

과제
번호

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()
플랜트기술 고도화 사업 제8차 연도 최종 보고서

R&D / 08LNG플랜트A02

테
스
트
베
드

통
합
적
용
을

위
한

기
술
체
계

및

운
영
기
술

개
발

최
종
보
고
서

2021

국
토
교
통
부
국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

테스트베드 통합적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발 최종보고서

2021. 3. 15.

주관연구기관 / 한국가스공사

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

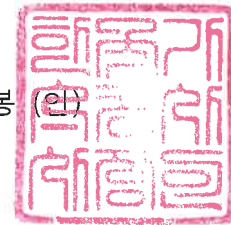
제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘테스트베드 통합적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발’(연구개발 기간 : 2008. 06. 18. ~ 2020.12.17) 과제의 최종보고서 를 제출합니다.

2021 . 3 . 15 .

주관연구기관명 : 한국가스공사 (대표자) 채희봉 (인)



주관연구기관책임자: 이 상 규

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	08LNG플랜트 A02	해당 단계 연구 기간	2014.10.08 ~ 2020.12.17	단계구분	(4단계)/ (총4단계)
연구사업명	중사업명	플랜트기술 고도화 사업			
	세부사업명	LNG플랜트사업단			
연구과제명	대과제명	LNG 플랜트 시스템엔지니어링기술 개발			
	세부과제명	테스트베드 통합적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발			
연구책임자	이 상 규	해당단계 참여연구원 수	총: 16명 내부: 16명 외부: 명	해당단계 연구비 (예산)	정부:910,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:910,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 16명 외부: 명	총 연구비 (예산)	정부:5,327,125천원 민간: 457,530천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 5,784,655천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국가스공사 가스연구원			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 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 (146쪽)

요약문

연구의 목적 및 내용	최종목표 : LNG플랜트 테스트베드 통합 적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발 - 기술개발 단계화 및 요구사항 정립 - 사업단과제 기본계획 및 연구관리체계 구축 - WBS 작성, 사업번호체계 개발 및 운영 등 사업기획 업무 - LNG 테스트베드 건설계획 수립 - 상위레벨의 개념설계 및 통합제어·운영기술 - 시스템 엔지니어링 모니터링 및 피드백				
연구개발성과	◦ 테스트베드 건설 추진계획 수립 ◦ 테스트베드 설계 관리 ◦ 테스트베드 공사 관리/감독 ◦ 테스트베드 시운전 관리/감독 ◦ 테스트베드 운영 및 유지보수 관리/감독 ◦ 상용급 LNG플랜트 FEED 패키지 개발 관리 ◦ 상용급 LNG-FPSO FEED 패키지 개발 관리 ◦ 연구성과시스템 ◦ 연구과제 관리 스케줄(PMS; Project management schedule) 관리 ◦ 연구성과 조사·분석 ◦ 기획보고서				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	◦ LNG 플랜트 사업단 WBS : 체계적 연구개발 활동 ◦ 테스트베드 건설계획 : 테스트베드의 성공적 건설과 운영 ◦ 테스트베드 기술적용체계 : 핵심과제별 기술의 적용 ◦ LNG플랜트 통합운영기법 : 기술통합과 제어, 운영계통과 제어요소 확립 ◦ Value Engineering 절차서 : EPC 최적화 ◦ LNG플랜트 사업모델 및 사업성공요인(CSF) : 플랜트 사업화				
국문핵심어 (5개 이내)	단계모델	사업화	연구플랜트	가치공학	정보흐름
영문핵심어 (5개 이내)	WBS	Business Model	Test-bed	Value Engineering	Information

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
2. 연구수행내용 및 성과	6
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	145
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	145
붙임. 참고 문헌 없음	

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 최종목표

1) 최종목표

- LNG플랜트 개발기술의 테스트베드 통합 적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발을 최종목표로 함
 - 테스트베드 통합 기술 적용체계
 - 연구수행 총괄 관리

2) 최종목표의 성격 및 설정근거

- 기술적인 측면에서 모든 과제요소를 세부적으로 컨트롤하기에는 어려움이 많으며, 구체적인 목적물을 대상으로 각 개별과제에서 도출되는 기술이 통합될 수 있도록 상위레벨에서 통합요소와 제어요소를 파악하고 시스템을 엮을 필요가 있음. 이를 위해서는 사업단장이 직접 주관하는 총괄과제를 도입하여 각 핵심과제 및 세부과제의 임무와 역할에 대한 정의를 토대로 각 단계별 기술 간 연계성 및 요구사항 등을 정의할 필요가 있으며, 구체적인 성과도출 로드맵을 작성하여 추진할 필요가 있음
- 특히, 개별 핵심과제 또는 세부과제에서 개발되는 요소기술 또는 모듈을 테스트베드에 집적함으로서 설계-시공-운영이 일체화된 EPC 종합기술의 완성도를 확보할 수 있음. 이는 테스트베드를 중심으로 각 핵심과제에서 도출되는 기술적 성과를 적용하여 검증하기위한 전략적 수단으로서, 먼저 테스트베드 건설 계획 단계에서 규모나 시스템 구성, 운영방안 등이 제시되며, 이를 토대로 핵심과제별 개발기술의 적용을 위한 기술체계를 완성
- 또한 각 핵심과제에서 추진하고 있는 기술개발 내용과 성과가 해당분야 테스트베드에 어떻게 적용될 것인지를 정의함과 동시에 적용 시점과 기술적인 적용방법, 평가 및 피드백 등에 관한 구체적인 계획 수립
- 최종적인 성과물은 WBS체계에 따른 과제관리를 통하여 직·간접적으로 적용이 되는 각 과제의 모니터링을 통하여 과제의 성공여부에 대한 판단을 수행하며, 테스트베드 건설의 기준을 정립하여 성공적인 테스트베드 건설 및 운영의 기반을 마련하는데 있음
- 궁극적으로 본 연구개발의 성과물은 이론적 아이디어 개발을 포함하고 있는 과제로 분류할 수 있음

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구 수행 기본

최종목표 : LNG플랜트 테스트베드 통합 적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발

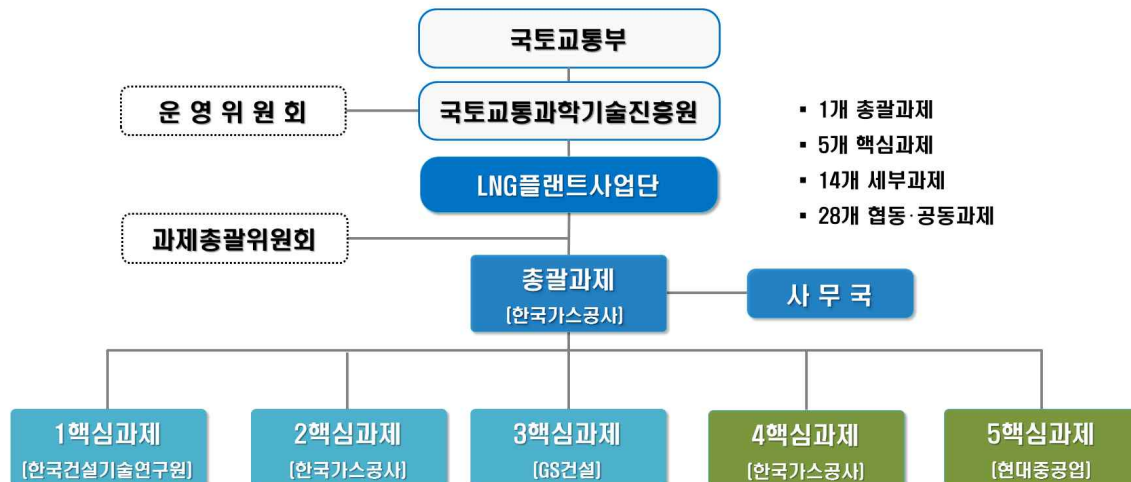
1) 기술개발 단계화 및 요구사항 정립

사업단과제의 기본계획을 수립하고 연구관리체계를 구축하였다.

연구수행체계

사업단 개요

- 정부부서 / 전문기관 : 국토교통부 / 국토교통과학기술진흥원
- 사업단 : 총괄과제를 중심으로 5개 핵심과제로 구성·운영



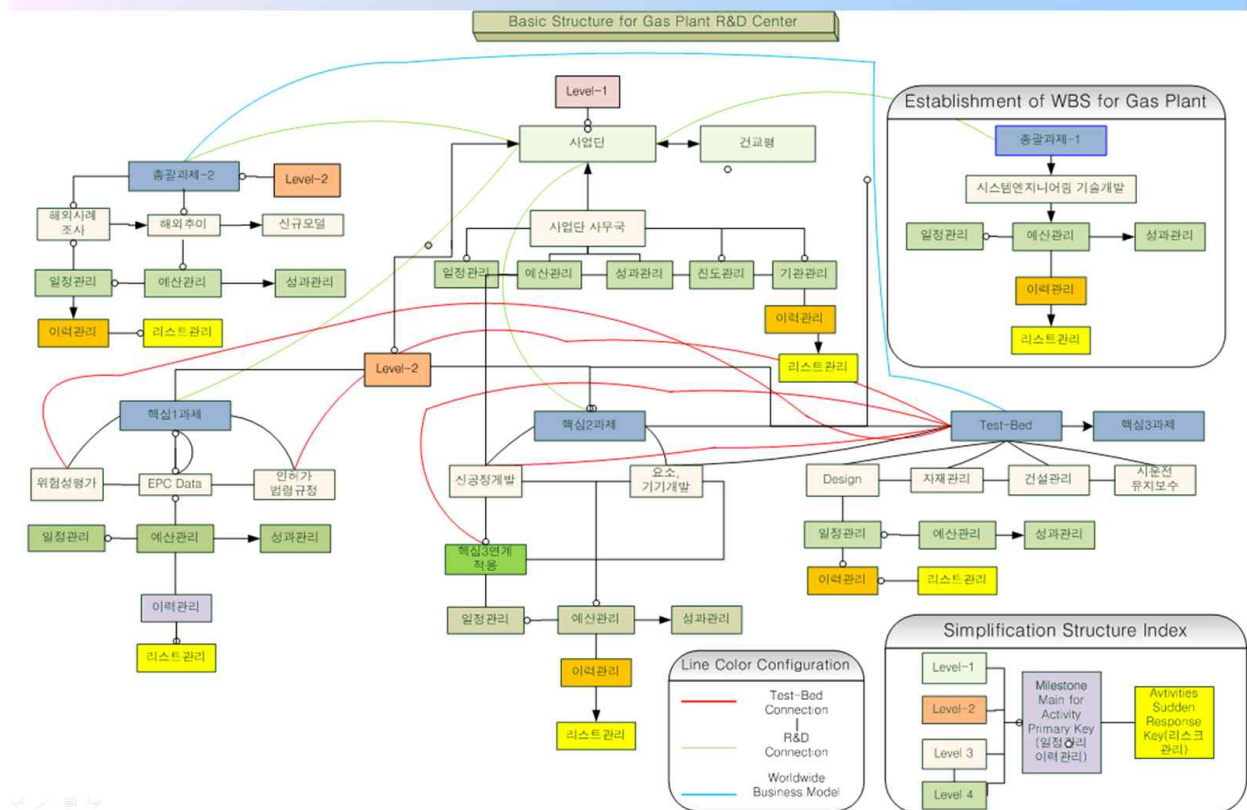
연구과제 구성

사업단 개요



2) WBS 작성, 사업번호체계 개발 및 운영 등 사업기획 업무

가스플랜트사업단의 프로젝트 기본 구조



3) LNG 테스트베드 건설계획 수립 및 상위레벨의 개념설계 및 통합제어·운영기술

핵심 연구성과

사업단 주요성과

● LNG플랜트 테스트베드 Train-1,2 설계 및 건설

- 상용공정(C3MR)을 적용한 국내 최초의 LNG플랜트 테스트베드 Train-1 EPC 및 시험운전 완료(2013.4)
 - 상용 공정(프로판-혼합냉매)에 대한 시공 및 운전 경험 확보
- 천연가스 신액화공정(KSMR)을 적용한 LNG플랜트 테스트베드 Train-2 EPC 및 시험운전 완료(2020.10)
 - 신액화공정(KSMR)을 최초 적용한 플랜트로 공정의 Track Record 확보, 열교환기 개발 및 냉매 압축기 국산화 성공

테스트베드 Train-1&2 3D Modeling



테스트베드 Train-1

- 개념설계(2009.4), 기본설계(2009.7~2010.3), 상세설계(2010.4~2013.3)
- 기자재 구매/제작, 건설(2011.09~2013.2)
- 시운전(1차 2013.1~2013.5, 2차 2014.1~2014.3)



테스트베드 Train-2

- 기본설계(2010.9~2011.10), 상세설계(2012.3~2014.01)
- 기자재 구매/제작, 건설(2013.4~2014.6)
- 시운전(1차 2017.10, 2차 2018.10, 3차 2020.9)

4) 시스템 엔지니어링 모니터링 및 피드백

- 테스트베드 건설 추진계획 수립
- 테스트베드 설계 관리
- 테스트베드 공사 관리/감독
- 테스트베드 시운전 관리/감독
- 테스트베드 운영 및 유지보수 관리/감독

테스트베드 개요

테스트베드 현황

● 연구목표 및 내용

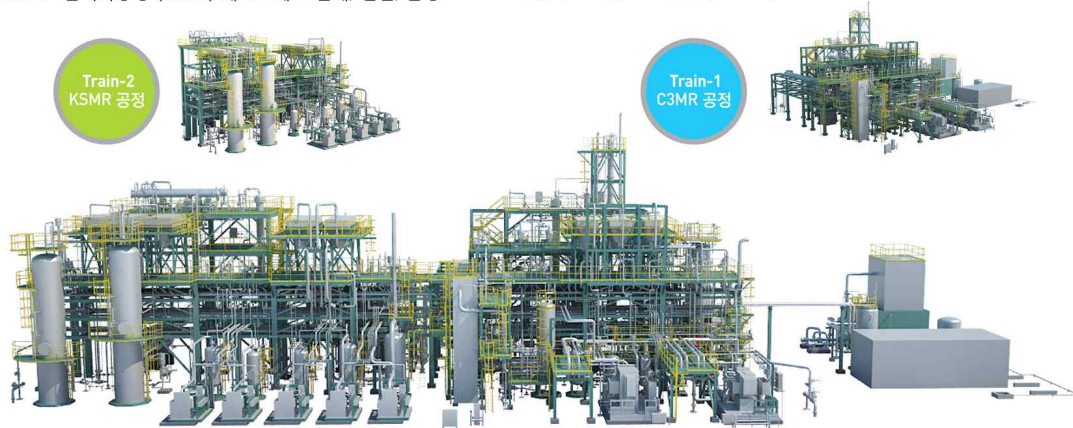
- 연구목표 : 테스트베드 건설을 통한 사업단 개발기술 실증
- 연구내용
 - Train-1 : 상용 액화공정(C3MR) 테스트베드 설계, 건설, 운영
 - Train-2 : 신액화공정 (KSMR) 테스트베드 설계, 건설, 운영

● 규모/생산량

- 규모 : 지상 1층, Train 2기
- 대지면적 : 30,483㎡(9,221평)
- 건축면적 : 1,500㎡(453평, 용적율 5%)
- 생산량 : 1기당 100톤/일(100TPD)

● 감리/시공

- 감독(감리) : 한국가스공사
- 설계 및 시공 : GS건설(주)



테스트베드 건설 현황

테스트베드 현황



< 테스트베드 Train-1 전경 >



< 테스트베드 Train-2 전경 >



주요 경과사항

테스트베드 현황

- 테스트베드 건설지 협약체결(한국가스공사) : 2010.7.8
- 테스트베드 건설기관 선정(GS건설) : 2010.10.26
- LNG 액화플랜트 테스트베드 착공식 : 2011.5.11
- 테스트베드 Train-1 공사 및 시운전 완료 : 2011.9.1~2014.4.19
- 테스트베드 Train-2 공사완료(압축기 제외) : 2014.06.30
- 2-4과제(한국터보기계) 연구수행 포기 : 2015.7.22
- 테스트베드 변경 구축 추진 : 2016.4.1~2018.12.17
- 테스트베드 Train-2, 1차 시험운전 : 2017.10~2017.11
민원에 따른 Flare Stack 자제 요청으로 정지
- 테스트베드 Train-2, 2차 시험운전 : 2018.10~2018.11 (LNG생산 30 ton/day)
주열교환기 등 성능개선 사항 발견으로 정지
- 코로나-19로 시험운전 및 사업단 과제 6개월 연장 (2020.06.17 → 2020.12.17 종료)
- 테스트베드 Train-2, 3차 시험운전 : 2020.09~2020.11 (성능 검증 완료)

Trina-2의 1차 2차 3차 시험운전 시행



5) 상용급 LNG플랜트 FEED 패키지 개발 관리

핵심 연구성과

사업단 주요성과

● 상용급 LNG 플랜트 FEED 패키지 개발(육상용, 연산 500만톤급)

● 연구성과

- 상용급(5 mtpa) LNG플랜트 FEED 설계 패키지 작성 완료('14.12)
- 상용급 LNG플랜트 FEED 발표회 개최('14.12.11)
- 상용급 KSMR 액화공정 기술 인증('15.12, DNV-GL)

● 주요내용 및 특징

- 라이선스 : KSMR(한국가스공사가 개발한 천연가스 신액화공정)
- 적용대상 Site : 모잠비크 제4광구 가스전
- 규모 : Train 2기(Train당 가로 700m × 세로 200m)
- Train 당 LNG 생산량 : 5.32 mtpa(652톤/시간)
- 생산가능도 : 93%(340 days)

● 기대효과

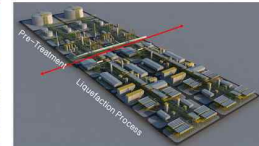
- 상용급 LNG플랜트 설계 기술력 확보로 천연가스 액화플랜트 사업의 독자적인 진출 가능
- ※ LNG 플랜트 EPC 기술의 경제적 가치는 5 mtpa 용량 기준으로 설계 약 2억 5,000만 달러, EPC 약 50억 달러 예상



상용 LNG플랜트 조감도



상용 LNG플랜트 설계집



상용 LNG플랜트 전처리/액화공정

6) 상용급 LNG-FPSO FEED 패키지 개발 관리

핵심 연구성과

사업단 주요성과

● 상용급 LNG-FPSO 플랜트 FEED 패키지(해상용, 연산 250만톤급)

● 연구성과

- LNG-FPSO FEED 패키지 개발
 - LNG-FPSO Pre-FEED
 - HAZID & HAZOP 수행
 - LNG-FPSO FEED 설계('15.12)
 - LNG-FPSO 3D 모델링 및 모델테스트('16.3)
- 설계 패키지 AIP 인증('17.2)

● 주요내용 및 특징

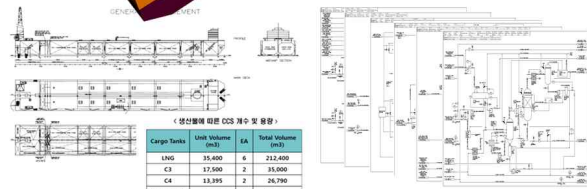
- 생산용량 : 2.72 mtpa @ 93% availability
- 액화공정 : KSMR LNG liquefaction process
- LNG탱크 : 212.4 km³(6 ea x 2 Row KC-1)
- LPG탱크 : C3 2ea, C4 2ea(IMO Type A)
- Hull 크기 : 420m × 70m × 35m(L × B × D)
- Offloading: LNG and LPG - Side by Side Condensate - Tandem

● 기대효과

- LNG-FPSO FEED 설계에 대한 엔지니어링 역량 강화 및 상용 프로젝트 수주시 국내 참여 비중 확대
- LNG-FPSO Topside 분야의 독자 설계가 가능함으로써 설계 유연성 증대 및 엔지니어링 비용절감
- 해상용 LNG 저장탱크 독자 모델 개발로 해외 라이선스 비용절감



LNG-FPSO 플랜트 3D 모델링



LNG-FPSO 플랜트 주요 설계 도면

7) 연구성과시스템

연구과제 관리 스케줄(PMS; Project management schedule) 관리 및 성과

사업단 운영·관리 실적-연구관리 능력

총괄과제 연구실적

● 사업단과제 성과도출을 위한 연구관리 실적 (2016 기준, 이후에는 예산상 활동을 줄임)

핵심연구성과 관리 - 사업단 5대 핵심연구성과물 진도관리 및 산출성과물 관리 - 상용급 LNG플랜트 FEED 발표회(2014.12.11) - 상용급 LNG-FPSO 설계 워크샵(2014.10.15~17) 등	연구과제 관리스케줄(PMS) 관리 - 오프라인으로 각 과제별로 최종연구목표 및 연구내용에 따른 산출성과물의 진도율 관리 - 총 8회(매월) 	연구성과 시스템 (사업단) 온라인으로 각 과제별 양적·질적 연구성과물 관리(총 8회, 매월) (전문기관) 온라인으로 각 과제별 연구성과물을 전문기관 연구관리 종합시스템에 입력(총 3회, 분기별)
연구성과 리스트 관리 - 오프라인으로 NTIS 제출양식(성과지표)에 따라 각 과제별 연구성과를 취합·관리 - 총 3회(분기별) 	사업단 워크샵 - 사업단 전체과제를 대상으로 발표를 통한 연구실적 및 계획 점검 - 제11회 LNG플랜트사업단 워크샵(2014.11.18~19, 대전)	현장실태조사 및 현장연구성과 점검 (현장실태조사) 연구현장에서 과제별 연구목표 및 성과 달성도, 연구개발비 집행관리, 과제관리 실태 조사(2015.1.29~2.09, 16개 과제) (현장연구성과점검) 연구현장에서 연구과제의 추진 실적 및 계획 점검(2014.10.31~2014.12.4 18개 연구과제, 2015.1.29~2.9, 16개 과제)
미달성 연구 추진관리 1~3핵심과제의 계획대비 미달성된 연구내용 및 연구성과에 대한 추진계획(일정)을 수립하여 관리 - 매월	성과점검기준표 - 연구목표의 질적 달성여부를 판단가능하고, 과제의 연구목표 및 연구내용과 연계가능한 성과지표 설정 - 1~3핵심과제 : 2014.8월 재설정 완료 - 4~5핵심과제 : 2015.3월 재설정 완료 예정 * 평가시 활용 예정	업무보고 - 각 연구과제별 연구과제/성과관리를 위한 실적 및 계획 관리(월간) - 테스트베드 현황 및 진도관리(주간, 월간)

사업단 운영·관리 실적-연구관리 능력

총괄과제 연구실적

● 테스트베드 EPC 및 압축기 개조 관리

● 테스트베드 EPC 관리/감독

- Train-1 : EPC 종합 : 100%(설계 100%, 구매 100%, 공사 100%)
- Train-2 : EPC 종합 : 100%(설계 100%, 구매 100%, 공사 100%)

● 테스트베드 시운전 및 운영/평가

- Train-1 : 시운전(2회, 완료), 운영평가(완료)
- Train-2 : 시운전(3회, 완료), 운영평가(완료)

● 테스트베드 Train-2 압축기 개조

- Train-1의 압축기 개조 완료



8) 연구성과 조사·분석

연구성과 및 기술가치 조사분석

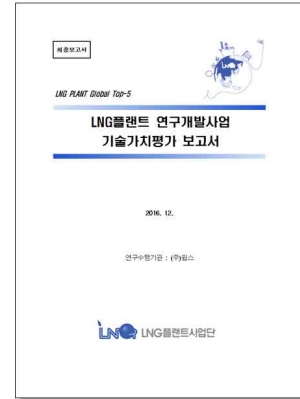
총괄과제

● 연구성과 조사분석

- 목적 : LNG플랜트사업 연구수행의 효율성 및 효과성 제고를 위한 투자현황 및 산출 성과 조사·분석

● 연구성과 조사·분석 및 기술 가치평가

- 천연가스 신액화공정(KSMR): 기술가치 2,300 억원
생산유발 5,161억원, 부가가치유발 1,642억원, 수입유발 612억원, 취업유발 1,846명
- LNG-FPSO 플랜트 Topside 공정: 기술가치 702억원
생산유발 1,574억원, 부가가치유발 501억원, 수입유발 187억원, 취업유발 561명
- 상용급 LNG플랜트 FEED 패키지: 기술가치 3,022억원
생산유발 6,781억원, 부가가치유발 2,157억원, 수입유발 807억원, 취업유발 2,417명
- 상용급 LNG-FPSO 플랜트 FEED 패키지: 기술가치 951억
생산유발 2,134억원, 부가가치유발 679억원, 수입유발 253억원, 취업유발 761명
- 테스트베드(T/B) Tain-1,2: 기술가치 638억
생산유발 1,432억원, 부가가치유발 456억원, 수입유발 170억원, 취업유발 510명



9) 기획보고서

후속과제 사전기획

총괄과제

- LNG플랜트사업단 수행과제 사업성과를 활용한 LNG플랜트 글로벌 사업기반 구축 추진
 - 육상 중소형 및 해상형 액화플랜트 액화공정 최적 설계 추진
 - 테스트베드 운전을 통한 Track record와 Reference 확보 추진
 - LNG플랜트 기술 고급인력 양성 추진
- LNG플랜트 산업 환경변화에 따른 육상형 LNG플랜트 비즈니스 모델 개발하여 실제 프로젝트에 적용 추진
 - 육상 중소형 액화플랜트 비즈니스 모델을 개발하여 실제 프로젝트에 적용
 - 천연가스 신액화공정(KSMR) 천연가스 액화플랜트 표준문서 개발하여 실제 프로젝트에 적용
 - 육상 천연가스 액화플랜트 FEED 패키지 개발하여 실제 프로젝트에 적용
- 부유식 액화플랜트(FLNG) 신사업모델 부상에 따른 해상형 LNG플랜트 비즈니스 개발하여 실제 프로젝트에 적용 추진
 - 해상형 액화플랜트 비즈니스 모델을 개발하여 실제 프로젝트에 적용
 - 연근해 FLNG Topside FEED 개발하여 실제 프로젝트에 적용
 - 연근해 FLNG Hull FEED 개발하여 실제 프로젝트에 적용
 - 연근해 FLNG 안전설계 및 신뢰도 평가 Tool을 개발하여 하여 실제 프로젝트에 적용

나. 세부 과제별 결과를 종합 분석

1) 핵심 1과제: RAM 기반의 LNG 플랜트 모듈화기술 개발

가) RAM 기반의 LNG 플랜트 모듈화기술 개발

- 인공지능 기반의 LNG 플랜트 모듈화기술 개발: 3차원 LNG 플랜트 가상모델을 구축하고 설계를 평가하는 기술로 이론적 방법론은 성립하였으나, 실제 설계에 반영하

지는 못하였고, 한국가스공사에서 내부 후속과제에 반영하여 시스템을 완성하였음.

- 마이크로채널 기반의 열교환 구조 개발: 시제품까지는 완성하였음.
- LNG 플랜트 시스템 위험도 평가기술 개발: 가스안전법률 및 설계 및 테스트베드에 대한 안전성 검토에 활용
- 고효율 LNG 플랜트용 열교환기에 적합한 열교환 구조의 설계 및 평가: 이론적 설계 기술 정립
- 공정계통 이상상태 실시간 감시 및 진단시스템 개발: 이론적 감시진단시스템 완성

나) 동적 공정설계 시뮬레이터 개발: 핵심1에서는 여건상 수행 정지되었고, 이후 관련 업무를 4-1로 승계하여 OTS 시스템 완성

다) 생애주기 규명 및 통합 지식관리기술 개발

생애주기 규명 및 통합 지식관리기술 개발, 시나리오 기반의 LNG 플랜트 사업계획 전문가 시스템 개발, 위험 기반의 사업 및 공정관리기법 개발, LNG플랜트 해외사업 모델 및 위험관리기법 개발에 대하여 하나의 시스템으로 완성하였음. 특히 LNG플랜트 해외 사업 모델 및 위험관리기법 시스템은 향후 해외 진출에 활용할 가치가 있음.

2) 핵심 2과제: 고효율 LNG 플랜트 공정기술 개발

가) 고효율 천연가스 액화공정기술 개발

- LNG 플랜트 사이클 모사 및 공정 개발: KSMR 액화공정을 개발하였고, 이에 대한 특허 다수를 등록하였음. 관련 공정을 육상용 및 해상용 LNG플랜트 FEED에 적용하였으며, 테스트베드에도 성공적으로 검증하였음
- 천연가스 및 냉매의 물성연구 및 DB 구축: 정교한 물성계산의 적용방법 및 해법 제시, 단 HYSYS 방법에는 적용하지 못했음
- 냉매 및 천연가스 관련 물질의 물성예측 모델 개발: Hysys 적용을 위한 binary factor를 통계로 계산하였음. 단, 그 값과 기존 값과의 차이가 크지 않고, 설계 기준을 바꾸는 것이 혼란스러울 수 있기에 설계에 반영하지는 않았음.
- 아래의 표는 개발된 연구결과 성과에 대한 선진사 대비 수준 평가를 나타내는데, 연산 500만톤 규모를 비교한 것이다. 표에서 개발된 KSMR 공정의 소비전력은 SMR 소비 전력을 100% 기준으로 할 경우의 값으로, 대형플랜트에서 가장 많이 사용되

는 C3MR 대비 약 5% 많지만 주요 기자재는 반으로 줄일 수 있음을 표현하였다. 또한, SMR과의 비교 경우, 단지 압축기 하나를 추가함으로써 소비전력이 1/3 로 줄어든다고 할 수 있다.

Cycle Comparison for 5 MTPA Scale

		Compressor Power Consumption		No. of Main Equipments			
		MW	% to SMR	Compressor	Pre-Chiller	MCHE	Sum
SMR		272	100%	4		2	6
C3MR		168	62%	7	6	1	14
Cascade		254	93%	8		3	11
KSMR Cycles	Cycle-B	183	67%	6		2	8
	Cycle-1	182	67%	5		2	7

나) 천연가스 전처리기술 개발

- NGL 회수공정 및 통합기술 개발: 전처리 설계 방법 정리
- 가스하이드레이트 생성 억제기술 및 공정 개발: 설계 방법 정리 및 실험을 통한 Data 정리

다) LNG 플랜트 열교환기 개발

Plat Fin Heat Exchanger 의 설계 기술 정립 및 제작기술 개발 완료하여, 테스트베드에 적용하여 검증 완료하였음

라) LNG 플랜트 압축기 개발

개발 중도 포기

3) 핵심 3과제: 대용량 LNG 플랜트 설계 및 건설기술 개발

가) LNG 플랜트 설계기술 개발

- FEED 및 기본, 상세설계기술 개발: 테스트베드 개념 · 기본 · 상세 설계 개발, 상용급 5 mtpa급 LNG플랜트 개념 · 기본 · 상세 설계 개발 완료

- LNG 플랜트 공정제어 설계기술 개발: C3MR 공정에 대한 BSU 완료

나) LNG플랜트 건설 및 운영유지관리 기술 개발

테스트베드 시공, 시운전 완료

다) 초대용량 LNG 저장탱크 설계기술 개발

- 초대용량 LNG 저장탱크 설계기술 개발: 27 만 kl 급 LNG저장탱크 설계 기술 개발 및 삼척기지와 싱가포르에 설계 및 구축 완료

- LNG 저장탱크 수명평가기술 개발: 27 만 kl 급 LNG저장탱크 설계 기술 검증 및 수명 관련 연구 수행

4) 핵심 4과제: LNG-FPSO 공정 응용기술 개발

가) LNG-FPSO 공정 최적 설계기술 개발

- LNG-FPSO 공정 최적화 기술 개발: 핵심 2에서 개발한 KSMR 공정의 효율을 개선하여 특허 취득하고, 이를 LNG-FPSO 공정에 적용

- LNG-FPSO 회전기기 최적화 기술 개발: 냉매 압축기 등 회전기기에 대한 이론적 최적화 수행

나) 천연가스 해상 전처리기술 개발

LNG-FPSO 전처리 공정 설계 기본 기술 정립 및 실험 장치 구축과 운영을 통한 Factor 정립

다) LNG-FPSO 안전설계 및 신뢰성 공학기술 개발

LNG-FPSO 안전 설계를 위한 각종 시스템 구축 및 기술 정립 및 상용급 LNG-FPSO 설계 기준 정립

5) LNG-FPSO 플랜트 설계 및 건설기술 개발

가) LNG-FPSO 플랜트 Topside 설계기술 개발

- LNG-FPSO Topside FEED 패키지 개발: 2.5 mtpa 급 LNG-FPSO Topside 및 Hull Side FEED 패키지 개발 및 AIP 인증 수행

- LNG-FPSO 전처리 FEED 설계: 2.5 mtpa 급 LNG-FPSO Topside 전처리 공정 설계 완수

나) LNG-FPSO Plant-CCS 연계기술 개발

LNG-FPSO의 LNG 화물창 기술 개발 완료, 일부 기술은 KC-1에 적용.

LNG플랜트사업단 연구 성과 요약

Core 1

Core 2

Core 3

Core 4

Core 5

시스템

공정 / 기자재

설계 / 건설

공정

설계

LNG 플랜트

LNG-FPSO 플랜트

핵심계통 가상 부품모델

플랜트 이상 감시 및 분석

MC 열교환기 개발 및 성능시험

통합 지식관리 시스템

해외 사업 모델

천연가스 액화공정(KSMR)

테스트베드 Train 구성

NGL/LNG 통합 공정 최적화

열교환기 및 Coldbox

BSU 플랜트 제어시스템

테스트베드 설계 및 3D 모델링

초대용량 LNG 저장탱크

테스트베드 Train-1

테스트베드 Train-2

2008~2020

63 개 기관

600명 연구진

LNG-FPSO 플랜트

천연가스 액화공정 개선

액화공정 설계

해상 전처리 기술

안전설계 및 신뢰성 공학기술

Topside 공정 설계

Hull GA 작성, PFD/P&IDs

CCS 설계



상용급 LNG 플랜트



상용급 LNG-FPSO 플랜트

다. 테스트베드 Train-1 시험운전

Train-1은 C3MR공정으로 2011.05 착공을 하고, 2013.01 에 1차 시험운전을 수행하였으나, 냉매 압축기 Sealing에 문제가 있어서 이를 보강하고, 2014.01~03 사이에 100 t/d 생산을 완료하였다. (상세 내용은 3-2 과제 보고서 참조)

라. 테스트베드 Train-2 시험운전

1) KSMR 액화공정 설명

가) LNG플랜트사업단의 KSMR 연구성과 요약

- 고효율 천연가스 신액화공정(KSMR)을 개발('11.5)
- KSMR 공정의 국내·외특허 취득(국내 등록 22건, 국외 등록 6건)
- 천연가스 액화공정 신기술 인증('15.12, DNV-GL)

나) LNG플랜트사업단의 KSMR 주요내용 및 특징

- 신액화공정(KSMR)은 SMR과 DMR의 장점을 동시에 보유한 국내 최초로 개발한 천연가스 액화공정
- 선진사의 액화공정(C3MR)보다 단순한 공정(주요 유닛 약 40% 감소)
- 유사 공정(SMR) 대비 35% 낮은 에너지 소비
- 단순한 설비 구성과 높은 효율로 중소규모의 가스전에 적합
- 주 열교환기(MCHE)로 PFHE(Plate-fin Heat Exchanger)와 SWHE(Spiral Wound Heat Exchanger) 모두 적용 가능

다) LNG플랜트사업단의 KSMR 기대효과

- 천연가스 액화공정 개발로 독자적인 해외 천연가스 액화사업 진출 토대 마련
 - ※ 세계적으로 천연가스 액화기술을 개발하여 실용화 단계인 기업은 APCI(미국), COP(미국) 등 소수에 불과함
- 고부가가치 기술분야인 천연가스 액화공정 설계 및 LNG플랜트 건설 참여 기반 제공

라) KSMR 기본 공정도 및 성능

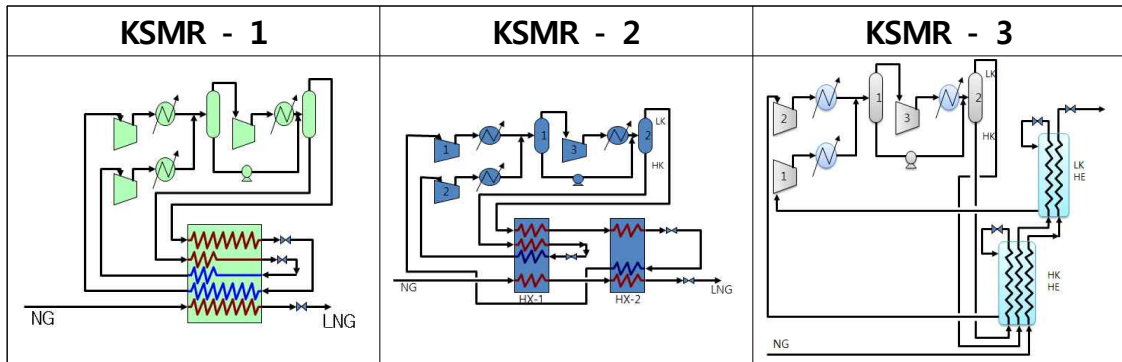


Table 2-다-1) 1. KSMR 기본 공정도 및 성능

Liquefaction Cycles	Power Consumption [kWh/kg LNG]	Comparison to SMR
SMR	0.4990	100%
KSMR TM -1	0.3477	70%
KSMR TM -2	0.3308	66%
KSMR TM -3	0.3219	65%

Table 2-다-1) 2. 기존 천연가스 공정과 비교한 KSMR 공정

2) Test-bed 설명

가) Test-bed 개요

(1) 목적

- 사업단 R&D를 통해 개발된 핵심 공정, 설계, 주요 기자재 등 실증 및 해외시장 진출을 위한 Reference 확보

(2) 구축내용

- **Train-1 : 상용 액화공정 테스트베드(100톤/일) 설계, 건설, 운영**
 - * 상용 액화공정(C3MR) : 미국 Air Product사에서 개발한 액화공정으로 전 세계 80% 이상의 LNG 플랜트에 적용(Reference Pilot 플랜트)
- **Train-2 : KSMR 공정 테스트베드(100톤/일) 설계, 건설, 운영**
 - * KSMR 공정 : 한국가스공사가 개발한 “한국형 천연가스 액화 공정”



Fig. 2-다-2) 1. Train-1과 Train-2 모델링



Fig. 2-다-2) 2. Train-1 현장 사진



Fig 2-다-2) 3. Train-2 현장 사진

(3) 규모 및 생산량

- 규모 : 지하1층 / 지상 2층(11개동)
- 대지면적 : 30,483㎡(9,221평)
- 건축면적 : 1,500㎡(453평, 용적율 5%)
- 생산량 : 1기당 100톤/일(100 TPD)
- 부지위치: 인천광역시 연수구 인천신행대로 960, 한국가스공사 LNG인수기지 내

(4) 감리/시공

- 감독(감리) : 한국가스공사
- 설계 및 시공 : GS건설(주)

(5) Test-bed Train-1과 Train-2의 비교

구분	Train-1	Train-2
구축 의의	· 상용 액화공정(C3MR)에 대한 설계, 시공, 운전 경험 확보 ※ 해외시장 진출 기반 마련 · 본 과제를 통해 개발한 한국형 액화공정(KSMR)의 성능 등을 평가하기 위한 레퍼런스	· 사업단 주요 연구성과물 실증가능 · 세계 5번째로 개발한 한국형 액화공정(KSMR)의 Track Record 확보를 통한 시장진출 교두보 마련 · LNG플랜트 운영요원 교육장소로 활용 가능
적용 기술	· 기존 상용 액화공정(C3MR) 기술	· 사업단에서 개발한 한국형 고효율 천연가스 액화공정(KSMR) 기술
주요 기자재	· 기존 제품을 구매하여 조달 ※ 열교환기(Fives Cryo(프)), 냉매압축기(삼성테크윈) 등	· 열교환기 (2-3-1 동화엔텍) 등 사업단에서 자체 개발한 성과물을 적용(장비 국산화율 80%(기자재 구매비용 기준, 공사 현장 물량 제외))

Table 2-다-2) 1. 테스트베드 Train-1과 Train-2의 비교

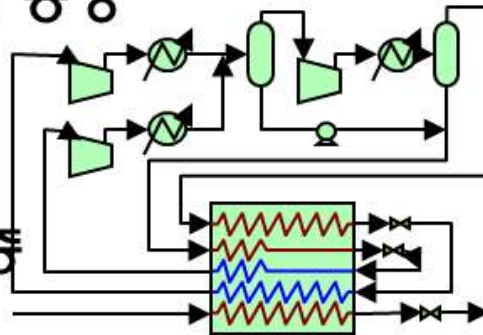
(6) Test-bed 필요성

액화공정 원천기술

LNG플랜트 핵심 공정

KSMR 공정

- 특허 22개
- 신기술 인정
- Simulation 검증



Test-bed 통한 실증



냉동 사이클에 대한 실체적 검증

- 약 5조원의 플랜트건설 가능 확인
- 1년 365일의 안정적 운영 가능 확인

'20~'30: 841조원 시장

**대용량 기본설계 및 라이선스 기술은
미국과 독일만이 소유**

LNG플랜트 1기: 약 5조원



LNG-FPSO 1기: 약 4조원



Fig 2-다-2) 4. Test-bed 필요성

액화공정 원천기술을 가지고 있더라도 841조원의 시장에 안정적으로 진입하기 위해서는
실체적인 검증이 필요하며, 그 실제적인 검증이 Test-bed이다.

(7) Test-bed 위치 및 Tie-in 들

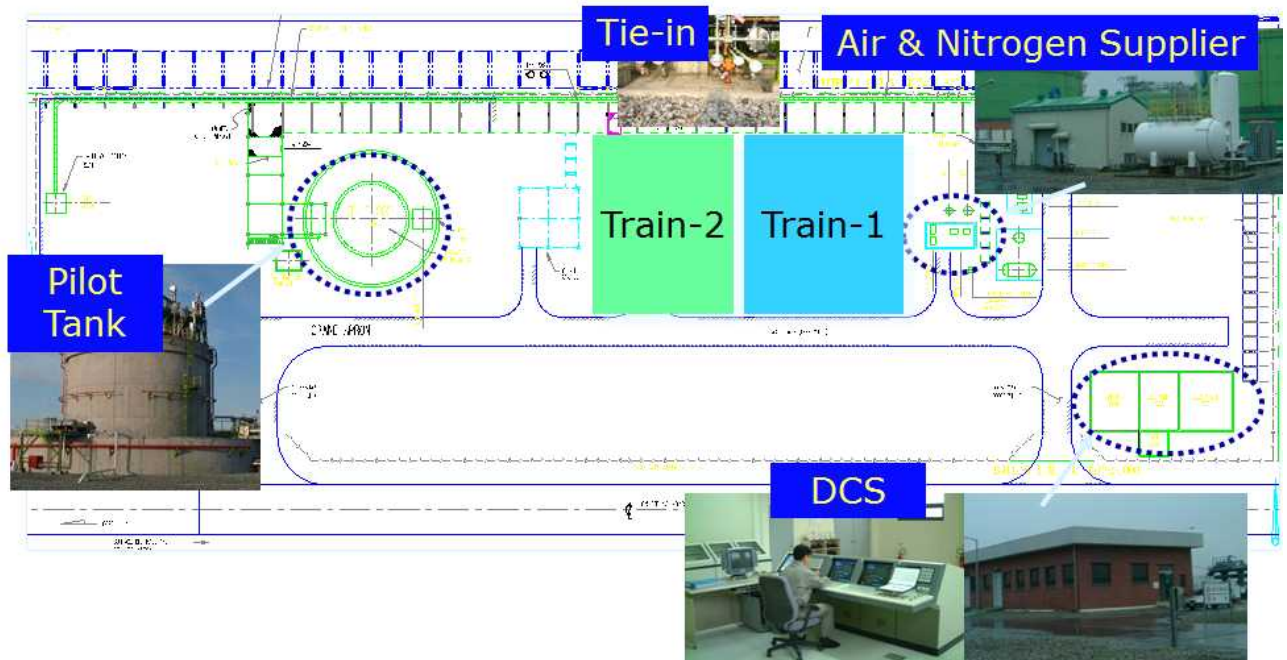


Fig. 2-다-2) 5. Test-bed 위치 및 Tie-in

(8) Pilot 설비 및 인천생산기지와의 연결

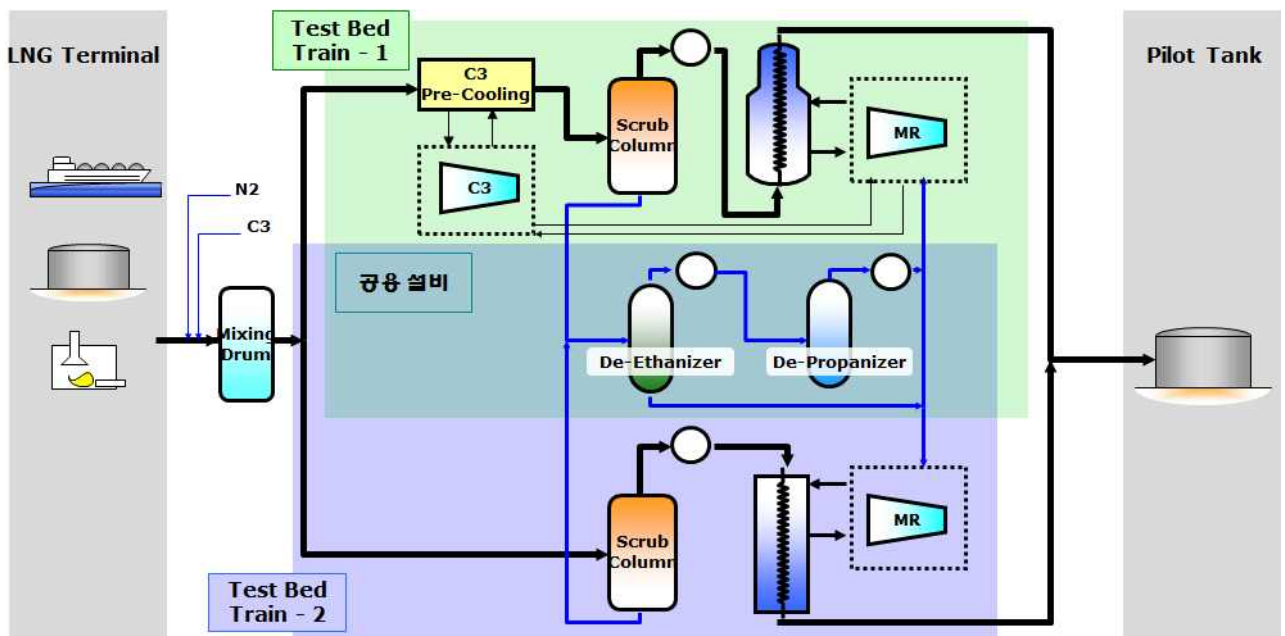


Fig. 2-다-2) 6. Pilot 설비 및 인천생산기지와의 공정 연결도

Test-bed는 Pilot 설비 영역 안에 있으며, Pilot 설비 영역과 기지는 NG, LNG 및 BOG 등이 연결되어 있다. 기본적으로는 기지로부터 NG (상온, 70 barg), LNG (액체상태, 10 barg) 등을 공급 받을 수 있으며, 생산된 LNG 및 BOG를 기지로 송부할 수 있다. 또한, Flare를 기지 쪽을 통하여 해소할 수 있으며, 유틸리티로는 전기, FG (Fuel Gas), Air, 물 등을 공급받을 수 있다. 본 시험 연구에서는 기지로부터 NG를 받아서 LNG로 송출하였고, BOG와 Flare를 방출할 수 있었다. 또한, 전기, 물을 공급받아서 시험 설비 운전에 활용하였다.

(9) 간략화된 Train-2 KSMR 공정도

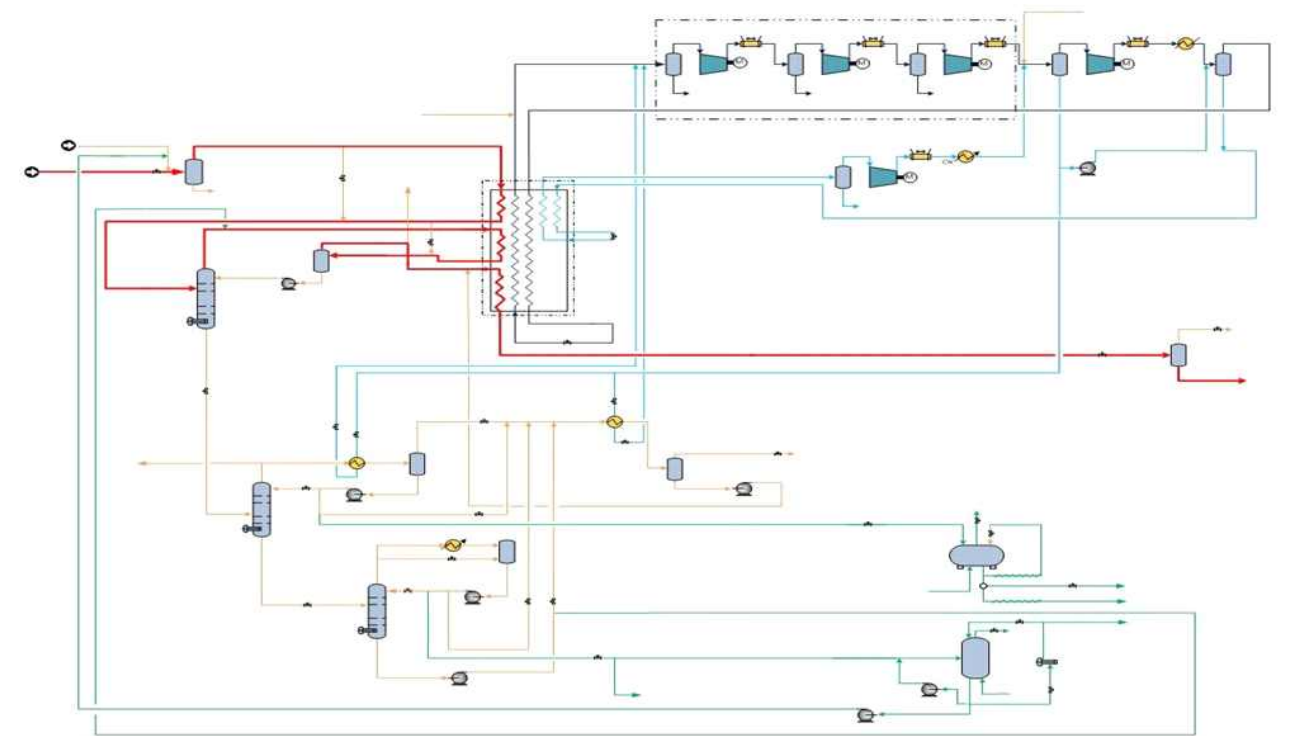


Fig. 2-다-2) 7. 간략화된 Train-2 KSMR 공정도

나) 추진경과

- 2010.07 : 테스트베드 건설지 협약체결(한국가스공사)
- 2010.10 : 테스트베드 건설기관 선정(GS건설)

- 2011.03 : 테스트베드 Train-1 인·허가
- 2011.05 : LNG 액화플랜트 테스트베드 착공식
- 2011.09 : 테스트베드 Train-1 공사(토목·기계·배관·전기·계장) 착공
- 2013.01 ~ 05 : 테스트베드 Train-1 시운전(1차)
- 2013.03 : 테스트베드 Train-1 사업개시신고
- 2013.03 : 테스트베드 Train-2 인·허가
- 2013.04 : 테스트베드 Train-2 공사 착공
- 2014.01 ~ 03 : 테스트베드 Train-1 시운전 완료(2차)
- 2014.06 : 테스트베드 Train-2 공사 완료(압축기 제외)

- 2016.04 : 테스트베드 변경구축 추진('16.4.1~'17.12.17)
- 2017.11 : 테스트베드 시운전 중단

(인천기지본부 소각탑 민원 발생에 따른 인천시 잠정연기 지시)

- 2017.12.04: 가스공사 기본계획 수립 (기술사업본부)
- 2017.12.15: LNG플랜트사업단 1년 기간연장 (사업단 운영위원회)
- 2018.01 ~ 2018.03: 운전비용 추산 및 참여기간 비용분담 협의 완료
- 2018.04.26: 가스공사 수시과제선정 기술실무위원회
- 2018.05.09: 가스공사 수시과제선정 기술심의위원회
- 2018.06.18: 가스공사 “KSMR Test-bed 2차 시험운전” 과제 시작
- 2018.06.27: 지역 안전협의체 시험 계획 보고
- 2018.08.27 ~ 2018.08.27: Pre-commissioning
- 2018.08.28 ~ 2018.09.26: Commissioning
- 2018.10.29: 30 ton/day LNG 생산 확인
- 2018.11.23: Test-bed 운영 정지
- 2018.12.14: LNG플랜트사업단 기간 1.5년 연장 (사업단 운영위원회)

- 2018.12 ~ 2019.07: 운전비용 추산 및 참여기간 비용분담 협의 완료
- 2019.08.20: 3차 시험운전 기본 계획 수립
- 2019.10.04: 가스공사 수시과제선정 연구개발심의위원회
- 2019.11.01: 가스공사 “KSMR Test-bed 3차 시험운전” 과제 시작

- 2020.03.27: COVID-19로 사업단 과제 기한 6개월 연장 (2020.12.17. 까지로 연장)
- 2020.06.15: 현장 엔지니어 및 운전원 출입 (15명으로 시작 최대 25명)
- 2020.06.23: COVID-19로 “KSMR Test-bed 3차 시험운전” 가스공사 자체과제 3개월 연장
(2020.12.31. 까지로 연장)
- 2020.06.30: 주열교환기 교체 (전후 1주일씩 배관 작업 수행)
- 2020.07 ~ 2020.09: 설비 보수, 교육, 기기 점검, Purging 및 수분제거 등
- 2020.09.01: NG 투입
- 2020.09.02: 냉매 압축기 가동
- 2020.09.10: LNG 생성 및 송출 시작
- 2020.09.12 ~ 2020.09.24: LNG 생산 성능 증가 (~3.4 ton/hr)
- 2020.09.25 ~ 2020.09.27: 1차 성능 시험 (72시간, 일 82톤)
- 2020.09.28. ~ 2020.10.07: 열선 보강 등을 통한 주열교환기 성능 보완
- 2020.10.07. ~ 2020.10.09: LNG 생산 성능 증가 (4.0~4.3 ton/hr)
- 2020.10.12: 최종 성능 시험운전의 성공적 완료
 - 성능 검사 결과: LNG 일평균 101.2 톤 생산, 72시간 연속 운전완료
 - 시험시간 2020.10.09 13:00 ~ 2020.10.12 13:00

다) KSMR Test-bed 최적 운전 절차서

(1) 기존의 Test-bed Train-2 전체 Start-up Scenario

<Start-up 준비>

- (Test-bed) IA 로 장치의 수분 제거
- N2로 장치의 Oxygen 제거

<Start-up>

1) Feed 가스를 Bypass Valve를 이용하여, 최소량의 Feed 가스를 Scrubber 상부에서 MCHE를 통과하고, End Flash Drum 상부를 통해 BOG Header로 송부한다. 단, 압력은 아직 1.3 bar를 유지한다.

- 도면 10-301 PV-002 Bypass를 이용하여 압력을 1.3 bar로 만들고, PV-002 Bypass를 닫고 도면 10-301 PIC-002를 1.3 bar 압력 제어한다.
- 도면 14-301 PV-043A의 Bypass를 이용하여 Feed 가스를 공정에서 제거하며 압력이 상승하면 PV-034A를 1.3 bar 로 자동 제어한다.

2) Feed 가스로 압축기 K-2301, K-2302, K-2303 (K-2303은 상태를 보면서 나중에 기동 가능)을 기동 Surge Control Valve로 100% 유량 회전

- LK JT Valve는 Open 상태로 운전 시작
- 도면 10-301 PIC-002를 1.3 bar 압력 제어 유지한다.
- 도면 23-301 HIC-342를 이용하여 Feed 가스를 K-2301 suction에 주입가능
- 예상: 고압의 압축기부터 기동 시작 (K-turbo의 결정 사항)
- K-2303의 경우 도면 23-312의 “004 Line Valve 사용” (HIC로 전환)
- Surge Control Valve를 Full Open 상태로 기동을 하면 각 압축기 전후단의 압력 형성은 없음

3) Feed 가스를 사용하는 압축기 경로 K-2301, K-2302, HP Separator의 상부인 LK 냉매 경로를 이용하여 열교환기를 냉각시킨다. 이때, 각 압축기의 Surge Control Valve는 작동하며, Surge 배관을 포함한 전체 압축기 시스템을 통과하는 냉매의 유량을 최대가 되도록 운전한다. (단, 나중에 본 유량 및 최대압력은 다시 검토 한다)

- 3단 압축기인 K-2301의 각 단의 Surge Valve를 조절하여 압력을 형성하여 흐름을 만들고, HP 압축기인 K-2302의 Surge Valve 조절 이후에는 LK JT Valve를 이용하여 전체 압축기의 압력을 형성
- 각 압축기의 Start-up을 위한 냉매 흐름을 완성하고 열교환기의 Cooldown을 시작한 이후엔 도면 23-301 HIC-342 (제어 가능 형태로 바꾼 이후) 를 1.3 bar 제어하고, Feed Line을 본래의 63.4 bar로 올릴 수 있도록 한다.

4) Feed 가스 초기 흐름을 위하여 Bypass Valve 이용 최소량의 Feed 가스를 Scrubber 상부에서 MCHE로 통과하고, End Flash Drum 상부를 통해 BOG Header로 송부한다. Feed 가스의 유량은 열교환기에서 회수하는 LK의 온도로 제어한다 (제어 Loop의 필요성 이유: 열교환기 고온부의 온도가 과도하게 떨어지는 것을 방지)

- Feed 가스 유량 제어를 도면 21-304 FV-308 Bypass Valve 사용
이유: 여기까지 고압 유지하는 것이 본래 공정이며, Feed Line에서 압축기의 냉매도 제공하므로
- 도면 14-301 PV-043A의 Bypass를 이용하여 Feed 가스를 공정에서 제거하며 압력이 상승하면 PV-034A를 자동 제어한다.
- LK 회수 온도 제어는 도면 21-305 TI-320를 관찰하면서, 일단 FV-308 Bypass Valve Manual로 제어
- LK 회수 온도 TI-320가 과도하게 낮은 온도가 되면 도면 21-304의 FV-308 Bypass를 close하고 FV-308을 이용하여 온도 제어

5) 중간 정검: LK 냉매의 Bypass를 이용하여 LK JT Valve의 전후단 온도를 제어 ($\Delta T < 30$)

- 설계 변경 요청: LK 냉매 Bypass Line 신설 요청 (제어 전략 구성 필요. 이는 LK JT Valve 운영과 관련되며 이는 LK 압축기의 입구 압력 유지와도 관련 됨)

6) 중간 정검: Scrubber Column의 응축기인 V-2101에 액위가 50%이상이면 P-2101이 허용하는 한도 내에서 최소 Reflux를 수행한다. 이후 V-2101에 액위가 95%가 되면 Reflux Flow를 자동 제어한다.

7) LK JT Valve 이전 온도가 -75°C (본 온도는 Feed Gas를 사용하는 압축기에 대한 압력 분포가 완성되면 다시 설정함)가 되면 MR에 C2 와 C3를 첨가하기 시작한다.

- 초기 C2와 C3 냉매의 조성을 추후에 결정 - 급격한 냉매의 조성 변동에 따른 압축기 및 공정의 변동을 최소화하기 위함
- C2 / C3 냉매 투입 경로 확인
- 추후 초기 C2, C3에서 추가 넣는 시기 결정

8) Scrubber Column의 액위가 50%가 되면 Reboiler를 켜고 온도를 현재 온도 보다 5°C 높은 온도로 운전을 시작한다 (현재 온도보다 $5 \sim 10^{\circ}\text{C}$ 높은 온도: 초기에는 Scrubber의 Bottom 온도가 약간 낮은 상태를 유지하도록 한다 - 이유: C4 re-injection이 되고 있지 않은 상태로 Column 내 Vapor의 양이 과도하게 될 경우 무리가 될 수 있음), 계속해서 액위를 50% 유지시키며 온도를 올린다

9) Scrubber Column의 액위가 80%가 되면 Bypass를 이용하여 Deethanizer의 Feed를 형성한다.

- Deethanizer로 간 Feed 가스 중에 Deethanizer 내에서 생성된 Vapor는 E-1201, V-1201, E-1205, 그리고 V-1203을 통하여 BOG 헤더로 가도록 흐름 생성
- 도면 21-301 FV-301의 Bypass를 이용하여 유량 형성
- Deethanizer로 간 Feed 가스 중에 Deethanizer 내에서 생성된 액체는 일단 Deethanizer의 액위를 상승시킨다

- Deethanizer 액위가 70%가 되면 Reboiler를 켜고, 일단 현재 보다 5 C 높게 운전
을 시작하며, 다시 액위가 70%가 되면 반복적으로 계속해서 5 C 씩 온도를 올리
며, 계속하여 온도가 정상 상태가 되도록 한다.
- 10) HP Separator의 액위가 40% 가 되면, Deethanizer의 응축기에 냉매를 송부하고,
Deethanizer를 운전한다.
- HP Separator에서 Deethanizer로의 유체 흐름은 설계 변경 이후에 작성
 - 최초의 유량은 12-302 PV-317 Bypass를 열고 LV-313 Bypass를 이용하여 E-1201
의 액위를 올린다.
 - 액위가 70%가 되면 PV-317 Bypass를 닫고 PV-317을 자동 제어로 놓고, 바로
LV-313 Bypass를 닫고 LV-313을 자동 제어로 놓는다.
 - 중간점검: E-1201의 온도가 과도히 내려가면 PV-317을 자동제어한다.
- 11) HP Separator의 액위가 70%가 되면, LPG Reinjection Cooler에 냉매를 송부하다.
- 최초의 유량은 12-308 PV-370 Bypass를 완전히 열고 LV-304 Bypass를 이용하여
E-1205의 액위를 올린다. 계속해서 액위가 70%가 되면 PV-370 Bypass를 닫고
PV-370을 자동 제어로 놓고, 바로 LV-304 Bypass를 닫고 LV-304를 자동 제어로
놓는다.
 - 중간점검: E-1205의 온도가 과도히 내려가면 PV-370을 자동제어한다.
- 12) MP Separator의 액위가 60%가 되면, HP Separator로 제공하였던 Fractionation 냉
매를 MP Separator에서 제공한다.
- HP Separator에서 Fractionation으로 가는 냉매 흐름을 잠근다.
- 13) 중간 점검: LPG Separator의 액위가 80%가 되면 LPG Reinjection을 시작한다.
- 도면 12-309 XV-073을 열고 P-1203 펌프 1기를 최소 유량으로 가동하여 LPG
Reinjection을 시작한다. 계속해서 액위가 100%가 되면 나머지 1기를 작동하고
LPG Separator의 액위 제어를 시작한다.
- 14) MP Separator의 액위가 80% 가 되면 냉매 펌프 P-2301을 가동하고, 액위가 조금
씩 상승하는 정도로 펌프 흐름을 결정하고 점차 증가시키다가, 액위가 95% 되면 Level
제어 자동으로 운전한다.
- 15) HK 냉매 압축기 K-2303이 Surge Valve 상태에서 운전되고 있고, HP Separator의
액위가 75%되면, Surge Valve를 줄이고 HK JT Valve를 조금씩 닫아서, HK 냉매 흐
름을 만든다.
- 16) 과도한 냉매 조성은 HP Separator의 상하부 조절 Valve를 이용하여 제거한다.
- 설계 개선 요청: MP Separator 하부에 냉매조절 Valve 추가
- 17) 중간 정점: Deethanizer의 액위가 75% 이상이 되면, Depropanizer의 Feed로 송부하
고 Depropanizer의 운전을 시작한다.
- Depropanizer의 재액화기의 Cooling Water를 정상 운전시키고
 - 도면 12-301 LV-014의 Bypass를 이용하여 Depropanizer로의 흐름을 만든다. 압

력이 과도히 올라가기 전에, 도면 12-305 PIC-065와 PDIC-020을 자동 제어 한다

- Reflux Drum의 액위를 계속 올리다가 액위가 60%가 되면 P-1202의 허용 최소유량으로 작동한다. 이후 80%가 되면, 필요시 V-5002 Propane 탱크로 송부를 시작할 수도 있음. 100%가 되면 Reflux 유량을 자동제어로 전환한다.
- Depropanizer의 액위가 50%가 되면 도면 12-307에서, PV-022 Bypass를 열고 P-1204의 한 개 펌프 가동 및 최소유량으로 설정하고 PT-022의 압력이 상승하면 PV-022 (LPG Reinjection으로 가는 양)를 자동제어로 놓고 PV-022 Bypass를 닫는다 (GS건설의 검토 필요) PV-022의 유량이 형성되면, FV-020 (이 유량은 Scrubber Column으로 가는 양)의 유량을 조금씩 상승시키는데 이때 Scrubber Column의 상부 온도 및 압력의 흔들림이 최소가 되는 형태로 FV-020의 유량을 조절하면서 상승한다.
- Depropanizer의 액위가 70%가 되면 도면 12-307에서, 가동 중인 P-1204의 한 개 펌프에 대한 유량을 증가하다.

18) 중간 점검: 도면 14-303의 End Flash Drum V-1401의 액위가 50%가 되면 FV-301 Bypass를 이용하여 이후 탱크까지의 배관을 Cooldown하고, 계속해서 흐름을 유지하다가 100%가 되면 자동 제어한다.

19) C3 저장 탱크의 액위가 30% 이상이면 Feed Gas에 C3를 혼합하기 시작한다.

- 도면 50-302 XV-072를 열고 C3 펌프인 P-5001을 최소 유량으로 송출하여 Feed 가스에 혼합한다. 이후 운전 상태를 보고 유량을 늘린다.

20) LK JT Valve 전단의 온도가 -140 C 이하로 되면 MR 냉매에 질소도 혼합하여 냉매 조성을 맞춘다.

21) MR JT Valve 자동 제어

(2) Test-bed Train-2에서 KSMR 시험운전

기존의 Test-bed Train-2에서 KSMR 부분만을 시험 운전하는 방법을 정리하겠다.

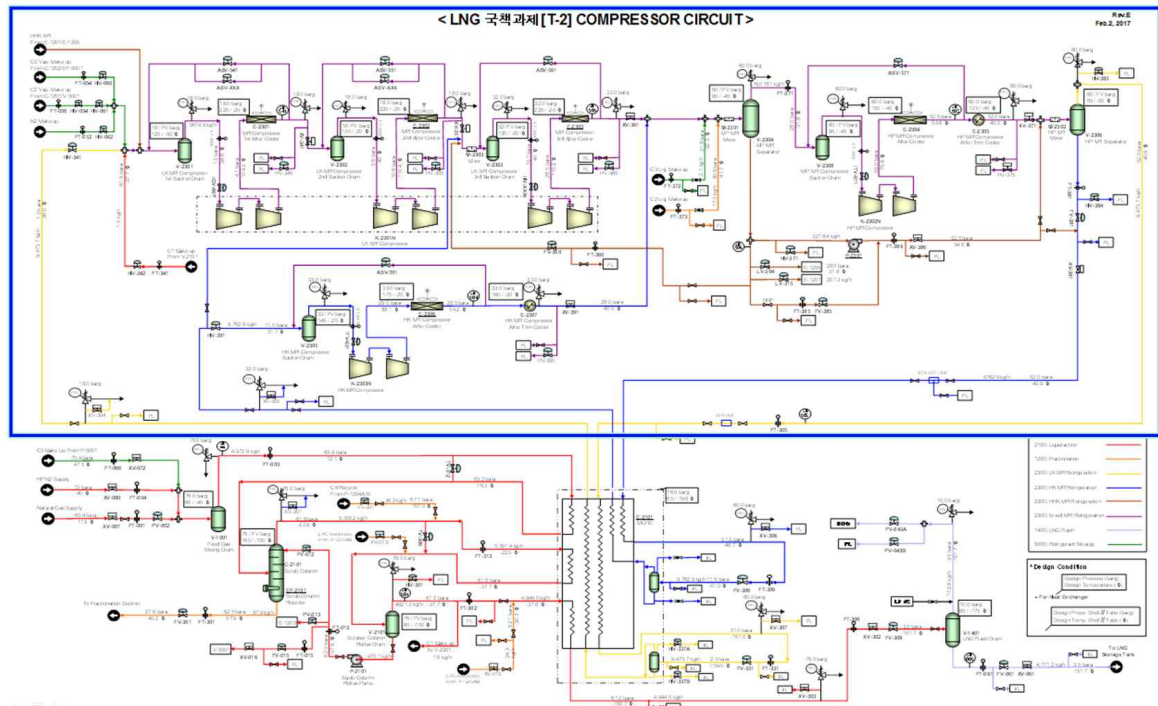


Fig. 2-다-2) 8. Test-bed Train-2에서 KSMR 공정 부분 (파란 박스)

Test-bed Train-2에는 KSMR 공정뿐이 아니라 Fractionation 부분도 같이 있다. 본 시험은 전의 범위는 KSMR 공정만을 시험 운전하여 그 성능을 검증하는 것이다. Fig. 2-다-2) 8. 에서 윗부분인 파란 박스가 그려진 부분으로 이 부분을 다시 간략히 그리면 Fig. 2-다-2) 9. 와 같다.

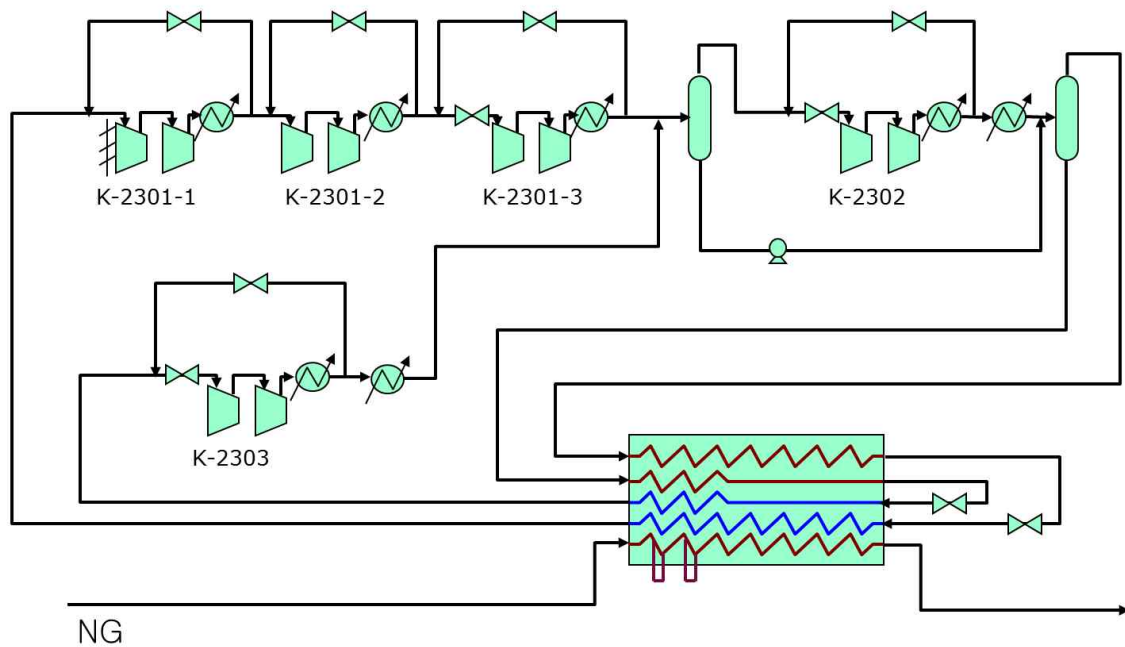


Fig. 2-다-2) 9. Test-bed Train-2 KSMR 공정 개략도

그림에서 맨 아래 가운데의 박스 부분이 MCHE이고, 나머지는 윗부분에 보이듯이 대부분 냉매 압축기로 이루어져 있다. 이렇게 냉매 압축기와 열교환기로 이루어진 KSMR 액화사이클 만의 시험운전은 아래와 같이 정리될 수 있다.

1) NG를 이용한 냉매 압축기 기동 ASV Full Open 상태

2) NG 냉매 압축기의 승압

- K2301-1 ASV 로는 입구압 제어

1 barg → 12 barg (2 barg → 19 barg)

3) 냉매 C3를 추가 및 승압

- 최저압 0.5 barg

- MP는 24 barg 가깝게 이내 유지 및 HP는 48 barg 이내 유지

- MP Separator에 Liq 냉매 누적 시작 가능 (HP Separator에서 발생된 것)

4) 냉매 C2를 추가 첨가

- 최저압 0.5 barg

- MP는 24 barg 가깝게 이내 유지 및 HP는 48 barg 이내 유지

- HP Separator에도 Liq 냉매 누적

5) 냉매 N2를 추가 첨가

- 최저압 0.5 barg
- MP는 24 barg 가깝게 이내 유지 및 HP는 48 barg 이내 유지

6) 최저압을 0.3 barg로 조정 (IGV, ASV, JTV, 냉매량 등 조절)

- MP는 27 barg 이내 유지 및 HP는 51 barg 이내 유지
- 단, 성능 향상을 위한 최고 압력으로 MP는 29 barg 이내 및 HP는 55 barg 이내 유지

(가) 압축기 기동

1) 모든 압축기의 ASVs를 완전 Open

2) NG Feed 가스 (약 60 bar)를 이용하여 K2301 압축기 기동압력 충전 후 각 압축기 차단

- K2301-1: 1.5 barg
- K2301-2: 4 barg
- K2301-3: 5 barg

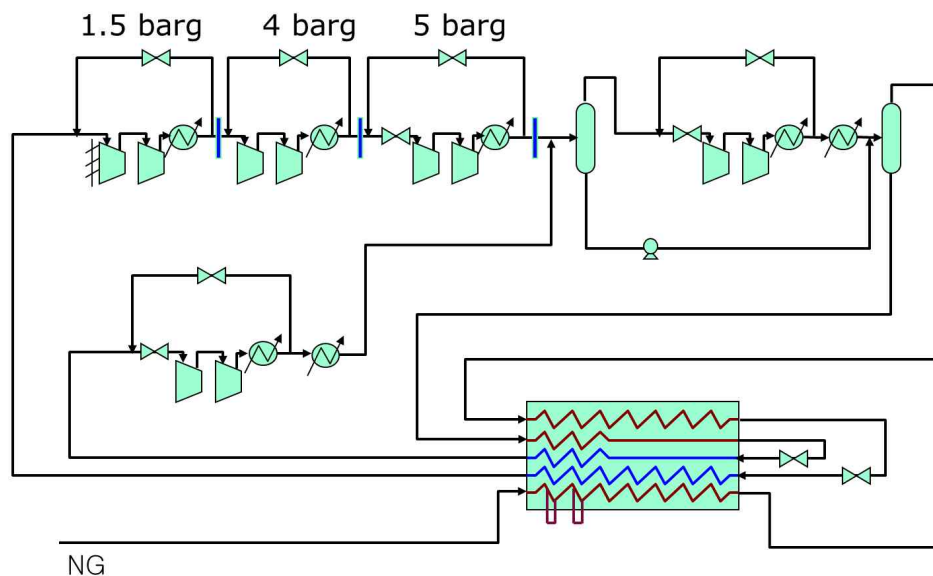


Fig. 2-다-2) 10. LK 압축기 기동 초기압 및 차단 밸브상태

3) K2301 기동 후, 각 압축단 사이의 차단 밸브 Open

4) K2301 토출압을 이용하여 K2302와 K2303의 기동압력 충전

- K2301입구에 NG Feed 가스 보충

5) K2302 / K2303 기동 후, 각 압축단 사이의 차단 밸브 Open

- 기동 완료하면 HP 최고압은 약 9 Barg로 나오며 HK 압축기 입구측은 약 6 Barg로
 됨

(나) 압축기 기동 ASV를 이용한 승압

냉매압축기에서 ASV를 완전히 열고 NG 가스만으로 승압을 할 경우, Fig. 2-다-2) 11.과 같은 성능이 나올 수 있다. 그림에서 맨 왼쪽의 6개는 K2301 즉 LK 압축기로 각각 상하로 한 개의 Set 이다. 즉 맨 왼쪽의 두 개 성능곡선은 LK 압축기 맨 첫 단의 성능 곡선인 것이다. 그 다음은 두 번째단이고 계속해서 가운데가 3번째 단이다. 그다음은 고압 압축기인 K2302의 성능곡선이고, 맨 오른쪽은 HK 압축기의 성능곡선이다.

일단 압축기가 연속적으로 기동을 한다는 것은 성능곡선 안에 있다는 것이고, 그렇다면 그림에서 파란색원을 중심으로 그 성능이 유지되고 있다고 볼 수 있다. 이에 따르면 ASV를 완전히 열린 상태에서는 최고압 9 Barg가 나올 수 있다.

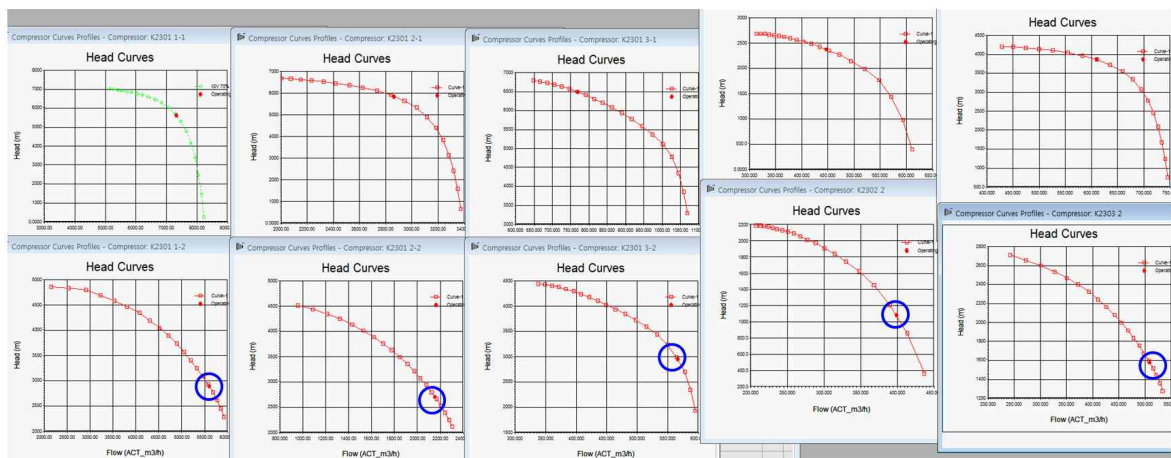


Fig. 2-다-2) 11. 냉매압축기 성능곡선들 (ASV Full Open 상태)

이후, ASV를 조금씩 닫으면, Fig. 2-다-2) 12. 에서처럼 성능 곡선상의 압축기 성능이 올라가는데 그에 따라 압축비도 상승하게 된다.

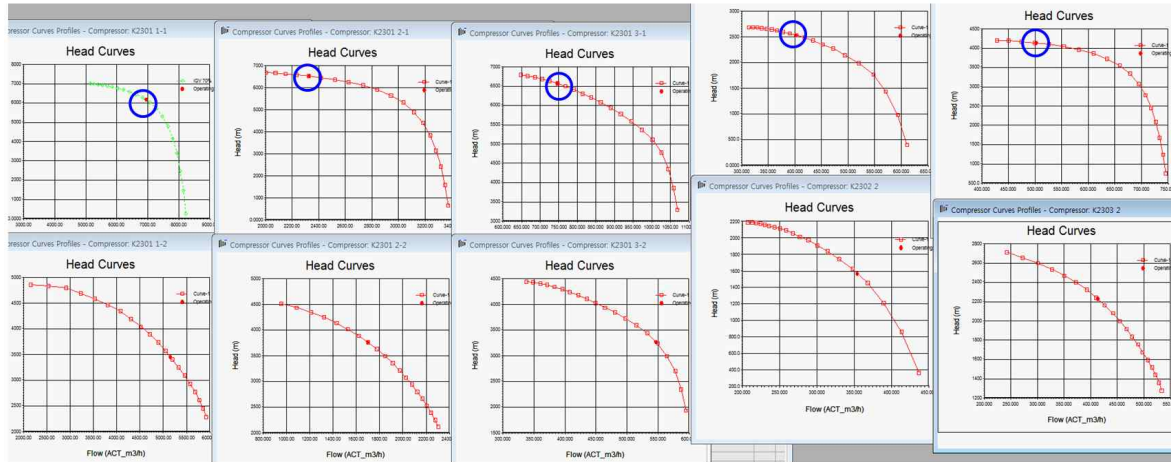


Fig. 2-다-2) 12. 냉매압축기 성능곡선들 (ASV를 가능한 닫은 상태)

Fig. 2-다-2) 12. 의 파란 원과 같이 압축비가 상승할 경우의 각 압축기의 압력값을 보면 Fig. 2-다-2) 13. 과 같이 최고압 20 Barg가 나올 수 있다.

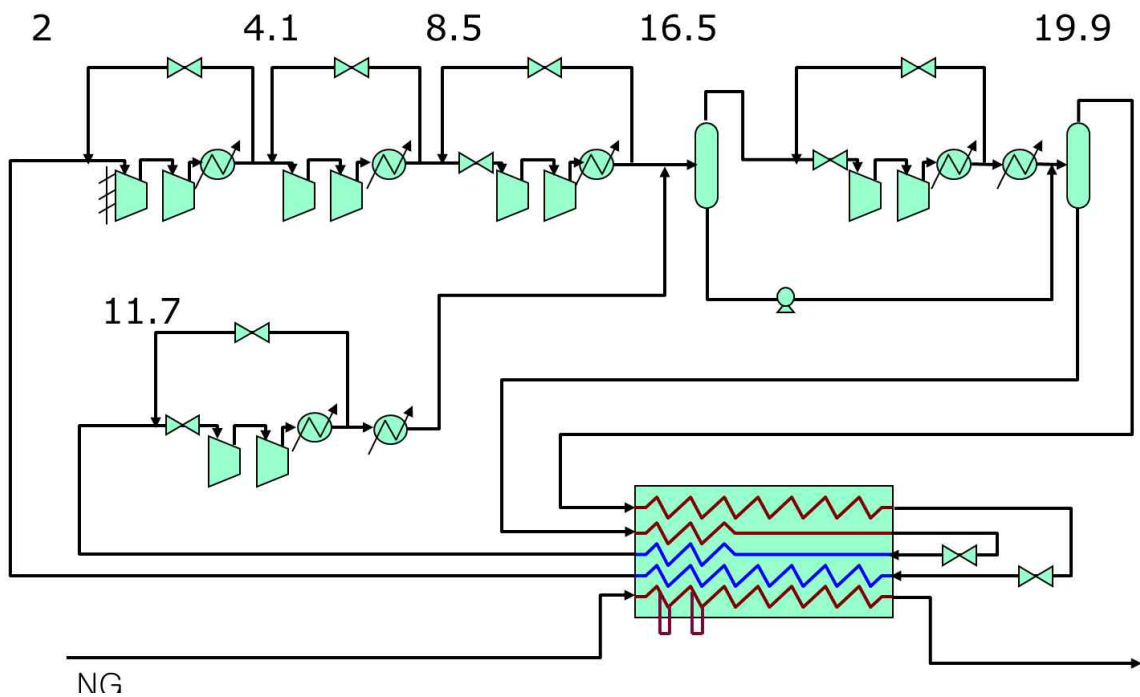


Fig. 2-다-2) 13. NG 냉매로 ASV를 가능한 닫은 압력 상태

(다) C3 및 C2 냉매 첨가하기

NG 만으로 구성된 냉매의 목적 조성을 맞추기 위하여 프로판 냉매부터 아래와 같이 주입한다:

- 1) NG Feed Gas 넣기
- 2) 계속적으로 C3를 첨가하며, 압력을 높인다.
- 3) K2301 입구압은 0.5 barg 유지, 중간압(MP)은 24 barg 이내로 유지
- 4) HK의 유체 흐름이 아주 낮게 유지
 - LK 유체 흐름의 $\frac{1}{4}$ 정도가 되도록 K2303 ASV를 조절 (20% Open)
- 5) LK의 C3 조성이 0.453 정도까지 높이며,
 - NG : C3 = 1 : 3
- 6) HP Separator 에 발생하는 Liq는 일단 MP Separator에 누적될 수 있도록 운전
 - C2 냉매 주입 시작
- 7) MP Separator에 $\frac{1}{4}$ 이상 누적되면 (Level = 0.5m + LL (0.5 m)),
 - HP Separator 에도 누적될 수 있도록 운전 (MR Pump 등 활용)

(라) N2 냉매 첨가 시작하기

- 1) C1, C3, C2 냉매에 이어서 N2 냉매도 첨가한다. N2 냉매 첨가할 때도 C1, C3, C2가 필요시 계속적으로 첨가한다.
- 2) 압축기 입구압은 0.5 barg 유지, 중간압은 24 barg 이내 유지
 - C2 냉매를 추가 주입을 하며,
 - NG 및 C3의 부족분도 첨가함
 - 목표 LK 조성 $C1 : C2 : C3 = 41 : 23 : 36$ (약 2 : 1 : 2)
 - 목표 HK 조성 $C1 : C2 : C3 = 17 : 18 : 65$ (약 1 : 1 : 3.6)
- 3) 위의 압력상황에 목표 조성을 만족하고 열교환기가 평형이 상태면 80 tpd LNG 생산 가능
- 4) NG+C2+C3 의 목표 조성을 만족한 다음에 N2를 추가로 주입함
 - 압축기 입구압은 0.5 barg 유지, 중간압은 24 barg 이내 유지 (동일)

- N2 추가 주입으로 N2 4% 이내로 조성 맞춤

(마) 압력 조정 (0.5 barg → 0.3 barg)

1) 설계 조성을 만족한 다음 설계 압력으로 조정

- ASV, JTV, 그밖에 IGV, ITV를 활용
- 필요시 냉매의 가감도 실행
- 압축기 K2301 입구압 0.3 barg
- 압축기 K2302 (냉각기 이후) 출구압 51 barg
- 압축기 K2302 입구압 (MP) 27 barg
- 압축기 K2303 입구압 10 barg
- 성능 향상을 위한 최고 압력으로 MP는 29 barg 이내 유지 및 HP는 55 barg 이내

유지

2) 목표 운전

- LNG 생산 100 tpd
- 72 hr (3일) 연속 운전

(3) KSMR Test-bed 시험운전 절차 요약

- (1) NG 가스만으로 냉매 압축기 가동
- (2) 냉매 추가 주입을 위한 냉매 압축기 승압
- (3) 냉매 흐름에 프로판 냉매 주입
- (4) 첫 Separator의 액체 냉매 (HHK) 발생 확인
- (5) 냉매 흐름에 에틸렌 냉매도 주입
- (6) 두 번째 Separator의 액체 냉매 (HK) 발생 확인
- (7) 냉매 흐름에 질소 냉매도 주입
- (8) 안티써지 밸브를 이용한 냉매 압축기 승압
- (9) 혼합 냉매 조성의 최종 조정

3) 냉매 압축기 개조 및 Train-2 1차 시험운전

가) Train-2 1차 시험운전 준비

Train-2는 KSMR공정으로 2013.04 착공을 하였으나, 냉매 압축기 개발인 2-3 한국터보기계의 지속적인 개발지연으로 테스트베드 시공 현장의 현장 인력을 더 이상 대기할 수 없어서 시공 업무를 수행하는 3-2 과제는 2014.06에 냉매압축기를 제외한 나머지 Train-2의 공사 완료를 선언하였다.

2-3 과제의 한국터보기계 대표는 사정상 미국에 억류되었고, 이에 사업단은 법적 대응을 준비하던 한국터보기계의 방해에도 불구하고 개발 중이던 냉매압축기 연구 자료와 시제품을 통하여 연구개발을 완료하려 하였으나, 개발 중이던 시제품이 압축기로의 성능이 불가능함을 발견하였고, 한국터보기계 역시 2015.07에 연구 수행을 공식적으로 포기하였다.

Fig. 2-다-3) 1. Train-2 압축기 본래 위치 5 기

이에 Fig. 2-다-3) 1. 의 위치에 있어야 할 5기의 압축기를 설치 못하고, 이를 대신할 압축기를 알아보기 위하여, 아래의 Table 2-다-3) 1 과 같은 평가표를 만들어서, 그 결과 현대중공업의 제시안이 제일 적절하여, 시행하여 하였지만, 계약 직전에 현대중공업의 구조조정으로 당분간 압축기 사업은 중단되었고, 이에 사업단 테스트베드 수행은 매우 어렵게 되었다.

Table 2-다-3) 1 냉매 압축기 평가표

이에, 한화테크윈에서는 사업단의 사업비 부족의 현실을 감안하여 기존에 납품한 Train-1의 압축기 개조를 제안하였다. 이에 공사 가능성과 운전 가능성을 고려하여 2016.2.23의 운영위원회를 통하여 아래 Fig. Fig. 2-다-3) 1. 과 같이 압축기 개조를 결정하고 수행하였다. 압축기 개조 설계 및 제작, 그리고 현장 배관 공사에 약 1년 4개월이 소요되어 2017.10에야 시험운전이 가능해졌다.

Fig. 2-다-3) 1. 한화테크윈의 압축기 개조안 그림

나) Test-bed Train-1의 압축기 개조 및 Train-2에 활용

Test-bed Train-2의 설계단계 및 구축 초기 단계에서는 LK 3단과 HK 1단, 그리고 HP 1단의 총 5 단계의 압축기가 있었다. 그러나, 그 개발을 책임질 개발회사가 개발을 포기하면서, 그 대안으로 Train-1 압축기를 개조하여 Train-2에 적용하였다. 즉, 아래 Fig. 2-다-3) 2.의 개조전 그림의 왼쪽 아래 5 개 압축기 대신, Fig. Fig. 2-다-3) 3. 의 오른쪽 아래 Train-1 압축기에 공정을 연결하여 구성하였다.

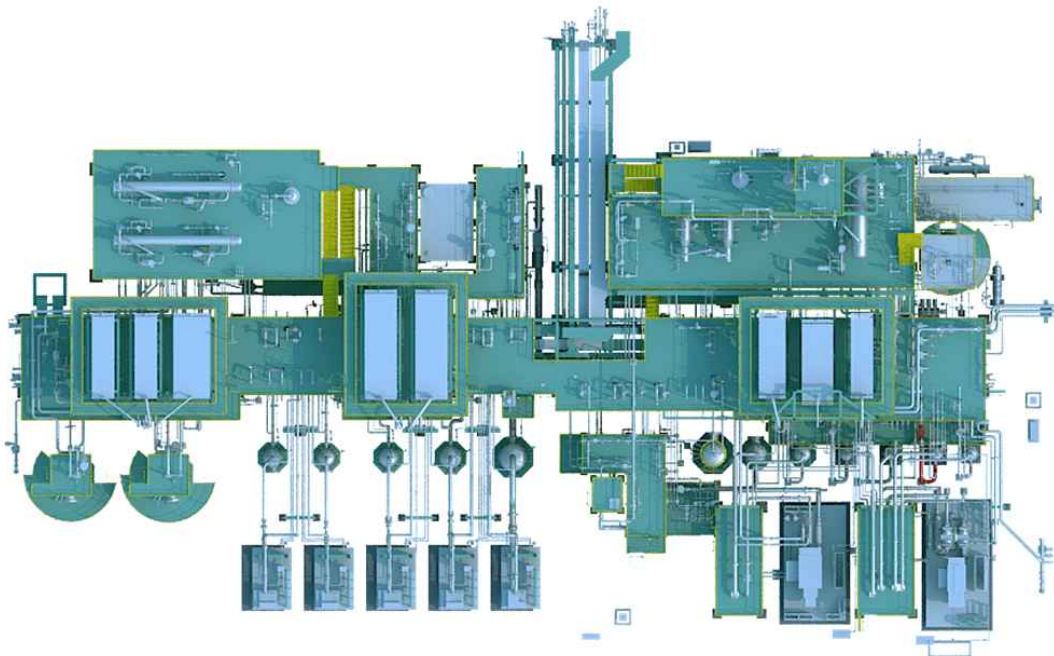


Fig. 2-다-3) 2. 개조전 Test-bed 평면 위치

Train-2 압축기 교체

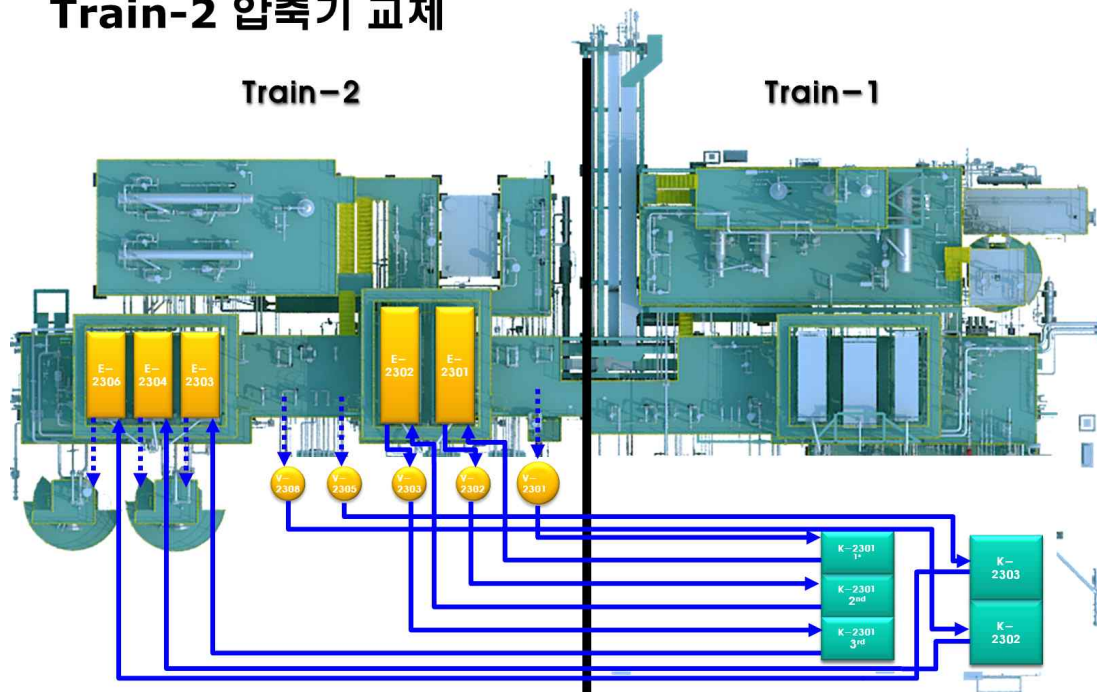


Fig. 2-다-3) 3. 개조후 Test-bed 평면 위치

다) KSMR 1차 시험운전

냉매압축기 개조 및 설치를 완료하고, 2017.11.01.에 교대근무 시작하고 2017.11.03.에 냉매 압축기 가동을 시작하였는데, 전체적인 1차 시험운전 진행 사항은 아래와 같다:

11/1 교대근무 시작

11/2(1일) NG 공급 시작, 냉매 압축기 Line 가압

11/3(2일) 냉매 압축기 (K-2301N/2302N/2303N) 가동

11/4(3일) 냉매압축기 가압, BOG Line 연결, 압축기 Seal Gas 주입

11/5(4일) 냉매 Line에 프로판 주입 시작 가압 작업 중 냉매압축기 Trip(16:43)

토출압력 Setting 조절로 문제 해결

<<아침에 인천기지 비상상황 발생 >>

11/6(5일) 냉매 압력 조절 후 냉매압축기 가동, 압축기 Surge Map 수정

11/7(6일) 냉매 MW 29 도달 목표로 프로판 주입

11/8(7일) 프로판 주입 계속, 이상 Valve 및 분석기 점검

압축기 부하 과도로 냉매 압축기 Trip (22:38)

냉매 압축기 K2301 시운전 방법 재정리 (입구압 0.5 barg 로 조절 운전)

11/9 공장 재가동을 위한 Flare 실시 중 인천기지에서부터 Flare 차단 요청

압축기 재가동을 위해 자체적으로 압력 재분배

11/10 냉매압축기 재가동, 단 최대한 Flare가 되지 않도록 천천히 운전

11/11(8일) 최대한 Flare가 되지 않도록 천천히 운전

11/12(9일) 냉매에 프로판 천천히 주입

11/13 가스공사의 요청으로 추가 작업 금지, 압축기 가동상태에서 추가 운전 정지 상태

11/14 추가 작업 금지 상태

11/15 추가 작업 금지 상태

대외협력 방안 수립, 언론에 LNG액화공정 시운전 공표 및 시청과 협의 준비

11/16 추가 작업 금지 상태, 인천시 에너지정책과와 1차 회의

11/17 추가 작업 금지 상태, 안전협의체 의원들과 개별접촉 설명

11/18 추가 작업 금지 상태, 주말에는 Flare 더욱 주의 요청

11/19 추가 작업 금지 상태, 주말에는 Flare 더욱 주의 요청

11/20 추가 작업 금지 상태, 인천시 에너지정책과와 2차 회의 및 투자유치국과 회의

11/21 (10일) 에틸렌 주입 시작, 냉매압축기 압력 상승 및 냉매온도 -62 C 도달

인천시 부시장님에게 보고

11/22 (11일) V-2304가 Liquid 생성, 냉매 압축기 Trip (19:30)

Trip 원인으로 P-2301 가동과 연관성 분석

인천광역시의 인천기지 Flare 사용 금지요청 공문 접수

11/23 연수구청의 인천기지 Flare 사용 금지요청 공문 접수

11/24 가스공사 가스연구원의 시험운전 정지 연기 공문 발송

이러한 민원이 발생한 주변 상황 변화로는, 사업단 시작 초기인 2010년도 시대의 송도 신도시 및 가스공사 인천생산기지 모습인 Fig. 2-다-3) 4.에서 나타나듯이 주민들의 아파트가 5 km 정도 떨어져 있어서 Flare 발생에 관심이 없었으나, 이후 실제 실험하는 2017년도에는 Fig.2-다-3) 5. 와 같이 주민 아파트가 인천생산기지 앞에까지 건설되어 Flare만 발생하면 화재로 신

고하여, 시험운전에 지장이 많게 되었다.



Fig. 2-다-3) 4. 2010년 (추정) 송도 신도시
및 가스공사 인천생산기지 모습



Fig. 2-다-3) 5. 2010년 후반기 송도 신도
시 및 가스공사 인천생산기지 모습

2017.11.22 과 1012.11.23에는 Fig. 2-다-3) 6. 예서와 같은 인천시 및 연수구의 공문으로 정지하였다.

인천시 공문

연수구 공문

Fig. 2-다-3) 6. 인천시 및 연수구에서 발송한 공문 일부 발취

4) KSMR Train-2 2차 시험운전

가) 냉매 최적 재기동 방안

(1) Flaring 발생 시나리오

(가) Shutdown 이후 flaring 발생 시나리오.

Overall Shut down이 발생하면 Interlock에 의해 rotating equipment는 stop이 되며, isolation value는 close 됨으로 써 plant는 safety condition이 되도록 조치가 취해진다. 하지만 shutdown 기간이 지속됨에 따라 아래와 같은 이유로 인하여 system의 압력은 지속적으로 증가하고 최종적으로 Design pressure에 도달하게 되어 flaring이 발생하게 된다.

- 1) 천연가스의 경우 Critical Temperature가 상온에 비하여 무척 낮기 때문에 아무리 Design pressure가 높더라도 액체 상태를 유지할 수 없기에, 액화된 천연가스에 대하여 지속적인 열유입은 반드시 압력상승을 동반함
- 2) Shutdown에 따른 Balance 붕괴에 따른 pressure 상승
- 3) Shutdown시에는 normal balance와 상이한 새로운 balance에 도달하게 되고 이에 따른 unbalance에 따라 일부 구간의 압력이 급격하게 증가 할 수 있음

(나) Restart up을 위한 flaring 발생 시나리오

Overall Shutdown이 발생하면 MR refrigeration system의 Settle out pressure 에 도달하게 된다. 냉동 circuit의 compressor는 settle out pressure 에서 start up이 될 수 있도록 설계되는 것이 일반적이나 아래와 같은 이유로 현재 Train 2는 settle out pressure에서 start up 불가능한 사항이다. 따라서, compressor circuit의 startup을 위해서는 circuit내 압력 강하를 위해 flaring을 시킬 수 밖에 없음.

1) Motor Power for compressor restart-up

Train1의 compressor를 일부 개조하여 사용한 reused item이기 때문에, Settle out pressure에서의 start up 할 수 있는 충분한 Motor power를 가지고 있지 않음.

2) Heatintake를 통한 추가 압력증가

Shutdown이 오래 지속되면, 저온인 MCHE를 통과하는 compressor circuit은 Settle out pressure 보다 더 높은 압력으로 증가되므로, restart up을 위해서 compressor의 압력 강하가 필요

(2) Flaring 감소 방안

(가) Shutdown 이후 flaring 감소 방안

저온 공정이 있는 액화공정에서, 기본적으로shutdown 이후에 flaring을 줄이는 방안은

Shutdown 이후 restart-up까지의 시간을 최소화함에 따라서 heat ingress를 최소화 하는 방안이다. 불가피한 이유로 인하여 shutdown이 지속 될 수 밖에 없는 경우라면, 아래 방법을 통해 Flare로 향하는 Gas를 감소시킬 수 있음.

Shutdown이후 발생 isolation 되는 구간은 Feed Gas circuit과 MR circuit으로 나눌 수 있다.

A) Feed Gas Circuit

LNG Flash에서 발생하는 과압은 기존 line up을 통해 BOG header로 내보냄으로써, Flaring을 방지함. (cf. Flare로 연결된 PV-043B는 close position으로 유지)

B) Mixed Refrigerant Circuit

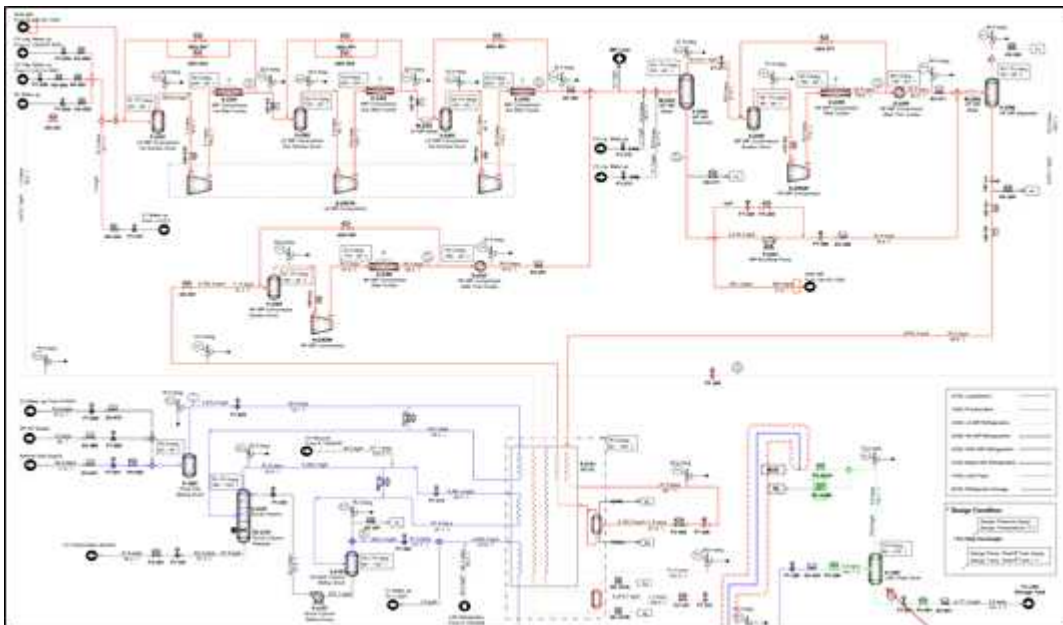


Fig. 2-다-4) 1. 냉매 공정도 (주황색 표기)

Fig. 2-다-4) 1. 에서 주황색으로 표기된 line(MR Circuit)은 Ethylene 성분을 함유하고 있고, C3+ 성분을 다량 함유 하고 있기 때문에 BOG system을 통한 recovery가 불가능 하다. N2, C1, C2, C3의 조성의 MR은 외부 heat intake에 의해 system의 압력 상승을 초래하므로, Shutdown 시간을 최소화 하는 방법이 Flaring을 줄일 수 있는 가장 좋은 방법이다.

(나) Restart up 과정에서의 flaring 감소 방안

Feed side에는 별도의 원동기가 없기 때문에 cold start up 시 별도의 조치가 필요 없다.

하지만, MR side의 경우 MR Compressor를 재가동하기 위해 MR Compressor의 start up이 가능한 압력으로 낮추는 vent operation이 필요하다.

MRCircuit은 Interlock과 연결과 Isolation valve에 의해 section이 나누어지고, 일부 HV를 이용하여 compressor start up시 recycle mode에 해당하는 구간을 최소화함으로써, MR start up시 필요 압력을 위해 vent하는 량을 최소화 할 수 있다. 이에 따라 나누어지는 section은 아래 그림에 표기 된 바와 같다.

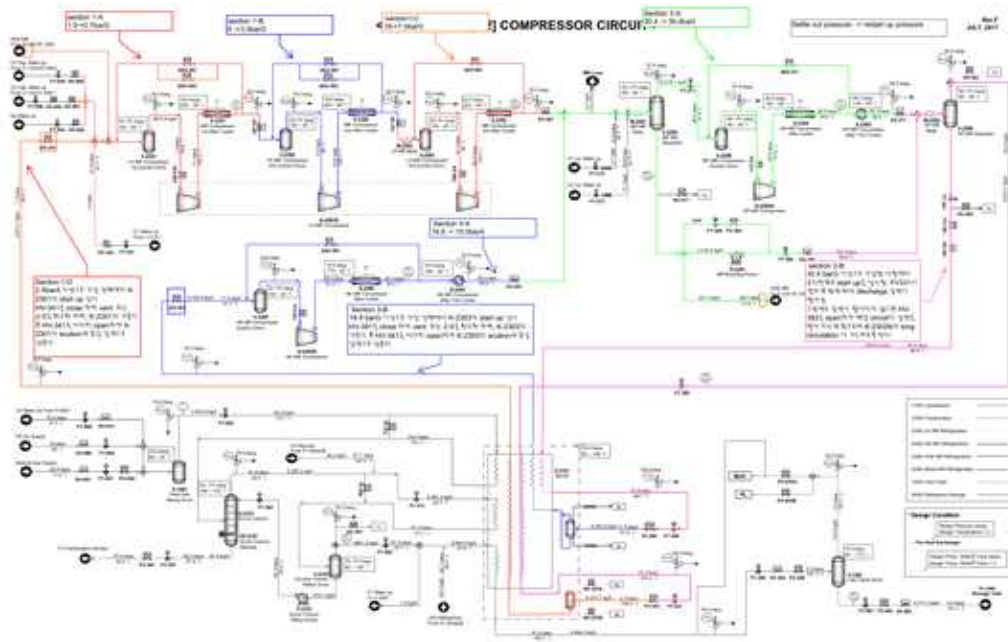


Fig. 2-다-4) 2. Section 구분

또한 각 section 별로 settle out pressure와 필요한 Start up pressure는 아래 표와 같다.

Section	Location	Unit	Settle out pressure	Start up pressure	Remark
1-A	K-2301N 1ststage	Bar A	2.5	1.7	Vapor vent 필요
1-B	K-2301N 2ndstage	Bar A	7	4	Vapor vent 필요
1-C	K-2301N 3rd stage	Bar A	20	8	Vapor vent 필요
1-D	K-2301N 1stsuction	Bar A	2.5	-	HV-341을 close로, 해당 section을 compressorrecyclecircuit에서 제외함으로 써, Vent를 시키지 않음.
2-A	K-2302N circuit	Bar A	30.4	30.4	
2-B	K-2302N 후단 circuit	Bar A	30.8	-	XV-371의 close에 의해 해당 section을 compressor recycle circuit에서 분리됨으로 Vent operation이 필요없음..
3-A	K-2303N Circuit	Bar A	18.8	15	Vapor vent 필요
3-B	K-2303N 전단Circuit	Bar A	18.8	-	HV-391을 close로, 해당 section을 compressorrecyclecircuit에서 제외함으로 써, Vent를 시키지 않음.

Table 2-다-4) 1. Section별 Settle out pressure와 Start up pressure

각 section별로 Vent 량 감소 방안을 살펴보면 아래와 같다.

1) K-2301 (LK MR compressor)

Compressor의 Restart up pressure보다 Settle out pressure가 더 높기 때문에 Vent operation을 피할 수 없다. 따라서, Liquid MR을 포함 하고 있는 K-2301 suction 부분(Section 1-D)를 HV-341을 close하여 isolation을 시킴으로 써, Vent operation을 구간을 최소화 하도록 함

K-2301이 Total recycle mode에서 Start up이 되고 나면, Section 1-D은 K-2301 suction 이 flow source가 되며, K-2301의 압력 상승 과정에서 HV-341을 서서히 열어 Section 1-A와 1-D를 동압이 되도록 함.

동압이 되고 난 이후에는 FV-331을 열어 K-2301의 suction pressure를 유지 시키게 되고, FV-331이 open 됨에 따라 Section 2-B의 압력이 감소됨으로 써, Start up을 위한 Section 2-B의 압력 강하가 불필요하게 만듦으로 써, vent 량을 최소화시킴.

2) K-2302 (HP MR Compressor)

K-2301가동 되고 난 이후 K-2302/K2303이 동시에 Start up이 된다.

K-2302/2303의 경우, 상대적으로 가용 power가 여유가 있는 편이다.

따라서, K-2302의 경우 Settle out pressure에서 restart up 이 가능하기 때문에 장기간 shutdown으로 인해 system 압력이 추가 상승하지 않은 경우에는 Section 2-A, 2-B은 vent operation이 불필요 하다.

대기로부터 Heat intake가 발생하여 압력이 Settle out pressure 이상으로 상승한 경우에 한하여 section 2-A의 pressure는 settle out pressure로 낮추기 위해 Vent operation이 필요하다. Section 2-B의 경우 K-230N start up시 recycle circuit에

포함 되지 않기 때문에 압력을 낮출 필요가 없으며, Section 2-B의 압력은

K-2301N, K-2303N suction pressure 유지하기 위해 FV-331/ 306를 open 함에

따라 자연적으로 압력이 낮아지게 될 것이며, Section 2-A와 Section 2-B가 동압이 된 시점에서 XV-371을 open하여 두 section을 합친다.

3) K-2303(HK MR Compress)

K-2301가동 되고 난 이후 K-2302/K2303이 동시에 Start up이 된다.

K-2302/2303의 경우, 상대적으로 가용 power가 여유가 있는 편이다.

K-2303의 경우에는 Settle out pressure 보다 Restart up pressure가 약 3.5bar 높기 때문에 restart up이전에 pressure를 낮추어야 한다. Liquid HK MR을 포함 하고 있는 K-2303 suction 부분(Section 3-B)를 HV-341을 close하여 isolation을 시킴으로 써, Vent operation을 구간을 최소화 하도록 함

K-2301이 Total recycle mode에서 Start up이 되고 나면, Section 1-D은 K-2301 suction 이 flow source가 되며, K-2303의 압력 상승 과정에서 HV-391을 서서히 열어 Section 3-A와 3-B를 동압이 되도록 함.

동압이 되고 난 이후에는 FV-306을 열어 K-2303의 suction pressure를 유지 시키게 되고, FV-306이 open 됨에 따라 Section 2-B의 압력을 감소됨으로 써, Start up을 위해 Section 2-B의 압력 강하가 불필요하게 만듦으로 써, vent 량을 최소화시킴.

➔ 상기 내용에서 보는 바와 같이 MR Liquid를 포함한 section의 Vent operation이 존재하지 않기 때문에 Vent 량은 크지 않을 것으로 예상되며, 이를 통해 restart up의 시간을 단축할 것으로 예상됨.

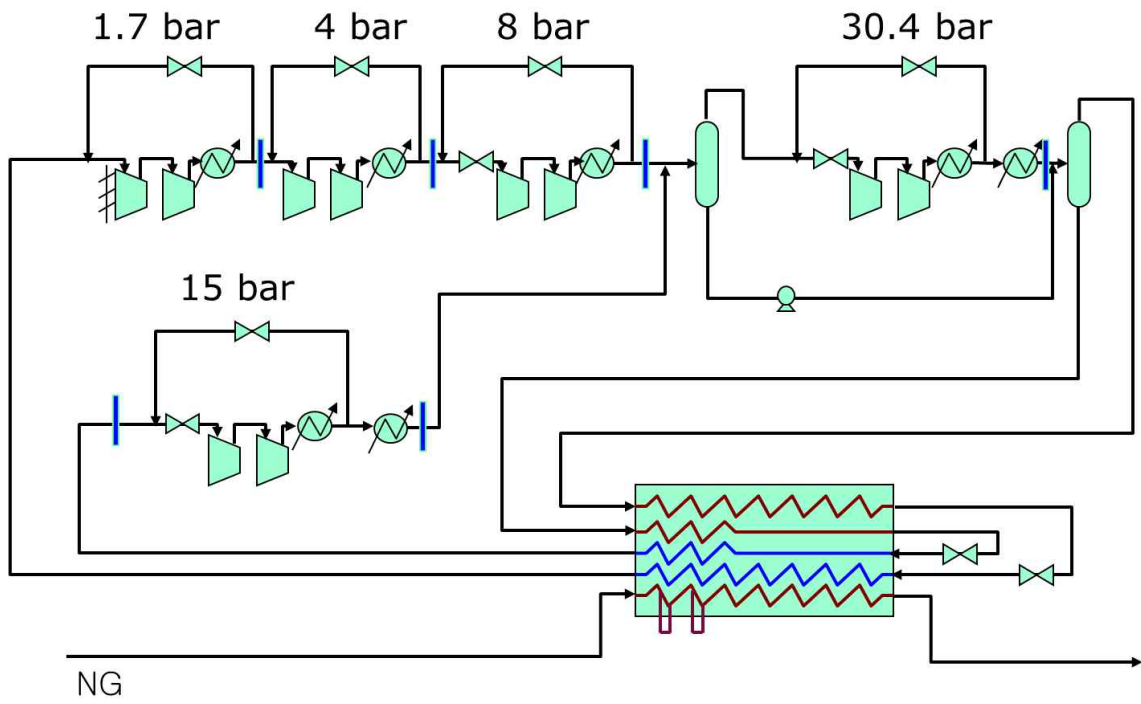


Fig. 2-다-4) 3. 기체 냉매만 → 압축기 기동 초기압으로 기동

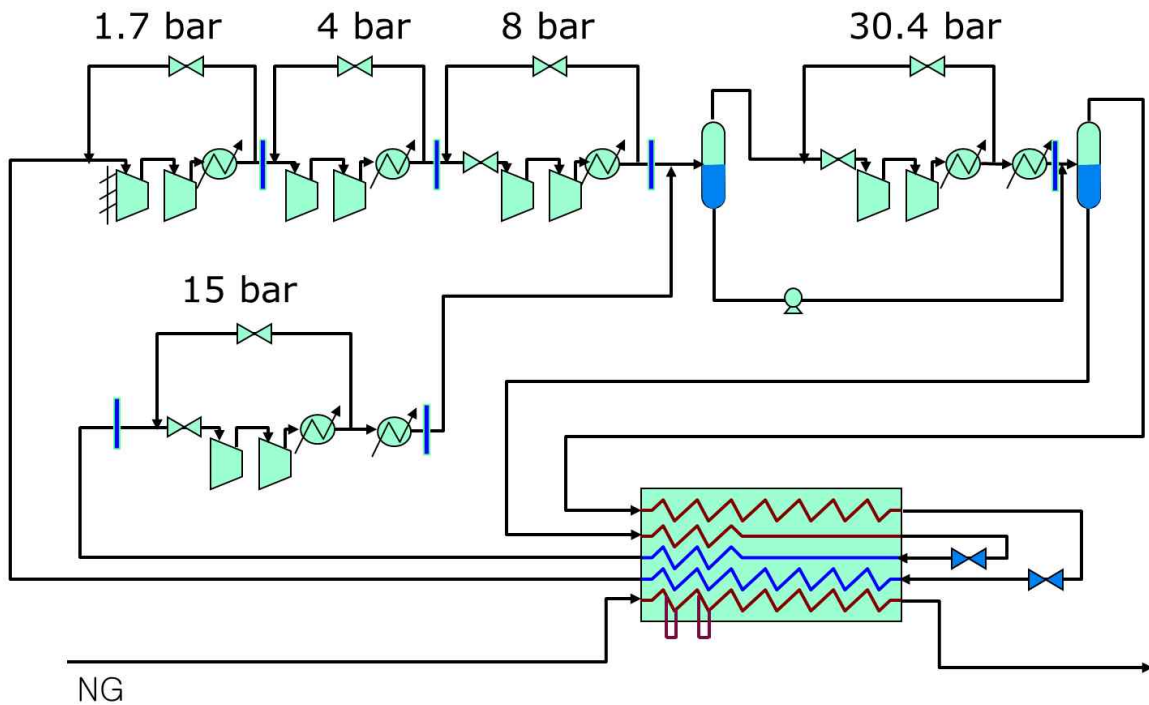


Fig. 2-다-4) 4. 기액분리기 액체냉매 → 액체 냉매 저장 기동 가능

나) 시운전 체계 구축

(1) 대외 협력

앞의 1차 시험에서 설명되었듯이 2017년도의 시험운전은 인천시 및 연수구청의 정지 요청으로 시험운전이 연기되었기에, 2차인 2018년도 시험운전에서 대외적인 설명이 절대적으로 중요하였다.

(가) 안전협의체 보고

2018년도 6월 27일에 인천생산기지와 인천시와 구성한 인천생산기지 안전협의체에 2018년도 시험운전에 대하여 보고하여 안전 운전 수행을 지시받았음.



Fig. 2-다-4) 5. 안전협의 발표 자료 1

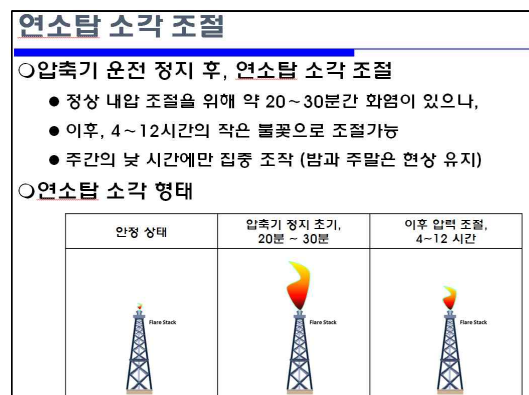


Fig. 2-다-4) 6. 안전협의 발표 자료 2

<안전협의체에 보고한 정보 공개 계획>

- 1) 시험 시작 전, 정보 공개
 - 전국 에너지 신문 등: KSMR Test-bed 운영
 - 인천 및 연수구 신문: Test-bed 및 소각탑 양해
 - NIB 남인천 방송 자막 안내 예정
 - 연수구청 전광판
 - 연수구 통반장에 SNS 송부
- 2) 시험운전 관련 관공서 통보: 인천시, 연수구, 경찰서, 소방서 등
- 3) 계획된 소각탑 소각 시, 정보 공개

- 연수구청 전광판
- 연수구 통반장에 SNS 송부

(나) 언론 매체 (에너지 신문 등)

 한국가스공사 보도자료 2018년10월 1일(월)부터 보도하여 주시기 바랍니다. 자료문의 : 신국철 부장 이리라 팀장 (032-810-4517) 가스공사, 한국형 액화공정(KSMR) 시험설비 가동 인천 LNG 기지에서 하루 100톤 규모 테스트베드(Test-bed) 시운전 □ 한국가스공사(사장 정승일)는 10월 1일 한국형 천연가스 액화공정 시험설비인 ‘KSMR™ 테스트베드(Test-bed)’의 성능 검증을 위해 본격적인 가동에 나섰다고 밝혔다. ○ KSMR™ 테스트베드는 가스공사가 2008년부터 국토교통부의 정부 정책연구로 추진하고 있는 LNG 플랜트 사업에서 380억원 이상 투자한 핵심 성과물이며, 하루 100톤 규모의 천연가스를 액화 처리하는 연구시험설비로 인천 LNG 기지에 설치해 가동 중이다. □ 한편, 기저부하용 천연가스 액화공정 라이선스 및 기본설계 기술은 미국·독일 등 일부 선진국만 보유하고 있는 핵심 기술로, 가스공사가 이번 성능 검증을 성공적으로 마치고 관련 라이선스를 획득하면, 2020~2030년 841조 원으로 예상되는 해외 천연가스 액화플랜트 시장에서 세계 유수 메이저 기업들과 어깨를 나란히 할 수 있는 계기가 될 것으로 기대된다.	□ LNG플랜트사업단 이상규단장은 “연구사업이 끝나는 이번 12월 26일 이전에 테스트베드의 시험운전이 성공하기 위해서는 반드시 전력과 천연가스의 안정적인 공급이 필요하며, 시험설비 가동시 연소탑에서 불꽃이 관찰될 수 있으나, 이는 정상적인 점화로 안전합니다.”라고 밝혔다. ※ 자료와 관련하여 자세한 사항은 한국가스공사 가스연구원 이상규 단장(032-810-0351) 또는 이철구 수석(032-810-0215)에게 문의하여 주시기 바랍니다.
--	---

Fig. 2-다-4) 7. 보도자료

(다) NIB 남인천 방송 자막

가스공사, 한국형 액화공정(KSMR) 시험설비 가동

한국형 천연가스 액화공정(KSMR) 시험설비의 성능 검증을 위한 설비 가동사항을 알려드리오니 참고하시기 바랍니다.

일 시 2018년 10월 1일 ~ 12월 26일

장 소 한국가스공사 인천LNG기지

한국형 액화공정 설비(KSMR)

국내 엔지니어링 사업 육성을 위해 국토교통부가 정책과제로 10년간 추진한 LNG플랜트 사업의 핵심 성과물

알 림 **운전 정시 시 연소탑에 불꽃이 관찰될 수 있으나**, 이는 시험설비 가동 중 발생하는 **정상적인 점화**로 안전함.

한국가스공사 가스연구원 (032-810-0351, 032-810-0215)

Fig. 2-다-4) 8. NIB 남인천 방송 자막

(라) 연수구청 전광판

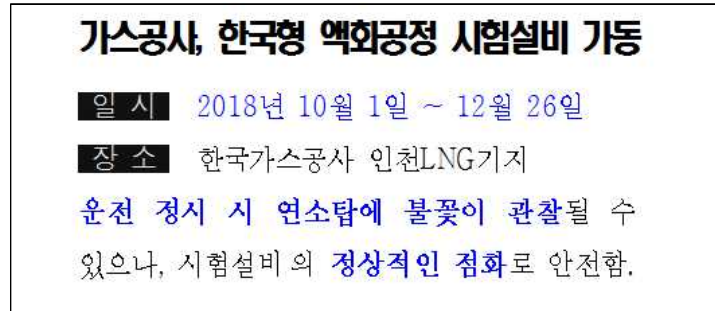


Fig. 2-다-4) 9. 연수구청 전광판 문구

(마) 시험운전시 관공서 통보

시험 운전 시작하기 전에 관공서에 방문하여 시험설비 운전관련 설명 및 이해를 얻음.

- 인천시청
- 연수구청
- 연수경찰서
- 연수소방서 및 인천소방지휘본부

(2) 대내 지원체계

(가) 시험운전 주요일정 및 지원계획

- 시험운전 준비기간(~'18.09.30)

시험운전 주요일정	주요 지원 계획
○ 설비 점검 및 보수(~09.30) - Air Blowing - Motor Solo Run - Leak Test - Compressor MRT - N2 inert & defrosting ○ 교육 - KSMR 공정 교육	○ 교대근무 계획 수립 ○ 주말 및 휴일작업(9.22~9.30) 감독입회 ○ Pilot 설비 정상 사용준비 ○ 안전관리방안 마련 ○ 시험운전 세부지원 계획 작성

Table 2-다-4) 2. 시험운전 준비기간 일정

- 시험운전 기간('18.10.01 ~ 시험운전 종료시)

시험운전 주요일정	주요 지원 계획
○ Start-up - 냉매수분제거 및 충전 - NG 퍼지 - LK 압축기 가동 - HK 압축기 가동 - 압축기 연결 운전 - Cool down by JT - 최종 Cool-down ○ Normal Operation - LNG생산 - Performance Test ○ Shut Down	○ 교대근무 실시(4조 3교대) ○ Pilot 설비 정상 운영 ○ 본사 인력지원(액화기술부, 2인) ○ 필요시 연구안전환경팀 안전관리 지원

Table 2-다-4) 3. 시험운전 기간 일정

- 시험운전 종료 후

시험운전 주요일정	주요 지원 내용
○ 시험데이터 분석 ○ 결과 보고	○ 시험운전 결과 보고 ○ Pilot 설비 원상복구 ○ 향후 테스트베드 운영방안 수립 - 경상정비 계획 - 주요 설비 내역 정리 - 활용계획 등

Table 2-다-4) 4. 시험운전 종료 후 일정

(나) 시험운전 지원조직 체계

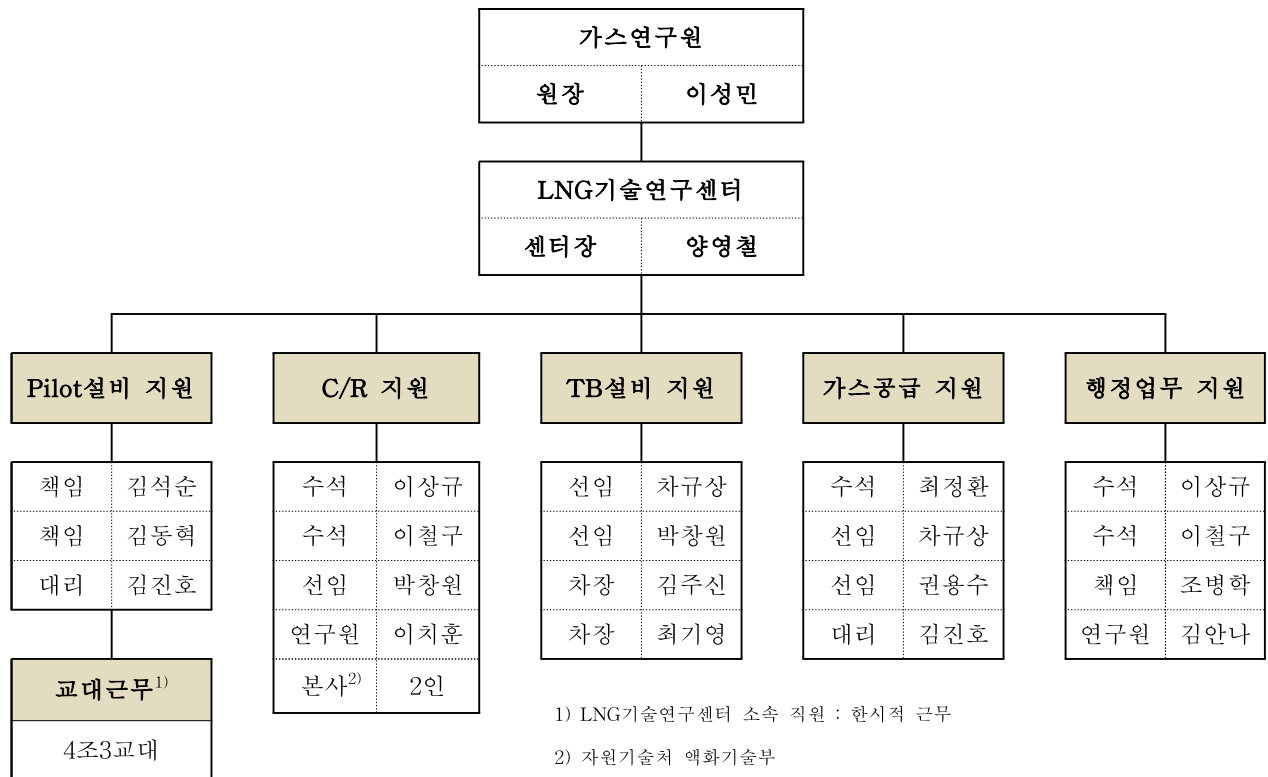


Fig. 2-다-4) 10. 시험운전 지원조직 체계

(다) 조직별 세부 지원계획

- Pilot 설비 지원

주요 역할	Pilot LNG Tank 계통 현장작업, 교대근무 편성
담당자	김석순, 김동혁, 김진호
수행역무	1. 시험운전 준비기간 중 Pilot Tank 및 C/R 설비 정상 운영 준비 2. 교대근무 조 편성 및 수당 산정 2. Feed Gas 인입 준비 3. 유틸리티 공급 준비 3. 안전점검 활동 4. 시험운전 종료 후 Pilot 설비 원상복구 5. 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 기타 : 비상조치 방안 및 시운전절차서 확보 및 숙지

Table 2-다-4) 5. Pilot 설비 지원

- 교대근무

주요 역할	Pilot LNG Tank 및 C/R 설비관리
근무 형태	4조3교대 (상시 1인 Pilot C/R 근무)
근무 인원	LNG기술연구센터 소속 직원
수행역무	1. Pilot Tank 및 CR설비 관리 2. 유틸리티 공급 관리 3. 안전점검 활동 4. 시험운전 종료 후 Pilot 설비 원상복구 5. 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 차량관리 7. 작성자료 - 교대근무일지 - Pilot CR 로그시트

Table 2-다-4) 6. 교대 근무

- C/R 지원

주요 역할	테스트베드 시험운전 지원
담 당 자	이상규, 이철구, 박창원, 이치훈, 본사(액화기술부) 2인
수행 업무	1. 시험운전 중 계통상태 및 인력현황 확인 2. Start-up/정상운전/Shut down에 따른 계통 운영지원 3. 압축기 가동 및 냉매주입 현장지원 4. LNG 생산 계통 현장지원 5. 인천기지 C/R 및 유관기관 상황보고 연락체계 유지 4. 안전점검 활동 5. 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 기타 - 시험운전 일일회의 주관(매일) : 회의록 공동 작성 - 시험운전 자료확보 및 분석 - 일일 상황 전파(sns 활용) - 시험운전 결과분석 및 보고

Table 2-다-4) 7. C/R 지원

- TB설비 및 가스공급 지원

주요 역할	테스트베드 시험운전 설비 지원
담 당 자	최정환, 차규상, 박창원, 권용수, 김주신, 최기영
수행 업무	1. 압축기 및 열교환기 설비 지원 2. 냉매 공급 지원 : C2, C3 공급 및 Dryer 가동 지원 3. 질소 공급 지원 : purge, defrosting 등 4. 고압 Feed gas 공급 지원(시운전 시작/종료 시점) 4. 전기 및 계장설비 : 전기실, DCS, 계측기 관련 사항 지원 5. 안전점검 활동 및 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 기타 - 필요시 담당설비에 대한 C/R조 주관 일일회의 참석 - 문제발생 시 원인 및 결과분석

Table 2-다-4) 8. Test-bed 설비 및 가스공급 지원

- 행정업무 지원

주요 역할	외부인 출입, 대내외 협력, 위탁용역관리 등
담 당 자	이상규, 이철구, 조병학, 김안나
수행 업무	1. 관련 자료작성 및 보고 2. 대내외 협력 - 인천기지/지역관공서/본사/LNG플랜트사업단 협조사항 협의 3. 출입신청업무(출입관리, 외부인안전교육) 4. 위탁용역(GS건설) 관리 5. 기타 - 주요 기록자료 양식작성, 현장비치 및 취합보관 - 시험운전 중 비용수반 긴급 처리(자재 공급, 수리) 협조

Table 2-다-4) 9. 행정업무 지원

(3) 안전관리 체계

(가) 안전관리 추진계획

((가)) 안전관리 체계 및 협력체계 구축

- 안전관리 조직은 법적 이원화 체계
- Pilot Tank 설비는 도시가스사업법, 테스트베드 Train-2는 고압가스안전관리법에 해당하는 설비.
- 별도의 법 적용에 따라 안전관리 조직을 이원화하여 운영함이 원칙.
- 실질적 안전관리는 효율적 통합운영
- 안전관리 활동의 효율성을 고려하여 실질적인 안전관리 체계는 통합하여 운영
- CR운영지원 총괄책임자(이상규 수석)을 중심으로 안전관리원, 교대근무자, 현장지원인력 및 협력업체 인력이 협력하여 Test-bed 현장 안전관리 활동 공동 수행

((나)) 신속한 상황보고 체계구축 및 비상 대응능력 강화

- 상황 발생시 신속한 대내·외 보고체계 구축
- 현장지원담당자와 인천생산기지 CR간 상시 연락체계 구축
- 대내·외 상황 발생시 보고체계 구축 및 현장 비치
- 비상상황 발생시 조치계획 수립

((다)) 안전관리 활동 강화

- 시험운전 준비기간중 위험요인 정비 철저
- 정비기간 : ~19.09.30
- Pilot 설비담당 및 안전관리자 중심으로 매일 현장설비 점검 수행
- 위험요인 발생시 즉각 보고 및 대응조치(가스기술공사 경상정비 수행 포함)
- 시험운전관련자 안전교육 실시
- 실시시기 : 시험운전 시작전(~ '18.10.01 이전)

- 실시장소 : 인천기지내 소방서
- 대상인원 : 협력업체 인력중 시험운전 관련 해당설비 출입자
(단, 6개월 이내 해당교육을 이수한 인원 제외)
 - 연구안전환경팀 인력 지원
- 지원기간 : '18.10.01 ~ 시험운전 종료시
- 지원방안 : LNG기술연구센터 요청에 의해 필요시 지원
- 시험운전 기간중 위험작업 등 안전점검 활동 공동 수행
 - 인천생산기지 안전환경팀과 업무협력
- 협력방안 : 상호 협력사항 및 상황 발생시 상호 요청에 의해 회의개최
- 안전점검, 비상대응 계획, 업무분장 등 협의(소방차 배치 등)
 - 시험운전 시작전 가스공사 주관 합동안전점검 실시
 - 점검기간 : '18.09.28(금) 오후 3:00 ~
 - 점검반구성 : 가스공사(LNG기술연구센터, 연구안전환경팀)

사업단(안전관리원)

GS건설(안전관리원 혹은 비상대응 담당자)

- 휴일 안전점검 실시
- 점검기간 : 2018년 추석 연휴기간 및 시험운전 기간중 주말 및 휴일
- 점검방안 : 사업단 담당자, 가스공사 공사감독(입회자), 교대근무자 상시 점검 실시
- 점검결과 : 교대근무일지(교대근무자) 작성후 안전관리자 통보후 조치

(나) 안전관리 체계 및 비상연락망

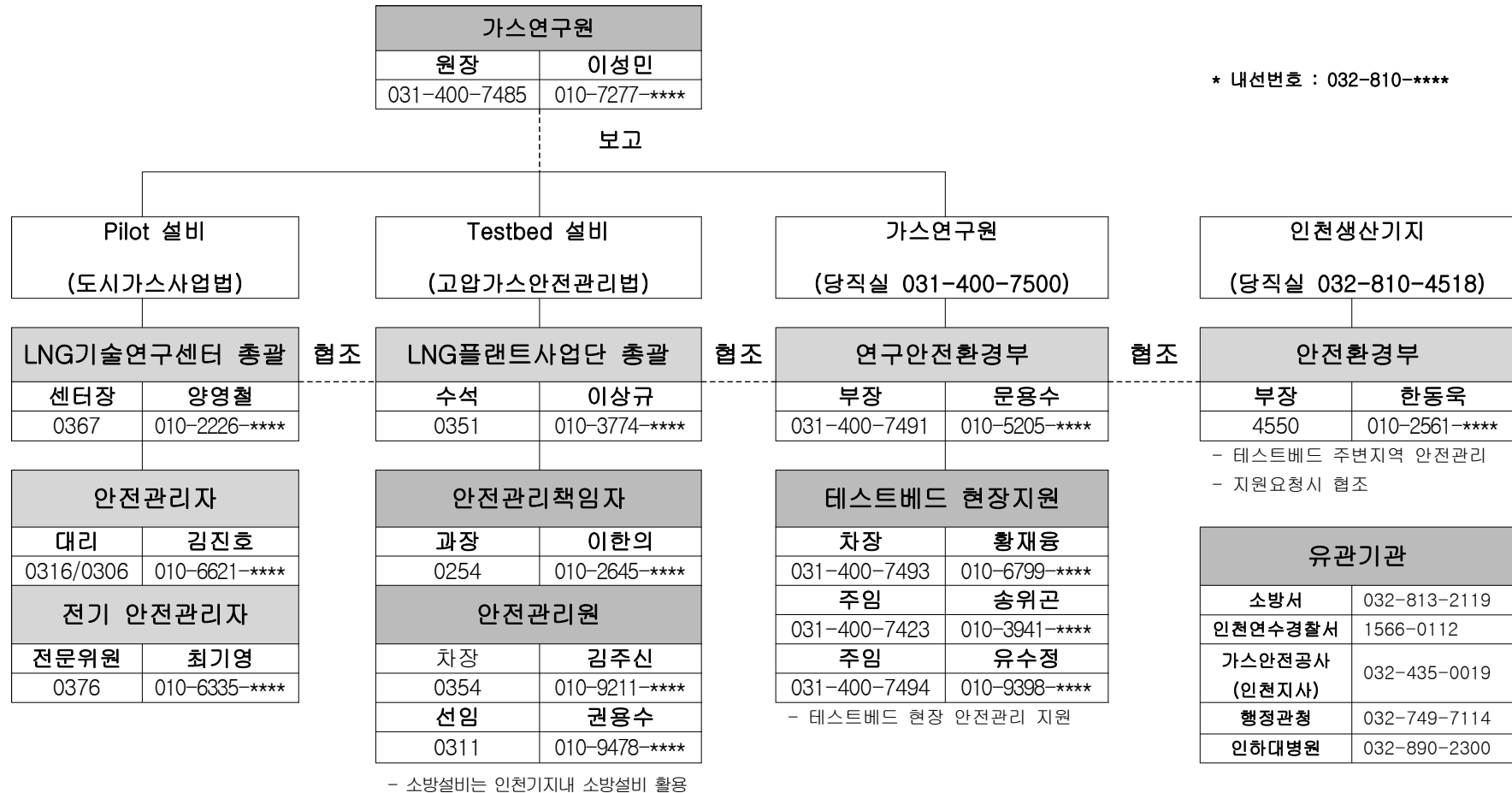
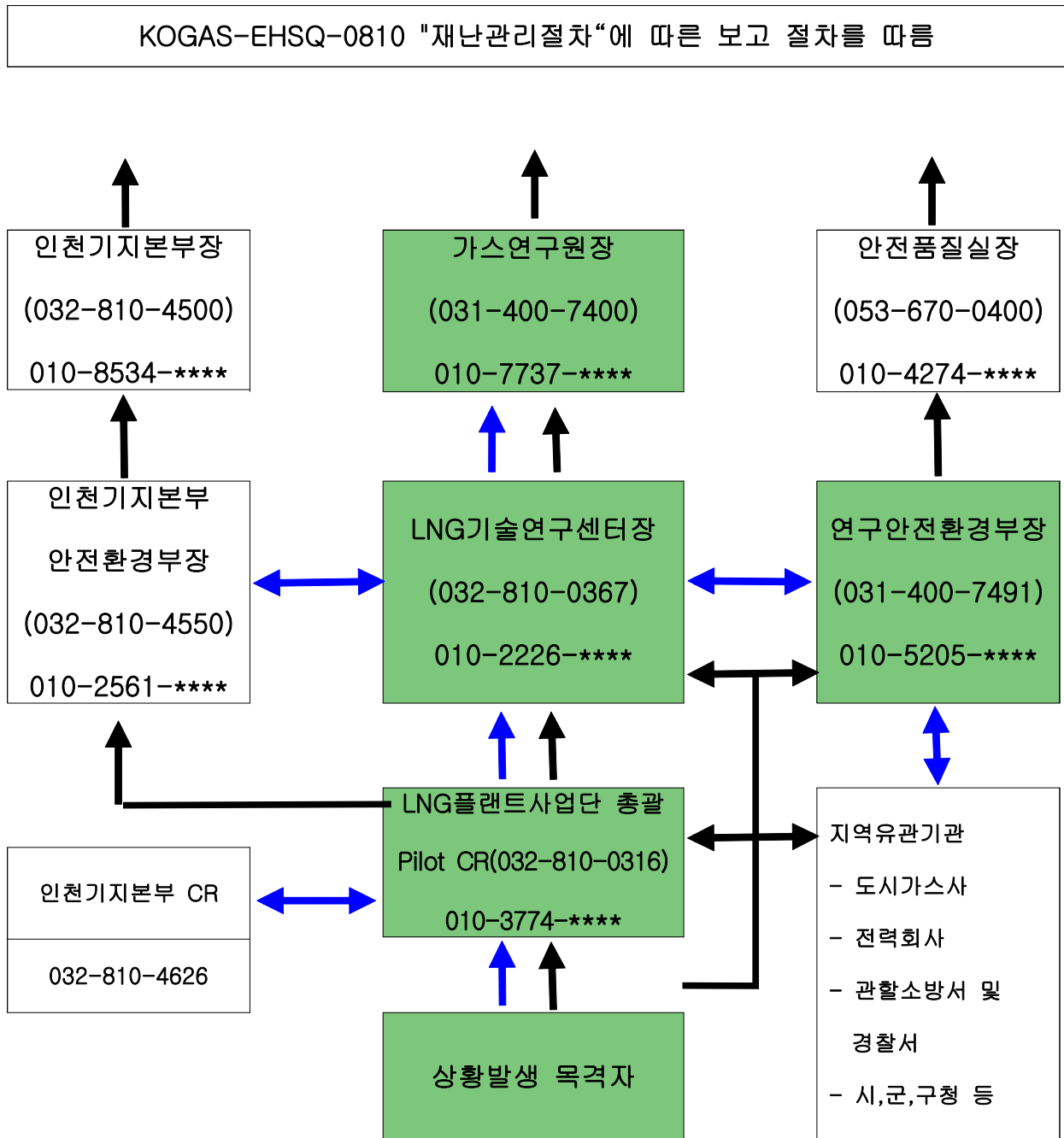


Fig. 2-다-4) 11. 안전관리 체계 및 비상연락망

(라) 상황발생시 보고체계



- ※주 1. → : 즉보[재난(1,2급사고 포함) 발생 및 목격시 보고(평일, 휴일, 주야간 공통)]
2. → : 상황보고 또는 전파
3. 보고 체계중 보고 받은 자가 부재시는 직상위자에게 보고한다.

Fig. 2-다-4) 12. 상황발생 시 보고체계

(마) 비상시 조치 요령

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
1	에틸렌/프로판 Loading	Leak로 인한 가스누출 또는 화재발생	Flexible hose의 노후 파손 및 연결부위 누설	Loading 작업 전 담당 작업자와 Tank Lorry 기사가 함께 hose 및 연결 부위 등 위험발생 가능부위 사전 점검	비상대책반 편성 운영 ※별첨 참조	오태훈
			Tank Lorry 미 접지로 인한 정전기로 인해 가스 누출 시 점화	Tank Lorry 접지 확인 후 Loading 작업 실시		
			Bolting작업 시 Spark로 인해 가스누출 시 점화	Non-Spark Tool 사용		
			Loading시 Flexible hose에 있는 공기가 System으로 유입	Loading전 N2로 대기 Purge후 산소농도 1% 미만 확인 후 Loading		
			Loading후 Flexible hose에 남아 있는 에틸렌이 대기로 방출	Loading후 Flexible hose에 남아 있는 에틸렌을 초저온 Flexible hose를 Flare로 연결하고 N2를 연결하		

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
				여 Purge		
			Tank lorry 주차위치에서 이동으로 인한 Loading Flexible hose 분리에 의한 에틸렌 Leak	Tank Lorry 바퀴에 받침목 설치		
			외부 인원의 오 조작	외부 인원 출입 금지를 위한 작업 주변 통제 및 출입금지 테잎 설치		
		Flare Stack 또는 BOG System 압력 불안정	갑작스럽게 또는 불규칙하게 배출	사전에 가스공사에 통보하고 천천히 조작		
2	In-take and Liquefaction Hydrocarbon Service	Leak로 인한 가스누출 및 화재 발생	Flange 부위의 Gasket 불량 또는 용접부위의 Pin-hole발생, Valve 파손 등에 의한 누설	1. 규정된 Gasket, Valve 사용 및 점검 2. Start-up 전 육안검사, 비눗물검사, 가스누설 탐지기 등을 이용한 철저한 사전점검		오태훈

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
			Bolting작업 시 Spark로 인해 가스누출 시 점화	N2 Hose로 N2 Spray 하면서 Non-Spark Tool을 사용하여 Bolt의 적절한 Torque값으로 체결		
			System에 과도한 산소 유입	Feed gas service 전 산소 농도 1% 미만 확인 후 Feed gas service		
			Flare Stack 또는 BOG System 압력 불안정	갑작스럽게 또는 불규칙하게 배출	사전에 가스공사에 통보하고 천천히 조작	
3	복합냉매 냉동기 가동	Valve Leak로 인한 화재 또는 폭발	1. Stem Packing Loose 2. Packing Material 불량 및 마모 3. Bolt 느슨하게 체결 4. Valve Seat나 Disc 마모 5. Valve Disc나 Plug가 Stem에서 이탈	1. N2 Hose로 N2 Spray 하면서 Non-Spark Tool을 사용하여 Bolt의 적절한 Torque값으로 체결 2. Valve Open 시 과도한 Open / 과도한 Close 방지 3. 필요시 Blinding, Plugging , Capping		이완직 이영주

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
				<사전방지 대책> 1. 소화기 비치 및 위치숙지 2. N2 Hose 연결 비치 3. 위험물질제거 4. 현장정리 정돈 5. 풍향확인 (풍향계) 6. 소화용 보호구 비치 및 착용 7. 현장 근무직원 Hydrant 사용 사전 소화 훈련		
4	Cool down	가연성가스 대기누출로 인한 화재	1. Cool Down 시 온도 하강으로 Line이 수축되어 Flange 에서 Gas Leak. 2. Drain / Vent Valve Passing	1. 온도하강시 주기적으로 Flange 부위 가스점검 및 Cold Bolting 실시 2. Drain / Vent Valve를 Cap 또는		이완직 이영주

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
			으로 인한 Gas Leak.	Blind Flange로 마감조치.		
		Cold Box의 Thermal Shock	1. Cold Box의 각 Stream의 온도차가 너무 크거나, 급하게 온도변화가 있을 때.	1. Cool Down Rate를 14°C/h로 조절운전. 2. Cool Down Gas를 모든 Stream에 동시에 공급		
		K-2301 1단 흡입압력 Over pressure에 의한 PSV Popping *V-2301 (운전압력0.5barg) *V-1401 (운전압력 3.8barg)	1. LK MR Gas의 공급압력이 0.5~0.7barg로 운전.	1. V-2301 K-2301 1단 흡입압력 (PI-541)과 C1의 유량(FI-341)을 관찰하면 조절밸브 (HV-342)로 공급한다. 2. V-1401 Vent 쪽 Valve를 먼저 열고 PI-010을 관찰하면서 Pre-Cool Gas를 Service하고, PIC-043(V-1401)을 3.8barg로 Auto Set한다.		

Table 2-다-4) 10. 비상 시 조치 요령

(바) 비상대책반 편성 운영 (위탁기관)

※지휘조(시운전팀장)는 각 조의 상황 발생 대비 교육을 주기적으로 실시하고 근무 시작 전 안전교육을 실시한다.

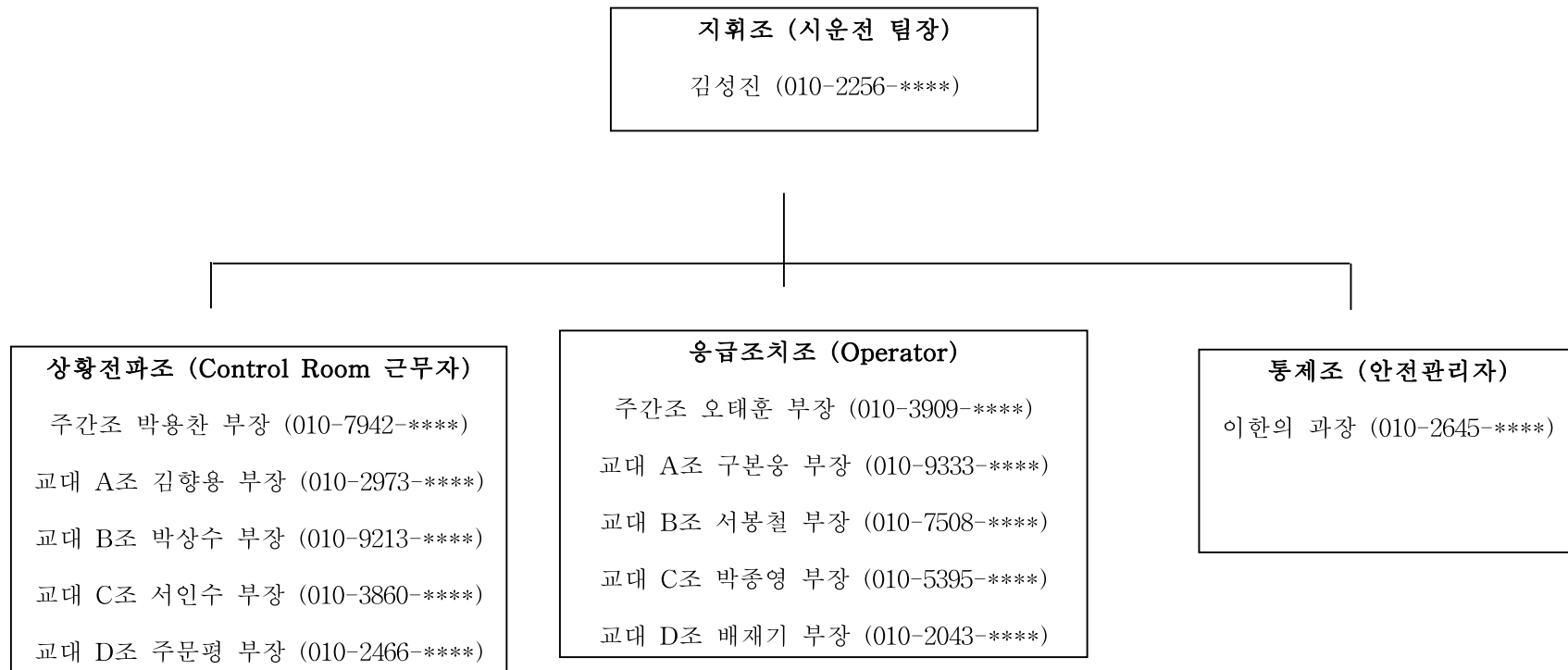


Fig. 2-다-4) 13. 비상대책반 편성 운영

○ 각 조의 역할

- **지휘조** : 신속한 상황 파악 및 현장을 지휘한다.
- **상황전파조** : 상황실, 안전실, 중앙조정실, 소방서 등에 신속한 보고 및 상황을 전파한다.

· **응급조치조**

㉠ 각 중 Vessel에서 가스 누출시

- 방독면 등 신속하게 보호구를 착용한다.
- 배관의 밸브를 잠그고 사용을 중지시킨다.

- 누출부위에는 납마개, 고무시트 또는 납박킹을 씌우거나 박아넣어 가스의 분출을 막고 가스누출검지기로 누출 여부를 확인한다.

- 가연성물질을 신속히 제거하고 통풍이 양호하도록 한다.

㉡ 배관에서 가스 누출시

- 방독면 등 신속하게 보호구를 착용한다.
- 긴급차단장치 및 가장 가까운 전·후단밸브를 잠그고 사용을 중지한다.

- 누출부위에는 납마개·고무시트 또는 납박킹을 씌우거나 박아넣어 가스의 분출을 막고 가스누출검지기로 누출여부를 확인한다.
- 가연성물질은 신속히 제거한다.
- 화재가 발생하였을 경우에는 소화기로 소화하고 부근의 Vessel에 물을 살수하여 온도상승을 막는다.

- **통제조** : 상황 발생 주변 통행 인원을 통제시키고 불필요한 인원을 대피 유도한다

(4) 시운전 조직체계 (위탁기관)

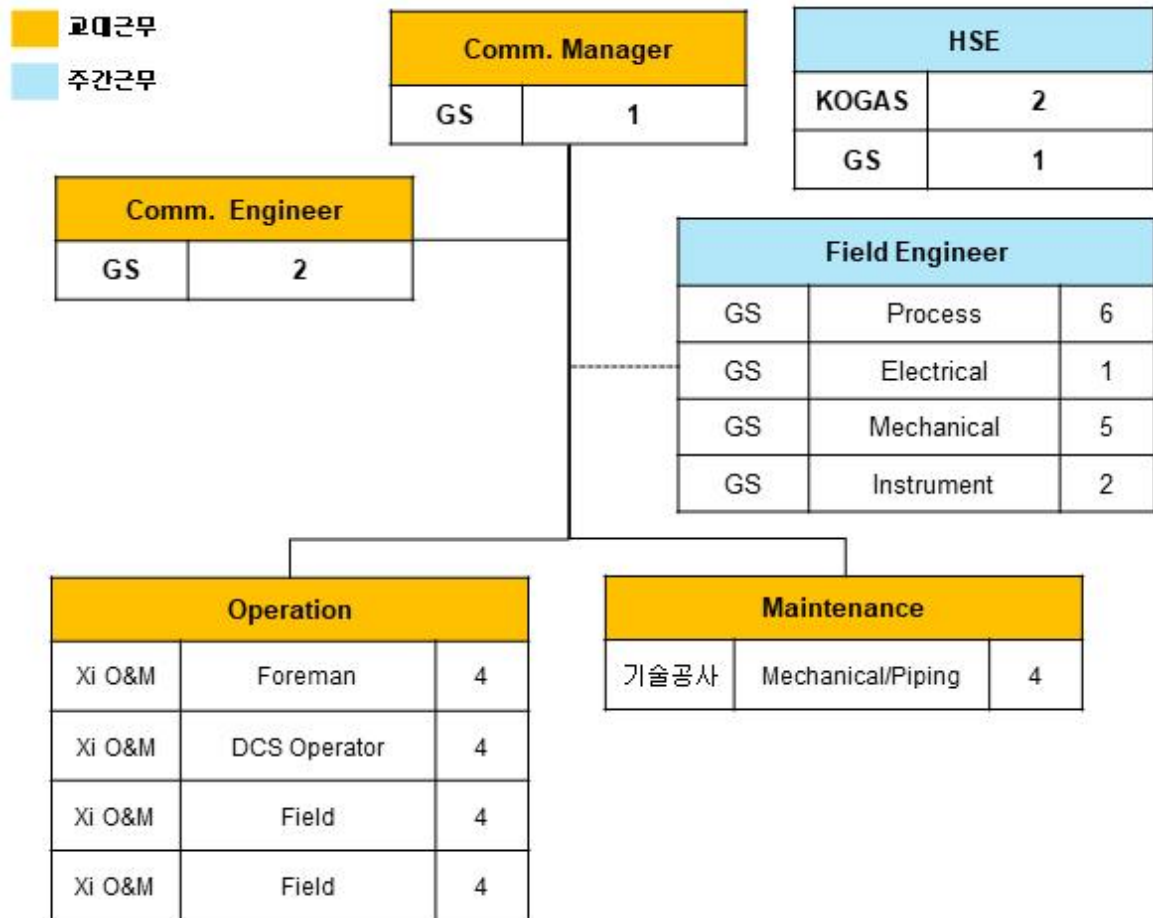


Fig. 2-다-4) 14. 시운전 조직체계 (위탁기관)

#. 주 52시간 근무제 반영 및 시운전의 효율성 증대를 위하여 20명의 인원을 (5개조 (교대 4개조, 일근 1개조)로 구성하여 운영

#. 조별 구성

.일근조 4명 : DCS 1명, Field 3명으로 구성

.교대조 16명 : 각 조는 Foreman 1명, DCS 1명, Field 2명으로 구성

(5) Pilot 설비 점검 및 운영

(가) Pilot LNG 저장탱크 설비 운전 현황

○ 2001년 12월 준공되어 상시운전의 형태로 운영되어 온 Pilot LNG 저장탱크는 상시운전을 2013년 9월 13일부로 종료하였고, 향후 필요성이 발생할 때마다 운전하는 방안으로 변경 시행키로 하였음. (연구개발원-5220(2013.9.11)“Pilot LNG 저장탱크 관리방안 보고”)

○ 2014년 액화 테스트베드 Train-1 시운전에 따른 생산 LNG 저장 및 송출을 위한 Pilot LNG 저장탱크 운전 [교대근무 기간 : 14년 2월 24일 ~ 14년 3월 17일]. (연구개발원-737(2014.2.6)“Pilot LNG 저장탱크 운전 재개 및 교대근무 시행”)

○ 2017년 KSMR Test-bed 시운전에 따른 Pilot LNG 저장탱크 운전 [교대근무 기간 : 17년 11월 1일 ~ 17년 12월 31일] (가스연구원-6759(2017.11.2)“Pilot LNG 저장탱크 교대근무 시행”)

○ 2018년 2차 KSMR Test-bed 시운전이 진행됨에 따라 Pilot LNG 저장탱크 운전사유가 발생함에 따라 관련 Pilot 설비 점검, 시운전, 정상운전 및 운전 정지 업무가 진행되었음.

Pilot LNG Storage Tank



□ Objectives

- Verify design, construction and operation technologies to develop commercial tanks
- Studies on LNG storage behavior

□ Features

- Applied Kogas membrane containment system
- Installed a stress measurement system for membrane
- The unique LNG storage tank for R&D purposes
- Connected with the processes of Incheon terminal

□ Specifications

- Type : elevated, membrane, suspended deck
- Kogas membrane containment system
 - STS304 corrugated membrane
 - PUF insulation
- Inner diameter 13.76m, height 10.92m
- Outer tank : Pre-stressed concrete (600mmt)
 - Outer diameter 15.38m, height 14.21m
- Net capacity : 1,020m³ (gross 1,300m³)
- Operating level : 1.5~8.81m
- Design pressure : -5~450mbarg
- Operating pressure : 50~350mbarg
- Boil-Off Rate : 0.53vol%/day
- LNG Pump : 50m³/h x 2, 15bar
- ❖ Started operation in 2001

□ Practical Uses

- Evaluation of Kogas containment system
- LNG storage and boil-off behavior studies
- Cyclic fatigue test of warm-up and cool-down
- LNG tank commissioning training

Fig. 2-다-4) 15. Pilot LNG 저장탱크 Summary

(나) Pilot LNG 저장탱크 운전 목적

- LNG 액화 플랜트 KSMR Test-bed 시운전 지원을 위한 Pilot LNG 저장탱크 Start-up 수행
- LNG 액화 플랜트 KSMR Test-bed 시운전에서 생산되는 LNG를 Pilot LNG 저장탱크 저장 및 송출
- LNG 액화 플랜트 KSMR Test-bed 시운전 종료 후 Pilot LNG 저장탱크 Warm-up 및 Shut-down 수행

(다) Pilot LNG 저장탱크 교대근무 시행

- Pilot LNG 저장탱크 운전을 위하여 교대근무가 실시되었음.
- 교대근무 기간 : 2018년 10월 1일 ~ 2018년 12월 17일
- 근무 형태 : 통상 및 교대근무 혼합 4조 3교대 실시
 - LNG기술연구센터 25인 1회 12일 Turn 교대근무 투입, 순번에 따른 반복투입
 - 12일 교대근무 1 turn : [After After After 휴무 Day Day Day 휴무 Night Night Night 휴무] 순서 시작 및 종료
 - 수석연구원[2급] 참여 ; 교대근무 관련 수당 미지급 [“공사 연봉제 규정 제7조(법정수당)”에 따라 지급 불가]
 - 책임급[3급] 이하 ; 교대근무 12일 관련 교대근무수당 지급, 월 초과근무수당 잔여 통상근무일 일할계산 신청 수령
 - 교대근무 제외자 6인 : 윤인수 연구위원[1급], 양영철 수석[센터장 보임], 조용범 수석 & 이강원 책임 [질병 제외], 김안나 연구원[여성], 김영균 책임[본사 KC-1 고도화 추진단원 겸임]
 - 인천분원 당직근무 병행 참여 [교대근무시 개별 당직일 변경 신청]
 - 한국가스공사 노동조합 및 연구관리부 협조 실시

구분	10월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
	요일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수		
C1		N	N	N	X	A	A	X	D	X	D	X	D	X	N	N	X	A	A	X	A	X	D	X	N	X	A	A	X	A	A	A	A	
		김진호	김진호	김진호	김진호	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	자규상	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	한해철	
C2		X	A	A	A	X	D	D	D	X	N	N	N	X	A	A	X	D	D	D	D	D	X	N	N	N	N	X	A	A	A	X	D	
		한준호	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	이철구	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	서홍식	
C3		X	A	X	D	D	D	X	N	N	X	A	A	X	D	X	N	N	N	X	N	N	N	X	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
		권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수	
C4		D	D	X	N	N	X	A	A	X	D	D	D	D	X	N	N	N	N	X	A	A	A	X	D	D	D	D	X	N	N	N	X	
		오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학	오병학

Day : 08:00 ~ 16:00

After : 16:00 ~ 22:00

Night : 22:00 ~ 08:00

[illegible]

구분	12월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	요일	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월	화	수	목	금	토	일	월
C1		김진호	김진호	김진호	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	최정환	이영규	이영규														
C2		A	A	A	X	D	D	D	X	N	N	N	X	A	A	A	A	X	D													
		이지훈	A	지훈	이지훈	김용수	이지훈	이지훈	이지훈	이지훈	이지훈	이지훈	이지훈	권용수	권용수	권용수	권용수	권용수														
C3		D	X	D	X	N	N	N	N	X	A	A	X	D	D	D	D	X														
		이상규	이상규	이상규	이상규	이상규	이상규	이상규	이상규	윤용근	윤용근	윤용근	윤용근	윤용근	윤용근	윤용근	윤용근	윤용근														
C4		D	X	N	N	N	X	A	A	A	X	D	D	D	X	N	N	N														
		김주산	김주산	김주산	김주산	김주산	김주산	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표	임거표														

Day : 08:00 ~ 16:00
After : 16:00 ~ 22:00
Night : 22:00 ~ 08:00

- Pilot LNG 저장탱크 Shut-down 및 교대근무 종료 : 2018년 12월 17일
- Pilot LNG 저장탱크 점검 및 보수 : 2018년 12월 18일 ~

다) 시험운전 시행

(자세한 시험운전 절차서 및 시행 내용은 GS건설의 용역보고서 참조)

- 2018.06.18: 가스공사 “KSMR Test-bed 2차 시험운전” 과제 시작
- 지역 안전협의체 시험 계획 보고 (‘18.6.27)
- 2018.08.01: GS건설과의 용역 계약 완료
 - 수의 계약 공고 및 수의 시담, 계약 보증 준비 등 수행
- 2018.08.27~2018.08.27: Pre-commissioning
 - 점검/보수: Inverter Panel 점검, Analyzer 부품 입고중, 제어 Valve류 (가스기술공사 수행), 압축기 모터 점검
 - 시운전 교육: 안전, KSMR
 - 보수: 전기설비 점검, 압축기 진동센서 교체, Pump, Analyzer
 - 시운전 교육: 압축기, 열교환기
- 2018.08.28~2018.09.26: Commissioning
 - 계통 활성화 및 보수: 전기, 공기, N2, Flare, BOG, 냉각수
 - Process Leak Test 및 보수 (MCHE 포함)
 - 계장설비 Function Test 및 교정
 - 압축기 MRT 및 진동 문제 해결
 - 수분제거
- NG 퍼징 완료(10.1), 냉매압축기 기동 및 C3 냉매 충전 (‘18.10.1~)
- C2(에틸렌) 냉매 주입 및 MCHE Cool down (‘18.10.15~10.17)
- 30 ton/day LNG 생산 확인 (‘18.10.29)

- 동화엔텍의 열교환기 제품결합 인정 ('18.11.07)
 - 일부 열교환 유로(Flow-Path)의 제작 오류로 열전달 면적 축소
- Test-bed 운영 정지 ('18.11.23)
- 내부 보고 및 대책 수립
 - 2018.12.05: LNG플랜트사업단 KSMR 테스트베드 후속업무 추진방안(안)
 - 2018.12.16: LNG플랜트사업단 기간연장에 대한 대응 방안
 - 2018.12.24: LNG플랜트사업단 과제 변경 추진(안)

라) 2차 시험운전 결과 분석

(1) LNG생산

KSMR Test-bed를 통하여 생산된 LNG의 양을 검증하는 방법은 End Flash Drum의 Level을 이용하여 생산된 양을 측정하는 방법이다. 이렇게 생산된 LNG의 실체를 눈으로 확인하고 그 조성을 분석하여 실제적으로 LNG가 생산되는 것 또한 확인할 수도 있다. Fig. 2-다-4) 17. 에 KSMR Test-bed 공정의 End Flash Drum으로부터 생산된 LNG를 수거하는 위치를 나타내었다. Fig. 2-다-4) 18. 은 생산된 LNG를 End Flash Drum에서부터 받는 사진이다.

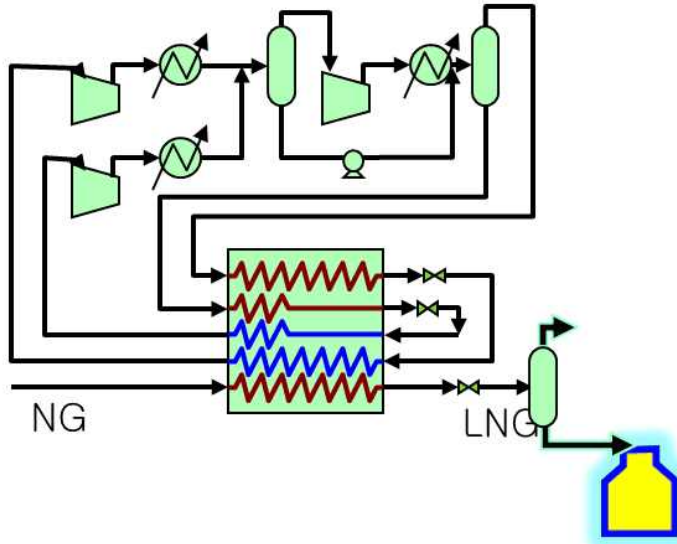


Fig. 2-다-4) 17. KSMR Test-bed 공정의 End Flash Drum과 생산 LNG수거 위치



Fig. 2-다-4) 18. 생산된 LNG를 End Flash Drum에서 부터 받는 사진

KSMR Test-bed 공정의 End Flash Drum을 통하여 생산된 LNG의 양을 연속적으로 측정하기 위해서는 FIC061.PV 값을 이용할 수 있는데, Fig. 2-다-4) 19. 에 2018.10.29 부터 2018.11. 11까지 KSMR Test-bed에서 생산되는 LNG생산량을 그래프로 나타내었다. 나타난 전체기간은 13일 인데, 그중 표시된 부분의 생산량이 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ 이고 LNG 밀도를 $0.45 \text{ ton}/\text{m}^3$ 으로 한다면, 일 $32.4 \text{ ton}/\text{day}$ 로 생산되고 있음을 계산할 수 있다.

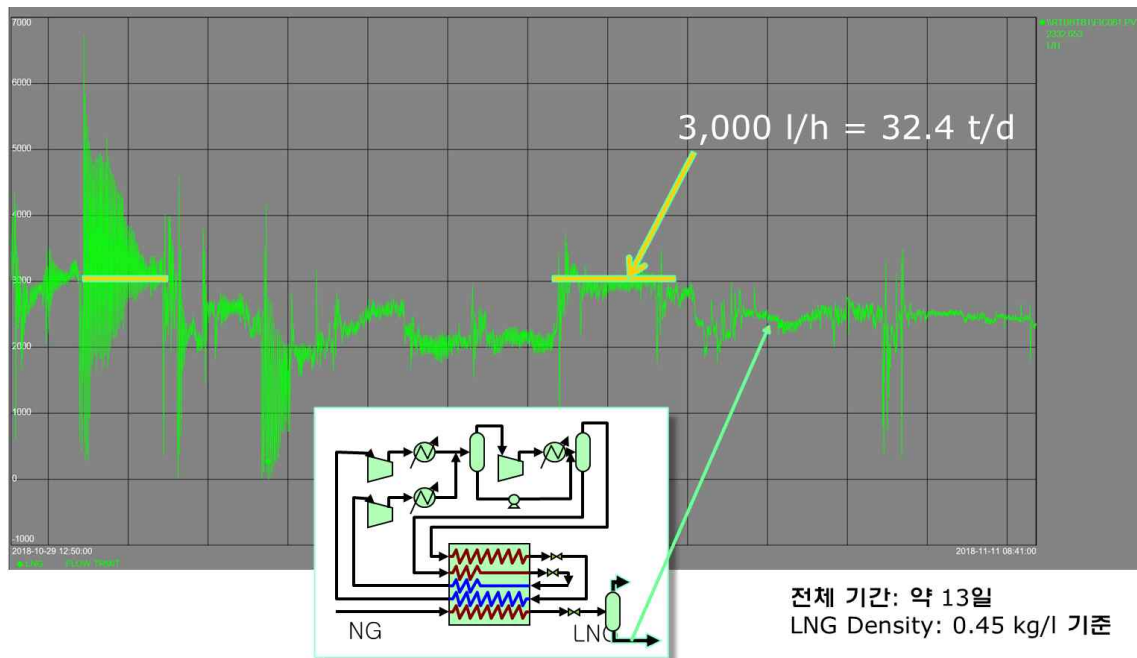


Fig. 2-다-4) 19. KSMR Test-bed에서 LNG생산량 (2018.10.29 ~ 2018.11.11)

앞의 Fig. 2-다-4) 19. 에서 2018.11.13에 받은 LNG를 가스 분석기를 통하여 분석한 조성 값을 Table 2-다-4) 11. 에 표기하였다.

Description	Unit	Actual Result
C1	Mol %	83.95
C2	Mol %	6.94
C3	Mol %	3.9
C4 +	Mol %	4.9
C5 +	Mol %	0.2
N2	Mol %	0.01
H2O	ppm Wt	N/A

Table 2-다-4) 11. 생산된 LNG 조성표 (Sampling: 2018.11.13)

(2) 주열교환기 (MCHE) 성능 문제

(가) MCHE 운전상의 특징

KSMR Test-bed의 생산 성능은 100 ton/day LNG이나, 32 ton/day 이상의 LNG 생산이 불가능하였다.

문제점: Cold LK MR과 Hot LK MR간의 온도차(34℃)가 좁혀 지지 않는 문제를 해결하려 운전 방법을 다양한 방법으로 시도하였으나 해결 불가하였음.

원인분석:

- MCHE의 제작상의 문제로 인한 LK MR side의 Dead zone 발생으로 Cold LK MR의 냉열 분배 문제
- Cold LK MR의 MCHE inlet device에서 과도한 pressure drop 문제
- Multi Stream Heat exchanger의 각 stream 별 상이한 margin 적용 및 각 stream별 조절 변수 부재에 따른 control 불가 문제

특히, MCHE의 제작상의 문제로 인한 LK MR side의 Dead zone 발생의 문제는 MCHE를 다시 제작해야 만이 해결할 수 있는 상황임을 가스공사의 수시과제 연구진행을 통하여 밝혀냈다.

(나) LK MR 측 Dead 영역 문제

LK MR 측의 Dead 영역이 발생하였다는 것은 그 부분에 유체의 흐름이 없다는 것이다. Fig. 2-다-4) 20. 에 PFHE의 일반적인 구조를 표시하였는데, PFHE는 그림에 보이듯이 여러 개의 Plate를 겹겹이 쌓은 진공상태에서 약 650 C로 구워서 한 덩어리로 만드는 것이다. 거기에 Fig. 2-다-4) 21. 에서처럼 노즐을 붙여서 흐름을 만드는 것이다.

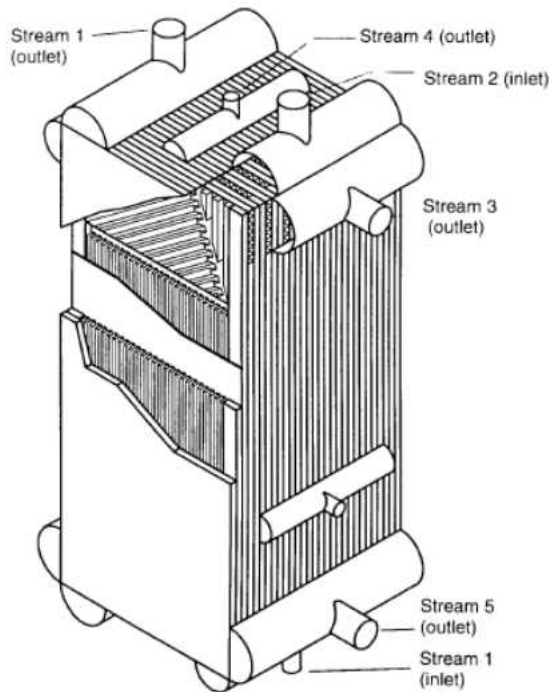


Fig. 2-다-4) 20. PFHE의 일반적인 구조

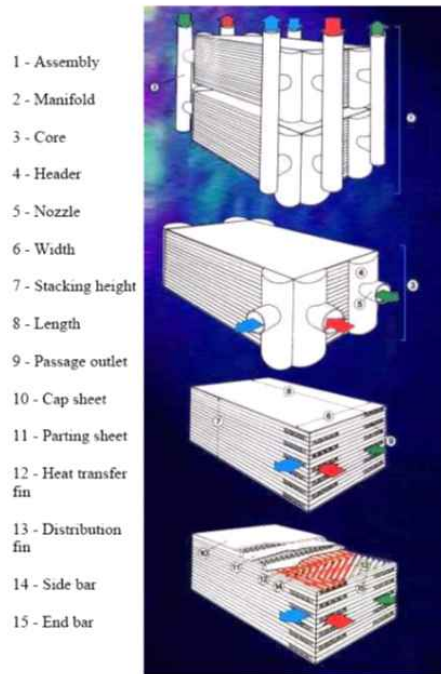


Fig. 2-다-4) 21. PFHE의 일반적인
제작순서

Fig. 2-다-4) 22. 에서처럼 다양한 흐름의 Plate들은 아래 그림에서처럼 PFHE 안에서 Plate Fin의 유체 흐름을 보이게 되는데, 각각의 흐름 특성은 해당 Plate의 흐름 방향에 따라 결정된다. 또한, 그러한 흐름 방향에 따라 흐름이 합쳐지거나 분리되기도 한다.

PFHE에서 합쳐지거나 분리된 흐름은 Fig. 2-다-4) 23. 에 표현된 PFHE의 다양한 Header 들에서 모이거나 분배돼서 Plate 내에서의 흐름이 되거나 다른 공정으로 전달된다.

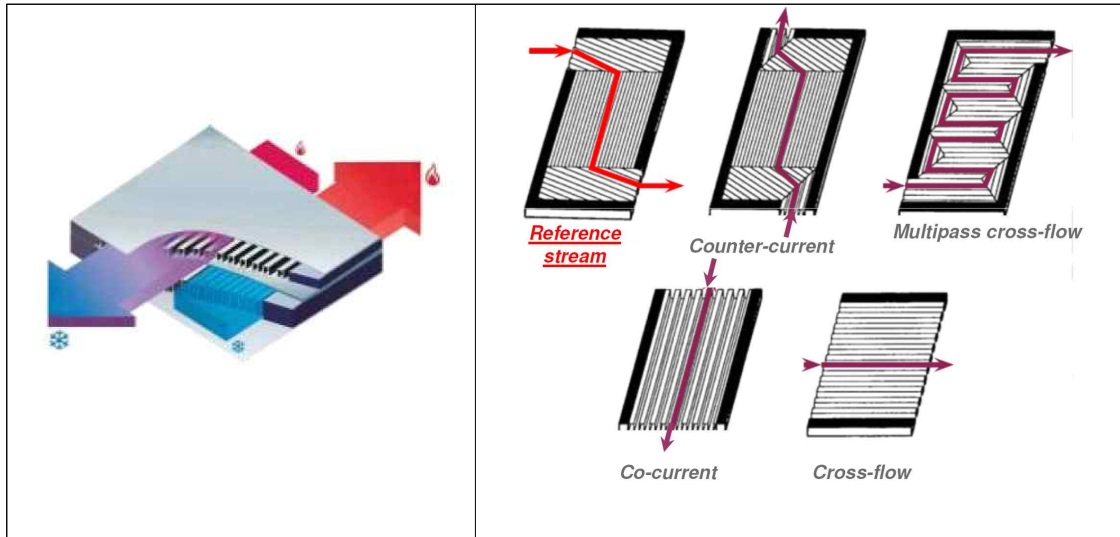


Fig. 2-다-4) 22. PFHE 안에서 Plate Fin의 유체 흐름

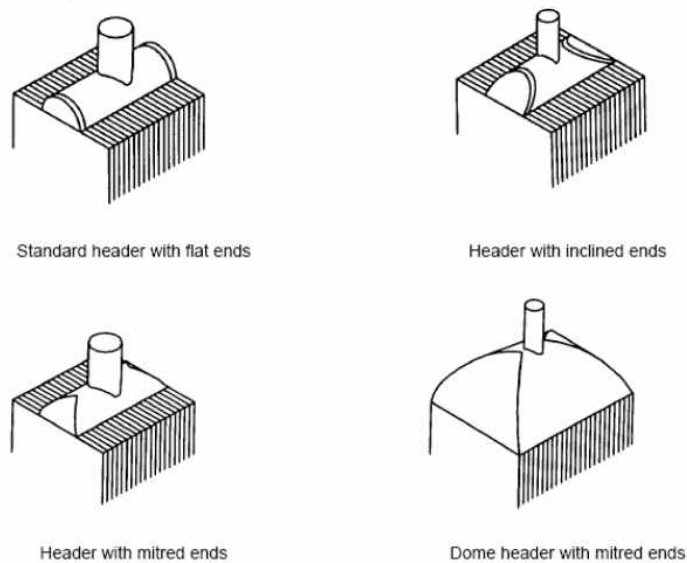


Fig. 2-다-4) 23. PFHE의 다양한 Header 들 사례

이번 KSMR Test-bed의 MCHE 제작 문제는 이러한 Header를 통하여 분배된, 새로 만드는 유체의 흐름에 제작 실수가 있었던 것이다. Fig. 2-다-4) 24. 에 있어서 KSMR Test-bed L K 흐름의 본래 방향에서는 왼쪽 위로부터 내려오던 LK가 가운데 부분의 사선 흐름 Fin에서 일부가 Header를 통해 오른쪽의 다른 Plate로 이동할 수 있는 것으로 개념 설계를 하였다. 하지만, 실제 제작된 KSMR Test-bed MCHE의 LK 흐름은 Fig. 2-다-4) 25. 와 같이 왼쪽의 Plate 중간 부분의 사선 흐름이 반대로 놓여있음을 발견하였다. 그렇기에 왼쪽 Plate의 반

이 오른쪽으로 가지 못할뿐더러 왼쪽 열교환 영역 역시 많이 축소되었다. 이러한 이유로 더 이상의 열교환 성능을 낼 수 없었다.

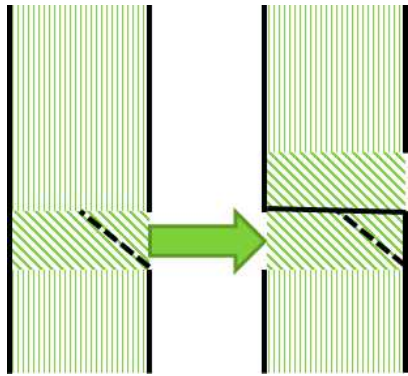


Fig. 2-다-4) 24. KSMR Test

-bed의 LK 흐름의 본래 방향

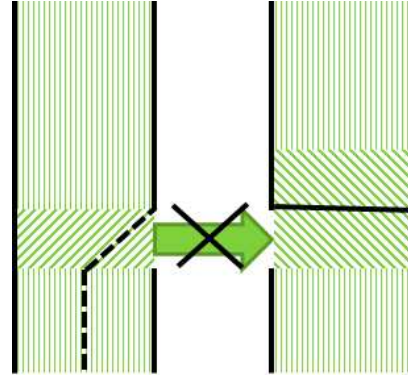


Fig. 2-다-4) 25. KSMR Test

-bed의 LK 흐름의 잘못

제작된 방향

(다) KSMR 성능 시험운전 결과

본 연구과제의 목표는 LNG플랜트사업단이 개발한 KSMR 공정이 구현된 KSMR Test-bed의 시험운전을 완수하는 것이다. KSMR의 압축 시스템이나 열교환기 등 구성품 및 기본 설계는 LNG플랜트사업단의 업무이며, 그렇기에 본 연구과제에서 이를 개조하거나 성능 향상을 할 수 없으며, 단지 그 설비의 성능을 평가 및 검증하는 것이다. 단지, 문제점이 있을 시에는 이에 대한 개선점을 제시할 수는 있을 것이다.

결론적으로는 본 연구과제 수행을 통하여 다음을 확인하는 것이다:

- Test-bed의 안정적 운영
- KSMR 특성
- KSMR 운전성 확인

Test-bed의 안정적 운영은 혹시 발생할 수 있는 사고를 방지하고 성공적으로 시험운전을 수행하는 것이다. 또한, KSMR의 특성을 확인하려면, KSMR의 구성부분을 먼저 봐야 한다.

Fig.2-다-4) 26. 에 KSMR의 구성으로 압축기 시스템, 열교환기, 초저온 펌프와 JT Valve류를 나타내었다.

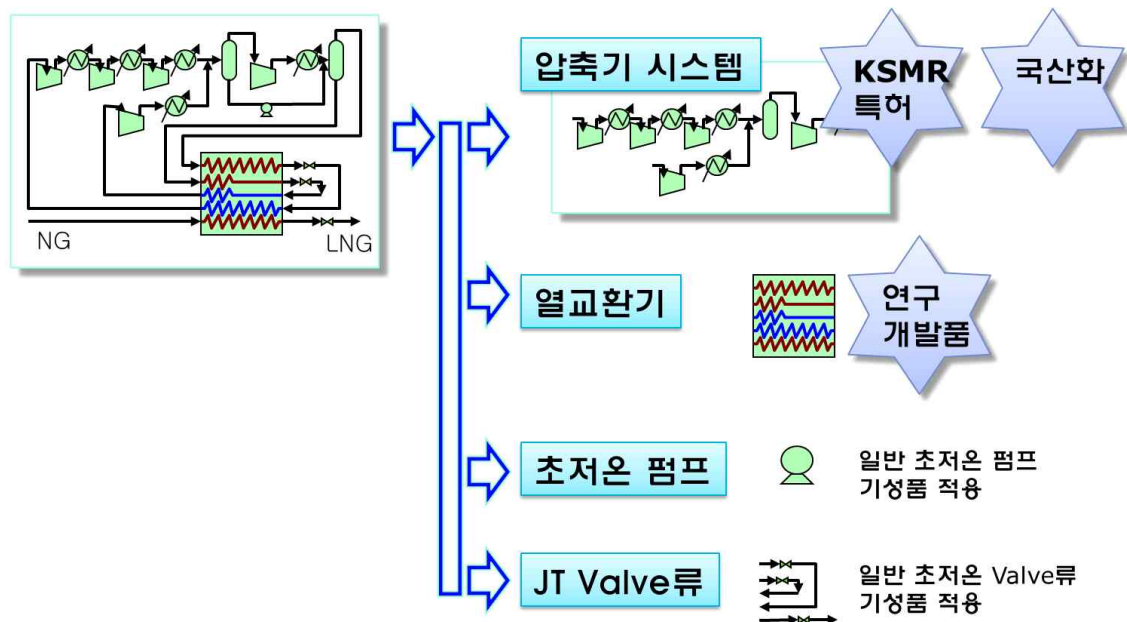


Fig. 2-다-4) 26. KSMR 천연가스 액화공정 구성

Fig. 2-다-4) 26. 에서 초저온 펌프와 JT Valve류는 특별한 기술이 필요하지 않기에 일반 기성품을 사용했으며, 특별히 연구개발할 필요도 없다고 판단되었다. 압축기 시스템의 경우는 LK와 HK가 병렬로 압축하여 합쳐지기에 일반적인 구조가 아니다. 그러한 이유로 압축기 시스템은 KSMR 특허의 핵심 구조라 할 수 있으며, KSMR Test-bed에서도 국산화된 시스템으로 집중적인 평가가 필요하다. 또한, 열교환기의 경우도 천연가스가 액화되는 장소이며, LNG플랜트사업단 연구개발성과품이기에 그 성능에 대하여 주시할 필요가 있다.

<KSMR 공정 구성>

냉매 압축 시스템

- KSMR공정의 특징이 있음
- LK와 HK MR의 분리·혼합으로 다소 복잡

열교환기

- Pilot 급으로는 최초 국산화
- 연구개발품

JT Valve, MR 증압 Pump: 일반 기성품

<KSMR 공정 특징>

LK MR과 HK MR으로의 분리

- 일반 SMR 및 C3MR에서도 적용됨

LK MR과 HK MR의 혼합에서 온도 하강

- KSMR에서만 특징으로 효율 향상주역

이러한 이유로 Test-bed를 통하여 KSMR 액화공정의 성능을 확인하기 위해서는 아래의 사항을 반드시 정리해야 한다:

- ① 냉매 압축 시스템
- ② 열교환기
- ③ LK 및 HK MR 혼합 특이점

Fig. 2-다-4) 27. 에 KSMR Test-bed 냉매 압축 시스템 구성을 LK, HK, HP로 표시하였다. 특히 LK부분은 3단으로 표현하였다. 실제적으로는 LK 3단, HK, HP 압축기 모두가 각각 2단씩으로 제작되었다. 즉, 임펠라만 본다면 LK 6단, HK 2단, HP 2단으로 제작된 것이다.

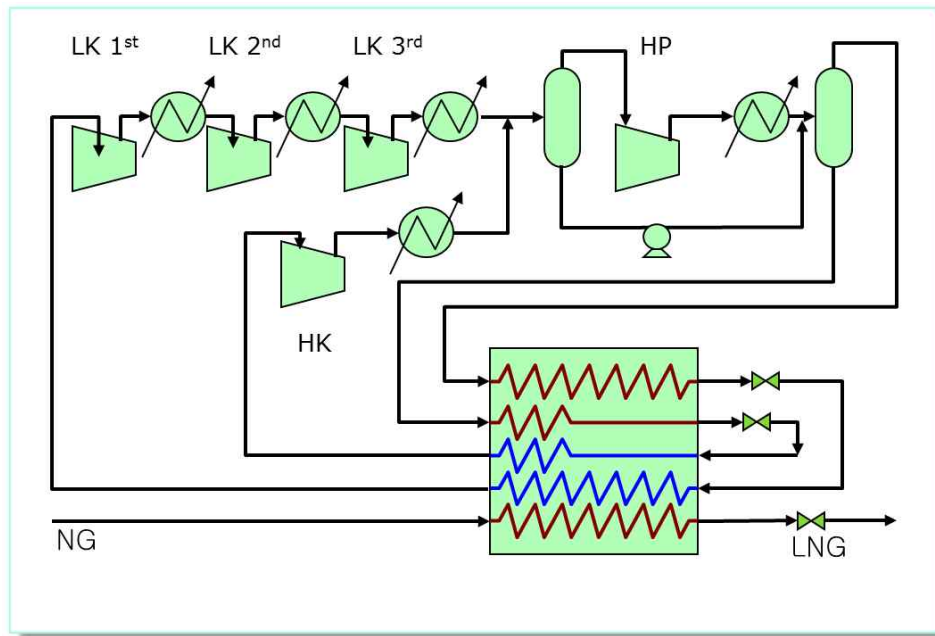


Fig. 2-다-4) 27. KSMR Test-bed 냉매 압축 시스템 구성

냉매 압축 시스템의 성능 검증은 압축기 전후의 압력과 온도 및 압축 유량의 분석으로 평가를 수행할 수 있다.

Fig. 2-다-4) 28. 에 LK, HK, HP의 운전 Data를 그래프로 나타내었다. 본 Data는 실제 KS MR Test-bed의 운전 Data를 표시한 것으로, 그래프 아래에 표시하였듯이 2018.11.04 6시부터 7시 사이의 운전 Data이다.

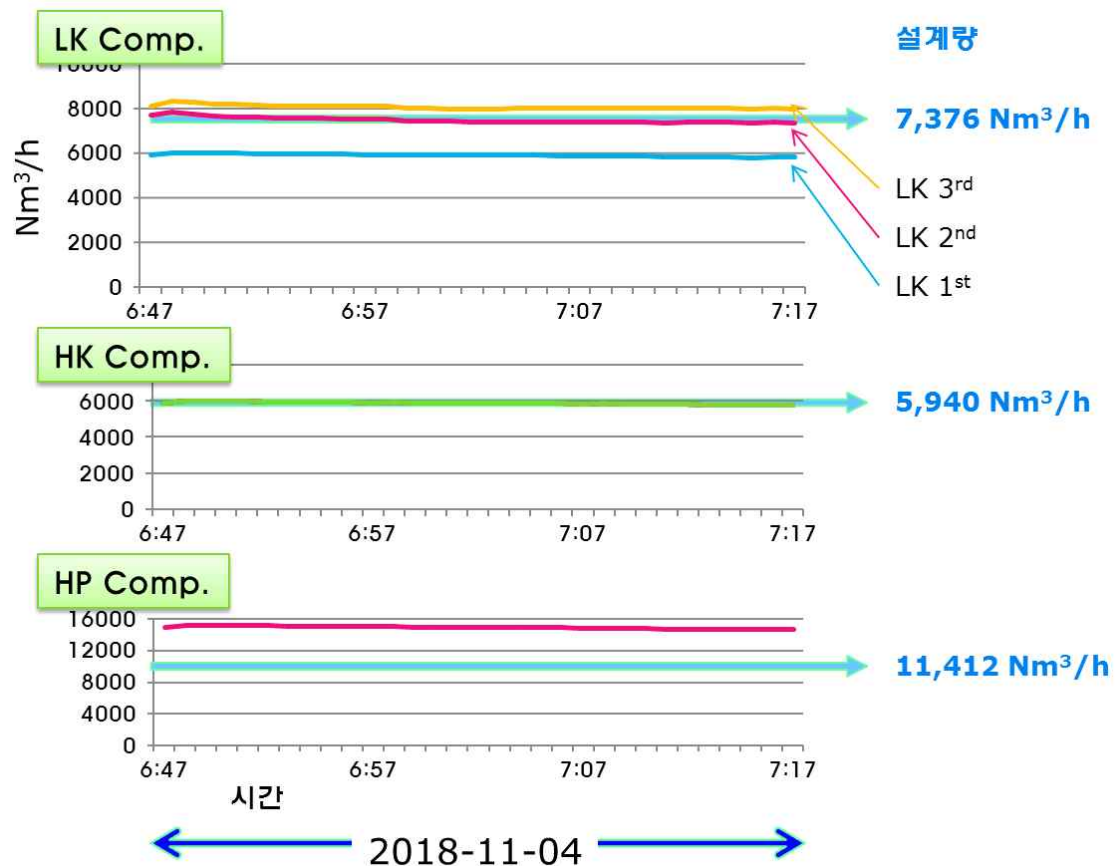


Fig. 2-다-4) 28. KSMR Test-bed 냉매 유량 그래프

Fig. 2-다-4) 28. 의 맨 위는 LK 냉매 압축기의 유량 값이다. 그래프에서 가로로 가로지는 7,376 Nm³/h 화살표는 설계 값으로 이 값보다 크면 설계 이상의 유량이 흐른다는 뜻이 될 수 있다. 그림에서 LK 3rd와 LK 2nd의 경우는 설계 값 보다 크기에 성능에 문제가 없으나, LK 1st의 경우는 설계 값 보다 작기에 Test-bed를 통하여 압축기 성능 검증을 완수 못했다고 할 수 있다.

Fig. 2-다-4) 28. 의 가운데에는 HK 냉매 압축기의 유량 값이며, 여기서도 가로로 가로지는 5,940 Nm³/h 화살표는 설계 값으로 이 값보다 크면 설계 이상의 유량이 흐른다는 뜻이 될 수 있다. 그림에서는 운전 값과 혼재되어서 잘 보이지 않지만, 일부는 설계 값 이상이고 일

부는 조금 작을 수 있지만 전체적으로 설계 값을 만족한다.

Fig. 2-다-4) 28. 의 아래 부분은 HP 냉매 압축기의 유량 값이며, 여기서도 가로로 가로지는 11,412 Nm³/h 화살표는 설계 값으로 이 값보다 크면 설계 이상의 유량이 흐른다는 뜻이 될 수 있다. 그림에서 나타나듯이 전체적으로 설계 값보다 크기에 조건을 만족한다.

KSMR Test-bed는 LK 1st를 제외하고는 모든 압축기의 유량이 설계 조건을 만족한다고 할 수 있다. LK 1st가 정말로 설계 조건을 만족 못하는지에 대하여 좀 더 분석하기 위하여, 2-다-4) 29. 와 같이 LK 압축기 유량 센서와 LK JT Valve에 있는 유량 센서도 같이 분석하였다.

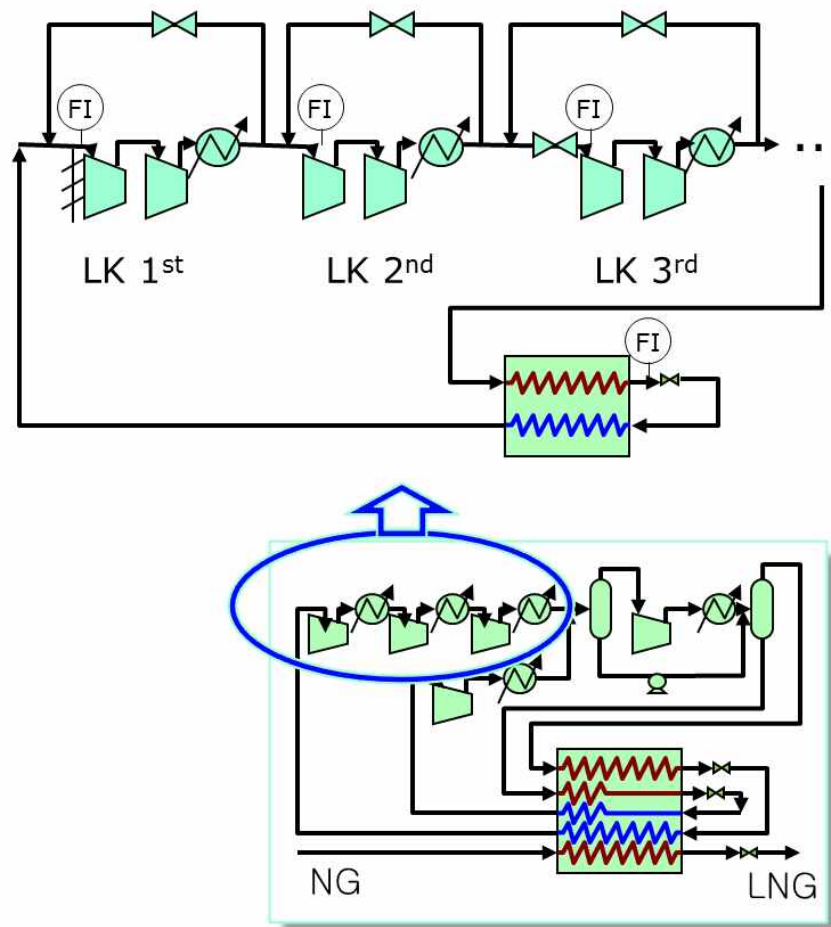


Fig. 2-다-4) 29. KSMR Test-bed LK 냉매 압축 시스템

Fig. 2-다-4) 30. 에 2018.11.04 6시 운전 Data를 세로로 확대하여 다시 표시하였다. 그림에

따르면 LK 2nd와 LK 3rd는 확실히 설계 량인 7,376 Nm³/h 값을 넘는 것을 확인 알 수 있다.

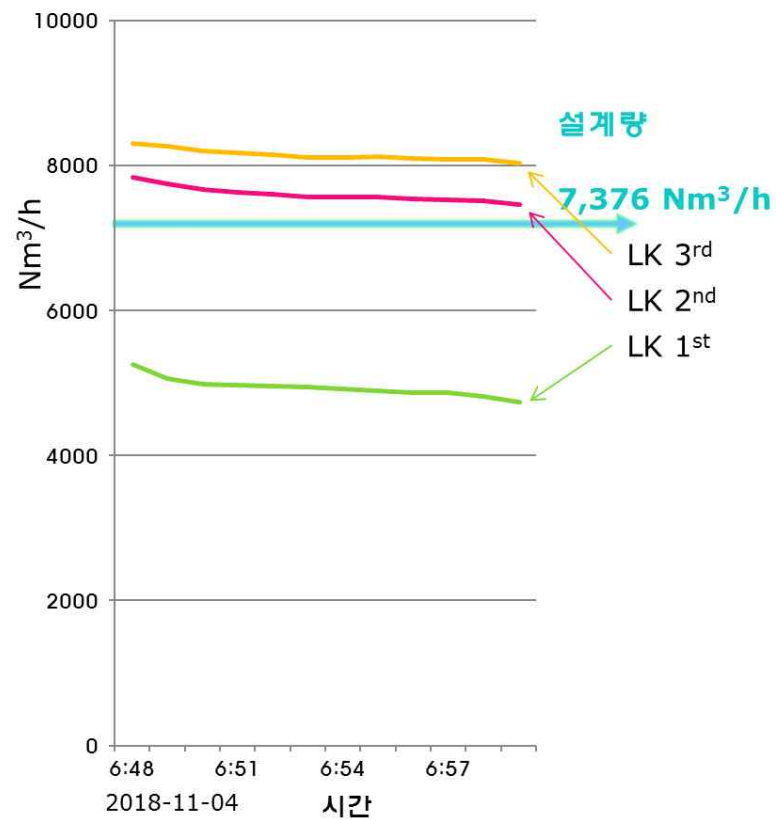


Fig. 2-다-4) 30. KSMR Test-bed LK 압축 시스템 유량
그래프 및 설계 유량값 표시 (7,376 Nm³/h)

Fig. 2-다-4) 31. 에서 각 압축기 유량 센서는 압축기의 ASV (Anti-Surge Valve)가 만든 Loop 안쪽에 있기에 전체 유량 보다는 항상 크다. 물론 ASV를 역방향으로 흐를 수도 있다고 할 수 있지만, 압력 Data를 보면 압축기의 입구측이 출구측보다 압력이 작기에 그러한 흐름이 있을 수는 없다. 또한, ASV의 Open 상태를 보면 6:59 자료에 34%나 열려있음을 알 수 있다.

ASV: 34% (6:59 기준)

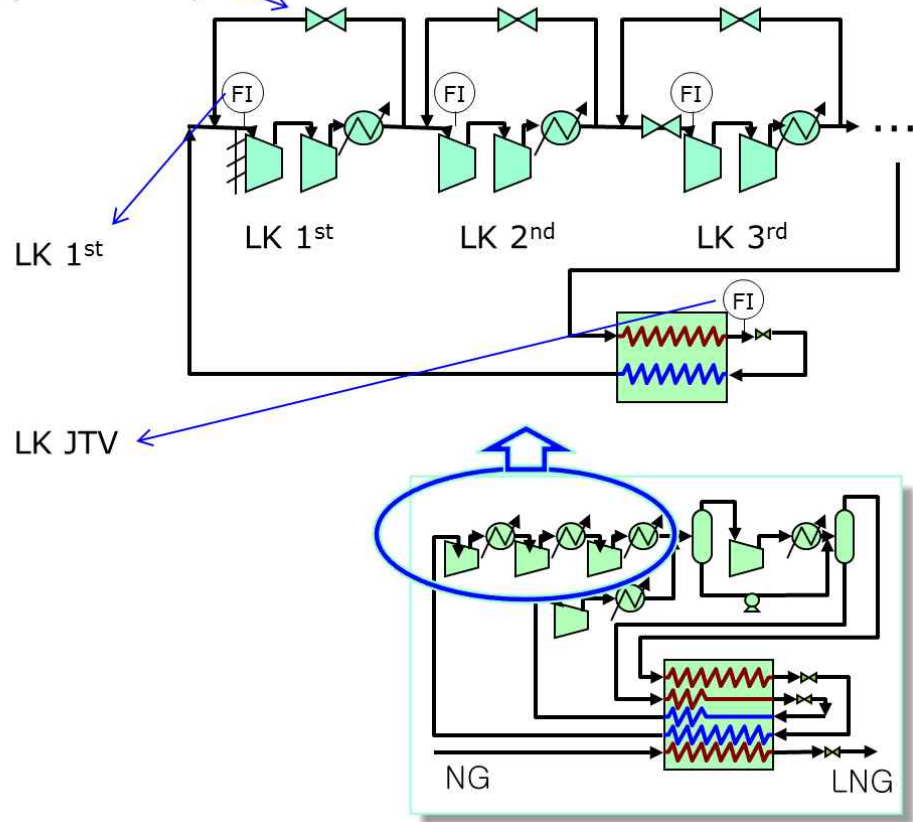


Fig. 2-다-4) 31. KSMR Test-bed LK 압축 시스템의 유량계들

LK 냉매 전체 유량은 LK JTV에 있는 유량계로 알 수 있기에 이를 LK 1st 유량과 함께 Fig. 2-다-4) 32. 에 나타내었다. 그림에서 LK JTV에 있는 유량인 LK 냉매 전체 유량이 LK 1st 유량보다 작게 나타나는 기이한 현상을 볼 수 있는데, 이는 근본적으로 잘못된 것이다.

즉 LK 냉매 전체 유량에 ASV 유량이 합쳐진 것이 LK 1st 유량인데, 이 값이 LK 냉매 전체 유량보다 작을 수는 없는 것이다. 이러한 잘못된 상황을 시험운전 동안 분석하여, C3MR Test-bed (Train-1)에서부터 냉매 압축기를 개조할 때 LK 1st 유량 범위 조정에 문제 있었음으로 판정되었다.

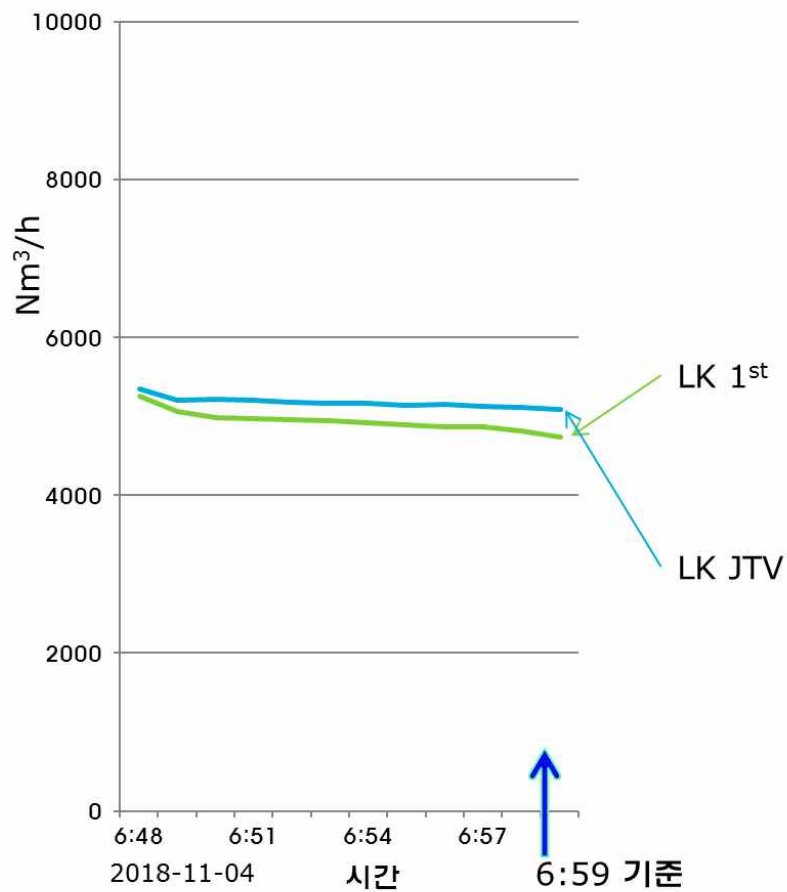


Fig. 2-다-4) 32. KSMR Test-bed LK 냉매의 JTV 유량과 LK 1st 유량 비교 그래프

지금까지 Fig. 2-다-4) 28. 에서 Fig. 2-다-4) 32. 을 통하여 LK 압축기 유량의 성능을 분석하였다. 계속해서 Fig. 2-다-4) 33. 을 통하여 LK 압축기의 압력 값 및 온도 값을 분석하려

한다. Fig. 2-다-4) 33. 의 맨 윗부분의 1.39 bar는 LK 압축기 입구측 압력 측정값이며, 그 옆의 가로 안의 값인 1.3은 설계 값이다. 나머지의 표기 역시 같은 방법인 측정값과 가로 안의 설계 값이며 2-다-4) 33. 에 표시하였다. Fig. 2-다-4) 33. 에서 LK 압력은 1.39 bar에서 3.5 bar, 9.7 bar, 28 bar로 설계 값이 1.3 bar에서 3.6 bar, 10 bar, 28 bar로 설계 값과의 비교에서 오차범위 안에 있음을 알 수 있다. 또한, 온도 역시 13.7 C에서 34 C, 34 C, 39 C로 설계 값인 35 C, 40 C, 40 C, 40 C와 (맨 처음의 입구 온도이외에는) 매우 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. LK 압축기 입구측의 13.7 C는 MCHE가 성능 제대로 발휘하지 못해서 나타는 현상으로, 냉매로 공급된 냉매의 냉열이 MCHE에서 열교환 면적으로 부족으로 해소되지 못하고, 압축기로 냉열이 회수되기에 낮은 온도로 나타나는 것이다. 또한, 이러한 낮은 온도는 냉매의 밀도를 높여서 압축기 입장에서는 부하가 더 커지는 형태가 되기에 더 엄격한 상황으로 볼 수 있다. 즉, LK 압축 시스템에 있어서 압력과 온도 값들은 전체적으로 설계 조건을 만족하는 운전 Data를 보여준다고 할 수 있다.

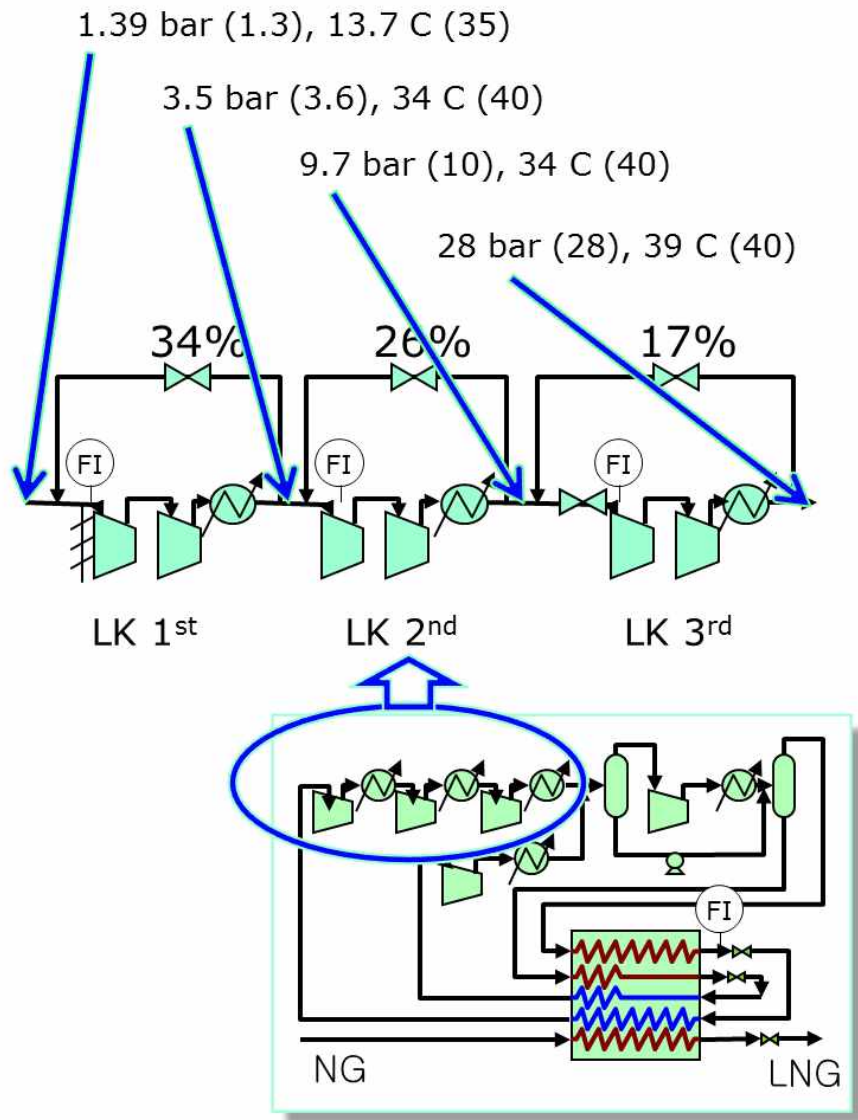


Fig. 2-다-4) 33. KSMR Test-bed LK 압축 시스템의 압력, 온도 값

Fig. 2-다-4) 34. 에는 Fig. 2-다-4) 33. 의 압력 유량을 표시한 시간의 LK 압축기 유량 값을 표시하였다.

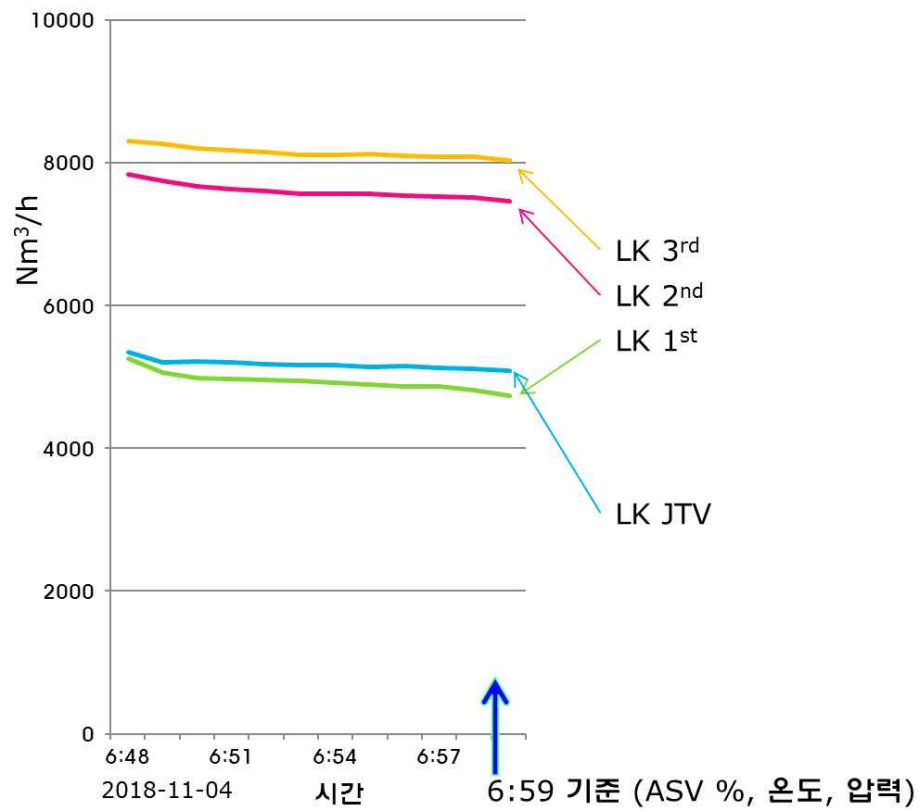


Fig. 2-다-4) 34. KSMR Test-bed LK 압축 시스템 온도 압력 값에서의 유량값 그래프

Fig. 2-다-4) 35. 에 KSMR Test-bed HK 압축 시스템의 냉매 유량 압축 능력을 표시하였다. 표시 방법은 앞의 Fig. 2-다-4) 33. 및 Fig. 2-다-4) 34.과 같다. HK 압축기는 11 bar에서 28 bar로 가압하는 압축기로 유량 역시 설계 값과 거의 같은 값을 보여주고, 온도와 압력 역시 설계 값을 만족시키기에 KSMR Test-bed HK 압축 시스템은 설계와 같은 성능을 보여준다고 할 수 있다.

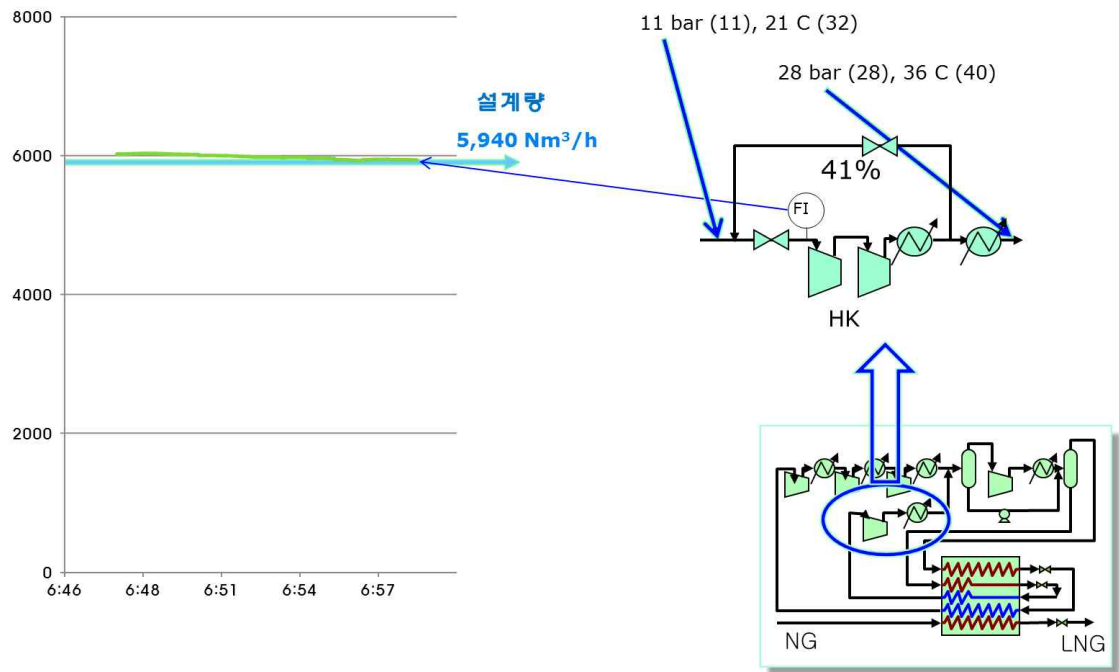


Fig. 2-다-4) 35. KSMR Test-bed HK 압축 시스템의 냉매 유량 압축 능력

Fig. 2-다-4) 36. 에 KSMR Test-bed HP 압축 시스템의 냉매 유량 압축 능력을 표시하였다. 표시 방법은 앞의 Fig. 2-다-4) 35. 와 같다. HP 압축기는 28 bar에서 52bar로 가압하는 압축기로 유량 역시 설계 값 이상을 보여주고, 온도와 압력 역시 설계 값을 만족시키기에 KSMR Test-bed HP 압축 시스템은 설계 이상의 성능을 보여준다고 할 수 있다.

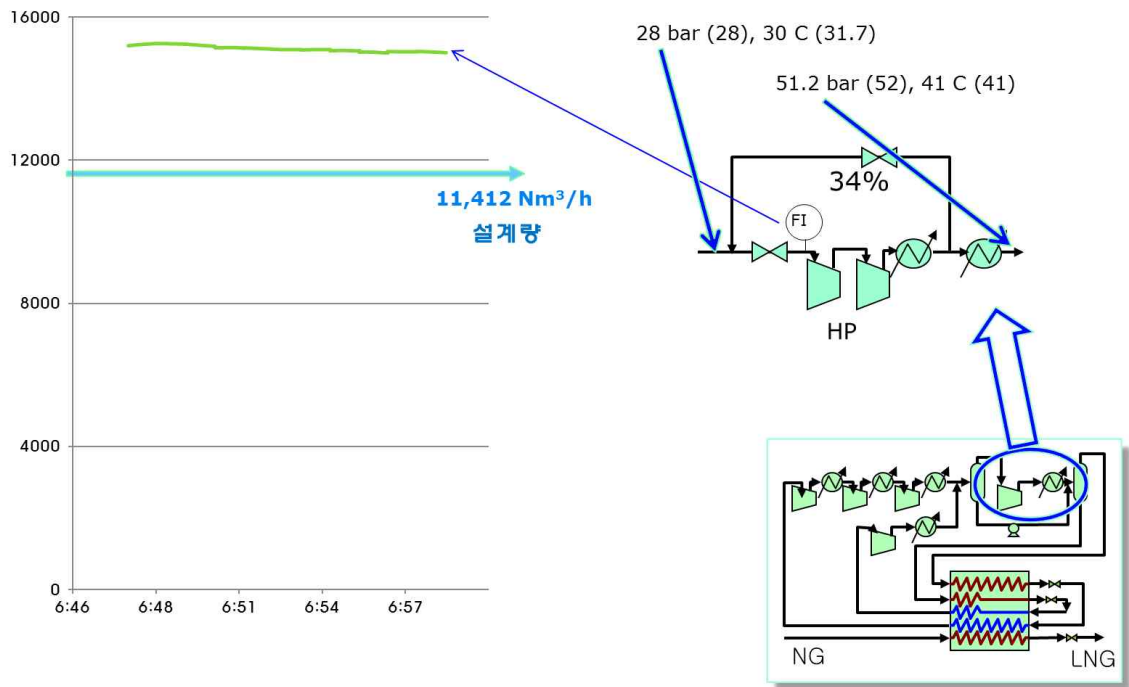


Fig. 2-다-4) 36. KSMR Test-bed HP 압축 시스템의 냉매 유량 압축 능력

KSMR 천연가스 액화공정은 기존의 액화공정과 다른 매우 특이한 온도 구배가 있다. Fig. 2-다-4) 37. 에 그 온도 특이점을 표시하였다. 또한, 2-다-4) 37. 에 각 공정 흐름 위치의 온도 및 압력과 유량을 표시하였는데, 가운데 점선 원으로 표시한 부분이 KSMR 천연가스 액화공정의 특이한 온도 구배이다. 그 부분은 LK 냉매와 HK 냉매가 만나는 부분으로, 각각이 40 C 상태로 돌이 만난 다음에 31.75 C로 온도가 떨어지는 것이다. 이 부분이 처음 개발 때 부터 많은 논란이 있었던 부분인데, 이렇게 된 이유가 HK 냉매가 기·액이 혼합된 냉매 상태 이기 때문이다. 기·액이 혼합된 HK 냉매가 LK와 혼합되면서 새로운 평형상태로 되는데, 이때 HK 액체 냉매 일부가 기화되는 형태의 평형 조건이기 때문이다. 이렇게 증발된 액체 냉매는 증발 잠열을 필요로 하는데, 이러한 이유로 냉매의 온도가 떨어지는 현상이다. 물론 열역학적으로 증명을 하였지만, 실제 공정의 운전에서도 그러한 온도 하강 효과가 발생된 수 있다는 것이 KSMR 액화공정의 성공 여부를 결정하는 매우 중요한 특이점이었다.

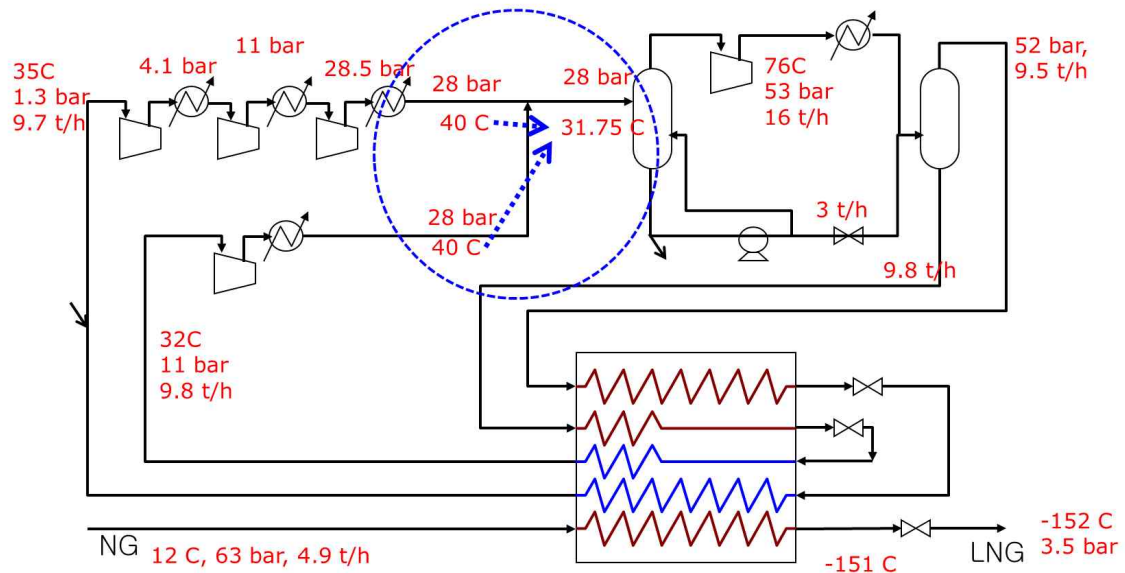


Fig. 2-다-4) 37. KSMR Test-bed 의 냉매 혼합 온도 특이점

Fig. 2-다-4) 38. 에 KSMR Test-bed 의 냉매 혼합 온도 특이점에 대한 실험 결과를 표시하였다. 그림은 2018.11.04 에 발생된 Data로 앞의 LK 압축기 및 HK 및 HP 압축기에 사용된 Data와 동일 시점인 6시 59분의 공정 Data이다. 그림의 Data에서 28 bar 상태의 두 유체, LK와 HK는 각각 39 C 및 36 C 이었으며, 혼합한 이후에는 30.02 C로 떨어지는 것으로 알 수 있다.

이러한 LK 및 HK 냉매의 혼합에 의한 온도 하강 효과는 예시된 2-다-4) 38. 그 시간에만 나타난 것이 아니다. Fig. 2-다-4) 39. 에 2018.11.09부터 2018.11.14 사이에 나타난 온도 하강 효과를 그래프로 표현하였다. 그림에서 40 C 부분에 나타난 초록 (흑백으로 본다면 흔들림은 크지만 39 C ~ 41 C 사이에만 나타나는 그래프) 부분이 LK MR 이고 빨강 (흑백으로 본다면 흔들림은 적지만 35 C ~ 45 C 사이에 움직임이 나타나는 그래프) 부분이 HK MR인데, 이 둘이 합쳐지면 아래 노란색의 Mixed MR로 표현된다. 즉, 약 40 C의 두 LK와 HK 냉매가 혼합되면 약 31 C의 혼합 냉매로 온도가 하강된다는 것이다.

이러한 냉매 혼합에 의한 온도 하강은 압축기 성능을 많이 올릴 수 있게 되어, 전체적으로 KSMR 공정의 높은 효율이 가능하도록 하는 부분이다. 본 KSMR Test-bed 시험운전을 통

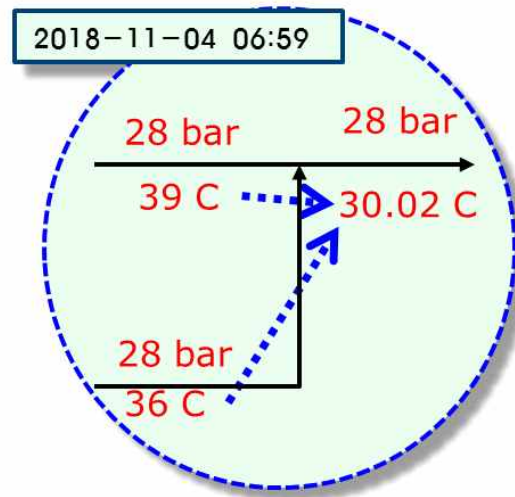


Fig. 2-다-4) 38. KSMR Test-bed 의 냉매 혼합

온도 특이점의 실험 결과
하여 KSMR 온도 특이점을 증명하였다.

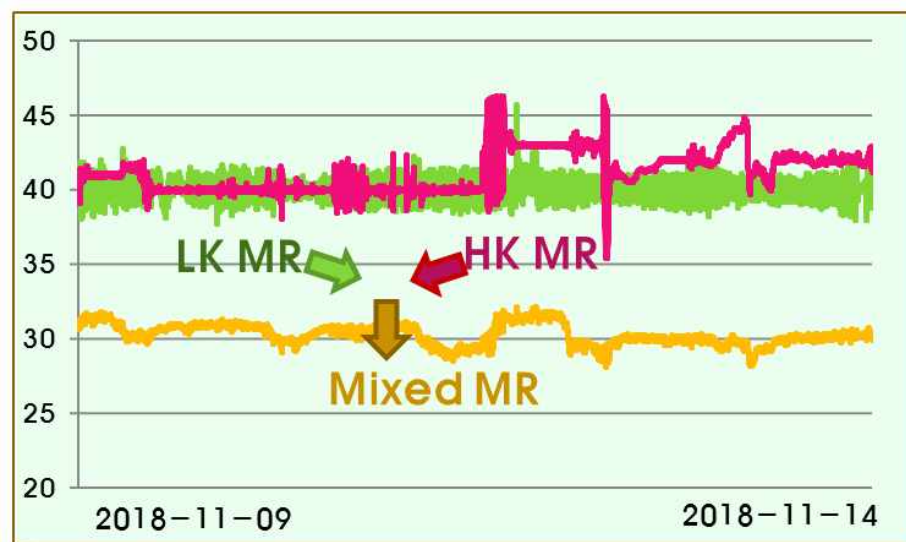


Fig. 2-다-4) 39. KSMR Test-bed 의 냉매 혼합 온도 특이점의 실험 결과

그래프

Fig. 2-다-4) 40. 은 KSMR Test-bed LK 냉매 구성에 대한 설계 값 및 실험 값을 표현하였
다. 그림에서 C1, C3 등의 큰 부분을 차지하는 냉매의 경우는 물론 N2 와 C2 같은 냉매의

경우도 오차 범위 안에 있다고 할 수 있다. 또한 2-다-4) 41. 에 KSMR Test-bed HK 냉매 조성에 대한 설계 값 및 실험 값을 표현하였는데, LK 결과처럼 냉매 조성들이 설계 오차 범위 안에 있다고 할 수 있다.

LK MR (AE-341) Mol%	K-2301N 1 st Discharge	
	Design	Actual
N2	5.3 %	4.2 %
C1	40.6 %	42.2 %
C2	17.6 %	16.4 %
C3	36.5 %	35.6 %
C4+	0 %	0.4 %
Sum	100%	98.8 %

Fig. 2-다-4) 40. KSMR Test-bed LK

냉매 조성 (설계 값 및 실험 값)

HK MR (AE-304) Mol%	K-2303N Discharge	
	Design	Actual
N2	1.2 %	0.9 %
C1	16.7 %	18.1 %
C2	17.0 %	14.3 %
C3	65.2 %	62.7 %
C4+	0 %	0.98 %
Sum	100%	97.6 %

Fig. 2-다-4) 41. KSMR Test-bed HK

냉매 조성 (설계 값 및 실험 값)

여기까지 KSMR Test-bed의 압축기 및 냉매에 대하여 분석해 보았다. 다음은 KSMR의 MCHE 특징에 대하여 분석해 보겠다. 2-다-4) 42. 의 아래에 KSMR 액화공정을 표시하였는데, 점선 원으로 열교환기 부분을 표시하고, 이를 윗부분에 다시 표시하였다 (1번 열교환기 모델). 또한 이 열교환기를 바로 오른쪽의 두 개로 된 열교환기로 다시 표현하였는데, 열교환기 만 두 개로 나눠서 표현했을 뿐 구조적으로 동일하다 (2번 열교환기 모델). 그리고, 한 냉매 흐름을 고온 열교환기에서 분리하여 저온 상태로 바로 압축기로 들어가는 것을 그 아래에 다시 그려 보았다 (3번 열교환기 모델).

1 번 열교환기 모델은 1개의 천연가스 흐름에 Cold Stream이 2개이고 Hot Stream이 두 개인 MCHE로 Fig. 2-다-4) 43. 의 N2 Deal Expander Cycle의 MCHE 특징과 동일하다. N2 Deal Expander Cycle의 MCHE에도 1개의 천연가스 흐름에 Cold Stream이 2개이고 Hot Stream이 두 개가 있다. 즉, KSMR Test-bed에 사용된 MCHE는 KSMR 액화공정만의 특징이 있는 MCHE가 아니라 상용으로 널리 사용되고 있는 N2 Deal Expander Cycle의 MCHE와 같은 구조 같은 기능의 열교환기인 것이다.

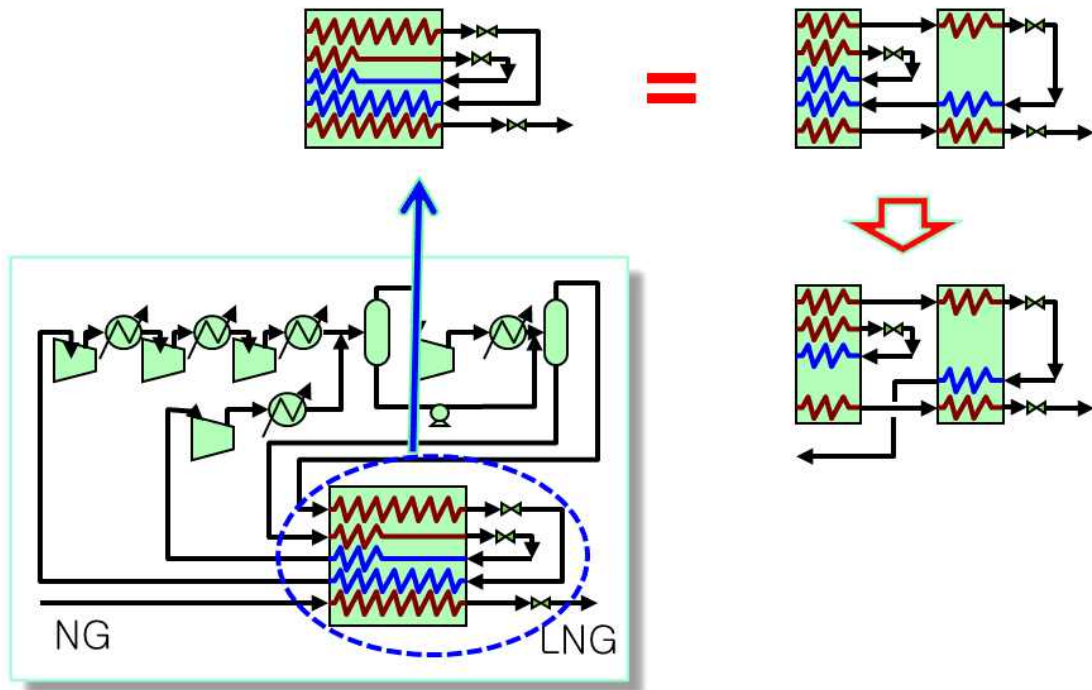


Fig. 2-다-4) 42. KSMR MCHE 특징

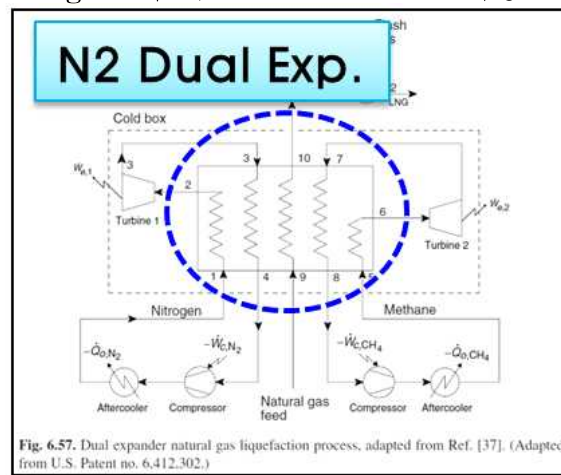


Fig. 2-다-4) 43. N2 Deal Expander Cycle의 MC

HE 특징

또한, 1 번 열교환기 모델의 확장형인 3 번 열교환기 모델의 경우는 2-다-4) 44. 의 DMR Cycle의 MCHE 특징과 같은 형태인 것이다.

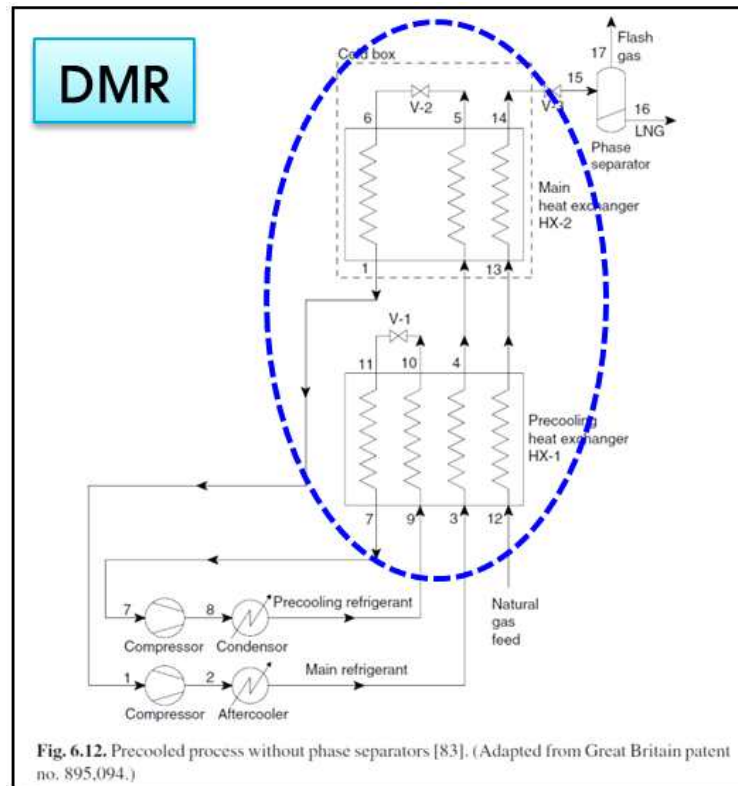


Fig. 2-다-4) 44. DMR Cycle의 MCHE 특징

이러한 N2 Deal Expander Cycle 이나 DMR Cycle의 경우 이외에도, 가장 널리 사용되는 Fig. 2-다-4) 45. 의 C3MR MCHE의 경우를 보더라도 KSMR보다 많이 복잡하기에 KSMR 공정의 MCHE는 기존의 MCHE 시장에서는 특별한 열교환기가 아니다.

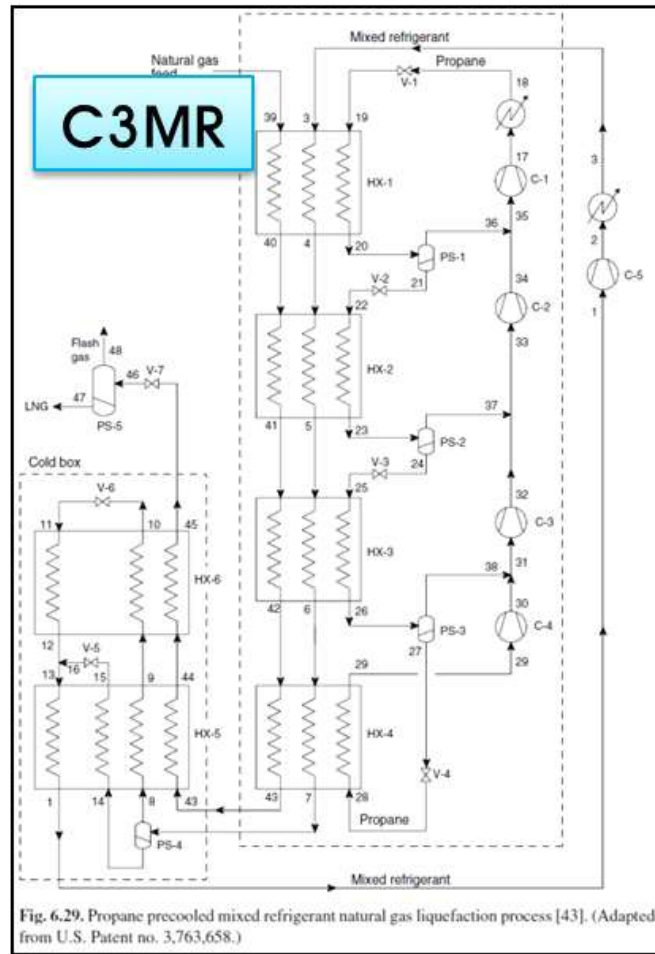


Fig. 2-다-4) 45. C3MR Cycle의 MCHE 특징

MCHE 열교환기가 정상이라 가정하였을 때, KSMR Test-bed 시험운전이 성공적으로 완료할 수 있음을 Fig. 2-다-4) 46. 에 표현하였다. 그림에서 표현된 내용은 크게 2가지를 볼 수 있다. 냉매 압축 시스템이 정상 상태로 운전할 수 있으며, 또한 KSMR 특이점이 잘 표현되어서 효율 향상을 검증할 수 있냐는 것이다.

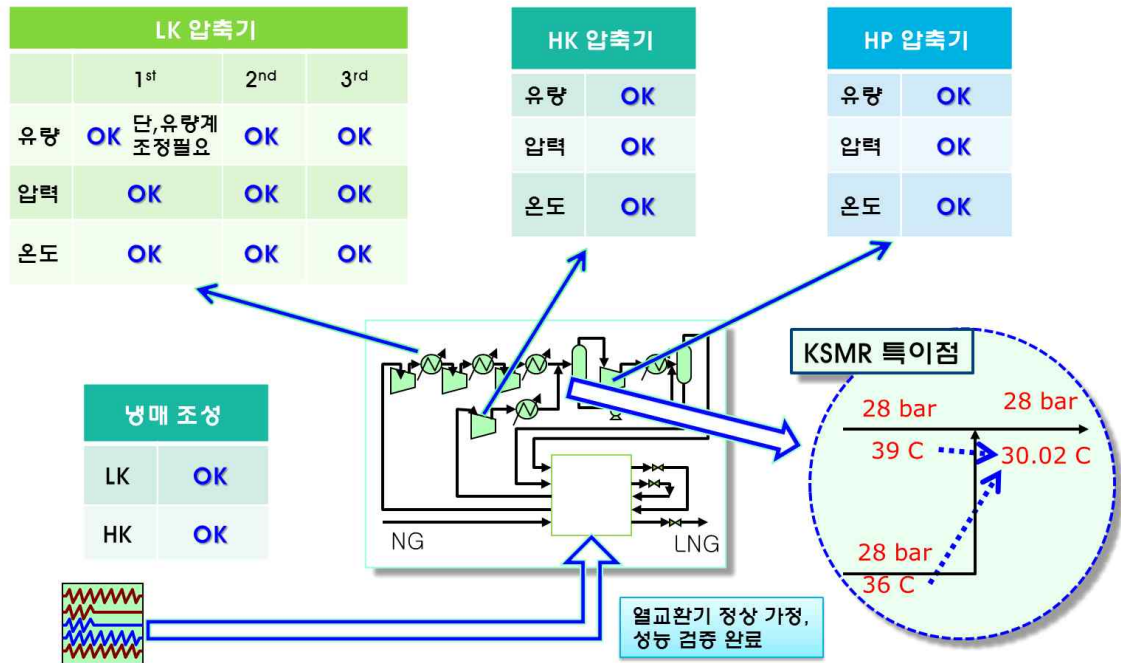


Fig. 2-다-4) 46. KSMR Test-bed 성능 검증을 위한 시험운전 완료 개념도

Fig. 2-다-4) 46. 에서 LK, HK, HP 압축 시스템 모두 정상 이상의 유량을 보였으며 (단, LK 1st 단은 유량계의 조절이 필요), 압력과 온도 역시 정상 상태를 보였기에 열교환기에 정상 유량을 보낼 수 있음을 검증하였다. 또한, 그림의 오른쪽 아래에 보이듯이 KSMR의 온도 하강 특이점도 시험운전 결과로 잘 검증되었음을 알 수 있다. 구축된 KSMR Test-bed는 LNG 100 ton/day 생산의 냉열을 MCHE에 공급하고 있음이 검증되었다. 이러한 이유로 MCHE 흐름의 전·후단 유량 및 온도 압력 값이 보장될 수 있으며, 선진사의 MCHE 도입, 혹은 완전히 검증된 MCHE를 그 자리에 놓는다면, 이러한 보장된 흐름이 MCHE의 성능을 보장할 것이다. 선진사들도 그러한 설계 유량 및 온도 압력 값으로 MCHE를 설계하고 제작 및 납품하기에 주어진 유량의 조건만 맞는다면 (열교환기에 문제가 없다면) 당연히 성능이 나오는 것이다. 또한, Test-bed 운영을 통하여 검증된 KSMR의 온도하강 특이성도 KSMR의 성능의 높은 효율을 검증하고 있다.

라) 2차 시험운전 결론

KSMR 액화공정은 LNG플랜트사업단을 통하여 가스공사가 개발한 천연가스 신액화공정이다. LNG플랜트사업단이 이러한 KSMR 신액화공정의 운전성과 성능을 검증하기 위하여 Test-bed를 인천생산기지에 구축하였으나, 2017년도 현장 여건상 LNG플랜트사업단의 Test-bed 운영을 완료하지 못했다.

2.다.4) 절의 결과분석에 따르면, KSMR의 냉매 압축시스템은 Test-bed 설계에 부합되는 유량, 압력, 온도, 냉매 조성을 보이기에 설계 목표인 100 ton/day의 냉열을 열교환기에 공급한다고 하였다. 특히, KSMR 냉매 압축시스템은 LK와 HK가 병렬로 압축되어 고압상태에서 하나의 냉매로 혼합되는 매우 특이한 구조로 매우 도전적인 상황이었지만 문제없이 운전하였다. KSMR 신액화공정은 압축시스템 안에서 LK와 HK 혼합 시 온도가 하강되는 열역학적으로도 매우 흥미로운 특이점이 있는데, 결과분석에 나오듯이 설계 현상이 그대로 재현되었으며, 이 부분이 KSMR의 고효율을 나타낸다고 할 수 있다.

KSMR 신액화공정은 Fig. 2-다-4) 47. 에 보이듯이 공정 특허, 신기술 검증, 기술설계, 상세설계, Test-bed 건설하였다. 또한, Test-bed 시운전을 통하여 LNG 100 ton/day 생산용량의 냉열이 MCHE에 공급되는 있음을 확인하였다.

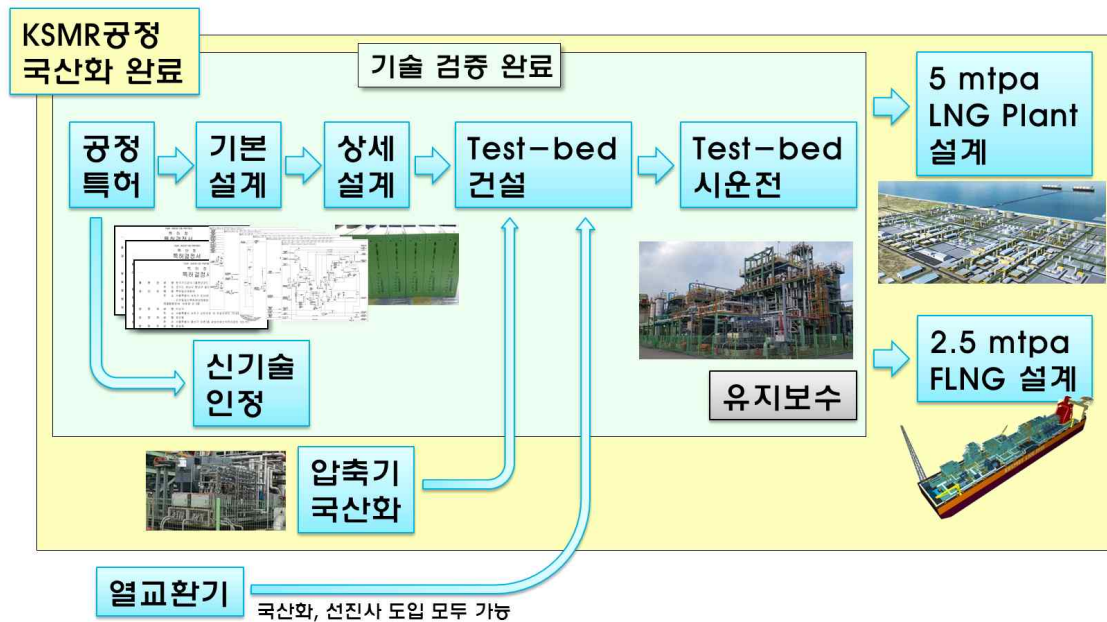


Fig. 2-다-4) 47. KSMR 천연가스 액화공정 기술 검증 단계 및 사업화 목표

본 결과를 통하여 ①LNG플랜트사업단이 구축한 *Test-bed*는 *MCHE* (주열교환기; 사업단 연구성과품)의 문제로 생산 목표인 100 ton/day 에 도달할 수 없음을 확인하였고, (2019년 6월 현재, LNG플랜트사업단은 시험운전 재개를 위하여, 본 시험운전 결과에 따라 *MCHE* 설계를 개선하고 재제작하고 있음) ② *KSMR*의 가장 큰 특징인 온도하강 특이점을 검증하였고, ③ *KSMR* 신액화공정 냉매 병렬·혼합 압축시스템의 운전 안전성을 검증하였고, ④ 구축된 *KSMR Test-bed*는 *LNG* 100 ton/day 생산의 냉열을 열교환기에 공급할 수 있음을 확인하였다. 그 무엇보다도 안정적으로 시험운전을 완료하였고, 이에 따라 *KSMR* 시험운전 절차서를 완성할 수 있었다.

이 결과를 바탕으로 사업단 각 기관들은 협력하여, *KSMR Test-bed* 3차 시험운전을 준비하였다.

5) KSMR Train-2 3차 시험운전

가) 시운전 체계 구축

(1) 대외 협력

앞의 2-다-3)-가) 장에 설명되었듯이 2017년도의 시험운전은 인천시 및 연수구청의 정지 요청으로 시험운전이 연기되었기에, 지난 2018년도 및 이번 2020년도 시험운전에서도 대외적인 설명이 절대적으로 중요하였다. 특히, 이번 2020년도에는 현수막을 15개나 설치하였다.

(가) 안전협의체 보고

2020년도 8월 12일에 인천생산기지와 인천시와 구성한 인천생산기지 안전협의체에 2020년도 시험운전에 대하여 보고하여 안전 운전 수행을 지시받았음.

<안전협의체에 보고한 정보 공개 계획>

1) 시험 시작 전, 정보 공개

- 전국 에너지 신문 등: KSMR Test-bed 운영
- 인천 및 연수구 신문: Test-bed 및 소각탑 양해
- NIB 남인천 방송 자막 안내 예정
- 연수구청 전광판
- 현수막 설치: 인천기지 방향과 입구, 인천신항 근처 등

2) 시험운전 관련 관공서 통보: 인천시, 연수구, 경찰서, 소방서, 인천소방지휘본부 등

3) 계획된 소각탑 소각 시, 정보 공개

- 인천시, 연수구, 경찰서, 소방서, 인천소방지휘본부 등

(나) 언론 매체 (에너지 신문 등)

KOGAS

한국가스공사

보도자료

정부혁신
보여주는 정부

2020년 8월 31일(월)부터 보도하여 주시기 바랍니다.

담당부서	가스연구원 LNG기술연구소 이상규 단장(☎032-810-0351) 이철구 수석연구원(☎032-810-0215)
자료문의	양기철 부장 이리라 팀장(☎032-810-4517)

가스공사, 한국형 액화공정(KSMR) 시험설비 가동

천연가스 액화공정 라이센스 및 기본설계 원천기술 보유가 목표

□ 한국가스공사(사장 채희봉)는 8월 31일 한국형 천연가스 액화공정 시험설비인 'KSMR™' 테스트베드(Test-bed)의 성능 검증을 위해 본격적인 가동과 함께 지역사회의 협력과 공조를 부탁하였다.

○ KSMR™ 테스트베드는 2008년부터 국토교통부 정책연구로 추진하고 있는 LNG 플랜트 사업의 핵심 성과물이며, 하루 100톤 규모의 천연가스를 액화 처리하는 연구시험설비로 인천 LNG 기지에 설치해 가동하였다.

□ 한편, 기저부하용 천연가스 액화공정 라이센스 및 기본설계 기술은 미국·독일 등 일부 선진국만 보유하고 있는 핵심 기술로, 가스공사가 이번 성능 검증을 성공적으로 마치고 관련 라이센스를 획득하면, 해외 천연가스 액화플랜트 시장에서 세계 유수 메이저 기업들과 어깨를 나란히 할 수 있는 계기가 될 것으로 기대된다.

□ 한국가스공사 LNG플랜트사업단 이상규단장은 “한국형 천연가스 액화 공정 개발연구의 성과물에 대한 최종 성능시험을 안전하게 운영하여 계획된 일정내에 성공적으로 수행하겠다.”는 의지를 표명하였다. 또한, 시험과정 중 인천기지 내 연소탑에서 불꽃이 관찰될 수 있으나, 이는 시험가동 중에 발생할 수 있는 정상적인 과정이라며 시민여러분들의 협조와 양해를 구하였다.

Fig. 2-다-5) 1. 보도자료

(다) NIB 남인천 방송 자막

가스공사, 한국형 액화공정 시험운전 안내

한국형 천연가스 액화공정(KSMR) 시험설비의 성능 검증을 위한 시험운전 사항을 알려드리오니 참고하시기 바랍니다.

일 시 2020년 8월 31일 ~ 10월 30일

장 소 한국가스공사 인천LNG기지

한국형 액화공정 설비(KSMR)

국내 엔지니어링 사업 육성을 위해 국토교통부가 정책과제로 12년간 추진한 LNG플랜트 사업의 핵심 성과물

알 림 운전중 연소탑에 불꽃이 관찰될 수 있으나, 이는 시험운전에 따른 정상적인 점화로 안전합니다.

한국가스공사 가스연구원 (032-810-0351, 032-810-0215)

Fig. 2-다-5) 2. NIB 남인천 방송 자막

(라) 연수구청 전광판

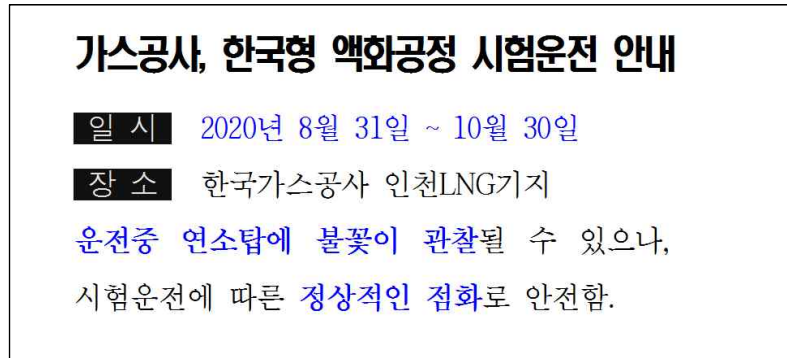


Fig. 2-다-5) 3, 연수구청 전광판 문구

(마) 시험운전시 관공서 통보

시험 운전 시작하기 전에 관공서에 방문하여 시험설비 운전관련 설명 및 이해를 얻음.

- 인천시청
- 연수구청
- 연수경찰서
- 연수소방서 및 인천소방지휘본부

(바) 송도 신도시 현수막 설치

시험 운전 시작하기 전에 송도 신도시 내에 15개의 현수막 설치하였음.

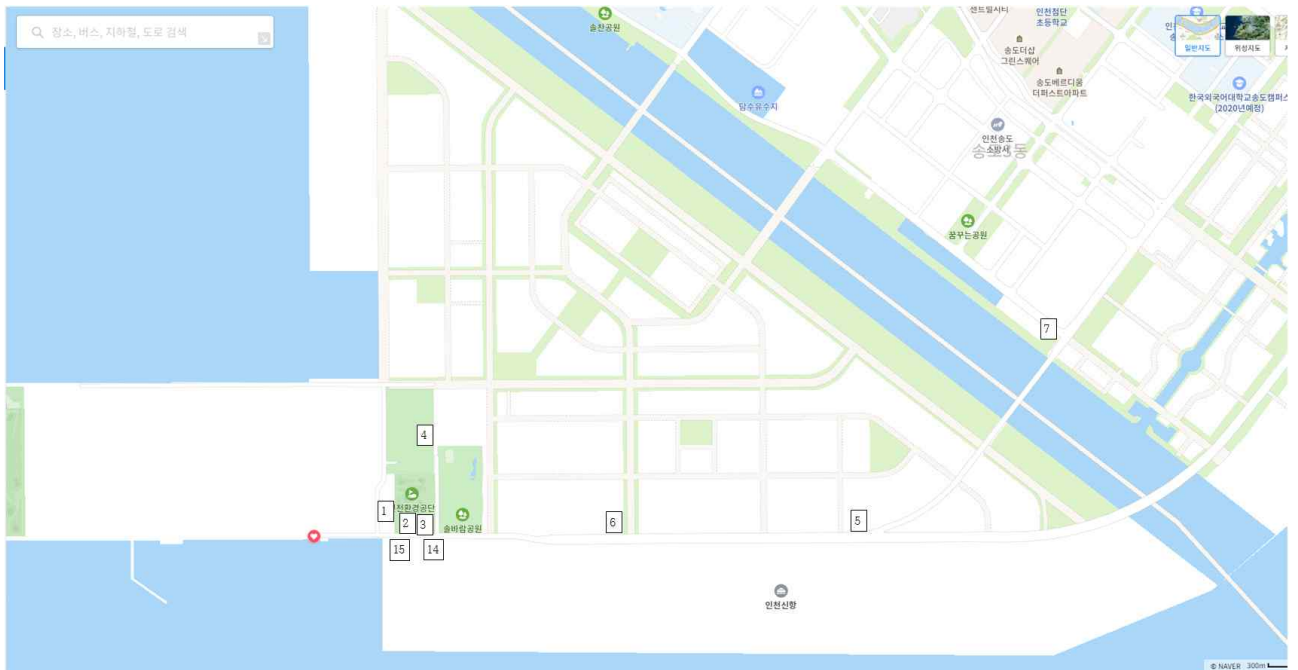


Fig. 2-다-5) 4. 송도 시내 현수막 위치 1~7, 14, 15

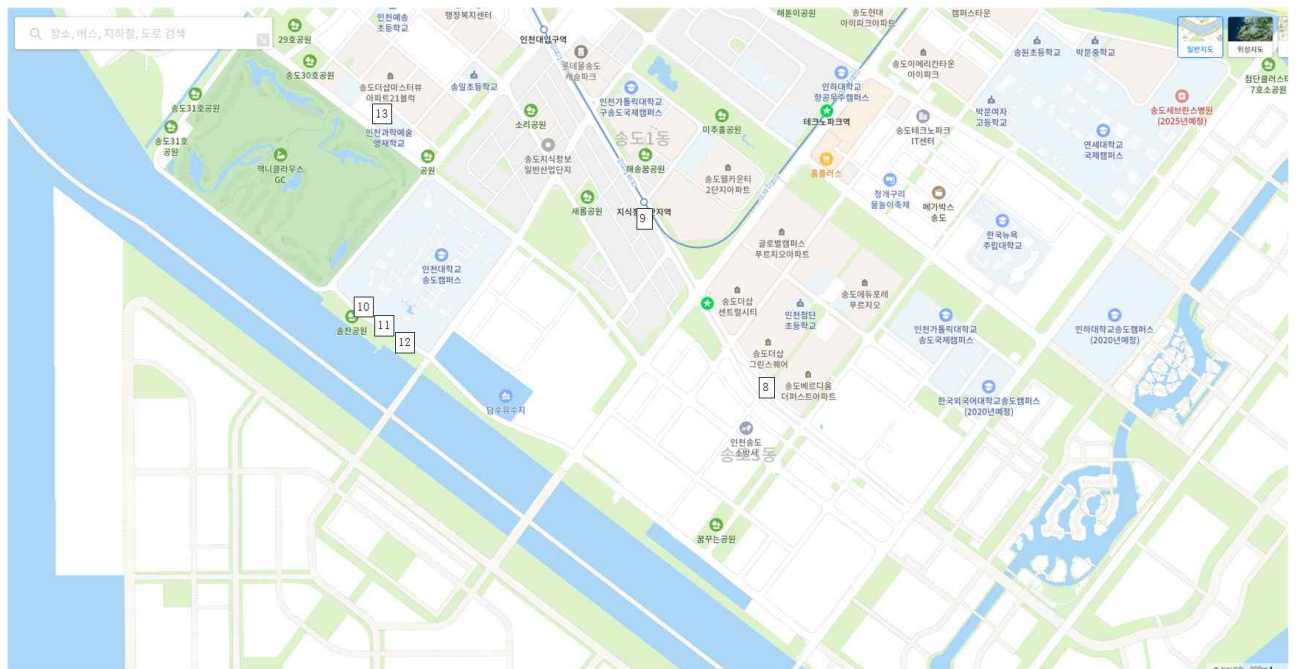


Fig. 2-다-5) 5. 송도 시내 현수막 위치 8~13



1.jpg



2.jpg



3.jpg



4.jpg



5.jpg



6.jpg



7.jpg



8.jpg

Fig. 2-다-5) 6. 송도 시내 현수막 1 ~ 8



9.jpg



10.jpg



11.jpg



12.jpg



13.jpg



14.jpg



15.jpg

Fig. 2-다-5) 7. 송도 시내 현수막 9 ~ 15

(2) 대내 지원체계

(가) 시험운전 주요일정 및 지원계획

- 시험운전 준비기간(~'20.08.31)

시험운전 주요일정	주요 지원 내용
○ MCHE 교체 (07.01) ○ 설비 점검 및 보수(~08.31) - Air Blowing - Motor Solo Run - Leak Test - Compressor MRT - N2 inert & defrosting ○ 교육 - KSMR 공정 교육	○ 교대근무 계획 수립 ○ Pilot 설비 정상 사용 준비 ○ 안전관리방안 마련 ○ 시험운전 세부지원 계획 작성 ○ 현장 감독 및 안전관리

Table 2-다-5) 1. 시험운전 준비기간 일정

- 시험운전 기간('20.09.01 ~ 시험운전 종료시)

시험운전 주요일정	주요 지원 계획
○ Start-up - 냉매수분제거 및 충전 - NG 퍼지 - LK 압축기 가동 - HK 압축기 가동 - 압축기 연결 운전 - Cool down by JT - 최종 Cool-down ○ Normal Operation - LNG생산 - Performance Test ○ Shut Down	○ 교대근무 실시(5조 3교대) ○ Pilot 설비 정상 운영 ○ 시험운전 인력지원(공정 엔지니어) ○ 연구안전환경팀 안전관리 지원

Table 2-다-5) 2. 시험운전 기간 일정

- 시험운전 종료 후

시험운전 주요일정	주요 지원 내용
○ 시험데이터 분석 ○ 결과 보고	○ 시험운전 결과 보고 ○ Pilot 설비 원상복구 ○ 향후 테스트베드 운영방안 수립

Table 2-다-5) 3. 시험운전 종료 후 일정

(나) 시험운전 조직 체계

- KSMR Test-bed의 운영을 위해서는 Pilot 설비의 지원 역시 필수적이기에, LNG기술연구소에 Test-bed 운영 조직과 Pilot 설비 운영 조직의 2개가 필요. 단, 직접적인 Test-bed 시험운전은 위탁용역 기관인 GS건설이 수행한다.
- 인력운영은 시험운전 일정 및 안전운전에 따라 일부조정 가능함
- Pilot 설비 운영을 위한 5조 3교대 인원 구성은 시험운전 가동 시작 이전에 구성함.
- 플랜트의 공사·점검·보수 등에 있어서 휴일 작업에 입회한 주말 공사 감독자와 휴일 시험운전에 근무한 지원 엔지니어에 대하여 대체 휴무 수행

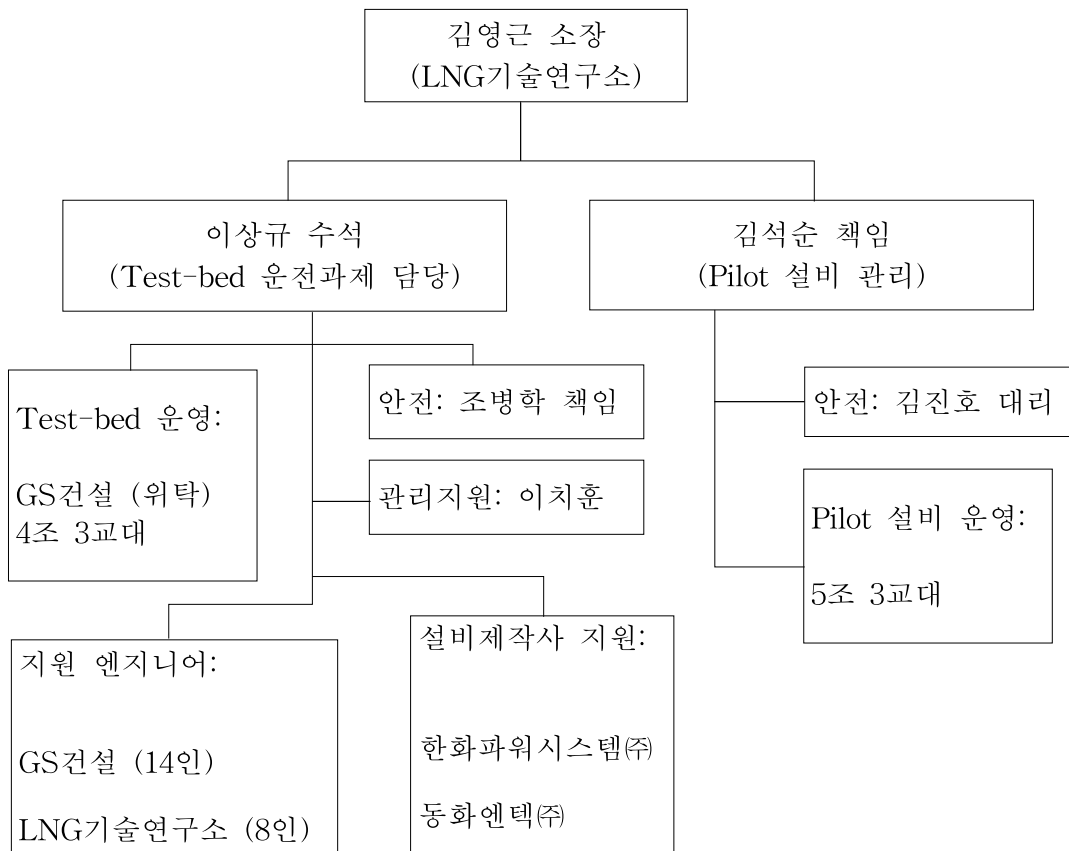


Fig. 2-다-5) 8. 기능에 따른 시험운전 조직 구성

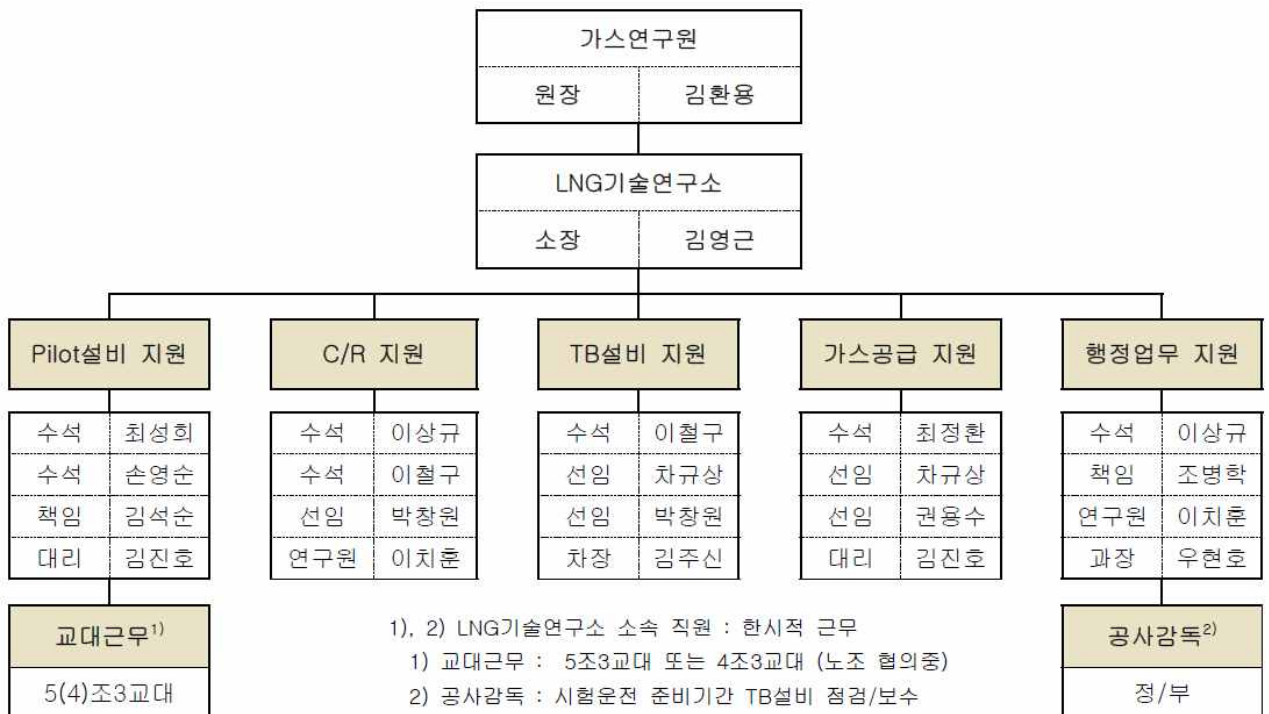


Fig. 2-다-5) 9. 시험운전 지원조직 체계

(다) 조직별 세부 지원계획

- Pilot 설비 지원

주요 역할	천연가스 공급 계통 및 유틸리티 현장작업, 교대근무 편성
담당자	최성희, 손영순, 김석순, 김진호
수행역무	1. 시험운전 준비기간 중 유틸리티(공사보유분) 및 설비 운영 준비 2. 교대근무 조 편성 및 수당 산정 2. Feed Gas 인입 준비 3. 유틸리티 공급 준비 3. 안전점검 활동 4. 시험운전 종료 후 Pilot 설비 원상복구 5. 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 기타 : 비상조치 방안 및 시운전절차서 확보 및 숙지

Table 2-다-5) 4. Pilot 설비 지원

- 교대근무

주요 역할	유틸리티(공사보유분) 설비관리
근무 형태	5(4)조 3교대 (상시 1인 Pilot C/R 근무)
근무 인원	LNG기술연구소 소속 직원
수행역무	1. 유틸리티(공사보유분) 설비 관리 2. 천연가스 및 유틸리티 공급 관리 3. 안전점검 활동 4. 시험운전 종료 후 Pilot 설비 원상복구 5. 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 차량관리 7. 작성자료 - 교대근무일지 - Pilot CR 로그시트 (유틸리티 부분)

Table 2-다-5) 5. 교대 근무

- C/R 지원

주요 역할	테스트베드 시험운전 지원
담당자	이상규, 박창원, 이치훈
수행역무	1. 시험운전 중 계통상태 및 인력현황 확인 2. Start-up/정상운전/Shut down에 따른 계통 운영지원 3. 압축기 가동 및 냉매주입 현장지원 4. LNG 생산 계통 현장지원 5. 인천기지 C/R 및 유관기관 상황보고 연락체계 유지 4. 안전점검 활동 5. 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 기타 - 시험운전 일일회의 주관(매일) : 회의록 공동 작성 - 시험운전 자료 확보 및 분석 - 일일 상황 전파(sns 활용) - 시험운전 결과분석 및 보고

Table 2-다-5) 6. C/R 지원

- TB설비 및 가스공급 지원

주요 역할	테스트베드 시험운전 설비 지원
담당자	이철구, 최정환, 차규상, 박창원, 권용수, 김주신, 김진호
수행역무	1. 압축기 및 열교환기 설비 지원 2. 냉매 공급 지원 : C2, C3 공급 및 Dryer 가동 지원 3. 질소 공급 지원 : purge, defrosting 등 4. 고압 Feed gas 공급 지원(시운전 시작/종료 시점) 4. 전기 및 계장설비 : 전기실, DCS, 계측기 관련 사항 지원 5. 안전점검 활동 및 비상상황 발생 시 조치 및 보고 6. 기타 - 필요시 담당설비에 대한 C/R조 주관 일일회의 참석 - 문제발생 시 원인 및 결과분석

Table 2-다-5) 7. Test-bed 설비 및 가스공급 지원

- 행정업무 지원

주요 역할	외부인 출입, 대내외 협력, 위탁용역관리 등
담당자	이상규, 이철구, 이치훈, 우현호
수행역무	1. 관련 자료작성 및 보고 2. 대내외 협력 - 인천기지/지역관공서/본사/LNG플랜트사업단 협조사항 협의 3. 출입신청업무(출입관리, 외부인안전교육) 4. 위탁용역(GS건설) 관리 5. 기타 - 주요 기록자료 양식작성, 현장비치 및 취합보관 - 시험운전 중 비용수반 긴급 처리(자재 공급, 수리) 협조

Table 2-다-5) 8. 행정업무 지원

(3) 안전관리 체계

(가) 안전관리 추진계획

((가)) 안전관리 체계 및 협력체계 구축

- 안전관리 조직은 법적 이원화 체계
 - Pilot Tank 설비는 도시가스사업법, 테스트베드 Train-2는 고압가스안전관리법에 해당하는 설비.
 - 별도의 법 적용에 따라 안전관리 조직을 이원화하여 운영함이 원칙.
- 실질적 안전관리는 효율적 통합운영
 - 안전관리 활동의 효율성을 고려하여 실질적인 안전관리 체계는 통합하여 운영
 - CR운영지원 총괄책임자(이상규 수석)를 중심으로 안전관리원, 교대근무자, 현장지원인력 및 협력업체 인력이 협력하여 Test-bed 현장 안전관리 활동 공동 수행

((나)) 신속한 상황보고 체계구축 및 비상 대응능력 강화

- 상황 발생시 신속한 대내·외 보고체계 구축
 - 현장지원담당자와 인천생산기지 CR간 상시 연락체계 구축
 - 대내·외 상황 발생시 보고체계 구축 및 현장 비치
- 비상상황 발생시 조치계획 수립

((다)) 안전관리 활동 강화

- 시험운전 준비기간 중 위험요인 정비 철저
 - 정비기간 : ~20.08.31
 - Pilot 설비담당 및 안전관리자 중심으로 매일 현장설비 점검 수행
 - 위험요인 발생시 즉각 보고 및 대응조치(가스기술공사 경상정비 수행 포함)
- 시험운전관련자 안전교육 실시
 - 실시시기 : 시험운전 시작전(~ '20.09.01 이전)

- 실시장소 : 인천기지내 소방서
- 대상인원 : 협력업체 인력중 시험운전 관련 해당설비 출입자
(단, 6개월 이내 해당교육을 이수한 인원 제외)
- 연구안전환경팀 인력 지원
 - 지원기간 : '20.06.15 ~ 시험운전 종료시
 - 지원방안 : LNG기술연구센터 요청에 의해 필요시 지원
 - 시험운전 기간중 위험작업 등 안전점검 활동 공동 수행
- 인천생산기지 안전환경팀과 업무협력
 - 협력방안 : 상호 협력사항 및 상황 발생시 상호 요청에 의해 회의개최
 - 안전점검, 비상대응 계획, 업무분장 등 협의(소방차 배치 등)
- 시험운전 시작전 가스공사 주관 합동안전점검 실시
 - 점검기간 : '20.08.28(금) 오전 10:00 ~
 - 시험운전 기간 중 점검 : 09/07(월), 09/14(월)
 - 점검반구성 : 가스공사(LNG기술연구센터, 연구안전환경팀)
사업단(사업단장)
GS건설(안전관리원 혹은 비상대응 담당자)
- 휴일 안전점검 실시
 - 점검기간 : 2020년 추석 연휴기간 및 시험운전 기간중 주말 및 휴일
 - 점검방안 : 사업단 담당자, 가스공사 공사감독(입회자), 교대근무자 상시 점검실시
 - 점검결과 : 교대근무일지(교대근무자) 작성후 안전관리자 통보후 조치
- 비상상황 발생 시 대응 방법 훈련 실시
 - 협력업체 관련 법정(산안법 64조)에 따른 시운전 중 화재, 폭발 가능에 대한 경보체계 운영과 대피방법에 대한 협력업체 훈련 실시
- 코로나19 예방을 위한 정부 지침 준수
 - * 코로나19 예방 및 확산방지를 위한 건설현장 대응 가이드라인(5판)_국토부

(나) 안전관리 체계 및 비상연락망

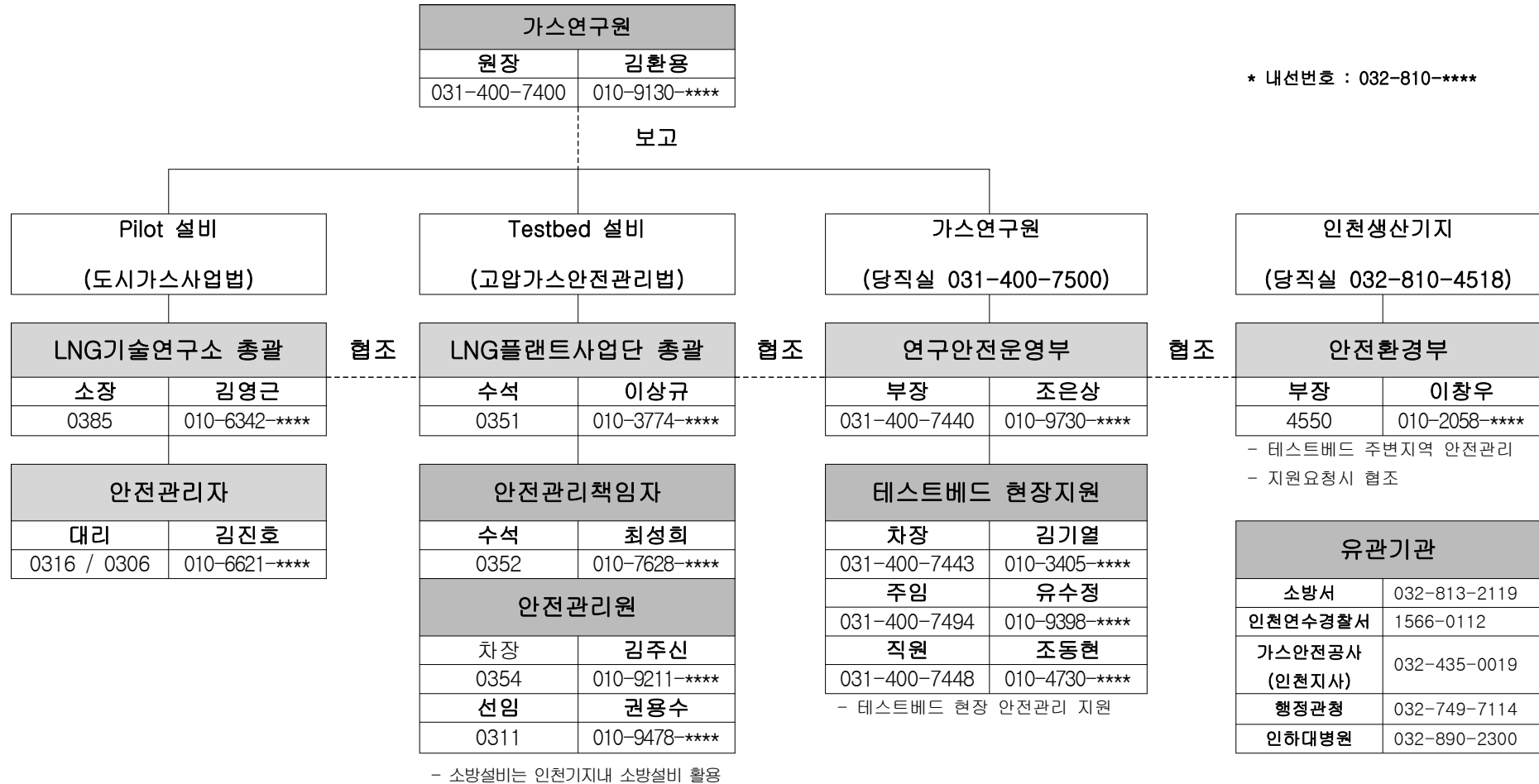
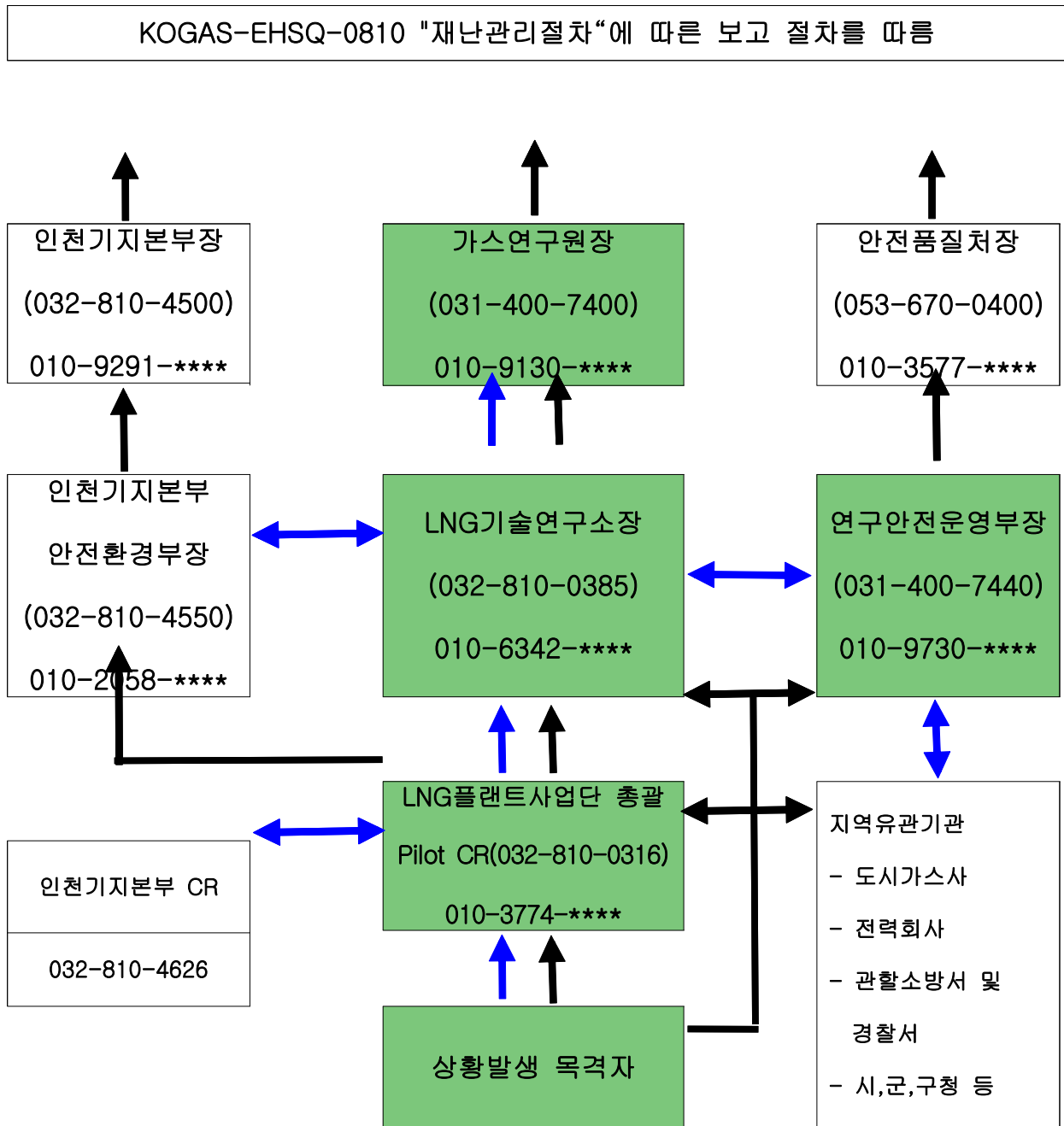


Fig. 2-다-5) 10. 안전관리 체계 및 비상연락망

(다) 상황발생시 보고체계



- ※주 1. → : 즉보[재난(1,2급사고 포함) 발생 및 목격시 보고(평일, 휴일, 주야간 공통)]
2. → : 상황보고 또는 전파
3. 보고 체계중 보고 받은 자가 부재시는 직상위자에게 보고한다.

Fig. 2-다-5) 11. 상황발생 시 보고체계

(라) 비상시 조치 요령

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
1	에틸렌/프로판 Loading	Leak로 인한 가스누출 또는 화재발생	Flexible hose의 노후 파손 및 연결부위 누설	Loading 작업 전 담당 작업자와 Tank Lorry 기사가 함께 hose 및 연결 부위 등 위험발생 가능부위 사전 점검	비상대책반 편성 운영 ※별첨 참조	오태훈
			Tank Lorry 미 접지로 인한 정전기로 인해 가스 누출 시 점화	Tank Lorry 접지 확인 후 Loading 작업 실시		
			Bolting작업 시 Spark로 인해 가스누출 시 점화	Non-Spark Tool 사용		
			Loading시 Flexible hose에 있는 공기가 System으로 유입	Loading전 N2로 대기 Purge후 산소농도 1% 미만 확인 후 Loading		
			Loading후 Flexible hose에 남아 있는 에틸렌이 대기로 방출	Loading후 Flexible hose에 남아 있는 에틸렌을 초저온 Flexible hose를 Flare로 연결하고 N2를 연결하		

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
				여 Purge		
			Tank lorry 주차위치에서 이동으로 인한 Loading Flexible hose 분리에 의한 에틸렌 Leak	Tank Lorry 바퀴에 받침목 설치		
			외부 인원의 오 조작	외부 인원 출입 금지를 위한 작업 주변 통제 및 출입금지 테잎 설치		
		Flare Stack 또는 BOG System 압력 불안정	갑작스럽게 또는 불규칙하게 배출	사전에 가스공사에 통보하고 천천히 조작		
2	In-take and Liquefaction Hydrocarbon Service	Leak로 인한 가스누출 및 화재 발생	Flange 부위의 Gasket 불량 또는 용접부위의 Pin-hole발생, Valve 파손 등에 의한 누설	1. 규정된 Gasket, Valve 사용 및 점검 2. Start-up 전 육안검사, 비눗물검사, 가스누설 탐지기 등을 이용한 철저한 사전점검		오태훈

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
			Bolting작업 시 Spark로 인해 가스누출 시 점화	N2 Hose로 N2 Spray 하면서 Non-Spark Tool을 사용하여 Bolt의 적절한 Torque값으로 체결		
			System에 과도한 산소 유입	Feed gas service 전 산소 농도 1% 미만 확인 후 Feed gas service		
			Flare Stack 또는 BOG System 압력 불안정	갑작스럽게 또는 불규칙하게 배출		
3	복합냉매 냉동기 가동	Valve Leak로 인한 화재 또는 폭발	1. Stem Packing Loose 2. Packing Material 불량 및 마모 3. Bolt 느슨하게 체결 4. Valve Seat나 Disc 마모 5. Valve Disc나 Plug가 Stem에서 이탈	1. N2 Hose로 N2 Spray 하면서 Non-Spark Tool을 사용하여 Bolt의 적절한 Torque값으로 체결 2. Valve Open 시 과도한 Open / 과도한 Close 방지 3. 필요시 Blinding, Plugging , Capping		이완직 이영주

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
				<사전방지 대책> 1. 소화기 비치 및 위치숙지 2. N2 Hose 연결 비치 3. 위험물질제거 4. 현장정리 정돈 5. 풍향확인 (풍향계) 6. 소화용 보호구 비치 및 착용 7. 현장 근무직원 Hydrant 사용 사전 소화 훈련		
4	Cool down	가연성가스 대기누출로 인한 화재	1. Cool Down 시 온도 하강으로 Line이 수축되어 Flange 에서 Gas Leak. 2. Drain / Vent Valve Passing	1. 온도하강시 주기적으로 Flange 부위 가스점검 및 Cold Bolting 실시 2. Drain / Vent Valve를 Cap 또는		이완직 이영주

No.	작업 단계	발생 상황	발생 원인	조치방안		현장 담당자
				사전조치	후속조치	
			으로 인한 Gas Leak.	Blind Flange로 마감조치.		
		Cold Box의 Thermal Shock	1. Cold Box의 각 Stream의 온도차가 너무 크거나, 급하게 온도변화가 있을 때.	1. Cool Down Rate를 14°C/h로 조절운전. 2. Cool Down Gas를 모든 Stream에 동시에 공급		
		K-2301 1단 흡입압력 Over pressure에 의한 PSV Popping *V-2301 (운전압력0.5barg) *V-1401 (운전압력 3.8barg)	1. LK MR Gas의 공급압력이 0.5~0.7barg로 운전.	1. V-2301 K-2301 1단 흡입압력 (PI-541)과 C1의 유량(FI-341)을 관찰하면 조절밸브 (HV-342)로 공급한다. 2. V-1401 Vent 쪽 Valve를 먼저 열고 PI-010을 관찰하면서 Pre-Cool Gas를 Service하고, PIC-043(V-1401)을 3.8barg로 Auto Set한다.		

Table 2-다-5) 9. 비상 시 조치 요령

(마) 비상대책반 편성 운영 (위탁기관)

※지휘조(시운전팀장)는 각 조의 상황 발생 대비 교육을 주기적으로 실시하고 근무 시작 전 안전교육을 실시한다.

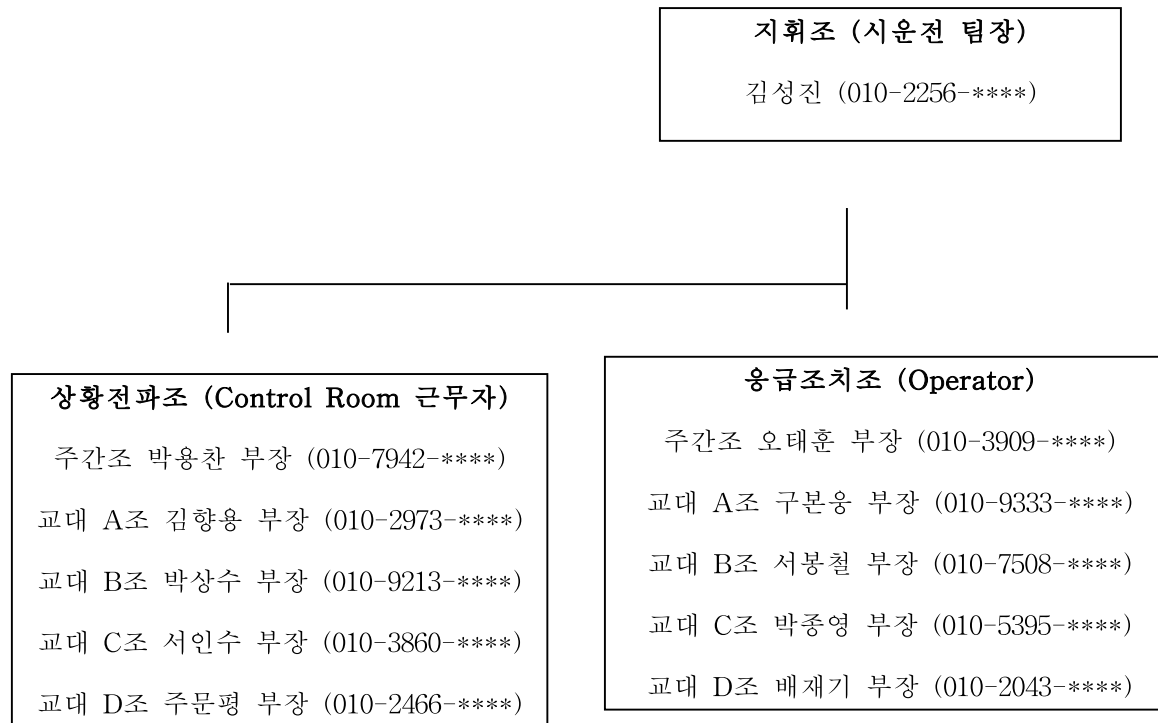


Fig. 2-다-5) 12. 비상대책반 편성 운영

○ 각 조의 역할

- **지휘조** : 신속한 상황 파악 및 현장을 지휘한다.
- **상황전파조** : 상황실, 안전실, 중앙조정실, 소방서 등에 신속한 보고 및 상황을 전파한다.
- **응급조치조**

㉠ 각 중 Vessel에서 가스 누출시

- 방독면 등 신속하게 보호구를 착용한다.
- 배관의 밸브를 잠그고 사용을 중지시킨다.
- 누출부위에는 납마개, 고무시트 또는 납박킹을 씌우거나 박아 넣어 가스의 분출을 막고 가스누출검지기로 누출여부를 확인한다.
 - 가연성물질을 신속히 제거하고 통풍이 양호하도록 한다.

㉡ 배관에서 가스 누출시

- 방독면 등 신속하게 보호구를 착용한다.
- 긴급차단장치 및 가장 가까운 전·후단밸브를 잠그고 사용을 중지한다.
- 누출부위에는 납마개·고무시트 또는 납박킹을 씌우거나 박아 넣어 가스의 분출을 막고 가스누출검지기로 누출여부를 확인한다.
 - 가연성물질은 신속히 제거한다.
 - 화재가 발생하였을 경우에는 소화기로 소화하고 부근의 Vessel에 물을 살수하여 온도상승을 막는다.

(4) 시운전 조직체계 (위탁기관)

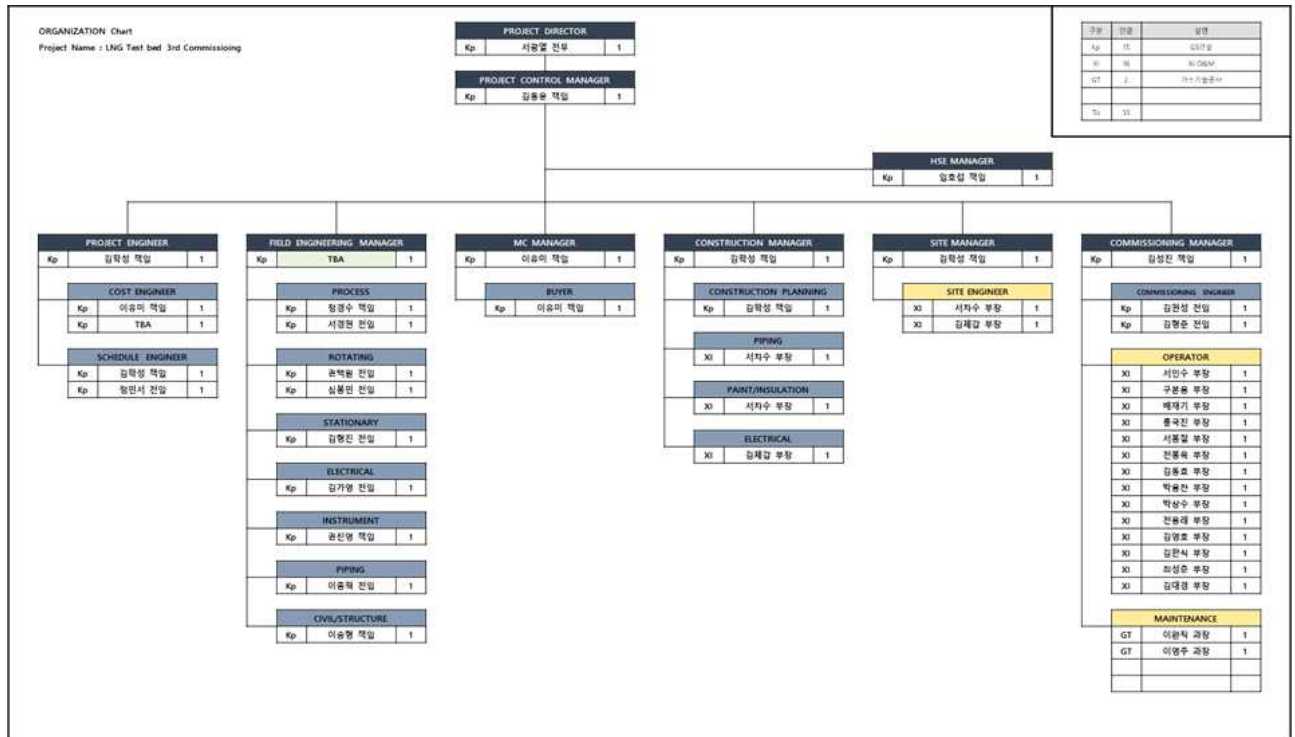


Fig. 2-다-5) 13. 시운전 조직체계 (위탁기관)

#. 주 52시간 근무제 반영 및 시운전의 효율성 증대를 위하여 16명의 인원을 5개조 (교대 4개조, 일근 1개조)로 구성하여 운영

#. 조별 구성

.일근조 4명 : DCS 1명, Field 3명으로 구성

.교대조 12명 : 각 조는 Foreman 1명, DCS 1명, Field 1명으로 구성

나) Pilot 설비 점검 및 운영

(1) Pilot 설비 변경 사항

KSMR Test-bed는 Pilot 설비 지역 안에 있는 설비이기에 인천기지와 NG와 LNG 등을 이송할 때 Pilot 설비를 통과하게 된다. 이전의 1차 와 2차 운전에서는 Pilot 설비 안에 Pilot 저장탱크가 있어서 Test-bed에서 생산된 LNG를 Pilot 저장탱크에 1차적으로 저장한 이후에 Pilot 저장탱크 안에 있는 LNG Pump로 LNG를 가압하여 인천기지로 이송하였다. 즉, Test-bed에서 생산된 LNG에 대하여, 과도한 고압이 아니라면 문제없이 Pilot LNG저장탱크가 받아주었다. 2차 시험운전 이후에 Pilot 설비 사항은 Fig. 2-다-5) 14. 에서처럼 바뀌었다. Pilot LNG저장탱크가 노후화로 더 이상 존재하지 않았기에 Test-bed에서 생산된 LNG는 직접 인천기지로 이송해야만 하였다.

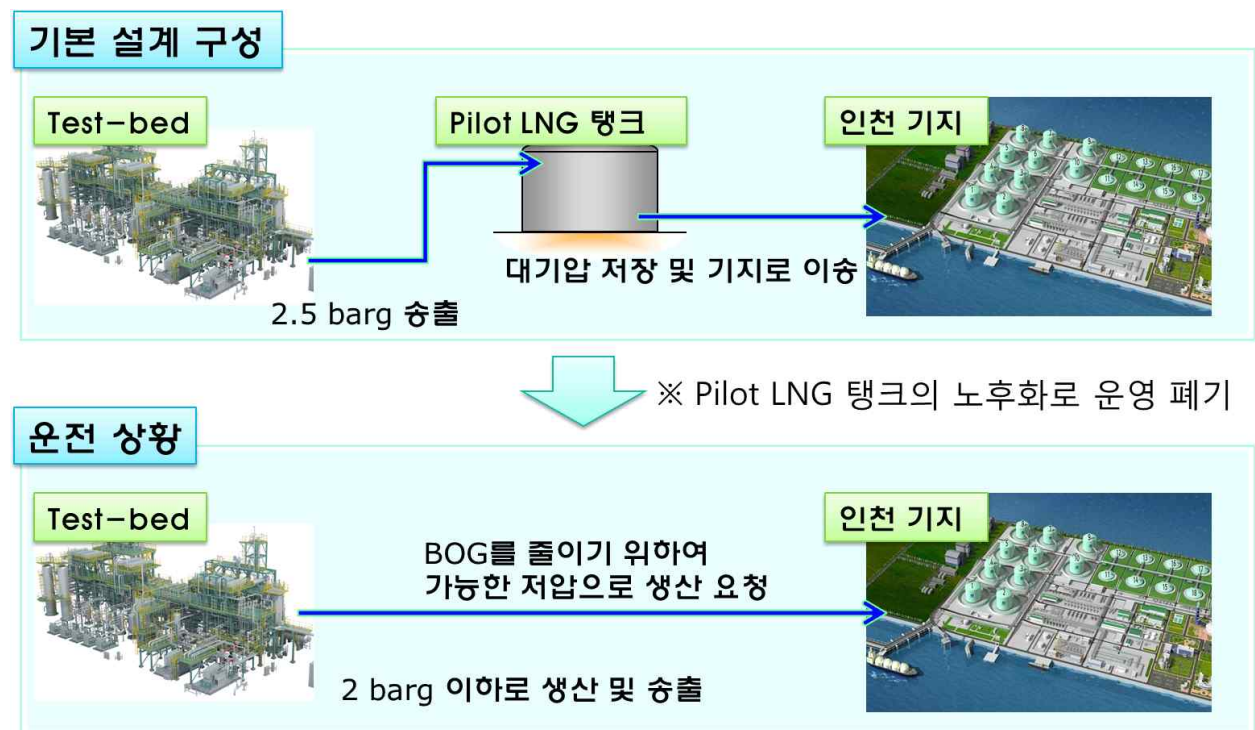


Fig. 2-다-5) 14. Pilot LNG저장탱크 폐기로 인한 Pilot 설비 변경 사항

기존의 LNG저장탱크 내 LNG Pump에서는 LNG 압력을 약 10 barg 까지 올려서 인천기지 LP Line에 이송하였다. Test-bed에서 생산된 LNG는 설계상 2.5 barg 이며, 앞의 방법과 같이 인천기지로 이송하기 위해서는 그 이상의 압력으로 올려야 하는데, 별도의 가압 방법을

찾아야 한다. 이에 인천기지 운영부와 2019년도 10월부터 협의를 거쳐서 Fig. 2-다-5) 15. 에
 서처럼 인천기지의 Unloading Line Drain Drum으로 이송하는 방법을 결정하였고, 2019년 12
 월 4일에는 Pilot Tank 없이 Test-bed LNG 이송 방안에 대한 시험을 수행하여 운영 절차서
 를 완성하였다. 다만, Test-bed에서 가급적 낮은 온도, 즉 낮은 압력으로 LNG를 생산하는 것
 이, 상압 상태인 인천기지의 Unloading Line Drain Drum에 유입되었을 때, 생성된 LNG로
 부터의 BOG 발생을 최소화하는 방법이다.

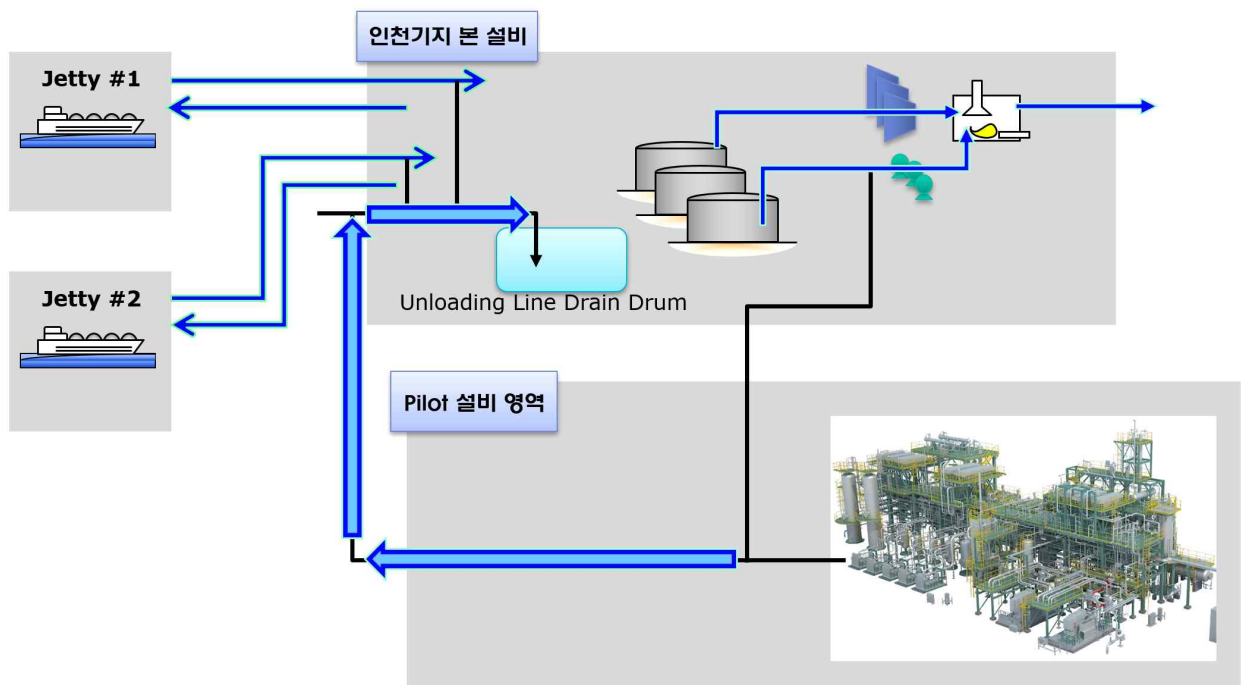


Fig. 2-다-5) 15. 3차 시험운전의 경우 Test-bed에서 생산된 LNG를 인천기지로 이송하는 방법

(2) Pilot 설비 운전 방안 점검

○ 2001년 12월 준공되어 상시운전의 형태로 운영되어 온 Pilot LNG 저장탱크는 영구 운영
 정지 상태이며, Test-bed의 운영을 위하여 인천생산기지와의 직접적인 공정 연결 (LNG, N
 G, BOG 등)만이 사용가능한 상태이다.

○ Pilot LNG 저장탱크를 사용할 수 없는 상황이기에 2019-12-03 ~ 2019-12-05 사이에 Test-bed로부터
 인천기지까지의 LNG배관 운영가능성을 검사하였다.

I. Test-bed 배관까지 LNG 전송

Jetty #2의 Unloading Line에서 Unloading Drain Drum 방향으로의 배관을 이용하여 Test-bed까

지 LNG를 이송.

(1) Valve Close 상태 점검

- RPV 2001 (Drain Drum 방향)
- RP 2001
- RB 2010 (62-D14 방향)
- 62-D50 방향
- RP 0401 (Jetty #1)
- RP 0402 (Jetty #1)
- RP 0403 (Jetty #1)
- RP 0404 (Jetty #1)

(2) Valve Open

- RP 04101 (Jetty #2, 혹은 RP 04102)
- RP 04107 (Jetty #2)
- RV 2021 (Pilot 설비)

이후, Pilot 설비에서 유량 조절하며 Cooldown 수행 및 LNG를 배관에 받음.

II. Test-bed 배관 LNG를 Unloading Drain Drum 으로 전송

(1) Valve Close

- RP 04101 (Jetty #2, 혹은 RP 04102)
- RP 04107 (Jetty #2)

(2) Valve Open

- RP 2001
- RPM2001 (Drain Drum 방향)

이후, Test-bed 배관 LNG를 Unloading Drain Drum 으로 전송 및 배관 내 LNG는 자연 기화하여 BOG 배관으로 전송

III. Unloading Drain Drum의 LNG Pump Test

- 자주 가동하기에 필요없다고 함

IV. 시험 결과 화면

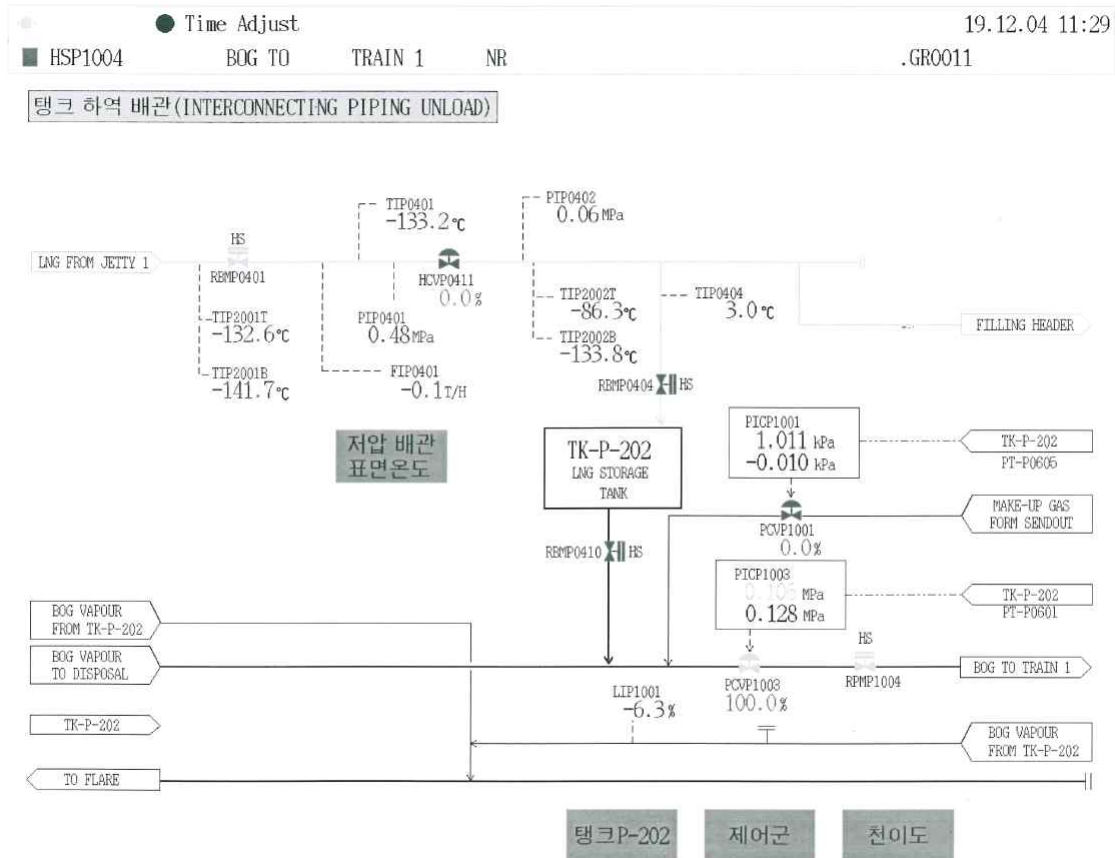


Fig. 2-다-5) 16. Test-bed로부터 인천기지까지의 LNG배관 운영 시험결과 화면

- 온도 141 C 는 5 bar_g 상태에서 Rich LNG로 액체 상태로 판단됨. 또한 상부의 -132.6 C는 기체 상태로 더 이상 온도가 내려가지 않았는데, 그 이유는 HCVP0411 Bypass 로 후단으로 액체가 넘어가며 배관 상부의 기체가 잔류돼 있는 것으로 판단됨.

(3) Pilot 설비 교대근무 시행

- Pilot 설비 운전을 위하여 교대근무가 실시되었음.
- 교대근무 기간 : 2020년 8월 25일 ~ 2020년 10월 15일
- 근무 형태 : 통상 및 교대근무 혼합 5조 3교대 실시
 - LNG기술연구센터 16인 1회 10일 Turn 교대근무 투입, 순번에 따른 반복투입
 - 10일 교대근무 1 turn : [After After Day Day 일근 휴무 Night Night 휴무 휴무] 순서 시작 및 종료
 - 수석연구원[2급] 참여 ; 교대근무 관련 수당 미지급 [“공사 연봉제 규정 제7조(법정수당)”에 따라 지급 불가]
 - 책임급[3급] 이하 ; 교대근무 10일 관련 교대근무수당 지급, 월 초과근무수당 잔여 통상근무일 일할계산

- 인천분원 당직근무 병행 참여 [교대근무시 개별 당직일 변경 신청]
- 한국가스공사 노동조합 및 연구관리부 협조 실시

기간 : 2020. 8. 25 - 2020. 8. 31

[illegible]

기간 : 2020. 9. 1 - 2018. 9. 30

[illegible]

기간 : 2020. 10. 1 - 2020. 10. 30

[illegible]

다) 시험운전 시행

- 2019.11.01: 가스공사 “KSMR Test-bed 3차 시험운전” 과제 시작

- 2020.03.09: GS건설과의 용역 계약 완료
 - 수의 계약 공고 및 수의 시담, 계약 보증 준비 등 수행
- 2020.06.15: 현장 엔지니어 및 운전원 출입 (15명으로 시작 최대 25명)
- 2020.07.01: 주열교환기 교체 (전후 1주일씩 배관 작업 수행)
- 2020.7월~9월: 설비 보수, 교육, 기기 점검, Purging 및 수분제거 등
- 2020.08.12.: 지역 안전협의체 시험 계획 보고
- 2020.09.01: NG 투입; 9/2: 냉매 압축기 가동
- 2020.09.10: LNG 생성 및 송출 시작
- 2020.09.12.~09.24: LNG 생산 성능 증가 (~3.4 ton/hr)
- 2020.09.25.~09.27: 1차 성능 시험 (72시간, 일 82톤)
- 2020.09.28.~10.07: 열선 보강 등을 통한 주열교환기 성능 보완
- 2020.10.07~10.09: LNG 생산 성능 증가 (4.0~4.3 ton/hr)
- 2020.10.12: 최종 성능 시험운전의 성공적 완료
 - 성능 검사 결과: LNG 일평균 101.2 톤 생산, 72시간 연속 운전완료
 - 시험시간 10/09 13:00 ~ 10/12 13:00

라) 결과 분석

(1) 1. LNG생산

KSMR Test-bed를 통하여 생산된 LNG의 양을 검증하는 방법은 End Flash Drum의 Level을 이용하여 생산된 양을 측정하는 방법이다. KSMR Test-bed 공정의 End Flash Drum을 통하여 생산된 LNG의 양을 연속적으로 측정하기 위해서는 FIC061.CPV 값을 이용할 수 있는데, Fig. 2-다-5) 18. 에 3일간의 성능 검사를 완료한 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지 KSMR Test-bed에서 생산되는 LNG생산량을 그래프로 나타내었다. 나타난 전체기간

은 3일 (72시간)이며 평균 100.14 ton/day 이다. 본 평균값의 직접적인 계산 방법은 FQI061A.SUM Tag를 사용하였다. FQI061A.SUM Tag는 FIC061.CPV 값을 적분하는 Tag로 시간을 정확히 시작 13:00에서 끝 13:00까지로 분명하게 표현할 수 있어서 FIC061.CPV 값 결과에 대한 적분대신 사용하였다.

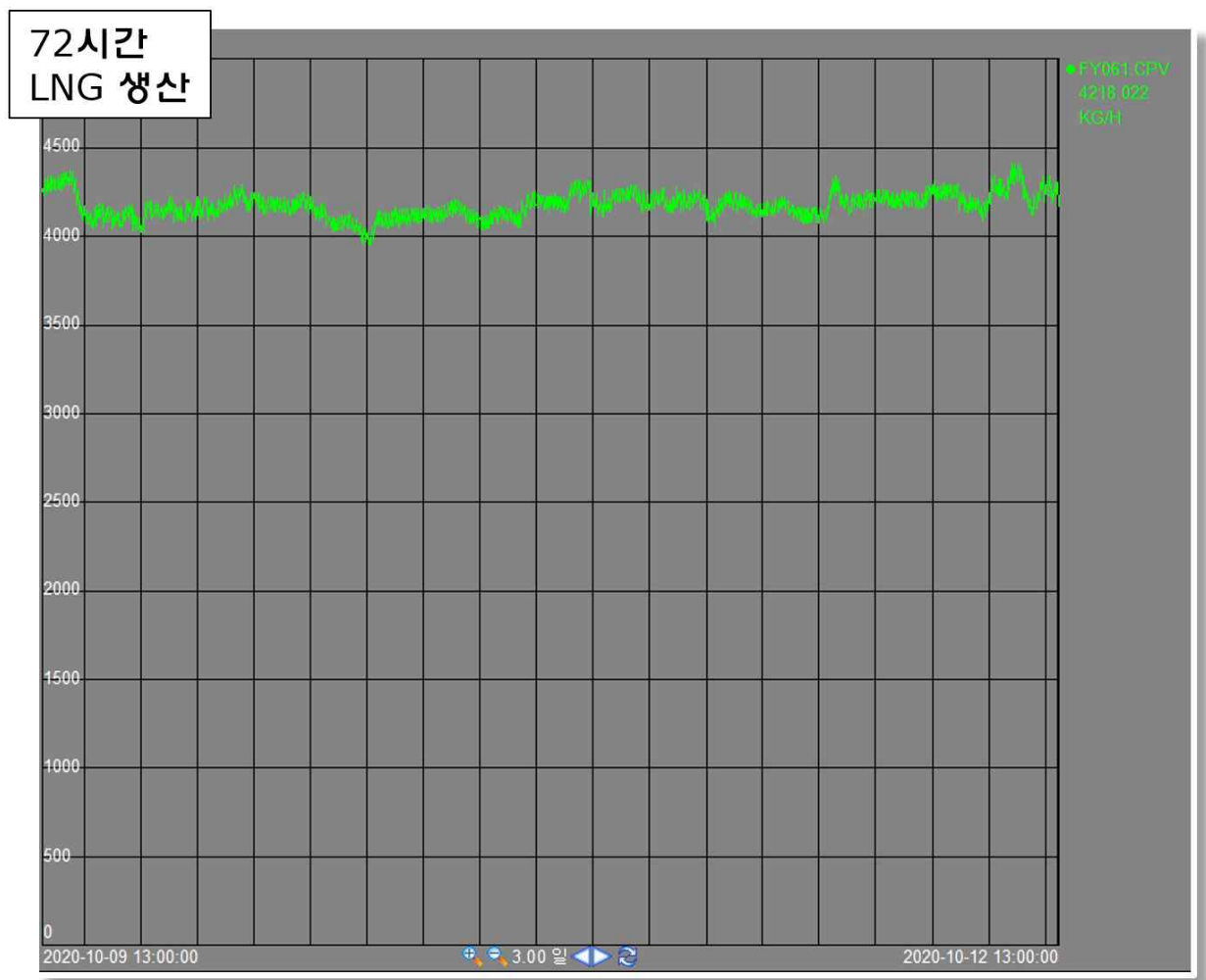


Fig. 2-다-5) 18. KSMR Test-bed에서 LNG생산량 (2020.10.09. 13:00 ~ 2020.10.12. 13:00)

Fig. 2-다-5) 19. 는 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지 3일간의 성능 검증에 보여준 MCHE 내 NG 흐름의 온도 변화이다. 왼쪽 화면이 DCS 화면인데, 동그라미 4개가 그 온도의 위치이다. 맨 위에서부터 NG 유입 온도 (거의 대기 온도 임), 예냉 이후 온도 (Scrubber 입구), Reflux Drum에서부터 나오는 온도, 그리고 마지막 생산 온도 순서이다. 설계 값의 상

황을 보여주고 있다고 할 수 있다.

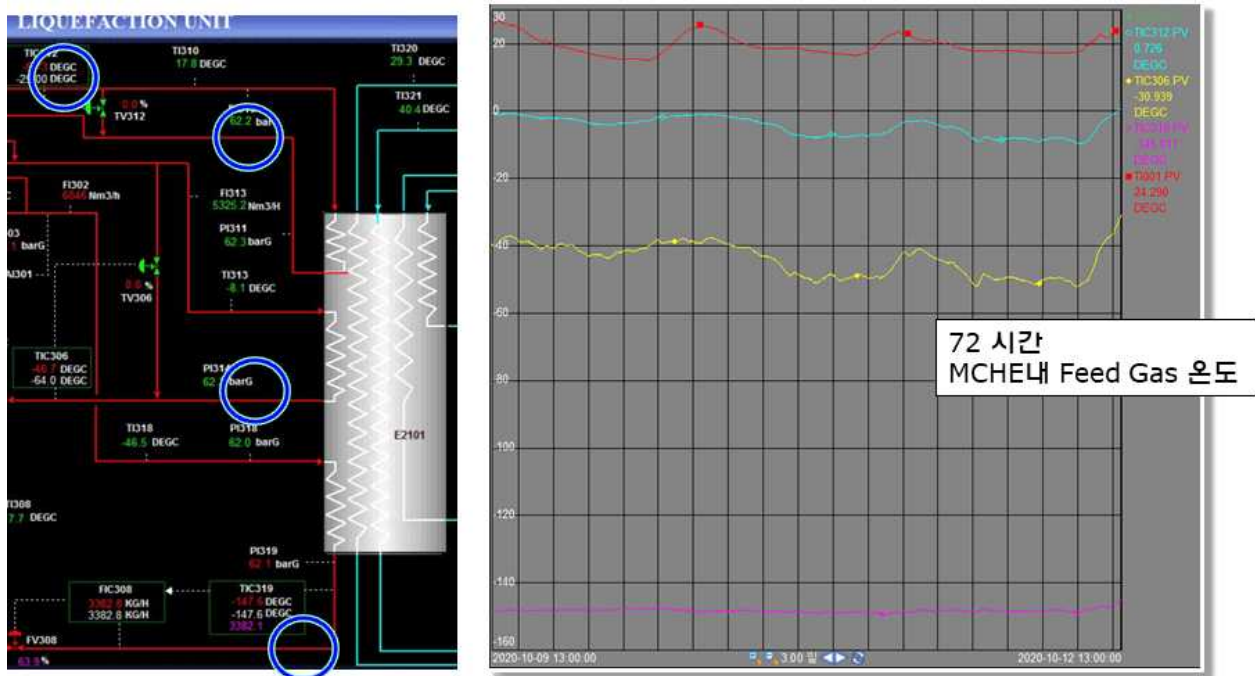


Fig. 2-다-5) 19. 72시간 성능 검사 기간 중에 MCHE 내 NG흐름 온도 구배

Fig. 2-다-5) 20. 는 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지 3일간의 성능 검증에 보여준 End Flash Drum의 압력 변화이다. 설계는 2.5 bar로 하였지만, 앞에서 설명하였듯이 생성되는 BOG 양을 줄이기 위하여 LNG를 가급적 낮은 압력 (낮은 온도)으로 생산하여 인천기지의 Unloading Line Drain Drum으로 이송시켜야 한다. 이에, Test-bed 시험운전에서는 LNG를 가능한 낮은 온도 (낮은 압력)까지 낮추려고 하였으나, 혼합 냉매의 설계 조성 및 MCHE 설계 온도 구매의 한계로 Fig. 2-다-5) 20. 에서와 같이 2 barg 정도까지만 가능하였다. 하지만 이렇게 무리하게 온도를 낮추면 LNG생산 효율이 떨어지며, 결국 생산성이 낮아지게 된다. 마지막에 압력이 상승한 부분은 시험기간 (시험 비용) 부족으로 실험 종료 후 바로 시스템을 정지시키기 위한 예비 조작에 따라 압력이 상승된 것으로 판단되며, 이것이 성능 결과 평가에는 좋지 않은 영향을 주지만, 이것을 포함한 전체 평균이 100.14 ton/day으로 생산량 조건을 만족하였기에 결과로서 포함시켰다.

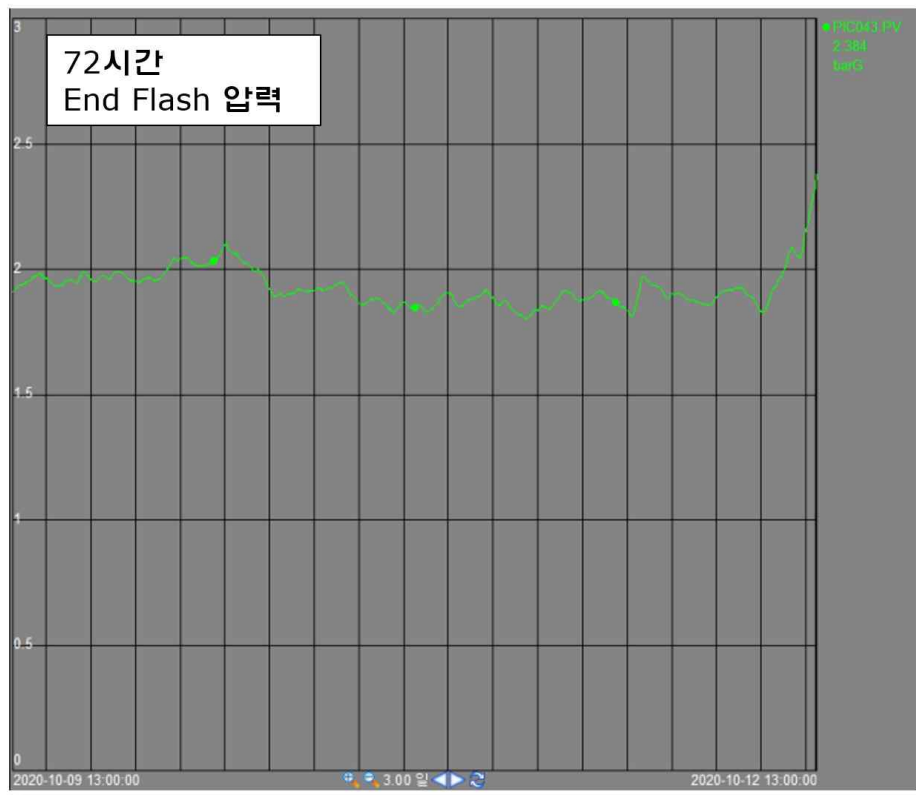


Fig. 2-다-5) 20. 72시간 성능 검사 기간 중에 End Flash 압력 변화

Fig. 2-다-5) 21.은 72시간 성능 검사 기간 중에 대기온도 변화에 따른 NG Feed 온도 변화를 보여주고 있다. MCHE에 들어가는 NG의 설계 온도가 12.1 C 이니, 이보다 낮으면 천연가스를 액화하는데 더 적은 에너지가 들어가고, 그 보다 높으면 더 많은 에너지가 들어간다. 즉, 일부러 겨울철에 시험 운전을 하면 더 적은 에너지로 액화할 수 있어, 실제 성능 보다 더 좋은 결과가 나올 수 있다.

Fig. 2-다-5) 21.의 Data를 보면 맨 아래가 14 C 이기에 설계 온도인 12.1 C를 기본적으로 초과하고 있다. 운전 기록을 보면 26 C를 넘어가는 경우도 있기에 이는 설계 온도 보다 14 C를 초과하기에 많은 성능 저하를 유발한다. 일단, 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지 3일간의 성능 검사에서 100 ton/day 평균 생산을 넘겼기에 기본적으로 생산 목표는 맞춘 것으로 하고, NG Feed 온도에 따른 생산력 저하 보정은 이후에 다시 살펴보기로 하겠다.

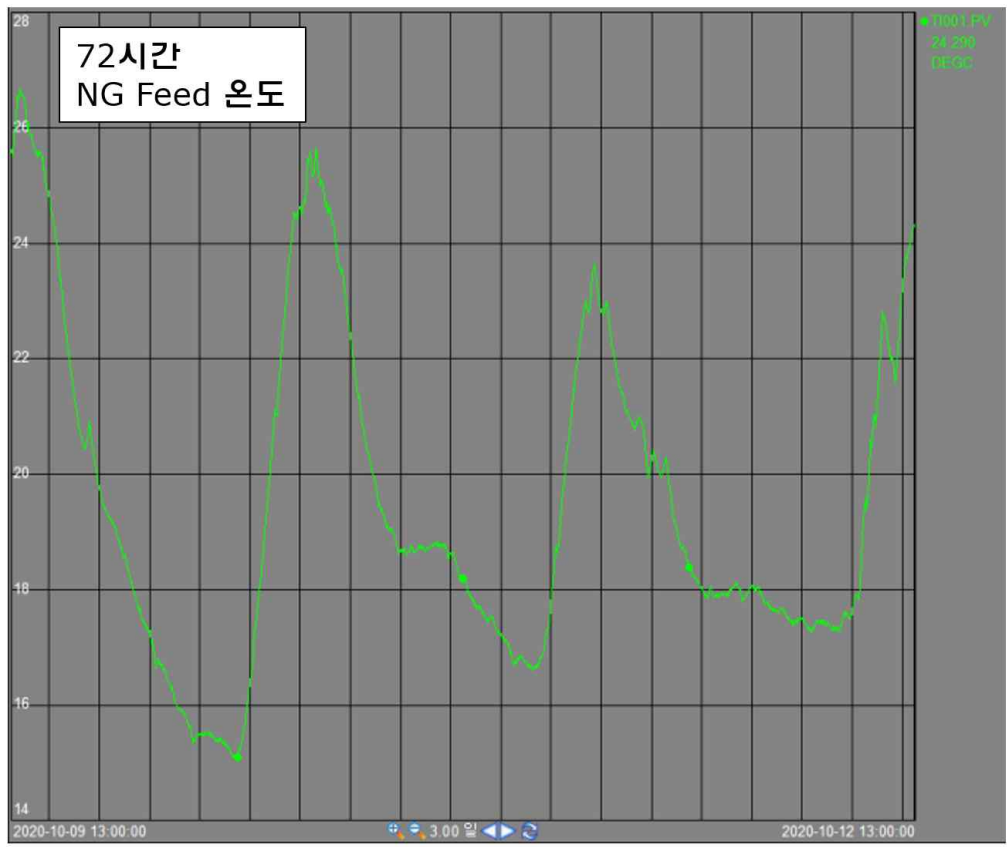


Fig. 2-다-5) 21. 72시간 성능 검사 기간 중에 대기온도 변화에 따른 NG Feed 온도 변화

Test-bed에서 생산되는 LNG의 양은 End Flash Drum 이후의 유량 측정기로 측정된다. 그렇기에 End Flash Drum의 Level은 생산량과 관련성이 깊다. 즉, Level이 줄면 생산량이 증가하고, Level이 늘어나면 생산량이 줄어든다. 이에 따르면 초기 Level과 마지막 Level이 같아야 정확한 생산량을 측정할 수 있게 된다. 특히, 초기 Level이 마지막 Level로 보다 높으면 실제 생산량보다 측정량이 많아 질 수 있기에, 가급적 두 Level이 비슷하면서도 마지막 Level이 조금 높게 보여지는 것이 좋다고 할 수 있다. 본 시험 운전에서도 End Flash Drum Level이 27.1% → 27.2% 으로 되었기에 생산량 측정에 문제가 없다.

(2) KSMR Test-bed 생산 성능 보정

(가) Feed Gas 조건 변화에 따른 LNG 생산량 민감도 분석

KSMR Test-bed 성능 시험 목표는 100 t/d 72 시간 연속 운전이다. 100 t/d 의 성능은 액화사이클 성능에 의하여 좌우되기도 하지만, Feed Gas 조성과 온도 및 대기 온도 등에 의해서도 바뀔 수 있다. 이에 시험의 완성을 위하여 Feed Gas 조성과 온도 및 대기 온도 등을 설계 조건에 맞춰야 하지만, 이는 실제적으로 불가능하기에 시험운전 결과를 설계 조건으로 환산하기 위하여 생산량 민감도를 분석하고 이를 이용하여 성능 시험 결과의 완성을 높이려 한다.

가. KSMR Test-bed 공정 및 민감도 분석

아래의 Fig. 2-다-5) 22. 는 KSMR Test-bed 공정을 Feed Gas 및 생산 LNG중심으로 단순화하여 표현한 것이다. 그림에서 NG는 70 bar 15 C로 유입되어 C3와 N2를 혼합한 이후에 온도를 낮추고 C3+ 성분을 분리하는 공정을 통과한 이후에 LNG로 냉각된다.

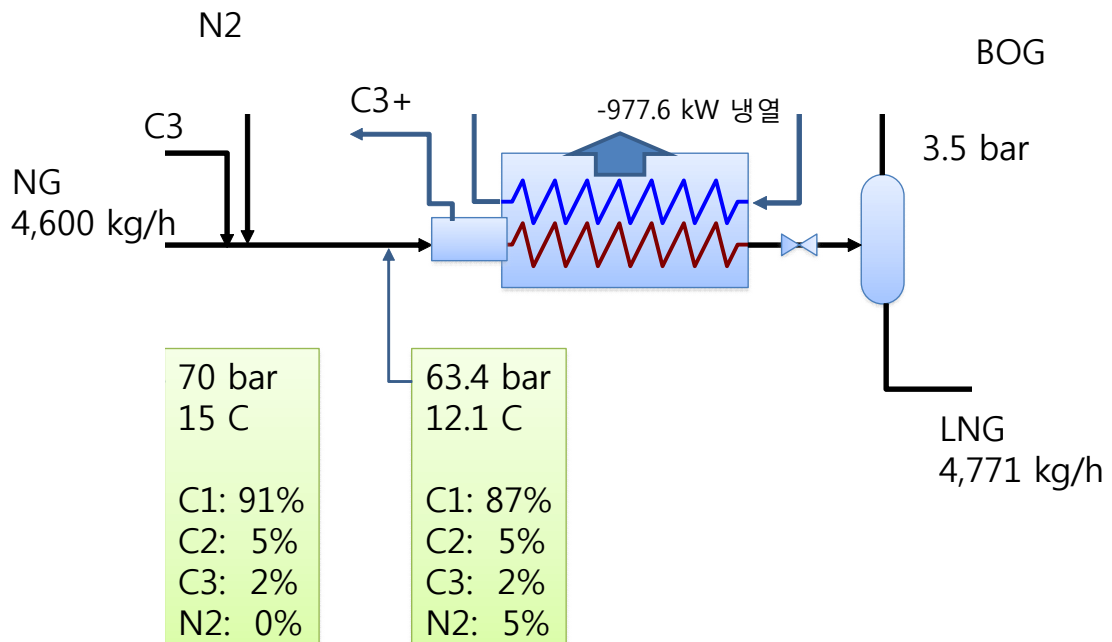


Fig. 2-다-5) 22. KSMR Test-bed 공정에 대한 Feed Gas 및 생산 LNG중심 단순화 표현

2020.09 현재 C3와 N2 첨가를 시행하고 있지 않기에 이는 다음 Fig. 2-다-5) 23. 와 같이 바뀌어서 표현될 수 있다. 이를 HYSYS로 공정을 만들어서 Feed Gas 온도 압력 조성들을 바꾸면서 생산되는 LNG 양의 민감도를 분석하였다. 여기서 냉동 사이클은 따로 만들지 않고 단지 열교환기에서 977.6 kW의 냉열만이 빠진다고 가정하였다.

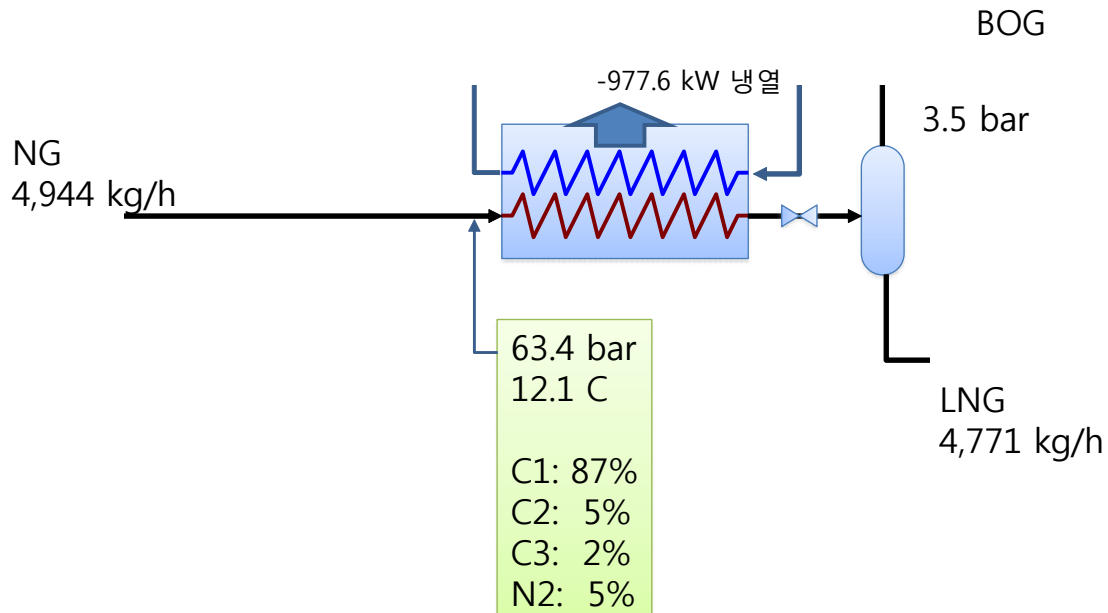


Fig. 2-다-5) 23. C3와 N2 라인이 제거된 KSMR Test-bed 공정에 대한 Feed Gas 및 생산 LNG중심 단순화 표현

우선, Feed Gas 온도를 ± 5 C 하면서 Simulation 한 결과인 그 LNG생산량 변화 (-249.13 kg/h)를 온도 변화 값이 10 C 나누고 본래 유량 값인 4,944 kg/h로도 나눈 값인 -0.522%를 온도에 따른 생산 민감도로 표현한다. 압력 또한 ± 5 %인 66.57 bar 와 60.23 bar 의 생산량 결과 값 (73.55 kg/h) 을 같은 방법으로 나누어서 0.243%를 얻을 수 있다. 이를 표로 만들면 아래와 같다. 이는 즉 Feed Gas 온도 1 C 상승시 생산량이 0.522 % 감소하고, 압력 1 bar 상승시 생산량이 0.243% 증가된다는 의미이다.

단, 조성의 경우, 그 민감도가 크기에 신뢰도가 높을 경우만 적용한다.

온도	C	±5C	-249.13 kg/h	-0.522% /ΔC
압력	Bar	±5%	73.55 kg/h	0.243% /Δbar
N2	비율	±5%	-6.76 kg/h	-29.829% /Δmole
C1		±5%	4.96 kg/h	9.202% /Δmole
C2		±5%	0.20 kg/h	0.883% /Δmole
C3		±5%	0.74 kg/h	7.921% /Δmole
i-C4		±5%	0.49 kg/h	23.792% /Δmole
n-C4		±5%	0.25 kg/h	13.151% /Δmole

Table 2-다-5) 10. Feed Gas 조건 변화에 따른 LNG 생산량 민감도

또한, LNG를 상압 (1.03 bar 저장탱크 기준)으로 생산할 경우는 3.5 bar 생산에 비하여 11.14%가 감소한다.

나. 민감도 분석 사례

(1) 현재 Feed Gas가 63.4 bar 12.1 C 상태에서 100 t/d LNG가 생산되고 있는데, 갑자기 Feed Gas 온도가 17.1 C 로 증가될 경우 생산량의 변화는?

$$((17.1 - 12.1) \times (-0.522\%) + 1) \times 100 \text{ t/d} = 97.39 \text{ t/d}$$

생산량은 97.39 t/d로 변화된다.

(2) 103 t/d 생산 중인 Test-bed의 압력이 64 bar 이고, 온도가 12.1 C (설계 온도) 일 때 이를 설계 기준으로 환산하였을 경우 설계 기준 환산 생산량은 얼마인가?

$$\frac{103}{((64 - 63.4) \times 0.243\% + 1)} = 102.85$$

설계 기준 환산 생산량은 102.85 t/d 이다.

(3) 본 설비가 63.4 bar 12.1 C 상태(설계 기준 상태)의 Feed Gas를 넣고 탱크 상압기준인 1.03 bar로 LNG를 생산하면 100 t/d가 생산될 수 있다는 것을 증명하고 싶다. 현재 Feed Gas는 설계 압력에 23 C 상태이고 3.5 bar 로 생산하고 있다면, 현재 상태에서 몇 톤이 생산되어야 증명될 수 있는가?

- 생산 압력 1.03 bar에서 100 t/d 이란 것은 3.5 bar에서는 111.14 t/d 임
- 여기에, 12.1 C 으로부터의 값으로 변환하면,

$$\frac{111.14}{((12.1 - 23) \times (-0.522\%) + 1)} = 105.2$$

즉, 12.1 C Feed Gas에 생산압력 1.03 bar의 100 t/d 로 생산될 수 있으려면, 23 C Feed Gas 생산압력 3.5 bar LNG로 생산할 경우 LNG가 105.2 t/d 은 생산되어야 한다.

(2) KSMR Test-bed 생산량 보정

Test-bed에서 생산되는 LNG의 양은 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지 3일간의 FY 061.CPV 값을 Feed Gas 온도인 TI001.PV 과 생산 압력인 PIC043.PV를 이용하여 보정하였다. 각 Data는 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지의 매분단위의 자료를 이용하여 아래의 수식에 적용하였다.

$$m =$$

$$m_0$$

$$\times \frac{1}{((T - 12.1) \times (-0.00522) + 1)}$$

$$\times \frac{1}{((P_{EndFlash} - 3.5) \times 0.0451 + 1)}$$

수식에서 m은 생산량이고, m_0 는 FY061.CPV 값을 넣고, T에는 TI001.PV값과 $P_{EndFlash}$ 에는 PIC043.PV값을 넣고 그 평균값을 평균 생산량으로 하였다. 그 결과 4457.346 kg/hr이며 이 값은 106.98 ton/day 값으로 된다. 즉, Pilot 저장탱크의 폐쇄와 환경 온도 상승 등으로 인한 생산량 감소분을 설계 기준으로 보정한다면, KSMR Test-bed의 정확한 생산능력은 단순 측정값인 10 0.14 ton/day이 아닌 106.98 ton/day이 된다는 것이다.

마) Train-2 3차 시험운전 결론

KSMR 액화공정은 LNG플랜트사업단을 통하여 가스공사가 개발한 천연가스 신액화공정이다. LNG플랜트사업단이 이러한 KSMR 신액화공정의 운전성과 성능을 검증하기 위하여 KSMR Test-bed를 인천생산기지에 구축하였으나, 2017년도 및 2018년도의 현장 여건상 LNG플랜트사업단의 KSMR Test-bed 운영을 완료하지 못했다. 본 KSMR Test-bed 3차 시험운전에서는 LNG플랜트사업단에서 구축한 KSMR Test-bed를 이용하여 **KSMR 신액화공정의 운전성과 성능을 검증을 완료하였다.**

연구과제의 연구수행 내용은 아래와 같다.

(1) KSMR Test-bed 성능 향상 및 유지보수 수행

KSMR Test-bed MCHE 재설계 및 설치를 하였고, 냉매 펌프 구조 보강 지원 및 배관 단열 성능 향상하여 Test-bed의 재가동을 가능하게 하였다.

(2) Pilot 설비점검 및 KSMR Test-bed 3차 시험운전 준비

Pilot 설비 점검을 통한 운전 절차서 확립 및 설비 시험을 통하여 시험 준비를 수행하였다. 인천생산기지 안전협의체 보고와 언론기관 협조 등 대외 협력 사항 등 유관기관 협의를 완료하였고, 교대근무 준비 등을 통하여 시험 준비를 완료하였다.

(3) KSMR Test-bed 3차 시험운전 실시

자세한 내용은 2-다-5) 및 GS건설의 3-2 과제 보고서 참조

(4) 시험운전 결과분석 및 정리

시험운전 결과 분석을 통하여 2020.10.09. 13:00 부터 2020.10.12. 13:00 까지 3일간의 성능 검증에 보여준 KSMR Test-bed의 생산량은 100.14 ton/day이며, Pilot 저장탱크의 폐쇄와 설비 환경 온도 상승 등으로 인한 생산량 감소분을 설계 기준으로 보정한다면, KSMR Test-bed의 정

확한 생산능력은 단순 측정값인 100.14 ton/day이 아닌 106.98 ton/day이 된다는 것이다.

KSMR 신액화공정은 Fig. 2-다-5) 24. 에 보이듯이 공정 특허, 신기술 검증, 기술설계, 상세설계, Test-bed 건설하였고, Test-bed 시운전을 통하여 KSMR 공정 자체, 기본설계, 상세설계, 건설, 유지보수, 시험운전 능력을 검증하였다.

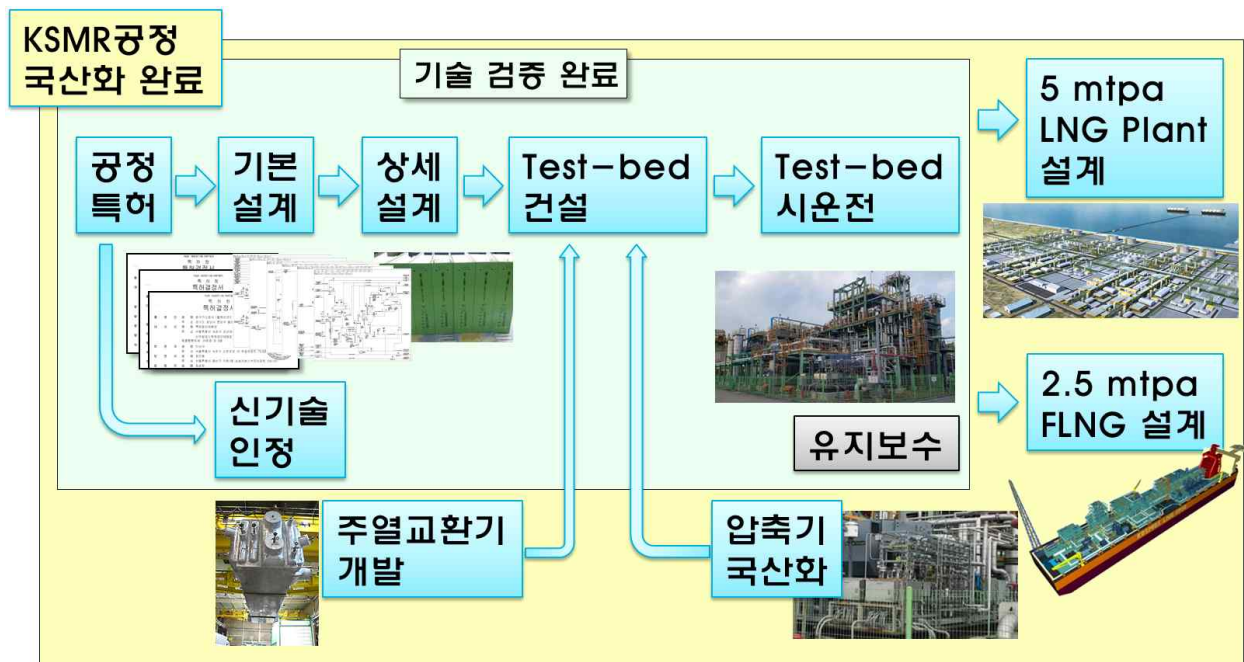


Fig. 2-다-5) 24. KSMR 천연가스 액화공정 기술 검증 단계 및 사업화 목표

그 무엇보다도 본 시험운전 과제를 통하여 안정적으로 시험운전을 완료하였고, 이에 따라 KSMR 시험운전 절차서를 완성할 수 있었다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

LNG플랜트 테스트베드 통합 적용을 위한 기술체계 및 운영기술 개발

나. 목표 달성여부

“2장의 연구수행내용 및 성과”에서 설명하였듯이, 기술개발 단계화 및 요구사항을 정립하고, 사업단과제 기본계획 및 연구관리체계를 구축하였다. WBS 작성, 사업번호체계 개발 및 운영 등 사업기획 업무를 수립하고, LNG 테스트베드 건설계획 수립하고, 상위레벨의 개념설계 및 통합제어·운영기술하고, 시스템 엔지니어링 모니터링 및 피드백을 수행하였다.

최종적으로는 사업단의 각 세부과제를 종료할 수 있었고, 테스트베드도 성공리에 완수하였다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

- 테스트베드에서 충분히 검증된 개발기술로 해외 가스전 플랜트 시장개척 추진
- 메이저들이 선점하고 있는 대규모 가스전보다 수요발생이 많고 진입이 용이한 중·소 규모의 가스전에 개발된 기술을 우선 적용하고, 그 실적을 토대로 대규모 가스전 진입
- 다양한 가스공급 방안 검토 필요
 - 한국가스공사와 기타 국내기업이 지분을 보유하고 있는 가스전을 상대로 개발기술 적용 추진
 - 기존의 가스 배관망에 소형 LNG플랜트 추진 (환경친화적 혹은 도서 지역)
- 해외 사업모델 개발을 통하여 개발기술의 최초 적용에 따른 리스크 관리방안 검토

붙임. 참고문헌: 없음

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 플랜트기술고도화사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 플랜트기술고도화사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.