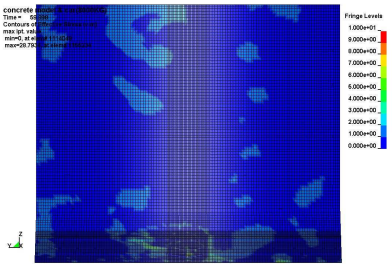


(b) 40msec에서의 von-Mises응력

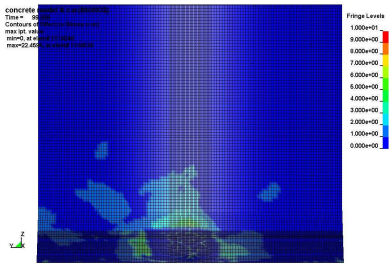


(c) 60msec에서의 von-Mises응력

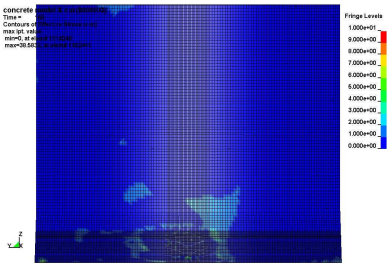
그림 2.13.22 LNG 외부탱크의 해석결과($f_{ck}$=45MPa)



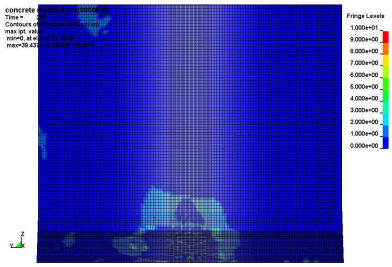
(a) 50msec에서의 von-Mises응력



(b) 100msec에서의 von-Mises응력



(c) 150mse에서의 von-Mises응력



(d) 200msec에서의 von-Mises응력

그림 2.13.23 LNG 외부탱크의 해석결과($f_{ck}$=24MPa)

# 14절. LNG 저장탱크 외조(outer tank)의 특수하중 (충돌/외부 화재)에 대한 해석적 거동 평가

## 1. 서론

세계적으로 친환경 사업에 대한 관심이 증가하고 있는 가운데 석유, 석탄 등과 같은 기존의 에너지원을 대체할 수 있는 청정연료의 수요가 점차 증가하고 있다. 또한 지속적인 유가 상승 및 1970년대의 두 차례의 석유 위기를 겪으면서 석유 의존도를 줄이고자 하는 노력이 정부정책의 일환으로 꾸준히 이루어지고 있다. 이러한 상황에서 천연가스는 청정성, 안정성, 편리성을 두루 갖춘 주요 에너지원으로 그 수요가 점차 증가할 것으로 기대된다.

우리나라는 배관을 통해 천연가스를 직접 공급 받는 PNG(Pipeline Natural Gas)를 사용하는 미국이나 유럽과 달리 천연가스를 초저온으로 액화시킨 LNG(Liquefied Natural Gas)를 도입하여 소비자에게 공급하고 있다. 따라서 국내의 천연 가스의 수요증가와 함께 LNG를 저장하기 위한 LNG 저장 탱크의 수요 역시 증가하고 있다.

또한 말레이시아, 호주, 인도네시아 등과 같은 주요 천연가스 생산 국가에서 지속적으로 LNG 수출기지를 신설 및 확장하고 있으며, 일본, 스페인, 중국 등의 에너지 수입 국가에서도 LNG 수입기지의 건설 및 확장이 예정되어 있다.(안영훈 2002) 이렇게 기하급수적으로 증가하는 수요에 따라 천연가스의 효율적인 운송과 보관을 위해 LNG 공급선박 및 LNG 저장탱크가 점차 초대용량화를 지향하고 있는 실정이다.

세계적으로 LNG 저장의 수요가 증가함에 따라 LNG 저장탱크의 설계와 시공이 건설업계에서도 주목 받고 있으며 우리나라 역시 한국가스공사가 2001년 세계에서 5번째로 LNG 저장탱크 설계(14 만$m^3$급) 기술을 국산화하였다. 이후 국제적 추세인 저장탱크의 대용량화에 대응하고 LNG 저장탱크의 대형화를 통한 원가절감 및 경쟁력 제고를 위해 2005년 20 만kl급 LNG 저장탱크 설계 기술을 개발하였으며 2011년 현재 27 만kl급 LNG 저장탱크 기술개발에 힘쓰고 있다.

### 가. 연구목적 및 필요성

최근 국내에서 건설되고 있는 LNG 저장탱크는 외부 프리스트레스 콘크리트 이중벽과 내부 9% 니켈방호벽 및 벽사이의 효율이 높은 단열재로 구성된 완전방호식이 적용되고 있다. 특히 저장탱크 외조는 천연가스의 저장보다는 방호 목적을 위해 건설되어지는 것이 일반적이라 할 수 있다. 즉 저장탱크 내조의 균열이나 파단에 의한 LNG 누출 사고, 혹은 외부로부터 발생할 수 있는 지진이나 풍압과 같은 환경적 요인은 물론 미사일이나 비행기와 같은 다양한 형태의 비행체 충돌 등에 의한 사고 발생 시 저장탱크 외조 건물이 최종 안전을 보장해야 하는 구조물인 것이다. 따라서 구조물의 적합한 강도 안전성을 확보하기위해 내부 혹은 외부로부터 발생할 수 있는 여러 가상사고에 대한 영향은 저장탱크 외조의 단면 설계 시 각종 하중의 형태로 반영되고 있다. LNG 저장탱크 외조에 작용하는 하중은 크게 영구하중, 프리스트레스 하중, 가변 하중, 비상 시 하중이 네 가지로 나눌 수 있다. 특히 비상 시 하중은 저장탱크의 방호에 큰 악영향을 미칠 수 있으므로 비상 시 하중에 대한 구조물의 안전성 확보는 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

LNG 저장탱크의 비상 상황 시나리오는 내부탱크의 누출, 붕괴방지수준지진, 외부 충돌 및 폭

발, 외부 화재위험 등이 있는데 누출이나 지진에 관한 연구는 많이 이루어지고 있으며 구조물 설계 시에도 충분히 반영되고 있다. 하지만 비산물체 충돌은 설계에 반영할 필요가 없을 정도로 발생 가능성이 극히 희박하기 때문에 연구 상태는 아직 미미한 수준이다. 하지만 2001년 미국 세계무역센터와 항공기의 충돌사고와 같은 의도적인 테러에 의한 충돌사고를 계기로 중요 사회기반시설의 안전성에 대한 사회적 경각심이 불러 일으켜졌으며 이후 원전과 같은 주요 구조물의 충돌사고에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. LNG 저장탱크 역시 충돌사고 발생 시 사회적으로 큰 부작용을 발생시킬 수 있는 중요 구조물이므로 비산물체 충돌에 대한 안전성 확보는 필수불가결한 요소이다.

또한 이와 더불어 외부화재 역시 LNG 저장탱크의 안전성에 치명적인 영향을 줄 수 있으나 현재까지는 LNG 저장탱크에 대한 정형화 된 화재 안전성 평가방법이 수립되어 있지 않다. 특히 강재 지붕형 LNG 저장탱크는 콘크리트 벽체에 비해 강재 지붕에 있어 상대적으로 화재에 대해 취약할 것으로 예상되는 바 이에 대한 연구해석이 필요한 시점이라 할 수 있다.

따라서 이번 연구를 통해 LNG 저장탱크 외조 구조물의 비산물체(미사일) 충돌 및 외부 화재에 따른 거동을 분석해 보고 그 안전성에 대한 성능을 평가해 보고자 한다.

나. 연구범위

본 연구는 미사일 충돌하중 및 외부 화재하중을 받는 LNG 저장탱크 외조의 설계 안전성을 검토하기 위한 것이다.

(1) 미사일 충돌 해석

미사일 충돌은 정상적인 가동상태에서 발생하는 것으로 가정하였으며 정상가동 상태에서 저장탱크 외조는 자중, 프리스트레싱 하중, 내압 및 온도하중 등을 받고 있다. 충돌해석은 다음과 같은 제한된 연구범위를 설정하여 수행하였다.

(1) 미사일 충돌하중을 받는 LNG 저장탱크 외조의 거동 해석은 범용 해석프로그램인 LS-DYNA 971을 이용한 정밀해석기법을 사용하도록 한다.

(2) 충돌 해석 시 LNG 저장탱크의 자중, 프리스트레싱 하중, 미사일 충돌 하중만을 고려한다.

(3) 미사일은 한국가스공사에서 선정한 충돌 시나리오에 따라 질량(2000kg)과 속도(50m/s)를 갖는 강체를 사용한다.

(4) 저장탱크 외조에 가해지는 충돌하중은 충돌각도에 따라 다르게 적용되므로 충돌각도는 충돌 하중이 가장 크게 적용되는 90°로 한다.

(5) 충돌은 저장탱크 외조 벽체에 대하여 수행하며 그 위치는 벽체를 상부 하부로 나누어 약 2/3 위치인(30m), 약 1/3 위치인(15m) 에 충격이 가해지도록 한다.

(2) 외부 화재 해석

외부화재는 LNG 저장탱크 설계 시 전 세계적으로 범용되는 EN 14620 시리즈, EN 1473, BS 7777, API620, NFPA 59A, JGA RPAS 등에 대해 지붕 설계 시 화재 안전기준 및 국내 설계된 LNG 저장탱크의 화재해석 및 지붕설계 사례를 조사· 분석하여 LNG 저장탱크에 대한 화재 안전

성 평가기법 개발의 방향을 설정하였다.

(1) 화재해석은 기존의 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크에 비해 강재 지붕형 LNG 저장탱크가 상대적으로 화재 사고에 취약할 것으로 예상되므로 두 경우 모두 대해 비교 수행한다.

(2) 화재조건으로는 일반적으로 국내 탱크 설계 시 적용되는 시나리오 4가지(지붕 압력방출밸브 가스 누출에 의한 화재, 근접탱크 지붕붕괴에 의한 풀 화재, 펌프 토출배관 하단부 배관 파단에 의한 풀 화재, 자 체 강재 지붕 붕괴에 의한 burn-out)를 선정한다.

(3) 외부 화재를 위한 시간 경과에 따른 열-유동해석은 유동의 전 영역을 해석할 수 있는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 전용 솔버인 Fluent 6.1.22를 이용한다.

(4) 외부 화재를 위한 Burn-out은 구조, 진동, 열유체 등의 넓은 해석기능을 제공하는 범용 해석 프로그램인 ANSYS 9.0을 이용하여 해석한다.

(5) 유동장의 경우 난류 등이 발생하지 않도록 최적화 시키고 바람의 방향은 탱크를 향하도록 하였으며 풍속 또한 가혹한 조건을 도출하기 위해 시행착오법을 통하여 최악의 조건을 적용한다.

(6) 연소시간, 연소속도, 누출속도는 설계조건 검토를 통해 선정하여 수행한다.

## 2. LNG 저장탱크 외조 설계특성

### 가. LNG 저장탱크의 개요

#### (1) LNG 저장탱크의 분류

LNG 저장탱크는 설계위치, 내· 외부 탱크 형식 등 여러 가지 기준에 의해 분류된다. 우선 탱크의 설치위치에 따라 지면을 기준으로 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 지상식 저장탱크 (Above-ground Storagge Tank)
- 지중식 저장탱크 (In-ground Storage Tank)
- 지하식 저장탱크 (Under-ground Storage Tank)
- 인피트식 저장탱크 (In-pit Storage Tank)

BS 7777은 내· 외부탱크의 독립적인 LNG 저장능력 여부와 내부탱크로부터 LNG 누출 시 외부탱크가 증발가스를 제어할 수 있는가 하는 구조형식에 따라 지상식 저장탱크를 다음과 같이 분류하고 있다.

- 단일방호식 저장탱크 (Single Containment Tank)
- 이중방호식 저장탱크 (Double Containment Tank)
- 완전방호식 저장탱크 (Full Containment Tank)

또한 내부탱크의 형식, 즉 재료 및 형상에 따라 다음과 같이 분류된다.

- 9% Ni강 내부탱크 (9% Nickel Plate Inner Tank)
- 멤브레인 내부탱크 (Membrane Inner Tank)

◆ 콘크리트 내부탱크 (Concrete Inner Tank)

이외에도 탱크 바닥의 위치에 따라 다음과 같이 분류하는데 탱크 바닥이 지표면에 위치하는 경우 지반의 동결을 방지하기 위해 전기 또는 액체순환 등의 방법으로 바닥을 가열하여야 하며 고상식의 경우는 별도의 가열장치를 설치할 필요는 없다.

◆ 저부가열식 (Base Heating) 저장탱크
◆ 고상식 (Elevated Base) 저장탱크

(2) LNG 저장탱크 외조의 구조

국내에서 시공되고 있는 LNG 저장탱크는 완전방호식 저장탱크이므로 본 연구에서는 완전방호식 저장탱크를 채택하여 이에 대한 해석을 수행하였다. 완전방호식 LNG 저장탱크는 크게 9% 니켈(Ni) 강 또는 멤브레인 형식의 내조와 프리스트레스 콘크리트 외조로 이루어져 있다. LNG와 직접 접하는 내조는 정상 운전 시, LNG의 액압하중 및 온도하중을 견디게 설계 및 시공된다. 콘크리트 외조는 외부의 하중뿐만 아니라 내조 파괴 시, LNG 누출에 의한 추가적인 피해를 방지할 수 있도록 설계 및 시공된다. 완전방호식 LNG 저장탱크의 일반적인 형태는 그림 2.14.1 과 같다.

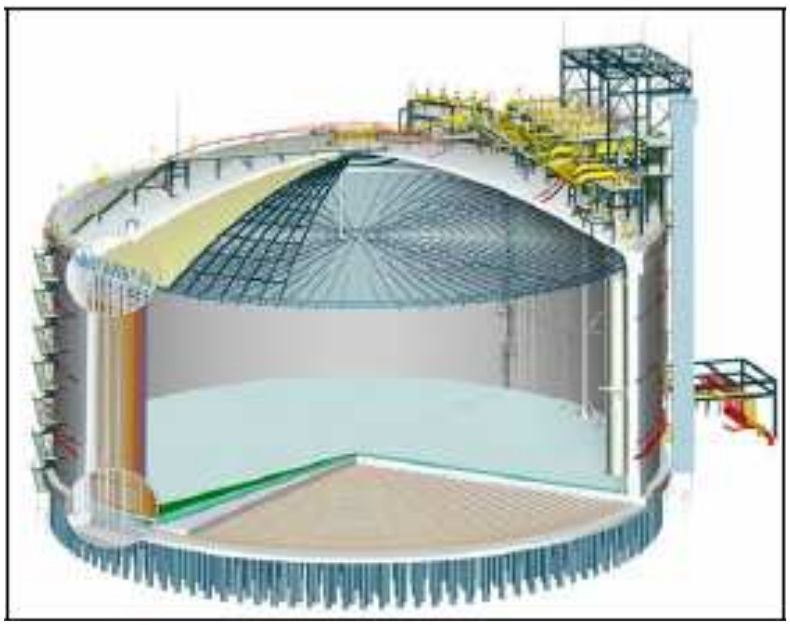


그림 2.14.1 완전방호식 LNG 저장탱크

본 연구에서 다루고자 하는 외조는 미사일 충돌해석을 위한 콘크리트 지붕형 완전방호식과 외부 화재해석을 위한 강재 지붕형 완전방호식 두 가지 이며 돔형 지붕, 링빔(Ring Beam), 벽체, 바닥판, 파일 기초 등으로 이루어져 있다.

일반적으로 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크의 돔형 지붕은 철골조 지붕 위에 약 5mm의 Roof Plate를 거치하고 그 위에 철근콘크리트를 타설하여 완성된다. 돔형 지붕과 벽체 사이에는 지붕에서 전달된 수평력을 지지할 수 있도록 링빔이 설치된다.

벽체는 두께에 따라 두 부분으로 나눌 수 있다. 상부벽체는 두께가 일정한 완전 원통형이며 하부벽체는 외측이 지름이 아래 방향으로 증가하여 벽체가 두꺼워지는 형상이다. 벽체는 프리스트레스 기법을 도입, 긴장재를 이용하여 수평과 수직으로 긴장된다.

말뚝기초의 직경과 배열은 벽체 하단부와 바닥판 하부에서 상대 부등침하가 발생하지 않도록 선정해야 한다.

표 2.14.1 및 그림 2.14.2는 비산물체 충돌해석에 사용된 LNG 저장탱크 외조의 기본적인 설계 사양을 나타내고 있다.

표 2.14.1 콘크리트 지붕형 완전방호식 LNG 저장탱크 기본 설계 사양

| 구분 | 설계 사양 |
|---|---|
| LNG tank capacity (Net) | 270,000 $m^3$ |
| Design gas pressure (operation phase) | 29 $kN/m^2$ |
| Inner diameter of inner tank | 90.0 m |
| Inner diameter of outer tank | 92.4 m |
| Height of outer tank (including ring beam) | 48.28 m |
| LNG liquid levels (from bottom plate) | 42.7 m |
| Tank foundation type | Pile foundation |

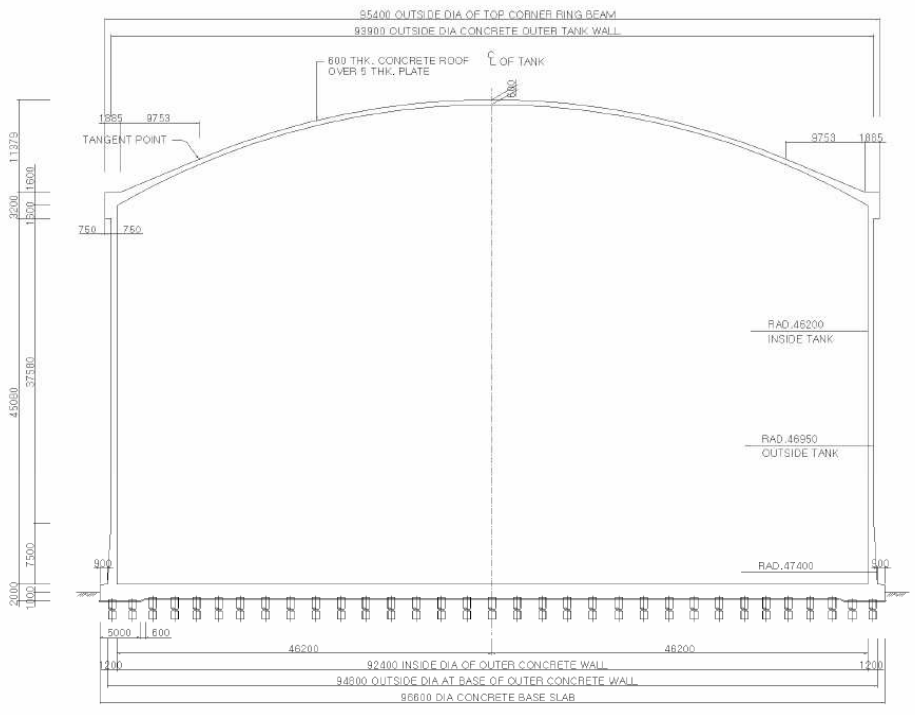



그림 2.14.2 콘크리트 지붕형 완전방호식 LNG 저장탱크의 단면도

반면 외부 화재해석에 사용된 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 지붕은 철재구조물로서 서까래, 빔, 펄린, 링빔 및 판 등으로 구성된다. 주부재는 서까래와 판으로 볼 수 있으며 이들은 합성으로 거동할 것이다. 표 2.14.2 및 그림 2.14.3 은 외부 화재해석에 사용된 LNG 저장탱크 외조의 기본적인 설계 사양과 지붕의 구성요소를 보여주고 있다.

표 2.14.2 강재 지붕형 완전방호식 LNG 저장탱크 기본 설계 사양

| 구분 | 설계 사양 |
|---|---|
| LNG tank capacity (Net) | 187,300 $m^3$ |
| Design gas pressure (operation phase) | 29 mbar |
| Inner diameter of inner tank | 84.0 m |
| Inner diameter of outer tank | 86.40 m |
| Height of outer tank (including ring beam) | 39.638 m |
| LNG liquid levels (from bottom plate) | 36.22 m |
| Tank foundation type | Pile foundation |

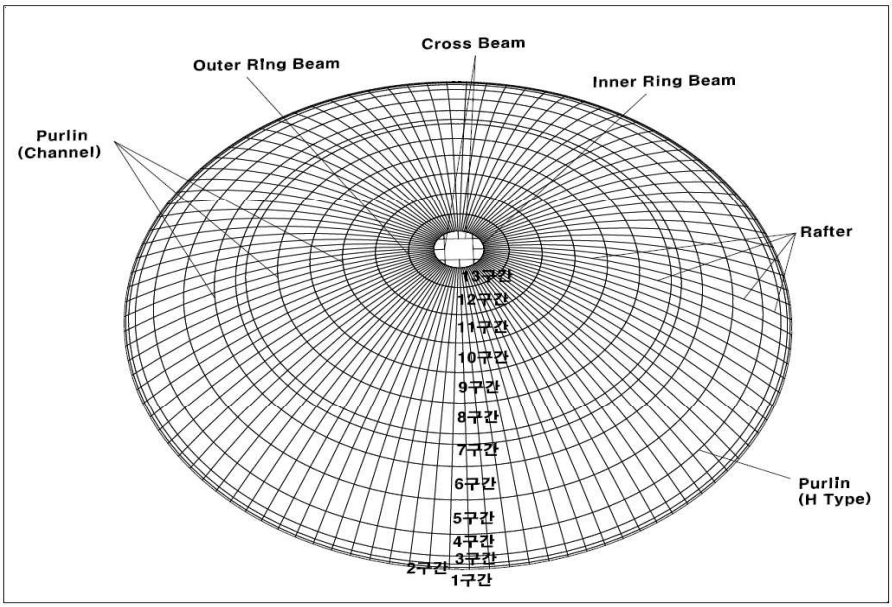



그림 2.14.3 강재 지붕형 완전방호식 LNG 저장탱크의 강재 지붕 형상

나. LNG 저장탱크의 외조 설계

(1) LNG 저장탱크 설계 하중

LNG 저장탱크 외조에 작용하는 하중들은 크게 네 가지로 분류할 수 있으며 표 2.14.3과 같이 정리 할 수 있다.

표 2.14.3 LNG 저장탱크 외조 작용 하중

| a. Permanent loads |
|---|
| ◆ Dead weight (including insulation etc)<br>◆ Actions resulting from shrinkage of concrete |
| **b. Pre-stress loads** |
| ◆ Forces applied by the pre-stressing tendons, taking account of loss of pre-stress due to friction and relaxation, shrinkage and creep during late life |
| **c. Variable loads** |
| ◆ hydrotest water loads<br>◆ operational LNG load (maximum and minimum operating levels)<br>◆ Internal gas pressure (test pressure, maximum and minimum design and operating pressures)<br>◆ Variations in external temperature<br>◆ Wind loads<br>◆ Live load on roof (including snow load)<br>◆ Operating Basis Earthquake (OBE) |
| **d. Emergency loads** |
| ◆ Inner tank LNG spill (hydrostatic and temperature effects)<br>◆ Impact Load<br>◆ Safe Shutdown Earthquake (SSE) |

이러한 하중을 바탕으로 표 2.14.4과 같은 LNG 저장탱크의 상황 시나리오에 따라 하중계수를 적용하여 적절한 하중 조합을 구조 해석에 적용한다.

표 2.14.4 LNG 저장탱크 상황 시나리오

| Normal situations | Emergency situations |
|---|---|
| ◆ Constuction<br>◆ Testing<br>◆ Operation<br>◆ Operation plus OBE | ◆ Inner tank LNG spill (hydrostatic and temperature effects)<br>◆ Inner tank LNG spill plus OBE<br>◆ Impact Load<br>◆ Safe Shutdown Earthquake (SSE) |

(2) LNG 저장탱크 설계 방법

현재 국내에서는 LNG 저장탱크 설계에 적합한 규정이 마련되어 있지 않아 유럽, 일본, 미국 등의 관련 코드를 사용하고 있다. 국내에서 주로 사용되는 BS (British Standard) 코드는 한계상태설계법 (LSD:Limit State Design)으로 안전성은 극한한계상태 (ULS:Ultimate Limit State)를 검토함으로써 확보하고, 사용성은 사용한계상태 (SLS:Serviceability Limit State)를 검토하여 확보한다.

극한한계상태는 부재의 최대 내력에 해당하는 상태로써, 단면파괴, 좌굴, 피로 등에 의한 한계상태로 표현되며, 사용한계상태는 정상적인 가동상태 또는 내구성에 관한 한계상태이며 과대한 변형이나 처짐, 균열 등이 유발되는 상황이라고 할 수 있다. 또한 하중과 재료에 대하여 각각 부분안전계수를 사용하여 이들의 특성을 설계에 합리적으로 반영한다. 극한한계상태에서의 개략적인 부분하중계수와 부분재료계수가 표 2.14.5와 표 2.14.6에 정리되어 있다.

표 2.14.5 부분하중계수 (극한한계상태)

| Loads | Normal Situations | | Emergency Situations | |
|---|---|---|---|---|
| | Unfavorable Effect | Favorable Effect | Unfavorable Effect | Favorable Effect |
| Permanent | 1.4/1.2* | 1.0 | 1.05 | 1.0 |
| Prestress | 1.2 | 0.9 | - | 0.9 |
| Wind | 1.4 | - | 0.30 | - |
| Variable | 1.2* | 0 | 1.05 | 0 |
| OBE | 1.4/1.2 | - | - | - |
| Emergency | - | - | 1.05 | 0 |

표 2.14.6 부분재료계수 (극한한계상태)

| Design Situation | Concrete | Reinforcement |
|---|---|---|
| Normal-Flexure/Axial Load | 1.5 | 1.05 |
| Normal-Shear | 1.25 | 1.05 |
| Emergency-Flexure/Axial Load | 1.3 | 1.0 |
| Emergency-Shear | 1.1 | 1.0 |

표 2.14.7에는 LNG 저장탱크 설계 시 실제로 사용된 설계기준 예를 정리하였다. 그러나 이 내용은 지진하중, 온도하중 및 화재에 대한 안전성 확보에 대한 기준이며 미사일 충돌은 저장탱크 내조에 대한 기준으로 채택되며 외조에는 해당되지 않고 있다. 따라서 본 보고서의

결과를 통한 LNG 저장탱크 외조의 충돌하중에 대한 설계기준 설립이 필요할 것으로 판단되며, 외부화재에 대한 구조물의 안전성도 함께 평가해 볼 수 있을 것이다.

표 2.14.7 LNG 지상식 저장탱크 설계기준 (한국가스공사, 2008)

| 조건 | | 적용범위 | 설계기준 |
|---|---|---|---|
| a. 정상가동상태 | | 안전성 | BS8110의 극한한계상태 만족 |
| | | 내구성 | 제한균열폭 = 0.2 mm<br>평균균열폭 = 0.12 mm |
| | | 기밀성 | Steel Liner에 의한 확보 |
| b. 정수압시험<br>(공기압시험 포함) | | 안전성 | BS8110의 극한한계상태 |
| | | 기밀성 | Liner |
| c. 비상상황 | 내조 LNG 유출 | 안전성 | 극한한계상태 만족 |
| | | 사용성 | 잔존압축영역 100 mm 이상 확보, 압축영역에서 압축응력은 2 N/mm$^2$ 확보 |
| | 지진하중 | 가동가능 | |
| | | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | | 기밀성 | 제한균열폭 = 0.2 mm |
| | 지진하중 (SSE) | 기능안전 | |
| | | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | | 기밀성 | Steel Liner |
| | 액체충격 | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | 미사일충돌 | 내조의 구조적 안전성 유지 | 콘크리트 벽체의 관통은 국부적인 영향만 미치도록 방어 |
| | 벽체의 저온의 온도충격 | | 국부적인 영향<br>균열폭 = 0.2 mm |
| | 인접지역의 화재발생에 노출시 | ◆ 구조적 안전성 확보<br>◆ 탱크와 지붕은 복사열에 대해 2시간동안 유지 | 비선형 해석 검토 |
| | 탱크내부의 화재 | 약위 이하에서 탱크벽체의 안전성 확보 | 비선형 해석 검토 |

다. LNG 저장탱크의 외조에 대한 충돌 및 화재 영향의 평가

(1) 국부적 충돌 안전성 평가

콘크리트 외부탱크는 외부 충돌하중에 대한 안전성을 확보해야 한다. 근본적으로 충돌과정

은 외부벽체의 국부거동으로 특징지어진다.

일반적으로 목표 구조물 상에 비산물체(flying object)에 의한 충돌 효과는 목표물 속으로의 비산물체의 관통(penetration), 천공(perforation), 이면박리(scabbing), 박리(spalling)의 네 가지 유형의 파괴모드로 구성된다. 그림 2.14.4는 그 전형적인 파괴모드를 나타낸 것이다.

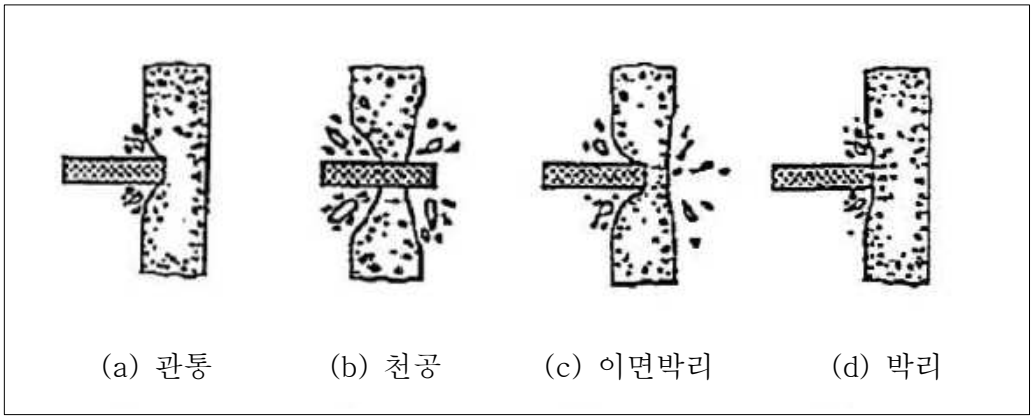



그림 2.14.4 전형적인 국부 충돌 효과 파괴모드

국내 LNG 저장탱크 외조의 설계 시 외부 충돌하중에 대한 안전성은 UKAEA(United Kingdom Atomic Energy Authority)의 실험공식을 사용하여 평가하고 있다. 천공에 대한 부재의 최소 두께가 AEA Tech. 사의 실험공식을 사용하여 계산된 천공두께와 비교하여 안전성 여부를 간단히 비교하는 방법이다.

$$e = \frac{0.82(\pi M/p)^{1/2}\, V^{3/4}}{\rho^{1/8} f_{cy}^{3/8} (\gamma + 0.3)^{3/8}}$$

where, e = perforation thickness (m)
M = projectile mass (kg)
p = periphery of projectile (m/sec)
V = velocity of projectile (m/sec)
$\rho$ = concrete density (kg/m$^3$)
$f_{cu}$ = compressive strength of concrete (Pa)
$\gamma$ = reinforcement ratio (%)

270,000 kl의 국내 LNG 저장탱크 외조에의 충돌시나리오를 적용시켜 천공두께를 계산해 보면 다음과 같이 검증할 수 있다.

Mass : 2000 kg
Velocity : 50 m/s
Impact area : 1.0 m diameter circle

Direction of impact : Perpendicular to the respective area

외부 벽체에 대한 천공두께

◆ Hoop direction $\gamma$ = 0.37 % (H22@150)

$$e = \frac{0.82(\pi M/p)^{1/2}\ V^{3/4}}{\rho^{1/8} f_{cy}^{3/8}(\gamma+0.3)^{3/8}} = \frac{0.82\times(\pi\times 2000/(\pi\times 1))^{1/2}\times 50^{3/4}}{2500^{1/8}\times(5\times 10^7)^{3/8}\times(0.37+0.3)^{3/8}} = 0.39\,m < 0.75\,m$$

→ **O.K**

◆ Inplane direction $\gamma$ = 0.39 % (H22@150)

$$e = \frac{0.82(\pi M/p)^{1/2}\ V^{3/4}}{\rho^{1/8} f_{cy}^{3/8}(\gamma+0.3)^{3/8}} = \frac{0.82\times(\pi\times 2000/(\pi\times 1))^{1/2}\times 50^{3/4}}{2500^{1/8}\times(5\times 10^7)^{3/8}\times(0.39+0.3)^{3/8}} = 0.39\,m < 0.75\,m$$

→ **O.K**

결과적으로 콘크리트 LNG 저장탱크 외조의 벽체는 외부 충돌하중(직경 1.0 m, 질량 2,000 kg, 속도 50 m/s)에 있어서 천공에 대해 안전하게 설계되었음을 알 수 있다.

(2) 화재에 대한 콘크리트 및 강재의 내화성능

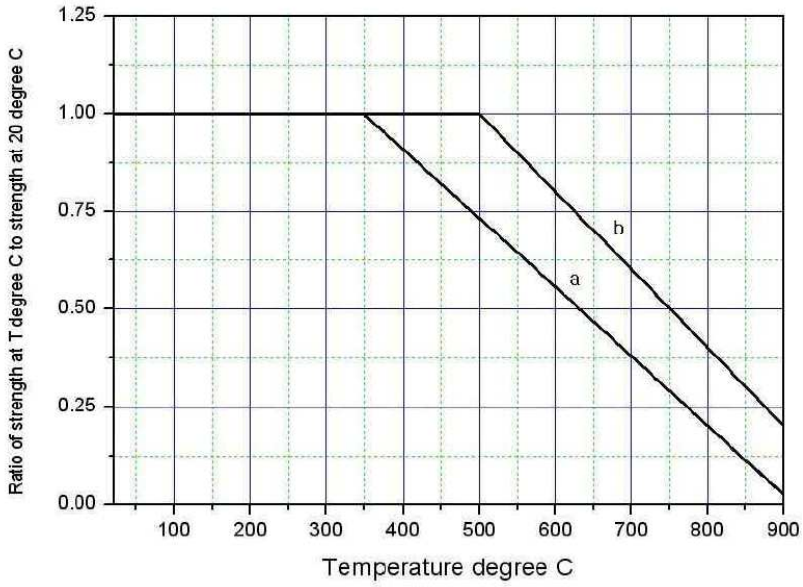
가. 콘크리트 구조물 내화성능

콘크리트가 열을 받게 되면 콘크리트의 강도는 저하하게 된다. 영국의 BRE의 연구결과에 의하면 약 500~600 ℃에서 상온 콘크리트 강도의 50% 수준으로 감소한다고 보고하고 있으며, Schneider의 연구결과에 의하면 콘크리트의 탄성계수는 약 300~500 ℃에서 상온 탄성계수의 50% 수준으로 저감되는 것으로 나타났다. 표 2.14.8은 콘크리트 종류에 따른 강도저감계수를 나타낸다.

그림 2.14.8 콘크리트 종류에 따른 강도저감계수

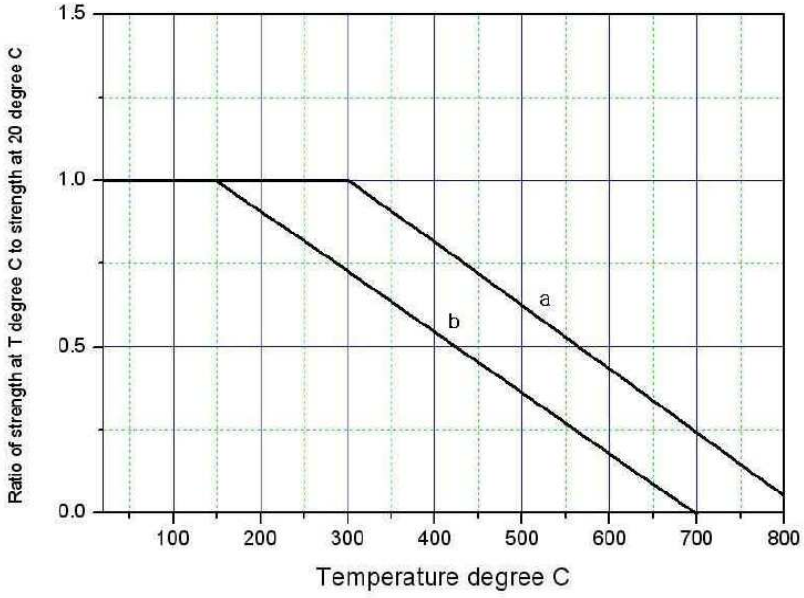
| 온도(℃) | 강도저감계수 | |
|---|---|---|
| | 일반콘크리트 | 경량콘크리트 |
| 20 | 1.00 | 1.00 |
| 100 | 0.95 | 1.00 |
| 200 | 0.90 | 1.00 |
| 300 | 0.85 | 1.00 |
| 400 | 0.75 | 0.88 |
| 500 | 0.60 | 0.76 |
| 600 | 0.45 | 0.64 |
| 700 | 0.30 | 0.52 |
| 800 | 0.15 | 0.40 |
| 900 | 0.08 | 0.28 |
| 1,000 | 0.04 | 0.16 |
| 1,100 | 0.01 | 0.04 |
| 1,200 | 0.00 | 0.00 |

LNG 저장탱크에 사용되는 보강콘크리트와 예응력 콘크리트에 대한 내화성능에 대해서는 BS 8110에 상세한 가이드라인이 제시되어 있다. 이 규격에서는 온도 증가에 따라 콘크리트 및 콘크리트 내 강재(철근, 텐던)의 강도 변화를 그림 2.14.5 및 그림 2.14.6과 같이 보여주고 있다.




(a) 밀입도 콘크리트 (dense concrete)
(b) 경량골재 콘크리트 (lightweight aggregate concrete)

그림 2.14.5 온도에 따른 콘크리트 강도변화 설계 곡선 (BS 8110)




(a) grade 460 and grade 250 reinforcement and extra high-strength bars
(b) prestressing wires or strands

그림 2.14.6 온도에 따른 강재의 강도변화 설계 곡선 (BS 8110)

(2) 강재 구조물 내화성능

일반 구조용 강재의 경우 화재 등의 고온에 노출되면 인장강도, 항복강도 및 탄성계수는 감

소하며 연신율은 감소하다가 다시 증가하는 추세를 보인다. 한국건설기술연구원에서 실험에 의해서 제시하는 국내 일반적인 구조용 강재(SS 400, SM 400, SM 490)의 고온 열적특성 데이터의 분석을 통해 표 2.14.9에 나타내었다.

허용내력은 강소재의 고온에서의 열적 안전성 판단 기준의 하나였으나, 최근에는 강소재의 실질적 파괴시점인 상온 인장강도에 대해 고온 시 강재의 허용응력도 확보 여부로서 강소재의 열적 특성평가가 이루어지고 있다.

표 2.14.9 국내 일반 구조용 강재의 고온 열적특성 (한국건설기술연구원)

| 강종 | 온도 (℃) | 내력 ($kgf/mm^2$) | | 인장강도 ($kgf/mm^2$) | 탄성계수 ($kgf/cm^2$) | 연신율 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 항복점 (0.2%옵셋) | 항복점 (1.0%옵셋) | | | |
| SS 400 | 20 | 29.49 | 28.83 | 46.37 | 16,493.97 | 34.60 |
| | 100 | 27.94 | 26.47 | 43.90 | 20,443.47 | 30.70 |
| | 200 | 26.74 | 28.96 | 52.16 | 19,733.23 | 23.21 |
| | 300 | 21.56 | 28.75 | 53.00 | 18,605.47 | 27.96 |
| | 400 | 19.49 | 26.37 | 44.10 | 19,742.63 | 30.24 |
| | 500 | 18.86 | 24.10 | 31.56 | 13,817.50 | 32.02 |
| | 600 | 13.53 | 16.05 | 17.57 | 13,817.50 | 42.75 |
| SM 400 (ASTM A516) | 20 | 30.55 | 28.65 | 44.58 | 21,678.63 | 38.24 |
| | 100 | 28.24 | 27.49 | 42.89 | 21,465.87 | 33.18 |
| | 200 | 27.05 | 26.48 | 48.01 | 21,465.87 | 25.19 |
| | 300 | 22.66 | 28.02 | 50.94 | 18,698.67 | 28.09 |
| | 400 | 18.81 | 25.20 | 43.63 | 18,817.67 | 34.11 |
| | 500 | 18.00 | 23.33 | 31.70 | 14,607.23 | 32.86 |
| | 600 | 13.76 | 16.31 | 17.88 | 15,006.43 | 42.24 |
| SM 490 | 20 | 37.61 | 37.28 | 55.73 | 24,028.80 | 31.63 |
| | 100 | 36.19 | 35.43 | 50.90 | 21,183.60 | 31.47 |
| | 200 | 30.88 | 34.61 | 51.58 | 19,050.30 | 26.39 |
| | 300 | 26.87 | 36.03 | 53.65 | 15,182.97 | 29.43 |
| | 400 | 26.37 | 34.22 | 49.50 | 15,728.93 | 34.11 |
| | 500 | 24.12 | 30.10 | 36.98 | 13,638.90 | 33.11 |
| | 600 | 17.31 | 21.11 | 22.69 | 13,941.97 | 39.41 |

인장강도 내력 손실평가는 강소재가 실질적으로 파괴되는 인장강도를 기준으로 하고 있으며 SM 490 13 mm의 경우 인장강도는 600 ℃부근에서 상온 인장강도의 65% 수준인 2,200 $kgf/cm^2$에 도달하여 파괴되는 것으로 나타났다.

탄성계수는 강소재가 고온에 노출될 경우 저하하게 되는데 일본, 호주 등의 건축 구조용 강

소재(SS 400, SM 400, SM 490)에 대한 연구결과에 따르면 온도가 상승함에 따라 탄성계수의 저하율은 거의 일정하다가 600 ℃에서 다소 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 500 ℃에서는 상온 탄성계수의 약 68 ~ 70% 수준에 이르며 600 ℃에서는 상온 탄성계수의 약 50 ~ 60% 에 도달하는 것으로 보고하고 있다. 표 2.14.9의 재료 중 저장탱크 지붕 강판대로 일반적으로 사용되는 SM 400의 온도 변화에 따른 인장강도와 탄성계수 변화추이를 그래프로 그림 2.14.7과 같이 나타내었다.

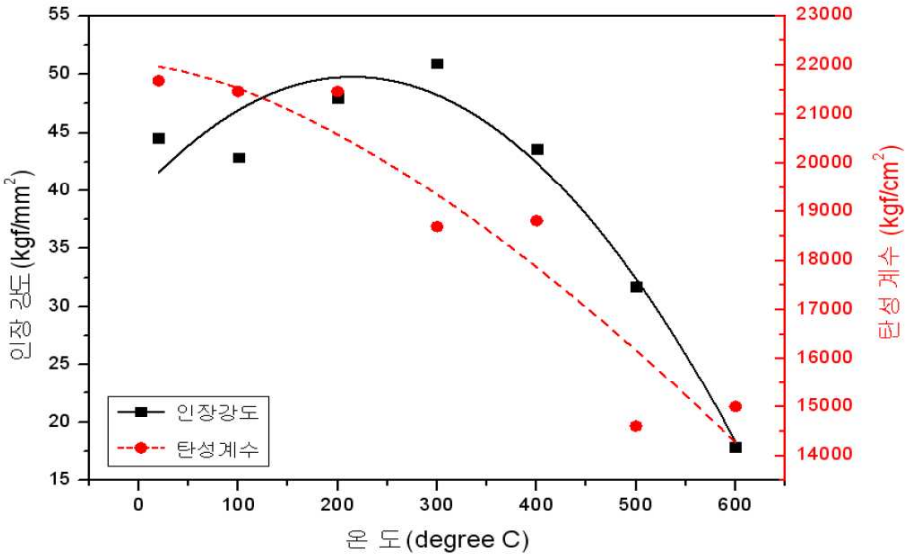



그림 2.14.7 SM 400의 온도에 따른 인장강도 및 탄성계수

3. LNG 저장탱크 외조에 대한 특수하중 해석

가. 충돌하중 모델링 및 해석

일반적으로 지상식 LNG 저장탱크의 유한요소 해석을 위한 프로그램은 다양하게 이용되고 있다. 연구의 목적과 방향에 따라 어떤 프로그램을 사용해야 할지 결정되는데 본 연구의 충돌해석에서는 충돌 시뮬레이션을 통한 충돌하중과 충격량을 토대로 외부탱크의 안전성을 검토하기 위해 모델링은 Hypermesh 11.0을 이용하였으며, 해석 툴은 LS-DYNA 971을 사용하였다. 충돌에 의해 발생하는 국부적인 영향뿐만 아니라 구조물 전체의 거동 및 응력변화를 관찰하기 위해 LNG 저장탱크 외조의 벽체 및 바닥 슬래브를 실제 스케일에 맞추어 모델링하였다. 또한 실제 구조물에 사용된 재료의 물성치를 반영하여 충돌에 따른 구조물의 거동을 보다 정확히 예측하고자 하였다.

(1) 미사일 충돌 시나리오

(가) 충돌 대상 물체의 선정

LNG 저장탱크 설계 시에는 다음과 같은 비산물체(미사일)에 의한 외부 충돌(Missile Impact) 시 안전성이 확보되길 요구하고 있다.

- mass : 2000 kg
- velocity : 50 m/sec
- impact area : circle 1.0 m dia.
- direction of impact : perpendicular to the surface

그러나 저장탱크 구조물의 설계 시에는 표 2.14.7에서 확인했듯이 미사일 충돌하중에 대한 안전성 개념을 내조의 구조적 안정성 유지에 국한시키고 있으며, 외조에 관해서는 국부적 영향인 천공두께에 대한 안전성만을 고려하고 있다.

따라서 본 연구의 충동 해석에서는 위에서 언급한 충돌 특성을 그대로 반영하여 미사일 충돌에 대한 LNG 저장탱크 외조의 거동을 분석하고 그 안전성을 평가해 보고자 하였다. 또한 LNG 저장탱크 설계 시 외부 충돌 하중에 대한 구조적 안전성 평가에 있어 내조뿐만 아니라 외조에 관한 설계기준 설립이 필요하다고 판단되는 바, 본 연구 결과가 LNG 저장탱크 외조의 외부 충돌 하중에 대한 설계기준을 국부적 영향평가에서 외부탱크의 구조적 안전성 확보로 까지 확대 시키는데 활용될 수 있도록 하고자 하였다.

해석에 사용된 충돌 시나리오를 정리해 보면 다음과 같다. 2000 kg의 강체가 50 m/s의 속도로 LNG 저장탱크 외조 벽면에 수직으로 충돌하며 충돌면적은 직경 1.0 m이다.

(나) 충돌 위치의 선정

비산물체가 LNG 저장탱크 외조 건물에 충돌할 때 가능한 충돌위치는 저장탱크 주변 건물들의 배치나 주변 지형 및 형상에 따라 달라질 것이다. 하지만 해석 대상으로 삼고 있는 초대용량 LNG 저장탱크 외조 건물은 아직 개발단계로 주변 환경을 참고할만한 구조물이 실존하지 않는데다가, 구조물에 비해 비산물체의 크기가 매우 작으므로 예상 충돌위치를 파악하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 주변 환경에 대한 영향을 배제하고, 구조물에 가장 큰 손상을 초래할 것으로 예측되는 충돌부위 및 기존 충돌관련 연구 등을 종합적으로 참고하여 그 위치를 선정하였다.

저장탱크 외조 구조물의 벽체는 유체압, 내압 등 설계하중에 의해 상부에 비하여 하부 쪽에 훨씬 큰 응력이 작용한다. 이 응력을 상쇄시켜 주기위해 벽체 하부 쪽에는 상부보다 훨씬 촘촘히 프리스트레스 텐던이 배근되며, 또한 벽체 하부가 강성이 큰 바닥판에 구속되어 있어 벽체의 하부 쪽에 응력이 집중되게 된다. 이렇게 응력이 집중된 부분에 큰 충격하중이 가해진다면 구조물에 큰 손상을 초래하게 될 것으로 예상된다.

벽체의 중간부분은 하부에 비해 적용되는 설계하중이 작아 프리스트레스 텐던이 적게 배근되므로 설계하중을 제외하고 저장탱크 외조 벽체 자체의 강도만을 고려하게 되면 하부에 비해 중간부의 강도가 떨어진다. 또한 지붕이나 바닥판과의 거리가 멀어 벽체 중간 높이에 충돌 하중이 가해지게 되면 변위를 제어가 어려울 것으로 판단된다.

이러한 벽체의 구조적 특징을 참고하여 충돌 위치를 선정하고, 표 2.14.10 에 정리 하였다.

표 2.14.10 미사일 충돌 위치의 선정

| 충돌 위치 | 특징 |
|---|---|
| 30 m | 벽체의 약 2/3 지점으로 텐던의 배치가 적고 지점으로부터 멀어 충돌 시 큰 변위가 발생할 것으로 예상된다. |
| 15 m | 벽체의 약 1/3 지점으로 텐던의 배치가 촘촘하고 강성이 큰 바닥판에 구속되어 있어 응력이 집중되어 있다. |

(다) 충돌 조건

미사일 충돌은 정상적인 가동상태에서 발생하는 것으로 가정하였으며, 정상가동 상태에서 LNG 저장탱크 외조는 자중, 프리스트레싱 하중, 내압 및 온도하중 등을 받고 있다. 이 중에서 정상가동시의 내압은 그 크기가 작고 또한 외부 충격하중에 대해 반대 방향으로 작용하므로 안전측으로 무시하였다. 또한 온도하중의 경우 정상가동시 내· 외부 온도차이가 발생시키는 단면력이 크지는 않은 것으로 보아 역시 무시하였다. 결국 미사일 충돌하중 이외에 추가로 고려된 하중은 자중 및 프리스트레싱 하중이며, 충돌하중이며, 충돌하중 작용 이전의 초기 조건으로 설정하였다.

충돌 하중은 짧은 시간에 큰 변형을 일으키므로 충돌체와 벽체 사이의 충돌면에 있어서 적합한 경계면 처리가 필요하다. 또한 콘크리트는 재료 특성상 콘크리트 구조물에 가해지는 하중에 대한 에너지를 흡수하므로 충돌하중에 대한 변형량과 충격력 사이의 상관관계를 찾기 어렵다. 따라서 충돌 시나리오에서 제시한 직경 1.0 m의 충돌면적에 충격력을 가해주는 방법 대신, 직접 2000 kg의 질량을 가진 직경 1.0 m의 미사일 충돌체를 모델링 하고 해석 툴인 LS-DYNA의 접촉 알고리즘 (contact algorithm; contact automatic one way surface to surface)을 이용하여 저장탱크 외조의 벽체와 미사일 충돌체 사이의 경계면을 구성하였다.

충돌각도는 충돌 시나리오에서 요구하는 벽체에 대한 직각방향으로 선정하였다. 실제로 벽체에 대해 직각방향, 높이에 대한 60° 방향 및 바닥과 평행한 사선방향, 이 세 가지 각도로 충돌해석을 실행 해 본 결과 직각방행에서 가장 큰 충돌효과가 나타남을 확인해 볼 수 있었다.

(1) 충돌 해석을 위한 LNG 저장탱크 모델링

프리스트레스트 콘크리트 구조물로 건설되는 LNG 저장탱크 외조의 강도 안전성에 관한 평가는 유한요소해석법(FEM)으로 해석하는 것이 일반적이다. 미사일 충돌하중은 내압, 자중 등의 축대칭 하중과는 달리 비대칭 하중으로서 일반적으로 3차원 유한요소해석이 요구된다. 3차원 모델링에서는 벽체 등에 대한 모델링을 쉘 요소(shell element)의 2차원 요소를 사용할 수 있으나 이 경우 해석시간이 비교적 빠른 장점을 갖지만 접합부에서의 강성 중복 문제 등 구조물의 이상화에 따른 문제점들을 해결해야 하는 등의 주의를 요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Hypermesh 11.0을 사용하여 콘크리트 단면을 입체 솔리드 요소(solid element)로 모델링하였으며 콘크리트, 철근, 텐던 등의 재료의 실제 물성치 및 비선형성을 모두 고려하였다.

(가) LNG 저장탱크 외조의 기하학적 특성

그림 2.14.8은 저장탱크 외조의 단면도이다.

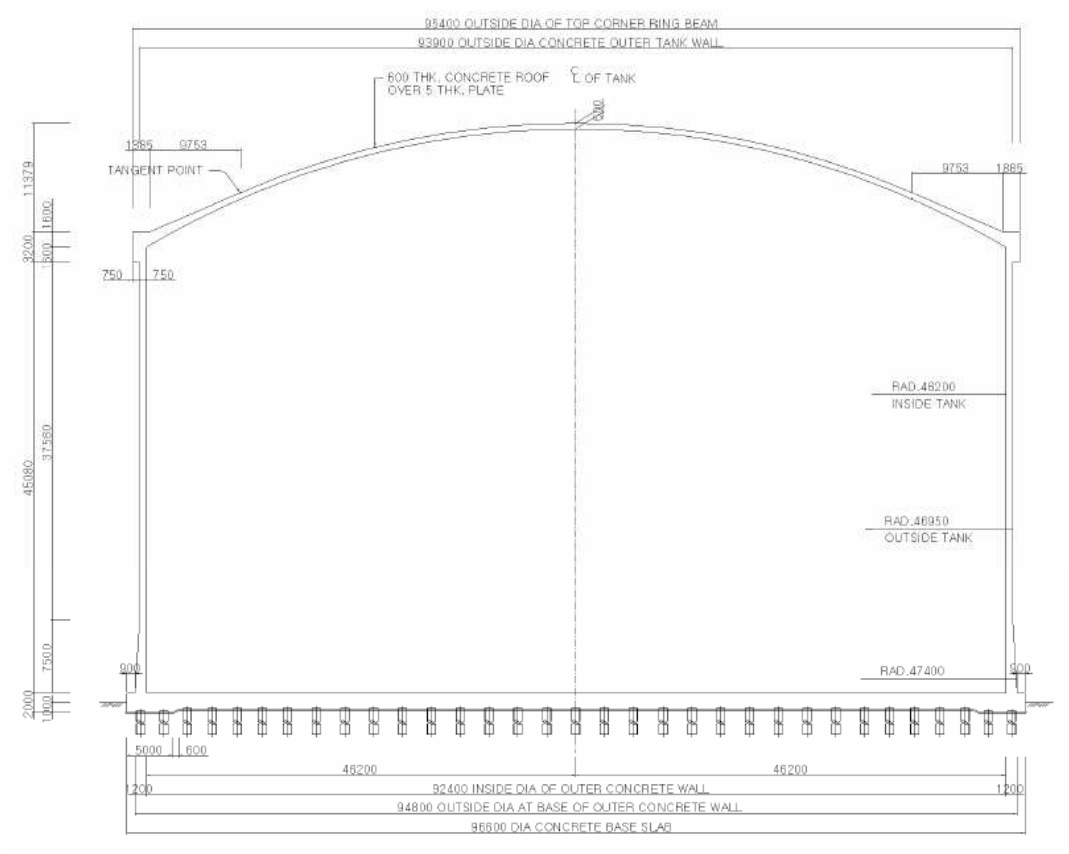



그림 2.14.8 27,0000 kl급 LNG 저장탱크 외조 단면도

본 연구에서 충돌해석 시 사용할 구조물은 27,0000 kl급 LNG 저장탱크 외조로 바닥 슬래브부터 돔형 지붕까지 그 높이가 59.659 m이고 벽체와 링빔만 그 높이가 약 48.28 m이다. 저장탱크 외조의 내부 반지름은 46.2 m이고 외벽 두께는 하단의 7.5 m까지는 1.2 ~ 0.75m로 구배를 갖으며 그 위로는 0.75m로 일정한 두께를 갖는 탭진 형상을 나타낸다. 외벽 위에는 약 0.6 m의 철근콘크리트 지붕이 강재 지붕 라이너 위에 시공되며, 콘크리트의 지붕과 벽체의 연결부에는 지붕의 무게를 견디기 위한 링빔이 설치된다. 표 2.14.11는 LNG 저장탱크 외조의 주요 제원을 나타낸 것이다.

벽체는 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 벽체의 단면 상세는 그림 2.14.9와 같다. 프리스트레스 텐던과 철근의 배치는 벽체의 높이에 따라 달라지며 벽체 모델링 시 그 배치를 모두 반영하여 실제 벽체에 가까운 모델을 구현하고자 하였다.

표 2.14.11 LNG 저장탱크 외조의 주요 제원

| 부재 종류 | LNG 저장탱크 외조 구조물 특징 |
|---|---|
| 벽체 두께 | 0.75 m |
| 지붕 돔 두께 | 0.60 m |
| 지붕 형상 | 부분 구형 |
| 벽체 높이 | 48.28 |
| 벽체 내경 | 46.2 m |
| 링 빔 | 있음 |
| 바닥판 프리스트레싱 | 있음 |

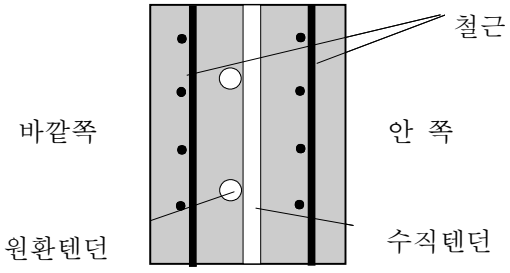



그림 2.14.9 외부 벽체의 상세 단면도

(나) LNG 저장탱크 외조의 모델링 요소별 물성치

LNG 저장탱크 외조의 모델링에 사용된 요소별 물성치를 다음 표 2.14.12에 정리하였다. 모델링은 실제 구조물 설계에 사용된 재료들의 설계 물성치와 동일한 값들을 사용하였으며 프리스트레스 텐던의 긴장력은 모든 손실 후의 최종 평균 긴장력을 사용하였다.

표 2.14.12 모델링 요소별 강도특성

| 재료 | LNG 저장탱크 외조 벽체 | | |
|---|---|---|---|
| 콘크리트 | 질량 | (ton/$m^3$) | $m_c$ = 2.4 |
| | 압축강도 | (N/$mm^2$) | $f_{ck}$ = 40 (cylinder strength) |
| | 휨강도 | (N/$mm^2$) | 0.6$f_{ck}$ = 24 |
| | 탄성계수 | (kN/$m^2$) | $E_c$ = 31.75 e^6 |
| | 프아송 비 | | $\mu$ = 0.2 |
| 철근 | 질량 | (ton/$m^3$) | $m_s$ = 7.85 |
| | 항복인장강도 | (N/$mm^2$) | $f_y$ = 400 |
| | 탄성계수 | (kN/$m^2$) | $E_s$ = 200.0 e^6 |
| | 프아송 비 | | $\mu$ = 0.3 |
| 프리스트레스 텐던 | 질량 | (ton/$m^3$) | $m_{st}$ = 7.85 |
| | 탄성계수 | (kN/$m^2$) | $E_s$ = 195.0 e^6 |
| | 프아송 비 | | $\mu$ = 0.3 |
| | 긴장력(vertical) | (N/$mm^2$) | 862.5 |
| | 긴장력(horizontal) | (N/$mm^2$) | 1153 |

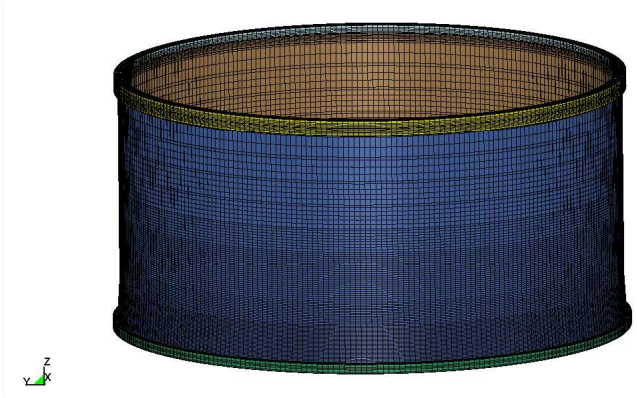
(다) LNG 저장탱크 외조의 유한요소모델

위에서 언급했듯이 충돌하중은 비대칭 하중이므로 구조물 전체의 거동을 확인하기 위해서는 풀 모델링이 필요하다. 따라서 충돌해석을 위해 Hypermesh를 이용하여 3D 풀 모델을 구현하였으며 보다 정확한 예측을 위해 콘크리트를 3D 입체 요소인 솔리드 요소(solid element)로 모델링하였다.

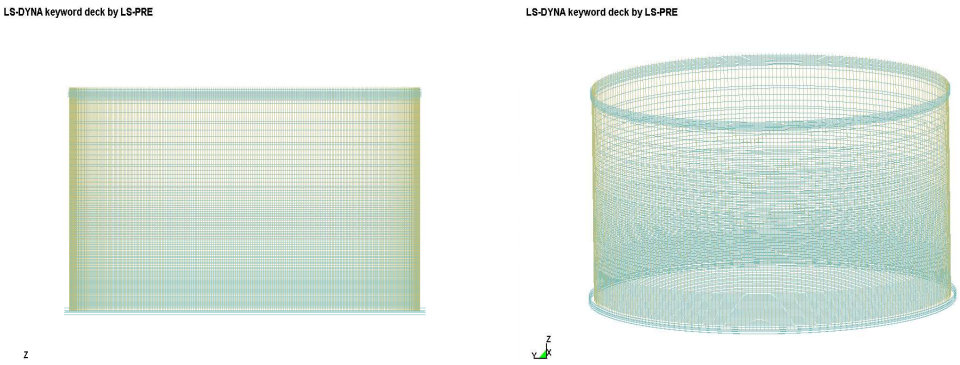
철근은 주철근을 포함한 주요철근을 모델링에 모두 포함시켰는데 구조물의 크기가 초대형이다 보니 개별적으로 철근을 모델링하기가 어렵고 요소의 수가 지나치게 많아져 해석시간이 길어진다는 단점이 발생한다. 또한 이번 해석의 목적은 국부적 충돌 거동이 아닌, 구조물의 전체적 거동을 확인하고자 하는 것이므로 철근의 자세한 모델링이 필요하지는 않을 것이라 판단되었다. 따라서 철근은 하나하나 개별적으로 모델링하지 않고 분포시켜 이상화하였으며 분포된 철근 층은 철근의 직경, 간격, 콘크리트 두께상의 위치 등을 엄밀하게 고려하기 위해 쉘 요소(shell element)를 이용하여 콘크리트 요소 속에 묻는 방식을 사용하였다.

프리스트레싱 텐던의 경우 철근만큼 밀집된 형태는 아니므로 개개의 텐던을 요소처럼 모델링 하는 것이 바람직하다. 따라서 텐던은 1D 요소를 사용하여 콘크리트 속에 텐던의 배치 및 규격을 고려하여 묻는 방식으로 모델링 하였다. LNG 저장탱크 외조의 경우 post-tensioning 방식을 채택하고 있지만 충돌해석 시 프리스트레싱 하중은 초기 하중 조건으로 설정되므로, LS-DYNA 971의 Initial_Stress_ Beam 옵션을 통해 프리스트레스 하중을 적용

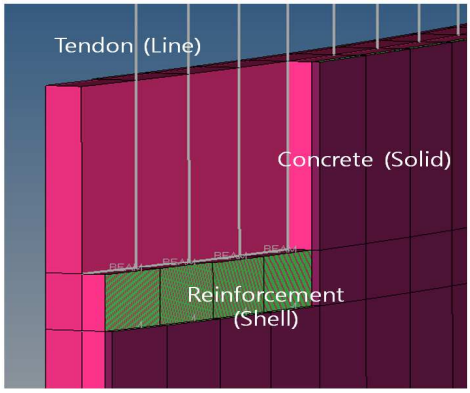
시켰다. Initial_ Stress_ Beam 옵션을 사용하는 경우 빔 요소(beam element)에 적용시킨 힘이 초기조건으로 계산된 후 일정하게 유지된다고 가정된다.



(a) LNG 저장탱크 외조의 벽체 및 바닥 슬래브




(b) LNG 저장탱크 외조의 텐던 모델링




(c) LNG 저장탱크 외조 벽체의 모델링 상세

그림 2.14.10 LNG 저장탱크 외조의 유한요소모델

바닥판 슬래브는 수직방향 긴장재가 벽체로부터 내려와 고정되는 위치이므로 벽체와 바닥판을 고정시켜서 모델링 하였다. 또한 바닥판은 말뚝기초에 의해 지지되므로 경계조건으로

바닥판 슬래브를 모두 고정(fix)시킨 후 해석을 수행하였다.

해석은 충돌 후에 일어나는 벽체의 거동까지 확인 할 수 있도록 120ms의 타임 스텝으로 진행하였다.

그림 2.14.10은 최종 모델링 결과를 나타낸 것이다.

(3) 충돌 해석 결과

충돌 시나리오는 충돌 높이 (h = 30 m & h =15 m)를 제외하고는 모두 동일한 조건에서 수행하였다. 즉, 질량 2000kg을 갖는 강체가 50 m/s의 속도로 벽체에 수직하게 충돌하도록 하였으며 충돌의 높이만을 변수로 두었다.

(가) 시나리오 1(높이 h = 30 m)의 충돌 해석

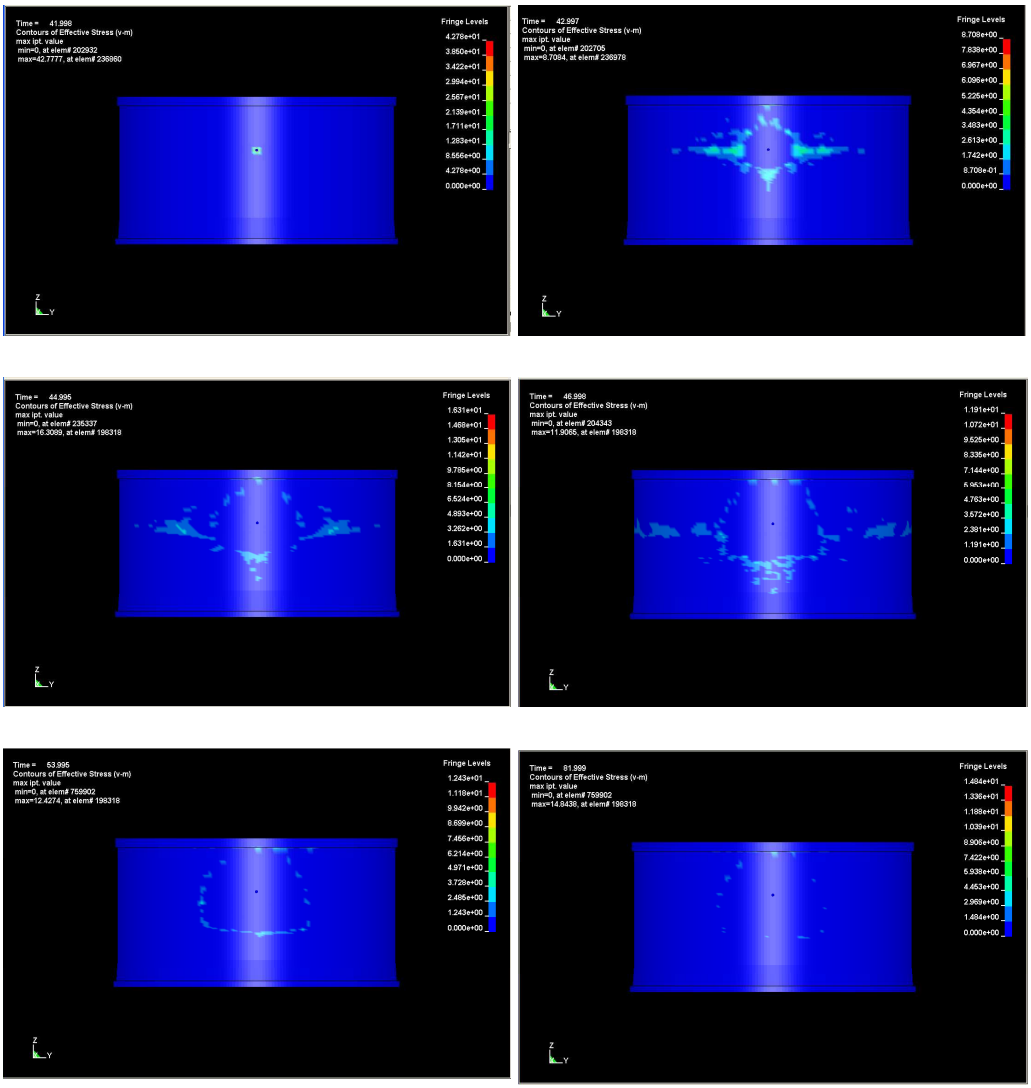
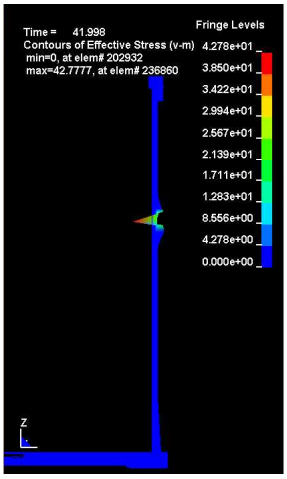


그림 2.14.11 충돌 후 시간 이력에 따른 Von-mises 응력

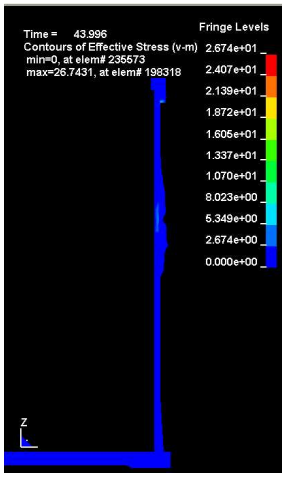
그림 2.14.11는 미사일 충돌하중이 높이 30 m에 가해졌을 때 저장탱크 외조 벽체에 나타나는 Von-Mises 응력 분포의 시간 흐름에 따른 변화이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 미사일

충돌체와 벽체의 충돌시간은 매우 짧다. 하지만 짧은 충돌시간으로 인해 벽체에는 큰 충격력이 발생하며, 충돌면적에 발생한 응력은 충돌 이후 점차 벽체 전체로 퍼져나가며 충돌면 부근의 잔류응력이 시간이 지남에 따라 사라지는 것을 관찰할 수 있었다.

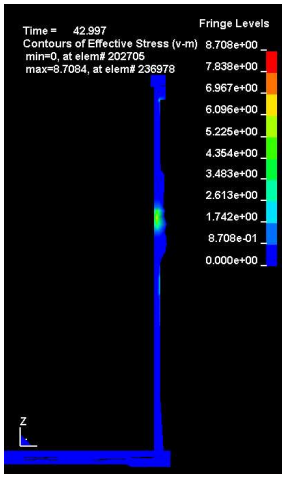
그림 2.14.12는 충돌 발생에 따른 벽체 단면의 거동을 보여주고 있다.



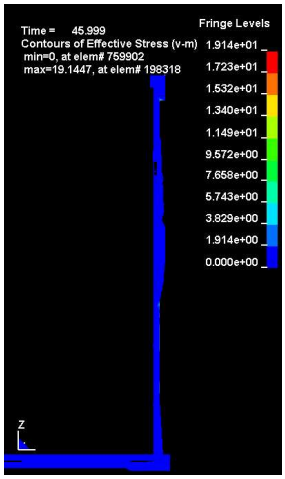

(a) 41.99 ms



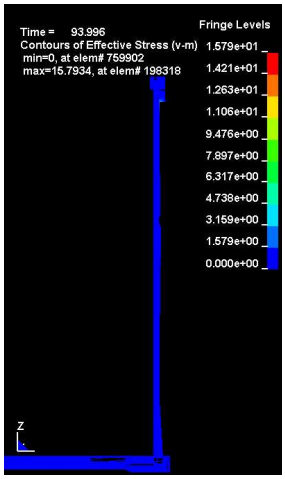

(c) 43.99 ms




(b) 42.99 ms




(d) 45.99 ms




(e) 90 ms

그림 2.14.12 충돌 후 시간 이력에 따른 벽체의 거동

그림 2.14.12는 충돌에 의한 최대 변위가 일어나는 지점의 단면모습으로 충돌에 따른 벽체의 거동을 좀 더 확실히 볼 수 있도록 변위를 200배 증가시켜서 나타낸 것이다. (a), (b), (c), (d)를 통해 충돌 직후 응력이 넓게 퍼져나감에 따라 벽체의 변형 역시 넓은 범위로 확대되는 것을 확인할 수 있으며, (e)는 벽체와 미사일의 충돌부위에 미소한 잔류변형이 남았음을 보여주고 있다.

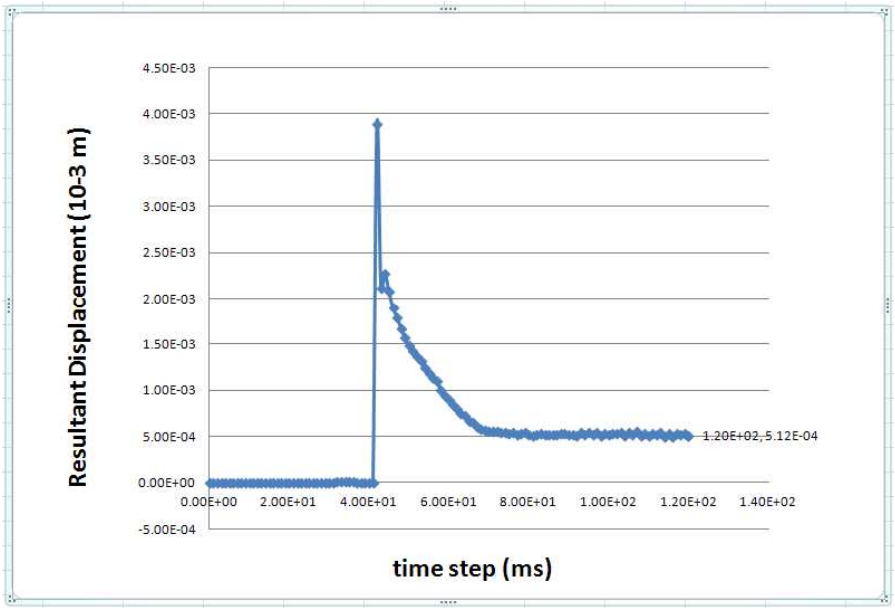



그림 2.14.13 최대 처짐 부의 시간이력에 따른 변위

그림 2.14.13은 충돌로 인해 발생하는 시간이력에 따른 최대변위를 나타내는 그래프이다. 이 그래프를 통해 충돌이 발생하는 42 ms 시점에서 3.89 mm의 최대변위가 발생 하며, 그림 2.14.13에서도 보았듯이 충돌 이후 0.5mm 정도의 아주 미소한 잔류변형이 지속되고 있음을 알 수 있다.

(나) 시나리오 2(높이 h = 15 m)의 충돌 해석

그림 2.14.14은 미사일 충돌하중이 높이 15 m에 가해졌을 때 저장탱크 외조 벽체에 나타나는 Von-Mises 응력 분포의 시간 흐름에 따른 변화이다.

충돌 위치를 제외한 모든 조건은 동일하였으나 미사일 충돌체를 15 m에 충돌시켰을 때가 30m에 충돌 시킨 경우에 비해 훨씬 큰 응력을 발생시키며, 따라서 LNG 저장탱크 외조의 벽체는 하부 쪽이 상부에 비해 충돌에 훨씬 취약하다는 것을 알 수 있다.

하지만 시간에 따른 응력의 흐름은 30 m에 충돌시킨 경우와 크게 다르지 않아, 시간이 지남에 따라 벽체 전체로 퍼져나가며 충돌에 의해 집중적으로 발생한 응력이 소산되는 것을 확인할 수 있다.

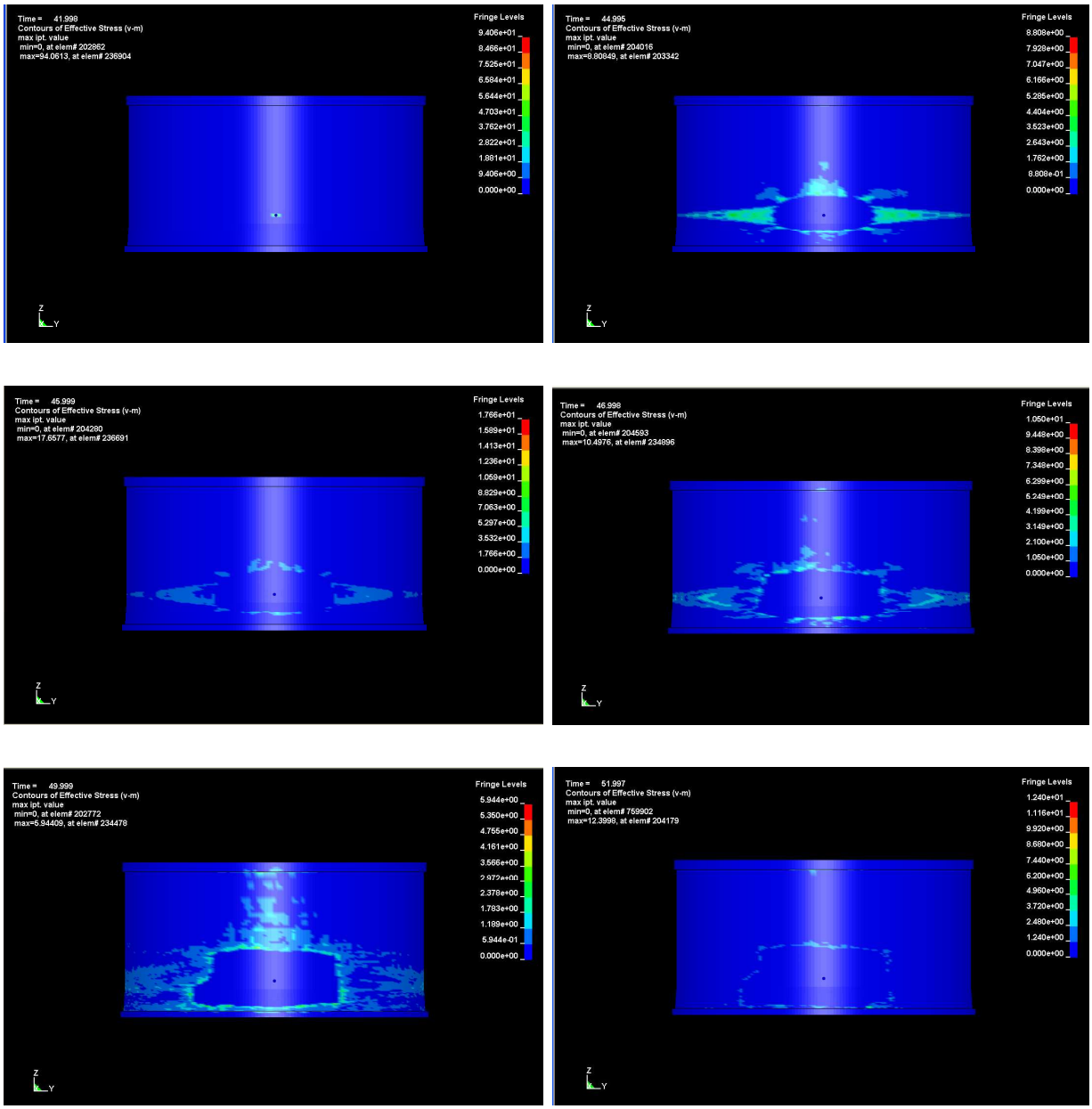
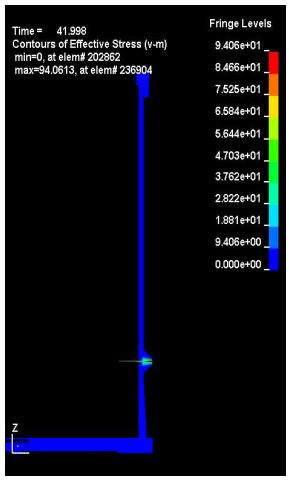
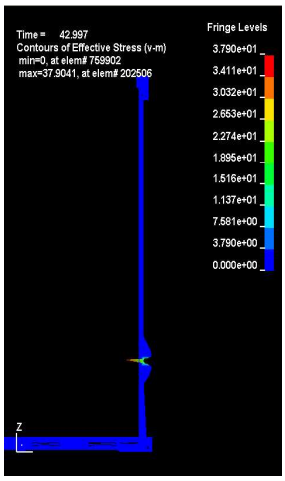


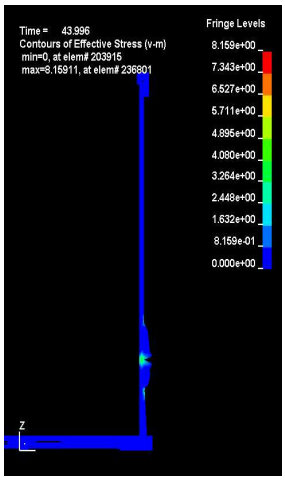

그림 2.14.14 충돌 후 시간 이력에 따른 Von-mises 응력



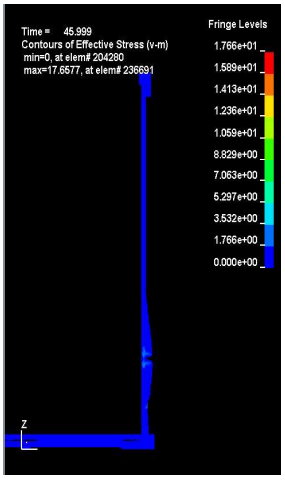

(a) 42 ms



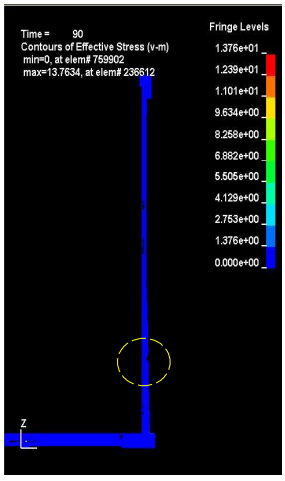

(b) 43 ms




(c) 44 ms




(d) 46 ms




(e) 90 ms

그림 2.14.15 충돌 후 시간 이력에 따른 벽체의 거동

그림 2.14.15은 충돌에 의한 최대 변위가 일어나는 지점의 단면모습으로 이번에도 역시 변위를 200배 증가시켜 벽체의 거동을 자세히 관찰하고자 하였다. 시나리오 2의 경우에도 응력이 벽체 전체로 퍼져나감에 따라 벽체의 변위 발생부위도 함께 퍼져나갔음을 확인할 수 있었으나, 시나리오 1의 경우보다 큰 응력이 발생하므로 변위 역시 더 넓은 부위에서 더 크게 발생하였다. 또한 벽체와 미사일의 충돌부위에 미소한 잔류변형 역시 남아 있음을 (e)를 통해 확인해 볼 수 있다.

그림 2.14.16는 벽체의 15 m 높이에 충돌하중이 가해졌을 경우의 시간이력에 따른 최대변위 그래프이다. 최대변위는 충돌이 발생하는 42 ms 시점에서 나타났으며 그 크기는 6.32 mm 로 30 m의 높이에서의 충돌에 의한 최대 변위인 3.89 mm 보다 약 1배 큰 변형이 발생하였음을 알 수 있었고, 잔류변형도 1 mm 정도로 시나리오 1에서의 잔류변형 0.5 mm보다 두 배 큰 변형이 지속되고 있음을 보여준다.

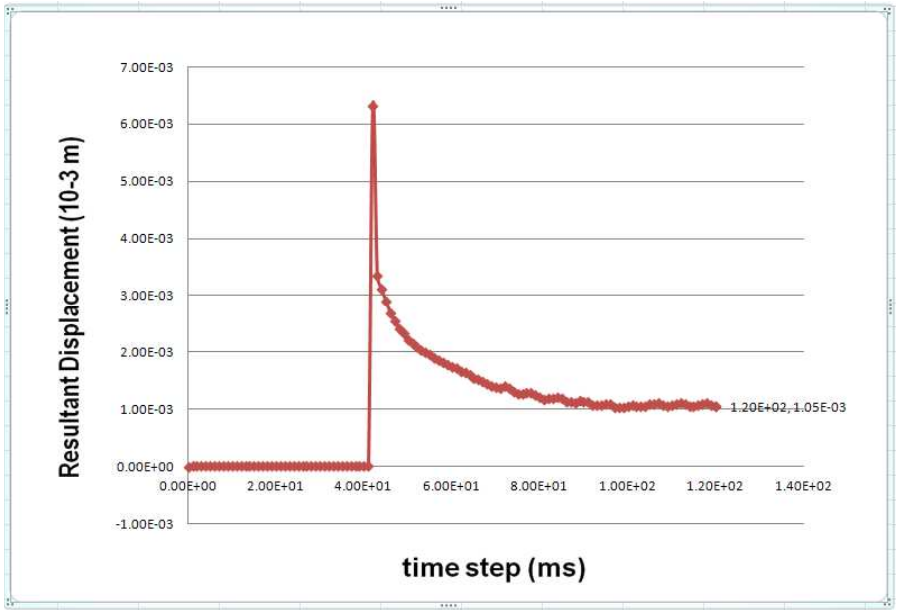



그림 2.14.16 최대 처짐 부의 시간이력에 따른 변위

나. 외부 화재하중 모델링 및 해석

LNG 저장탱크에 발생할 수 있는 외부화재 시나리오는 크게 지붕에 존재하는 LNG 누출에 의한 화재, 근접탱크의 화재, 외벽 펌프 토출 측 배관에 LNG 누출에 의한 화재 및 번아웃(burn-out)으로 나뉠 수 있다. 이러한 화재로 인해 구조적 결함이 발생한다면 자칫 엄청난 결과를 초래할 수 있기 때문에 이러한 화재가 발생할 경우 강재 지붕형 LNG 저장탱크가 안전한지 알아보는 것은 매우 중요하다. 각 화재 시나리오에 대해 시간의 경과에 의존한 열-유동해석을 통해 각 구조물의 온도를 계산하여 화재 안전성 기준과 비교하여 그 건전성을 평가한다.

외부 화재를 위한 시간 경과에 대한 열-유동해석은 Fluent 6.1.22를 이용하여 계산하였다. Fluent는 유동의 전 영역을 해석할 수 있는 CFD(Compu- tational Fluid Dynamics) 전용 솔버로 여러 유속 영역에서 최적의 해석 효율과 정확도를 보장한다. 또한 Fluent는 적응 격자 기법과 연계한 다양한 수치해석 모델을 제공함으로써 사용자가 다양한 물리적· 화학적 현상들을 정확하게 예측할 수 있는 기능을 제공한다.

번아웃은 ANSYS 9.0을 이용하여 계산하였는데 ANSYS는 구조, 진동, 열전달, 열유체, 충돌낙하 등 넓은 해석기능을 제공하고 있는 범용 툴이다.

(1) 화재 시나리오

현실적인 화재 시나리오를 국내· 외 위험성 평가 사례 및 해외 규격 등의 분석을 통해 4가지로 도출하였다. 표 2.14.13는 화재 시나리오에 대한 일반적인 사항을 표시하고 있다. 바람장의 경우 풍향이 저장탱크를 향하도록 하였고, 바람은 시행착오법을 통해 가장 가혹한 조건을 도출하여 적용하였다. 여기서 D는 저장탱크의 외경이다.

표 2.14.13 해석을 위한 화재 시나리오

| 구분 | 개요 | 해석 조건 |
|---|---|---|
| 시나리오 1 | 지붕 압력방출밸브화재 | ◆ 직경 : 396 mm<br>◆ 누출 속도 : 127 kg/s<br>◆ 연소 시간 : 2 hrs<br>◆ 누출 가스 온도 : 115 K<br>◆ 바람 속도 : 5 m/s |
| 시나리오 2 | 근접탱크 지붕붕괴화재 | ◆ 연소 속도 : 0.78 kg/m$^2$/s (0.1088 m/s)<br>◆ 연소 시간 : 3 days<br>◆ 연소 표변적 : 5,863 m$^2$<br>◆ 누출 가스 온도 : 115 K<br>◆ 탱크간 거리 : D/4<br>◆ 바람 속도 : 15 m/s |
| 시나리오 3 | 펌프 토출배관누출화재 | ◆ 배관 직경 : 314 mm<br>◆ 누출 속도 : 43.7 kg/s<br>◆ 연소 시간 : 1 hrs<br>◆ 누출액 온도 : 111 K<br>◆ 바람 속도 : 20 m/s |
| 시나리오 4 | 번아웃(burn-out) | ◆ 연소 시간 : 72 hrs<br>◆ 액위 감소 속도 : 0.5 m/s<br>◆ 온도 측정 조건 : 액위 2 m 감소 후 최초 콘크리트 지점 |

(2) 화재 해석을 위한 LNG 저장탱크 모델링

(가) LNG 저장탱크 외조의 기하학적 특성

화재에 해석에서는 콘크리트 지붕형 및 강재 지붕형 LNG 저장탱크 모두가 사용되었는데 강재 지붕형 탱크의 경우 11 mm 두께의 강판이 내·외부 하중을 지탱하고 링빔이 없으며 상대적으로 가벼운 지붕 구조를 갖기 때문에 콘크리트 시공방식에 있어서도 슬립폼(slip form)공법을 적용하여 두께가 일정한 벽체를 가진다. 그림 2.14.17은 콘크리트 지붕형 모델과 강재 지붕형 모델의 단면형상으로 기하학적 형상의 차이를 비교해 볼 수 있다.

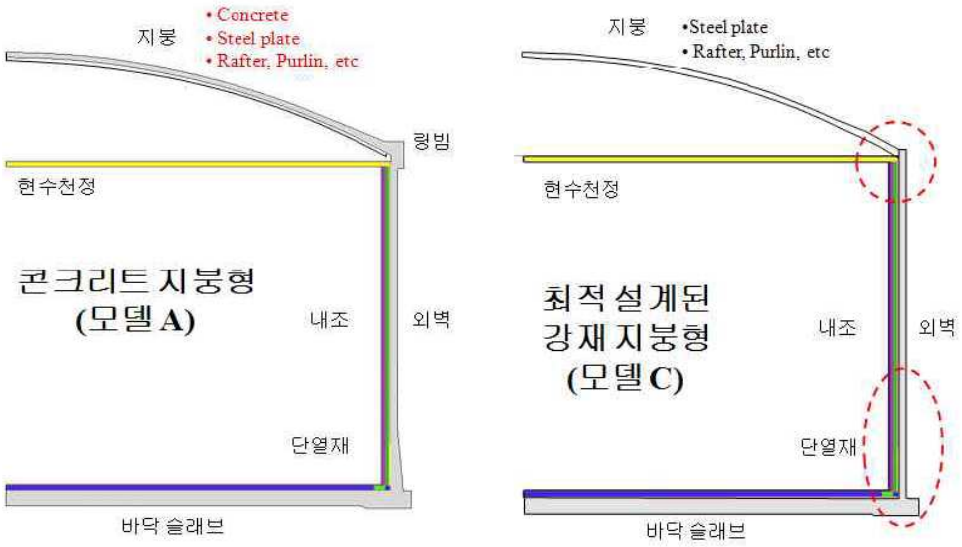



그림 2.14.17 콘크리트 지붕형 및 강재 지붕형 저장탱크의 단면형상

강재 지붕은 그림 2.14.18과 같이 서까래(rafter), 펄린링(purlin ring), 내부링(inner ring), 외부링(outer ring), 그릴리지(grillage), 브레이싱(bracing)으로 빔 구조물이 있으며 그 사이로 11mm의 강재 판으로 이루어져 있다.

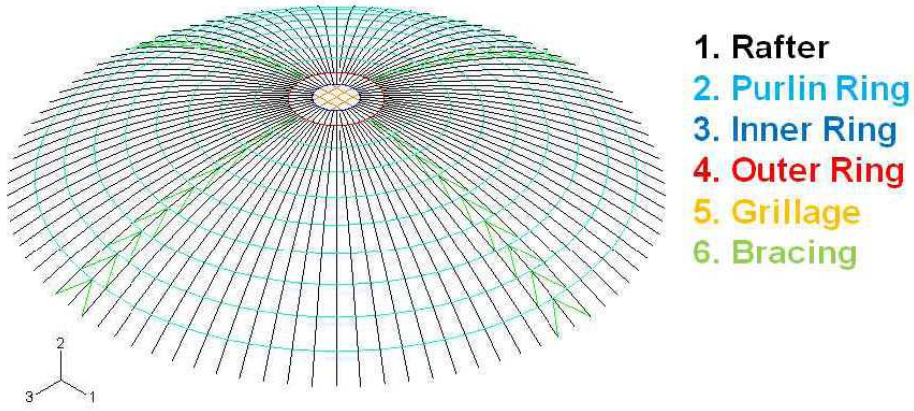



그림 2.14.18 강재 지붕의 형상

(나) LNG 저장탱크 외조의 모델링 요소별 물성치

화재 해석을 위한 모델링은 2D의 단면 모델링으로 진행할 예정이므로 모델링 재료에 사용된 재료별 물성치는 간단하게 적용하였다. 그 요소별 재료 물성치는 표 2.14.14와 그림 2.14.19에 정리하였다.

표 2.14.14 재료별 강도특성

| Material | E (GPa) | $\nu$ | $\rho$ (kg/m$^3$) |
|---|---|---|---|
| Concrete (C50) | 30 | 0.2 | 2500 |
| Concrete (C40) | 28 | 0.2 | 2500 |
| Steel | 205 | 0.3 | 7850 |

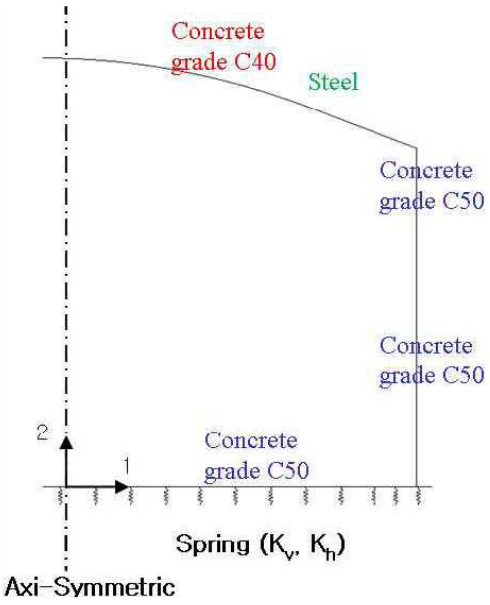



그림 2.14.19 부재별 재료 특성

(다) 외부 화재 해석을 위한 유한요소모델

화재 열-유동해석을 위해 2D 모델링을 수행하였다. 지붕 압력방출밸브 화재, 근접탱크 지붕붕괴 화재, 펌프 토출배관 파단 화재 및 번아웃에 대해 모델링 하였다. 그림 2.14.20부터 그림 2.14.22에 각각 근접탱크 지붕붕괴 화재 및 토출배관 파단 화재에 대한 모델링을 보여주고 있다. 유동장의 요소 크기는 0.1 m × 0.1 m로서 요소 민감도 해석을 통해 결정하였다.

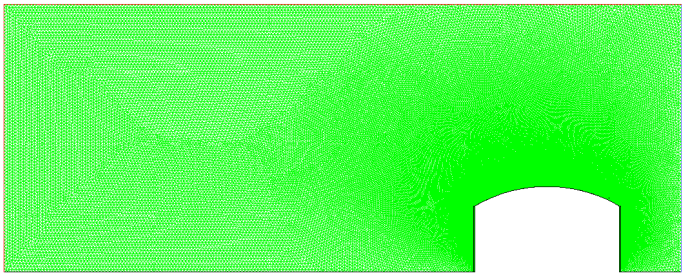


그림 2.14.20 시나리오 1 모델링

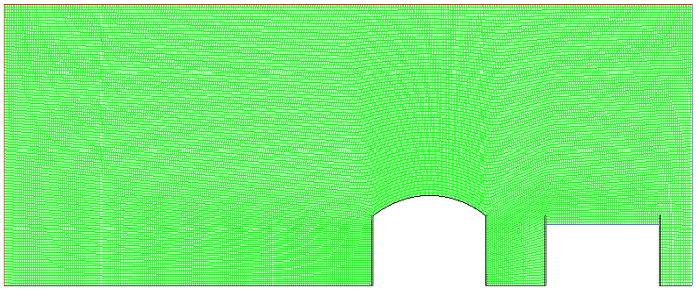


그림 2.14.21 시나리오 2 모델링

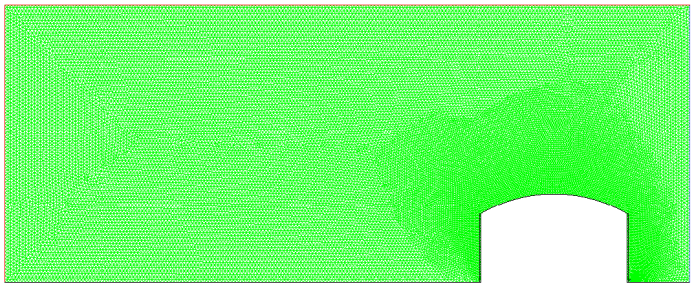


그림 2.14.22 시나리오 3 모델링

(3) 화재 열유동 해석 결과

(가) 지붕 압력방출밸브 LNG 누출에 의한 화재

그림 2.14.23은 지붕 압력방출밸브 배관의 LNG 누출에 의한 화재를 도식화한 것이다. 보통 지붕에 존재하는 압력방출밸브 배관은 3개가 한 세트이며, 그 중 하나는 예비용이다. 그러므로 통상 2개의 압력방출밸브 배관이 터져 LNG가 누출되게 된다.

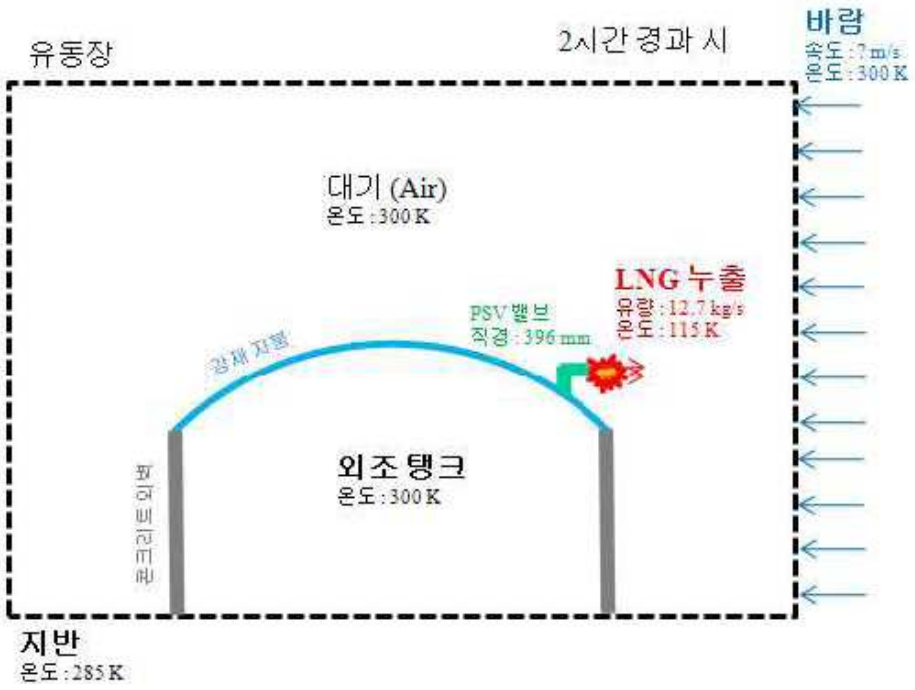



그림 2.14.23 압력방출밸브 LNG 누출 화재

이 밸브는 탱크 바깥을 향해 수평으로 나와 있기 때문에 그림 2.14.23과 같은 방향으로 LNG가 누출되게 된다. 이 때, 압력방출밸브 배관의 직경은 396 mm이고 LNG 누출 유량은 12.7 kg/s(2개의 밸브), LNG 기체의 밀도는 2,274 kg/m3, LNG의 온도는 115 K이다. 대기 조건에서 바람은 탱크를 향해 부는 것이 가장 가혹한 조건일 것이며, 이때 바람의 속도는 LNG 저장탱크에 가장 큰 영향을 미치는 속도를 계산하였다. 이 시나리오는 LNG 누출이 2시간 동안 지속되었다는 가정 하에 2시간 후의 강재 지붕과 콘크리트 외벽의 온도와 화재 안전성 기준과의 비교를 통해 안전성 검토가 이루어진다.

① 바람의 속도에 대한 영향

대기의 바람의 속도에 따라 강재 지붕이나 콘크리트 외벽의 온도는 큰 영향을 받게 될 것이다. 따라서 그림 2.14.24과 같이 바람의 속도를 2, 5 및 10 m/s를 적용하여 콘크리트 외벽과 강재 지붕에 대해 그 온도를 살펴보았다.

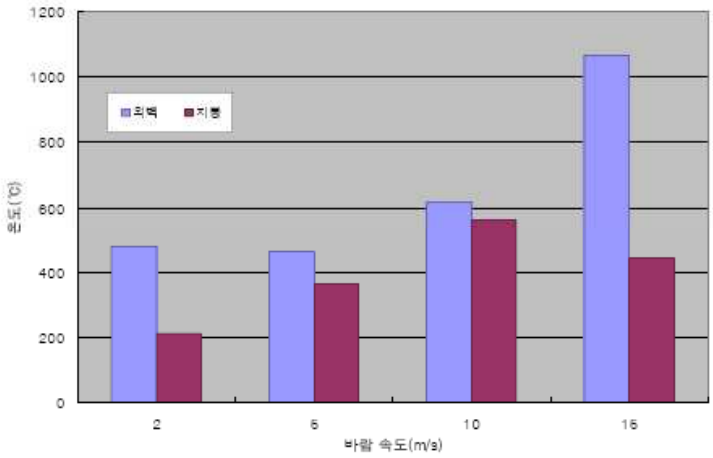



그림 2.14.24 바람 속도에 의한 외벽과 지붕의 온도

그림 2.14.24과 같이 지붕 압력방출밸브 배관의 LNG 누출에 의한 화재일 경우에는 바람의 속도가 10 m/s일 때, 콘크리트 외벽에서 최대 617℃, 강재 지붕에서는최대 561℃의 온도분포를 보임으로써 강재 지붕에 가장 가혹한 바람의 속도임을알 수 있다. 또한, 이때에 강재 지붕의 온도가 안전 기준온도인 300℃(EN 1473)를 초과하였고, 콘크리트 벽체 또한 안전 기준온도인 500℃를 넘어 구조적 건전성이 위험한 수준으로 나타났다. 그림 2.14.25은 강재 지붕형 LNG 저장탱크에서 지붕 압력방출밸브 배관의 LNG 누출에 의한 화재가 2시간 동안 지속되었고, 바람의 속도는 10 m/s일 때 열-유동해석을 통한 대기의 온도분포를 나타낸 것이다.

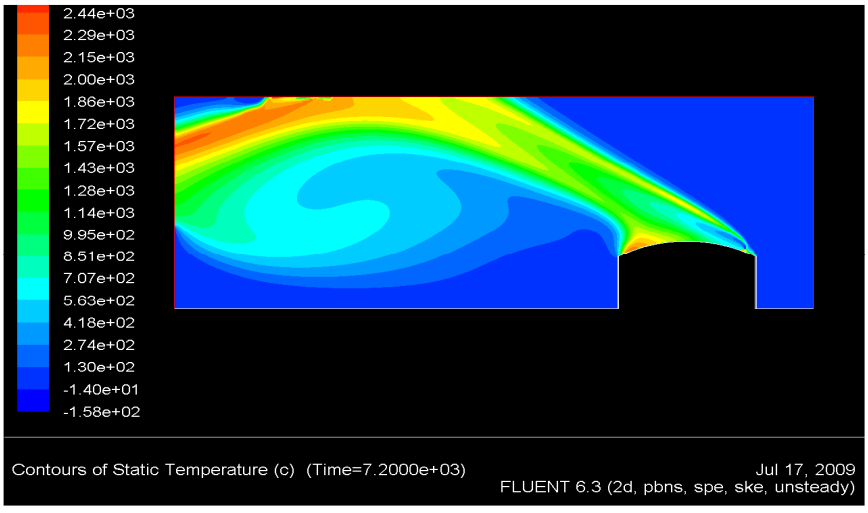



그림 2.14.25 시나리오 1에 의한 열유동 해석

② 강재 지붕형과 콘크리트 지붕형과의 온도 비교

앞서 살펴 본 바와 같이 지붕 압력방출밸브 배관의 LNG 누출에 의한 화재일 경우 가장 가혹한 바람의 속도인 10 m/s 일 때 강재 지붕형과 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크의 벽체 및 지붕 부위 온도분포를 그림 2.14.26 및 그림 2.14.27 비교하여 나타내었다.

그림 2.14.26 및 그림 2.14.27은 압력방출밸브(PSV) 화재 시 탱크 중심을 0으로 하여 탱크 좌우 X축상의 벽체 및 지붕의 온도 분포를 나타낸다. 이것을 통해서 벽체 및 지붕의 최고 온도와 열유속의 상대적인 영향을 파악할 수 있다.

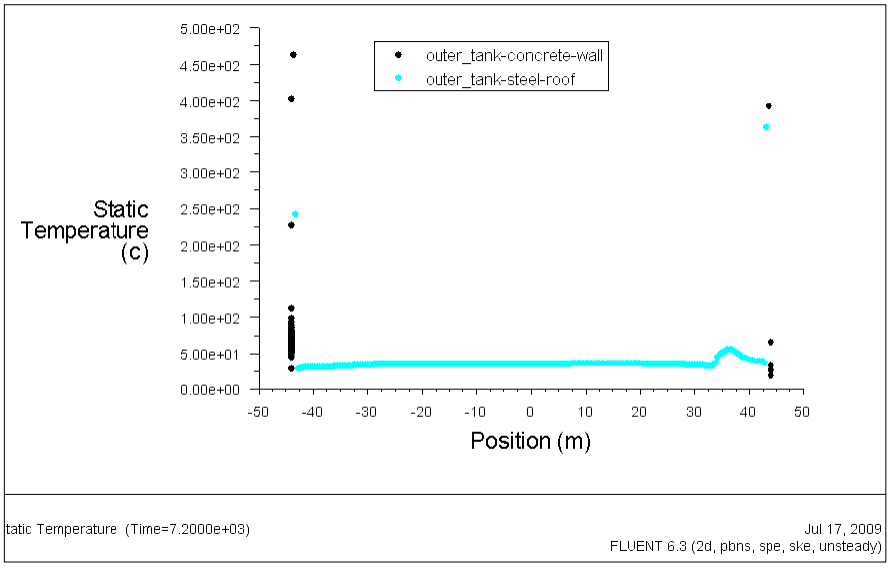



그림 2.14.26 강재 지붕형 저장탱크의 온도 분포

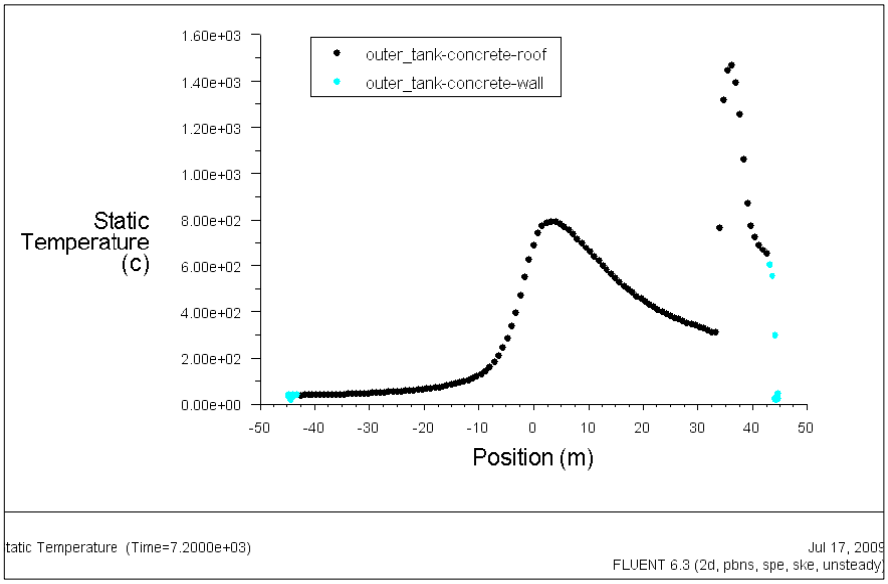



그림 2.14.27 콘크리트 지붕형 저장탱크의 온도 분포

위 그래프에서 보는 바와 같이 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 외벽 콘크리트의 최고 온도는

617℃, 강재 지붕의 최고 온도는 561℃를 나타내었고 콘크리트 지붕형 LNG 저장 탱크의 외벽 콘크리트 최고 온도는 1,392℃, 콘크리트 지붕의 최고 온도는 1,229℃를 나타내었다. 이는 근본적으로 강재 및 콘크리트 재료의 열전도도 차이에 기인하는 것으로 해석된다. 강재 지붕형 LNG저장탱크의 콘크리트 벽체 및 강재 지붕은 안전기준온도인 500℃와 300℃를 초과해서 구조물의 건전성에 위험한 수치임을 알 수 있다. 하지만, 콘크리트 지붕형의 지붕이나 외벽은 콘크리트의 안쪽에 있는 철근 위치에서의 온도가 철근의 강도에 영향을 미치는 온도인지 여부와 살수 설비 효과를 고려해야 하기 때문에 위험하다고 단정하기는 어렵다.

(나) 근접 저장탱크의 지붕 붕괴에 의한 화재

서로 근접한 LNG 저장탱크의 거리는 최소 탱크 직경의 1/4이 되어야 하며, 근접 탱크의 화재에 대해서도 안전성을 확보해야 한다. 근접탱크의 지붕 전체가 붕괴된 것으로 가정하고 LNG의 연소속도는 0.078 kg/m2/s, 연소 표면적은 5,863m$^2$, LNG 가스의 누출량은 457.3 kg/s, 그 온도는 115 K이다. 대기의 바람의 조건은 그림 2.14.28과 같이 화재가 발생한 탱크에서 건전한 탱크의 방향으로 불며 그 속도는 가장 가혹한 조건을 계산하여 고려하였다.

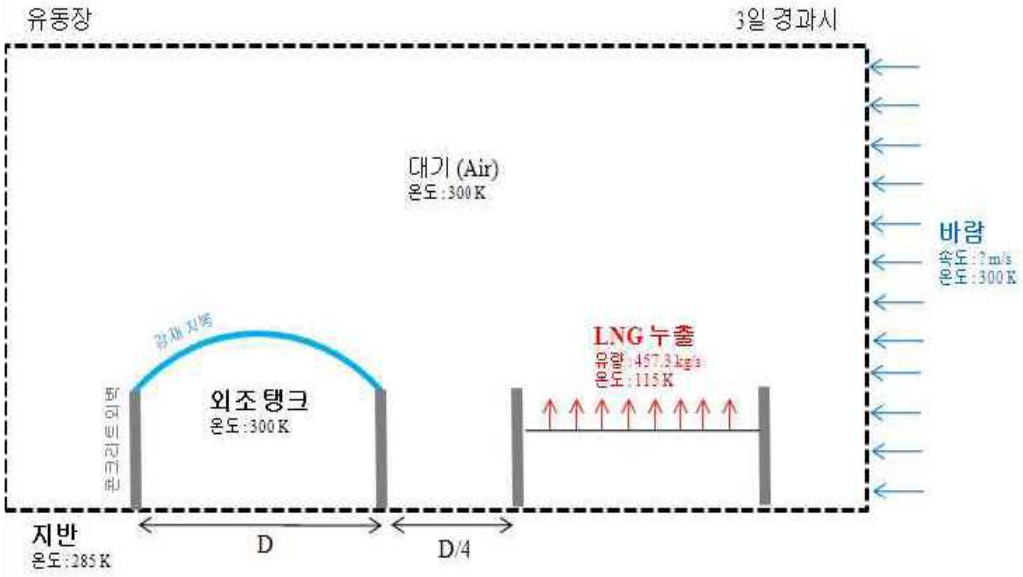



그림 2.14.28 지붕 붕괴에 의한 화재

① 바람의 속도에 대한 영향

그림 2.14.29와 같이 바람의 속도를 5, 10 및 15 m/s를 적용하여 콘크리트 외벽과 강재 지붕에 대해 그 온도를 살펴보았다. 그림과 같이 근접 저장탱크의 지붕 붕괴에 의한 화재일 경우에는 바람의 속도가 10 m/s일 때, 콘크리트 외벽에서 최대 1,723℃, 강재 지붕에서는 최대 832℃의 온도분포를 보임으로써 강재 지붕형 LNG 저장탱크에 있어 가장 가혹한 바람의 속도임을 알 수 있다. 또한, 이 때 강재 지붕과 콘크리트 벽체에서의 안전성 기준온도인 300℃와 500℃를 모두 초과해서 구조물 건전성에 위험한 수치임을 알 수 있다. 그림 2.14.30은 강재 지붕형 LNG 저장탱크에서 근접 저장탱크의 지붕 붕괴에 의한 화재가 3일 동안 지속되었고, 바람의 속도는 10 m/s일 때 열-유동해석을 통한 온도분포를 나타낸 것이다.

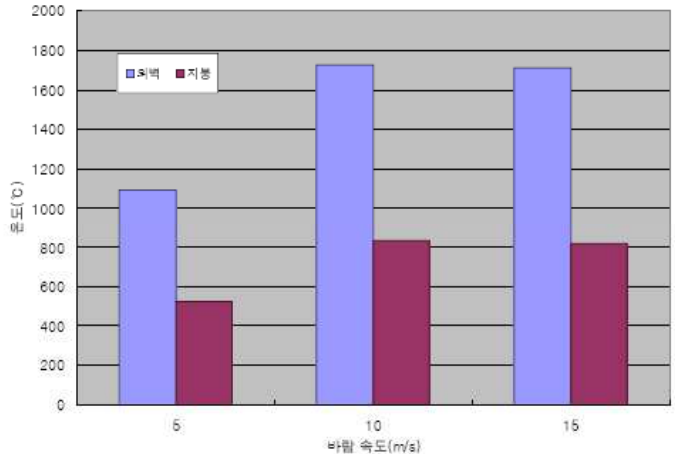



그림 2.14.29 바람 속도에 의한 외벽과 지붕의 온도

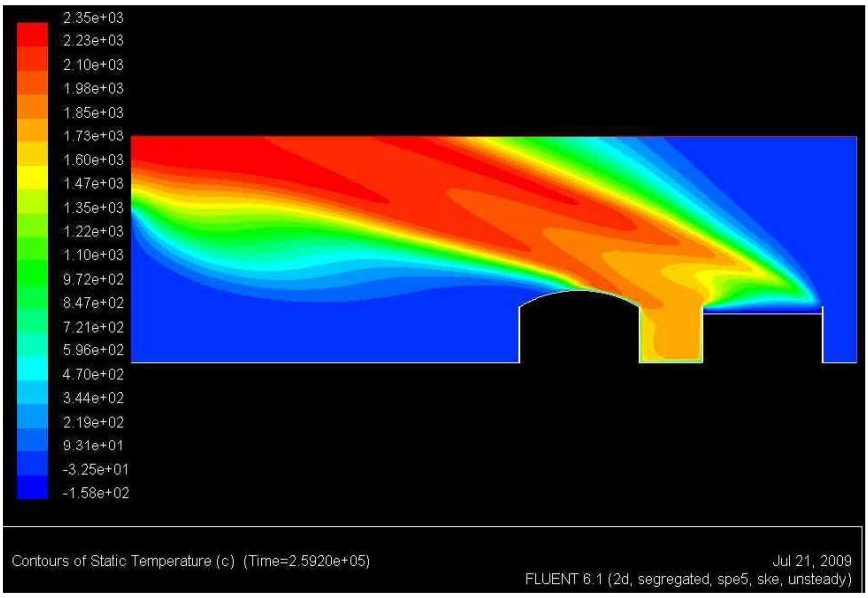



그림 2.14.30 시나리오 2에 의한 열유동 해석

② 강재 지붕형과 콘크리트 지붕형과의 온도 비교

가장 가혹한 바람의 속도인 10 m/s일 때, 강재 지붕형과 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크의 온도를 비교하였다. 그림 2.14.31 및 그림 2.14.32와 같이 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 콘크리트 외벽의 최고 온도는 1,723℃, 강재 지붕의 최고 온도는 832℃를 나타내었다. 반면, 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크의 경우 콘크리트 외벽의 최고온도는 1,543℃, 콘크리트 지붕의 최고온도는 1,418℃로 강재와 콘크리트재의 열전도도 차이에 의해 지붕부에서의 온도 차이가 현저함을 알 수 있다.

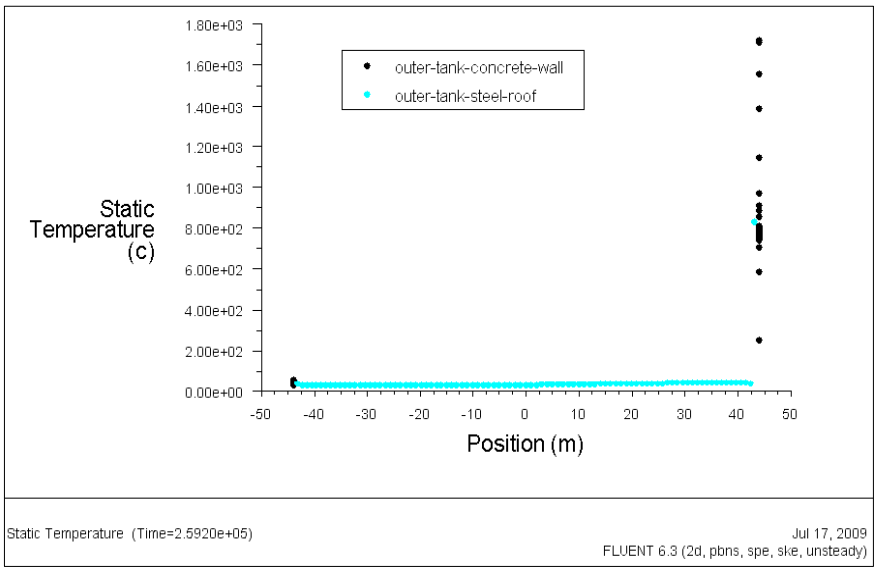



그림 2.14.31 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포

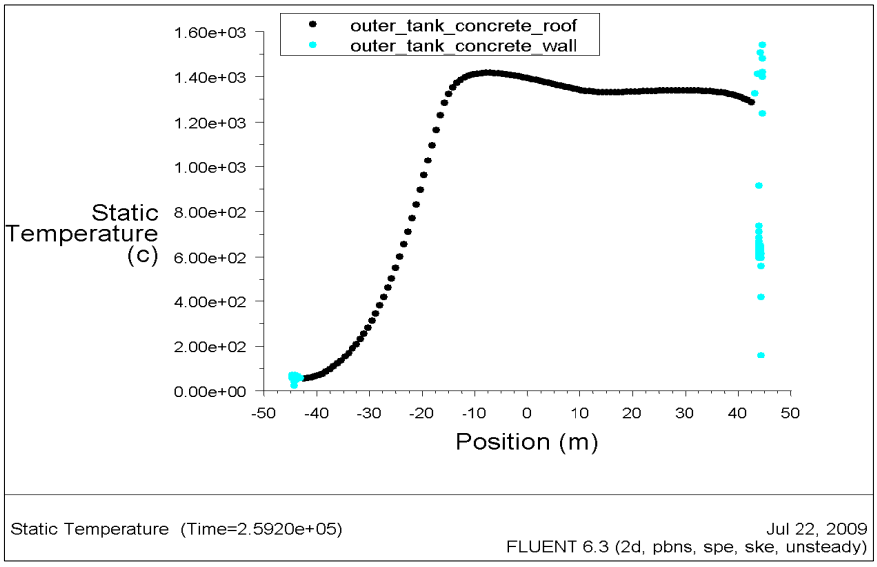



그림 2.14.32 콘크리트 지붕형 저장탱크의 온도분포

위 그래프에 나타난 것과 같이 강재 지붕형 탱크의 콘크리트 벽체는 화재로부터 열이 전달되는 탱크 우측 상단부에서 최고 온도를 나타내었고 강재 지붕 역시 우측 콘크리트 벽체와 연결되는 부위에서 최고 온도를 나타내었다.

(다) 1차 펌프 토출 배관 파단에 의한 풀 화재

그림 2.14.33은 저장탱크 외벽에 설치된 펌프 토출 배관의 파단에 의한 액상의 LNG 풀 화재를 도식화한 것이다.

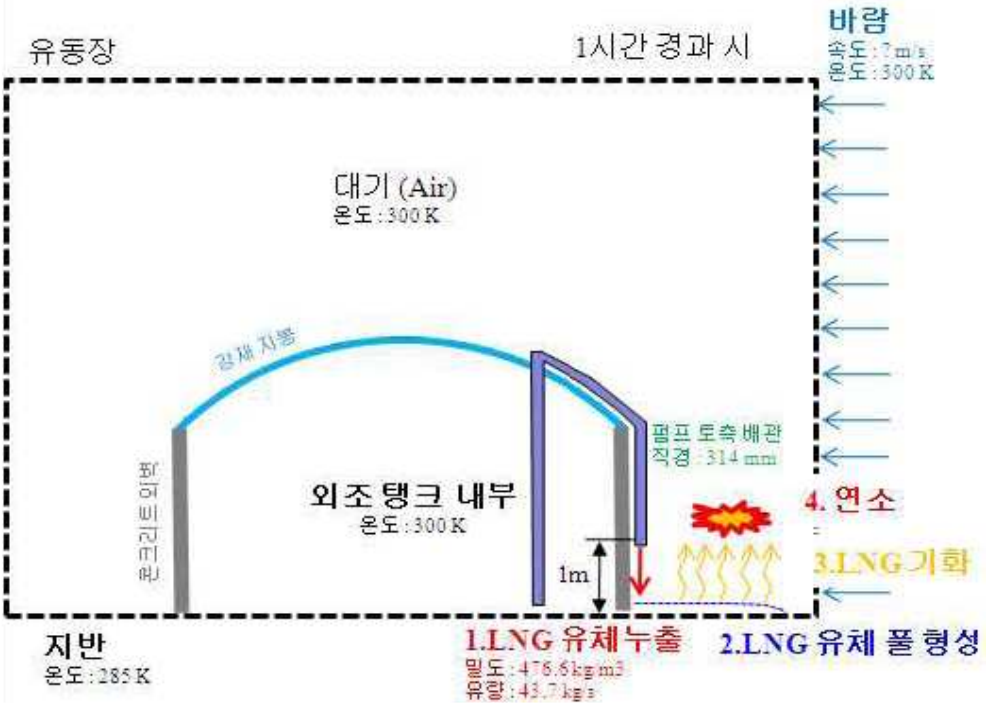



그림 2.14.33 펌프 토출 배관 파단에 의한 화재

LNG 액상(온도: 111 K, 유량: 43.7 kg/s)이 외벽 펌프(직경: 314 mm)를 통해 누출되며 지상에 액상 풀을 생성하게 된다. 이 액상 풀은 기화하여 공기 중의 산소와 만나 연소되게 된다. 최대 풀의 반경은 다음과 같다.

$$rb = \sqrt{\frac{W_f}{me\pi}} = \sqrt{\frac{43.7}{0.078\pi}} = 13.35\,m$$

이때, $W_f$는 액상성분의 누출속도(kg/s)이며, br은 물질의 연소속도(kg/㎡ s)이다. 대기 조건에서 바람은 탱크를 향해 부는 것이 가장 가혹한 조건일 것이며, 이때 바람의 속도는 LNG 저장탱크에 가장 큰 영향을 미치는 속도를 계산하였다. 이 시나리오는 LNG 누출이 1시간 동안 지속되었다는 가정 하에 1시간 후의 강재 지붕과 콘크리트 외벽의 온도와 화재 안전성 기준과의 비교를 통해 안전성 검토가 이루어진다.

① 바람의 속도에 대한 영향

따라서, 그림 2.14.34과 같이 바람의 속도를 2, 5, 10, 15 및 20 m/s를 적용하여 콘크리트 외벽과 강재 지붕에 대해 그 온도를 살펴보았다. 그림과 같이 외벽에 설치된 펌프 토출 측 배관의 LNG 누출에 의한 화재일 경우에는 바람의 속도가 15 m/s일 때 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 콘크리트 외벽에서 최대 570℃, 강재 지붕에서는 최대 325℃의 온도분포를 보임으로써 가장 가혹한 바람의 속도임을 알 수 있다. 또한, 이때에 강재 지붕과 콘크리트 외벽은 안전 기준온도인 300℃와 500℃를 넘어 위험한 것임을 알 수 있다.

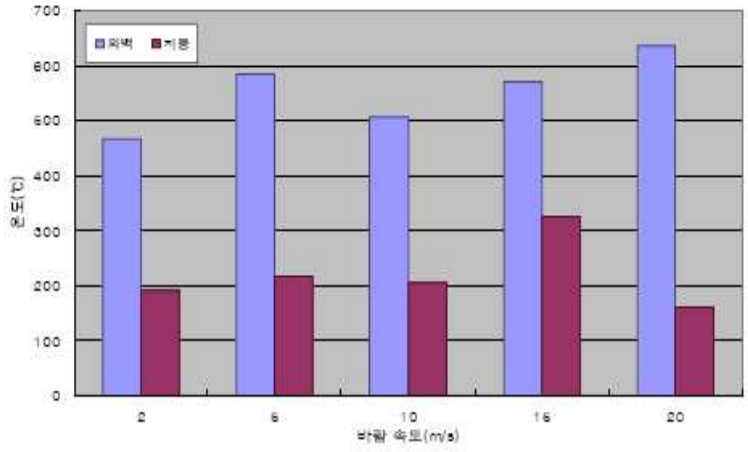



그림 2.14.34 바람 속도에 의한 외벽과 지붕의 온도

② 강재 지붕형과 콘크리트 지붕형과의 온도 비교

저장탱크 외벽에 설치된 펌프 토출 측 배관의 LNG 누출에 의한 화재일 경우가장 가혹한 바람의 속도인 15 m/s일 때, 강재 지붕형과 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크의 온도를 비교하였다. 그림 2.14.33 및 그림 2.14.34와 같이 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 콘크리트 외벽의 최고 온도는 570℃, 강재 지붕의 최고 온도는 325℃를 나타내었다. 반면, 콘크리트 지붕형 LNG 저장탱크의 콘크리트 외벽의 최고 온도는 789℃, 콘크리트 지붕의 최고 온도는 1,238℃로 강재 지붕형 LNG 저장탱크에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이는 강재와 콘크리트 재료의 열전도도 차이에 기인하는 것으로 분석된다.

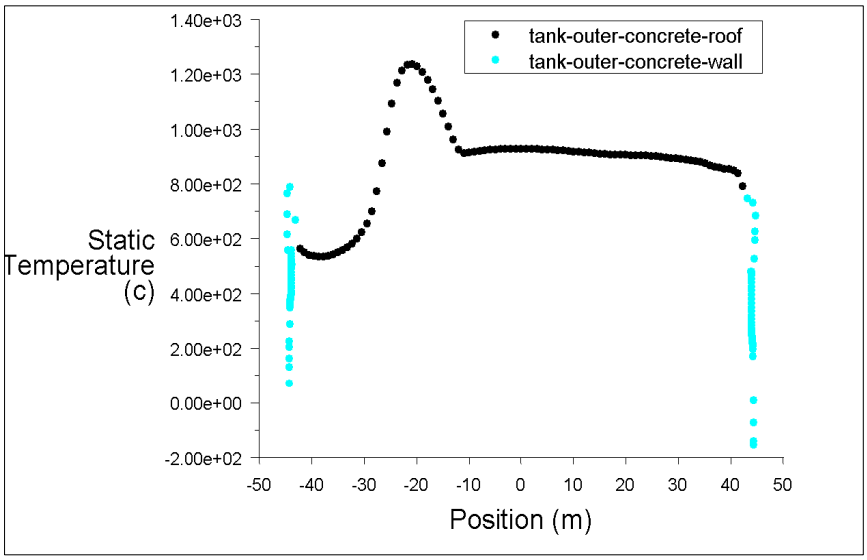



그림 2.14.35 콘크리트 지붕형 저장탱크의 온도분포

(라) 번아웃(burn-out)

'번아웃' 이라 불리는 화재 시나리오는 지붕이 일시적인 붕괴에 의해 더 이상 존재하지

않아 LNG의 유체가 대기와 만나 연소하면서 LNG의 수면이 점점 줄어드는 것이다(그림 2.14.35). 보통 LNG 유체가 다 연소되기까지의 기간은 3일 정도이며, 이 기간 동안 콘크리트 외벽은 LNG 유체를 담고 있어야만 한다. 하지만, 열응력에 의해 콘크리트 외벽은 점차 붕괴될 것이고, 그 붕괴속도가 LNG 유체가 줄어드는 속도보다는 적어야만 할 것이다. 여기서는 콘크리트 외벽이 LNG 유체를 안전하게 담을 수 있기 위해서 LNG 유면에서 2 m 높이가 되는 콘크리트 외벽이 안전한지를 검토한 것이다.

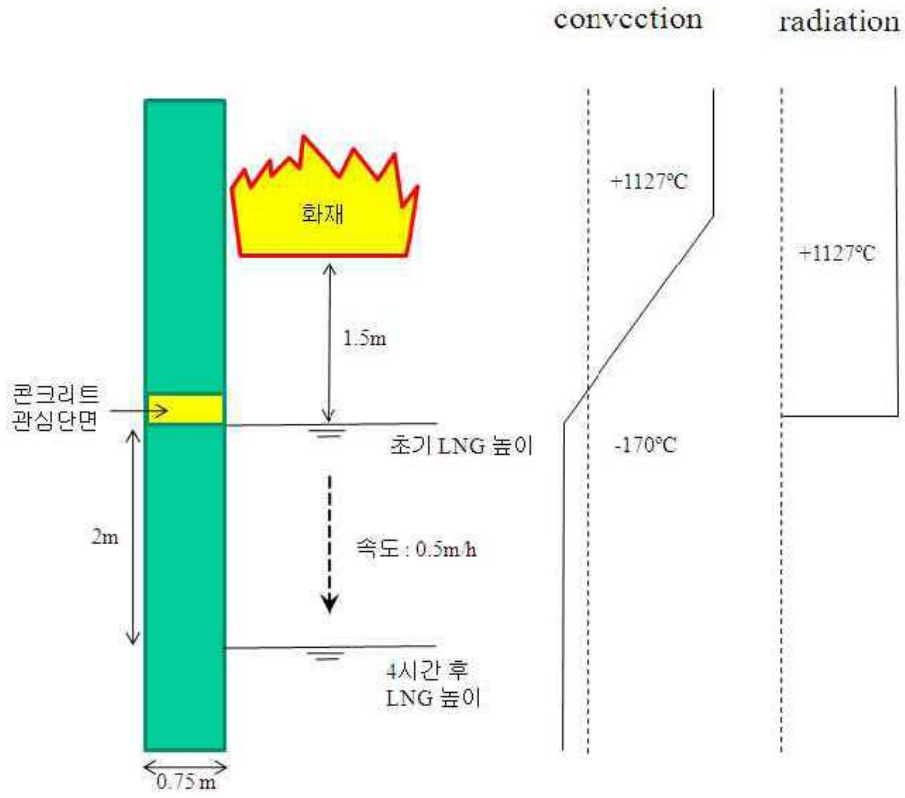



그림 2.14.36 Conditions of burn-out

콘크리트의 물성치는 번아웃이 되는 동안 일정하다고 가정하였으며, 그 값은 다음과 같이 정하였다.

(1) 비열(specific heat), c = 1,000 J/kgk
(2) 열전도도(thermal conductivity), k = 1.6 W/mk
(c) 밀도(dencity), rho = 2,300 kg/$m^3$

번아웃에 대해 요약하면 그림 2.14.36과 같이 화재는 LNG 유면에서부터 1.5 m 위에서 발생하며 화재의 온도는 1,127℃, LNG의 온도는 -170℃이다. 초기 LNG 높이에서 시간이 흘러 그 높이가 2 m 줄어들었을 때, 초기 LNG 높이에 해당하는 콘크리트 단면(그림에서 콘크리트 관심단면을 의미)이 붕괴되지 않아야 한다. 현재 설계된 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 LNG 최대 설계 높이는 36.22 m이고, 3일(72 시간)동안 모든 LNG 유체가 타 사라지게

되므로 LNG 유체가 줄어드는 속도는 근사적으로 36.22 m / 72 h = 0.5 m/h 가 된다. 또한 LNG가 2 m정도 줄어드는데 필요한 시간은 2 m / 0.5 m/h = 4.0 h 이 된다.

그림 2.14.36과 같이 대류조건에서 주변 온도 값은 화재발생지점에서 1,127℃이고, LNG 가 -170℃이며 그 사이는 선형적으로 변화한다. 또한 대류 열전달 계수는 대기의 자연대류 조건인 h =10 $W/m^2$ k로 하였다. 복사조건에서 온도는 LNG 유면 위로부터 1,127℃로 하였다. 대류와 복사조건은 시간에 따라 그 지점이 변화하게 되므로 열전달 과도해석을 통해 해석해야만 한다. 최종적으로 4시간이 흐른 후, 초기 LNG 높이의 콘크리트 외벽단면의 온도분포를 계산한 뒤 프리스트레스를 위해 존재하는 철근 위치에서의 온도가 철근의 물성 변화를 주지 않는 범위 내에 존재하면 안전하다 할 것이다.

본 연구에서는 Ansys에서 4개의 절점을 갖는 열전달 해석이 가능한 plane 요소를 사용하여 과도 열전달해석을 수행하였다. 이때, 요소의 크기는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다. 그림 2.14.37부터 그림 2.14.40에는 1시간에서 4시간이경과한 뒤 콘크리트 외벽 전체의 온도를 나타낸 것이다.

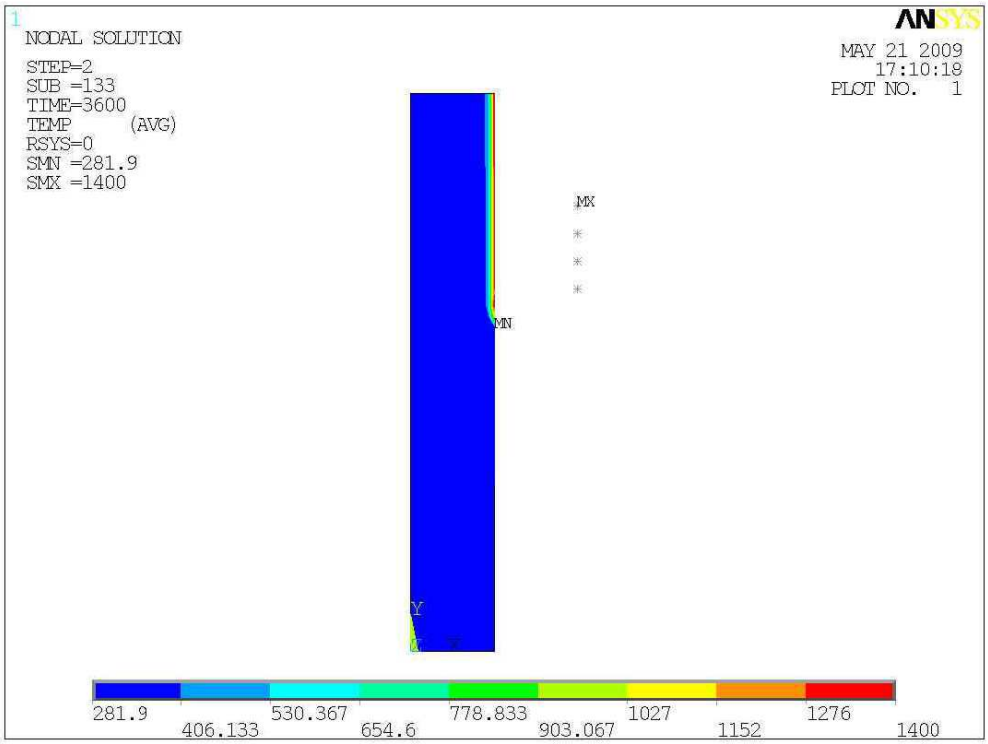



그림 2.14.37 시나리오 4의 열유동 해석 (after 1 hour)

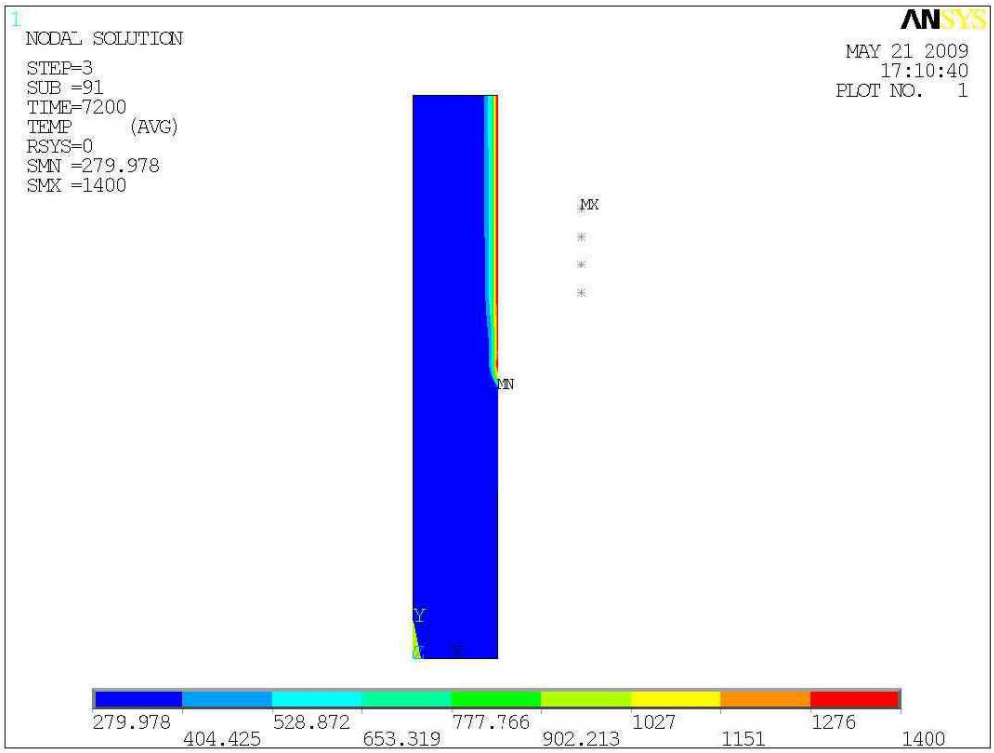



그림 2.14.38 시나리오 4의 열유동 해석 (after 2 hour)

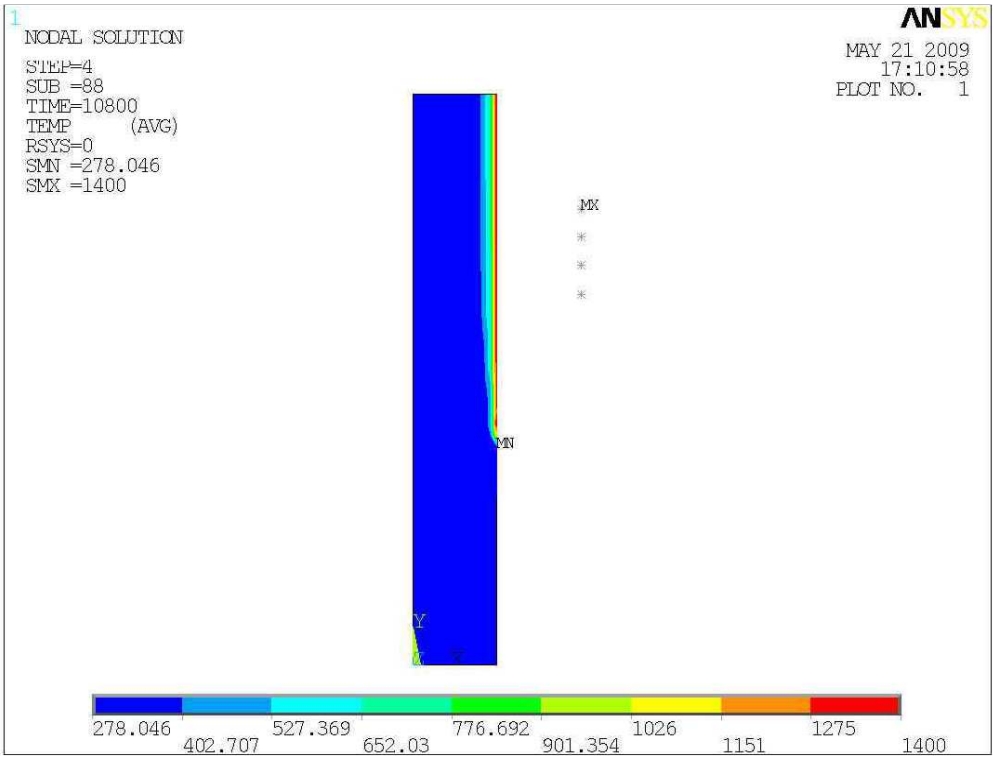



그림 2.14.39 시나리오 4의 열유동 해석 (after 3 hour)

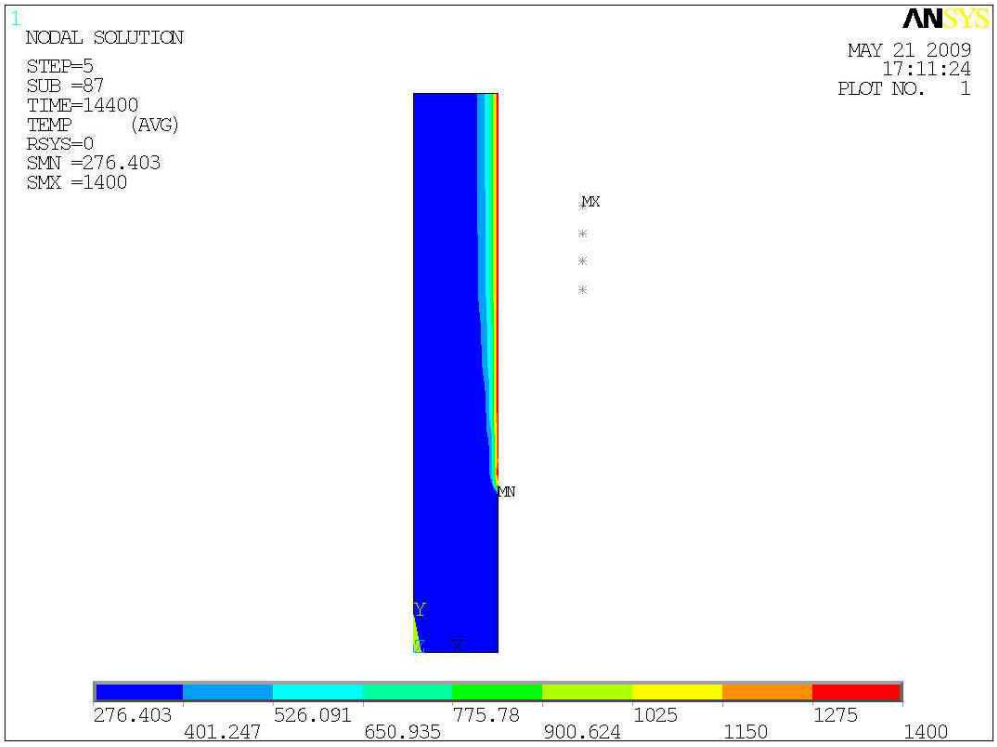



그림 2.14.40 시나리오 4의 열유동 해석 (after 4 hour)

표 2.14.15은 과도열전달해석에 의한 시간변화에 따른 온도분포를 나타내었다.

표 2.14.15 과도열전달해석에 의한 온도분포

| 연소 1시간 경과 | | 연소 2시간 경과 | | 연소 3시간 경과 | | 연소 4시간 경과 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| r (m) | Temp (℃) | r (m) | Temp (℃) | r (m) | Temp (℃) | r (m) | Temp (℃) |
| 0.00 | 300.00 | 0.00 | 300.00 | 0.00 | 300.00 | 0.00 | 300.00 |
| 0.05 | 300.00 | 0.05 | 300.00 | 0.05 | 300.00 | 0.05 | 300.00 |
| 0.10 | 300.00 | 0.10 | 300.00 | 0.10 | 300.00 | 0.10 | 300.00 |
| 0.15 | 300.00 | 0.15 | 300.00 | 0.15 | 300.00 | 0.15 | 300.01 |
| 0.20 | 300.00 | 0.20 | 300.00 | 0.20 | 300.00 | 0.20 | 300.03 |
| 0.25 | 300.00 | 0.25 | 300.00 | 0.25 | 300.01 | 0.25 | 300.12 |
| 0.30 | 300.00 | 0.30 | 300.00 | 0.30 | 300.06 | 0.30 | 300.40 |
| 0.35 | 300.00 | 0.35 | 300.01 | 0.35 | 300.26 | 0.35 | 301.29 |
| 0.40 | 300.00 | 0.40 | 300.08 | 0.40 | 300.99 | 0.40 | 303.82 |
| 0.45 | 300.00 | 0.45 | 300.45 | 0.45 | 303.50 | 0.45 | 310.42 |
| 0.50 | 299.99 | 0.50 | 302.23 | 0.50 | 311.12 | 0.50 | 326.01 |
| 0.55 | 300.05 | 0.55 | 309.42 | 0.55 | 331.45 | 0.55 | 358.97 |
| 0.60 | 301.51 | 0.60 | 333.38 | 0.60 | 377.89 | 0.60 | 420.35 |
| 0.65 | 318.38 | 0.65 | 401.07 | 0.65 | 469.30 | 0.65 | 522.12 |
| 0.70 | 460.20 | 0.70 | 594.10 | 0.70 | 662.81 | 0.70 | 711.94 |
| 0.75 | 1327.60 | 0.75 | 1296.70 | 0.75 | 1311.70 | 0.75 | 1322.90 |

4. LNG 저장탱크 외조의 특수하중 해석 결과의 고찰

가. 충돌하중에 대한 해석 결과의 고찰

유한요소해석 프로그램을 사용하여 LNG 저장탱크 외조 벽체에 대한 비산물체 충돌을 모사하고 해석을 실시하였다. 저장탱크 외조 벽체의 설계에 따라 충돌에 가장 취약할 것으로 예상되는 두 위치를 선정하였으며, 다음은 두 시나리오의 비교 분석을 통한 해석의 평가 내용이다.

(1) 충돌에 대한 LNG 저장탱크 외조의 거동 응답 분석

(가) 시나리오 1과 2의 응력 거동 비교

미사일의 충돌에 의해 저장탱크 외조 벽면에 국소적으로 발생한 집중 응력은 벽면을 따라 구조물 전체로 퍼져나가며 소산되는 것을 확인할 수 있었다. 이때 충격파의 형태로 전파되는

응력은 충돌시의 응력에 비해 현저히 작으므로 벽체에 큰 변형을 일으키지 않는다. 하지만 여기서 주목해야 할 점은 시나리오 1(h = 30 m)에 비해 시나리오 2(h = 15 m)의 경우 훨씬 큰 응력이 발생했다는 것이다. 이는 해석 수행 전 예상했듯이 벽체 하부의 경우 강성이 큰 바닥판에 고정되어 있으며 벽체 상부에 비해 훨씬 많은 텐던의 배치가 이루어져 있어 충돌 하중과 같이 큰 하중이 가해졌을 시 더 취약한 것으로 판단된다.

그림 2.14.41과 그림 2.14.42는 시간 이력에 따라 벽체에 발생한 최대 응력을 나타낸 그래프로 시나리오 1의 경우 순간적으로 발생한 최대 응력이 콘크리트 재료의 설계 강도인 50 MPa보다 작아 벽체에 큰 손상을 발생시키지 않을 것으로 예상되나, 시나리오 2의 경우 순간적으로 최대 응력이 100 MPa에 가까이 나타났으므로 충돌로 인한 벽체 손상이 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 물론 외조 벽체는 철근 및 강선으로 단단히 보강되어 있으며 특히 벽체 하부의 경우 그 두께가 750mm이상으로 충분한 안전성을 확보하고 있지만, 이번 해석에서 사용한 시나리오 보다 훨씬 큰 충돌 하중이 발생할 시에는 구조적 결함을 줄 수 있는 큰 손상이 예상되므로 벽체의 설계 시 충돌 하중에 대한 구조적 안전성을 확보하기 위한 기준 설립이 필요할 것으로 판단된다.

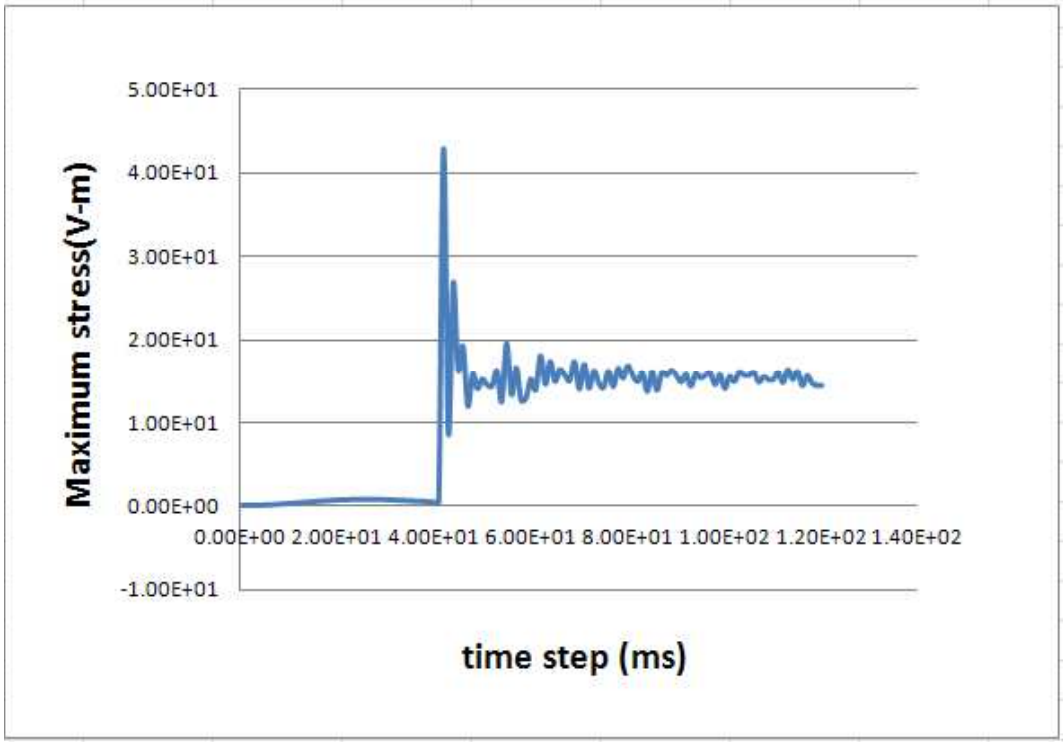



그림 2.14.41 시간 이력에 따른 최대 응력 (시나리오 1)

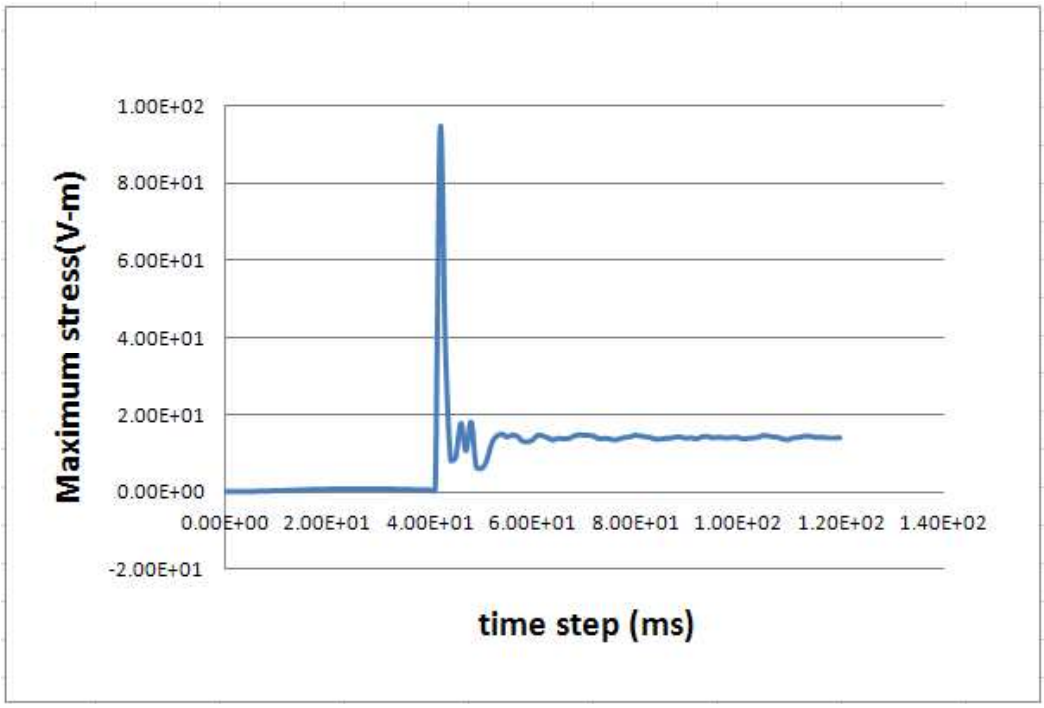



그림 2.14.42 시간 이력에 따른 최대 응력 (시나리오 2)

(나) LNG 저장탱크 외조의 부위별 가속도 응답

그림 2.14.44와 그림 2.14.45는 각 시나리오 별 A, B, C, 위치에서의 시간이력에 따른 가속도 그래프로 충돌 위치인 A는 충돌 순간 급격히 가속도가 증가하였다가 응력이 퍼져 나가면서 가속도가 현저히 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 가속도 도달 시점이 A, B, C의 순서로 나타나는 것으로 응력의 전달을 확인할 수 있으며, 그래프의 모양으로 보아 충격파는 미세한 진동의 형태로 전달되며 이 때 전달되는 응력은 A, B, C 순으로 점차 줄어든다는 것을 알 수 있다. 이러한 벽체 부위별 가속도 응답들은 충돌 시 내부 기기의 안전성 평가에 유용하게 사용될 수 있을 것이라 생각된다.

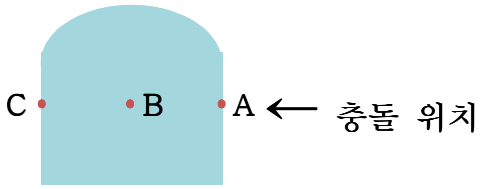



그림 2.14.43 A, B, C 의 위치

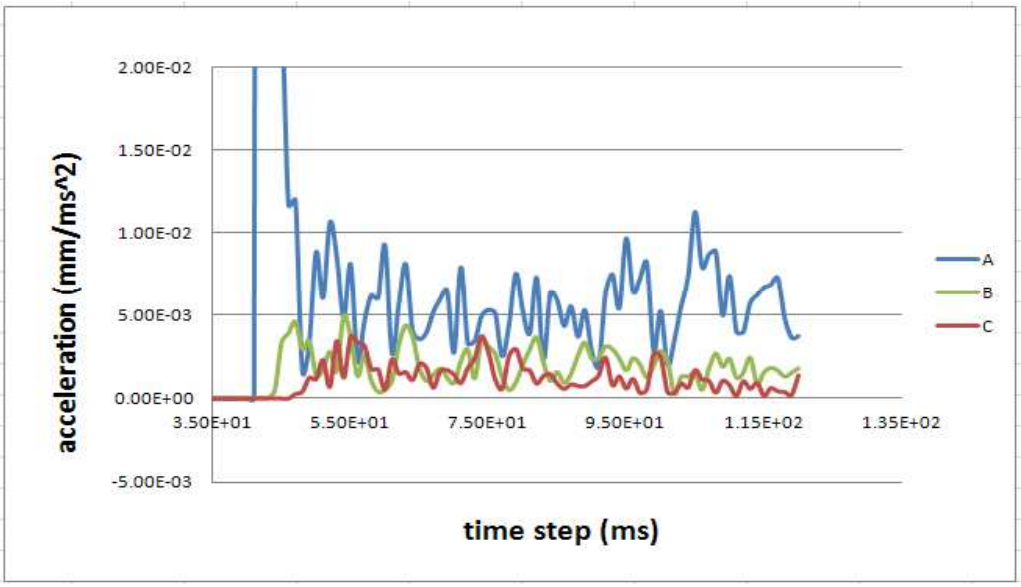



그림 2.14.44 시간 이력에 따른 가속도 응답 (시나리오 1)

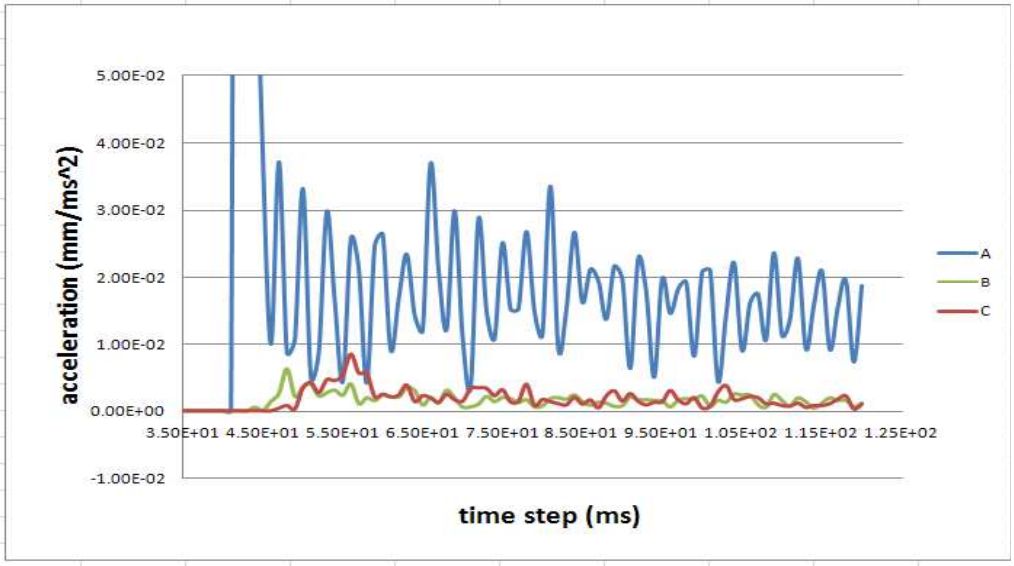



그림 2.14.45 시간 이력에 따른 가속도 응답 (시나리오 2)

(다) 충돌에 의한 주요 손상 부위 예측

또한 그림 2.14.46과 그림 2.14.47은 콘크리트 벽체의 소성 변형률(plastic strain) 분포를 나타낸 것으로 충돌 시 벽체의 주요 손상 부위를 예측할 수 있는 근거로 활용될 수 있을 것이다.

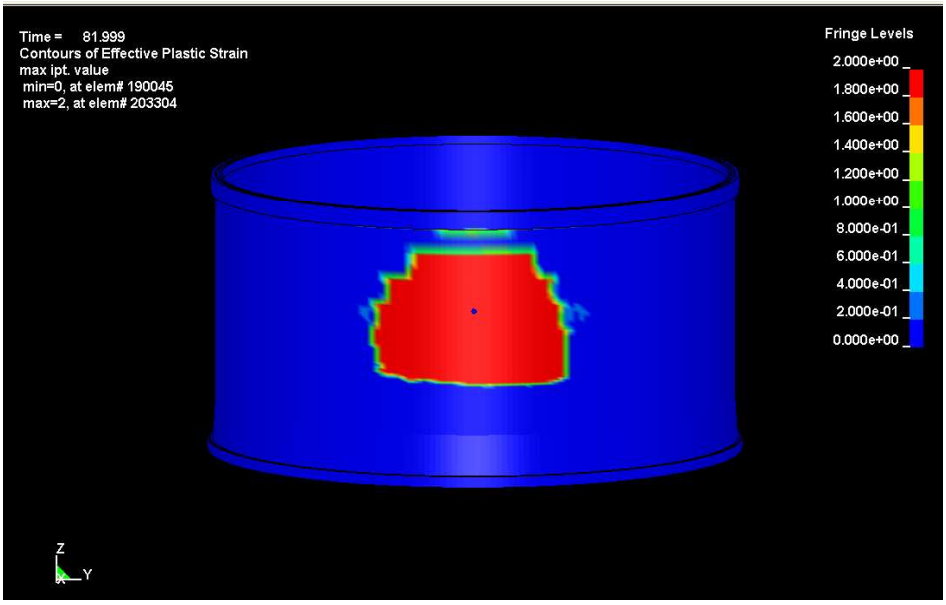



그림 2.14.46 충돌에 의한 소성 변형률 분포 (시나리오 1)

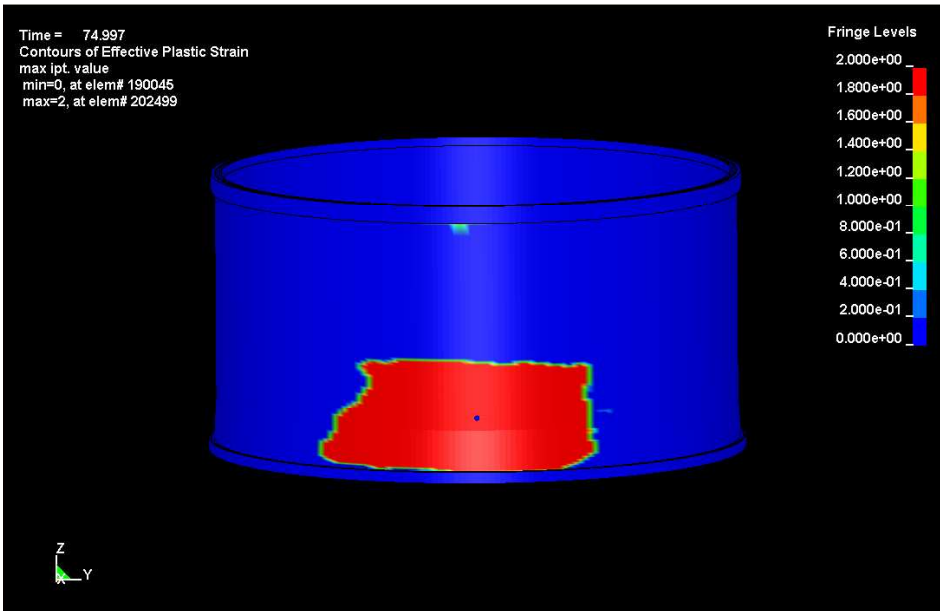



그림 2.14.47 충돌에 의한 소성 변형률 분포 (시나리오 2)

(라) 시간이력에 따른 최대변위

그림 2.14.48은 시나리오 1과 2의 시간이력에 따른 최대변위 비교를 위한 것으로 벽체 중간부인 30 m의 높이에 충돌시킨 경우 충돌 발생 즉시 최대 변위가 약 4mm 발생하였으며, 0.5mm의 매우 미소한 잔류변위가 남아있음을 알 수 있다. 벽체 하부인 15 m 높이에 충돌시킨 경우 역시 충돌 발생 즉시 최대 변위가 발생하여 그 크기는 약 6.32 mm 이며, 최종적으로 약 1 m정도의 잔류변위를 관찰할 수 있다. 시나리오 2의 경우가 1의 경우에 비해 최대변위 및 잔류 변위에서 모두 두 배 가까운 수치를 보이고 있으므로 최대 변위의 발생 차이를 통해서도 저장탱크 외조 벽체 하부면의 취약성을 확인할 수 있다.

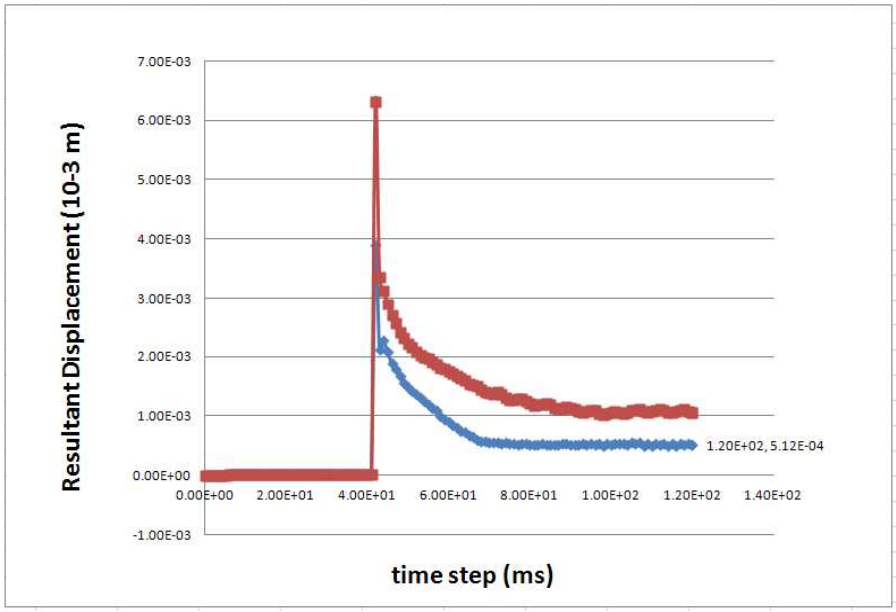



그림 2.14.48 시간 이력에 따른 최대 변위 (시나리오 1, 2)

하지만 시나리오 1과 2의 경우 모두 변위의 크기는 저장탱크 전체 크기에 비해 매우 작은 수준이므로 구조물 자체의 안전성에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 순간적으로 큰 힘이 작은 충돌면에 집중 발생하므로 국부적 손상이 발생할 가능성이 있을 것으로 보이기는 하나, 해석에 사용된 LNG 저장탱크 외조 벽체는 기존 설계 단계에서 요구되는 기준인 충돌하중에 대한 국부적 천공 안전성 기준을 만족(2.3.1.절 참고)하고 있다. 따라서 본 연구에 사용된 시나리오 상의 충돌하중에 대해서는 구조물이 국부적·구조적 안전성을 모두 충분히 확보하고 있는 것으로 판단된다.

(2) 해석 결과에 대한 신뢰성 검토

(가) 충돌 과정의 에너지 흐름을 통한 신뢰성 검토

충돌 해석에 있어서 충돌 전 비산물체의 운동에너지를 total energy로 볼 수 있는데, 일반적으로 충돌이 발생하게 되면 운동에너지는 충돌에너지, 마찰에너지, 열에너지 등으로 손실이 발생하게 되며 나머지는 그 나머지는 비산물체의 잔류 운동에너지로 남게 된다. 그리고 이 때 에너지 보존법칙에 의하여 충돌 후의 충돌에너지, 마찰에너지, 열에너지, 잔류 운동에너지의 총 합은 충돌 전 운동에너지와 같게 된다. 충돌모사에 있어서 운동에너지와 내부에너지의 상관관계는 매우 중요하다. 따라서 본 연구의 에너지 흐름을 통해 해석 결과에 대한 신뢰성을 검토해 보고자 한다.

그림 2.14.49는 시나리오 2의 시간 이력에 따른 에너지 흐름을 나타낸 에너지 곡선이다. 여기에서도 충돌 전 total energy는 비산물체의 운동에너지이며 충돌이 일어남과 동시에 에너지의 손실이 일어나며 비산물체의 운동에너지가 감소하는 모습을 볼 수 있다. 이때 줄어든 운동에너지는 충돌에너지로 볼 수 있으며 충돌에너지는 LNG 저장탱크 외조 벽체에 국부적

손상 및 변형을 일으키며 내부 에너지로 전환되어 흡수된다는 것을 충돌 시 내부에너지의 증가 흐름을 통해 알 수 있다.

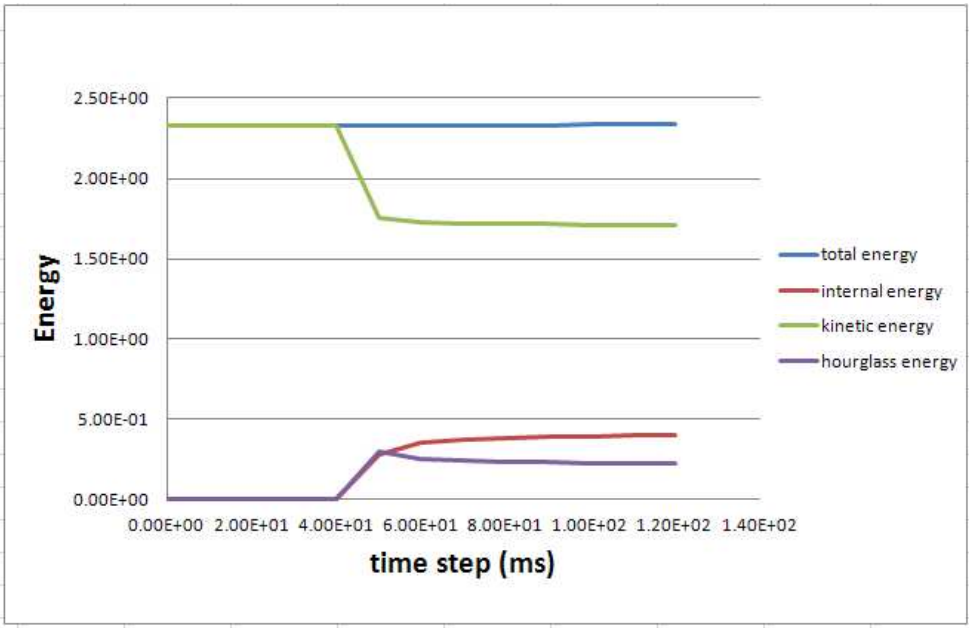



그림 2.14.49 시간 이력에 따른 에너지 흐름 곡선

유한요소해석 시 물체의 전체 반응보다 높은 frequency에서 진동하는 zero- energy mode, 즉 변형에너지 없이도 변형이 발생되는 hourglass mode 가 발생하게 되며 이러한 모드의 발생을 억제하기 위해 가상의 에너지가 적용되는데 이 에너지를 hourglass energy라고 한다. 충돌모사에 있어서 내부에너지의 계산은 변형에너지와 이 hourglass energy의 합으로 계산되므로 비정상적인 충돌 모사인 경우 내부에너지는 증가하게 된다. 따라서 과도한 hourglass energy로 인해 총에너지가 증가하게 되면 충돌 해석의 정확성이 떨어진다는 것을 의미하게 되는 것이다. Zaouk et al.(1996)와 Sherifet et al.(2008)에 의한 연구에 따르면 총에너지에 대한 hourglass energy가 적게 발생하였다면 해석 결과의 신뢰도가 높으며, 일반적으로 hourglass energy가 total energy의 10% 이내이면 비교적 신뢰할 수 있는 해석 결과라고 판단 할 수 있다.

그림 2.14.49의 에너지 흐름 곡선을 통해서도 본 충돌 해석에서 hourglass energy가 발생하였음을 확인할 수 있는데, total energy에 대한 hourglass energy의 비율은 약 9.66% 정도로 본 연구에서의 충돌 해석은 비교적 신뢰할 만한 수준임을 알 수 있었다.

(나) LS-DYNA를 통한 충돌 해석 신뢰성 검증

충돌 해석의 경우 선행되어진 해석의 사례가 많지 않아 해석 결과를 비교해 보기 어렵고, 실제 충돌 실험 데이터의 확보가 힘들기 때문에 해석에 대한 신뢰성을 확보하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서 충돌 해석을 위해 사용한 범용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA의 신뢰성을 제고하기 위해 다음과 같은 간단한 충돌 해석을 수행해 보았다.

표 2.14.16과 그림 2.14.50에 신뢰성 검증을 위해 수행한 충돌 해석에 대한 개요 및 유한 요

소 모델링 모습을 나타내었다.

표 2.14.16 충돌 해석 개요

| | |
|---|---|
| 벽체 ($m^3$) | 1.0 x 10.0 x 15.0 |
| 비산물체 (m) | dia. 1.0 |
| 탄성계수 ($N/m^2$) | 2.1 e^9 |
| 단위질량 ($kg/m^3$) | 1200.0 |
| 충돌속도 (m/s) | 5 |
| 충돌각도 ( ° ) | 90 |
| material | rigid material |
| Boundary condition | all fixed |

본 충돌 해석 검증 모델링에서는 탄성충돌을 유도하기 위해 벽체 요소를 rigid material을 이용하여 모델링함으로써 두 물체에 충돌로 인한 응력과 변형의 발생을 방지하였으며, 충돌된 전후의 비산물체의 속도 변화 여부를 비교하기 위해 벽체의 경계는 모두 고정시켜 해석을 진행하였다.

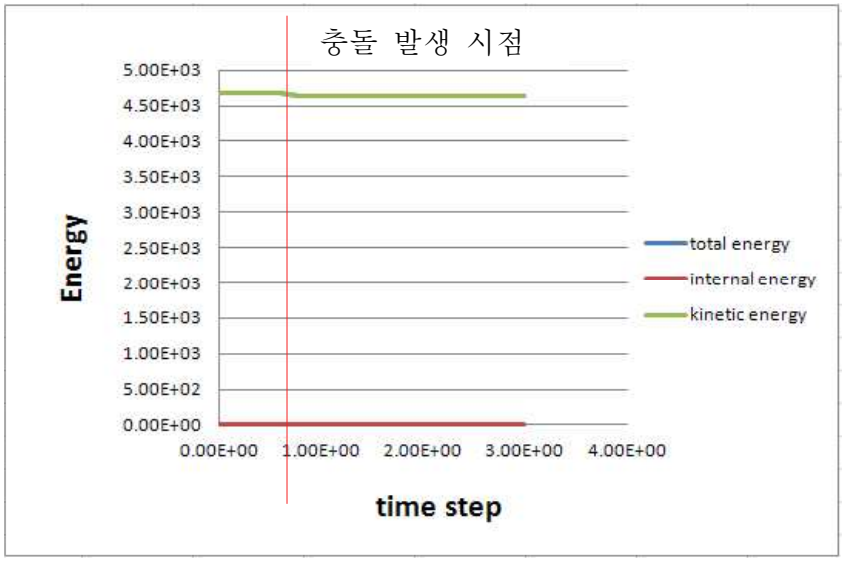



그림 2.14.50 시간 이력에 따른 에너지 흐름 곡선

그림 2.14.50은 해석 결과 에너지 흐름 곡선을 나타낸 것이다. 충돌 전 total energy는 비산물체의 운동에너지와 같으며, 위 그래프로는 분간하기 어렵지만 실제 수치를 보면 비산물체의 운동에너지는 충돌이 발생하면서 근소한 감소를 보이며 그와 동시에 내부에너지가 발생하였다. 그 이유는 해석 전 충돌 시나리오로 탄성충돌을 유도 했었으나 비산물체의 요소 모

델링 시 elastic material을 사용하였기 때문에 충돌 과정 중 비산물체에 응력이 발생하며 변형을 일으켰고, 이로 인해 운동에너지가 충돌 전 후 완벽하게 보존되지 못하고 약간 감소하는 모습을 보인 것으로 판단된다.

충돌 시 internal energy는 강체 요소로 모델링 된 벽체에서는 전혀 발생하지 않고 비산물체에서만 발생하였는데, 이를 통해 충돌에너지가 비산물체의 내부에너지로 흡수되며 비산물체에 변형을 일으킨 것을 알 수 있었  다.

본 충돌 해석을 통해 충돌 전 후의 운동에너지는 다소 차이를 보였으나 그 차이는 0.4% 차이로 매우 근소하였으며, 강체로 모델링 한 벽체에서는 어떠한 에너지(내부· 운동에너지)도 나타나지 않았으므로 충돌로 인한 에너지 감소는 비산물체의 변형에 따른 내부에너지 발생 때문임을 입증해 보일 수 있었다. 따라서 본 검증 해석을 통해 LS-DYNA 프로그램을 통한 모델링은 신뢰성을 확보하고 있음을 판단할 수 있다.

아래는 우리가 알고 있는 운동에너지 공식을 통해 계산된 운동에너지 값과 유한요소해석을 통해 나온 운동에너지 값을 비교해 본 것이다.

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

여기서, $E_k$ = kinetic energy (kg $m^2/s^2$)

m = mass (kg)

v = velocity (m/s)

V = $\frac{4\pi}{3}\left(0.55^3 - 0.45^3\right) = 0.315$ $m^3$ (비산물체의 부피)

m = $0.315 \times 1200 = 378.0$ kg

$E_k$ = $\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 378 \times 5^2 = 4725$ kg $m^2/s^2$

∴ 4725 kg $m^2/s^2$ (공식을 통해 계산된 운동에너지)

> 4673 kg $m^2/s^2$ (유한요소해석을 통해 계산된 운동에너지)

공식을 통한 운동에너지 값과 유한요소해석을 통한 운동에너지 값이 약간의 차이를 보이고 있으나, 이는 유한요소모델링에 따른 비산물체 부피의 차이에서 기인된 것이며 그 차이는 약 1% 정도로 무시할 만한 수준이라 판단된다.

나. 화재 해석을 통한 안전성 평가

(1) 안전성 평가

국내·외 관련 규격에서 규정하고 있는 특수하중으로서의 화재에 대한 안전설계 요구조건을 분석하고 국내 탱크 적용사례 분석을 통해 강재 지붕탱크에서 가능한 4가지의 시나리오를 도출하여 해석을 실시하였다. 다음은 해석 결과의 고찰을 통한 안전성 평가 내용이다.

(가) 화재 안전성 평가 기준

①BS 7777

BS 7777에 의하면 비정상 하중조건(abnormal loading cases)로서 화재 위험성(fire hazards)을 언급하고 있고 화재로 인한 복사열에 의한 구조물의 온도가 구조물의 건전성 확보를 위해 강재 지붕과 측벽의 경우 300℃를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 따라서 살수장비 가동 시 300℃ 초과여부를 통해 지붕의 화재 안전성을 평가하였다.

② NEPA 59A

NFPA 59A에는 콘크리트 2차 컨테이너가 있는 이중 또는 완전방호식 탱크는 인접한 탱크의 일차 또는 이차 컨테이너 내의 화재로부터 입사되는 열유속을 강재 벽체 및 지붕은 15,000 W/㎡, 콘크리트 벽체는 30,000 W/㎡로 제한할 수 있는 이격거리가 있어야 한다고 규정하고 있다.

(나) 화재 안전성 평가 결과

① 지붕 압력방출밸브 LNG 누출에 의한 화재

지붕 압력방출밸브 LNG 방출에 의한 화재를 포함한 LNG 저장탱크에 본체 및 외부화재 발생 시에 대비하여 LNG 저장탱크에는 살수장비를 이중으로 설치하도록 소방법에 명시하고 있다. 그러므로 살수 장비가 가동되었을 경우 저장탱크의 구조물의 온도 분포를 계산하여 안전성을 검토하는 것은 매우 중요하다. 살수 장비에 대한 해석을 위해 살수 장비가 가동되었을 경우 전체 저장탱크의 표면에 2cm의 물막이 형성되었다고 가정하고 물은 살수 장비의 용량에 맞게 2.5 liter/min/$m^2$ 으로 공급된다. 이 경우 그림 2.14.52과 같이 살수 장비의 효과를 살펴보면, 살수 장비가 가동되었을 경우 콘크리트 외벽은 115℃, 강재 지붕은 72℃의 온도 분포를 보이며 안전성 기준인 500℃와 300℃보다 작아 안전함을 알 수 있다.

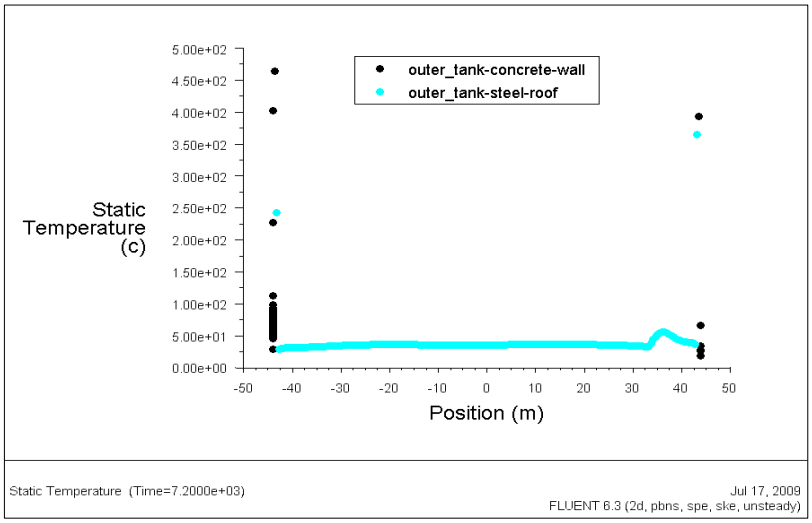



그림 2.14.51 살수장비 미가동시의 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포 (시나리오 1)

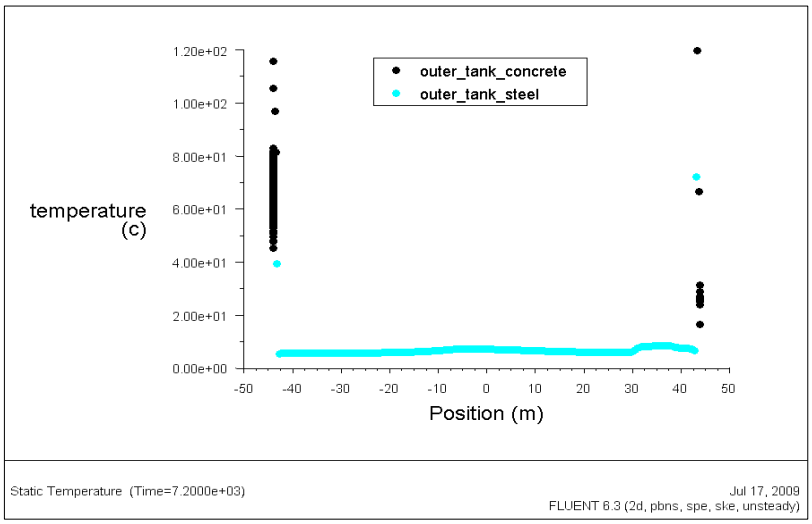



그림 2.14.52 살수장비 가동시의 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포 (시나리오 1)

② 근접 저장탱크의 지붕 붕괴에 의한 화재

근접 탱크의 지붕 붕괴에 의한 화재의 경우 그림 2.14.53 및 그림 2.14.54와 같이 살수 장비의 효과를 살펴보면, 살수 장비 효과가 고려되지 않은 경우에는 콘크리트 외벽 1,732℃, 강재 지붕 832℃이었던 것이 살수 장비 효과를 고려할 경우 콘크리트 외벽은 331℃, 강재 지붕은 46℃로 온도가 낮아지고 안전 온도 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

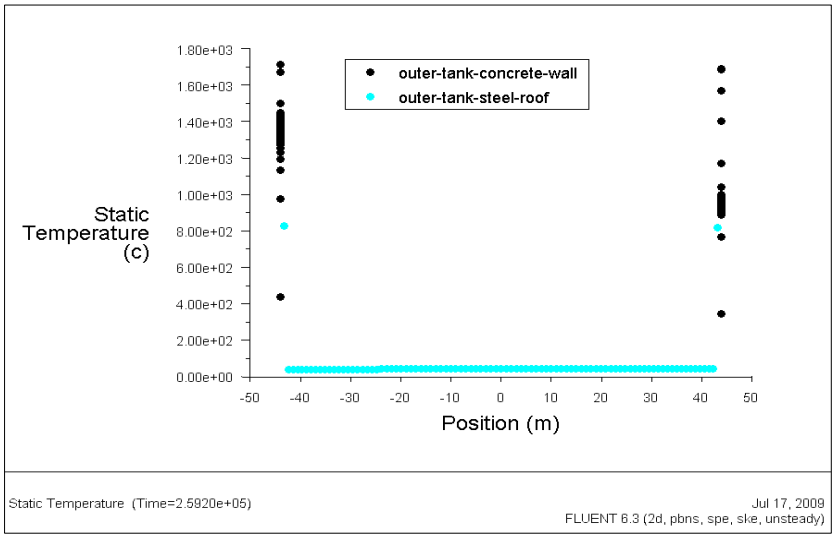



그림 2.14.53 살수장비 미가동시의 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포 (시나리오 2)

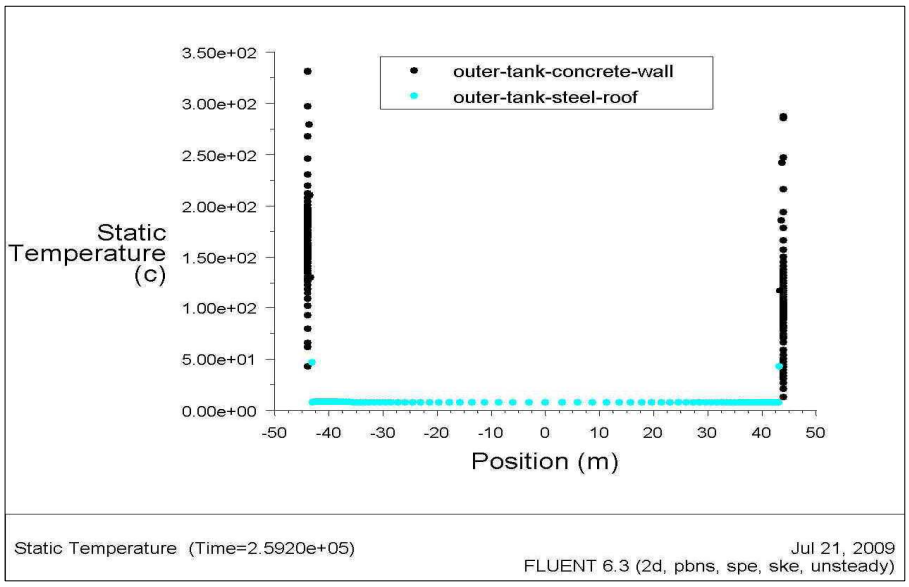



그림 2.14.54 살수장비 가동시의 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포 (시나리오 2)

③ 1차 펌프 토출 배관 파단에 의한 풀 화재

그림 2.14.55 및 그림 2.14.56과 같이 살수 장비의 효과를 살펴보면 살수 장비 효과를 고려하지 않을 경우 콘크리트 외벽 최고 570℃, 강재 지붕 최고 325℃였던 것이 살수장비 효과를 고려할 경우에는 콘크리트 외벽은 최고 264℃, 강재 지붕은 최고 97℃로 온도가 낮아지고 안전 온도 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

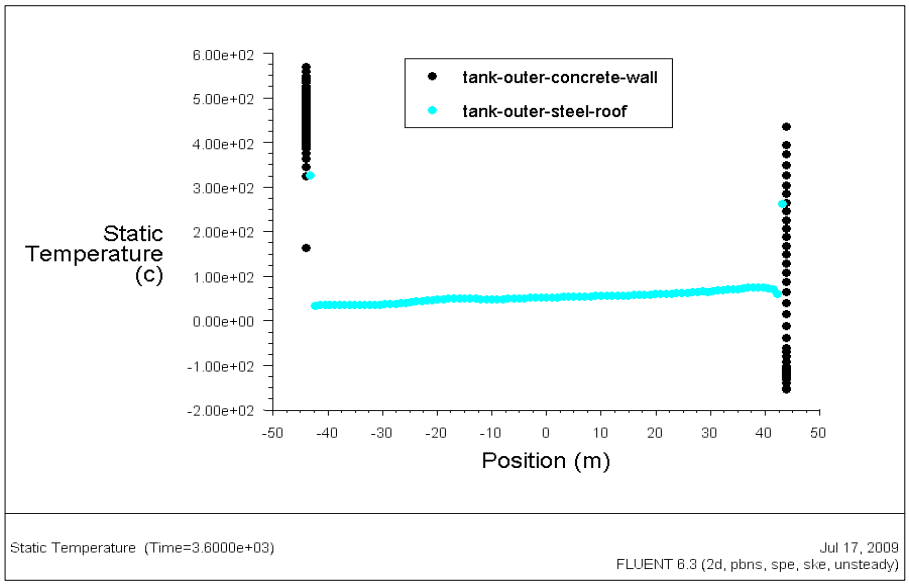



그림 2.14.55 살수장비 미가동시의 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포 (시나리오 2)

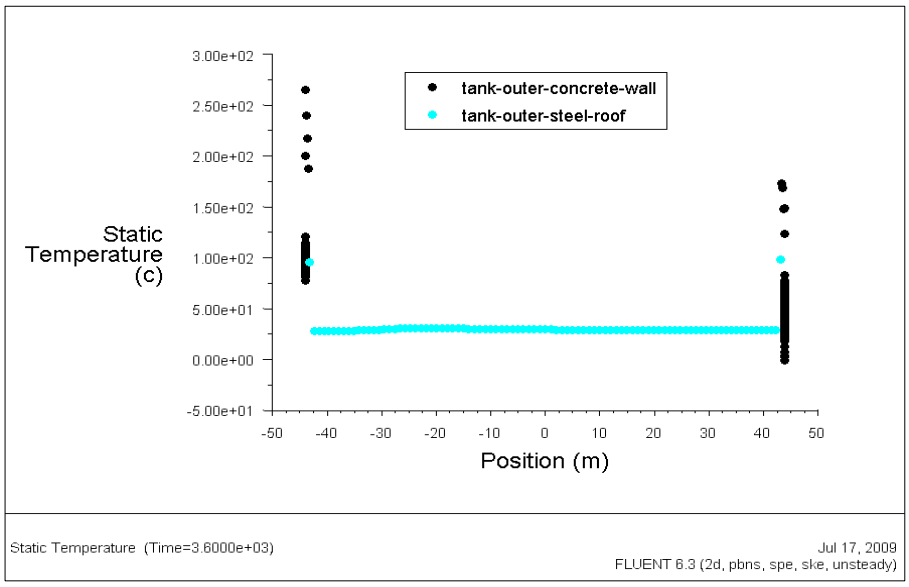



그림 2.14.56 살수장비 가동시의 강재 지붕형 저장탱크의 온도분포 (시나리오 2)

④ 번아웃

번아웃 조건인 그림 2.14.57에서 보면 4시간이 흐른 뒤 철근에 도달하는 온도는 약 250℃에 해당한다. 이는 철근(steel reinforcing bar)의 강도에 영향을 미치는 온도인 300℃보다 낮으므로 안전하다 할 수 있다.

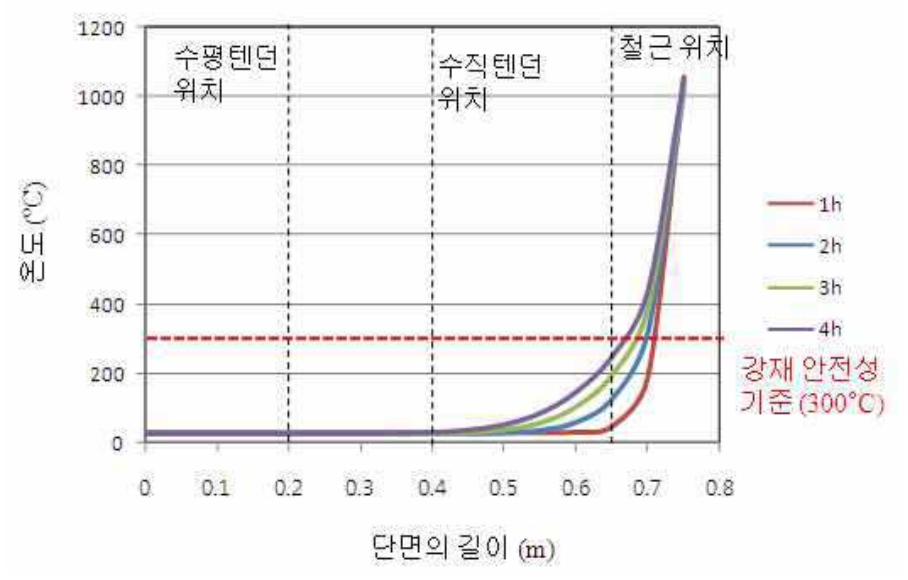



그림 2.14.57 번아웃 발생시 콘크리트 외벽의 온도분포

(2) 강재 지붕의 안전성 향상 방안

앞서 기술한 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 평가된 취약점 및 재료적인 특성 등을 감안하여 다음과 같이 강재 지붕형 LNG 저장탱크의 안전성 향상 방안을 제안하고자 한다.

(가) 초저온 LNG 누출 처리 설비 보강

강재 지붕의 경우 콘크리트 지붕에 비해 사고로 인한 LNG 누출에 대해 상대적으로 취약할 수밖에 없다. 따라서 사고로 누출된 LNG에 의한 탱크 지붕에 악영향을 미치지 못하도록 지붕은 보호되어야 한다.

탱크 지붕 상부 중 증발가스의 누출 가능성이 가장 높은 곳은 플랜지형 연결부(flanged joints)이다. 그러한 누출 발생 예상 지역은 저온용 강재 지붕을 설치하거나 또는 집액 트레이(product catchment tray), 방액 단열재(liquid proof insulation) 및 누출물을 안전한 처리 장소(safe disposal area)로 유도하는 적절한 배수로 등의 설치를 통해 보호할 필요가 있다. 이들 트레이들의 크기는 바람의 분산(wind dispersion)도 고려하여 선정하여야 한다.

(나) 살수설비의 신뢰성 제고

LNG 저장탱크의 살수설비시스템은 국내 소방법 및 NFPA 15에 의해 설계되고있다. 표 2.14.17는 실제 한국가스공사 200,000 ㎘ LNG 저장탱크 설계 시 반영된 고정식 살수설비시스템의 유동장 밀도(flow density)에 대해 나타내었다.

표 2.14.17 살수설비시스템의 유동장 밀도

| 대상 장치 | 유동장 밀도 (l/min/$m^2$) |
|---|---|
| 탱크 지붕 및 동체 | 2.5 |
| LP 펌프 지역 | 20.4 |
| 계측 지역 | 10.2 |
| 장치 노즐 지역 | 10.2 |

EN 1473의 살수설비에 권장장하는 최소 물의 체적유량은 70 L/min/$m^2$ 이다. 또, NFPA 15에서는 10.2 L/min/$m^2$로 규정하고 있어 국내 살수설비 기준(5 또는 2.5 L/min/$m^2$)과는 상당한 차이를 보이고 있다. 적정한 국내 살수설비의 적정용량에 대한 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.

급수 시스템은 수막 시스템의 운전 압력에서 최대 LNG 누설과 관련된 수막에 필요한 유량 이상을 공급할 수 있어야 한다. 특히, 강재 지붕형 탱크의 경우 콘크리트 지붕에 비해 상대적으로 화재에 취약한 구조이므로 살수용량을 콘크리트의 2배인 5 L/min/$m^2$로 설계하고 살수설비의 이중설치를 적극적으로 검토해볼 필요가 있다. 이는 살수설비의 신뢰성을 높이는 근본적인 방법 중에 최선책으로 사료된다.

(다) 강재 지붕 탱크의 운전 지침 설정 및 준수

LNG 저장탱크 내의 현수 지붕 위 공간은 초저온 설계온도가 적용되지 않았으므로 여하한 운전 오류 등에 의한 내부의 초저온 유체 유입이든 비정상 상황의 경우에 강재 지붕의 경우에는 강재 취성파괴에 의한 중대한 위험에 노출될 수가 있는 점을 간과해서는 안 된다.

따라서 탱크 내부 현수 지붕 위의 공간으로 초저온 유체가 유입될 수 있는 가능성이 배제될 수 있도록 조치하여야 한다. 예를 들면 LNG 재순환 라인의 고온 운전 등으로 야기될 수 있는 강재 지붕과 현수지붕 사이 공간으로의 초저온 유체 유입은 중대한 결과를 야기할 수 있으므로 콘크리트 지붕에 비하여 보다 엄밀한 운전지침 준수와 추가적인 계측제어 설비의

고려가 필요할 것이다. 재순환(recirculation) 온도는 기본공정설계사(M.W. Kellogg) 에서 제시한 3～5℃정도(1차 펌프에서 송출되는 LNG와 재순환된 LNG의 온도차)이내에서 운전하여 플래시 가스(flash gas) 발생을 최소화하고, 이와 더불어 초기 하역 시 따듯한 LNG(warm LNG)에 의한 플래시 가스 발생량을 적게 하기 위해 단계별 유량 증가(ramp up)를 실시하고 있으며, 이러한 단계별 유량 증가 시 설계유량을 초과 하지 않도록 운전에 유의해야 한다.

# 15절. 파일 및 기초 설계 개선

1. 기초 형식 검토

기초는 상부구조물과 지반 사이에서 상부구조물의 하중을 양질의 지반에 전달-분포시켜 기초하중에 의한 지반의 전단파괴와 과도한 침하가 발생하지 않도록 함으로써 상부 구조물이 안정한 상태에서 그 고유의 기능을 충분히 발휘하도록 하는 기능을 수행하는 하부구조물을 일컫는다. 따라서 구조물은 기초에 의하여 지지되고 기초의 양부는 구조물의 안정을 좌우한다. 불안전한 설계와 시공에 의한 기초공은 구조물의 침하, 경사, 때로는 전도(轉倒), 활동(滑動)을 일으키게 된다. 기초공은 많은 경우 지하 깊숙하게 구축되어 시공중이나 완성 후 대부분 그 모양이 보이지 않기 때문에 지반조사, 설계, 시공 등에 있어서는 충분한 주의가 필요하다.

기초는 상부구조 및 하부구조에 작용하는 하중을 안전하게 지지하도록 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

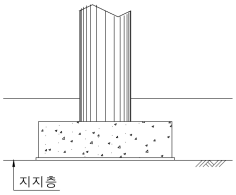
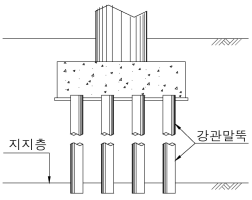
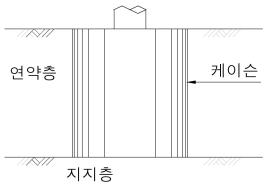
· 기초 하부지반에 전달되는 하중으로 인해 유발될 수 있는 지반의 전단파괴에 대한 충분한 안전율을 보장할 수 있도록 지지력을 확보하여야 한다.
· 연직 및 수평방향의 변위량이 허용치 이내여야 한다.
· 구조체에 발생한 응력이 허용치를 초과하지 않으면서 내구성이 구조물의 수명을 보장할 수 있는 단면이어야 한다.

기초형식은 그림 2.15.1 과 같이 크게 얕은기초와 깊은기초로 구분할 수 있다. 얕은기초는 상부 구조로부터 하중을 지반에 직접 전달시키는 형식의 기초로 압축성이 큰 지층이 없고, 지지층에 도달하는 심도가 비교적 얕을 때 설치하는 기초이다. 반면 깊은기초는 하중이 전달되는 지반이 연약하거나 느슨하며 지지층의 심도가 깊어 지지층까지 하중을 전달시키는데 필요한 매개체를 사용하는 형식의 기초이다. 즉, 기초 설계에 있어 적합한 기초 형식은 지반의 특성에 따라 달라진다. 지반조사 결과를 토대로 지지층으로 분류할 수 있는 풍화암층 이상의 기반암층이 비교적 얕게 형성되어 있고, 하중의 영향범위 내에 압축성이 큰 지층이 존재하지 않을 경우 얕은기초(직접기초) 고려를 원칙으로 하나, 지지층 심도가 7~8m에 형성되어 말뚝기초 선정이 다소 비경제적이거나 지형이 횡방향으로 심하게 경사져 있는 경우는 시공성 등을 감안하여 부분적으로 mass concrete를 이용한 얕은기초 형식을 고려하기도 한다. 얕은기초의 적용이 불가능한 경우, 깊은기초를 고려한다. 깊은기초는 지지층이 약 4~6m보다 깊은 경우 직접기초에 비해 유리하게 적용될 수 있으며, 말뚝은 일반적으로 항타에 의해 설치하나 지층 중간에 자갈층 또는 호박돌층이 존재하거나 도심지에서 진동과 소음피해 등이 문제가 되는 경우 Pre-boring 후 설치하는 것을 고려하여야 한다. 또한, 말뚝기초와 우물통기초의 비교는 지반조건을 고려한 안정성과 해당부지에서의 적용성 및 시공성을 검토한 후 공사기간을 포함한 경제성을 비교하여 적합한 형식을 선정한다. 표 2.15.1 은 얕은 기초와 깊은기초의 적용지반 및 장·단점, 선정시 고려사항 등을 정리한 표이다.




그림 2.15.1 그림 1 기초형식 분류

표 2.15.1 기초형식의 비교

| 구분 | 얕은기초(직접기초) | 깊은기초 | |
|---|---|---|---|
| | | 말뚝기초 | 우물통기초 |
| 개념도 |  |  |  |
| 적용 지반 | 지반조사결과 지지층으로 분류할 수 있는 기반암층이 약 7m 이내로 형성되어 있거나 하중의 영향 범위 내에 압축성이 큰 지층이 존재하지 않는 경우 적용 | 얕은기초의 적용이 불가능하면 깊은기초를 고려하며 지반조건을 감안한 안정성과 해당부지에서의 적용성 및 시공성을 우선 검토한 후 시공기간을 포함한 경제성을 비교하여 선정 | |
| 장·단점 | ▌장점<br>· 지지층 확인가능<br>· 양호한 품질 유지가능<br>· 공사비가 저렴함<br>▌단점<br>·굴착심도가 깊으면 별도의 가설 공사 필요 | ▌장점<br>· 토질에 관계없이 적용 가능 (연약지반)<br>▌단점<br>· 상대적 공사비 고가<br>· 항타시 소음과 진동 유발 | ▌장점<br>· 지지층 육안 확인<br>· 쇄굴 가능성 큰 곳에 유리<br>▌단점<br>· 지지층 심도 30m 이상 시공 곤란 |
| 선정시 고려사항 | 지지력, 침하량 (전체/부등) | 지지력, 본체 응력, 두부 변위, 부주면 마찰력, 침하량 (전체/부등) | 지지력, 침하량 (우물통 본체의 탄성침하량/저면 지반의 침하량) |

2. 기존 파일기초 설계

본 장에서 소개하는 기존 파일기초 설계는 한국토목학회의 교량시방서와 콘크리트시방서 및 한국건축학회의 건축물 설계하중 기준 등을 참고로 설계되었다. 파일기초는 파일로 탱크 본체를 지지하도록 설계하며, 이때 사용된 파일은 강관파일로써 풍화암이나 연암층 지반까지 도달하도록 설계한다. 파일기초 설계는 가정된 파일 배치로부터 파일 반력과 응력 등을 검토하고 설계에 대한 적정성을 판단한다. 파일기초 설계는 다음과 같이 지반조사를 통해 지반조건을 검토하고, 사용 재료에 대한 제원을 결정한다. 또한 탱크의 각 단면 질량을 구하여 이를 하중으로 가하고 하중조합에 따라 조합한다.

가. 지반 조건 및 재료 제원

본 연구는 삼척에 위치하고 있는 삼척 LNG 기지의 지반조건을 이용하여 진행되었다. 27만 kl급 저장탱크 #210~212가 위치할 곳 주변의 bore hole 15개를 조사하였으며, bore hole의 위치도는 그림 2.15.2와 같다. Bore hole의 위치를 표 2.15.2에 정리하여 나타내었으며, 대표로 저장탱크 #210(B10-1)의 지반구성을 그림 2.15.3에 정리하였다.

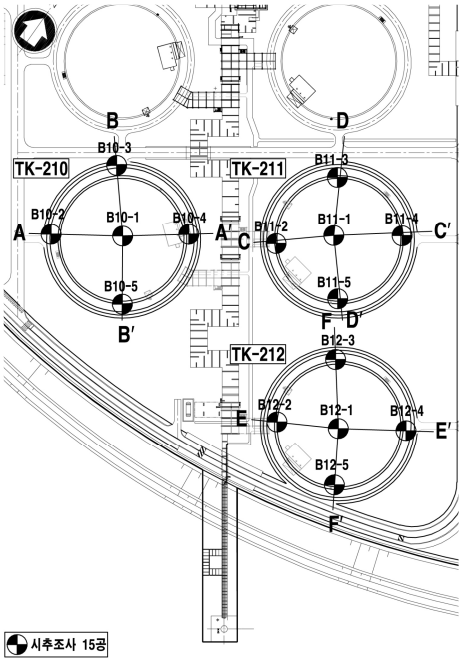


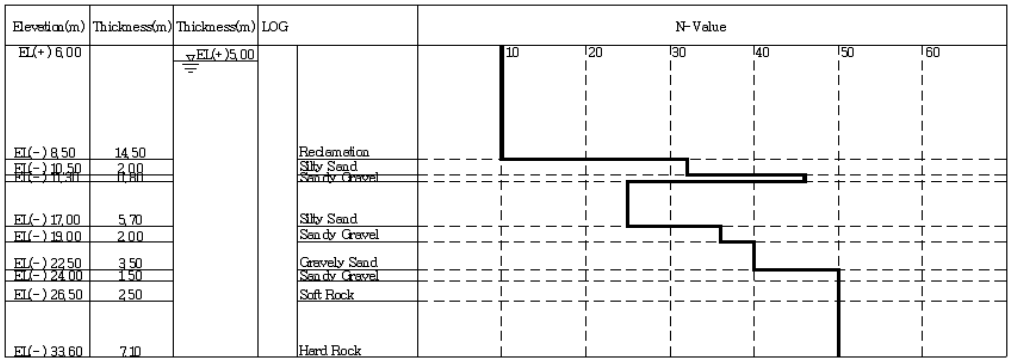

그림 2.15.2 Bore hole 위치도

표 2.15.2 저장탱크 #210~212의 Bore hole 위치

| Tank No. | Bore Hole No. | PN | PE |
|---|---|---|---|
| Tank #210 | B10-1 | 407,526.69 | 231,276.24 |
| | B10-2 | 407,497.79 | 231,240.63 |
| | B10-3 | 407,568.48 | 231,240.53 |
| | B10-4 | 407,556.84 | 231,317.19 |
| | B10-5 | 407,483.05 | 231,306.41 |
| Tank #211 | B11-1 | 407,621.24 | 231,409.06 |
| | B11-2 | 407,590.26 | 231,376.53 |
| | B11-3 | 407,659.97 | 231,385.33 |
| | B11-4 | 407,651.64 | 231.452.44 |
| | B11-5 | 407,583.15 | 231,440.08 |
| Tank #212 | B12-1 | 407,501.66 | 231,498.33 |
| | B12-2 | 407,478.21 | 231,456.74 |
| | B12-3 | 407,544.01 | 231,465.84 |
| | B12-4 | 407,530.62 | 231,542.21 |
| | B12-5 | 407,464.08 | 231,521.44 |

표 2.15.3 저장탱크 #210(B10-1)의 지반구성 - Pile length : 29.01~ 33.98 m

| Soil Profile | Elevation | Thickness | N-Value | G.Water.Level | Remarks |
|---|---|---|---|---|---|
| Reclamation | -8.5 | 14.5 | 10 | EL(+)5.00 | |
| Silty Sand | -10.5 | 2.0 | 32 | | Sand-Well Graded |
| Sandy Gravel | -11.3 | 0.8 | 46 | | Gravel |
| Silty Sand | -17.0 | 5.7 | 25 | | Sand |
| Sandy Gravel | -19.0 | 2.0 | 36 | | Gravel |
| Gravely Sand | -22.5 | 3.5 | 40 | | Sand |
| Sandy Gravel | -24.0 | 1.5 | 50 | | Gravel |
| S / R | -26.5 | 2.5 | 50 | | Soft Rock |
| H / R | -33.6 | 7.1 | 50 | | Hard Rock |



강관 파일은 “KS F4602 SPS400”을 사용하였으며, 철근은 “KS F4602 SD40”을 사용하였다. 파일 제원 및 허용응력은 표 2.15.4와 같고, 콘크리트 및 철근의 허용응력은 표 2.15.5와 같다. 표 2.15.6은 각 재료들의 물성을 나타낸 표이다.

표 2.15.4 파일 제원 및 허용응력

| 구분 | 제원 | 단위 |
|---|---|---|
| Diameter (D) | 914.4 | mm |
| Thickness (t) | 18 | mm |
| Corrosion allowance | 2 | mm |
| Section area (A) | 44,957[1)] | $mm^2$ |
| Length of circumference (U) | 2,860[1)] | mm |
| Modulus of elasticity (E) | 200,000 | $N/mm^2$ |
| Moment of inertia of section (I) | 4,496,910,048[1)] | mm4 |
| Modulus of section (Z) | 9,878,976[1)] | $mm^3$ |
| Unit mass | 78.50 | $kN/m^3$ |
| Yield stress ($f_y$) | 240 | MPa |
| Tensile stress ($f_{sa}$) | 140 | MPa |
| Compressive stress ($f_{sa}$) | 140 | MPa |

1) 부식두께 2mm를 고려하여 계산한 값임

표 2.15.5 콘크리트 및 철근의 허용응력

| 구분 | 제원 | 단위 |
|---|---|---|
| ▌콘크리트 | | |
| Compressive bending stress ($f_{ca}$) | 12.0 | MPa |
| Bearing stress ($f_{ba}$) | 7.5 | MPa |
| Punching shear stress ($\tau_a$) | 1.0 | MPa |
| Bond stress ($\tau_o$) | 1.8 | MPa |
| ▌철근 | | |
| Tensile stress ($f_{sa}$) | 180 | MPa |

표 2.15.6재료 물성

| 구분 | | 단위중량 ($kN/m^3$) | 탄성계수 E (MPa) | 전단탄성계수 G (MPa) | Poisson's Ratio $\nu$ | Damping Ratio (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 유체 | LNG | 4.80 | 1000(Bulk) | - | - | 대류 : 0.5 |
| | | | | | | 충격 : 5.0 |
| Steel | 내조 | 78.50 | 203,000 | 78,077 | 0.300 | 5.0 |
| | 파일 | 78.50 | 200,000 | 76,923 | 0.300 | |
| Concrete | 지붕 | 25.00 | 29,000 | 12,083 | 0.200 | 7.0 |
| | 벽체 | 25.00 | 31,750 | 13,229 | 0.200 | 5.0 |
| | 바닥 슬래브 | 25.00 | 29,000 | 12,083 | 0.200 | RC : 7.0 |
| | | | | | | PC : 5.0 |

나. 하중 및 하중조합

탱크에 작용하는 하중은 지붕, 바닥슬래브, 외조 벽체, LNG 유체 등의 해당 부피에 단위중량을 곱해서 구한다. 이때 부피는 다음의 식 (1) ~ 식 (4)로부터 구하고, 단위중량은 표 2.15.6의 값을 이용한다. 그림 3은 외조탱크의 일반도이며, 저장탱크의 주요 제원은 표 2.15.7과 같다.

$V=\pi\times r^2\times h$ (원기둥) (1)

$V=\pi\times h\times(R^2-r^2)$ (중공원기둥) (2)

$V=\frac{1}{3}\pi\times h\times(R^2+R\times r+r^2)$ (원뿔대) (3)

$V=\pi\times h^2\times(r-\frac{h}{3})$ (결구) (4)

여기서, $r$은 윗면 혹은 내측 반경, $R$은 아랫면 혹은 외측 반경, $h$는 높이를 의미한다.

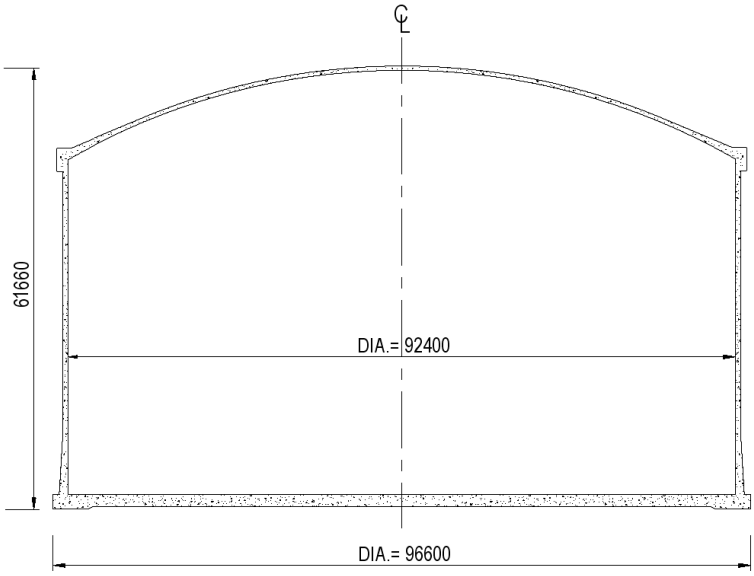



그림 2.15.3 외조탱크 단면도 (단위 : mm)

표 2.15.7 탱크 주요 제원

| 구 분 | | 사 용 재 료 | 반 경 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| 내 조 | | 9% Ni. | 내경: 90.0m | |
| 외 조 | 바닥판 | fck = 40.0MPa<br>fck = 30.0MPa | 외경: 96.6m | PC 및 RC |
| | 벽 체 | fck = 40.0MPa | 내경: 92.4m | PC |
| | 링 빔 | fck = 40.0MPa | 내경: 92.4m | PC |
| | 지 붕 | fck = 30.0MPa | 내경: 92.4m<br>(곡률 반경) | RC |
| Pile 기초 | | Type :<br>Steel Pipe<br>(fy=240.0MP) | Φ914.4mm | 833ea |

이렇게 구해진 질량은 각 부분의 하중으로 작용한다. 하중 조합은 표 2.15.8과 같고 하중 조합에 따른 증가계수는 표 2.15.9와 같다. 하중조합은 상시, 시험시, 유지관리시, 풍하중시, 지진시를 별도로 고려한다. 표 2.15.8의 하중조합을 고려하여 얻은 결과는 표 2.15.10과 같다.

표 2.15.8 하중조합

| No. | 하중조합 | 하중 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 내조 | 지붕 | 배관 | 외조 | 풍하중 | 지진 |
| 1 | 상시 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | - |
| 2 | 시험시 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | - |
| 3 | 유지관리시 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | - |
| 4 | 풍하중시 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - |
| 5 | 지진시↓(SSE) | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | 1.00 |
| | 지진시↑(SSE) | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | -1.00 |

표 2.15.9 하중조합에 따른 증가계수

| No. | 하중조합 | 증가계수 | |
|---|---|---|---|
| 1 | 상시 | 1.00 | |
| 2 | 시험시 | 1.15 | |
| 3 | 유지관리시 | 1.15 | |
| 4 | 풍하중시 | 1.25 | |
| 5 | 지진시 | 1.33 (Concrete) | 1.50 (Steel) |

표 2.15.10 적용 상태에 따른 하중조합 결과

| 상시 | 수직력 $V_o$(kN) | 수평력 $H_o$(kN) | 모멘트 $M_o$(kN·m) |
|---|---|---|---|
| 내조 | 1,412,298 | - | - |
| 지붕 | 28,232 | - | - |
| 배관 | 15,640 | - | - |
| 외조 | 768,950 | - | - |
| 합계 | 2,225,120 | - | - |

| 시험시 | 수직력 $V_o$(kN) | 수평력 $H_o$(kN) | 모멘트 $M_o$(kN·m) |
|---|---|---|---|
| 내조 | 1,746,212 | - | - |
| 지붕 | 9,032 | - | - |
| 배관 | 15,640 | - | - |
| 외조 | 768,950 | - | - |
| 합계 | 2,539,834 | - | - |

| 유지관리시 | 수직력 $V_o$(kN) | 수평력 $H_o$(kN) | 모멘트 $M_o$(kN·m) |
|---|---|---|---|
| 내조 | 1,412,298 | - | - |
| 지붕 | 41,032 | - | - |
| 배관 | 15,640 | - | - |
| 외조 | 768,950 | - | - |
| 합계 | 2,237,920 | - | - |

| 풍하중 | 수직력 $V_o$(kN) | 수평력 $H_o$(kN) | 모멘트 $M_o$(kN·m) |
|---|---|---|---|
| 내조 | 1,412,298 | - | - |
| 지붕 | 28,232 | - | - |
| 배관 | 15,640 | - | - |
| 외조 | 768,950 | - | - |
| 풍하중 | -8,563 | 6,884 | 221,154 |
| 합계 | 2,216,557 | 6,884 | 221,154 |

| 지진시(↓SSE) | 수직력 $V_o$(kN) | 수평력 $H_o$(kN) | 모멘트 $M_o$(kN·m) |
|---|---|---|---|
| 내조 | 1,412,298 | - | - |
| 지붕 | 41,032 | - | - |
| 배관 | 15,640 | - | - |
| 외조 | 768,950 | - | - |
| 지진 | 173,980 | 549,125 | 19,122,213 |
| 합계 | 2,399,100 | 549,125 | 19,122,213 |

| 지진시(↑SSE) | 수직력 $V_o$(kN) | 수평력 $H_o$(kN) | 모멘트 $M_o$(kN·m) |
|---|---|---|---|
| 내조 | 1,412,298 | - | - |
| 지붕 | 41,032 | - | - |
| 배관 | 15,640 | - | - |
| 외조 | 768,950 | - | - |
| 지진 | -173,980 | 549,125 | 19,122,213 |
| 합계 | 2,051,140 | 549,125 | 19,122,213 |

다. 파일기초 설계

탱크를 지지하는 파일은 탱크에 작용하는 하중을 고려하여 파일 본당 지지력을 계산한 다음 필요한 파일의 수를 결정하고, 군말뚝 효과가 생기지 않도록 파일 간격을 고려하여 배치한다. 이러한 과정을 통해 결정된 파일 설계는 다음의 검토 사항을 모두 만족할 때까지 수정하는 과정을 반복한다.

(1) 파일의 허용지지력

말뚝 기초의 선단지지력은 일축압축강도를 이용한 구조물 기초 설계기준에 의한 방법과 Goodman의 지지력 공식 및 CFEM 공식을 이용하여 산정하고, 산정된 값 중에서 작은 값을 적용하였다. 식 (5)는 구조물 기초 설계기준에 의한 식이며, 식 (6)은 Goodman의 지지력 공식과 CFEM 공식이다.

$$Q_a = \frac{1}{N} \times Q_u$$

$$Q_u = 443 \cdot {q_u}^{0.5} \cdot {A_t}^{2/5} \cdot {A_i}^{1/3} \qquad (5)$$

여기서, $Q_a$는 허용지지력, N은 안전율, $Q_u$는 극한지지력이며, $q_u$는 암반의 일축압축강도, $A_t$는 강관말뚝의 선단부 순단면적, $A_i$는 강관말뚝의 선단부 심부면적을 의미한다. 위의 식은 강관말뚝이 암반에 말뚝직경 이상 근입된 경우에 적용 가능하며, 산정된 선단지지력은 암반 근입부의 주면마찰력까지 포함한다.

$$Q_a = \frac{1}{3} q_u (N_\phi + 1) \cdot A_p \ : \text{Goodman의 지지력 공식}$$

$$Q_a = q_u \cdot K_{sp} \cdot d \cdot A_p \ : \text{CFEM 공식} \qquad (6)$$

여기서, $Q_a$는 말뚝의 본당허용지지력, $q_u$는 암반의 일축압축강도, $N_\phi$는 내부마찰각에 의한 지지력계수, $K_{sp}$는 안전율 3을 포함한 경험계수, $A_p$는 말뚝의 선단면적을 의미한다.

위의 공식들로부터 계산된 기반암지지 말뚝 허용지지력은 표 2.15.11에 탱크별로 정리하였다.

표 2.15.11 탱크별 기반암지지 말뚝 허용지지력

| 구 분 | 암석일축 압축강도 (MPa) | 허용지지력 (kN/EA) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 구조물 기초 설계기준 | Goodman | CFEM | 강관말뚝 재료허용 압축응력 | 정상상태 적용 | 지진상태 적용 |
| TK-210 | 37.08 | 3610 | 6436 | 3475 | 5664 | 3475 | 5213 |
| TK-211 | 56.80 | 3610 | 9859 | 5324 | 5664 | 3610 | 5415 |
| TK-212 | 45.44 | 3610 | 7887 | 4259 | 5664 | 3610 | 5415 |

(2) 파일 스프링 계수 산정

파일 스프링 계수 $K_H$는 식 (7)로부터 구하며, 식의 계산은 $\beta$값의 가정으로부터 시작하므로 $K_H$는 Trial & Error Method를 이용하여 구한다. 따라서 Trial & Error Method 과정을 표 표 2.15.12에 정리하였고, #210 bore hole에 대한 $K_H$와 $\beta$값을 표 2.15.13에 나타내었다. 또한 표 2.15.12에서 사용한 파일 직경과 두께, 탄성계수 및 관성모멘트는 표 2.15.4의 값을 참고하였다. 한편 표 2.15.12의 $k_{H_o}$를 구하는 식에서 $\alpha$값은 $E_o$에 대한 계수로써 정상상태($\alpha$=1)와 지진상태($\alpha$=2)에 따라 다르다.

$$K_H = k_{H_o} \times (\frac{B_H}{0.3})^{-\frac{3}{4}} \qquad (7)$$

표 2.15.12 Trial & Error Method 과정

| 기호 | 식 | 단위 |
|---|---|---|
| $\beta$ | $\beta$값을 가정 | $m^{-1}$ |
| N | 평균 N치=10 | - |
| $E_o$ | 2800×N | $kN/m^2$ |
| $k_{H_o}$ | $1/0.3 \times \alpha \times E_o$ | $kN/m^3$ |
| $B_H$ | $\sqrt{(D/\beta)}$ | m |
| $K_H$ | $K_H = k_{H_o} \times (\frac{B_H}{0.3})^{-\frac{3}{4}}$ | $kN/m^3$ |
| $\beta$ | $\sqrt[4]{(K_H \times D/4EI)}$ | $m^{-1}$ |

표 2.15.13 저장탱크 #210 Bore hole에 대한 $K_H$와 $\beta$값

| 구분 | | B10-1 | B10-2 | B10-3 | B10-4 | B10-5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 정상상태 | N | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | $K_H(kN/m^3)$ | 24,284 | 24,284 | 24,284 | 24,284 | 24,284 |
| | $\beta(m^{-1})$ | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 | 0.280 |
| 지진상태 | N | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | $K_H(kN/m^3)$ | 52,178 | 52,178 | 52,178 | 52,178 | 52,178 |
| | β ($m^{-1}$) | 0.339 | 0.339 | 0.339 | 0.339 | 0.339 |

(3) 파일 배치

파일의 군말뚝 효과를 고려하지 않기 위해서는 파일 중심간 거리가 파일 직경의 2.5배 이상이어야 하므로, 1/4단면을 대상으로 중심부는 3.1m 간격으로 10줄, 2.7m 간격으로 4줄을 직교 배치하고, 원환부는 2.5m 간격으로 3줄을 원환 배치하였다. 따라서 중심부는 파일 중심간 거리를 2.95D ~ 3.39D로 설계하였으며, 원환부는 2.73D로 설계하였다. 파일 배치 결과 총

833개의 파일이 탱크 기초에 배치되었으며, 파일배치도는 그림 2.15.4와 같다.

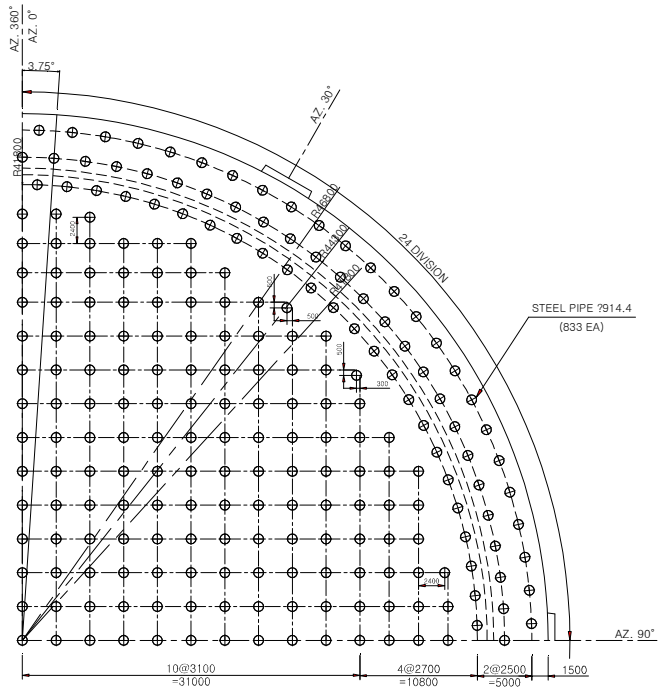



그림 2.15.4 파일배치도

(4) 파일기초 설계의 검토

앞서 배치한 파일기초 설계가 상부 탱크를 지지하기에 충분한지를 검증하기 위하여, 파일의 반력과 응력, 파일 두부와 기초 바닥사이의 연결 및 파일 변위 등 여러 가지 사항을 검토하여야 한다. 만약 검토사항 중에 만족하지 못한 결과를 얻게 된다면 파일 배치 및 파일기초 설계는 다시 이루어져야 한다.

(가) 파일의 반력 검토

앞서 구한 표 2.15.9의 수직력, 수평력 및 모멘트 값과 표13의 $\beta$값을 이용하여 파일의 축방향력 즉, 반력 $R$을 계산할 수 있으며, 이를 표 2.15.11의 최소값($R_a$)과 비교·검토하여 표 2.15.14에 나타내었다. 이때 반력 $R$은 식 (8)로부터 구할 수 있다.

$$R = \frac{V_o}{n} \pm \frac{M_o + H_o/(2\times\beta)}{\sum_{k=1}^{k}(n_k \times x_k^2)} \times x_k \qquad (8)$$

여기서, $V_o$는 수직력, $M_o$는 모멘트, $H_o$는 수평력, $\beta$는 파일 특성값, $n$은 파일의 총 개수, $x_k$는 탱크중심에서부터 $k$번째 파일까지의 $x$방향 거리, $n_k$는 $k$번째 위치한 파일의 수를 의미한다.

표 2.15.14 파일의 반력 검토

| 하중조합 | $V_o$ (kN) | $H_o$ (kN) | $M_o$ (kN·m) | β ($m^{-1}$) | H (kN) | $R_{max}$ (kN) | $R_{min}$ (kN) | $R_a$ (kN) | Check |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 정상시 | 2,225,120 | | | 0.27082 | | 2,621 | | 3,475 | O.K |
| 시험시 | 2,539,834 | | | 0.27082 | | 3,049 | | 3,475 | O.K |
| 유지관리시 | 2,237,920 | | | 0.27082 | | 2,687 | | 3,475 | O.K |
| 풍하중 | 2,216,577 | 6,884 | 221,154 | 0.27082 | 8.264 | 2,681 | 2,640 | 3,475 | O.K |
| 지진시↓(SSE) | 2,399,100 | 549,125 | 19,122,213 | 0.32789 | 659.214 | 4,634 | 1,127 | 5,213 | O.K |
| 지진시↑(SSE) | 2,051,140 | 549,125 | 19,122,213 | 0.32789 | 659.214 | 4,216 | 709 | 5,213 | O.K |

표 2.15.14에서 $H$는 파일 한본의 수평력을 의미하며, 이는 $H_o$를 파일의 총개수 $n$으로 나누어 구한다. 모든 하중 조합에 대하여 반력을 검토해본 결과, 모두 허용치 대비 약 70~75% 정도의 반력이 발생하는 것으로 보아 파일의 반력 검토에 대하여 만족함을 알 수 있다.

(나) 파일의 응력 검토

표 2.15.14에서 구한 파일의 반력으로부터 파일의 휨 응력을 검토한다. 식 (9)를 이용하여 파일의 휨응력을 구하며, 이를 허용응력 $f_a$값과 비교·검토하여 표 2.15.15에 나타내었다.

$$f = (\frac{R}{A} \pm \frac{M}{Z}) \times 10^{-3} \qquad (9)$$

여기서, $f$는 파일의 휨응력, $A$는 유효 단면적, $M$은 파일 두부의 휨 모멘트, $Z$는 파일의 단면 계수를 의미한다. $A$와 $Z$는 표 2.15.4 파일 제원을 참고하며, $M$은 표 2.15.14의 $H$를 $2\beta$로 나누어 계산한다. 이때 표 2.15.15의 $f_a$값은 표 2.15.4의 $f_{sa}$값에 표 2.15.8의 증가계수를 적용하여 구한다.

표 2.15.15 파일의 응력 검토

| 하중조합 | R (kN) | H (kN) | M (kN·m) | $f_{max}$ (MPa) | $f_{min}$ (MPa) | $f_a$ (MPa) | Check |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 정상시 | 2,671.212 | | | 53 | | 140 | O.K |
| 시험시 | 3,049.021 | | | 60 | | 161 | O.K |
| 유지관리시 | 2,686.579 | | | 53 | | 161 | O.K |
| 풍하중 | 2,681.479 | 8.264 | 15.257 | 54 | 52 | 175 | O.K |
| 지진시↓(SSE) | 4,633.606 | 659.214 | 1,005.236 | 182 | 1 | 210 | O.K |
| 지진시↑(SSE) | 4,215.887 | 659.214 | 1,005.236 | 173 | -7 | 210 | O.K |

모든 하중 조합에 대하여 반력을 검토해본 결과, 모두 허용치내의 응력이 발생하므로 파일 설계는 응력 검토에 대하여 만족함을 알 수 있다.

(다) 파일 두부와 기초 바닥의 연결 검토

파일 두부와 기초 바닥의 연결부 검토를 위하여 바닥의 수직 지압응력과 펀칭 전단응력, 수평 지압응력, 최외측 파일에 의한 기초의 수평 펀칭 전단응력, 가상 철근 콘크리트 단면의 응력 및 철근의 이음길이 등이 검토되어야 한다.

① 바닥의 수직 지압응력

아래의 식 (10)으로부터 계산된 바닥의 수직 지압응력을 하중조합에 따른 증가계수를 반영하여 구한 파일 지압응력 $f_{ba}$와 비교한 결과 표 2.15.16과 같이 모두 허용치내의 응력이 발생하므로 바닥의 수직 지압응력 검토에 대하여 만족함을 알 수 있다.

$$f_{cv} = (\frac{4 \times P}{\pi \times D^2}) \times 10^{-3} < f_{ba} \qquad (10)$$

여기서, $f_{cv}$는 수직 지압응력(MPa), $P$는 파일의 최대 축력(kN), $D$는 파일의 직경(m)을 의미한다.

표 2.15.16 바닥의 수직 지압 응력 검토

| Load Combination | $P$ (kN) | $f_{cv}$ (MPa) | 하중조합에 따른 증가계수 | $f_{ba}$ (MPa) | Check |
|---|---|---|---|---|---|
| 정상시 | 2,671 | 4.068 | 1.000 | 7.500 | O.K |
| 시험시 | 3,049 | 4.643 | 1.150 | 8.625 | O.K |
| 유지관리시 | 2,687 | 4.091 | 1.150 | 8.625 | O.K |
| 풍하중 | 2,681 | 4.083 | 1.250 | 9.375 | O.K |
| 지진시↓(SSE) | 4,634 | 7.056 | 1.330 | 9.975 | O.K |
| 지진시↑(SSE) | 4,216 | 6.353 | 1.330 | 9.975 | O.K |

② 바닥의 펀칭 전단응력

바닥의 펀칭 전단응력은 식 (11)로부터 구하며, 이를 하중조합에 따른 증가계수를 반영하여 구한 허용 펀칭전단응력 $\tau_a$와 비교·검토한다. 그 결과는 표 2.15.17과 같다.

$$\tau_v = (\frac{P}{\pi \times (D+h) \times h}) \times 10^{-3} \leq \tau_a \qquad (11)$$

여기서, $\tau_v$는 펀칭 전단응력(MPa), $P$는 파일의 최대 축력(kN), $D$는 파일의 직경(m), $h$는 기초부 위단에서부터 파일 선단까지의 거리를 의미한다.

표 2.15.17 바닥의 펀칭 전단응력 검토

| Load Combination | $P$ (kN) | $\tau_v$ (MPa) | 하중조합에 따른 증가계수 | $\tau_a$ (MPa) | Check |
|---|---|---|---|---|---|
| 정상시 | 2,671 | 0.211 | 1.000 | 1.000 | O.K |
| 시험시 | 3,049 | 0.241 | 1.150 | 1.150 | O.K |
| 유지관리시 | 2,687 | 0.213 | 1.150 | 1.150 | O.K |
| 풍하중 | 2,681 | 0.212 | 1.250 | 1.250 | O.K |
| 지진시↓(SSE) | 4,634 | 0.367 | 1.330 | 1.330 | O.K |
| 지진시↑(SSE) | 4,216 | 0.334 | 1.330 | 1.330 | O.K |

표 2.15.17의 결과로부터 모든 하중 조합에 대하여 펀칭 전단응력을 검토해본 결과 모두 허용치내의 응력이 발생하므로 바닥의 펀칭 전단응력 검토에 대하여 만족함을 알 수 있다.

③ 바닥의 수평 지압응력

바닥의 수평 지압응력은 식 (12)로부터 구하며, 그 결과를 표 2.15.18에 정리하였다.

$$f_{ch} = \frac{H}{D \times l} \times 10^{-3} < f_{ba} \qquad (12)$$

여기서, $f_{ch}$는 바닥의 수평 지압응력(MPa), $H$는 파일의 최대 수평력(kN), $D$는 파일의 직경(m), $l$은 파일의 매설 길이를 의미한다.

표 2.15.18 바닥의 수평 지압응력 검토

| Load Combination | $H$ (kN) | $f_{ch}$ (MPa) | 하중조합에 따른 증가계수 | $f_{ba}$ (MPa) | Check |
|---|---|---|---|---|---|
| 풍하중 | 8.264 | 0.090 | 1.250 | 9.375 | O.K |
| 지진시↓(SSE) | 659.214 | 7.209 | 1.330 | 9.975 | O.K |

검토결과 풍하중과 지진시의 수평 지압응력이 허용치 이내로 발생하므로, 바닥의 수평 지압응력에 대하여 만족함을 알 수 있다.

④ 외측 파일에 의한 기초의 수평 펀칭 전단응력

외측 파일에 의한 기초의 수평 펀칭 전단응력은 식 (13)으로부터 구하며, 그 결과를 표 2.15.13에 정리하였다.

$$\tau_h = \frac{H}{h' \times (2 \times l + D + 2 \times h')} \times 10^{-3} \leq \tau_a \qquad (13)$$

여기서, $\tau_h$는 수평 펀칭 전단응력(MPa), $H$는 파일의 최대 수평력(kN), $D$는 파일의 직경(m), $l$은 파일의 매설 길이, $h'$는 기초 콘크리트의 유효 깊이, $\tau_a$는 허용 펀칭전단응력을 의미한다.

표 2.15.19 기초의 수평 펀칭 전단응력 검토

| Load Combination | $H$ (kN) | $\tau_h$ (MPa) | 하중조합에 따른 증가계수 | $\tau_a$ (MPa) | Check |
|---|---|---|---|---|---|
| 풍하중 | 8.264 | 0.002 | 1.250 | 1.250 | O.K |
| 지진시↓(SSE) | 659.214 | 0.198 | 1.330 | 1.330 | O.K |

검토결과 풍하중과 지진시 수평 펀칭 전단응력이 허용치 이내로 발생하므로, 기초의 수평 펀칭 전단응력에 대하여 만족함을 알 수 있다.

⑤ 가상 철근 콘크리트 단면의 응력

가상 철근 콘크리트 단면의 응력검토는 식 (14)와 식 (15)로부터 각각의 응력을 검토함으로써 이루어진다.

$$f_c = \frac{M'}{r^3} \times C < f_{ca} \qquad (14)$$

$$f_s = \frac{M'}{r^3} \times S \times n < f_{sa} \qquad (15)$$

여기서, $f_c$는 콘크리트의 압축 휨 응력(N/mm$^2$), $f_s$는 철근의 인장 휨 응력(N/mm$^2$), $M'$는 지진시 파일의 최대 휨모멘트(N·mm), $r$은 가상 콘크리트 기둥 단면의 반경, $C$와 $S$는 무차원 계수, $n$은 탄성계수 비, $f_{ca}$는 콘크리트 허용 압축 휨 응력(N/mm$^2$), $f_{sa}$는 철근의 허용 인장 휨 응력(N/mm$^2$)을 의미한다.

위의 식으로부터 검토한 결과, $f_c$는 11.684 N/mm$^2$로 허용 압축 휨 응력 $f_{ca}$= 18.00 N/mm$^2$ 이내의 값을 가지며, $f_s$ 또한 19.056 N/mm$^2$로 허용 인장 휨 응력 $f_{sa}$=239.4 N/mm$^2$보다 작은 값을 가지므로 모두 만족함을 알 수 있다.

⑥ 철근의 이음길이

철근의 이음길이에 대한 검토는 식 (16)에 따라 이루어진다.

$$L_o = \frac{f_{sa} \times A_s}{\tau_o \times U} \qquad (16)$$

여기서, $L_o$는 철근의 이음길이(mm), $f_{sa}$는 철근의 압축응력(MPa), $A_s$는 철근 단면적($mm^2$), $\tau_o$는 콘크리트의 허용 부착응력(MPa), $U$는 콘크리트의 원주길이(mm)를 의미한다.
계산결과 철근의 이음길이 $L_o$는 628 mm로 최소 철근의 이음길이($L_{o_{\min}}$) 879 mm 보다 작은 값을 가지므로 철근의 이음길이에 따른 설계가 만족함을 알 수 있다.

(라) 파일 변위 검토
마지막으로 파일의 변위를 검토해야 하며, 이는 식 (17)로부터 구한다.

$$\delta = \frac{H}{4 \times E \times I \times \beta^3} \qquad (17)$$

여기서, $\delta$는 파일두부의 변위, $E$는 파일의 탄성계수, $I$는 관성모멘트, $\beta$는 파일 특성값, $H$는 파일의 최대 수평력이며, 이 값은 표 2.15.15의 $H$값 중 가장 큰 값을 적용한다.
계산 결과 $\delta$=4.589mm이며, 계산시 적용한 최대 수평력이 지진시이므로 지진 조건에서 허용하는 허용변위와 비교해야 한다. 즉 $\delta$=4.589mm는 허용변위 $\delta_{allow}$=15mm보다 작으므로 파일 변위에 대하여 만족함을 알 수 있다.

3. 파일기초 설계의 개선
본 장에서는 기존 파일기초 설계 방법의 개선사항에 대해 논하고자 한다. 즉, 설계에 적용하던 기존의 코드에 Eurocode를 추가하면서 달라진 부분과 설계 검토 과정 중에서 변경된 부분을 중심으로 기술하고자 한다. 지반 조사 위치와 지반구성은 기존 파일기초 설계와 동일하므로 조사 위치 및 지반구성은 표 2.15.2와 표 2.15.3과 같고, 파일 제원과 배치 또한 2장의 파일 배치와 동일하다. 그러나 Eurocode를 적용하면서 하중 조합 등 기존의 내용들과 달라진 부분이 있으며, 설계 검토 과정이 기존 파일기초 설계와 달리 해석에 의하여 진행되었다.

가. 개선된 파일기초 설계
해석 대상 탱크 단면과 탱크 주요 제원은 기존 파일기초 설계의 그림 2.15.3 및 표 2.15.7과 동일하다. 표 2.15.20은 콘크리트와 철근 및 파일에 대한 재료 제원을 나타낸 표이며, 재료 물성은 표 2.15.6과 같다. LNG 탱크에 작용하는 하중산정 방법은 기존 파일 설계와 동일하나, 기존의 코드를 Eurocode로 변경함으로써 표 2.15.21과 같이 ULS와 SLS의 하중 조합이 각각 반영되었다. 기존의 설계 개념은 설정하중에 의해 계산된 각 부재의 최대 응력이 그 부재를 구성하는 재료의 허용응력 이하가 된다는 조건 아래 이루어지는 허용응력설계법을 토대로 하기 때문에 표 2.15.8과 같은 하중조합이 고려되었다. 그러나 Eurocode는 한계상태 설계법 즉, 확률론적 개념으로부터 구조부재나 상세요소의 극한내력, 또는 사용성한계, 피로강도와 같은 각종 한계상태에 바탕을 두고 극한 또는 한계하중에 의한 부재력이 부재의 극한 또는 한계상태 내력을 초과하지 않도록 하는 방법이 적용된다.

표 2.15.20 재료 제원

| 구분 | 제원 | | 단위 |
|---|---|---|---|
| ▌ 콘크리트 | Base Slab (Central) | Base Slab (Outer) | |
| Concrete grade | C37 | C50 | |
| Characteristic compressive cylinder strength $f_{ck}$ | 30 | 40 | $N/mm^2$ |
| Characteristic compressive cylinder strength $f_{cu}$ | 37 | 50 | $N/mm^2$ |
| Modulus of elasticity $E_c$ | 33 | 35 | $kN/mm^2$ |
| ▌ 철근 (KS D3504) | | | |
| Characteristic tensile yield strength $f_y$ | 400 | | $N/mm^2$ |
| Modulus of elasticity $E_s$,$E_p$ | 200 | | $kN/mm^2$ |
| ▌ 파일 (KS F4602 SKK400) | | | |
| Characteristic tensile strength $f_{pu}$ | 400 | | $N/mm^2$ |
| Characteristic tensile yield strength $f_y$ | 235 | | $N/mm^2$ |
| Design tensile strength $f_{pu}$ | 400 | | $N/mm^2$ |

표 2.15.21 Ultimate Limit States

| No | Load Combination | Load Case | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Dead Load | LNG Load | Hydro Static | Live Load | Wind | Seismic | |
| | | | | | | | Vert. | Hor. |
| 1 | Normal operation | 1.35 | 1.20 | - | - | - | - | |
| 2 | Pneumatic & Hydro test | 1.35 | - | 1.20 | - | - | - | |
| 3 | Maintain Inspection | 1.35 | 1.20 | - | 1.50 | - | - | |
| 4 | Wind | 1.00 | 1.20 | 1.00 | - | 1.35 | - | |
| 5 | Earthquake(SSE) (1.0H+0.3V1) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 0.315 | 1.05 |
| 6 | Earthquake(SSE) (1.0H+0.3V2) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 0.315 | 1.05 |
| 7 | Earthquake(SSE) (0.3H+1.0V1) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 1.05 | 0.315 |
| 8 | Earthquake(SSE) (0.3H+1.0V2) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 1.05 | 0.315 |

표 2.15.21 Serviceability Limit States (계속)

| No | Load Combination | Load Case | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Dead Load | LNG Load | Hydro Static | Live Load | Wind | Seismic | |
| | | | | | | | Vert. | Hor. |
| 1 | Normal operation | 1.00 | 1.00 | - | - | - | - | |
| 2 | Pneumatic & Hydro test | 1.00 | - | 1.00 | 1.00 | - | - | |
| 3 | Maintain Inspection | 1.00 | 1.00 | - | 1.00 | - | - | |
| 4 | Wind | 1.00 | 1.00 | 1.00 | - | 1.00 | - | |
| 5 | Earthquake(SSE) (1.0H+0.3V1) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 0.30 | 1.00 |
| 6 | Earthquake(SSE) (1.0H+0.3V2) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 0.30 | 1.00 |
| 7 | Earthquake(SSE) (0.3H+1.0V1) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 1.00 | 0.30 |
| 8 | Earthquake(SSE) (0.3H+1.0V2) | 1.00 | 1.00 | - | - | - | 1.00 | 0.30 |

(1) 파일기초 설계의 검토

본절에서는 파일기초의 설계 검토 부분에 대하여 개선 사항을 설명하고자 한다. 기존의 방법은 공식에 따라 파일의 반력을 계산하고, 그 값이 허용 값 이내의 값인지를 검토하여 설계에 대한 적정성을 판단하였다. 그러나 본 절에서는 유한요소해석으로 파일의 반력을 검토하고, 파일 설계 결과를 정리하고자 한다.

(가) 파일의 반력 검토

파일의 반력을 검토하기 위하여 그림 2.15.5와 같이 배치된 파일을 그림 2.15.6과 같이 그대로 모델링하여 유한요소해석을 수행한다. 유한요소해석은 SAP2000을 사용하였다.

① 수직력

수직력 검토를 위하여 그림 2.15.7과 같이 정상상태와 지진상태의 해석 결과를 삽입하고, 이를 표 2.15.22에 정리하였다. 이때 $F_{cd}$는 해석결과 파일에 작용하는 수직력을 의미하며, $R_{cd}$는 2장의 표 2.15.11로부터 결정한 허용지지력을 의미한다. 표 2.15.22에서와 같이 비교, 검토한 결과 각 하중 조합 별로 모두 허용치 이내의 값을 보이므로 설계된 파일 설계는 수직력에 대하여 만족함을 알 수 있다.

표 2.15.22 수직력 비교 검토 결과

| Load Combination | $F_{cd}$ (kN) | $R_{cd}$ (kN) | Check |
|---|---|---|---|
| Normal operation | 2,668 | 3,610 | O.K |
| Pneumatic & Hydro test | 3,173 | 3,610 | O.K |
| Maintain Inspection | 2,668 | 3,610 | O.K |
| Wind | 2,668 | 3,610 | O.K |
| Earthquake↓(SSE) (1.0H+0.3V1) | 3,098 | 5,415 | O.K |
| Earthquake↑(SSE) (1.0H+0.3V2) | 3,195 | 5,415 | O.K |
| Earthquake↓(SSE) (0.3H+1.0V1) | 3,965 | 5,415 | O.K |
| Earthquake↑(SSE) (0.3H+1.0V2) | 4,291 | 5,415 | O.K |

② 인장력

인장력 검토를 위하여 필요한 파일의 허용 인장 저항 값을 표 2.15.23의 과정과 식 (18)로부터 구한다.

표 2.15.23 파일의 극한 인장 저항 값을 구하는 과정

| Depth(EL) | N-value | f(kN/m$^2$) | L(m) | f·L(kN) |
|---|---|---|---|---|
| 5.000 | 10 | 20.00 | 0.000 | 0.000 |
| 4.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| 3.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| 2.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| 1.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| 0.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -1.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -2.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -3.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -4.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -5.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -6.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -7.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -8.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -9.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -10.000 | 10 | 20.00 | 1.000 | 20.000 |
| -11.000 | 7 | 14.00 | 1.000 | 14.000 |
| -12.000 | 11 | 22.00 | 1.000 | 22.000 |
| -13.000 | 19 | 38.00 | 1.000 | 38.000 |
| -14.000 | 18 | 36.00 | 1.000 | 36.000 |
| -15.000 | 24 | 48.00 | 1.000 | 48.000 |
| -16.000 | 33 | 66.00 | 1.000 | 66.000 |
| -17.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |

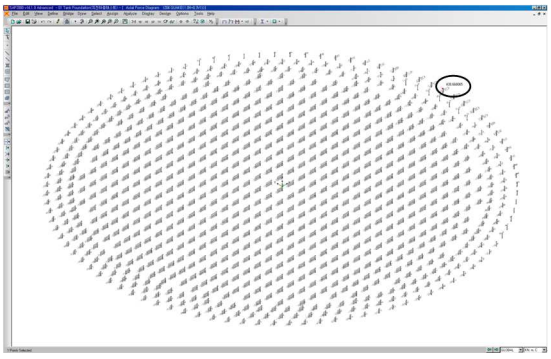
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| -18.000 | 37 | 74.00 | 1.000 | 74.000 |
| -19.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -20.000 | 14 | 28.00 | 1.000 | 28.000 |
| -21.000 | 30 | 60.00 | 1.000 | 60.000 |
| -22.000 | 26 | 52.00 | 1.000 | 52.000 |
| -23.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -24.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -25.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -26.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -27.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -28.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -29.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -30.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -31.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -32.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -33.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -34.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -35.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -36.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -37.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -38.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |
| -39.000 | 50 | 100.00 | 1.000 | 100.000 |

$$P_a = \frac{1}{N} \times P_u$$

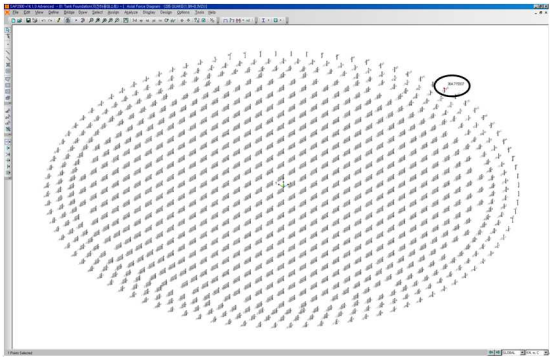
$$P_u = U \times \Sigma L \times f \qquad (18)$$

여기서, $P_a$는 파일의 허용 인장 저항 값, N은 안전계수(정상상태:6, 지진상태:3), $P_u$는 파일의 극한 인장 저항 값, U는 파일의 원주길이, L은 지층두께, f는 파일의 표면 마찰력을 의미한다.

계산 결과 $P_u$=7,578 kN, 지진상태의 허용 인장 저항 값 $P_a$=2,526 kN이다. 그림 2.15.8과 같이 정상상태와 지진상태의 해석 결과를 삽입하고, 이를 표 2.15.24에 정리하였다.



(a) Earthquake (SSE) (1.0H+0.3V1)



(b) Earthquake (SSE) (1.0H+0.3V2)

그림 2.15.8 인장력 해석 결과

표 2.15.24. 인장력 비교 검토 결과

| Load Combination | Pu (kN) | Pa (kN) | Check |
|---|---|---|---|
| Normal operation | - | - | O.K |
| Pneumatic & Hydro test | - | - | O.K |
| Maintain Inspection | - | - | O.K |
| Wind | - | - | O.K |
| Earthquake ↓ (SSE) (1.0H+0.3V1) | 439 | 2,526 | O.K |
| Earthquake ↑ (SSE) (1.0H+0.3V2) | 365 | 2,526 | O.K |
| Earthquake ↓ (SSE) (0.3H+1.0V1) | - | - | O.K |
| Earthquake ↑ (SSE) (0.3H+1.0V2) | - | - | O.K |

이때 $P_u$는 해석결과 파일에 작용하는 인장력을 의미하며, $P_a$는 허용 인장 저항 값을 의미한다. 표 2.15.24에서와 같이 비교, 검토한 결과 각 하중 조합 별로 모두 허용치 이내의 값을 보이므로 설계된 파일 설계는 인장력에 대하여 만족함을 알 수 있다.

(나) 파일 본체 설계 결과 요약

파일 본체 설계에 대한 결과를 요약하면 표 2.15.25와 같다.

표 2.15.25 파일 본체 설계 결과

| Load Combination | Axial Force | Moment | Shear Force | Check |
|---|---|---|---|---|
| | $N_{ed}<N_{c,Rd}$ | $M_{ed}<M_{c,Rd}$ | $V_{ed}<V_{c,Rd}$ | |
| Normal operation | 2,124 < 15,499 | 547 < 3,406 | 262 < 4,475 | O.K |
| Pneumatic & Hydro test | 2,523 < 15,499 | 659 < 3,406 | 316 < 4,475 | O.K |
| Maintain Inspection | 2,124 < 15,499 | 547 < 3,406 | 262 < 4,475 | O.K |
| Wind | 2,005 < 15,499 | 509 < 3,406 | 235 < 4,475 | O.K |
| Earthquake ↓ (SSE) (1.0H+0.3V1) | 1,400 < 15,499 | 2,104 < 3,406 | 2,397 < 4,475 | O.K |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Earthquake↑(SSE)<br>(1.0H+0.3V2) | 1,493 < 15,499 | 2,108 < 3,406 | 2,381 < 4,475 | O.K |
| Earthquake↓(SSE)<br>(0.3H+1.0V1) | 2,478 < 15,499 | 1,163 < 3,406 | 969 < 4,475 | O.K |
| Earthquake↑(SSE)<br>(0.3H+1.0V2) | 2,790 < 15,499 | 1,177 < 3,406 | 976 < 4,475 | O.K |

나. 결론

파일 설계 개선에 의한 결과는 기존 설계 결과와 유사하였다. 오히려 기존 설계의 수치계산에서 고려할 수 없었던 원형구조물에서의 구속효과에 의한 모멘트를 FEM해석에 의해 산출하여 반영할 수 있었다. 결과적으로 Eurocode에 의한 한계상태설계법을 적용함으로써 기존보다 합리적인 설계법을 적용하였고, 개선된 파일 설계에 따라 검토한 결과 파일 설계는 검토 조건을 모두 만족하였다.

4. 기초 설계 개선의 검토

본 연구는 저장탱크의 용량 증가와 지진력 상향 및 설계응답스펙트럼 변경의 세 가지 사항을 반영하여 설계를 진행하였다. 저장탱크 용량은 기존 20만 kl급에서 27만 kl급으로 증가하였고, 지진 수준은 규모 6.5 수준의 최대가속도 0.2g에서 규모 7.0 수준의 최대가속도 0.3g로 상향되었다. 또한 설계응답스펙트럼은 기존 NRC 응답스펙트럼에서 UBC 응답스펙트럼으로 변경하였다. 지진력 상향과 설계응답스펙트럼에 대한 내용은 “제 I 편 특수하중(온도/지진 등) 설계 개선 및 평가” 보고서에 이미 언급하였으므로, 본 장에서는 생략하기로 한다. 본 장에서는 개선된 27만 kl급 저장탱크 기초 설계와 기존 20만 kl급 저장탱크의 기초 설계를 비교하여 개선된 기초 설계의 적정성을 검토하고자 한다. 또한 기초 설계 개선에 적용한 파일의 타당성을 검토하고자 한다.

가. 개선에 의한 파일 제원 및 배치

개선된 파일 배치에 대한 상세는 본보고서 2장에서 언급한 바와 같고, 그림 2.15.4와 같이 배치되었다. 이때 적용된 파일 제원 및 물성은 표 2.15.4와 같다. 개선에 의한 파일 제원과 배치를 기존 20만 kl급과 비교하여 표 2.15.26과 그림 2.15.9에 나타내었다. 표 2.15.26과 같이 개선과 기존 설계 모두 파일 부식두께 2mm를 포함하여, 개선 시 파일두께 18mm, 기존시 파일두께 16mm로 설계되었다.

그림 9의 1/4 단면을 대상으로 하여 개선시 중심부는 3.1m 간격으로 10줄, 2.7m 간격으로 4줄을 직교 배치하고, 원환부는 2.5m 간격으로 3줄을 원환 배치하였다. 파일 배치 결과 총 833개의 파일이 탱크 기초에 배치되었다. 기존 20만 kl급 저장탱크의 기초 설계는 중심부 2.9m 간격으로 12줄을 직교 배치하고, 원환부는 각각 2.9m, 2.6m, 2.3m 간격으로 원환 배치하였다. 파일 배치 결과 총 824개의 파일이 탱크 기초에 배치되었다.

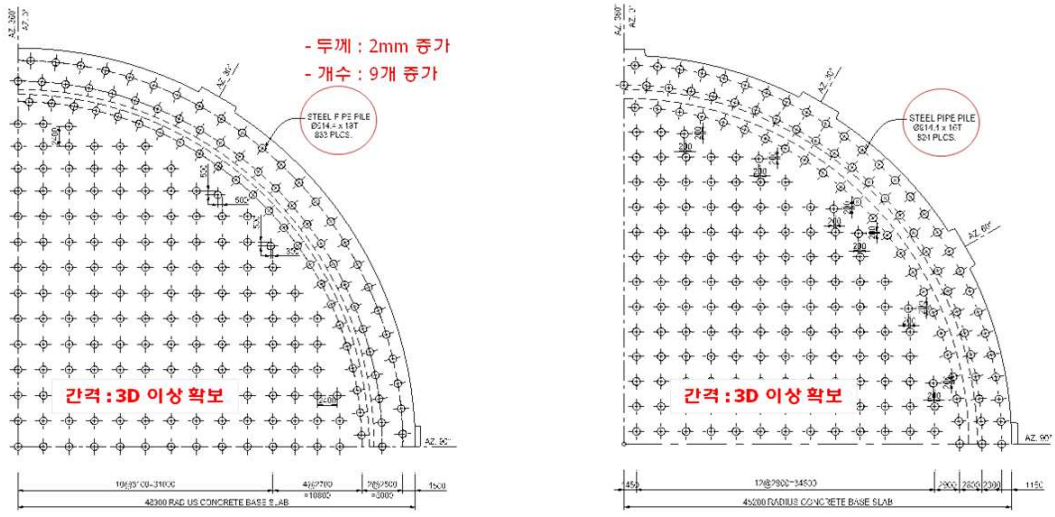
결과적으로 탱크 용량 증가로 인하여 탱크 설계 하중이 증가하였으나, 파일 두께가 증가하였기 때문에 말뚝이 받는 반력이 증가하였다. 이와 같은 이유로 실제로 증가한 하중에 비하여 파일 개수는 크게 늘지 않은 것으로 보이며, 또한 기존 말뚝 반력과 본체 응력에 대한 안

전율이 보수적으로 검토되었던 것으로 판단된다.

표 2.15.26. 개선시 파일 제원과 기존 (20만 kl급) 파일 제원 비교

| 구분 | 개선 27만 kl급 | 기존 20만 kl급 | 단위 |
|---|---|---|---|
| Diameter (D) | 914.4 | 914.4 | mm |
| Thickness (t) | 18 | 16 | mm |
| Corrosion allowance | 2 | 2 | mm |
| Section area (A) | 44,957[1)] | 39,426[1)] | $mm^2$ |
| Length of circumference (U) | 2,860[1)] | 2,860[1)] | mm |
| Modulus of elasticity (E) | 200,000 | 200,000 | $N/mm^2$ |
| Moment of inertia of section (I) | 4,496,910,048[1)]) | 3,960,950,238[1)] | $mm^4$ |
| Modulus of section (Z) | 9,878,976[1)] | 8,701,560[1)] | $mm^3$ |
| Unit mass | 78.50 | 78.50 | $kN/m^3$ |
| Yield stress ($f_y$) | 240 | 240 | MPa |
| Tensile stress ($f_{sa}$) | 140 | 140 | MPa |
| Compressive stress ($f_{sa}$) | 140 | 140 | MPa |

1) 부식두께 2mm를 고려하여 계산한 값임




(a) 개선 27만 kl급 (b) 기존 20만 kl급

그림 2.15.9 개선 및 기존 파일 배치

나. 적용 파일의 타당성 검토

삼척 LNG 기지에 실제 시공될 27만 kl급 저장탱크 #210~212의 지반을 대상으로 하여 시추조사를 실시한 결과 표3과 같이 지층 내 자갈층이 존재하였다. 이에 강관직경별 항타해머의 항타관입성 가능 여부와 경제성을 검토하여, 적용 파일의 타당성을 검토하였다. 말뚝 항타 구간중 말뚝길이가 가장 짧은 B10-1번공(L=34.6m)과 가장 긴 B12-1번공(L=55.6m)에 대하여

항타관입성 가능 여부를 검토하였다. 본 연구에서 고려한 말뚝직경과 파일두께는 Φ914.4×18t, Φ1016×16t, Φ1016×18t, Φ1016×19t의 3가지에 대하여 검토하였으며, 동광해머 100kN과 130kN을 이용하였다. 검토에 사용한 프로그램은 GRLWEAP Ver.2005이며, 항타관입성 선정기준은 다음과 같이 허용 압축 항타응력(≤ 0.9σy= 0.9×240kN/m$^2$=2,160kN/m$^2$ = 216 MPa), 지지력(≥ 6,000kN/본), 항타수(BPM ≤ 500)를 동시에 만족하여야 한다. 항타관입성 검토결과를 표 2.15.27에 나타내었다.

표 2.15.27 항타관입성 검토결과

| 구 분 | 공 번 | 해머 | 말뚝직경 | 해석결과 | | | | 선정여부 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | BPM | 압축응력 (MPa) | 지지력 (kN/본) | 낙하고 (m) | |
| 관 입 성 | B10-1 | 100kN | 914.4×18 | 2,642 | 197 | 7,843 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×16 | 항타불가 | 197 | 8,350 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×18 | 2,342 | 192 | 8,358 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×19 | 1,459 | 190 | 8,350 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | 130kN | 914.4×18 | 516 | 206 | 7,843 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×16 | 756 | 207 | 8,350 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×18 | 496 | 201 | 8,358 | 1.2 | 가능 |
| | | | 1,016×19 | 429 | 199 | 8,350 | 1.2 | 가능 |
| | B12-1 | 100kN | 914.4×18 | 항타불가 | 197 | 17,167 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×16 | 항타불가 | 197 | 18,709 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×18 | 항타불가 | 190 | 18,783 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×19 | 항타불가 | 190 | 18,709 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | 130kN | 914.4×18 | 항타불가 | 206 | 17,167 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×16 | 항타불가 | 207 | 18,709 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×18 | 항타불가 | 199 | 18,783 | 1.2 | BPM 500 초과 |
| | | | 1,016×19 | 항타불가 | 199 | 18,709 | 1.2 | BPM 500 초과 |

강관말뚝의 경우 항타조합시 BPM은 400~500 정도에서 결정하는 것이 지지력 확보와 경제성에 있어서 가장 무난한 것으로 평가되며, 400 이하로 떨어지는 경우 비경제적인 항타조합일 가능성이 크다. 항타관입성 검토결과 B10-1번공의 경우, 130kN 해머로 항타 할 경우 Φ1,016×18t와 Φ1,016×19t 강관말뚝만 기준을 만족하고, 나머지 강관말뚝 Φ914.4×18t 및 Φ1,016×16t는 BPM 500을 초과하여 기준에 만족하지 못하였다. 또한 B12-1번공의 경우 100kN와 130kN 해머로 항타 할 경우 모든 경우가 BPM 500을 초과하므로 적절한 항타조합이 아닌 것으로 판단되었다. 따라서 항타관입성 여부만 고려한 경우 Φ1016×18t와 Φ1016×19t가 가장 조건에 부합한 결과를 얻었다. 한편 파일 설계시 경제성을 검토하면 표 2.15.28과 같은 결과를 얻게 된다. 표 2.15.28은 PRD 천공비(1m당)와 탱크 1기당 기초공사비를 산출한 것으로 Φ1016×19t보다 Φ914.4×18t의 강관말뚝이 경제성 측면에서 유리한 것으로 산정되었다.

항타관입성과 경제성의 두 가지 사항을 모두 고려하여 표 2.15.29에 나타내었다.

두 가지 사항을 모두 고려해 본 결과 Φ914.4×18t 파일이 가장 적합하다는 결론을 내릴 수

있으며, 따라서 개선된 파일 설계 시의 Φ914.4×18t 파일 사용은 타당하다는 결론을 내릴 수 있다.

표 2.15.28 경제성 검토결과

| 구 분 | 공 사 비 | | | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| | Φ914.4×18 | Φ1016×16 | Φ1016×19 | |
| 재료비 | 336,740원/m | 509,000원/m | 599,000원/m | 개략 공사비 (말뚝길이 40m) |
| 파일 항타비 | 96,931원/m | 103,472원/m | 103,472원/m | |
| 탱크당 | 142억/824본 | 176억/722본 | 202억/722본 | |

표 2.15.29 말뚝직경별 검토결과

| 구 분 | 강관말뚝 직경 | | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| | Φ914.4×18 | Φ1016×16 | Φ1016×19 | |
| 관입성 | △ | △ | ◎ | ◎ : 유리<br>○ : 보통<br>△ : 불리 |
| 경제성 | ◎ | △ | △ | |

# 16절. 외부탱크 시공법 개선 방안 도출

1. 외부탱크 시공법 개선

본 보고서의 외부탱크 시공법 개선은 크게 두 가지 관점에서 기술하고자 한다. 첫 번째는 임시 개구부 위치를 2단에서 1단으로 변경하는 방안이며, 두 번째는 바닥판 텐던을 제거하는 방안이다. 보고서 2장에서는 국내외의 임시 개구부 설치 위치 현황과 검토 방법에 대하여 설명하고, 임시 개구부의 위치를 벽체 2단과 벽체 1단으로 하였을 때의 구조적 특징을 기술하고자 한다. 또한 임시 개구부 설치 위치에 따른 설계 결과 비교 및 경제성 검토를 통해 임시 개구부 위치 변경에 대한 결론을 내리고자 한다. 3장에서는 바닥판 텐던 제거 방안에 대하여 기술한다. 먼저 바닥판 텐던 설치 현황과 검토 방법에 대하여 기술하고, 외기 온도 조건에 따른 온도 해석 결과를 비교하고자 한다. 또한 바닥판 텐던 설치 여부에 따른 설계 결과 비교와 경제성 검토를 통해 바닥판 텐던 제거 방안에 대한 결론을 내리고자 한다.

2. 임시 개구부 위치 변경

임시 개구부의 위치는 일반적으로 벽체 하단부에 설치된다. 콘크리트 외조를 시공하는 동안 내조 시공도 이루어지는데, 이때 내조 작업을 위한 자재의 이동 통로로써 임시 개구부가 이용된다. 본 연구는 LNG 저장탱크 시공 중 설치되는 임시 개구부의 위치를 기존 벽체 2단에서 벽체 1단으로 변경하고 안전성과 경제성, 그리고 시공성이라는 관점 아래 임시 개구부 위치의 적정성을 검토하고자 한다.

가. 임시 개구부 위치 현황 및 검토 방법

국·내외에서 적용한 임시 개구부의 현황에 대한 사례를 조사하여, 표1에 정리하였다. 표1과 같이 국외 사례와 국내에서 초기에 건설된 인천 6호기와 통영 1~3호기를 제외하고는 임시 개구부가 모두 벽체 2단에 설치된 것으로 조사되었다. 이는 인천 6호기와 통영 1~3호기가 국외 설계사에 의해 설계된 점을 감안하면, 국외에서는 벽체 1단에 임시 개구부 설치를 선호하는 것으로 보인다.

표 2.16.1 국·내외 임시 개구부 제원 및 현황

| 구 분 | | 만자리노 PJT | 절강성 PJT | 인천 #6 | 통영 #1~3 | 삼척 #1~4 & 평택 #15~19 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 탱크 용량 | | 15만KL | 16만KL | 10만KL | 14KL | 20만KL |
| Type | 내 조 | Membrane | 9% Ni. | 9% Ni. | 9% Ni. | 9% Ni. |
| | 외 조 | 고상식 | 지상식 | 고상식 | 지상식 | 지상식 |
| 임시 개구부 위치 | | 벽체 1단 | 벽체 1단 | 벽체 1단 | 벽체 1단 | 벽체 2단 |
| 개구부 크기 (단위 : m) | Large | 6.1 x 4.0 | 6.1 x 3.6 | 5.5 x 2.15 | 5.5 x 2.98 | 12.4 x 4.25 |
| | Small | - | 3.1 x 2.6 | 4.0 x 2.15 | 4.0 x 2.98 | 8.0 x 4.25 |

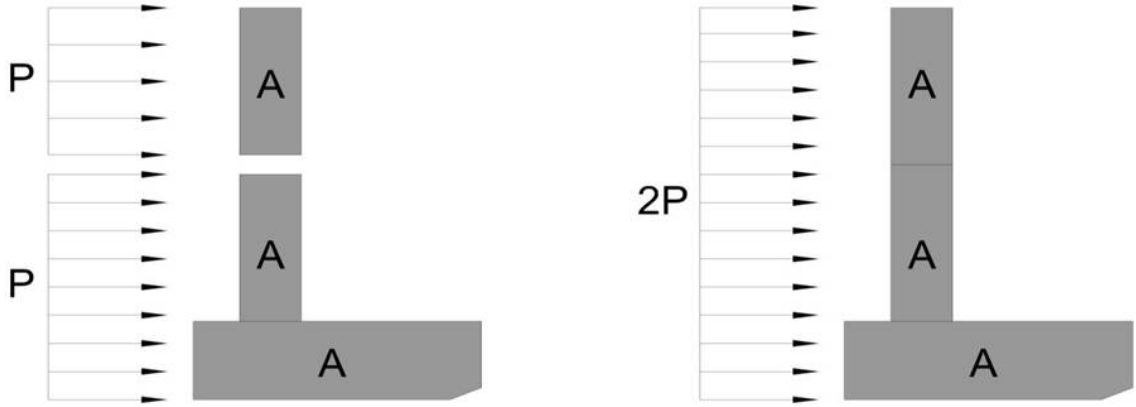
임시 개구부 위치의 적정성은 벽체 2단에 적용한 경우와 벽체 1단에 적용한 경우에 대해 구조적인 특징을 분석한 뒤, 안전성과 경제성 측면을 검토하였다. 검토 시 적용한 설계 코드는 EN14620 및 Eurocode를 기반으로 하였으며, 경제성 분석은 동일한 탱크 제원에 대해 임시 개구부 위치가 벽체 2단에 있는 경우와 벽체 1단에 있는 경우에 대한 철근과 텐던 물량을 비교하였다.

나. 임시 개구부 위치에 따른 구조적 특징

본 장에서는 LNG 탱크 구조물을 대상으로 임시 개구부 위치가 벽체 2단에 있는 경우와 벽체 1단에 있는 경우에 대한 구조적인 차이점을 비교 분석하고, 두 방법의 장단점에 대해 논의하고자 한다.

(1) 임시 개구부 위치 : 벽체 2단

앞서 언급된 바와 같이 국내에서 설계된 LNG 탱크는 대부분 벽체 2단에 임시 개구부를 설치해 왔다. 이처럼 벽체 2단에 임시 개구부를 설치한 이유는 일반적으로 LNG 탱크 구조물은 유출 시 등의 상황에서 아래 벽체 하단부에 하중이 집중되므로 이 위치에서의 Hoop 방향 프리스트레싱 도입 효율을 극대화하기 위한 것으로 판단된다. 이러한 개념은 그림 2.16.1에 보인 바와 같이 정량적으로 설명이 가능하다.




(a) 벽체 2단인 경우 (b) 벽체 1단인 경우

그림 2.16.1 임시 개구부 위치에 따른 원환 방향 프리스트레싱 도입 개요도

그림 2.16.1에서 임시 개구부 위치가 벽체 2단인 경우는 바닥판 원환부(Annular Part)와 벽체 1단까지 콘크리트를 타설한 후, 이 상태에서 프리스트레싱 작업을 실시하므로 바닥판 원환부와 벽체 하단부에는 P/(2A) 만큼의 압축력이 도입되고, 최종적으로 5/6 x (P/A) 만큼의 압축력이 도입된다. 반면, 임시 개구부 위치가 벽체 1단인 경우는 바닥판 원환부 타설 후 벽체 1단까지 콘크리트 타설은 가능하나, 임시 개구부 존재로 인해 긴장 작업이 불가하므로 바닥판 프리스트레스 효율을 극대화하기 벽체 1단 콘크리트 타설 이전에 바닥판 긴장력을 도입하게 된다. 최종적으로 벽체와 바닥판에 도입되는 압축력은 4/6 x (P/A)가 된다. 참고로 그

림 2.16.1에 보여지는 긴장력 P와 단면적 A는 상대적인 비교를 위해 정해놓은 값으로 벽체 2단인 경우가 1.25배(=5/4) 더 크다는 뜻은 아니다.

따라서 벽체 하단부에 Hoop 방향으로 프리스트레싱 도입 효율을 극대화하기 위해서는 임시 개구부의 위치가 2단인 경우가 벽체 1단인 경우에 비해 더 유리하다는 것을 알 수 있으며, 기존 국내 사례에서도 이러한 장점을 이용하기 위해 임시 개구부 위치를 벽체 2단에 적용한 것으로 판단된다.

(2) 임시 개구부 위치 : 벽체 1단

벽체 1단에 임시 개구부가 놓이게 되면 벽체와 바닥판 원환부의 프리스트레싱 도입 효율은 분명 벽체 2단에 비해 떨어지게 된다. 그러나 바닥판 중앙부(Circular Part)의 입장에서는 달리 생각해 볼 필요가 있다. 그림 2.16.2는 벽체와 바닥판 원환부의 Hoop 방향 프리스트레싱에 의해 바닥판 중앙부가 어떠한 영향을 받는지를 정량적으로 설명하고 있다.

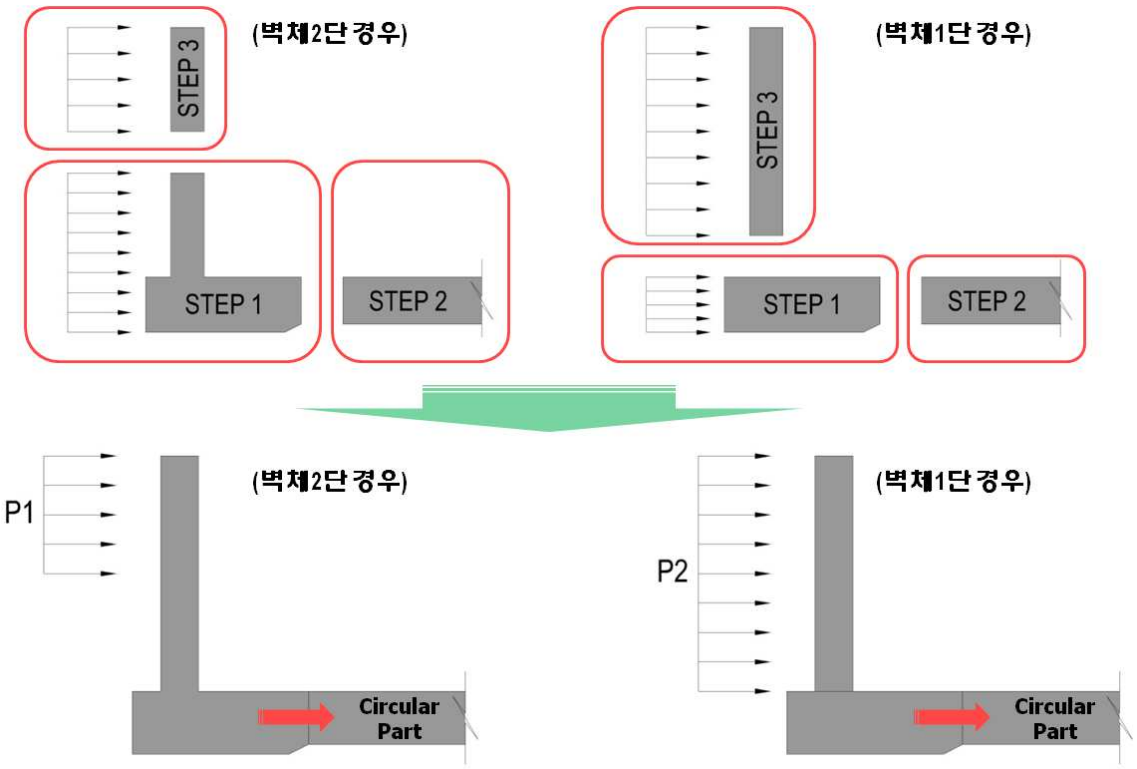



그림 2.16.2 임시 개구부 위치에 따른 바닥판 중앙부 2차 압축력 도입 개요도

그림 2.16.2에서 Step 1, 2, 3은 시공 순서라는 점에 착안하여 벽체와 바닥판 원환부의 Hoop 방향 프리스트레싱에 의해 바닥판 중앙부에 가해지는 2차적인 압축력 크기를 생각해 보면 벽체 1단인 경우가 더 유리한 상황이 된다. 다시 말해 벽체 2단에 임시 개구부가 놓이게 되면 벽체 및 바닥판 중앙부 전구간이 타설된 이후 벽체 Hoop 방향으로 긴장 작업이 이루어지는 반면, 벽체 2단에 임시 개구부가 놓이는 경우는 바닥판 중앙부가 타설되기 이전에 벽체 하단부에 긴장 작업이 이루어지므로 그 만큼(벽체 하단부에 도입된 긴장력 만큼)의 바

닥판 중앙부에는 압축력이 덜 도입되는 결과를 준다.

따라서 벽체 및 바닥판 원환부의 Hoop 방향 프리스트레싱에 의한 바닥판 중앙부의 2차적인 압축력 도입을 극대화하기 위해서는 임시 개구부의 위치가 벽체 1단인 경우가 벽체 2단에 비해 더 유리하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

상기 기술된 내용에 의하면 임시 개구부의 위치에 따라 구조적인 장점과 단점이 동시에 존재한다는 것을 알 수 있으며, 이러한 사실을 바탕으로 다음 장에서 제시된 설계 결과에 대해 좀 더 구체적으로 논의하기로 한다.

다. 임시 개구부 위치에 따른 결과 비교

검토 대상 구조물인 27만 kl급 LNG 저장탱크의 제원과 탱크 일반도 및 임시 개구부의 상세를 표 2.16.2와 그림 2.16.3 및 그림 2.16.4에 나타내었다.

표 2.16.2 탱크 주요 제원

| 구 분 | | 사 용 재 료 | 반 경 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| 내 조 | | 9% Ni. | 내경: 90.0m | |
| 외 조 | 바닥판 | $f_{ck}$ = 40.0MPa<br>$f_{ck}$ = 30.0MPa | 외경: 96.6m | PC 및 RC |
| | 벽 체 | $f_{ck}$ = 40.0MPa | 내경: 92.4m | PC |
| | 링 빔 | $f_{ck}$ = 40.0MPa | 내경: 92.4m | PC |
| | 지 붕 | $f_{ck}$ = 30.0MPa | 내경: 92.4m<br>(곡률 반경) | RC |
| Pile 기초 | | Type : Steel Pipe<br>($f_y$=240.0MP) | Φ914.4mm | 833ea |

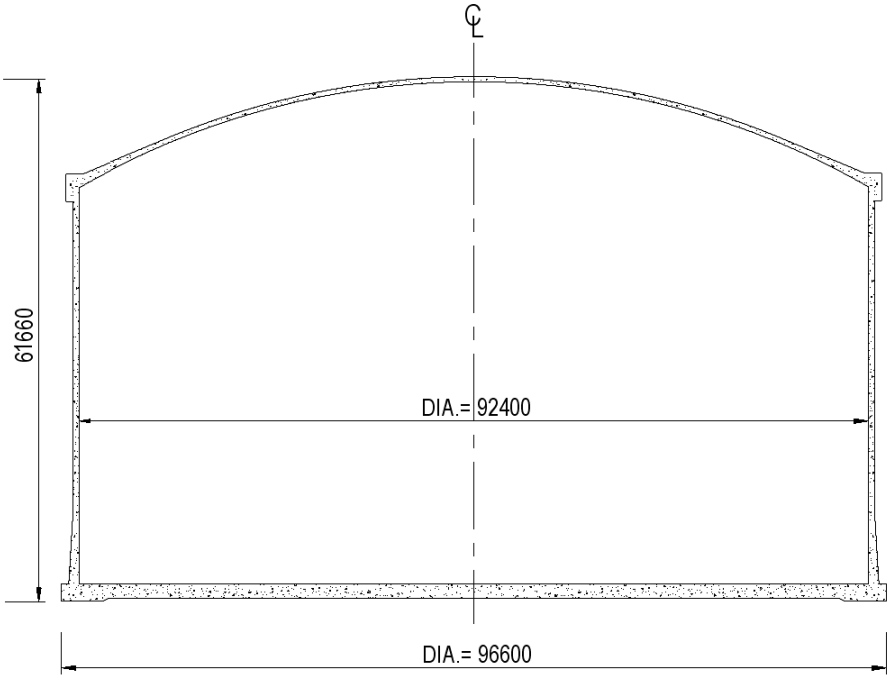



그림 2.16.3 탱크 일반도 (단위 : mm)

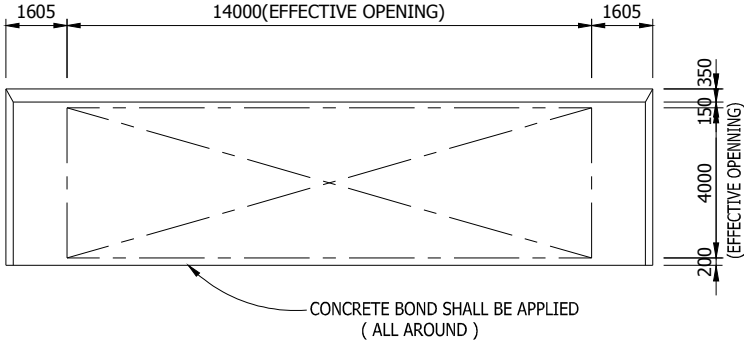
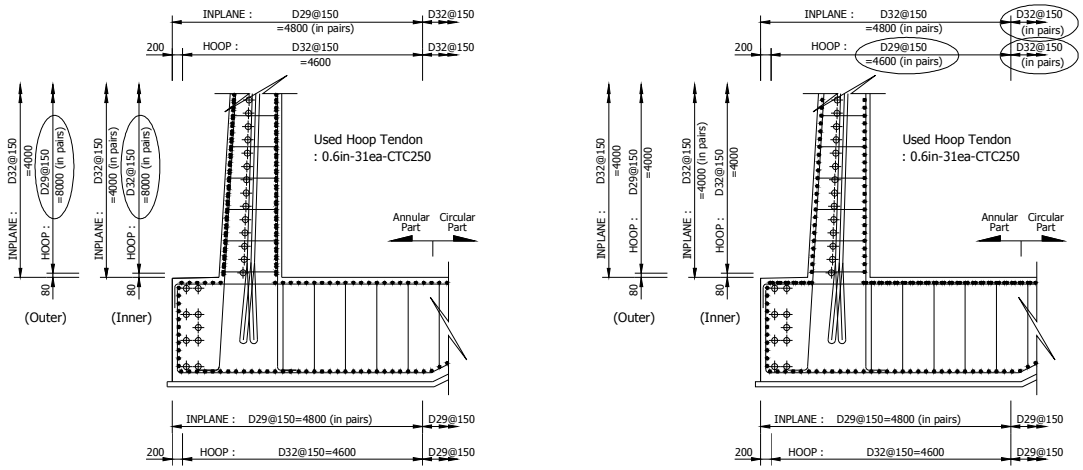



그림 2.16.4 임시 개구부 상세

(1) 임시 개구부 위치에 따른 설계 결과 비교

(가) 주요 단면 상세

Eurocode를 기반으로 하여 임시 개구부 위치에 따른 상세 설계를 수행하였고, 이로부터 대표적인 단면 상세를 임시 개구부 위치에 따라 그림 2.16.5와 같이 정리하였다. 그림 2.16.5에 의하면 임시 개구부 위치가 벽체 1단인 경우는 벽체 하단부의 철근량이 벽체 2단의 경우에 비해 늘어났음(그림 2.16.5 (a)의 원호 표시부)을 알 수 있고, 반면 임시 개구부 위치가 벽체 2단인 경우는 바닥판 중앙부의 철근량이 벽체 1단의 경우에 비해 늘어난 결과(그림 2.16.5 (b)의 원호 표시부)를 볼 수 있다. 이러한 경향은 앞서 설명한 바와 같이 프리스트레싱 도입 효율에 기인한 것으로 분석되었다.

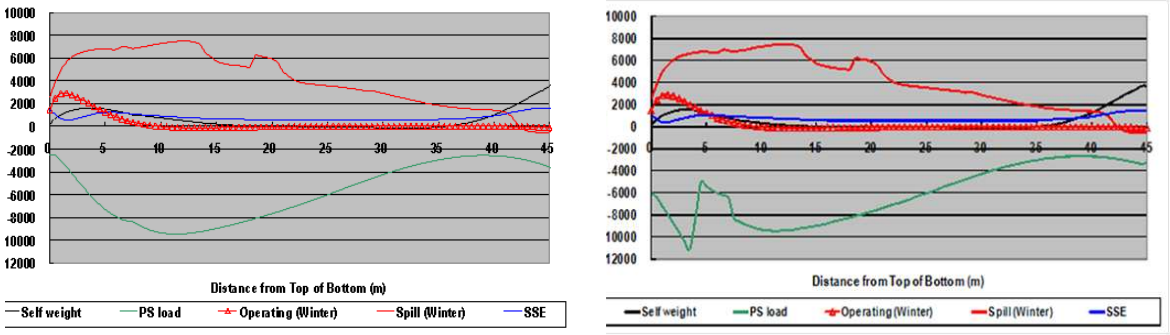



(a) 벽체 1단인 경우 (b) 벽체 2단인 경우

그림 2.16.5 임시 개구부 위치에 따른 주요 단면 상세

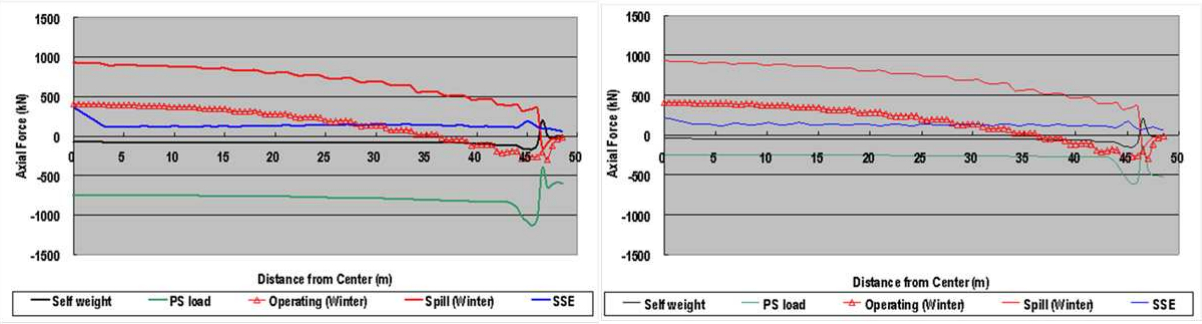
(나) 부재력도

그림 2.16.6 및 그림 2.16.7과 같이 주요 하중에 대한 Hoop 방향 및 Inplane 방향의 부재력도를 임시 개구부 위치에 따라 구성 요소별로 구분하여 비교하였다. 여기서 주요 하중이라 함은 본 검토 시 설계에 영향력이 크다고 판단되는 고정하중, 프리스트레스 하중, 온도 하중, 그리고 SSE 지진 하중을 의미하고, 그림에 보여지는 부재력은 하중 계수가 적용되지 않은 실하중에 의한 부재력도이다. 임시 개구부의 위치가 달라지게 되면 프리스트레싱력을 제외하고는 모든 작용 하중은 동일해야 한다. 그림 2.16.6과 그림 2.16.7에 의하면 프리스트레싱에 의한 벽체 Hoop 방향 축력 및 바닥판 축력에 큰 차이를 보이며, 그 외에 하중에 대해서는 동일함을 알 수 있다. 앞서 2장에서 설명한 바와 같이 그림 2.16.6의 벽체 Hoop 방향 축력은 임시 개구부 위치가 벽체 2단일 경우, 벽체 하단부에 큰 압축력이 도입되는 것을 볼 수 있는 반면 벽체 1단인 경우는 상대적으로 적은 압축력이 도입된다는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 2.16.7의 바닥판 축력의 경우는 임시 개구부 위치가 벽체 1단일 경우, 바닥판 중앙부 및 원환부에 큰 압축력이 도입되는 반면에 벽체 2단인 경우는 상대적으로 적은 압축력이 도입되는 것을 알 수 있다.




(a) 벽체 1단인 경우 (b) 벽체 2단인 경우

그림 2.16.6 임시 개구부 위치에 따른 벽체 Hoop 방향 축력도

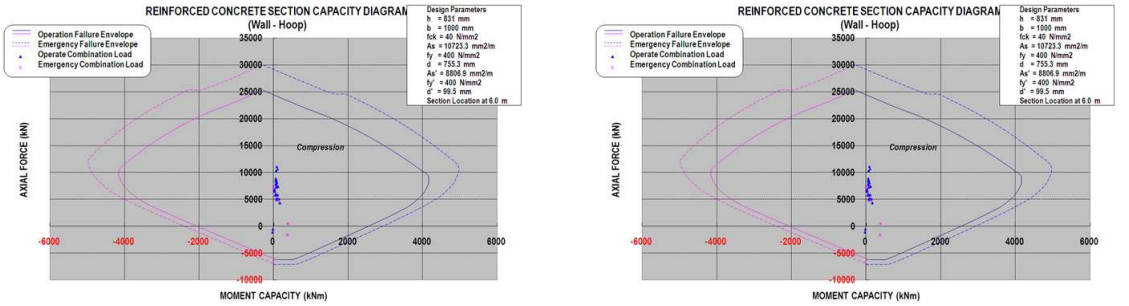



(a) 벽체 1단인 경우 (b) 벽체 2단인 경우

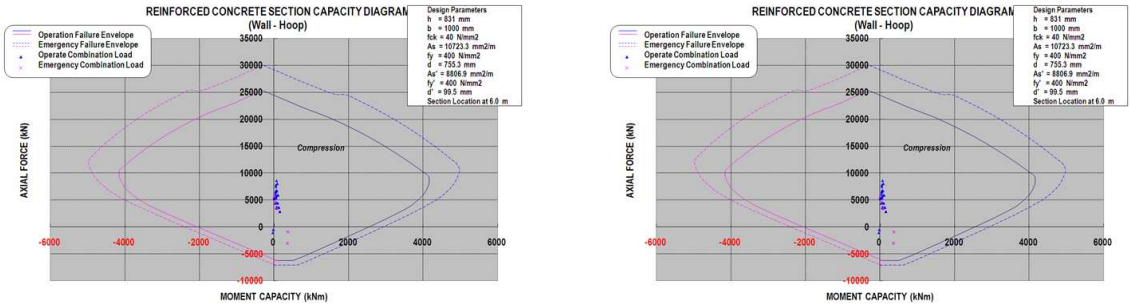
그림 2.16.7 임시 개구부 위치에 따른 바닥판 Inplane 방향 축력도

(다) 단면 검토 결과

임시 개구부 위치에 따른 ULS 검토 결과 및 SLS 검토 결과를 각각 그림 2.16.8과 그림 2.16.9에 비교 제시하였다. 참고로 ULS 검토는 그림 2.16.5에 제시된 단면을 대상으로 하였고, 그림 2.16.8과 그림 2.16.9에서 “철근 보강전” 혹은 “철근 보강후”라는 뜻은 그림 2.16.5의 원호 부분의 철근이 보강되기 전과 후를 의미한다. 먼저, 벽체 Hoop 방향 경우는 두 경우 모두 철근 보강 전후에 관계없이 적절한 안전성을 확보하는 것으로 나타났으며, 바닥판의 경우 또한 동일한 경향을 보였다. 반면, 그림 2.16.10에 제시된 SLS 검토 결과에서 벽체의 경우는 임시 개구부 위치가 벽체 1단에 설치될 때, 철근 보강전 단면에서 Hoop 방향 벽체 하단부의 일부 구간에 허용 균열폭을 초과하는 경우가 발생해 철근을 보강하여 허용 균열폭 이내가 되도록 하였다. 반면, 임시 개구부 위치가 벽체 2단일 경우는 철근 보강전 단면에서 바닥판 Inplane 방향으로 상당 부분이 허용 균열폭을 크게 초과하는 것으로 나타나 전반적인 철근 보강이 필요한 것으로 나타났다.

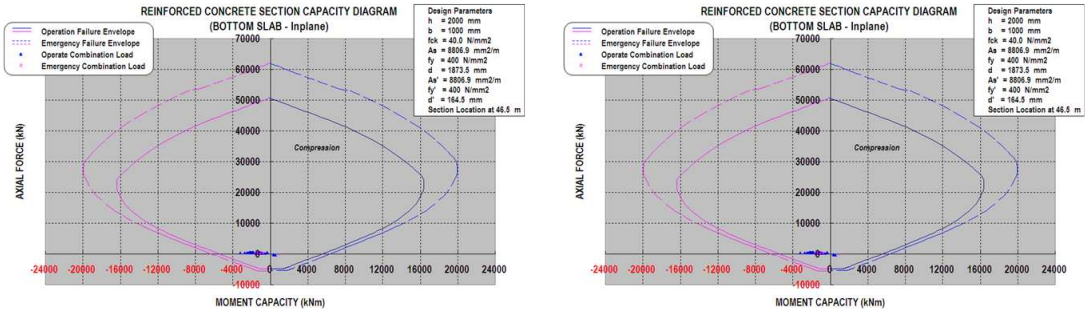



(a) 벽체 1단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

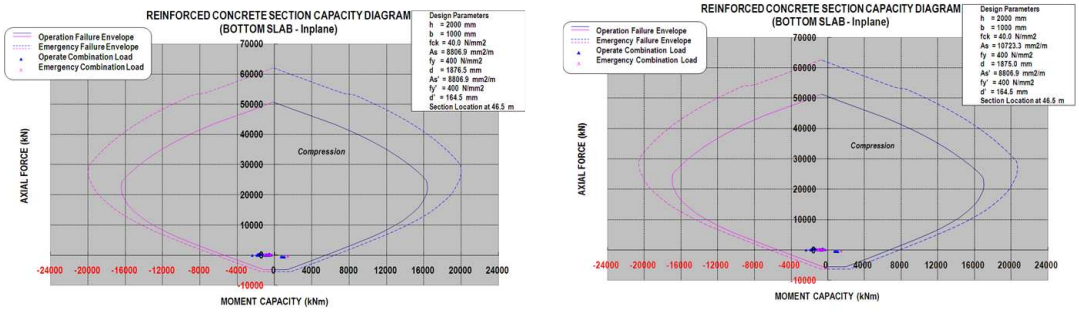



(b) 벽체 2단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

그림 2.16.8 임시 개구부 위치에 따른 벽체 Hoop 방향 ULS 검토 결과

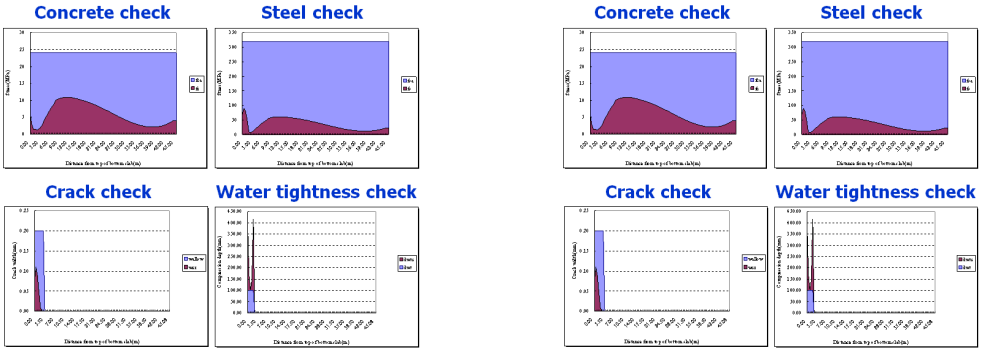



(a) 벽체 1단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

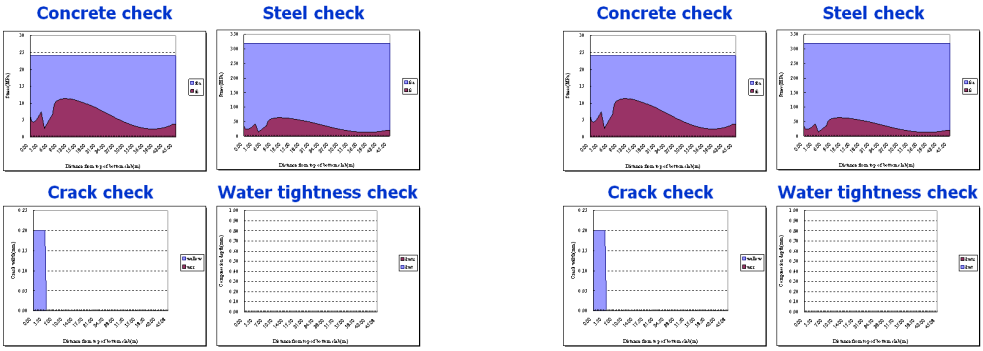



(b) 벽체 2단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

그림 2.16.9 임시 개구부 위치에 따른 바닥판 ULS 검토 결과

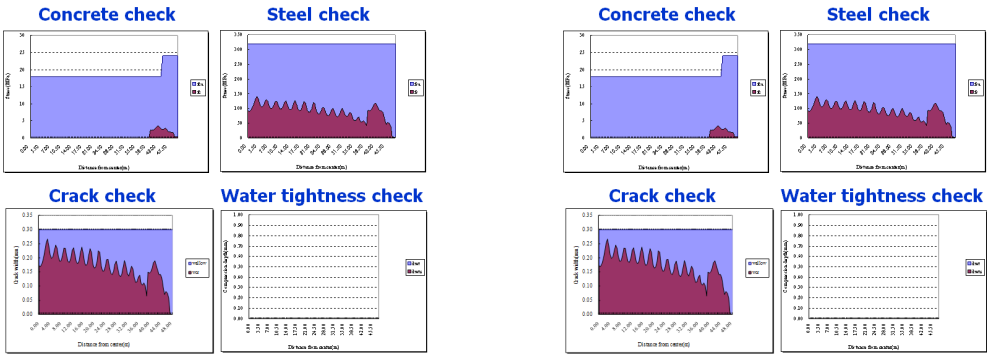



(a) 벽체 1단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

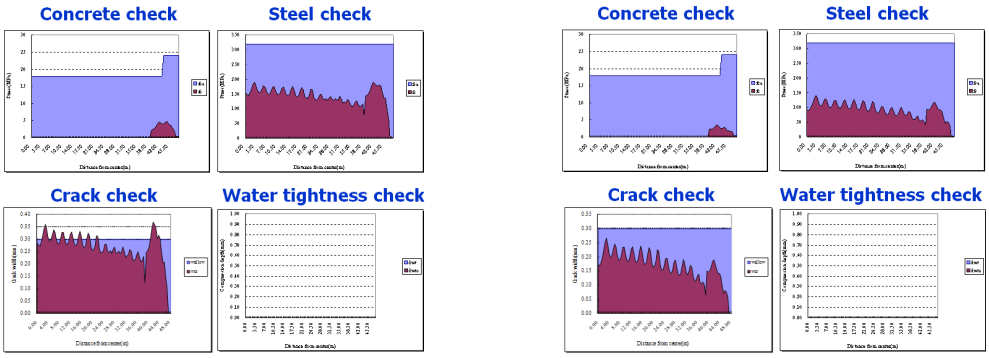



(b) 벽체 2단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

그림 2.16.10 임시 개구부 위치에 따른 벽체 Hoop 방향 SLS 검토 결과




(a) 벽체 1단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)




(b) 벽체 2단인 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

그림 2.16.11 임시 개구부 위치에 따른 바닥판 SLS 검토 결과

(2) 임시 개구부 위치에 따른 경제성 검토

본 절에서는 앞서 수행된 상세 설계 결과를 바탕으로 하여 임시 개구부 위치에 따른 물량의 증감을 비교 분석하였다. 그림 2.16.5와 같이 두 경우에 대한 물량은 철근량을 제외하고 모두 같으므로 바닥판 및 벽체에 대한 철근량 증감에 대해서만 비교하였다. 표 2.16.3에 보인 바와 같이 임시 개구부 위치가 벽체 1단에 있는 경우, 벽체에 설치되는 철근량은 벽체 2단의 경우보다 11.2% 증가하였고, 바닥판의 철근량은 45.3% 감소하였다. 따라서 임시 개구부를 벽체 1단에 설치하면 철근량 654톤(=4025.2- 3371.2)만큼의 경제적 이득이 예상되며, 이와 같은 결과를 보이는 이유는 앞서 설명하였듯이 임시 개구부가 벽체 2단에 위치할 경우에는 바닥판에 2차적인 압축력이 적게 도입된 것이 주된 이유라 판단되며, 더불어 Eurocode에 의한 균열폭 산정 방법이 다소 보수적인 것에서 비롯된 것으로 분석되었다.

표 2.16.3 임시 개구부 위치에 따른 철근량 비교 (단위 : 톤)

| 임시 개구부 위치 | 바닥판 | 벽체 | 바닥판+벽체 |
|---|---|---|---|
| 벽체 1단 | 1792.1 | 1579.1 | 3371.2 |
| 벽체 2단 | 2604.5 | 1420.6 | 4025.2 |

라. 결론

본 검토에서는 시공 중 설치되는 임시 개구부 위치의 적정성 검토를 수행하기 위해 임시 개구부가 벽체 1단에 설치되는 경우와 벽체 2단에 설치되는 경우에 대한 상세 설계를 실시하였고, 안전성과 경제성, 그리고 시공성을 고려하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

• 임시 개구부가 벽체 1단에 설치될 경우, 벽체 하단부에 도입되는 프리스트레싱의 도입 효율은 떨어지나 바닥판의 2차 압축력 도입 효율이 증가하는 것으로 나타났다.

• 반면, 임시 개구부가 벽체 2단에 설치될 경우에는 벽체 하단부의 프리스트레싱의 도입 효율은 높아지나, 바닥판의 2차 압축력 도입 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 이로 인해 벽체 하단부의 필요 철근량이 감소되기는 하나, 바닥판 중앙부(Circular Part) 전반에 걸쳐 필요 철근량이 크게 증가하는 결과를 보였다.

3. 바닥판 텐던 제거 방안

LNG 탱크의 바닥판에 원환 방향 텐던을 설치하는 주된 이유는 온도 하중에 의한 인장 응력에 대비하기 위해서이다. LNG 탱크는 구조물의 특성상 극저온에 대한 온도 영향을 설계 시 반영해야 하는데, 이러한 온도 하중은 일반적으로 LNG 탱크 설계 단면을 결정하는 주요 인자로 작용함은 물론, 상시에 영구적인 하중으로 작용한다. 따라서 본 검토에서는 LNG 저장탱크 바닥판의 텐던 설치 여부에 대하여 안전성과 경제성, 그리고 시공성을 검토하여 그 적정성에 대해 논의하고자 한다.

가. 바닥판 텐던 설치 현황 및 검토 방법

국·내외 LNG 탱크를 대상으로 바닥판 텐던 설치 현황에 대한 사례를 조사하여, 표4에 정리하였다. 유출 시 온도하중과 LNG 액압이 동시에 작용하게 되면 벽체 하단부와 바닥판 원환부(Annular Part) 단부 부근에 매우 큰 인장력을 유발하여, 필요 철근량 및 텐던량이 타 부위에 비해 많이 요구되기 때문에 국내의 설계 사례에서는 LNG 탱크 벽체 하단부 뿐만 아니라 바닥판 단부에도 원환 텐던을 설치해 왔다. 그러나 해외의 설계 사례의 경우 국내 사례에 비해 벽체 하단부의 철근량과 텐던량이 상대적으로 적고, 바닥판 텐던은 설치하지 않는 것으로 조사되었다.

표 2.16.4 국내외 바닥판 제원 및 텐던 설치 현황

| 구분 | 인천 #6 (10만급) | 통영 #1~3 (14만급) | 삼척 #1~4 &평택 #15~19 (20만급) | 만자리노 PJT (15만급) | 절강성 PJT (16만급) | 호주 PJT (18.8만급) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 바닥 텐던 | 설치 | 설치 | 설치 | 미설치 | 미설치 | 미설치 |
| 바닥판 두께 | T=1000mm (말뚝+고상식) | T=1900mm (말뚝+지상식) | T=2000mm (말뚝+지상식) | T=1000mm (말뚝+고상식) | T=1000mm (말뚝+고상식) | T=1000mm (직접기초) |
| 사용 텐던 | 0.6in-19ea (6 Tendon) | 0.6in-19ea (9 Tendon) | 0.6in-27ea (9 Tendon) | - | - | - |

본 검토에서는 바닥판 텐던 필요 여부를 결정하기 위해 텐던 유무에 따른 안전성과 경제성, 그리고 시공성을 비교 분석하였으며, 검토 시 적용한 설계 코드는 EN14620 및 Eurocode를 기반으로 하였다. 본 검토에서 주요 인자로 작용하는 온도 하중의 영향은 열전달 및 열응력 해석을 통해 평가되는데, 해석 시 반영되는 대기 온도 조건에 따라 해석 결과가 크게 달라진다. 따라서 3장에서는 대기 온도 조건을 변수로 한 해석을 수행하고, 이로부터 본 검토에 적용할 대기 온도 조건을 결정하였다. 경제성 검토는 동일한 탱크 단면에 대해 바닥판 텐던이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우에 대한 철근과 텐던 물량을 기반으로 수행하였다.

나. 외기 온도 조건에 따른 온도 해석 결과 비교

본 장에서는 LNG 탱크 구조물을 대상으로 외기 온도 조건에 따른 온도 해석 결과를 비교 분석하여 본 검토에 적용할 외기 온도 조건을 결정하고자 한다.

(1) 외기 온도 적용 사례 및 온도 영향 분석

LNG 탱크는 외기 온도 조건에 비교적 큰 영향을 받는 구조물이므로 타 프로젝트에서 적용한 외기 온도 고려 방법을 조사하였다. 국·내외 LNG 탱크 설계시 반영한 외기 온도 적용 사례를 표 2.16.5에 정리하였다. 표 2.16.5에 의하면 통영 #13~14, 평택 #15~17 그리고 삼척 #1~9 탱크는 온도 적용 컨셉이 유사하며, 유출 시에 대한 온도 조건을 여름과 겨울로 구분하지 않고, 연평균 온도를 일괄 적용하였다. 반면, 광양 3호기와 멕시코 만자리노 프로젝트에서는 유출 시에도 여름과 겨울로 구분하여 외기 온도를 고려한 것으로 조사되었다. 그리고 만자리노 프로젝트에서는 정상 상태와 비정상 상태에 적용한 외기 온도가 동일한 것을 볼 수

있다.

표 2.16.5 국·내외 외기 온도 적용 사례 (단위 : ℃)

| 구 분 | 정상 상태 | | 비정상 상태 (유출시) | |
|---|---|---|---|---|
| | 여 름 | 겨 울 | 여 름 | 겨 울 |
| 통영 #13~14 | +36.9 | -11.6 | +14.2 (Mean Annual) | |
| 평택 #15~17 | +37.4 | -18.7 | +11.8 (Mean Annual) | |
| 삼척 #1~9 | +37.0 | -14.1 | +12.5 (Mean Annual) | |
| 광양 3호기 | +30.8 | -5.6 | +25.3 | 0.0 |
| 만자리노 PJT | +33.3 | -12.5 | +33.3 | -12.5 |

한편, 상기 내용과 관련하여 일본 OGE사에서는 LNG 탱크 설계시 합리적인 외기 온도를 적용하기 위한 연구를 수행하였다. OGE사에서 제안한 외기 온도 컨셉을 간단히 설명하면, 그림 2.16.12와 같이 콘크리트(표면으로부터 10cm깊이)의 온도는 여름과 겨울철의 대기 온도와는 차이를 보인다는 것이다. 연구 결과로부터 OGE사가 평택 지역에 제시한 외기 온도는 여름과 겨울 각각 +25.0℃와 -2.0℃이며, 이는 표5의 평택 #15~17 탱크에 적용된 외기 온도(+11.8℃)와는 큰 차이를 보인다. 이처럼 LNG 탱크가 온도 하중에 큰 영향을 받는 구조물임에도 프로젝트마다 외기 온도 적용 컨셉이 다른 것을 확인할 수 있다.

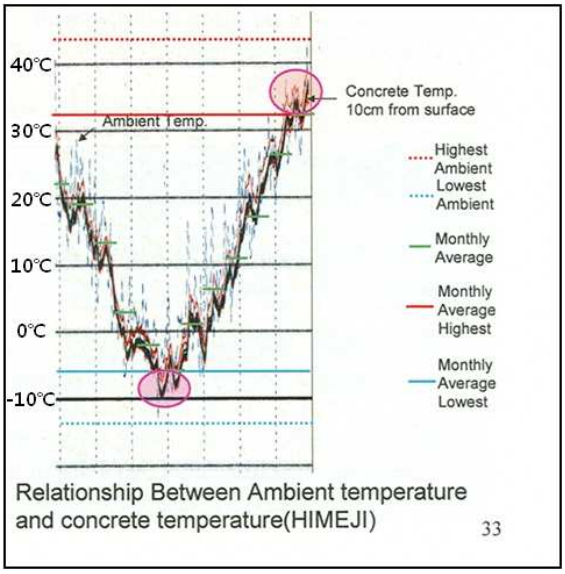



표 2.16.12 콘크리트 온도와 대기 온도 사이의 관계

(2) 외기 온도 조건에 따른 온도 해석 결과

본 절에서는 3장에서 언급한 외기 온도 조건이 LNG 탱크의 유출 시 온도 해석 결과에 미치는 영향에 대해서 살펴보기로 한다. 비정상 상태(유출시)의 온도 해석 시 외기 온도 조건을 여름과 겨울, 특히 겨울의 낮은 온도가 적용될 경우에는 벽체 하단부와 바닥판 단부에

Hoop 방향으로 매우 큰 인장 응력이 발생한다. 반면, 연평균 온도 즉, 표 2.16.5의 +12.5~14.2℃ 정도의 온도가 적용되면 상대적으로 인장 응력 수준이 낮아진다. 이와 같은 설명을 돕고자 유출 시 외기 온도 조건에 따른 열전달 및 열응력 해석을 수행하였고, 이로부터 벽체부에 발생하는 Hoop 방향 인장력을 그림 2.16.13에 비교 제시하였다. 여기서, 해석 CASE는 외기 온도 +12.7℃를 적용한 경우와 -0.6℃를 적용한 경우에 대한 것이다. 그림 2.16.13에 의하면 외기 온도를 +12.7℃로 적용한 경우는 -0.6℃를 적용한 경우에 비해 벽체 하단 0~10m구간에서 상대적으로 Hoop 방향 인장력이 작게 발생한다. 특히, 벽체 하단 2m~5m 구간에서는 최대 60% 정도의 단면력 차이를 보인다. 이 정도의 차이는 벽체 Hoop 방향의 철근과 텐던 물량에 상당한 영향을 주는 수준이며, 따라서 LNG 탱크 설계 시 외기 온도의 결정에 있어서 신중해야 할 필요가 있다. 본 검토에서는 설계 시 외기 온도 조건을 표 2.16.5의 삼척 #1~9 탱크와 동일하게 적용하였다.

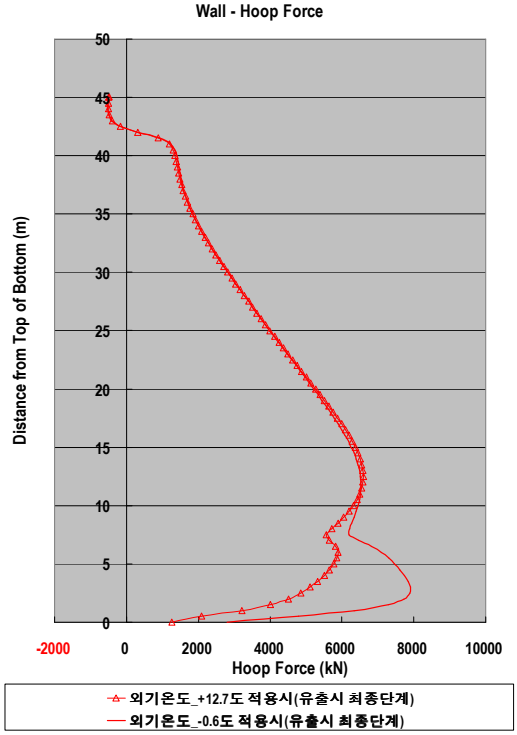



그림 2.16.13 유출 시 외기 온도 조건에 따른 벽체 Hoop Force 비교

다. 바닥판 텐던 설치 여부에 따른 결과 비교

본 연구의 검토 대상 구조물인 LNG 저장탱크의 제원과 일반도는 표 2.16.2 및 그림 2.16.3과 같으며, 바닥판 원환부 텐던 배치 상세는 그림 2.16.14와 같다.

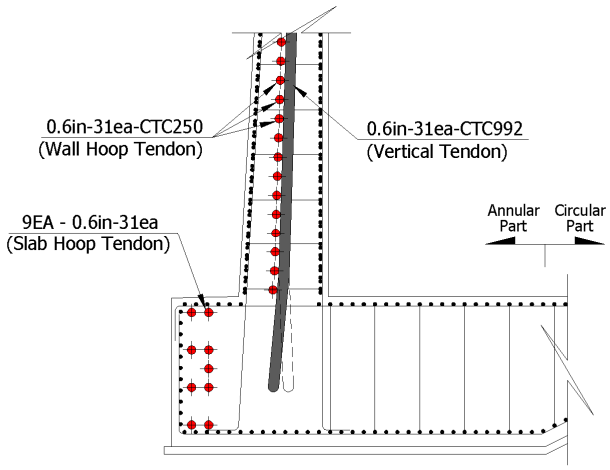
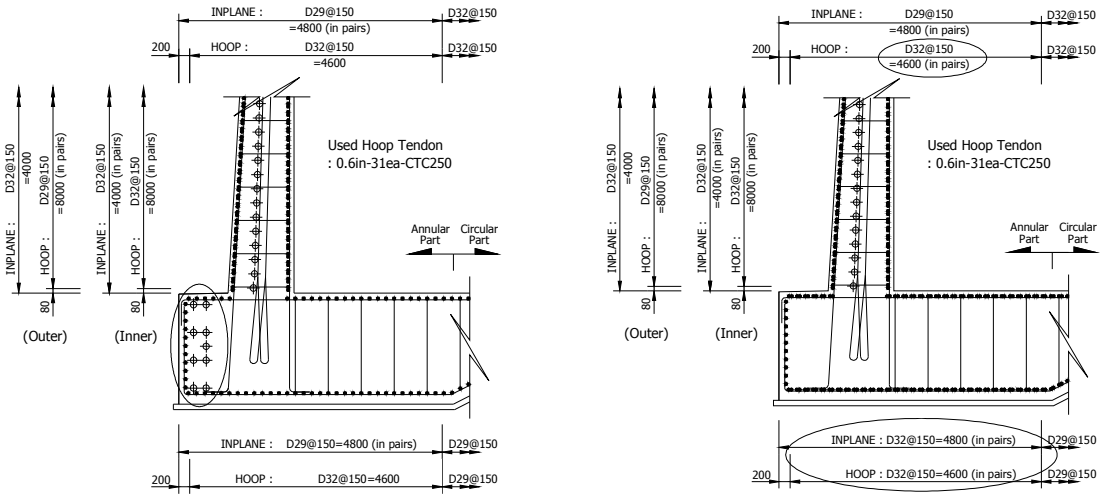



표 2.16.14 바닥판 텐던 배치 상세 (단위 : mm)

(1) 바닥판 텐던 설치 유무에 따른 설계 결과 비교

(가) 주요 단면 상세

바닥판 텐던 유무에 따른 상세 설계를 수행하였고, 이로부터 대표적인 단면 상세를 바닥판 텐던 유무에 따라 그림 2.16.15와 같이 정리하였다. 그림 15에 의하면 바닥판 텐던이 없는 경우는 텐던이 설치된 경우에 비해 벽체 하단부 Hoop 철근 및 바닥 상면의 Hoop 철근이 더 많이 배치된 것을 알 수 있다. 이는 온도 하중에 의한 인장력을 철근만으로 저항하도록 설계되었기 때문에 당연한 결과이다. 반면, 바닥판에 텐던이 설치되면 압축력이 도입된 만큼 인장력 수준이 낮아져 그림 2.16.15의 (a)와 같이 다발 철근(Bundled Rebar)이 불필요하게 되므로 철근 상세가 간결해진다. LNG 탱크 시공 시 벽체 하단부와 바닥판이 만나는 위치에서는 가급적 복잡한 철근 상세가 되지 않도록 다발 철근을 피하는 것이 시공성 측면에서 유리하다.

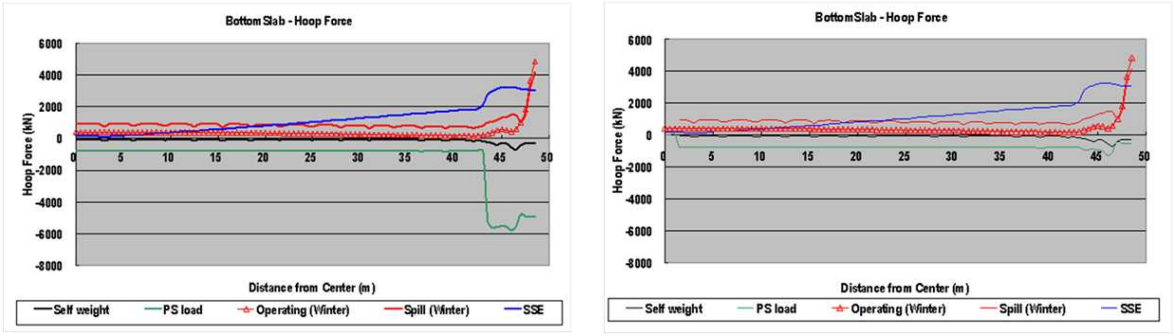



(a) 바닥판 텐던이 있는 경우 (b) 바닥판 텐던이 없는 경우

그림 2.16.15 바닥판 텐던 유무에 따른 주요 단면 상세

(나) 부재력도

그림 2.16.16에 보인 바와 같이 주요 하중에 대한 Hoop 방향 및 Inplane 방향의 부재력도를 바닥판 텐던 유무에 따라 구성 요소별로 구분하여 비교하였다. 여기서 주요 하중이라 함은 본 검토 시 설계에 영향력이 크다고 판단되는 고정하중, 프리스트레스 하중, 온도 하중, 그리고 SSE 지진 하중을 의미하고, 그림에 보여지는 부재력은 하중 계수가 적용되지 않은 실하중에 의한 부재력도이다. 바닥판 텐던의 유무에 따른 부재력도는 바닥판 단부의 프리스트레싱력을 제외하고는 모두 동일해야 하며, 그림 2.16.16에 의하면 프리스트레싱에 의한 바닥판 단부의 Hoop 방향 축력에 큰 차이가 있으며, 그 외에 하중에 대해서는 동일함을 알 수 있다. 그림 2.16.16의 (a)에서 유출 시 발생되는 인장력의 대부분을 프리스트레싱에 의한 압축력이 상쇄시키고 있음을 알 수 있다.

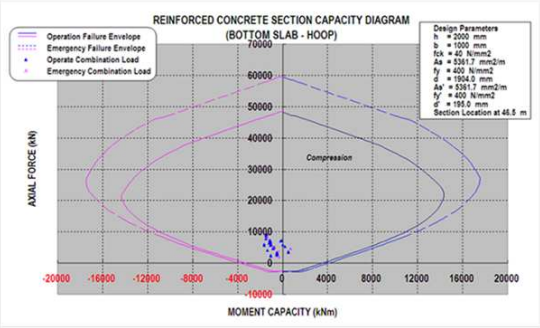



(a) 바닥판 텐던이 설치된 경우 (b) 바닥판 텐던이 설치되지 않은 경우

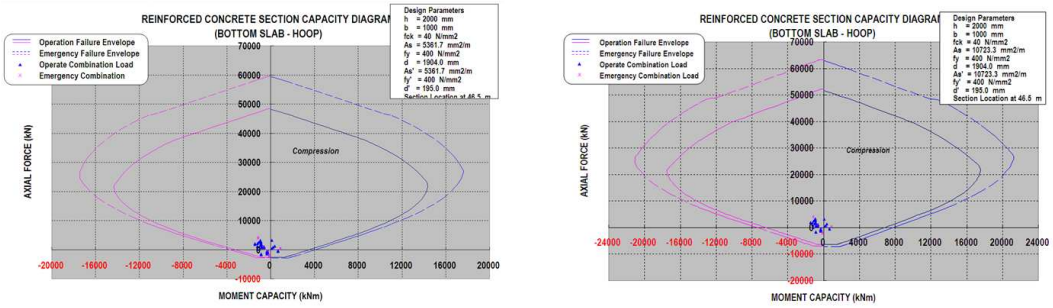
그림 2.16.16 바닥판 텐던 유무에 따른 바닥판 Hoop 방향 축력도

(다) 단면 검토 결과

바닥판 텐던 유무에 따른 ULS 검토 결과 및 SLS 검토 결과를 각각 그림 2.16.17과 그림 2.16.18에 비교 제시하였다. 참고로 ULS 검토는 그림 2.16.15에 제시된 단면을 대상으로 하였고, 그림 2.16.17과 그림 2.16.18에서 “철근 보강전” 혹은 “철근 보강후”라는 뜻은 그림 2.16.15의 원호 부분의 철근이 보강되기 전과 후를 의미한다. 그림 2.16.17의 ULS 검토 결과에 의하면 바닥판 텐던이 설치되지 않을 경우, 철근이 보강되기 전에는 안전율이 매우 낮으며, 철근 보강 후에는 안전율이 상향하되 바닥판 텐던을 설치한 경우보다는 상대적으로 안전율이 작다. 콘크리트 단면에 인장력이 크게 발생하면 근본적으로 콘크리트가 인장에 취약하기 때문에 철근 부착력에 의존하여 안전성을 확보하기에는 무리가 있어 보이며, 따라서 프리스트레싱 등의 방법을 동원하여 인장력을 감소시키는 것이 바람직하다고 판단된다.

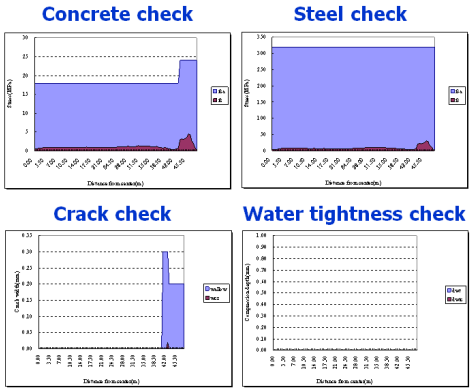



(a) 바닥판 텐던이 있는 경우

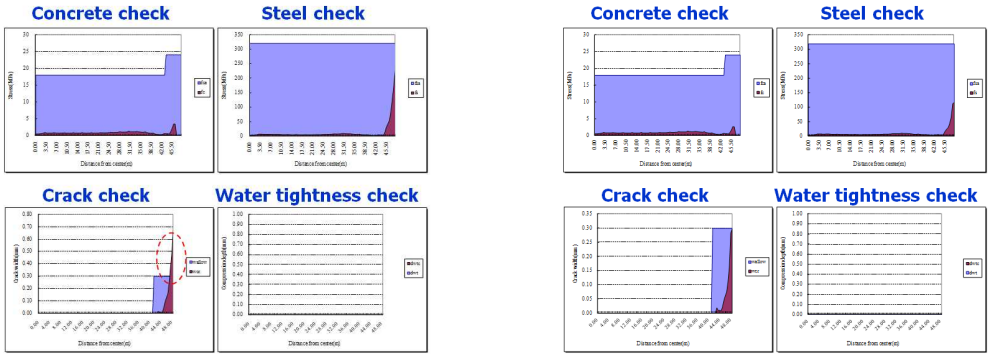



(b) 바닥판 텐던이 없는 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

그림 2.16.17 바닥판 텐던 유무에 따른 바닥판 단부의 Hoop 방향 ULS 검토 결과




(a) 바닥판 텐던이 있는 경우




(b) 바닥판 텐던이 없는 경우 (좌:보강전, 우:보강후)

그림 2.16.18 바닥판 텐던 유무에 따른 바닥판 Hoop 방향 SLS 검토 결과

그림 2.16.18의 SLS 검토 결과에서도 ULS 검토 결과와 비슷한 경향을 보여준다. 바닥판 텐던이 설치되지 않을 경우, 철근이 보강되기 전에는 바닥판 단부로 갈수록 균열폭이 급격히 커져 허용치를 훨씬 초과하며, 철근을 보강한 후에는 허용 균열폭 이내가 되지만 바닥판 텐던을 설치한 경우에 비해서는 안전율에 큰 차이를 보인다. 본 보고서 서두에 언급하였듯이 LNG 탱크는 구조물의 특성상 극저온에 대한 온도 영향이 설계 단면을 결정하는데 주요 인자로 작용하고, 또한 상시에 영구적인 하중으로 작용하기 때문에 온도 하중에 대해 충분한 안전성이 보장되어야 할 필요가 있다.

(2) 바닥판 텐던 설치 유무에 따른 경제성 검토

본 절에서는 3장에서 수행된 상세 설계 결과를 바탕으로 하여 바닥판 텐던 유무에 따른 물량의 증감을 비교 분석하였다. 그림 2.16.15에 보여진 바와 같이 두 경우에 대한 물량은 철근량과 텐던을 제외하고는 모두 같으므로 바닥판 및 벽체에 대한 철근과 텐던량 증감에 대해서만 비교하였다. 표 2.16.6에 의하면 바닥판 텐던이 설치될 경우, 바닥판 철근량이 83톤 정도 감소되는 반면 텐던량이 2837m 증가하였다. 따라서 공사비 산출 시 적용되는 텐던의 단가와 철근의 단가를 감안하면 바닥판 텐던을 설치할 경우 공사비가 대략 1억 7천 만원 이상 증가될 것으로 예상된다.

표 2.16.6 바닥판 텐던 유무에 따른 물량 비교

| 구 분 | | 바닥판 | 벽체 | 바닥판+벽체 |
|---|---|---|---|---|
| 텐던 설치 | 철근량 (톤) | 1792.1 | 1579.1 | 3371.2 |
| | 텐던량 (m) | 2837.0 | 44550.0 | 47387.0 |
| 텐던 미설치 | 철근량 (톤) | 1875.4 | 1579.1 | 3454.5 |
| | 텐던량 (m) | - | 44550.0 | 44550.0 |

라. 결론

본 검토에서는 바닥판 텐던의 필요 여부에 대한 검토를 수행하기 위해 바닥판 텐던을 설치한 경우와 설치되지 않는 경우에 대한 상세 설계를 실시하였고, 안전성과 경제성, 그리고 시공성을 고려하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

• 바닥판 텐던이 설치되지 않을 경우, 온도 하중에 의한 인장력을 철근으로 저항하도록 설계가 가능하나 그 안전율에 있어서는 바닥판 텐던을 설치한 경우에 비해 매우 낮은 수준으로 나타났다.

• 반면, 바닥판 텐던이 설치될 경우, 공사비 증가는 불가피하지만 LNG 탱크가 온도 하중에 의해 상시 영구적으로 큰 인장력에 저항하기 위해서는 해당 위치에 압축력을 도입하여 발생 인장력을 감소시키는 방법이 바람직한 것으로 판단된다.

# 17절. 긴장재의 슬립거동을 고려한 LNG외부탱크 임시 개구부 여부에 따른 해석적 거동 평가

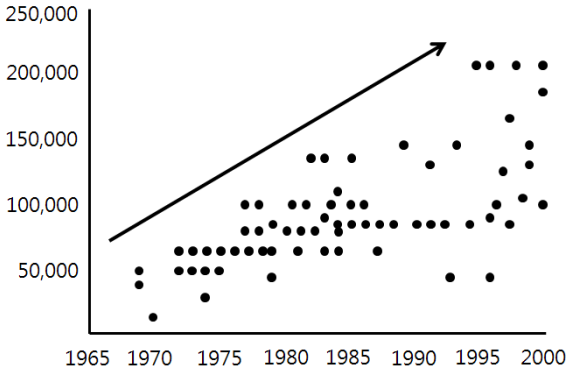
## 1. 연구 목적 및 동향

### 가. 연구목적

최근 국내에서 건설되고 있는 LNG 저장탱크는 외부 프리스트레스 콘크리트(Prestress concrete, PSC) 이중벽과 내부 9% 니켈방호벽 및 벽사이의 효율이 높은 단열재로 구성된 완전방호식이 적용되고 있다. 이는 현재까지 전 세계적으로 적용된 멤브레인 방식보다 대용량화에 보다 안전한 형태의 저장탱크로 판단되기 때문에 완전방호식 저장탱크로 건설이 활발히 진행되고 있다. 완전방호식 저장탱크의 내부탱크는 -162℃의 초저온 액체를 저장하기 위해 초저온에 견딜 수 있도록 고안된 9%니켈을 사용하여 건설되어진다. 반면 외부탱크는 천연가스의 저장보다는 방호 목적을 위해 건설 되어지는 것이 일반적이라 할 수 있다.

표 2.17.1 LNG 저장탱크의 대형화 추세

| 년 도 | 년 도 |
|---|---|
| ~1970 | 5,600m³ Trunkling LNG, USA<br>9,000m³ Canvey Island, England<br>12,000m³ Le Havre, France |
| 1971~1990 | 75,000m³ Chita, Japan<br>80,000m³ Himeji, Japan<br>100,000m³ Pyeongtack, Korea<br>100,000m³ Huelva, Spain<br>100,000m³ El Paso LNG, USA |
| 1991~2000 | 140,000m³ Tongyoung, Korea<br>160,000m³ Dabhol, India<br>180,000m³ Senboku Il, Japan |




따라서 외부탱크는 내부탱크의 균열로 인한 가스누출 사고 발생 시 최종 안전을 보장해야 하는 구조물이므로 외부탱크의 안전성 확보는 필수조건 이라고 할 수 있다. 일반적으로 외부탱크는 정상 가동시에 LNG에 의한 측압이 내부탱크에만 작용하지만 누출사고시 외부탱크의 콘크리트 벽체의 설계하중으로 작용한다. 또한 벽체의 안전성을 검토하는 과정에서 검토 시점은 시공시와 운전시 두 단계에 거쳐 수행되어야하며, 프리스트레스드(prestressed, PS)텐던에 의해 주요 설계하중이 서로 상쇄되는 경우인 운전시점 보다는 프리스트레스드 텐던에 의한 힘만 작용하는 시공시점이 설계를 지배하는 주된 요인이다. 시공시점에서 보다 상세한 연구를 위해서는 주된 요인인 프리스트레스의 손실량까지 고려하여 작용되었을 때 설계에 반영되어야만 한다. 또한 일반적으로 응력이 가장 크게 발생하는 곳은 강성이 큰 바닥판에 의해 구속되어 있는 벽체 하부이기 때문에 이러한 벽체 하부에 시공과정 중 임시개구부에 외부탱크 거동에 대한 연구가 이루어져야 한다.

실제 LNG 저장탱크는 초대형 구조물이기 때문에 외부 하중인자로부터 안전을 확보하기 위

해 최신의 건설기술을 집약적으로 사용하여 건설되어진다. 또한 장기적인 측면에서 볼 때 사용연한을 충분히 확보하기 위해 외부하중조건에 대해 만족할 수 있는 설계가 이루어 져야 한다. 따라서 본 보고서에서는 긴장재의 손실량을 고려한 LNG 외부탱크의 임시개구부에 의한 해석적 거동을 평가하고자 한다.

나. 연구동향

프리스트레스 손실량에 관한 연구는 해석적으로 이미 많은 연구가 진행되어 정립되어왔다. 이렇게 정립되어진 해석기술은 장대교량이나 원자로 격납건물에서 이미 적용되어 연구되어 많은 논문이 존재한다. 이전까지의 프리스트레스 손실량에 대한 연구를 살펴보면 Balazs, G, L(1992)은 긴장재의 전달길이에 걸쳐 일정한 부착응력-슬립관계가 적용된다고 가정하여 구성한 2차 미분방정식으로부터 유도식을 연구하였으며, Belarbi. A.와 Hsu. T. T. C.(1994)는 매설철근에 대한 제안식을 연구하였다. 이 논문은 본 연구에서 사용된 매설철근과 매설긴장재에 대한 손실량 부분을 슬립거동을 고려하여 해석하는 방법을 이용하였다. 그밖에 Maekawa. k.(2003)와 Rizkalla. S. H.(1984)는 프리스트레스 콘크리트에 대한 비선형해석에 대한 연구를 진행하였다. 그 내용은 압축영역에서는 Drucker-Prager 파괴면으로 나타내었으며, 인장영역은 Rankine 파괴면으로 나타내는데 이를 수학적으로 구체화하는 구성방정식은 직교이방성모델을 채택하여 콘크리트의 파괴모드를 지배하는 인장영역에 인장증강효과를 고려한 모델식을 제안하였다.

현재까지 연구되어진 긴장재의 정확한 해석기법에 대한 연구는 많았으나, 긴장재의 손실량을 고려한 LNG 외부탱크의 해석적 거동에 대한 연구는 국내외적으로 전무하다. 또한 시공단계에 존재하는 임시 개구부에 대한 연구는 필수적으로 이루어져야 하나 그 연구는 전무하다. 그러므로 이 연구에서는 긴장재의 슬립거동을 고려한 외부탱크의 거동분석 및 임시개구부 존재에 따른 시공중 해석적 거동의 차이를 비선형 해석프로그램인 MIDAS FEA로 수행하였다. 이 프로그램은 토목 구조 분야의 비선형 상세 해석에 필요한 제반기능을 집적하여 개발된 최적의 솔루션이며 TNO DIANA사와 조력 및 협력으로 개발된 프로그램이다. 주로 구조물의 비선형 해석, 열전달 해석, 피로해석 등 토목 구조 분야의 전반적인 해석분야에 사용된다. 본 연구에서는 MIDAS FEA를 사용하여 LNG 외부탱크벽체에 긴장재의 응력-변형율 및 시공 단계의 임시 개구부 여부에 따른 해석적 거동에 대해 정밀해석을 수행하였다.

외부탱크의 긴장재에 대한 응력 손실량에 대해 평가하는 방법은 실제 긴장재의 응력을 측정하는 방법이 가장 확실하나 비용과 시간이 많이 소요된다. 따라서 긴장재 손실량에 대한 구성방정식을 정의하고 컴퓨터 시뮬레이션을 도입하여 가스탱크의 성능을 평가하는 것이 효과적이다. 국내에서는 원자로 격납고에 대한 긴장재의 슬립거동을 고려한 비선형 상세 해석을 실시한 바 있다(곽효경, 2005). 이러한 연구에서는 1/4모델을 사용하였으며 가스 탱크와의 재료 물성이 다르기 때문에 추가적인 연구가 필요한 부분이다. 또한 이번에 새로 연구되어지는 270,000kL급 가스탱크의 임시 개구부에 대한 시공단계 중 해석은 필수적이라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 긴장재의 슬립거동을 고려한 LNG 외부탱크의 거동과 임시 개구부 여부에 따른 거동을 MIDAS FEA를 이용한 유한요소 해석을 통해 평가하고 LNG 외부탱크의 안전성을 검토하고자 한다. 또한 270,000kL급 탱크의 프리스트레스 텐던 정착구간을 60°

로 풀 모델링 거동을 평가하고자 한다.

다. 연구범위

본 연구는 긴장재의 슬립거동을 고려한 LNG 외부탱크의 설계시 안전성을 검토하기 위하여 시공 단계에 존재하는 임시 개구부 여부에 따른 해석적 거동을 평가한다. 본 보고서의 연구 범위는 다음과 같다.

① LNG 외부탱크는 MIDAS FEA를 이용한 긴장재의 슬립거동을 고려한 정밀해석기법을 사용하도록 한다.
② 임시 개구부는 폭 14m, 높이 4m로 시공단계 중 기초 타설 후 존재하며 지붕을 시공 완료 후 임시 개구부는 막게된다.
③ 임시 개구부가 존재할 때의 최대 하중은 LNG 외부탱크의 자중과 Ringbeam의 프리스트레스력의 79.7%, 기초의 프리스트레스력, 지붕의 자중이다.
④ 외부탱크 설계시 긴장재의 슬립거동을 고려하였으며, 프리스트레싱 텐던 배치 각도는 60°로 한다.
⑤ 임시 개구부의 주변 폭 20m, 높이 10m에서는 철근을 상세 모델링하여 보다 정확한 해석을 한다.
⑥ LNG 외부탱크의 콘트리트 압축강도는 40MPa, 강재의 경우 기본적으로 철근, 긴장재의 실험결과에 기초한 다선형 모델을 사용한다.

2. LNG 외부탱크 설계특성

LNG 저장탱크는 사고 발생 시 방호 방식에 따라 크게 3가지로 분류된다.
단일방호탱크는 저온액체에 직접 접촉하는 내조만이 저온연성의 필요조건을 충족하도록 설계 및 시공되는 탱크로 내조에서 초저온 액체가 누출 되었을 경우 이로 인한 2차 피해를 막기 위한 방액제가 필요하다.

이중방호탱크는 내조 및 외조가 저온 연성의 조건을 만족하도록 설계 , 시공하는 형식의 탱크이다. 외조는 내조 파괴로 인해 누출된 액체를 저장할 수 있도록 설계 및 시공되지만 기화된 가스의 누출 방지 기능을 고려하지 않는다.

완전방호탱크는 이중방호탱크와 마찬가지로 내조와 외조 모두 저온 연성 조건을 만족해야 한다. 외조는 내조 파괴 시 누출된 액체를 저장할 수 있을 뿐만 아니라 가스의 누출도 방지할 수 있도록 설계 및 시공된다. 1970년대까지 주로 건설된 단일방호탱크를 1세대 탱크라 하고, 1970년 이후에 건설된 이중방호탱크와 완전방호탱크를 2세대 탱크로 분류한다. LNG 저장탱크 형식별 도식도가 그림1에 나타나 있다.

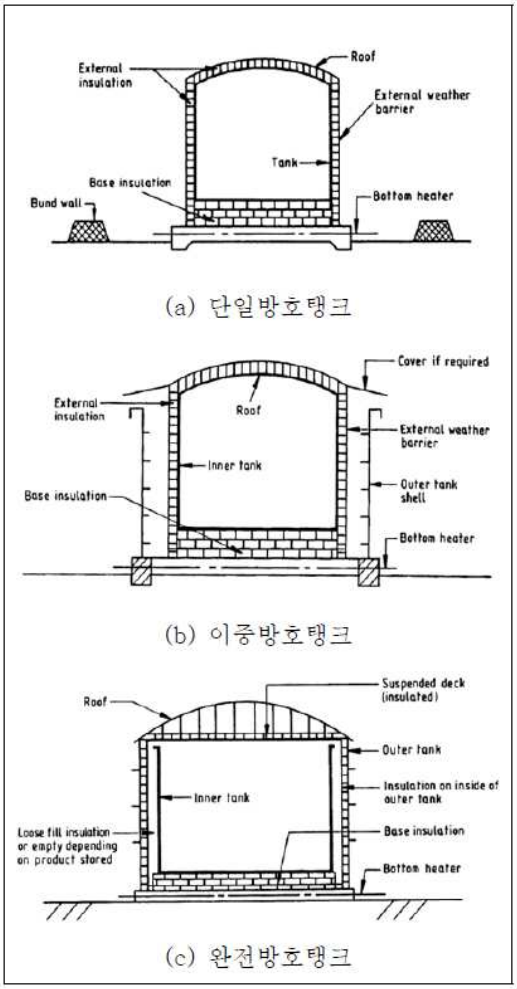



그림 2.17.1 LNG 저장탱크 형식별 도식도

완전 방호식 LNG 저장탱크는 크게 내부탱크와 외부탱크로 나누어 설계할 수 있다. 일반적으로 내부탱크는 9% 니켈강을 사용하여 -162℃이하에서 액화 가스를 안정적으로 저장 할 수 있도록 하기 위한 구조물로 실제 액화 천연가스의 저장시설이라고 볼 수 있다. 반면 외부탱크는 철근 콘크리트를 사용하여 내부탱크를 감싸고 있는 형태로 존재하며, PSC를 적용하여 보다 안정적인 콘크리트 구조물로 이루어져 있다. 따라서 LNG 저장탱크의 설계는 저장탱크의 종류에 따라 설계특성이 있는것을 알 수 있다. 일반적으로 LNG 저장탱크의 1차탱크(내부탱크)와 2차탱크(외부탱크)로 나누어 설계되는 완전방호식(full containment) 저장탱크의 종류로서 PSC로 설계 되어진 구조물을 말한다. 이러한 외부탱크의 설계는 콘크리트의 재료특성 및 구조적 성능을 고려하여 설계가 이루어지고 있다.

가. 외부탱크의 설계

본 연구에서는 실제 국내에 설계되고 있는 27만kL급 LNG 저장탱크의 설계를 기초로 하여 연구를 수행하였다. 완전방호식 지상식 저장탱크는 내부탱크와 외부탱크로 분리되어져 있으며, 실제 임시 개구부의 여부에 따른 외부탱크의 해석적 거동을 판단하기 위해 재료적, 물리적 재원을 동일하게 적용하였다.

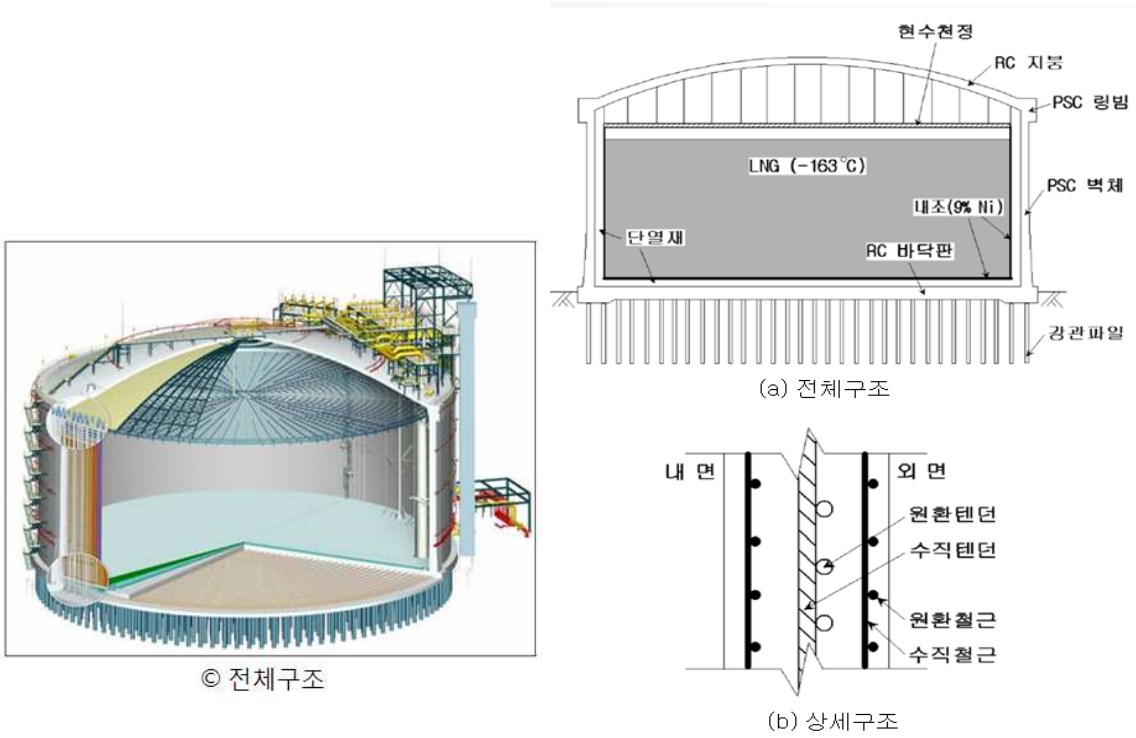



그림 2.17.2 완전 방호식 LNG 저장탱크의 구조

LNG 저장탱크의 전체적인 구조는 그림 2.17.2 (a),(c)와 동일하며, 실제 철근의 배근과 프리스트레스드 텐던의 배치형상은 그림 2.17.2 (b)와 같다.

(1) 설계범위

지상식 LNG 저장탱크의 설계는 내조설계와 외조설계로 이루어진다. 내조설계 시 9%니켈강 구조물과 이의 부속장비 및 기계장치의 설계를 수행한다. 설계조건에 따른 하중에 대하여 구조해석을 수행한 후 하부기초 및 탱크본체 상부구조물의 설계로 이루어진다. 탱크 벽체는 일반하중 조건뿐만 아니라 비상조건에서의 특수하중에 대해서도 구조물의 안전성 검토가 이루어진다. 다음은 본 연구에서의 LNG 가스탱크 설계과정을 나타내고 있다.

① 설계 기본사항 결정(저장용량, 사용기본 충족조건)

② 단일하중 결정 및 구조해석(일반하중, 특수하중, 선형탄성해석)

③ 단면력의 선형중첩(하중조건에 따른 단면력 조합)

④ 벽체설계(단면력 산정, PSC)

⑤ 비상조건 검토

표 2.17.2 설계 기본 정보

| | |
|---|---|
| Number of LNG Storage tanks | 1 tank |
| Tank capacity | 270,000kL |
| Design Liquid density | 0.480ton/m$^3$ |
| Design temperature(LNG) | -170°C |
| Inner tank diameter | 90.00m |
| Inner tank wall height | 43.74m |
| Inner diameter of outer tank | 92.4m |
| Wall height of outer tank wall | 48.28m |
| Liquid levels | 42.7m |
| Heating system | Electric heating system 500mm under top of base slab |
| Tank foundation type | Pile foundation |

(2) 설계조건 및 기준

LNG 저장탱크는 -162℃ 극저온 상태의 액체를 저장한다. 내조는 설계 수명동안 정상 가동조건에서 저온의 액압을 지지해야 한다. 9%니켈을 함유한 특수 합금강은 저온 조건에서 연성 및 인성을 확보하고 있다고 알려져 있다. 안전도 측면에서 9%니켈강의 내조와 프리스트레스트 콘크리트의 외조로 구성되는 탱크시스템이 효율적이며, 본 연구의 지상식 저장탱크는 다음과 같은 조건하에서 한계상태에 만족하도록 설계 되었다.

① 정상가동 조건

② 시험하중 조건

③ 비상상황 조건

한계상태는 극한한계상태와 사용한계상태로 구분한다. 극한한계는 부재의 최대 내력에 해당하는 상태로써, 단면파괴, 좌굴, 피로 등에 의한 한계상태로 표현된다. 사용한계는 정상적인 가동상태, 또는 내구성에 관한 한계상태이며 과대한 변형이나 처짐, 균열 등이 유발되는 상황이라고 할 수 있다. 표 2.17.3는 LNG 저장탱크의 설계기준으로 실제 LNG 탱크 설계 시 다음과 같은 규정에 의해 설계가 되고 있다. 그러나 표 2.2의 내용에는 임시 개구부에 대한 언급이 없으며, 본 연구에 의한 결과에 따른 임시 개구부에 대한 결과값이 반영되어야 한다고 판단된다.

표 2.17.3 지상식 저장탱크 설계기준 (한국가스공사, 2008)

| 조건 | | 적용범위 | 설계기준 |
|---|---|---|---|
| A. 정상가동상태 | | 안전성 | BS8110의 극한한계상태 만족 |
| | | 내구성 | 제한균열폭=0.2mm<br>평균균열폭=0.12mm |
| | | 기밀성 | Steel Liner에 의한 확보 |
| B. 정수압시험<br>(공기압시험 포함) | | 안전성 | BS8110의 극한한계상태 |
| | | 기밀성 | Liner |
| C. 비상상황 | 1.내조LNG유출 | 안전성 | 극한한계상태 만족 |
| | | 사용성 | 잔존압축영역 100mm이상 확보, 압축영역에서<br>압축응력은 2N/mm2 확보 |
| | 2.지진하중 | 가동가능 | |
| | | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | | 기밀성 | 제한균열폭=0.2mm |
| | 3,지진하중(SSE) | 기능안전 | |
| | | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | | 기밀성 | Steel Liner |
| | 4.액체충격 | 안전성 | 극한한계상태 확보 |
| | 5.미사일충돌 | 내조의 구조적 안전성 유지 | 콘크리트 벽체의 관통은 국부적인 영향만<br>미치도록 방어 |
| | 6.벽체의 저온의<br>온도충격 | | 국부적인 영향<br>균열폭=0.2mm |
| | 7.인접지역의 화재발생에<br>노출시 | -구조적 안전성 확보<br>-탱크와 지붕은 복사열에대해<br>2시간동안 유지 | 비선형 해석 검토 |
| | 8.탱크내부의 화재 | 약위이하에서 탱크 벽체의<br>안전성 확보 | 비선형 해석 검토 |

(3) 설계하중

하중은 탱크의 시험 및 정상 가동상태에서 작용하는 일반하중과 비상 상태시 작용하는 특수하중으로 구별된다. 일반하중의 종류는 다음과 같다.

① 지붕 구조물에 작용하는 하중

② 벽체 구조물에 작용하는 하중

- 지붕으로부터 전달되는 하중
- 풍압력
- 가스압력
- 액체압력
- 온도하중
- PSC 효과

- 벽체 자중
- 단열재 중진에 따른 횡압

③ 특수하중

- LNG 누출사고 시
- 누출 온도하중
- 액체충격
- OBE, SSE
- 인접지역 화재
- 탱크 내 화재
- 비행물체 또는 물체 충돌

정상 가동상태에서 탱크 내부의 가스압력은 일정한 범위 내에서 관리된다. 하지만 비정상 적인 경우 가스압력은 커져서 과압력이 작용한다. 또한 내조의 파괴 또는 액체 누출시 외조는 갑작스런 온도저하 즉, 온도충격을 받는다. 내조와 외조 사이의 단열재에 결함이 있을 경우에도 온도충격이 유발된다. 하지만 본 연구에서는 온도에 대한 영향은 고려하지 않으며 단지 차량충돌에 의한 해석을 하고자 한다.

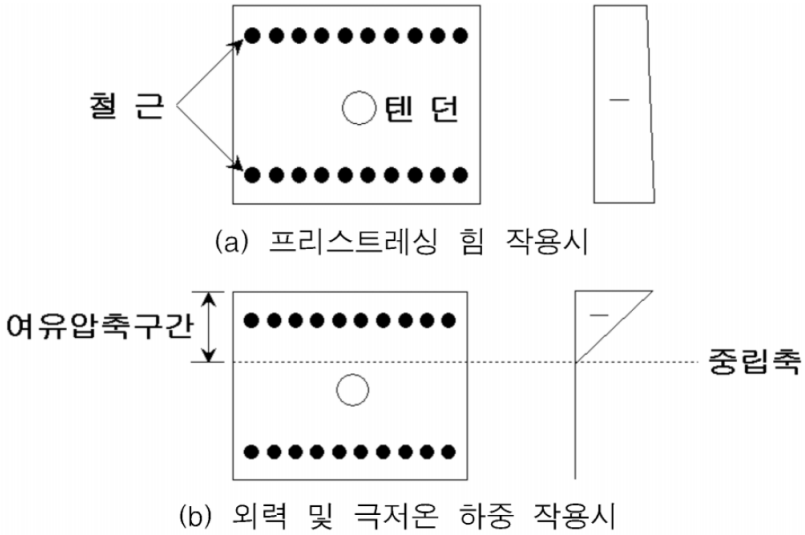



그림 2.17.3 LNG 외부탱크 벽체의 형상 및 응력분포

그림 2.17.3 (a)는 LNG 외부탱크의 프리스트레싱 힘이 작용할 때의 응력분포를 나타내고 있으며, 그림 2.17.3 (b)는 외력 및 극저온 하중이 작용할 때의 응력분포를 보이고 있다. 실제로 프리스트레스드 긴장력이 작용할 때와 그렇지 않을때 응력분포를 알 수 있다.

나. LNG 외부탱크의 프리스트레싱 텐던의 설계특성

LNG 외부탱크는 가스의 내압 및 하중인자로부터 안전성을 확보하는 1차 방호성능 구조물이다. 외부탱크는 프리스트레스로 보강된 철근콘크리트 구조물로서 고강도 콘크리트 압축강도와 철근의 결합으로 견고하게 이루어진 벽체로 프리스트레싱 텐던 긴장력을 도입하여 보다 안전한 방호구조물로 설계하는 특징이 있다. 프리스트레싱 텐던의 배치각도에 따라 부벽을 위치하여 각도를 결정하며, 원환방향 프리스트레스 긴장력을 도입할 수 있다. 또한 수직방향 프리스트레스드 긴장력은 바닥판으로부터 지붕의 링빔까지 수직방향 텐던을 삽입하여 긴장을 도입하는 방법이 있다.

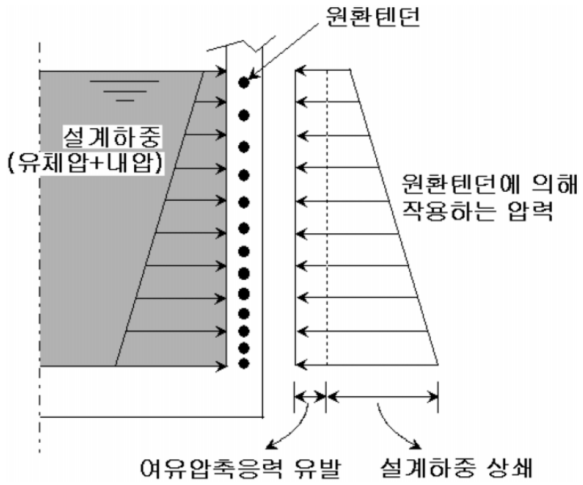



그림 2.17.4 LNG 외부탱크의 프리스트레스드 원환텐던 배치(KOGAS, 2007)

그림 2.17.4 와같이 응력집중현상이 발생하는 LNG 외부탱크 하부는 상부보다 상대적으로 더 큰 프리스트레스력이 필요로 하게 된다.

(1) 프리스트레싱 텐던 배치각에 따른 LNG 외부탱크

탱크구조물은 내압에 의하여 측벽에 원환방향 인장력과 수직방향의 휨 모멘트를 유발한다. 따라서 원주 방향 인장력에 대한 저항력을 확보하기 위해 원주방향으로 프리스트레스를 도입하며, 수직방향의 휨모멘트에 대한 저항력을 확보하기 위해 수직방향으로 프리스트레스를 도입해야 한다. LNG저장탱크 구조물과 같은 원통형 구조물에서 원환방향으로 도입된 프리스트레스는 원환방향 단면의 압축응력을 유발한다. 프리스트레스에 의해 도입된 압축응력은 구조물 내부의 액압에 의해 발생되는 원환방향의 인장응력을 방지한다. 원주방향의 프리스트레스 도입은 Post-Tensioning 방법에 의해 PS 강재를 내부 긴장 방식으로 설치한다. 원주 방향의 텐던은 벽체의 부벽(buttress)에 정착되며, 부벽은 일정한 각도로 배치된다. 부벽의 간격은 60° 또는 90° 간격으로 배치되며, 그림 2.5 및 2.6과 같다.

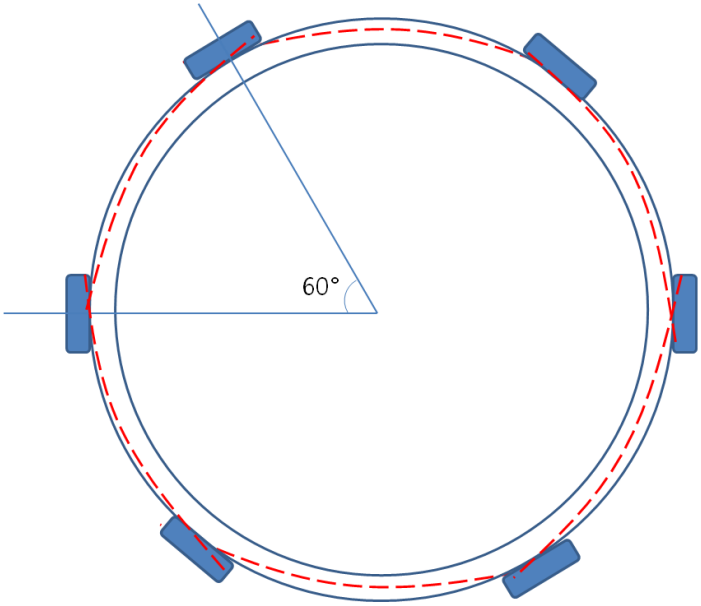



그림 2.17.5 프리스트레싱 텐던 배치각도 60°

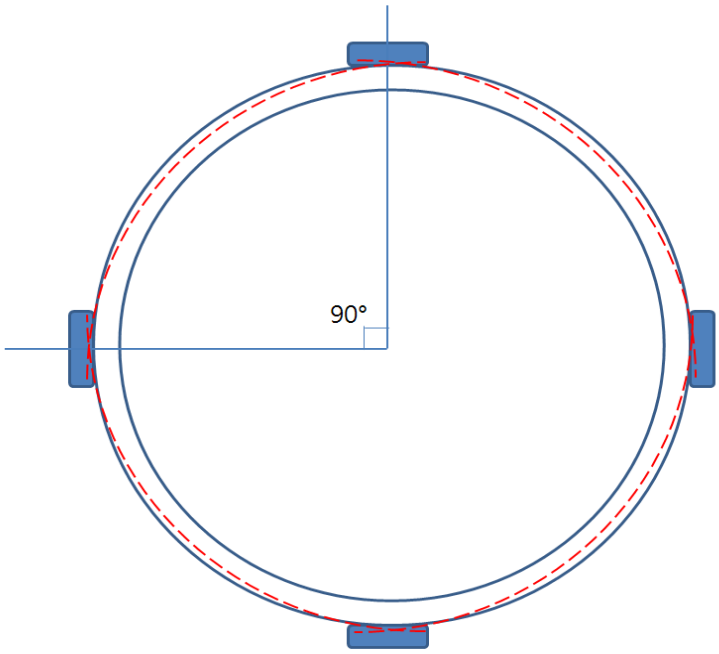



그림 2.17.6 프리스트레싱 텐던 배치각도 90°

(2) LNG 외부탱크의 프리스트레스의 설계

벽체의 수직 텐던은 저부가열식의 경우 탱크의 바닥판이 지면이 접해 바닥판에 텐던 정착부를 설치하기가 곤란하므로 텐던을 U자형으로 배열하여 긴장단과 고정단을 벽체의 상단에 위치시키게 된다. 고상식 탱크의 바닥판은 페데스탈에 의해 지지되어 일정한 높이에 위치하므로 텐던의 정착부를 바닥판 밑면에 위치시킬 수 있다. 본 연구에서는 지상식 저장탱크의 수직 텐던

은 모델링절차에서 수직방향으로 배치하여 양쪽 끝단을 모두 고정시켜 모델링을 하도록 하였다. 따라서 텐던을 수직·수평 형태로 배치 가능토록 설계한다. 벽체에 도입되는 원환방식의 프리스트레스를 결정하는 과정은 다음과 같다.

① 벽체에 작용하는 내압 Fa를 계산한다. 내압은 LNG누출시의 액압, 가스압, 단열재다짐에 의한 횡압 및 잔류응력(residual stresses)으로 구성된다.

② 프리스트레싱에 의한  등가외압Fe의 결정

$$Fe=X\cdot Fa \qquad (2.1)$$

여기서 Fe : 프리스트레스에 의한 등가외압(KN)

X : 프리스트레스 수준(prestress level)

Fa : 작용내압(액압+가스압+단열재횡압+잔류응력)(KN)

③ 텐던당 유효 프리스트레스 fpe 계산

④ 유효 프리스트레스에 의한 텐던의 유효하중 산출

$$Pe=Ape\ fpe \qquad (2.2)$$

여기서 Pe : 텐던의 유효하중(KN)

Ape : 텐던의 단면적(mm2)

fpe : 텐던의 유효응력(MPa)

⑥ 벽체 높이별 텐던 구간 L의 구분

⑦ 벽체 구간별 텐던 개수의 결정

$$n=\frac{F_e r L}{P_e} \qquad (2.3)$$

여기서 n : 텐던갯수

Fe : 프리스트레스에 의한 등가외압(KN)

Pe : 텐던의 유효 프리스트레스하중(KN)

r : 원통형 벽체의 반지름(mm)

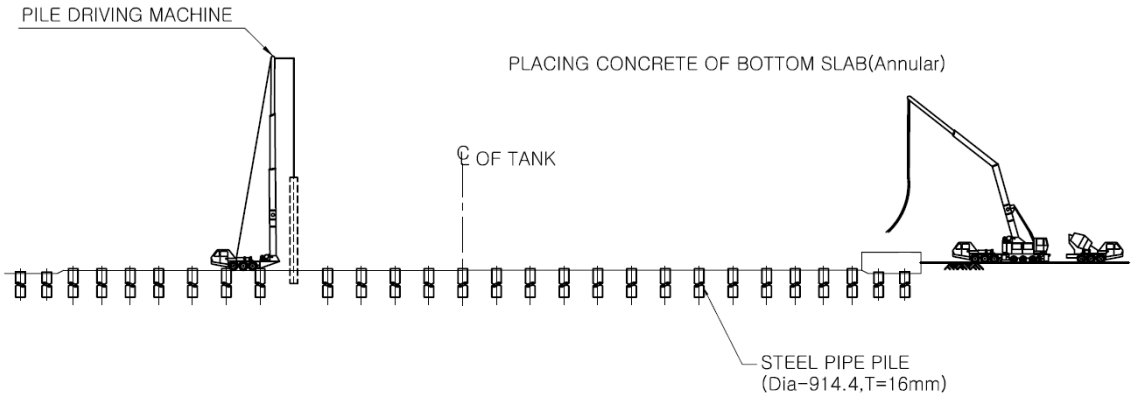
L : 벽체구간의 높이(mm)

다. LNG 외부탱크의 시공과정

LNG 외부탱크의 임시 개구부에 대한 비선형 해석을 하기 위해서는 LNG외부탱크의 시공과정을 자세히 알아야 한다. 아래의 그림은 LNG 시공과정을 도식화한 것으로 각각의 과정에 대해서 설명한다.

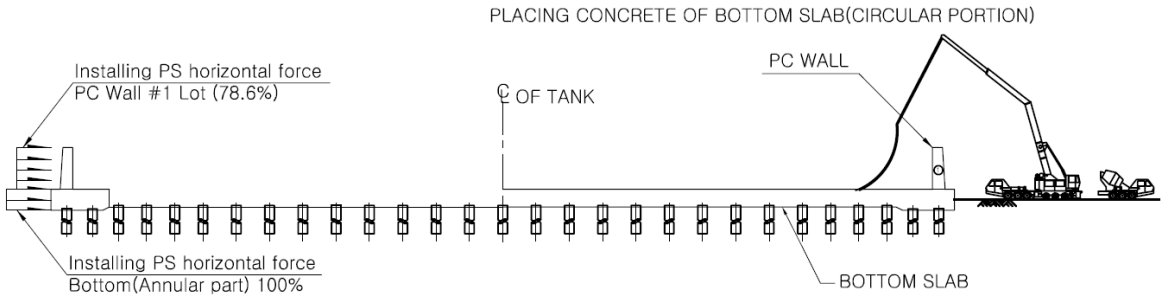
① Foundation, Bottom slab work

- Foundation work
- Placing concrete (Bottom slab)

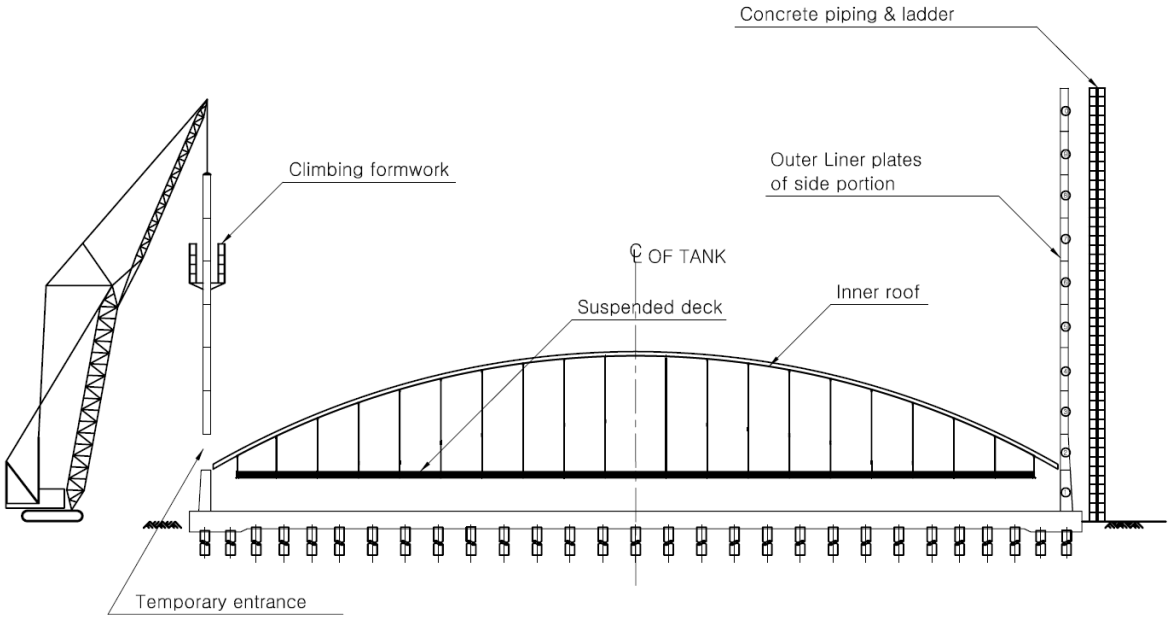



② PC wall #1 Lot, PS work, Bottom slab work

- PC wall #1 Lot
- Installing PS horizontal force (Bottom Slab)
- Installing PS horizontal force (PC wall : #1 Lot;78.6%)
- Reinforcing work of bottom slab
- Electrical base heating system work
- Placing concrete of bottom slab

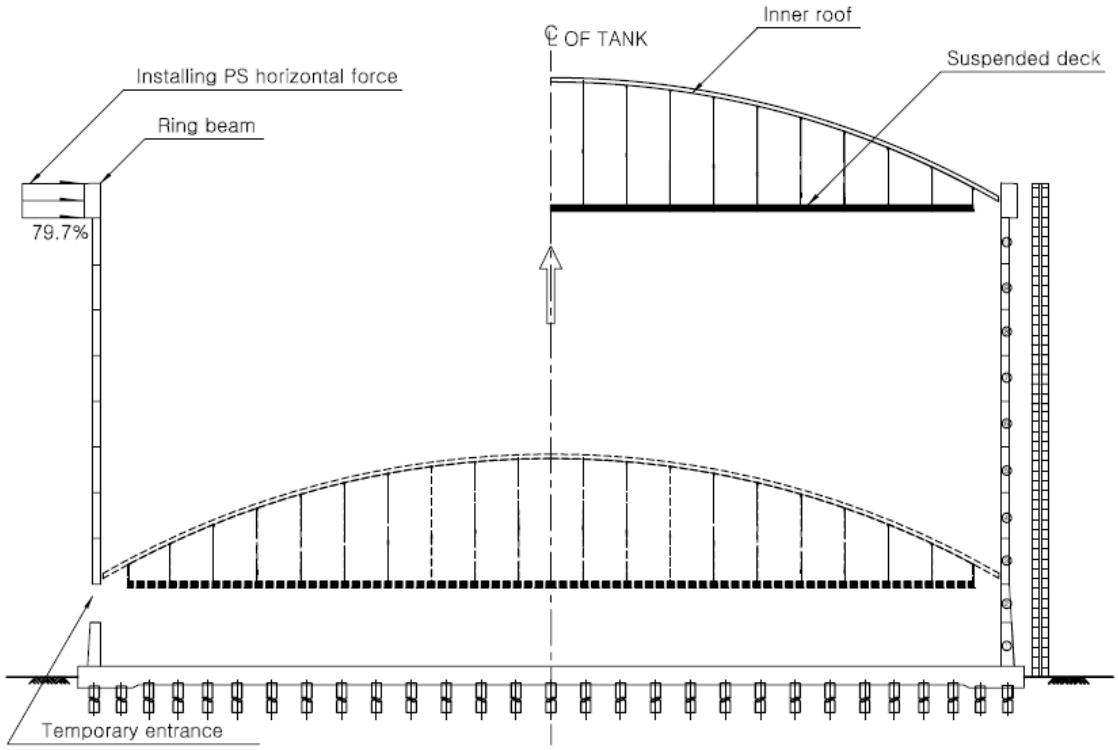



③ PC wall(#2~#10), Ring beam, Outer liner work, Erection of roof structure




④ PS work, Roof lifting (air-raising system)

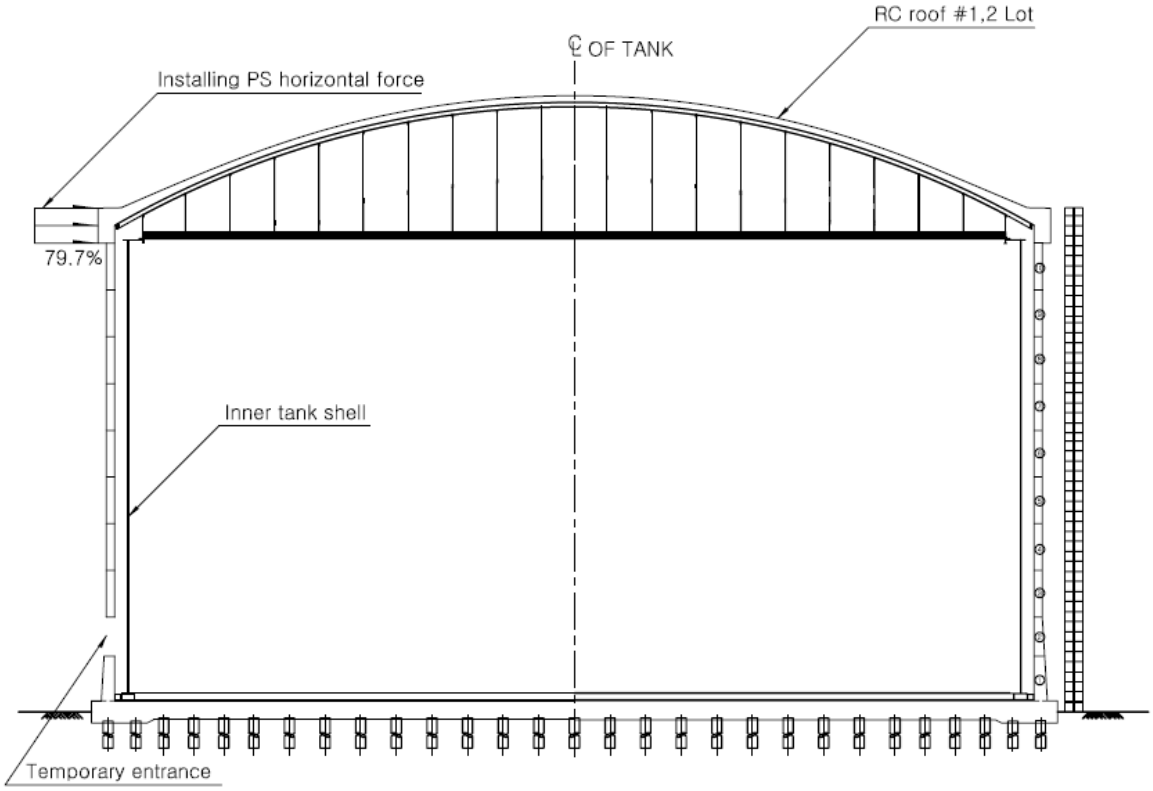
- Installing PS horizontal force (Ring beam)
- Lifting up roof structure (air-raising system)
- Fixing roof structure




⑤ Inner tank work

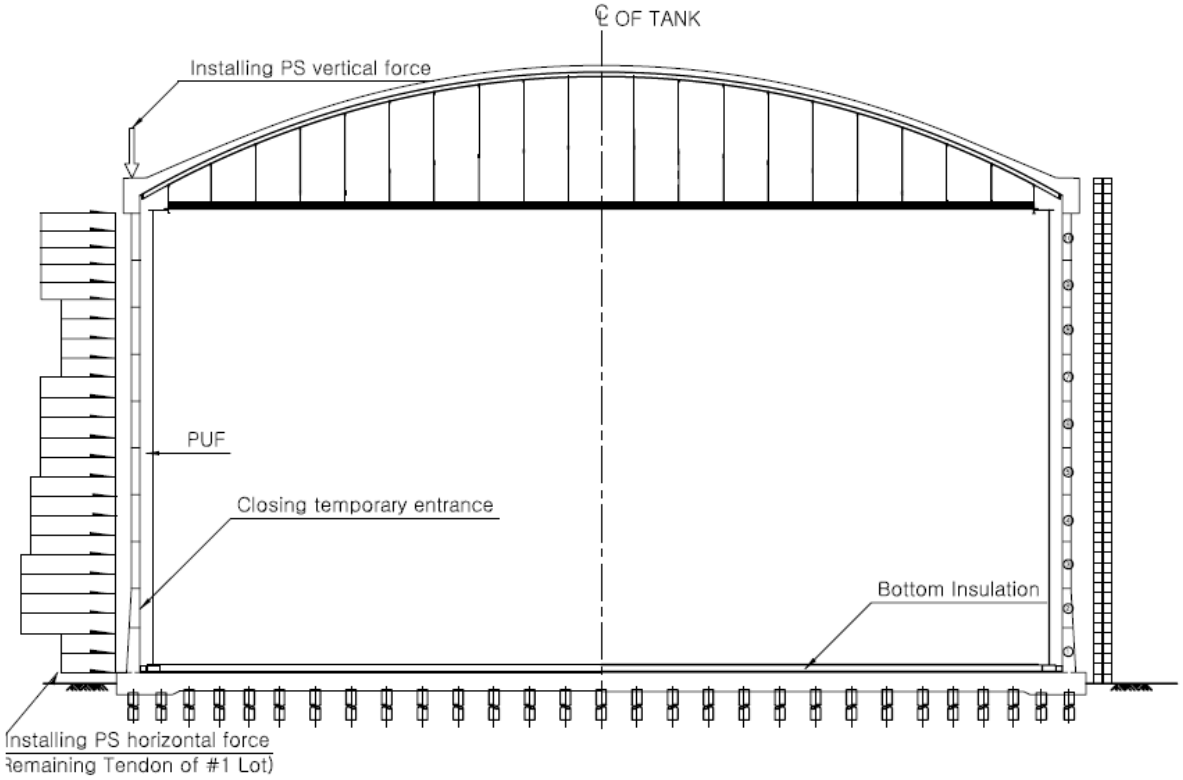
- Inner tank work
- RC roof #1 Lot
- Installing PS horizontal force (Ring beam : Remaining Tendon)

- RC roof #2 Lot




⑥ PS work, Insulation work, Test

- Closing temporary entrance
- Installing PS vertical force : 100%
- Installing PS horizontal force
- PUF insulation work
- Test&Pre-commissioning




시공과정 중 (3)~(5)에서 임시 개구부가 존재한다. 임시 개구부가 존재할 때 LNG 외부탱크가 받는 최대하중은 탱크의 자중, 지붕의 자중, 내부탱크의 자중, 바닥 슬래브의 프리스트레스력(78.6%), 링빔의 프리스트레스력(79.7%)이다. 본 연구에서 해석에 쓰이는 하중은 위의 5가지 하중이다.

3. 긴장재의 슬립거동을 고려한 LNG 외부탱크의 유한요소모델

일반적으로 지상식 LNG 저장탱크의 유한요소 해석을 위한 프로그램은 다양하게 이용되어지고 있다. 연구의 목적과 방향에 따라 어떤 프로그램을 이용해야 할지 결정되는데 본 연구에서는 긴장재의 슬립거동을 고려하여 임시 개구부의 여부에 따른 LNG 외부탱크의 비선형 해석을 위한 프로그램으로 MIDAS FEA를 사용하였다. 모델링은 초대형화 LNG 탱크를 위한 270,000kL급 저장탱크이며, 외조의 지름과 높이가 상당히 크기 때문에 철근을 적층 Shell을 이용하여 모델링 하고 임시 개구부 주변부만 따로 상세 모델링을 수행한다.

가. 슬립거동을 고려한 긴장재의 모델

매설긴장재(Embedded tendon)에 대한 모델 및 상호거동은 긴장재의 전달길이에 걸쳐 일정한 부착응력-슬립관계가 적용된다고 가정하여 구성한 2차 미분방정식으로부터 유도할 수 있다.

$$\delta''(\xi) - K_p f_b(\delta(\xi)) = 0 \qquad (1)$$

여기서 $\xi = x/d_p$로 긴장재의 지름으로 무차원화한 긴장재 길이방향의 자연좌표이고, 이로부

터 식 (1)의 부착응력 슬립 관계 $f_b(\delta(\xi))$를 이용하여 무차원화한 슬립 $\delta(\xi)=s(\xi)/d_p$을 변수로 갖는 지배방정식을 구성할 수 있다. 또한 계수 $K_p=4(1+\eta\rho_p)\Theta/E_p$이며, 상수들은 각각 $\eta=E_p/E_c,\ \rho_p=A_p/A_c$이고, $\Theta=d_p^2\pi/(4_{Ap})$이다.

한편, Balazes(1992)에 따르면 전달길이를 구할 때 정착단에서 긴장재의 프리스트레스를 부착응력으로 저항하게 되므로 긴장재의 응력은 프리스트레스에서 부착응력을 차감하여 구할 수 있다고 보고하고 있다. 그러나 콘크리트에 균열이 발생하였을 때는 균열 사이 중앙부에서 긴장재의 인장응력에 부착응력이 더해져 균열부에서 긴장재의 인장응력으로 전달되므로 긴장재의 응력분포는 중앙부에서의 응력 $\sigma_{p0}$에 $4\Theta$를 이용하여 단면응력으로 환산시킨 부착응력 $\sigma_{pb}$를 누적해주어 식 (2)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\sigma_p(\xi)&=\sigma_{p0}+4\Theta\int_0^{\xi}f_b(\xi)d\xi=\sigma_{p0}+4\Theta\int_0^{\xi}\Psi c\sqrt{f_c'\sqrt{\delta(\xi)d\xi}} \qquad (2)\\ &=\sigma_{p0}+B\xi^{\frac{1+b}{1-b}}=\sigma_{p0}+\left[\frac{4\Theta(1-b)}{1+b}\Psi c\sqrt{f_c'}\,k^b\right]\xi^{\frac{1+b}{1-b}}\\ &=\sigma_{p0}+8.5\sqrt[3]{f_c'/E_p}\,\xi^{5/3}\end{aligned}$$

만약 부착응력이 균열 사이 모든 위치에서 발생한다고 가정하면, 식 (3)과 같이 매설긴장재의 평균 응력($\sigma_{pa}$)과 실제 균열부에서 발생하는 응력($\sigma_{p1}$)의 차이를 구할 수 있다. 긴장재가 프리텐셔닝(pre-tensioning)으로 시공되는 경우 콘크리트가 그라우팅제 역할을 하게 되며, 포스트텐셔닝(post-tensioning)으로 시공되는 경우 보통 시멘트풀(cement paste)로 그라우팅 한다. 그러므로 일반적인 그라우팅제의 강도는 프리텐셔닝으로 시공되는 경우 24MPa, 포스트텐셔닝으로 시공되는 경우 55MPa이라 할 수 있다. 또한 긴장재의 탄성계수 $E_p$=200000MPa, 균열간 거리는 보통 150mm~250mm로 나타나므로 대푯값인 200mm를 사용하였다. 여기서 $d_p$는 긴장재의 공칭지름으로 단위는 mm이며 응력차이는 MPa단위로 계산된다.

$$\sigma_{p1}-\sigma_{pa}=\begin{cases}7300/d_p^{5/3} & \text{for } pre-tensioning\\ 12700/d_p^{5/3} & \text{for } post-tensioning\end{cases} \qquad (3)$$

식 (3)은 단순히 부착슬립이 콘크리트의 균열 사이 전 영역에서 발생한다고 가정하여 계산된 응력차이이므로, 실제 중앙부의 일부 구간에서 부착슬립이 발생하지 않는 경우 응력차이는 식 (3)에서 계산된 값보다 작아지게 된다. 따라서 중앙부에서 부착슬립이 발현되지 않는 경우 힘의 평형조건을 이용하여 응력차이를 계산함으로써 식 (3)의 상한값을 결정할 수 있다. 이때 긴장재의 항복점은 확연히 드러나지는 않지만 보통 $\epsilon$=0.01정도에서 항복이 발생한다고 볼 수 있다.

$$\sigma_{p1}-\sigma_{pa}=\frac{1}{\rho}\sigma_c=\frac{f_{cr}}{\rho}\left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon}\right)^{0.4}=\frac{f_{cr}}{\rho}\left(\frac{f_{cr}/E_c}{0.01}\right)^{0.4}=\frac{6.3}{\rho}\frac{f_{cr}^{1.4}}{E_c^{0.4}} \qquad (4)$$

유도된 식 (4)에 따르면 부착된 긴장재와 그라우팅제의 상호거동은 매설철근과 같은 현격한 차이는 보이지 않으므로 평균응력-변형률 관계를 기본으로 유도된 식 (5)와 같은 겉보기 항복응력을 기준으로 다선형 모델을 사용하였다. 이때, 그림 2.17.7의 다선형 모델은 항복변형률의 70%정도인 탄성한계점 (A), 겉보기 항복응력 (B), 극한강도 (C)를 이용하여 선형구간 AB와 BC로 간단히 구성할 수 있다.

$$\sigma_{py}^{*}=\begin{cases}\sigma_{py}-\min\left[7300/d_p^{5/3},6.3f_{cr}^{1.4}/\rho E_c^{0.4}\right] & \text{for } pre-tensioning\\ \sigma_{py}-\min\left[12700/d_p^{5/3},6.3f_{cr}^{1.4}/\rho E_c^{0.4}\right] & \text{for } post-tensioning\end{cases} \qquad (5)$$

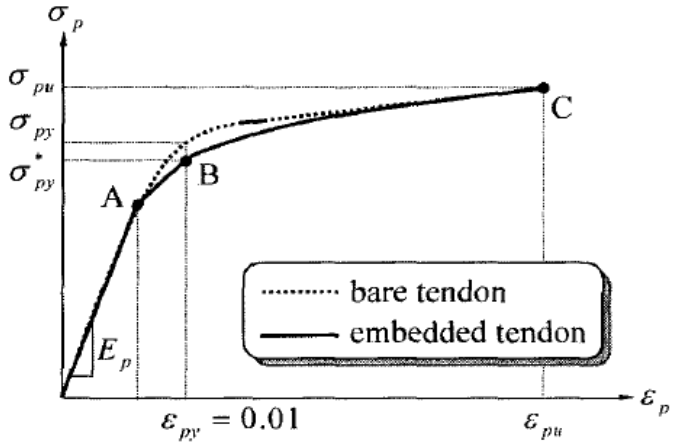



그림 2.17.7 부착된 긴장재의 응력-변형률 관계

한편, 비부착된 긴장재를 매설긴장재로 표현하는 경우 변형률 적합조건을 만족하지 않는 비부착된 긴장재와 그라우팅제 사이를 매설모델의 이론상 완전부착으로 가정하게 되는 문제가 발생한다. 즉, 일반적인 사용 프로그램인 DIANA와 ABAQUS 등은 기본적으로 완전부착 가정인 긴장재를 모사하여 비부착된 긴장재가 배치된 부재의 저항력을 상대적으로 과대 평가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 쉬스관 내에서 자유롭게 이동할 수 있는 비부착된 긴장재의 슬립효과를 일반적인 상용 프로그램 사용 시 간접적으로 모사하기 위해서 독립적인 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 알고리즘은 각 하중단계에 따라 비부착된 긴장재의 응력-변형률 관계를 반복해석을 통하여 식 (6)과 같이 결정함으로써, 결정된 응력-변형률 관계를 실제 구조물의 긴장재 재료모델에 적용하여 간접적으로 고려할 수 있다.

$$\delta_j^{-1}(\sigma_{j,ave}(p_i))=f^{-1}(\sigma_{f,\max}(p_i)) \qquad (6)$$

여기서 $p_i$는 $A_p\sigma_{pe}\le p_i\le A_p\sigma_{pu}$의 긴장재의 유효 긴장력과 극한상태에서 긴장재의 긴장력 사이 범위를 갖는 임의의 하중크기이고, 비부착된 긴장재의 수정된 응력-변형률 관계 $\delta_j$는 그림 2.17.8와 같이 반복과정을 통해 긴장재 자체의 응력-변형률 관계 f를 각 하중단계별로 유한요소 해석하여 나온 응력($\sigma_{j,\max}(p)$)대신 평균 변형률에 해당하는 응력($\sigma_{j,ave}(p)$)로 수정

하여 구성됨을 의미한다. 여기서 긴장재와 쉬스관 사이의 마찰을 무시하였다.

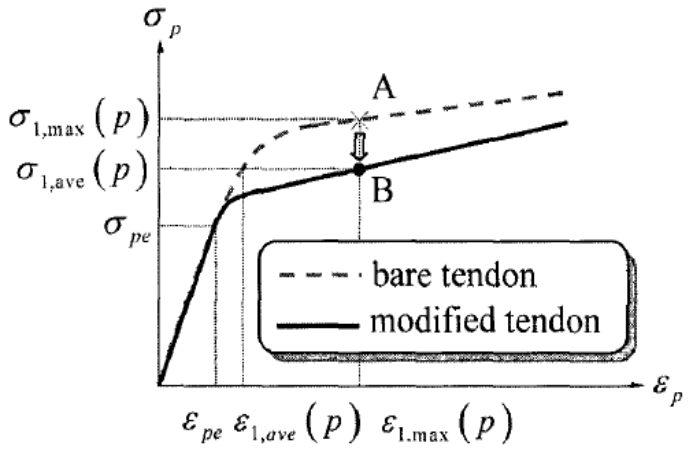



그림 2.17.8 비부착된 긴장재의 응력-변형률 관계

이때 긴장재 재료 자체의 응력-변형률 곡선 $\sigma = f(\epsilon)$을 이용한 등가의 부착된 긴장재로 해석하여 얻어진 임의의 하중(p)에서 긴장재 길이방향(x=0~L)으로의 변형률 분포를 $\epsilon_j$(x,p)이라 할 때, 등가의 부착된 긴장재로 해석한 결과는 변형률 적합조건을 만족하므로 비부착된 긴장재가 받는 평균응력($\sigma_{j,ave}$)은 긴장재 재료 자체의 응력-변형률 관계에서 그 변형률에 대응하는 값을 계산함으로써 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{j,ave}(p) = \frac{1}{L}\int_0^L \epsilon_j(x,p)dx \qquad (7)$$
$$\sigma_{j,ave}(p) = f(\epsilon_{j,ave}(p))$$

한편, 등가의 부착된 긴장재를 토대로 한 해석 시 부재의 위험단면은 긴장재의 변형률이 가장 큰 단면이라 할 수 있다. 그러므로 위험단면의 변형률을 해석한 결과에서 얻어지는 최대 변형률($\epsilon_{j,\max}$) 값으로 규정할 수 있다. 이때 긴장재가 받는 응력 또한 긴장재 재료 자체의 응력-변형률 관계를 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

$$\epsilon_{j,\max}(p) = \max[\epsilon_j(x,p)] \qquad (8)$$
$$\sigma_{j,\max}(p) = f(\epsilon_{j,\max}(p))$$

나. LNG 외부탱크의 재료 모델

본 연구에서는 균연선단의 국부적인 거동보다는 구조물 전체 거동에 관심이 있으므로 분산균열모델을 사용하여 콘크리트의 재료 비선형성을 표현하였고, 회전균열모델로 균열각의 변화를 모사하여 균열로 인한 유한요소 위상의 재정의 없이 자동적인 균열의 발생을 표현하였다. 이에 따라 강도포락선은 압축영역에서 Drucker-Prager 파괴면으로, 인장영역과 인장-압

축영역에서는 Rankine 파괴면으로 표현하였다. 또한 이를 수학적으로 구체화하는 구성방정식은 탄성모델에 기초한 직교이방성모델을 채택하여 구성방정식의 압축영역은 Hongestad(1951)에 의해 제안된 모델식을, 인장영역에는 인장증강효과를 고려한 Maekawa 등(2003)에 의해 제안된 모델식을 그림 2.17.9과 같이 구성하였다.

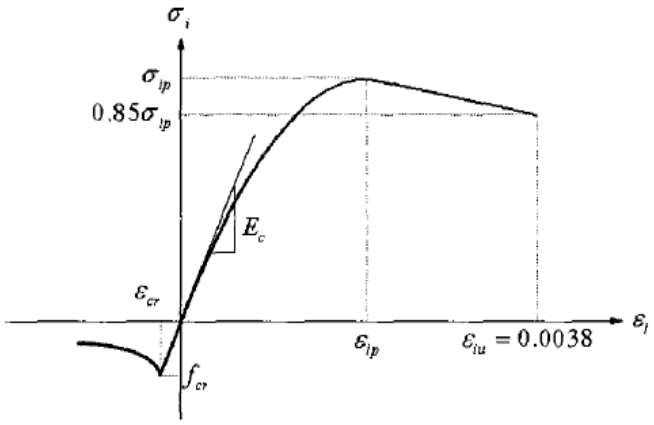



그림 2.17.9 철근의 응력-변형률 관계

강재의 경우 기본적으로 철근, 긴장재 각각의 실험결과에 기초한 다선형 모델을 사용하였다. 이때 철근과 콘크리트의 상호거동을 분산균열모델에 표현하기 위해 그림 2.17.10와 같은 Belarbi 등(1994)의 매설철근에 대한 제안식을 적용하였다.

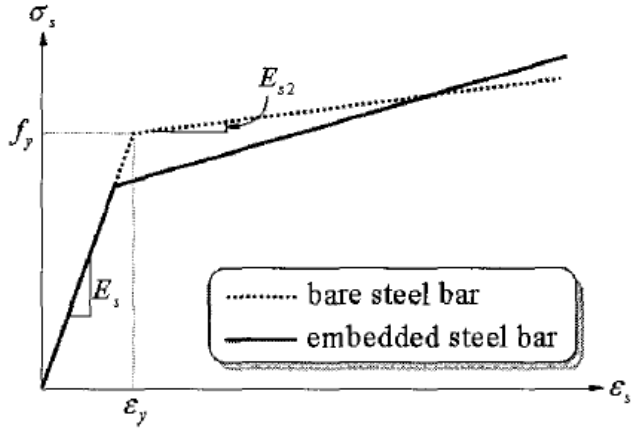



그림 2.17.10 철근의 응력-변형률 관계

다. LNG 외부탱크의 유한요소 모델

본 연구에서 해석에 사용된 27만kL 저장탱크의 외부탱크는 설계 상의 벽체의 실제 두께와 지름, 높이를 그대로 사용하였다. 다만 콘크리트 내부의 철근에 대한 모델링은 철근의 총 부피를 계산하여 등가 두께를 가진 적층Shell 요소를 이용하여 모델링하였으나, 철근의 강성은 정확히 일치하게 적용하였다. 프리스트레스 긴장재의 배치각도는 60°로 긴장재는 설계상과

동일하게 배치하였거, 긴장재는 Embedded Reinforcement요소로 모델링하였다. LNG의 외부탱크의 단면치수는 750mm이고 하단부 최대 치수는 1200mm의 두께를 사용하였으며 피복두께는 80mm이다. 외부탱크의 콘크리트는 solid요소로 모델링 하였으며 압축강도는 40MPa을 이용하였다. Element size는 2000mm×2000mm로 통일하였다. 다만 임시 개구부 주변의 폭 20m 높이 10m 부분의 철근을 shell요소가 아닌 Embedded Reinforcement요소를 이용하여 설계한 철근 배치와 똑같이 상세 모델링하였다. 표3.1과 표3.2는 실제로 유한요소 해석에 쓰인 해석조건과 재료의 특성을 표로 정리한 것이다.

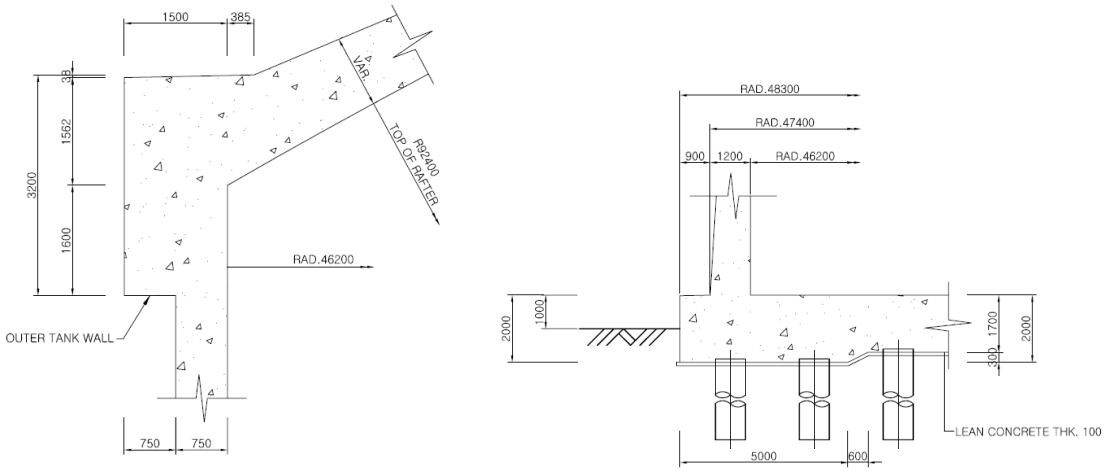
표 2.17.4 LNG 저장탱크의 해석조건

| | |
|---|---|
| 방호형식 | 완전방호식 저장탱크 |
| 기초형식 | 지상식 저장탱크 |
| 프리스트레스<br>텐던 배치각도 | 60° |
| 콘크리트 강도 | 40MPa |

표 2.17.5 유한요소해석에 사용된 강도특성

| 구 분 | 외부탱크 벽체(kN/mm²) | |
|---|---|---|
| 콘크리트 | 탄성계수 | 28.628 |
| | 포아송비 | 0.18 |
| | 팽창계수 | $1*10^{-5}$ |
| | 압축강도 | 40.0 |
| | 비중 | $2.4517*10^{-8}$ |
| 철 근 | 재료 | SM400 |
| | 탄성계수 | 205.9397 |
| 프리스트레스<br>텐던 | 재료 | SWPC7 |
| | 탄성계수 | 196.133 |

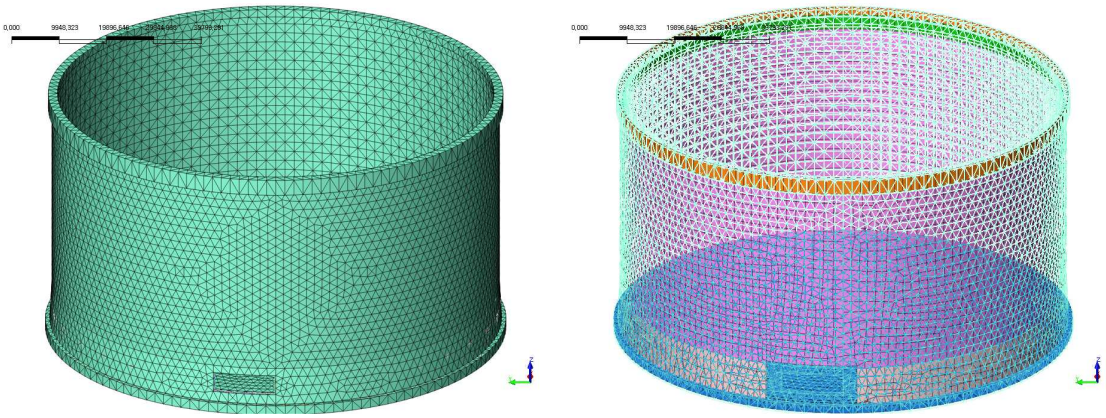
그림 2.17.11는 LNG 외부탱크 벽체의 상세 모델링 제원을 나타내고 있다. 본 연구에서 LNG 외부탱크의 모델링은 전체모델링이 아닌 프리스트레스 긴장재의 배치각도인 60°를 기준으로 벽체를 잘라 나타낸 것이다. 외부탱크의 두께는 하단의 7,500mm지점까지는 1,200～750mm로 설정하였으며, 그 이상의 상부 벽체두께는 750mm로 일정하게 유지하였다. 그러므로 외부탱크 벽체의 하부에서 응력집중현상이 발생하기 때문에 단면의 보강이 발생하게 된다. 링빔의 경우 벽체보다 750mm만큼 더 두꺼우며 긴장재는 원환긴장재 10개가 들어가게 된다.




a. 링빔 b, 벽체 하부

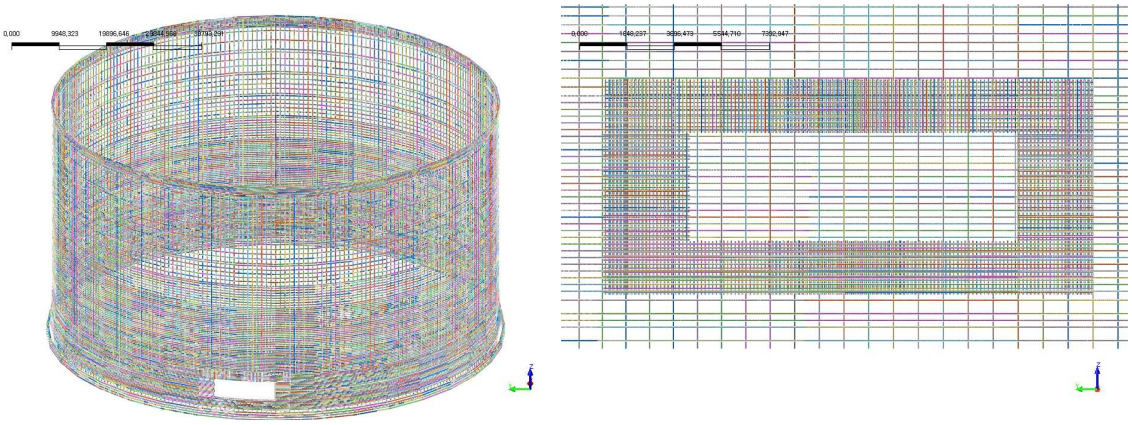
그림 2.17.11 벽체 상세 모델링 제원

프리스트레스드 콘크리트 벽체의 모델링은 실제 외부탱크 설계도를 기준으로 철근과 프리스트레스의 배치 및 규격을 엄격히 준수하여 그림 2.17.11 및 그림 2.17.12와 같은 유한요소 모델을 완성하였다.



(a)콘크리트 Solid모델 (b)철근의 Shell모델

그림 2.17.12 LNG 외부탱크 유한요소 모델



(a) 긴장재 Embedded 모델 (b)임시 개구부 상세모델

그림 2.17.13 LNG 외부탱크 철근 및 PS의 유한요소 모델

2.3에서 언급했듯이 시공 과정 중에 임시 개구부가 존재할 때는 (3)~(5)과정 중에 존재한다. 이 과정 중에 LNG 외부탱크가 받는 최대하중은 외부탱크의 자중, 지붕의 자중, 내부탱크의 자중, 바닥 슬래브의 프리스트레스력(78.6%), 링빔의 프리스트레스력(79.7%)이다.

표 2.17.6 Inner tank

| | |
|---|---|
| shell plate | 2168ton |
| shell stiffrener | 147ton |
| tatal mass | 2315ton |
| load(line) | 80.33kN/m |
| circular plate | 501ton |
| tatal mass | 501ton |
| load | 0.772kN/m$^2$ |
| suspended deck | 175ton |
| load | 1.473kN/m$^2$ |

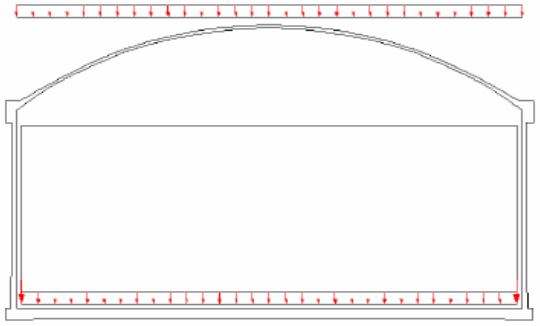


표 2.17.7 Liner and steel roof

| | |
|---|---|
| wall liner | 609ton |
| load | 0.457kN/m$^2$ |
| bottom liner | 329ton |
| load | 0.481kN/m$^2$ |
| roof liner | - |
| load | 1.05kN/m$^2$ |

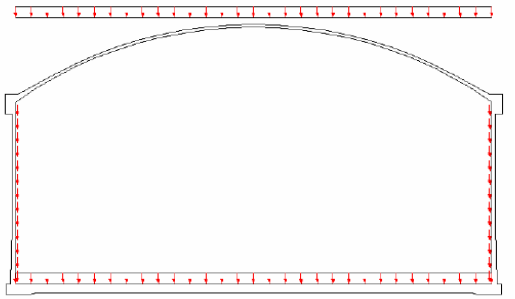


표 2.17.8 Steel structures on the roof, piping etc

| | |
|---|---|
| wall piping&support | 210ton |
| roof nozzles | 294ton |
| roof accessories | 112ton |
| roof maintenance stage | 210ton |
| roof piping&support | 728ton |
| total mass | 1553ton |
| load | 5.82kN/m² |

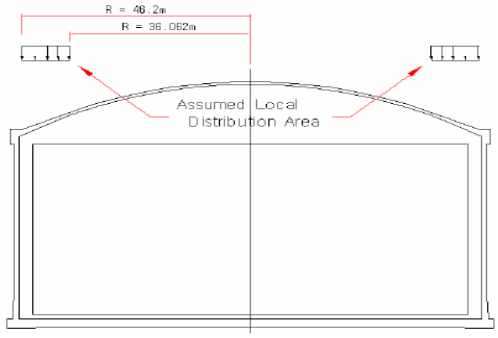



표 2.17.9 Bottom insulation

| Material | Thickness | Density |
|---|---|---|
| dry sand | 66.5 | 1.700 |
| secondary bottom plate | 5 | 7.850 |
| dry sand | 42 | 1.700 |
| cellular glass blocks | 3×150 | 0.136 |
| BDPC felt | 4×3 | 1.500 |
| dry sand | 100 | 1.700 |
| leveling concrete | 74.5 | 2.450 |
| secondary bottom plate | 5 | 7.850 |
| perlite concrete | 509 | 1.200 |
| HLB | 100 | 1.600 |
| leveling concrete | 100 | 2.450 |
| load | 4.439kN/m² | |

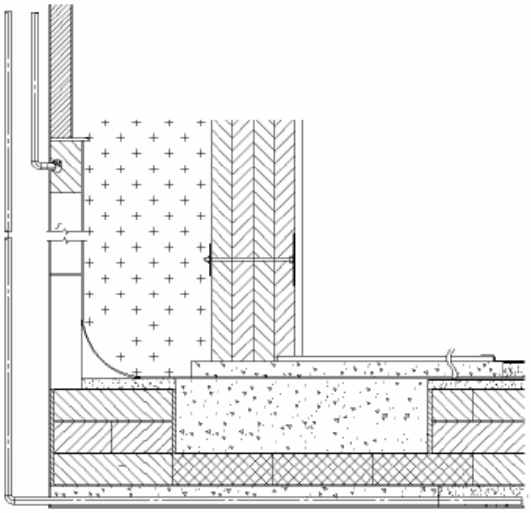


표 2.17.10 Wall insulation

| Material | Thickness | Density |
|---|---|---|
| poly urethane foam | 100 | 0.055 |
| perlite | 650 | 0.065 |
| resilient blanket | 450 | 0.024 |
| cellular glass | 150 | 0.135 |
| perlite | 600 | 0.065 |
| resilinet blanker | 450 | 0.024 |
| load | 21.746kN/m² | |

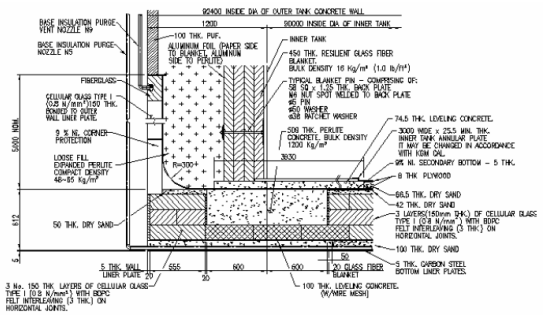



표 2.17.11 Roof insulation

| Material | Thickness | Density |
|---|---|---|
| fiber glass blanket | 525 | 0.024 |
| load | 0.124kN/m² | |

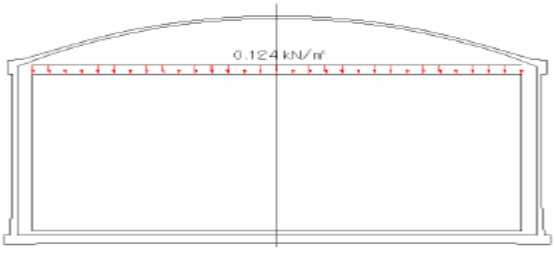
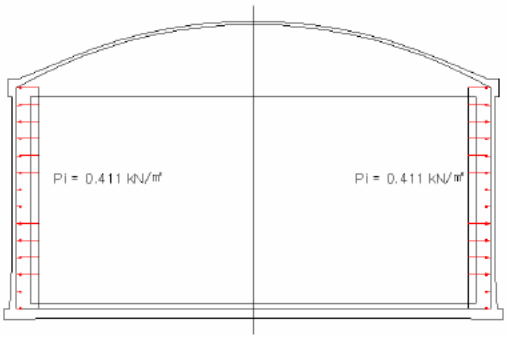


표 2.17.12 Pressure from insulation on outer tank wall




$$P_w = 0.065 \times (0.600 \times 5.000 + 0.650 \times 39.450) / 45.08 \times 9.81$$

$$= 0.411 \text{kN/m}^2$$

표 2.17.13 Average final stress of strand after all losses

| | |
|---|---|
| Wall | 862.5N/mm² |
| Ring Beam | 878.8N/mm² |
| Bottom | 961.4N/mm² |

4. LNG 외부탱크의 유한요소해석

가. 임시 개구부가 존재하는 LNG 외부탱크의 유한요소 해석 결과

임시 개구부가 존재하는 LNG 외부탱크 벽체의 하중에 따른 처짐거동 을 해석적 기법으로 확보하고, 외부 탱크에서 가장 취약한 부분이 임시 개구부 주변에서의 해석적 거동을 평가한다.

(1) 하중에 따른 변위곡선

그림4.1은 임시 개구부에서의 변위양을 나타낸 그림으로 총 하중 60만kN의 LNG 외부탱크의 하중이 주어졌을 때 임시 개구부의 중앙부에서 최대 처짐이 발생하였다. 하중에 따른 변위 그래프는 그림4.2와 같으며 직선을 나타낸다. 이때 최대 처짐은 0.838mm로 매우 적다.

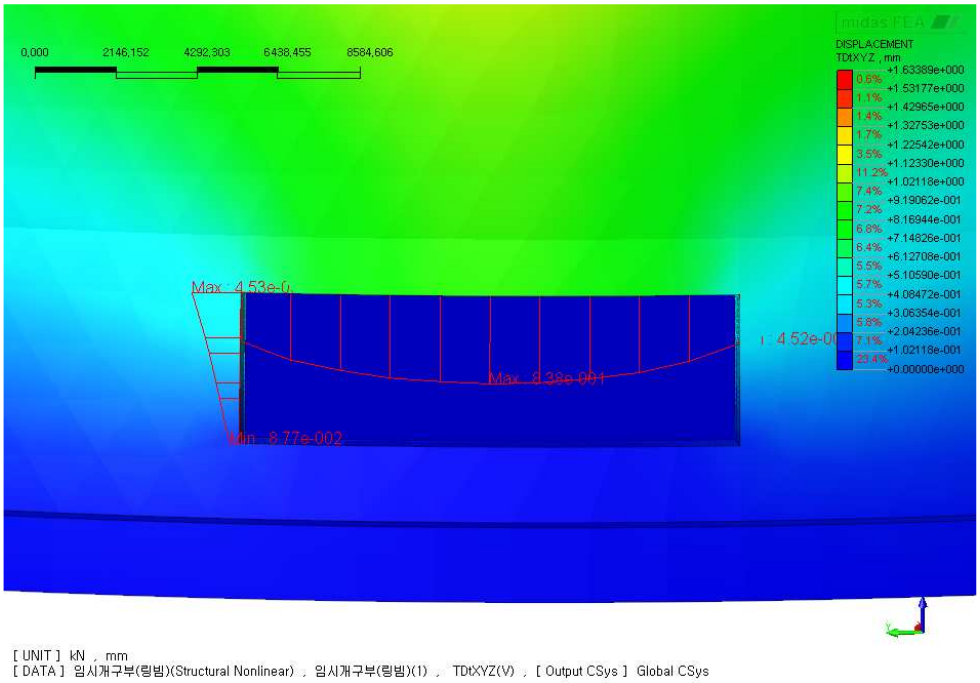



그림 2.17.14 임시 개구부의 변위

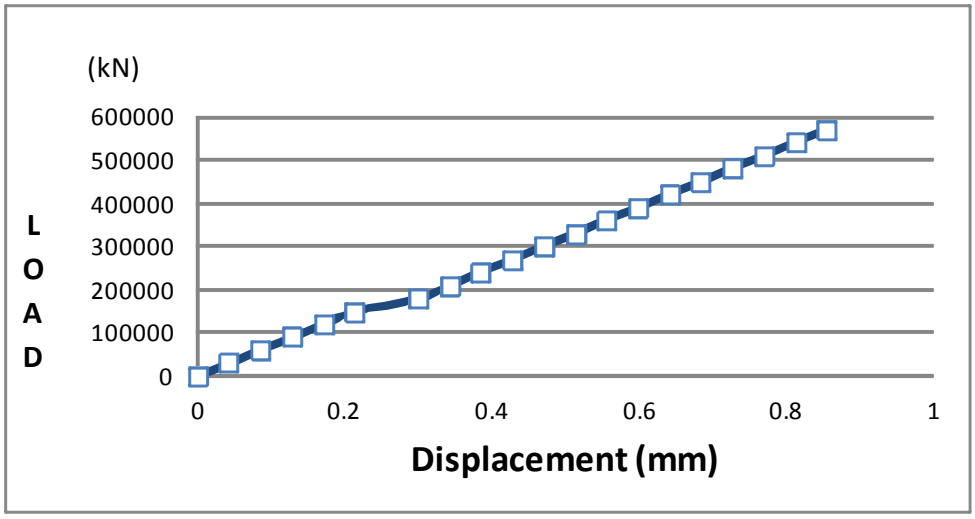



그림 2.17.15 하중-변위 그래프

결국 그림 그림 2.17.15에서 알 수 있듯이 주어진 하중에서는 LNG 외부 탱크가 탄성 구간에서 거동하는 것을 의미하며 임시 개구부가 가장 취약하기는 하지만 안정성 문제는 없다고 판단할 수 있다.

(2) 임시 개구부가 존재하는 LNG 외부탱크의 거동

LNG 외부탱크의 60kN 하중에 의한 최대처짐은 그림 2.17.14에서 보는바와 같이 임시 개구부의 중앙부에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 시공 과정 중 임시 개구부가 매우 취약하다

는 것을 의미하지만 탄성구간에서 거동하는 것을 보면 알 수 있듯이 시공 과정 중에 주어지는 하중은 외부탱크에 비해 매우 적은 하중으로 임시 개구부에 보강한 철근으로도 충분히 안정성이 확보된다고 판단할 수 있다. 해석을 통해 확보된 von-Mises 해석결과를 통해서도 알 수 있듯이 모델링 되어진 LNG 외부탱크의 벽에 비해 임시 개구부의 크기가 매우 작기 때문에 그림 2.17.16과 2.17.17에서 보이는 것과 같이 매우 국부적인 손상이 발생한 것을 알 수 있었다. 또한 LNG 외부탱크의 차량충돌면 벽체두께는 1200~800mm로 대단히 보강되어진 구조를 갖고 있으며, 또한 프리스트레스드 긴장력이 도입되었고 임시 개구부에서는 추가적인 보강이 이루어져 있기 때문에 비교적 안전성을 확보한 설계라고 판단된다.

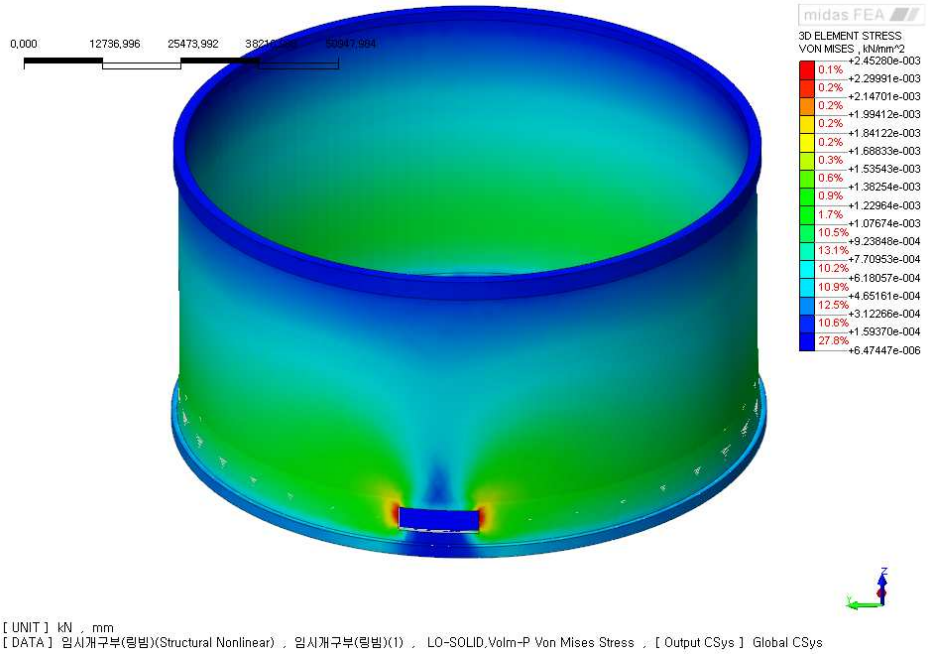



그림 2.17.16 LNG 외부 탱크의 VonMises Stress

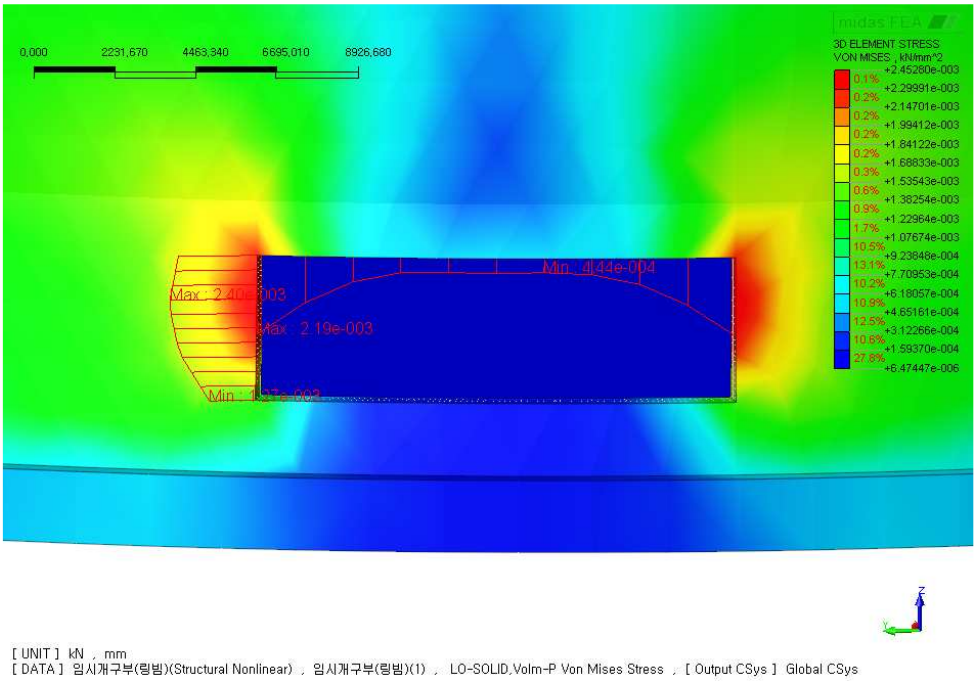



그림 2.17.17 임시 개구부의 VonMises Stress

임시 개구부 철근의 해석결과 최대 응력 지점은 그림 2.17.17와 동일한 부분에서 최대 응력이 발생하였고 그 응력값은 0.02kn/mm²이며 항복점에 도달하지 않았다. 그림 2.17.18는 철근의 응력-변형률 곡선이며 항복점에 도달하지 않았음을 나타낸다.

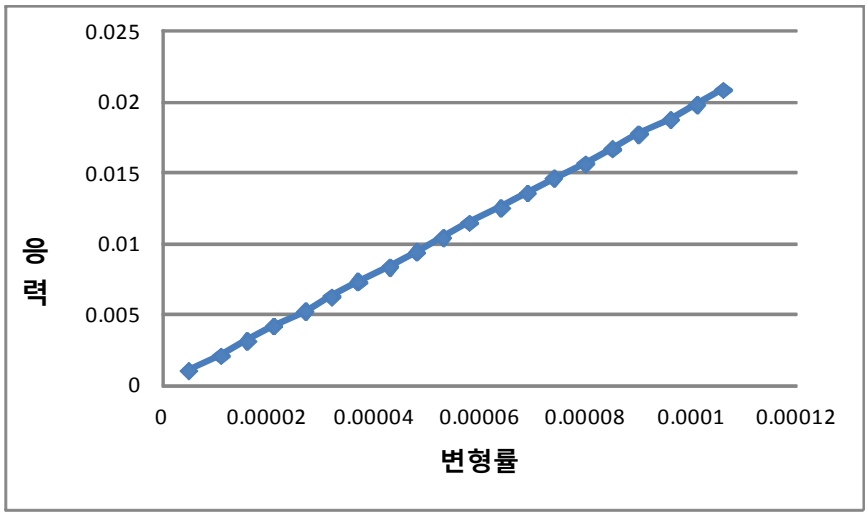
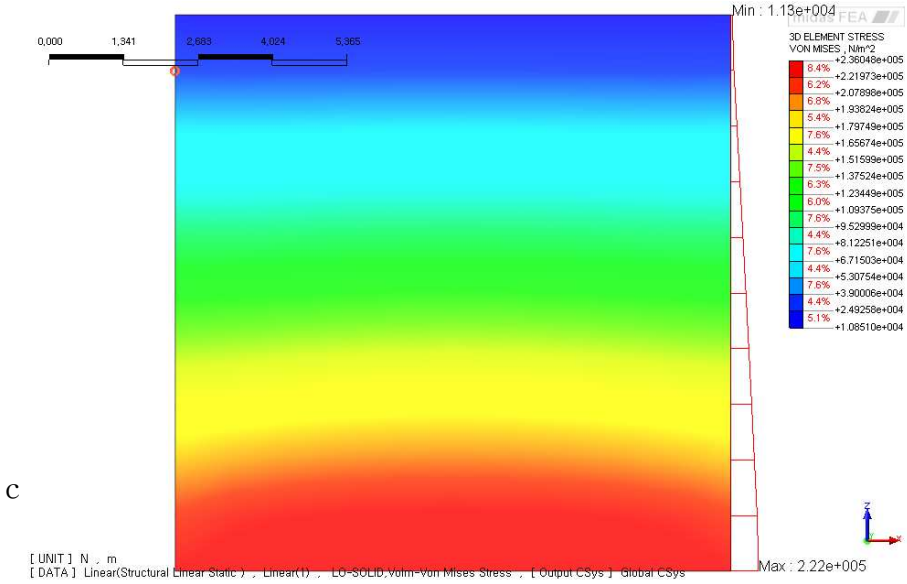



그림 2.17.18 임시 개구부의 철근 응력-변형률 곡선

나. LNG 외부탱크의 Verification(MIDAS FEA)

MIDAS FEA를 이용하여 LNG 외부탱크의 모델링한 것은 검증을 통해 해석적 거동의 신뢰성을 확보하는 것이 중요하다. MIDAS FEA를 통해서 간단한 슬래브를 모델링하여 응력분포도를 통해 수치계산값과 비교하여 검증을 하였다. 그림 2.17.19은 슬래브의 응력분포도를

나타낸 것이다. 수직방향으로 힘을 주고 아래는 Z축으로 Fix했을 때 그림과 같이 우리가 알고 있는 응력분포도를 나타내고 있다.




c

그림 2.17.19 슬래브의 응력분포도

임시 개구부 모델링과 관련하여 Data의 검증도 필요하다. 검증을 위해서 위의 슬래브와 동일한 슬래브에 원의 구멍을 뚫어 응력집중현상이 나타나는지 응력분포도를 통해 검증을 하려고한다. 하중조건과 Boundary조건은 동일하다. 그림 2.17.20은 원의 구멍 주위에서의 응력분포도를 나타낸 그림이다.

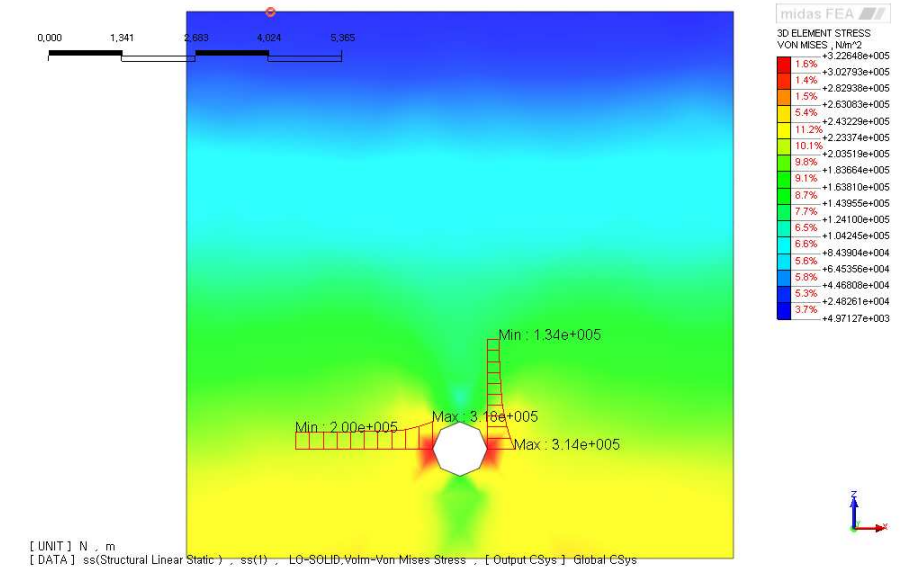



그림 2.17.20 원의 응력분포도

우리가 알고 있는 응력집중현상으로 인해 원의 가장자리 부분이 가장 응력이 높게 나타나고 있다.

# 18절. Roof Frame 설계 개선 및 평가

## 1. LNG 저장탱크의 Roof Frame

현재 거의 대부분의 국내 지상식 9% 니켈 타입 LNG 저장탱크의 Roof는 콘크리트 Dome 형식으로 운영하고 있거나 혹은 시공 중에 있다. Roof Frame은 콘크리트 Dome 지붕의 뼈대라고 할 수 있는 구조물로써 지붕 콘크리트 타설, Suspended Deck 설치 그리고 Steel Roof Plate를 부착하기 위한 목적으로 설치된다.

### 가. Roof Frame의 구성

Roof Frame을 구성하는 각 부재는 기본적으로 Steel이며, 위치에 따라서 Rafter, Compression ring, Concentric Purlin, Bracing, Roof plate 등의 부재로 구성된다. Roof Frame의 주부재인 Rafter는 Roof 중심을 기준으로 방사형으로 배열되고, compression ring, Concentric Purlin, Bracing등의 부재로 Rafter와 Rafter를 연결하며, Roof Plate는 이 Rafter와 Rafter 사이의 공간을 덮을 수 있도록 상부에서 용접한다.

### 나. Roof Frame의 설계

지붕의 설계방법은 먼저 탱크의 용량, 지붕의 직경 등 기본적인 설계조건을 정하고 이에 합당한 Roof Dome의 반경을 정한 후 Roof Frame의 설계가 이루어진다. Roof Frame 설계는 Roof Frame이 지붕에 작용하는 하중을 견딜 수 있도록 설계 코드에 맞게 구성하고 배치하는 과정이다. 본 보고서는 초대용량 LNG 저장탱크 설계기술 개발 과제의 목표인 27만 kl급 LNG 저장탱크 설계기술 중 Roof Frame 설계에 대하여 알아보고 개선 및 변화된 부분에 대하여 기술하고자 한다.

## 2. 초대용량 LNG 저장탱크의 Roof Frame 설계 개선

국내 LNG 수요량이 늘어남에 따라 저장능력 증대를 위하여 초창기의 10만 kl급 LNG 저장탱크를 시작으로 최근의 20만 kl급 LNG 저장탱크까지 필연적으로 그 규모가 증가하였다. 저장탱크의 규모 증가로 인하여 직경이 커짐에 따라서 Roof Frame의 구성 또는 배치도 변화하게 되었다. 이에 세계최대 용량인 27만 kl급 LNG 저장탱크의 개선된 Roof Frame에 대하여 기존의 LNG 저장탱크 Roof Frame과 비교하고자 한다.

### 가. 적용 코드 비교

기존의 LNG 저장탱크는 일본의 JGA 코드와 미국의 AISC-ASD 코드를 기준으로 설계되어 왔다. 하지만 27만 kl급 초대용량 저장탱크에서는 최근의 추세에 맞추어 기존과는 다른 코드로 설계하였다.

#### (1) 허용응력설계법과 한계상태설계법

기존의 LNG 저장탱크는 Roof Frame 설계에 주로 일본의 JGA 코드 와 미국의 AISC-ASD 코드를 적용하였다. 이는 모두 허용응력설계법을 기반으로 하는 코드이다.

허용응력설계법(Allowable Stress Design)은 주어진 설계하중 조건에서 탄성구조이론에 의하여 계산된 부재응력이 정해진 허용응력을 넘지 않도록 설계하는 방법이다.
다음은 Roof Frame에 대한 허용응력설계법의 응력평가 예시이다.

- 압축측에 대한 평가

$$\frac{\sigma_N}{f_c}+\frac{\sigma_{bxz}}{f_{bxz}}+\frac{\sigma_{bxy}}{f_{bxy}}\leq 1 \qquad (1)$$

여기에서,
$\sigma_N$ : 축방향 응력의 절대값
$\sigma_{bxz}$ : X-Z 평면의 압축측에 대한 휨응력의 절대값
$\sigma_{bxy}$ : X-Y 평면의 압축측에 대한 휨응력의 절대값
$f_c$ : 허용압축응력의 절대값
$f_{bxz}$ : X-Z 평면의 허용휨응력의 절대값
$f_{bxy}$ : X-Y 평면의 허용휨응력의 절대값

- 인장측에 대한 평가

$$\frac{\sigma_N+\sigma_{bxz}+\sigma_{bxy}}{f_t}\leq 1 \qquad (2)$$

여기에서, $f_t$ : 허용인장응력의 절대값

- 전단응력에 대한 평가

$$\frac{\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2-\sigma_x\sigma_y+3\sigma_{xy}^2}}{f_t}\leq 1 \qquad (3)$$

여기에서,
$\sigma_x$ : X방향의 수직응력
$\sigma_y$ : Y방향의 수직응력
$\sigma_{xy}$ : X-Y 평면의 전단응력

설계법의 발전으로 근래에는 국제적으로 한계상태설계법을 사용하고 있다. 한계상태설계법(Limit State Design)은 구조물이 제 기능을 발휘 못하는 한계상태에 이르러 하중지지능력을 상실하는 극한한계상태(Ultimate Limit State)와 구조기능 저하로 사용상 부적합한 상태(균열, 처짐 등)가 되는 사용한계상태(Serviceability Limit State)로 나누어 검토하는 설계방법이다. 즉 안정성은 ULS, 사용성은 SLS를 검토하여 확보하게 되는데 하중 및 저항관련 설계안전율은 불확실성을 확률 통계적으로 처리하는 구조 신뢰성이론에 기초하여 결정한다. 따라서 일관성 있는 적정수준의 안전율을 확보할 수 있어 구조물의 신뢰도를 높일 수 있는 보다 합리적이고 새로운 설계법이다.
이러한 한계상태설계법을 기반으로 하는 코드는 대표적으로 유럽의 BS 코드와 BS 코드를 기반으로 개정된 EN 코드가 있다. 초대용량 LNG 저장탱크도 최근 설계 추세에 맞추어 한계상태설계법을 기반으로 한 EN 코드로 설계를 하였다.

(2) Roof Plate

Roof Plate의 두께를 결정하는데 있어서 일본, 미국, 유럽 모두 각기 다른 설계식을 적용하고 있지만, 거의 동일한 결과값을 나타낸다. 일본에서는 용접효율과 부식의 영향을 고려하며, 미국은 용접에 대한 효율만을, 유럽에서는 부식에 대한 영향을 반영하고 있다.

아래의 표는 각국의 Roof Plate 설계식을 나타낸다.

표 2.18.1 국가별 Roof Plate 설계식

| 일본(RPAS) | 미국(API 620) | 유럽(BS 7777) |
|---|---|---|
| $t = \frac{P \cdot R}{200 f_t \cdot \eta - 0.2P} + \alpha$ | $t = \frac{P \cdot R}{2S \cdot \eta}$ | $t = \frac{P \cdot D}{20S} + C$ |
| $P$ : 최대 사용 압력(kg/cm$^2$)<br>$R$ : Roof의 곡률반경(mm)<br>$f_t$ : 최대허용 인장 응력<br>$\eta$ : 용접 이음의 효율<br>$\alpha$ : 부식 이음부의 두께 | $P$ : 설계 압력(kg/mm$^2$)<br>$R$ : Roof Dome의 내경(mm)<br>$S$ : 허용인장응력(kg/mm$^2$)<br>$\eta$ : 용접한 조인트의 효율 | $P$ : 내부 압력(mbar)<br>$S$ : 허용설계응력(N/mm$^2$)<br>$D$ : 용기 직경(m)<br>$C$ : 부식 허용량 |

Roof Plate의 시공방식은 Lap joint type과 Butt joint type의 두 가지로 나뉘게 된다. 아래의 그림은 Lap joint type과 Butt joint type 시공방식이다.

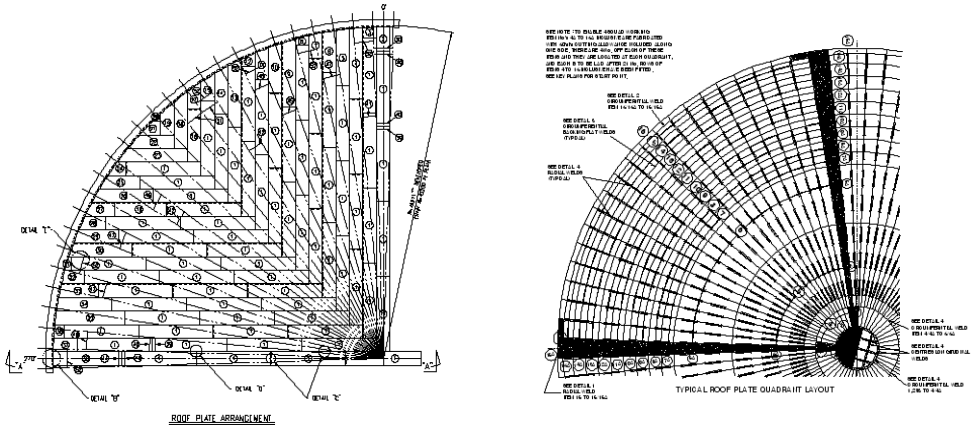



그림 1 Lap joint type 방식(좌)과 Butt joint type(우) Roof Plate

Lap joint 방식은 일정한 크기의 plate를 겹쳐서 용접하는 방식으로 plate의 재단은 쉽지만 각 plate를 겹쳐서 용접하므로 두꺼워지고 용접효율이 떨어진다. 반면 Butt joint 방식은 plate의 재단이 까다롭지만 용접효율이 좋아지고 plate의 두께를 얇게 할 수 있다는 장점이 있다.

나. Roof Frame의 배치 및 구성

우선 기존에 시공된 LNG 저장탱크의 Roof Frame을 살펴보고 초대용량 LNG 저장탱크에 맞는 Roof Frame 배치와 구성을 선정하였다.

(1) 기존 LNG 저장탱크

기존 20만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof 직경은 86.4m로 Rafter, Inner compression ring, Middle compression ring, Outer compression ring, Concentric Purlin, Bracing, Roof plate로 구성된다. Rafter는 배치에 따라서 27개의 Primary Rafter와 27개의 Secondary Rafter, 54개의 Tertiary Rafter로 나뉘어지며, 총 108개의 Rafter가 3.33도 간격으로 구성된다. Roof plate의 두께는 5mm이다. 20만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof Frame 배치와 Roof Frame을 구성하는 각 부재의 제원을 그림 2.18.2와 표 2.18.2에 나타내었다.

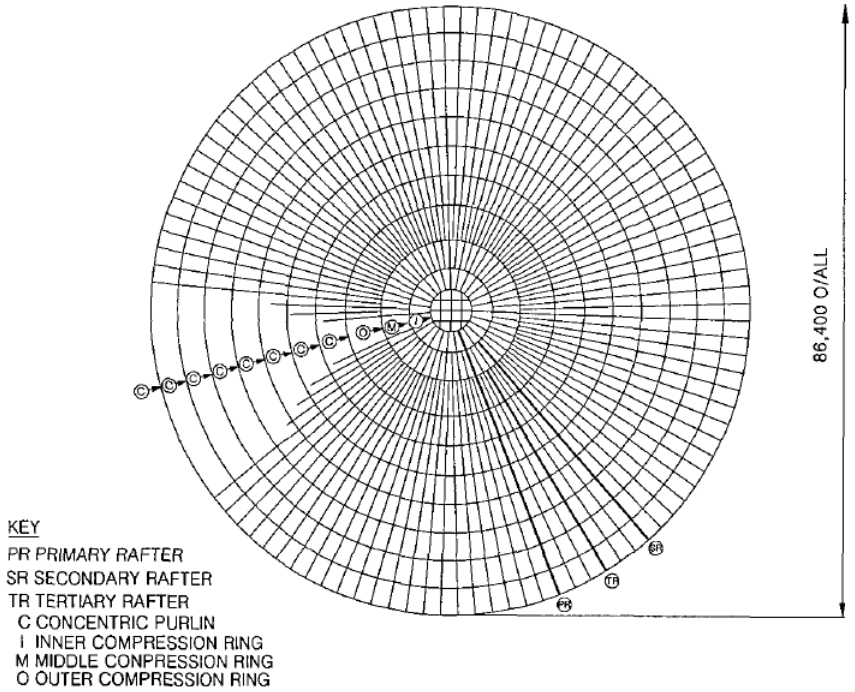



그림 2.18.2 20만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof Frame 배치

표 2.18.2 20만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof Frame 각 부재의 제원

| 부재 | 제원 |
|---|---|
| RAFTERS | H 400 ×200 ×8 ×13 |
| INNER COMPRESSION RING | H 450 ×300 ×13 ×22 |
| MIDDLE COMPRESSION RINGS | H 390 ×300 ×11 ×16 |
| OUTER COMPRESSION RING | H 390 ×300 ×11 ×16 |
| CONCENTRIC 'PURLINS' | C 250 ×90 ×9 ×13 |
| BRACING | L 100 ×100 ×7 ×10 |

(2) 초대용량 LNG 저장탱크

저장탱크의 용량이 20만 kl에서 27만 kl로 용량이 35% 증가함에 따라서 탱크 Roof의 직경은 86.4m에서 92.4m로 6m증가하였다. Roof Frame의 구성은 이 늘어난 직경과 직경이 늘어난 만큼 작용하중이 증가하는 것을 고려해야 한다. 이에 LNG 저장탱크의 규모 변화에 맞도록 Roof Frame 배치를 검토하였다.

주부재인 Rafter를 배치할 때에는 아래의 규정을 따른다.

- Rafter의 총 개수는 4로 나누어 정수가 되어야 한다.
- 탱크 벽체와 접하는 끝단의 Rafter 사이의 간격이 최대 2.5m를 넘지 않도록 한다.

그 외에 시공성을 고려한 Rafter와 Rafter 사이의 최소 간격과 Grillage부의 수직, 수평 부재 배치 등을 추가로 고려한다.

27만 kl급 LNG 저장탱크는 위의 사항들을 종합적으로 고려하였고, 하중 증가에 대응하여 기존 20만 kl 저장탱크의 108개에서 120개로 Rafter의 개수를 증가시켰으며 3단으로 배치하였다. 아래의 표 2.18.4은 최종적으로 선정된 Roof Frame의 구성안이다.

표 2.18.4 27만 kl급 LNG 저장탱크 Roof Frame 최종 구성안

| | | 비고 | 최종안 | 단위 |
|---|---|---|---|---|
| 배치 | PRIMARY RAFTER | | 30 | 개 |
| | SECONDARY RAFTER | | 30 | 개 |
| | TERTIARY RAFTER | | 60 | 개 |
| 간격 | RAFTER 간격(각도) | | 3.0000 | 도 |
| | GRILLAGE부 RAFTER 최소간격 | 시공성 고려 | 0.524 | m |
| | 단부 RAFTER간격 | <2.5 | 2.419 | m |
| Compression ring 반지름 | INNER 반지름 | | 3.000 | m |
| | MIDDLE 반지름 | | 6.000 | m |
| | OUTER 반지름 | | 10.000 | m |

아래의 그림은 최종 구성안에 따른 Roof Frame의 배치도이다.

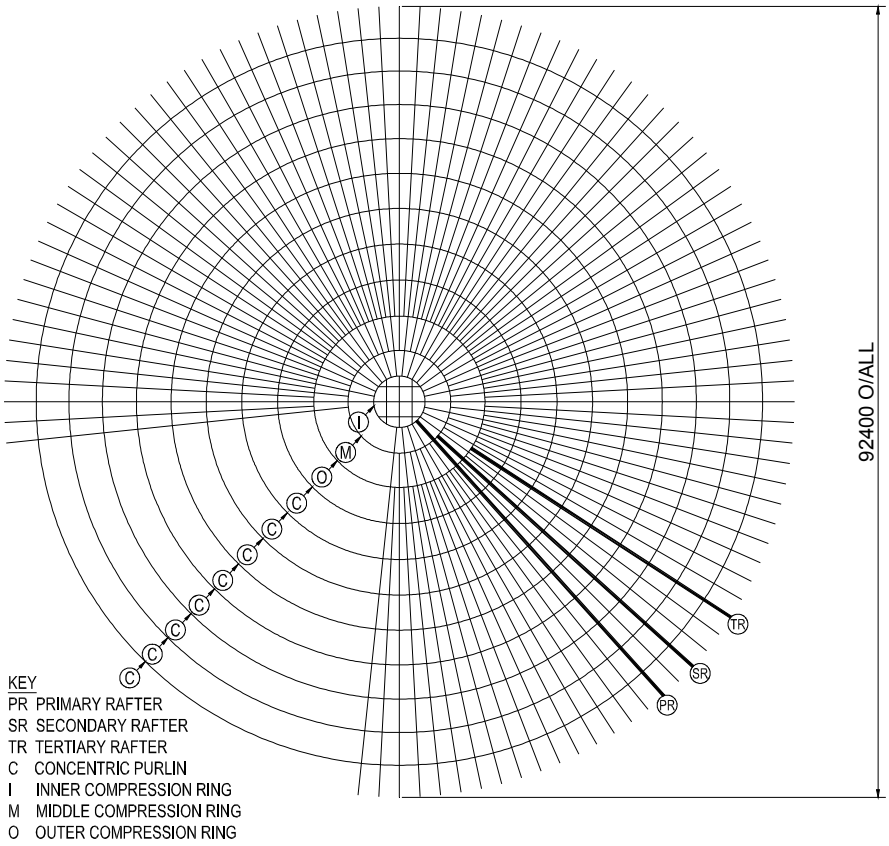



그림 2.18.3 27만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof Frame 배치도

다. 27만 kl급 LNG 저장탱크 Roof Frame의 해석

선정한 Roof Frame 배치를 FEA 프로그램으로 모델링하여 각 부재에 미치는 부재력을 산정하였다. 부재력을 구하기 위해서는 상량전과 상량후 Roof Frame에 작용하는 외부 하중과 자중등 여러 하중을 고려하여 해석한다. 모델링에는 MIDAS CIVIL 프로그램을 사용하였다.

Roof Frame의 해석은 두 가지 경우로 나뉜다. Roof Frame은 탱크 바닥에서 조립한 이후에 공기압력으로 탱크 상부로 이동시켜 콘크리트 지붕을 타설한다. 이러한 시공과정을 고려하여 Roof Frame이 탱크 바닥에서 조립된 상태인 상량전과 탱크 상부로 이동된 상태인 상량후로 나뉘어 해석을 수행한다.

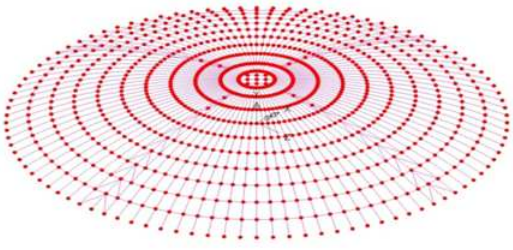


그림 2.18.4 해석 모델(상량전, 상량후)

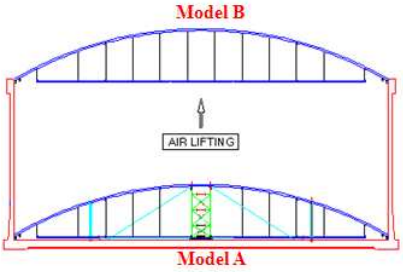



그림 2.18.5 상량전과 상량후의 비교

(1) 상량전 모델

• 고려하중

- Member self weights
- Steel roof plates
- Aluminum deck and insulation
- Nominal live load

• 하중조합

표 2.18.5 하중조합 (상량전 모델)

| DESCRIPTION | LOAD | | FACTOR |
|---|---|---|---|
| CONSTRUCTION A<br>Serviceability Limit State | 1<br>2<br>3<br>4 | Self-Weight<br>Dead load-Roof Plates<br>Dead load-Aluminum deck<br>Imposed load | 1.00<br>1.00<br>1.00<br>1.00 |
| CONSTRUCTION A<br>Ultimate Limit State | 1<br>2<br>3<br>4 | Self-Weight<br>Dead load-Roof Plates<br>Dead load-Aluminum deck<br>Imposed load | 1.35<br>1.35<br>1.35<br>1.50 |

(2) 상량후 모델

• 고려하중

- Member self weights
- Steel roof plates
- Aluminum deck and insulation
- Nominal live load
- Wet concrete
- Internal air pressure (to maintain spherical shape during concrete pour)

• 지붕 콘크리트 타설

지붕 콘크리트는 다음 그림과 같은 순서로 타설, 시공하며, 하중 조합도 이와 동일하게 적용하였다.

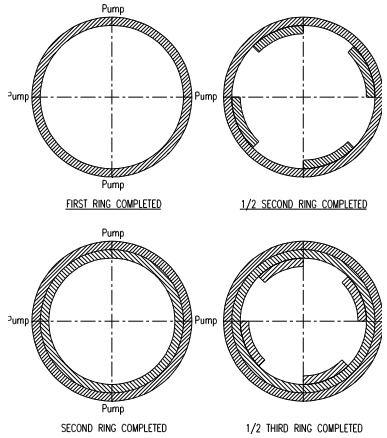



그림 2.18.6 지붕 콘크리트 타설 순서

• 하중조합

아래의 하중조합을 사용하여 SLS와 ULS 검토를 하였다.

표 2.18.6 Serviceability Limit State

| Description | LOAD CASE No. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 |
| 1 Member SW | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 Con B Dead | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 3 Con B Imp'd | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 4 Int.Air Press | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 5 Conc Ring 1 | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 6 Conc Ring 1.5 | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 7 Conc Ring 2 | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 8 Conc Ring 2.5 | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 9 Conc Ring 3 | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 10 Conc Ring 3.5 | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 11 Conc Ring 4 | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 12 Conc Ring 4.5 | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 13 Conc Ring 5 | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 14 Conc Ring 5.5 | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 15 Conc Ring 6 | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 16 Conc Ring 6.5 | | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 17 Conc Ring 7 | | | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 18 Conc Ring 7.5 | | | | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 19 Conc Ring 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 20 Conc Ring 8.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |

| | |
|---|---|
| 21 Conc Ring 9 | 1.0 1.0 1.0 1.0 |
| 22 Conc Ring 9.5 | 1.0 1.0 1.0 |
| 23 Conc Ring 10 | 1.0 1.0 |
| 24 Conc Ring 11 | 1.0 |
| 25 Conc Complete | |

표 2.18.7 Ultimate Limit State

| Description | LOAD CASE No. |
|---|---|
| | 110 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 |
| 1 Member SW | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 2 Con B Dead | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 3 Con B Imp'd | 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 |
| 4 Int.Air Press | 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 |
| 5 Conc Ring 1 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 6 Conc Ring 1.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 7 Conc Ring 2 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 8 Conc Ring 2.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 9 Conc Ring 3 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 10 Conc Ring 3.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 11 Conc Ring 4 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 12 Conc Ring 4.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 13 Conc Ring 5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 14 Conc Ring 5.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 15 Conc Ring 6 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 16 Conc Ring 6.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 17 Conc Ring 7 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 18 Conc Ring 7.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 19 Conc Ring 8 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 20 Conc Ring 8.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 21 Conc Ring 9 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 22 Conc Ring 9.5 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 23 Conc Ring 10 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 24 Conc Ring 11 | 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 1.35 |
| 25 Conc Complete | |

상량전과 상량후의 경우를 비교할 때 작용하중 측면에서 상량전의 경우가 더 critical한 것으로 나타났다. 상량후의 경우에는 상량과정에서 적용하는 Internal air pressure가 상량 이후에도 콘크리트 타설을 위하여 계속 유지되므로 상부에서 가해지는 하중을 상쇄하기 때문이

다.

라. 27만 kl급 LNG 저장탱크 Roof Frame의 부재 설계

Roof Frame의 부재 설계는 해석에서 도출된 작용하중에 대하여 안전성을 확보하고 설계코드를 만족할 수 있도록 각 부재의 제원을 선정하는 작업이다. 우선 20만 kl급 LNG 저장탱크의 제원과 거의 동일하게 제원을 선정하였다. 아래의 표는 27만 kl급 LNG 저장탱크에 적용한 각 부재의 제원이다.

표 2.18.8 27만 kl급 LNG 저장탱크 각 부재의 제원

| 부재 | 제원 |
|---|---|
| RAFTERS, GRILLAGE | H 400 ×200 ×8 ×13 |
| INNER COMPRESSION RINGS | H 440 ×300 ×11 ×18 |
| MIDDLE COMPRESSION RINGS | H 390 ×300 ×10 ×16 |
| OUTER COMPRESSION RINGS | H 390 ×300 ×10 ×16 |
| CONCENTRIC 'PURLINS' | C 250 ×90 ×9 ×13 |
| BRACING | L 100 ×100 ×13 ×13 |

(1) Rafter의 유효좌굴길이

좌굴은 Rafter 설계에서 중요하게 고려해야하는 부분 중 하나이다. Rafter와 같이 얇고 가느다란 부재로 구성되어 있는 구조물의 압축에 대한 강도는 구성 재료 자체의 압축강도보다는 좌굴에 대한 저항력에 의해 좌우되는 경우가 많다. 구조물을 구성하는 부재의 압축강도가 충분할지라도 구조물이 좌굴에 의해 변형을 일으키면, 구조물 전체의 구조적인 안전성을 상실한다. 따라서 압축을 받는 구조물의 경우 좌굴이 발생하지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 아래의 그림은 좌굴 설계시 고려한 Rafter의 휨모멘트도이다.

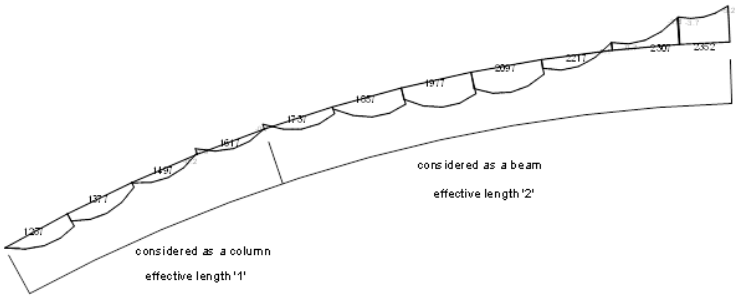



그림 2.18.7 Rafter의 휨모멘트도

휨모멘트도를 보면 기둥처럼 거동하는 부분과 보처럼 거동하는 부분으로 나뉘게 되는 데이를 이용하여 Rafter의 유효좌굴길이를 산정한다. 그리고 이 유효좌굴길이를 토대로 부재의 단면이 좌굴에 대하여 안정적인지를 검토하게 된다.

(2) Rafter의 부재 설계 결과

아래의 그림은 프로그램을 이용한 Rafter 부재(H 400×200×8×13)의 단면 검토 화면이다.

**Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK**
Combo : COMB1
Units : KN, m, C

Frame : 819 Design Sect: R_H_400x200x8/13
X Mid : -27.898 Design Type: Brace
Y Mid : 34.451 Frame Type : Moment Resisting Frame
Z Mid : 1.023 Sect Class : Class 1
Length : 4.262 Major Axis : 0.000 degrees counterclockwise from local 3
Loc : 0.000 RLLF : 1.000

Area : 0.008 SMajor : 0.001 rMajor : 0.167 AVMajor: 0.003
IMajor : 2.296E-04 SMinor : 1.735E-04 rMinor : 0.046 AVMinor: 0.004
IMinor : 1.735E-05 ZMajor : 0.001 E : 200000000.00
Ixy : 0.000 ZMinor : 2.660E-04 Fy : 240000.000

**STRESS CHECK FORCES & MOMENTS**

| Location | P | M33 | M22 | V2 | V3 | T |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | -304.069 | 12.304 | -0.001 | -0.595 | -4.146E-04 | 9.385E-05 |

**PMM DEMAND/CAPACITY RATIO**

| Governing Equation | Total Ratio | | P Ratio | | MMajor Ratio | | MMinor Ratio | Ratio Limit | Status Check |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (6.61) | 0.705 | = | 0.656 | + | 0.000 | + | 0.049 | 0.950 | OK |

**AXIAL FORCE DESIGN**

| | Ned Force | Nc,Rd Capacity | Nt,Rd Capacity | Nb33,Rd Major | Nb22,Rd Minor |
|---|---|---|---|---|---|
| Axial | -304.069 | 463.394 | 1966.080 | 463.394 | 1037.592 |

**MOMENT DESIGN**

| | Med Moment | Mc,Rd Capacity | Mv,Rd Capacity | Mb,Rd Capacity |
|---|---|---|---|---|
| Major Moment | 12.304 | 308.628 | 308.628 | 308.628 |
| Minor Moment | -0.001 | 63.836 | 63.836 | |

| | K Factor | L Factor | k Factor | kzy Factor | kyz Factor | C1 Factor |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Major Moment | 0.850 | 7.841 | 1.525 | 0.915 | | 1.894 |
| Minor Moment | 1.000 | 1.000 | 0.600 | | 0.360 | |

**SHEAR DESIGN**

| | Ved Force | Vc,Rd Capacity | Stress Ratio | Status Check | Ted Torsion |
|---|---|---|---|---|---|
| Major Shear | 0.595 | 443.405 | 0.001 | OK | 0.000 |
| Minor Shear | 4.146E-04 | 600.444 | 0.000 | OK | 0.000 |

그림 2.18.8 Rafter의 단면검토

3. 초대용량 LNG 저장탱크 Roof Frame 설계 결과 및 비교

27만 kl급 LNG 저장탱크 Roof Frame의 부재 단면은 기존 20만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof Frame과 거의 동일하다. 표 2.18.9은 각 부재별 작용응력과 허용응력의 비율을 나타내는 것으로 1보다 작아야 안전성을 확보할 수 있다. 27만 kl급 저장탱크 Roof Frame의 설계결과를 보면 표 2.18.8의 부재를 사용해도 구조적으로 무리 없이 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다.

표 2.18.9 부재별 응력비

| Member | Section | RATIO (<1.0) |
|---|---|---|
| Rafter | H400X200X8X13 | 0.610 |
| Outer ring<br>Middle ring | H390X300X10X16 | 0.593 |
| Grillage | H400X200X8X13 | 0.242 |
| Inner ring | H440X300X11X18 | 0.569 |
| Purlin | C250X90X9X13 | 0.832 |
| Bracing | L100X100X13X13 | 0.999 |

표 2.18.10는 기존 20만 kl급 LNG 저장탱크와 본 보고서의 27만 kl급 LNG 저장탱크의 부재 단면제원과 소요 물량비교표이다. 아래의 표에서 노란색으로 표시된 부분은 단면제원이 서로 상이한 부분이며, 두 가지 용량의 저장탱크에 따른 Roof Frame의 소요 물량을 비교하였다.

표 2.18.10 탱크별 Roof Frame 소요 물량

| | 단면제원 | | 물량(ton) | |
|---|---|---|---|---|
| 부재 | 기존 20만 kl급 | 27만 kl급 | 20만 kl급 | 27만 kl급 |
| P. Rafter | H400X200X8X13 | H400X200X8X13 | 80 | 96 |
| S. Rafter | H400X200X8X13 | H400X200X8X13 | 74 | 89 |
| T. Rafter | H400X200X8X13 | H400X200X8X13 | 134 | 162 |
| Grillage | H400X200X8X13 | H400X200X8X13 | 2 | 2 |
| Inner | H450X300X13X22 | H440X300X11X18 | 3 | 2 |
| Middle | H390X300X10X16 | H390X300X10X16 | 4 | 4 |
| Outer | H390X300X10X16 | H390X300X10X16 | 7 | 7 |
| Purlin | C250X90X9X13 | C250X90X9X13 | 43 | 52 |
| Bracing | L100X100X7X10 | L100X100X13X13 | 1 | 2 |
| Cleat,etc | 10t | 10t | 17 | 20 |
| 합계 | | | **365** | **436** |
| 증감 | | | | **19% 증가** |

4. 결론

Roof Frame 설계에서 27만 kl급 LNG 저장탱크가 기존 LNG 저장탱크와 구별되는 점은 크게 개선된 코드의 사용과 최적화로 요약할 수 있다.

• 개선된 코드 적용

기존 20만 kl급 저장탱크의 Roof Frame은 BS 5950 코드를 적용하여 설계하였다. 현재 국제적으로는 BS 코드를 개선한 EN 코드를 사용하고 있는 추세이다. 따라서 본 보고서의 27

만 kl급 LNG 저장탱크의 Roof Frame은 EN 3(Eurocode 3)코드를 설계에 적용하였다.

• 최적화

27만 kl급 LNG 저장탱크는 20만 kl급 LNG 저장탱크와 비교하였을 때 용량이 35% 증가하였다. 하지만 서로 다른 탱크용량의 Roof Frame이 거의 동일한 제원의 부재를 사용하였음에도 불구하고 27만 kl급 LNG 저장탱크의 소요물량은 19% 증가에 그쳤다. 다시 말해 용량대비 소요물량의 증가를 최소화함으로써 경제적인 측면에서 Roof Frame의 최적화를 이루었다고 할 수 있다.

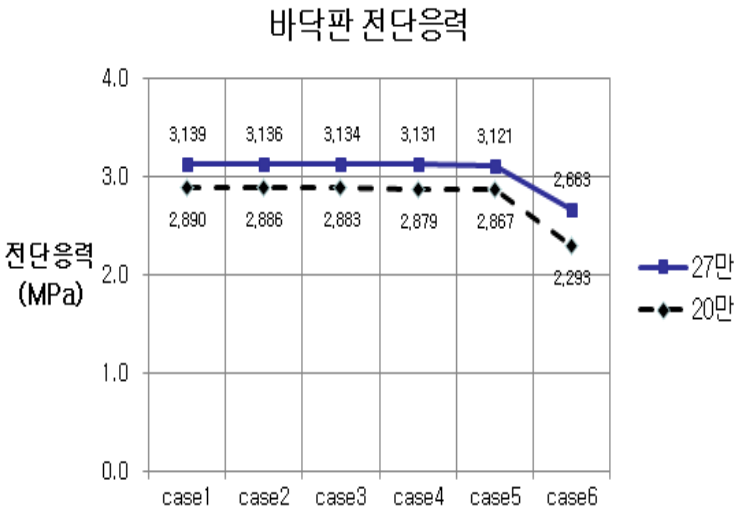
# 19절. 저장탱크 외조 단면결정인자 도출

## 1. 지진하중에 의한 단면결정인자 도출

### 가. 지반 종류에 따른 탱크용량(20만kL, 27만kL)별 단면 응력

○ 20만, 27만 kL TANK 의 SSI를 고려한 지반의 종류 및 용량에 따른 단면 응력 검토

○ 해석 조건 : ① 매립층 15m ② Pile 길이 50m ③ UBC 0.3g Response specturm해석




| | KH(MN/m) (Soil stiffness) | |
|---|---|---|
| Case | 20만탱크 | 27만탱크 |
| Case1 | 1.82E+05 | 1.53E+05 |
| Case2 | 2.08E+05 | 1.75E+05 |
| Case3 | 2.32E+05 | 1.95E+05 |
| Case4 | 2.61E+05 | 2.19E+05 |
| Case5 | 4.26E+05 | 3.57E+05 |
| Case6 (Fix) | - | - |

○ 지반의 강성이 클수록, 전단응력은 감소하였다.

○ 지반의 종류에 따른 바닥판의 전단응력 차이는 1% 미만이다.

○ SSI 고려한 경우 지반고정상태보다 20만은 25%, 27만은 17% 증가하였다.

○ 휨 응력 : 20만 -> 27만(9% 증가)

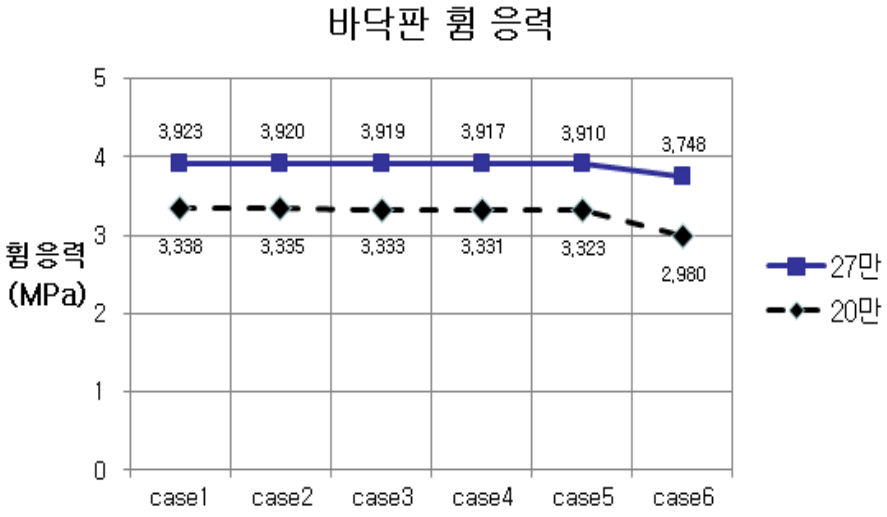



그림 2.19.1 Case별 바닥판 휨 응력

○ 지반의 강성이 클수록, 휨응력은 감소하였다.
○ 지반의 종류에 따른 바닥판의 전단응력 차이는 1% 미만이다.
○ SSI 고려한 경우 지반고정상태보다 20만은 11%, 27만 4% 증가하였다.
○ 휨 응력 : 20만 -> 27만(18% 증가)

나. Pile 길이에 따른 탱크용량(20만kL, 27만kL)별 단면 응력
○ 20만, 27만 kL TANK 의 Pile 길이에 따른 단면 응력 검토
○ 해석 조건 : ① 매립층 15m ② Case1 지반 ③ UBC 0.3g Response specturm 해석

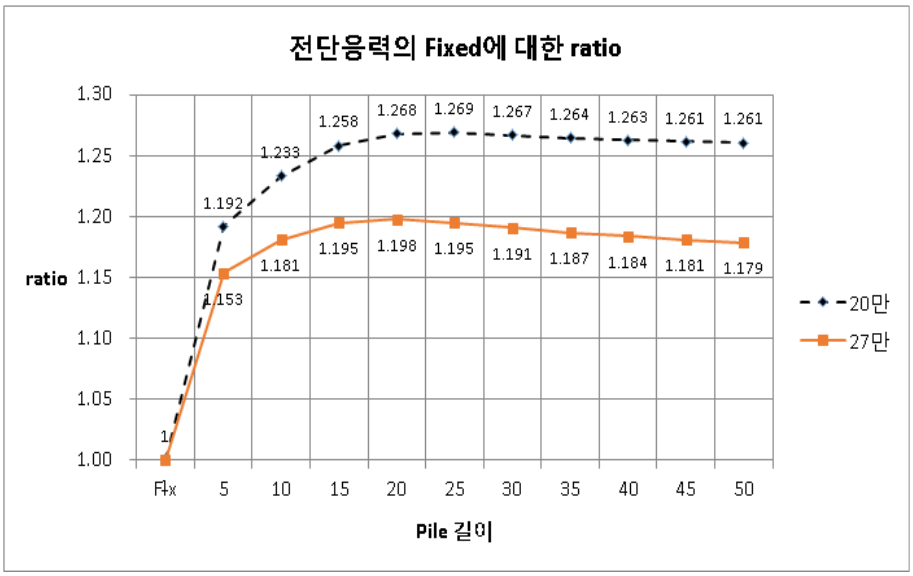



그림 2.19.2 Pile 길이에 따른 전단응력의 fixed에 대한 ratio

○ Pile 길이가 길어 질수록 전단응력 증가후, 일정길이 이후로 감소하였다.
○ 20만 탱크의 경우 증가구간 : 0m(fix) ~ 25m (약 27% 증가)
감소구간 : 25m ~ 50m (약 0.8%감소)
○ 27만 탱크의 경우 증가구간 : 0m(fix) ~ 20m (약 20% 증가)
감소구간 : 25m ~ 50m (약 2%감소)
○ 20만, 27만 탱크 모두, 감소량은 증가량에 비해 매우 작았다.
○ Pile 길이에 따른 단면응력의 변화량은 20만 탱크가 27만 탱크에 비해 상대적으로 더 크다.

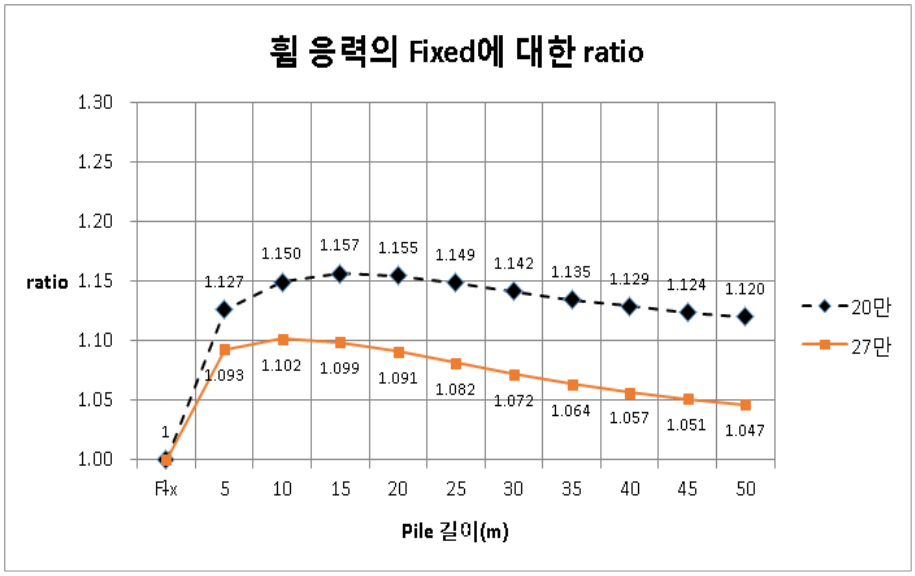



그림 2.19.3 Pile 길이에 따른 휨응력의 fixed에 대한 ratio

○ Pile 길이가 길어 질수록 휨응력 증가후, 일정길이 이후로 감소
○ 20만 탱크의 경우 증가구간 : 0m(fix) ~ 15m (약 16% 증가)
감소구간 : 15m ~ 50m (약 4%감소)
○ 27만 탱크의 경우 증가구간 : 0m(fix) ~ 10m (약 10% 증가)
감소구간 : 10m ~ 50m (약 5%감소)
○ 20만, 27만 탱크 모두, 감소량은 증가량보다 작음
○ Pile 길이에 따른 단면응력의 변화량은 20만 탱크가 27만 탱크에 비해 상대적으로 더 크다.

2. 온도하중에 의한 단면결정인자 도출

가. 상시상태 열응력해석결과

○ 표 2.19.1은 상시상태에서 온도에 따른 물성치 변화 반영 여부에 따른 열응력 차이이다. 오차는 해당 높이에서의 물성치 변화 반영 유무에 따른 응력의 절대값의 차이이고 소수점 셋째 자리에서 반올림한 값이다. -부호의 의미는 물성치 변화를 반영한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 응력의 절대값이 증가하였다는 의미이다. 해석결과 최대오차는 - 14.1℃의 경우 외면(Outerface)에서 0.22MPa(약 0.84m 높이) 만큼이 발생하였고, 평균적인 응력 증가량은 외기온도별 각각 0.04(-14.1℃), 0.00(12.5℃), 0.00(37℃)으로 그 증가량이 소수점 둘째자리 이하임을 확인하였다.

표 2.19.1 상시상태에서 온도에 따른 물성치 변화 반영 여부에 따른 열응력 차이

| 외기온도(℃) | -14.1 | | 12.5 | | 37 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 외조 벽체 | 내면 | 외면 | 내면 | 외면 | 내면 | 외면 |
| 최대오차(MPa) | -0.20 | -0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 평균오차(MPa) | -0.04 | -0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

* 오차 계산 = |해당 높이에서 물성치 변화 미반영 응력| - |해당 높이에서 물성치 변화 반영 응력|
* 평균 오차 = 높이별 오차들의 평균, 소수점 셋째자리에서 반올림

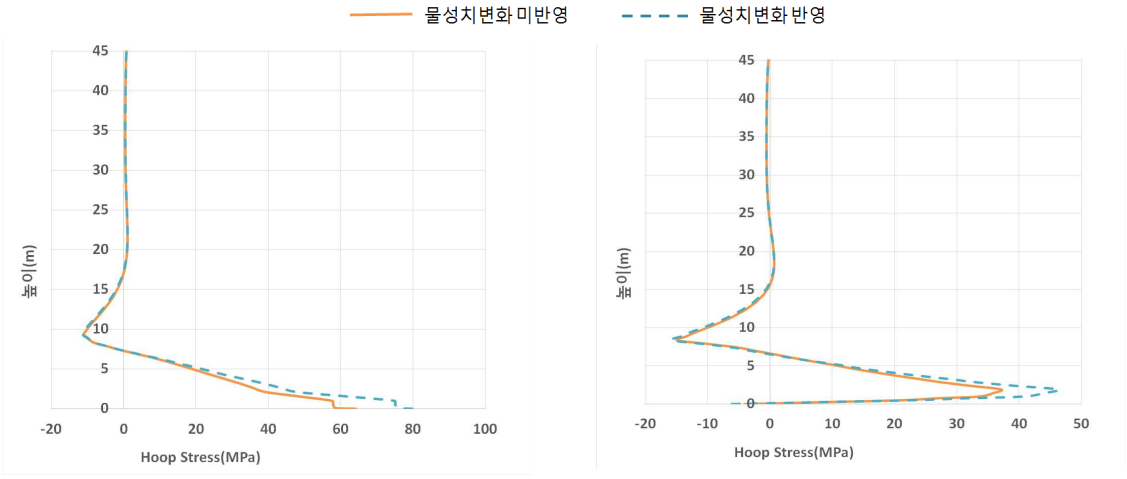
나. 유출상태 열응력해석결과

○ 해석결과 표 2.19.2에서 확인할 수 있는 것처럼, 37℃ 외면을 제외한 모든 외기온도에서 10MPa이 넘는 최대오차가 발생하였다. 그림 2.19.4는 외기온도 37℃에서 내면과 외면의 Hoop stress를 보여주고 있다. 바닥 기준점에서 약 5m 지점 사이에서 물성치 변화 반영 유무에 따른 응력 차이가 크게 발생함을 확인할 수 있다. 이 때, 외조벽체의 평균오차는 각각 1.51(내면), 0.71(외면)이고, 물성치 변화 반영으로 인한 최대응력증가는 각각 17.43(내면, 약 0.1m 높이), 9.17(외면, 약 1.92m 높이)로 나타났다.

표 2.19.2 유출상태에서 온도에 따른 물성치 변화 반영 여부에 따른 열응력 차이

| 외기온도(℃) | -14.1 | | 12.5 | | 37 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 외조 벽체 | 내면 | 외면 | 내면 | 외면 | 내면 | 외면 |
| 최대오차(MPa) | -16.36 | -11.24 | -15.94 | -10.12 | -17.43 | -9.17 |
| 평균오차(MPa) | -1.56 | -1.03 | -1.51 | -0.82 | -1.51 | -0.71 |

* 오차 계산 = |해당 높이에서 물성치 변화 미반영 응력| - |해당 높이에서 물성치 변화 반영 응력|
* 평균 오차 = 높이별 오차들의 평균, 소수점 셋째자리에서 반올림




(a) 내면(Innerface) (b) 외면(Outerface)

그림 2.19.4 유출시 외조 벽체의 높이별 Hoop stress 분포

3. 특수하중에 의한 단면결정인자 도출

가. BS 7777코드에 의한 충돌해석

○ BS 7777 코드를 기본 시나리오로 선정하여, 벽체 손상에 대해 자체적으로 충돌 영향 평가 기준을 설정하고, 이 손상에 관한 충돌 영향 평가를 실시하여 이를 만족시키는 수준에서의 비산물체의 최대 속도 및 최대 크기를 도출하였다.

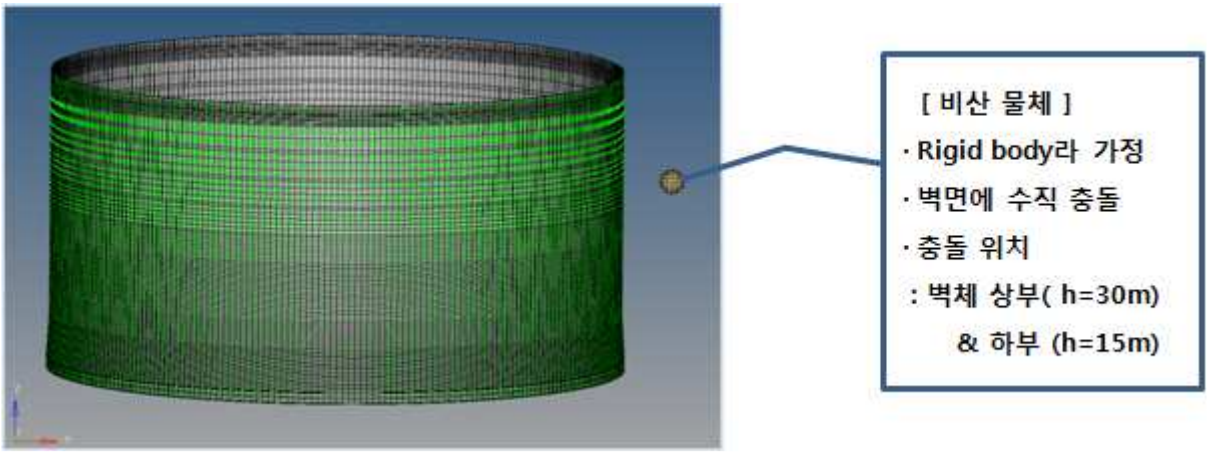



그림 2.19.5 BS 7777 코드 시나리오 해석

표 2.19.3 충돌 시나리오 선정

| 코드에 의한 시나리오 선정 | | |
|---|---|---|
| Impact | BS 7777 | 직경 1m, 50kg의 물체가 45m/s의 속도로 벽체에 충돌 |
| | 최대하중 | 직경 2m, 50kg의 물체가 60m/s의 속도로 벽체에 충돌 |

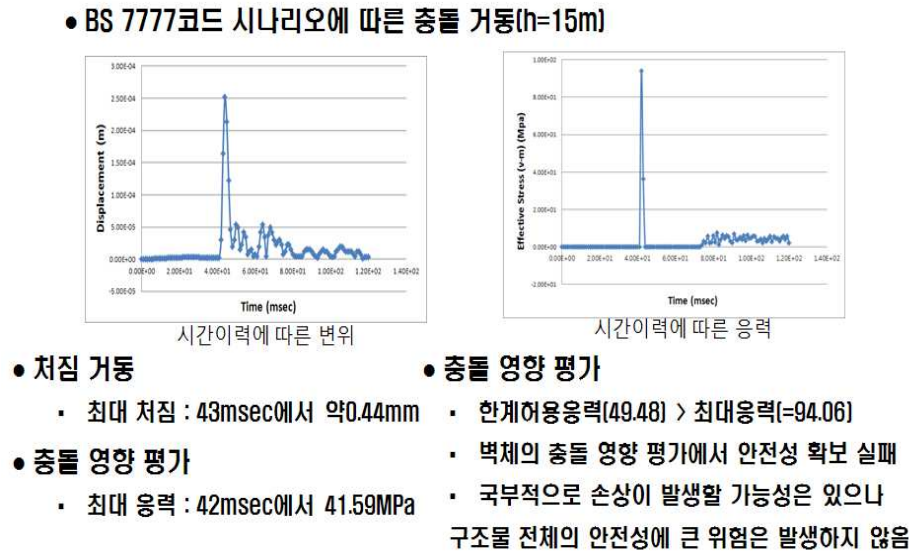



그림 2.19.6 BS 7777 코드 시나리오에 따른 해석결과 (PS손실량 도입하지 않음)

나. 프리스트레스 손실이 도입된 최대하중에 의한 충돌

○ 한국가스공사에 채택하고 있는 BS 7777 코드의 외부충돌하중 시나리오를 바탕으로 구조물의 상부 및 하부에 충돌 해석을 수행한 결과 발생한 응력에 비해 변위는 미소한 크기로 발생하였다.

○ 벽체 손상에 대해 자체적으로 충돌 영향 평가 기준을 설정하고, 이 손상에 관한 충돌 영향 평가를 실시하여 이를 만족시키는 수준에서의 비산물체의 최대 속도 및 최대 크기를 도출하였다

○ 벽체 하부면에 대해서는 프리스트레스 도입 시 텐던의 긴장력 약화로 인해 벽체의 강성이 작아져 변위는 증가하고 응력은 감소하는 등 충돌 저항성이 감소되는 불안정 거동을 보여준다.

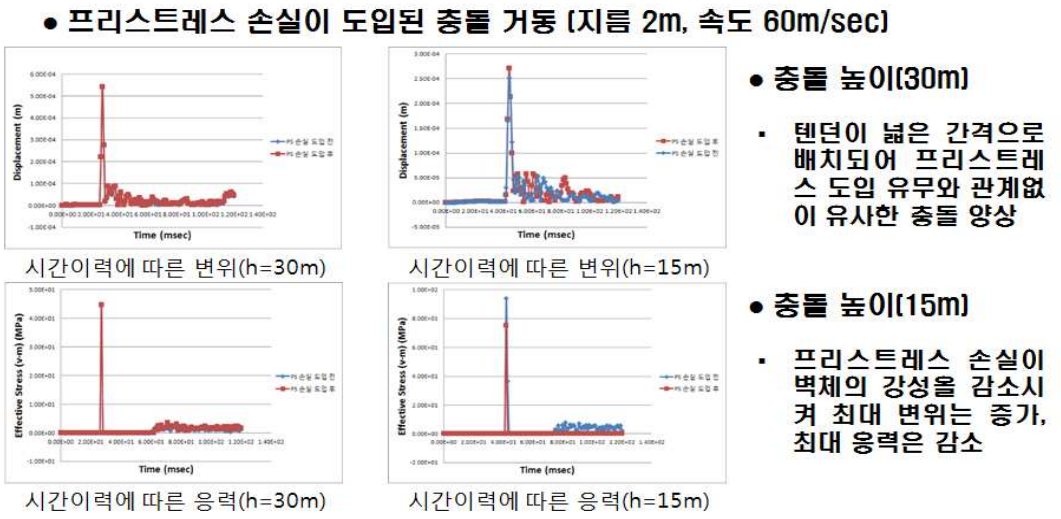



그림 2.19.7 BS 7777 코드 시나리오에 따른 해석결과 (PS손실량 도입)

4. 프리스트레스하중에 의한 단면결정인자 도출

가. 프리스트레스 도입순서에 따른 해석 - 시나리오 ①

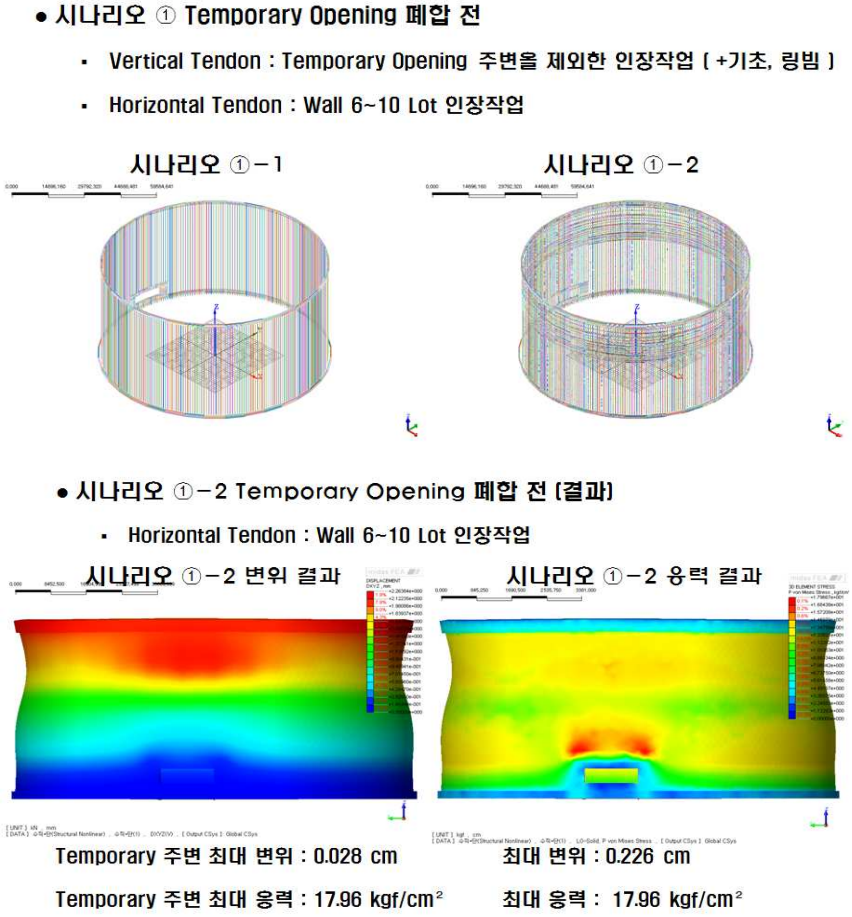
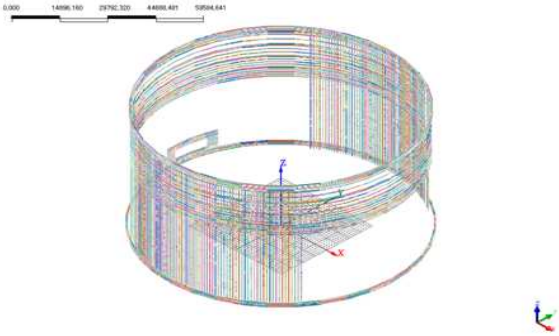



그림 2.19.8 시나리오 ①에 대한 해석결과

나. 프리스트레스 도입순서에 따른 해석 - 시나리오 ②

● 시나리오 ② : Temporary Opening 폐합 전

- Vertical Tendon : 전체 vertical 텐던의 50% 인장 작업
- Horizontal Tendon : Wall 6~10 Lot 인장 작업



● 시나리오 ② : Temporary Opening 폐합 전

- Vertical Tendon : 전체 vertical 텐던의 50% 인장 작업
- Horizontal Tendon : Wall 6~10 Lot 인장 작업

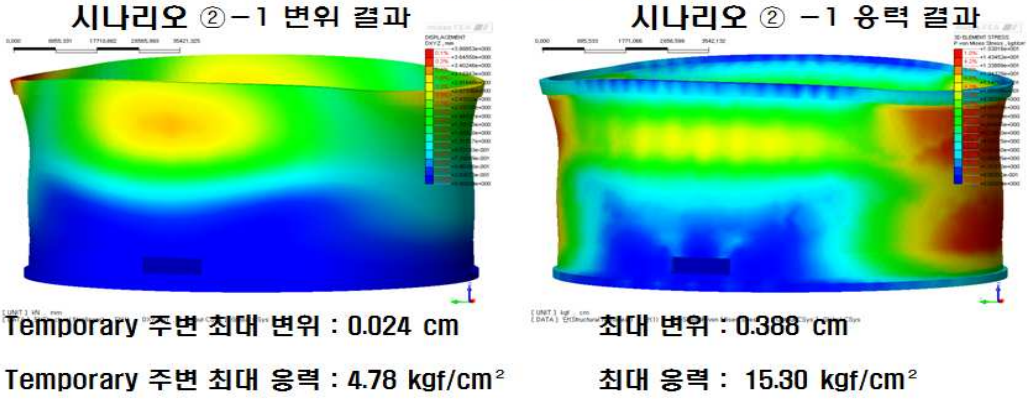



그림 2.19.9 시나리오 ②에 대한 해석결과

○ FEM 해석 결과, Temporary Opening 폐합 이전에 인장작업을 실시할 경우, Temporary Opening 주위에 응력 다소 증가

○ 시나리오 ②가 시나리오 ①보다 응력이 작고 최대 응력 발생위치 또한 Temporary Opening에 떨어진 위치이므로 좀 더 안전하다고 판단

# 20절. 초대형 저장탱크의 설계기준 작성을 위한 최적 설계기법 작성

## 1. Buttress 개수에 따른 주요 인자 분석

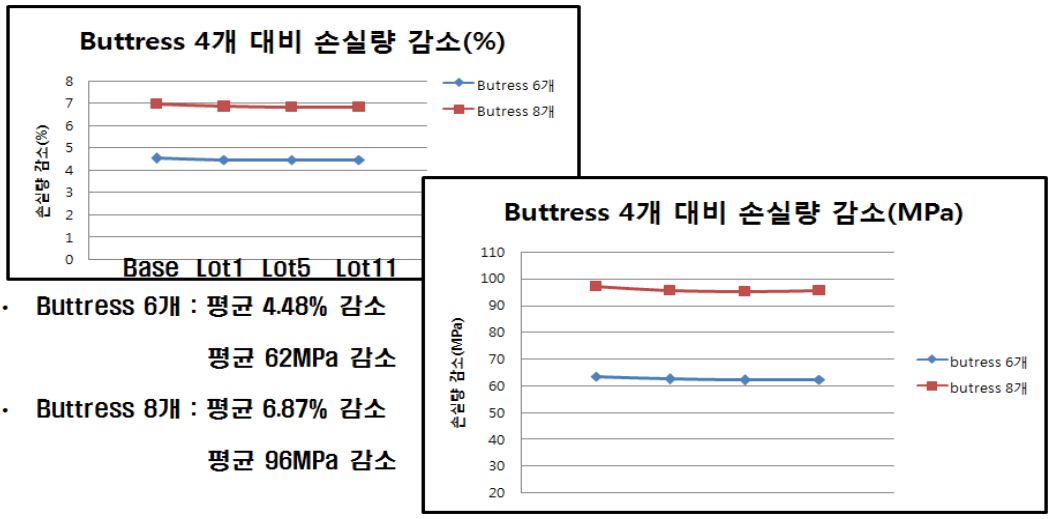



그림 2.20.1 Buttress 개수에 따른 해석결과

○ Buttress 개수에 따라 Buttress 4개와 대비하여 프리스트레스 손실량이 약 4.48%, 6.97% 줄어들었다.

## 2. 화재하중 해석을 통한 단면결정인자 도출

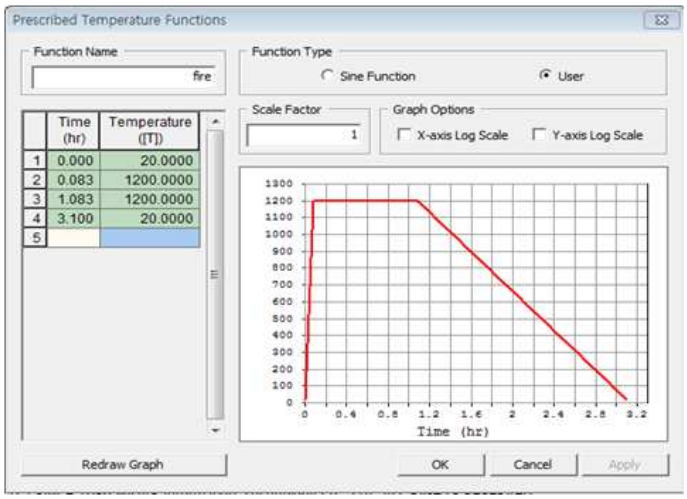



그림 2.20.2 RABT 시나리오

○ 시간에 따른 화재 온도 : 초기 온도 20℃, 5분동안 1200℃, 1시간동안 유지, 2시간동안 20℃까지 냉각 (RABT 시나리오)

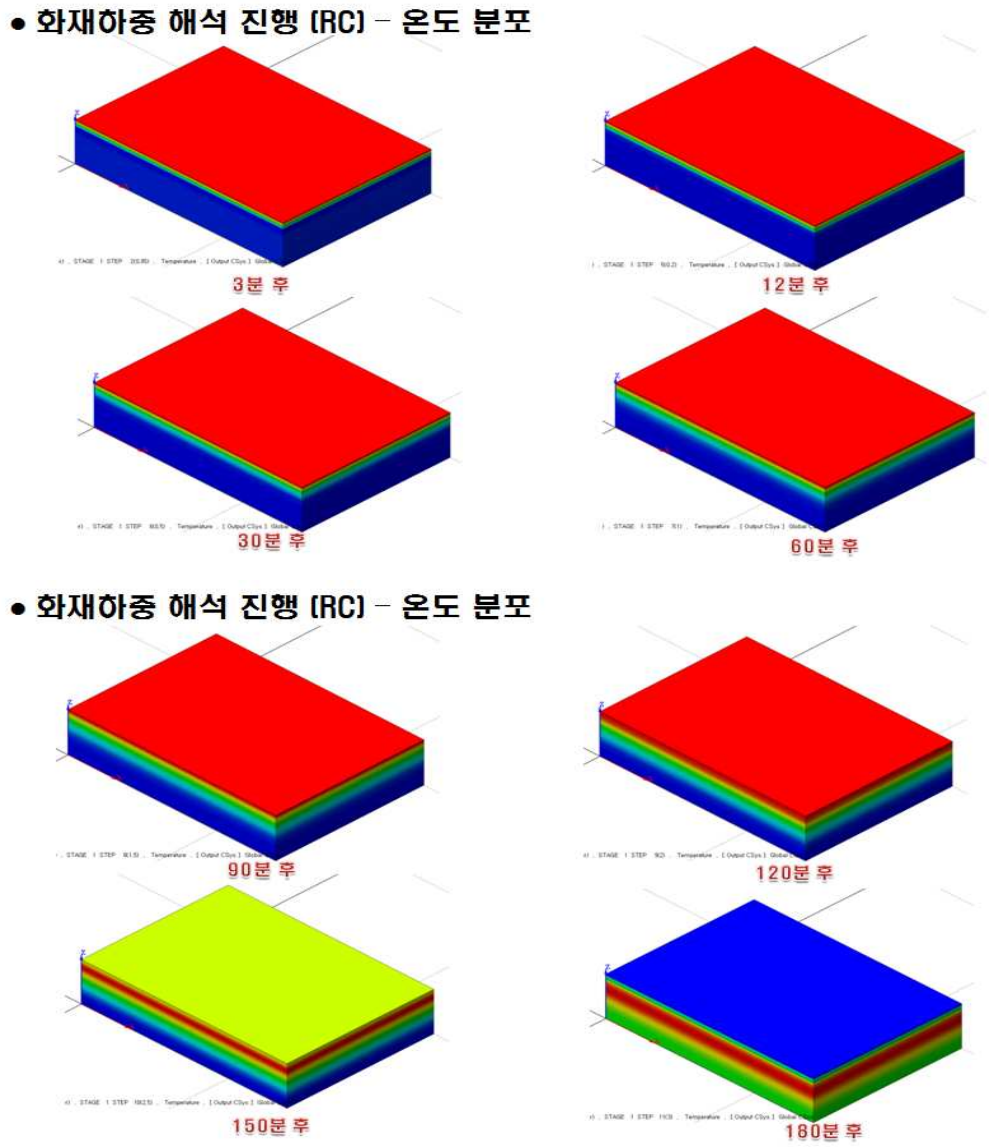



그림 2.20.3 화재해석 결과

○ 콘크리트의 손상깊이는 약 7cm로 실험값 6.2cm와 비교하여 비슷한 결과값을 도출할 수 있었다. 손상깊이에 도달하는 시간도 약90분으로 실험값 85분과 비교하여 비슷한 결과를 나타내고 있다. 철근은 상단부 철근이 콘크리트 폭렬현상으로 노출되었으며 이는 실험과 동일하다. 상단부 철근이 노출되는 시간도 약20분으로 실험값과 유사하다.

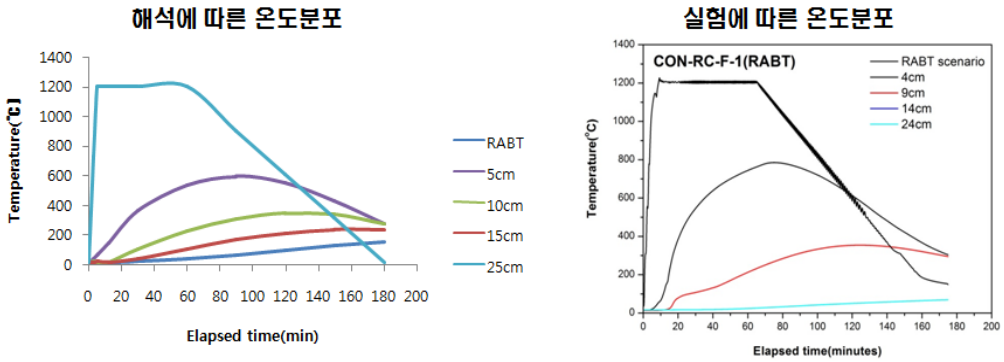



그림 2.20.4 콘크리트 내부의 온도분포

○ 콘크리트 내부의 온도분포를 살펴보면 해석값과 실험값의 온도분포가 비슷한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 5cm 깊이에서 최대온도 650℃(해석), 780℃(실험)으로 차이를 보이는데, 이는 콘크리트 폭렬현상에 따른 직접 화재에 닿는 면적이 변함으로써 차이를 보인다고 판단할 수 있고 그 근거는 폭렬깊이 7cm를 넘어선 10cm에서는 최대온도가 유사함으로 판단할 수 있다.

# 21절. LNG저장탱크 설계프로그램 개발

## 1. 개발 목적

### 가. 필요성

LNG저장탱크 설계 시, 서로 다른 부서(기계, 토목 및 공정)의 상호 협력이 필요하여 통합적으로 설계하기 위한 LNG저장탱크 설계프로그램의 개발이 필요하다. 이는 일부 선진기술을 보유한 국가에서 자체적으로 표준화된 기술 또는 상용 툴을 개발하고 컨설팅 사업을 확대해가고 있는 실정이기 때문에 국내/외적인 사업 추진에 LNG저장탱크 설계프로그램이 매우 효과적이다. 설계 프로그램은 소형 LNG 기지 또는 광양 POSCO LNG 터미널 추가 탱크에 적용할 가능성이 있고, 10년 이후의 시점에는 한국가스공사의 제5기지 건설 또는 기지 확장을 통해 27만 kl급 초대용량 LNG 저장탱크 적용이 가능하다. 또한, 자동화를 통한 기간이 단축되고 설계 변경에 대한 빠른 대응이 가능해져 해외 시장에서의 가격 대비 경쟁력을 갖출 수 있다.

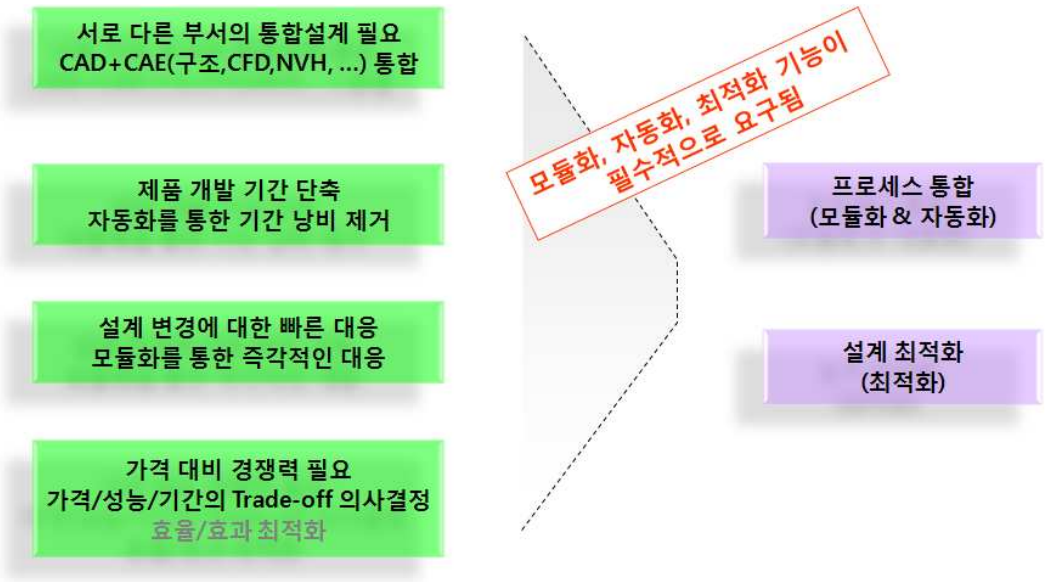



그림 2.21.1 LNG저장탱크 설계프로그램의 필요성

### 나. 목적

3단계에서는 대용량 LNG 저장탱크의 토목/기계 통합설계 프로그램을 개발하고(4차년도), 국제 공인기관의 인증을 획득하고자 한다(5차년도). 외부 프로그램 개발 업체와의 원활한 협조를 위해 기계분야 인터페이스를 구축하여 이를 통해 코너프로텍션, 관통파이프 및 스티프너의 설계 기술이 토목분야의 기술과 잘 접목되도록 한다. 이러한 통합 프로그램을 통해 국제 공인기관의 인증 획득 시 필요한 여러 설계안이나 구조해석 결과에 대해 체계적이고 빠르게 대응해 나아가고자 한다.

- LNG 저장탱크 설계의 프로그래밍
- 해외 LNG 저장탱크 건설 시 수주 활동을 위한 설계 프로그램 개발
- LNG 저장탱크 설계의 최적화, 경제성 확보 및 안전성 향상
- 공사가 보유한 핵심기술력의 영구 보전

그림 2.21.2 **LNG저장탱크 설계프로그램의 목적**

2. LNG저장탱크 설계프로그램 구축

LNG 저장탱크 설계프로그램 구축을 위해 외부 프로그래밍 업체로 브이피코리아(주)를 선정하였고, 2011년 12월 28일에 한국가스공사 연구개발원 LNG기술연구센터 내 컴퓨터 서버실에 프로그램 구축 전용 소프트웨어인 "NEOTIDE"를 설치하고 라이센스 인증서를 받았다.




그림 2.21.3 LNG저장탱크 설계프로그램 구축 소프트웨어 "NEOTIDE"

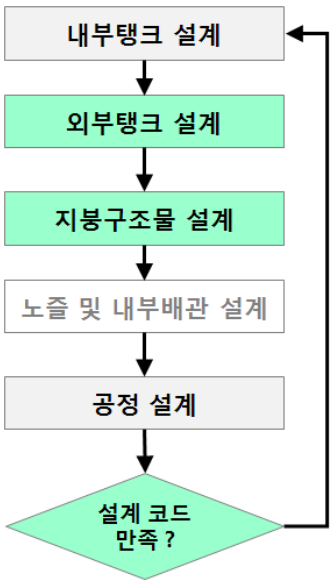
3. LNG저장탱크 설계프로그램 개발 범위

설계프로그램은 기계, 공정 및 토목 설계분야를 반영하며 주요 설계항목은 다음과 같다.

- 저장탱크 타입 : 완전방호식 저장탱크, 9% Ni강 내부탱크
- 기계 : Inner Tank, Insulation, Nozzle & Internal Pipe
- 공정 : P&ID, Heat Leak, Pressure Safety Valve, Heat Break Nozzle, Purge & Cool Down
- 토목 : Outer Tank, Tank Foundation

4. LNG저장탱크 설계프로그램 구성

LNG저장탱크 설계는 그림 4와 같이 내부탱크 설계, 외부탱크 설계, 지붕구조물 설계, 노즐 및 내부배관 설계, 공정설계의 흐름으로 진행되며 최종적으로 설계 코드를 만족하는지의 여부를 판단하게 된다. 따라서 최종적인 LNG저장탱크의 설계안이 나오기 위해서는 위와 같은 설계 흐름이 수차례 반복하게 된다. LNG저장탱크 설계프로그램은 기계, 토목 및 공정분야의 설계 방법을 포함하며 모든 과정이 자동화되어 통합적인 설계가 빠르게 진행되도록 한다. 또한 그림 4의 표에 열거된 여러 종류의 설계 코드를 반영하여 다양한 발주자의 요구를 만족시킬 수 있도록 한다.




| | |
|---|---|
| BS 7777 | Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature services : Part 1,2,3 |
| API 620 | Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks : Appendix Q, L |
| BS8110 | Structural Use of Concrete : Part 1, 2 |
| NFPA 59A | Standard for the Protection, Storage and handling of Liquefied Natural Gas (LNG) |
| API 2000 | Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tanks |
| ASME | American Society of Mechanical Engineering : Boiler and Pressure Vessel Code |

그림 2.21.4 **LNG저장탱크 설계 흐름 및 적용코드**

LNG저장탱크 설계프로그램 구성은 아래 그림과 같이 모듈화, 통합화, 자동화 및 최적화로 이루어진다. 4차년도에는 기계, 공정 및 토목 설계 모듈의 흐름을 정의하였으며 5차년도부터는 각 모듈들을 프로그래밍하여 구축하고 상호관계를 정립하여 통합화 과정을 진행할 계획이다.




그림 2.21.5 LNG저장탱크 설계프로그램의 구성

LNG저장탱크 설계프로그램의 최종 결과물은 아래 표 1과 같이 각 설계 분야별로 자동으로 출력되어, 총 도면 개수 246개, 계산서 44개가 되고 물량내역서도 간단하게 얻을 수 있게 된다.

표 2.21.1 LNG저장탱크 설계프로그램의 결과물

| 설계 분야 | Drawing | Calculation |
|---|---|---|
| 기계 (Mechanical) | 127 + 21(철골) = 148 | 19 + 1(철골) = 20 |
| 공정 (Process) | - | 9 |
| 토목 (Civil) | 98 | 15 |
| 합 계 | 246 | 44 |
| 기 타 (사 업) | 물량내역서(공사발주지원) | |

# 3장 연구목표 달성 및 효과

## 1절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

- 대용량 저장탱크의 설계 및 시공기술 개발로 기술력 제고와 경쟁력을 향상시킬 수 있음
- 기존 LNG 탱크의 설계 및 시공법과 더불어 설계의 정밀도를 극대화함으로써 최적화되고 경제적인 단면을 도출할 수 있는 기반 기술을 확보
- 해외의 사례 또는 기타 구조물들의 사례로부터 공법 개선방안을 도출하여 LNG 탱크의 공기 및 시공비를 절감할 수 있는 근거를 마련
- 해외 시장으로의 진출시 후발주자로서 요구되는 차별화된 기술력 보유라는 면에서 막대한 기술적 파급효과가 있음
- LNG 탱크 시공, 설계, 해석, 신공법관련 기술, 전문인력 양성, 연구 인프라 구축 등의 면에서 전체적인 기술적 향상 효과가 있음
- LNG 저장탱크 수명관리기술 확보를 통한 액화플랜트 해외진출 기반 구축
- Time-based inspection에서 Condition-based inspection으로 검사 체계 변화
  - 선진화된 건전성평가기술 적용을 통한 Time-based inspection 개념 탈피
- LNG 저장탱크 핵심요소별 수명평가기술 확보
  - 강재내부탱크, 단열시스템, PC외부탱크, 주요 기기
- 건전성평가기술의 표준화를 통한 안전성 제고

## 2절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

- 초대용량 LNG 저장탱크 개발을 통한 탱크 건설비 및 운영비를 절감할 수 있음
- 저장탱크 건설부지의 이용효율을 제고하고 저장시설의 용량을 증대시킬 수 있음
- 세계 최대용량 LNG 저장탱크의 개발로 국내기술의 위상을 제고할 수 있음
- 국가 기간설비의 수명연장을 통한 건설비용 절감
- 원활한 수급 지원을 통한 에너지안보 구축
- 에너지 저장 핵심설비의 수명연장을 통한 LNG supply chain의 건전성 확보
- 수명연장을 통한 재건설에 소요되는 비용 절감
- 정기검사 개념에서 탈피한 건전성평가를 통해 경제적인 유지관리 실현

## 3절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

1. 전략적 측면
- 세계 2위의 LNG 수입 위상에 걸맞는 LNG 저장탱크 수명평가 기술 보유
- LNG 플랜트 해외시장 진출을 위한 가격 및 기술경쟁력 토대 마련

2.. 타산업에 미치는 효과

- 국내 플랜트 엔지니어링사의 국제적인 경쟁력 강화
- 원자력 분야와의 협조체계와 상호 기술공유를 통한 성능개선
- 신기술 발굴에 따른 적용 분야 확대

3.. 정부 정책과의 연계 방안

- 본 연구의 경우 LNG 저장탱크 수명평가 기술 및 표준을 정립함으로서, 이에 도출되는 결과를 관련 법령에 반영하여 국내 LNG 저장탱크의 안전성 및 경제적 운전성을 확보하고자 한다.
- 국내 LNG 저장탱크 수명평가기술의 컨설팅 사업화를 통해 국내 기술 및 전문 인력을 양성하고 고용창출 효과를 극대화 할 수 있다.
- 본 연구에서 도출되는 기반기술은 향후 국내 인수기지 및 해외 가스 플랜트 개발에 직접적으로 응용될 수 있다.

# 4절 연구개발 최종 목표 달성도

| 연구목표 | 연구내용 | 연구수행단계 | 추진일정 | 추진성과 | | | 산출 성과물 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 가중치 | 진도율 | 달성도 | |
| LNG 저장탱크의 설계 및 인증 | 1) 25만 m3 이상 저장탱크 설계 | 1)저장탱크최적용량 산정 | 2009.04~2013.04 | 20 | 20 | 100 | GA도면 |
| | | 2) 내부탱크 설계 | 2009.04~2013.04 | 20 | 20 | 100 | 내부탱크설계도면, 계산서, 사양서 |
| | | 3) 외부탱크 설계 | 2009.04~2013.04 | 20 | 20 | 100 | 외부탱크설계도면, 계산서, 사양서 |
| | | 4) 공정/전기/계장/배관 설계 | 2009.04~2013.04 | 20 | 20 | 100 | 설계도면, 계산서, 공사 시방서, 사양서 |
| | | 5)설계도서작성 (도면,사양서등) | 2009.04~2013.04 | 20 | 20 | 100 | 설계도면, 계산서, 사양서 |
| | 2) 저장탱크 내/외부탱크 설계 최적화 | 1) 코너프로텍션, 관통파이프, 스티프너 설계 최적화 기술 개발 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 내부탱크설계도면,내부탱크계산서,사양서 |
| | | 2) 공정 및 안전 최적설계 기술 개발 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 공정 설계도면, 관련 계산서 및 사양서 적용 |
| | | 3)특수하중(온도/지진/폭발/충격/외부화재) 해석 및 설계개선 | 2010.04~2011.04 | 20 | 20 | 100 | 추가연구 보고서 |
| | | 4) 파일 및 기초 설계 개선 | 2010.04~2011.04 | 20 | 20 | 100 | 파일 및 기초 설계 연구보고서 |
| | | 5)RoofRafter구조의 설계최적화 | 2011.04~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 관련설계도면, 계산서, 사양서 |
| | 3) 설계 프로그램 제작 | 1) 내부탱크 설계 자동화 | 2010.04~2015.12 | 25 | 25 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계프로그램 |
| | | 2) 기계설계 해석 자동화 | 2010.04~2015.12 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계프로그램 |
| | | 3) 외부탱크 해석 자동화 | 2010.04~2015.12 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계프로그램 |
| | | 4)외부탱크단면설계 자동화 | 2010.04~2015.12 | 25 | 25 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계프로그램 |
| | | 5)RoofRafter설계 자동화 | 2010.04~2015.12 | 10 | 10 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계프로그램 |
| | 4) 저장탱크 시공 개선 방안 검토 | 1) 임시개구부 위치변경 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG저장탱크 설계 보고서 |
| | | 2) 바닥판 텐던 제거 방안 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG저장탱크 설계 보고서 |
| | | 3)프리스트레싱텐던 개선 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG저장탱크 설계 보고서 |
| | | 4) 코너프로텍션 개선 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG저장탱크 설계 보고서 |
| | | 5) 앵커스트랩 개선 | 2009.10~2012.04 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG저장탱크 설계 보고서 |
| | 5) LNG 저장탱크 설계 인증 | 1)기계설계 기본개념인증 | 2011.11~2014.06 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계 인증서 |
| | | 2)토목설계 기본개념인증 | 2011.11~2014.06 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계 인증서 |
| | | 3) 기본 설계 인증서 수령 | 2011.11~2014.06 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계 인증서 |
| | | 4) 설계 개선 인증 | 2011.11~2014.06 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계 인증서 |
| | | 5) 최종 설계 인증서 수령 | 2011.11~2014.06 | 20 | 20 | 100 | 초대용량 LNG 저장탱크 설계 인증서 |

# 4장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

## 1절 연구성과 향후 활용방안

1. 연구결과의 활용방안

가. 초대용량 LNG 저장탱크의 설계 기술을 독자적으로 개발하면 국내 LNG 인수기지에서도 적용 가능

나. 해외에서 완전히 인정받지 못하고 있는 저장탱크 기술력의 확보로 해외 EPC 공사 수주시 기술력 홍보 효과 및 경쟁력 확보 가능

다. 기존 LNG 저장탱크의 설계 및 시공기술과 합하여 비용 최적화와 신공법 적용으로 인한 공사비 절감 가능

라. 에너지 확보경쟁으로 불안한 국제사회에서 해외 EPC 분야의 기술력 확보와 사업진출은 국가적 수익창출 및 국가 에너지 안보에 중요

2. 정부 정책 활용

가. LNG 저장탱크의 수명평가 기술 및 표준을 정립함으로서, 이에 도출되는 결과를 수명연장 및 검사주기제도 등에 활용

나. 국내 관련 법령 및 코드 제정에 기술 자료로 활용

다. 본 연구에서 도출되는 기반기술은 향후 가스 플랜트 개발에 직접적으로 응용

3. 기업 활용 방안

가. 참여기업의 현황분석

• LNG 저장탱크 설계기업
- 종합엔지니어링사 : 한국가스기술공사
- 토목설계엔지니어링사 : 다산컨설턴트
- 배관설계엔지니어링사 : 삼성엔지니어링 외 다수

• LNG 저장탱크 시공기업
- 종합시공사 : 현대건설 외 다수
- 기계분야전문시공사 : 디에이치아이 등

한국가스안전공사는 가스안전연구원과 가스안전진단인증원에서 국내 LNG 인수기지 설비에 대한 위험성평가 및 정밀안전진단 업무를 국가대행 및 수탁용역으로 수행하고 있다. 본 연구과제의 성과물은 국내 한국가스공사와 포스코의 LNG 인수기지 LNG 저장탱크에 적용 가능하고 국내 검증을 통해 해외 가스플랜트사업 진출 시 LNG 저장탱크의 가격 경쟁력을 높여 플랜트 수주의 중요한 교두보 역할을 할 수 있다.

나. 참여기업별 연계방안 및 추진전략

한국가스기술공사와 다산컨설턴트는 27만 kl급 LNG 저장탱크 설계자료를 바탕으로 국내외 LNG 저장탱크 실시설계를 수행할 수 있다.
디에이치아이는 27만 kl급 LNG 저장탱크 시공기술을 바탕으로 국내외 LNG 저장탱크 시공에 활용할 수 있다.
본 3-4과제에 참여하고 있는 한국가스공사는 초대용량 저장탱크 설계에 따른 경제적 운전과 저장탱크 설계, 시공 및 운전의 경제성 확보를 통한 해외진출 기반 구축에 관심을 가지고 있다.

표 3.1 참여기업별 연계방안

| 번호 | 기업명 | 과제에 대한 기업 관심영역 | 연계방안 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 기업활용 | 장비활용 | 교육연계 | 기술상담 | 정보제공 | 기술지도 | 기술이전 | 공동연구 | 창업지원 |
| 1 | 한국가스기술공사 | 표준설계 | V | V | V | V | V | V | V | V | |
| | | 설계프로그램 | V | V | V | V | V | V | V | V | |
| | | 3D 모델링 | | V | V | V | V | V | V | V | |
| 2 | (주)다산컨설턴트 | 표준설계 | V | V | | V | | | | | |
| | | 설계프로그램 | V | V | | V | | | | | |
| 3 | 디에이치아이 | 설계시방서 | V | V | V | V | | | | | |
| | | 설계도면 | V | V | V | V | | | | | |
| 4 | 한국가스공사 | 수명연장을 통한 경제적 운전<br>저장탱크 경제성 확보를 통한 해외진출 기반 구축 | V | | V | V | | | V | V | |
| 5 | 한국가스안전공사 | 수명평가 제도화 추진<br>수명평가기법 적용을 통한 장기안전성 확보 | V | V | V | | V | V | V | V | |
| 합계 | | | | | | | | | | | |

참고문헌

[1] API 620 “Design and Construction of large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks”, 2008

[2] BS 7777 “Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service”, 1993

[3] BS EN 1473 “Installation and equipment for liquefied natural gas(Design of onshore installations)”, 2007

[4] BS 4741 “Specification for vertical cylindrical, welded steel storage tanks for low temperature services: single wall tanks for temperatures down to -50℃”, 1971

[5] BS 5387 “Specification for vertical cylindrical welded storage tanks for low-temperature service: double-wall tanks for temperatures down to -196℃”, 1976

[5] JGA RPIS(Recommended Practice for LNG Inground Storage; LNG 地下式貯槽指針), 2002

[6] JGA RPAS(Recommended Practice for LNG Above-ground Storage; LNG 地上式貯槽指針), 2002

[7] NFPA 59A “Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas(LNG)”

[8] BS EN 14620-1~5 “Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0℃ and -165℃”, 2006

[9] NFPA 59A “Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas(LNG)”, 2006

[10] API579, "Fitness-For-Service API Recommended Practice First Edition", API, (2000)

[11] 이승림 등, LNG 저장탱크의 잔여수명평가 방안, 한국가스학회 추계학술대회, 2005

[12] 김지윤, 국가 기간 산업설비의 안전관리 및 수명연장 방안, 제 4회 산업설비 안전진단 Workshop, (2002)

[13] 한상인, 공정플랜트 고온튜브 수명연장 및 건전성평가에 관한 연구, 한국가스안전공사, (2002)

[14] 김효정, Korean Regulatory Approach to Ageing Management of NPPs, KINS, 2003

[15] 노명섭 등, PSR에 근거한 원전의 연장운전 제안, 한수원, 2003

[16] 천추영, 원전 연장운전 제도의 조기 정착, 한수원, 2002

[17] 신태명등, 주기적안전성평가 제도와 원전 연장 운전과의 연계성 검토, 원자력산업, 2002

[18] 정일석, 원전 수명관리 연구 및 주기적안전성 검토, 제21회 한일 원자력산업세미나, 2002

[19] 장근선등, 원전 수명 연장에 대한 기술 현안 분석, 제14회 국제 원전 기기건전성 워크숍, 2002

[20] B. Capra & J. Le Drogo, Reinforeced concrete corrosion: application of Bayesian nettworks to the risk management of cooling towers in nuclear plants, OXAND S.A., 2003

[21] Bruno Gerard, etc., Risk management for civil engineering and oil & gas infrastructures: the use of models for performance and risk assessment, OSAND S.A., 2008

[22] Risk-Based Inservice Testing-Development of Guidelines, Vol. 1, ASME, (2000)

[23] 아키오 고바야시등, 도쿄가스(주)의 네기시 및 소데가우라 인수기지 LNG 설비의 진단과 수명연장조치 사례, 2004

[24] 지식경제부-한국가스공사, 가스 에너지전략기술 로드맵, 2008.10

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 플랜트연구사업 가스플랜트사업단의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 플랜트연구사업사업 가스플랜트사업단의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

# 제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "LNG 저장탱크 수명평가 기술 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2015 . 12 .

주관연구기관명 : 한국가스안전공사
주관연구책임자 : 김 영 구
연 구 원 : 김 정 훈
" : 강 승 규
" : 이 승 림
" : 방 효 중
" : 최 경 석
" : 배 승 균
" : 오 정 석
" : 김 필 종
" : 유 근 준
" : 송 일 현
" : 김 상 훈
" : 이 경 민
협동연구기관명 : 한국가스공사
협동연구책임자 : 윤 인 수

# 보 고 서 요 약 서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>08가스<br>플랜트D05</td><td>해 당 단 계<br>연 구 기 간</td><td>2012. 04. 18. ~<br>2015. 12. 17.</td><td>단 계 구 분</td><td>(3단계)/<br>(총 3 단 계 )</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">플랜트연구사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위<br>과 제 명</td><td colspan="4">대용량 LNG 플랜트 설계 및 건설기술 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">3-4-2 LNG 저장탱크 수명평가기술 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>김 영 구</td><td>총연구기간<br>참 여<br>연구원수</td><td>총 : 28명<br>내부 : 21명<br>외부 : 7명</td><td>총연구비</td><td>정부 :<br>500,000천원<br>기업 :<br>500,000 천원<br>계 :<br>1,000,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및<br>소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국가스안전공사<br>가스안전연구원 안전연구실</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약</td><td>보고서면수</td><td>186</td></tr>
<tr><td colspan="6">우리나라 LNG 저장탱크의 설계보증 수명기간(약 25년)이 도래함에 따라 국내 환경에 적합한 건전성평가, 잔여수명평가 기법 및 기준 개발이 필요함. LNG 저장탱크 주요 요소별 피로특성 및 성능열화특성 규명을 하고, LNG 저장탱크의 체계적인 수명관리를 위한 수명평가 및 모니터링기술을 개발함. 내조탱크에 대해서 수명평가 절차를 수립하고 주요 시나리오를 정의하여 수명평가를 수행함. 외조탱크 수명평가 기법에서는 콘크리트 외조의 열화 종류 및 메커니즘에 대해서 분석 및 열화평가방법 조사를 통해 염해 및 탄산화 평가. 내조탱크의 구조해석 및 피로수명평가에 대한 자동화 해석 및 외조탱크 탄산화 및 염해평가를 할 수 있는 LNG저장탱크 수명평가 프로그램을 개발. 외조탱크에서 발생하는 손상에 대해서 손상의 종류와 정도에 따라 안전성 정도를 평가하는 상태평가기준(안)을 개발. 모니터링기법에서는 현수천정 상단 온도 모니터링 개선 방안과 유지관리 모니터링에 이용될 수 있는 각종 비파괴 검사법에 대해서 조사 및 분석을 하고, 관련 외조탱크 압축강도 추정식(안) 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어<br>(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">LNG 저장탱크, 수명평가, 모니터링, 내구성, 열화,</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">LNG Storage Tank, Life Assessment, Monitoring, Durability, Degradation</td></tr>
</table>

# 요 약 문

Ⅰ.연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

- ○ 선진국에서 적절한 건전성평가 및 잔여수명평가 기법을 개발하여 적용함으로서 안전성 기반위에 재건설에 따른 경제적 비용절감 효과를 거두고 있음
- ○ 우리나라의 LNG 저장탱크의 설계보증 수명기간이 도래함에 따라 국내 환경에 적합한 건전성평가 및 잔여수명평가 기법의 개발 및 기준 개발이 필요
- ○ 세계 최고 수준의 LNG 저장탱크 수명평가기술 및 모니터링 핵심기술을 개발하고자 함.
- ○ LNG 저장탱크 주요 요소별 피로특성 및 성능열화특성 규명을 하고, LNG 저장탱크의 체계적인 수명관리를 위한 수명평가 및 모니터링 핵심기술 개발

Ⅱ. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

- ○ 수명평가기술 개발 방향 설정을 위해서 프랑스 GdF LNG 저장탱크 수명평가 기술 현황 및 적용 사례와 프랑스 수명평가 전문사(OXAND S.A.) 컨설팅 프로그램 조사·분석 및 일본 동경가스 LNG 저장탱크 수명평가 기술 현황 및 적용 사례 등을 조사하여 연구방향을 설정
- ○ 강재 내부탱크 수명평가 기술 개발에서는 수명평가 절차를 수립하고 주요 해석 시나리오를 정의하여 구조해석 및 피로해석을 통해 수명평가를 수행
- ○ 외부탱크 수명평가 기법에서는 콘크리트 외조의 열화 종류 및 메커니즘에 대해서 분석 및 내구수명을 위한 열화평가방법 조사를 통해서 LNG 저장탱크 콘크리트 외조의 내구성 평가을 신설 LNG 저장탱크 콘크리트 배합표를 이용하여 염해 및 탄산화 시험을 수행
- ○ 내부탱크 모니터링 기법에서는 LNG 저장탱크 내조 안전계기 모니터링 최적화 방안 검토 및 현수천정 상단 온도 모니터링 개선 방안을 수립
- ○ 외부탱크 모니터링 기법에서는 콘크리트 구조물의 유지관리 모니터링에 이용될 수 있는 각종 비파괴 검사법에 대해서 조사 및 분석
- ○ LNG 저장탱크 외조 콘크리트 탱크의 압축강도 추정식(안) 개발은 외조탱크의 건전도를 모니터링 할 수 있는 내용으로 비파괴검사와 실제 압축강도와의 상관관계식으로 인천기지 파일럿 탱크에 대해서 시험 및 검사를 통해 개발
- ○ LNG저장탱크 보수/보강 기술에 대해서 콘크리트 구조물과 강구조물로 구분하여 보수·보강 공법의 종류와 방법에 대해서 조사 및 분석
- ○ 표준 개발로 LNG 저장탱크 콘크리트 외조의 상태평가기준(안)을 개발하였고, 이 기준은 외조탱크에서 발생하는 손상에 대해서 손상의 종류와 정도에 따라 안전성 정도를 평가하는 기준
- ○ LNG 저장탱크 수명평가 프로그램을 개발하였고, 내조탱크의 구조해석 및 피로수명평가에 대한 자동화 해석 및 외조탱크 탄산화 및 염해평가 수행
- ○ 수명평가 현장 적용 및 보완에서는 인천기지 파일럿 LNG저장탱크에 대한 염해시

험 및 탄산화 시험과 LNG저장탱크 부재 상태평가기준과 관련해서 2014년에 정밀안전진단의 손상 데이터를 이용하여 적용성 검토

Ⅲ. 최종 연구성과 및 적용실적

- ○ 내조탱크의 구조해석 및 피로수명평가에 대한 자동화 해석 및 외조탱크 탄산화 및 염해평가를 할 수 있는 LNG저장탱크 수명평가 프로그램을 개발
- ○ 인천기지에 있는 연구용 파일럿 LNG 저장탱크 벽체 콘크리트에서 코어를 채취하여 염해시험과 탄산화시험을 수행하고 수명평가 프로그램을 이용하여 검토
- ○ 구조물에 대한 다양한 상태평가기준을 분석하여 LNG저장탱크의 설계기준과 특성에 적합하도록 수정 및 보완하여 적용하는 방안으로 기준(안)개발
- ○ LNG저장탱크 부재 상태평가기준 적용성 검토을 위해 인천 TK-207 LNG저장탱크의 벽체의 정밀안전진단 손상데이터를 이용하여 상태등급평가 적용성 검토를 수행
- ○ LNG 저장탱크 압축강도 추정식 관련 기준은 비파괴검사 결과로부터 LNG저장탱크의 압축강도를 예측할 수 있는 기준을 개발
- ○ 인천기지 파일럿 탱크 벽체에 대해서 콘크리트 코어 채취, 압축강도시험 및 비파괴검사를 실시하여 그 결과를 통해서 압축강도 추정식(안)을 개발

Ⅳ. 연구목표 달성 및 효과

- ○ 본 연구의 최종목표는 LNG 저장탱크 소재별 열화메커니즘 규명, LNG 저장탱크 수명관리시스템 개발 및 LNG 저장탱크 수명관리 제도(안) 개발으로 목표달성을 함
- ○ 본 연구과제의 성과물(LNG 저장탱크 수명평가 기술)은 국내 한국가스공사와 포스코의 LNG 인수기지 LNG 저장탱크에 적용 가능
- ○ 본 연구에서 도출되는 기반기술은 향후 국내 인수기지 및 해외 가스 플랜트 개발에 직접적으로 응용될 수 있음
- ○ 기계 및 콘크리트 복합구조물인 LNG 저장탱크의 수명평가 솔루션을 개발하고 유사구조물의 수명평가기술 개발에 파급효과
- ○ 국내 LNG 저장탱크 수명평가기술의 컨설팅 사업화를 통해 국내 기술 및 전문인력을 양성하고 고용창출 효과를 극대화
- ○ 국가 기간설비인 LNG저장탱크 구조물에 대해서 연구개발된 기술에 의한 효율적 유지관리를 통해 수명연장을 통한 건설비용 절감이 가능
- ○ LNG 저장탱크 수명평가 기술 및 표준을 정립함으로서, 이에 도출되는 상태평가기준(안) 및 압축강도 추정식 관련 기준 결과를 관련 코드에 반영되게 되면 국내 LNG 저장탱크의 안전성 및 경제적 운전성을 확보할 수 있는 기반을 마련
- ○ 에너지 저장 핵심설비의 수명연장을 통한 LNG supply chain의 건전성 확보로, 원활한 수급 지원을 통한 에너지안보 구축이 가능

Ⅴ. 연구성과 활용계획

- ○ 액화질소, 액화수소 등 내용물이 다른 초저온 저장탱크시스템의 수명평가에 활용

할 수 있으며 컨설팅 사업으로 확대 가능할 것임

- ○ LNG 저장탱크의 수명평가 기술 및 표준을 정립함으로서, 이에 도출된 상태평가기준(안)과 압축강도 추정식(안) 결과를 수명연장(계속운전) 및 검사주기제도 등에 활용 될 예정
- ○ 기존의 LNG 저장탱크 및 주요 기기의 수명평가에 활용할 수 있으며 신규 LNG 플랜트 개발 시 응용 가능
- ○ LNG 저장탱크의 수명평가를 위한 모니터링 시스템 구축을 위해 활용할 수 있으며 LNG 플랜트의 핵심 설비인 대용량 저장탱크 설계시 응용 가능할 것임
- ○ LNG 저장탱크 수명평가관련 기존의 정밀안전진단 및 안전성평가 코드가 개정 될 것임

# S U M M A R Y

## Ⅰ Introduction

◦ Advanced country developed the evaluation technique of integrity and remaining life to apply LNG storage tank. Therefore, the country have obtaining economic savings effect due to reconstruction based on safety.

◦ As design warranty life of LNG storage tank in Korea has arrived, it needs to develop techniques and standards for integrity evaluation and remaining assessment.

◦ Techniques of life evaluation and monitering for world-leading LNG storage tank are needed to develop.

◦ It should be studied for each major component characteristics of LNG storage tanks, fatigue performance degradation, core technology of life assessment and monitering for systematic life cycle management of the LNG storage tank.

## Ⅱ. Performance contents and Results

◦ For development strategy of life assessment technique, it was surveyed for technique situation of Gdf and OXAND S.A. in France and tokyo gas in Japan etc.

◦ In technique development of life assessment for inner tank, the analysis of structure and fatigue was performed by the establishment of life evaluation procedure and definition of major analysis scenarios

◦ For technique development of life assessment for outer tank, tests of chloride-induced corrosion and carbonation as durability evaluation were performed through analysis of degradation types and mechanism.

◦ Optimized method of safety instrument monitoring and improvement plan of temperature monitoring at top of suspended ceiling were established as a technique of inner tank monitoring.

◦ Various non-destructive tests were surveyed and analyzed to use maintenance management monitoring of concrete structures.

◦ Prediction equation of concrete compression strength as integrity monitoring of outer tank was developed by using non-destructive tests and real core compression strength tests.

◦ Types and methodology of maintenance method were surveyed and analyzed for concrete structures and steel structures

◦ Condition evaluation standard of outer tanks was developed to evaluate a safety level according to types and the seriousness of damages.

◦ LNG storage tank life evaluation program was developed to perform an

automation of structure analysis and fatigue life evaluation for inner tank and assessments of chloride-induced corrosion and carbonation for outer tank.

- ◦ A study on tests of chloride-induced corrosion and carbonation in a pilot tank and condition evaluation standard of outer tanks was performed by using damage data of precision safety diagnosis in 2014.

## Ⅲ. Final Research Results and Application Actual Result

- ◦ LNG storage tank life evaluation program can analyze structure behaviors and fatigue life evaluation automatically for inner tank and chloride-induced corrosion and carbonation for outer tank.
- ◦ By using concrete core from a pilot tank, tests of chloride-induced corrosion and carbonation were performed. Also, it was analyzed through developed life evaluation program.
- ◦ Condition evaluation standard considering design criteria and characteristic of LNG storage tank was developed by analyzing various condition evaluation standards for concrete structures.
- ◦ The application examination of condition evaluation standard was carried out from damage data of precision safety diagnosis.
- ◦ The standard related to a prediction model for concrete compression strength of LNG storage tank was developed from results of non-destructive tests and real core compression strength tests
- ◦ For a pilot LNG storage tank in Incheon, the prediction model of compression strength was obtained by performing concrete core collection, compression strength tests and non-destructive tests.

## Ⅳ. Achievement and Effectiveness of Research Results

- ◦ The final objectives of this study were achieved for deterioration mechanism investigation of each material, the development of LNG storage tank life evaluation system and life management standards
- ◦ The final results of this study can be applied to LNG storage tanks of korea gas corporation and POSCO company etc.
- ◦ The base technology obtained from this study can be directly used to domestic storage tanks and the gas plant of foreign country.
- ◦ Life evaluation solution of LNG storage tank as mixed building structure of machine and concrete was developed and had a ripple effect on the life assesment technology of similar structures.
- ◦ Through consulting commercialization of LNG storage tank life evaluation, domestic technology and professional manpower will be cultivated and help to

create employment.

- ○ For structures of LNG storage tank as national facilities, construction cost savings are possible by means of effective maintenance from life extension.
- ○ By establishing technology and standards, it can be secured for safety and economic operation of LNG storage tank.
- ○ Through life extension of energy storage core facilities, it is possible to build energy security by integrity of LNG supply chain and smooth supply.

## Ⅴ. Research Achievement Utilization and Needs of Further Study

- ○ Results of this study will be utilized to evaluate a life of different cryogenic storage tank system and expand consulting commercialization.
- ○ Standards of condition evaluation and concrete compression strength prediction will be used in precision safety diagnosis of LNG storage tank.
- ○ Research results will be utilized to Existing LNG storage tank and major equipments and applied to a new LNG plant development.
- ○ To construct a monitoring system of life evaluation for LNG storage tank, the study results can be utilized and applied to a design of large storage tank as core facilities of LNG plant.
- ○ Standards of precision safety diagnosis related to LNG storage tank life evaluation will be amended.

# C O N T E N T S


**Ⅰ Introduction ····· 13**
Chap.1 Objectives and Needs ····· 13
Chap.2 Definition, Range and Characteristic of Research ····· 13
Chap.3 Present Condition of Domestic and Foreign Technology ····· 14

**Ⅱ Performance contents and Results ····· 18**
Chap.1 Strategy and Methodology of Research Achievement Result ····· 18
Chap.2 Technology Survey and Development Strategy of Life Evaluation ····· 21
1. Development Direction of Life Evaluation Technology ····· 21
2. Analysis of Deterioration Element for LNG Storage Tank ····· 26
Chap.3 Technology Development of Life Evaluation and Monitering ····· 27
1. Life Evaluation Technique for Inner Tank ····· 27
2. Life Evaluation Technique for Outer Tank ····· 90
3. Monitering Technique for Inner Tank ····· 112
4. Monitering Technique for Outer Tank ····· 114
5. LNG Prediction Equation of Compression Strength for Outer Tank ····· 116
Chap.4 Maintenance Technique of LNG Storage Tank ····· 124
1. Maintenance Method of Concrete Structure ····· 124
2. Maintenance Method of Steel Structure ····· 130
Chap.5 Development of Standard and Software Program ····· 133
1. Condition Evaluation Criteria for Outer Tank of LNG Storage Tank ····· 133
2. Life Evaluation Program for LNG Storage Tank ····· 139
Chap.6 Field Application and Supplementation for Life Evaluation ····· 156
1. Test of Chloride-induced Corrosion and Carbonation for Pilot Tank ····· 156
2. Application Review of Condition Evaluation Criteria ····· 159

**Ⅲ Final Research Results and Application Actual Result ····· 162**
Chap.1 LNG Storage Tank Life Evaluation Program ····· 162
Chap.2 Condition Evaluation Criteria of Outer Tank ····· 162
Chap.3 Standard related to Prediction Equation of Compression Strength for Outer Tank ····· 162

Ⅳ Achievement and Effectiveness of Research Results ····· 164
Chap.1 Achievement of Final Objectives ····· 164
Chap.2 Technical Effectiveness Analysis of Research Results ····· 164
Chap.3 Economic Effectiveness Analysis of Research Results ····· 164
Chap.4 Policy Effectiveness Analysis of Research Results ····· 165

Ⅴ Research Achievement Utilization and Needs of Further Study ····· 166
Chap.1 Future Utilization Plan for Research Achievement ····· 166
Chap.2 Needs of Further Study ····· 166

Reference ····· 167

[ Appendix ] ····· 170
1. Quantitative Performance of Research Papers and Patent etc. ····· 170
2. Criteria and Method of Condition Evaluation for Each Member of Outer Tank ····· 174

# 목 차

**1장 연구개발과제 개요 ····· 13**
1절 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 13
2절 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 13
3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 14

**제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 18**
1절 연구수행 전략 및 방법론 ····· 18
2절 수명평가 기술 조사 및 방향 설정 ····· 21
1. 수명평가기술 개발 방향 ····· 21
2. LNG저장탱크 열화요소 분석 ····· 26
3절 수명평가 및 모니터링 기술 개발 ····· 27
1. 강재 내부탱크 수명평가 기술 개발 ····· 27
2. 외부탱크 수명평가 기법 ····· 90
3. 내부탱크 모니터링 기법 ····· 112
4. 외부탱크 모니터링 기법 ····· 114
5. LNG 저장탱크 외조 콘크리트 탱크의 압축강도 추정식(안) 개발 ····· 116
4절 LNG저장탱크 보수/보강 기술 ····· 124
1. 콘크리트구조물 보수·보강공법 ····· 124
2. 강구조물 보수·보강공법 ····· 130
5절 표준 개발 및 소프트웨어 개발 ····· 133
1. LNG 저장탱크 콘크리트 외조의 상태평가기준(안) 개발 ····· 133
2. LNG 저장탱크 수명평가 프로그램 ····· 139
6절 수명평가 현장 적용 및 보완 ····· 156
1. 인천기지 파일럿 LNG저장탱크에 대한 염해시험 및 탄산화 시험 ····· 156
2. LNG저장탱크 부재 상태평가기준 적용성 검토 ····· 159

**제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 162**
1절 LNG저장탱크 수명평가 프로그램 ····· 162
2절 LNG저장탱크 상태평가 기준 ····· 162
3절 LNG저장탱크 압축강도 추정식 관련 기준 ····· 162

**제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 164**
1절 연구개발 최종목표 달성도 ····· 164

2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 164
3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석 ····· 164
4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 165

**제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 166**
1절 연구성과 향후 활용방안 ····· 166
2절 추가연구 필요성 ····· 166

**참고문헌 ····· 167**

**[ 부 록 ] ····· 170**
1. 논문, 특허 등 정량적 성과 ····· 170
2. LNG저장탱크 부재별 상태평가기준 및 방법 ····· 174

# 1장 연구개발과제 개요

## 1절 연구개발의 목적 및 필요성

LNG 저장탱크는 인수기지 건설비용의 45~65%를 차지하는 핵심설비이다. 우리나라는 1986년부터 LNG를 공급하기 시작하여 현재 약 28년의 역사를 가지고 있다. LNG기술 관련 선진외국의 LNG 저장탱크는 일부 국가의 경우 LNG 사용 초기인 1960년대에 건설되어 현재까지 운전되는 저장탱크도 보고되고 있다. 이는 적절한 건전성평가 및 잔여수명평가 기법을 개발하여 적용함으로서 안전성 기반위에 재건설에 따른 경제적 비용절감 효과를 거두어 국가기간설비의 효용증대를 꾀하고 있기 때문이다.

국내적으로는 1980년대 후반 설치된 우리나라의 LNG 저장탱크의 설계보증 수명기간이 도래함에 따라 국내 환경에 적합한 건전성평가 및 잔여수명평가 기법의 개발 및 기준 개발이 필요하고, 가스플랜트의 해외진출 시 수명관리시스템 개념의 설계 및 시공이 이루어진 LNG 저장탱크를 통해 전체 프로젝트의 가격 경쟁력 제고가 필요한 시점이다.

이 연구에서 “세계 최고 수준의 LNG 저장탱크 수명평가기술 및 모니터링 핵심기술”을 개발하고자 한다. 현재까지의 국내의 경우 1986년 가스공급을 시작한 평택생산기지의 경우 설계 보증 기한 30~50년이 도래하고 있으나 LNG 저장탱크 설계 및 소재 국산화 개발은 일부 이루어지고 있으나 탱크의 건전성 평가를 위한 모니터링기법 및 데이터 확보, 잔여수명평가를 위한 요소별 열화메커니즘 연구, 수명평가기법 및 규격 개발과 관련해서는 기술개발 노력이 전무한 실정이다.

반면 외국의 경우 선진국(프랑스, 일본 등)에서는 30년 이상 운전된 LNG 저장탱크에 대해서 개방 후 내부탱크(9% Ni강, 멤브레인), 외부탱크(PS 콘크리트), 단열재에 대한 기능성 분석(functional analysis), 위험성평가(Risk Analysis), 진단 및 예후 평가, 잔여수명평가 등에 대한 체계적인 시스템을 구축하고 공학적으로 잔여수명을 평가하고 탱크를 연장 사용하고 있다. 또한 최근에는 설계단계부터 수명관리시스템 개념을 도입하여 탱크의 수명을 연장하고 수명주기비용을 최적화하는 노력들이 이루어지고 있다. 따라서 세계 2위의 LNG 저장탱크 보유국 위상에 걸맞는 탱크 수명관리 기술 즉, 수명평가 및 모니터링 기술을 개발하고 국내 적용을 통해 해외 플랜트 시장진출의 발판을 마련하고자 한다.

## 2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

LNG 저장탱크 주요 요소별 피로특성 및 성능열화특성 규명을 하고, LNG 저장탱크의 체계적인 수명관리를 위한 수명평가 및 모니터링 핵심기술 개발이다.

<표. 1> LNG 저장탱크 수명평가 핵심요소기술 및 개요

| 핵심 요소 기술 | 핵심 요소 기술 개요 |
|---|---|
| ○ LNG 저장탱크 소재별 열화메커니즘 규명 | - LNG 저장탱크 재료 및 재질 열화 데이터베이스 구축<br>- 석유화학 플랜트 및 원자력 플랜트 개발 기술 벤치마킹 |
| ○ LNG 저장탱크 수명관리시스템 개발 | - LNG 저장탱크 수명평가기법 및 프로그램 개발<br>- LNG 저장탱크 모니터링기법 개발 |
| ○ LNG 저장탱크 수명관리 제도(안) 개발 | - 정기검사, 정밀안전진단, 위험성평가와 연계한 통합적 수명관리 제도 개발<br>- 수명관리제도 법령 정비 및 코드 제정(안) 개발 |

## 3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

한국은 세계 2위의 LNG 수입국으로 세계에서 두 번째로 많은 LNG 저장탱크(44기 운전중)를 보유하고 있고, 최초 운전에 들어간 평택생산기지의 LNG 저장탱크는 1986년에 운전을 시작해서 현재 설계보증수명기간(약 30 ~ 50년)이 도래하고 있다. 국내 LNG 저장탱크의 일부 소재에 대한 재료열화에 관한 연구는 가스공사를 중심으로 1996년 이후 내부탱크 강재에 대해 이루어졌으나 LNG 저장탱크의 수명관리 및 평가에 관한 연구는 전무한 것이 현실이다. 또, 최근에는 인천생산기지의 일부 저장탱크는 설계수명이 이르지 않았는데 가스가 누출되는 문제점을 발생시켜 설비 건전성평가 및 수명관리에 대한 관심이 급증하고 있다.

LNG 저장탱크 누출사고와 LNG에 대한 국제적인 수요 급증으로 핵심설비인 LNG 탱크의 수명관리를 위한 기술 확보 방안을 한국가스공사와 한국가스안전공사 등에서 모색해서 지식경제-한국가스공사의 “가스에너지 전략기술 로드맵(2008.10)”에도 포함된 바 있다.

원자력분야에서는1991년 7월 고리 1발전소에서 원자력 연구소와의 공동으로 “원전 이용률 및 안전성 향상을 위한 종합예방정비 관리체계 구축을 위한 연구”에서 최적 정비기법 사례조사를 통해 신뢰도중심정비 기술 도입의 필요성을 제기하였고, 1993년부터 2001년까지 약 7년 동안 “원전수명관리연구”를 통해 원전의 모니터링과 수명평가기법을 개발하여 원자력 플랜트에 적용해오고 있다.

규제 분야에서는 원자력안전기술원을 중심으로 정기검사, 주기적안전성평가(PSR) 및 계속운전평가 제도 등 종합적인 안전 및 수명관리를 위한 규제 대책을 수립하여 적용 중에 있다.

<표. 2> 세부기술별 국내 주요업체 현황

| 세부기술 | 업체명 | 보유 기술 또는 특허 | 최고기술 보유기관 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 탱크 설계 | 한국가스공사<br>(한국가스기술공사) | - 9% Ni강식 저장탱크 설계 국산화 완료<br>(세계 5번째, 국내 총 14기 적용 건설)<br>- 멤브레인식 저장탱크 설계 국산화 완료<br>(세계 3번째, 국내 상용화 건설실적 없음)<br>- 세부설계는 한국가스기술공사에서 수행하고 있음.<br>- 시공사로서 대우건설에서도 자체적으로 9% Ni강식 저장탱크에 대한 설계기술을 확보하고 있음. | 100% | 설계 |
| 탱크<br>안전성평가 | 한국가스안전공사<br>한국가스공사<br>서울산업대 등 | - 구조해석(FEM)의 경우 설계과정에서 적용되고 있으며 한국가스공사 및 대우건설이 가장 최적화된 기술을 확보하고 있음.<br>- 위험성평가(Risk Assessment)에 있어서는 국내 몇몇 대학의 화학공학과(안전공학과) 및 위험성평가 컨설팅사에서 기술을 확보하고 있음.<br>- 기지건설시 정성적 위험성평가(HAZOP) 및 정량적 위험성평가(QRA)에 대해서는 한국가스안전공사 및 한국가스공사가 수행능력과 많은 실적을 가지고 있음. | 80% | 안전성평가 |
| 단열재 | 한국가스공사<br>화인텍<br>한국화이바 | - 한국가스공사의 소재개발 연구를 통해 PUF 단열재 등을 국산화하였고, 국내 기업에서 자체기술 또는 한국가스공사로부터 기술을 이전받아 생산하고 있음. | 100% | 단열재 |
| 강판 | POSCO | - 9% Ni강판(후판) 및 STS강판(박판)의 경우 현재 POSCO에서 개발한 강판을 사용하고 있음. | 80% | 강판<br>(9%Ni, STS) |
| 건설(시공) | 대우건설<br>대림건설<br>삼성건설<br>LG건설<br>대아건설 등 | - LNG 시공실적은 대우건설과 대림산업이 수주수량에 있어 가장 많음.<br>- 대우건설의 경우 멤브레인식과 9%Ni강식에 대한 시공 실적과 기술을 보유하고 있음. | 100% | 건설(시공) |
| 운전 | 한국가스공사<br>(3개 기지, 44 탱크)<br>POSCO<br>(1개 기지, 2 탱크) | - 한국가스공사에서는 1980년대 후반부터 LNG 인수기지를 운전해오고 있어 풍부한 유지관리 기술을 확보하고 있고, POSCO 등 대형소비자 및 발전사 등에 기술을 이전하고 있음. | 100% | 운전(운영) |
| 검사(감리) | 한국가스안전공사<br>한국가스기술공사 | - 특정설비로서 한국가스안전공사에서 설계기술 검토, 전 시공공정에 대한 주요 시험 및 검사를 수행하고 있음.<br>- 최근 설계기술을 확보한 한국가스기술공업에서 설계에 대한 제3자 시공감리를 수행하고 있음 | 90% | 검사(감리) |
| 원전<br>수명관리 | 한국전력연구원<br>한국전력기술<br>한국원자력연구원<br>한국원자력안전기술원 | - 원전 및 기기 관련 재료 열화 연구를 수행하였고 수명평가기법(프로그램)을 개발하여 적용하고 있음.<br>- 정기검사, 주기적안전성평가, 계속운전심사 등의 통합수명관리프로그램을 개발하여 제도에 반영하고 운영 중에 있음. | 100% | 원전<br>수명관리<br>(수명평가/모니터링) |

국내 LNG 저장탱크가 대용량화에 중점을 맞춘 것에 비해 국외 설계사는 특수 LNG 저장설비에 대해 주로 기술개발을 추진하고 있는 추세로서, LNG 선박을 응용한 해상 LNG 저장설비, 이중 콘크리트 저장설비, 지하암반 LNG 저장설비 등의 연구가 진행되고 있거나 상용화되어 있다.

LNG 저장탱크의 특수성에 의해 활발하게 LNG 저장탱크를 건설 중인 미국과 일본 등은 자국의 설계사가 대부분의 사업을 수행하고 있는 추세이므로 주요 설계사가 없는 국가인 중동, 호주, 동남아, 남미, 러시아, 스페인 등의 시장이 전략적 목표 대상이 될 수 있을 것이다. 이들 지역의 LNG 저장탱크는 LNG터미널에 약 2기 내외의 LNG 저장탱크를 건설하는 것이 일반적인 사례로서 연간 발주량을 약 2~3기 정도로 판단할 수 있다.

프랑스의 GdF는 Oxand SA의 원자력 수명평가기술을 기반으로 하는 시스템으로 1970년대

초에 건설된 저장탱크를 대상으로 수명평가를 통해 수명연장을 실시한 바 있다. 또한, Oxand SA에서는 LNG 탱크에 대한 수명진단 컨설팅을 수행 중에 있다. 일본도 동경가스의 노후 탱크에 대해서 정부기관과 협력하여 수명평가를 실시하고 지속사용 가능여부를 진단한 사례가 보고되고 있다. 미국의 경우도 탱크설계 전문회사인 CB&I 연구소 등을 중심으로 탱크의 수명평가 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

LNG 저장탱크에 대한 설계 기술은 시공 기술과 함께 병행하여 발전하고 있다. 동시에 여러 기를 같이 시공하는 국내의 경우와는 달리 해외 플랜트는 대부분 1기 또는 2기를 건설하는 경우가 대부분으로 이에 따른 시공 과정 또한 차이를 보이고 있다. 또한 계절적인 요인 등에 의해 외부탱크 벽체를 한번에 시공하는 Slip Form 공법을 국내에 적용이 어려운 반면 최근 해외 플랜트에서는 대부분 적용하고 있는 실정이다. 또한 국가별로 안전성 기준이 다소 차이를 보이고 법규가 다르기 때문에 기술 적용 방법이 다른 부분이 있는 것이 현실이다.

기계분야 설계에 대해서는 대부분 대동소이하나 세부적인 기술 적용 차이가 전체 경제성에 미치는 영향을 무시할 수 없는 요소에 대해서는 개별적으로 최적화 기술을 보유하고 있다.

LNG 저장탱크에 대한 국제 특허는 이미 오래전에 시효가 만료되었거나 이미 국제기준에 반영되어 있는 상태이다.

<표. 3> 선진국 LNG저장탱크 수명평가기술 및 수준

| 세부기술 | 업체명(국적) | 보유 기술 또는 특허 | 기술 수준 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| - 유지관리(수명평가)<br>- 모니터링 | GdF SVEZ (France) | - 1970년대 및 1980년대 운전 개시한 4기의 저장탱크에 대한 수명평가 및 모니터링 경험 보유 | 100% | |
| - 수명평가 컨설팅<br>- 모니터링 컨설팅<br>- 소프트웨어 개발·운영 | OXAND SA (France) | - 1978년과 1980년대 초에 운전 개시된 포스머기지와 몽뚜아 기지의 LNG 탱크 4기에 대한 수명평가 및 모니터링 시스템 컨설팅 실적 보유<br>- 상용툴로 SIMEO-ERM/SIMEO-MAINTENANCE /SEMOCONSULTING/ SEMO-RISK 개발<br>- 원전 토목구조물 수명평가 및 모니터링시스템 컨설팅이 전문 분야 | 100% | |
| - 인수기지 유지보수<br>- 수명평가 | 동경가스 | - 1969년 및 1973년에 운전 개시한 네기시 및 소데가우라 인수기지에 대한 설비노화 규명 및 수명 연장 실적 있음(LNG 14 발표) | 100% | |

<표. 4> 선진국 기술 대비 국내의 과제수행 전·후의 기술수준

| 세부산업 또는 기술내용 | 현재 기술수준 | | | 과제 완료시 국내 기술수준 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 기술 수준 (%) | 기술 격차 (년) | 비고 | 기술 수준 (%) | 기술 격차 (년) | 비고 |
| LNG 저장탱크 수명평가기술 | 60 | 5 | | 100 | 0 | |
| LNG 저장탱크 수명관리 제도 | 30 | 5 | | 90 | 2 | |
| LNG 저장탱크 재질열화 메커니즘 | 50 | 5 | | 100 | 0 | |

# 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

## 1절 연구수행 전략 및 방법론

세부주관기관인 한국가스공사가 총괄기관이고, 한국가스안전공사가 공동기관으로 LNG 저장탱크 수명평가기술 개발 연구를 수행하였다. 한국가스안전공사가 연구수행을 하는데 한국가스공사에서는 수명평가기술 연구에 필요한 설계 관련 데이터, 운전자료, 현장시험 등에 대해 협조하고, 연구 협의체로부터 열화 메커니즘, 수명평가기법 및 모니터링 기법 등을 자문을 통해 검토 및 분석을 통하여 연구를 수행하였다. 과제 추진체계는 <표 5>와 같고 연구 단계별 연구개발 내용 및 세부추진 계획 및 방법은 <표 6> ~ <표 8>과 같다.

<표. 5> 과제 추진체계

| 세부주관기관 | 공 동 기 관 |
|---|---|
| **한국가스공사** | **한국가스안전공사** |
| ·세부과제(3-4과제) 총괄<br>·차세대 탱크 설계기술 개발(3-4-1과제)<br>·LNG 저장탱크 설계, 운전 자료 등 제공 | ·세세부과제(3-4-2과제) 총괄<br>·LNG 저장탱크 수명평가기술 개발 |

| 연구 협의체 |
|---|
| **수명평가 전문기관** |
| ·탱크 요소별 열화 메커니즘 자문<br>·LNG 저장탱크 수명평가기법 자문<br>·LNG 저장탱크 모니터링기법 자문 |

(가) 진도 및 성과관리방안

- 과제 진도 회의를 공동기관과 주기적(분기)으로 개최·점검
- 공동, 위탁 기관이 종합적으로 분기별 진도 점검회의 개최
- 각 성과 지표에 따른 성과 계획 및 실적을 상호 발표/점검

(나) 자체평가방안

- 각 분야별(공정, 기계, 토목, 계장, 배관) 상호 의견 교환을 총한 수명평가 방안 도출
- 해외 사례와 비교한 기술경쟁력 제고
- 국내 관련 산업계 전문가 자문단의 의견수렴을 통한 현장적용성 제고

<표. 6> 1단계 연구개발 내용 및 세부추진 계획 및 방법

| 연번 | 연구개발내용 | 세부추진 계획 및 방법 | 수행기간 |
|---|---|---|---|
| 1 | ■ LNG 저장탱크 핵심소재별 재료 및 재질 열화메커니즘 자료 조사·분석 | - 해외사례 조사 및 분석<br>- 타산업 사례조사 및 호환성 분석<br>- 원자력발전소 등 수명평가 구축 사례 조사 | 09.4-7 |
| 2 | ■ 국내·외 원자력발전 및 석유화학분야 수명평가기술 현황 조사·분석 | - 국내·외 관련 규격 조사·분석<br>- 해외 상용 툴 조사·분석 | 09.8-11 |
| 3 | ■ LNG 저장탱크 수명평가기술 개발 방향 설정 | - 수명평가(수명연장) 경제성 분석<br>- LNG 저장탱크 모니터링 방향 설정<br>- 수명관리 기본요소 설정<br>- 경년열화관리 및 수명관리 방안 개발 | 09.12-10.4 |

<표. 7> 2단계 연구개발 내용 및 세부추진 계획 및 방법

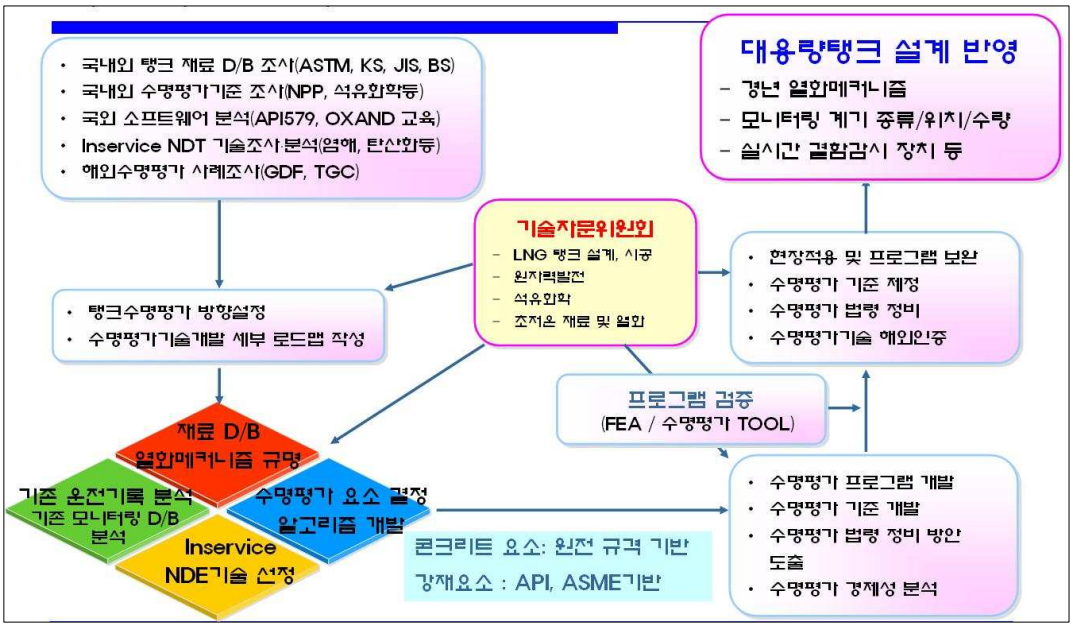
| 연번 | 연구개발내용 | 세부추진 계획 및 방법 | 수행기간 |
|---|---|---|---|
| 1 | ■ LNG 저장탱크 내부강재탱크 시스템의 피로특성 및 열화메커니즘 규명 | - 국·내외 내부탱크 피로설계법 분석<br>- 초저온 재료(STS 304L, 9% Ni강 등)의 열화특성 규명<br>- 멤브레인 형상별 열화메커니즘 비교·분석<br>- 용접부 결함평가 및 수명평가기법 개발<br>- 구조 강도 열화특성 규명 | 10.4-7 |
| 2 | ■ LNG 저장탱크 단열시스템 성능열화특성 규명 | - 단열성능 열화특성 규명 | 10.4-7 |
| 3 | ■ 내부탱크 시스템 모니터링 기법 개발 | - 내부탱크 압력 및 온도 모니터링 기법 개발<br>- 내부탱크 및 IBS(Inter Barrier Space) 모니터링기법 개발 | 10.8-12 |
| 4 | ■ 내부탱크 수명평가 기법 개발 | - 요소별 소명평가 산식 및 FN곡선 도출<br>- 요소별 평가기법 조합방안 도출<br>- 모니터링에 따른 보수 방안 개발 | 10.11-11.4 |
| 5 | ■ LNG 저장탱크 PC 외부탱크의 잔존내력 및 성능열화 규명 | - PC외부탱크 성능열화 요소 도출<br>- 요소별 성능열화 메커니즘 규명<br>(콘크리트, 철근, 텐던 등) | 11.4-7 |
| 6 | ■ PC 외부탱크 모니터링 기법 개발 | - 외부탱크 요소별 모니터링 기법 개발<br>(침하, 염해, 부식, Cabonation, 프리스트레싱 손실 등) | 11.8-11 |
| 7 | ■ PC 외부탱크 수명평가 기법 개발 | - 요소별 상세수명평가기법 개발<br>- 요소별 평가기법 조합방안 도출<br>- 모니터링에 따른 보수 방안 개발 | 11.12-12.4 |

<표. 8> 3단계 연구개발 내용 및 세부추진 계획 및 방법

| 연번 | 연구개발내용 | 세부추진 계획 및 방법 | 수행기간 |
|---|---|---|---|
| 1 | ■ LNG 저장탱크 수명평가 기법 표준화 개발 | - LNG 저장탱크 요소별 수명평가 표준 개발<br>- 수명평가를 통한 수명연장기법 표준화<br>- 수명평가에 따른 유지관리기준 표준화 | 12.4-11 |
| 2 | ■ LNG 저장탱크 모니터링 기법 표준화 개발 | - LNG 저장탱크 모니터링기준 표준화<br>- DB 관리 표준 개발<br>- 모니터링 계기 유지관리기준 표준화 | 12.4-11 |
| 3 | ■ LNG 저장탱크 수명평가 규격 및 프로그램 개발 | - 수명평가 규격(안) 개발<br>- 프로그램 구조 설계(입력, body 및 출력 설계)<br>- 기존 제도(위험성평가, 정밀안전진단)와의 연계 방안 도출<br>- 수명평가에 따른 경제성 분석방법 개발 | 12.8-13.4 |
| 4 | ■ LNG 저장탱크 수명평가 현장 적용 및 보완 | - 현장 모니터링 데이터 분석<br>- 수명평가 시범 적용<br>- 수명평가를 위한 모니터링 보완 대책 수립 | 13.4-13.11 |
| 5 | ■ LNG 저장탱크 수명평가 기준(안) 개발 및 제도 반영(안) 개발 | - LNG 저장탱크 관련 법령 개정<br>- 수명평가기준 KGS 코드 제정 | 13.4-15.12 |
| 6 | ■ LNG 저장탱크 수명평가 프로그램 최적화 개발 | - 현장적용 결과 반영·보완<br>- 수명평가 기준(안) 반영·보완 | 13.4-15.12 |

한국가스공사는 수명연장을 통한 경제적 운전과 저장탱크 설계, 시공 및 운전의 경제성 확보를 통한 해외진출 기반 구축에 핵심관심사항이고, 한국가스안전공사는 수명관리기법의 도입을 통해 LNG 저장탱크의 장기적인 안전성 확보와 수명평가 기술확보가 주요 관심 영역이다. 60여기의 LNG 탱크를 운전 중인 한국가스공사와 검사 및 진단을 수행하고 있는 한국가스안전공사가 보유기술을 공유하고, 타 산업과 연계하여 현장 적용성이 매우 높고 국제적 수준의 수명평가기법을 개발하고자 하였다.

<그림 1>은 LNG 저장탱크 수명평가 기술개발 수행방법에 대한 내용이다. 수명관리 시스템이 구축되어 적용중인 원전과 석유화학산업의 수명평가 시스템에 대한 조사·분석을 하였다. 분야별 전문가를 동 연구의 전문가그룹에 포함시켜 연구방향 수립 및 기술검증에 이르기까지 긴밀한 협조체계를 통해 국제 수준에 대응하고 현장적용성이 높은 기술 및 제도를 개발하고자 하였다.




<그림. 1> LNG 저장탱크 수명평가 기술개발 수행 방법

## 2절 수명평가 기술 조사 및 방향 설정

### 1. 수명평가기술 개발 방향

가. 프랑스 GdF LNG 저장탱크 수명평가 기술 현황 및 적용 사례

(1) 프랑스 GdF LNG 저장탱크(4기) 수명평가 사례조사

최근 Svez와 기업합병을 통해 세계 4위의 에너지기업이 된 GdF는 몽뚜아기지의 120,000 kℓ용량 멤브레인 탱크 2기와 동일용량의 9% Ni강식 탱크 1기 및 FOS/MER기지의 80,000 kℓ 용량 9% Ni강식 탱크 1기를 포함한 총 4기의 LNG 저장탱크에 대해서 운전정지 후 내부 개방검사를 통해 수명평가 및 수명연장을 실시하였다. 다음 표에는 GdF사의 수명평가 대상 탱크 현황을 나타내었다.

<표. 9> GdF SVEZ사의 수명평가 대상 탱크

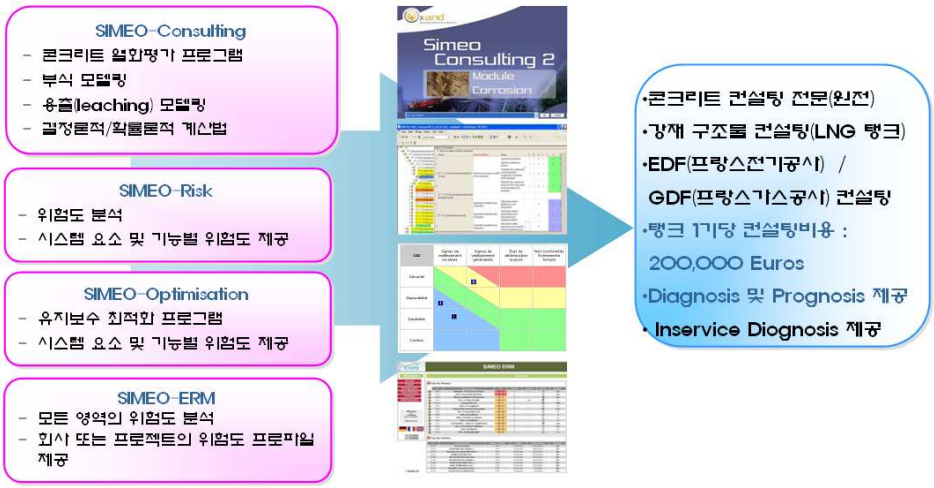
| 기지명 | 지상식 탱크 | | 탱크형태/Builder | 운전개시 (년) |
|---|---|---|---|---|
| | No. | 용량(㎥) | | |
| FOS/MER | 1 | 80,000 | 9%Ni/PC-CMP | 1978 |
| MONTOIR DE BRETAGNE | 2 | 120,000 | Membrane/PC-TechniGaz/CMP | 1980/81 |
| | 1 | 120,000 | 9%Ni/PC-CMP | 1983 |

당초 2003년에 몽뚜아 기지의 2개의 멤브레인 탱크의 1차 펌프에 소음이 발생하여 문제가 있음을 감지하고 개방검사를 결정하였으며, 콘크리트에 대한 건전성 확인은 2006년에 착수하였다. 강재 내부탱크 분야는 자체 기술인력을 통해 점검을 실시하였고, 콘크리트 외부탱크와

관련해서는 Oxand SA라는 전문컨설팅사의 컨설팅을 통해서 수명진단을 실시하였다. 내부 멤브레인의 건전성은 육안검사를 통해서 멤브레인의 형상치수 및 상태를 검사해서 이상이 없었고, 단열재의 경우 그 동안 운전이력을 통해 내부 단열공간(IBS : Internal Insulation Space)에서는 아무런 누출이 없었다고 한다. GdF는 내부탱크의 사다리 등 일부를 수리하고 4기의 탱크를 계속 운전 중에 있다.

(2) 프랑스 수명평가 전문사(OXAND S.A.) 컨설팅 프로그램 조사·분석

Oxand SA는 프랑스 EdF사(프랑스 전력공사)가 출자한 회사로 원자력발전소 수명진단 컨설팅 전문회사이다. Oxand사는 최초 원자력발전소의 콘크리트 구조물에 대한 수명평가 전문기업으로 시작해서 최근에는 LNG산업에까지 사업영역을 확대하고 있다. Oxand사는 컨설팅을 위한 자체 수명평가 툴을 개발, 보유하고 있으며 다양한 수명관리분야의 컨설팅을 제공하고 있다. 다음 <그림 2>는 Oxand사의 컨설팅 툴과 제공 서비스에 대해 개략적으로 나타내고 있다.




<그림. 2> 프랑스 Oxand사의 수명관리 프로그램 현황

나. 일본 동경가스 LNG 저장탱크 수명평가 기술 현황 및 적용 사례

도쿄가스는 총 29기의 지하식 저장탱크를 운영하고 있는데, 그중 가장 오래 된 것은 약 30년 전에 건설되었다. 높은 수준의 신뢰성과 낮은 수준의 비용으로 LNG 저장탱크를 계속 운전하기 위해서는 오랜 기간 동안 탱크의 노후화 정도를 산정하고 필요한 대책을 준비하면서 계속 사용하고 있다. 지붕이나 멤브레인과 같은 지하식 저장탱크의 주요 구조적 요소들의 노후화는 현재까지 표면화되지 않았으나 피로나 기타 원인들로 인한 손상은 운전과 안전에 큰 영향을 줄 수 있는데, 이들 요소들을 재래식 기술로서 점검하고 진단하기 위해서는 그 저장탱크를 비우고 공기로 치환한 후 정기보수(overhaul)할 필요가 있다. 이것은 막대한 비용과 장기간의 저장탱크의 운전 정지를 수반하고 운영에 큰 손실을 줄 수 있어서 도쿄가스는 저장탱크의 사용정지 없이 점검하고 진단하는 기술을 개발해서 실제 저장탱크들에 이를 적용하고

있다.

도쿄가스는 190년대와 1970년대에 운전을 시작한 네기시기지와 소데가우라기지의 지상식 LNG 저장탱크 및 지하식 LNG 저장탱크에 대해 노후화 현상을 규정하고 이에 대한 검사, 진단 및 수명평가를 실시하였다.

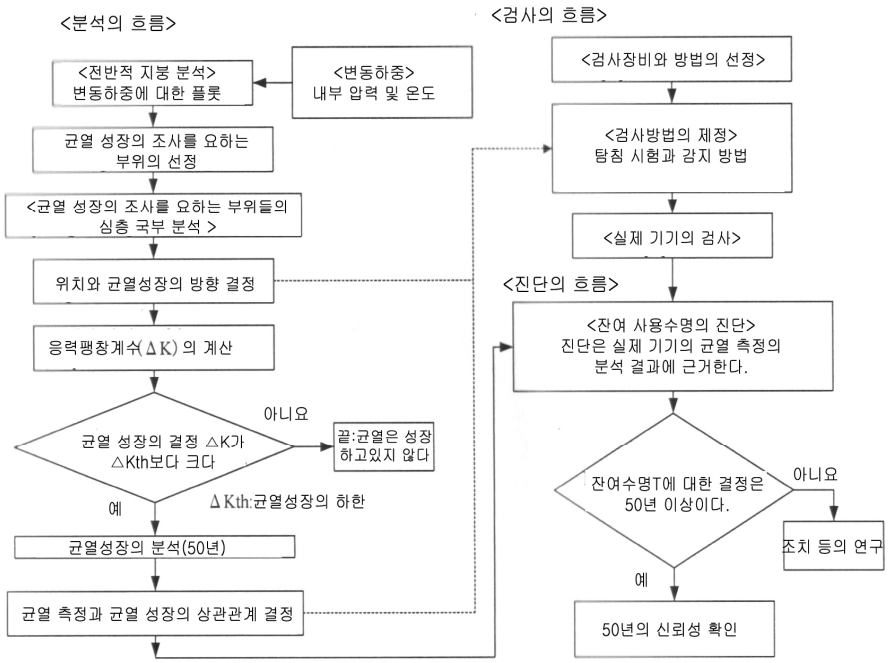
<표. 10> 일본 도쿄가스의 LNG 저장탱크 수명평가 사례

| 구 분 | 노후화 현상 | 조치 및 처리 |
|---|---|---|
| 지상식 LNG 저장탱크 | 각 부분의 부식 | 검사, 진단, 수리 |
| | 파일의 부식 | 검사, 진단: 문제없음 |
| | 통기 저장탱크의 다이어프램 노후화 | 검사, 진단, 교체 |
| 지하식 LNG 저장탱크 | 지붕의 피로 | 검사, 진단: 문제없음 |
| | 멤브레인의 피로 | 검사, 진단: 문제없음 |
| | 각 부분의 부식 | 검사, 진단, 수리 |

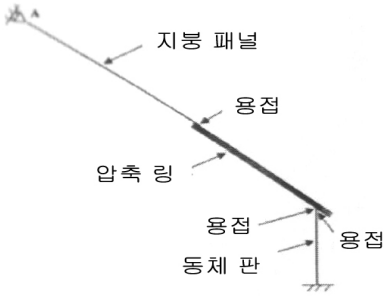
(1) 지붕 진단 기술

저장탱크의 강재지붕 안쪽의 필릿 용접부의 노후화의 정도를 평가하기 어려워서 도쿄가스는 그러한 부분들의 노후화의 진단을 위해서 분석과 검사의 기술적 수단을 확립하였고 실제 저장탱크들에 이를 적용하였다.

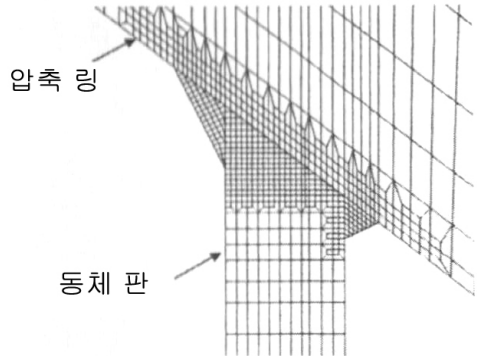
지붕 노후화의 진단은 (1) 피로 균열 성장의 분석 결과에 근거한 진단 필요 부분의 선정, (2) 실제 저장탱크의 점검, (3) 평가(잔여 사용수명의 진단) 순으로 실시되었다. 아래 그림들은 지붕 진단절차, 지붕 해석을 위한 전체 모델 및 심층해석 샘플을 나타낸다.




<그림. 3> 지붕 진단 절차

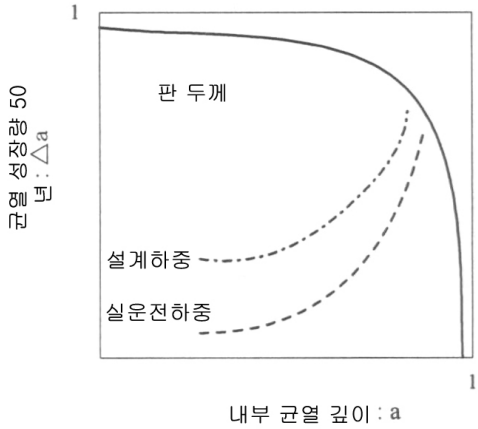



<그림. 4> 전체 지붕 분석 모델




<그림. 5> 외곽 지붕 둘레에 대한
심층 분석 샘플

다음 그림은 한 실제 사례의 분석 결과를 나타내는데 이것은 하중 조건의 각 경우에 대한 플롯과 함께 지붕 둘레의 용접선 상의 균열의 성장을 나타낸다.




<그림. 6> 균열 성장 곡선(분석 결과)

위의 분석을 통해서 특정 부위에 대한 균열 측정 검사를 초음파탐상시험을 실시하였다. 지붕의 둘레에 있는 준결함(quasi-flaw)이 있는 시험편 하나를 준비해서 이 시험을 실시하였다. 이 시험 결과에 근거하여 부위의 각 유형에 대해서 검출프로브(detection probe)와 감지방법의 최적의 조합을 선택했고 실제 기기에 검사를 실시하였다. 잔여 사용수명은 실제 기기에서 검출한 균열의 측정치와 그 분석에 근거로 하여 문제가 된다고 판단되는 측정치로부터 평가하였다. 그 평가는 탱크가 현재와 같은 방법으로 향후 50년 동안 계속 운전하더라도 피로로 인한 지붕 손상의 가능성은 없다고 밝혔다.

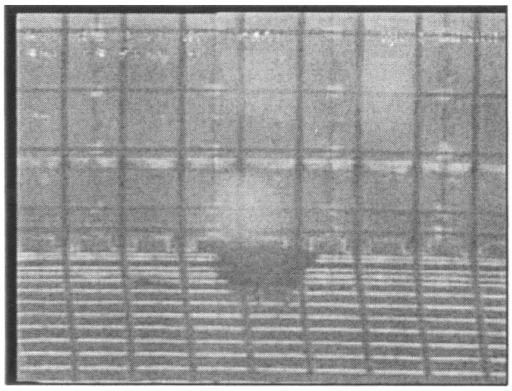
(2) 내부탱크 잠액식 관측장치(submersible observation unit) 개발과 적용

도쿄가스는 분해검사를 하지 않고 저장탱크 내의 멤브레인을 점검할 목적으로 LNG 속에 잠영할 수 있는 내부 관측 장비를 개발하였다. 동 장비를 활용해 노화된 저장탱크의 내부를 점점한 결과 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

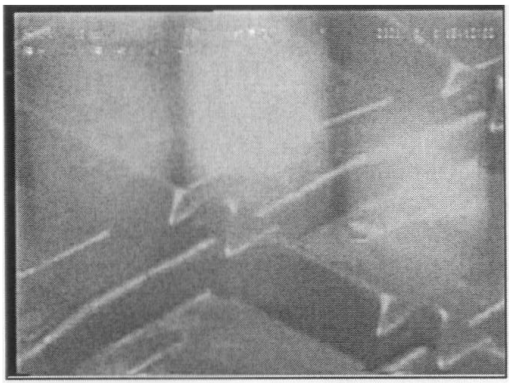
도쿄가스가 개발한 잠액식 관측장비의 특징은 다음과 같다.

- ○ 초저온 LNG 액 내에서도 사용 가능
- ○ 6 인치 노즐을 통하여 저장탱크 내에 삽입할 수 있는 소형
- ○ 소수 인력으로 검사 가능한 소형 및 경량
- ○ 약 1 주 이내의 내부탱크 점검 능력

결과적으로 새로 개발한 장치들을 이용해 멤브레인에 비정상적인 변형이나 기타 유사한 문제들이 없음을 확인할 수 있었다. 다음 그림은 멤브레인을 점검 시의 사진을 보여주고 있다.



<그림. 7> 저장탱크 내부 멤브레인



<그림. 8> 바닥 멤브레인의 팽창

## 2. LNG저장탱크 열화요소 분석

LNG 저장탱크의 수명평가를 위한 열화요소는 해외사례와 문헌자료 등을 통해 <표 11>과 같이 정리하였다.

<표. 11> LNG 저장탱크 수명평가 요소 및 주요 내용

| 구 분 | 수명평가 요소 | 주요 내용 |
|---|---|---|
| 내부 강재 탱크 | 내부탱크(용접부) 저온 열피로 | - 9% Ni강 내조 |
| | 지붕 용접부등 피로 | - 이종용접부, 지붕 필릿용접부 |
| | 펌프 컬럼 피로 | - 펌프 컬럼 지지구조물/용접부 |
| 외부 콘크리트 탱크 | 예응력 손실 | - 프리스트레스 손실 |
| | 콘크리트 내구성 | - 콘크리트강도<br>- 콘크리트 외면(균열 등)<br>- 염소이온농도 및 염해 확산 계수 (염화물 함유량 시험 등)<br>- 철근 부식<br>- 콘크리트 크리프 및 수축<br>- 탄산화(carbonation) |
| | 파일 부식 | 파일 부식 |
| | 텐던(tendon) 부식 | 텐던 부식 |
| 단열재 | 내력단열재 단열성능 및 강도 열화 | PUF, 셀룰라글래스 등 |
| | 비내력단열재 단열성능 열화 | 펄라이트, 글래스울 등 |

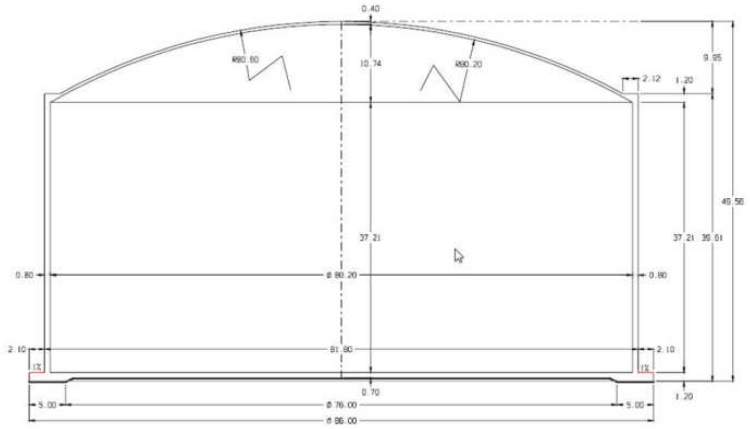
# 3절 수명평가 및 모니터링 기술 개발

## 1. 강재 내부탱크 수명평가 기술 개발

최종 연구의 목표는 LNG 저장탱크의 수명평가 및 모니터링 기술을 개발하여 현장에서 동 기술이 적용될 수 있도록 하는 것이다. 현재 단계에서는 이미 건설되어 운전 중인 16만5천㎘ 탱크에 대한 모델링, 구조해석 및 피로해석 등을 통해서 LNG 저장탱크 내부탱크에 대한 수명평가 및 모니터링 기법을 확립하고 향후 27만㎘ 탱크에 확대 적용하고자 한다.

(1) 수명평가 절차

9% Ni강 LNG 저장탱크에 대한 시뮬레이션을 통해서 일정한 하중조건하에 저장탱크에 작용하는 stress를 구한 후 그 결과 값을 이용하여 피로수명을 예측하고 이러한 절차를 표준화하고자 하였다.

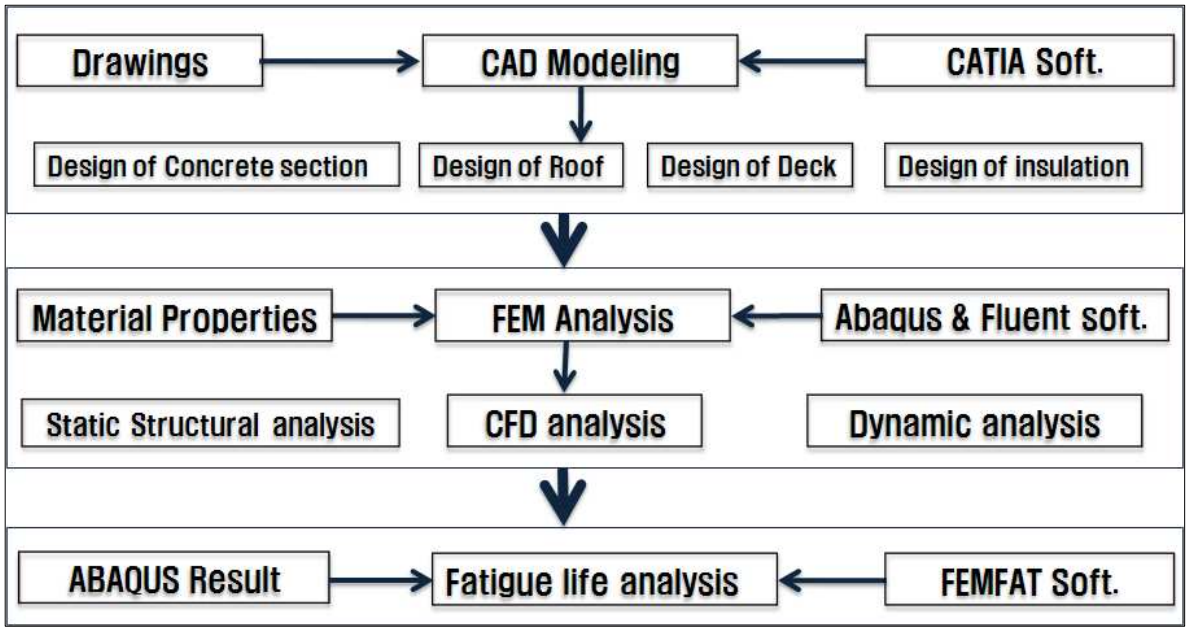



<그림. 9> LNG 저장탱크 개략도(16만5천㎘)

<표. 12> 수명평가 대상 LNG 저장탱크 일반 사양

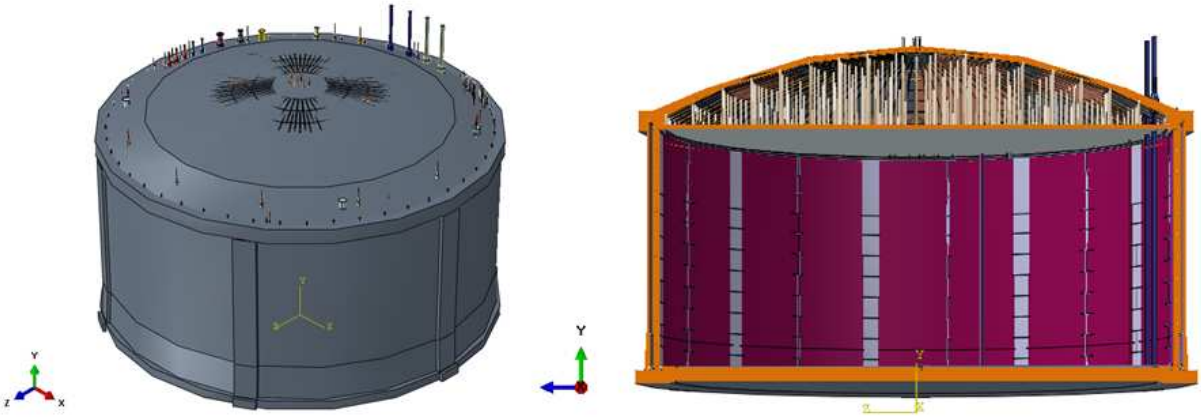
| | |
|---|---|
| 탱크 분류 | 지상식(Above-ground), 완전방호식(Full Containment), 9% Ni 강 (내부탱크) (9% Nickel Plate Inner Tank) 탱크 |
| 탱크 용량 | 165,000$m^3$ |
| 내부탱크 | 9% 니켈강 (9% Ni Steel Plate) |
| 외부탱크 | 프리스트레스트 콘크리트 (PS Concrete) |
| 내부탱크 지름(m) | 80.2 |
| 내부탱크 높이(m) | 36.5 |
| 외부탱크 지름(m) | 82.6 |

다음 그림은 LNG저장탱크에 대한 피로수명예측에 사용된 프로그램과 절차를 간략하게 나타내었다.

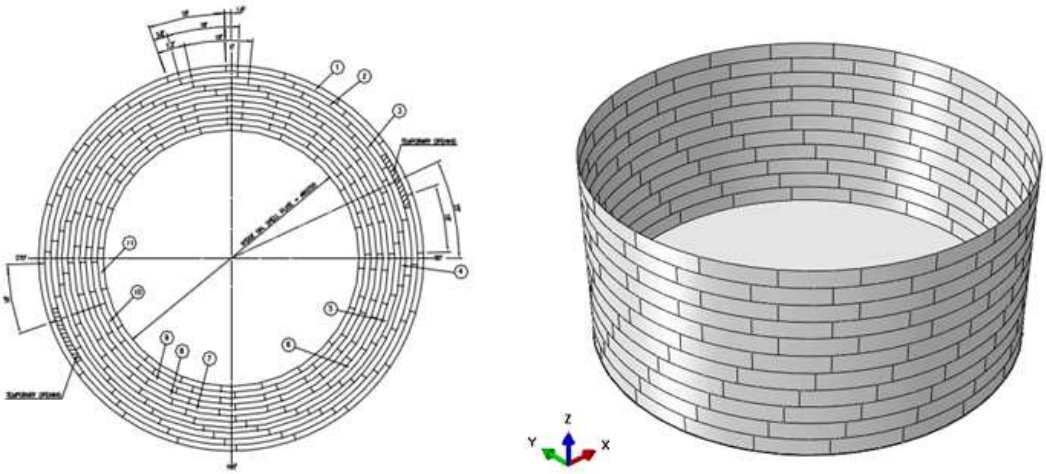



<그림. 10> LNG 저장탱크 피로수명 예측에 사용된 프로그램 및 해석절차 개략도

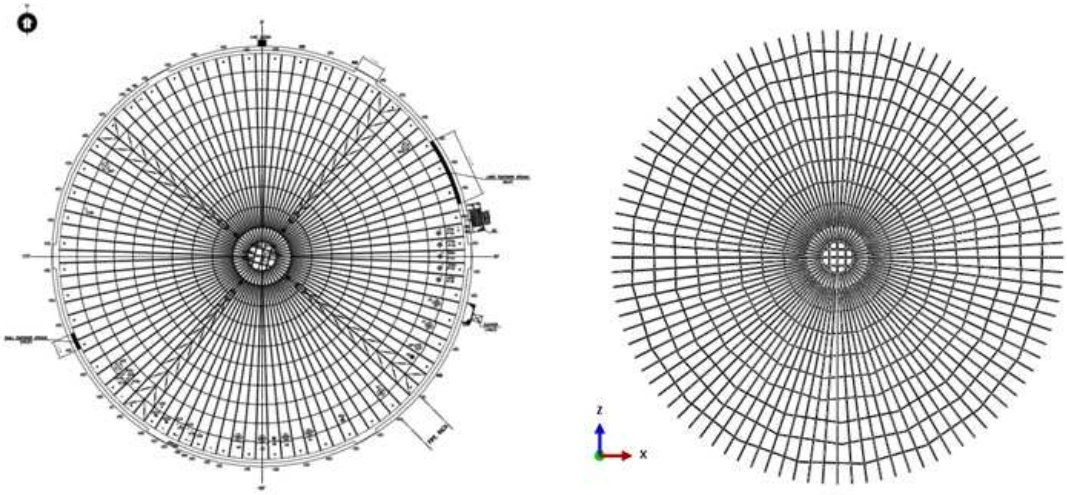
(가) LNG 저장탱크 모델



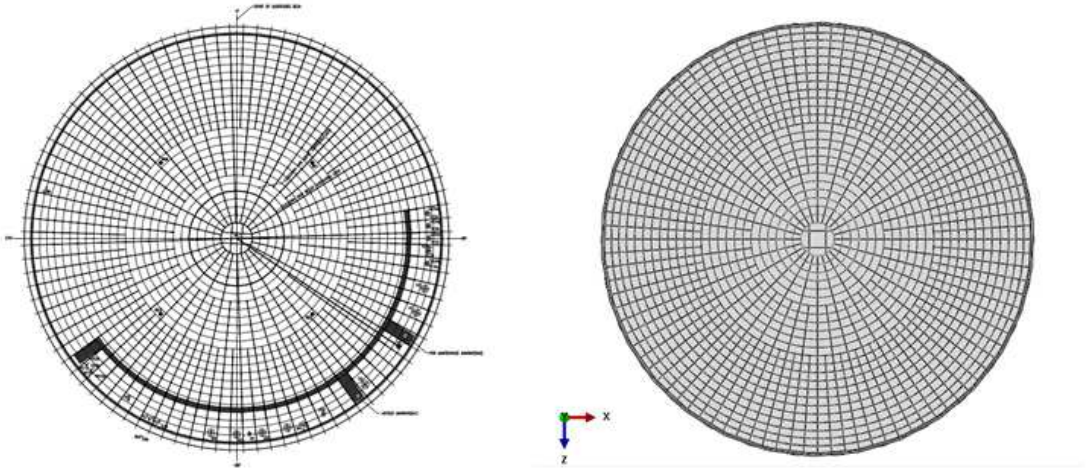
<그림. 11> LNG 저장탱크 해석 모델



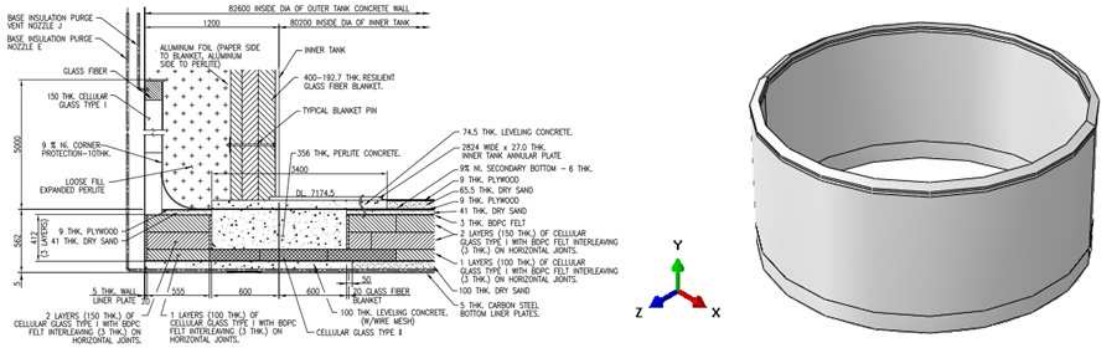
<그림. 12> 9%-Ni강 내부탱크



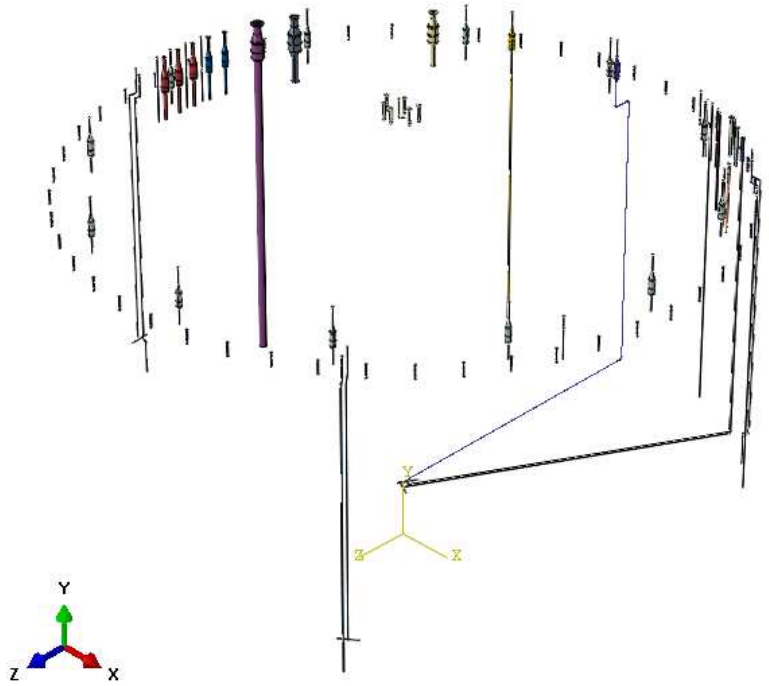
<그림. 13> 지붕 지지구조물



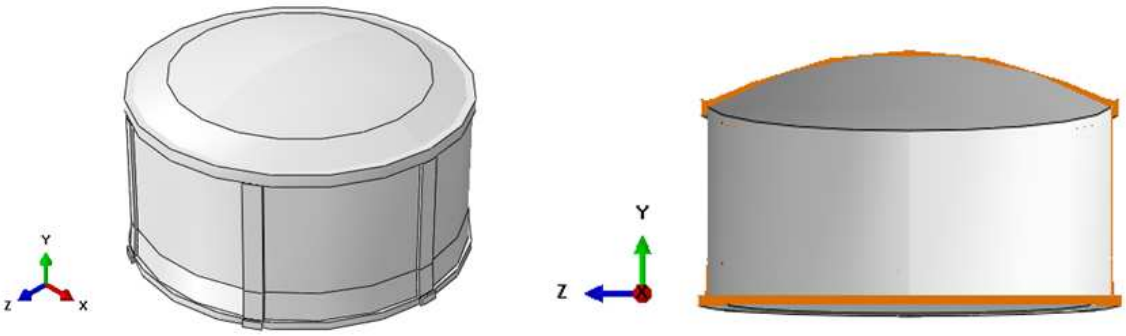
<그림. 14> 현수천정




<그림. 15> 단열재




<그림. 16> LNG저장탱크 지붕관통 노즐부




<그림. 17> 외부탱크

(나) LNG 저장탱크 각 부분 대한 물성치

<표. 13> LNG 저장탱크 구성요소별 물성값

| Matiriral | item | Density (x1000 kg/m$^3$) | Poisson's Ratio | Elastic Modulus (GPa) | Thermal Conductivity (W/m.K) | CTE (1x10$^{-5}$/°C) | Specific Heat (J/kg.K) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| metal | Roof Frame | 7.93 | 0.29 | 193 | 14.6(30)~9(-170) | 1.42 | 475(30)~308(-170) |
| | Hanger Rob, Pipe, Nozzle, Vapour Barrier Bottom | 7.85 | 0.3 | 208 | 51.88(30)~50.17(-172) | 1.2 | 475.47(30)~464.22(-172) |
| | Shell Plates,Bottom Annular Plates | 8 | 0.3 | 210 | 29.77(30)~18.26(-170) | 0.921 | 468.58(30)~239.72(-170) |
| | Suspended Deck Plates | 2.7 | 0.3 | 68.6 | 117 | 2.4 | 902.66(30)~490.79(-170) |
| concrete | Bottom | 2.5 | 0.2 | 31.75 | 2 | 1 | 858.38(30)~339.58(-170) |
| | Annular, Wall, Roof | 2.5 | 0.2 | 38.89 | 2 | 1 | 858.38(30)~339.58(-170) |
| Insulation | Cellular Glass | 0.12 | | | 0.051(24)~0.035(-80) | | 753.62 |
| | Dry Sand | 1.8 | | | 0.65 | | 824.09(30)~291.83(-170) |
| | Resilent Blanket | 0.016 | | | 0.0407 | | 816.58(30)~292.189(-170) |
| | Loose Fill Expanded Perlite | 0.064 | | | 0.043(30)~0.033(-170) | | 846.11(30)~257.8(-170) |
| | PUF | 0.055 | | | 0.0233 | | 2600 |
| | Leveling Concrete | 2.3 | | | 2 | | 858.38(30)~339.58(-170) |
| | Perlite Concrete | 0.8 | | | 2.326 | | 858.38(30)~339.58(-171) |

(다) 해석 시나리오

내부탱크 수명평가와 관련하여 3가지 시나리오를 정의하고 구조해석 및 피로해석을 수행하였다. 시나리오 3은 지붕 plate 온도장해석에 대한 내용이다.

<표. 14> LNG 저장 탱크 내부탱크 해석 시나리오의 구성

| 구분 | 적용하중 | 비고 |
|---|---|---|
| 시나리오 1<br>(9% Ni강 내부탱크 구조 및 피로해석) | - 자중<br>- 단열재 압력<br>- LNG 최고/최저 액위에서의 정수압. | |
| 시나리오 2<br>(펌프 Column과 지지구조물의 구조해석 및 피로해석) | - 자중<br>- LNG 최고/최적 액위 조건에서의 정수압 | |
| 시나리오 3<br>(지붕 plate 온도장 해석) | - CFD 유동해석을 통한 온도장 + 설하중 +풍하중+자중<br>- LNG 저온증발가스에 의한 지붕상부 온도장 해석(모니터링 위치 선정) | |
| 시나리오 4<br>(코너프로텍션 구조해석 및 피로해석) | - LNG 자중<br>- 정수압<br>- LNG 압력<br>- Perlite 단열재 압력 | |

(2) LNG 저장탱크 해석 시나리오별 구조 및 피로해석

(가) 시나리오 1 : 9% Ni강 내부탱크 구조 및 피로해석

LNG 저장탱크 해석 시나리오 1의 상세 내용은 <표 33>와 같이 경계조건, 모델링 요소, 하중조건 및 방법론에 대한 설명이다.

<표. 15> 시나리오 1의 상세 내용

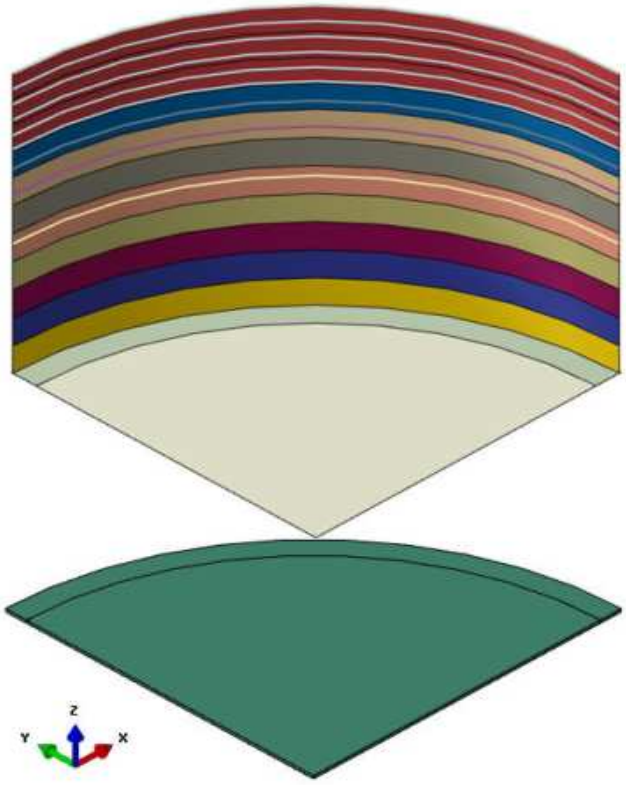
| | |
|---|---|
| 대상 | Tank 내조(피로해석 시 용접 부 묘사), 바닥 면 perlite concrete |
| 경계조건 | Perlite concrete의 바닥 면 6자유도 구속, 내조와 perlite concrete 사이 contact 조건 적용. |
| 모델링 요소 | 내조 -shell, Concrete -solid |
| 하중조건 | 내조 외벽에 작용하는 단열재 압력 2,043Pa(균일), 내조 내벽에 적용하는 정수압(LNG 높이 Max: 35.2m, Min: 2m), 자중 |
| 방법론 | 구조해석 프로그램 ABAQUS를 이용해서 최고, 최저 액위에서 내부탱크에 작용하는 응력을 구한 후 피로해석 프로그램 FEMFAT을 이용해서 내부탱크에 작용하는 반복하중 정의 및 피로(내구)해석 진행 |

해석 시나리오의 모델링은 내조탱크의 1/4 모델을 이용해서 수행하였다.

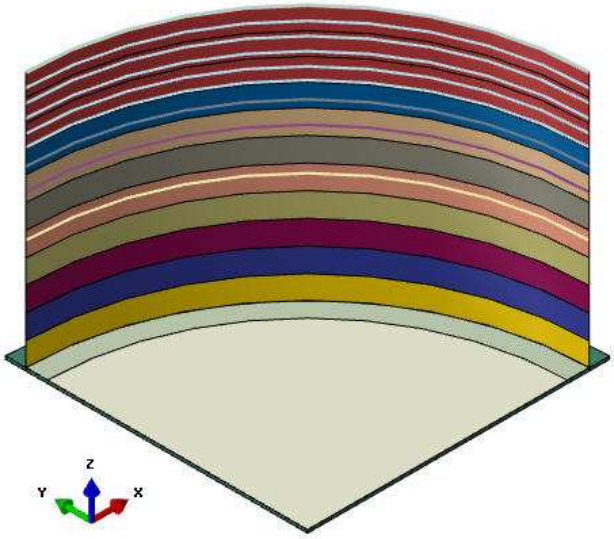
<표. 16> 내조의 주요 치수

| | |
|---|---|
| Inner tank diameter | 80.2m inside diameter |
| Inner tank height | 36.5m |
| Pump restart level | 2m |
| Design liquid level | 35.2m |

내조의 구조해석에 사용된 요소는 shell element로 하고, 단열재는 solid element로 하였다.




<그림. 18> 내조(위)와 단열재(아래)




<그림. 19> 내조와 단열재의 조립모델(색상은 두께가 다름을 의미)

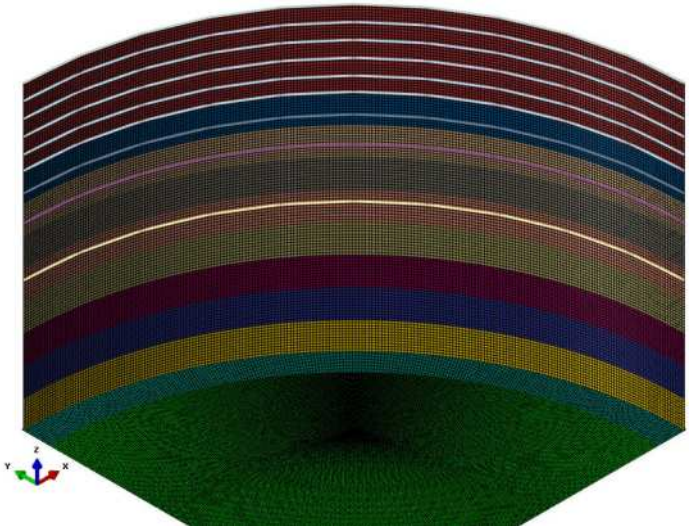
① 유한요소 모델

- 내부탱크

Abaqus의 shell element S4R type을 사용하였고 global size 0.3로 지정하였다.

<표. 17> 내조의 유한요소 모델 정보

| element수 | node수 | element type |
|---|---|---|
| 61,706 | 60,116 | S4R |



<그림. 20> 내조의 1/4 유한요소 모델 (두께를 색상별로 구분함)

- 단열재 지지부(Solid)

Abaqus의 shell element C3D8R type 사용하고 global size 0.5로 지정하였다.

<표. 18> 단열재 지지부의 유한요소 모델 정보

| element수 | node수 | element type |
|---|---|---|
| 39,168 | 59,514 | C3D8R |



<그림. 21> 단열재 meshing결과도

② 하중조건

○ 자중(전체) (<그림 22> 참고)

- 중력 가속도 9.81 m/s2로 모델 전체에 부여함.
  - 중력 가속도방향은 global 좌표계의 -z방향으로 적용

○ 정수압(내조의 내벽과 바닥면) (<그림 23> 참고)

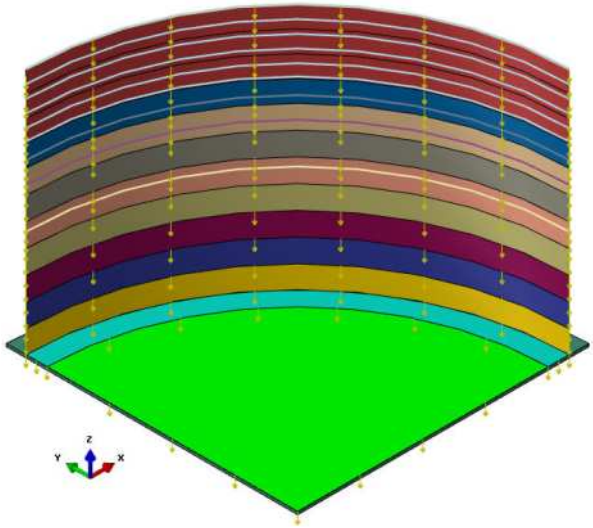
- LNG 액위에 따른 정수압을 내조 벽면에 부여
- 최고, 최저 액위에 대한 정수압은 아래 그림과 같음

○ 균일 압력(내조 외벽) (<그림 24> 참고)

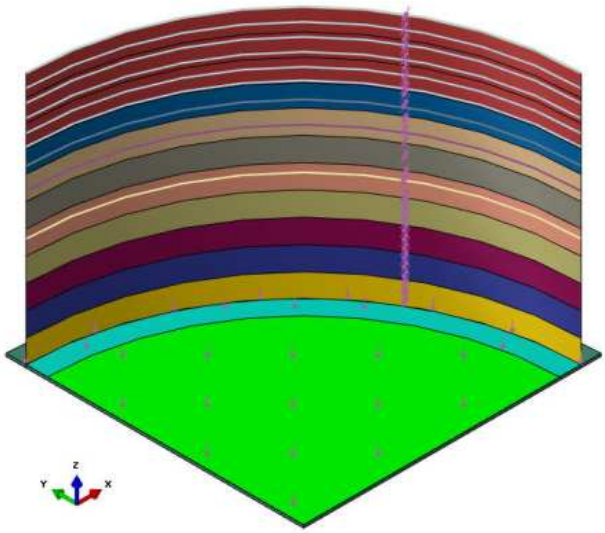
- 단열재로부터 내조 벽면에 균일하게 작용하는 압력을 2043Pa로 간주

<표. 19> 높이별 바닥면의 정수압 압력 값

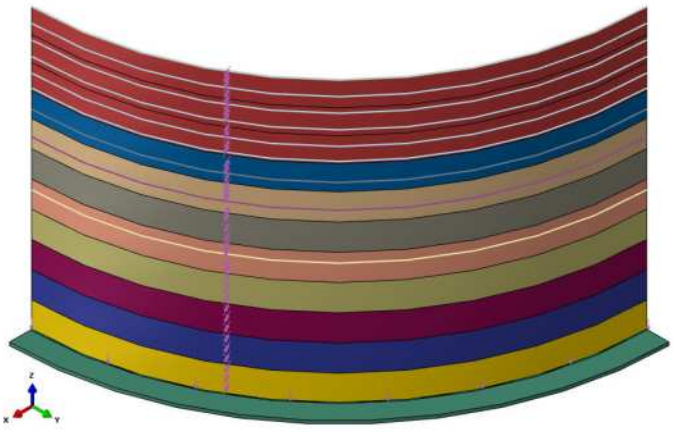
| LNG 높이(m) | 바닥면에 압력(Pa) |
|---|---|
| 35.2(m) | 165,750 |
| 2(m) | 9,418 |



<그림. 22> 전체 모델에 중력 부하



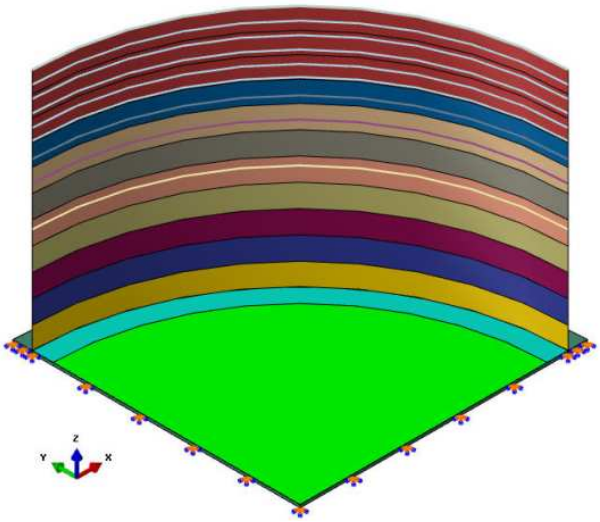
<그림. 23> 1/4 내조에 작용하는 정수압



<그림. 24> 내조 외벽에 균일 압력 적용

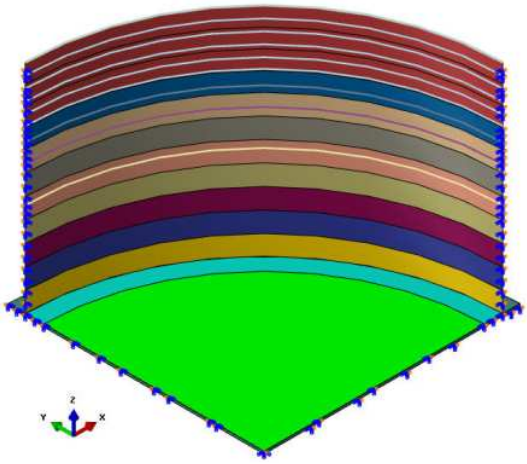
③ 경계조건

- 단열재 지지부의 하단 6자유도 구속(Fixed 1~6)을 하고, 단열재 밑면의 6자유도를 그림과 같이 구속하였다.



<그림. 25> 단열재의 바닥면 6자유도 구속

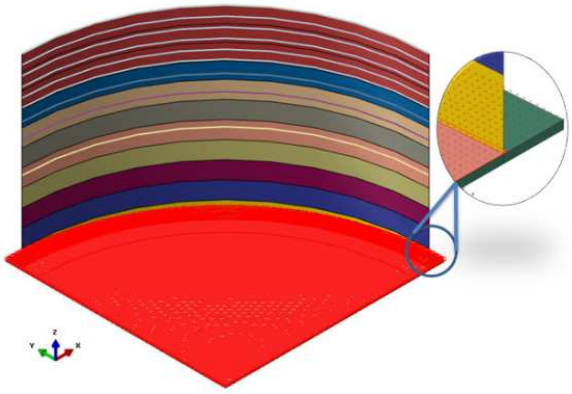
- 전체의 단면부위에 대칭조건을 부여하였다.



<그림. 26> 1/4 내조와 단열재의
단면에 대칭조건

- 내조 바닥면과 단열재 사이의 Contact 조건

내조 바닥면과 단열재의 상단면의 접촉 부위에 contact 조건을 부여하였다.



<그림. 27> 내조와 단열재 contact 조건

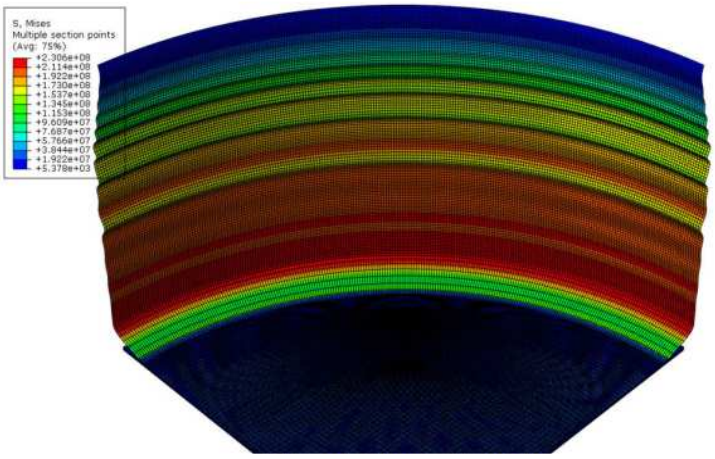
<표. 20> Abaqus에 contact 상세설정

| contact type | sliding formulation | discretization method | shell 두께 고려 | frictionless (무마찰) |
|---|---|---|---|---|
| surface-to-surface | small sliding | node to surface | Y | Y |

④ 구조해석 결과

- LNG 최대액위 (35.2m)

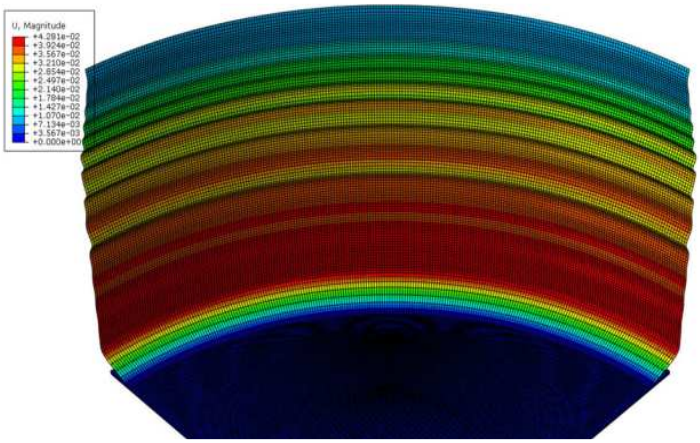
  Stress, Strain 결과를 100배 확대해서 나타내면 다음과 같다.




<그림. 28> 내조의 응력분포

<표. 21> Max & Min 응력

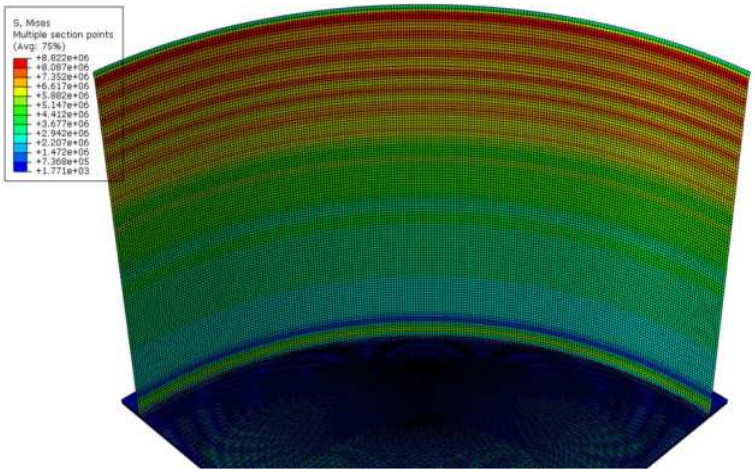
| | |
|---|---|
| Max. 응력 | 230.6Mpa |
| Min. 응력 | 7.719KPa |




<그림. 29> 최대 변위 4.2cm

- LNG 최저액위 (2m)

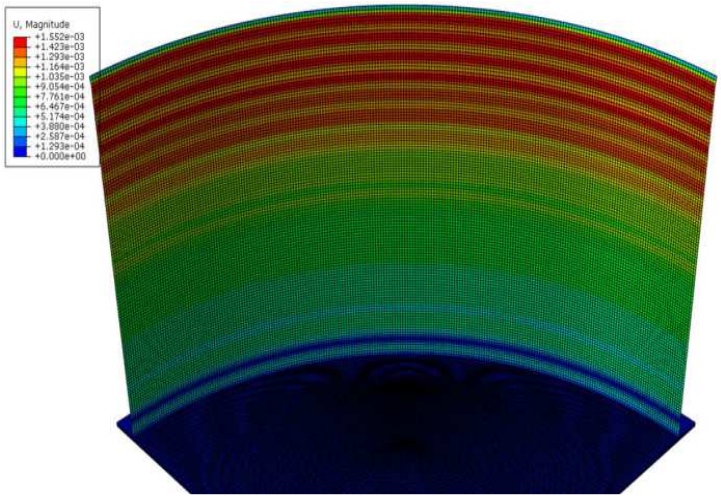
Stress, Strain 결과를 100배 확대해서 나타내면 다음과 같다.




<그림. 30> 내조의 응력분포

<표. 22> Max & Min 응력

| | |
|---|---|
| Max. 응력 | 8.822MPa |
| Min. 응력 | 4.174KPa |

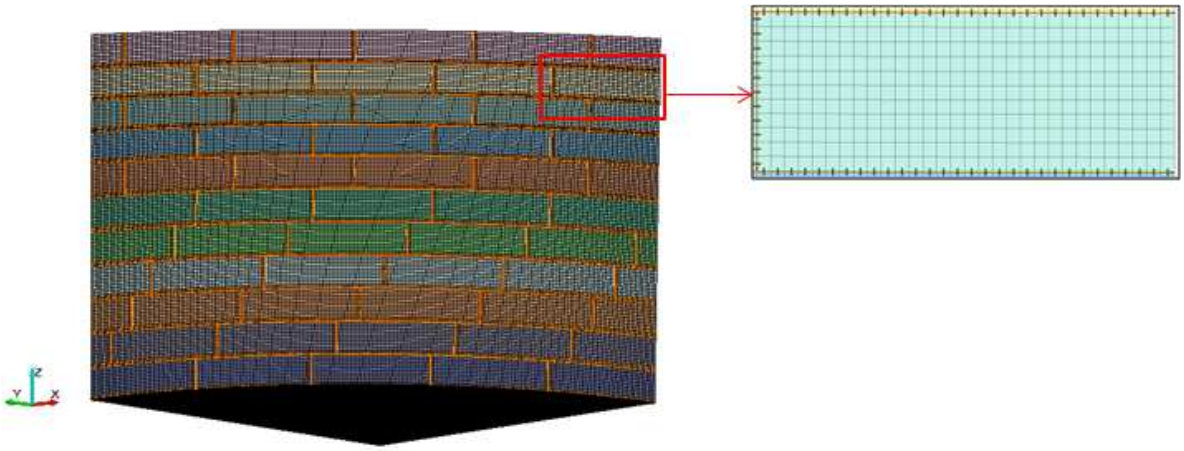



<그림. 31> 내조의 변위분포 최대 변위 1.552mm

③ 피로해석

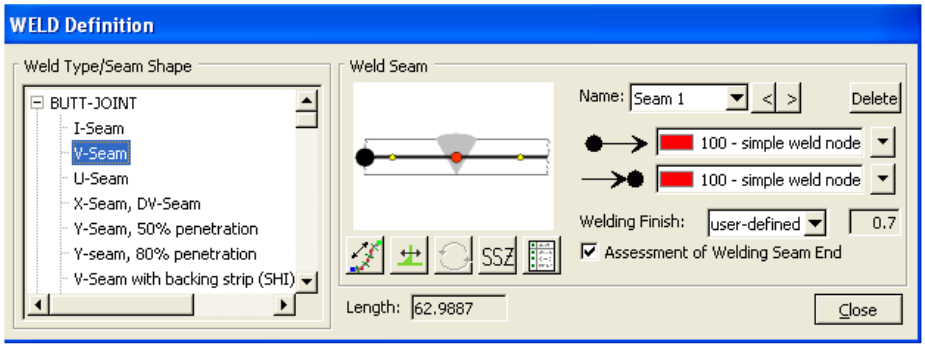
피로해석 프로그램 FEMFAT을 사용하여 용접부위를 정의하고 구조해석 결과를 바탕으로 용접부위에 대한 피로 수명을 예측 하였다. FEMFAT은 제품에 대한 안전의 판단 기준으로 마이너의 손상법칙(Miner's Rule)을 이용하여 손상(damage)값을 산출하고 내구성능을 평가한다. 피로파괴는 피로하중에 의한 일이 재료가 흡수할 수 있는 일의 총량에 도달했을 때 일어나며, 피로손상은 최대응력이 피로한도 응력보다 큰 경우만 일어난다는 가정아래 유도된 것으로 수식 $D=\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}+.....+\frac{n_n}{N_n}=1$ 을 만족할 때 피로파괴가 발생한다는 것이다.

용접부위 정의 시 grounding처리 factor를 0.7 및 0.89로 설정하여 해석하였다. 이 factor는 0.1~1로 조정할 수 있다. 피로해석은 사용수명을 10000cycle로 가정하고 LNG가 한 달에 4번 순환한다는 가정 하에 해석하였다.

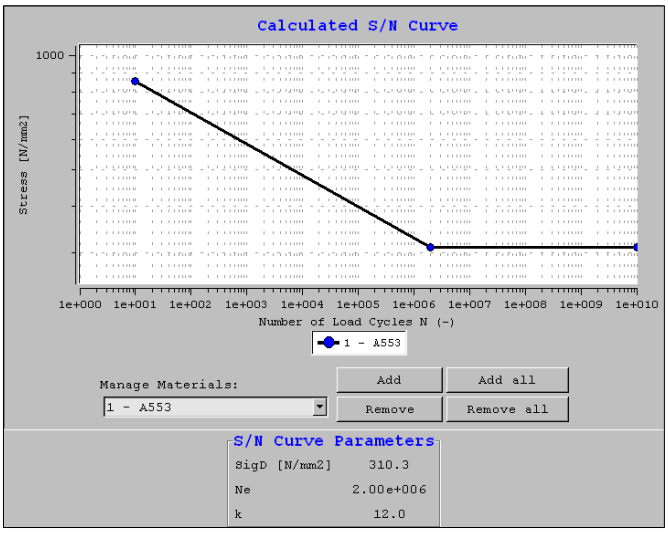


<그림. 32> 내조의 용접부위 정의

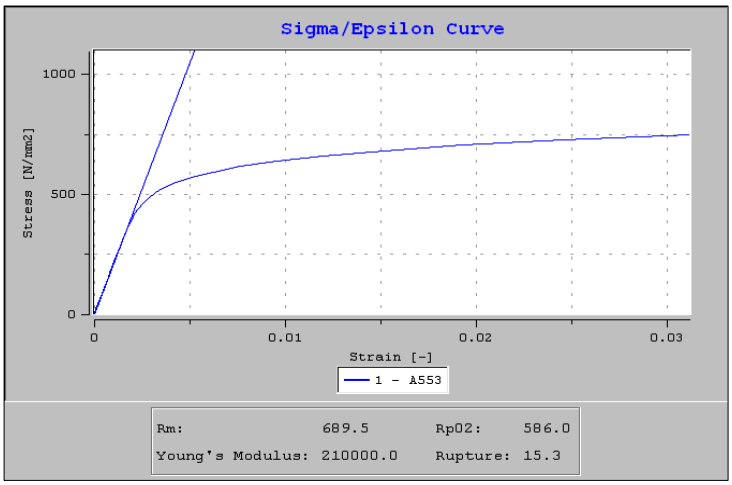
<그림 32>는 FEMFAT을 이용해서 내조에 용접부위를 정의한 그림을 나타내고 있다. 이렇게 용접부위를 정의하고 나면 <그림 33>과 같이 용접특성을 정의할 수 있다.




<그림. 33> 용접특성 정의



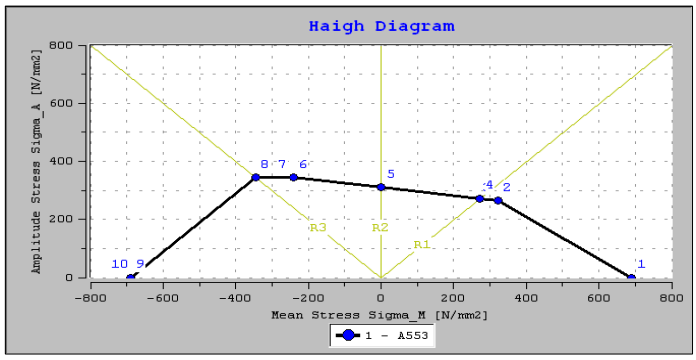

<그림. 34> 내조의 재료 A553의 S-N 선도




<그림. 35> 내조의 재료 A553의 응력-변형률 선도

FEMFAT을 통해서 피로(내구)해석을 수행할 경우, 피로해석의 결과는 Damage로 나타난

다. FEMFAT에서 $Damage = \frac{n_1}{N_1}$ 이다. 여기서 n은 가정수명을 나타내며 N은 실제수명을 나타낸다. 즉, 실제수명 $N_1 = \frac{n_1}{Damage}$ 이다.




<그림. 36> 내조의 재료 A553의 Haigh 선도

내조해석의 경우 Welding finish의 값을 0.89 및 0.7로 설정해서 Damage 값을 비교하였다. Welding finish는 용접품질을 나타내는 계수이며 값이 작을수록 용접품질이 우수함을 의미한다. 가정 수명은 n=10000 cycle이고 수명 해석 결과는 damage D 및 실제 수명은 N=n/D으로 계산된다.

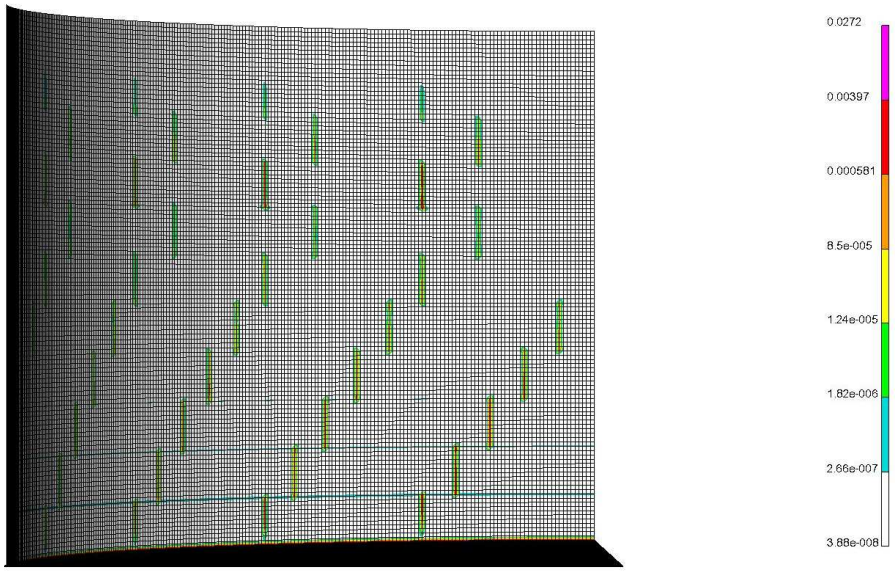
한 달 동안 LNG 저장탱크가 4회 가동 된다고 가정하면 1년에 48cycle이 된다.

Welding finish 0.7인 경우는 피로해석 결과 damage D=2.718e-002로 계산되었다.




<그림. 37> 내조의 최대 Damage(welding finish 0.7)

FEMFAT을 통해서 피로(내구)해석을 수행할 경우, 피로해석의 결과는 Damage로 나타난다. FEMFAT에서 $Damage = \frac{n_1}{N_1}$ 이다. 여기서 n은 가정수명을 나타내며 N은 실제수명을 나타낸다. 즉, 실제수명 $N_1 = \frac{n_1}{Damage}$ 이다.




<그림. 38> 내조의 Damage 분포

실제 cycle수는 10,000cycle/2.718e-002=3.68e+005cycle이며 수명은 3.68e+005/48 (cycle/year)이므로 7.66e+003년이다.

· Welding finish 0.89인 경우

피로해석 결과 damage D=7.118e-002




<그림. 39> 내조의 최대 Damage(welding finish 0.89)

피로해석 결과 Welding finish 값이 0.89와 0.7인 경우 피로해석 측면에서 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 Welding finish 0.89인 경우에도 실제수명은 2.92e+003년이다.

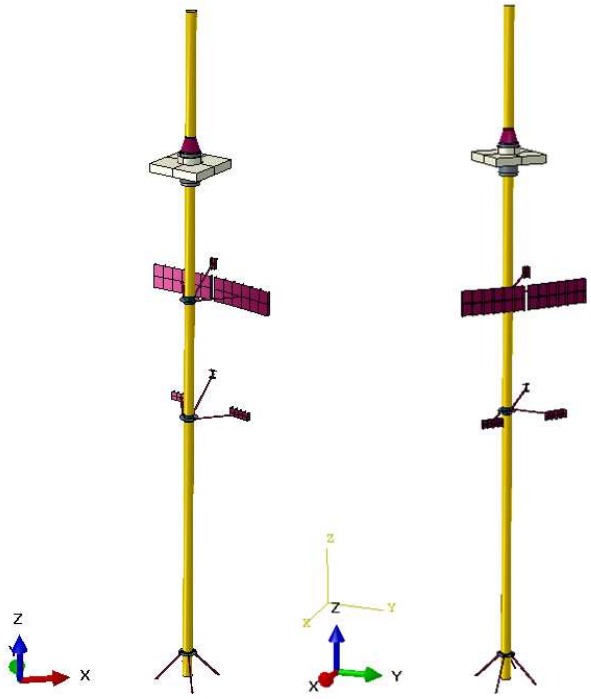
(나) 시나리오 2 : pump column 및 지지구조물의 구조해석과 피로해석

LNG 저장탱크 해석 시나리오 1의 상세 내용은 <표 23>와 같이 경계조건, 모델링 요소, 하중조건 및 방법론에 대한 설명이다.

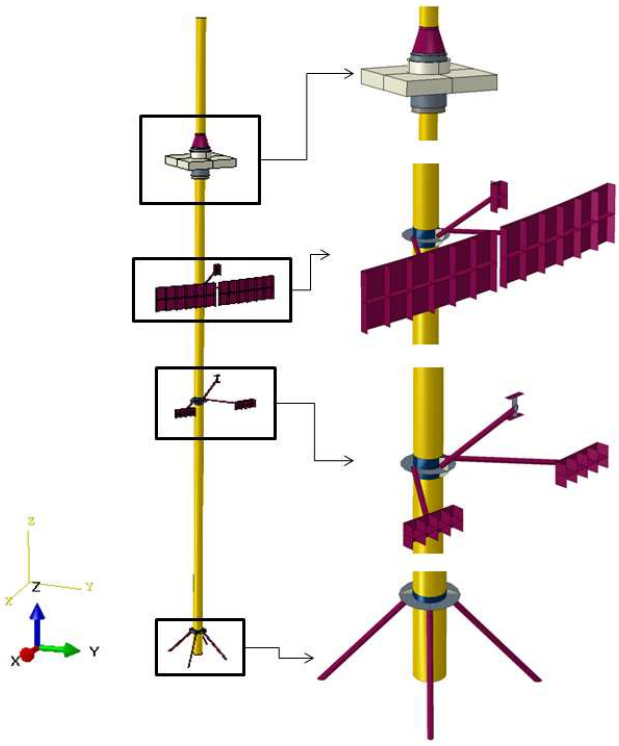
<표. 23> 시나리오 2의 상세 내용

| | |
|---|---|
| 대상 | Pump column및 지지구조물(지붕, 내조) |
| 경계조건 | |
| Element type | 내조 - shell, 지지bracket -shell, 외족 -solid |
| Loading | 자중, LNG 최고, 최저액위에서의 정수압 |
| 방법론 | 최고, 최저 LNG 액위에서 발생하는 최대, 최하응력 값을 통해 펌프배관 및 지지구조물의 용접부위의 피로해석 수행 |

주요 관심 부위 펌프배관 및 지지구조물은 피로 해석을 수행할 때 용접부위 정의를 용의하게 하기 위해 배관 및 지지구조물의 부분을 쉘 요소로 모델링 하였다.




<그림. 40> 펌프배관 및 지지구조물
해석모델




<그림. 41> 펌프배관 및 지지구조물 확대모델

① 유한요소 모델

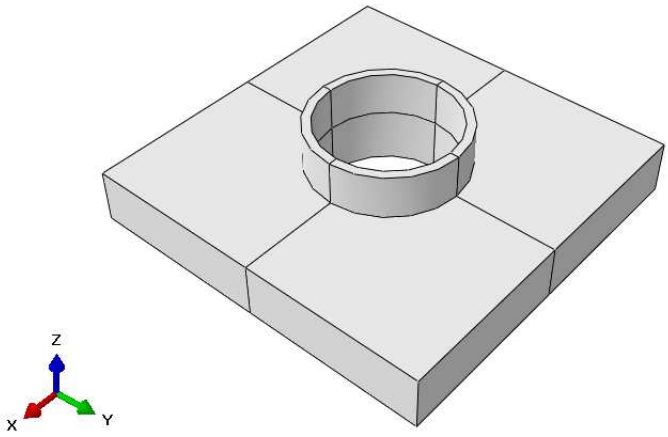



<그림. 42> 펌프배관 및
지지구조물 유한요소모델

| | Part Name | Element Type | Elements | Nodes |
|---|---|---|---|---|
| 1 | COLUMN | | 108408 | 109290 |
| 2 | | S4R | 108323 | |
| 3 | | S3 | 85 | |

<그림. 43> 펌프배관 및 지지구조물 유한요소모델
정보

외조(지붕부)의 지붕 콘크리트부분은 solid element로 모델링하였다.




<그림. 44> 외조 지붕부

- 물성치

<표. 24> Column과 Concrete의 물성치

| | Density(Kg/m$^3$) | Young's Modulus(GPa) | Poisson's Ratio |
|---|---|---|---|
| Column | 7850 | 208 | 0.3 |
| Concrete | 2500 | 38.89 | 0.2 |

② 하중조건

○ 하중조건

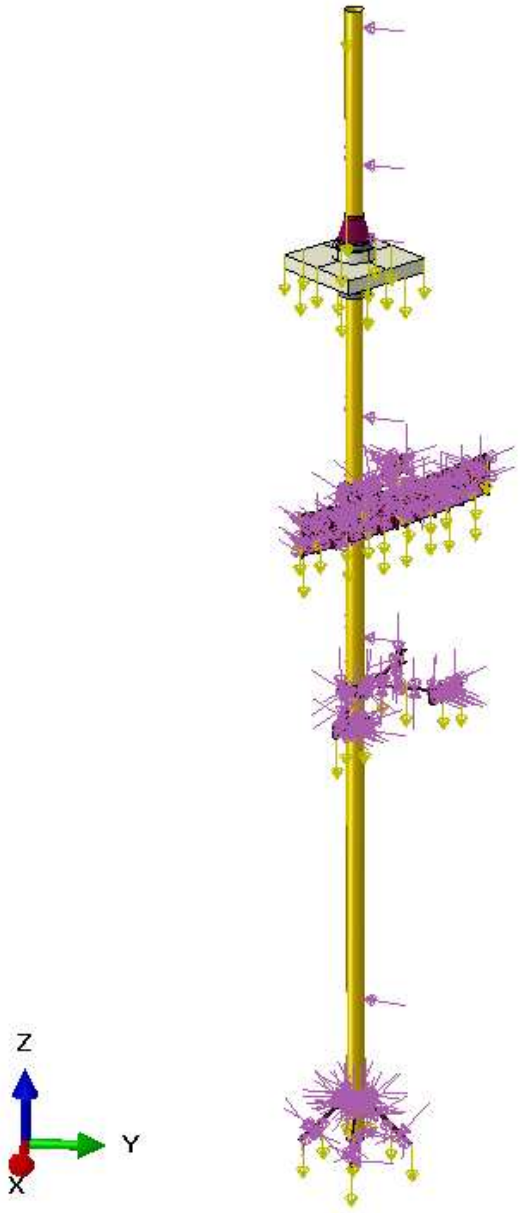
- 최고,최저액위에서 펌프배관 지지구조물에 작용하는 정수압 및 자중

○ 자중

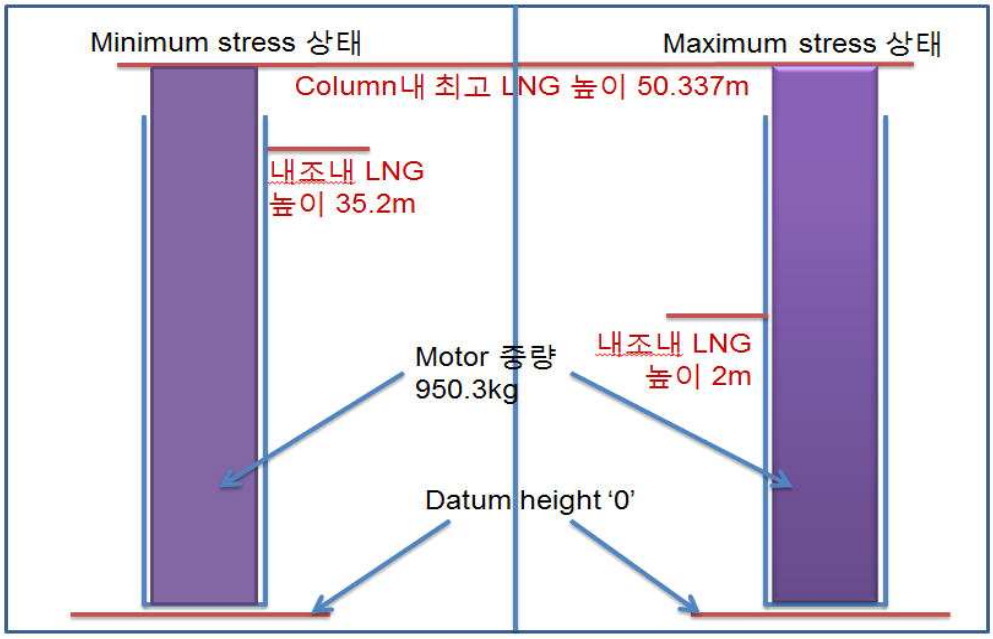
- 모델 전체에 중력가속도($g = 9.81 m/s^2$) 부여함.

○ 정수압

- LNG 최고, 최저 액위에 대한 정수압을 아래의 그림과 같이 내조 벽면에 부여함




<그림. 45> 펌프배관 및 지지구조물 하중조건



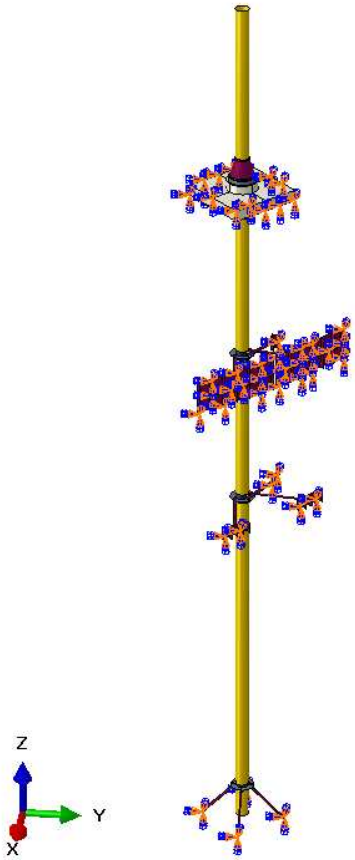

<그림. 46> 밑면압력은 LNG압력과 motor중량을 고려하였다.

<표. 25>. 최고,최저 LNG 액위 조건에서의 펌프배관 LNG높이

| | Max 상태 | Min 상태 |
|---|---|---|
| Column 내경 | 0.75m | |
| Column내 LNG 높이 | 50.337m | |
| 내조내 LNG 높이 | 35.2m | 2m |

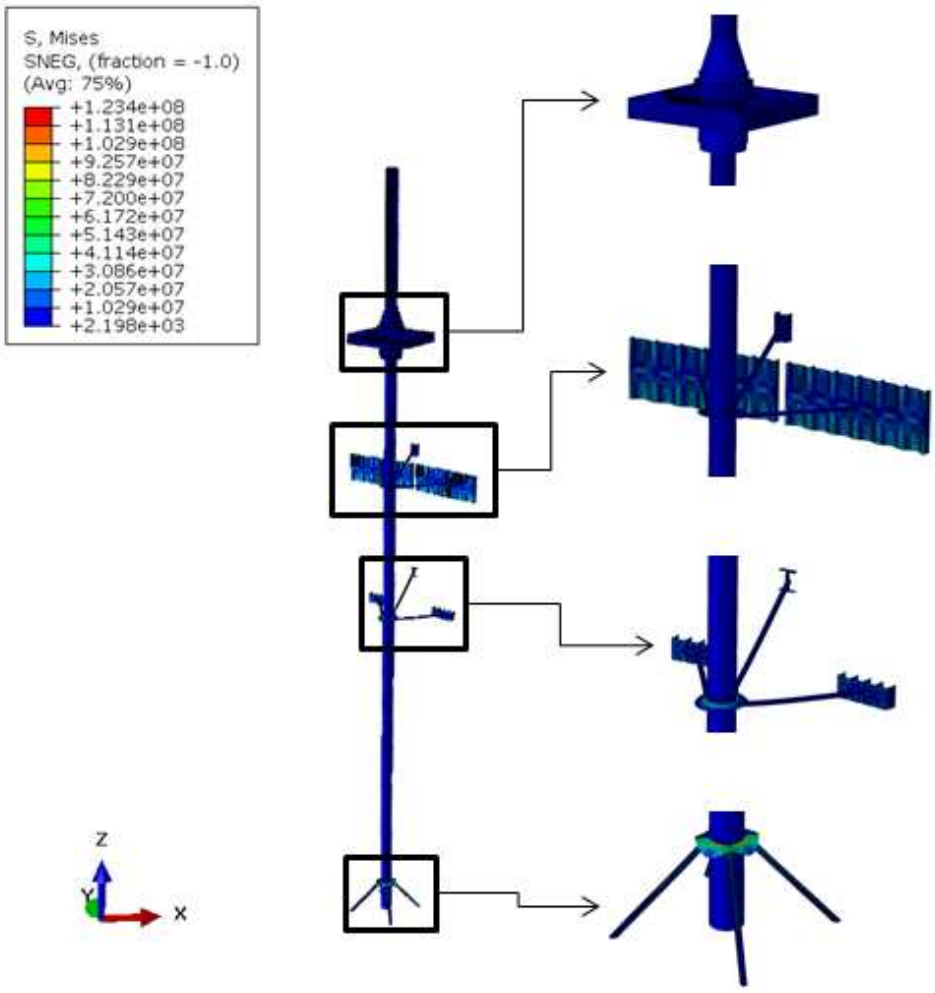
③ 경계조건

지붕부분 단면을 6자유도 구속하고 column에서 내조와 접촉되는 부분도 6자유도로 구속한 상태로 경계조건을 정의하였다.




<그림. 47> 펌프배관 및
지지구조물 경계조건

④ 구조해석 결과

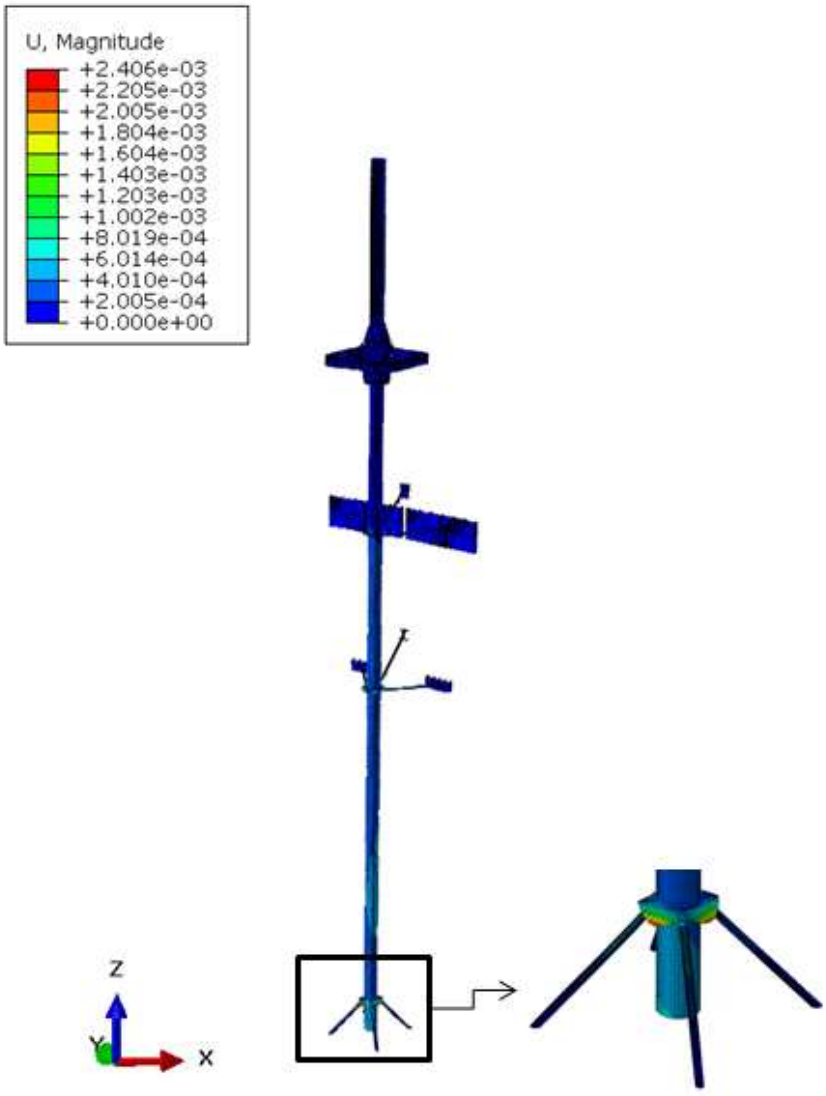



<그림. 48> 최대액위 조건에서 펌프배관 및 지지구조물 응력분포

- LNG 최대액위(35.2m)

<표. 26> Max & Min 응력

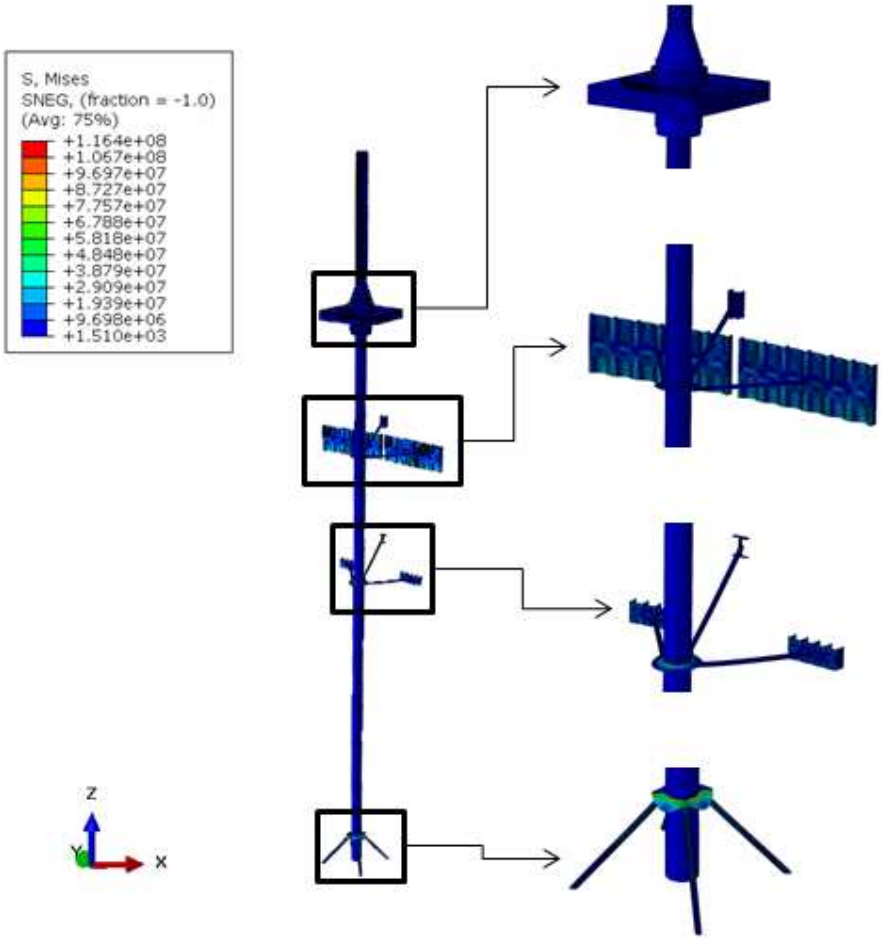
| | |
|---|---|
| Max. 응력 | 123.4Mpa |
| Min. 응력 | 2.19Kpa |




<그림. 49> 최대액위 조건에서 펌프배관 및 지지구조물 변위분포

<표. 27> Max & Min 응력

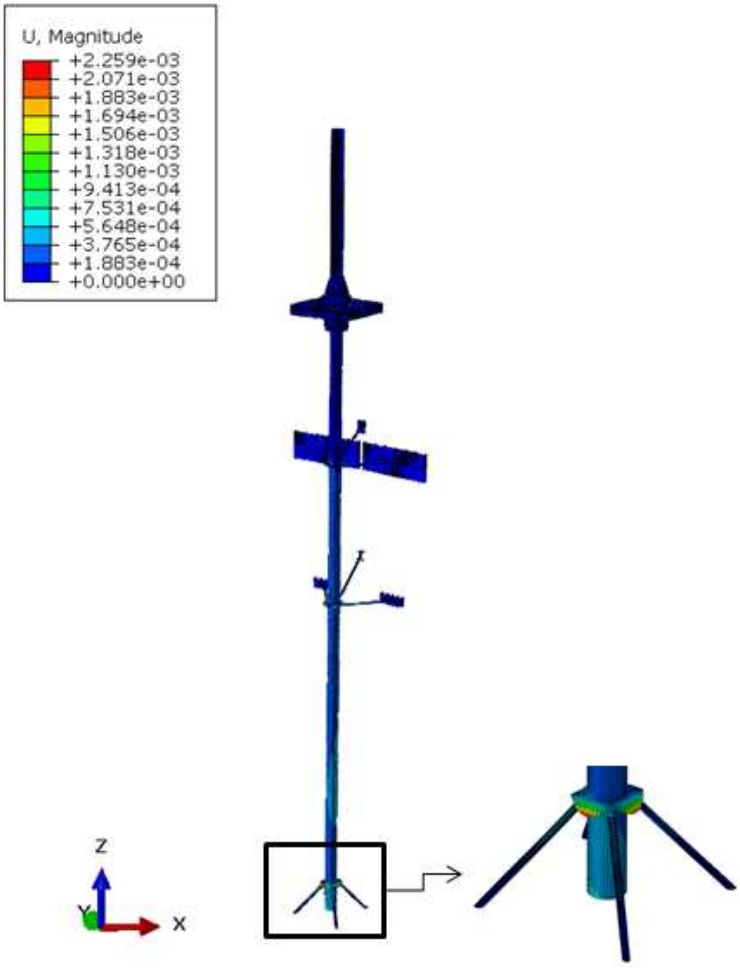
| | |
|---|---|
| Max. 변위 | 2.4 mm |
| Min 변위 | 0 mm |




<그림. 50> 최저액위 조건에서 펌프배관 및 지지구조물 응력분포

<표. 28> Max & Min 응력

| | |
|---|---|
| Max. 응력 | 116.4Mpa |
| Min. 응력 | 1.51Kpa |



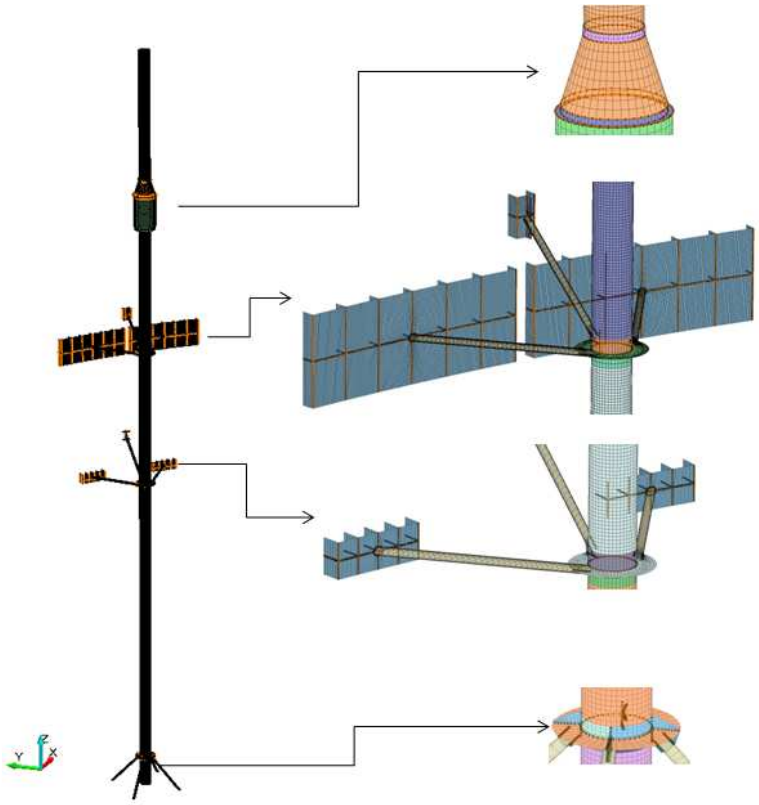

<그림. 51> 최저액위 조건에서 펌프배관 및 지지구조물 변위분포

<표. 29> Max & Min 응력

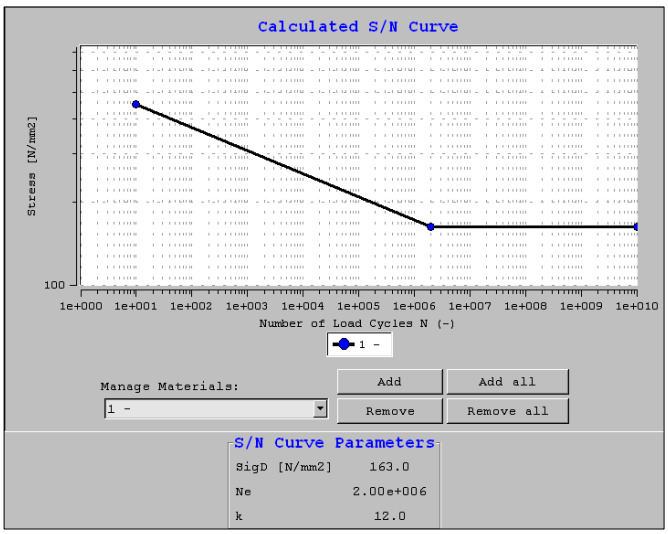
| | |
|---|---|
| Max. 변위 | 2.26 mm |
| Min 변위 | 0 mm |

⑤ 피로해석결과

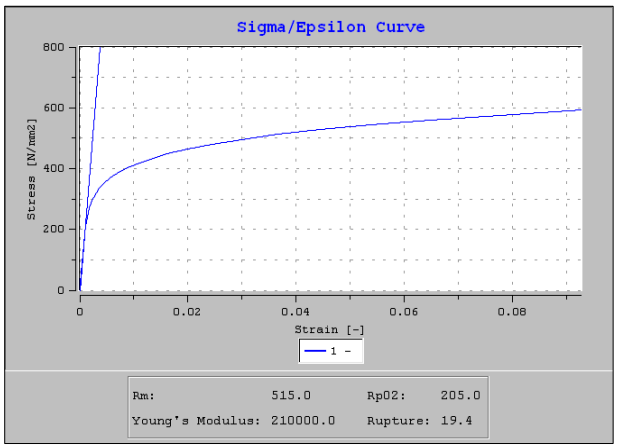
피로해석 프로그램 FEMFAT을 사용하여 용접부위를 정의하고 구조해석 결과를 바탕으로 용접부위에 대한 피로 수명을 예측 하였다.



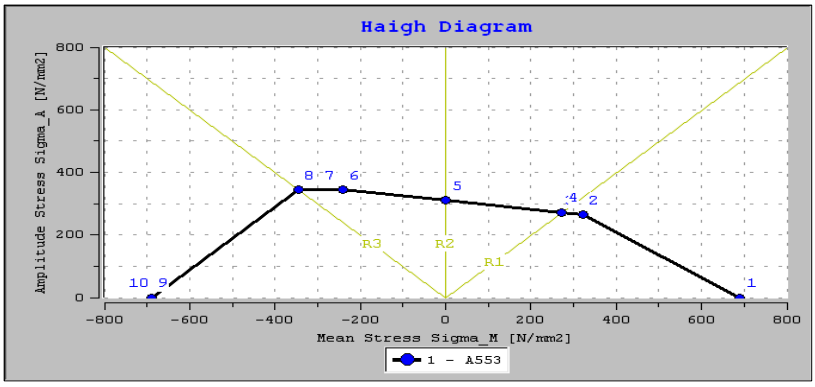
<그림. 52> 펌프배관 및 지지구조물 용접부위 정의



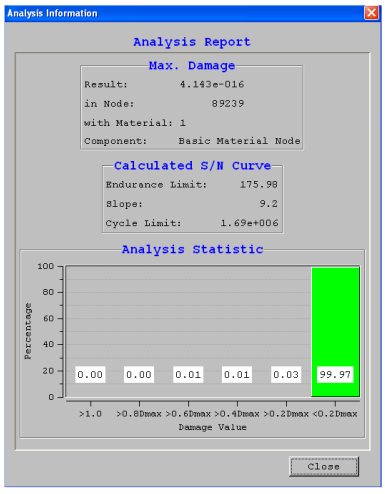

<그림. 53> 펌프배관 및 지지구조물 재료의 S-N 선도



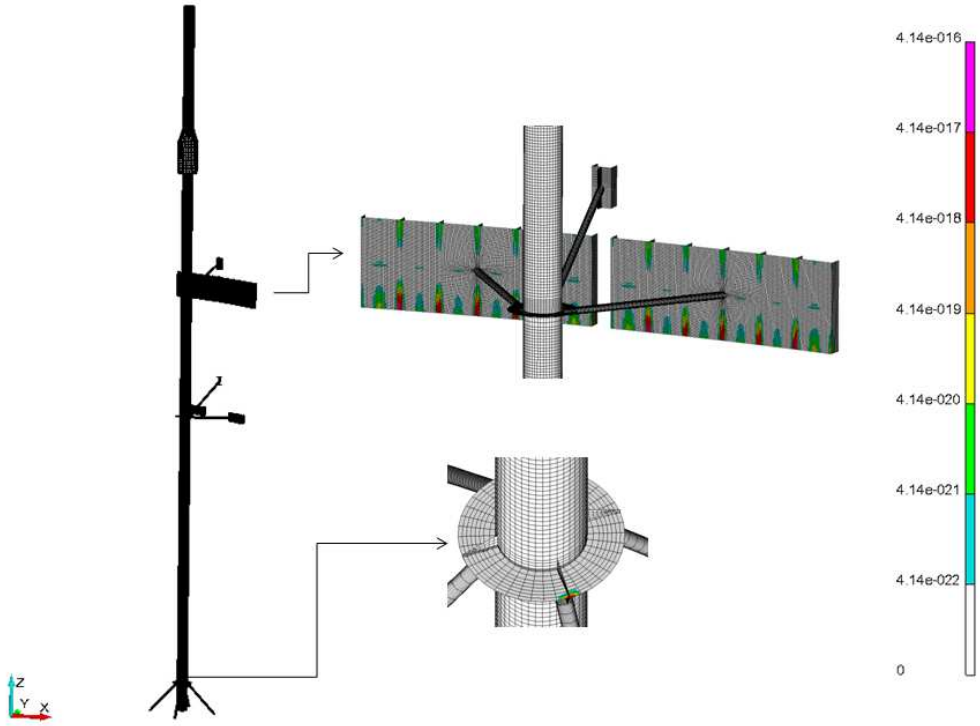

<그림. 54> 펌프배관 및 지지구조물 재료의 응력-변형률 선도



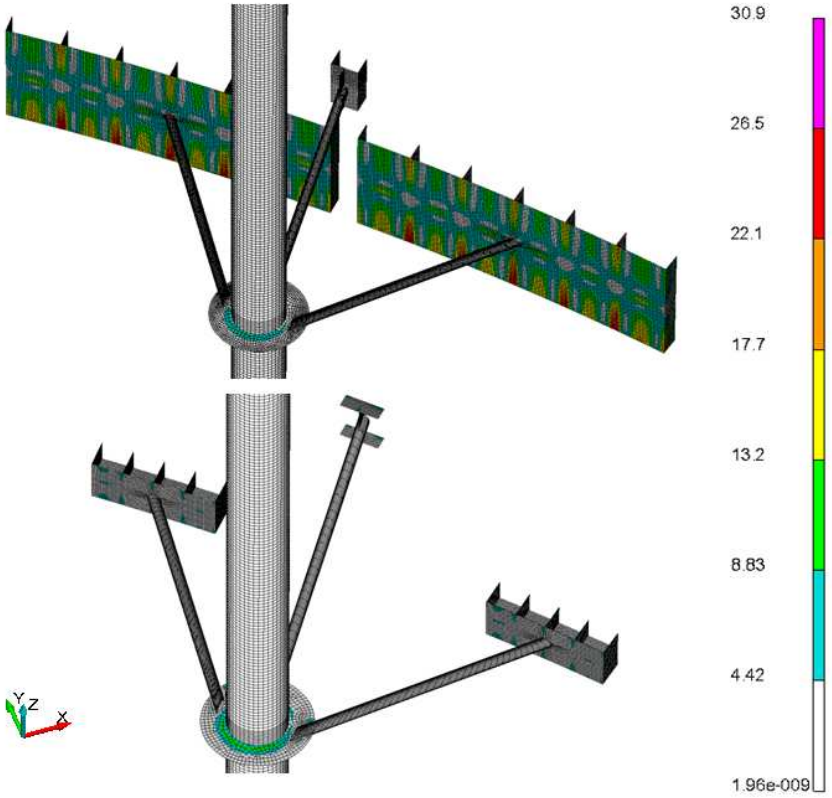

<그림. 55> 펌프배관 및 지지구조물 재료의 Haigh 선도




<그림. 56> 펌프배관 및 지지구조물의 최대 Damage(welding finish 0.89)




<그림. 57> 펌프배관 및 지지구조물의 주요 Damage 분포




<그림. 58> 펌프배관 및 지지구조물에 작용하는 주요 응력진폭

가정 수명 n=10000 cycle
수명 해석 결과 damage D
실제 수명 N=n/D

한 달 동안 LNG 저장탱크가 4회 가동 된다고 가정하면 1년에 48cycle이 된다. 실제 cycle 수는 10,000cycle/4.143e-016=2.41e+19cycle이며 수명은 2.41e+17/48 (cycle/year)이므로 5.03e+17년이다.

피로해석 결과 Welding finish 값이 0.89와 1인 경우 피로해석 측면에서 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 Welding finish 1인 경우에도 실제수명은 5.03e+17년이다.

(다) 시나리오 3: 지붕과 suspended deck에 대한 유체해석(Fluent) 온도장 해석

LNG 저장탱크 해석 시나리오 3의 상세 내용은 <표 30>와 같이 경계조건, 모델링 요소, 하중조건 및 방법론에 대한 설명이다.

<표. 30> 시나리오 3의 상세 내용

| | |
|---|---|
| 대상 | 외조 지붕, suspended deck |
| 경계조건 | 온도와 압력 시간에 따라 선형변함 |
| Element type | 5mm 지붕철판 -shell,기타 -solid |
| Loading | CFD 유동해석을 통해 온동장 |
| 방법론 | LNG 저온증발 가스(BOG)에 의해 지붕상부 온조장 구함 |

① 유한요소 모델

- 외조 지붕부분

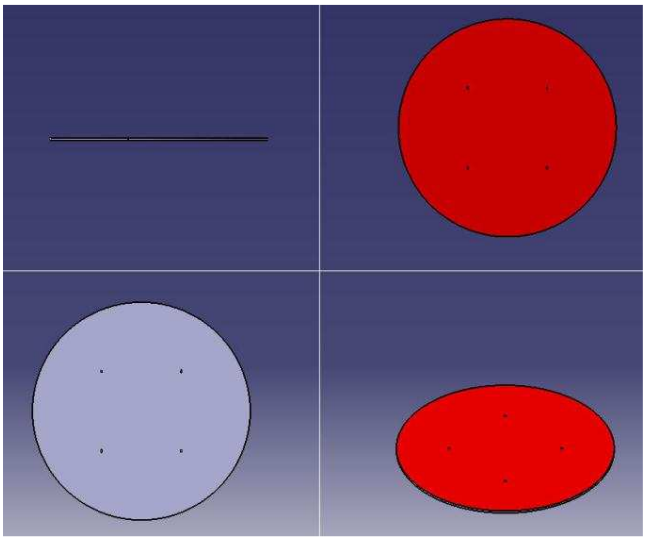
외조 지붕 부분은 solid로 모델링 하였고 모델을 간단히 표현하기 위해 suspended deck 상부전체와 2.6m정도 이하의 벽체부분만 모델링 하였다.



<그림. 59 외조 지붕 부분>

- suspended deck

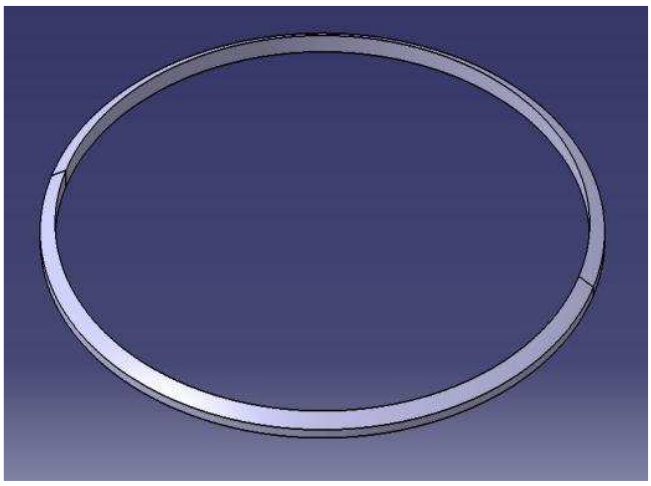
suspended deck은 solid로 구성하고 유체해석을 위해 도면과 동일 위치에 사각형 홀 4개를 그림과 같이 배치하였다.



<그림. 60> suspended deck plate

- Perlite blanket

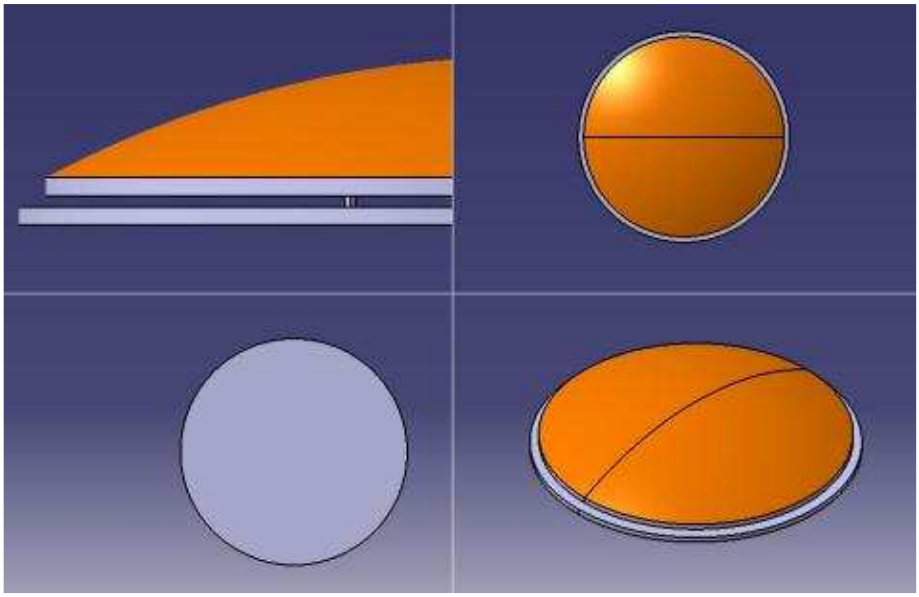
Perlite blanket는 solid로 구성하여 모델링하였다.



<그림. 61> perlite blanket

- 유체영역

solid로 구성하고 suspended deck의 홀에서 상부 ,하부 2부분으로 나누어지며 외조 지붕공간을 차지한다.



<그림. 62> 상하 2부분으로 나누어진 유체부분

- 물성치

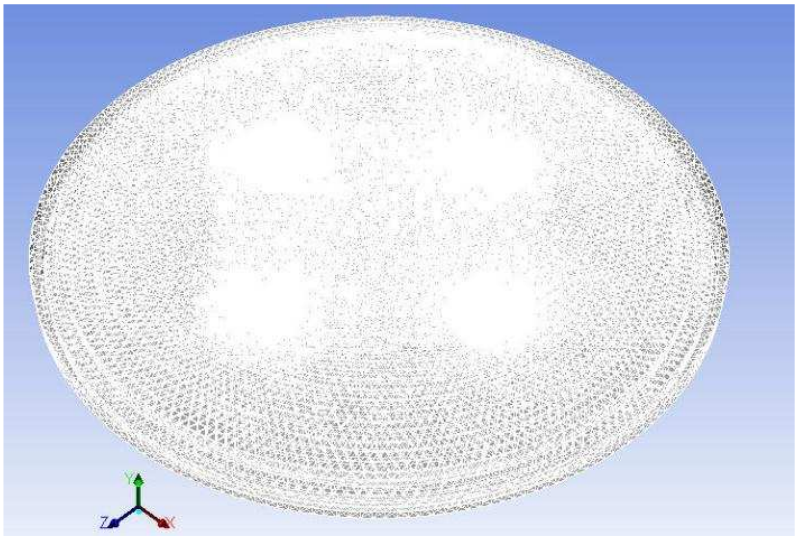
<표. 31> LNG & air 물성치

| | Density (Kg/m3) | Specific Heat (J/Kg K) | Thermal Conductivity (W/m K) | Viscosity (Kg/m s) |
|---|---|---|---|---|
| LNG | 0.6679 | piecewise value | 0.0332 | 1.087e-5 |
| air | ideal gas | 1006.43 | 0.0242 | 1.7894e-5 |

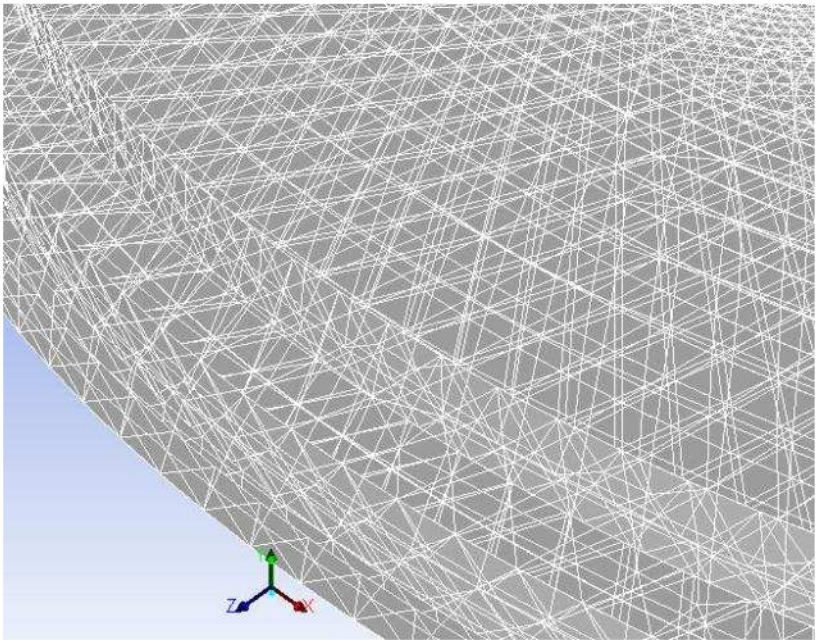
- 유한요소모델 정보

<표. 32> 외조지붕에 대한 유한요소모델 정보

| Cells | Faces | Nodes |
|---|---|---|
| 602776 | 131707 | 135111 |



<그림. 63> 유한요소 모델



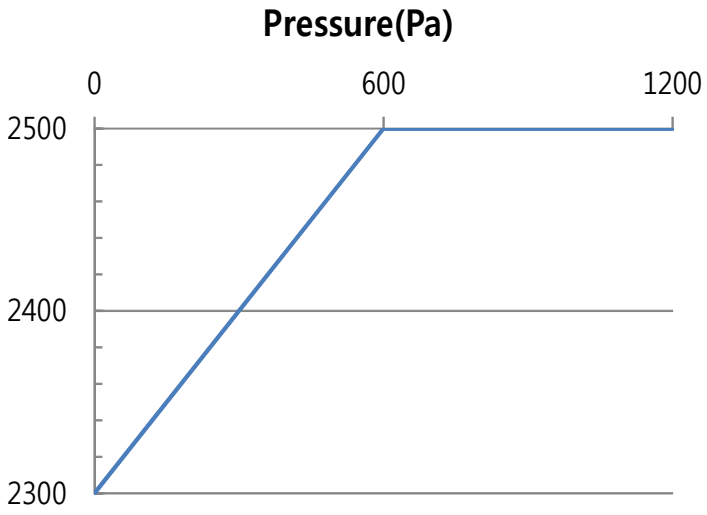
<그림. 64> 유한요소모델 확대도

② 경계조건 및 하중조건

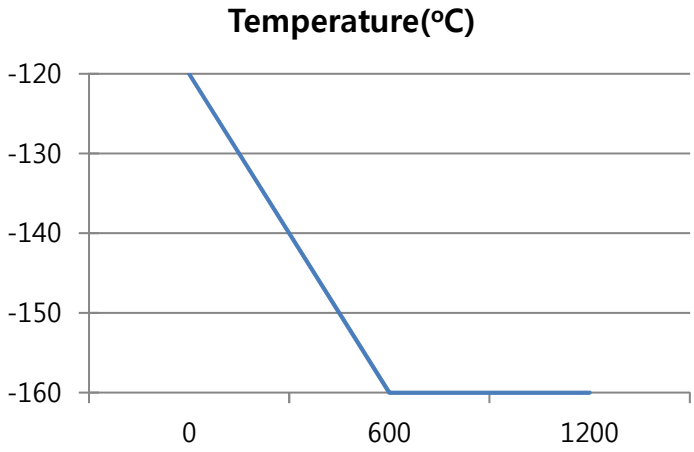
전체 온도 20C° 유체압력 20000Pa이며 해석할 때 유체 밑면에 시간에 따라 선형 변화하는 온도와 압력조건을 적용하였다. 변하는 조건은 Fluent에서 UDF(User Define File)를 통해 실행된다.

<표. 33> 시나리오3 경계조건

| | 초기조건 | 최종조건 | 소요시간 |
|---|---|---|---|
| 압력 | 23000Pa | 25000Pa | 600s |
| 온도 | -120C° | -160C° | 600s |



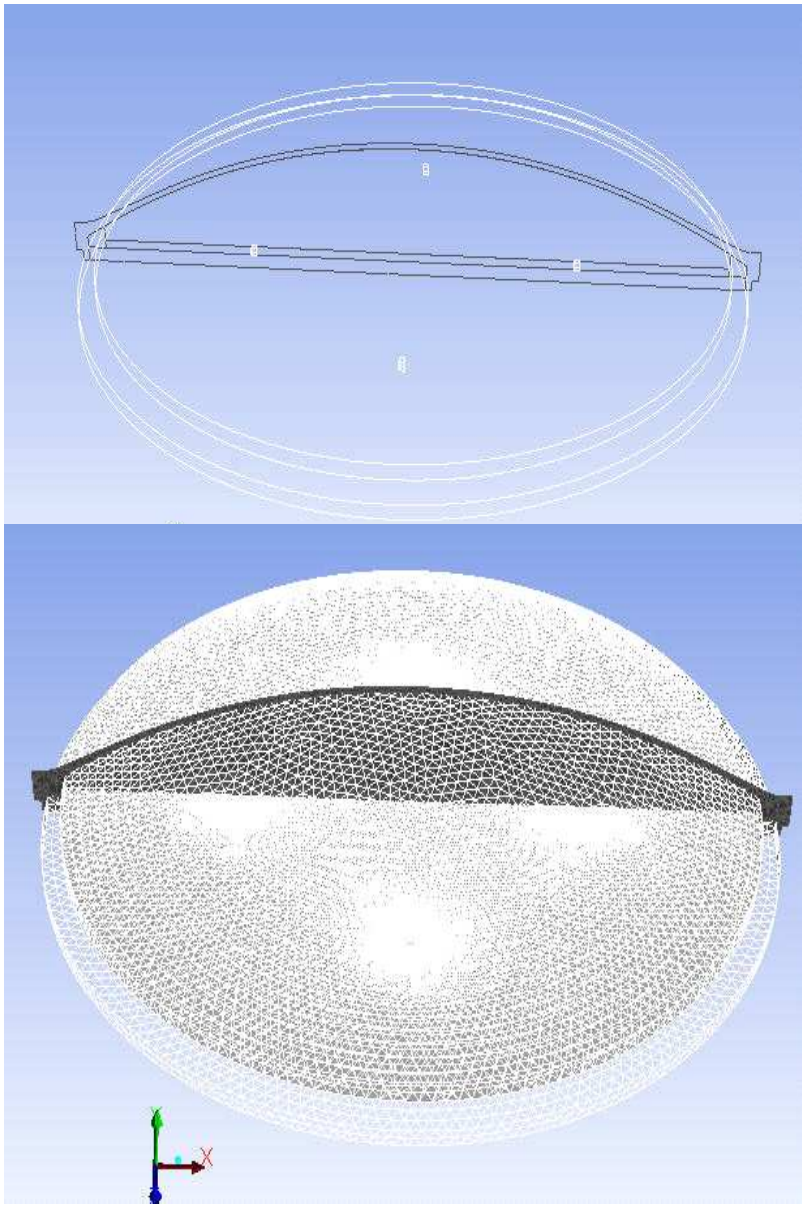

<그림. 65> 유체해석 inlet에 압력조건



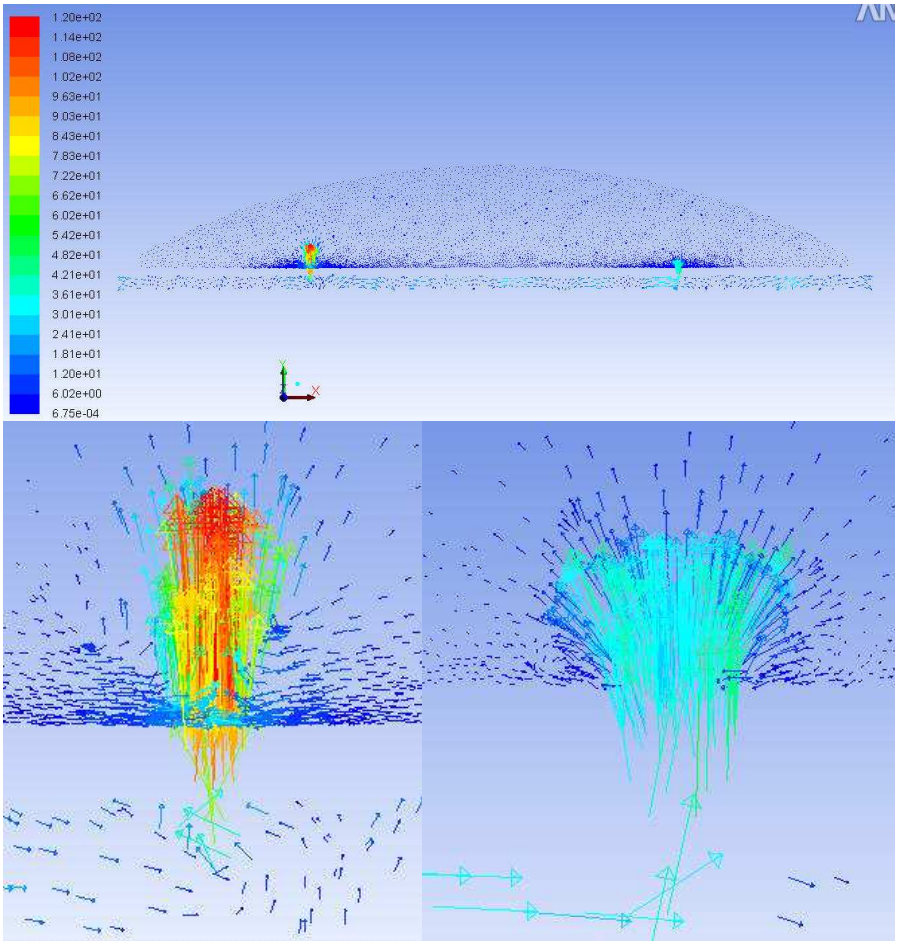

<그림. 66> 유체해석 inlet에 온도조건

③ 구조해석 결과

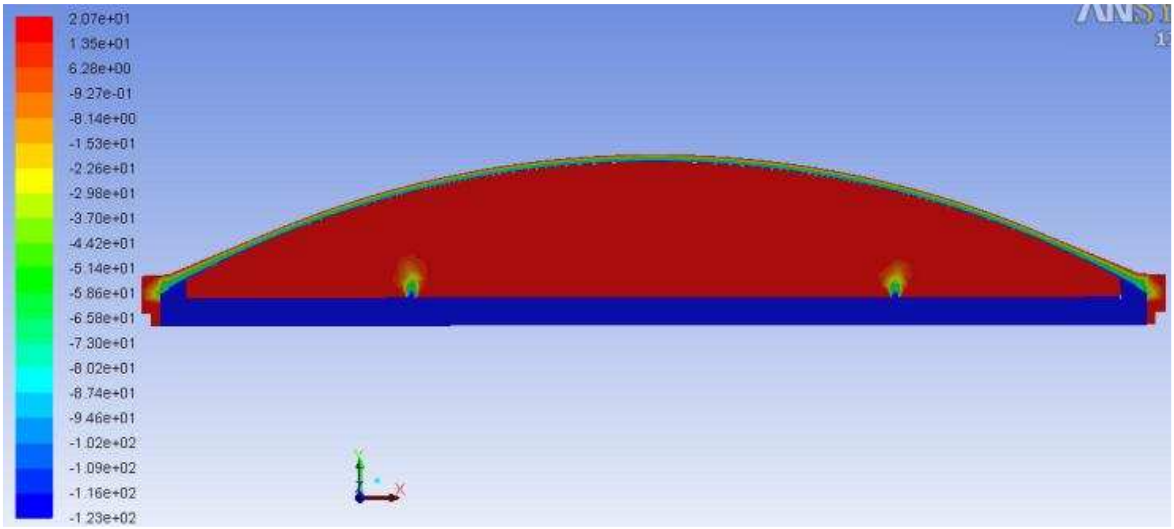
해석은 Fluent에서 transient방식으로 하고 simulation 시간은 1200초로 설정하였다. 결과는 1200초에 압력이 거의 균일하게 되고 지붕하부에 유체온도는 대략 20℃도로써 실제 현상과 유사하다.



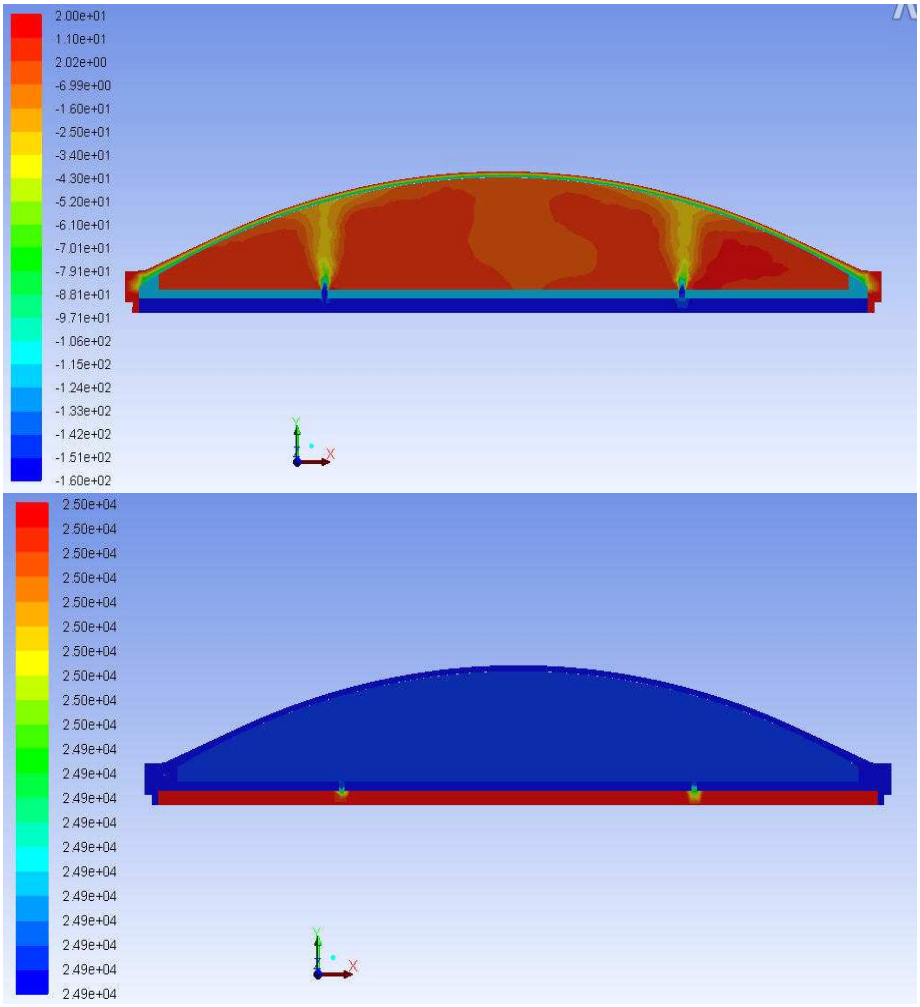
<그림. 67> 결과 표시용 plain위치 표시



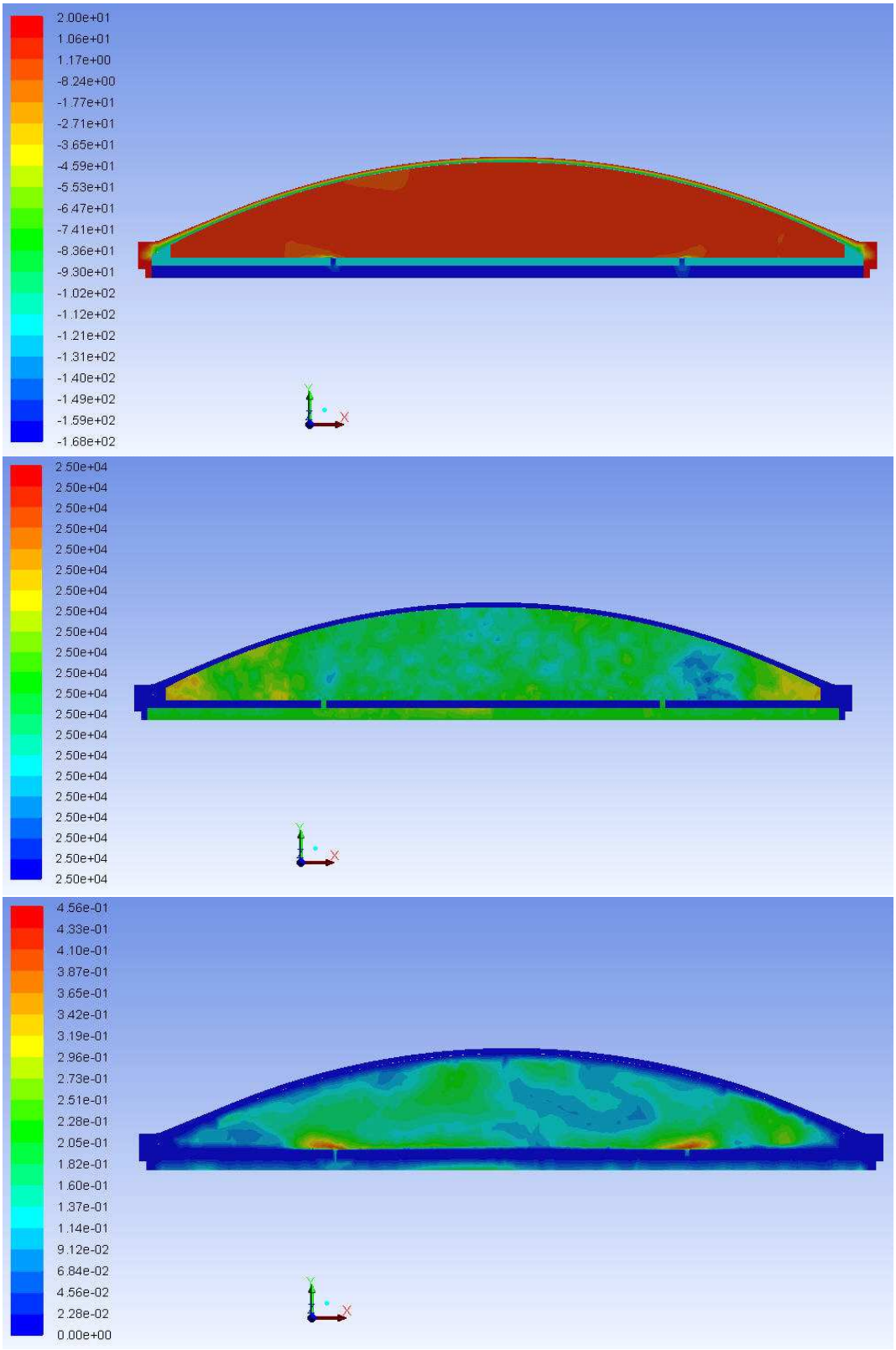

<그림. 68> t=10s일 때 유체속도(세부 그림은 deck의 홀을 나타냄)




<그림. 69> t=100s 일 때 온도장 분포




<그림. 70> t=600s 일 때 온도(상)와 압력(하)

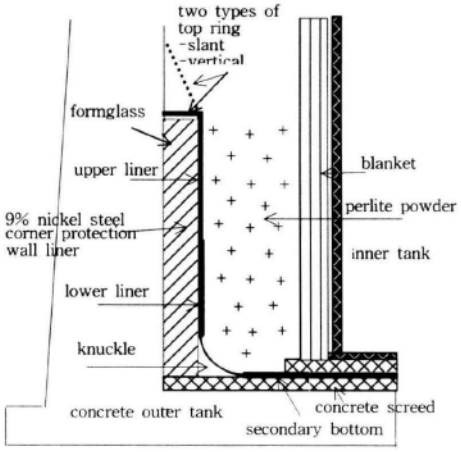



<그림. 71> t=1200s일 때 온도(상) 압력(중)과 속도(하)

(라) 시나리오 4 : 코너프로텍션 구조해석 및 피로해석

콘크리트 외조의 경우에 초저온의 LNG을 저장하게 되면 고정되어 있는 바닥과 내면/외면의 온도차에 의해 원통형 하단부에 큰 열적 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력은 원통형 콘크리트 탱크의 설계를 불가능하게 한다. 따라서 높이 5m까지 콘크리트 외조 하단부 내면에 단열재인 폼 글라스를 설치하고, 기밀성을 위지하기 위해 5~20mm 두께의 9% 니켈강 라이더를 시공하게 되는데 이를 코너프로텍션(Corner Protection)이라 한다.

27만kℓ LNG 저장탱크 코너프로텍션에 대한 시뮬레이션을 통해서 실제 하중조건을 모사하여 LNG 저장탱크 코너프로텍션에 작용하는 응력을 구한 후 그 결과 값을 이용하여 피로수명을 예측하고 이러한 절차를 표준화 하고자 하였다.

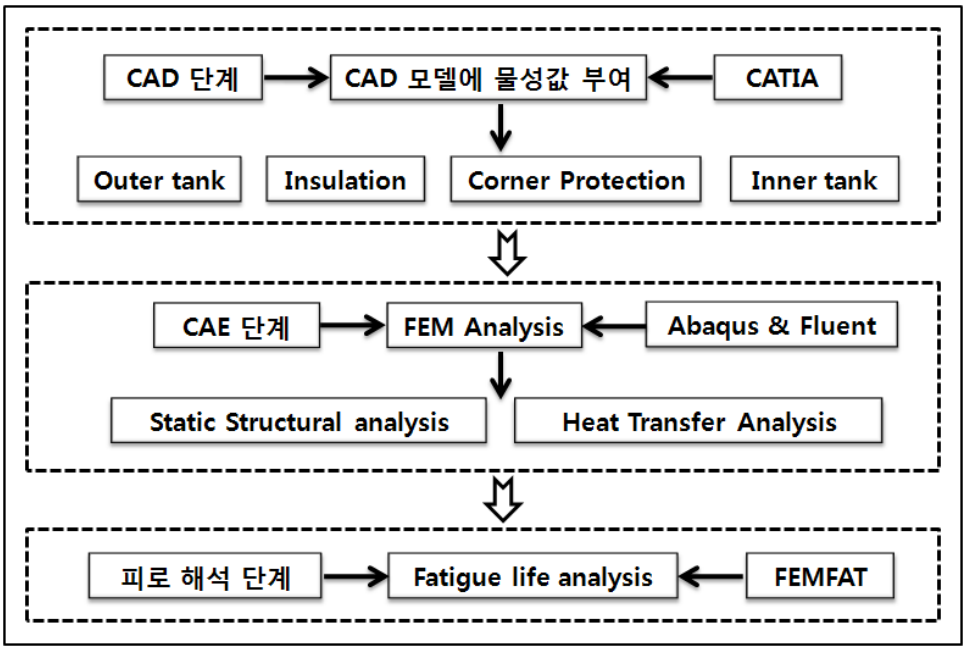



<그림. 72 코너프로텍션의 구조

<표. 34> 수명평가 대상 LNG 저장탱크 일반 사양

| 탱크 분류 | 지상식(Above-ground), 완전방호식(Full Containment), 9% Ni 강 (내부탱크) (9% Nickel Plate Inner Tank) 탱크 |
|---|---|
| 탱크 용량 | 270,000$m^3$ |
| 내부탱크 | 9% 니켈강 (9% Ni Steel Plate) |
| 외부탱크 | 프리스트레스트 콘크리트 (PS Concrete) |
| 내부탱크 지름(m) | 45 |
| 내부탱크 높이(m) | 42.7 |
| 외부탱크 지름(m) | 48.3 |
| 외부탱크 높이(m) | 46 |
| 코너프로텍션 지름(m) | 45.9 |
| 코너프로텍션 높이(m) | 5 |

다음 그림은 코너프로텍션에 대한 피로수명예측에 사용된 프로그램과 절 차를 간략하게 나타내었다.

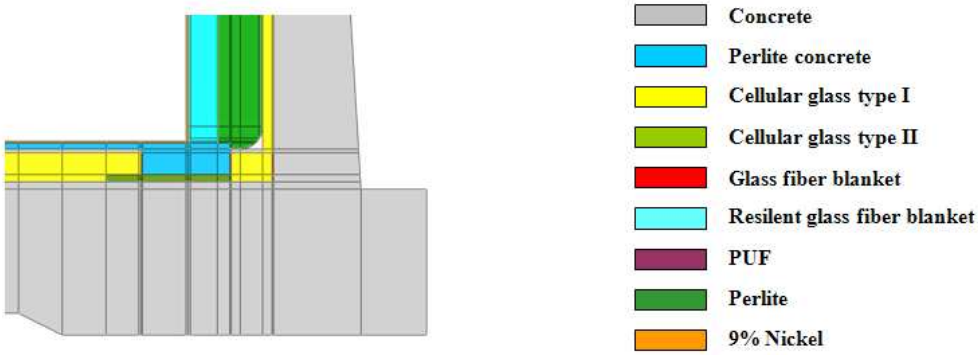



<그림. 73> 코너프로텍션 해석 흐름도

LNG 저장탱크 각 부분에 대한 물성치는 다음과 같다.

<표. 35> LNG 저장탱크 코너프로텍션 구성요소별 물성값

| material | E | Poisson's ratio | Expansion coef. | Density | Thermal conductivity |
|---|---|---|---|---|---|
| concrete | 2.80E+11 | 0.2 | 1.00E-05 | 2350 | 2 |
| cellular glass type I | 1.20E+09 | 0.2 | 6.97E-06 | 135 | 4.40E-02 |
| glass fiber blanket | 1.20E+06 | 0.2 | 6.97E-06 | 24 | 4.90E-02 |
| Perlite concrete | 2.80E+10 | 0.2 | 1.00E-05 | 1000 | 2.70E-01 |
| Resilent glass fiber blanket | 1.20E+06 | 0.2 | 6.97E-06 | 16 | 5.90E-06 |
| PUF | 2.45E+06 | 0.4 | 6.50E-05 | 55 | 2.32E-02 |
| Perlite | 1.00E+09 | 0.2 | 1.00E-05 | 64 | 4.20E-02 |
| 9% Nikel steel | 2.10E+11 | 0.3 | 9.21E-06 | 8000 | 3.01E+01 |




해석 시나리오의 구성은 <표 36>과 같다.

<표. 36> LNG 저장 탱크 해석 시나리오의 구성

| 해석종류 | 적용하중 | 비고 |
|---|---|---|
| 시나리오 4-1<br>Rectangular Knuckle<br>코너프로텍션 구조 및<br>피로해석 | - 자중, 단열재 압력, LNG 정수압,<br>온도차에 의한 열하중 | |
| 시나리오 4-2<br>Circular Knuckle<br>코너프로텍션 구조 및<br>피로해석 | - 자중, 단열재 압력, LNG 정수압,<br>온도차에 의한 열하중 | |

LNG 저장탱크 해석 시나리오 4-1 및 4-2의 상세 내용은 <표 37>와 같이 경계조건, 모델링 요소, 하중조건 및 방법론에 대한 설명이다.

<표. 37> 시나리오 4-1 및 4-2의 상세 내용

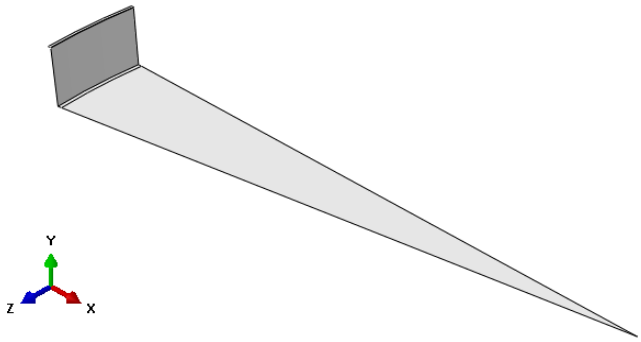
| | |
|---|---|
| 대상 | LNG 저장탱크 코너프로텍션 |
| 경계조건 | 외부탱크의 바닥 면 Z방향 병진 자유도 구속, 외조와 코너프로텍션 사이에 contact 조건 적용, 내조와 코너프로텍션 사이에 contact 조건 적용. |
| Element type | 외조,단열재 및 내조 - solid, 코너프로텍션 - shell |
| Loading | 가스압(29 Kpa), 정수압(201 Kpa), 단열재 압력(1.567 Kpa) |
| 방법론 | 구조해석 프로그램 ABAQUS를 이용해서 최고 액위에서 코너프로텍션에 작용하는 응력을 구한 후 피로해석 프로그램 FEMFAT을 이용해서 코너프로텍션에 작용하는 반복하중 정의 및 피로(내구)해석 진행. |

코너프로텍션의 1/36 모델을 이용해서 해석을 진행하였다.

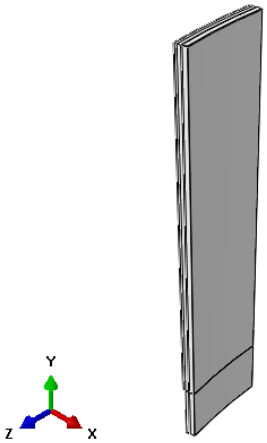
<표. 38> 코너프로텍션의 주요 치수

| | |
|---|---|
| Corner protection | 80.2m inside diameter |
| Inner tank height | 36.3m |
| Pump restart level | 2m |
| Design liquid level | 45m |

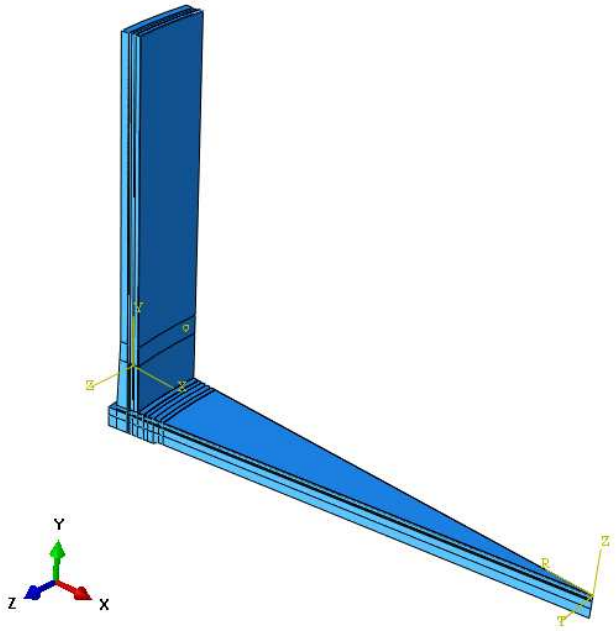
- Corner Protection -shell element로 구성
- Insulation -solid element로 구성
- Inner tank -solid element로 구성
- Outer tank -solid element로 구성



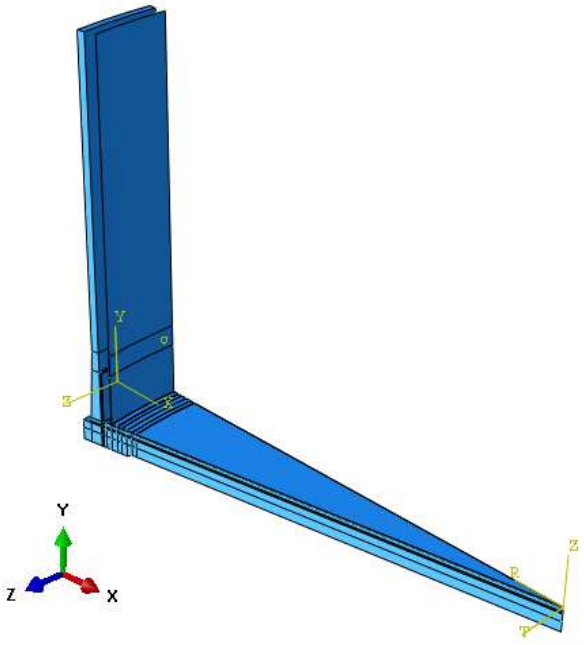

<그림. 74 Rectangular Knuckle 코너프로텍션>




<그림. 75 Perlite 단열재>




<그림. 76> Heat Transfer Analysis를 위한
Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델




<그림. 77> Static Analysis를 위한
Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델

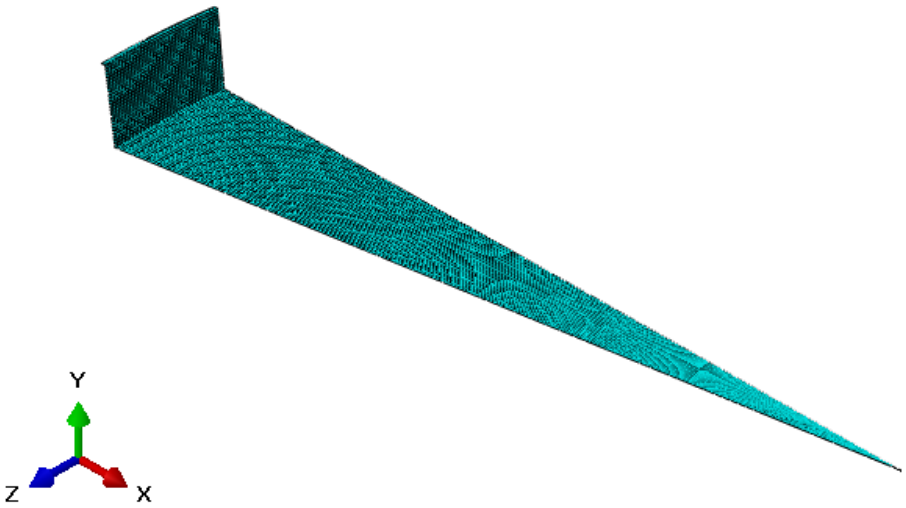
① 유한요소 모델

○ Rectangular Knuckle 코너프로텍션

- Abaqus의 shell element DS4 type을 사용하였고 global size 0.2로 지정했다.

<표. 39> Rectangular Knuckle 코너프로텍션 유한요소 모델 정보

| element수 | node수 | element type |
|---|---|---|
| 10280 | 10,538 | DS4 |



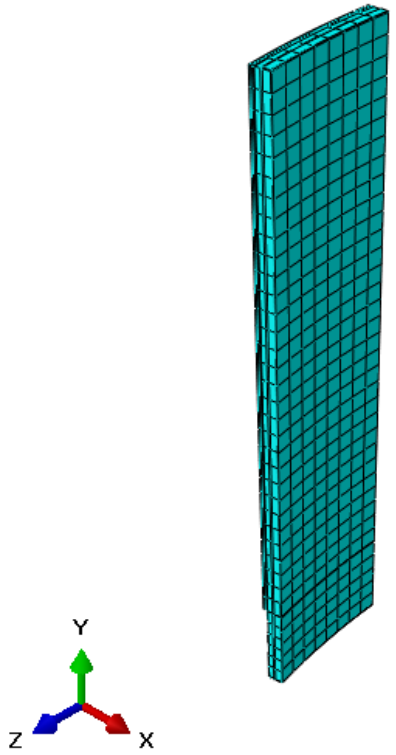

<그림. 78> Rectangular Knuckle 코너프로텍션 유한요소모델

○ Perlite 단열재

- Abaqus의 solid element C3D8R type 사용하고 global size 0.5로 지정했다.

<표. 40> Perlite 단열재 지지부의 유한요소 모델 정보

| element수 | node수 | element type |
|---|---|---|
| 39,168 | 59,514 | DC3D8 |

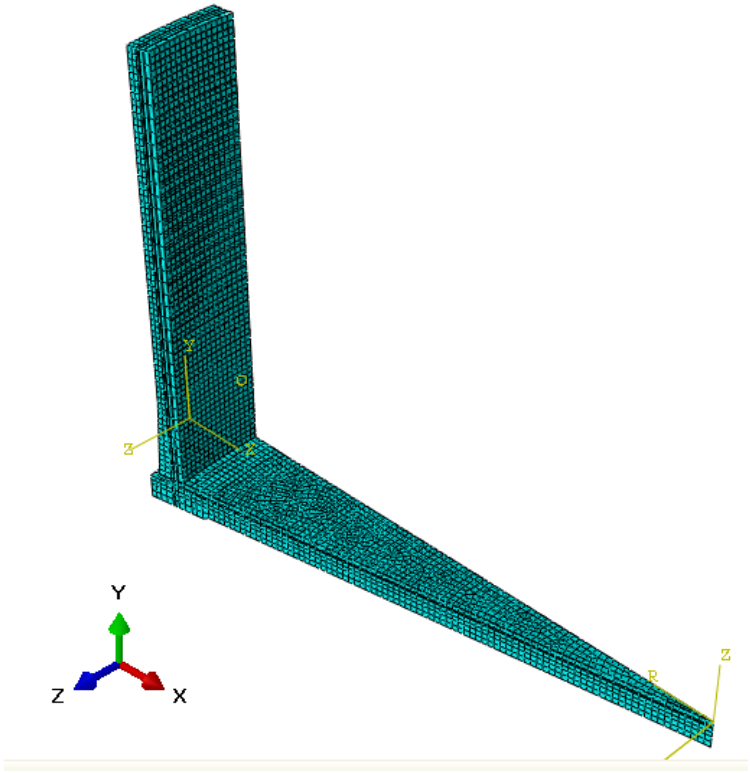



<그림. 79> Perlite 단열재 유한요소모델

○ Heat Transfer Analysis를 위한 Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델

<표. 41> Heat Transfer Analysis를 위한 Rectangular Knuckle 코너프로텍션 유한요소모델 정보

| element수 | element type |
|---|---|
| 16228 | DC3D8 |
| 10240 | DS4 |
| 40 | DS3 |

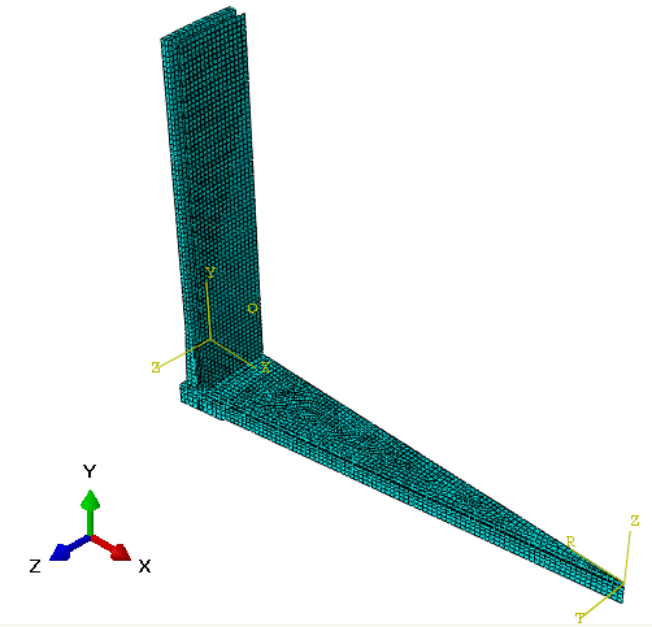



<그림. 80> Heat Transfer Analysis를 위한 Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델의 유한요소 모델

○ Static Analysis를 위한 Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델

<표. 42> Static Analysis를 위한 Rectangular Knuckle 코너프로텍션 유한요소모델 정보

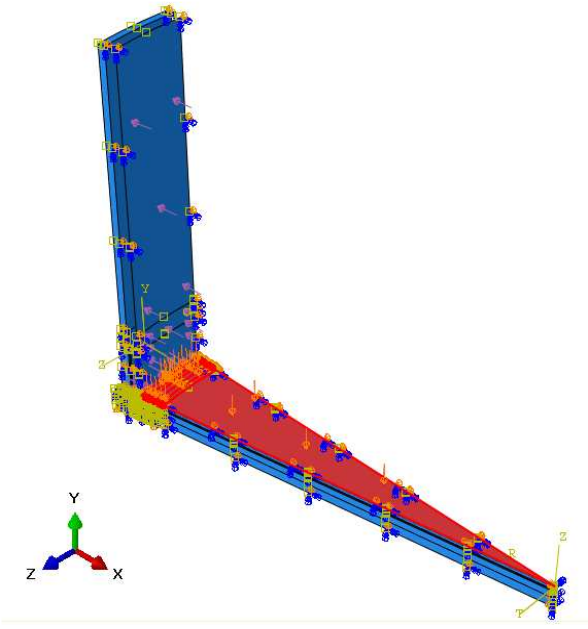
| element수 | element type |
|---|---|
| 13876 | C3D8R |
| 10240 | S4R |
| 40 | S3 |




<그림. 81> Static Analysis를 위한
Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델의
유한요소 모델

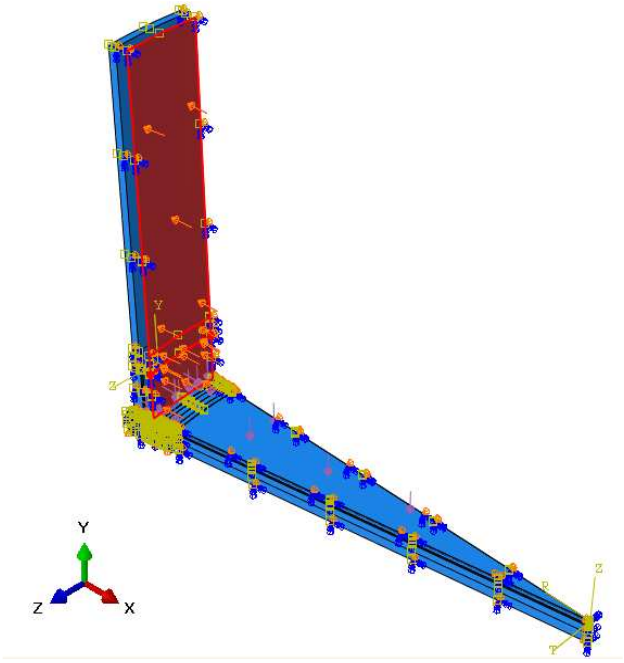
② 하중조건

○ LNG 자중(201,000Pa)



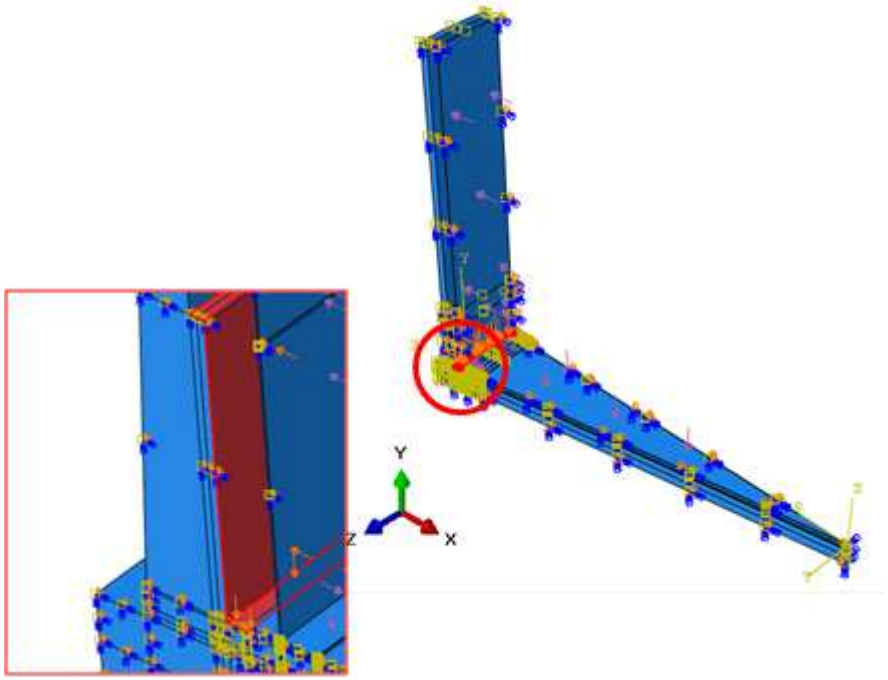

<그림. 82> 내부탱크 바닥면에 작용하는
LNG 자중

○ 정수압(201000Pa)



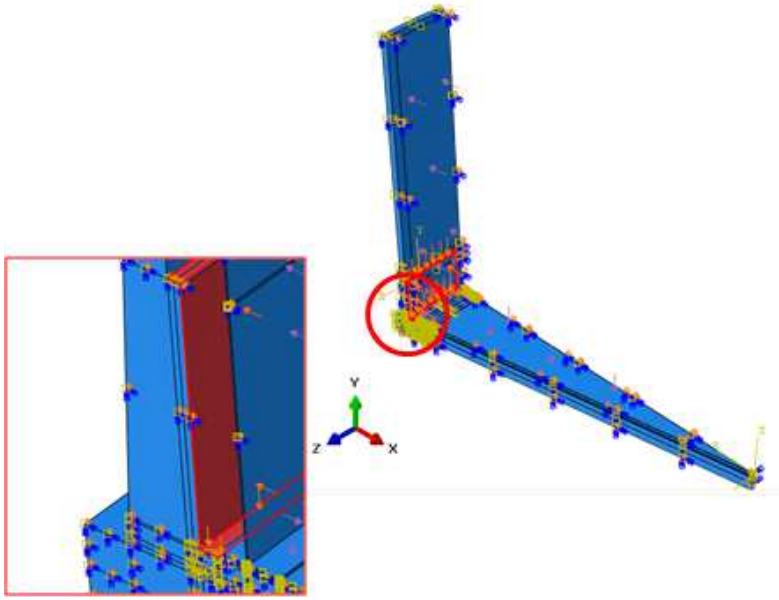

<그림. 83> 내부탱크 벽면에 작용하는
정수압

○ LNG 압력(29,000Pa)




<그림. 84> 코너프로텍션과 내조 벽면에 작용하는 가스 압력

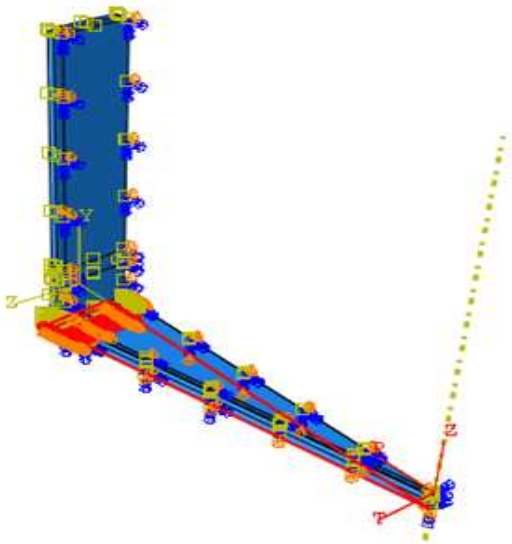
○ Perlite 단열재 압력(1,567Pa)




<그림. 85> 코너프로텍션과 내조 벽면에 작용하는 Perlite 단열재 압력

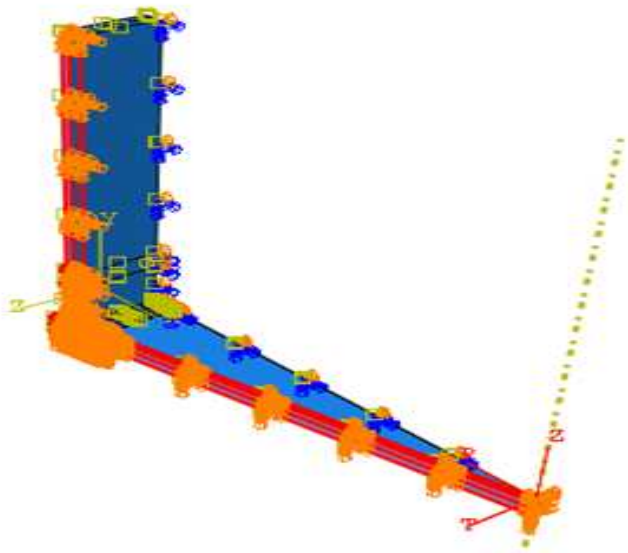
③ 경계조건

외부탱크 밑면에 대해서 Z축 변위를 구속하였다.



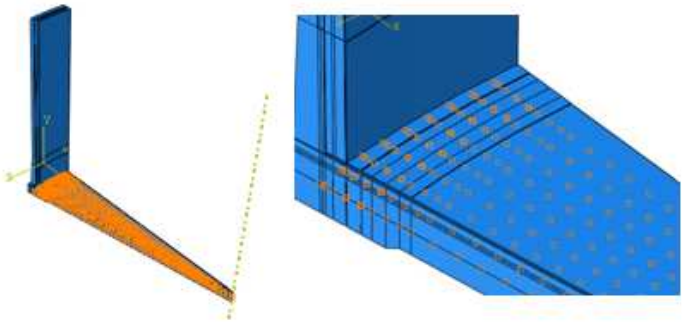

<그림. 86> 외부탱크 밑면의 Z축 변위 자유도를 구속함.

○ 대칭조건 적용



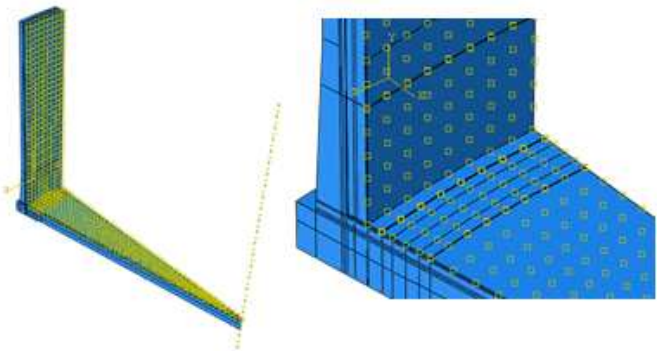
<그림.87>원통좌표계를 이용하여 측면에 대해 대칭조건을 적용함

○ Heater 온도조건 적용



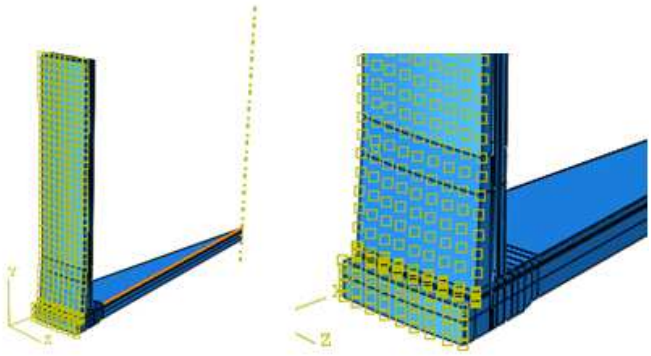
<그림. 88> Heater 조건 5℃적용

○ Inner tank 온도조건 적용



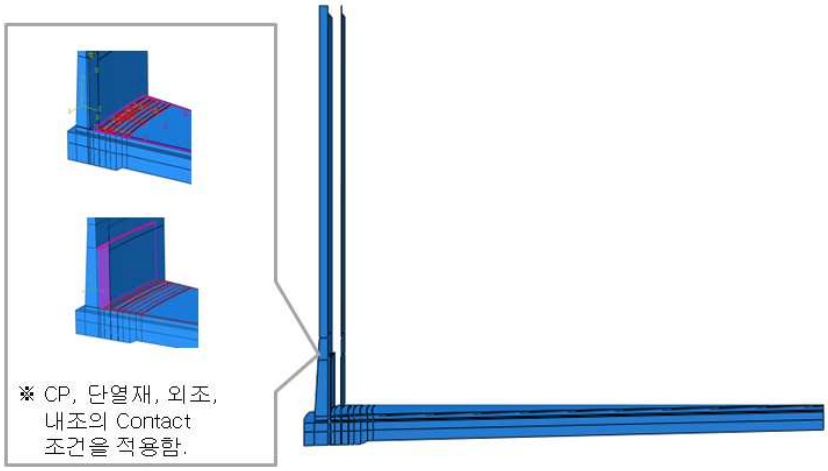
<그림. 89> Inner tank 조건 -170℃ 적용

○ Outer tank 온도조건 적용



<그림. 90> Outer tank 조건 37℃ 적용

○ 코너프로텍션, 단열재, 외조, 내조 사이 Tie 조건 및 Contact 조건 적용




<그림. 91> 코너부 Tie조건 및 Contact 조건

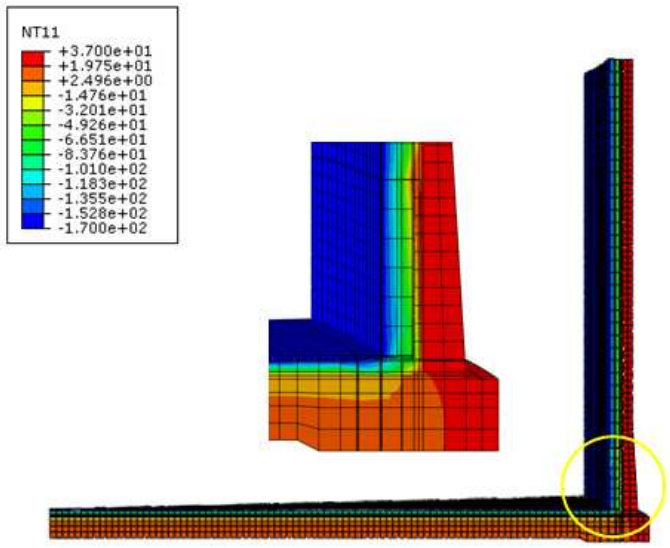
<표. 43> Abaqus에 contact 상세설정

| contact type | sliding formulation | discretization method | shell 두께 고려 | frictionless (무마찰) |
|---|---|---|---|---|
| surface-to-surface | Finite sliding | surface to surface | Y | Y |

④ 열전달 및 구조해석 결과

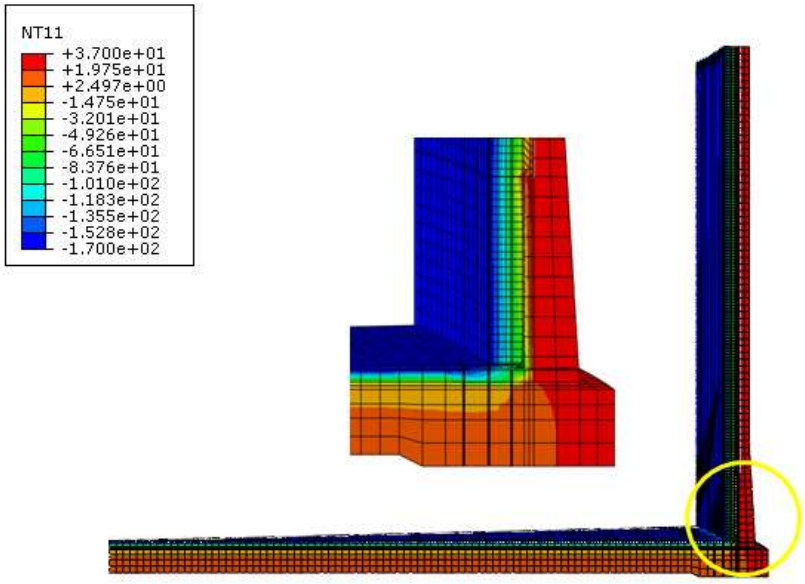
○ 열전달 해석결과

- Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델



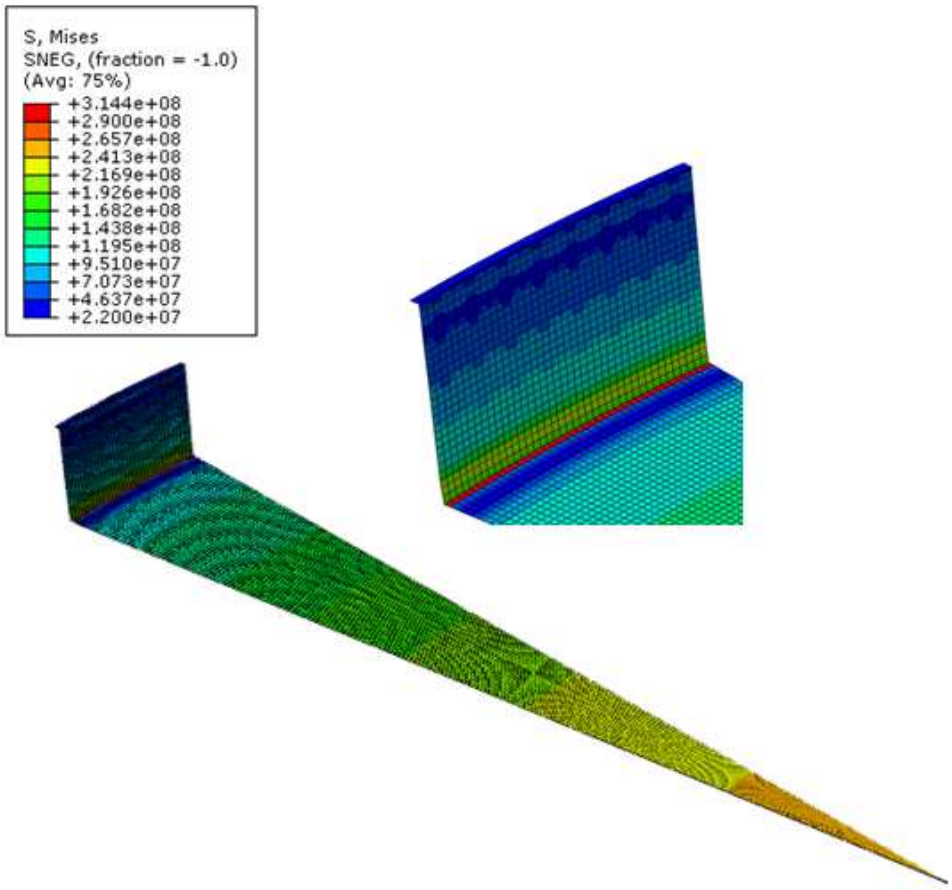

<그림. 92> Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델 온도분포 결과

- Circular Knuckle 코너프로텍션 모델




<그림. 93> Circular Knuckle 코너프로텍션 모델 온도분포 결과

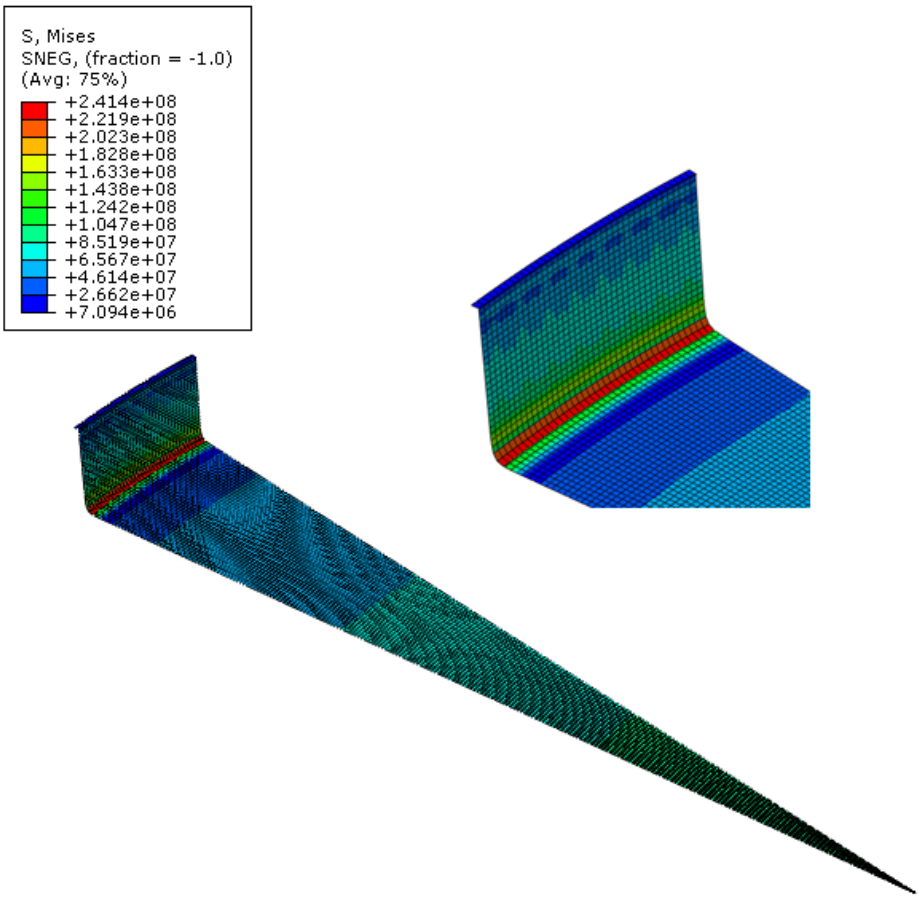
○ 구조해석결과




<그림. 94> Rectangular Knuckle 코너프로텍션 모델 구조해석 결과

<표. 44> Max & Min 응력

| | |
|---|---|
| Max. 응력 | 314.4Mpa |
| Min. 응력 | 22Mpa |




<그림. 95> Circular Knuckle 코너프로텍션 모델 구조해석 결과

<표. 45> Max & Min 응력

| | |
|---|---|
| Max. 응력 | 241.4Mpa |
| Min. 응력 | 7Mpa |

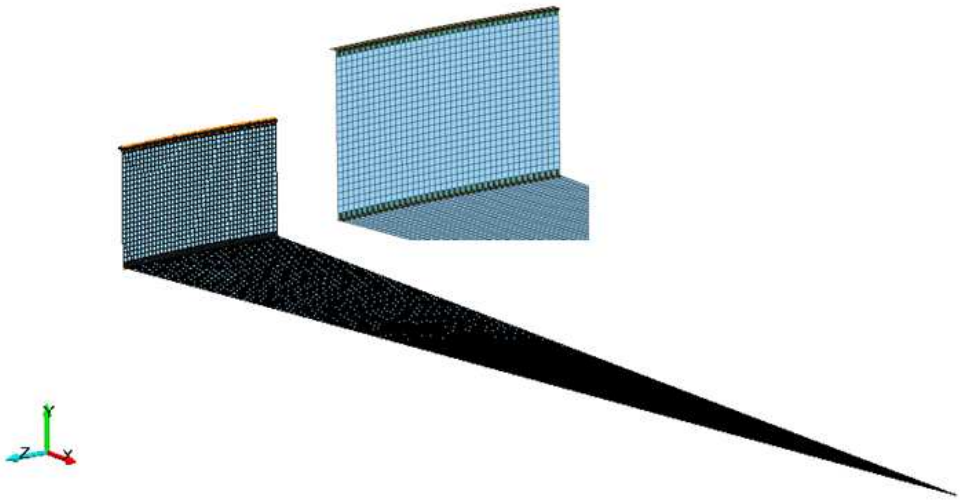
⑤ 피로해석

피로해석 프로그램 FEMFAT을 사용하여 용접부위를 정의하고 구조해석 결과를 바탕으로 용접부위에 대한 피로 수명을 예측 하였다.

FEMFAT은 제품에 대한 안전의 판단 기준으로 마이너의 손상법칙 (Miner's Rule)을 이용하여 손상(damage)값을 산출하고 내구성능을 평 가한다. 피로파괴는 피로하중에 의한 일이 재료가 흡수할 수 있는 일의 총량에 도달했을 때 일어나며, 피로손상은 최대응력이 피로한도 응력보 다 큰 경우만 일어난다는 가정아래 유도된 것으로 수식

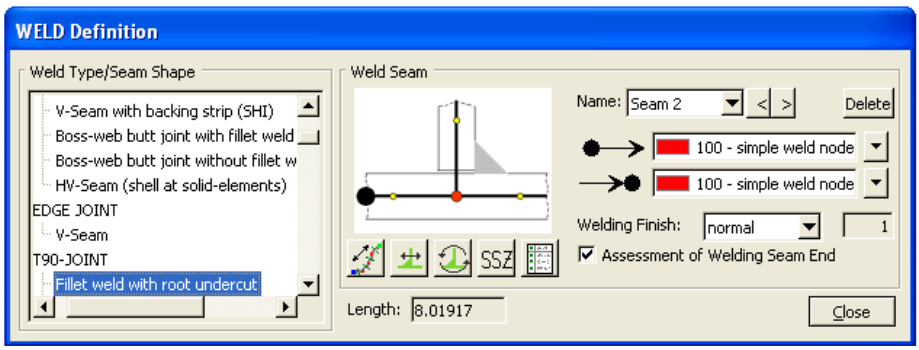
$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \cdots\cdots + \frac{n_n}{N_n} = 1$ 을 만족할 때 피로파괴가 발생한다는 것이다.

피로해석은 사용수명을 10000cycle로 가정하고 LNG가 한 달에 4번 순환한다는 가정 하에 해석하였다.

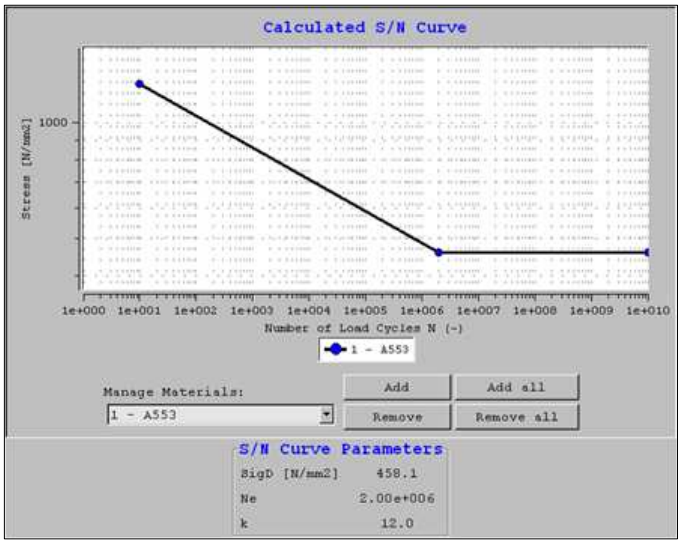


<그림. 96> 코너프로텍션의 용접부위 정의

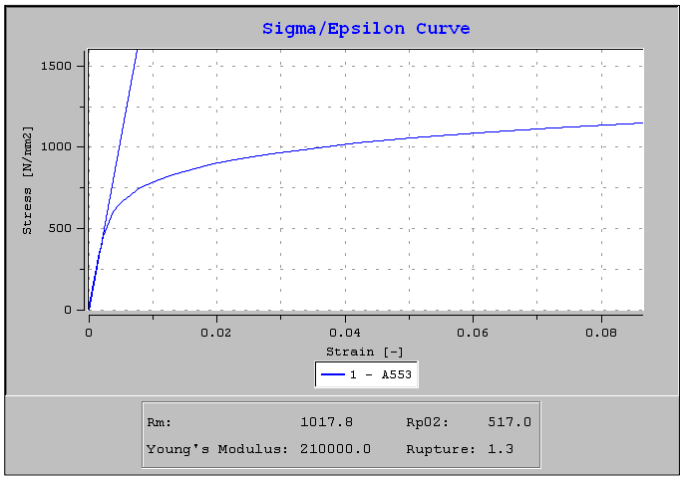
<그림 96>은 FEMFAT을 이용해서 내조에 용접부위를 정의한 그림을 나타내고 있다. 이렇게 용접부위를 정의하고 나면 <그림 97>과 같이 용접특성을 정의할 수 있다.



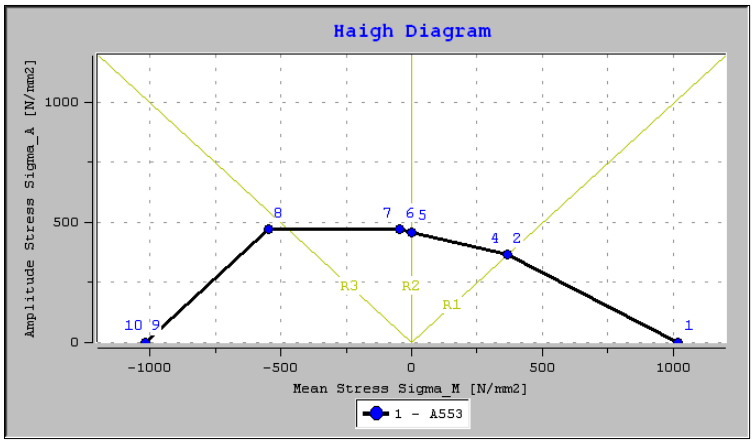

<그림. 97> 용접특성 정의




<그림. 98> 코너프로텍션 재료 A553의 S-N 선도




<그림. 99> 코너프로텍션 재료 A553의 응력-변형률 선도




<그림. 100> 코너프로텍션 재료 A553의 Haigh 선도

FEMFAT을 통해서 피로(내구)해석을 수행할 경우, 피로해석의 결과는 Damage로 나타난다. FEMFAT에서 $Damage = \frac{n_1}{N_1}$ 이다. 여기서 n은 가정수명을 나타내며 N은 실제수명을 나타낸다. 즉, 실제수명 $N_1 = \frac{n_1}{Damage}$ 이다.

내조해석의 경우 Welding finish의 값을 0.89 및 0.7로 설정해서 Damage 값을 비교하였다. Welding finish는 용접품질을 나타내는 계수이며 값이 작을수록 용접품질이 우수함을 의미한다.

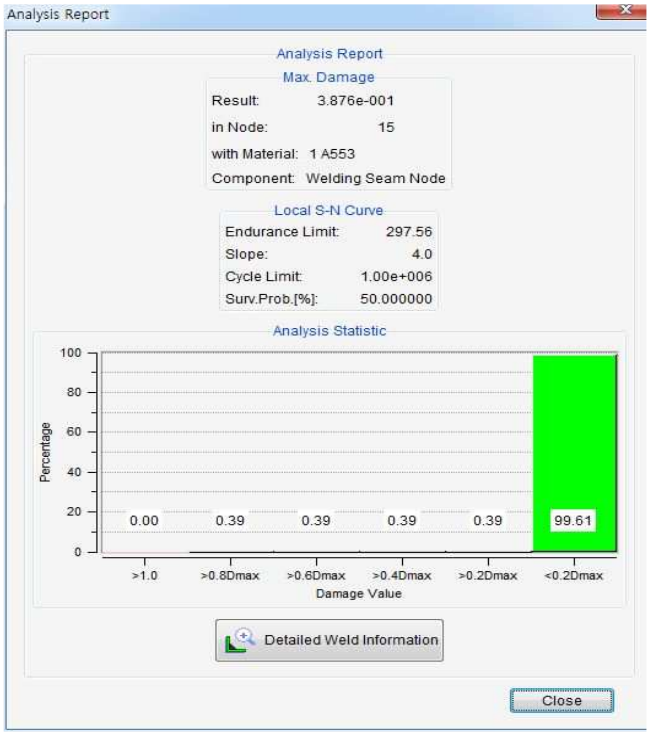
가정 수명 n=10000 cycle

수명 해석 결과 damage D

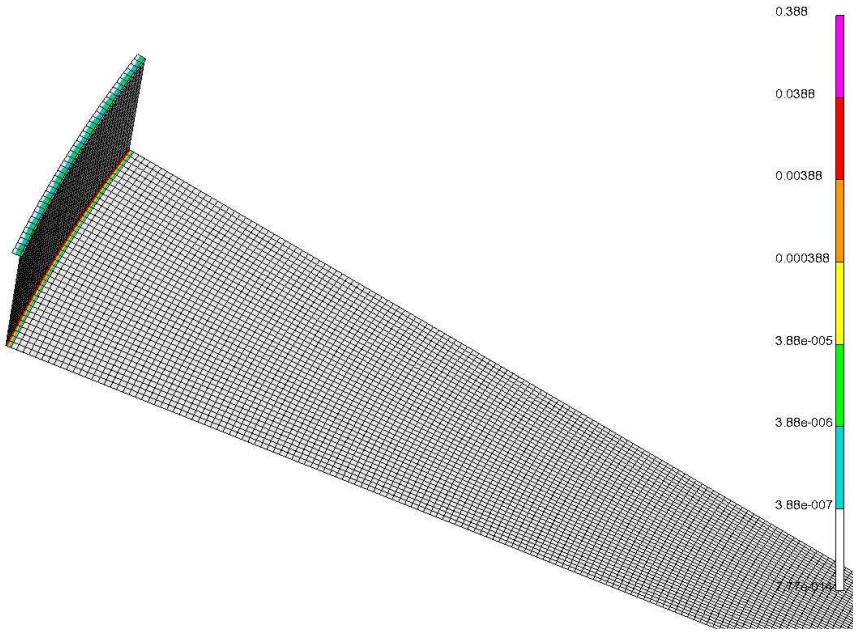
실제 수명 N=n/D

한 달 동안 LNG 저장탱크가 4회 가동 된다고 가정하면 1년에 48cycle이 된다.

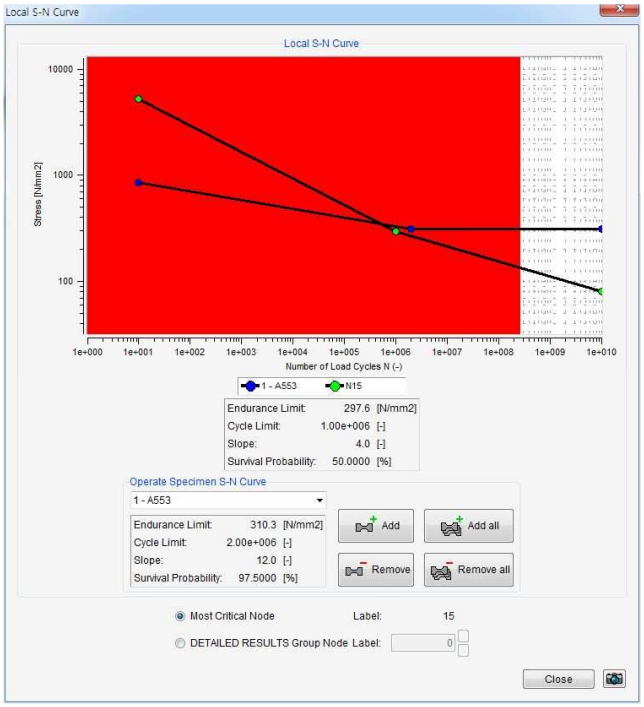
㉮ Rectangular Knuckle 코너프로텍션의 경우 피로해석 결과 damage D=3.876e-01



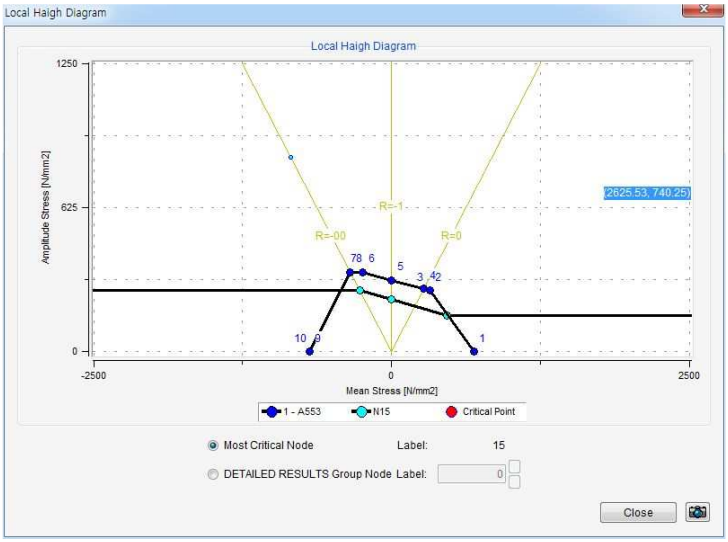

<그림. 101> Rectangular Knuckle 코너프로텍션의 최대 Damage




<그림. 102> Rectangular Knuckle 코너프로텍션의 Damage 분포




<그림. 103> 피로해석을 통해 수전된 S-N 선도




<그림. 104> 피로해석을 통해 수정된 Haigh 선도

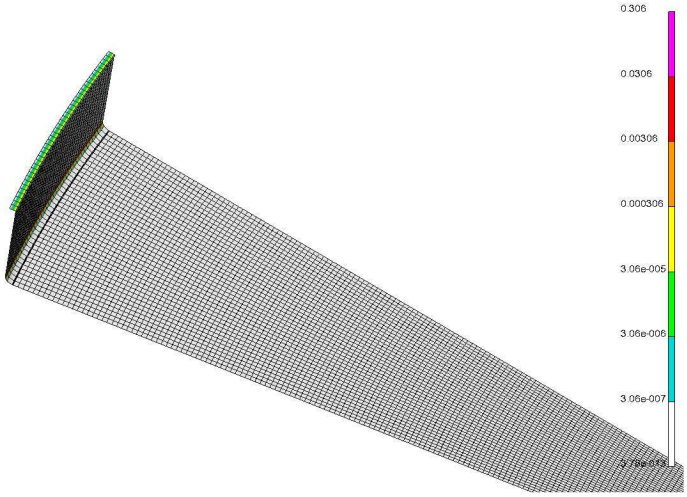
실제 cycle수는 10,000cycle/3.876e-001=25799cycle이며 수명은 25799/48 (cycle/year)이므로 537년이다.

㉡ Circular Knuckle 코너프로텍션의 경우 피로해석 결과 damage D=4.929e-01




<그림 105> Circular Knuckle 코너프로텍션의 최대 Damage

실제 cycle수는 10,000cycle/4.929e-01=16189cycle이며 수명은 20288/48 (cycle/year)이므로 422년이다.




<그림. 106> Circular Knuckle 코너프로텍션의 Damage 분포

## 2. 외부탱크 수명평가 기법

### 가. LNG 저장탱크 콘크리트 외조의 열화 종류 및 메커니즘

#### (1) 일반적인 콘크리트 열화

LNG 저장탱크 콘크리트 외조에서 발생할 수 있는 열화의 종류와 그에 따르는 원인을 파악하였다. 일반적으로 콘크리트에 발생할 수 있는 열화는 크게 일반적인 콘크리트 열화와 콘크리트 내구성에 치명적인 열화로 나타낼 수 있다. 일반적인 콘크리트 열화와 콘크리트 내구성에 치명적인 열화에 대한 설명은 <표 46>과 <표 47>에서 확인할 수 있다.

<표. 46> 일반적인 콘크리트 열화

| 열화 종류 | 열화 현상 내용 |
|---|---|
| 박리 | 콘크리트 표면의 모르타르가 손실되는 현상 |
| 층분리 | 철근의 상부 또는 하부에서 콘크리트가 층을 이루며 분리되는 현상 |
| 박락 | 콘크리트의 균열을 따라 원형으로 떨어져 나가는 층분리 현상 |
| 들뜸 | 모르타르, 타일 등이 시간이 지나면서 건습, 열응력의 바복 등에 의해서 부착력이 감소하여 들뜨는 현상 |
| 백화 | 콘크리트 내부의 수분에 의해 염분이 콘크리트 표면에 고형화한 현상 |
| 충돌현상 | 외부에서의 충격 등에 의해 콘크리트가 떨어져 나아가는 현상 |
| 누수 | 배수공과 시공이음의 결함, 균열 등으로 인한 누수현상 |
| 팝아웃 | 팽창성 골재가 콘크리트의 표면 가까이에 존재하는 경우나 기존의 철근이 현저 하게 녹슬어 팽창하는 경우 원추형의 구덩이 모양으로 파괴되는 현상 |
| 취약표층 | 동결융해, 부식성 액체 및 부식성 가스에 의해 표층부 콘크리트의 조직이 흐트러지거나, 시멘트페이스트가 약해지는 현상 |
| 마모 | 물흐름 작용에 의한 마모, 캐비테이션 마모 |
| 녹오염 | 철근이나 매립된 금속물이 부식하여 이어치기 한 부분이나, 균열부분에서 녹이 흘러나오기도 하고, 콘크리트 구조물의 상부에 설치되어진 철골구조물이 부식하여 콘크리트를 오염시키는 현상 |

<표. 47> 콘크리트 내구성에 치명적인 열화

| 열화 종류 | 열화 현상 내용 |
|---|---|
| 균열 | 인장을 받는 부재나 부재의 일부에 재료의 결함 또는 과도한 하중 등으로 인하여 원래 연결되어 있던 재료가 분리되어 발생하는 작은 틈 |
| 탄산화 | 공기중의 탄산가스와 콘크리트중의 수산화칼슘이 반응하여 알칼리성을 상실하는 현상 |
| 동결융해 | 콘크리트중의 수분이 동결, 융해를 반복하면서 콘크리트를 파괴시키는 현상 |
| 알칼리골재반응 | 시멘트의 알칼리 성분과 골재중의 반응에서 실리카 성분이 수분의 존재하에 장기간에 걸쳐 일어나는 체적팽창성 반응-균열을 발생시켜 내구성 저하 |
| 염해 | 염화물 이온의 침투로 강재를 부식, 콘크리트의 균열 발생 |

나. 외조의 내구수명을 위한 열화의 평가 방법

(1) 파괴(DT) 시험 방법

(가) 균열의 평가

철근콘크리트(RC) 구조물에는 강구조물과 달리 항상 균열이 존재한다. 이러한 균열은 구조체 안전성에 전혀 문제가 없는 경우도 많다. 그러나 구조물의 안전성 문제에서 중요한 요소가 되기도 하는 것 또한 사실이다. 이는 균열이 어떠한 위치에서, 어떠한 크기의, 어떠한 형태로 균열이 있는지에 따라 구조물 안전성에 미치는 균열의 영향이 크게 다르다는 것을 암시한다. 따라서 철근콘크리트 구조물의 안전성 평가에서 평가자에 의한 균열의 발생원인 판정 혹은 예측은 매우 중요한 일이다.

<표. 48> ACI-224 위원회

| 노출조건 | 허용 균열폭 (mm) |
|---|---|
| 건조한 외기 또는 보호막이 있는 경우 | 0.40 |
| 습한 외기 또는 지중 | 0.30 |
| 제빙용 화학 혼합제를 사용할 때 | 0.18 |
| 해수 및 건습이 교차되는 경우 | 0.15 |
| 수밀 구조물 | 0.10 |

<표. 49> CEB-FIP 국제지침

| 노출등급 | 철근콘크리트 (mm) | 프리스트레스트 콘크리트 (mm) | |
|---|---|---|---|
| | | Post-Tension | Pre-Tension |
| 1 | - | 0.2 | 0.2 |
| 2 | 0.3 | 0.2 | 인장 허용 않음 |
| 3 & 4 | 0.3 | 인장을 허용하지 않으나 허용할 경우 0.2 | |

<표. 50> CEB-FIP(국제지침) 규준에서 정의된 노출등급 기준

| 노출등급 | | 환경조건 |
|---|---|---|
| 건조환경 | | ·일반적 주거 또는 사무실 건물의 내부 |
| 습윤환경 | 동결되지 않는 경우 | ·습도가 높은 지역의 건물내부<br>·건물 외부 부재<br>·유해성 없는 흙 또는 물에 접촉되는 부재 |
| | 동결되는 경우 | ·동결에 노출되어 있는 외부 부재<br>·유해성이 없는 흙 또는 물에 접촉되면서 동결되는 환경<br>·습도가 높고 서리에 노출되어 있는 내·외 부재 |
| 서리, 제빙제가 있는 환경 | | ·동결과 제빙제에 노출되어 있는 내·외 부재 |
| 해수환경 | 동결되지 않는 경우 | ·부분적으로 해수에 잠기거나 해수가 튀기는 지역<br>·염분으로 포화된 공기를 갖는 환경(해안지역) |
| | 동결되는 경우 | ·부분적으로 해수에 잠기거나 해수가 튀기는 지역으로 동결되는 지역<br>·염분으로 포화된 공기 환경으로 동결되는 지역 |

(나) 탄산화의 평가

구조물의 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 우선 구조물의 구성재료인 콘크리트 및 강재의 개개 열화상태를 평가함과 동시에 그들의 상태를 정량화하고 구조물의 성능을 평가할 필요가 있다.

구체적인 성능평가 수법으로서는 점검 시 및 예정공용기간 종료 시에 있어서 재료의 성질을 예를 들어 구조계산식에 대입하는 것에 의해 내하력을 구하여 안전성능을 조사하고 처짐

량이나 변형량을 구하여 사용성능을 조사하고 더욱이 균열·박리의 범위·밀도, 강재의 부식도 등에서 제3자 영향도, 미관·경관을 조사하는 것 등을 생각할 수 있다.

이들 조사에 있어서 현상의 평가는 비교적 명쾌하게 되는 경우도 잇지만 예정 공용기간 종료 시의 물성값 예측은 현상에서 반드시 충분한 정도를 갖고 있지 못하며 상기의 방법에 의한 조사가 어려운 경우가 많다.

구조물의 제반성능을 정량적으로 평가하는 것은 성능평가형 설계체계 중의 성능평가 수법으로서는 이상적이지만 현상에서는 반드시 이와 같은 시법이 확립되어 있지 않다. 그러므로 현실적으로는 구조물의 외관변화 상태에서 <표 51>에 의해 평가을 실시하고 <표 52>를 참고로 구조물의 성능저하를 반정량적으로 평가하는 방법을 사용해도 좋다.

또한, 유사 구조물(구조형식, 재료, 시공, 환경, 공용상태)의 상세한 유지관리 기록이 남아 있고 또한 그것까지의 열화진행상황이 유사한 경우에는 그 구조물의평가결과도 평가의 참고로 하는 것이 가능하다.

<표. 51> 구조물의 외관상 등급과 열화 상태

| 구조물<br>외관상 등급 | 콘크리트의 상태 |
|---|---|
| 상태 Ⅰ-1<br>(잠복기) | 외관상 변상이 보여지지 않고 탄산화거리가 발청한계 이상 |
| 상태 Ⅰ-2<br>(잠복기) | 외관상 변상이 보여지지 않고 탄산화거리가 발청한계 미만, 부식개시 |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 전기) | 부식균열 발생 |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 후기) | 부식균열이 다수발생, 녹물이 보여지고,<br>부분적인 박리·발락이 보여지고 부식량 증대 |
| 상태 Ⅲ<br>(열화기) | 부식균열이 다수발생, 균열폭이 크고, 녹물이 보여지고 박리·발락이 보여짐 |

<표. 52> 구조물의 외관상 등급과 표준적인 성능저하

| 구조물<br>외관상 등급 | 안전성능 | 사용성능 | 제3자 영향도<br>미관·경관 |
|---|---|---|---|
| 상태 Ⅰ-1<br>(잠복기) | - | - | - |
| 상태 Ⅰ-2<br>(잠복기) | - | - | - |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 전기) | - | - | 미관의 저하<br>- 균열·녹물<br>- 강재 노출<br>- 제3자에의 영향<br>- 박리·박락 |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 후기) | - | 강성저하<br>(변형증대, 진동발생)<br>- 강재단면적 감소<br>- 강재와 콘크리트 부착력저하<br>- 들뜸·박리에 의한 콘크리트 단면적 감소 | |
| 상태 Ⅲ<br>(열화기) | 내하력·인성 저하<br>- 강재 단면적 감소<br>-들뜸·박리에 의한 콘크리트 단면 감소 | | |

평가 및 판정의 결과, 대책이 필요하다고 판정된 경우에는 ①점검강화, ②보수, ③보강, ④경관회복, ⑤사용성 회복, ⑥기능성 향상, ⑦공용제한, ⑧해체·철거를 구조물의 외관상 등급에 따라 <표 53>과 같이 어느 것을 선정할 필요가 있다.

정량적인 평가에 기초하여 판정이 곤란한 경우에는 구조물의 열화상태 등급을기준으로 실시하는 것으로 한다. 대책은 구조물의 종류나 중요도, 열화의 진행속도, 유지관리구분에 의해 다르지만 표준으로서 이하의 기준에 따르면 좋다.

<표. 53> 구조물의 외관상 등급과 열화 상태

| 구조물<br>외관상 등급 | 점검<br>강화 | 보수 | 보강 | 경관<br>회복 | 사용성<br>회복 | 기능성<br>회복 | 공용<br>제한 | 해체<br>철거 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 상태 Ⅰ-1<br>(잠복기) | ○ | (○) | | | | | | |
| 상태 Ⅰ-2<br>(잠복기) | ○ | ○ | | | | | | |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 전기) | ◎ | ◎ | | ◎ | | | | |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 후기) | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | ○ | ○ | |
| 상태 Ⅲ<br>(열화기) | | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |

(◎ : 표준적인 대책, ○ : 경우에 따른 대책, (○) : 예방적으로 실시되는 대책)

(다) 염해의 평가

염해에 의한 구조물의 성능저하는 강재의 부식에 기인하므로 구조물이 잠복기, 진전기, 가속기, 열화기 중 어느 시기인가에 유의하여 영향을 받는 성능을 평가한다. 구조물의 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 우선 구조물의 구성재료인 콘크리트 및 강재 각각의 열화상태를 평가함과 동시에 그것을 정량화하고 구조물의 성능을 평가할 필요가 있다.

구체적인 성능평가방법으로는 각 점검 시 및 예정사용기간 종료 시의 재료성질을 구조계산식에 대입하여 내하력을 구하여 안전성능을 조사하고, 처짐이나 변형을 구하여 사용성능을 조사하여야 한다. 또한, 균열·박리의 범위 및 강재의 부식도 등을 조사하여야 하며 미관·경관을 조사하여야 한다. 이들 조사에 의하여 실제 열화정도를 비교적 명확하게 밝힐 수 있는 경우도 있지만, 예정사용기간 종료 시의 물성치의 예측 등은 상기의 방법에 의한 조사가 어려운 경우가 있다. 그러므로 육안으로 살핀 염화물이온의 확산계수, 강재의 부식속도를 바탕으로 열화예측을 시행하고, 내구성능을 조사함으로써 이를 보충한다. 이 경우, 성능조사방법의 정밀도와 함께 열화예측방법의 정밀도도 문제가 되므로 예측방법의 선정에 충분한 검토가 필요하고 나아가 적절한 안전도를 감안하는 것이 중요 하다.

구조물의 성능은 구조물의 외관변형으로부터 <표 54>에 따라 등급을 정하고 <표 55> 을 참고로 구조물의 성능저하를 반정량적으로 평가하는 방법을 쓰는 것이 좋다.

<표. 54> 구조물의 외관상 등급과 표준적인 성능저하

| 구조물<br>외관상 등급 | 안전성능 | 사용성능 | 제3의 영향<br>(미관·경관) |
|---|---|---|---|
| 상태 Ⅰ-1<br>(잠복기) | - | - | - |
| 상태 Ⅰ-2<br>(잠복기) | - | - | - |
| 상태 Ⅱ<br>(가속기) | - | - | 미관상태 악화<br>균열<br>녹물<br>강재의 노출<br>제3의 영향<br>박리<br>박락 |
| 상태 Ⅲ<br>(열화기) | 내하력 및 연성저하, 강재단면적의 감소, 파단, 들뜸 및 박리에 의한 콘크리트단면의 감소 | 강성저하(변형의 증대, 진동발생), 강재단면적의 감소, 강재와 콘크리트의 부착력 저하, 들뜸 및 박리에 의한 콘크리트 단면의 감소 | |

평가 및 판정의 결과 대책은 ①점검강화, ②보수, ③보강, ④경관회복, ⑤사용성 회복, ⑥기능성 향상, ⑦공용제한, ⑧해체·철거로 구분한다. 정량적인 평가에 의한 판정이 어려운 경우에는 구조물의 열화상태의 등급을 기준으로 판정하며, 대책은 구조물의 종류나 중요도, 열화의 진행속도, 유지관리구분에 따라 다르지만 표준적으로 표 8을 기준으로 한다.

<표. 55> 구조물의 외관상의 등급과 대책

| 구조물<br>외관상 등급 | 점검<br>강화 | 보수 | 보강 | 경관<br>회복 | 사용성<br>회복 | 기능성<br>회복 | 공용<br>제한 | 해체<br>철거 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 상태 Ⅰ-1<br>(잠복기) | ○ | (○) | | | | | | |
| 상태 Ⅰ-2<br>(잠복기) | ○ | ○ | | | | | | |
| 상태 Ⅱ-1<br>(가속기 전기) | ◎ | ◎ | ○ | ◎ | ○ | ○ | ○ | |
| 상태 Ⅲ<br>(열화기) | | ○ | ◎ | ○ | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ |

(◎ : 표준적인 대책, ○ : 경우에 따른 대책, (○) : 예방적으로 실시되는 대책)

(2) 비파괴(DT) 시험 방법

(가) 해머사운딩

해머 사운딩(Hammer Sounding) 기법은 콘크리트 표면상태를 결정하는 손쉬운 비파괴검사이다. 도로 포장 검사의 체인 드래그 기법과 유사하게 평범한 망치로 콘크리트 표면을 타격하여 진행되고, 타격 시 소리를 주관적으로 해석하여 콘크리트 상태를 판단한다. 이 기법은 사용자의 판단에 의해 결과가 좌우되나 일반적으로 신뢰할 수 있는 결과를 도출한다. 속이 찬듯한 소리는 콘크리트 표면 아래에 별다른 이상이 없음을 나타내고 속이 빈 듯한 소리는 콘크리트 표면 아래에 공극, 노후화, 벌집 같은 모양, 혹은 균열이 있음을 나타낸다.

(나) 슈미트 해머(반발 경도법)

반발경도법은 콘크리트 표면 강도를 측정한 값으로부터 압축강도를 판정하는 검사방법이다. 반발 경도법은 일반적으로 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용된다. 슈미트 해머법은 콘크리트의 강도에 따라 반발경도가 변화하는 점을 이용한 방법으로서 시험방법이 간편하고 국제적으로 표준화 되어있다. 이 방법은 콘크리트의 표면부분을 타격하여 반발력을 측정하므로 표면의 상태와 타격조건에 따라 달라질 수 있으므로 콘크리트 구조체 내부의 강도를 정확하게 측정하기는 어려운 점도 있다.

반발경도법의 원리는 슈미트 해머로 콘크리트 면을 타격시 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F) 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 한다. 타격시 해머내의 반동량을 반발도로 표시하며, 이 반발도의 크기에 따라 콘크리트의 압축강도를 추정한다. 일반적으로 타격시의 반발도는 타격에너지 및 피 타격체의 형상, 크기, 재료의 물리적 특성과의 관계는 물리량에 따라 다르며, 반드시 재료의 강도와 일률적인 관계가 있는 것만은 아니다. 특히, 콘크리트와 같은 불균질한 재료에서는, 슈미트 해머로 표면에서 국부적 타격을 하는 경우의 반발도는 타격면에 존재하는 골재의 유무, 습윤 상태, 콘크리트의 재령 등에 따라 차이가 난다. 그러나 측정 방법이 간편하고, 짧은 시간에 강도 추정이 가능한 사용성과 콘크리트 구조물 전체에 대해 강도 측정이 가능하다는 점에서 유효한 시험이라 할 수 있다.

(다) 초음파 검사

초음파의 투과속도가 콘크리트의 밀도 및 탄성계수에 따라서 변화하는 것을 이용하며, 이 투과속도로부터 콘크리트의 동적 특성, 강도, 균열상태 등을 추정하는 방법이다. 그러나 강도 추정의 정확도는 높지 않으며, 일반적으로 콘크리트의 강도 및 품질비교 또는 균열깊이를 판정하는 수단으로서 이 방법을 사용하고 있다. 강도 추정에 적용할 경우에는 반발경도법과 초음파법의 조합식을 이용하는 것이 바람직하다.

초음파 전달속도를 결정하기 위해서는 재료에서 초음파가 전달되는 거리를 미리 측정하고 장비 상에 나타난 초음파 전달시간을 측정한 후 다음 식에 의해서 구한다.

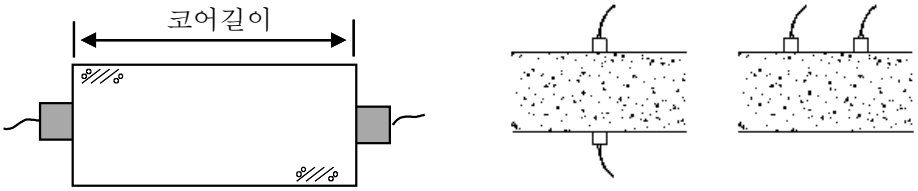
$$\text{전달속도}(Velocity) = \frac{\text{전달길이}(Path\ Length)}{\text{전달시간}(Transit\ \ Time)}$$




<그림. 107> 초음파속도법에 의한 압축강도 추정도

초음파탐사를 위한 탐촉자의 배열은 직접법, 반직접법 및 간접법이 있으며, 간접법과 직접법에서 구한 초음파 전달속도는 근사적으로 다음 식과 같은 관계가 있다.

- $V_d \approx 1.05 V_i$
- $V_d =$ 직접법(Direct method)에 의한 초음파 속도
- $V_i =$ 간접법(Indirect method)에 의한 초음파




(a) 직접법 (b) 간접법

<그림 108> 초음파속도법의 직접법과 간접법

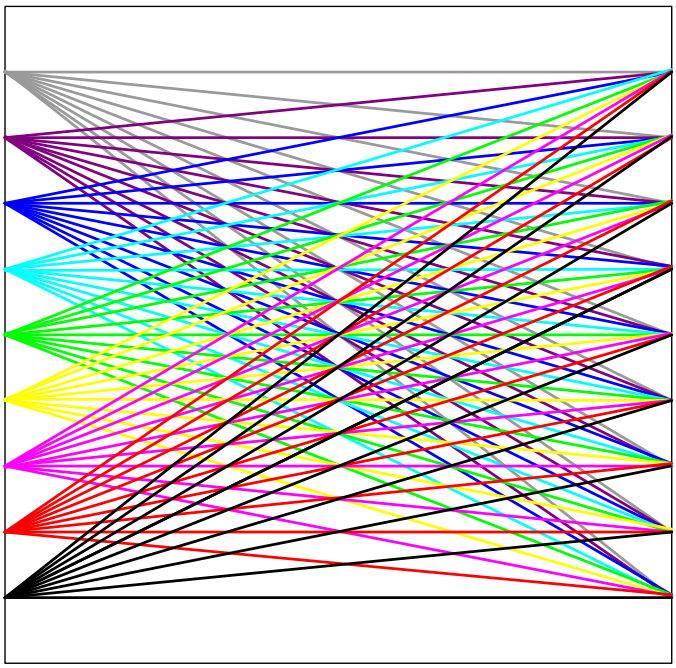
간접법을 수행한 동일 조건의 구조물, 동일한 부위에서 채취한 코어의 종파(직접법)속도를 측정하여 현장에서 측정된 표면파(간접법)속도와 상관관계를 통한 초음파 전달속도를 근사적으로 환산하여 이용할 수 있다. 간접법은 일정거리를 등간격으로 떨어진 5점 이상의 측점을 정하고 초음파의 전달거리( $X_i$ )에 따른 전달시간 $T_i$를 측정한다. 최소자승법에 의해서 회귀직선 식을 구하여 그 기울기를 전달속도 $V_i$로 한다. 회귀직선의 적정성 여부를 판단하기 위해서 회귀직선의 유의성(有意性) 검정에 사용되는 결정계수(Coefficient of determination)를 다음 식에 의해 계산한다.

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{(\Sigma (X_i - \overline{X})(T_i - \overline{T}))^2}{\Sigma (X_i - \overline{X})^2 \Sigma (T_i - \overline{T})^2}$$

* 여기서, $\overline{X}$, $\overline{T}$는 거리 및 전달시간의 평균값

(라) 토모그래피

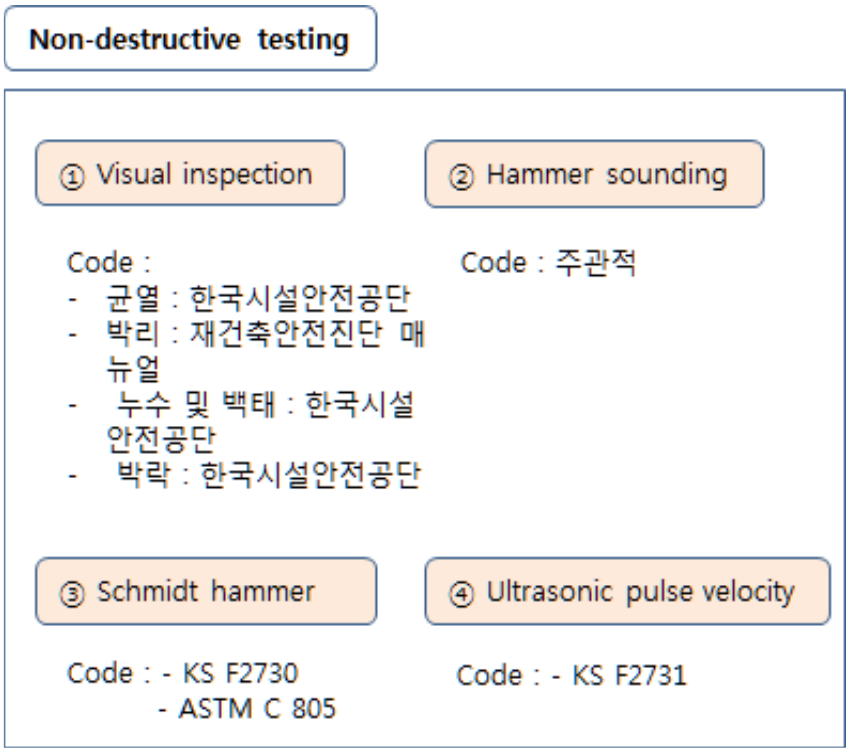
음향 토모그래피(Tomography)는 적용대상의 한 내부 평면 속도를 정의하기 위해 초음파 검사 기법을 사용한다. 직선형 초음파 검사는 콘크리트 표면 안쪽의 비정상에 관한 정보를 제공하는 반면, 토모그램(tomogram)은 많은 초음파 광선 경로를 이용해 콘크리트 표면 안쪽의 특정한 단면에 대한 보다 종합적인 정보를 획득하는데 사용될 수 있다. 파동이나 음파는 직선형이나 사선형 같이 동일한 높이의 직선상에서만 수행되지 않고 송신 위치를 고정한 후 수신 위치를 다양하게 이동시키면서 데이터를 획득한다. 수신부가 열을 따라 이동함으로 송신부와 수신부 사이 거리가 변화하는데 이 거리를 고려한 속도는 U.S. Bureau of Mines 에서 개발된 해석 프로그램에 의해 계산할 수 있다. 이 프로그램은 한 점 주위를 지나는 여러 광선경로의 속도를 수학적인 이터레이션에 의해 그 점에서의 속도 또한 계산된다. 전형적인 토모그래프 단면에 대한 광선경로 (파동 혹은 음파)는 <그림 109>에서 나타내었다. 토모그램이 수행된 단면의 위치는 정면으로부터 30.5cm 떨어지고 정면에 평행한 단면이다. 다른 모든 초음파 검사와 일관성을 유지하기 위해 토모그램의 진동 속도는 0에서 5.59 km/sec 사이 수치만을 데이터로 활용하였다. 보다 자세한 토모그래프 해석에 대한 정보는 참고 문헌에서 에서 접할 수 있다(Hager, 2005, Rens, 2000).



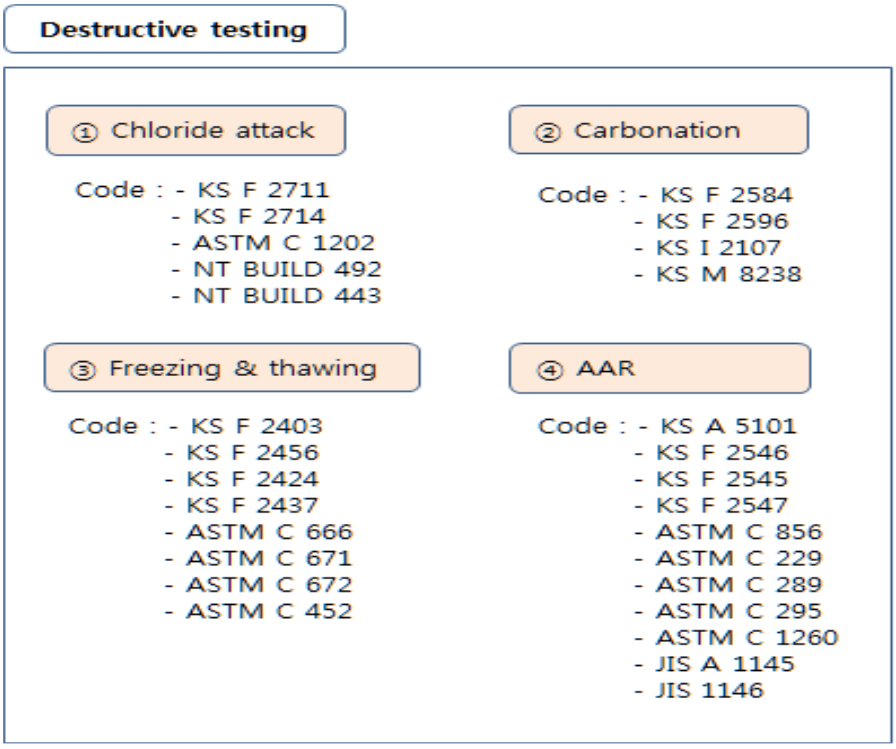
<그림 109> 토모그래피 광선 경로

(3) 콘크리트 외조의 비파괴와 파괴 시험법 및 관련 코드

콘크리트 외조탱크의 비피괴 및 파괴 관련 시험법 및 관련 코드는 <그림 110>과 <그림 111>에 나타내었다.




<그림. 110> 비파괴 시험법 및 관련코드




<그림. 111> 파괴시험법 및 관련코드

다. LNG 저장탱크 콘크리트 외조의 내구성 평가

LNG저장탱크는 가스인수의 용이성을 위해 해수에 직·간접적으로 영향을 받는 해양환경에 존재하는 콘크리트 구조물로 가장 중요한 내구성 저하 요인은 염소이온 침투에 의한 철근 부식이다. 염해 관련 내구수명을 예측하는데 주요인자는 표면 염소이온 농도, 임계 염소이온 농도 및 염소이온 확산계수이다. 이 가운데 염소이온 확산계수는 콘크리트 품질 및 환경조건에 큰 영향을 받으며 확산계수에 의해 내구수명이 크게 달라지기 때문에 내구수명을 예측하는데 가장 중요한 인자로 평가되고 있다. LNG 저장탱크 외조 콘크리트 설계 및 유지관리를 위해 확산계수 평가를 위한 연구가 미비하여 국내자료가 부족한 실정이다.

콘크리트 구조물 내구성의 주요 저하요인 중 다른 하나는 탄산화이다. 산업화와 도시화의 영향으로 대기 중 $CO_2$ 농도가 점점 높아짐에 따라 LNG 저장탱크 외조 콘크리트에 탄산화에 의한 내구성능이 저하된다. $CO_2$의 영향으로 콘크리트 구조물의 탄산화에 영향을 미치는 요인은 시멘트 종류, 구조물의 용도, 환경조건, 배합비율, 온도, 수화도, 상대습도 등으로 분류 할 수 있다. 콘크리트 탄산화로 인한 콘크리트 구조물의 성능저하는 단기간에 발생하지 않고, 오랜 시간동안 침투한 $CO_2$의 영향 및 환경조건으로 인해 콘크리트 구조물의 성능저하가 발생하게 된다.

산업통상자원부 고시에 따라 처음으로 2014년부터 LNG저장탱크의 정밀안전진단을 시행하고 있지만, 구조물 안전성과 관련된 내구성평가에 필요한 LNG저장탱크 콘크리트에 적합한 확산계수 자료가 없고 탄산화 관련 연구가 미비하여 연구가 필요하다. 가장 신뢰도 있는 확산계수와 탄산화 평가 방법은 실제 공용중인 구조물에 대해 코어링을 하여 시험을 하는 것이다. 이와 같은 확산계수 데이터가 충분히 누적되고 DB화를 하여 염해 및 탄산화의 수명을 보

다 정확하게 예측 할 수 있지만, LNG 저장탱크의 특성상 직접적으로 시험을 하지 못하고 있다. 그렇기 때문에 초기 시공시의 탄산화와 염해의 저항능력을 확인 할 수 있는 데이터가 많이 필요하며 이 연구도 이와 관련된 것이다. 이러한 데이터는 추후 시공 시에 탄산화와 염해에 대한 초기 성능을 고려하여 합리적인 시공을 할 수 있고, 시공 후 정밀안전진단 시 콘크리트 코어링이 불가한 LNG저장탱크에 대해 참고할 수 있는 탄산화와 확산계수 정보를 제공한다. 또한, 공용기간이 지난 후 정밀안전진단에서 탄산화 및 염해 평가를 하여 데이터를 확보하는 경우, 탄산화 및 염해의 성능이력을 파악하여 저하 경향성을 파악할 수 있는 예측 모델 개발에 활용할 수 있다.

이 연구에서는 전남 광양 및 강원 삼척의 신설 LNG 저장탱크 실구조물의 배합표에 대해 탄산화 및 염해에 대한 시험을 수행하였다. 탄산화 시험은 KS F 2596에 제시된 방법에 따라 탄산화 침투 깊이를 측정하고 시약은 KS F 8238에서 규정하고 있는 페놀프탈레인 용액 또는 이와 유사한 성능을 가지는 것을 사용하였다. 염해시험에서는 염화물 침투 깊이 및 확산계수 측정에 많이 사용하고 있는 NT BUILD443과 NT BUILD 492에 대해 비교 및 분석을 통하여, 북유럽에서 공인된 NT BUILD 492 방법으로 시험하였다.

시험 대상인 전남 광양과 강원 삼척 지역에 건설될 신설 LNG 저장탱크 외조 콘크리트의 배합표 특징을 분석하였다. 배합표의 각 인자들이 콘크리트의 탄산화 및 염해 저항 능력과 깊은 관계가 있는 것으로 결과가 나왔다.

탄산화 시험은 배합표에 따라 각각 성형된 콘크리트 공시체에 대해 재령별 촉진탄산화 침투깊이를 시간 경과에 따라 측정하여, 침투 깊이 경향을 분석하여 콘크리트 배합과 관련하여 검토 및 분석을 하였다.

콘크리트 배합 데이터를 이용하여 염소이온 확산계수를 예측할 수 있는 모델을 소개하고 특성을 분석하였다. 일본에서 사용하고 있는 JCI의 염소이온 확산계수 모델과 북미의 ACI life-365에 의한 확산계수 모델을 이 연구에 이용하였다. 신설 LNG 저장탱크 콘크리트 배합표에 의해 획득된 이론적 확산계수와 배합표로부터 성형된 공시체로부터 NT BUILD 492 시험법에 의해 획득된 시험적 확산계수의 비교를 통하여 상관성을 분석하였다. NT BUILD 443 방법 기반의 ACI life-365 확산계수 모델을 적용하기 위해 NT BUILD 492의 결과로 나타내는 방법이 필요하여 관련 연구를 참고하였다. 초기 염해 시험 평가 결과와 예측 모델식을 고려하여 합리적인 배합에 대해 검토 및 분석을 하였다.

(1) 콘크리트 외조 탄산화 평가

(가) 탄산화 시험 방법

탄산화 시험 측정에 사용된 공시체는 KS F 2403에 제시된 방법에 따라 Φ100×200 mm 의 원주형 공시체 3개를 1개 조로 측정 재령일별 7일, 28일, 56일에 대해 총 9개가 제작되었으며, 탄산화 시험전 20 ± 2℃의 수중양생을 실시하였다.

본 연구에 사용된 촉진탄산화 시험기는 상대습도 60 %, 온도 20 ℃ 및 $CO_2$ 농도 5 %의 환경조건을 갖는 시험기를 사용하였다.

KS F 2596에 제시된 방법에 따라 탄산화 침투깊이를 측정하였으며, 탄산화 침투깊이를 측정할 때 이용한 시약은 KS F 8238에서 규정하고 있는 페놀프탈레인 용액 또는 이와 유사한 성능을 가지는 것을 사용하였다. 또한, 지시약으로 사용된 페놀프탈레인 용액은 95 % 에탄올

90 mL에 페놀프탈레인 분말 1g을 녹인 수용액 10 mL를 첨가시켜 100 mL로 하였다.

(나) 외조 콘크리트 탄산화 평가

신설 광양 및 삼척 LNG 저장탱크 콘크리트의 배합표(<표 56>)에 따라 각각 성형된 콘크리트 공시체로부터 획득된 재령별 촉진탄산화 침투깊이를 <그림 112>>에서 시간 경과에 따른 재령별 침투깊이 경향을 보여주고 있다.

<그림 113>에서 광양과 삼척 LNG 저장탱크 콘크리트의 촉진탄산화 침투깊이는 재령의 증가에 따라 증가함을 알 수 있으며, 광양의 7일, 28일, 56일에 대한 콘크리트 촉진탄산화 침투깊이는 4.45 mm, 9.19 mm, 13.37 mm로 삼척의 0.91 mm, 6.71 mm, 8.67 mm과 비교해 각 재령별 3.54 mm(389 %), 2.48 mm(37 %), 4.7 mm(54 %)만큼 큰 결과가 나왔다. 이는 총결합재량 대비 32 %의 플라이애쉬를 사용한 삼척 LNG 저장탱크가 15 %의 플라이애쉬를 배합한 광양 LNG 저장탱크 보다 밀실한 콘크리트를 생산하게 되어 탄산화에 대한 저항성이 더 커지게 된 것으로 판단된다. 특히, 재령 28일에서 56일로 진행되는 동안 탄산화 침투깊이의 증가량은 광양이 4.14 mm, 삼척이 1.96 mm로 나타나 32 %의 플라이애쉬를 사용한 삼척 콘크리트 배합에서 장기재령에 대한 탄산화 저항성이 우수하였으나 플라이애쉬의 치환량이 사용범위 내에서 증가하게 되면 콘크리트의 탄산화 저항 성능이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 플라이애쉬 치환량이 콘크리트의 강도에도 큰 영향을 미칠 것으로 판단되며 적정범위 내에서 그 사용량이 증가하게 되면 장기 재령시 강도가 크게 회복됨을 유추할 수 있었다. 또한 실제로 그 결과는 기존 문헌과 같은 결과(플라이애쉬 사용량과 재령에 따른 콘크리트의 강도비와의 관계)를 보여주는 것을 알 수 있었다.

<표. 56> 광양 및 삼첨 LNG저장 외조탱크 콘크리트 배합

| Location | Member | f′c (MPa) | W/B (%) | S/a (%) | Unit Weight($kg_f/m^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | C | FA | W |
| Kwangyang | Wall | 40 | 38.3 | 43.5 | 362 | 64 | 165 |
| Samcheok | | 40 | 39.0 | 43.5 | 319 | 106 | 129 |

여기서,

f′c : 콘크리트 압축강도

W/B : 물/결합재 비

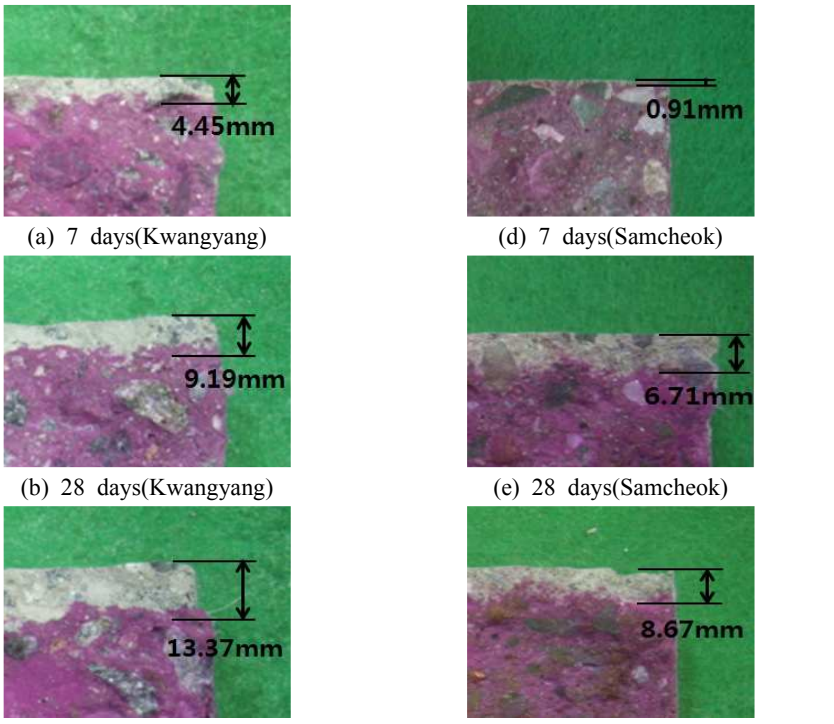
S/a : 측정 후 용액의 평균 온도 (℃)

Unit Weight : 단위부피당 중량

C : 시험편의 두께(mm)

FA : 염소 이온의 침투 깊이 (mm)

W : 시험 지속 시간(hour)

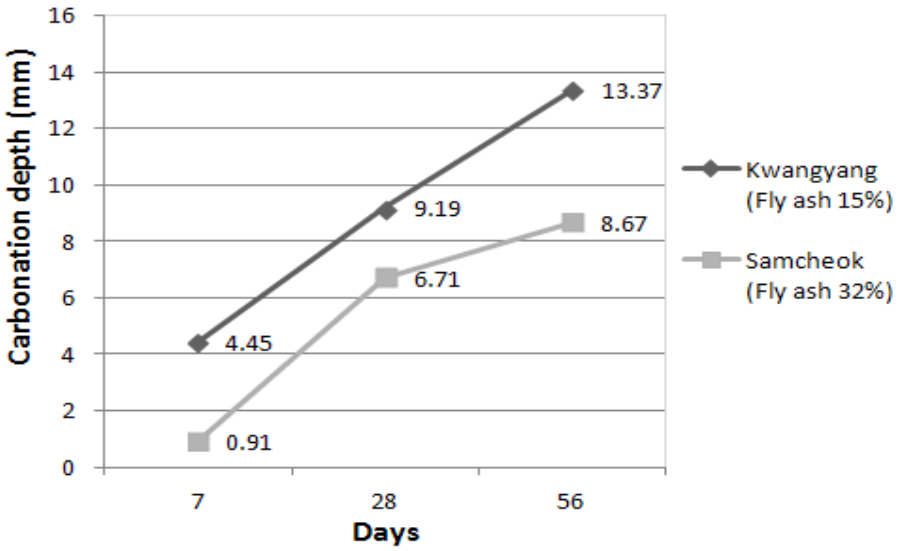



(a) 7 days(Kwangyang) (d) 7 days(Samcheok)

(b) 28 days(Kwangyang) (e) 28 days(Samcheok)

(c) 56 days(Kwangyang) (f) 56 days(Samcheok)

<그림. 112> 시간에 따른 촉진탄산화 침투 깊이




<그림. 113> 광양 및 삼척의 촉진탄산화 깊이 경향성

(다) 탄산화에 대한 내구수명 예측평가

탄산화 모델인 아래의 Fick's의 제11법칙을 사용하여 탄산화 내구수명 예측평가를 수행하였다.

$$X = R\sqrt{t}$$

$X$ : 콘크리트 탄산화깊이(mm)
$t$ : 경과년수(년)
$R$ : 시멘트, 골재의 종류, 환경조건, 혼화재료, 표면마감재 등의 정도를 나타내는 상수

촉진탄산화 시험에 의한 $CO_2$농도를 대기중 농도로 환산하여 산출하였다.

$$t = \frac{167}{b_1^2} \times X_c^2$$

$X_c$ : 탄산화깊이(mm)
$b_1$ : 촉진탄산화시험에 대한 정수 ($mm/\sqrt{weeks}$)
$t$ : 재료(weeks)

대상구조물인 광양 및 삼척 LNG 저장탱크의 내구수명은 피복두께 80mm와 100mm인 경우에 모두 200년 이상의 내구수명이 확보되는 것으로 계산되었다. 하지만 열화인자가 복합적으로 작용하는 경우에 다른 결과가 나올 수 있을 것이라고 사료된다.

(2) 콘크리트 외조 염해 평가
(가) 염해 확산계수 기존 모델 및 시험 방법
① 염소이온 확산계수 기존 모델
㉮ JCI의 염소이온 확산계수 모델
일본에서 실내 침지시험 데이터와 수년 또는 수십년 동안의 염화물 영향을 받은 콘크리트 구조물에서 코어링을 해서 시료를 채취하여 염소이온 확산계수를 얻었다. 그 데이터와 물-시멘트비(W/C)에 대해 회귀 분석을 하여 도출한 식이다.

$$D_{JCI} = 1 \times 10^{4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 12.47} \quad (m^2/s) \qquad (1)$$

이 모델의 경우 염해환경에 오랜 기간 동안 노출된 콘크리트 구조물로부터 산출된 모델이므로 그 의미가 크다고 할 수 있다. 하지만 이와 같은 확산계수는 구조물이 전체 시간에 대한 평균적인 의미의 확산 계수라고 할 수 있다.
㉯ ACI life-365에 의한 확산계수 모델
북미의 life-365에서는 여러 연구자들의 침지시험에 의한 확산계수 연구결과를 이용하여 W/B(물-결합재비)에 따른 기준 염소이온 확산계수 식을 아래와 같이 제안하였다. 기준 염소이온 확산계수는 보통 28일 재령의 확산계수를 의미한다.

$$D_{ACI,28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.4\,W/B)} \ (m^2/s) \qquad (2)$$

여기서 기준 염소이온 확산계수는 NT Build 443에 의하여 측정된 시험 결과를 대신 사용할 수 있다.

② 공시체 제작

염화물 침투와 관련된 공시체는 탄산화 시험에 사용된 공시체와 동일하며, 원주형 공시체 3개를 1개 조로 총 3개가 제작되었다. 또한 탄산화 시험과 마찬가지로 염화물 침투 시험전 20 ± 2℃의 수중양생을 실시하였다.

③ 염화물 침투 깊이 및 확산계수 측정 방법

염화물 침투와 관련한 촉진시험은 크게 염수 침지에 의한 방법인 NT BUILD443과 전위차에 의한 전기적 촉진 시험 방법인 NT BUILD 492로 나눌 수 있으며, 각 시험 방법에 대한 내용은 Table 1과 같다.

<표. 57> 확산계수를 평가할 수 있는 NT BUILD 443 및 NT BUILD 492 방법 비교

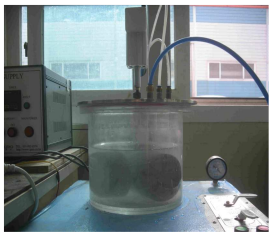
| Item | NT BUILD 443 | NT BUILD 492 |
|---|---|---|
| Process | · Profiling after relatively short immersion period of 35 days | · Measuring penetration depth with specimen whose migration period is about 1 day |
| Penetration mechanism | · Diffusion | · Migration |
| Application | · ACI Life-365 diffusivity model | · European durability design, DuraCrete |
| Advantage | · Relatively easy to use in design<br>· Considers the effect of admixture<br>· Considers the effect of time on diffusivity | · Takes very short test period<br>· Profiling is not required<br>· Precise result with a few test<br>· Proper test method for individual project |
| Shortcoming | · Many tests are required for a reliable result<br>· Needs time- consuming profiling process | · Not a generalized diffusivity model<br>· Is a way to check diffusivity of a specified mixture<br>· Needs informations about cover depth of other design cases at initial design state |

NT BUILD 443은 시편을 일정기간 염수에 침지하여 염분침투 프로파일을 측정하고 최소 1개월이 소요되는 방법이다. 28일 재령의 포화된 콘크리트를 Cl 농도 100 $kg_f/m^3$의 수용액에 35일간 침지하여 염소이온을 침투시킨다. 침지가 끝나는 시점에 시편의 깊이별 총염소이온량을 측정하고 회귀분석을 통해 확산계수를 구한다.

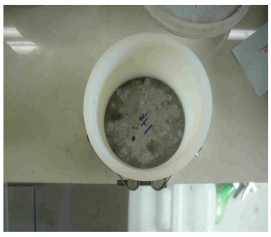
유럽에서 내구수명 예측에 추천하고 있는 NT BUILD 492는 전위차에 의한 촉진침투를 이용하는 방법으로 염화물 침투깊이를 측정하고 24~48시간이 소요되는 방법이다. 콘크리트 양단에 10~60 V의 직류전압을 24시간 이상 가하여 염소이온의 이동을 촉진시키는 방법으로 염화물 침투깊이를 측정한다. 시편은 <그림 114>과 같이 세팅을 하고 직류 전압으로 전기장을 걸어 24시간 동안 염소이온을 침투 시킨다. 침투가 끝난 후 시편을 할렬하고 그 면에 질산은 용액을 분무하면 염소이온 침투에 의해 색변화가 관찰 된다. 이로부터 염소이온 침투깊이를 측정하여 확산계수를 구하는 방법이다.

NT BUILD 443과 같은 비정상상태 확산실험에 의한 총 염소이온량의 프로파일로부터 구한

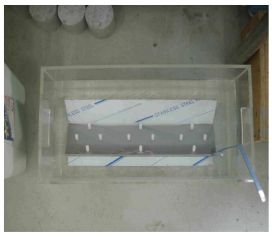
확산계수가 일정하지 않은 값을 가지는데 비하여, NT BUILD 492에 의한 확산계수는 비교적 일관적인 결과를 준다고 알려져 있다. 이 방법은 보통 24시간 정도의 단기간에 비교적 정밀한 염소이온 확산계수 측정이 가능한 장점이 있어서, 염화물 확산평가를 위해서 북유럽에서 공인된 NT BUILD 492 방법으로 시험하였다.



(a) Vaccum immersion



(b) Confinement of rubber cylinder



(c) Support of potable liquids



(d) Setting specimens

<그림. 114> NT BUILD 492의 시편 준비과정

④ 콘크리트 배합표에 의한 확산계수 산정 방법

콘크리트의 확산계수를 산정하기 위해서는 구조물의 지리적 위치, 염해에 노출되는 자연 환경 조건, 콘크리트의 피복 두께, 물-시멘트비, 혼화재의 종류에 대한 입력 데이터가 필요하나 데이터를 획득할 수 없는 경우 또는 시편 채취가 곤란한 경우에 앞에서 설명한 염소이온 확산계수 모델이 사용된다. 이 연구에서는 현재 내구성 설계에서 자주 사용되는 염소이온 확산계수 모델로 JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 확산계수 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 신설 LNG 저장탱크 콘크리트 배합표에 의해 획득된 이론적 확산계수와 배합표로부터 성형된 공시체로부터 NT BUILD 492 시험법에 의해 획득된 시험적 확산계수의 비교를 통하여 상관성을 분석하였다. ACI life-365 확산계수 모델은 NT BUILD 443 방법의 시험결과들을 바탕으로 만들어진 것이기 때문에 이 모델을 적용하려면, NT BUILD 492의 결과로 나타내는 방법이 필요하여 관련 연구를 참고하였다. 유럽의 CHLORTEST 프로젝트에서 NT BUILD 443과 NT BUILD 492의 확산계수의 상관관계를 제시하는 연구가 수행되었으며, 두 방법에 의한 상관관계는 결정계수가 0.96일 정도로 높다. NT BUILD 492의 확산계수가 다소 크게 나타나며 아래와 같이 제안하였다.

$$D_{NTbuild492} = 1.16 \times D_{NTbuild443} + 0.32$$

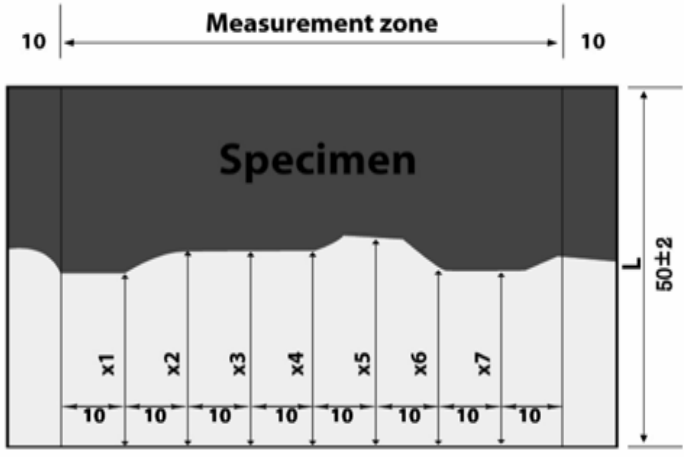
염해환경에 건설되는 콘크리트 구조물을 설계할 때 NT BUILD 492에 의한 확산계수 측정

결과를 위의 식을 이용하여 NT BUILD 443의 확산계수도 산출하여 비교하였다.

(나) 외조 콘크리트 염소이온 확산계수 평가

현재 광양 및 삼척 지역에 신설되고 있는 LNG 저장탱크는 일반적으로 해안가 근처에 건설하기 때문에 염해에 대한 내구수명 평가가 절실히 요구된다. 그러나 LNG 저장탱크와 같은 실구조물은 안전성에 대한 우려로 유지관리시 염해에 대한 직접적인 평가가 어렵기 때문에 일본과 미국에서 제안된 관련 식을 이용하였다. 앞에서 설명한 JCI의 염소이온 확산계수 모델과 ACI life-365에 의한 확산계수모델 식으로 구한 확산계수와 광양 및 삼척 지역에 건설될 신설 LNG 저장탱크의 콘크리트 배합표를 가지고 성형된 공시체로부터 획득된 NT BUILD 492시험의 확산계수를 서로 비교 및 평가를 하여 염해에 대한 내구수명 평가를 위한 기초자료로 활용하고자 한다. NT BUILD 492의 시험결과와 NT BUILD 443 확산계수와의 상관관계식을 이용하여 NT BUILD 443의 값도 함께 비교 분석을 하였다.

외부의 전기적 전위차에 의한 염소 이온 침투 속도를 촉진 시킨 NT BUILD 492 시험법에 의해 확산계수를 산출하였다. 염화물 침투 깊이를 바탕으로 <그림 115>와 아래의 식을 이용하여 확산계수를 산정하였다. <그림 116>은 광양 및 삼척 배합표로부터 성형된 공시체의 염화물 침투 깊이(3개를 표준)를 각각 보여준다. 그 결과 광양 배합표로부터 성형된 공시체의 확산계수는 $7.10\times10^{-12}m^2/\text{sec}$, 삼척 배합표로부터 성형된 공시체의 확산계수는 $3.64\times10^{-12}m^2/\text{sec}$를 각각 나타내 삼척 배합표로부터 성형된 공시체가 광양 배합표로부터 성형된 공시체 보다 염화물 침투 저항성이 약 2배 큰 것으로 나타났다. 이는 배합단계에서 검토된 플라이애쉬 사용량(광양 15 %, 삼척 32 %)과 물결합재 비의 배합 등에 의한 차이인 것으로 판단되며, 적절한 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 경우 포졸란 반응에 의한 수밀성 향상으로 장기 재령이 되면 그 차이는 더욱 현저해 질 것으로 판단된다.




<그림. 115> 염화물 침투깊이 측정 방법

$$D_{nssm}=\frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)T}(x_d-0.0238\frac{\sqrt{C273+T)Lx_d}}{U-2})$$

여기서,

$D_{nssm}$ : 염소이온 확산 계수 (10-12m2/s)

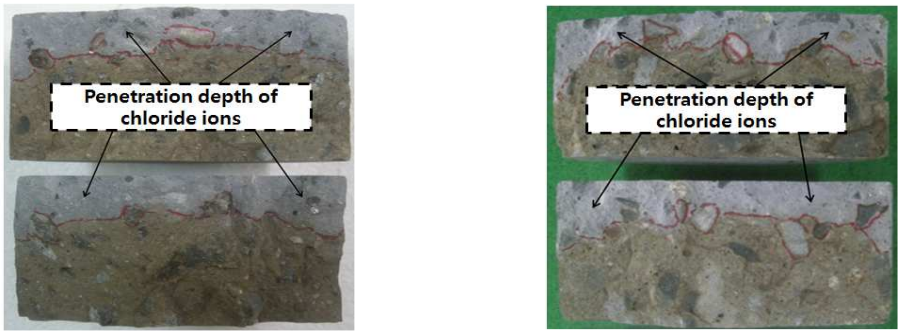
$U$ : 적용한 전압의 절대값(V)

$T$ : 측정 후 용액의 평균 온도 (℃)

$L$ : 시험편의 두께(mm)

$x_d$ : 염소 이온의 침투 깊이 (mm)

$t$ : 시험 지속 시간(hour)




(a) Kwangyang (b) Samcheok

<그림. 116> NT BUILD 492에 의한 염화물 침투깊이 측정

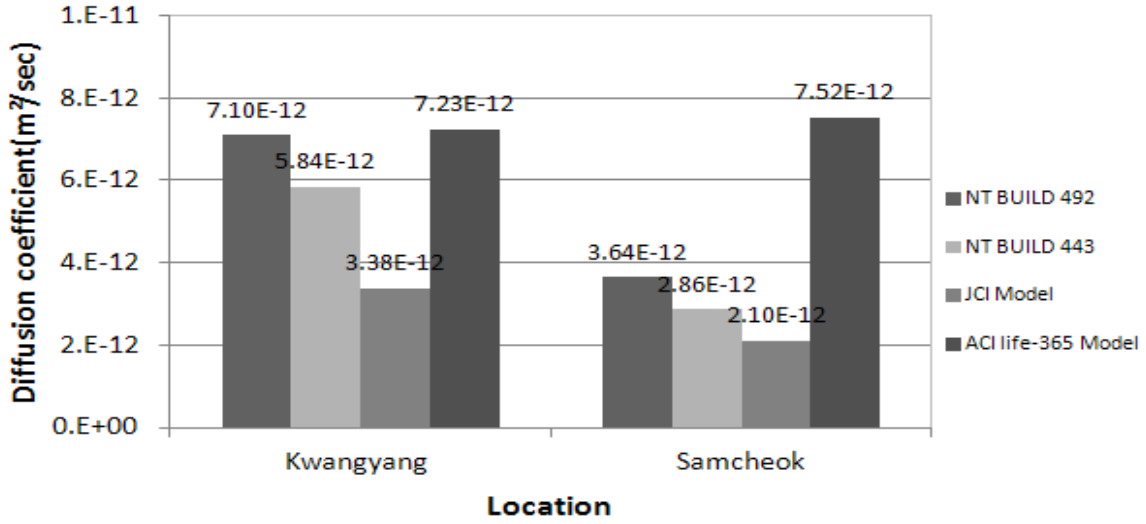
<그림 117>은 NT BUILD 492 시험을 통해 얻은 염소이온 확산계수, 실험결과와 상관관계식으로부터 계산된 NT BUILD 443의 염소이온 확산계수, 일본의 JCI Model 식으로부터 계산된 염소이온 확산계수 및 미국의 ACI life-365 Model 식으로부터 산출된 염소이온 확산계수이다. NT BUILD 492가 NT BUILD 443의 염해 확산계수에 비해서 상관관계식에 의해서 광양에서는 18 %, 삼척은 21 %가 큰 결과가 나왔다. NT BUILD 443은 총 염소이온량의 프로파일로 계산되는 확산계수로 일정하지 않은 값을 가지는 경우가 많기 때문에 이 연구와 같이 염화물 침투깊이를 이용하여 보다 일정한 값을 얻을 수 있는 NT BUILD 492 시험을 하고 관련 상관관계식을 통해 NT BUILD 443의 결과를 도출할 수 있다.

NT BUILD 492의 염소이온 확산계수와 JCI Model의 염소이온 확산계수를 비교했을 때 광양의 경우는 $7.10 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$과 $3.38 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$로 $3.72 \times 10^{-12}$ $m^2/\text{sec}$(52%) 정도의 차이를 보였고, 삼척의 경우 $3.64 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$과 $2.10 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$로 $1.54 \times 10^{-12}$ $m^2/\text{sec}$(42 %) 만큼 차이를 보이는 것으로 나타났다.

NT BUILD 492의 염소이온 확산계수와 ACI life-365 Model의 염소이온 확산계수를 비교했을 때 광양의 경우는 $7.10 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$과$7.23 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$로 $-1.31 \times 10^{-13} m^2/\text{sec}$(-2 %) 정도의 작은 차이를 보였고, 삼척의 경우 $3.64 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$과 $7.52 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$로 $-3.88 \times 10^{-12} m^2/\text{sec}$(-106 %) 만큼 차이가 났다.

광양의 경우는 ACI life-365 Model의 경우가 2 %의 차이로 시험 결과의 염소이온 확산계수와 가장 근접한 예측값을 보였지만, 삼척의 경우는 JCI Model의 경우가 42% 차이로 ACI life-365에 비해 보다 유사한 결과를 산출하였다. 두 모델은 많은 시험과 코어링 시험 결과 데

이터로 산출된 식으로 불확실성을 포함하고 있고, 우리나라와의 재료적 및 환경적 특성이 다르기 때문에 이러한 결과가 나올 수 있다고 판단된다. JCI Model은 종속변수 염소이온 확산계수에 영향을 주는 독립변수는 물/시멘트비의 사용량 및 종류에 따라 확산계수가 달라지게 되고, ACI life-Model의 경우는 영향 독립변수가 물/결합재비로 종류 및 사용량에 따라 변하게 된다. 하지만 실제 콘크리트는 염소이온 확산성에 영향을 미치는 인자는 물/시멘트비와 물/결합재비 뿐만 아니라 다른 여러 가지 요소가 있다. 예를 들면, 콘크리트는 크게 물, 시멘트, 골재, 혼화재료 등과 같은 서로 다른 재료로 이루어진 복합구조체이며, 그 재료의 생산 및 취급과정에서 오는 품질의 불균질성 때문에 동일한 재료를 사용하였다 하더라도 사용재료의 양과 주위 환경 등에 따라 상이한 콘크리트가 만들어지기 쉽다. 특히, 플라이애쉬(혼화재료)를 사용한 콘크리트의 특징은 장기강도 증진, 건조수축 감소, 수밀성 향상, 수화열 감소 및 알카리반응 억제 등에 큰 효과가 있지만, 플라이애쉬는 산업부산물이기 때문에 제조공장, 시기 등에 따라 품질상의 변동이 생기기 쉬우므로 시험에 대한 검토 결과는 전문성이 요구되며, 사용시 주의가 필요하다

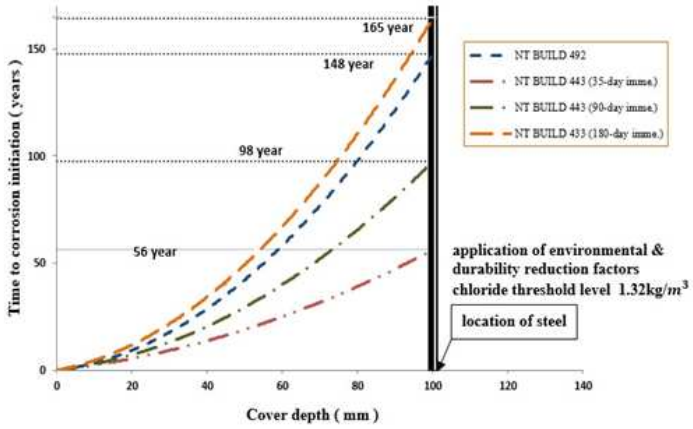



<그림. 117> NT BUILD 492, NT BUILD 443, JCI Model 및 ACI life-365 Model에 의한 광양 및 삼척의 염화물 확산계수

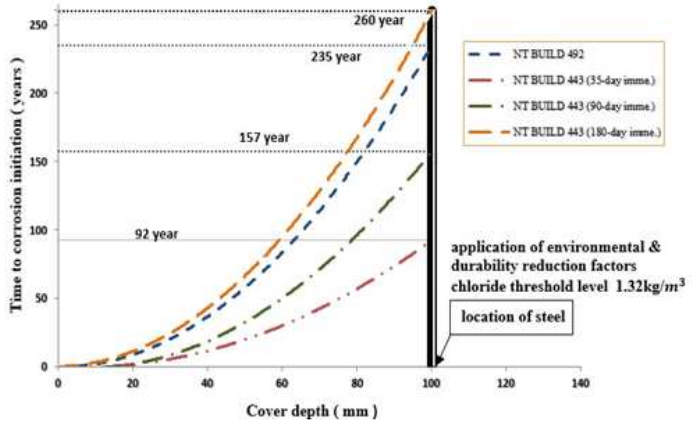
염소이온 확산계수($1\sim10\times10^{-12}m^2/\sec$)의 적정 범위는 $1\sim10\times10^{-12}m^2/\sec$으로 시험결과와 예측 값 모두 적정 범위의 값이라고 판단된다. 실내 침지시험 데이터와 실구조물 코어링 시험 데이터의 JCI Model과 침지시험 데이터로 부터의 ACI life-365 Model 식에 의한 염소이온 확산계수는 원자력 구조물과 LNG 저장탱크와 같은 중요 구조물에서 코어링이 어렵기 때문에 데이터를 직접적으로 획득할 수 없는 경우 또는 협소한 장소에서의 시편 채취가 곤란한 경우 등에 주로 사용될 수 있다. 이런 경우의 결과는 중요 구조물에 대한 결과물로써 사용상 충분한 검토가 요구되며, 도출된 결과에 대해 보다 신뢰도를 확보를 하기 위해서는 실제 구조물로부터 획득된 결과와 비교 및 분석이 필요하다.

(다) 염해에 대한 내구수명 예측평가

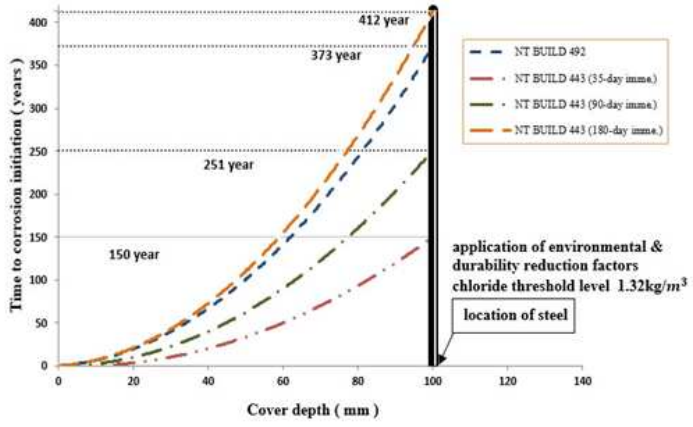
표면염화물이온 농도에 따른 내구수명 예측을 한 결과는 표면염화물량의 감소에 따라 사용수명은 증가하는 것을 <그림 118> 및 <그림 119>에서 확인할 수 있다. 철근 깊이까지 염소이온이 도달하여 부식이 발생하는데 소요되는 시간은 최소 56년에서 최대 500년 이상 나타났다. 구조물의 특수성을 감안하면 보수적인 관점에서 접근한 예측치이다.




(a) Surface Chloride Level : 13kg/m$^3$

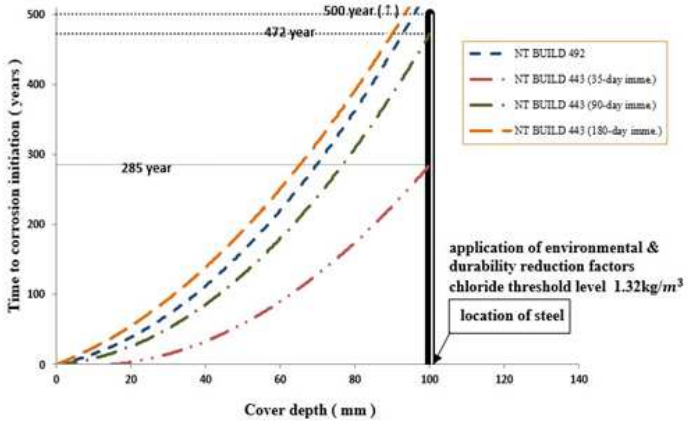



(b) Surface Chloride Level : 7kg/m$^3$

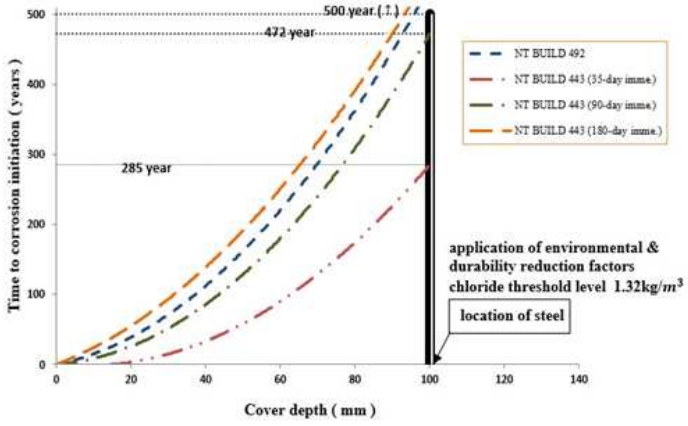



(c) Surface Chloride Level : 4.5kg/m$^3$

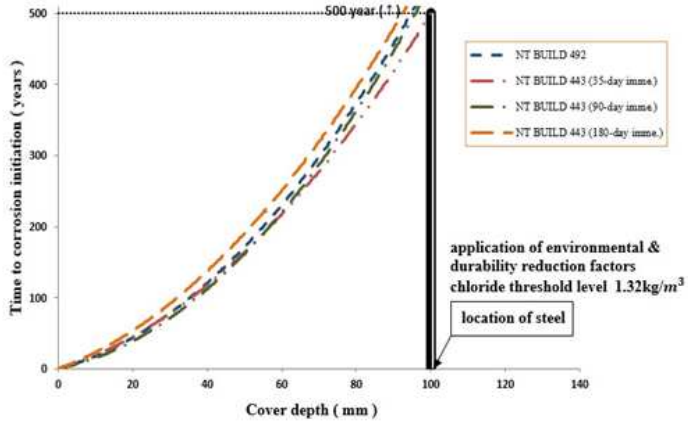
<그림. 118> 표면염화물에 따른 내구수명예측 평가(1)




(d) Surface Chloride Level : 3kg/m3




(e) Surface Chloride Level : 2.5kg/m3



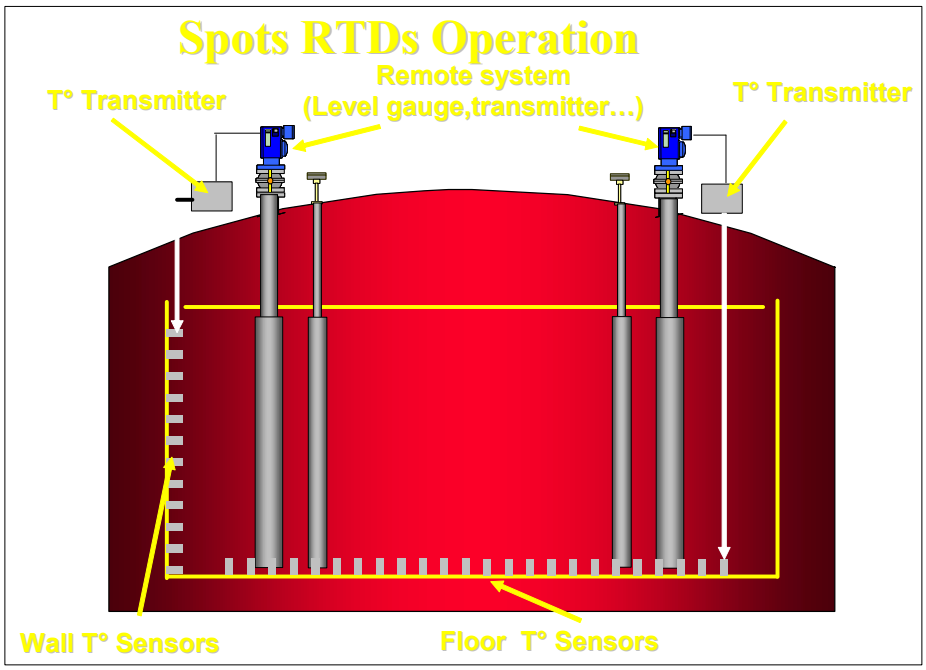

(f) Surface Chloride Level : 1kg/m3

<그림. 119> 표면염화물에 따른 내구수명예측 평가(2)

## 3. 내부탱크 모니터링 기법

### 가. LNG 저장탱크 내조 안전계기 모니터링 최적화 방안 검토

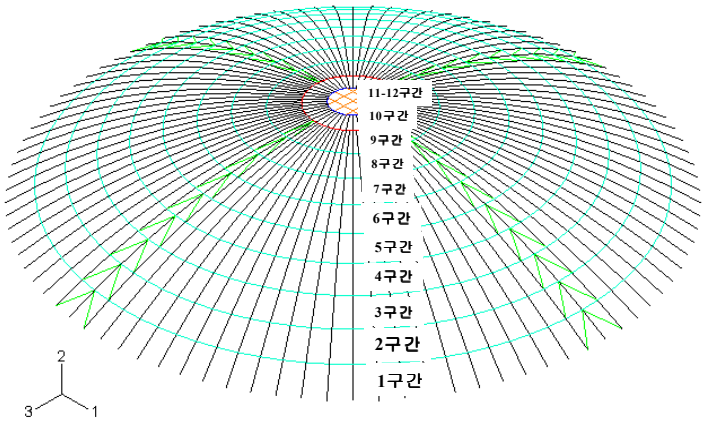
LNG 저장탱크의 경우 통상 내부탱크를 중심으로 액위, 온도, 밀도, 압력 등을 계측함으로써 운전(하중)상황 및 누출 등에 대한 안전성을 모니터링하고 있다. 따라서 현재 운전 중인 LNG 저장탱크 모니터링 시스템 분석을 통해서 비용 대비 고효율이 수명관리를 위한 모니터링 최적화 방안을 검토하였다.




<그림. 120> LNG 저장탱크 온도 계측 시스템(예)

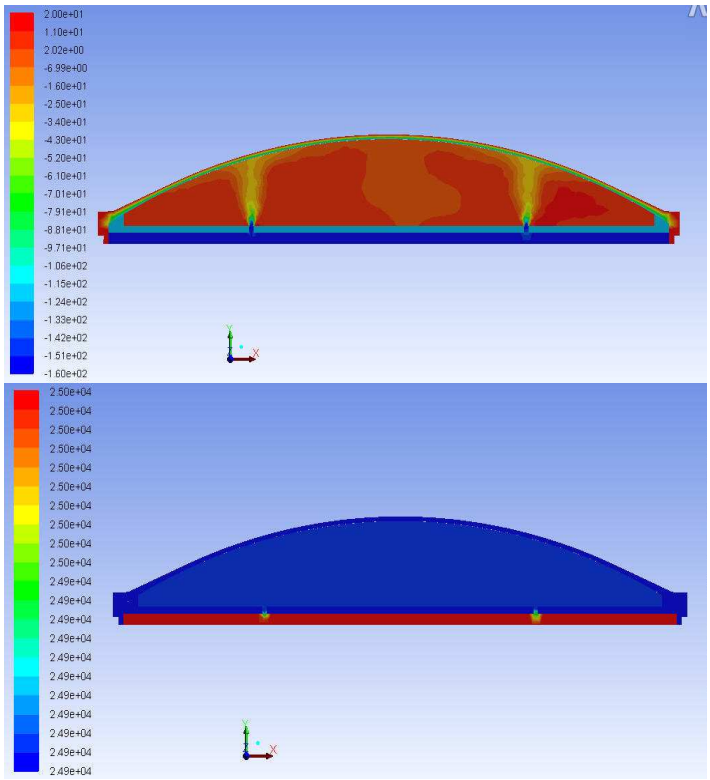
### 나. 현수천정 상단 온도 모니터링 개선 방안 수립

LNG 저장탱크의 상단부는 Rafter와 Roof Plate로 구성되는데, 인입 및 송출 배관, 각종 계측기용 배관 등이 지붕을 관통하게 되고, 초저온 LNG 및 증기와 접촉하지 않는 상온 조건으로 설계된다. 따라서 일반 탄소강으로 설계되는 지붕 구조물(<그림 121> 참조)은 초저온 재료로 설계되는 구성 요소에 비해 상대적으로 저온에 취약하고 운전에 따른 온도 모니터링이 다른 요소에 비해 대단히 중요하다.




<그림. 121> LNG 저장탱크 지붕 강재부 형상

따라서 2단계 연구가 완료되면 한국가스공사에서 설계중인 27만㎘급 초대용량 LNG 저장탱크에 대한 현수천장 상단의 온도 모니터링 시스템이 최적설계 방안을 협의하여 최종 설계에 반영하고자 하였다. <그림 122>는 현수천정 상단의 온도 및 압력 분포를 CFD를 이용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 기존 온도 센서 설계 위치를 분석하여 지붕라이너 저오 모니터링 센서 2개소 추가를 LNG Filling Nozzle 및 Pump Well Nozzle 상부에 하였고 Anunular Bottom부에 가스 누출 모니터링 센서 2개소를 추가하는 방안을 수립하였다.




<그림. 122> t=600s 일 때 현수천정온도(상)와 압력(하)

## 4. 외부탱크 모니터링 기법

콘크리트 구조물의 유지관리 모니터링에 이용될 수 있는 각종 비파괴 검사법을 그 원리에 따라 크게 분류하면 다음과 같다.

1) 광학적, 시각적인 기계장치를 이용해서 구조물 표면 상태로부터 정보를 얻는 것
2) 파, 열, 전기 등 고체중을 전파하는 성질을 이용해서 콘크리트 내부 및 배면 정보를 얻는것
3) 콘크리트의 국부를 파괴하여 정보를 얻는 것

특별히 LNG 저장탱크 PC 외부탱크에 적용 가능한 기술을 정리하면 다음과 같다.

가. 광섬유 센서를 이용한 유지 관리 모니터링

최근에는 작고 가벼울 뿐만 아니라, 전자파에 의한 장애가 없고, 신호의 원거리 전송이 가능한 첨단 광섬유 센서를 사용한 시스템이 주목 받기에 이르렀다. 이 분야는 Intelligent Materials와 Smart Structure System의 핵심 센서로서 이미 기술 선진국 (유럽, 미국 )에서는 1980년대 초반부터 토목, 건축 구조물로의 응용 계측 기술이 꾸준하게 개발되어 왔으며, 실제 구조물에도 활발하게 적용되어 연구가 이루어지고 있는 실정이다. <그림 123>은 일반적인 광섬유 센서를 이용한 전형적인 교량의 유지 관리 계측 시스템을 보여주고 있다. 국내에서는 구조물 유지 관리 시스템이 전무한 상태고 전진국에서는 일부기존의 센서를 이용한 유지관리 시스템이 있다. 그러나 광섬유 센서는 기존의 전자식 또는 기계식 센서에 비해 다음과 같은 장점이 있어 최첨단의 유지 관리 시스템의 구성이 가능하다. <표 58>은 광섬유 센서가 갖는 일반적인 장점을 요약하고 있다.

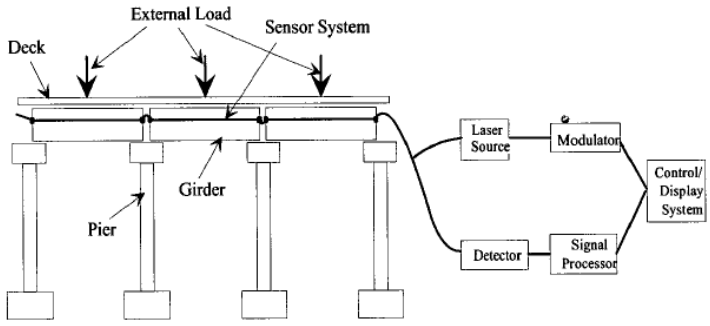



그림 1. 광 섬유를 이용한 교량 유지 관리 시스템

<그림. 123> 광섬유센서를 이용한 교량 유지관리계측 시스템

<표. 58> 기존센서와 광섬유센서의 비교

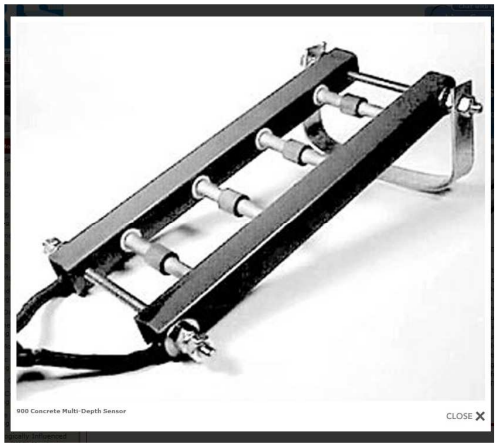
| 기존센서 | 광섬유 센서 |
|---|---|
| 전자파에 의한 노이즈 발생(스트레인 게이지의 오차 요인) | 전자파 장애 없음 |
| 센서 매설시 결함 → 콘크리트 균열 발생 | 100$\mu m$정도의 광섬유 사용으로 결함 요인 없음 |
| 내구성 결여 및 리드선 납땜 처리 문제 | 내구성 견고 |
| 여러 개의 센서 매설 필요 | 한 개의 라인으로 여러 개의 센서 역할 |
| 리드선에서의 전자파 장애로 원거리 신호 전달 곤란으로 많은 수의 서브 시스템 필요 | 원거리 신호 전달 용이하며 서브 시스템 개수를 줄일 수 있음. |
| 리드선의 굵기 및 무게 때문에 매설 센서 개수의 제한 | 센서의 개수가 많아져도 부피가 별로 커지지 않음. |

나. 음향 모니터링 기술

연속적인 음향 모니터링 방법은 프리스트레스 텐던 파단을 감지하기 위한 영구적인 모니터링 시스템들의 한 부분으로서 현제까지 덴던 파단을 감지할 수 있는 매우 효과적인 기술로 여겨지고 있다 음향모니터링 방법을 이용한 텐더의 파단 감지기술에 대한 기존 연구는 주로 텐더의 인위적인 절단시 또는 부식촉진장치를 이용한 급속한 텐던 파단시 발생되는 음향을 감지하는 실험들이 대부분이었다. 하지만 그라우팅 된 프리스트레싱 텐건의 부식영역이 매우 작고 또한 서서히 부식이 진행되는 경우를 모사하는 위한 실험은 아직까지 수행되지 않았다.

다. 마크로셀 전류를 이용한 철근 부식 모니터링 기술

철근 콘크리트 구조물 중의 철근 부식을 조사하기 위해서는 고가의 기구와 장비 및 인력이 소요될 뿐만 아니라 매번 철근을 노출시켜야 한다는 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여 개발된 것으로 비교적 최근에 연구 성과와 적용 사례가 증가하고 있는 ladder system은 마크로셀 전류 측정법을 응용한 것으로 독일에서 개발 되었으며, 최근 신설 철근콘크리트 구조물의 철근 부식 모니터링에 적용한 사례가 많이 보고되고 있다. 한편 국내에는 anode-ladder system 또는 multi-depths sensor로 소개된 바 있다.




<그림. 124> multi-depths sensor

라. 철근 부식전위 모니터링 기술

이 모니터링 기술들은 현장의 구조물에 직접 적용할 수 있다는 장점으로 인해 관심이 모아지고 있으며, 콘크리트 구조물 내에서 철근의 부식이 발생하기 이전에 부식유발인자들과 반응하여 응답성을 보여줌으로써, 철근의 부식진행을 사전에 예견할 수 있도록 개발된 특징을 지닌다. 따라서 철근과 동일한 철 성분이 주요 반응(또는 감지)부분으로 구성되어 있는데, 철근 그대로 또는 철 와이어 형태로 된다. 이들의 사용을 위해서는 철근에 바로 고정하거나, 콘크리트 커버와 철근 사이의 콘크리트 매체에 적절히 위치시킨다.

콘크리트 타설 시 매립형 기준전극(embeddable reference electrode)을 콘크리트 내 철근에 인접하게 위치시켜 수시로 철근의 자연전위를 측정하고, 이 측정 자연전위로부터 철근의 부식진행 경향성을 정성적으로 판단하고자 하는 방법이다. 이러한 매립형 기준전극으로 철근에 인접하게 위치시키는 방법을 이용함으로써, 기존의 콘크리트 커버 외부에 기준전극을 올려놓고 측정하는 방법에 비해 콘크리트 커버로 인해 발생하는 전압강하(iR drop)요인을 제거할 수 있는 장점을 나타낸다(V2000 monitoring electrode, ERE 20 probe, MMO Ti probe) 등).

## 5. LNG 저장탱크 외조 콘크리트 탱크의 압축강도 추정식(안) 개발

정밀안전진단 수행 시 반발경도 및 초음파 속도를 측정하여 콘크리트 압축강도를 추정할 수 있지만, 저장탱크에 적합한 압축강도 추정식이 부재하여 비파괴시험 결과로부터 예측할 수 있는 모델식 필요하다. 반발경도법 및 초음파법의 적용은 구조물 내의 상대적 강도변화를 추정하거나 건전도를 추정할 때 사용하는 것으로, 코어시험 없이 이를 이용하여 콘크리트의 압축강도를 추정하여서는 안된다. 현실적으로 기존 구조물에 대해서 많은 코어시험을 하기가 쉽지 않기 때문에 콘크리트 공시체를 추가적으로 이용하는 방안을 이용할 수도 있다.

또한, 추후 노후 LNG저장탱크에 대한 구조적 안전성 평가에 사용될 기본데이터인 탄성계수 및 포아송비를 위해서 시험이 필요하다.

가. 기존 압축강도 추정식 현황

미국, 일본 등 선진국에서는 고강도 및 초고강도 콘크리트에 대한 연구를 바탕으로 고강도 콘크리트 구조물에 대한 강도 및 내부탐사를 위하여 비파괴시험에 의한 콘크리트 강도 추정식 연구를 수행하였다. LNG저장탱크 외조에 사용하늩 콘크리트는 압축강도가 30 MPa 이상인 고강도 콘크리트를 사용한다.

<표 59>는 기존에 사용되고 있는 압축강도 추정식으로 크게 고강도와 일반강도를 분류하고, 고강도의 경우가 반발경도법을 통한 강도평가가 기존 보통강도 콘크리트에 비하여 낮은 값을 보이고 있는 것으로 알려져 있다.

<표. 59> 기존 국내·외 압축강도 추정식

| 기관/연구자 | 추정식(MPa) | 비고 |
|---|---|---|
| 권영웅 외 | $F_c = 2.304R - 38.80$ | 기존 고강도 추정식 |
| 과학기술부 | $F_c = (15.2R - 112.8) \times 0.098$ | |
| 일본재료학회 | $F_c = -18.0 + 1.27R$ | 기존 일반강도 추정식 |
| 동경건축재료검사소 | $F_c = (10R - 110) \times 0.098$ | |
| 일본건축학회 | $F_c = (7.3R + 100) \times 0.098$ | |
| US Army | $F_c = (-120.6 + 8.0R + 0.0932R_0^2) \times 0.098$ | |
| 木村 | $F_c = (9.37 \times (0.987)^t R + (1.3t - 109)) \times 0.098$ | |

LNG저장탱크와 관련되는 추정식은 국내에서 개발된 권영웅 외와 과학기술부에서 개발된 추정식으로 현재 LNG저장탱크에 이용되고 있지만, 어떤 추정식이 더 적합한지 모르고 사용하고 있는 실정이다. 반발경도법의 결과 값을 추정식에 대입하여 각각의 압축강도 값을 평균하여 추정하고 있다.

나. 콘크리트 압축강도 추정식 개발 방법

① 대상 콘크리트 구조물의 반발경도 분포집단을 나누어 4등급으로 분류하고 코어를 채취할 위치를 선정한다.

② pilot 탱크의 설계도에서 콘크리트 배합비가 다른(설계강도 다른) 부위를 검토하고 동일한 경우 구조적인 특성 차이로 반발강도가 다른 부분으로 나누어 분류한다.

③ 코어를 채취할 위치에서 미리 반발경도를 측정하고 그 위치에서 코어를 채취를 한다.

④ 선택된 분포집단별로 시험영역 중 4군데 이상에서 각각 3개이상의 코어시험체를 채취하고 채취된 코어를 이용하여 KS F 2422에 따라 압축강도를 산출한다.

⑤ 횡축에 반발경도, 종축에 코어의 압축강도를 대응하게 하여 추정식의 계수값들을 최소제

곱법을 통해 산출한다.

콘크리트 압축강도시험체 코어 크기 결정은 정확한 코어강도 산출을 위한 표준 크기는 Φ 100×200(mm)이나, LNG저장탱크 구조물의 안전을 위해 최대한 작은 크기를 고려하였다. 압축강도시험시 안정적인 결과를 얻기 위해서 일반적으로 굵은 골재가 25mm인 경우 공시체 지름 75mm 이상이 되어야 한다는 전문가 의견을 통해 코어 크기를 결정하였다. 철근탐사의 경우 규격상 500mm까지 확인이 가능하다고 하나, 경험적으로 150 mm 정도까지 철근 위치 정확히 파악 가능하였다.

콘크리트 압축강도시험체 코어 채취 위치는 철근 탐상을 이용하여 철근 간섭이 없는 벽체 부분으로 하였다. 채취 위치 선정 전에 철근탐상기의 성능확인을 위해 시험시편에 테스트하여 검증하였다.

압축강도추정식 개발을 위해서는 많은 코어시편이 필요하지만 현장여건 및 중요구조물 등의 이유로 파일럿 저장탱크의 코어를 이용하였고, <표 60>과 같다.

<표. 60> 콘크리트 압축강도 시험체

| 대상 구조물 | 위치 | 개수(EA) | 시험체 크기 | 비고 |
|---|---|---|---|---|
| 인천 파일럿 LNG저장탱크 | 벽체 콘크리트 | 12 | Φ 100×100(mm) | 코어 |

압축강도시험 결과물은 콘크리트 위치별 각 공시체의 압축강도 결과와 추후 구조적 안전성 평가 시 이용되는 탄성계수 및 포아송비 데이터로 하였다.

다. 콘크리트 압축강도 예측을 위한 비파괴 시험

인천기지 파일럿 탱크 벽체 비파괴검사 결과는 <표 61>에 있으며, 4개의 다른 영역에 각 3군데 위치에서 반발경도와 초음파시험을 실시하였다.

<표. 61> 인천기지 파일럿 탱크 벽체 비파괴검사 결과

| 위치 | 부위 | 타격 방향 α | 반발도 R 측정치 (평균치의±20%미만) | | | | | 평균치 R | 타격 방향 보정 ΔR | 기준 반발도 (R+ΔR) Ro | 초음파 속도 (km/sec) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0º #1 | 벽체 | 0 | 52 | 57 | 55 | 50 | 58 | 52.2 | 0 | 52.2 | 3.29 |
| | | | 51 | 54 | 51 | 50 | 50 | | | | |
| | | | 50 | 49 | 55 | 49 | 52 | | | | |
| | | | 52 | 53 | 51 | 52 | 52 | | | | |
| 0º #2 | 벽체 | 0 | 52 | 50 | 52 | 51 | 52 | 52.1 | 0 | 52.1 | 3.27 |
| | | | 51 | 54 | 52 | 52 | 51 | | | | |
| | | | 54 | 54 | 51 | 54 | 52 | | | | |
| | | | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0º #3 | 벽체 | 0 | 55 | 65 | 54 | 52 | 48 | 52.7 | 0 | 52.7 | 3.30 |
| | | | 58 | 50 | 49 | 46 | 52 | | | | |
| | | | 50 | 51 | 57 | 54 | 51 | | | | |
| | | | 55 | 52 | 54 | 52 | 48 | | | | |
| 90º #1 | 벽체 | 0 | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 | 50.9 | 0 | 50.9 | 3.72 |
| | | | 52 | 52 | 53 | 51 | 51 | | | | |
| | | | 55 | 50 | 50 | 50 | 50 | | | | |
| | | | 50 | 49 | 49 | 48 | 48 | | | | |
| 90º #2 | 벽체 | 0 | 54 | 54 | 54 | 53 | 53 | 51.3 | 0 | 51.3 | 3.65 |
| | | | 53 | 52 | 52 | 52 | 52 | | | | |
| | | | 51 | 51 | 50 | 50 | 50 | | | | |
| | | | 50 | 50 | 48 | 48 | 48 | | | | |
| 90º #3 | 벽체 | 0 | 57 | 56 | 56 | 56 | 55 | 53.2 | 0 | 53.2 | 3.44 |
| | | | 55 | 54 | 54 | 54 | 53 | | | | |
| | | | 53 | 53 | 52 | 52 | 51 | | | | |
| | | | 51 | 51 | 50 | 50 | 50 | | | | |
| 180º #1 | 벽체 | 0 | 54 | 52 | 52 | 52 | 51 | 50.0 | 0 | 50.0 | 4.67 |
| | | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | | | | |
| | | | 50 | 50 | 49 | 49 | 49 | | | | |
| | | | 49 | 48 | 48 | 48 | 48 | | | | |
| 180º #2 | 벽체 | 0 | 53 | 52 | 52 | 52 | 52 | 51.2 | 0 | 51.2 | 3.83 |
| | | | 52 | 52 | 52 | 52 | 52 | | | | |
| | | | 52 | 51 | 51 | 51 | 50 | | | | |
| | | | 50 | 50 | 50 | 49 | 49 | | | | |
| 180º #3 | 벽체 | 0 | 57 | 55 | 54 | 53 | 52 | 50.7 | | 50.7 | 5.49 |
| | | | 52 | 51 | 50 | 50 | 50 | | | | |
| | | | 50 | 50 | 50 | 49 | 49 | | | | |
| | | | 49 | 49 | 48 | 48 | 48 | | | | |
| 270º #1 | 벽체 | 0 | 50 | 46 | 48 | 54 | 52 | 50.2 | | 50.2 | 4.02 |
| | | | 52 | 48 | 48 | 52 | 52 | | | | |
| | | | 52 | 53 | 53 | 48 | 51 | | | | |
| | | | 49 | 48 | 50 | 48 | 49 | | | | |
| 270º #2 | 벽체 | 0 | 48 | 48 | 49 | 48 | 48 | 49.1 | | 49.1 | 3.59 |
| | | | 49 | 48 | 46 | 48 | 50 | | | | |
| | | | 48 | 48 | 49 | 49 | 49 | | | | |
| | | | 50 | 50 | 51 | 53 | 52 | | | | |
| 270º #3 | 벽체 | 0 | 48 | 50 | 51 | 52 | 50 | 50.0 | | 50.0 | 4.11 |
| | | | 51 | 50 | 50 | 47 | 54 | | | | |
| | | | 48 | 51 | 48 | 52 | 49 | | | | |
| | | | 49 | 49 | 50 | 50 | 51 | | | | |

라. 콘크리트 코어 및 공시체 압축강도 시험

압축강도시험은 주로 취성재료에 적용되며, 압축하중 시에 강도·변형특성 등을 구하기 위해 행해지는 시험이다. 금속제품 등 균질재료(homogeneity material)에는 일반적으로 압축강도와 인장강도가 균등하기 때문에 비교적 시험이 용이한 인장시험으로 하는 일이 많으며, 취약한 재료는 압축되면 일정한 각도의 면을 따라 전단파괴가 된다.

콘크리트의 경우에는 압축강도가 다른 강도에 비해 현저하게 크기 때문에 압축강도 시험이 중요시된다. LNG저장탱크 외조탱크와 같은 PC구조물에서도 콘크리트가 압축력을 부담하도록 설계되어 있기 때문에 콘크리트 압축강도시험이 필요하다.

인천기지 파일럿 탱크 벽체 코어와 삼척기지 TK-212 탱크 11단 벽체의 공시체를 이용하여 KS F 2405에 따라 공인된 기관에서 압축강도시험을 수행하였고, 추가로 향후 구조안전성평가시 필요한 탄성계수와 포아송비를 얻기 위해 변형률 게이지를 코어와 공시체에 가로 및 세로로 부착하여 시험을 실시하였다.

<표. 62> 인천기지 파일럿 탱크 벽체 압축강도시험 결과

| 구 분 | 압축강도(MPa) | 탄성계수(MPa) | 포아송비 |
|---|---|---|---|
| No.1 | 64.5 | $3.88 \times 10^4$ | 0.186 |
| No.2 | 55.6 | $3.55 \times 10^4$ | 0.171 |
| No.3 | 60.0 | $3.57 \times 10^4$ | 0.170 |
| No.4 | 56.4 | $3.62 \times 10^4$ | 0.167 |
| No.5 | 46.5 | $3.14 \times 10^4$ | 0.157 |
| No.6 | 51.1 | $3.40 \times 10^4$ | 0.169 |
| No.7 | 50.8 | $3.45 \times 10^4$ | 0.164 |
| No.8 | 52.9 | $3.49 \times 10^4$ | 0.171 |
| No.9 | 53.2 | $3.53 \times 10^4$ | 0.177 |
| No.10 | 37.1 | $2.85 \times 10^4$ | 0.142 |
| No.11 | 49.9 | $3.31 \times 10^4$ | 0.166 |
| No.12 | 44.3 | $3.21 \times 10^4$ | 0.158 |
| 평균 | 51.9 | $3.42 \times 10^4$ | 0.167 |




<그림. 125> 콘크리트 코어 압축강도시험 전경

마. 반발경도법으로 코어시험체를 이용한 압축강도 추정식(안) 개발

인천파일럿 탱크 벽체에 대한 압축강도결과와 비파괴시험 중 반발도 결과를 이용하여 압축강도 추정식(안)을 기존에 사용하는 두 가지 추정식 권영웅 외 및 과학기술부에서 제시하고 있는 모델식을 준용하여 산출하였다.

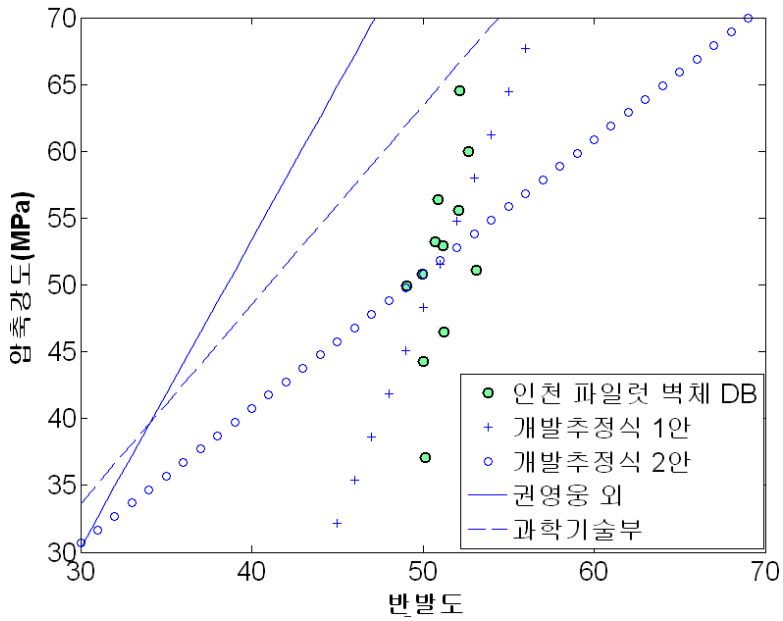
개발추정식 1안의 권영웅 외 추정식 'y=a*x+b'의 형태로 회귀분석한 결과와 2안의 과학기술부 추정식 y=(a*x+b)*c의 형태로 회귀분석한 결과는 아래와 같다.

<표. 63> 회귀분석한 압축강도 추정식(안)

| 개발추정식 | 압축강도 추정식(안) | 결정계수 |
|---|---|---|
| 1안 | 압축강도=3.2274*x-113.0769 | 0.3015 |
| 2안 | 압축강도=(1.5985*x+0.7353)*0.6298 | 0.1587 |

기존 고강도 압축강도 추정식보다 실제 DB의 추정식 안이 평균값으로 반발도 값 50에서 권영웅 외 및 과학기술부 추정식에 비해 각각 약 27MPa 및 약 13MPa 작게 나오는 경향이 있는 것으로 보여 기존 추정식은 LNG저장탱크의 압축강도를 추정하기에 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

하지만, 현재 개발한 추정식(안)은 많은 저장탱크들에 대한 시험데이터가 이용되지 못하고, 파일럿 탱크 하나의 구조물에 대한 데이터로 개발한 경우로 추정식으로 제한적으로 사용할 수 밖에 없기 때문에, 기존 2개의 추정식 중에 연구시험 데이터와 가까운 추정식인 과학기술부의 추정식을 우선적으로 사용하는 것도 방법이라고 판단된다.

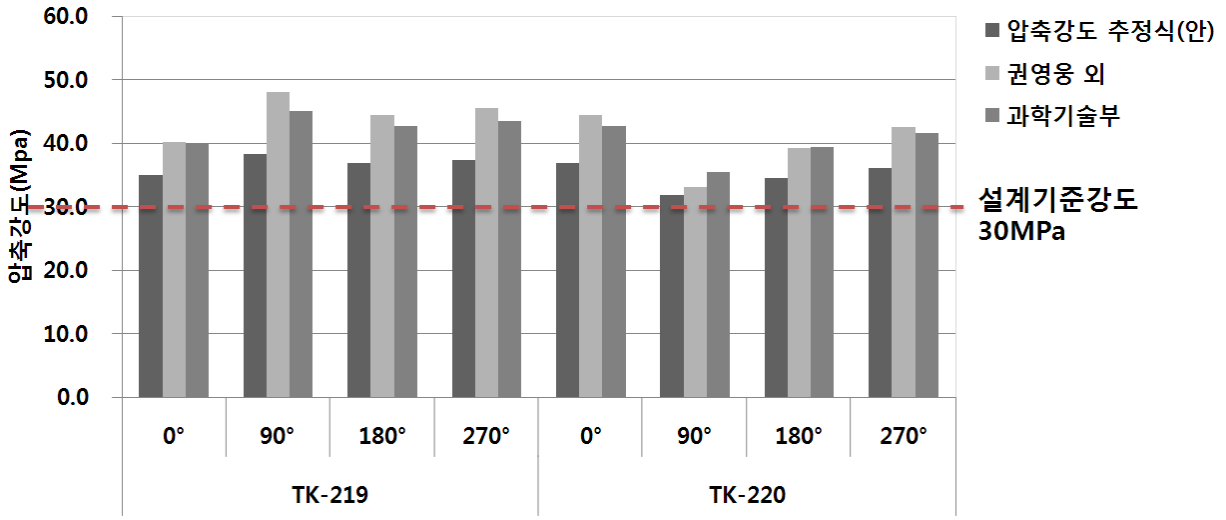



<그림. 126> 반발도에 따른 압축강도 기존곡선 및 추정식 개발 곡선

2가지 안의 결정계수를 보면 1안이 2안보다 높긴하지만 2안의 경우 기존 추정식과 유사한 기울기이고, 기존추정식보다 압축강도가 낮은 영역에 있으므로 보수적으로 사용할 수 있고 LNG저장탱크 압축강도 예측에 참고하는데 1안보다 더 적합하다고 판단된다. 결정계수(Coefficient of determination)는 회귀직선의 적정성 여부를 판단하기 위해서 회귀직선의 유의성(有意性)검정에 사용된다.

인천기지의 TK-219와 TK-220 벽체의 반발도 데이터(14년 정밀안전진단보고서)를 이용하여 적용성 및 타당성 검토를 수행한 결과는 아래의 그래프이며, 설계기준강도가 30 MPa로 기존식 및 개발된 압축강도 추정식(안)도 설계기준강도를 상회하는 것으로 확인되어 결과가 타당한 것으로 판단되었다.

설계기준강도와 비교해서 압축강도 추정식(안), 권영웅 외 및 과학기술부의 평균적인 차이는 각각 120%, 141% 및 138%이였다.

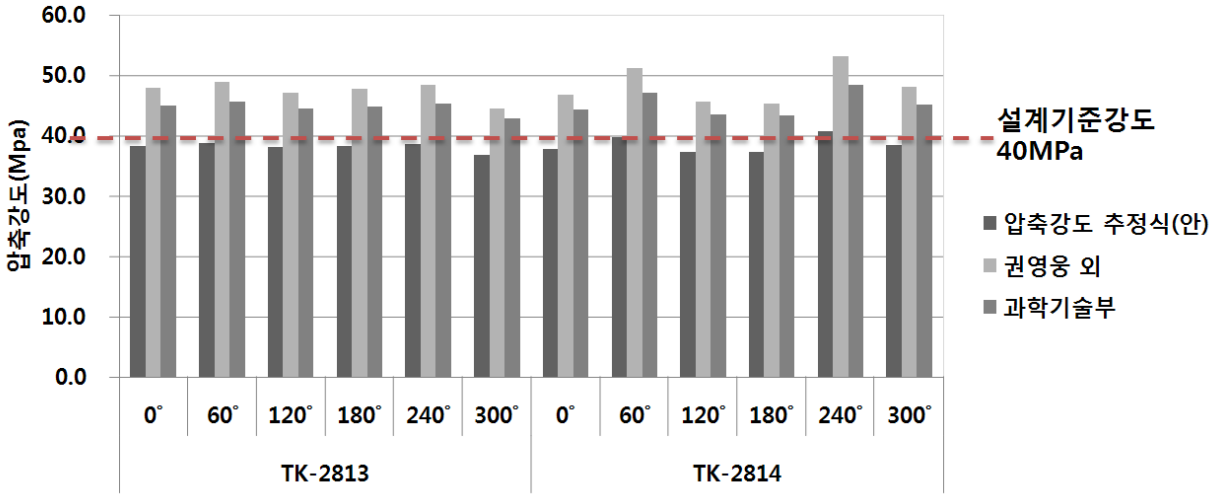



<그림. 127> 인천 TK-219와 TK-220 벽체의 반발도 데이터를 이용한 압축강도 비교

평택기지의 TK-2813와 TK-2814 벽체의 반발도 데이터(14년 정밀안전진단보고서)를 이용하여 적용성 및 타당성 검토를 수행한 결과는 아래의 그래프이며, 설계기준강도가 40 MPa로 기존식은 설계기준강도를 상회하지만 개발된 압축강도추정식(안) 미치지 못하는 것으로 확인되었다.

설계기준강도와 비교해서 압축강도 추정식(안), 권영웅 외 및 과학기술부의 평균적인 차이는 각각 96%, 120% 및 113%이였다.

압축강도 추정식(안)을 개발하기 위해 사용된 인천파일럿탱크 벽체의 기준강도는 35MPa로, 40MPa 설계기준강도에 대한 시험데이터가 부족하여 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다.




<그림. 128> 평택 TK-2813와 TK-2814 벽체의 반발도 데이터를 이용한 압축강도 비교

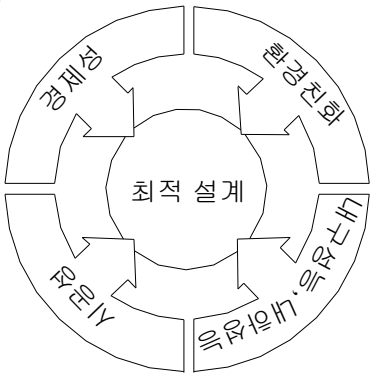
인천 파일럿 벽체가 35MPa의 설계강도로 DB가 반발도 49~53의 영역에서 압축강도 평균 51.9MPa로 분산되어 있는 것을 알 수 있는데, 보다 정확한 추정식을 위해서는 다른영역의 반발도에서의 보다 많은 압축강도 데이터가 확보 되어야 한다.

현장여건 및 중요구조물 코어채취의 어려움으로 추후 파일럿탱크 뿐만 아니라 운영 탱크에 대해서 코어채취가 가능할 때 보완 되어야 한다.

## 4절 LNG저장탱크 보수/보강 기술

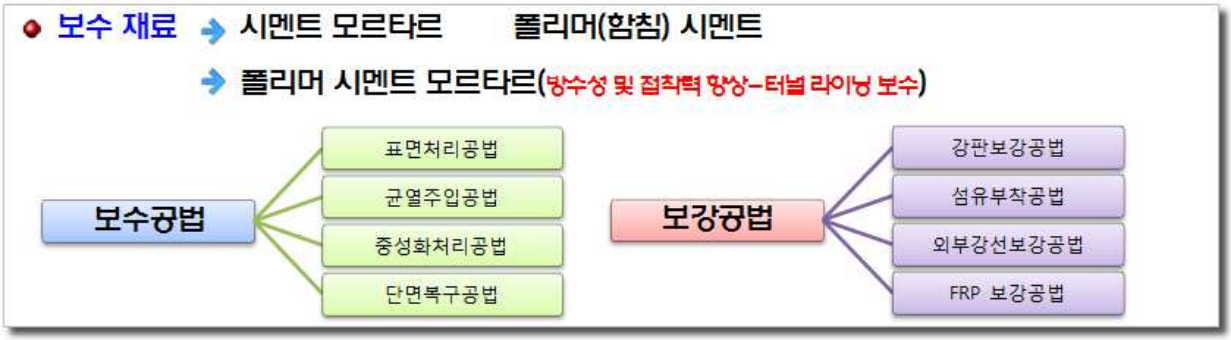
구조물의 결함발생 원인에 대한 정확한 분석과 이를 통해 적절한 공법과 재료를 구조적 적합성 및 시공성을 고려하여 공법을 선정해야 한다. 보수·보강을 위해서는 상태변화의 종류 및 정도, 구조물의 중요도, 사용 환경조건 및 경제성 등에 의해서 수준 결정을 한다.

<표. 64> 보수 · 보강 방안 선정의 요건 및 고려사항

| 보수 · 보강 방안 선정의 요건 | 보수 · 보강 재료 및 공법 선정시 고려사항 | |
|---|---|---|
|  | 내구성능<br>내하성능 | · 충분한 내구성 확보가 가능한 보수 방안<br>· 충분한 내하력 확보가 가능한 보강 방안 |
| | 환경친화 | · 유해환경요소를 발생시키지 않는 방안<br>· 화재 등 재해의 피해를 최소화 할 수 있는 방안<br>· 미관이 양호한 방안 |
| | 시 공 성 | · 시공성의 제약요소를 최소화 할 수 있는 방안<br>· 시공이 간단한 방안<br>· 보수 · 보강 품질이 확실한 방안 |
| | 경 제 성 | · 경제적으로 유리한 방안<br>· 공기를 단축시킬 수 있는 방안<br>· 주변 민원발생을 최소화 할 수 있는 방안 |

### 1. 콘크리트구조물 보수·보강공법

콘크리트 구조물의 보수재료, 보수공법 및 보강공법의 종류는 <그림 129>에 나타내었다.




<그림. 129> 콘크리트 구조물의 보수재료, 보수공법 및 보강공법

가.보수공법

(균열피복공법) 일반적으로 0.2mm 이하의 미세한 균열에 사용하며 균열 위에 도막을 형성하여 방수성, 내구성을 향상시키는 목적으로 실시하는 공법으로 균열부분만을 피복하는 공법이다.

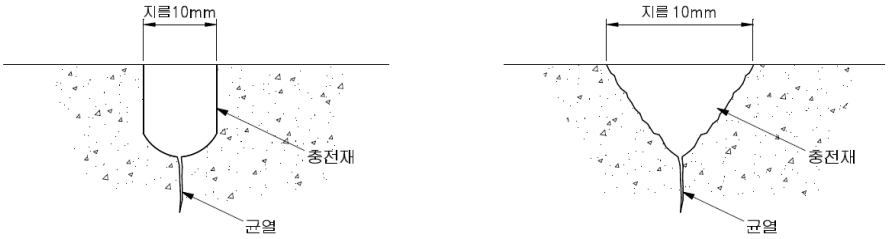
(균열주입공법) 일반적으로 0.2mm를 초과하는 경우에 사용되며 균열 내부에 점성이 낮은

수지계 또는 시멘트계 재료를 주입하여 방수성과 내구성을 향상시키는 공법이다.

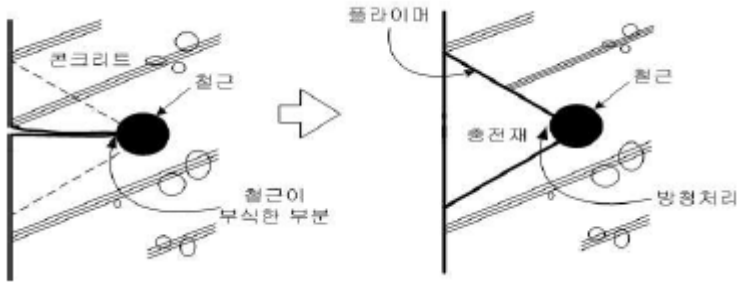
<표. 65> 콘크리트 구조물에 따른 보수공법 종류

| 보수 공법 | 공통 | 교량 | 터널 |
|---|---|---|---|
| 균열 보수 | ·균열피복공법<br>·균열주입공법<br>·균열충전공법 | ·균열피복공법<br>·균열주입공법<br>·균열충전공법 | ·균열피복공법<br>·균열주입공법<br>·균열충전공법<br>·핀그라우트공법<br>·침투성방수재도포공법 |
| 표면 보호 | · 유기계피복공법<br>-도포공법<br>-쉬트공법<br>· 무기계피복공법<br>-도포공법<br>-매쉬공법<br>· 표면함침공법 | · 유기계피복공법<br>-도포공법<br>-쉬트공법<br>· 무기계피복공법<br>-도포공법<br>-매쉬공법<br>· 표면함침공법 | |
| 단면 복구 | ·미장공법<br>·숏크리트공법<br>·충전공법 | ·미장공법<br>·숏크리트공법<br>·충전공법 | ·미장공법<br>·숏크리트공법<br>·충전공법<br>·타설이음공법<br>·맞대기판공법<br>·이음재채움공법 |
| 누수 보수 | | · 지수공법 | ·도수공법(유도공법)<br>·지수공법<br>·도포공법<br>·방수판표면배수공법<br>·수위저하공법<br>·침투성방수재도포공법 |
| 기타 | · 방청처리공법 | ·포장부보수공법<br>·신축이음장치 보수공법<br>·교좌장치 보수공법 | ·내장판교체공법 |

(균열충진공법) 비구조적 균열폭이 0.5mm 이상의 비교적 큰 경우의 보수에 적합한 공법으로 균열을 따라 모르타르 마감 또는 콘크리트를 절단하여 그 부분에 보수재를 충전하는 공법이다.




<철근이 부식하지 않은 경우의 충진공법>




<철근이 부식된 경우의 충진공법>

<그림. 130> 충진공법 개요도

(단면복구공법) 콘크리트 구조물의 내구성 향상, 열화 억제 또는 보수를 목적으로 콘크리트 구조물의 상태변화가 현저한 부분, 염화물이온 등의 열화요인이 허용한도를 초과하여 존재하고 있는 부분 등을 제거한 후 단면복구재를 이용하여 당초의 성능 및 형상치수로 복원하는 공법이다.

균열폭 3.0mm 이상의 균열은 구조적인 결함을 수반하는 일이 많으므로 여기에 표시하는 보수공법뿐만 아니라 구조내력의 보강을 포함하여 실시하는 일이 보통이다.

(○ : 적당, △ : 조건에 따라 적당, □ : 기타)

<표. 66> 보수목적 및 균열현상·원인에 따른 보수공법 적용

| 보수 목적 | 균열현상·원인 | | 균열폭 (mm) | 보수공법 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 표면 처리 공법 | 주입 공법 | 충전 공법 | 침투성 공법 | 기타 |
| 방수성 | 철근부식 미발생시 | 균열폭 변동이 작음 | 0.2이하 | ○ | △ | | ○ | |
| | | | 0.2~1.0 | △ | ○ | ○ | | |
| | | 균열폭 변동이 큼 | 0.2이하 | △ | △ | | ○ | |
| | | | 0.2~1.0 | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 내구성 | 철근부식 미발생시 | 균열폭 변동이 작음 | 0.2이하 | ○ | △ | △ | | |
| | | | 0.2~1.0 | △ | ○ | ○ | | |
| | | | 1.0이상 | | △ | ○ | | |
| | | 균열폭 변동이 큼 | 0.2이하 | △ | △ | △ | | |
| | | | 0.2~1.0 | △ | ○ | ○ | | |
| | | | 1.0이상 | | △ | ○ | | |
| | 철근부식 | | - | | | | | □ |
| | 염해 | | - | | | | | □ |
| | 반응성 골재 | | - | | | | | □ |

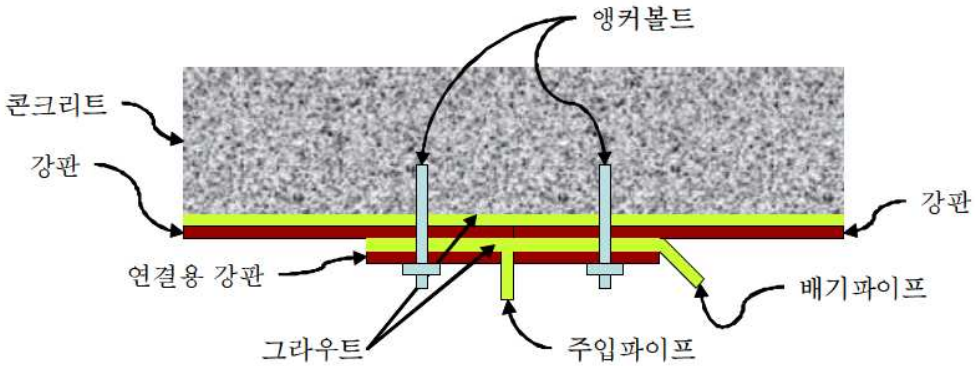
나. 보강공법

<표. 67> 콘크리트 보강공법에 따른 공통, 교량 및 터널에 적용되는 세부공법 종류

| 보강 공법 | 공통 | 교량 | 터널 |
|---|---|---|---|
| 단면 증설 | • 단면증설공법<br>• 휨부재의 보강<br>• 압축재의 보강<br>• 슬래브의 보강 | • 단면증설공법<br>• 둘러싸기공법 | |
| 부재 교화 | | • 교체공법 | |
| 부재 추가 | | • 보증설공법<br>• 지지점증설공법 | |
| 보강재 추가 | • 강판보강공법<br>• 강판압착공법<br>• 부착주입공법<br>• 연속섬유보강공법<br>• 섬유쉬트보강공법<br>• 섬유플레이트 보강공법 | • 강판보강공법<br>• 연속섬유보강공법<br>• 섬유쉬트보강공법<br>• 섬유플레이트 보강공법 | • 강판보강공법<br>• 철망설치공법<br>• 록볼트보강공법<br>• 섬유쉬트보강공법<br>• 강지보공설치공법<br>• 인버트보강공법<br>• 콘크리트라이닝 보강공법 |
| 프리 스트 레스 도입 | • 프리스트레싱 보강공법 | • 프리스트레싱 보강공법 | |
| 기타 | | | • 배면공극 충전공법 |

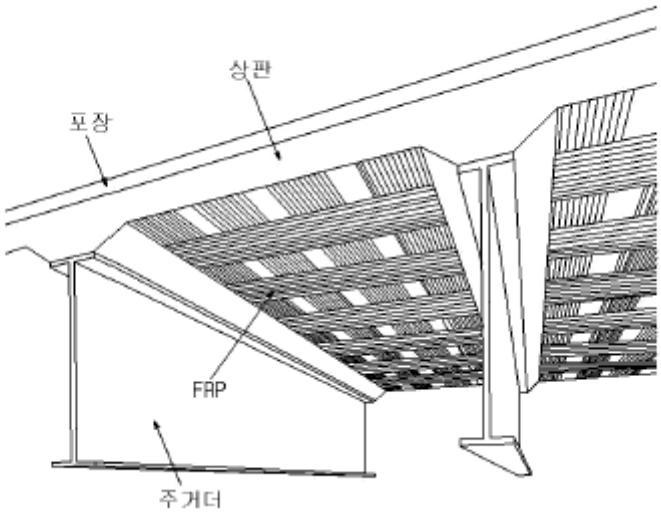
(단면증설공법) 기존 구조물의 부족한 내력을 확보하기 위하여 부재의 단면을 증대시키는 공법으로 부재의 강성이 증가되고, 단면증설 보강 후 처짐 등이 보완되어 사용성을 증대시킬 수 있다. 다만 공법의 적용 후 고정하중이 증가되므로 시설물의 안전성 검토를 실시하여 안전성을 확보해야 한다.

(강판보강공법) 기존 콘크리트에 강판을 부착하고 그 사이에 에폭시를 그라우팅하여 콘크리트와 강판을 일체화시켜 구조물의 조하된 내하력을 원상회복 또는 향상시키는 경우에 적용하며 강판과 부착되는 콘크리트 면의 균열 또는 누수가 존재하거나 발생 위험이 있을 경우에는 완전한 보수 후, 충분한 강도가 발현되는 시점에 콘크리트 표면이 건조한 상태에서 적용한다.




<그림. 131> 강판보강공법 개요도

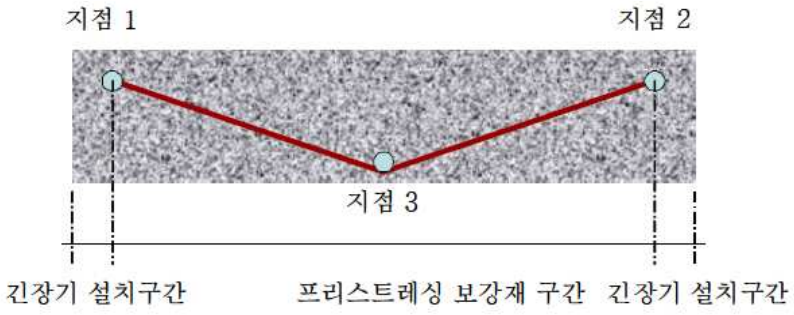
(연속섬유보강공법) 연속섬유쉬트 및 플레이트를 함침 수지를 이용하여 콘크리트 표면에 함침·부착하는 공법이다.




<그림. 132> 연속섬유보강공법 개요도

(외부프리스트레싱보강공법) 기존 구조물에 새로운 PS 긴장재를 추가 배치하여 프리스트레스를 도입하는 방법으로써 부재에 내응력(Internal stress)을 발생시켜 부재내에 발생된 균열을 복귀시킬 뿐만 아니라 압축응력을 부여하여 휨모멘트, 전단력, 축력을 증가시켜 구조물의 내력 및 강성을 증가시키는 공법이다.

《개요도》



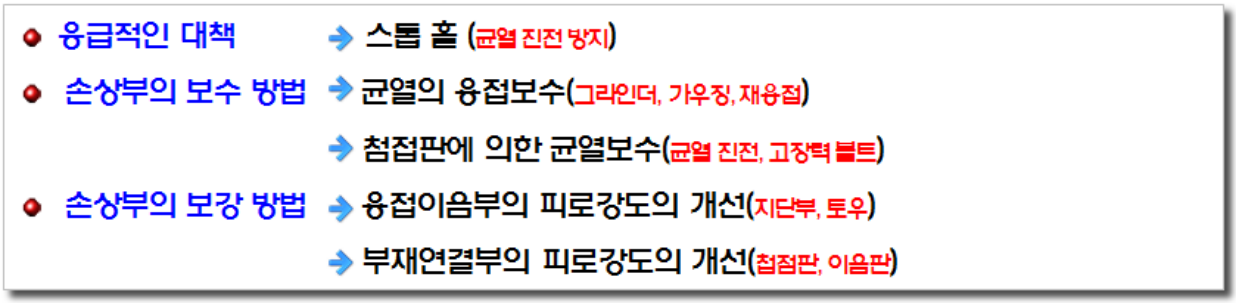

<측면에 프리스트레싱 보강재를 설치한 경우>




<하부면에 프리스트레싱 보강재를 설치한 경우>

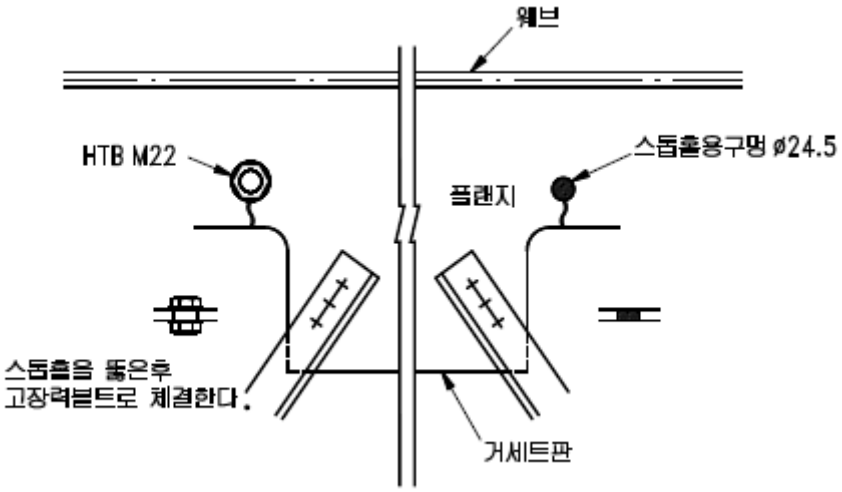
<그림. 133> 외부프리스트레싱보강공법 개요도

## 2. 강구조물 보수·보강공법



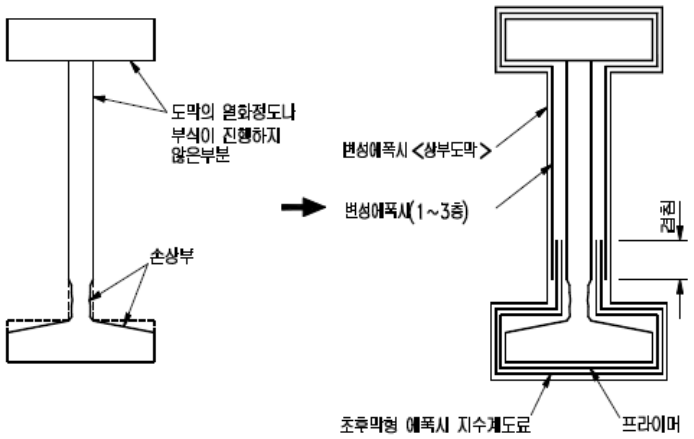

<그림. 134> 강구조물의 응급대책, 보수방법 및 보강방법

Stop-Hole 공법은  피로균열 선단에 구멍을 설치하여 선단부의 국부적인 응력집중을 해소하고, 균열의 진전을 일시적으로 방지하는 방법이다.



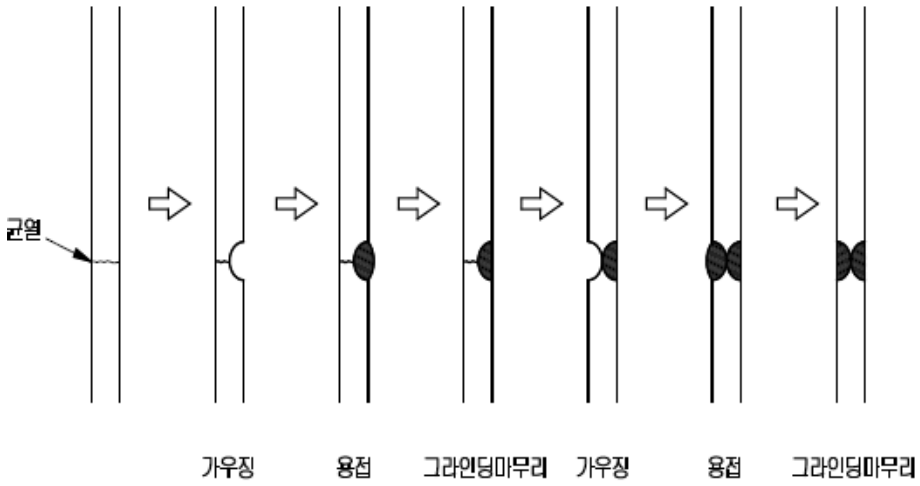

<그림. 135> Stop-Hole 공법 개요

도색보수공법은 부식에 의해 결함이 발생한 부재는 녹의 진행속도도 빠르고 도막수명도 짧아 구조물의 내력이나 내구성에 영향을 끼칠 수 있다. 부식에 의해 단면손상이나 결함발생이 우려되는 경우 특수한 도장을 이용한다.



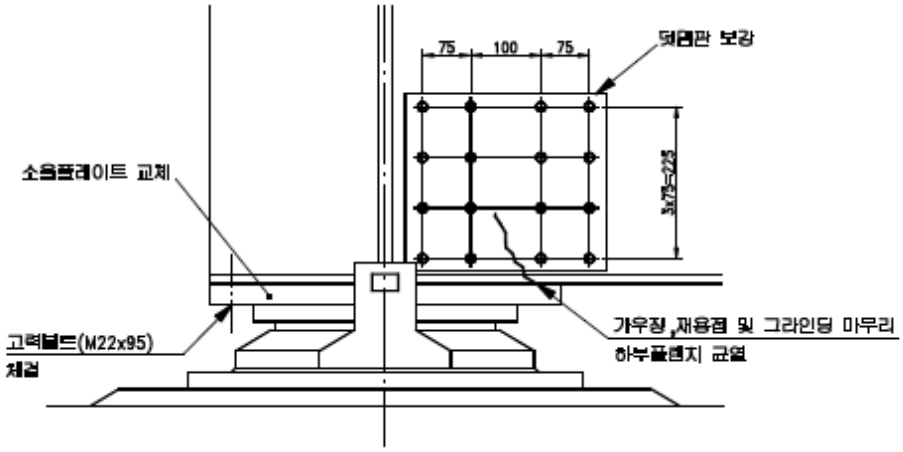

<그림. 136> 도색보수공법 개요

용접보수공법은 균열이 발생한 부위를 가우징으로 제거한 후 재 용접하여 보수하는 방법과 Tig 용접의 비소모성 전극을 사용하여 균열부를 재용융하는 방법, 손상부에 첨접판을 대고 용접하는 방법 등이 있고 현장 조건과 종류에 따라 적정한 공법을 적용하여 보수한다.




<그림. 137> 용접보수공법 개요

보강판 고력볼트체결공법은 강재의 재질이 불확실하고 작업조건이 나빠 안정된 상태로 용접할 수 없는 강교에서 부식에 의한 단면 결손이나 피로에 의한 균열이 생겼을 때 단면의 보강효과를 기대하는 목적으로 이 공법을 적용한다.




<그림. 138> 보강판 고력볼트체결공법 개요

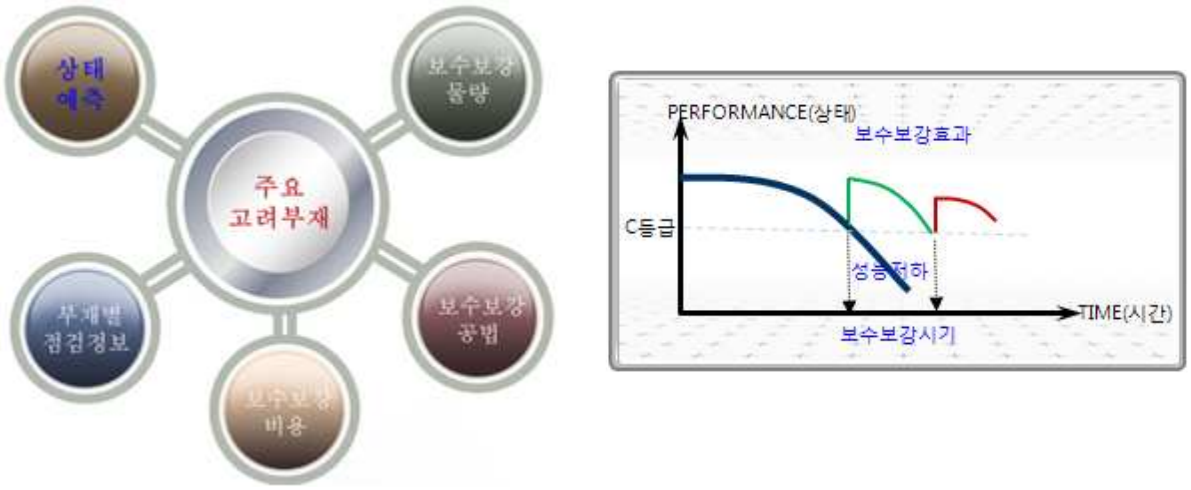
## 5절 표준 개발 및 소프트웨어 개발

### 1. LNG 저장탱크 콘크리트 외조의 상태평가기준(안) 개발

가. 상태평가대상 저장탱크의 대표부재 및 손상종류 분류

외조콘크리트 부재는 복합적 요인(콘크리트 열화, 부식, 크리프, 건조수축 및 피로, 환경 등)의 영향을 받고 부재의 재료, 구조적 특성 등에 따라 상이하게 상태변화가 발생한다. 형식별 구성 부재들의 표준화를 통해 다수의 대상 탱크에 대한 방대한 정보처리 시 체계적인 관리 및 분석을 수행할 수 있다.

주요고려부재 단위로 부재별점검정보, 보수보강비용 데이터, 보수보강공법, 보수보강물량 및 상태예측모델 개발 등을 수행할 수 있다. 추후 상태등급DB가 확보되면 보수시점을 예측할 수 있는 상태예측모델을 부재별로 개발 할 수 있고 전체상태등급 산정방법을 통해 전체저장탱크에 대한 상태도 예측 가능하다.




(a) 주요고려 부재 유지관리 (b) 상태등급예측모델 예

<그림. 139> LNG저장탱크 대표부재 분류의 중요성

LNG저장탱크 외조탱크의 내부적 결함으로 인한 위험성 발생으로 가능한 취약위치는 피로수명 평가프로그램으로 검토 및 확인을 할 수 있다. 이러한 분석으로 LNG저장탱크 벽체부가 다른 부재에 비해 손상위험이 있어서 벽체 상태평가기준(안)에 대해 보수적 적용이 필요하다고 판단된다.

LNG저장탱크 외조탱크의 구조적 특성을 고려하여 아래와 같이 주요부재를 지상식과 지중식에 따라 구분할 수 있다.

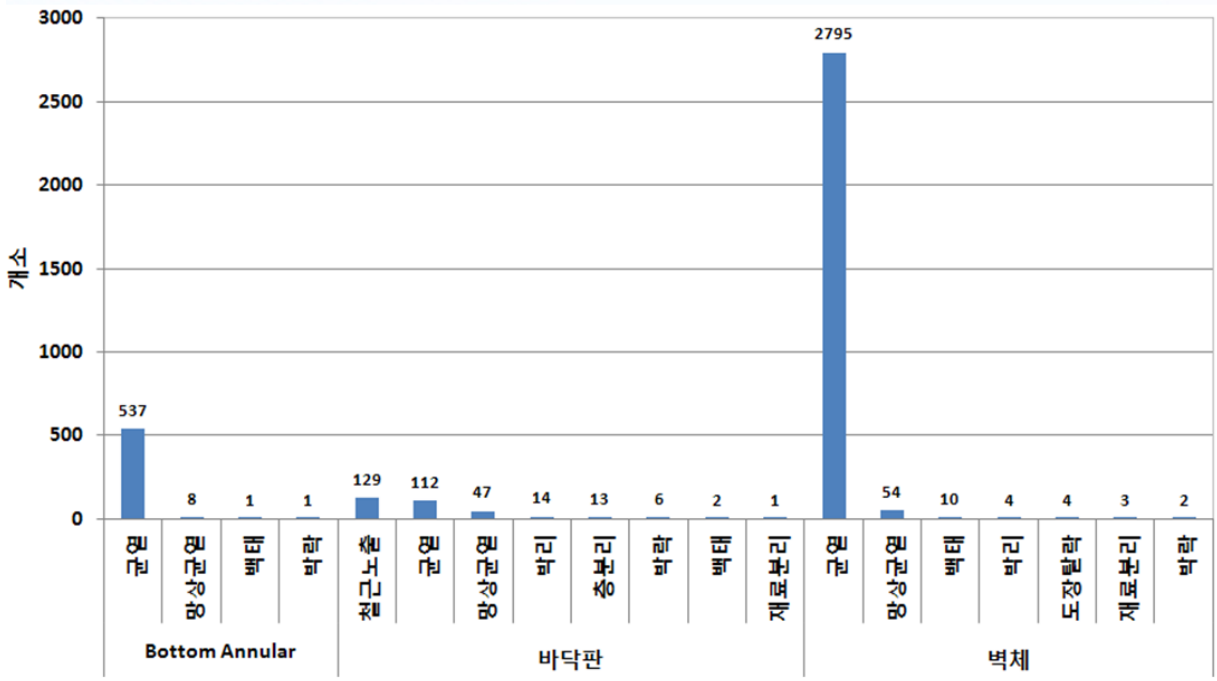
<표. 68> LNG저장탱크 외조탱크의 형식별 주요부재

| 위치 | 기초 | 내조 | 주요부재 | |
|---|---|---|---|---|
| 지상식 | 고상식 | 9% Ni 탱크, Membrane 탱크 | 상부구조 | 지붕 |
| | | | | 벽체(버트라스 포함) |
| | | | | 바닥판 |
| | | | 하부구조 | 탱크기둥 |
| | | | | 기초 |
| | | | 받침 | 탱크받침 |
| | | | 기타구조 | 지붕 난간 |
| | 저부 가열식 | 9% Ni 탱크, Membrane 탱크 | 상부구조 | 지붕 |
| | | | | 벽체(버트라스 포함) |
| | | | 하부구조 | 기초 |
| | | | 기타구조 | 지붕 난간 |
| 지중식 | | 9% Ni 탱크, Membrane 탱크 | 상부구조 | 지붕 |
| | | | | 벽체(버트라스 포함) |

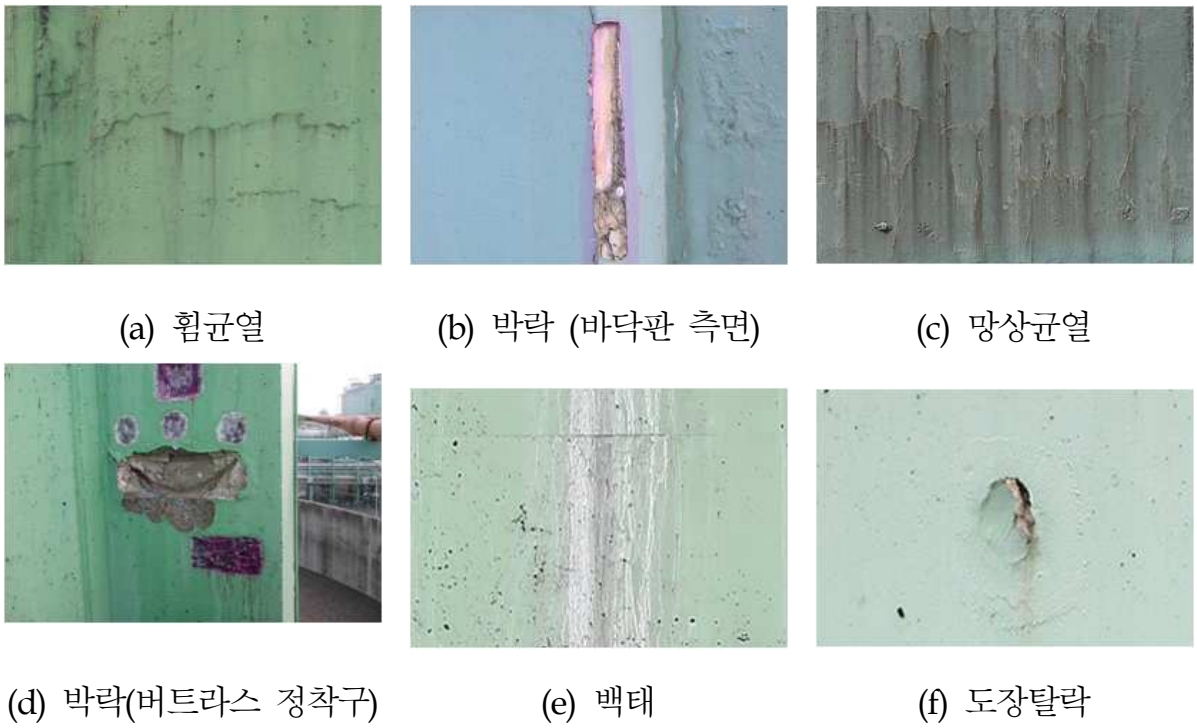
LNG저장탱크에서 실제로 발생하고 있는 손상종류를 확인하기 위해서 2014년도에 정밀안전진단을 완료한 저장탱크의 정밀안전진단 보고서를 이용하였다. 이 보고서는 터널 상태평가기준을 기본으로 적용하고 벽체는 교량의 PSC거더 부재 상태평가기준을 이용하고 있다.

<표. 69> 2014년도에 LNG 저장탱크의 정밀안전진단 결과

| 탱크 번호 | 위치 | 용량 ( $m^3$ ) | 준공일 | 내부 탱크 | 설치 위치 | 상태 등급 | 기초 형식 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| TK-220 | 인천 | 20만 | 2009.04 | 멤브레인 | 지중 | A | |
| TK-219 | | | 2008.09 | | | A | |
| TK-207 | | 10만 | 1999.11 | 9% 니켈 | 지상 | A | 고상식 |
| TK-208 | | | 1999.11 | | | B | |
| TK-209 | | | 1999.11 | | | B | |
| TK-211 | 통영 | 14만 | 2008.09 | 9% 니켈 | 지상 | A | 저부가열식 |
| TK-212 | | | 2008.09 | | | A | |
| TK-707 | 평택 | 10만 | 1995.11 | 멤브레인 (SUS304) | 지상 | B | 고상식 |
| TK-706 | | | 1994.11 | | | B | |
| TK-2813 | | 14만 | 2008.03 | 9% 니켈 | 지상 | A | 저부가열식 |
| TK-2814 | | | 2008.03 | | | A | |




<그림. 140> 부재별 손상종류 개소 분포



(a) 횡균열 (b) 박락 (바닥판 측면) (c) 망상균열

(d) 박락(버트라스 정착구) (e) 백태 (f) 도장탈락

<그림. 141> LNG저장탱크 부재별 손상종류 - 벽체



(a) 휨균열



(b) 받침 부식 및 도장 탈락





(c) 재료분리



(d) 철근노출

(e) 철근노출 및 오염

<그림. 142> LNG저장탱크 부재별 손상종류 - 바닥판 및 받침

LNG 저장탱크의 상부구조는 크게 지붕, 벽체, 바닥판으로 구분되고, 정밀안전진단보고서에서 점검된 손상종류와 기존 토목구조물에서 발생하고 있는 결함을 고려하여 부재별 손상종류 분류를 하였다.

<표. 70> LNG 저장탱크의 부재별 손상종류

| 점검부위 | 손상종류 |
|---|---|
| 지붕 | ○ 균열, 박리, 박락, 층분리, 철근노출<br>○ 재료분리(공동, 공극)<br>○ 백태(유리석회)<br>○ 도장탈락 |
| 벽체<br>(버트라스 포함) | ○ 균열, 박리, 박락, 철근노출<br>○ 재료분리(공동, 공극)<br>○ 백태(유리석회)<br>○ 망상균열<br>○ 도장탈락<br>○ 정착부 노출 및 파손 |
| 바닥판 | ○ 균열, 박리, 박락, 층분리, 철근노출<br>○ 재료분리(공동, 공극)<br>○ 백태(유리석회)<br>○ 망상균열 |

| | |
|---|---|
| 페데스탈 | ○ 앵커볼트 파손, 절단<br>○ 콘크리트 파손, 하부공동 및 침하<br>○ 두부 균열<br>○ 재료분리(공동, 공극)<br>○ 백태(유리석회)<br>○ 망상균열 |
| 기초 | ○ 균열, 박리, 박락, 철근노출, 백태<br>○ 침하<br>○ 하부구조물 기울음 |
| 받침 본체 | ○ 받침과 바닥판의 밀착상태<br>○ 받침 편기상태<br>○ 받침 물고임 및 부식<br>○ 도장탈락<br>○ 부속물 파손<br>○ 고무판의 부풀음 및 갈라짐<br>○ 고무판의 과도한 변형 |

나. LNG저장탱크에 대한 기존 상태평가기준(안) 개발

국내 기존 토목구조물의 상태평가기준을 분석을 통해 구조물 형상과 부재구성이 유사한 교량 구조물의 상태등급을 적용하였다. 저장탱크의 벽체의 경우 PSC 거더(PSC박스 거더)와 구조적 특성과 부재종류가 유사하고 그 외 부재도 교량의 부재와 비슷하다. 교량 부재 상태평가기준을 LNG저장탱크 특성에 맞게 수정 및 보완하여 적용하는 방안으로 하였다.

부재별 상태평가 기준은 상부구조, 하부구조, 받침 및 기타부재로 분류하고, 콘크리트의 탄산화와 염화물에 대한 평가항목을 포함하였다. LNG저장탱크의 안전에 직접적인 영향을 미치는 지붕, 벽체, 바닥판, 탱크기둥, 기초 및 탱크받침은 a~e 범위를 적용하였다. 내구성에 영향을 미치는 콘크리트 재료의 열화 관련 탄산화 및 염화물은 a~d 범위로 하였다.

<표. 71> 부재별 상태평가 적용범위

| 부재의 분류 | | 차등 적용범위 |
|---|---|---|
| **상부구조** | **지붕** | a, b, c, d , e |
| | **벽체(버트라스 포함)** | a, b, c, d , e |
| | **바닥판** | a, b, c, d , e |
| **하부구조** | **페데스탈** | a, b, c, d , e |
| | **기초** | a, b, c, d , e |
| **받침** | **탱크받침** | a, b, c, d , e |
| **콘크리트 재료** | **탄산화, 염화물** | a, b, c, d |

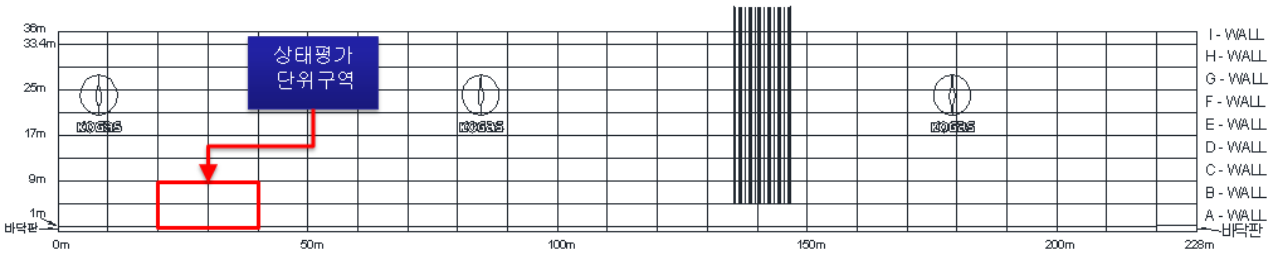
LNG저장탱크 상태평가 단위구역은 구조물의 진단여건과 특성, 상태평가 등을 고려하여 구조물의 정북 방향의 중심을 기준점 0m로 잡고 4mx10m의 사각형태로 등분하여 높이에는 A~I열까지 총 9열, 길이에는 10m값을 부여하였으나, 현재 정밀안전진단에서 상태평가 등을 고려하여 8mx20m, 10블럭씩 5열, 총 60블럭으로 하였다.

※ 터널 : 측점분할을 신축이음부 또는 평가단위로 분할하고 일반적으로 5~50 m (책임기술자 조정 가능)

※ 옹벽: 측점분할을 신축이음부 또는 평가단위로 하고 일반적으로 20 m 간격 (책임기술자 조정 가능)

※ 교량: 여러 부재에 대해서 경간별 부재(거더, 바닥판 등)과 지점별 부재(교각, 받침 등)으로 구분하여 점검

자문의견에 따라 벽체에서 구조적 특성으로 구분할 수 있는 부분인 버트라스간 사이의 구간으로 한 개의 단위구역으로 해서 총 6개 단위구역으로 하고 1개 단위구역에서 수직으로 8m씩 구분하는 방향으로 설정하였다.




<그림. 143> 현재 LNG저장탱크의 정밀안전진단시 상태평가 단위구역

LNG 저장탱크 부재별 상태평가기준(안)에 대한 가이드라인은 부록을 참고한다.

## 2. LNG 저장탱크 수명평가 프로그램

가. 프로그램 주요메뉴

LNG 저장탱크 수명평가 최적화 프로그램 개발용역의 Main Menu Template는 <그림 144>과 같다. Main Menu는 다음 5가지 Menu로 구성된다. Material DB는 Mechanical Analysis와 Civil Analysis를 위한 물성값을 정의하며, Mechanical Analysis는 총 5가지 해석을 수행하고, Civil Analysis는 총 10가지 해석을 수행한다. 수행된 결과는 Report를 통하여 인쇄가 되며 해석을 위한 기본 Code 파일은 Code에서 검토할 수 있다.




<그림. 144> Main menu template

Material DB: LNG 저장탱크에 필수적으로 들어가는 재료물성치 DB를 구축하며 우선 Default 값을 저장해놓았으며 필요에 따라서 사용자가 물성치값을 변경 가능하도록 프로그래밍하였다.

Mechanical Analysis: 기계분야의 해석을 진행하며 Abaqus 해석을 통한 구조해석 및 계산된 구조해석을 적용한 FEMFAT 피로수명 계산을 실시한다.

Civil Analysis: Chloride Attack(염해해석)과 Carbonation(탄산화 해석)을 진행하며 설계자가 다양한 조건을 입력해야 하는 Chloride Attack인 경우에는 공개 프로그램인 Life-365를 실행시키고 별도의 입력 메뉴없이 사용자가 다양하게 해석을 진행하여 결과를 지정된 출력 파일로 저장하여 Report 메뉴에서 Post-Processing을 진행하도록 하였다.

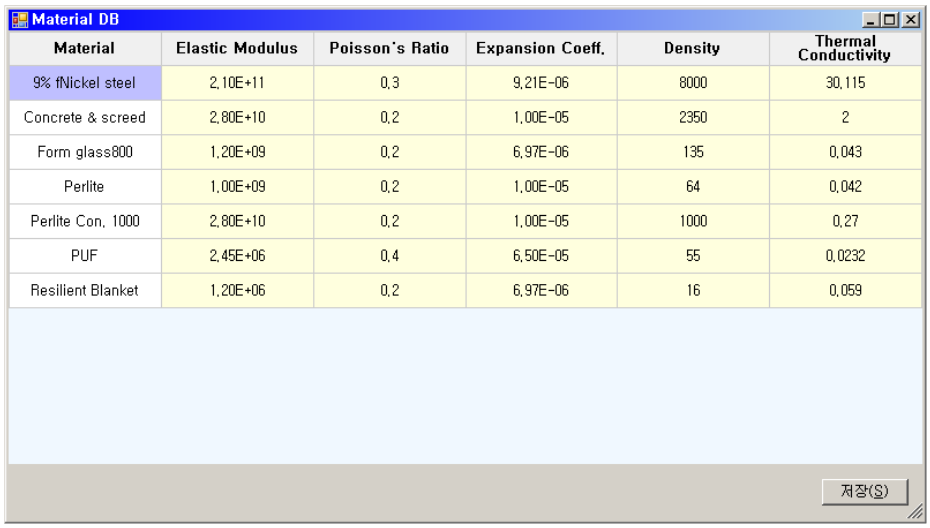
Code: LNG 저장탱크의 최종 판정을 내리기 위하여 2차 과제에서 기존의 BS Code 혹은 Euro Code를 정량화하여 최종 판정값을 계산하는 프로세스를 수시로 찾아볼 수 있도록 하였

다.

Report: LNG 저장탱크 수명 시뮬레이션을 위한 판정 기준을 2차 과제를 통하여 Post-Processing 하도록 한다.

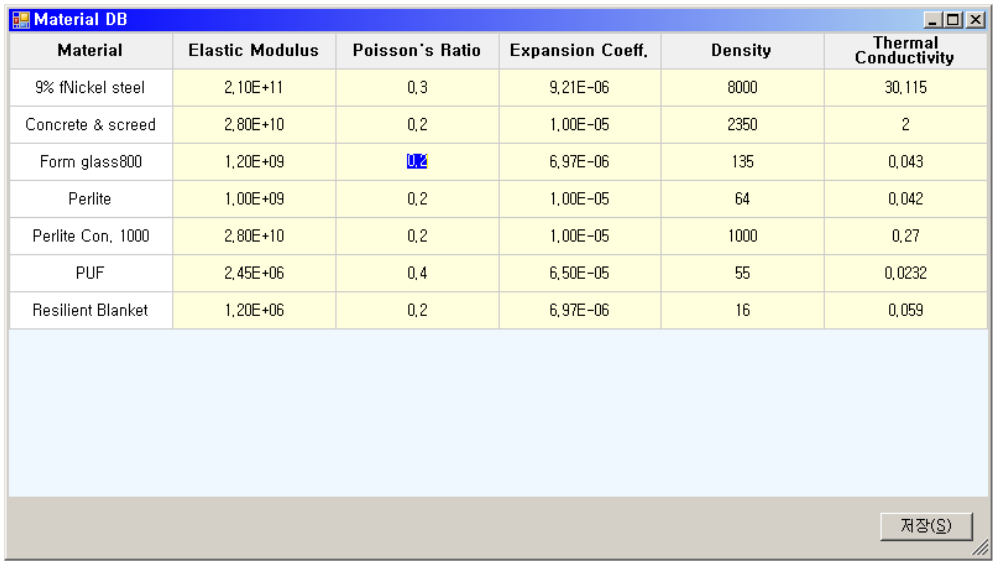
(1) Material DB

재료 물성치 DB는 1차적으로 Default 물성치를 저장해 놓았으며 만약 사용자가 변경을 진행하지 않는다면 Default값을 그냥 사용하면 되며 만약 사용자가 변경을 진행한다면 변경을 하고 저장(S) 버큰을 눌러야 저장이 되도록 하였다. 재료 물성치는 LNG 저장탱크의 수명평가에 큰 영향을 미치기 때문에 사용자가 다시 한번 검토를 할 필요가 있어서 저장(S) 버튼을 적용하였다. <그림 145>은 LNG 저장탱크 재료물성치의 Default값을 보여주며 LNG 저장탱크를 구성하는 중요한 재료인 9% Nickel Steel, Concrete & Screed, Form Glass 800, Perlite, Perlite Con. 1000, PUF, Resilient Blanket의 7가지 재료의 물성치를 DB화 하였다.

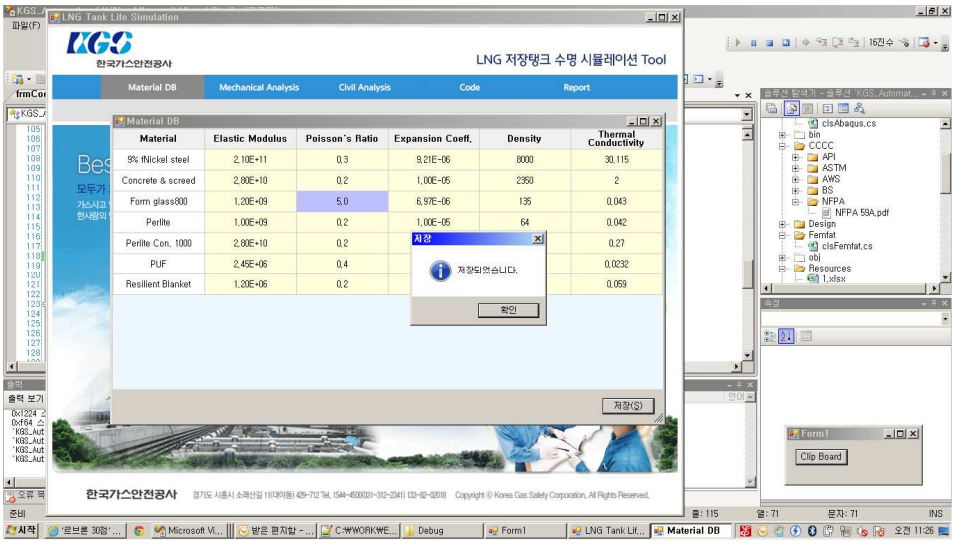



<그림. 145> 재료물성치 default값

사용자가 재료물성치를 변경하고자 한다면 <그림 146>과 같이 사용자는 사용자가 변경하고자 하는 Form Glass 800의 물성치인 Poisson's Ratio를 선정한다. 초기에 지정된 Default값은 0.2를 나타내며 사용자가 만약 0.2인 Poisson's Ratio를 5.0으로 변경하고 싶다면 0.2값이 있는 Cell을 마우스로 선택한 후에 값을 5.0으로 입력하면 된다. 하지만 사용자가 재료물성치와 같은 중요한 값을 잘못 변경할 수 있는 위험을 최소화하기 위하여 Poisson's Ratio를 5.0으로 변경한 후에 오른쪽 하단부에 위치하는 저장(S) 버튼을 눌러야지만 재료물성치 DB가 Update가 되도록 하였다. <그림 147>은 Poisson's Ratio를 5.0으로 변경하고 Update한 최종결과를 보여주며 사용자는 기타 다른 재료물성치 값도 동일한 방법을 적용하여 변경을 할 수 있다.



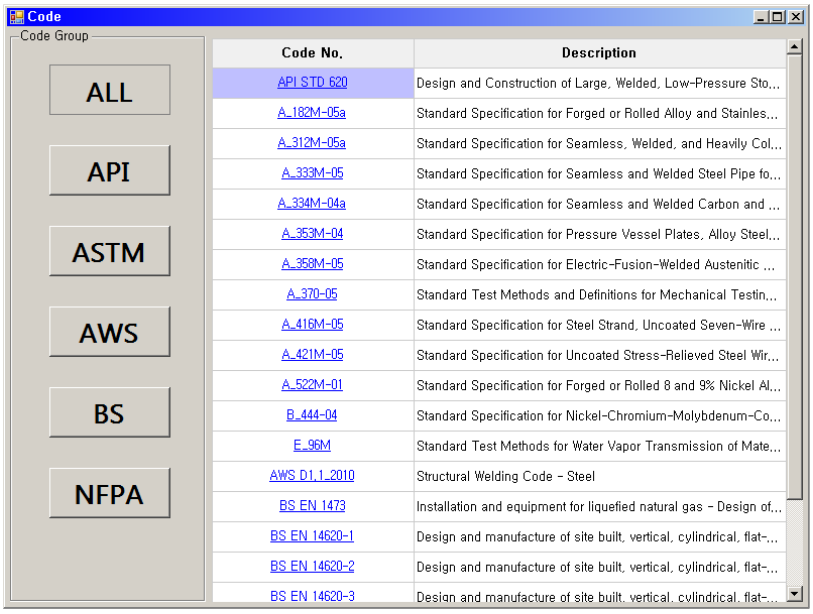

<그림. 146> 재료물성치 변경 프로세스 I




<그림. 147> 재료물성치 변경 프로세스 II

(2) Code

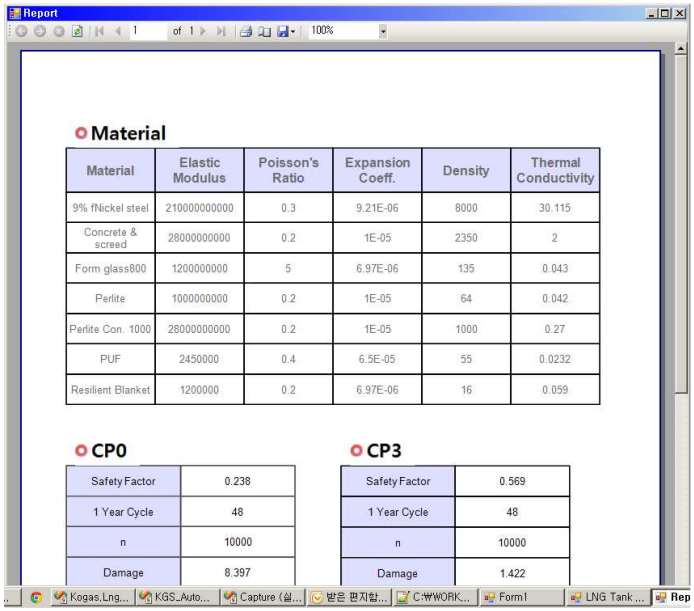
LNG 저장탱크의 최종 판정을 내리기 위하여 기존의 BS Code 혹은 Euro Code를 정량화하여 최종 판정값을 계산하도록 하였으며 LNG 저장탱크 수명평가를 위하여 사용자가 꼭 읽어야 할 Code 파일들을 링크시켜 놓았다. Code 파일들은 API, ASTM, AWS, BS, NFPA의 총 5가지 Code별 파일들을 저장하였으며 전체를 볼 수 있는 ALL 버튼을 그림 1.5와 같이 추가하였다. <그림 148>은 전체 Code 파일을 모두 보여준다.




<그림. 148> LNG 저장탱크 전체 Code 파일

(3) Report

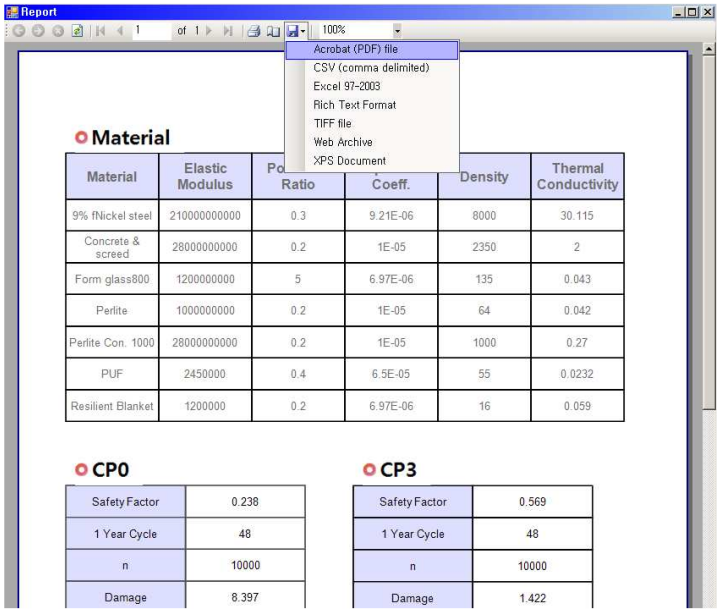
LNG 저장탱크 수명평가의 최종 Report를 위한 Summary(용약보고서)는 <그림 149>와 같다. 1차적으로 해석에 적용된 재료물성치 값들을 표시하도록 하였으며 최종 피로수면 해석 결과인 안전계수(Safety Factor)와 피로 수명(Cycle, Damage)를 표시하도록 하였다.




<그림. 149> LNG 저장탱크 Report 포맷

그림1.12 LNG 저장탱크 Report 포맷

<그림 150>은 1차 Summary 결과를 인쇄가 가능한 형태나 보고서 형태로 저장하는 프로세스를 의미하며 pdf file, CSV file, Excel 97-2003, Rich Text Format, TIFF, Web Archive, XPS Document의 총 7가지 보고서 형태를 우선적으로 구축하였다.



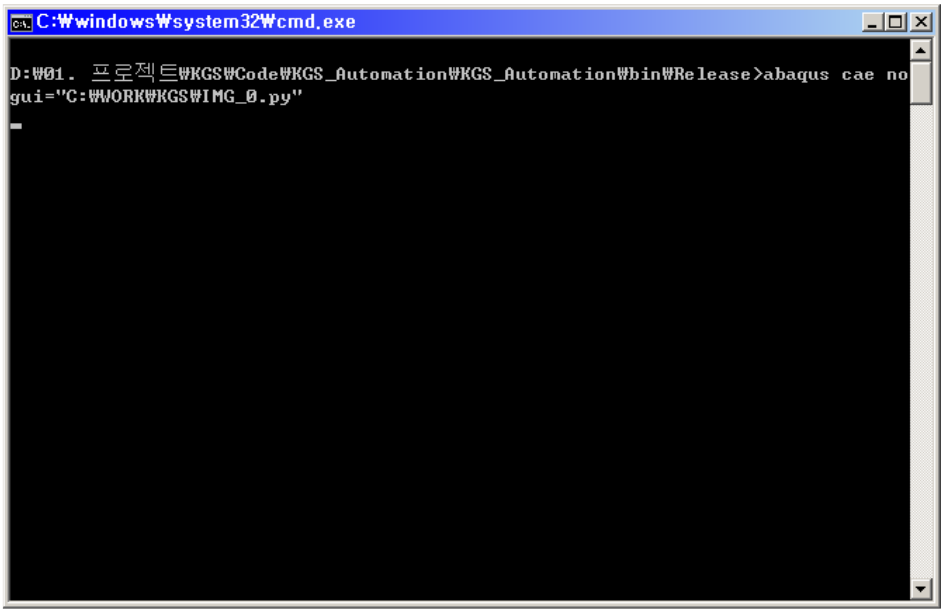

<그림. 150> LNG 저장탱크 Report 저장 프로세스

나. 내조탱크 수명평가 해석

기계분야 해석(Mechanical Analysis)는 크게 다음 2가지의 프로세스로 구분된다. 유한요소 해석 프로그램을 적용한 응력(구조/열) 해석 프로세스 및 해석된 응력값을 기반을 한 피로수명 해석 프로세스로 대별된다. 다양한 유한요소해석 프로그램 중에서 LNG 저장탱크 해석을 위하여 Abaqus를 적용하였으며 피로수명 해석은 FEMFAT을 적용하여 계산하였다. Abaqus와 FEMFAT을 자동화하기 위해서는 batch command를 적용하여야 하며 자동화를 위하여 필요한 batch command는 소프트웨어를 기술지원하는 공급업체와 협업하여 완료하였다.

(1) Abaqus 자동화

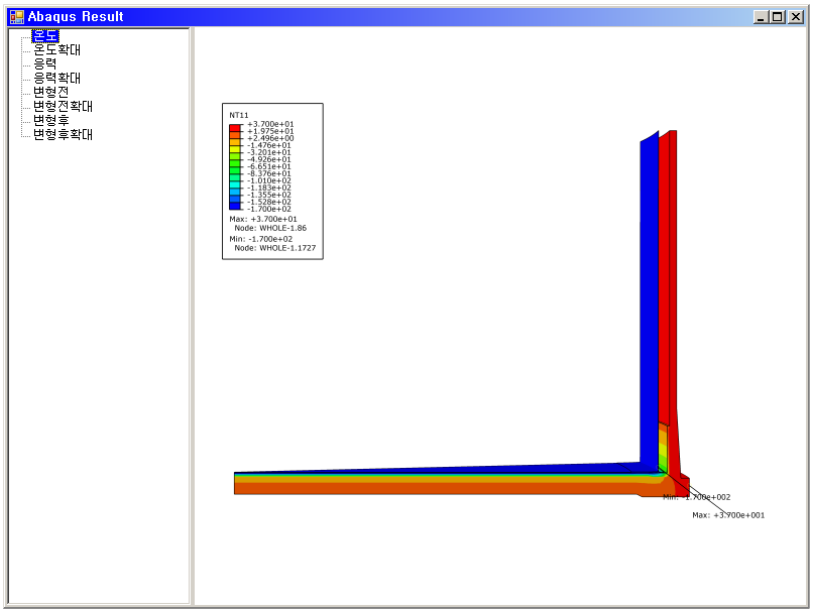
Abaqus 해석을 자동화하기 위한 batch command를 프로그래밍한 결과는 <그림 151>와 같다. batch command를 적용하면 어떠한 Abaqus 해석도 자동화할 수 있다. 특히 Abaqus는 Python이라고 불리는 Script 언어를 채택하였기 때문에 모델링 및 해석 프로세스를 모두 Python언어로 모듈화를 시켜놓고 batch command를 적용한다면 LNG저장탱크에서의 대부분 작업을 자동화할 수 있다.



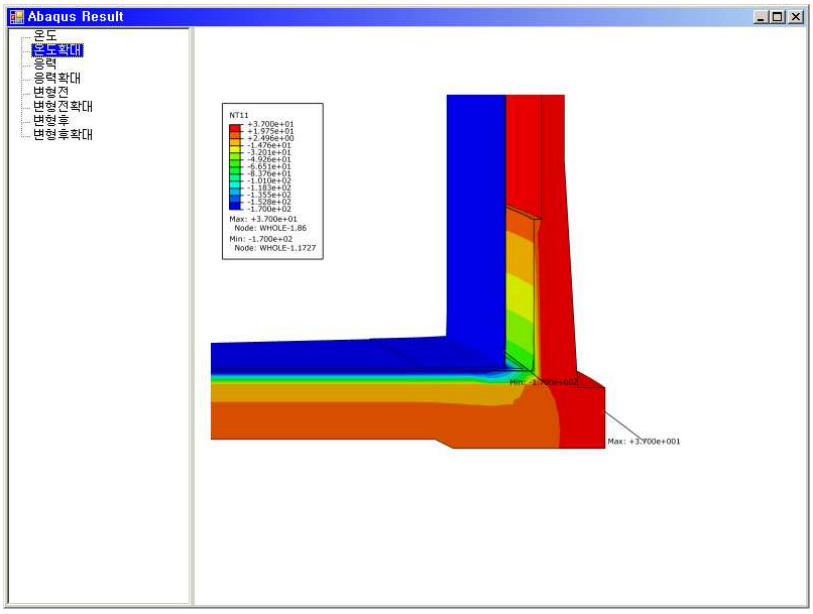

<그림. 151> Abaqus batch command

Abaqus 해석을 통하여 사용자가 필요한 해석 정보는 온도 해석 결과, 응력 해석 결과, 변형 해석 결과의 3가지이며 온도 해석인 경우에는 온도 전체 해석 결과와 온도가 가장 크게 영향을 주는 Corner protection 부분을 확대한 2가지 온도 해석을 Post-Processing화 하였다. 응력 해석인 경우에는 온도 해석인 경우와 동일하게 응력 전체 해석 결과와 응력이 가장 크게 영향을 주는 Corner protection 부분을 확대한 2가지 응력 해석을 Post-Processing화 하였다. 변형 해석인 경우에는 변형 전의 형상과 변형 후의 형상 변화에 관심이 있기 때문에 변형 전후의 전체 해석 결과와 역시 변형이 가장 크게 발생하는 Corner protection 부분을 확대한 2가지 변형 전후 해석을 Post-Processing화 하였다.

<그림 152>와 <그림 153>은 Abaqus 온도 해석의 전체 해석 결과와 Corner Protection 확대 결과를 보여준다.

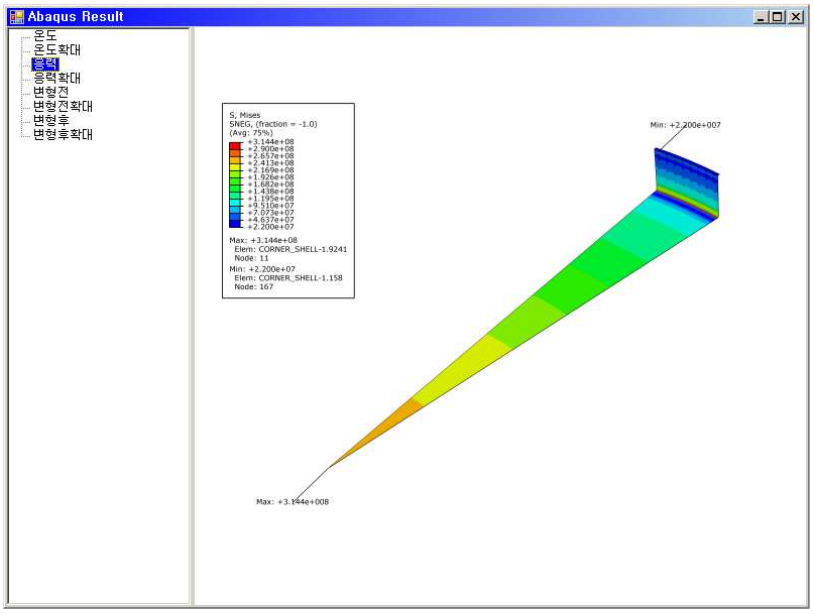



<그림. 152> Abaqus 온도해석 결과

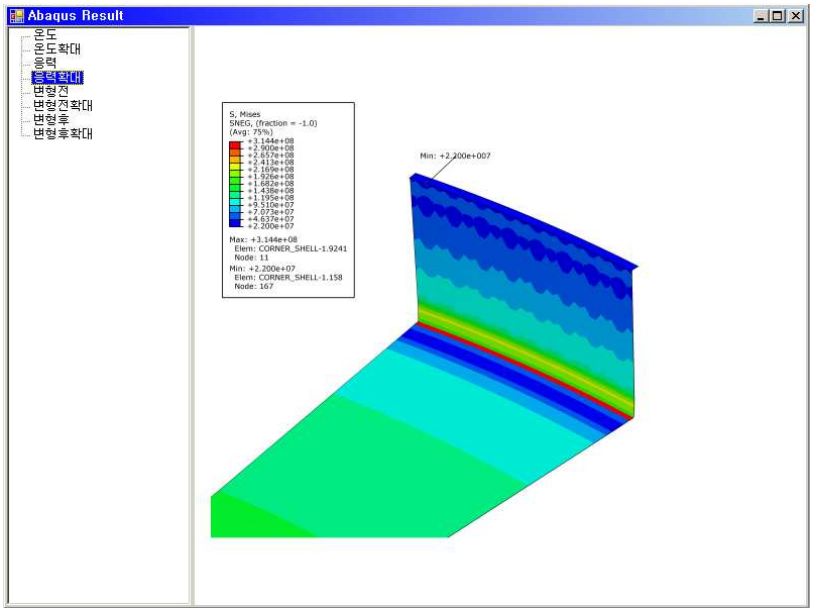



<그림. 153> Abaqus 온도해석 확대 결과

<그림 154>와 <그림 155>은 Abaqus 응력 해석의 전체 해석 결과와 Corner Protection 확대 결과를 보여준다.

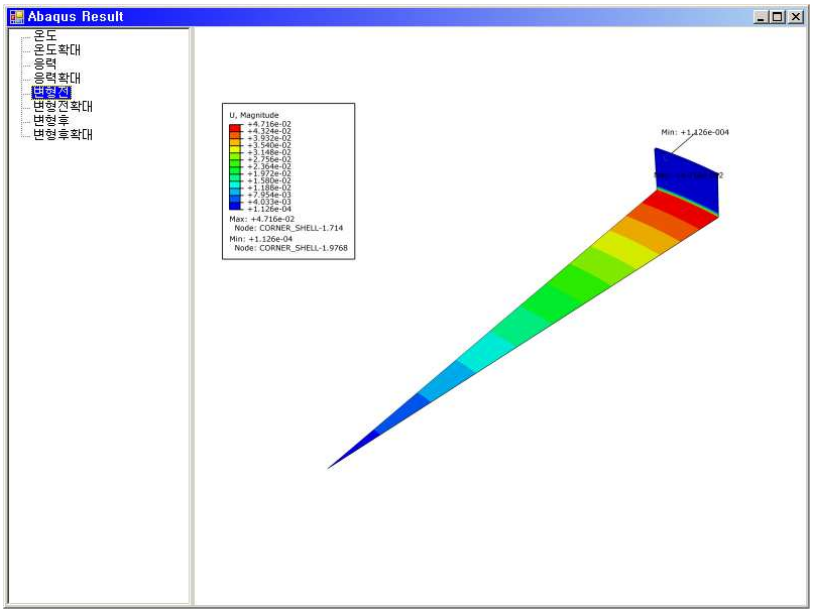



<그림. 154> Abaqus 응력해석 결과

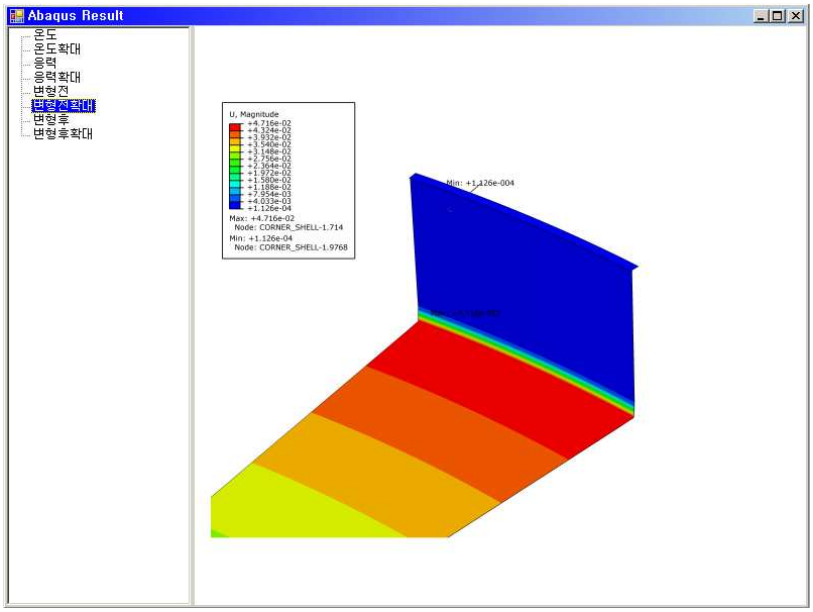



<그림. 155> Abaqus 응력해석 확대 결과

<그림 156>와 <그림 157>은 Abaqus 변형전 해석의 전체 해석 결과와 Corner Protection 확대 결과를 보여준다.

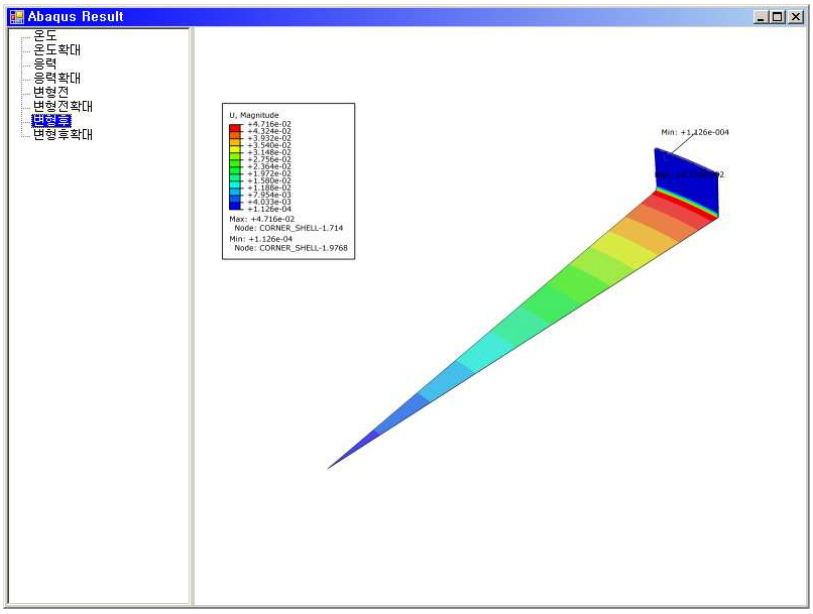



<그림. 156> Abaqus 변형전 해석 결과

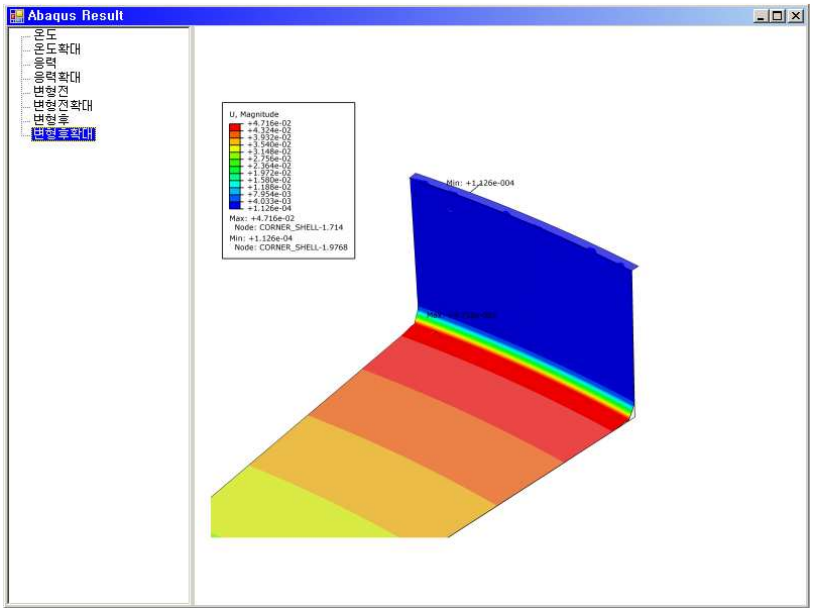



<그림. 157> Abaqus 변형전 해석 확대 결과

<그림 158>와 <그림 159>은 Abaqus 변형 후 해석의 전체 해석 결과와 Corner Protection 확대 결과를 보여준다.

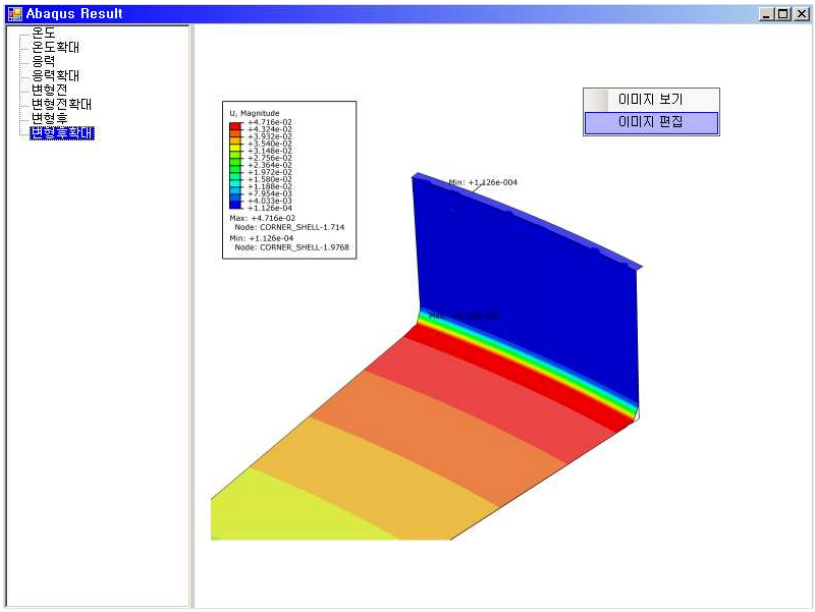



<그림. 158> Abaqus 변형후 해석 결과




<그림. 159> Abaqus 변형후 해석 확대 결과

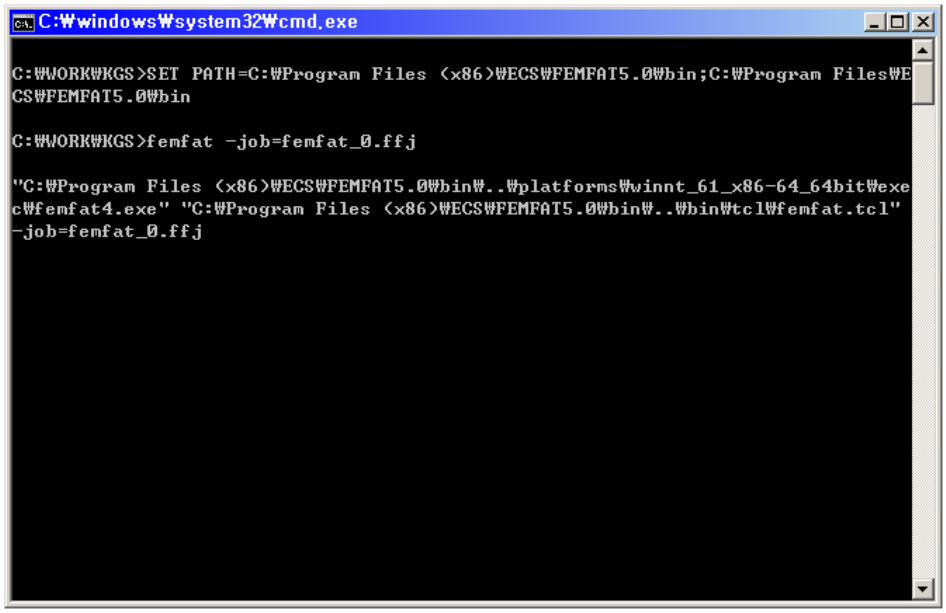
특히 Abaqus 해석 결과에서 추출한 Post-Processing 이미지를 보고서 형태로 편집할 수 있도록 <그림 160>과 같이 이미지 편집 버튼을 만들어 사용자가 필요한 이미지를 편집할 수 잇도록 하였다.




<그림. 160> Abaqus 해석 결과 편집 프로세스

(2) FEMFAT 자동화

FEMFAT 해석을 자동화하기 위한 batch command를 프로그래밍한 결과는 그림 2.11과 같다. <그림 161>과 같은 batch command를 적용하면 어떠한 FEMFAT 해석도 자동화할 수 있다.

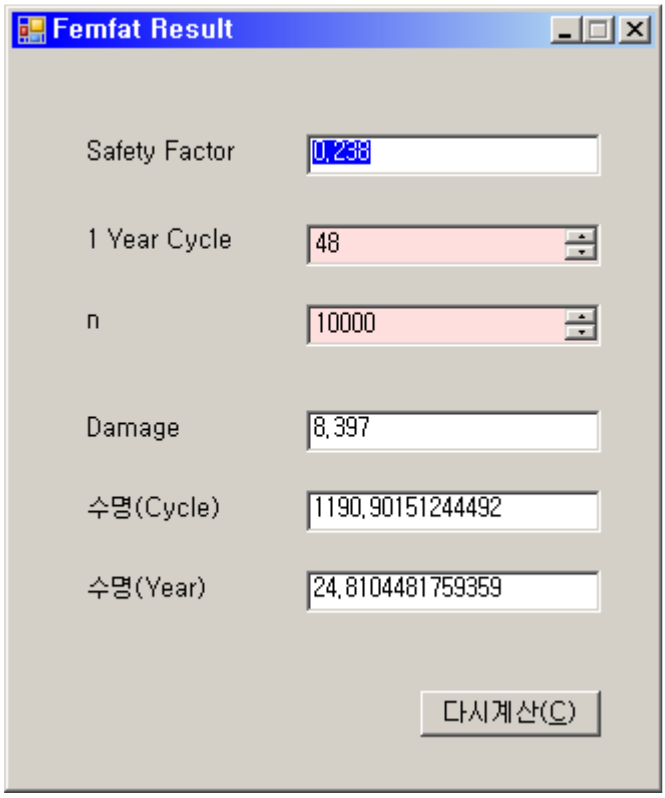



<그림. 161> FEMFAT batch command

하지만 FEMFAT에서는 batch command를 실행하기 위하여 ffj라는 입력 파일을 생성하며 생성된 ffj 입력 파일에 대한 용접 조건과 같은 상세한 분석이 2차 과제 진행을 위하여 추가적으로 진행되어야 한다. 아래 파일은 시나리오 3인 경우에 생성된 ffj파일을 나타낸다.

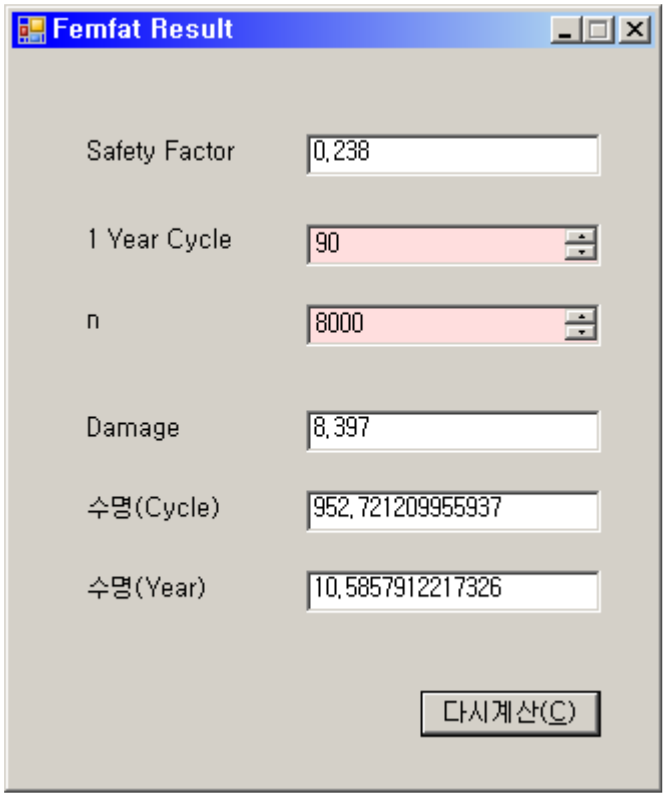
FEMFAT 해석은 자동화를 통하여 2가지 해석을 진행한다. 1번째로 안전계수(Safety Factor)를 구하기 위하여 FEMFAT을 한번 해석하고 난 후에 Damage, 피로수명을 계산하기 의한 2번째 해석을 진행한다.

<그림 162>는 FEMFAT 해석 결과를 보여주며 제일 위의 해석 결과가 1차 FEMFAT 해석을 통하여 구한 안전계수(Safety factor)를 의미하며 위에서 4번째 해석 결과인 Damage가 2차 FEMFAT 해석을 통하여 구한 값이다. 설계자는 FEMFAT 해석 결과인 Damage와 실제 운용 조건인 1 Year Cycle과 n의 값을 입력하면 Cycle과 년도로 수명을 계산할 수 있다.




<그림. 162> FEMFAT 해석 결과

<그림 163>은 1 Year Cycle과 n을 각각 90과 8000으로 변경했을 때 계산된 수명(Cycle, Year)을 나타낸다. 계산된 수명은 952 Cycle과 10년을 나타낸다. 그림 2.12의 1190 Cycle과 24년과 비교하여 수명이 줄어든 것을 알 수 있으며 그 이유는 사용조건인 1 Year Cycle과 n 값을 변경했기 때문이다.




<그림. 163> 수명 계산 프로세스

다. 외조탱크 수명평가 해석

토목분야 해석(Civil Analysis)은 염해 해석, 탄산화 해석뿐만 아니라 부식평가를 위해 적용되는 자연전위법 등과 같은 다양한 해석 및 실험값들을 통합하여야 한다. 기본적으로 염해 해석 및 탄산화 해석을 기준으로 하여 Immediate Loss(즉시 손실), Time Dependent Loss(시간적 손실), Visual Inspection(육안검사), Nondestructive Test(비파괴검사), Corrosion Method(부식평가), Construction Sequence BOR Comparison(시공검사단계와 운전단계 BOR 비교), Operational Safety Assessment(운전성분석), Residual Life Assessment(잔여 수명평가)에 대한 자동화 및 통합화를 진행한다.

(1) Chloride Attack(염해 해석)

염해 해석을 통한 염해 수명을 예측하기 위해서는 염해확산계수, 표면염화물량, 임계염화물량 등을 입력하려 잔여 수명을 예측하여야 하며, 염해 해석을 위한 소프트웨어로서 Life-365를 선정하였다. 하지만 염해 해석을 진행하기 위해서는 다양한 입력 조건들을 경우에 따라 입력해 주어야 하기 때문에 현재 개발 중인 LNG저장탱크 수명평가 최적화 프로그램에서 매개변수화를 하는 것보다는 오히려 Life-365의 다양하고 자유도가 높은 기능을 적용하여 염해 해석을 진행한 후에 염해 해석 결과를 Report로 전환하는 프로세스를 구축하는 것이 타당하다.

<그림 164>은 Main menu에서 염해 해석을 실행했을 경우에 자동적으로 Life-365 프로그램이 실행되도록 프로그래밍한 결과를 보여준다. 사용자는 주어진 염해 조건에 따른 염해 해석을 Life-365레서 실행한 후에 해석 결과를 저장하고 저장된 결과에서 Report에 필요한 이

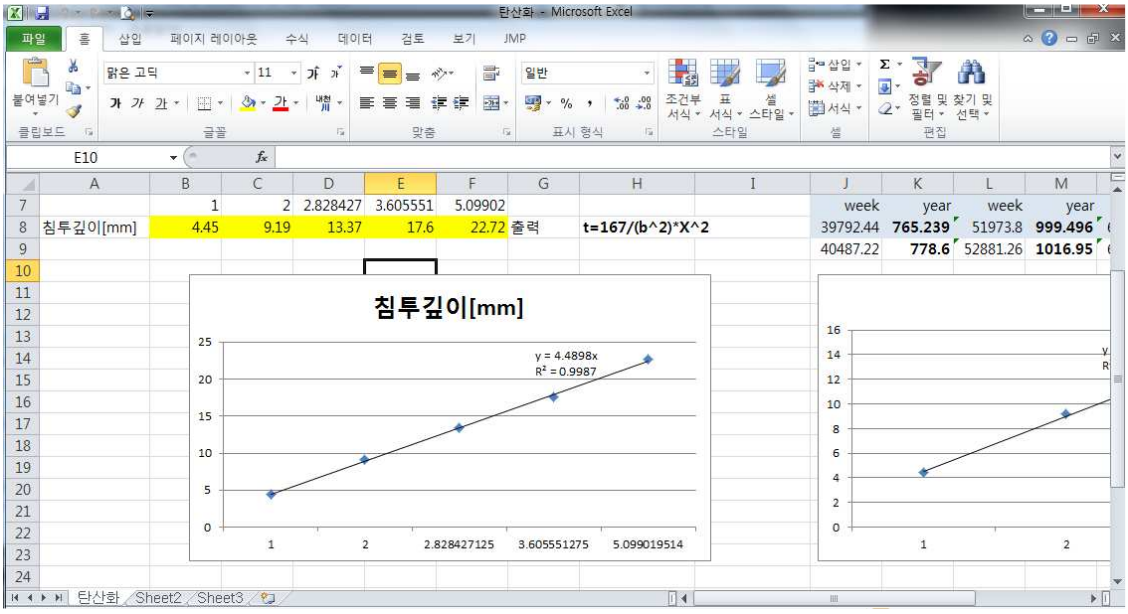
미지들을 추출하여 Report를 자동으로 인쇄한다.




<그림. 164> Life-365 실행 프로세스

(2) 탄산화 해석

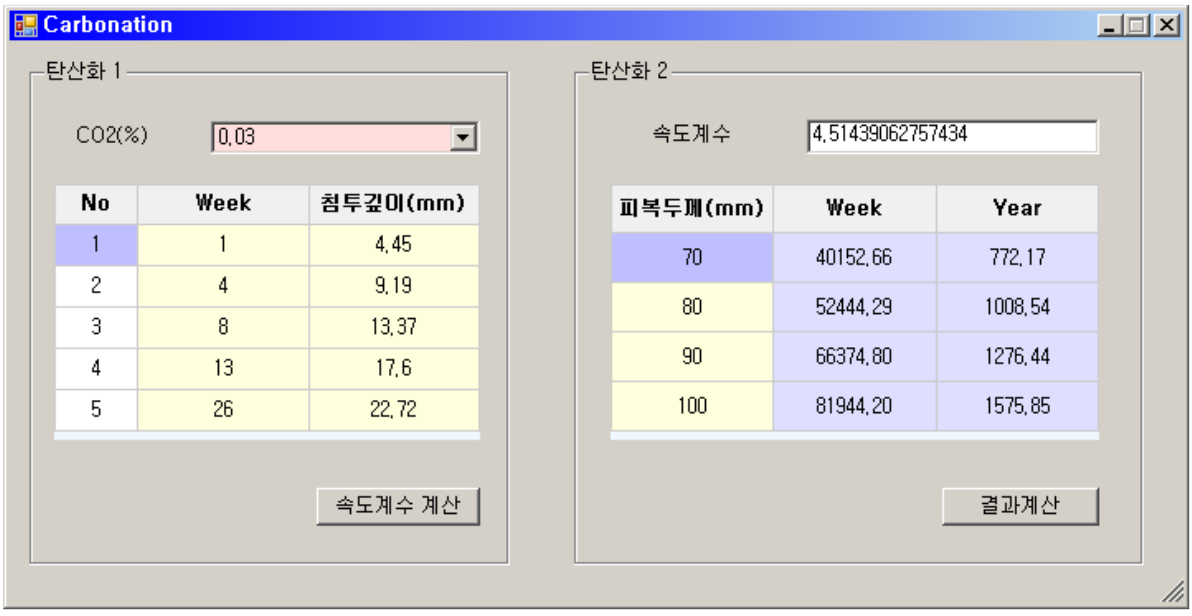
탄산화 해석은 엑셀 프로그램을 활용하여 진행한다. 엑셀 프로그램을 활용하는 중요한 이유는 사용자가 탄산화 해석을 위하여 구축한 엑셀 파일 안에 존재하는 어떠한 수식도 직접 이용할 수 있다는 점이다. 추후 탄산화 프로그램뿐만 아니라 기타 자체 프로그램(In-house program)들고 엑셀로 개발한다면 아주 손쉽게 LNG 자장탱크 수명평가 최적화 프로그램에 모두 Plug-In할 수가 있다. <그림 165>은 탄산화 엑셀 파일을 나타내며 탄산화를 위하여 필요한 수식들은 엑셀로 정의하고 계산이 가능하도록 하였다.



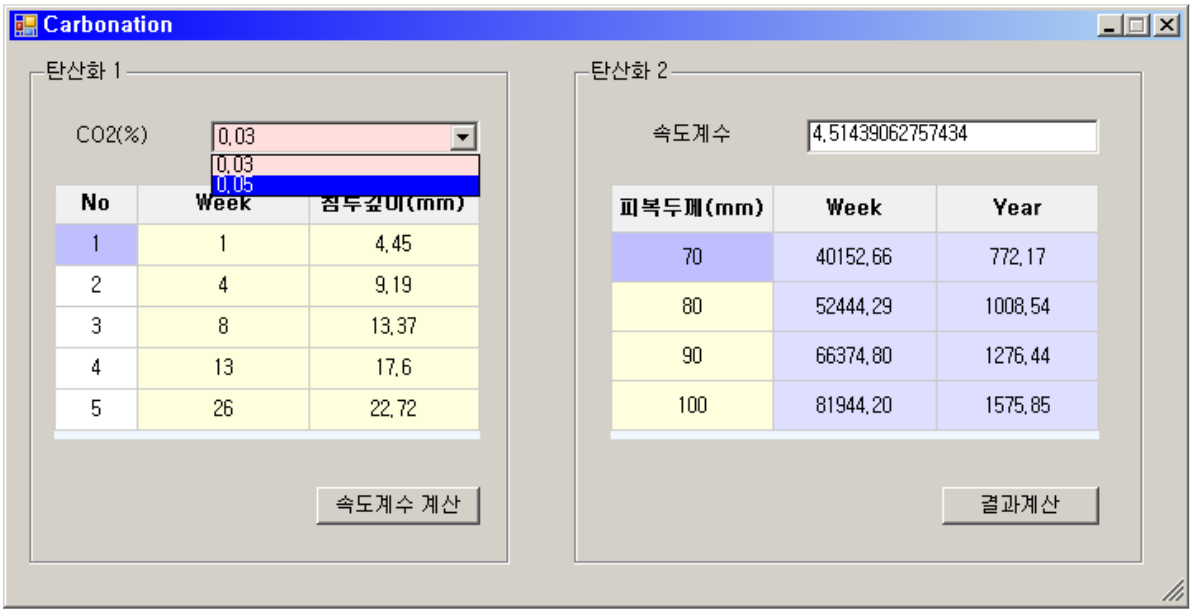

<그림. 165> 탄산화 엑셀 프로그램

<그림 166>은 탄산화 엑셀 프로그램 GUI를 의미하며 탄산화 1에서는 이산화탄소 함량(CO2%, 0.05, 0.03 적용)과 침투 깊이(mm)를 매개변수화 하였으며 사용자는 주어진 염해 조건을 고려하여 이산화탄소 함량과 침투 깊이를 설정한다. 탄산화 1에서 필요한 입력인 이산화탄소 함량과 침투 깊이를 입력하면 사용자는 오른쪽 아래에 있는 속도계수 계산 버튼을 눌러야 입력된 이산화탄소 함량과 침투 깊이가 Update되어 탄산화 2의 속도계수를 계산하게 된다. 계산된 속도계수를 가지고 미리 정의한 피복두께에 대한 잔여 수명을 계산하여 표시한다. 탄산화 2에서도 오른쪽 아래에 있는 결과계산 버튼을 눌러야 잔여 수명이 계산되도록 하였다.

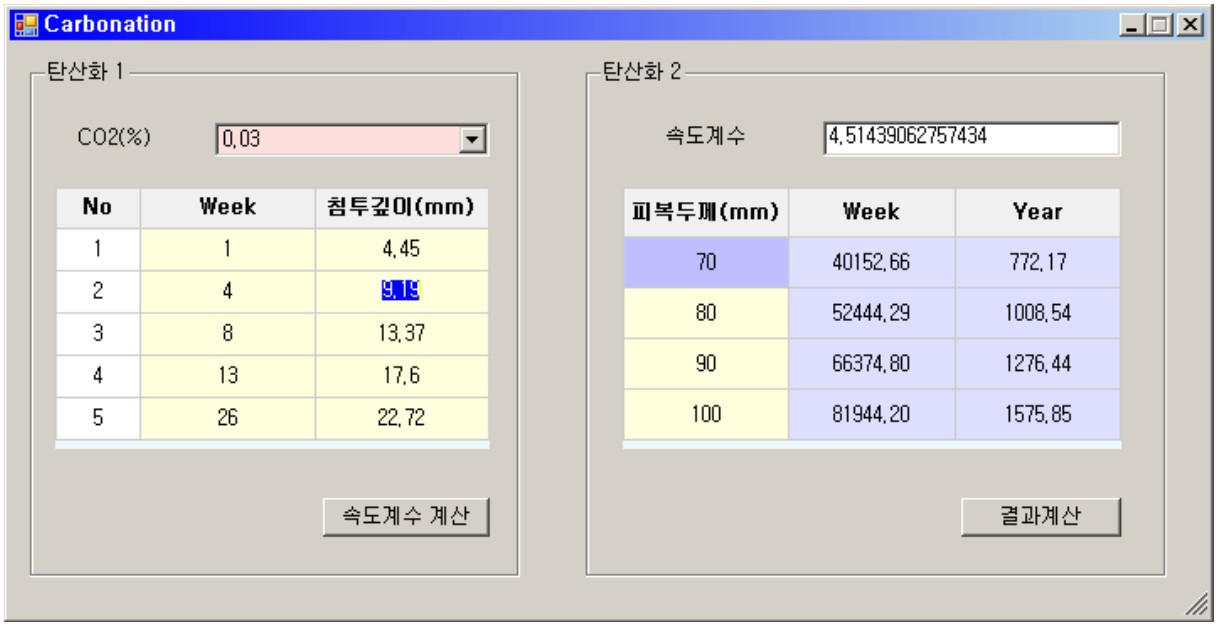
<그림 167>는 이산화탄소 함량(CO2%)을 0.05와 0.03의 2가지로 선정하도록 프로그래밍한 결과를 보여주며, 사용자와의 협의 결과에 따라 추기되는 이산화탄소 함량은 변경이 가능하다. <그림 168>는 침투깊이를 주(1 week, 4 week, 8 week, 13 week, 26 week)에 따라 입력하는 경우를 보여준다. <그림 169>은 이산화탄소 함량(CO2%)과 침투 깊이(mm)를 변경한 경우에 계산된 자여 수명을 나타낸다. <그림 166>과 비교하면 피복두께가 70 mmm인 경우에 40,152 week에서 44,802 week으로 변경이 되었으며 772 year에서 861 year로 변경이 되었다.



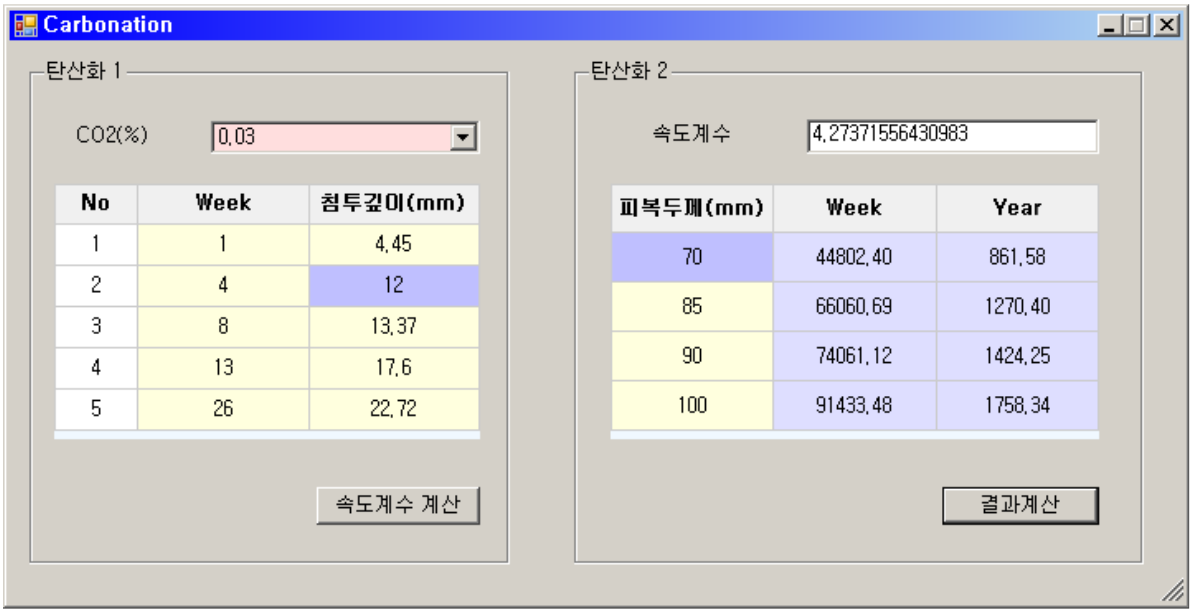

<그림. 166> 탄산화 엑셀 프로그램 GUI




<그림. 167> 이산화탄소 변경 프로세스




<그림. 168> 침투깊이 변경 프로세스




<그림. 169> 탄산화 계산 프로세스

# 6절 수명평가 현장 적용 및 보완

## 1. 인천기지 파일럿 LNG저장탱크에 대한 염해시험 및 탄산화 시험

인천기지에 있는 연구용 파일럿 LNG 저장탱크 벽체 콘크리트에서 코어를 채취하여 염해시험과 탄산화시험을 수행하였다. 코어채취하는 전경은 <그림 170>과 같다.

15년 정도 경과된 인천 LNG Pilot 탱크에 대해서 코어링을 한 시험체에 대해서 염해시험으로 내측과 표면으로 부터 NT BUILD 443, NT BUILD 492 시험을 수행하였고, 탄산화 시험으로 표면으로부터 KS F 2596과 내측으로부터는 촉진 탄산화시험인 KS F2584을 수행하였다.



<그림. 170> 인천기지 파일럿 LNG저장탱크 벽체 콘크리트 코어 채취

(1) 벽체 콘크리트 코어 염해시험(NT BUILD 492, NTBUILD 443)

염화물 침투와 관련한 촉진시험은 크게 염수 침지에 의한 방법인 NT BUILD443과 전위차에 의한 전기적 촉진 시험 방법인 NT BUILD 492로 나눌 수 있다. NT BUILD 443은 미국의 ACI life-365에 적용되는 시험으로 시편을 일정기간 염수에 침지하여 염분침투 프로파일을 측정하고 최소 1개월이 소요되는 방법이다. 유럽에서 내구수명 예측에 추천하고 있는 NT BUILD 492는 전위차에 의한 촉진침투를 이용하는 방법으로 염화물 침투깊이를 측정하고 24~48시간이 소요되는 방법이다.

염해에 대해서 외측부에서는 염해영향이 적은 것으로 결과가 나왔고, 내측부에 대해서는 비교적 확산계수가 일관적인 결과가 나오는 NT BUILD 492시험의 결과는 적정범위의 확산계수 값보다 크게 나온 경향이 있었음. 그 원인으로 표준시편보다 작은 크기의 시험체로 시험을 수행해서인지 아니면 콘크리트 열화가 진행되어 그러한 결과가 나온 것인지 판단이 어렵기 때문에 추가적인 시험으로 데이터가 필요할 것으로 사료되었다.

NT BUILD 443 시험의 결과는 내측부로부터 침지일수에 따라 어떤 경향성을 보이지 않았다. 15년이 된 콘크리트로 공극구조가 안정되고 확산계수는 더 이상 감소하지 않고 어느 정도 일정한 것으로 예상되었지만 그렇지 않았으며, 그 이유는 총 염소이온량의 프로파일로부터 구한 확산계수로 일정하지 않은 값을 가지는 경향이 있고 시험 중 오차 등으로 인한 결과라

고 사료되었다.

(가) 코어의 표면부터 NT BUILD 492 시험 결과

NT BUILD 492시험에서 염화물 침투 깊이가 0 mm 측정되어 염해에 대한 열화가 진전되지 않은 것으로 나왔지만, 도장이 안 되어 있는 상태인데 침투 깊이가 없는 것은 시험상에 다른 문제가 있을 수도 있다고 사료되어 향후 추가 시험이 필요하다고 판단되었다.

침지 없이 NT BUILD 443으로 시험한 경우로 깊이별 염화물량 값이 낮아 확산계수를 도출하기 어려울 정도였다.

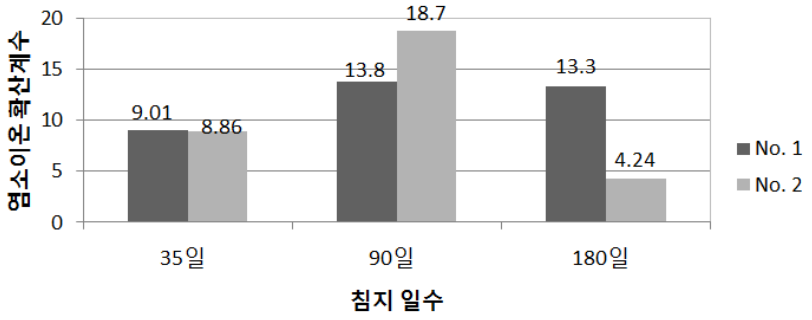
(나) 코어의 내측부터 NT BUILD 492 시험 결과

3개 시편에서 침투깊이 55.1, 51.68, 54.18 (mm)이고 각각의 확산계수는 14.60, 12.84, 14.11 ($10^{-12}m^2/s$)로 측정되었다. 표준크기의 1/2 수준을 코어링을 해서 시험을 한 경우로 염소이온이 모두 투과하여 확산계수가 크게 측정되었을 가능성도 있다고 사료되었다.

이전 다른 시험에서 삼척과 광양의 콘크리트 배합표로 동일한 시험을 재령 35일, 90일, 180일에 한 경우에 확산계수는 7.10, 3.64 ($10^{-12}m^2/s$)의 결과를 얻었다.. 인천탱크의 경우는 재령이 15년 정도로 수화반응이 완료되어 공극구조가 안정되어 확산계수가 타설 후 초기 시기의 확산계수보다는 작을 것이라고 판단되나, 15년 동안 기타요인(건조수축, 동결융해 등)에 의해 열화가 진행 되었을 경우에 공극구조가 불안정이 되어 확산계수가 크게 나올 수도 있다고 사료되었다. 일반적으로 타설 후에는 침지가 길어질수록 확산계수가 감소되는 경향이 있는데 이유는 타설 후 시간경과에 따라 수화반응이 계속되어 콘크리트의 공극구조가 점차 조밀해지므로 확산계수는 시간에 따라 점차 감소된다.

(다) 코어의 내측부터 NT BUILD 443 시험 결과

NT BUILD 443 시험으로 35일 침지, 90일 침지, 180일 침지 후 깊이별 염화물량을 측정하여 염화이온 확산계수($10^{-12}m^2$/sec)를 산출하였다. 인천 저장탱크의 경우는 수화반응이 완료되어 공극구조가 안정되고 확산계수는 더 이상 감소하지 않고 일정할 것이라고 예상되었으나, 일정하지 않고 차이가 나는 원인은 침지기간 동안 온도변화나 시험 시 표층부 염소이온 제거가 잘 안 되는 경우 등이 있을 것으로 사료되었다. 또 다른 원인으로는 NT BUILD 443과 같은 비정상상태 확산실험에 의한 총 염소이온량의 프로파일로부터 구한 확산계수가 일정하지 않은 값을 가지는데 비하여, NT BUILD 492에 의한 확산계수는 비교적 일관적인 결과가 나온다고 알려져 있다는 것이다. 염소이온 확산계수의 적정 범위는 $1\sim10\times10^{-12}m^2$/sec으로 알려져 있다.




<그림. 171> 침지일수에 따른 염소이온 확산계수

35일 침지 평균 8.93, 90일 침지 평균 16.25, 180일 침지 8.77($10^{-12}m^2/s$)의 확산계수이고 전체 평균은 $11.32 10^{-12}m^2/s$ 으로 산출되었다.

(2) 벽체 콘크리트 코어 탄산화 시험(KS F 2596 및 KS F2584)

탄산화 시험으로 코어의 표면으로부터 KS F 2596 시험 결과가 균열 등으로 인해 3개 시편의 탄산화 깊이가 일관되지 않았으나 문헌과 비교해서 약 10 mm 정도 되는 것으로 결과가 나왔다. 기타구조물의 기준을 참고했을 때 현재까지는 부식발생에 우려가 없는 것으로 판단된다. 촉진탄산화 시험인 KS F 2584는 촉진 1주, 4주 및 8주에 대해서 탄산화 깊이를 측정한 것으로 시간에 따라 증가 되는 경향이 나타내었다.

(가) 코어의 표면으로부터 KS F 2596 시험 결과

3개의 시편에 대해서 수행하였고 탄산화 깊이는 0.0, 10.2, 1.5 (mm)의 결과가 나왔다. 시험전에 코어에 균열부위가 존재하여 유사한 깊이가 나오지 않은 것으로 판단된다. 문헌에 인천 LNG Pilot 탱크에 대해 동일한 시험을 한 경우가 있었는데 7.47, 11.49, 10.11 mm( Sungnam Hong et al., International Scholarly and Scientific Research & Innovation, 2013)이였다.

[표 1.26] 탄산화 상태평가 기준

| 기준 | 탄산화 잔여 깊이 | 철근부식의 가능성 |
|---|---|---|
| a | ○30㎜이상 | 탄산화에 의한 부식발생 우려 없음 |
| b | ○10㎜이상 ~ 30㎜미만 | 향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음 |
| c | ○0㎜이상 ~ 10㎜미만 | 탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음 |
| d | ○0㎜미만 | 철근부식 발생 |
| e | - | - |

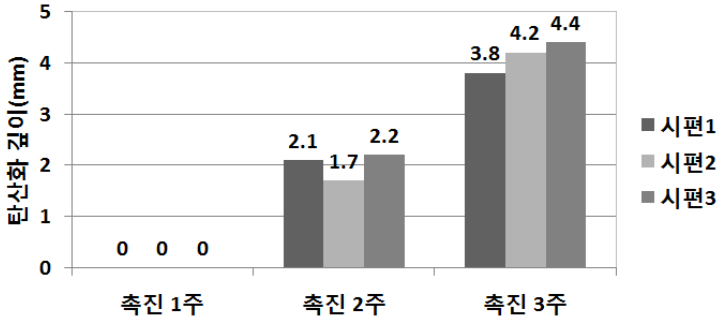
※ 일본구조물진단기술협회 「비파괴시험을 이용한 토목 콘크리트구조물의 건전도 진단 매뉴얼」(2003년)

<그림. 172> 토목구조물 콘크리트 탄산화 상태평가기준

<그림 172>의 토목구조물 교량의 기준을 참고했을 경우 A 등급으로 부식발생 우려가 없는 것으로 평가되었다.

(나) 코어의 표면부터 NT BUILD 492 시험 결과

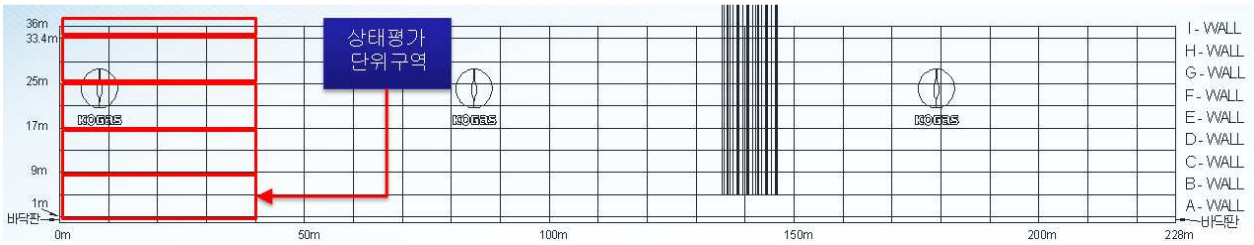
촉진 탄산화 시험으로 촉진 1주, 4주 및 8주에 대해서 탄산화 깊이를 측정한 것으로 시간에 따라 증가 되는 경향이 나왔다.




<그림. 173> 촉진시간에 따른 탄산화 깊이

## 2. LNG저장탱크 부재 상태평가기준 적용성 검토

인천 TK-207 LNG저장탱크의 벽체의 정밀안전진단 손상데이터를 이용하여 상태등급평가 적용성 검토를 수행하였다. LNG저장탱크의 상태평가 단위를 자문의견을 반영하여 구조적으로 구분되는 부벽으로 나누어 6개 영역(2개 부벽 중심 사이의 거리)으로 하였다. 현재 정밀안전진단에서 상태평가는 벽체부와 바닥판에 대해서 수행하여 벽체부에 대한 점검결과 검토를 하였다.




<그림. 174> 벽체 상태평가 단위구역

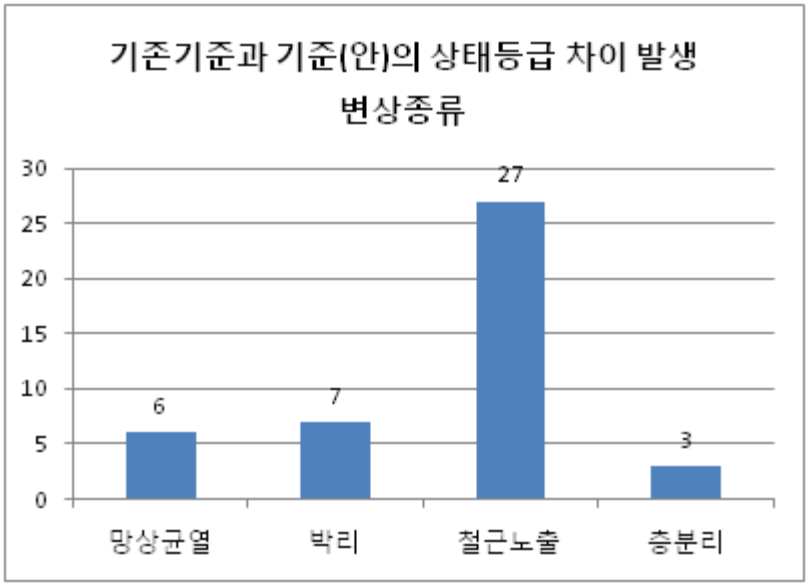
<표. 72> 2014년 TK-207 LNG저장탱크 벽체 외관조사 결과

| 결함내용 | 위 치 | 총수량 | 개 소 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|
| 균열(0.1㎜) | 벽체외부 및 Bottom Annular | 723.2m | 402 | |
| 균열(0.2㎜) | 벽체외부 및 Bottom Annular | 82.4m | 42 | |
| 망상균열(0.1) | 벽체외부 및 Bottom Annular | 40.96㎡ | 9 | |
| 백태 | 벽체외부 | 0.61㎡ | 2 | |
| 재료분리 | 벽체외부 | 0.41㎡ | 3 | |
| 박락 | 벽체외부 | 0.18㎡ | 2 | |
| 도장탈락 | 벽체외부 | 0.02㎡ | 1 | |

기존기준과 기준(안)의 각 손상이벤트별 상태등급 차이 검토를 분석하였다. 2014년에 정밀

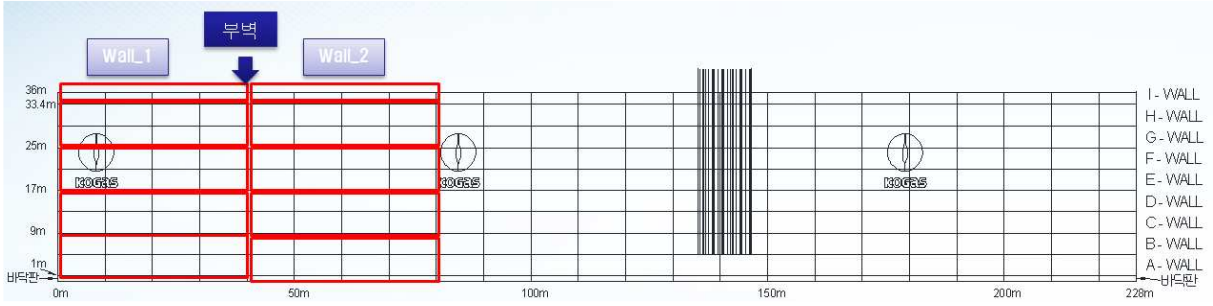
안전진단 점검을 받은 TK-207에 대해 분석한 결과 총 533 손상 중 38개 손상이 차이가 발생하였다.

아래 그래프와 같이 차이가 발생했고 b등급 -> c등급으로 하향하였고, 기준(안)의 철근부식 손상면적 2%미만이 c등급으로 하향한 이유였다. 철근부식 손상의 경우는 박리, 철근노출 및 층분리 등과 같은 손상으로, 빠른 유지보수를 하지 않으면 구조물 건전도에 좋지 않기 때문에 보수를 해야 하는 정도의 상태등급으로 매기는 것은 타당하다고 판단된다.




<그림. 175> 기존기준과 기준(안)의
상태등급 차이발생 변상종류

TK-207에 대해 기준(안)을 적용하여 6개 부분의 벽체에 대해 각 벽체의 수직부분 5개 점검 단위별로 상태등급평가를 수행하였다. 각 점검단위영역에서 여러손상 중 최저값을 산출하고 6개 부분 벽체에 대해서 평균 등급 산출한 결과 b등급이었다.




<그림. 176> 벽체 상태등급 평가 단위 구역

상태등급은 A, B, C, D, E로 갈수록 손상이 심한 상태이며, 상태등급평가 결과는 각 등급별 5, 4, 3, 2, 1로 매칭하여 평가하였다.

<표. 73> 벽체 평가 단위 구역별 상태등급 평가 결과

| | Wall_1 | Wall_2 | Wall_3 | Wall_4 | Wall_5 | Wall_6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **수직_5** | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| **수직_4** | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| **수직_3** | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 |
| **수직_2** | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **수직_1** | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| **평균등급** | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 |

TK-207 바닥판과 평택기지의 TK-707 LNG저장탱크의 벽체와 바닥판의 적용성 검토의 경우에도 유사한 결과를 얻었다.

# 제3장 최종 연구성과 및 적용실적

## 1절 LNG저장탱크 수명평가 프로그램

LNG저장탱크 수명평가 프로그램은 내조탱크의 구조해석 및 피로수명평가에 대한 자동화 해석 및 외조탱크 탄산화 및 염해평가 프로그램이다. Main Menu는 다음 5가지 Menu로 구성된다. Material DB는 Mechanical Analysis와 Civil Analysis를 위한 물성값을 정의하며, Mechanical Analysis는 구조해석과 피로수명해석을 수행하고, Civil Analysis는 염해 및 탄산화 해석을 수행한다. 수행된 결과는 Report를 통하여 인쇄가 되며 해석을 위한 기본 Code 파일은 Code에서 검토할 수 있다.

인천기지에 있는 연구용 파일럿 LNG 저장탱크 벽체 콘크리트에서 코어를 채취하여 염해시험과 탄산화시험을 수행하고 수명평가 프로그램을 이용하여 검토하였다.

## 2절 LNG저장탱크 상태평가 기준

LNG저장탱크 외벽 콘크리트에 균열, 철근부식 등 결함이 발생한 경우, 손상 종류 및 정도에 따라 구조물의 붕괴 등 대형사고 발생 위험이 있다. 기타 토목구조물(댐, 터널, 교량 등)에는 점검시에 사용되는 상태평가기준이 정립되어 있으나, LNG저장탱크의 외조 콘크리트에 대한 상태평가기준이 국내·외에 부재하여 개발하게 되었다. LNG저장탱크 상태평가기준은 외조 콘크리트 탱크에 대한 부재별 손상·결함 등에 대한 평가기준이다.

LNG저장탱크 구조적 특성에서 외부저장탱크 설계방법을 분석하여 구조적 거동을 확인하고 재료 및 구조적 특징에 따라 대표부재를 분류하였다. 국내 토목구조물(터널 , 옹벽, 댐, 건축물, 교량) 및 원자력발전소 구조물에 대한 상태평가기준을 분석한 결과, 교량 구조물이 가장 적합하다고 판단되어 교량의 부재 상태 평가기준을 LNG저장탱크의 설계기준과 특성에 적합하도록 수정 및 보완하여 적용하는 방안으로 기준(안)개발하였다.

LNG저장탱크 부재 상태평가기준 적용성 검토을 위해 인천 TK-207 LNG저장탱크의 벽체의 정밀안전진단 손상데이터를 이용하여 상태등급평가 적용성 검토를 수행하였다.

## 3절 LNG저장탱크 압축강도 추정식 관련 기준

운용중인 LNG저장탱크 외벽 콘크리트의 압축강도가 열화가 되어 건전도가 확보되지 않는 경우, 구조물 붕괴 등의 대형사고 위험이 존재한다. 정밀안전진단 수행 시 반발경도 및 초음파속도를 측정하여 콘크리트 압축강도를 추정할 수 있지만, 저장탱크에 적합한 추정식이 부재하여 압축강도를 비파괴시험 결과로부터 예측할 수 있는 모델식이 필요하여 개발하게 되었다.

LNG 저장탱크 압축강도 추정식 관련 기준은 비파괴검삼 결과로부터 LNG저장탱크의 압축강도를 예측할 수 있는 기준이다. 기존에 사용되고 있는 압축강도 추정식을 조사 및 분석을 하고 반발경도법, 초음파전파속도법 및 복합법으로 코어시험체를 이용한 압축강도 추정식 개발 방안을 수립하고, 가스공사 인천기지 파일럿 LNG저장탱크 콘크리트 코어 및 삼척기지 LNG 저장탱크 콘크리트 공시체를 이용한 비파괴시험 및 압축강도시험을 수행하였다. 반발경도법을 이용한 추정식(안)을 기존 모델식을 적용하여 분석한 결과, 기존추정식이 적합하지 않은

것으로 판단되었고, LNG저장탱크 압축강도 예측에 참고할 수 있는 추정식(안)을 개발하였다.

인천기지 파일럿 탱크 벽체에 대해서 콘크리트 코어 채취, 압축강도시험 및 비파괴검사를 실시하여 그 결과를 통해서 압축강도 추정식(안)을 개발하였다.

# 제4장 연구목표 달성 및 효과

## 1절 연구개발 최종목표 달성도

본 연구의 최종목표는 세계 최고수준의 LNG 저장탱크의 수명평가기술 및 모니터링기술을 개발을 통해 LNG 플랜트의 핵심설비인 LNG 저장탱크의 수명관리시스템을 개발하는 것이다. 세부목표는 아래와 같으며 최종목표를 모두 달성하였다.

○ LNG 저장탱크 소재별 열화메커니즘 규명
- LNG 저장탱크 재료 및 재질 열화 데이터베이스 구축
- 석유화학 플랜트 및 원자력 플랜트 개발 기술 벤치마킹

○ LNG 저장탱크 수명관리시스템 개발
- LNG 저장탱크 수명평가기법 및 프로그램 개발
- LNG 저장탱크 모니터링기법 개발

○ LNG 저장탱크 수명관리 제도(안) 개발
- 정기검사, 정밀안전진단, 위험성평가와 연계한 통합적 수명관리 제도 개발
- 수명관리제도 법령 정비 및 코드 제정(안) 개발

## 2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

한국가스안전공사는 국내 LNG 인수기지 설비에 대한 위험성평가 및 정밀안전진단 업무를 국가대행 및 수탁용역으로 수행하고 있다. 본 연구과제의 성과물(LNG 저장탱크 수명평가 기술)은 국내 한국가스공사와 포스코의 LNG 인수기지 LNG 저장탱크에 적용 가능하고 국내 검증을 통해 해외 가스플랜트사업 진출 시 LNG 저장탱크의 가격 경쟁력을 높여 플랜트 수주의 중요한 교두보 역할을 할 수 있다.

본 연구에서 도출되는 기반기술은 향후 국내 인수기지 및 해외 가스 플랜트 개발에 직접적으로 응용될 수 있다. 기계 및 콘크리트 복합구조물인 LNG 저장탱크의 수명평가 솔루션을 개발하고 유사구조물의 수명평가기술 개발에 파급효과가 있다. 수명평가기술과 연계된 관련 산업과의 효율적 협업으로 상호 기술력 제고 및 효율화에 기여할 것이다.

## 3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

국내 LNG 저장탱크 수명평가기술의 컨설팅 사업화를 통해 국내 기술 및 전문인력을 양성하고 고용창출 효과를 극대화 할 수 있다. 국가 기간설비인 LNG저장탱크 구조물에 대해서 연구개발된 기술에 의한 효율적 유지관리를 통해 수명연장을 통한 건설비용 절감이 가능하다. 또한, LNG 저장탱크의 정기검사 개념에서 탈피한 생애주기를 고려한 건전성평가를 통해 경제적인 유지관리가 실현되게 된다.

## 4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

본 연구의 경우 LNG 저장탱크 수명평가 기술 및 표준을 정립함으로서, 이에 도출되는 상태평가기준(안) 및 압축강도 추정식 관련 기준 결과를 관련 코드에 반영되게 되면 국내 LNG 저장탱크의 안전성 및 경제적 운전성을 확보할 수 있는 기반을 마련하게 된다. 에너지 저장 핵심설비의 수명연장을 통한 LNG supply chain의 건전성 확보로, 원활한 수급 지원을 통한 에너지안보 구축이 가능하다.

# 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

## 1절 연구성과 향후 활용방안

프랑스 GdF의 경우 기존 운전 중이던 4기의 LNG 저장탱크에 대해 컨설팅사와 공동으로 수명평가 및 모니터링시스템을 구축하고 계속 운전 중이다. 따라서 국내 및 해외 LNG 저장탱크 수명평가 컨설팅 사업으로 기술을 발전 확대 가능할 것이라고 판단된다. 액화질소, 액화수소 등 내용물이 다른 초저온 저장탱크시스템의 수명평가에 활용할 수 있으며 컨설팅 사업으로 확대 가능할 것이라고 사료된다.

LNG 저장탱크의 수명평가 기술 및 표준을 정립함으로서, 이에 도출된 상태평가기준(안)과 압축강도 추정식(안) 결과를 수명연장(계속운전) 및 검사주기제도 등에 활용 될 예정이다. 국내 관련 법령 및 코드 제정에 기술자료로 활용이 될 수 있고 본 연구에서 도출되는 기반기술은 향후 가스 플랜트 개발에 직접적으로 응용이 될 것이다.

기존의 LNG 저장탱크 및 주요 기기의 수명평가에 활용할 수 있으며 신규 LNG 플랜트 개발 시 응용 가능하며, LNG 저장탱크의 수명평가를 위한 모니터링 시스템 구축을 위해 활용할 수 있으며 LNG 플랜트의 핵심 설비인 대용량 저장탱크 설계시 응용 가능할 것이다.

LNG 저장탱크 수명평가 및 모니터링 기법 개발을 통해 LNG 저장탱크 수명평가관련 기존의 정밀안전진단 및 안전성평가 코드가 개정 될 것이다.

## 2절 추가연구 필요성

이 연구를 통해 상태평가기준(안)을 개발하였는데, 이 내용은 부재별 상태평가등급기준(안)으로 전체 LNG저장탱크 상태평가등급 기준은 관련 데이터가 부족하여 개발하지 못하였다. 정밀안전진단시 적용될 수 있는 상태평가를 위해서 추가적인 전체 상태평가등급 기준 개발이 필요하다.

압축강도 추정식 관련 기준의 경우는 정밀안전진단시 비파괴검사의 결과로 실제 압축강도를 예측할 수 있는 것이다. 이 연구에서 사용한 데이터는 파일럿 탱크의 일부 데이터로 일반적인 추정식으로 사용하기에는 아직 관련 데이터가 부족한 실정이다. 따라서, 실제 운용중인 LNG 저장탱크에 대한 압축강도 시험 및 비파괴 검사가 추가적으로 시행되어 현재 추정식을 개선 및 검토 연구가 필요하다.

또한, 도시가스사업법 제17조의2에 안전성평가의 실시에 대한 법은 있으나 구조적 안전성평가에 대한 세부 절차와 방법에 대한 고시가 부재한 상태이다. 일반 토목구조물에서 구조적 건전성 평가를 위한 구조적 안전성평가와 내진평가를 시행하고 있는데 이와 관련된 평가기준이 부재하기 때문에 관련 평가기법 및 기준 개발의 연구가 진행되어야 한다.

# 참고문헌


1. BS 7777 “Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service”, 1993
2. API 620 “Design and Construction of large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks”, 2008
3. BS EN 1473 “Installation and equipment for liquefied natural gas Design of onshore installations”, 2007
4. BS EN 14620-1~5 “Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0℃ and -165℃″, 2006
5. NFPA 59A “Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas(LNG)”, 2006
6. JGA RPIS(Recommended Practice for LNG Inground Storage; LNG 地下式 貯槽指針), 2002
7. JGA RPAS(Recommended Practice for LNG Above-ground Storage; LNG 地上式貯槽指針), 2002
8. API579, ″Fitness-For-Service API Recommended Practice First Edition″, API, (2000)
9. 이승림 등, LNG 저장탱크의 잔여수명평가 방안, 한국가스학회 추계학술대회, 2005
10. 김지윤, 국가 기간 산업설비의 안전관리 및 수명연장 방안, 제 4회 산업설비 안전진단 Workshop, (2002)
11. 한상인, 공정플랜트 고온튜브 수명연장 및 건전성평가에 관한 연구, 한국가스안전공사, (2002)
12. 김효정, Korean Regulatory Approach to Ageing Management of NPPs, KINS, 2003
13. 노명섭 등, PSR에 근거한 원전의 연장운전 제안, 한수원, 2003
14. 천추영, 원전 연장운전 제도의 조기 정착, 한수원, 2002
15. 신태명등, 주기적안전성평가 제도와 원전 연장 운전과의 연계성 검토, 원자력산업, 2002
16. 정일석, 원전 수명관리 연구 및 주기적안전성 검토, 제21회 한일 원자력산업세미나, 2002
17. 장근선등, 원전 수명 연장에 대한 기술 현안 분석, 제14회 국제 원전 기기건전성 워크숍, 2002
18. B. Capra & J. Le Drogo, Reinforeced concrete corrosion: application of Bayesian nettworks to the risk management of cooling towers in nuclear plants, OXAND S.A., 2003
19. Bruno Gerard, etc., Risk management for civil engineering and oil & gas infrastructures: the use of models for performance and risk assessment, OSAND S.A., 2008
20. Risk-Based Inservice Testing-Development of Guidelines, Vol. 1, ASME, (2000)
21. 아키오 고바야시등, 도쿄가스의 네기시 및 소데가우라 인수기지 LNG 설비의 진단과 수

명연장조치 사례, 2004
22. 지식경제부--한국가스공사, 가스 에너지전략기술 로드맵, 2008.10
23. Yoon, I. S., Lee, Y. W., Hong, S. H. and Lee, Y. W., “Finite Element Analysis of Membrane for Liquified Natural Gas”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng., 18(10), 1994, pp.2797-2804.
24. Kim, H. S., Hong, S. H., Seo, H. S., "Integrity comparison for various design specifications of corner protections in LNG storage tank", KIGAS, 6(4), 2002, pp.33-39.
25. Kim, H. S., Hong, S. H., Seo, H. S., "A Study on the optimum design of corner protection for LNG storage tank.", Trans. Korean Soc. Mech. Eng., 11, 2002, pp.51-57.
26. Lee, S. R., and Hwang, S. H., “An Experimental Study on the Estimation of Chloride Diffusion Coefficient of LNG Storage Tanks”, Journal of Energy Engineering, 21(2), 2012, pp.118~123.
27. Lee, S. R., Kim, H. S., “ The comparative risk assessment of LNG tank designs using FTA”, KIGAS, 16(6), 2012, pp.48-53.
28. Lee, S. R., Bang, H. J., and Kim, I. C., “Service Life Assessment of LNG Storage Tank Using Life-365”, Proceeding of the 2012 Symposium on Journal of Energy Engineering, 2012, pp.68.
29. Lee, S. R., Song, I. H., Kim, H. S., “Service Life Assessment and Restrain Methods of Carbonation Attack on PC Outer Wall of LNG Storage Tanks“, KIGAS, 18(2), 2014, pp.73~80.
30. Lee, S. R., Lee, K. M., Kim, H. S., “Prediction of Fatigue Life for 270,000 kl LNG Storage Tank According to Shape of Corner-protection Knuckle”, KIGAS, 18(2), 2014, pp.69~72.
31. Lim, J. J., Park, Y. H., “Stability Analysis of Hazmat Tank Foundation to Prevent Leakage Accident”, Korean Journal of Hazardous Materials, 1(1), 2013, pp.49-53.
32. Park, K. D., Lee, I. J., “A Study on Safety Enhancement of Petrochemical Facility by Using the Latest Equipment Diagnosis Technology”, Korean Journal of Hazardous Materials, 2(2), 2014, pp.1-13.
33. Institute of Gas Safety R&D, Korea Safety Corporation, A series of report of Development of Life Time Assessment Technologies for LNG Storage Tanks, 2013.
34. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., Concrete, Microstructure, Properties, and Materials, New York; McGraw Hill, 2006, pp.176~183.
35. Neville, A. M., Properties of Concrete, England Essex; Prentice Hall, 1995, pp.482~536.
36. Bae, S. H., Lee, K. M., Kim, J. S. and Jeong, S. H., “Influence of Water-Cement Ratios and Curing Conditions on the Diffusion Characteristics of Chloride Ion in Concrete”, Journal of KSCE, 26(4A), 2006, pp.753~759.
37. Institute of Japan Concrete Engineering, Durability Design Guideline(proposal), 1991,

pp.76.
38. Bentz, E. C. and Thomas, M. D. A., Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Programe for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, Life365 Users Manual, 2008, pp.67.
39. Tang, L., "Chloride Ttransport in Cconcrete-Measurement and Prediction", Ph.D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996, pp.88.
40. Rob B. Polder, Gert van der Wegen, and Michel Boutz, "Performance Based Guideline for Service Life Design of Concrete for Civil Engineering Structures-A Proposal Discussed in the Netherlands," International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 2006, pp.10.
41. Korea Concrete Institute, Advanced Concrete Engineering, Korea; KiMoonDang, 2005, pp.279-312.
42. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, ACI Standard, 2013.
43. Arai, Y., Materials Chemistry of Cement, Korea; Chonnam National University, 1998, pp.253-274.
44. Kim, S. S., Ryou, J. S., Lee, S. T. and Jeong, H. S., Construction Materials Engineerng, Korea; GooMiBook, 2009, pp.45-64.
45. Kim, S. S., " A study on the deterioration of concrete and the corrosion and protection of reinforcing steel in concrete under the seawater environment", Ph.D. Dissertation, Hanyang University, 1994, pp.55-57.
46. Kim, D. G., "A study on the development of corrosion prediction system according to chloride diffusion velocity in concrete ", Ph.D. Dissertation, Chungnam National University, 2000, pp.51-52.

# [ 부 록 ]

## 1. 논문, 특허 등 정량적 성과

### 가. 학술지 게재_비 SCI(E)급 논문게재

| 해당기관 | 논문제목 | 학술지명 | ISSN | 저자명 | 게재일자 |
|---|---|---|---|---|---|
| 국내 | 액화천연가스 저장탱크 9% 니켈강 용접부의 방사선투과시험 필름에 나타나는 밴드형상의 지시 해석 | 비파괴검사학회지 | 1225-7842 | 이승현외 2명 | 201010 |
| 국내 | LNG 저장탱크 염해 확산 계수 산출을 위한 실험적 고찰 | 에너지공학지 | 1598-7981 | 이승림외 2명 | 201201 |
| 국내 | 고장수목분석법을 이용한 액화천연가스 저장탱크 형식별 위험성 비교 평가 | 한국가스학회지 | 1226-8402 | 이승림외 1명 | 201212 |
| 국내 | 상지상식 멤브레인 액화천연가스 저장탱크의 안전성 향상 방안 | 에너지공학지 | 1598-7981 | 이승림외 1명 | 201212 |
| 국내 | 너클 형상에 따른 LNG 저장탱크 코너프로텍션 피로수명 예측 | 한국가스학회지 | 1226-8402 | 이승림외 2명 | 201404 |
| 국내 | 탄산염해에 대한 LNG 저장탱크 PC 외부벽체의 수명평가 및 억제방안 | 한국가스학회지 | 1226-8402 | 이승림외 2명 | 201404 |
| 국내 | LNG 저장탱크 외조 콘크리트의 탄산화 및 염해 평가 | 한국위험물학회지 | 2288-6338 | 김정훈외 | 201506 |

### 나. 국제학술대회 발표

| 발표제목 | 학술대회명 | 발표일자 |
|---|---|---|
| Development of Technologies and Standards for the Life Time Management of LNG Storage Tanks | 2010 AIChE Spring National Meeting | 201003 |
| Interpretation of Band-typed Indication on Radiography on 9% Ni Steel Welds for LNG Storage Tanks | WCOGi 2010 | 201009 |
| Fire Hazard Analysis of a Steel Roof LNG Storage Tank | The 1st international conference on accidence on accident prevention | 201010 |
| Service Life time Prediction of 9% Ni Steel LNG Storage Tank Using Fatigue Analysis | 2012 Spring Meeting & 8th Global Congress on Process Safety(AIChE) | 201204 |

### 다. 국내학술대회 발표

| 발표제목 | 학술대회명 | 발표일자 |
|---|---|---|
| LNG저장탱크 계속운전을 위한 수명평가 시스템 개발 | 2010 한국가스학회 추계학술발표회 논문집 | 201005 |
| LNG저장탱크 염해 수명예측 | 2011 에너지공학회 | 201104 |
| 액화천연가스 자장탱크 9%Ni강 내부탱크의 내구수명 예측 | 2011 한국에너지공학회 추계학술발표회 | 201110 |
| 액화천연가스 저장탱크의 콘크리트 염해 수명 예측 | 2012 한국가스학회 추계학술발표회 논문집 | 201211 |
| 270,000 kl LNG 저장탱크 코너프로텍션 피로수명 예측에 관한 연구 | 2012 한국가스학회 추계학술발표회 논문집 | 201211 |
| Life-365를 이용한 LNG저장탱크 염해 수명평가 | 2012 한국에너지공학회 | 201204 |

| | | |
|---|---|---|
| | 춘계학술발표회 | |
| LNG 저장탱크의 수명평가 기술 개발 | 글로벌 시장 진출을 위한 「LNG플랜트 컨퍼런스 2013」 | 201306 |
| FEMFAT을 이용한 LNG 탱크 수명평가 자동화 프로그램 개발 | 2013 FEMFAT Korea User Meeting | 201310 |
| 완전방호식 액화천연가스 저장탱크 수명평가 기술 개발 | 2013 한국가스학회 춘계학술발표회 논문집 | 201305 |
| LNG 저장탱크 외조 콘크리트에 대한 탄산화 및 염해 내구성 평가 | 2015 한국에너지공학회 춘계학술발표회 | 201504 |

라. 기타성과

| 성과구분 | 내용 |
|---|---|
| 성과지표 직접기입 (기술확산교류, 전문인력양성 등) | 상세내용 작성<br>- 소프트웨어 등록번호<br>- 전문인력양성자 이름(학위)<br>- 자문회의 명<br>- 기술확산교류 회의명 및 날짜 |
| 기술지원 | - 실험실 독성가스 안전관리<br>- 기업을 대상으로 2010년에 지원 |
| 기술지원 | - LNG저장탱크 수명평가기술개발<br>- 기업을 대상으로 2010년에 지원 |
| 기술지원 | - 고망간강의 LNG 저장탱크 적용성 및 코드 개발 방향<br>- 기업을 대상으로 2012년에 지원 |
| 기술지원 | - 배관 유동 시뮬레이터(PipeTech) 사용자 교육<br>- 기업을 대상으로 2013년에 지원 |
| 인력양성 | - 이혁재(석사) |
| 인력양성 | - 송일현(채용) |
| 인력양성 | - 이경민(채용) |
| 국제협력 | - LNG저장탱크수명평가분야해외전문가초청<br>- 프랑스 기술사와 협력방안 협의(2009년 5월 27일, 한국) |
| 현장조사 | - Interpretation of Band-typed Indication on Radiography on 9% Ni Steel Welds for LNG Storage Tanks(2010년 9월 26일, 중국) |
| 현장조사 | - Fire Hazard Analysis of a Steel Roof LNG Storage Tank(2010년 10월 20일, 한국) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 강재 피로해석기술<br>- LNG저장탱크토목분야외부전문가초청, 최근기술정보를 습득, 토론,협의(건국대 기계공학과 김창완 교수)(20100812) |
| 기술확산교류 | - 부식 및 재료 선정<br>- 공정설비 부식 및 재료 선정 기술관련 해외 전문가를초청해 최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론・협의함(20100907) |
| 기술확산교류 | - LNG 설비 화재안전성평가 기술<br>- LNG설비 화재안전성평가 소프트웨어 전문가를 초청해 최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론・협의(20101015) |
| 기술확산교류 | - LNG저장탱크수명평가분야전문가초청 |

| | |
|---|---|
| | - LNG저장탱크토목분야외부전문가초청, 최근기술정보를 습득, 토론,협의(대우건설 기술연연구소 전세진박사)(20100511) |
| 기술확산교류 | - LNG저장탱크내구및피로해석<br>- LNG저장탱크기계분야수명평가관련외부전문가를초청해 기술정보를습득하고관심사항을토론·협의(20101227) |
| 기술확산교류 | - -LNG 저장탱크 구조해석기술<br>- LNG 저장탱크 구조해석 분야외부 전문가를초청해최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론·협의(20101229) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 구조해석기술 및 피로해석<br>- LNG 저장탱크 구조해석 분야외부전문가를초청해최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론·협의(20110311) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 수명평가 해외전문가초청교육 및 세미나 결과<br>- LNG 저장탱크 및 원전 수명평가진단 해외 전문기관의 전문가를 초청해 기술교육 및 세미나를 실시해 선진 수명평가진단 기술을 습득,전파(20110411) |
| 기술확산교류 | - 초저온 피로시험 기술<br>- LNG저장탱크 토목분야 수명평가관련 외부전문가를 초청(20111024) |
| 기술확산교류 | - LNG 설비 화재위험성평가기술<br>- LNG설비 화재위험성평가 전문가를 초청해 최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론·협의(20111116) |
| 기술확산교류 | - LNG탱크콘크리트외조수명진단기술<br>- LNG저장탱크외조콘크리트수명진단관련외부전문가를초청(20111209) |
| 기술확산교류 | - LRC LNG 저장설비 위험성평가기술<br>- 해외 위험성평가 전문기관에 위탁하여 실시한 위험성평가 결과 기술이전교육(20111214) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 물분무설비 설계 전문가 초청 세미나<br>- LNG 저장탱크 물분무설비 설계기술(20120905) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 콘크리트 수명평가 전문가 초청 세미나<br>- 콘크리트 성능저하와 염해 내구성 평가(20120926) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 콘크리트 수명평가 관련 자문회의<br>- LNG 저장탱크 콘크리트 염해수명평가 결과 검증(20121026) |
| 기술확산교류 | - 고망간강 LNG 저장탱크 적용성 기술지원 세미나<br>- 고망간강의 LNG 저장탱크 적용성 및 코드 개발 방향(20121129) |
| 기술확산교류 | - LNG 액화플랜트 위험성평가 전문가 초청 세미나<br>- LNG 액화플랜트 공정 및 위험성평가(HAZOP)(20121204) |
| 기술확산교류 | - 초대용량 LNG 저장탱크 위험성평가 전문가 초청 세미나<br>- 초대용량 LNG 저장탱크 위험성평가(HAZOP)(20121218) |
| 기술확산교류 | - 배관 유동 시뮬레이터(PipeTech) 사용자 교육<br>- 배관 유동해석 해외전문가 초청 교육(20130124) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 내부탱크 강재 적용성 검증 협의<br>- 고망간강 LNG 저장탱크 적용성 검증 방안 등(20130207) |
| 기술확산교류 | - 적외선 메탄 가스투출 검지 기술<br>- LNG 저장탱크 등의 메탄가스 누출 검지를 위한 적외선 메탄가스 검지기술과 관련하여 해외 전문가를 초청(20130226) |

| | |
|---|---|
| 기술확산교류 | - 천연가스 설비 위험성평가<br>- 천연가스 설비 위험성평가 외부 전문가를 초청해 최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론·협의(20130515) |
| 기술확산교류 | - LNG 저장탱크 콘크리트기술개발 워크샵<br>- LNG 저장탱크 안전 및 유지관리 기술(20130611) |
| 기술확산교류 | - LNG 설비 위험성평가기술<br>- LNG설비 위험성평가 전문가를 초청해 최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론·협의(20130827) |
| 기술확산교류 | - 가스감지기의 이해<br>- 가스감지기 관련 GASTRON 전문가 발표(20131002) |
| 기술확산교류 | - LNG 설비 위험성평가기술<br>- LNG설비 위험성평가 전문가를 초청해 최근 기술정보를 습득하고 관심사항을 토론·협의(20130314) |
| 산학연 협력활동 | - 파이프라인유동시뮬레이션(PipeTech)사용자교육<br>- 파이프라인유동시뮬레이션해외전문가를 초청해시뮬레이터이론및운용기술을 습득(20130124) |
| 산학연 협력활동 | - 고망간강의 LNG 저장탱크 적용성 및 코드 개발 방향<br>- 고망간강 LNG 저장탱크 적용성 협의 및 고망간강 국내외 코드화 방법 협의(20121129) |
| 포럼, 박람회 | - LNG 저장기술 국제 워크숍 및 심포지움<br>- LNG저장기술관련 표준및 기술동향(20090918) |
| 포럼, 박람회 | - FEMFAT을이용한LNG저장탱크의피로 수명평가<br>- LNG저장설비 적용에 대한 위험성 평가(20101012) |
| 매체(신문방송) | - LNG저장탱크수명평가 전문가초청세미나, 투데이에너지/디지털가스신문/에너지경제(20090528) |
| 매체(신문방송) | - LNG 저장탱크 국제표준화 국제회의 서울 개최, 한국가스안전공사(홍보실)(20090918) |
| 매체(신문방송) | - LNG 저장탱크 수명평가 기술 개발 현황 및 전망, 가스안전(20091201) |
| 매체(신문방송) | - LNG저장탱크 충격 및 화재 안전성평가기술,가스안전(20101001) |
| 매체(신문방송) | - LNG저장 설비 위험성평가 기준, 가스안전(20101201) |
| 매체(신문방송) | - LNG저장탱크 형식별 위험성 비교평가, 가스안전(20101215) |

2. LNG저장탱크 부재별 상태평가기준 및 방법

## 1 공통사항

가. “열화 및 손상” 손상항목은 표면손상 면적과 철근부식손상 면적으로 평가하며, 철근부식에 따르는 내하력 저하의 가능성이 없으면 표면손상으로, 부식에 의한 철근의 단면감소로 인하여 내하력 저하의 가능성이 있으면 철근부식손상으로 규정한다.

나. 표면손상은 파손, 박락, 층분리, 재료분리 등과 같이 손상이 콘크리트 부분에 국한된 경우를 말하며, 철근부식손상은 철근노출 및 노출된 철근이 부식된 경우나, 탄산화 또는 콘크리트내의 염화물로 인해 내부철근의 부식이 발생하고, 이로 인해 콘크리트의 팽창, 균열 및 박리가 발생한 경우를 말한다.

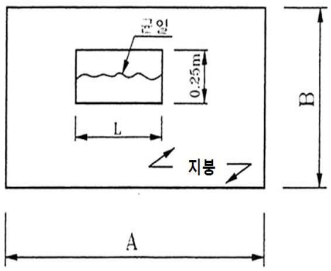
다. 균열율은 폭 0.2㎜이상의 균열을 대상으로 산정한다.

라. 콘크리트 균열에 의한 평가기준은 콘크리트 부재에 대한 설계, 시공 및 유지관리 분야간의 일관성을 위해 2007년 12월 개정된 콘크리트 설계기준에 명시된 허용 균열 폭을 참고하였다.

마. 손상항목은 정량적인 평가(균열폭, 균열율, 손상면적비)와 정성적인 평가(손상정도)로 나눌 수 있고 정량적 평가와 함께 손상의 정도에 따라 기술자의 판단에 의해 대표등급을 조정할 수 있다.

바. 철근 부식손상 면적은 철근이 완전히 노출된 경우는 노출면적을 부식손상 면적으로 산정하고 철근 부식손상이 의심스럽거나 징후가 보이는 손상(균열 등)에 대해서는 폭 0.25m에 대해 산정한다.

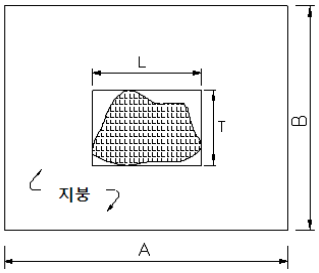
## 사. 균열율 산정 방법




- 균열발생 면적은 길이 당 0.25m의 폭을 차지하는 것으로 하며, 균열의 개수가 2개 이상일 경우는 각 균열길이에 0.25m의 폭을 곱해서 합산하여 구한다.
- 균열 면적율은 아래 식으로 산정한다.

$$\frac{\text{균열발생면적}}{\text{조사단위면적}} \times 100 = \frac{\text{균열길이}(L) \times 0.25}{A(m) \times B(m)} \times 100 = \%$$

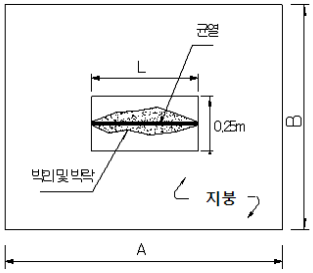
## 아. 표면손상에 대한 면적율 산정 방법




- 표면손상 면적은 손상부위 가로, 세로의 최외측 경계로 사각형으로 구획한 후 내면면적으로 구한다.
- 표면손상 면적율은 아래 식으로 산정한다.

$$\text{표면손상면적율}(\%) = \frac{\text{결함 및 손상발생면적}}{\text{조사단위면적}} \times 100$$

## 자. 철근부식 손상면적율 산정 방법




- 철근이 완전히 노출된 경우는 노출면적으로 산정하고, 내부에서 철근 부식시에는 철근노출 길이 당 0.25m의 폭을 차지하는 것으로 한다.
- 철근노출 면적율은 아래 식으로 산정한다.

$$\text{철근노출면적율}(\%) = \frac{\sum \text{철근노출면적}}{\text{조사단위면적}} \times 100 = \frac{\sum \text{철근노출길이}(L) \times 0.25m}{A(m) \times B(m)} \times 100 = \%$$

## 2 상부구조

### 가. 콘크리트 지붕

#### 1) 평가 기준

| 기준 | 균 열 | 열화 및 손상 |
|---|---|---|
| a | ○ 균열폭 0.1㎜미만 | ○ 없음 |
| b | ○ 균열폭 0.1㎜이상~0.3㎜미만<br>○ 균열율 2%미만 | ○ 표면 손상면적 2%미만 |
| c | ○ 균열폭 0.3㎜이상~0.5㎜미만<br>○ 균열율 2%이상~10% 미만 | ○ 표면 손상면적 2%이상~10%미만<br>○ 철근부식 손상면적 2%미만 |
| d | ○ 균열폭 0.5㎜이상~1.0㎜미만<br>○ 균열율 10%이상~20%미만 | ○ 표면 손상면적 10%이상<br>○ 철근부식 손상면적 2%이상 |
| e | ○ 균열폭 1.0㎜이상<br>○ 균열율 20%이상 | ○ 부식으로 인한 철근의 단면감소가 심하여 바닥판의 안전성이 저하되는 경우 |

#### 2) 평가방법

가) 1방향균열의 경우 0.3㎜미만의 균열평가 기준을 “b”로 1.0㎜이상의 균열과 균열율 20%이상인 상태를 “e”로 평가한다.

나) 콘크리트 지붕의 평가항목은 “균열”과 “열화 및 손상”으로 분류하고 균열은 1방향 균열에 의해 평가하고, 열화 및 손상은 표면손상과 철근 부식손상으로 평가한다.

다) 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로써 지붕의 경우 원모양에서 1/4인 90도 부채꼴 구분 단위의 지붕을 개별부재로 본다(예, 탱크1의 지붕A, B, C, 및 D). 개별부재의 대표등급은 평가항목 중 최소등급으로 결정한다. 지붕의 대표등급은 4개의 개별부재 중 평균등급으로 한다.

나. 벽체 (버트라스 포함)

1) 평가 기준

| 기준 | 균 열 | 열화 및 손상 |
|---|---|---|
| a | ◦없음 | ◦없음 |
| b | ◦균열폭 0.2㎜이하 | ◦표면 손상면적 2%미만 |
| c | ◦균열폭 0.2㎜초과 0.4㎜미만 | ◦표면 손상면적 2%이상~10%미만<br>◦철근부식 손상면적 2%미만 |
| d | ◦균열폭 0.4㎜이상~0.5㎜미만<br>◦내하력저하로 인한 휨균열 과다발생 | ◦표면손상면적 10%이상<br>◦철근부식 손상면적 2%이상 |
| e | ◦균열폭 0.5㎜이상<br>◦휨균열 과다발생 및 과대처짐으로 인한 안전성 저하 | ◦콘크리트의 심한 파손 또는 강선 정착부 파손으로 인한 부재의 안정성 저하 |

2) 평가방법

가) 프리스트레스트 콘크리트 벽체의 경우에는 텐던으로 인해 철근콘크리트 거더 보다 균열발생 가능성이 적으므로 균열의 평가 기준을 버트라스부 균열 및 정착부 균열 등으로 구분하지 않고 하나의 평가 기준을 적용한다.

나) 벽체 버트라스 콘크리트가 파손이 심하거나 정착부 파손으로 안정성이 저하되는 경우 평가기준을 “e”로 평가하며, 즉시 보강 또는 개축을 실시한다.

다) PSC 부재는 균열이 발생하지 않도록 설계하므로, 균열이 없을 경우의 평가기준은 “a”로, 0.5㎜이상의 균열이 발생할 경우 내하력저하로 인한 벽체의 안전성이 우려되므로 “e”로 분류한다.

라) 부재에 발생한 손상은 콘크리트 부분에 국한된 표면손상과 철근노출, 탄산화 및 염화물로 인한 철근부식 가능성이 있는 철근부식 손상으로 구분하여 평가한다.

마) 벽체의 평가항목은 “균열”과 “열화 및 손상”으로 분류하고 균열은 균열폭에 의해 평가하고, 열화 및 손상은 표면손상과 철근 부식손상으로 평가한다.

바) 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로써 벽체의 경우 버트라스간 사이의 영역으로 구분한다. 각 개별부재에서 수직방향으로 4m씩 점검단위영역으로 나누어 상태평가를 수행한다. 점검단위영역의 등급은 평가항목 중 최소등급으로 한다. 한 개별부재의 등급은 점검단위영역의 등급 중 평균으로 결정한다. 벽체의 대표등급은 개별부재들의 평균으로 한다.

다. 바닥판

1) 평가 기준

| 기준 | 균 열 | 열화 및 손상 |
|---|---|---|
| a | ◦균열폭 0.1㎜미만 | ◦없음 |
| b | ◦균열폭 0.1㎜이상~0.3㎜미만<br>◦균열율 2%미만 | ◦표면 손상면적 2%미만 |
| c | ◦균열폭 0.3㎜이상~0.5㎜미만<br>◦균열율 2%이상~10% 미만 | ◦표면 손상면적 2%이상~10%미만<br>◦철근부식 손상면적 2%미만 |
| d | ◦균열폭 0.5㎜이상~1.0㎜미만<br>◦균열율 10%이상~20%미만 | ◦표면 손상면적 10%이상<br>◦철근부식 손상면적 2%이상 |
| e | ◦균열폭 1.0㎜이상<br>◦균열율 20%이상 | ◦부식으로 인한 철근의 단면감소가 심하여 바닥판의 안전성이 저하되는 경우 |

2) 평가방법

가) 1방향균열의 경우 0.3㎜미만의 균열평가 기준을 “b”로 1.0㎜이상의 균열과 균열율 20%이상인 상태를 “e”로 평가한다.

나) “열화 및 손상” 손상항목은 표면손상 면적과 철근부식손상 면적으로 평가하며, 철근부식에 따르는 내하력 저하의 가능성이 없으면 표면손상으로, 부식에 의한 철근의 단면감소로 인하여 내하력 저하의 가능성이 있으면 철근부식손상으로 규정한다.

다) 콘크리트 바닥판의 평가항목은 “균열”과 “열화 및 손상”으로 분류하고 균열은 1방향 균열에 의해 평가하고, 열화 및 손상은 표면손상과 철근 부식손상으로 평가한다.

라) 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로써 바닥판의 경우 원모양에서 1/4인 90도 부채꼴 구분 단위의 바닥판을 개별부재로 본다(예, 탱크1의 바닥판A, B, C, 및 D). 개별부재의 대표등급은 평가항목 중 최소등급으로 결정한다. 바닥판의 대표등급은 4개의 개별부재 중 평균등급으로 한다.

## 3 하부구조

### 가. 페데스탈

1) 평가 기준

| 기준 | 균열, 변위 | 열화 및 손상, 철근부식 |
|---|---|---|
| a | ◦균열폭 0.1㎜미만 | ◦없음 |
| b | ◦균열폭 0.1㎜이상~0.3㎜미만 | ◦표면 손상면적 2%미만 |
| c | ◦균열폭 0.3㎜이상~0.5㎜미만 | ◦표면 손상면적 2%이상~10%미만<br>◦철근부식 손상면적 2%미만 |
| d | ◦균열폭 0.5㎜이상~1.0㎜미만<br>◦기초의 부등침하로 인한 페데스탈 기울음 | ◦표면 손상면적 10% 이상<br>◦철근부식 손상면적 2%이상 |
| e | ◦균열폭 1.0㎜이상<br>◦부등침하로 인한 페데스탈 안전성 저하 | ◦페데스탈 파손으로 인하여 상부구조 손상 가능성 있음<br>◦심한 철근부식으로 인하여 페데스탈의 안전성이 저하됨 |

2) 평가방법

가) 열화 및 손상과 철근부식은 표면손상 면적과 부식으로 인한 철근의 단면손상 발생면적으로 평가한다.

나) 상부구조의 침하 및 단차가 발생하거나, 받침 연단부 파손이 발생한 경우 “e” 로 평가하며, 즉시 보강 또는 개축을 실시한다.

다) 콘크리트 페데스탈의 평가항목은 “균열, 변위”과 “열화 및 손상, 철근부식”으로 분류하고 균열은 균열폭에 의해 평가하고, 열화 및 손상은 표면손상과 철근 부식손상으로 평가한다.

라) 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로써 페데스탈의 경우 각 페데스탈을 개별부재로 본다. 개별부재의 대표등급은 평가항목 중 최소등급으로 결정한다. 페데스탈은 한 저장탱크에 많이 구성되어 있어 페데스탈을 구조적 특성을 고려하여 벽체쪽 버트라스 중심에서 저장탱크의 중심까지 선을 그어서 영역을 구분하여 각 영역의 대표등급을 그 영역에서의 개별부재 최소등급으로 한다. 페데스탈의 대표등급은 개별영역의 평균등급으로 한다.

나. 기초

1) 평가 기준

| 기준 | 기초(직접, 말뚝, 케이슨)손상 | 지반의 안정성 |
|---|---|---|
| a | ◦없음 | ◦없음 |
| b | ◦직접기초(확대기초)에 폭 0.3㎜ 미만의 균열 발생 | ◦없음 |
| c | ◦직접기초(확대기초)에 폭 0.3㎜ 이상의 균열 및 단면손상 발생 | ◦탱크의 경사 1:500 미만 또는 방사형 선을 따라 탱크바닥 침하 1:300 미만 또는 탱크 원주 주변의 침하 1:500미만 발생<br>◦침하가 20㎜미만 발생 |
| d | ◦직접기초(확대기초)의 파손으로 인한 철근노출 발생 | ◦탱크의 경사 1:500 이상 또는 방사형 선을 따라 탱크바닥 침하 1:300 이상 또는 탱크 원주 주변의 침하 1:500이상 발생<br>◦침하가 20㎜이상 발생<br>◦기초의 부등침하 및 측방유동에 의해 교대/교각이 기울음 |
| e | ◦기초의 파손으로 인한 하부 구조물의 안전성 저하 | ◦기초의 부등침하 및 측방유동에 의한 페데스탈의 기울음으로 인해 상부구조의 단차 및 파손 발생 |

2) 평가방법

가) 기초 자체의 손상항목에는 직접기초(파일두부)의 파손, 파일의 손상 및 결함 등이 있으며, 지반의 안정성항목으로는 기초의 근입장 부족, 측방유동 등에 의한 기초의 부등침하가 중요한 평가항목이 된다.

나) 지반의 안정성 평가항목의 경우, 부등침하 발생시 “d”로 평가하며, 부등침하로 인한 상부구조물의 안전에 위해가 발생할 경우 “e”로 평가한다.

다) 기초의 평가항목은 “기초(직접, 말뚝, 케이슨)손상”과 “지반의 안정성”으로 분류하고 균열은 균열폭에 의해 평가하고, 열화 및 손상은

표면손상과 철근 부식손상으로 평가한다.

라) 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로써 기초의 경우  원모양에서 1/4인 90도 부채꼴 구분 단위의 기초를 개별부재로 본다(예, 탱크1의 기초A, B, C, 및 D). 개별부재의 대표등급은 평가항목 중 최소등급으로 결정한다. 기초의 대표등급은 4개의 개별부재 중 평균등급으로 한다.

### 4 저장탱크 받침

가. 평가 기준

| 기준 | 받침 본체 | | 받침 콘크리트 |
|---|---|---|---|
| | 탄성받침 | 강재받침 | |
| a | ◦양호 | ◦양호 | ◦양호 |
| b | ◦미세균열, 갈라짐 등 경미한 열화 | ◦외부 도장탈락 및 부식<br>◦도장탈색, 먼지 쌓임 | ◦부분적 박리, 탈락 등 손상 |
| c | ◦측면 부풀음<br>◦받침두께의 0.3배 미만의 전단변형 | ◦미끄럼판 부식 발생<br>◦부분적 변형, 고정장치 파손 및 이완 | ◦받침 콘크리트에 0.3㎜이상 균열 발생<br>◦박리, 탈락 등 손상으로 지지단면 감소, 기능상 장애 |
| d | ◦고무재 파손 및 단차, 균열 심화<br>◦받침두께의 0.3배 이상의 전단변형<br>◦받침이 밀착되지 않고 떠있는 부분이 전체면적의 1/2 미만<br>◦받침의 신축기능 불량 | ◦받침 본체 부식으로 인한 받침 신축거동 장애발생<br>◦받침 본체 파손<br>◦받침이 밀착되지 않고 떠있는 부분이 전체면적의 1/2 미만 | ◦받침 콘크리트 파손 및 하부공동으로 받침의 탈락 및 침하 발생 가능성 있음 |
| e | ◦받침 신축기능 불량으로 인하여 받침 본체 및 바닥판의 파손 발생<br>◦받침이 밀착되지 않고 떠있는 부분이 전체면적의 1/2 이상 | ◦받침 신축기능 불량으로 인하여 바닥판 등 주부재의 파손 발생<br>◦받침이 밀착되지 않고 떠있는 부분이 전체면적의 1/2 이상<br>◦작동불능 상태 | - |

나. 평가 방법

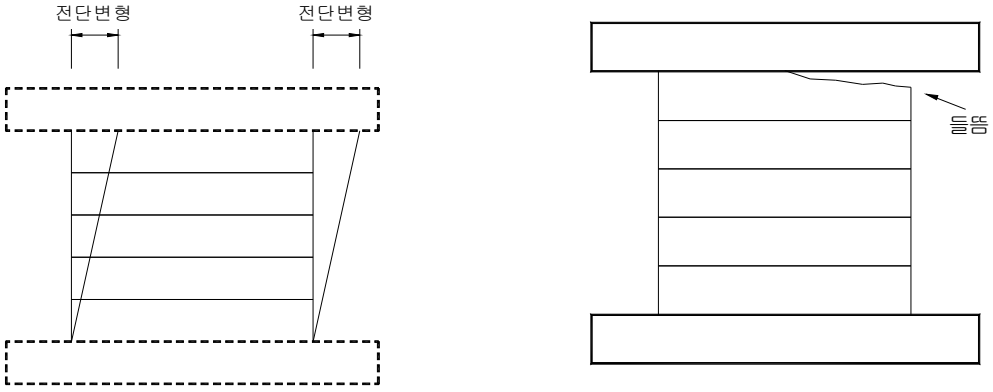
1) 본 상태평가 기준은 강재 및 탄성받침의 상태평가에 적용하며, 기타 특수받침의 경우에도 본 상태평가 기준을 준용한다.
2) 받침 본체는 상태평가 기준 범위는 “a~e”를 유지하고, 받침콘크리트는 본체에 비하여 중요도가 낮으므로 “a~d”로 한다.

3) 상부구조의 편기 또는 기울음 등에 의해 받침의 밀착면이 들뜨는 현상이 발생할 수 있고 이를 "밀착되지 않는 부분"으로 판정하여 평가하고 면적은 받침 본체의 접촉면적으로써, 탄성받침은 탄성고무받침의 접촉면적이며 강재받침은 받침본체의 상·하부 접촉면적을 말한다.

4) 공용 중 탱크의 탄성받침 전단변형은 상부구조의 신축에 따라 발생할 수 있으나 받침의 상시허용전단변형을 만족하더라도 상부구조의 밀림 또는 기타 원인에 의한 편기를 의심해 볼 필요가 있으므로 받침높이의 0.3배를 기준으로 "c"와 "d"등급으로 평가한다. "d"등급으로 판정된 경우는 상부구조의 편기를 의심하여 원인 파악을 할 필요가 있다.

5) 상태평가의 기본이 되는 개별부재는 평가의 최소부재 단위로써 저장탱크 받침의 경우 각 받침을 개별부재로 본다. 개별부재의 대표등급은 평가항목 중 최소등급으로 결정한다. 받침은 한 저장탱크에 많이 구성되어 있어 받침을 저장탱크의 구조적 특성을 고려하여 벽체쪽 버트라스 중심에서 저장탱크의 중심까지 선을 그어서 영역을 구분하여 각 영역의 대표등급을 그 영역에서의 개별부재 최소등급으로 한다. 페데스탈의 대표등급은 버트라스로 구분되는 영역 중 평균등급으로 한다.

6) 탄성받침의 전단변형은 아래를 참조하여 결정한다.




(a) 받침 전단변형 (b) 받침 들뜸현상

<탄성받침 전단변형 및 들뜸현상>

## 5 콘크리트 재료

가. 탄산화

1) 평가 기준

| 기준 | 탄산화 잔여 깊이 | 철근부식의 가능성 |
|---|---|---|
| a | ◦30㎜이상 | 탄산화에 의한 부식발생 우려 없음 |
| b | ◦10㎜이상 ~ 30㎜미만 | 향후 탄산화에 의한 부식발생 가능성 있음 |
| c | ◦0㎜이상 ~ 10㎜미만 | 탄산화에 의한 부식발생 가능성 높음 |
| d | ◦0㎜미만 | 철근부식 발생 |
| e | - | - |

2) 평가방법

가) 탄산화 깊이에 대한 평가는 철근으로부터 탄산화의 남은 깊이를 지표로 하여 탄산화에 의한 강재부식 가능성을 나타낸 것으로 탄산화에 의한 단독 열화에 대하여 적용 한다.

나) 콘크리트 품질평가 기준인 탄산화는 직접적인 손상항목이 아닌 철근부식을 유발할 수 있는 환경에 관한 항목으로써 상태평가 기준 범위를 “a~d”로 한다.

다) 철근의 피복은 조사 위치에서의 실측치를 기준으로 하며, 철근피복조사를 실시하지 않은 경우는 설계도의 수치를 따른다.

라) 콘크리트 코어채취가 가능한 조사대상에 대해서 탄산화 상태평가는 제한적으로 실시한다.

나. 염화물 함유량

1) 평가 기준

| 기준 | 전염화물 이온량 | 철근부식의 가능성 |
|---|---|---|
| a | ◦염화물 ≤ 0.3kg/㎥ | 염화물에 의한 부식이 발생할 우려 없음 |
| b | ◦0.3kg/㎥<염화물<1.2kg/㎥ | 염화물이 함유되어 있으나, 부식발생 가능성 낮음. |
| c | ◦1.2kg/㎥≤염화물<2.5kg/㎥ | 향후 염화물에 의한 부식발생 가능성 높음. |
| d | ◦염화물 ≥ 2.5kg/㎥ | 철근부식 발생 |
| e | - | - |

2) 평가방법

가) 채취 코어의 전염화물 이온 시험결과에서 염화물에 의한 강재부식 가능성을 평가한다.

나) 콘크리트 품질평가 기준인 염화물 함유량은 직접적인 손상항목이 아닌 철근부식을 유발할 수 있는 환경에 관한 항목으로써 상태평가 기준 범위를 “a~d”로 한다.

다) 염화물 함유량 분석은 철근 깊이까지 깊이별(10㎜ 또는 20㎜)로 단계를 구분하여 염화물 분포를 파악함을 원칙으로 하며, 염화물 이온농도의 분포를 도시한다.

라) 염화물 함유량 분석은 상・하부구조로 구분하여 KS F 2713(2002)의 산-가용성 염화물시험 규격에 따라 시행하며, 시험개소별로 평가한다.

마) 콘크리트 코어채취가 가능한 조사대상에 대해서 염화물 상태평가는 제한적으로 실시한다.