

R&D / 19
IFIP-C11
3546-04

최종보고서
중소형 모듈러 LNG 저장탱크 개발 및 실용화
2019 국토교통과학기술진흥원

Plant R&D Report

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()

플랜트연구사업 제 4차 연도 최종보고서

R&D /
19IFIP-C113546-04

중소형 모듈러 LNG 저장탱크 개발 및 실용화 최종보고서

2019. 10.

주관연구기관 / (주)한국조선해양

위탁연구기관 / 단국대학교

공동연구기관 / 한국건설기술연구원

한국과학기술원

(주)브리콘

(주)동남기업

국 토 교 통 부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

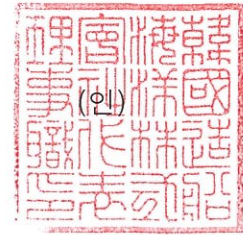
제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘중소형 모듈러 LNG 저장탱크 개발 및 실용화’(연구개발 기간 : 2016. 6. ~ 2019. 8.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 10. 17.

주관연구기관명 : (주)한국조선해양 (권오갑)



참 여 기 관 명 : 한국건설기술연구원 (한승현)
한국과학기술원 (신성철)
(주)브리콘 (이순환)
(주)동남기업 (김황수)
단국대학교 산학협력단 (황석호)

주관연구기관책임자: 심 우 승
참 여 기 관 책임자: 김 성 욱
: 곽 효 경
: 배 성 운
: 한 형 섭
: 최 명 성

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19IFIP-C113546-04	해당 단계 연구 기간	2016.6 ~ 2019.8	단계구분	1/1
연구사업명	플랜트 연구사업				
연구과제명	중소형 모듈러 LNG 저장탱크 개발 및 실용화				
연구책임자	심 우 승	해당단계 참여연구원 수	총: 52명 내부: 52명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 4,207,000 천원 민간: 1,661,000 천원 계: 5,868,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 52명 내부: 52명 외부: 명	총 연구비	정부: 4,207,000 천원 민간: 1,661,000 천원 계: 5,868,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)한국조선해양 미래기술연구원 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 한국과학기술원 건설및환경공학과 (주)브리콘 기업부설연구소 (주)동남기업 기업부설연구소			참여기업명: (주)한국조선해양 (주)브리콘 (주)동남기업	
국제공동연구	상대국명: 없음			상대국 연구기관명: 없음	
위탁연구	연구기관명: 단국대학교 토목환경공학과			연구책임자: 최명성 교수	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					

연구개발성과의 보안등급 및 사유	- 모듈 구조 및 재료 개발 분야의 원천기술을 개발하고 이를 본 과제의 참여기관 이외 타 유사 연구개발 분야의 기반 기술로 제공이 가능하므로 연구과제 보안등급의 분류 상 일반과제로 분류하는 것이 합당한 것으로 판단됨				
-------------------------	--	--	--	--	--

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	12/11	11/3	-	-	-	7	-	-	-	-	-

국가과학기술융합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

<요약>

- 연구 목표
 - LNG 저장용량 10,000~60,000m³의 중소형 모듈형 LNG 저장탱크 개발
- 연구 내용
 - LNG 저장탱크 외조 모듈 개발(강판 콘크리트 복합구조; SCP 및 HPCP)
 - SCP·HPCP 모듈용 충전 콘크리트 및 HPFRCC 재료 개발
 - SCP·HPCP 합성구조 구조성능 평가 및 제작성 검토
 - 모듈러 LNG 저장탱크 전주기 EPC Process 개발
 - 모듈러 LNG 저장탱크 설계 검증 및 신기술 사용적합성 인증 획득
- 연구 개발 성과
 - 논문게재: SCI(E)급 논문 11건, 국내 학술지 12건
 - 지식재산권 및 시제품: 특허출원 11건, 특허등록 3건, S/W 등록 7건, 시제품 2건
- 활용 계획
 - 본 연구로 확보된 모듈러 LNG 저장탱크 EPC 프로세스 및 신기술 사용적합성 인증을 통해 해외 엔지니어링 및 오일메이저 업체에 모듈러 LNG 저장탱크 기술홍보를 실시하여 실용화 달성에
활용할 계획임.

보고서 면수 94

<요약문>

연구의 목적 및 내용	○ LNG 저장용량 10,000~60,000m³의 중소형 모듈형 LNG 저장탱크 외조 구조 개발 - SCP 합성구조와 HPCP 합성구조 개발 - 합성구조와 강재 프레임이 결합된 외조 모듈 개발 ○ 10,000~60,000m³ 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 전주기 EPC 개발 - 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 구조설계(Engineering) 기술 개발 - 저장탱크 자재 구매 및 조달(Procurement) 연계 시스템 구축 - 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 시공(Construction) 기술 개발 ○ 모듈러 LNG 저장탱크 국제인증 - 신기술 적용 모듈 저장탱크 구조부재 사용적합성 인증 - 신형식 모듈러 LNG 저장탱크에 대한 설계 검증				
연구개발성과	○ LNG 저장탱크 외조 모듈 개발 - SCP(Steel Concrete Panel): Steel+Concrete+Steel의 합성구조 설계 및 제작 기술 개발 - SCP와 강재 프레임이 연결된 LNG 저장탱크 외조 모듈 설계·제작 기술 개발 - HPCP(High Performance Composite Panel): Steel+HPFRCC 합성구조 설계 및 제작 기술 개발 - SCP 및 HPCP 합성구조 모듈 해석 기술 개발 ○ 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 개발 - 9%Ni강 내조 + 단열층 + SCP 외조 구성의 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 설계 및 제작 기술 개발 - 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 구조 안전성 평가 완료 ○ SCP·HPCP 모듈용 충전 콘크리트 및 HPFRCC 재료 개발 - SCP 모듈 충전용 고유동 자기 충전성 콘크리트 배합 및 제조 기술 개발 - HPCP 모듈 합성용 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(HPFRCC) 배합 및 제조 기술 개발 - 콘크리트 및 HPFRCC의 충전 성능평가 및 유동해석 모델 개발 ○ SCP·HPCP 합성구조 구조성능 및 특성 평가 실험 - SCP·HPCP 합성구조 휨, 압축 등 구조실험 및 성능평가 완료 - SCP·HPCP 합성구조 내화성능, 충격성능 등, 특성 실험 및 평가 완료 ○ SCP·HPCP 합성구조 모듈 open mock-up 제작 및 제작성 검토 완료 ○ 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 EPC 기술 개발 - 완전 방호형 모듈러 LNG 저장 탱크 내조 및 외조 설계 기술 개발 - 자재 구매 및 조달 연계 시스템 구축 완료 - 모듈러 탱크의 육상 및 해상 운송 그리고 현장 설치 기술 개발 - 모듈러 탱크 외조 erection guidance 제정 - LNG 저장 탱크 운전 프로세스 상세 설계 완료 ○ 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 국제 인증 - SCP 외조 모듈 DNV-GL의 신기술 사용 적합성 평가 인증 획득 - 모듈러 LNG 저장탱크 설계 기술을 ABSG Consulting으로 부터 설계 검증 획득				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 모듈러 LNG 저장탱크 제품과 저장탱크 건설과 관련된 EPC 프로세스 기술을 개발하고 국제인증을 통하여 실용화 기반을 확보 - 세계 최초로 중소형 LNG 저장탱크의 모듈러 기술을 완성, 오지 공사 시 공사비용 10% 공사기간 15%, 극지 공사 시 공사비 30% 공사기간 35% 절감을 통한 중소형 LNG 저장탱크 가스탱크 건설 시장을 선점 - 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 설계, 제작, 조달 및 건설의 WFT 및 WBT 달성 - 신규 사업의 창출로 연간 1만 명 이상의 고용 창출과 주관기관인 대기업과 함께 참여기업이 중견기업으로 성장할 수 있는 기회 마련				
국문핵심어 (5개 이내)	모듈러	LNG 저장탱크	강판콘크리트판넬	고성능콘크리트판넬	종합설계시공기술
영문핵심어 (5개 이내)	Modular	LNG storage tank	SCP	HPCP	EPC

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구수행내용 및 성과	29
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	113
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	121
붙임. 참고 문헌	131

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표

(1) 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 구조 개발

- SCP와 강재 프레임이 결합된 외조 모듈개발
 - SCP : Steel + Concrete + Steel (Steel Concrete Panel)
 - 강재프레임 : 강재 I-beam
 - 내조+Insulation+외조 복합구조 형식
 - LNG 저장용량 : 10,000 ~ 60,000m³
- HPCP와 강재 프레임이 결합된 외조 모듈개발
 - HPCP : Steel + HPFRCC
 - 강재프레임 : 강재 I-beam
 - LNG 저장용량 : 50,000 ~ 60,000m³

(2) 10,000 ~ 60,000m³ 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 전주기 EPC개발

- LNG 저장탱크 외조 구조 설계 (Engineering) 지침 개발
 - 총칙, 설계 재료특성, 설계하중 및 조합, 사용성 및 내구성, 구조상세 등 항목 포함
- 저장탱크 자재 구매 및 조달 (Procurement) 연계 시스템 구축
 - 자재 구매 및 조달 등 항목 포함
- LNG 저장탱크 제작 (Fabrication & Manufacturing) 매뉴얼 개발
 - 제작설계 및 내외조 조립등 항목 포함
- LNG 저장탱크 설치 (Erection) 매뉴얼 개발
 - 육상 및 해상 운송, 기초 시방, 탱크 설치 절차, 설비 가설 절차, 현장 시험 매뉴얼

(3) 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 국제인증

- 모듈러 LNG 저장탱크의 위험요인 분석
 - HAZID (HAZard IDentification) workshop을 통한 위험요인 분석
- SCP 적용 외조 사용적합성 인증
 - SCP 모듈 신기술 사용적합성 인증에 필요한 설계 및 성능실험 수행
 - SCP 모듈 신기술 사용적합성 인증(서) 획득
- 모듈러 LNG 저장탱크 설계 검증
 - 저장탱크의 설계/제작/검사/운송/설치 관련 표준서의 국제공인인증기관 (ABSG Consulting)을 3rd party로 활용한 검증 관련 document 작업
 - 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 형식 설계 검증 획득

나. 연구개발 필요성

(1) 연구배경

(가) 기술현황

- LNG 저장탱크의 설계 및 시공의 경우 한국가스공사 및 국내 대형 건설사에서 독자적 설계와 시공 능력을 가지고 있으며, 근래에 들어서 해외수주 등을 통하여 선진업체와 동등한 수준의 기술 경쟁력을 확보하고 있는 것으로 판단됨
- 최근 국제 육상 및 해상의 대형 LNG 프로젝트의 경우 핵심 공정 설비를 제외한 대부분의 설비들이 한국의 중공업 관련 업체에서 모듈화 되어 제작, 납품 및 건설되고 있음. 그러나 저장탱크 내조 및 자체를 모듈화 하는 기술은 미흡
- 원거리 해안에 있는 가스전을 개발하기 위해 생산, 저장 및 출하가 가능한 부유식 해양 LNG 액화 플랜트 (LNG-FPSO; Floating Production Storage and Offloading)의 발주되고 있으며 국내 조선·해양 메이저 3사가 전 세계 프로젝트를 대부분 수행하지만, 핵심 설계기술은 아직 해외 엔지니어링 기술에 의존, 제작 중 설계 변경과 공기 미 준수의 문제 야기됨
- 국내외적으로 조립식 모듈러 LNG 저장탱크의 개발은 기본 개념 정립 단계이며 일부 해양 플랜트 및 조선사를 중심으로 형식 적용 가능성을 검토하는 수준이지만, 모듈러 방식의 육상 LNG 저장탱크의 기술개발은 거의 없는 실정
- 종래에 설계 및 시공된 육상 LNG 저장탱크는 단일 방호(single containment) · 이중 방호(double containment) · 완전 방호(full containment) 중에서 하나를 따르며, 안전 사고 방지에 대한 의무와 관심이 커지면서 점차 내조와 외조가 모두 완전 방호방식의 설계 및 시공이 근래에 주로 이루어지고 있음

표 1. LNG 저장탱크의 방호방식에 따른 분류

단일방호 방식	이중방호 방식	완전방호 방식

- LNG 저장탱크의 경우 CB&I, Whessoe 등 세계적인 유수의 엔지니어링 업체에서 전 세계에서 발주된 대부분의 LNG 저장탱크 설계 · 시공 실적을 보유하고 있으며, 최근 모듈화 개념을 이용한 LNG 저장 탱크에 대한 연구가 Mustang을 중심으로 진행되고 있음.

그러나 이는 소규모 탱크의 병렬연결에 기반을 두고 있다는 점에서 가격 경쟁력 확보가 어려울 것으로 판단됨

- 최근 제작 공사비용 및 공사기간 단축을 위하여 거의 모든 LNG 액화 플랜트 설비는 모듈화 되어 설계 및 제작되고 있으나, 액화된 LNG의 저장 및 선박으로의 수송을 위한 LNG 저장 탱크의 경우 아직 현장에서 조립 및 제작되어 과다한 제작 공기 및 비용은 육상 LNG 설비 관련 프로젝트의 착수에 걸림돌로 작용하고 있음
- 최초로 모듈형 LNG 저장 탱크의 설계 개념이 도입된 프로젝트는 Exxon Mobil이 주관한 Adriatic 해상 LNG Terminal (이하 ALT)이라고 할 수가 있으나, ALT의 경우 모듈 설계 개념은 내조에만 부분적으로 적용되어 있으며, 상대적으로 많은 인력 및 공기가 소요되는 외조 제작 작업은 모두 현장에서 이루어져 실제 공기 및 비용 단축 효과는 미미함
- ALT 공사 후 Exxon Mobil은 해상 LNG Terminal의 설치 경험을 바탕으로 구조 안정성과 경제성 확보를 위하여 저장 탱크의 폭과 길이는 증가시키는 대신 높이는 낮추고 콘크리트 외조 중앙부의 ballast compartment의 추가하는 동시에 외조의 루프를 콘크리트 구조에서 철 구조물로 변경함. 또한, 9% Ni강의 독립형 내조를 일반 탄소강의 멤브레인형 내조로 변경함으로써 비용 절감을 꾀하는 방안을 검토하고 있으나, 모듈형 저장 탱크의 개념으로 확장되지 못하고 있음
- DNV와 ABS Consulting 등의 국제인증기관은 LNG 저장탱크에 대한 사용 적합성 및 설계 검증 체계를 확보하고 있으며 이들과 협력을 통하여 본 과제를 통하여 개발된 기술을 검증할 방안을 사전에 준비할 필요 있음



그림 1. Adriatic 해상 LNG Terminal 제작 순서
(※출처 : Exxon Mobil)

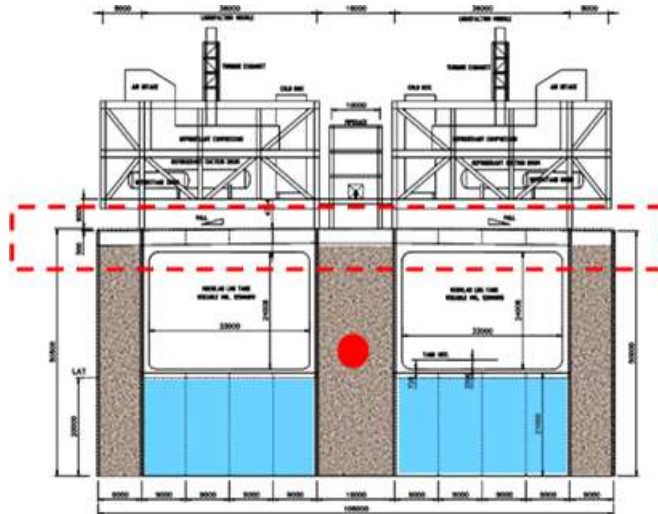
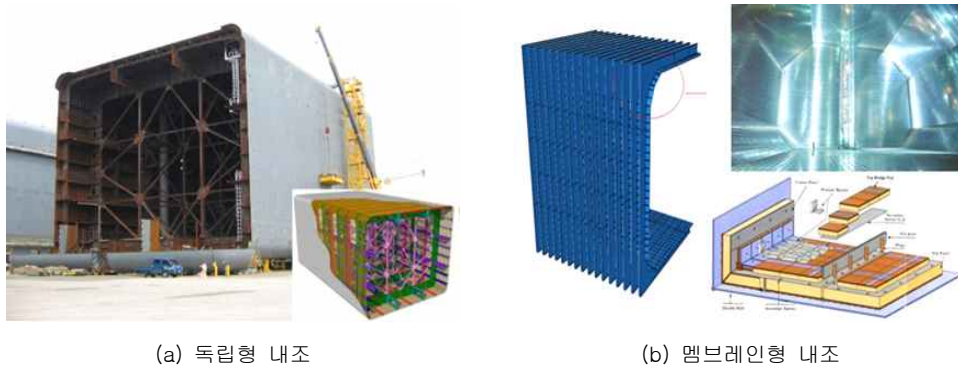


그림 2. Exxon Mobil의 LNG Terminal 외조 개선안
(※출처 : Exxon Mobil)



(a) 독립형 내조

(b) 멤브레인형 내조

그림 3. Exxon Mobil의 LNG Terminal 내조 개선안
(※출처 : Exxon Mobil, GTT)

- 강재와 콘크리트를 합성한 구조부재는 구조적으로는 얇은 단면으로 인한 강재의 국부 좌굴과 휨방향 비틀림 좌굴을 콘크리트가 구속해주기 때문에 효율적인 단면 구성이 가능하고, 강재로 인한 콘크리트 구속효과로 높은 강성을 발휘함
- 콘크리트 충전 강관(CFT, Concrete Filled Tube)을 이용한 교량의 거더 및 건축물의 보 부재가 개발된 바 있으며, 원전 보조건물(auxiliary building)에 SC(Steel Concrete) 합성구조의 실용화 연구가 진행중임
- 최근 강재와 콘크리트 합성구조의 부착 해석과 관련된 연구개발이 지속되는 등, 합성 구조에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있음

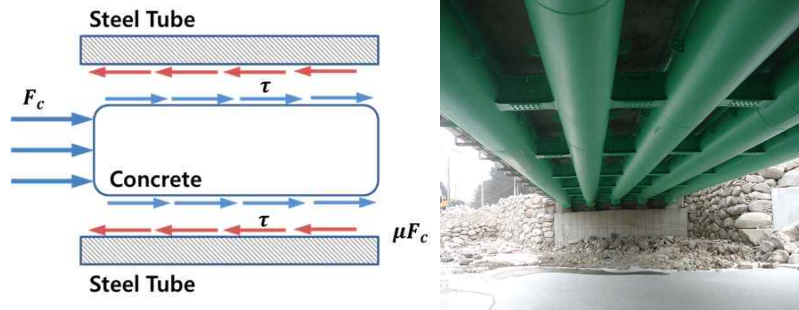


그림 4. 충전 강관 구조시스템 연구 및 적용 예

- 건축물의 철골을 철근콘크리트로 둘러싼 합성구조인 SRC(Steel framed Reinforced Concrete structure) 구조가 기둥을 중심으로 한 구조부재에 많이 활용되고 있음

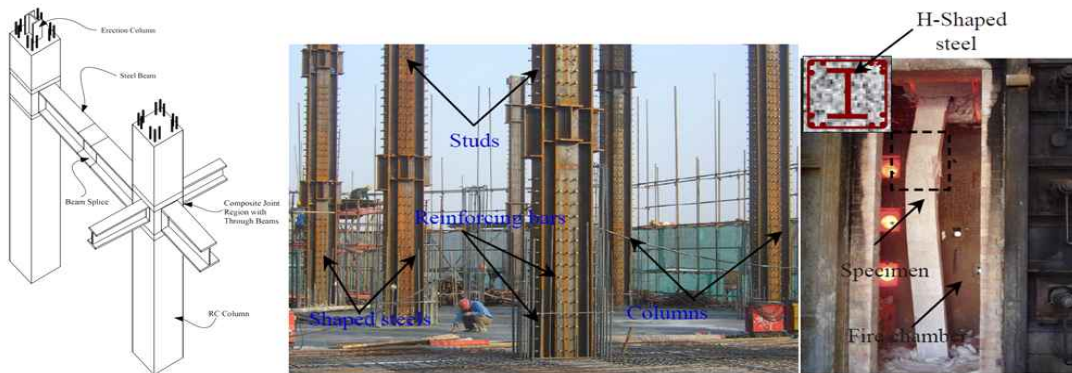


그림 5. SRC 단면도 및 적용 예 (※출처 : Procedia Engineering 62, 46-55, 2013)

- 미국의 경우, WEC사가 개발한 3세대 원자로 AP1000 이 US NRC로부터 건설부지 표준설계인증을 재취득하면서 원자로 격납구조에 대해 기존의 철근콘크리트구조에서 SC 구조로 변경하였음
- US NRC는 AP500, AP1000 설계 인허가심사 과정에 원전안전관련 구조물의 SC구조 설계기준 검토 및 모듈시공성을 평가하였고, NUREG/CR-6358과 NUREG/CR-6486 을 각각 발간하였음
- 국내 KEPIC 개발항목은 미국기준과 비교하여 HSC 슬래브와 이중부재 접합부 등이 미 개발상태이며 전산해석 기준이 제시되어 있지 않음 (※출처 : Magazine of the Korean society of steel construction, 27(5), 31-37, 2015)

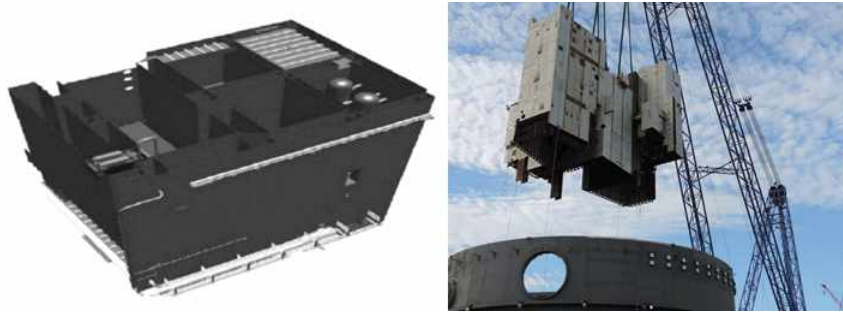


그림 6. AP1000 구조 모듈 입체도 및 시공현장
(※출처 : V.C. Summer new nuclear construction site, SCE&G)

- 일본에서는 1980년대부터 SC구조에 대한 기초연구를 시작하여 1991년부터 일본 내 전력회사 및 건설회사들이 공동으로 SC구조의 원전적용에 대하여 본격적인 실험적 연구와 이론적 연구를 수행하고, 2005년 SC 구조를 전면 적용하여 압고체폐기물 소각로 건물을 건설하였음
- 2007년 일본 서부 가시와자키 가리와 원저인근 지진발생으로 내진관련 규준을 강화시키며 격납구조에 SC구조를 전면설계하고 JNES로부터 건설허가를 취득하였으나, 건설부지의 안정성 재평가 요청에 따라 건설사업 추진은 답보된 상황임



그림 7. 가시와자키 가리와 원전 압고체 소각로 건물
(※출처 : 월간전기 2009년 3월호)

- 영국의 대표적인 제철 및 철강 회사인 British Steel (現 TATA Steel) 과 SCI (The Steel Construction Institute)는 1992년부터 연구를 통해 steel-concrete-steel sandwich 구조를 개발하고 Steel Rod를 마찰용접하게 제작방식을 개선하여 Bi-Steel을 제시하고 설계 및 시공지침을 정해서 사용 중임
- 이에 반해 최근에는 갈고리 모양의 shear connector를 사용하여 강판을 고정시킨 뒤 사이에 콘크리트를 충전하는 형식의 J-hook 기술도 제안되어 있는데, 기존의 Bi-steel 모델과 구조적으로 비슷한 성능을 지닌데 반해 shear connector의 용접시공이 쉽고 강성이 높아 각광을 받고 있음

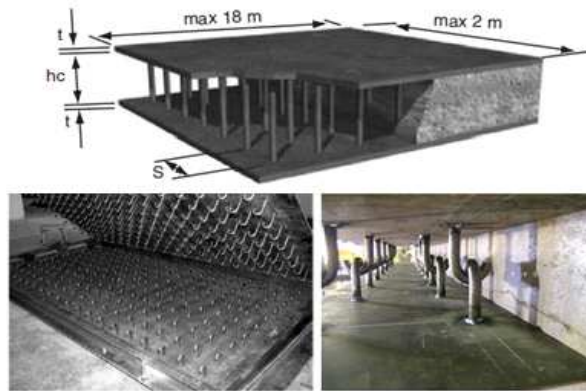


그림 8. Bi-steel 개념도 및 J-hook 실험체
(※출처 : Corus 1999 & Engineering Structure 31, 1166~1178, 2009)

- 독일의 Kassel 대학은 DFG 프로그램의 일환으로 수행된 프로젝트를 통하여 초고성능 콘크리트를 활용하여 강관과 초고성능 콘크리트 구조가 연결된 합성교량인 Gartnerplatz Foot Bridge를 2007년에 건설한 바 있음

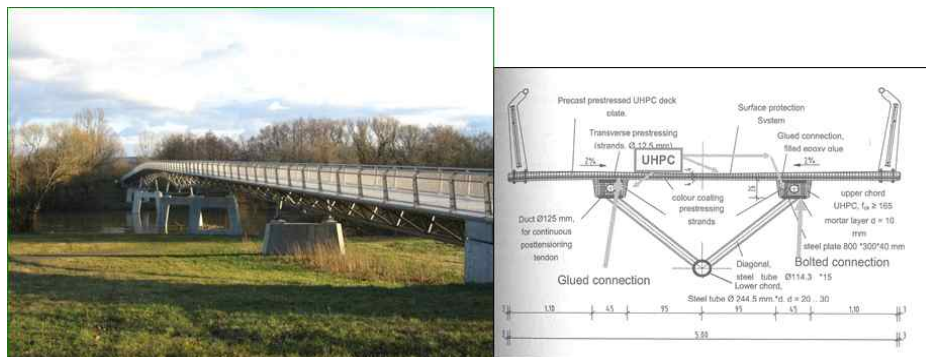


그림 9. 강재 및 초고성능 콘크리트 합성교량
(※출처 : 3rd Int. Symposium of UHPC, Kassel Germany, 2009)

- 지진 및 충격하중에 대한 설계 및 시공에 합성구조의 적용을 통한 전체 구조물의 성능 향상에 대한 연구가 다방면으로 이루어지고 있음
- 합성구조의 우수한 성능에 대한 부분에 있어서는 이미 많은 연구 및 적용사례를 통해 검증이 되었으며, 현재는 원전구조물을 중심으로 모듈화 시공에 따른 합성구조 기술기준개발, 설계안전성 확보 및 해석 기술 확보에 중점을 두고 있음
- 합성구조의 유한요소 해석에 있어서 강재와 콘크리트 사이의 하중전달 메커니즘이 완벽하게 규명되지 않았으며, 부착해석 모델 개발을 통해 콘크리트 변형이나 화재 등 특수상황에 있어 강재-콘크리트 간 박리 등에 대한 보다 정확한 예측 및 평가기술의 개발이 필요한 실정

- LNG 탱크 구조해석은 하중에 따라 정적과 동적, 구조물의 형상에 따른 외부와 내부탱크 구조해석으로 나눌 수 있음
- LNG 탱크의 시험 및 정상 가동상태에서 작용하는 정상하중과 비상상태에 작용하는 특수하중으로 대별됨
- 정상하중조건 : 고정하중, 재하하중, 액체하중, 풍하중, 충수 및 기밀시험하중, 부가하중, 온도하중
- 특수하중조건 : 지진하중, 폭발하중, 화재 및 내부탱크 누출하중

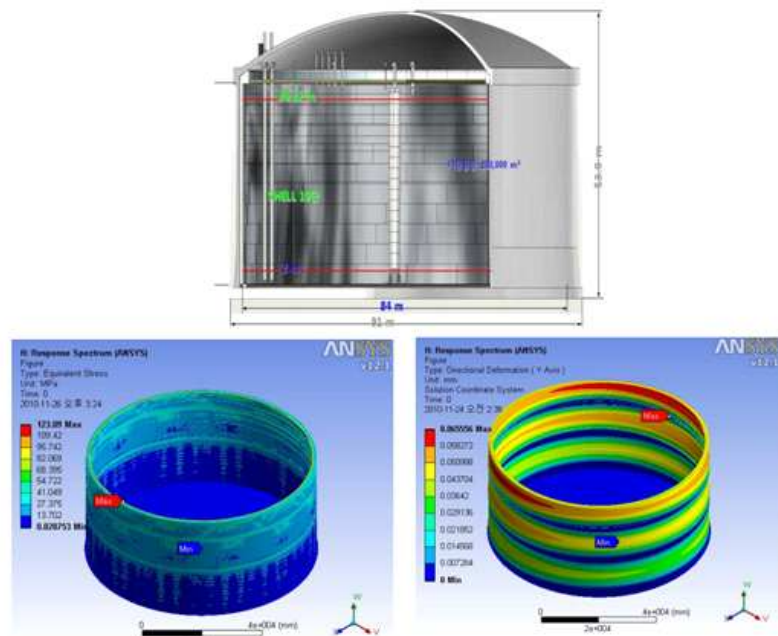


그림 10. LNG 탱크 모델링 및 해석 예

(※ 출처 : 2011 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집, p. 1202-1205)

- 정상운전 상태와 비상사태 등에서 극한하중 및 사용한계 상태에 대한 하중조합을 이용하여 해석함
- 한국가스공사는 2001년 지상식 9% Ni형 14만kl 저장탱크의 설계기술을 자립화하여 통영기지에 설계를 적용한 이후 동일형식의 20만kl 저장탱크 기본설계 및 상세설계 완료함
- 한국가스공사는 LNG 저장탱크 건설시 LUSAS Civil&structural software를 사용하여 구조해석을 수행한 예가 있음
- 범용구조해석 프로그램인 DIANA를 탱크해석 기술 및 관련 매뉴얼 개발
- 탱크 구조는 물론 LNG 보관 중 발생하는 적층환 현상 후 이들 층 사이의 쉼임 현상(rollover)에 대한 해석도 수행됨 (Australia)
- 강제탱크, SC 형태 탱크 및 이중구조 탱크 등 다양한 중소규모의 LNG 탱크에 대한 해석 설계 기술이 개발됨(Linde Group)



그림 11. 다양한 중소규모의 LNG 탱크 (※출처 : Linde Group Brochure)

- 기존 LNG 탱크에 대한 폭발, 온도, 상부 platform 하중 등의 하중에 대한 특수해석

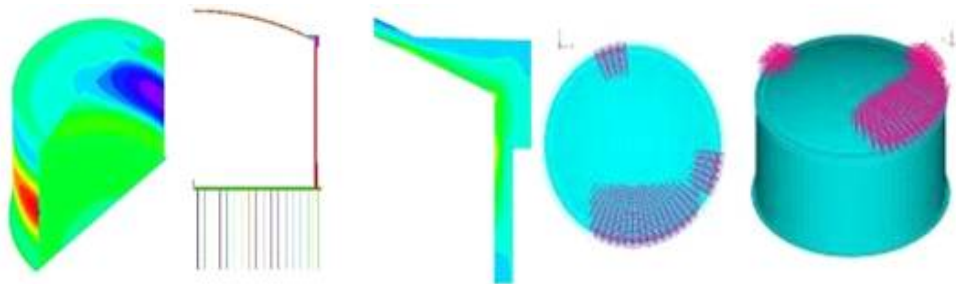


그림 12. 기존 LNG탱크에 대한 특수해석 (※출처 : PDS, ADINA distribution)

- 2000년대 중반에 고유동 콘크리트 슬럼프 플로 600 mm의 고유동 콘크리트가 현장에 적용되기 시작하여 복잡한 철근 배근 상태에도 콘크리트의 타설이 가능하게 되어 작업성을 진보를 가져옴
- 자기 충전형 고유동 콘크리트는 일반적인 철근간격(최소 150 mm 이상) 상태에서 자기 충전성을 나타내며, 사용 골재의 최대 치수 25 mm를 기준으로 개발됨

표 2. 자기 충전성 콘크리트 관련 연구 문헌

논문명	주요 연구내용	저자
하이브리드 섬유보강 자기충전 콘크리트의 재료성능 평가에 관한 연구	강성유, PVA섬유를 고정하여 유리섬유 사용량을 변화시킨 자기충전 콘크리트의 역학적 특성 및 내구특성 검토	김우석 외
광물질 혼화재료를 다량으로 사용한 고유동 자기충전 콘크리트의 내구 특성	고로슬래그미분말 및 플라이애시를 사용한 50 MPa급 탄소저감형 자기충전 콘크리트의 압축강도 및 내구성 평가	김용직 외
탄소저감형 자기충전 콘크리트의 특성	고로슬래그미분말을 결합재 대비 80%를 치환 사용한 자기충전 콘크리트의 역학적 특성 검토	김용직 외
고로슬래그 미분말 다량 사용한 고유동 자기충전 콘크리트의 역학적 특성	고로슬래그미분말을 60~70%, 플라이애시 5~10%를 치환한 고유동 자기충전 콘크리트의 역학적 특성 검토	안태호 외
다성분계 자기충전 콘크리트의 특성	광물질 혼화재료인 고로슬래그미분말 및 플라이애시를 다량 사용한 자기충전 콘크리트의 역학적 특성 분석	김용직 외

- 국내의 자기 충전성 콘크리트는 40~50 MPa의 고강도 영역에서 부분적으로 실용화

되고 있으나 시공법 개선, 구조설계의 반영, 관련 법규 개정, 품질관리, 수화열 저감 및 경시 변화에 따른 위커빌리티 확보 등이 문제로 지적되고 있음

- 가스 저장탱크 SCP 외조 모듈의 경우 좁은 stud 간격(50 ± 10 mm)으로 개발될 것으로 예상함. 이에 따라 25 mm 골재의 사용은 불가능하며, 외조 모듈의 3차원 결합 corner부 등의 타설을 위해서는 높은 유동성과 간극통과성 및 재료분리 방지가 필요한 유변학적 특성을 지닌 재료의 개발이 필요함

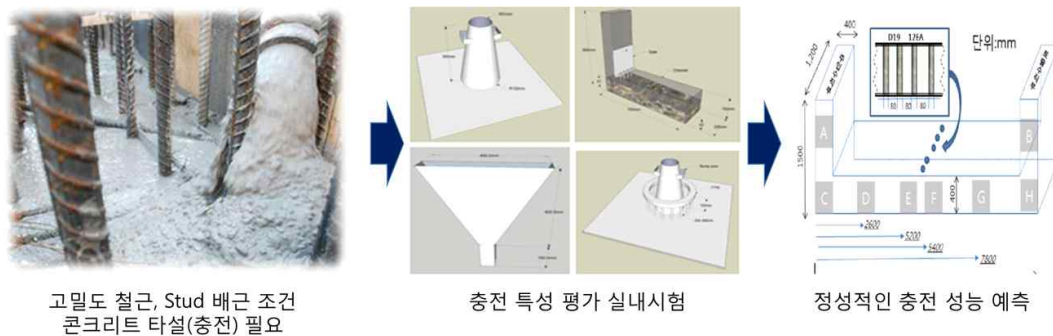
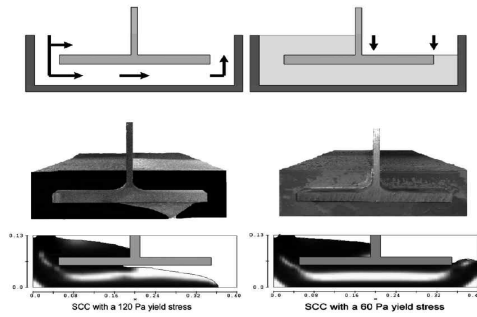
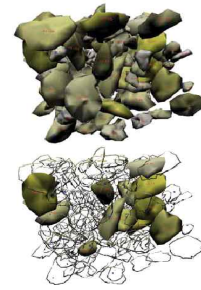


그림 13. 충전특성 평가 방법

- 국외의 자기 충전 콘크리트는 고강도 콘크리트를 중심으로 미국, 캐나다 및 유럽의 연구와 일본의 연구로 양분됨
- 미국의 경우 대부분 고강도 콘크리트를 중심으로 새로운 콘크리트의 재료 개발 및 역학적 특성, 내구성 및 구조적 안전성 등에 관한 연구가 활발히 진행
- 미국 National Institute of Standards and Technology (NIST)에서는 입자유동해석을 통한 콘크리트 구성 재료가 유동특성에 미치는 영향을 분석하여 미세구조 모델링을 진행
- 그 외, 미국 Northwestern University, University of Texas at Austin, Iowa State University 등 여러 대학에서는 자기충전 콘크리트를 소재로 유동특성에 관해 많은 연구가 진행 중
- 일본의 경우 동경대에서는 콘크리트 타설 시 부실시공 및 구조물의 내구성 저하 요인을 인력에 의한 다짐 공정의 영향으로 판단하여 다짐이 불필요한 자기충전 콘크리트를 개발
- 아이슬란드 Innovation Center Iceland (ICC)에서는 유동 시뮬레이션과 레오미터 개발에 중점을 두고 연구를 진행
- 프랑스 Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)에서는 콘크리트 유동 시뮬레이션 분야에서 두각



콘크리트 타설 과정 시뮬레이션 (LOPC, 프랑스, 2010)



입자유동해석(NIST, 미국, 2010)

그림 14. 국외 유동특성 연구 동향

- 콘크리트의 강도 발전은 급속히 진행되어 2010년에 이르러 초고강도 콘크리트의 압축 강도는 실험실에서 약 250 MPa를 실현할 수 있는 수준에 이름.
- 콘크리트 강도의 발전은 급속히 이루어졌지만, 100 MPa 이상의 고강도와 150 MPa 이상의 초고강도 콘크리트의 재료역학적 거동이 분명히 규명되지 않고 (초)고강도 콘크리트 구조부재의 거동을 근거로 한 설계 기준이 전혀 갖추어지지 않아 재료기술의 발전에도 불구하고 활용성이 높지 않음
- 1990년 초부터 한국건설기술연구원, 한국과학기술원, 서울대, 삼성건설기술연구소, 한양대, 충남대 등에서 50~80 MPa 범위의 고강도 콘크리트에 관한 연구를 시작함
- 1990년 중반부터 초고강도 콘크리트 연구 시작, 1994년 동아건설이 벽식 아파트 벽체에 100 MPa의 콘크리트를 시험 시공하였으며, 1997년 삼성물산(주) 건설부문은 80~140 MPa의 초고강도 콘크리트 개발하여 타워펠리스에 80 MPa 적용
- 콘크리트의 강도 발전은 급속히 진행되어 2010년에 이르러 초고강도 콘크리트의 압축 강도는 실험실에서 약 250 MPa를 실현할 수 있는 수준에 이름. 그러나 실제 현장에 Test-bed 적용 단계에서 약 150 MPa 압축강도가 적용됨
- 콘크리트 강도의 발전은 급속히 이루어졌지만, 100 MPa 이상의 고강도와 150 MPa 이상의 초고강도 콘크리트의 재료역학적 거동이 분명히 규명되지 않고 (초)고강도 콘크리트 구조부재의 거동을 근거로 한 설계 기준이 전혀 갖추어지지 않아 재료기술의 발전에도 불구하고 활용성이 높지 않음
- 2002년부터 한국건설기술연구원은 목표 강도 200 MPa의 초고성능 콘크리트를 개발하기 시작, 2006년에 압축강도 180 MPa, 인장강도 15 MPa의 초고강도, 연성거동 및 파괴에너지 흡수 능력이 탁월한 초고성능 콘크리트 원천기술을 확보
- 2009년 한국건설기술연구원은 초고성능 콘크리트 원천 기술을 이용하여 세계 최초의 보도 사장교를 건설하였고, 이를 이용하여 도로 사장교 설계를 2011년에 완성한 바 있음
- 한편, 2006년부터 시작된 Concrete Corea 연구단은 국내 콘크리트 기술을 발전시킨 project를 수행하였음. 이 project에서는 120 MPa의 초고강도 콘크리트를 상용화하였음 (※이상 출처 : 한국건설기술연구원, 하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발, 2012)

- HPFRCC 관련 기술동향에서 살펴본 바와 같이 대부분 교량을 중심으로 한 인프라 구조물의 건설용으로 개발되어 내화성능을 비롯한 충격 성능 등에 대한 검토가 이루어지지 않음

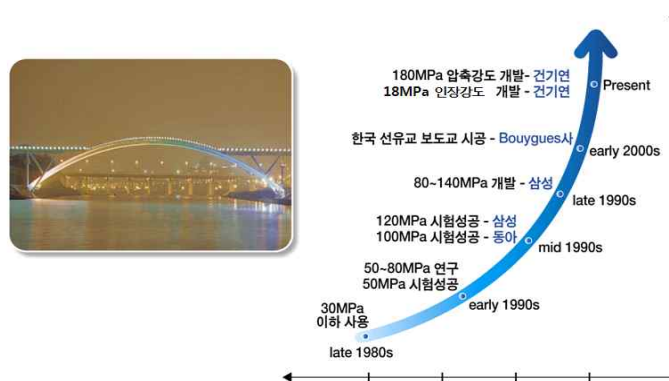


그림 15. 국내 콘크리트 재료 기술 발전 흐름

- 고성능 콘크리트(HPC)는 1980년대 중후반부터 출현 이후 대부분의 연구가 콘크리트의 고성능화에 초점이 맞추어져 기술 발전이 이루어짐. 고성능 콘크리트는 이후 맞춤형 고기능성 콘크리트의 개발로 이어졌으나 기능의 증가에 따라 단가가 상승하는 경향이 있어서 성능은 유지하면서 단가를 낮출 수 있는 방안에 대한 연구가 현재 진행되고 있음
- 또한 콘크리트 개발 방향은 국내외 마찬가지로 강도의 증가를 기반으로 하는 고강도 콘크리트에 대한 연구개발이 가장 많은 부분은 차지하고, 강도의 증진을 기반으로 세계적으로 초고강도, 초내구성 및 고인성 개념이 복합적으로 융합된 초고성능 콘크리트 출현과 이에 대한 핵심기술이 기술 개발이 주류를 형성함

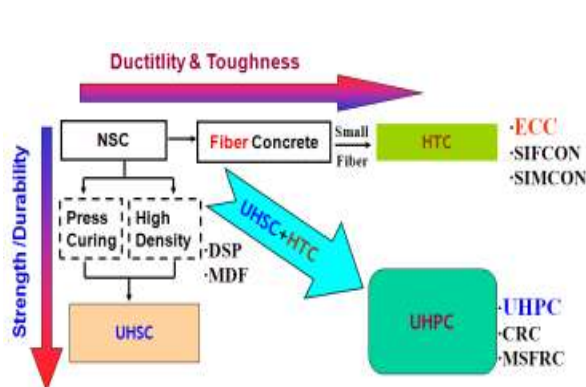


그림 16. 콘크리트 재료기술 발전 방향

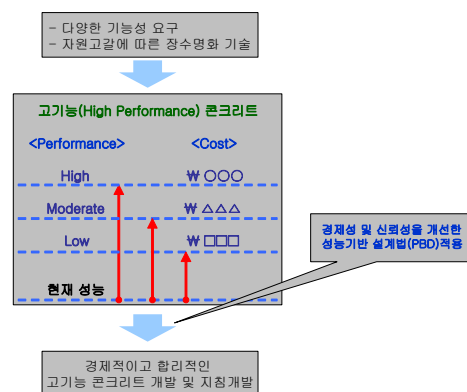


그림 17. 고성능 콘크리트의 성능과 단가 상관관계

- 세계적으로 EU, 일본 및 미국을 중심으로 초고성능 시멘트 복합재료 기술의 기반은 구축된 것으로 판단되며, 우리나라도 이들과 함께 재료기술 분야에는 거의 동등한 기술 수준을 확보하고 있음

- 고성능 및 초고성능 콘크리트 기술개발은 지속될 것이며 원천핵심기술이 확보된 상태에서 대상 구조물에 대한 응용기술 개발이 활발히 진행될 전망. 아직까지 LNG 저장탱크와 같은 저장시설에 사용하기 위한 응용기술이 세계적으로 완성되지 못한 것은 새로운 형식의 LNG 저장탱크 건설시장의 선점을 할 수 있는 기회가 될 것으로 전망됨
- 따라서, LNG 저장탱크 외조의 구조적 요구조건에 적합한 HPFRCC를 본 연구개발을 통하여 개선하고 이를 기반으로 구조적, 경제적 우위를 가지는 새로운 형식의 LNG 저장탱크 개발을 서두를 필요가 있음

[미국 동향]

- 2000년에는 NIST(National Institute of Standards and Technology)를 중심으로 고성능·고강도 콘크리트의 내화에 대한 연구가 수행되고, FHWA와 미국의 각 대학 콘크리트 연구실의 연구결과를 결집하여 ACI Committee 363에서는 2010년에 "Report on High-Strength Concrete"를 발간하여 고강도 콘크리트의 재료, 배합특성, 역학적 특성, 구조성능, 현장 적용 및 경제성 평가에 대한 근간을 제시하였음
- 2005년 이후 UHPC의 활용에 대한 관심이 고조되면서 2006년 FHWA의 지원으로 IOWA주 Wapello 카운티의 Mars Hill bridge를 UHPC로 건설하면서 Virginia주와 다른 주에서 현재 UHPC교량을 건설 중이거나 건설을 완료한 바 있음
- 2011년 TRR(Transportation Research Record)에 의하면 초고성능 콘크리트의 활용과 관련된 기술, 질산화물 흡수 친환경 콘크리트, 포장 콘크리트 내구성 향상 기술, 시멘트 사용을 최소화한 고성능 콘크리트의 개발과 나노 재료를 활용한 콘크리트의 첨단화 기술 개발 등에 관한 연구보고서가 출간
- 최근 미국에서도 전반적인 신규 콘크리트 교량의 건설량은 감소하였지만 첨단 신재료인 UHPC를 비롯한 고강도/고성능 콘크리트를 원전 격납건물, 초고층빌딩 등, 특수용도 구조물에 점차 활용 범위를 넓혀가고 있음

[EU 동향]

- 유럽은 석회암이 풍부한 배경에 따라 근대적인 콘크리트 기술이 매우 발달한 국가로는 독일, 네덜란드, 노르웨이 프랑스 등을 들 수 있으며 이들은 고성능 콘크리트 기술에 초고강도 및 초고성능 콘크리트 기술개발로 빠르게 전환된 지역임
- 프랑스는 New Ways for Concrete라는 연구프로젝트가 시작되어, 1992년 Bouygues가 중심이 되고 Larfaz와 Choida가 합류한 컨소시엄을 구성하여 180 MPa인 Ductal을 상용화하여 토목 및 건축 재료로 상용화시킴
- 독일은 DFG 프로그램의 일환은 2007년부터 UHPC 재료 개발을 시작하여 Nanodur라는 UHPC 결합재를 독자적으로 개발하여 현재 상용화를 진행하고 있음
- 독일은 비롯한 EU 국가들은 HPFRCC를 이용하여 교량, 초고층건물 등 새로운 형식의 구조물에 일부 적용하였으며, 구조부재의 단면감소와 경량화를 미관이 수려한 구조물 건설 영역에 주력하고 있음

- 유럽은 구조물 건설에 관련된 건설재료 및 설계 분야에서 매우 높은 수준의 핵심기술을 보유. 지금까지는 가스 저장탱크에 대한 모듈화 응용기술 개발은 시작하지 않고 있으나 강재 및 UHPC 합성 교량 건설 실적이 있는 점을 감안하면 새로운 형식의 가스 저장탱크 개발도 그리 어렵지 않을 것으로 예측됨

[일본 동향]

- 일본은 건설성의 1988년에 New RC Project를 실시하여 고강도 콘크리트 연구를 본격적으로 시작하였으며, 1988년 Tagaki는 혼화제로 실리카폼을 사용하여 160 MPa의 초고강도를 실현함 (※출처 : 콘크리트 학회지, 2001.7)
- 1991년 Kitamura는 구형 시멘트 콘크리트로서 140 MPa의 압축강도를 얻었음. 이후에도 지속적인 연구가 이루어졌으며, 최근에는 Tanaka 등은 PC교량에 사용하는 200 MPa의 초고강도 섬유보강 콘크리트를 개발함
- 일본콘크리트공학협회(JCI)는 “高靱性 セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会(DFRCC 연구 위원회)에서 초고강도 섬유보강 콘크리트 설계 및 시공지침을 개발 (※출처 : JCI Journal, 2001.9)
- 2003년 프랑스 Ductal을 재료로 활용하여 Mirai 보도교를 처음 건설하면서 일본은 본격적으로 UHPC 활용기술을 개발하고, 현재는 가시마건설에서 SUQCEM이라는 독자적인 UHPC 결합재를 상용화함
- 최근 일본의 Yamada 등은 초고성능 시멘트 복합재의 Packing Density Model을 개발하여 최대 84% 이상의 밀실도가 가능함을 제시하여 초고성능 시멘트 복합재의 Density 이론을 발표함
- 일본의 (초)고성능 시멘트 복합재료에 대한 기술수준은 매우 높으며, 교량(Mirai 교), 철도 및 모노레일(동경 경전철), 공항 활주로(간사이공항 활주로 확장구간) 등, SOC 시설물 중심으로 활발히 활용 중임. 그러나 가스저장탱크의 경우 일본도 우리나라와 유사하게 대부분 습식의 일반 프리스트레스트 콘크리트 형식을 적용하고 있음



그림 18. 초고성능 시멘트 복합재료 활용 (일본)

(※출처 : 하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트 개발, KICT, 2012)

[기타 국가 동향]

- 캐나다의 경우 1989년 HPC-Network을 구축하여 Sherbrooke 대학을 중심으로 7개 대학과 2개의 산업체가 공동으로 고성능·고강도 콘크리트에 대한 연구를 수행하였다. HPC-Network는 1997년 설계 압축강도 180 MPa의 초고강도 콘크리트를 개발하였으며, Sherbrooke 교량의 상하 플랜지 부재로 활용하였음
- 호주는 1997년 유럽과 함께 기반 콘크리트에 관한 국제 Workshop을 개최하면서부터 본격적인 기반 콘크리트에 관한 연구를 시작하여 New South Wales 대학의 Gowripalan 교수팀이 호주산 재료를 이용하여 200 MPa의 Reactive Power Concrete(RPC)를 개발하였으며, 2004년 세계 최초의 RPC 도로교량인 Shepherd Gulley Creek Bridge를 준공한 바 있음
- 한편 중국, 대만, 말레이시아, 태국 등의 개도국들은 선진국의 초고강도, 기반 콘크리트 개발 필요성을 인지하고 최근 이 분야의 연구를 서두르고 있고, 중국은 2002년 초미립 플라이애시 복합물(PFAC)로 굵은골재를 사용하여 130 MPa의 초고강도 콘크리트를 개발하였으며, Southeast University 대학, Tongji 대학, Zhejiang 대학 등에서 고강도 콘크리트에 대한 연구를 진행 중임
- 그 외 태국 대만, 말레이시아 등에서는 100 MPa 이상의 초고강도 콘크리트에 대한 연구를 활발히 시작되고 있고 특히 동남아 지역을 곡창지대로 Rice Husk ash를 활용한 고강도 및 초고강도 혼화재료 개발에 관심을 집중하여 실리카폼의 대체재로 활용의 대안을 제시함

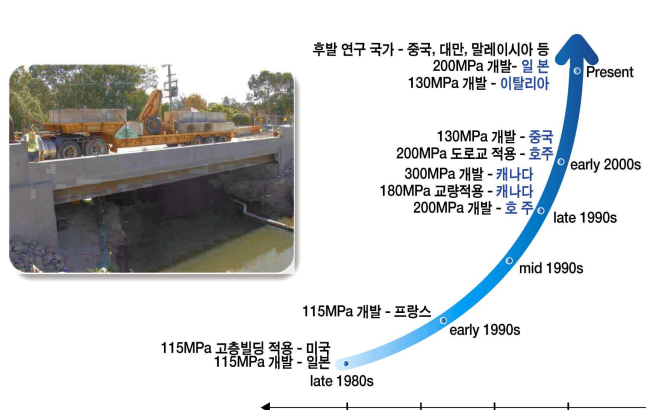


그림 19. 콘크리트 재료 기술 발전 추이 (해외)

- 초고강도, 연성거동 및 파괴에너지 흡수능력이 탁월한 HPFRCC를 LNG 저장탱크 모듈에 적용할 경우 기존 습식 저장탱크 방식에 비해 경제적이고 효율적인 건설기술 확보가 가능할 것으로 판단됨
- HPFRCC는 혼입된 강섬유가 인장보강재 역할을 하여 파괴강도에 이른 후 잔존 강도가 향상되어 구조적 안정성을 높일 수 있으나 내부조직이 밀실하여 내화성능에 매우 취약할 수 있음
- HPFRCC를 모듈러 LNG 저장탱크 외조 구조부재에 적용하기 위해서는 내화성능의 개선과 강재와 합성 시 stud와의 거동이 정확히 규명되어야 함

- 국내의 경우, 지반거동을 고려한 LNG 저장탱크 관련 연구는 매우 제한적으로 수행되었음. KAIST에서는 LNG 저장탱크의 지진응답해석을 통한 내진설계 기술개발 연구를 수행한 적이 있으며, 인천대학교에서는 지반동결에 따른 LNG 저장탱크의 안정성 검토 연구를 수행한 실적이 있음. 그러나 국내 지반조건인 계절동토를 대상으로 진행된 연구 과제가 대부분임
- 한국건설기술연구원에서는 남극 장보고과학기지 건설지원과 동토지역 건설시장 진출을 위한 기초연구로 영구동토를 대상으로 한 지반평가기법 개발, 동토지반 말뚝기초 설계정수 분석, 동토지역 적용 고성능 그라우트 재료 개발 등의 연구를 수행하였으나, 동토지역에 설치되는 LNG 저장탱크 설계 및 시공과 관련된 연구는 전무함 (※출처 : 한국건설기술연구원 연구보고서, 극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술 개발, 2014)



그림 20. 남극 장보고 과학기지 및 동토연구단 연구내용 (개요)

- 최근 동토지역 자원 이송망 설계, 시공 및 유지관리 기술개발 목적으로 연구를 진행 중이나, 심도 3~5 m 깊이의 다양한 지반조건을 고려한 연구가 중심이며, LNG 저장탱크와 연계한 동토지역 기초설계 기술 개발 연구는 반영되어 있지 않음 (※출처 : 국토교통과학기술진흥원, -20°C 이하, 2,000 km급 자원 이송망 설계 시공기술, 2013~2018)

(나) 시장현황

- LNG 인수기지는 수송된 LNG를 하역 및 저장하고 기화 및 송출 시키는 설비로 LNG의 안정적 도입 및 수요확대를 위해 반드시 구축이 필요함
- 최근 강화된 선박의 배출가스 규제인 Tier III가 2020년 전 세계에 발효될 예정이고, 이에 따라 2020년까지 선박용 디젤엔진의 약 25%가 LNG로 전환될 것으로 예측하고 있음. 이에 대비하여 항만 산업이 국가의 큰 산업영역을 차지하는 국내에도 주요항구별로 중소형의 LNG 병커링 기반설비가 계속해서 확충될 것으로 예상됨
- 한국가스공사와 도시가스의 수요예측에 따르면 2030년까지 국내의 LNG 병커링 수요만 1000만 톤 이상으로 예상하고 있음 (※출처 : LNG 병커링 수요조사, 한국가스공사 & 도시가스)
- 한국가스공사를 중심으로 국내 조선 4사와 LNG 병커링과 관련된 전략적 기술개발을 위한 연구가 2000년부터 진행되고 있으며, 병커링 인프라 구축을 위해 해운사 등과 사업화에 대하여 전략 추진 중에 있음
- 산업통상자원부는 ‘에코쉽 상생 협력 네트워크 구축’ 협약을 통해 2025년까지 LNG

병커링 대상 선박인 LNG추진선의 수주율의 70% 달성을 목표로 기술 단계별 로드맵에 따라 해외 의존도가 큰 핵심 기자재의 국산화 지원에 나서고 있으며, LNG연료 국제표준에 대해 한국산업표준(KS) 제정등 표준화를 선도해 기자재의 시장선점 기회를 높일 예정이다

- 그러나 LNG 병커링 설비의 경우 대부분 기 운영 중인 항만 시설에 추가적으로 설치되어야 하므로 기존의 습식 탱크의 제작 공정 및 공기 등을 고려할 때 많은 난제를 내포하고 있음. 즉, 경제성 확보를 전제로 모듈화 된 LNG 저장탱크의 경우 기존의 습식 탱크의 대안이 될 가능성이 매우 높음
- 특히 제주도나, 일반 도시에 친환경 에너지인 LNG의 공급 설비가 확대되는 경우 대규모 토목 공사를 최소화할 수 있는 소형 모듈형 LNG 저장 탱크는 유일한 대안이 될 수 있음
- 세계 LNG 거래량은 2014년 기준 2,411만 톤으로 거래량이 가장 많았던 2011년의 2,415만 톤에 달하는 수준임. 또한 LNG 수출 및 수입 국가 수는 지속적인 증가 추세에 있음

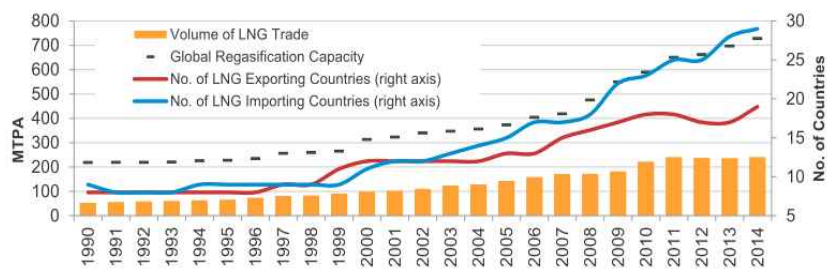


그림 21 . LNG 거래량 (1990-2014)

(※출처 : International Gas Union, "World LNG Report," 2015)

- 기존 LNG 주요 생산국은 주로 아시아태평양 지역이었으나, 1990년 후반부터 카타르의 단계적 증산에 따라 2010년경에는 중동이 최대 생산 지역으로 성장하였음. 2014년 중동 지역의 생산량은 전체 생산량 대비 41% 수준에 도달하였음
- 그러나, 최근 2014년 이후 생산 증가량의 75%는 태평양 해역에서 발생하였음. 호주, 말레이시아, 브루나이, 인도네시아의 LNG 생산 증가로 인해 태평양 해역의 생산량이 320만 톤까지 증가하였음
- 수요자 측면에서 보면, 2014년 리투아니아가 신규 수입국으로 추가됨에 따라 총 수입 국가수가 29개국으로 증가하였음. 2015에는 요르단, 이집트, 파키스탄, 폴란드 등의 국가가 신규 수입국으로 추가되며 LNG 수입국은 점차 증가할 전망이다
- 전술된 바와 같이 최근 LNG 시장의 특징은 수요처와 공급처가 다변화되고 있다는 점임. 즉, 다변화된 LNG 저장 설비 시장에 대응하기 위해서는 기후 및 사회 환경 인자에 많은 영향을 받는 기존의 LNG 저장 탱크보다는 모듈화 된 LNG 저장 탱크가 대안이 될 가능성이 매우 큼

- 지구 온난화에 따른 북극 항로 개척과 더불어 세계 석유와 천연가스의 13%와 30%가 매장된 것으로 알려진 북극 지역에 대한 자원 개발의 필요성이 증가함에 따라 극지 자원 개발용 플랜트에 대한 수요가 증가
 - 현재 개발 및 계획 중인 LNG 액화 플랜트는 총 440 MTPA (Million Tonne Per Annum) 달하는 것으로 보고되고 있으며, 5 MTPA 용량의 LNG 액화 플랜트의 EPC (Engineering, Procurement, Construction) 관련 수주 비용이 약 50억 달러 수준임
 - 따라서 현재 계획 중인 LNG 액화 플랜트 사업은 현재 운용되고 있는 LNG 액화 플랜트(360 MTPA)의 1.2배에 해당하며, 향후 5년간 상용화될 LNG 액화 플랜트의 EPC 비용이 약 4,400억 달러 수준에 달할 것으로 보고되고 있음
 - 일반적으로 육상 LNG 액화 플랜트의 경우 180 K CBM 저장 용량의 LNG 저장탱크가 4대가 설치된다는 점을 고려하면, 현재 계획 중인 극지나 호주 등의 LNG 플랜트를 위한 모듈형 LNG 탱크의 수는 약 40 (12 Project × 4 Tanks) 기로 추정할 수 있음
 - 현재 국제적으로 운용되고 있는 LNG 액화 플랜트 용량은 360 MTPA정도이며 2020년까지 5년간 계획 중인 용량은 1.2배 수준인 440 MTPA 정도
 - BP의 보고서에 따르면 2030년까지 LNG 생산량은 매년 4.3% 정도 증가하고, 2030년에는 전체 천연액화 에너지 중에서 LNG 비중이 15%를 초과할 것으로 예측
 - 5 MTPA 용량의 LNG 액화 플랜트의 EPC 관련 수주 비용은 약 50억 달러 수준이며 계획 중인 440 MTPA 용량의 EPC 관련 비용은 4,400억 달러 정도로 예측
 - 국제적으로 중소형 LNG 저장탱크가 필요한 병커링의 수요는 2030년까지 약 50억톤 예측, 중소형 50,000 m³ 용량 기준으로 약 100,000기의 LNG 저장탱크가 필요
-
- 호주와 미국에서 수행되는 신규 액화 플랜트 프로젝트의 설비 규모가 각각 5,760만 톤/년, 4,410만 톤/년으로 전체 국가 신규 설비 개발 대비 해당 국가에서의 프로젝트가 차지하는 비율이 큼. 추가적으로 러시아 1,650만 톤/년, 말레이시아 700만 톤/년, 인도네시아 250만 톤/년, 콜롬비아 50만 톤/년 규모의 액화 플랜트를 건설 중에 있음
 - 2020년까지의 LNG 액화 플랜트 설비 개발 예상 추이를 보면, 호주, 미국, 러시아 생산량 확대가 두드러짐
 - 특히 호주는 LNG 생산량 확대를 통해 카타르, 인도네시아에 이어 세계 3위의 LNG 생산국이 되었으며, 향후 5년간 이러한 추세를 이어갈 것으로 판단됨. 호주에서만 2018년 이전에 7개의 프로젝트가 신규 진행될 것으로 예상됨
 - 러시아 전체 천연가스 수출 중에서 LNG수출이 차지하는 비중은 2010년 기준 6.7%에 불과하였으나, 최근 정부 차원에서
-
- LNG 수출을 확대하기 위하여 현재 연간 960만 톤의 생산량을 2030년 7,000만 톤까지 증대시킬 계획임. 러시아에서는 현재 Sakhalin-2, Yamal LNG 프로젝트가 진행 중이며 향후 북극지역에서 Shtokman 사업, Pechora 사업 등이 추진될 것으로 예상됨

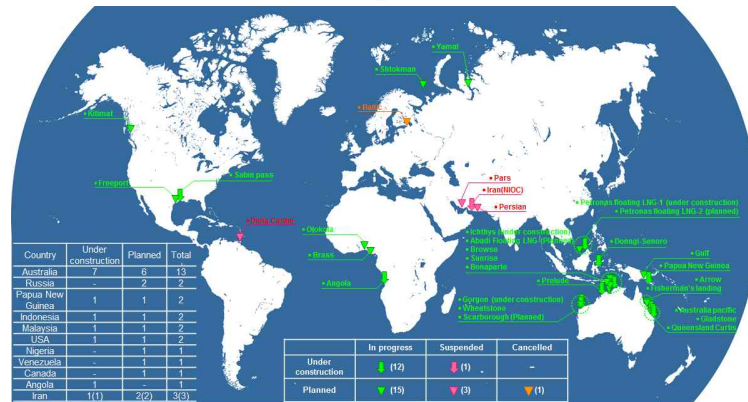


그림 22. LNG 플랜트 개발 예정지역

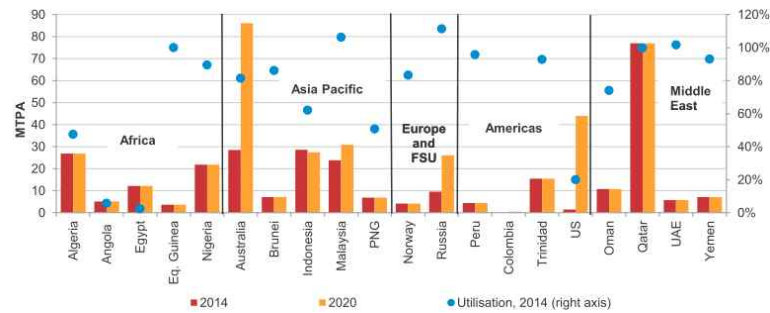


그림 23. 국가별 LNG 생산량 변화 예상

(※출처 : International Gas Union, "World LNG Report," 2015)

Country	Project Name	Start Year	Nameplate Capacity (MTPA)	Owners*
Australia	APLNG T1	2015	4.5	ConocoPhillips, Origin Energy, Sinopec
Australia	APLNG T2	2015	4.5	ConocoPhillips, Origin Energy, Sinopec
Australia	GLNG T1	2015	3.9	Santos, PETRONAS, TOTAL, KOGAS
Australia	Gorgon LNG T1-2	2015	10.4	Chevron, ExxonMobil, Shell, Osaka Gas, Tokyo Gas, Chubu Electric
Australia	QCLNG T2	2015	4.3	BG, Tokyo Gas
Colombia	Caribbean FLNG	2015	0.5	Exmar
Indonesia	Donggi-Senoro LNG	2015	2	Mitsubishi, Pertamina, KOGAS, Medco
Malaysia	MLNG 9	2015	3.6	PETRONAS
Malaysia	PFLNG 1	2016	1.2	PETRONAS
Australia	GLNG T2	2016	3.9	Santos, PETRONAS, TOTAL, KOGAS
Australia	Gorgon LNG T3	2016	5.2	Chevron, ExxonMobil, Shell, Osaka Gas, Tokyo Gas, Chubu Electric
Australia	Ichthys LNG T1	2016	4.2	INPEX, TOTAL, Tokyo Gas, CPC, Osaka Gas, Chubu Electric, Toho Gas
US	Sabine Pass T1-2	2016	9.0	Cheniere
Australia	Wheatstone LNG T1	2016	4.5	Chevron, Apache, Pan Pacific Energy, KUPPEC, Shell, Kyushu Electric
Australia	Ichthys LNG T2	2017	4.2	INPEX, TOTAL, Tokyo Gas, CPC, Osaka Gas, Chubu Electric, Toho Gas
Australia	Prelude FLNG	2017	3.6	Shell, INPEX, KOGAS, CPC
Australia	Wheatstone LNG T2	2017	4.5	Chevron, Apache, Pan Pacific Energy, KUPPEC, Shell, Kyushu Electric
Russia	Yamal LNG T1	2017	5.5	Novatek, TOTAL, CNPC
US	Cove Point LNG	2017	5.25	Dominion
US	Sabine Pass T3-4	2017	9.0	Cheniere
Malaysia	PFLNG 2	2018	1.5	PETRONAS, MISC, Murphy Oil
Russia	Yamal LNG T2	2018	5.5	Novatek, TOTAL, CNPC
US	Cameron LNG T1-3	2018	12.0	Sempra, Mitsubishi/NYK JV, Mitsui, GDF SUEZ
US	Freeport LNG T1	2018	4.4	Freeport LNG, Osaka Gas, Chubu Electric
Russia	Yamal LNG T3	2019	5.5	Novatek, TOTAL, CNPC
US	Freeport LNG T2	2019	4.4	Freeport LNG, IFM Investors

그림 24. LNG 액화 플랜트 개발 계획

(※출처 : International Gas Union, "World LNG Report," 2015)

- 최근 몇 년간, 중소형 LNG 기반시설 시장이 급격히 성장하고 있음. 특히 운송용 연료와 기존 LNG 설비로는 공급이 어려운 지역의 소비자를 대상으로 중소형 LNG 기반 시설의 개발이 활발함
- 중소형 인수 터미널의 경우 규모의 소형화로 인해 충분한 경제성이 확보되지 않은 경우가 많았음. 그러나 신기술 도입, 규격화, 모듈화 등을 통해 경쟁력 향상이 가능함
- 중국은 대기오염 문제를 해결하기 위한 방안으로 기존의 화석 연료를 이용한 발전을 LNG로 대체하는 방안에 대한 경제성 평가를 통하여 적용성을 검토 중임. 2020년까지 중국의 중소형 LNG 설비 규모가 21 MTPA에 도달할 것으로 예상함.
- 인도네시아 LNG 수입 터미널 개발 동향
 - 인도네시아 정부와 PLN(Perusahaan Listrik Negara, 국영 전력회사)는 전력 생산 비용을 절감하기 위하여 연료유를 LNG로 대체하는 전력 생산 기반을 구축 사업을 진행 중에 있음
 - 한편 다수의 섬으로 구성된 인도네시아의 지리적 상황을 고려하여 여러 지역에 소형 LNG 기반 시설을 확충하는 방안이 LNG 기반 전력 생산 및 공급을 위한 최적화 된 형태로 판단하고 있음
 - 계획된 LNG chain portfolio에는 LNG액화 ' bunkering ' 해상 및 육상 운송 ' LNG 육상발전으로 연계된 사업 모델을 포함하고 있으며 이를 위한 소형 LNG terminal이 필수적으로 건설되어야 함
 - 참고로 인도네시아 국영 에너지 기업인 PERTAMINA가 추진하고 있는 LNG bunkering infrastructure 구축 사업에 한국선급이 참여하여 기술 지원을 수행하고 있어 한국 업체의 진입이 유리할 것으로 판단됨
 - 인도네시아의 LNG 발전 사업은 주로 IPP의 형태로 진행되며 PLN이 직접 운영하는 LNG plant를 포함하면 향후 5년 간 총 35 GW에 달하는 용량의 발전 용량을 추가로 확보할 예정임. 현재 계획에는 10~100 MW의 중소형급 발전 시설이 다수 포함되어 있음 (※ Independent Power Producer: 민간 사업자들이 전력 공급을 위한 설비를 구축하고 PLN에 전력을 공급하는 방식의 사업 구성)
 - 10~100 MW의 중소형급 IPP LNG 발전 공사의 경우 추정되는 개별 저장탱크의 용량이 2.5 ~ 12.5 km³ 수준으로 매우 작아 기존에 현장 설치용 탱크의 경우 경제성 확보가 어렵다는 점에 주목할 필요가 있음

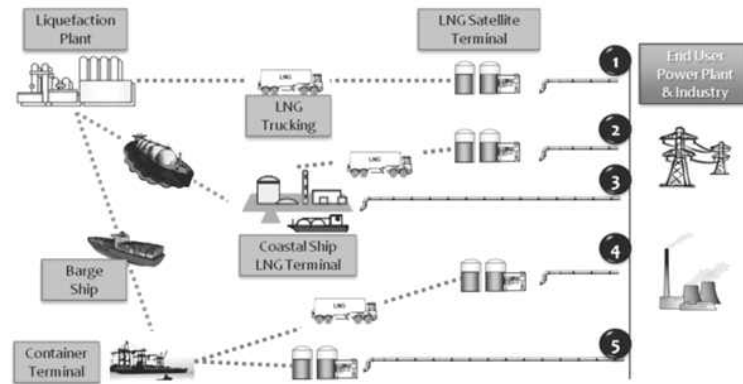


그림 25. 중소형 LNG 터미널 개요

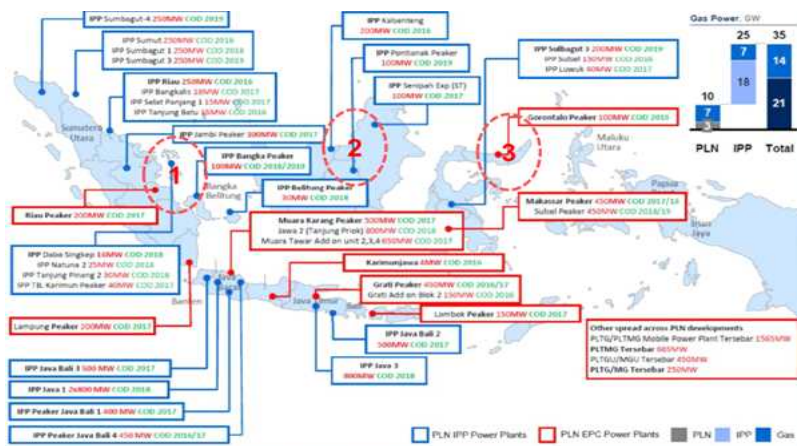


그림 26. 인도네시아 LNG 발전 사업 계획

표 3. 인도네시아 LNG 발전 사업 추진 계획

구분	공사명 / 사이트 위치	발전용량	저장탱크 용량(추정) (m ³)	비고
1	Selat Panjang-1 / Riau	20 MW	5.0 k	상시 발전
2	Bengkalis / Riau	20 MW	5.0 k	상시 발전
3	Tanjung Pinang-2 / Riau	50 MW	12.5 k	상시 발전
4	Natuna-2 / Riau	10 MW	2.5 k	상시 발전
5	Dabo Singkep-1	10 MW	2.5 k	상시 발전
6	Belitung / Bangka Belitung	40 MW	10.0 k	상시 발전
7	Tanjung Balai Karimun / Riau	20 MW	5.0 k	상시 발전
8	Tanjung Batu / Riau	10 MW	2.5 k	상시 발전
9	Pontianak / Kalimantan	100 MW	12.0 k	비 상시적 발전
10	Jambi / Sumatra	100 MW	12.0 k	비 상시적 발전

- 유럽연합집행위원회(EU)는 2025년까지 유럽에 LNG 병커링 기반시설 설치를 촉구함. 이에 따라 노르웨이의 Bergen, Oslo, Gasnor 등과 각국은 LNG 병커링 시설을 확대중임. 또한 국제항만협회(IAPH)가 후원하는 세계 항만 기후변화 협약(WPCI)이 LNG 연료 추진선박 실무협의회(LFVWG)를 설립해 LNG 병커링 안전 이행절차를 개발중임
- Shell은 2012년 노르웨이 LNG 병커링사인 Gasnor를 인수했음. 또한 네덜란드 Shell은 Wartsila와 미국 연근해에서 운항하는 LNG 추진선과 LNG 병커링을 공동으로 추진하고 있으며, LNG 병커링과 중소규모 LNG 액화플랜트 연계 사업을 개발 중임
- 러시아의 Gazprom은 유럽 내 LNG 병커링을 추진 중이며, 네덜란드 Gasunie사와 병커링용 LNG 터미널 프로젝트에 참여중임. 또한, 북해 및 발틱해에서의 LNG 병커링에 대한 공동 개발을 추진 중에 있음
- 프랑스 GDF SUEZ는 네덜란드 Cofely Netherland N.V와 합작회사인 LNG Solution을 설립해 네덜란드 선박과 트럭 연료용 LNG 공급을 추진 중임
- 북미 셰일가스 생산량 증가로 인한 천연가스 가격 하락으로, LNG 병커링이 활성화될 전망이다. LNG 개발 자회사인 Waller사는 루이지애나주 Cameron Parish에 LNG 플랜트를 건설 중이며, 향후 LNG 병커 barge로 선박용 LNG를 선박에 공급하려는 계획을 가지고 있음
- 세계 최대의 유류 병커링 국가인 싱가포르에서는, 싱가포르 항만청과 Singapore LNG가 발전용 LNG 터미널 건설과 LNG 병커링 프로젝트를 추진 중임. 2014년 하반기~2015년 초부터 10,000m³ LNG 병커링 선박을 이용한 LNG 병커링을 시작할 예정임
- 결론적으로 LNG가 기존의 선박 연료유를 대체할 가능성이 매우 높고 이를 위해서는 중소형 규모의 LNG 저장 탱크의 시장도 크게 증가할 것으로 예상됨

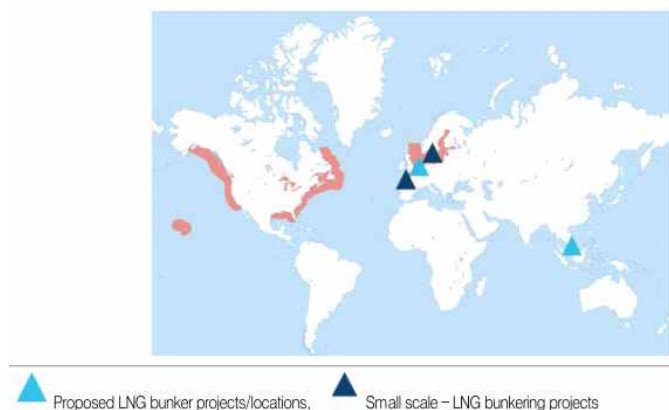


그림 27. Lloyd의 LNG 병커링 기반시설의 현재와 향후 위치 전망



그림 28. DNV의 LNG 벙커링 기반시설의 현재와 향후 위치 전망

(2) 연구개발의 중요성

(가) 기술적 측면

- 극지에서 LNG export 터미널 공사기간은 LNG 저장탱크 건설기간에 좌우됨. 따라서 기존 습식 LNG 저장탱크의 과도한 제작 공사기간 및 공사비용은 해당 프로젝트의 CAPEX(CAPital EXpenditure) 증가 주요인으로 작용하고 있다는 점에서 모듈러 탱크의 개발이 필요함
- Small-scale LNG 프로젝트는 중소형 LNG 수송, 벙커링 및 발전 시설의 건설을 골자로 하며 다수의 중소형 LNG 저장시설을 필요로 함. 통상 LNG 플랜트는 선박 대비 건설 기간이 길고, 그 중 저장시설의 건설에 가장 긴 시간이 소요되는 점을 감안할 때 공사기간을 단축할 수 있는 모듈러 LNG 저장탱크의 시장 진출 가능성이 높음
- LNG 저장탱크 모듈화 기술은 아직 세계적으로도 완성된 바 없는 기술임. 따라서 중소형 LNG 저장탱크 EPC 시장을 선점하기 위해서는 세계 수준의 핵심요소기술을 바탕으로 중소형 LNG 저장탱크 건설기술을 시급히 개발할 필요가 있음
- 특히 SCP 구조는 공사기간 단축과 모듈러 원스톱 설치 방식 등, 현장 시공성이 용이하고 공장 제작 및 조립이 가능하여 기술적 편의성도 높음. 또한 소형 원전 격납건물 등에 대한 적용 타당성이 검토되는 등 타 산업분야에 파급효과를 가져올 것으로 기대
- 국내 조선소의 육상 및 해상 LNG 플랜트 설비 모듈 설계 및 운송, 그리고 현장 설치 관련 세계 최고의 기술을 보유하고 있으므로 이의 활용이 가능함

(나) 경제-산업적 측면

- 극지 및 오지에 매설되어 있는 것으로 추정되는 LNG 매장지 중 상당수가 과도한 초기 투자비용으로 개발 타당성이 떨어질 수 있는 상황에서 LNG 저장탱크의 모듈화를 통한 건설 공기 단축 및 비용 절감 등의 효과를 본 과제를 통하여 검증함으로써 극지 및 오지 프로젝트 시장을 석권할 수 있을 것으로 기대

- 기존 및 건설 중인 플랜트로는 글로벌 플랜트 시장에서 증가하는 수요 충족이 어렵고, 2025년까지 LNG complex 규모는 약 200조원에 달할 것으로 예상됨(※ 출처 : LNG 글로벌 컨퍼런스 2014). 일반적으로 LNG complex 중 LNG 저장탱크가 차지하는 금액 비율은 약 6% 이며, 이는 약 12조원에 달하는 규모임
- 25,000 m³ 용량의 중소형 LNG 저장탱크의 1기 건설비용은 약 0.3억 달러(350억 원) /기 정도로 가정하면 2030년까지 중소형 LNG세계 시장규모는 300억 달러(35조 원) 규모가 예상 (FOB, Free On Board 기준)
- 또한 2020년 전 세계에 발표 예정인 Tier3의 선박 연소가스 배출 제안기준을 만족하기 위해 기존 디젤연료 추진 선박 중 20%가 LNG 추진 선박으로 전환될 것으로 예상됨에 따라, 관련 LNG 병커링 시설이 급격히 늘어날 것으로 예상되는데, 모듈러 LNG 저장탱크는 공기 단축의 이점에 따라 상당수의 LNG 병커링 시장을 선점할 수 있을 것으로 전망됨

(다) 사회적 측면

- 가스 저장탱크 생산 공정은 많은 부분을 인력에 의존하는 노동력 친화적 제조업. 점차 양질의 일자리가 감소하는 사회적 경향에 비해, 본 연구개발 성과물이 사업화될 경우 연간 1만 명 이상의 고용 효과 창출
- 향후 청정 환경 확보를 위한 가스 수요가 점차 증가할 것으로 예측되며, 개발지 저장탱크 소형화 및 사용지 병커링 등의 중소형 저장탱크 수요가 증가함을 고려하면 가스의 개발과 사용 측면에서 다양한 선택의 폭을 제공할 필요가 있음
- 국내외 LNG 병커링이 활성화 되는 경우 도서지역에 필요한 전력송전 선로 건설로 인한 해양환경 저해 등의 사회적 불만요인의 감소와 전력요금의 상승 또한 억제할 수 있음
- 모듈형 LNG 저장 탱크의 경우 사용 조건상의 설계 및 운전 시스템뿐 아니라, 운송 조건하에서 발생 가능한 모든 위험 요소를 제어할 수 있는 기술 개발이 요구되기 때문에 관련 산업 기관과 유기적인 협력 체계를 구축이 필요

(라) 정부정책적 측면

- 경제혁신 3개년 계획(' 14.3) - (37. 해외건설·플랜트 수출 고부가가치화) 및 (39. E DCF를 통한 중소·중견기업 진출확대)
 - 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 건설시장 진출을 위해서는 R&D를 통하여 중소 및 중견기업을 육성하고 ODA/EDCF 자금을 활용하여 해외 중소형 LNG 저장탱크 건설실적 확보 필요
- 2014년도 해외건설 추진계획(' 14.4) - (2. 해외건설 산업 수익성 제고 지원)
 - 해외 플랜트 건설 산업 수익성 제고와 고부가가치 창출을 위해서는 해외 중소형 LNG 저장탱크 건설에 특화된 세계 메이저 석유·가스 회사와의 파트너십 진출 모델 개발 필요
- 제22차 국가과학기술자문회의(' 15.5) - 엔지니어링사업 기술경쟁력 제고를 위한 5

대 핵심전략 제시

- 중소형 LNG 저장탱크 기술은 구조형식의 모듈러 건설기술과 이동 운반 및 설치의 대규모 블록 조선 기술의 상호 보완적인 기반 기술이 중요. 이들 국내 비교우위 기술을 바탕으로 세계시장에서 기술 선점 달성 가능
- 제5차 건설산업진흥기본계획(2013~2017) - 건설산업 성장동력 강화의 일환으로 시장선도형 고부가가치 창출 R&D 수행 필요성 강조
 - 점차 좁아지는 해외건설 수주시장의 활로를 개척하기 위해 선도형 신기술인 모듈러 LNG 저장탱크를 개발, 해외건설 5대 강국 진입에 일조
- 녹색 성장 관련 정책 및 동향
 - 개도국의 저탄소, 지속가능 경제성장과 특히 "Green Growth"전략을 추진할 수 있도록 민관부문에서 협력하여 전문적인 정책연구 및 정책개발을 하는 역할을 수행
 - 우리나라는 세계 8위의 온실가스 多배출국으로서 건설재료 부분에 대한 탄소배출량 저감 이슈화, 시멘트 구성에서 산업부산물 활용 5%→10% 허용 추진

다. 연구개발 범위

(1) 연구개발 대상

- LNG 저장용량 10,000~60,000 m³ 급의 저장탱크 외조 모듈 설계 및 제작 기술 개발
- 외조 모듈과 기존 내조를 결합하여 새로운 형식의 LNG 저장탱크의 제작 기술 개발
- 완성된 저장탱크의 육상 및 해상 이송 기술, 현장 설치 기술과 가동 전 검사(pre-commissioning)를 포함한 원스톱 EPC 기술 개발

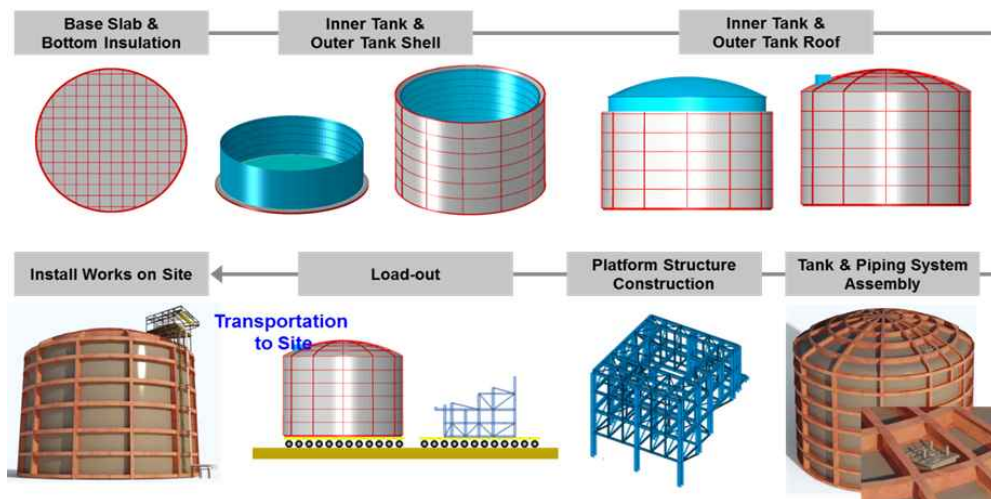


그림 29. 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 제작 및 설치 개념도

(가) 저장탱크 외조 모듈화 기술

- 강재와 강재 사이를 콘크리트 채움으로 연결한 SCP 모듈을 설계 및 제작하는 기술
- 외부 단면은 강재, 내부 단면은 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료로 구성된 HPCP 모듈을 설계 및 제작하는 기술
- SCP 또는 HPCP 모듈을 강재 프레임과 결합하여 가스 저장탱크의 외조 구조를 형성하는 기술

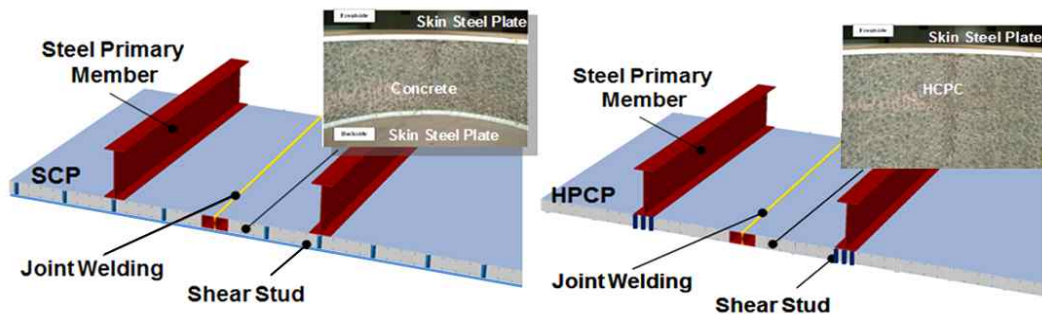


그림 30. SCP 및 HPCP 모듈 기본 구성

(나) 모듈러 저장탱크 안전성 해석 기술

- SCP · HPCP 모듈의 구조해석 및 결합된 저장탱크의 구조해석
- 저장탱크의 동적거동해석, 온도와 환경에 의한 비기계적 거동 해석
- 모듈의 구조 안전성과 저장탱크의 극한 저항력을 산정하는 기술
- 설계에 필요한 해석 자료를 제공하고 이송 · 설치 시 단계별 안전성 해석에 활용

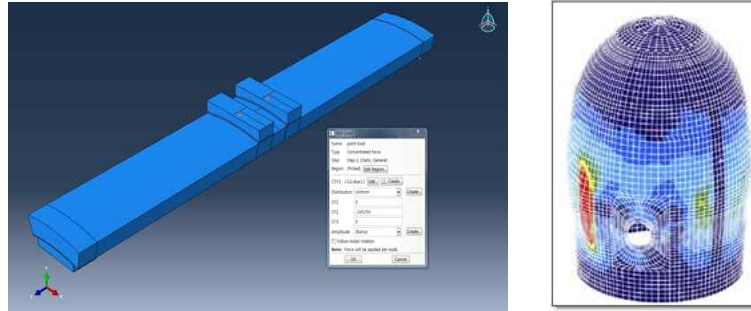


그림 31. 외조 모듈 및 가스 저장탱크 안전성 해석 가상 예

(다) SCP용 고유동 충전 콘크리트 및 HPCP 합성용 고성능 복합재료 기술

- SCP 모듈용 자기 충전성 콘크리트 재료 기술
- HPCP 모듈을 구성하기 위한 HPFRCC 재료 기술



그림 32. SCP 고유동 충전 콘크리트 및 HPCP 합성용 HPFRCC 재료 구성 예

(라) 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 EPC 기술

- 완전 방호형 모듈러 LNG 저장 탱크 내조 및 외조 설계 기술
- 자재 구매 및 조달 연계 시스템 구축
- 세부 블록 모듈 설계 및 제작 관련 표준 시공 기술
- 모듈러 탱크의 육상 및 해상 운송 그리고 현장 설치 기술

(마) 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 국제 인증

- 구조 안전성 및 성능평가 연구성과를 토대로 설계 검증 절차 수행
- 사업화를 위해 국제인증기관(예, DNV-GL, ABSG Consulting 등)을 통한 사용 적합성 평가와 설계 검증 획득

2. 연구수행내용 및 성과

가. 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 EPC 전주기 기술 개발 및 국제 인증

(1) 연구 내용

(가) SCP 외조 모듈 구조형식 개발

○ SCP 구조재료 적용 타당성 검토

- 강-콘크리트 합성 구조 적용 사례 및 관련 기준을 검토한 결과 이미 원자력 발전소 보조 격납 건물, 고층 빌딩 등 다양한 토목 구조물에 적용되고 있음.
- 아직까지 LNG 저장탱크에 적용한 사례는 없으나, 내조에서 LNG 누출이 발생하는 경우 적절한 단열 시스템과의 복합 구조 적용시 누출액을 가두는 역할을 하는 외조 부재로써 SCP의 적용이 타당하다고 판단됨.

○ SCP 설계 guidance 조사

- 강-콘크리트 합성 구조의 설계 문서로 3가지 문헌을 조사함.
INCA guidance (DNV-GL) / AISC N690 / KEPIC SNG

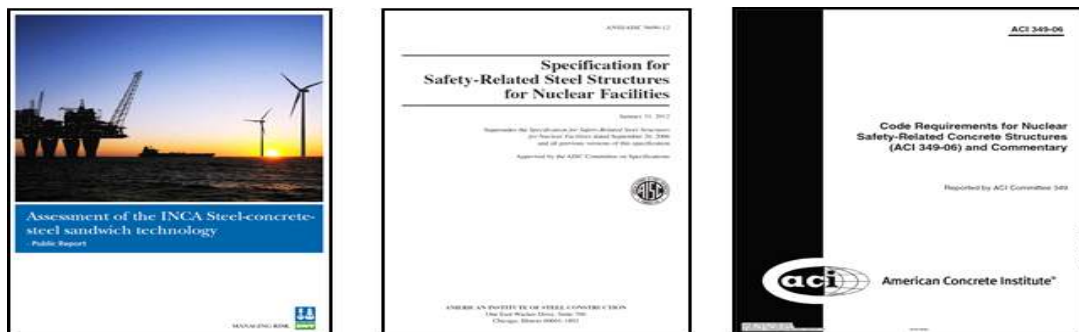


그림 33 강-콘크리트 합성 구조 관련 설계 문서

- 상기 설계 기준에서는 강-콘크리트의 합성 거동을 위해 스테드 배치 간격에 대한 기준을 제시하고 있으며, 공통적으로 고려하는 설계 사항은 크게 세 가지로 구분됨.
Skin steel plate 국부좌굴 / 스테드 강재 파괴 / 콘크리트 파괴
- 설계 항목 중 스테드 배치 간격을 가장 보수적으로 설계하는 인자는 'skin steel plate'의 국부좌굴이며, 관련 설계기준 중 가장 보수적인 기준을 제시하는 문서는 INCA-guidance임. 즉, SCP의 스테드 배치 설계 기준으로 INCA-guidance를 사용하는 것이 가장 안전할 것으로 판단됨

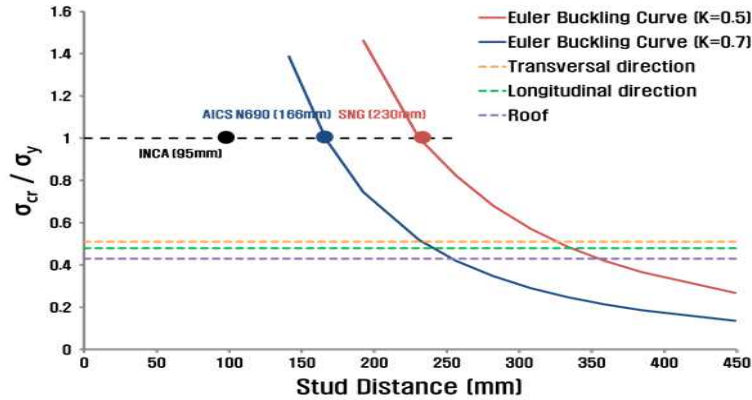


그림 34 문서별 skin steel plate 국부좌굴 방지 설계 사항 비교

○ SCP 모듈 기본설계 및 성능평가

- INCA guidance를 기반으로 SCP의 스티드 간격의 안전성을 평가하는 기본설계 계산 시트를 제작
- 60,000m³ 용량의 외조 바닥판과 벽체에 적용되는 두께 250mm SCP는 8mm 강판-234mm 콘크리트-8mm 강판으로 구성되며, 스티드 간격은 125mm임
- 외조 지붕에 적용되는 두께 200mm SCP는 8mm 강판-184mm 콘크리트-8mm 강판으로 구성되며, 스티드 간격은 125mm임
- 유한요소해석을 통해 설계된 SCP의 휨성능을 평가하였으며, INCA-guidance에서 명시하는 설계 휨강도 이상의 성능을 보일 것으로 예상됨

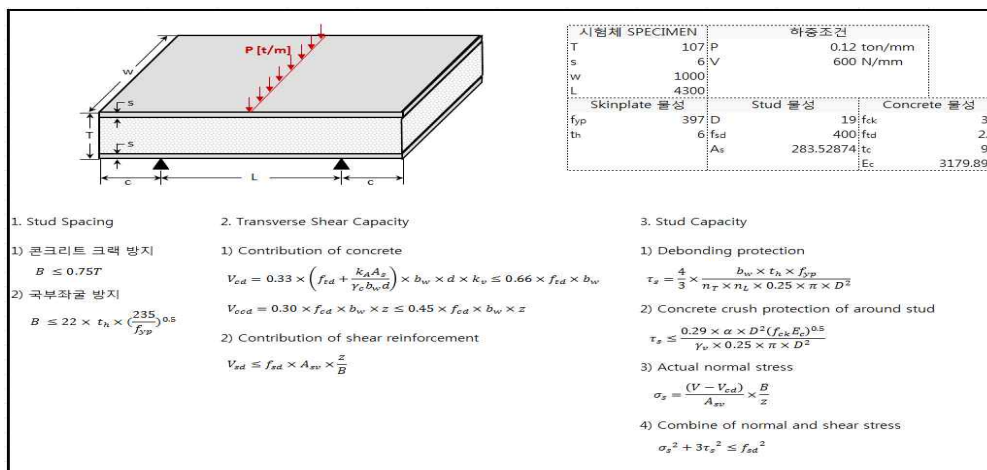


그림 35 스티드 간격 설계 시트

(나) 모듈러 LNG 저장탱크 내조 및 외조 기본설계

○ 기존 LNG 저장탱크 설계코드 기반의 60,000m³ 내조 및 외조 기본설계

- 내조설계 개요
 - API 620 코드 기반 설계 수행 (허용응력 설계법)
 - 상용 유한요소 해석 프로그램, ABAQUS를 사용해 기본설계 평가 및 개선
- 외조설계 개요

- EN 코드에 따라 충분한 단면력을 확보하도록 기본설계 수행 (극한강도 설계법)
- 상용 유한요소 해석 프로그램, ANSYS를 사용해 기본설계 평가 및 개선
- 직경 65m, side wall 높이 20m의 내조 기본설계를 수행하였으며, 유한요소 해석을 통해 4가지 하중조합에 대한 구조안전성을 검토함.



그림 36 내조 기본설계안의 유한요소 모델

- 직경 69.8m, side wall 높이 21.9m의 외조 기본설계를 수행함. Steel primary member 주요부재와 보조 부재는 각각 H600x250x13/25, H400X200X8/13을 사용함. 바닥판과 벽체에는 두께 250mm의 SCP를 적용하고, 지붕에는 두께 200mm SCP를 적용함. 정상상태의 5가지 하중조합과 비정상상태 4가지 하중조합을 고려해 구조안전성을 검토

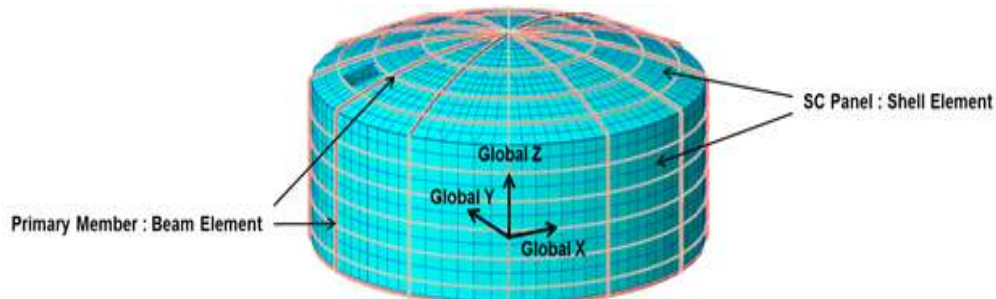


그림 37 외조 기본설계안의 유한요소 모델

○ 해상 운송 및 설치 하중 평가

- 해상 운송 중 모듈러 탱크는 선체의 종방향 stopper, 횡방향 stopper, 수직방향 support에 의해서 바지선에 걸착되고 육상 운송은 SPMT에 고정되어 운송

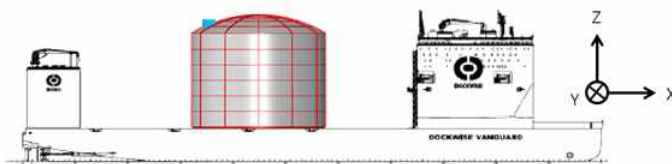


그림 38. 해상 운송 개념도



그림 39. 육상운송 개념

- 탱크의 해상 운송 및 설치 작업중 구조 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 조건을 선정

- 해상 조건: North Atlantic (IACS wave scatter diagram)
- 속도: 0kts, 6kts, 12kts 총 3가지 조건
- Heading: 30도 간격으로 12가지 조건
- 재현 주기: 10년 동안의 최대 가속도
- 해상 운송 조건 수립을 위하여 바지선 거동, heave 영향, 풍하중 고려
 - 바지선 거동: A_x 2.94E-03m/s², A_y 1.93E+00m/s², A_z 8.62E-01m/s²
 - heave: 연직방향으로 중력의 0.2배 고려
 - 풍하중: 45m/s
- 육상 설치 작업시 사용되는 SPMT의 최대 속도하에 예측된 최대 가속도 1.96m/s²를 사용
- 운송간 영향을 주는 하중과 운송 지지조건을 반영한 유한요소 모델을 내조 및 외조에 대해 구축하여 구조 안전성 평가를 수행
- 유한요소해석 결과, 운송 하중 하에서 내조와 외조의 구조 부재는 설계 기준 강도 이하의 응력을 나타내어 설계 적합성을 확인

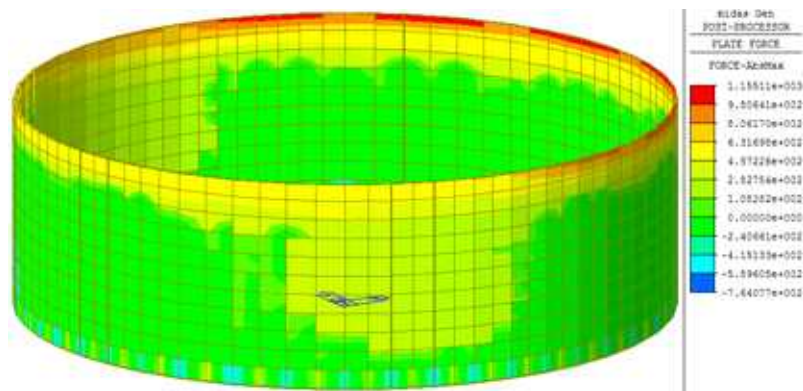


그림 40. 해상 운송시 외조의 축력 해석 결과

○ 내조 설치시 구조 적합성 평가

- 기존의 LNG 저장탱크 내조는 현장에 설치되면서 충수기밀시험 및 cool-down을 거친 후 사용되게 됨. 따라서 모듈러 LNG 저장탱크의 내조도 설치 과정 중 구조 안전성 평가가 필요
- 충수시험은 최대 수위의 62%로 충수하여 기밀압력은 설계 증기압의 1.25배인 0.024MPa의 조건이며 유한요소 해석으로 내조의 설계 적합성을 평가
- 충수시험 압력 조건
 - 충수압: 0.123MPa(최대 수위 62%)
 - 기밀압: 0.024MPa(설계 증기압의 1.25배)

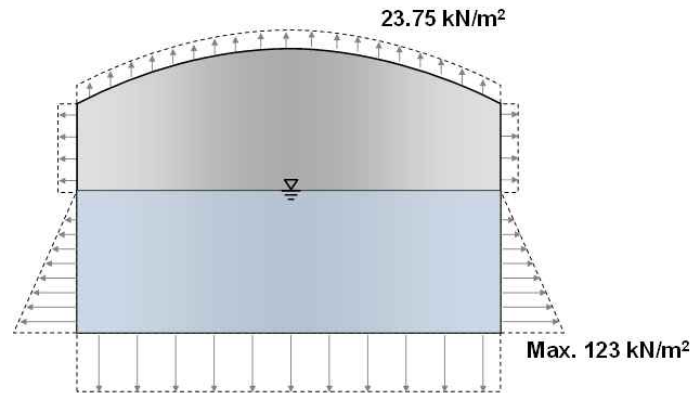


그림 41. 충수/기밀시험 압력 조건

- 충수/기밀시험 평가 결과, 측면벽, 천정부, 브라켓 등의 내조 구조 부재에서 구조 안전성을 확인

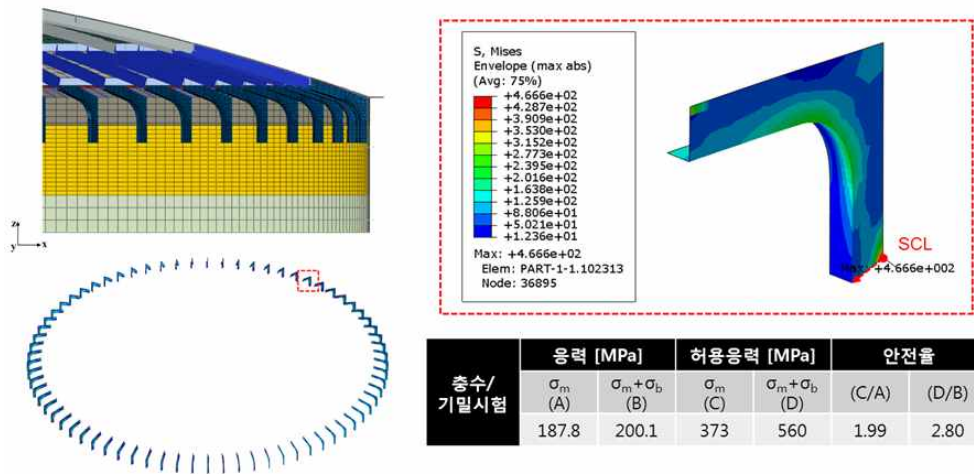


그림 42. 내조 bracket 응력 평가 결과

- Cool down은 내조의 온도를 LNG 저장에 가능한 초저온 조건으로 낮추는 것으로 시간당 3~5℃로 냉각

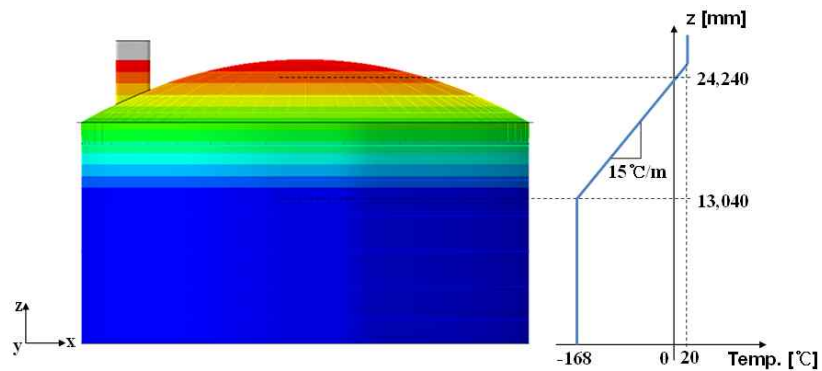


그림 43. Cool-down시 온도 구배

- 모듈러 LNG 저장탱크의 외조는 천정부와 하부의 온도구배를 설정하여 구조

부재의 안전성을 유한요소해석을 통해 평가

- Cool down시 안전성 평가 결과, 측면벽, 천정부, 브라켓 등의 내조 구조 부재에서 구조적 안전성을 확인

(다) SCP 부재 설계 및 구조성능 평가

○ SCP 모듈의 구조 성능 시험

- Steel housing 제작 후 콘크리트를 타설하여 SCP 구조 성능 시험용 시편 총 41EA를 제작
휨 시험용 시편:15EA / 압축 시험용 시편:14EA / 전단 시험용 시편:12EA
- 시편은 접합부가 없는 plane SCP와 접합부를 포함하는 jointed SCP로 구분 되고 jointed SCP 시편은 시공 중 발생이 예상되는 모듈간 콘크리트 불연속부(최대 30mm)와 접합부 용접 시공 단차(최대 2mm)를 고려하여 시편을 제작
- 구조 성능 시험은 휨시험, 압축시험, 전단시험으로 수행되었고 강-콘크리트 합성 구조의 설계 문서(INCA guidance, EN)를 통해 설계 강도 및 극한 강도를 계산

표 4. 시험 항목별 시편 구성 현황

시험 항목	시험체 수량 [EA]			
	Plane	Joint A	Joint B	Joint C
휨	6	3	3	3
압축	9 (편심 고려)	3	—	—
전단	3	3	3	3

표 5. 이음부 시편의 구조결함 포함 내용

시험 항목	Joint A		Joint B		Joint C	
	T.M*	D**	T.M*	D**	T.M*	D**
휨	—	5	—	5	—	—
		10		10	1	
		15		15	2	
압축	—	15				
	1					
	2					
전단	—	5	—	5	—	—
		10		10	1	
		15		15	2	

*T.M: Transverse Misalignment, 용접 시공 단차 [mm]

**D: Discontinuity of concrete core, 모듈간 콘크리트 불연속부 [mm]

- 시험 설계
 - 휨 시험: 순수 휨 구간에서의 거동 확인을 위해 4점 휨 시험을 수행

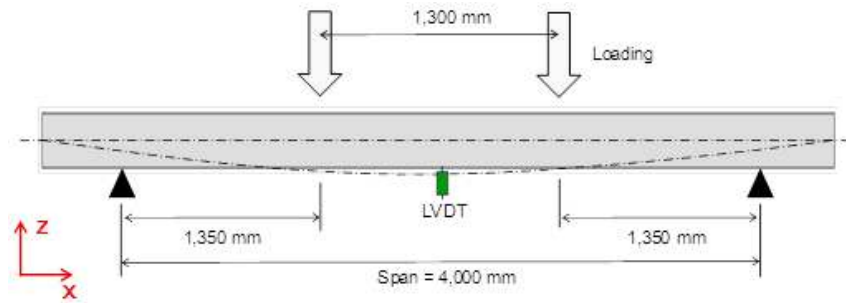


그림 44. 4점 휨시험 형상

- 압축 시험: 편심 하중으로 인한 영향을 평가하기 위해 Eurocode4 (EN 1994)에 따라 부재의 하중-휨 영향을 예측하였고, 총 4개 하중 조합 하에서 압축 시험을 수행

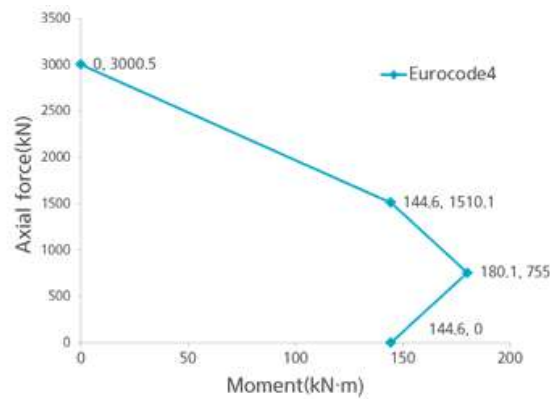


그림 45. 편심 압축 하중조합

- 전단 시험: 휨 파괴 이전에 전단 파괴를 확인할 수 있도록 시험 설계

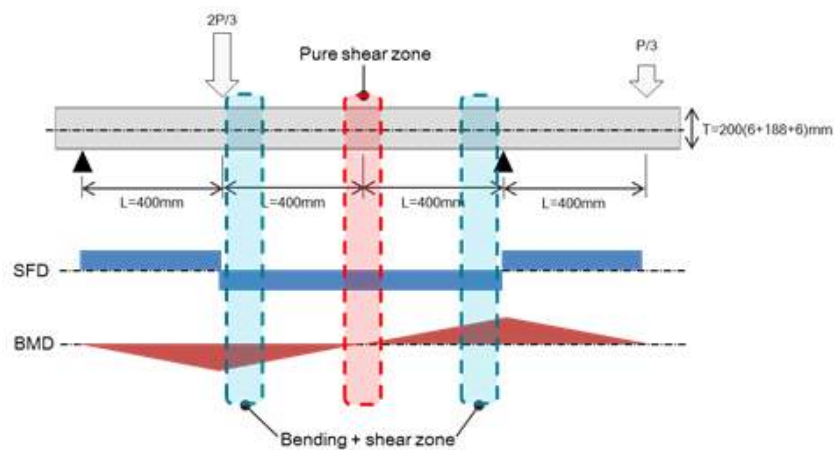


그림 46. 전단시험 설계 형상

- Plane SCP의 구조 성능시험 결과, SCP 모듈의 축력은 9,000 kN/m, 휨모멘트는 554.9 kN · m/m 수준으로 각각 달성 목표치를 초과하는 저항력을 확보함

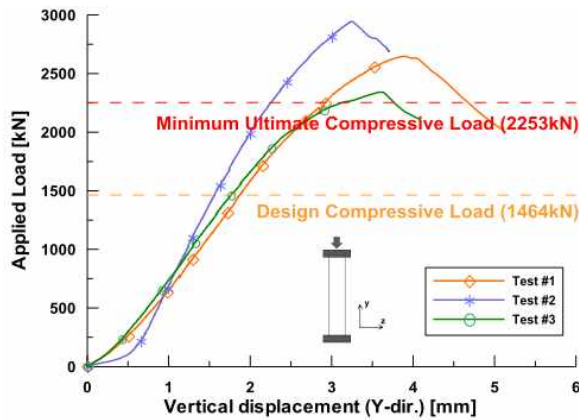


그림 47. 압축 성능 결과 (폭 200mm)

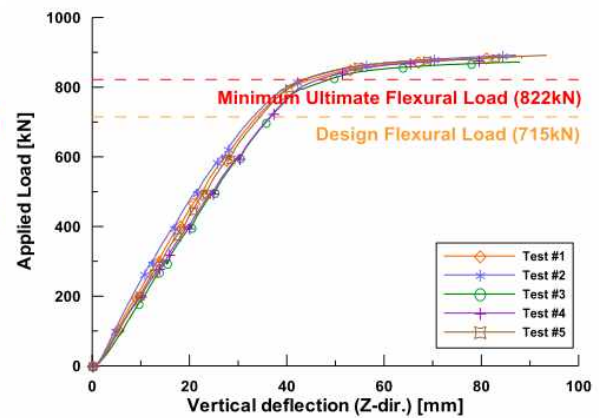


그림 48. 휨 시험 결과 (폭 1,000mm)

- Jointed SCP의 구조 성능시험 결과, plane SCP 시편의 구조성능과 동등수준을 나타내어 접합부 이음 효율이 1.0이상임을 확인

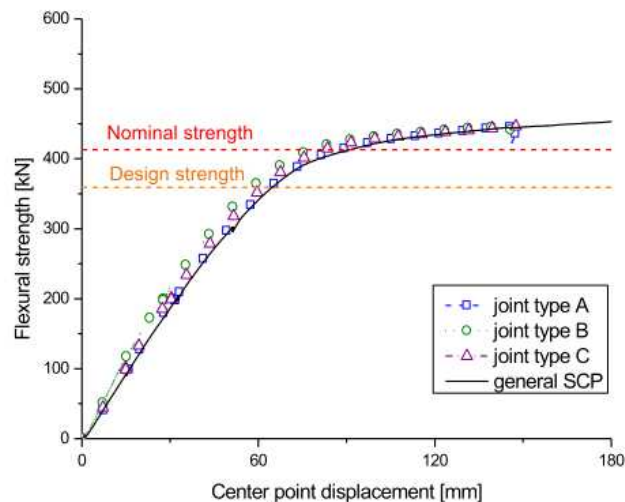


그림 49. 이음부 휨 성능 평가 (두께 100mm, 폭 1,000mm)

○ SCP 접합부 상세설계

- SCP 모듈은 연결 방향에 따라 3가지 type의 접합부가 형성
Type A:Open-Open edge / Type B:Open-Closed edge / Type C:Closed-Closed edge
- 접합부 상세설계는 모듈러 LNG 저장탱크의 스티드 배치 설계 기준인 INCA guidance를 기반으로 스티드 간격의 안전성을 평가하는 계산 시트를 통해 두께 200mm SCP에 대해서 수행
- 설계 대상 SCP의 두께는 200mm이고 8mm 강판-184mm 콘크리트-8mm 강판으로 구성되며, 스티드 간격은 125mm
- 접합부의 콘크리트 불연속부로 인한 부재 성능 감소를 감안하여 flat bar를 13mm로 설계
- (콘크리트 두께 x 콘크리트 압축강도) < (flat bar 두께 13mm x 강재 항복강도 x

2) 임을 확인

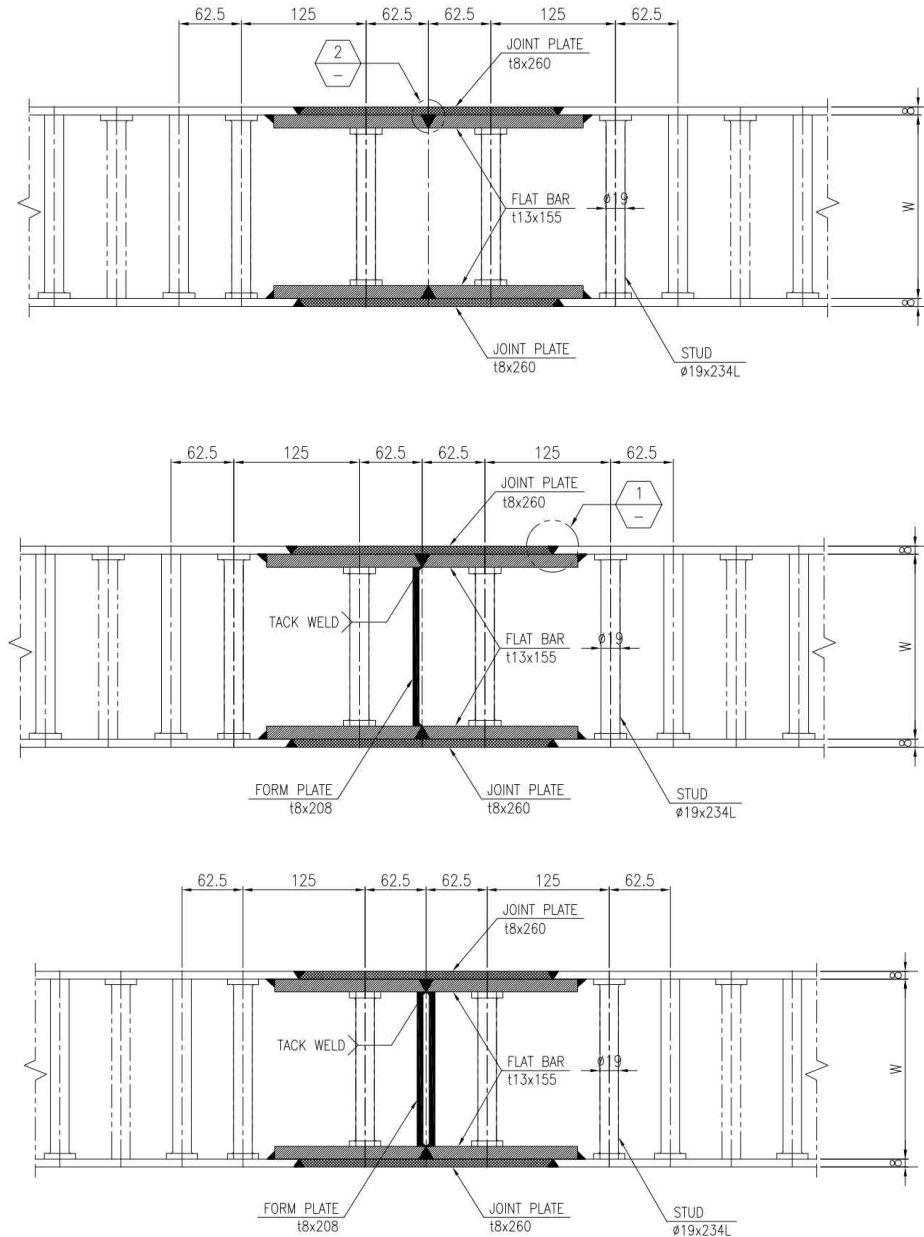


그림 50. 이음부 타입별 단면 형상

- SCP 접합부 용접 시공 및 용접부 비파괴 검사 방안
 - flat bar는 skin plate 상에 각장 8mm의 fillet 용접으로 시공함.
 - Joint B, C의 form plate는 콘크리트 채움을 위한 거푸집용 강판으로 단위 길이당 3 point tack 용접
 - 접합부의 두께 8mm의 joint plate는 후면의 두께 13mm flat bar를 back plate로 삼아 butt 용접을 수행함. 이 때 root gap은 3~8mm, root face는 0~2mm, groove angle은 35~60° 로 유지 필요
 - 접합부의 두께 13mm의 flat bar는 후면의 용락을 방지하기 위해 2pass GTAW(Gas Tungsten Arc Weld) TIG를 수행하며, 이후 FCAW(Flux Cored

Arc Weld)를 수행함. 이 때 root gap은 $3.2 \pm 0.8\text{mm}$, root face는 $1.6 \pm 0.8\text{mm}$, groove angle은 $60 \pm 50^\circ$ 로 유지 필요

- SCP joint 용접부 비파괴 검사 방안 (초음파 검사 및 자분탐상 검사) 수립 및 실 부재 시험적용

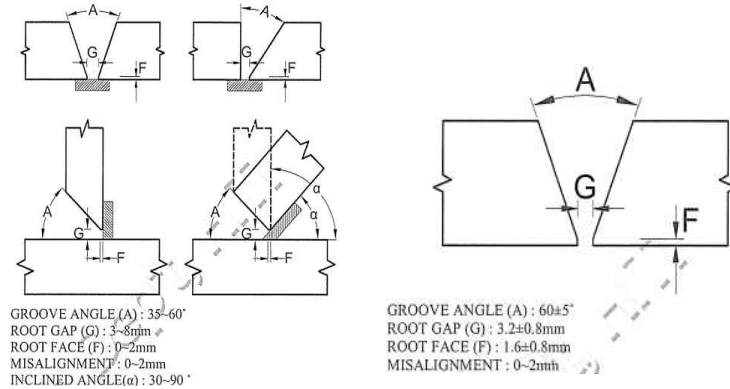


그림 51. 접합부 용접 상세도

○ SCP - H-beam 연결방안

- SCP - H-beam 연결시 각장 8mm의 fillet 용접을 적용
- 용접부의 응력집중을 방지하기 위해 H-beam간 교차점에는 scallop을 설계

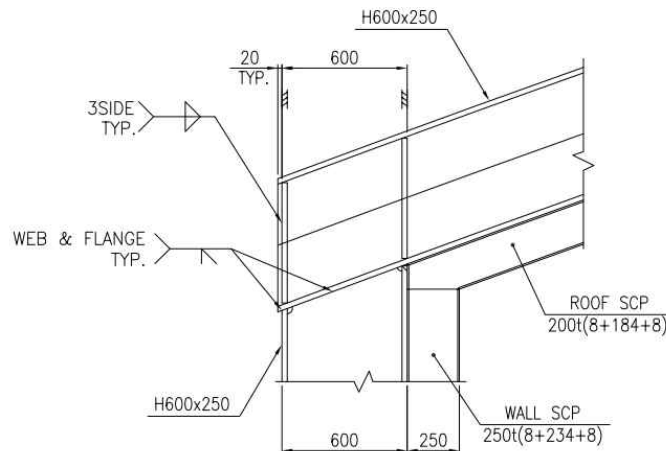


그림 52. SCP - H-beam 연결부 형상

○ SCP 정도관리 방안

- 스티드 용접시의 입열로 인해 강판은 면외방향의 용접변형이 발생함. 이러한 변형은 외조 모듈의 치수 불량을 야기할 수 있음. 이를 방지하기 위해 강재 프레임 제작 과정에서 정도 관리가 필요
- 스티드 용접 이전에 강판에 역변형을 가하면 스티드 용접시의 변형과 상쇄효과로 정도관리가 가능
- 유한요소 해석을 통해 역변형 유무에 따른 스티드 용접 이후 강재의 변형 정도를 예측하였으며, 그 결과를 바탕으로 역변형 곡률을 설계
- 스티드 용접시 변형을 예측하기 위해 아래 절차에 따라 입열 모델을 수립
 - 단위 스티드 입열량 시험

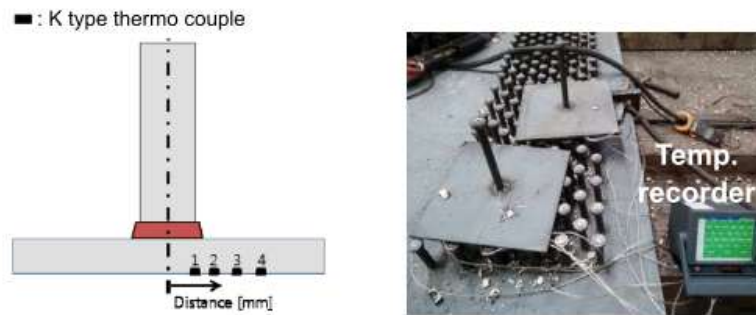


그림 53. 단위 스티드 입열량 시험

- 단위 유한요소 모델 생성 및 시험값과 비교 검증

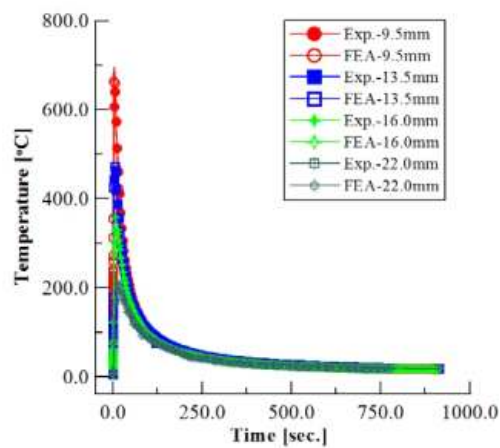


그림 54. 시험 및 해석값 비교

- 실 구조물 변형 제어를 위한 역변형량 시뮬레이션

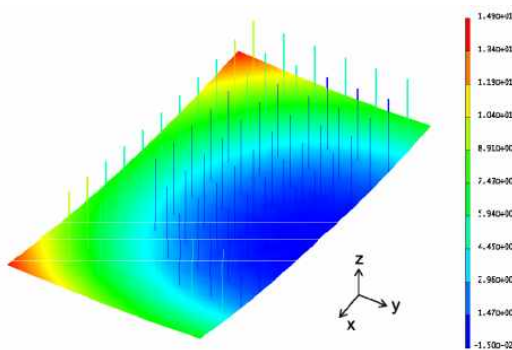


그림 55. 일반 시공시 변형 예측

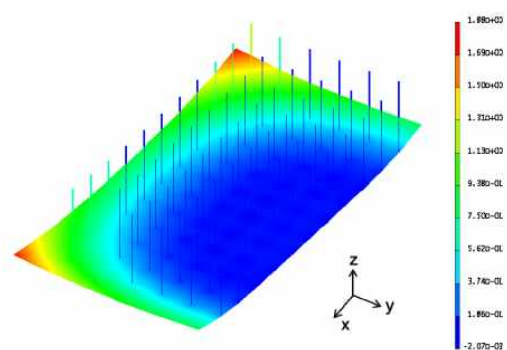


그림 56. 역변형 적용시 변형 예측

- 역변형 적용 실험: 스티드 시공 이전에 강판에 탄성범위 이내의 응력이 작용하도록 역곡을 적용



그림 57. 역곡 적용 현장

- 폭 1m, 길이 5m 강판을 대상으로 역변형 효과를 시험하였고, 면외방향으로 3.5mm 이내로 정도 관리가 가능함을 확인

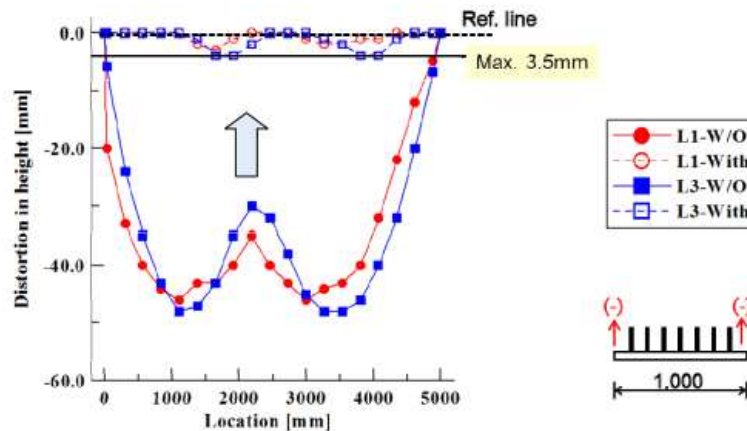


그림 58. 역변형 영향 시험 결과

(라) EPC 전주기 기술 개발

○ 기본설계 process 개발

- 모듈화된 외조 및 내조의 기본설계시 따라야 하는 설계 hierachy를 정립
- 내조의 경우 API625 코드를 기반으로 설계하며, 구조 안전성 평가는 API620, ASME Sec.VIII Div.2 기준을 따름.
- 외조 기본설계는 EN 코드의 하중 조합과 INCA-guidance를 고려하여 설계 마진을 확보함. Steel primary member는 EN코드 기준으로 단면을 검토하며, 강도감소계수를 이용하여 설계

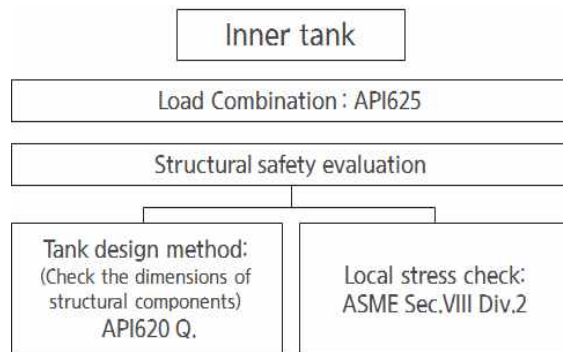


그림 59 내조의 설계 hierarchy

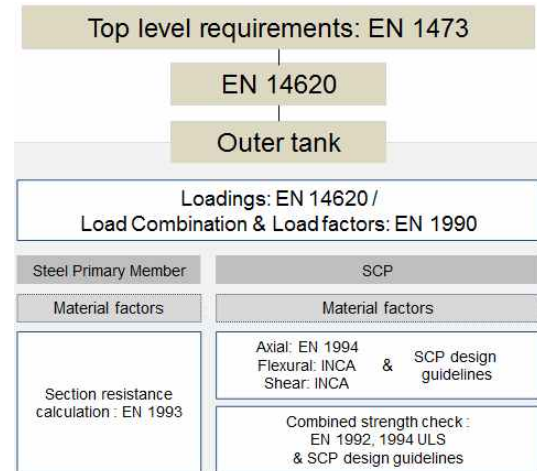


그림 60 외조의 설계 hierarchy

- 모듈러 LNG 저장탱크 설계/자재/모듈제작/이송/조립 EPC프로세스 수립
 - 관련 자재 수급을 위해 재료별 공급 업체를 리스트화 하고, 자재 구매 및 조달 절차를 수립
 - 외조 모듈의 제작 절차 수립
 - 모듈러 LNG 저장 탱크의 해상 및 육상 운송 조건을 수립
 - 공장 및 현장 각각에서의 제작/조립 작업 영역을 수립하고, 탱크 성능 검증을 위한 검사 항목을 산정
 - 공장 작업: 내/외조 제작 및 의장품 설치 → 질소가스 퍼징
 - 현장 작업: 플랫폼 설치 → 수압 시험 → 공기압 시험 → 단열재 시공

(마) 모듈러 LNG 저장탱크 경제성 평가

- 목표시장 경제성 분석 및 세계시장 진출전략 검토
 - 접근이 어려운 도서지역이나 연중 작업 기간이 제한되는 극지의 경우 공기, 비용 문제로 기존 stick-built type LNG 저장탱크를 적용하기 어렵다는 문제가 있음.
 - 이러한 문제의 해결책으로 세 가지 진출전략을 검토
 - 모듈의 최대화를 통한 현장 작업 최소화
 - 현장 작업 단순화
 - 현장에서의 가동전 검사 항목을 최소화
 - 이에 따라, 모듈화를 통한 제작 site의 환경 불확실성을 배제하여 CAPEX를 개선 가능할 것으로 기대됨. (현재: 습식대비 EPC 비용 절감 수준 극지 24%, 오지 8%)

○ 건적설계 process 개발

- 기본설계 정보에 따른 물량산출 및 건적이 산출 계산시트를 개발

20 kL	DIMENSION		Weight		BEAM	
	Inner Tank Dimension	Outer Tank Dimension	Beam 무게	201 ton	BEAM Dimension	Beam 길이
	Diameter	37 m	Diameter	41.7 m	600x200 11/17	1355 m
	Side Height	23 m	Shell Skin(6t) 무게	527 ton	400x200 8/13	969 m
	Total Height	28 m	Shell Concrete 무게	1793 ton		
			Total	2521 ton		
			3276.751981 3477.554			
30 kL	DIMENSION		Weight		BEAM	
	Inner Tank Dimension	Outer Tank Dimension	Beam 무게	234 ton	BEAM Dimension	Beam 길이
	Diameter	40 m	Diameter	44.7 m	600x200 11/17	1602 m
	Side Height	25 m	Shell Skin(6t) 무게	811 ton	400x200 8/13	1093 m
	Total Height	28 m	Shell Concrete 무게	2031 ton		
			Total	3076 ton		
			3924.849195 4158.838			
40 kL	DIMENSION		Weight		BEAM	
	Inner Tank Dimension	Outer Tank Dimension	Beam 무게	281 ton	BEAM Dimension	Beam 길이
	Diameter	44 m	Diameter	48.7 m	600x200 11/17	1928 m
	Side Height	28 m	Shell Skin(6t) 무게	973 ton	400x200 8/13	1300 m
	Total Height	34 m	Shell Concrete 무게	2439 ton		
			Total	3692 ton		
			4712.272199 4992.888			
60 kL	DIMENSION		Weight		BEAM	
	Inner Tank Dimension	Outer Tank Dimension	Beam 무게	344 ton	BEAM Dimension	Beam 길이
	Diameter	48 m	Diameter	52.7 m	600x200 11/17	2312 m
	Side Height	35 m	Shell Skin(6t) 무게	1225 ton	400x200 8/13	1678 m
	Total Height	41.5 m	Shell Concrete 무게	3095 ton		
			Total	4665 ton		

그림 61 물량산출 엑셀시트

○ 경제성 평가 (1, 2차 수행)

- 경량화 설계를 통해 모듈형 LNG 저장탱크 내/외조의 중량을 절감하였으며, 60,000m³ LNG 저장탱크를 기준으로 기존 stick-built type과 모듈형 탱크의 중량 및 공사비를 비교
- 1차 경제성 평가 결과, 기존 LNG 탱크 대비 극지 -24.1%, 오지 -7.9%의 공사비를 절감 가능하였음
- 2차 경제성 평가 결과, 모듈형 탱크의 중량은 기존탱크의 79.5% 수준이며 공사비는 극지 기준 -30.8%, 오지 기준 -14.5% 절감 가능하였음

단위: USD

구분		1차평가	2차평가
극지	기존 Stick-built	134,531,000	134,531,000
	모듈러 탱크	102,137,000	93,064,000
	공사비 감소율	-24.1%	-30.8%
오지	기존 Stick-built	94,966,000	94,966,000
	모듈러 탱크	87,478,000	81,163,000
	공사비 감소율	-7.9%	-14.5%

Price Table of Conventional Type 60K LNG Storage Tank (Full Containment)

Rev. 0												Nov. 28, 2016
Item	Description	Unit	Quantity	Material Cost		Fabrication Cost		Fabrication Equipment Cost (USD)	Direct Expense (USD)	Indirect Expense & Fees (USD)	Total (USD)	Remarks
				Unit Price (USD)	Price (USD)	Unit Price (USD)	Price (USD)					
I. Inner Tank	9% Ni Steel	Ton	1,515	3,300	4,998,675	2,699	4,088,571	240,640	173,000	2,380,570	11,881,456	③ Full containment LNG storage tank with earthquake isolators
Sub-Total					4,998,675		4,088,571	240,640	173,000	2,380,570	11,881,456	
II. Outer Tank (Base Slab+Wall+Roof)												
1. SCP* + H-beam (Fab.)	Carbon Steel	Ton	-	1,350	-	908	-	-	-	-	-	1. Out of scope
	Concrete	M3	6,600	200	1,320,000	265	1,746,100	617,320		1,032,040	4,715,460	- Electrical Equipment, I&C, Piping, Pump
2. Assembly		Ton	-			489	-	-	-	-	-	2. Target area
Sub-Total					1,320,000		1,746,100	617,320	-	1,032,040	4,715,460	- Harsh area
III. Insulation												
1. Glass wool blanket		M2	7,500	39	288,991	4.6	34,589	8,167		82,937	415,000	
2. Perlite		M3	10,582	16	164,969	12.9	136,690	48,802		87,615	438,000	
3. LD-PUF		M2	8,438	48	404,114	24.6	207,945	152,507		191,142	956,000	
4. HD-PUF board		M3	1,406	815	1,145,606	-	-	-		286,402	1,432,000	
5. Perlite concrete		M3	102	2,425	247,585	51.7	5,276	1,341		63,551	318,000	
6. Leveling concrete		M3	176	155	27,386	143.2	25,251	3,444		14,020	70,000	
Sub-Total		Ton	1,485		2,278,651		409,751	214,261	-	725,666	3,629,000	
IV. Design/PM/QM												
1. Design		Ton	3,325			146	483,912			120,978	605,000	
2. PM/QM		Ton	3,325			137	455,083			113,771	569,000	
Sub-Total					-		938,995	-	-	234,749	1,174,000	
V. Others												
1. Temporary		Ton	75	1,856	139,229				2,088	35,330	176,647	
2. Painting/Packing & Subsidiary Material					1,096,052					274,013	1,370,000	
3. Welding Material		Ton	15	49,000	755,526				6,771	196,842	959,140	
4. NDE									266,031	66,508	332,539	
5. Shop Drawing & Document									91,600	22,900	115,000	
6. Earthquake Isolator											1,200,000	
Sub-Total					1,990,807				366,491	595,592	4,153,325	
VI. Construction on site												
Sub-Total											108,978,000	
											108,978,000	
Total			18,839		10,588,133		7,183,417	1,072,221	539,491	4,968,617	134,531,000	

그림 62 기존 Stick-built type LNG 저장탱크(극지용) 공사비 산출시트

Price Table of Modular 60K LNG Storage Tank (Full Containment)

Rev. 0												Jan. 09, 2017
Item	Description	Unit	Quantity	Material Cost		Fabrication Cost		Fabrication Equipment Cost (USD)	Direct Expense (USD)	Indirect Expense & Fees (USD)	Total (USD)	Remarks
				Unit Price (USD)	Price (USD)	Unit Price (USD)	Price (USD)					
I. Inner Tank	9% Ni Steel	Ton	1,521	3,300	5,019,300	2,699	4,105,440	240,640	174,048	2,390,390	11,929,818	◎ Full containment LNG storage tank with earthquake isolators
Sub-Total					5,019,300		4,105,440	240,640	174,048	2,390,390	11,929,818	
II. Outer Tank (Base Slab+Wall+Roof)												
1. SCP* + H-beam (Fab.)	Carbon Steel	Ton	3,249	1,350	4,385,664	908	2,949,765	145,801	114,060	1,357,519	8,952,809	1. Completely assembled in shop
	Concrete	M3	4,256	200	851,132	265	1,125,880	617,320		504,760	3,099,092	2. Fabrication in Ulsan, Korea
2. Assembly		Ton	3,249			489	1,587,001	330,880		364,155	2,282,036	3. Perlite material to be supplied by HHI
Sub-Total					5,236,796		5,662,646	1,094,001	114,060	2,226,434	14,333,937	4. Out of scope
III. Insulation												
1. Glass wool blanket		M2	7,500	39	288,991	4.6	34,589	8,167		82,937	415,000	- Electrical Equipment, I&C, Piping, Pump
2. Perlite		M3	10,582	16	164,969	12.9	136,690	48,802		87,615	438,000	5. Target area
3. LD-PUF		M2	8,438	48	404,114	24.6	207,945	152,507		191,142	956,000	- Harsh area
4. HD-PUF board		M3	1,406	815	1,145,606	-	-	-		286,402	1,432,000	
5. Perlite concrete		M3	102	2,425	247,585	51.7	5,276	1,341		63,551	318,000	
6. Leveling concrete		M3	176	155	27,386	143.2	25,251	3,444		14,020	70,000	
Sub-Total			Ton	1,485		2,278,651		409,751	214,261	-	725,666	3,629,000
IV. Design/PM/QM												
1. Design		Ton	3,325			146	483,912			120,978	604,890	
2. PM/QM		Ton	3,325			137	455,083			113,771	568,854	
Sub-Total					-		938,995	-	-	234,749	1,174,000	
V. Others												
1. Temporary		Ton	230	1,856	426,969				6,404	108,344	541,718	
2. Painting/Packing & Subsidiary Material					1,096,052					274,013	1,370,065	
3. Welding Material		Ton	46	49,000	2,267,999				66,613	590,898	2,925,510	
4. NDE									798,594	199,648	998,242	
5. Shop Drawing & Document									91,600	22,900	114,500	
6. Earthquake Isolator											1,200,000	
Sub-Total					3,791,020				963,211	1,195,803	7,150,034	
VI. Construction on site												
Sub-Total											63,920,500	
Sub-Total											63,920,500	
Total				16,468		16,325,767		11,116,833	1,548,992	1,251,319	6,773,041	102,137,000

*SCP: Sandwich Concrete Panel

그림 63 모듈러 LNG 저장탱크(극지용) 공사비 산출시트(1차평가)

Price Table of Modular 60K LNG Storage Tank (Full Containment)

Rev. 0												Nov. 09, 2018
Item	Description	Unit	Quantity	Material Cost		Fabrication Cost		Fabrication Equipment Cost (USD)	Direct Expense (USD)	Indirect Expense & Fees (USD)	Total (USD)	Remarks
				Unit Price (USD)	Price (USD)	Unit Price (USD)	Price (USD)					
I. Inner Tank	9% Ni Steel	Ton	1,406	3,300	4,641,041	2,699	3,796,051	240,640	160,889	2,209,655	11,048,276	⑨ Full containment LNG storage tank with earthquake isolators
Sub-Total					4,641,041		3,796,051	240,640	160,889	2,209,655	11,048,276	
II. Outer Tank (Base Slab+Wall+Roof)												
1. SCP* + H-beam (Fab.)	Carbon Steel	Ton	2,304	1,350	3,110,973	908	2,092,417	145,801	80,885	1,357,519	6,787,596	1. Completely assembled in shop
	Concrete	M3	3,017	200	603,460	265	798,259	617,320		504,760	2,523,798	2. Fabrication in Ulsan, Korea
2. Assembly		Ton	2,304			489	1,125,740	330,880		364,155	1,820,775	3. Perlite material to be supplied by HHJ
Sub-Total					3,714,433		4,016,416	1,094,001	80,885	2,226,434	11,132,169	4. Out of scope
III. Insulation												
1. Glass wool blanket		M2	7,500	39	288,991	4.6	34,589	8,167		82,937	414,684	5. Target area
2. Perlite		M3	10,582	16	164,969	12.9	136,690	48,802		87,615	438,076	- Harsh area
3. LD-PUF		M2	8,438	48	404,114	24.6	207,945	152,507		191,142	955,708	
4. HD-PUF board		M3	1,406	815	1,145,606	-	-	-		286,402	1,432,008	
5. Perlite concrete		M3	102	2,425	247,585	51.7	5,276	1,341		63,551	317,753	
6. Leveling concrete		M3	176	155	27,386	143.2	25,251	3,444		14,020	70,101	
Sub-Total			Ton	1,485	2,278,651		409,751	214,261	-	725,666	3,628,329	
IV. Design/PM/QM												
1. Design		Ton	3,325			146	483,912			120,978	605,000	
2. PM/QM		Ton	3,325			137	455,083			113,771	569,000	
Sub-Total					-		938,995	-	-	234,749	1,174,000	
V. Others												
1. Temporary		Ton	180	1,856	334,150				5,012	84,791	423,953	
2. Painting/Packing & Subsidiary Material					1,096,052					274,013	1,370,065	
3. Welding Material		Ton	36	49,000	1,786,540				51,810	459,587	2,297,937	
4. NDE									621,129	155,282	776,412	
5. Shop Drawing & Document									91,600	22,900	114,500	
6. Earthquake Isolator											1,200,000	
Sub-Total					3,216,742				769,551	996,573	6,182,866	
VI. Construction on site												
Sub-Total											59,898,000	
Total			12,437		13,850,867		9,161,213	1,548,902	1,011,326	6,393,077	93,064,000	

*SCP: Sandwich Concrete Panel

그림 64 모듈러 LNG 저장탱크(극지용) 공사비 산출시트(2차평가)

Price Table of Conventional Type 60K LNG Storage Tank (Full Containment)

Rev. 0												Nov. 28, 2016
Item	Description	Unit	Quantity	Material Cost		Fabrication Cost		Fabrication Equipment Cost (USD)	Direct Expense (USD)	Indirect Expense & Fees (USD)	Total (USD)	Remarks
				Unit Price (USD)	Price (USD)	Unit Price (USD)	Price (USD)					
I. Inner Tank	9% Ni Steel	Ton	1,515	3,300	4,998,675	2,699	4,088,571	240,640	173,000	2,380,570	11,881,456	⑨ Full containment LNG storage tank with earthquake isolators
Sub-Total					4,998,675		4,088,571	240,640	173,000	2,380,570	11,881,456	
II. Outer Tank (Base Slab+Wall+Roof)												
1. SCP* + H-beam (Fab.)	Carbon Steel	Ton	-	1,350	-	908	-	-	-	-	-	1. Out of scope
	Concrete	M3	6,600	200	1,320,000	265	1,746,100	617,320		1,032,040	4,715,460	- Electrical Equipment, I&C, Piping, Pump
2. Assembly		Ton	-			489	-	-	-	-	-	2. Target area
Sub-Total					1,320,000		1,746,100	617,320	-	1,032,040	4,715,460	- North America / Australia
III. Insulation												
1. Glass wool blanket		M2	7,500	39	288,991	4.6	34,589	8,167		82,937	415,000	
2. Perlite		M3	10,582	16	164,969	12.9	136,690	48,802		87,615	438,000	
3. LD-PUF		M2	8,438	48	404,114	24.6	207,945	152,507		191,142	956,000	
4. HD-PUF board		M3	1,406	815	1,145,606	-	-	-		286,402	1,432,000	
5. Perlite concrete		M3	102	2,425	247,585	51.7	5,276	1,341		63,551	318,000	
6. Leveling concrete		M3	176	155	27,386	143.2	25,251	3,444		14,020	70,000	
Sub-Total		Ton	1,485		2,278,651		409,751	214,261	-	725,666	3,629,000	
IV. Design/PM/QM												
1. Design		Ton	3,325			146	483,912			120,978	605,000	
2. PM/QM		Ton	3,325			137	455,083			113,771	569,000	
Sub-Total					-		938,995	-	-	234,749	1,174,000	
V. Others												
1. Temporary		Ton	75	1,856	139,229				2,088	35,330	176,647	
2. Painting/Packing & Subsidiary Material					1,096,052					274,013	1,370,000	
3. Welding Material		Ton	15	49,000	755,526				6,771	196,842	959,140	
4. NDE									266,031	66,508	332,539	
5. Shop Drawing & Document									91,600	22,900	115,000	
6. Earthquake Isolator											1,200,000	
Sub-Total					1,990,807				366,491	595,592	4,153,325	
VI. Construction on site												
Sub-Total											69,413,000	
Total			18,839		10,588,133		7,183,417	1,072,221	539,491	4,968,617	94,966,000	

*SCP: Sandwich Concrete Panel

그림 65 기존 Stick-built type LNG 저장탱크(오지용) 공사비 산출시트

Price Table of Modular 60K LNG Storage Tank (Full Containment)

Rev. 0

Jan. 09, 2017

Item	Description	Unit	Quantity	Material Cost		Fabrication Cost		Fabrication Equipment Cost (USD)	Direct Expense (USD)	Indirect Expense & Fees (USD)	Total (USD)	Remarks
				Unit Price (USD)	Price (USD)	Unit Price (USD)	Price (USD)					
I. Inner Tank	9% Ni Steel	Ton	1,521	3,300	5,019,300	2,699	4,105,440	240,640	174,048	2,390,390	11,929,818	◎ Full containment LNG storage tank with earthquake isolators
Sub-Total					5,019,300		4,105,440	240,640	174,048	2,390,390	11,929,818	
II. Outer Tank (Base Slab+Wall+Roof)												
1. SCP* + H-beam (Fab.)	Carbon Steel	Ton	3,249	1,350	4,385,664	908	2,949,765	145,801	114,060	1,357,519	8,952,809	
2. Assembly	Concrete	M3	4,256	200	851,132	265	1,125,880	617,320		504,760	3,099,092	1. Completely assembled in shop
		Ton	3,249			489	1,587,001	330,880		364,155	2,282,036	2. Fabrication in Ulsan, Korea
Sub-Total					5,236,796		5,662,646	1,094,001	114,060	2,226,434	14,333,937	3. Perlite material to be supplied by HHI
III. Insulation												4. Out of scope
1. Glass wool blanket		M2	7,500	39	288,991	4.6	34,589	8,167		82,937	415,000	- Electrical Equipment, I&C, Piping, Pump
2. Perlite		M3	10,582	16	164,969	12.9	136,690	48,802		87,615	438,000	5. Target area
3. LD-PUF		M2	8,438	48	404,114	24.6	207,945	152,507		191,142	956,000	- North America / Australia
4. HD-PUF board		M3	1,406	815	1,145,606	-	-	-		286,402	1,432,000	
5. Perlite concrete		M3	102	2,425	247,585	51.7	5,276	1,341		63,551	317,000	
6. Leveling concrete		M3	176	155	27,386	143.2	25,251	3,444		14,020	70,000	
Sub-Total			1,485		2,278,651		409,751	214,261	-	725,666	3,629,000	
IV. Design/PM/QM												
1. Design		Ton	3,325			146	483,912			120,978	604,890	
2. PM/QM		Ton	3,325			137	455,083			113,771	568,854	
Sub-Total					-		938,995	-	-	234,749	1,174,000	
V. Others												
1. Temporary		Ton	230	1,856	426,969				6,404	108,344	541,718	
2. Painting/Packing & Subsidiary Material					1,096,052					274,013	1,370,065	
3. Welding Material		Ton	46	49,000	2,267,999				66,613	590,898	2,925,510	
4. NDE									798,594	199,648	998,242	
5. Shop Drawing & Document									91,600	22,900	114,500	
6. Earthquake Isolator											1,200,000	
Sub-Total					3,791,020				963,211	1,195,803	7,150,034	
VI. Construction on site											49,261,375	
Sub-Total											49,261,375	
Total			16,468		16,325,767		11,116,833	1,548,902	1,251,319	6,773,041	87,478,000	

*SCP: Sandwich Concrete Panel

그림 66 모듈러 LNG 저장탱크(오지용) 공사비 산출시트(1차평가)

Price Table of Modular 60K LNG Storage Tank (Full Containment)

Rev. 0

Nov. 09, 2018

Item	Description	Unit	Quantity	Material Cost		Fabrication Cost		Fabrication Equipment Cost (USD)	Direct Expense (USD)	Indirect Expense & Fees (USD)	Total (USD)	Remarks
				Unit Price (USD)	Price (USD)	Unit Price (USD)	Price (USD)					
I. Inner Tank	9% Ni Steel	Ton	1,406	3,300	4,641,041	2,699	3,796,051	240,640	160,889	2,209,655	11,048,276	◎ Full containment LNG storage tank with earthquake isolators
Sub-Total					4,641,041		3,796,051	240,640	160,889	2,209,655	11,048,276	
II. Outer Tank (Base Slab+Wall+Roof)												
1. SCP* + H-beam (Fab.)	Carbon Steel	Ton	2,304	1,350	3,110,973	908	2,092,417	145,801	80,885	1,357,519	6,787,596	
2. Assembly	Concrete	M3	3,017	200	603,460	265	798,259	617,320		504,760	2,523,798	1. Completely assembled in shop
		Ton	2,304			489	1,125,740	330,880		364,155	1,820,775	2. Fabrication in Ulsan, Korea
Sub-Total					3,714,433		4,016,416	1,094,001	80,885	2,226,434	11,132,169	3. Perlite material to be supplied by HHI
III. Insulation												4. Out of scope
1. Glass wool blanket		M2	7,500	39	288,991	4.6	34,589	8,167		82,937	414,684	- Electrical Equipment, I&C, Piping, Pump
2. Perlite		M3	10,582	16	164,969	12.9	136,690	48,802		87,615	438,076	5. Target area
3. LD-PUF		M2	8,438	48	404,114	24.6	207,945	152,507		191,142	956,708	- North America / Australia
4. HD-PUF board		M3	1,406	815	1,145,606	-	-	-		286,402	1,432,008	
5. Perlite concrete		M3	102	2,425	247,585	51.7	5,276	1,341		63,551	317,753	
6. Leveling concrete		M3	176	155	27,386	143.2	25,251	3,444		14,020	70,101	
Sub-Total			1,485		2,278,651		409,751	214,261	-	725,666	3,628,329	
IV. Design/PM/QM												
1. Design		Ton	3,325			146	483,912			120,978	604,890	
2. PM/QM		Ton	3,325			137	455,083			113,771	568,854	
Sub-Total					-		938,995	-	-	234,749	1,173,744	
V. Others												
1. Temporary		Ton	180	1,856	334,150				5,012	84,791	423,953	
2. Painting/Packing & Subsidiary Material					1,096,052					274,013	1,370,065	
3. Welding Material		Ton	36	49,000	1,786,540				51,810	459,587	2,297,937	
4. NDE									621,129	155,282	776,412	
5. Shop Drawing & Document									91,600	22,900	114,500	
6. Earthquake Isolator											1,200,000	
Sub-Total					3,216,742				769,551	996,573	6,182,866	
VI. Construction on site											47,998,000	
Sub-Total											47,998,000	
Total			12,437		13,850,867		9,161,213	1,548,902	1,011,326	6,393,077	81,163,000	

*SCP: Sandwich Concrete Panel

그림 67 모듈러 LNG 저장탱크(오지용) 공사비 산출시트(2차평가)

○ 중소형 LNG 저장탱크 시장 수요조사 및 모듈형 탱크의 경쟁력 분석 컨설팅 수행 (IHS Markit)

– Cost 분석

- 분석 대상: 10K ~ 60K LNG 육상 저장탱크
- 분석 범위: 총 8개 지역 (3개의 at-shore (인도, 카타르, 미국) / 3개 극지&오지 (인도네시아, 러시아, 캐나다) / 2개 병커링(로테르담, 싱가포르))
- 대부분의 경우 full containment (완전방호) 방식으로 LNG 저장탱크가 제작되고 있으며, full containment는 double containment는 비하여 비용은 30%, 기간은 4개월정도 더 소요됨
- single containment의 경우는 제작의 경우가 많지 않음. (full이 single보다 비용은 50%, 기간은 7개월 더 소요됨)
- 지역별로 제작비 및 공사기간이 차이가 나는데, 이는 labour의 생산능력 및 labour cost에 따라 다르기 때문임
- HMLST의 경우, 비용적으로 conventional의 평균에 대비하여 약 16%정도 가격경쟁력이 있으며, 극지에서 공기단축 (약 11개월) 효과 있으나, 다른 지역에서 공기면에서 현재 스케줄로는 경쟁력이 떨어짐



그림 68 LNG 저장탱크 방호 형식에 따른 공사비 및 공사기간 상관관계(Single, Double, Full containment)

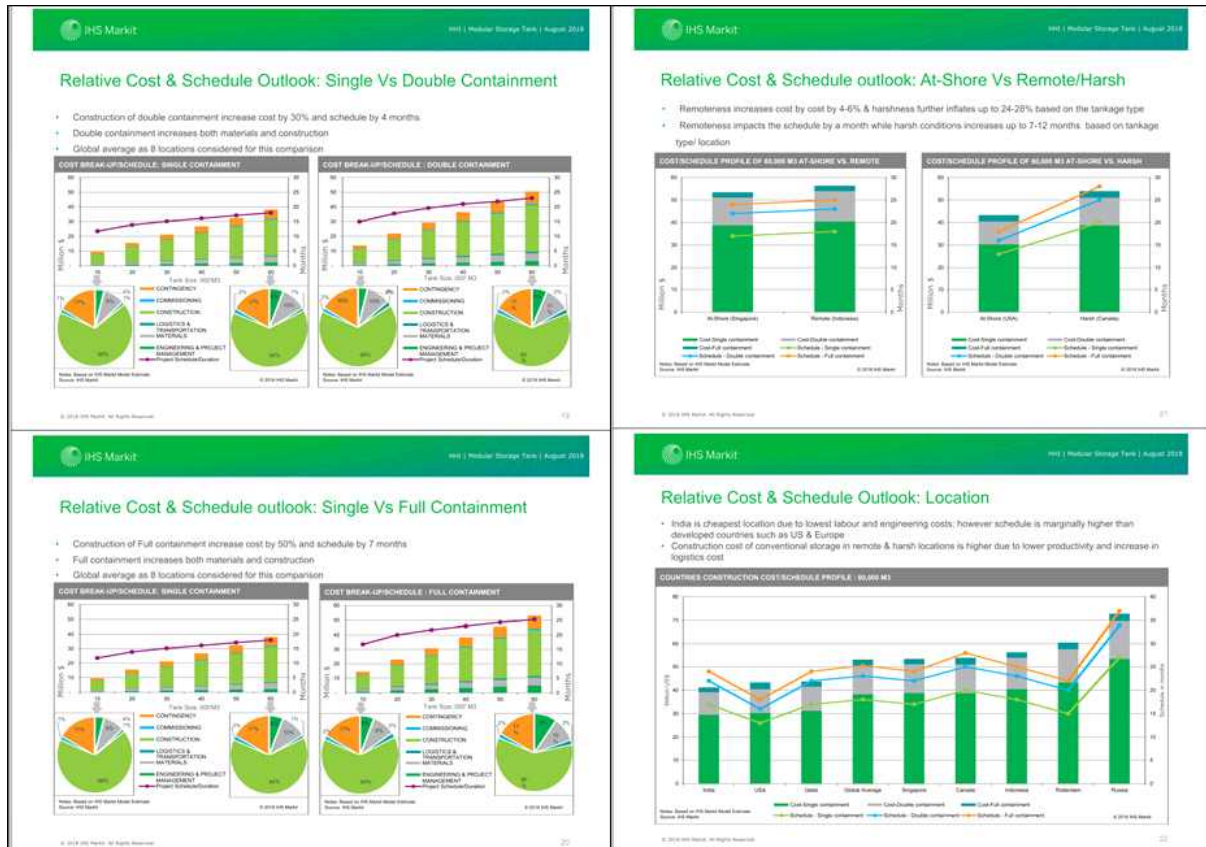


그림 69 방호형식과 공사지역 따른 공사비 및 공사기간 상관관계 (Single, Double, Full containment)

IHS Market			
HHI Modular Storage Tank August 2018			
Cost Comparison of Conventional Vs HHI Modular LNG Storage for Full Containment			
All values are in Million US Dollar			
Cost Items,	Conventional Storage	HHI Modular Storage	Remarks
A) Super structure			
1) Engineering & Project Management	3.5	1.2	Conventional tankage cost is significantly higher than modular as modular tankage design and fabrication can be standardized for the respective tank. However conventional design is more in-situ oriented and consumes more manhours every time a design is performed.
2) Procurement & Construction	36.1	25.8	The overall material procurement and associated erection of modular tank is expected to be lower than conventional set-up. However it needs to be observed as HHI has not reported "erection" costs. In general the benefit of modularization can still be seen even including erection costs.
3) Others	1.5	6.6	Non-comparable are listed in others
Sub Total (A)	41.1	33.6	The overall superstructure cost of HHI is lower than conventional tankage
B) Substructure	12.3	Not Available	Modular Tankage substructure cost is expected to be similar to that of conventional set-up since modularization of tankage still need on site location erection and commissioning
Total Cost (A+B)	53.4	45.9	The overall construction & installation cost of HHI modular storage tankage is expected to be lower conventional tankage
- Conventional Storage of cost is considered for Singapore location - Comparison to be viewed on overall basis as the individual cost breaks are not similar in nature between conventional Vs Modular - HHI Cost doesn't include any logistics & commissioning cost involved at carryout the job at project location			
© 2018 IHS Market. All Rights Reserved.			

그림 70 기존 stick-built type 탱크와 모듈러 LNG 저장탱크 공사비 비교 (Full containment)

– Market 분석

- 2030년까지 LNG의 소비량은 지속적으로 증가할 것으로 예상됨
- Renewable energy 시장 확대가 유럽쪽에서 강세를 띄지만, 아시아 지역의 LNG 소비량은 크게 늘어날 전망이다
- 미국이 LNG 생산의 주도적 위치를 가지게 될 것으로 예상됨
- 2022년까지 대형 LNG 수출/수입 터미널이 계획되어 있으나 대형 터미널은 HMLST의 범위와 다소 상이함
- 중소형 LNG 시장은 2013년에는 전체 LNG 시장의 21% 였으나, 2018년에는 56%로 늘고 있으며 아시아 시장 규모가 큼

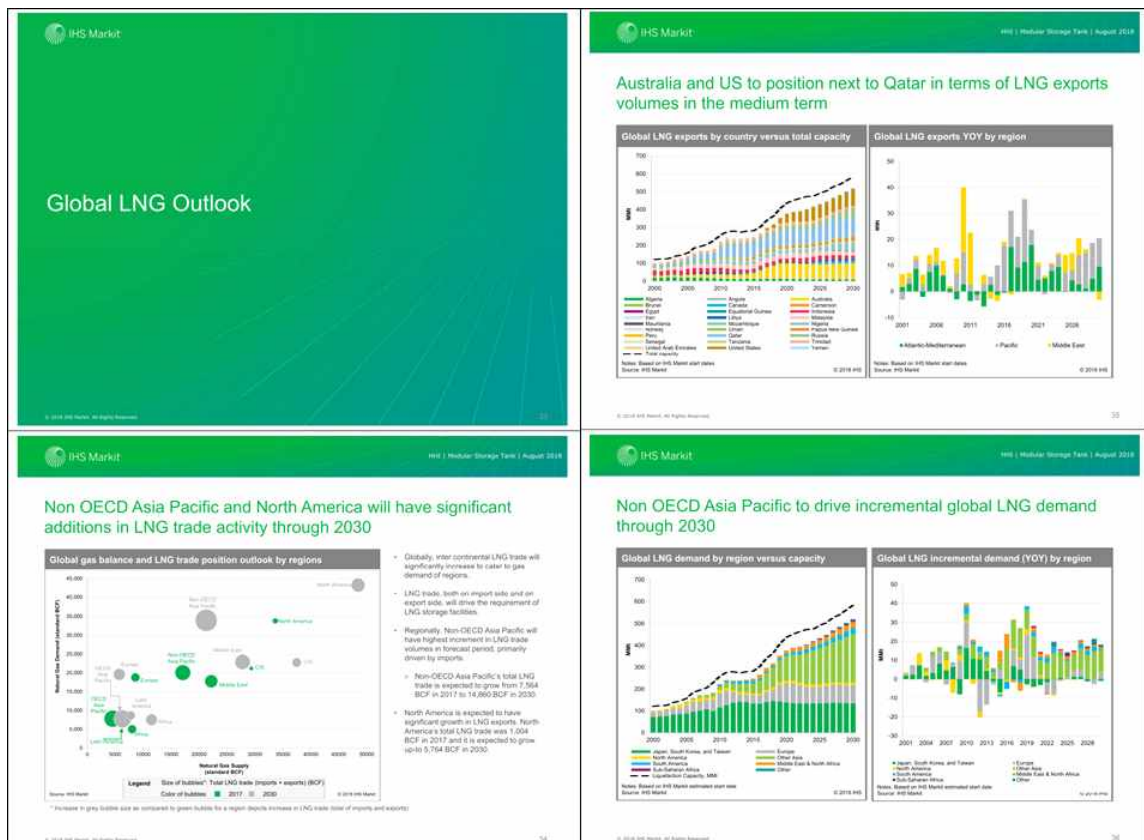


그림 71 세계 LNG 시장 전망

– 종합

- 중소형의 LNG 마켓은 주로 아시아 지역에서 큰 수요가 예상됨
- HMLST의 가격 및 공사기간 경쟁력이 at-shore 위치에서는 별로 없으며, 오지(Canada) 및 도서(Indonesia)에서 약 15~20% 및 2~3개월 가량의 이점이 있음
- 극지(Russia)의 경우 HMLST의 가격 및 공사기간에 대해 약 35% 및 11개월 가량의 경쟁력 있음
- Bunkering 터미널의 경우 Singapore는 약 15% / Rotterdam의 경우 20%의 가격 경쟁력이 있으나, 공사기간면에서는 이점이 없음
- 공기단축에 대한 추가적인 경쟁력 확보를 위한 방안 고려 필요함

(바) 모듈러 LNG 저장탱크 국제인증

○ ABSG consulting 기본설계 검증서 획득

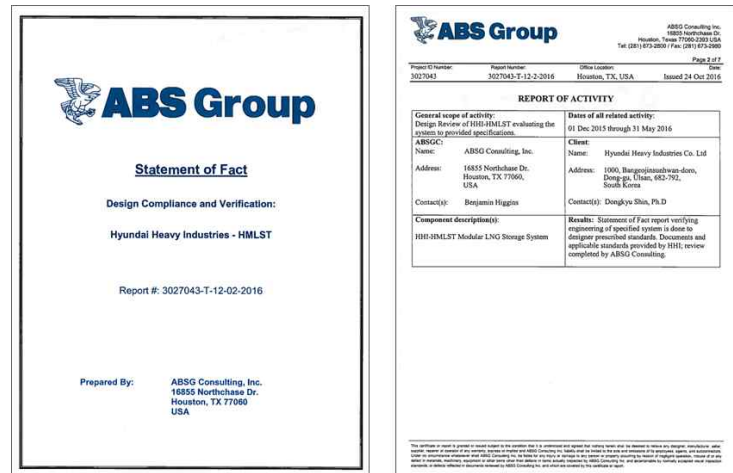


그림 72 ABSG consulting 기본설계 검증서

○ DNV-GL 신기술 인증

- DNV-GL 사용적합성 인증서 (1단계, 2단계, 3단계) 획득

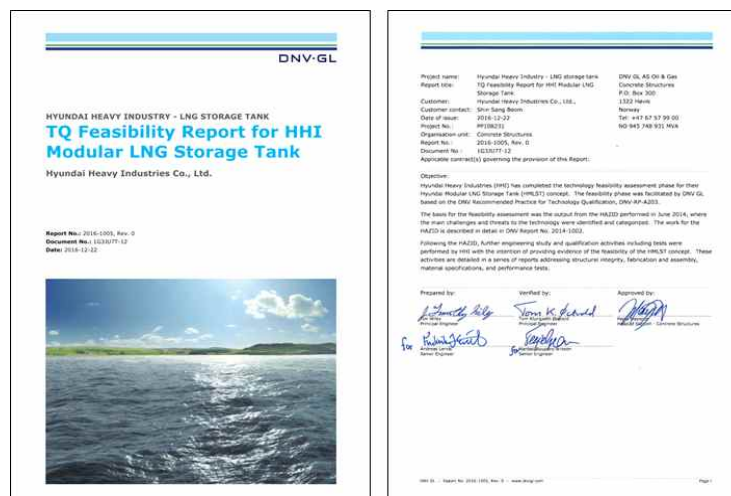


그림 73 DNV-GL 사용적합성 인증서

(2) 연구 개발 성과

(가) 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한토목학회	신동규	2016.10.20	제주국제컨벤션센터	대한민국
2	대한토목학회	김언	2016.10.20	제주국제컨벤션센터	대한민국
3	ISOPE(International Society of Offshore and Polar Engineers)	신동규	2017.06.27	샌프란시스코	미국
4	대한토목학회	황윤이	2017.10.19	부산 BEXCO	대한민국
5	대한토목학회	김언	2017.10.20	부산 BEXCO	대한민국

(나) 특허출원

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				가여율
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호*	등록인	등록일	등록번호	등록 번호*	
1	연결조립체를 구비하는 강판 콘크리트 구조물 및 연결구조	대한 민국	황윤이	16.05.27	P2016-00 65293						100
2	병커링 시스템 및 이를 포함하는 선박(1)	대한 민국	현대 중공업	17.09.14	10-2017 -0117616						100
3	병커링 시스템 및 이를 포함하는 선박(1)	대한 민국	현대 중공업	17.09.14	10-2017 -0117622						100
4	가스 처리 시스템 및 이를 포함하는 선박(1)	대한 민국	현대중 공업	17.08.31	10-2017 -0111054						100
5	가스 처리 시스템 및 이를 포함하는 선박(2)	대한 민국	현대 중공업	17.09.08	10-2017 -0115107						100
6	유체 충격 시험 장치	대한 민국	현대 중공업	17.10.30	10-2017 -0005562						100
7	액화가스 저장탱크 및 이를 포함하는 가스 처리 시스템 및 선박 (1)	대한 민국	현대 중공업	18.04.16	10-2018 -0044027						100
8	액화가스 저장탱크 및 이를 포함하는 가스 처리 시스템 및 선박 (2)	대한 민국	현대 중공업	18.01.30	10-2018 -0011580						100
9	가스 처리 시스템 및 이를 포함하는 선박	대한 민국	현대 중공업	18.01.30	10-2018 -0011573						100
10	액화가스 저장탱크의 단열시스템 및 이를 구비한 선박 (1)	대한 민국	현대 중공업	18.10.17	10-2018 -0124086						100
11	액화가스 저장탱크의 단열시스템 및 이를 구비한 선박 (2)	대한 민국	현대 중공업	18.10.17	10-2018 -0124087						100

(다) 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일
2016	설계 기본사항	2016.11.1
2016	설계 절차서 (내조)	2016.11.1
2016	설계 절차서 (외조)	2016.11.1
2016	화재 성능 보고서	2016.11.1
2017	화재시 극한온도 정의	2017.01.06
2017	정도관리 보고서	2017.01.06
2017	SCP 부재 휨 성능 평가	2017.10.26
2017	SCP 부재 압축 성능 평가	2017.10.26
2017	SCP 연결부 휨 성능 평가	2017.10.26
2017	유한요소 해석 기반의 SCP 부재 성능 검토	2017.10.26
2017	단열재를 고려한 외조 구조물의 지진 영향 검토	2017.10.26
2017	온도 조건에 따른 강재 설계	2017.10.26
2018	Modular LNG Storage Tanks- Market Study (IHS Markit)	2018.08.09

(라) 기술 승인서 및 검증서

획득일	승인/검증 기관	내용
2016.11.14	ABS Group Consulting	Design Compliance and Verification
2016.12.22	DNV-GL	TQ Feasibility Report for HHI Modular LNG Storage Tank
2017.12.29	DNV-GL	Endorsement of Qualification Plan for HHI Modular LNG Storage Tank
2018.06.05	DNV-GL	Technology Qualification Status Report

(마) 성과 홍보

홍보일	언론사	홍보기사명
2016.08.25	기간산업신문	기간산업신문 Special Edition 특집 (중소형 모듈러 LNG 저장탱크 연구단)
2017.11.08	한국가스신문	모듈형 LNG 저장탱크 설계기술로 글로벌 시장 노크

(바) 시작품

분 류	용 도	제 원(L x H x D x t) m	수 량	비 고
SCP	Open mock-up	1.8 x 1.8 x 2 x 0.2	1	35MPa급 고유동 콘크리트 적용

(사) 설계지침 및 매뉴얼

설계지침 및 매뉴얼 명	작성기관
Design Basis	현대중공업
Construction Sequence	현대중공업

나. 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 콘크리트 및 구조 성능 평가

(1) 연구 내용

(가) SCP 충전용 콘크리트 배합 개발 및 성능 평가

○ SCP 충전용 콘크리트 기본 배합 개발

－ 실험변수 및 실험 배합

- 잔골재율(S/a) : 48.5%, 51%, 53.5%, 56%
- 골재 조립율(F.M, 세척사 : 부순모래) = 3:7, 5:5, 7:3
- 결합재 비율(OPC:BFS:FA)=7:2:1, 6:2:2, 8:2:0, 6:4:0, 8:0:2, 5:4:1, 4:4:2

표 13 시험 계획표

No.	S/a (Gv)	F.M (세척사 :부순모래)	결합재 비율 (OPC : BFS : F A)
1	48.5 (0.334)	3 : 7	7 : 2 : 1
2		5 : 5	
3		7 : 3	
4	51 (0.317)	3 : 7	7 : 2 : 1
5		5 : 5	
6		7 : 3	
7	53.5 (0.301)	3 : 7	7 : 2 : 1
8		5 : 5	
9		7 : 3	
10	56 (0.285)	3 : 7	7 : 2 : 1
11		5 : 5	
12		7 : 3	
13	51 (0.317)	5 : 5	6 : 2 : 2
14			8 : 2 : 0
15			6 : 4 : 0
16			8 : 0 : 2
17			5 : 4 : 1
18			4 : 4 : 2

※ 최대치수 13 mm의 굵은골재 사용

표 14 고유동 콘크리트 배합표 (kg/m³)

구분	W	C	Slag	F/A	S	CS	G	SP제
1	165	301	86	43	247	572	884	6.45
2	165	301	86	43	412	408	884	6.45
3	165	301	86	43	576	245	884	6.45
4	165	301	86	43	260	601	841	6.45
5	165	301	86	43	433	429	841	6.45
6	165	301	86	43	606	258	841	6.45
7	165	301	86	43	272	631	798	6.45
8	165	301	86	43	454	450	798	6.45
9	165	301	86	43	636	270	798	6.45
10	165	301	86	43	285	660	755	6.45
11	165	301	86	43	475	472	755	6.45
12	165	301	86	43	665	283	755	6.45
13	165	258	86	86	429	426	833	6.45
14	165	344	86	0	437	433	849	6.45
15	165	258	172	0	435	432	846	6.45
16	165	344	0	86	430	427	836	6.45
17	165	215	172	43	431	428	838	6.45

※ SP제-폴리칼본산계 고성능 감수제(3000S), 결합재 대비 1.5% 사용

– 콘크리트 물성시험

- 굳지 않은 콘크리트 물성 시험: 공기량 측정 (KS F 2421), 슬럼프 플로 (KS F 2594), 500 mm 도달 시간 (KS F 2594), U-Box (JSCE-F511), L-Box (BS EN 12350-10)
- 굳은 콘크리트 물성실험: 압축강도 (KS F 2405) – 7일, 28일

– 잔골재율 및 골재 조립율 영향 평가

- 잔골재율(S/a) 48.5%에서 골재 조립율을 기존 3:7에서 7:3으로 변경시켰을 때 슬럼프 플로가 약 18% 증가하는 경향을 보임
- S/a가 51%인 경우 슬럼프 플로에서 잔골재 조립율이 5:5일 때 유동성이 가장 우수하였으며, 슬럼프 플로가 600 mm에 도달함
- 잔골재율이 53.5% 이상 증가할 경우 세척사의 비율이 높을 때 유동성이 향상되는 것으로 나타남
- 500 mm 도달시간은 슬럼프 플로 결과와 동일한 경향으로 나타났으며, S/a 48.5%에서 세척사와 부순모래의 비율이 7:3이었을 때 7.25초로 가장 짧게 나타남
- S/a 56%에서 잔골재 조립율이 7:3일 때 슬럼프 플로는 380 mm로, 500 mm 도달시간을 측정하지 못함

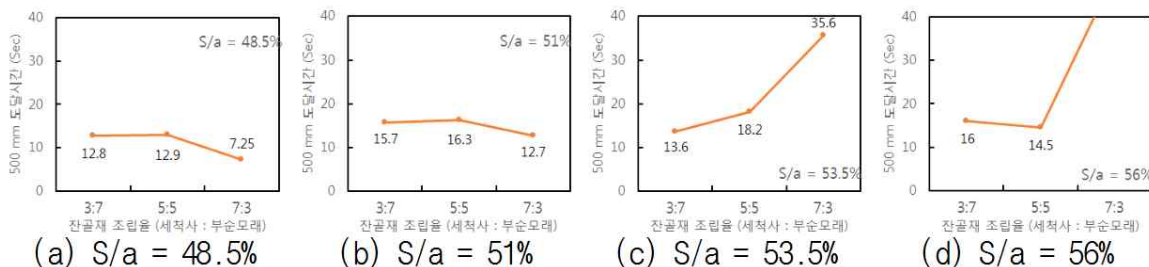


그림 74 500 mm 도달 시간 측정 결과

- 잔골재율 및 잔골재 조립율에 따른 SCP 충전 콘크리트의 철근 통과성 및 작업성을 확인하기 위해 L-box 및 U-box 시험을 진행하였으며, S/a 51, 53.5%에서 가장 안정적인 경향을 나타냄

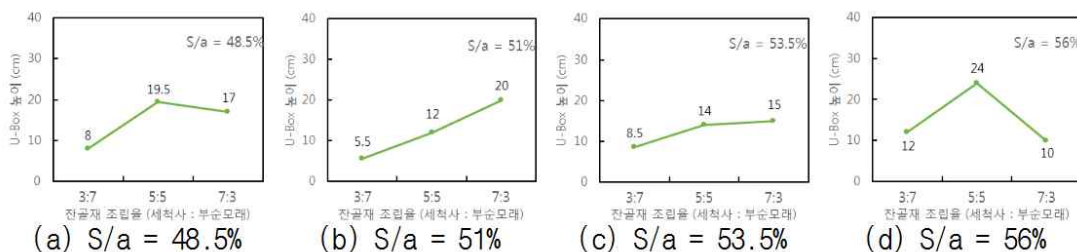


그림 75 U-box 높이 측정 결과

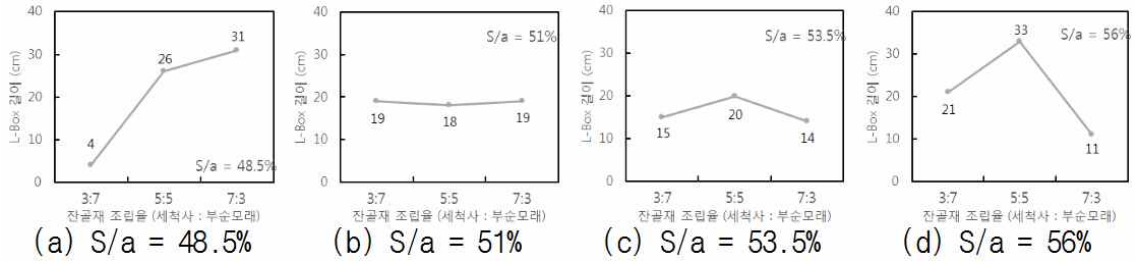


그림 76 L-box 길이 측정 결과

- 변수별 실험계획에 따른 SCP 채움용 콘크리트의 공기량 측정 결과 2~4.2%의 공기량을 나타냄

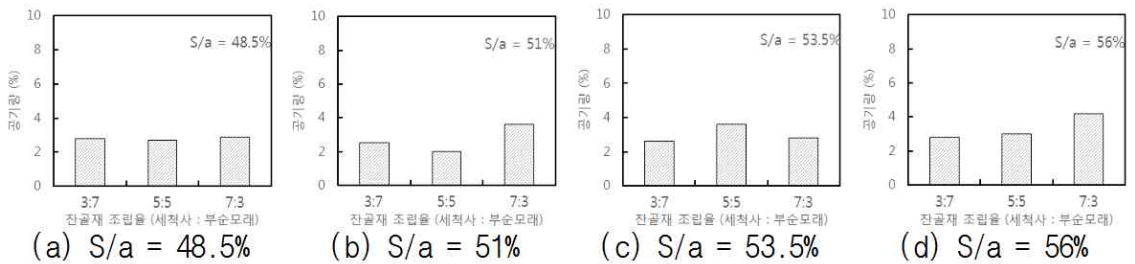


그림 77 공기량 측정 결과

- 동일한 결합재 비율에서 잔골재율 및 골재 조립율에 따른 SCP 채움용 콘크리트의 28일 압축강도 측정 결과, S/a가 51%일 때 조립율 3:7 및 5:5에서 가장 우수한 압축강도(48 MPa, 47.8 MPa)를 나타냄

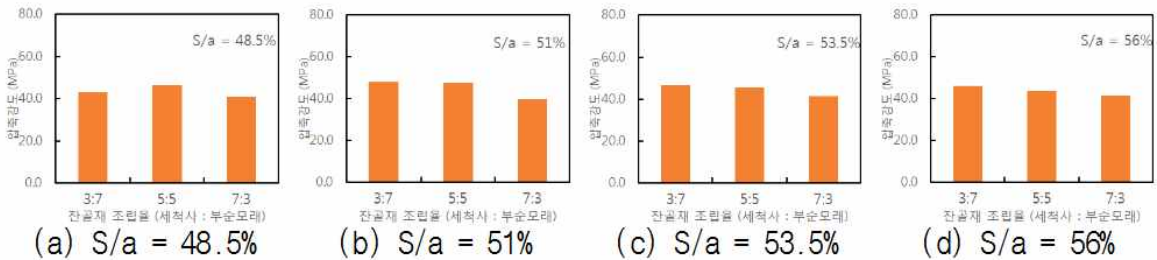


그림 78 압축강도 측정 결과 (재령 28일)

결합재 비율 영향 평가

- 전체적으로 시멘트량이 감소함에 따라 슬럼프가 증가하는 경향을 나타냄

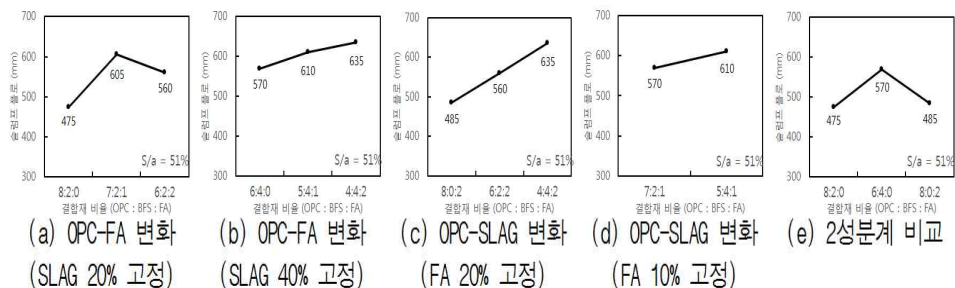


그림 79 슬럼프 플로 측정결과

- 500 mm 도달 시간 측정 결과는 슬럼프 플로와 유사한 경향을 보이지만, 시멘트가 전체 결합재의 80%를 차지할 경우 500 mm에 도달하지 못하였음

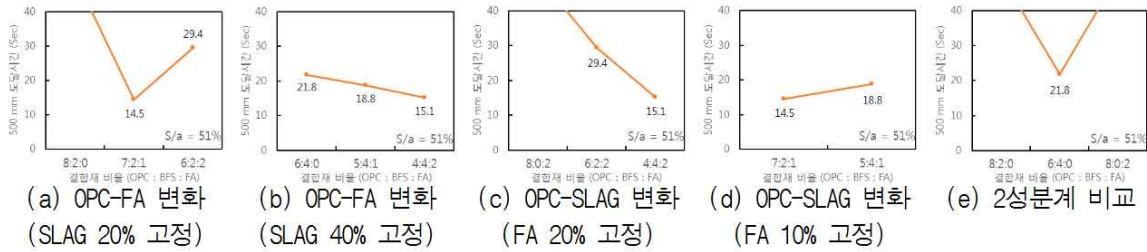


그림 80 500mm 도달 시간 측정 결과

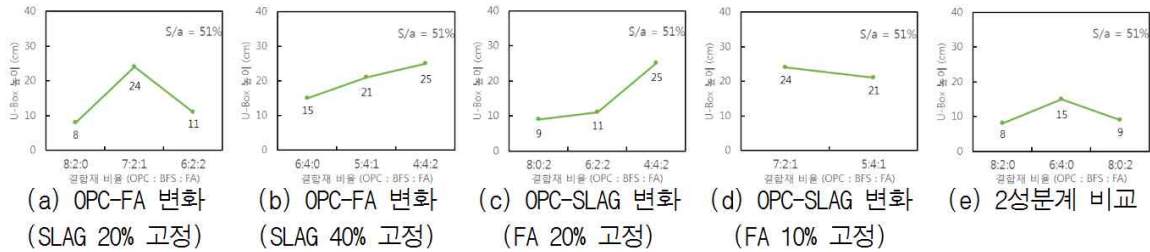


그림 81 U-box 높이 측정 결과

- U-Box 및 L-Box 에서도 시멘트 성분이 전체 결합재의 80%를 차지할 경우 저조한 성능을 나타냄

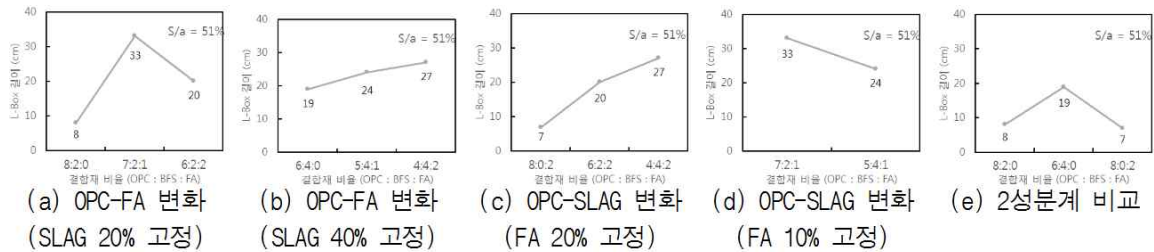


그림 82 U-box 길이 측정 결과

- 결합재 비율에 따른 SCP 채움 콘크리트의 공기량 측정 결과 3.4~3.9% 수준임

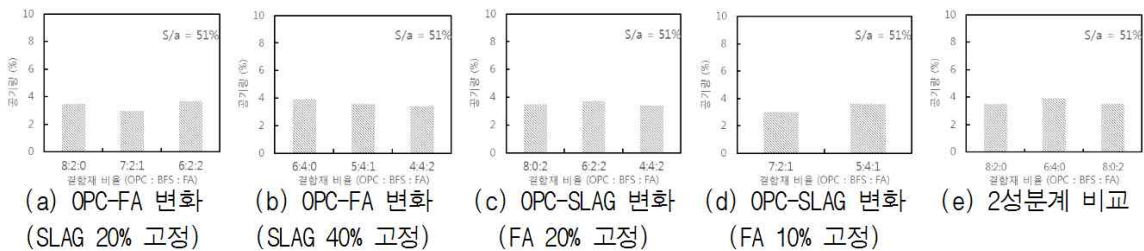


그림 83 공기량 측정 결과

- 시멘트 80%, 고로슬래그 20%의 비율에서 압축강도는 약 47.8 MPa 수준이며, 시멘트를 제외한 결합재 양이 증가하거나 결합재 중에서도 플라이애시의 비율이 증가할 때 압축강도가 48MPa 이하로 감소함

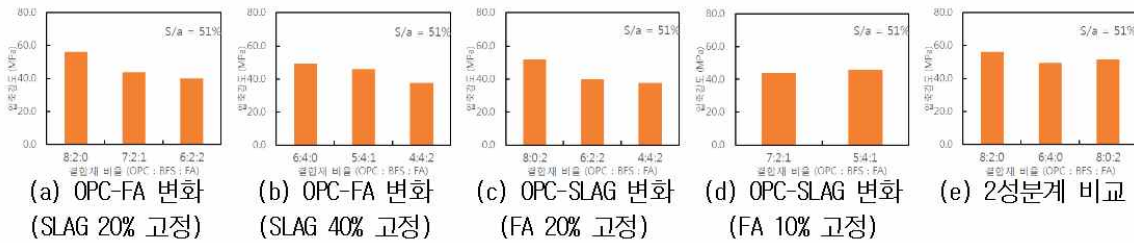


그림 84 압축강도 측정 결과

- 잔골재율 51% 및 골재 조립율 5:5에서 목표로 하는 유동성과 압축강도 발현이 용이함(혼화제 사용량 감소)
- 결합재의 경우 시멘트량이 증가할수록 압축강도가 증가하나, 유동성이 저하됨.
- OPC:BFS:FA = 7:2:1의 비율이 굳지 않은 콘크리트 특성에 유리한 것으로 나타남
- 그러나 플라이애시의 품질 변동이 심해 적용시 추가 검토가 필요함
- 다만 OPC:BFS:FA = 6:4:0의 경우 7:2:1에 비해 유동성이 다소 떨어지나 동남에서 개발하는 혼화제를 접목할 경우 품질이 개선될 것으로 예상됨

○ SCP 충전용 콘크리트 최적 배합 개발

－ 배합 목표

- 단위 결합재량 430, 400, 370 kg/m³의 조건(저분체)에서 슬럼프 플로 600 mm 이상 확보하는 것을 목표(고유동)로 하고 이 때의 500 mm 도달속도, L-box 및 U-box에 대한 특성을 검토
- 목표 압축강도는 40±5 MPa이나 동일 배합 조건에서 현장BP 적용시 강도가 저하되는 특성을 고려하여 실내실험시 압축강도가 50 MPa 초반을 형성하도록 함

－ 실험변수 및 실험배합

- 단위 결합재량 : 430, 400, 370 kg/m³
- 결합재 비율 : 슬래그(10%, 20%, 30%), 시멘트:슬래그:플라이애시(7:2:1)
- 단위수량 : 165, 170, 175, 180 kg/m³
- 잔골재 혼입비율(세척사:부순모래) : 3:7, 5:5, 7:3

실험 계획표

구분	단위결합재량 (kg/m ³)	결합재 비율	단위수량 (kg/m ³)	잔골재 혼입비율 (세척사:부순모래)
1	430	슬래그 0%	165	5:5
2		슬래그 10%	165	5:5
3		슬래그 20%	165	5:5
4		슬래그 30%	165	5:5
5		7:2:1 (C:BFS:FA)	165	5:5
6	400	슬래그 20%	165	5:5
7		슬래그 20%	170	5:5
8		슬래그 20%	175	5:5
9		슬래그 30%	175	5:5
10		슬래그 20%	180	5:5
11		슬래그 20%	180	3:7
12		슬래그 20%	180	7:3
13		7:2:1 (C:BFS:FA)	165	5:5
14		7:2:1 (C:BFS:FA)	170	5:5
15		7:2:1 (C:BFS:FA)	175	5:5
16	370	슬래그 20%	165	5:5
17		7:2:1 (C:BFS:FA)	165	5:5

SCP 충전용 콘크리트 배합표 (단위: kg/m³)

구분	W	C	Slag	F/A	S	CS	G	SP제
1	165	430	0	0	438	435	852	7.10
2	165	387	43	0	437	434	850	7.10
3	165	344	86	0	437	433	849	7.10
4	165	301	129	0	436	433	847	7.10
5	165	301	86	43	433	429	841	7.10
6	165	320	80	0	443	440	861	6.60
7	170	320	80	0	440	436	855	5.20
8	175	320	80	0	436	433	848	4.60
9	175	280	120	0	436	432	847	4.60
10	180	320	80	0	433	430	842	4.60
11	180	320	80	0	260	602	842	4.60
12	180	320	80	0	606	258	842	4.60
13	165	280	80	40	440	436	854	6.60
14	170	280	80	40	436	433	848	5.20
15	175	280	80	40	433	430	841	4.60
16	165	296	74	0	450	446	874	6.11
17	165	259	74	37	446	443	867	6.11

－ 실험결과

- 동일한 물-결합재비를 가지는 콘크리트에서 단위결합재량이 430 kg/m³부터 370 kg/m³으로 감소함에 따라 슬럼프 플로가 감소
- 단위결합재량 370 kg/m³에서 슬럼프 플로 600 mm를 달성하지 못함
- 결합재 비율에 따른 슬럼프 플로 및 J-ring, U-box 측정결과 슬래그 20% 및 7:2:1(C:BFS:FA)의 비율에서 가장 우수한 간극통과성을 보임
- 단위결합재량 430 kg/m³에서 콘크리트의 압축강도가 53~58 MPa를 나타냄
- 따라서 저분체 고유동 콘크리트 개발을 위해 단위결합재량을 400kg/m³으로 설정

- 이때 단위수량을 165 kg/m^3 에서 180 kg/m^3 까지 변경하여 레올로지 특성을 평가한 결과 슬래그 20%, 단위수량 180 kg/m^3 일때와 7:2:1(C:BFS:FA), 단위수량 175 kg/m^3 인 경우에서 상대적으로 우수한 충전성능과 50 MPa 수준의 압축강도를 나타냄



그림 85. 콘크리트 물성시험

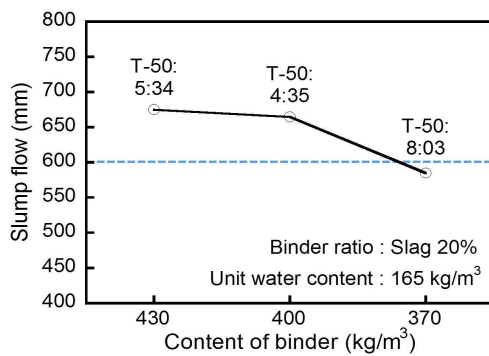


그림 86. 단위결합재량에 따른 슬럼프 플로 및 T-50

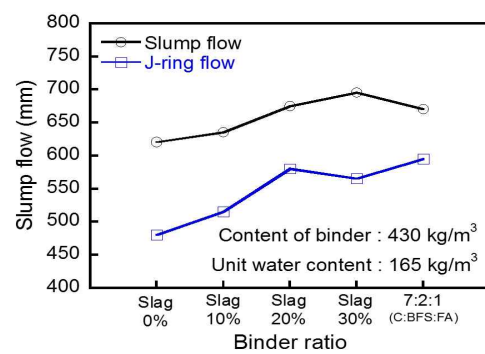


그림 87. 결합재 비율에 따른 슬럼프 플로 및 J-ring 플로

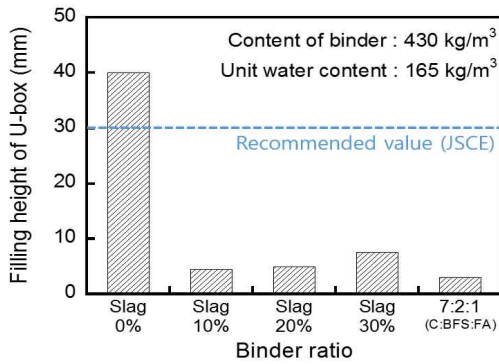


그림 88. 결합재 비율에 따른 U-box 높이차

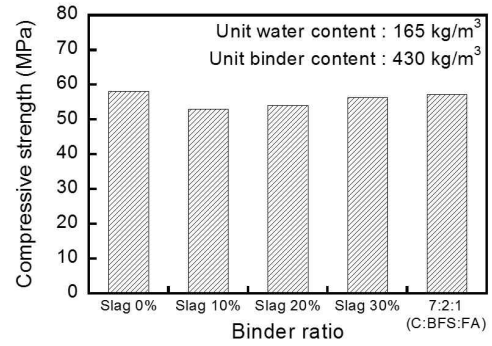


그림 89. 결합재 비율에 따른 압축강도(재령 28일)

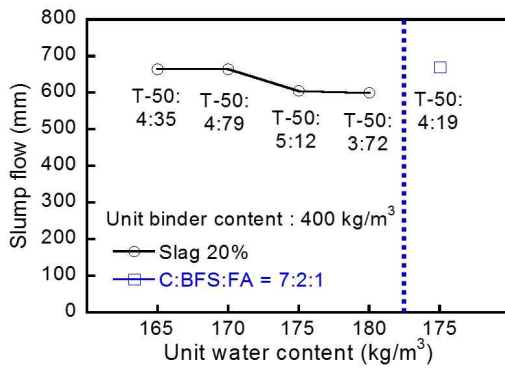


그림 90. 단위수량 변화에 따른 슬럼프 플로 및 T-50

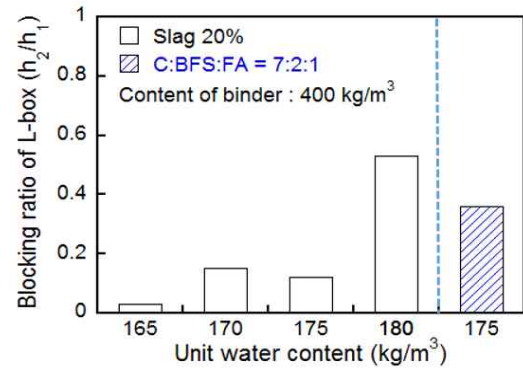


그림 91. 단위수량 변화에 따른 L-box 높이비

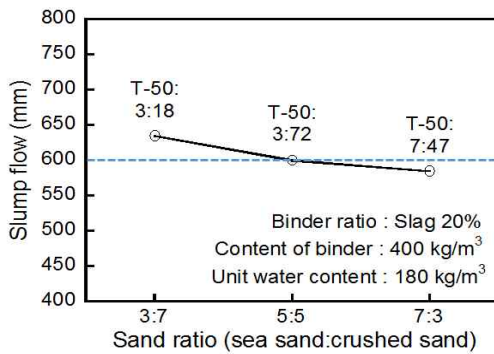


그림 92. 잔골재 비율에 따른 슬럼프 플로 및 T-50

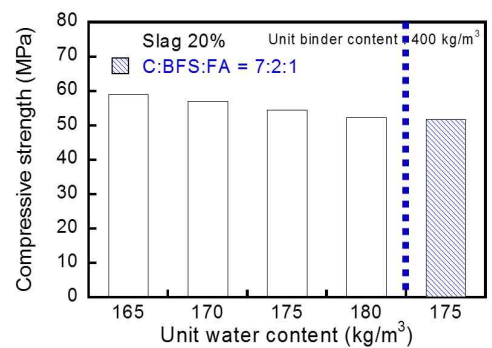


그림 93. 단위수량 변화에 따른 압축강도(재령 28일)

○ SCP 충전용 콘크리트 최적 배합 도출을 위한 현장실험

－ 배합 목표

- 실내실험에서 도출된 배합을 토대로 BP현장 상황을 고려한 SCP 충전용 콘크리트의 현장검증 실험 및 최적 배합 제시

－ 실험변수 및 실험배합

- 단위 결합재량 : 400 kg/m³
- 결합재 비율 : 시멘트:슬래그:플라이애시(6:3:1)
- 단위수량 : 180 kg/m³

- 잔골재 : 세척사 100% 사용
- 기타: 팽창재 2%, 혼화제 1%



— 실험결과

- BP현장 믹서를 이용한 SCP 충전용 콘크리트 제작 및 제작 횟수에 따른 레올로지 특성 평가 수행
- 총 4회의 콘크리트를 제작하였으며, 이때 슬럼프 플로는 모두 목표값인 600 mm 이상을 도달, T-50은 5초 이내의 빠른 속도로 도달함
- J-ring 플로의 경우 2번째 배합부터 플로차가 약 100 mm 이하로 안정적인 모습을 보임
- L-box의 높이비는 간극 통과 구간에서 폐색이 발생되지 않고 우수한 성능을 나타내며 실내실험 제안값인 0.5 이상을 만족
- U-box의 높이차는 실내실험 제안값인 300 mm 이내를 모두 만족
- 압축강도는 제작횟수에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며 재령 28일에서 평균 42.88 MPa를 나타내어 목표값인 40 ± 5 MPa를 만족

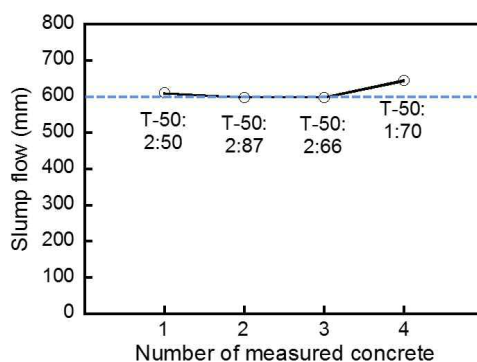


그림 94. 제작 횟수별 슬럼프 플로 및 T-50

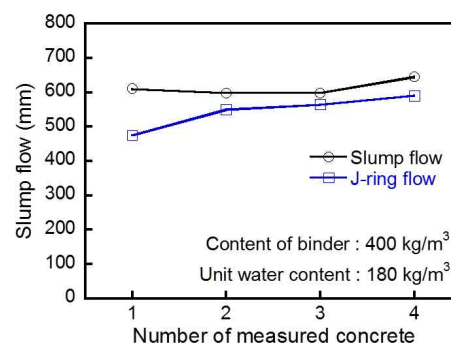


그림 95. 제작 횟수별 슬럼프 플로 및 J-ring 플로

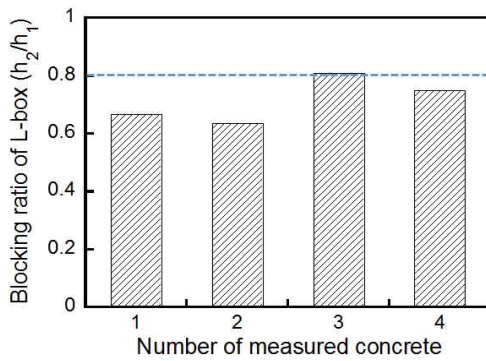


그림 96. 제작횟수별 L-box 높이비

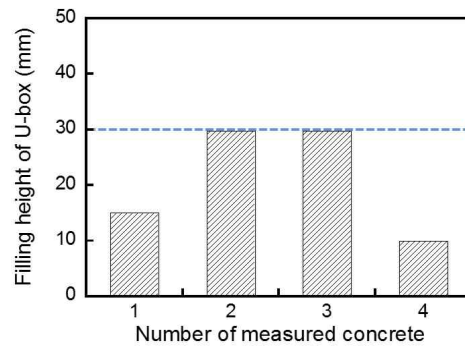


그림 97. 제작횟수별 U-box 높이차

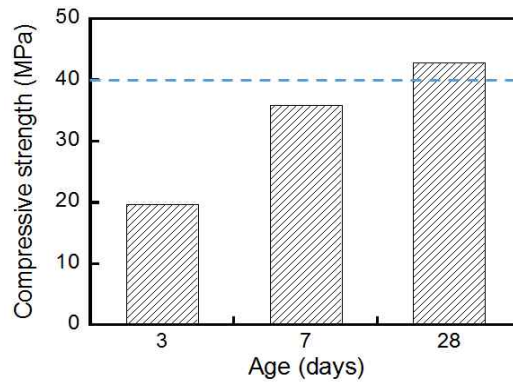


그림 98. 제령별 평균 압축강도

시험 결과 요약

작업 성능	평가 시험	본 연구에서의 제안값	BP현장 실험 평균값
충전성 시험	Slump Flow	600 ~ 700 mm	605 mm
	T-50	3 ~ 7 sec	3 sec
간극 통과성 시험	J-ring	< 100 mm	68 mm
	L-box	> 0.5	0.71
	U-box	< 300 mm	21 mm
Rheometer	Plastic Viscosity	< 100 Pa.s	28 Pa.s
	Yield Stress	< 30 Pa	0 Pa
강도평가	압축강도	40±5 MPa	42.88 MPa

- SCP 충전용 콘크리트의 BP현장 제작을 통해 목표 압축강도 값인 40±5 MPa와 품질 관리를 위해 제안한 값을 만족하였으며, 상기 실내실험 및 현장실험 결과를 바탕으로 SCP 충전용 콘크리트 최적 배합을 아래와 같이 도출함

SCP 충전용 콘크리트 최적 배합표(1 m³ 기준) [단위: kg/m³]

단위 수량	시멘트	슬래그	플라이애시	팽창재	세척사	굵은 골재	혼화제	수축 저감제
180	235.2	117.6	39.2	8	764.49	928.51	4	4

※ 혼화제의 경우 현장상황을 고려하여 슬럼프 플로 600 mm을 목표로 조절하여 사용

○ SCP 충전용 콘크리트 동적충격 압축물성평가(SHPB 시험)

- 내충격·방폭에 대한 성능 검증을 위해 재료/자재의 동적 압축물성 실험장치인 SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar) 실험장치를 이용하여 압축물성을 평가
- 정적 상태(Strain rate: 0.000333/s)에서의 압축강도가 약 49 MPa로 측정되었으

며, 동적 상태(strain rate: 250~400/s)일 때 압축강도가 122~171 MPa 으로 증가한 것을 확인

- 동적증가계수(DIF)는 정적 물성에 대한 동적 물성의 증가분으로 표현되며, 압축강도에 대한 DIF는 약 2.5~3.5 수준으로 나타남



그림 99. SHPB 실험장치

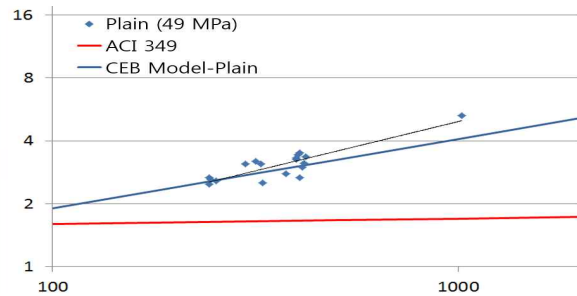


그림 100. 변형률 속도별 압축강도에 대한 동적증가계수

(나) HPCP용 콘크리트 배합 개발 및 성능 평가

○ HPFRCC용 콘크리트 기본 배합 개발

- 배합 목표
 - HPCP용 HPFRCC 압축강도 설계 범위는 100~180 MPa 수준
 - 180 MPa급은 최밀충전이론을 응용하여 제조할 수 있는 가장 높은 강도로 향후 100~180 MPa급 HPFRCC 결합재 구성 및 배합설계의 기본개념으로 활용 예정
- HPFRCC의 기본 결합재 설계 개념 도입(Richard and Cheyrezy, 1995)
 - 굵은골재 사용을 배제하여 HPFRCC의 균질성 확보
 - 구성재료의 입경을 고려하여 사용량을 최적화
 - 직경과 길이가 작은 강섬유를 혼입을 통한 시멘트 복합재료 연성 강화
- HPFRCC 기본 결합재 구성
 - 기본구성 재료는 시멘트, 실리카폼, 0.5 mm 이하의 잔골재, 충전재로 구성되며 실리카폼을 대신하여 플라이애시, 고로슬래그 미분말로 구성됨.
 - 낮은 물-결합재비하에서 재료의 분산과 유동성을 확보함.
- HPFRCC 기본 결합재 구성
 - Richard, P. 등의 팩킹 모델(packing model) 참조
 - 입자입경을 여러 가지로 분류하고 가능한 각각의 입경분류의 범위를 세부화하여 정의
 - 연속된 두 분류의 평균입경 d50의 비는 13 이상
 - 시멘트/고성능감수제의 비는 레올로지(rheology) 특성 분석을 통해 최적비 결정
 - 미분말은 덩어리지지 않게 최대한 분산된 형태의 것을 선정
 - 아래 그림에서 유동성이 양호한 범위 내에서 배합수량을 최소화하고, 물-결합재비는 밀도가 가장 크도록 입자를 구성한 배합에서 최소가 되도록 함(Richard and Cheyrezy, 1995)

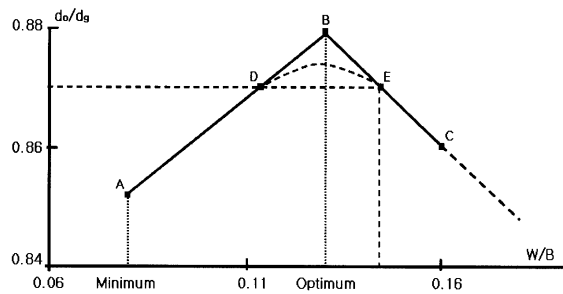


그림 101 물-결합재비에 따른 상대밀도의 변화

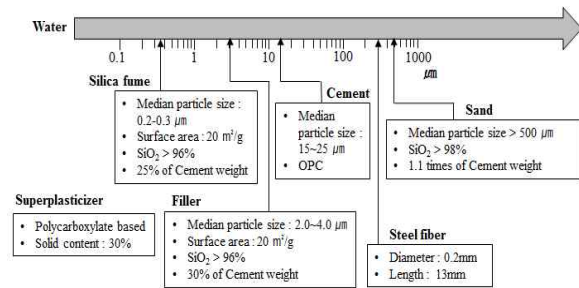
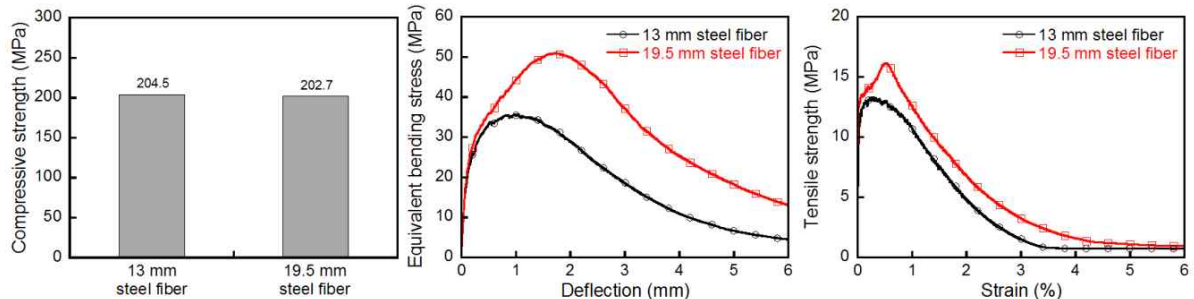


그림 102 HPFRCC 구성재료간의 특성

－ HPFRCC 기본배합 검증실험

- 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 실리카퍽, 잔골재, 충전재 등의 기본 결합재에 유동성 증진을 위해 고형성분 30%를 가진 폴리칼론산계 고성능감수제를 추가함
- 강섬유 13 mm와 19.5 mm를 각각 사용하여 기존연구결과 대비 휨 및 인장강도 향상방안을 모색함
- 재령초기 $90 \pm 2^\circ\text{C}$ 고온증기양생 3일간 실시함
- 실험결과



압축강도: 204 MPa(13 mm), 202 MPa(19.5 mm)

휨강도: 35 MPa(13 mm), 50 MPa(19.5 mm)

인장강도: 13 MPa(13 mm), 16 MPa(19.5 mm)

그림 103 HPFRCC 기본 시험 결과

－ HPFRCC 기본배합 제시

항목	W/B	시멘트	실리카퍽	잔골재	충전재	고성능 감수제	강섬유
상대비 (중량비)	0.2	1	0.25	1.1	0.3	0.18	체적의 2%

○ HPFRCC 최적 배합 개발

- － 배합 목표: SCP 구조와 유사한 성능을 발현하기 위한 HPCP 모듈 개발을 목적으로 100 MPa급 HPFRCC의 최적 배합을 개발하였으며 내화성능 확보를 위해 내화용 섬유 혼입률을 조정하여 유동 특성 및 역학적 특성을 평가함
- － 실험변수 및 조건
 - 내화용 섬유 : 폴리프로필렌(PP) 섬유
 - 내화용 섬유 혼입률 : 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6% (기본 강섬유 2% 고정)
 - 강섬유 혼입률 : 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5% (기본 PP섬유 0.2% 고정)
 - * 섬유 분산 효과를 고려한 특수혼화제 적용(증점효과 개선)

- 실험종류 : 유동 특성(슬럼프 플로, T-50, J-ring 플로, L-box, U-box), 역학적 특성(압축, 휨, 인장강도)



그림 104. 직선형 강섬유
($\phi = 0.2$ mm, $L = 19.5$ mm)



그림 105. PP섬유
($L = 19$ mm)

- 유동 특성 분석 결과

- 강섬유 및 유기섬유 혼입률을 변화하여 유동 특성 실험을 수행한 결과를 아래 표에 나타냄
- 동일 감수제 사용량에 따른 HPFRCC의 유동 특성 평가 결과 PP 섬유 혼입률 0.2% 고정 시 강섬유 최대 혼입량 확인($V_f = 2\%$)
- 강섬유 혼입률 2% 고정 시 PP섬유 0.3% 이상에서 유동성의 급격한 감소 발생
- 상기 실험 결과를 근거로 강섬유(2%) 및 PP섬유(0.2%)의 최적 혼입률 결정

표 17. 섬유 혼입률에 따른 유동 특성 평가 결과

구분		슬럼프 플로 (mm)	T-50 (sec)	J-ring 플로 (mm)	플로 값 차이 (mm)	L-box		U-box 높이차 (cm)
						500 mm 도달시간 (sec)	높이비	
PP섬유 0.2%	강섬유 2.5%	615	3.4	405	210	15.55	0.38	8.5
	강섬유 2.0%	690	2.8	480	210	7.25	0.63	3
	강섬유 1.5%	775	2.05	635	140	3.52	1	1
	강섬유 1.0%	845	2.06	820	25	3.65	1.06	0.5
	강섬유 0.5%	905	1.49	870	35	2.26	1.13	1.5
	강섬유 1.5%	905	2.06	880	25	2.42	1.46	1
Plain (섬유 미포함)		960	1.8	895	65	2.82	1.13	0.5
강섬유 2%	PP섬유 0%	880	1.75	700	180	2.85	1	0.5
	PP섬유 0.1%	760	2.64	490	270	4.93	0.94	0.5
	PP섬유 0.2%	690	2.8	480	210	7.25	0.63	3
	PP섬유 0.3%	565	5.3	390	175	20.42	0.24	10.5
	PP섬유 0.4%	500	15.51	345	155	X	X	20.5
	PP섬유 0.5%	440	X	340	100	X	X	25.5

- 역학적 특성 분석 결과

- 100 MPa급 HPFRCC의 압축강도는 내화용 섬유(PP fiber)의 혼입률 0, 0.2, 0.4%에서 각각 108.2, 105.3, 103.7 MPa로 나타났으며, PP섬유의 혼입률 증가에 따라 압축강도가 점점 감소하는 경향을 나타냄
- 한편 PP섬유 혼입률에 따른 100 MPa급 HPFRCC의 모든 배합에서 목표로 하는 압축강도 100 MPa 이상을 달성
- 휨강도 및 인장강도의 경우 PP섬유 혼입률에 관계없이 평균값이 각각 33.2 MPa, 12.5 MPa로 나타났으며, 이때 인장강도는 목표값인 8 MPa 이상을 만족
- 응력 및 변형률 곡선의 면적으로 나타내는 에너지 흡수능력(toughness)의 경우

PP섬유의 혼입률이 증가함에 따라 휨 및 인장강도에서 모두 약간 감소하는 경향을 보임

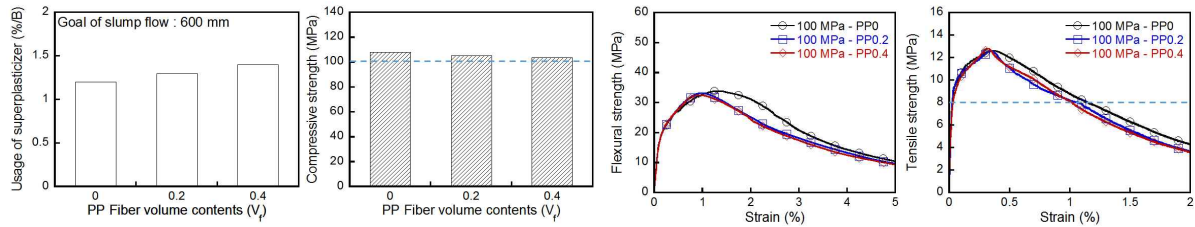


그림 106. PP 섬유 혼입률에 따른 감수제 사용량 그림 107. PP 섬유 혼입률에 따른 HPFRCC 압축강도 그림 108. PP 섬유 혼입률에 따른 HPFRCC 휨강도 그림 109. PP 섬유 혼입률에 따른 HPFRCC 직접인장강도

○ 내화성능 개선용 100 MPa급 HPFRCC의 폭렬성능 평가

- 설계기준강도 50 MPa 이상의 콘크리트를 사용할 경우 국토교통부 장관이 정하여 고시하는 고강도 콘크리트 내화성능 관리기준에 적합하여야 함 (국토교통부령 제238호)
- 본 과제에서 개발한 HPCP용 HPFRCC(100 MPa급)에 대한 내화성능을 검토하기 위해 우선적으로 내화용 섬유의 혼입률(0, 0.2, 0.4%)에 따라 폭렬 실험을 수행
- 전기 가열로(최대 1250℃) 및 ISO 834의 표준시간-가열온도 곡선 적용

표 18. HPFRCC 폭렬성능 1차 평가 결과

구분	시작전	1시간 경과후	2시간 경과후	3시간 경과후
Plain (강섬유 2%)			—	—
100-P0.2 (강섬유 2% 및 PP섬유 0.2%)				



그림 110. 폭렬실험을 위한 전기가열로

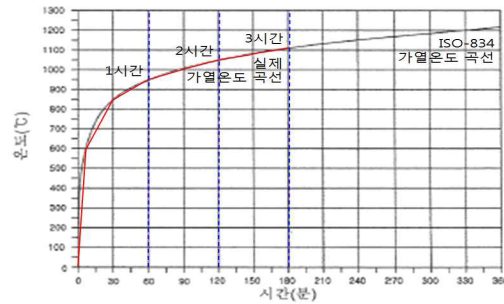


그림 111. 표준시간-가열온도 곡선

- 강섬유만 혼입된 Plain의 경우 약 500℃에서 폭렬 발생
- PP섬유 혼입률 0.2%에서 측정 최대 3시간까지 폭렬이 발생하지 않음
- 시험체 내부 단면을 살펴본 결과 1시간 경과 후 시험체에서 표면 약 2 cm 가량의 색깔이 변화됨(회색→백색)
- 시험체 내 PP섬유는 1시간 경과 후 모두 녹은 것으로 판단, 강섬유는 1시간 경과 후 중심부에 조금 남아있고, 2시간 경과 후에는 중심부까지 모두 녹은 것으로 확인

표 20. HPFRCC 폭렬성능 2차 평가 결과

구분	1시간 경과후	2시간 경과후
100-P0.2 (강섬유 2% 및 PP섬유 0.2%)		
100-P0.4 (강섬유 2% 및 PP섬유 0.2%)		
100-P0.6 (강섬유 2% 및 PP섬유 0.2%)		



그림 118. 터널가열로

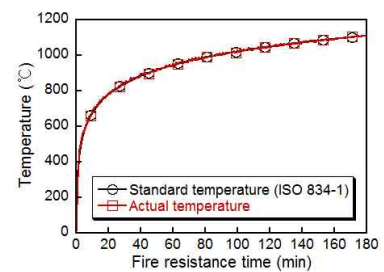


그림 119. 표준시간-가열온도 곡선

- 가스 가열 방식의 터널 가열로(내부 크기 : 4×1.2×1.5 m)를 활용하여 PP 섬유

혼입률에 따른 HPFRCC 폭렬 성능 평가를 수행함

- ISO 834에 따른 표준시간-가열온도 곡선을 반영하여 폭렬실험을 수행한 결과 PP 섬유 0.2% 이상 혼입시 내화 2시간까지 폭렬이 발생하지 않음
- 상기 유동 특성 및 역학적 특성평가 결과와 폭렬실험 결과를 토대로 아래에 PP섬유를 0.2% 혼입한 내화성능 개선 100 MPa급 HPFRCC 최적배합을 제시

내화성능 개선용 100 MPa급 HPFRCC 최적배합(1m³ 기준) [단위: kg/m³]

구분	시멘트	실리카 폼	플라이 애시	잔골재		충전재 (14 um)	배합수	감수제 (3000S)	강섬유 (19.5 mm)	PP 섬유	소포제	증점제
				국내 6호	국내 7호							
100-P0.2	705.9	70.6	141.2	508.2	338.8	141.2	248.9	11.10	156	1.82	2.0	3.3

○ 동적충격 재료물성 시험(SHPB 및 SEFIM) 평가를 통한 방호·방폭 성능 검증

- HPCP용 HPFRCC의 동적충격 압축물성 평가 결과 Strain rate가 10-1/s에서 329/s까지 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 경향을 나타냈으며, Strain rate 329/s에서 최대 162.7 MPa의 압축강도가 측정됨
- 동적충격 인장물성 평가의 경우 Strain rate가 10-1/s~134/s로 증가함에 따라 인장강도, 변형률, 에너지 흡수능력 등 모든 인장거동지표가 증가하는 경향을 나타냈으며, Strain rate 134/s에서 35.5 MPa 수준의 동적충격 인장강도를 나타냄

○ 동결융해 저항성 평가를 통한 내구성 지수 산정

- 내구성을 증진시킬 목적으로 공기연행제(AE) 첨가 유무에 따른 동결융해 시험결과 성능 목표값인 95 이상을 만족

○ 자기수축 평가

- 내구성 검증을 목적으로 자기수축 실험을 수행한 결과 평균 300×10^{-6} 에 도달하여 목표값(500×10^{-6} 이하)을 만족

(다) HPCP 모듈 기본 및 상세 설계

○ HPCP 단면두께 산정

- SCP와 유사성능을 갖는 skin plate 1개면을 갖는 HPCP 단면을 제안함(특허출원)
- 6 mm 두께의 강판을 사용할 경우, 콘크리트의 두께가 95 mm인 SCP와 110 mm인 HPCP가 유사한 강성(하중-변위 곡선의 기울기)을 갖는 것으로 나타남(단면두께 산정 시 콘크리트 35 MPa, HPFRCC 140 MPa 적용)

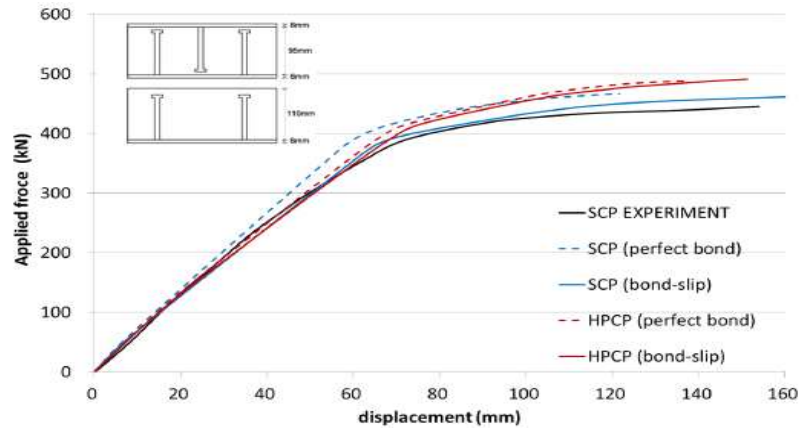


그림 120. SCP와 HPCP의 하중-변위 해석결과

○ HPCP 적용 HPFRCC의 강도 산정

- 콘크리트 강도에 따른 HPCP 구조의 최대 저항력을 바탕으로 HPFRCC의 최소 강도를 산정함
- HPFRCC 압축강도 80 MPa 이상일 때 48 MPa의 콘크리트가 적용된 SCP와 유사한 수준의 구조성능을 가짐
- 따라서 HPCP 적용 HPFRCC의 최소강도는 80 MPa이고 100과 140 MPa를 적용할 경우 유사한 거동을 나타냄

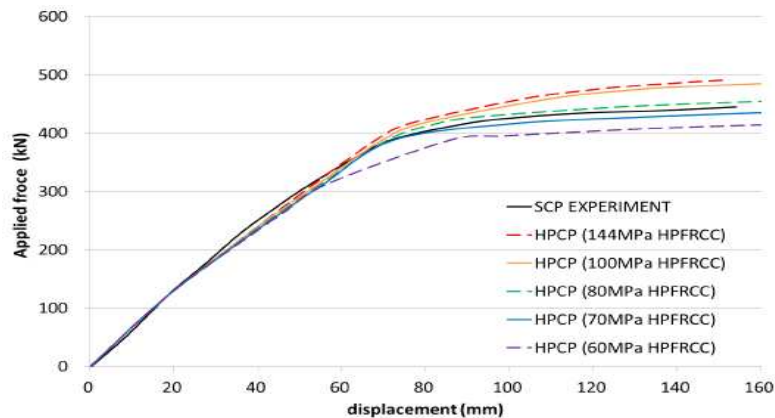


그림 121. 압축강도에 따른 SCP와 HPCP의 하중-변위 해석결과

○ SCP와 동일 두께 갖는 HPCP 거동 분석

- 변위 100mm까지에 대해 해석 수행
- HPCP의 경우 콘크리트 블록 두께를 194mm, SCP의 경우 콘크리트 블록 두께를 188 mm로 하여 해석 수행
- 일반강도 콘크리트를 사용한 SCP와 HPCP의 거동이 매우 유사한 것을 확인
- 콘크리트 강도보다 콘크리트 두께가 HPCP 거동에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인

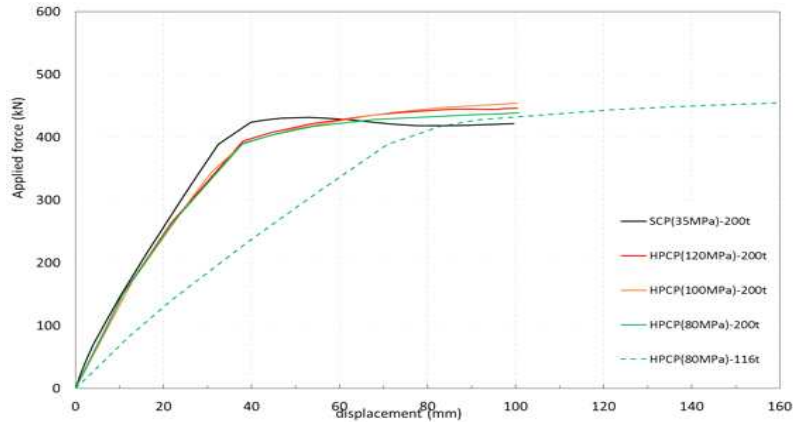


그림 122. 동일 두께에 따른 SCP와 HPCP의 하중-변위 해석결과

○ HPCP 모듈 접합부 상세 설계 도출

- HPCP의 경우 SCP의 접합부의 연결방법을 유사하게 적용함
- HPCP 접합면 상부면 일부에 Flat bar를 설치하고 이곳에 스티드를 역으로 용접하여 HPFRCC와 스티드가 일체거동을 할 수 있도록 유도함(그림 87)
- SCP와 같이 Flat bar를 통한 상하부 용접으로 접합부가 연결되는 방법을 고안함

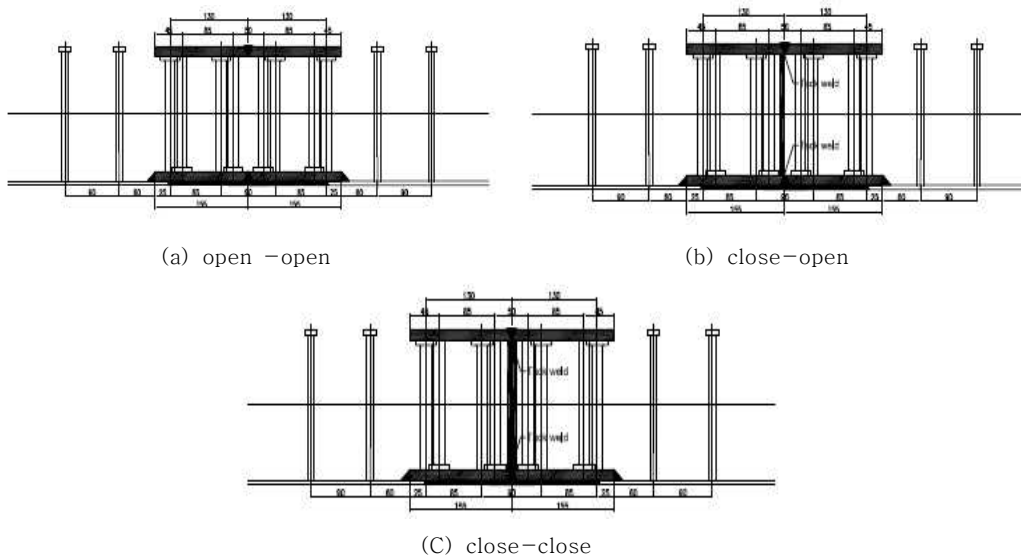


그림 123. HPCP 모듈 접합부 적용 방법 상세 설계

○ HPCP 모듈 구조성능 실험평가

- SCP 모듈의 실험과 동일한 재하조건과 경계조건을 부여하고 SCP 모듈에 비해 동등 이상의 구조성능을 갖도록 목표 설정
- HPCP 모듈은 최소 880 kN 이상의 휨강도를 나타냈으며, SCP 모듈에 비해 극한 강도가 다소 높고, 극한 강도 도달 이후의 연성능력도 더 우수한 것으로 평가됨
- 압축성능 실험에서는 HPCP 모듈의 목표 극한강도인 304 ton을 모두 만족하였으며, 시험장비의 최대하중인 360 ton에서도 파괴되지 않음을 검증함
- 한편 접합부 형상에 따른 HPCP 모듈 성능 평가 결과 휨 및 압축성능의 차이를 보이지

얇아 콘크리트 접촉면으로 연결된 HPCP 모듈의 안전성을 검증함

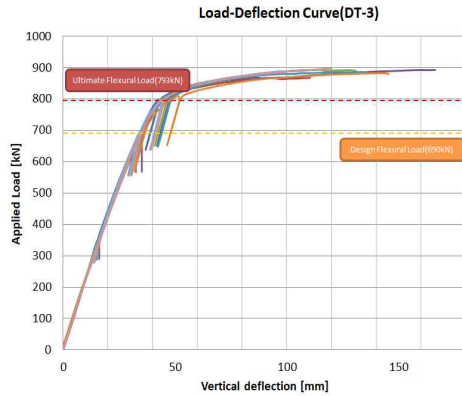


그림 124. 휨 시험체의 하중-변위 그래프 비교

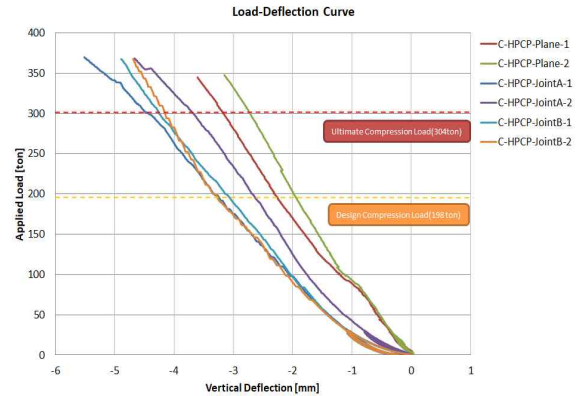


그림 125. 압축 시험체의 하중-변위 그래프 비교

(라) SCP/HPCP 모듈 구조성능 및 특성 실험

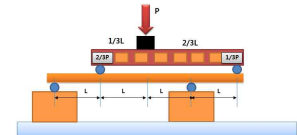
○ 휨성능 실험

- 200 ton UTM으로 4점 재하 휨실험 방식 적용
- 탄성구간 확인을 위해 loading-unloading 반복
 - 설계강도 50%까지 재하 후 직전 재하력 20% 감소
 - 설계강도 100%까지 재하 후 직전 재하력 20% 감소
 - 극한강도까지 재하 후 직전 재하력 20% 감소
 - 극한강도 이상(연성 거동까지 가력)



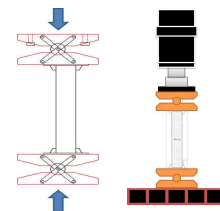
○ 전단성능 실험

- 200 ton UTM으로 4점 재하
- 보강된 하중분배용 빔 설계/제작
- 중앙 접합부에 휨모멘트 없는 순수전단력 발생
- 탄성구간 확인을 위해 loading-unloading 반복
 - 설계강도 50% 재하 후 직전 재하력 20% 감소
 - 설계강도 100% 재하 후 직전 재하력 20% 감소
 - 설계강도 이상



○ 압축성능 실험

- 400 ton 유압가력기로 압축력 재하
- 실험체 중심축에서 편심 e를 가할 지그 설계/제작
- 탄성구간 확인을 위해 loading-unloading 반복
 - 극한강도 10% 재하 후 재하력 모두 제거
 - 극한강도 이상 재하



○ 내화성능 실험

- 시험 목표
 - 목표 가열 온도에서 시험체의 극한 휨성능 평가

- 설계하중 선제하 후 목표 가열 온도 노출 이후 영구변형 수준 평가
- 4점 휨시험 구현을 위한 지그 설계/제작

(마) 영구동토 조건을 고려한 LNG 저장탱크 기초 설계법 도출

- 영구동토 대상 기초 설계를 위한 설계정수 도출 및 검토
 - 동토 대상 LNG 저장탱크의 지지력 및 장기침하 산정방법 검토(러시아 GOST, SNiP)
 - LNG 저장탱크의 천연가스 유출에 따른 주변 지반 거동 검토
- 영구동토 조건을 고려한 LNG 저장탱크의 기초 설계프로세스 정립
 - 동토지역 구조물 기초 설계흐름도 도출(하계기간 Vs 동계기간)
 - 하계기간:

$$P + W_p + P_d - P_s \leq 0$$

$$P + W_p + \pi d L_a \tau_A \leq \pi d L_e \tau_a$$

여기서, d : 말뚝기초의 직경, L_e : 말뚝기초의 영구동토층 관입깊이, τ_a : 동착강도,
 L_a : 활동층의 깊이, τ_A : 활동층 토사와 말뚝체간의 접촉면에서 발휘되는 전단강도

- 동계기간:

$$P_u - P - W_p - P_t - P_s \leq 0$$

$$\pi d L_f \tau_u \leq P + W_p + \pi d L_e \tau_a + \pi d L_t T_A$$

여기서, P_u : 동결상태의 활동층에서 발생하는 상향의 마찰력, P_t : 동계기간 융해상태의 활동층에서 작용하는 하향의 마찰력, L_f : 동결된 활동층 두께, τ_u : 동결된 활동층에서 발현된 동착강도, L_t : 융해된 활동층의 두께

- LNG 저장온도 및 지반조건을 반영한 LNG 저장탱크 기초 설계용 S/W 개발
 - 다층지반에 대한 지지력 산정 가능
 - 하중조합 및 하중계수를 다양하게 입력 가능
 - LNG 기초 말뚝의 계절적인 조건에 따라 검토 가능
 - LNG 기초 말뚝에 대한 설계 공식 코드화
 - 프로젝트 Data Base 및 관리, 출력물 Excel export 기능 확장
 - LNG 저장탱크 기초설계 프로그램 상세 매뉴얼 도출

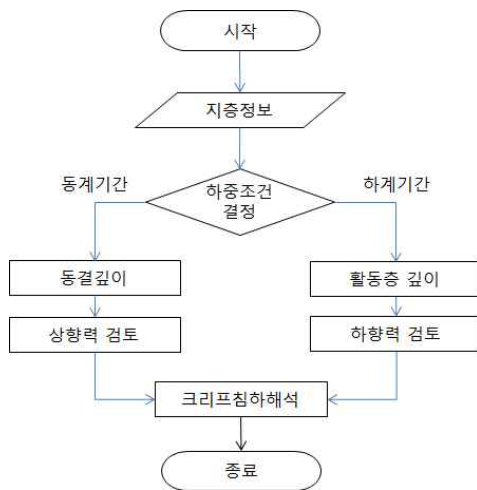


그림 126. LNG 저장탱크 기초 설계 프로세스

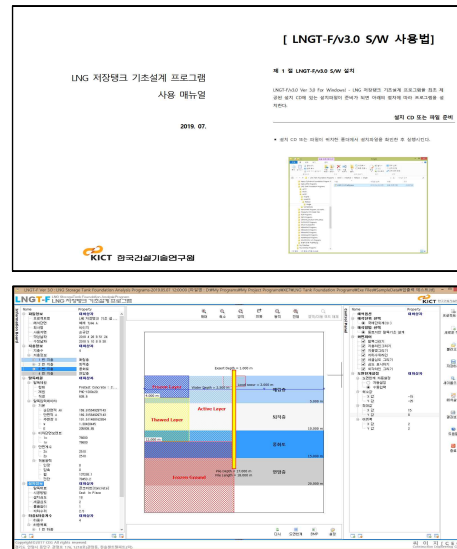


그림 127. 사용 매뉴얼 및 프로그램 구성

(2) 연구 개발 성과

(가) 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	증점제를 사용한 저분체 고유동 콘크리트의 특성에 관한 연구	한국산학기술학회 논문지	박기준	18(2)	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2017.02	ISSN 1975-4701
2	SCP 모듈 충전용 고유동 콘크리트의 최적배합 도출 및 채움성능 평가	한국산학기술학회 논문지	박기준	18(3)	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2017.03	ISSN 1975-4701
3	Fiber pullout behavior of HPPRCC: Effects of matrix strength and fiber type	Composite Structure	Sung-Wook Kim	174	스위스	Elsevier	SCI(E)	2017.08	ISSN 0263-8223
4	Development of cost effective ultra-high-performance fiber-reinforced concrete using single and hybrid steel fibers	Construction and Building Materials	Jung-Jun Park	150	스위스	Elsevier	SCI(E)	2017.09	ISSN 0950-0618
5	강섬유 형상, 길이 및 혼입율에 따른 고성능 섬유보강 시멘트 복합체의 휨 특성 평가	한국산학기술학회지	박기준	18(12)	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2017.12	ISSN 2288-4688
6	Effect of fiber spacing on dynamic pullout behavior of multiple straight steel fibers in ultra-high-performance concrete	Construction & Building Materials	Doo-Yeol Yoo		스위스	Elsevier	SCI(E)	2019.06	ISSN 0950-0618
7	저분체 기반 고유동 콘크리트의 SCP Mock-up 부재 충전 성능 평가	대한토목학회 논문집	박기준	39(4)	대한민국	대한토목학회	비SCI	2019.08	ISSN 1015-6348

8	LNG 외조탱크용 적용을 위한 SCP 모듈의 휨성능 평가	한국산학기술학회 논문지	박정준	20(1)	대한민국	한국산학기술학회	비SCI	2019.01	ISSN 1975-4701
9	LNG 탱크에서 천연가스 유출시 얇은 기초 주변 지반거동의 수치해석적 분석	한국지반신소재학회 논문집	김정수	17(4)	대한민국	한국지반신소재학회	비SCI	2018.12	ISSN 1975-2423
10	Benefitsofsyntheticfibersontheresidualmechanicalperformanceof 2UHPFRCAfterexposuretoISOstandardfire	Cement & Concrete Composites	Doo-Yeol Yoo				SCI(E)	2019. 05 (심사중)	ISSN 0958-9465
11	Residual flexural properties of HPFRCC exposed to fire - Effects of matrix strength, synthetic fiber, and fire duration	Construction & Building Materials	Jung-JunPark				SCI(E)	2019. 06 (심사중)	ISSN 0950-0618

(나) 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국건설순환자원학회	박기준	2017.04.07	상명대학교	대한민국
2	한국구조물진단유지관리공학회	박정준	2017.04.13	동명대학교	대한민국
3	한국구조물진단유지관리공학회	박기준	2017.04.13	동명대학교	대한민국
4	한국콘크리트학회	박기준	2017.05.11	휘닉스 제주	대한민국
5	한국구조물진단유지관리공학회	박정준	2017.09.21	원광대학교	대한민국
6	대한토목학회	박기준	2017.10.19	부산 BEXCO	대한민국
7	한국콘크리트학회	박기준	2017.11.02	안동 그랜드호텔 및 리첼호텔	대한민국
8	한국건설순환자원학회	박기준	2017.11.16	제주도 해비치 호텔&리조트	대한민국

(다) 특허출원

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호	등록인	등록일	등록번호	등록 번호	
1	강재판과 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료로 이루어진 모듈형 합성패널, 및 그 제작방법	대한민국	한국건설기술연구원	17.01.26	10-2017-0012803		한국건설기술연구원	17.08.24	10-1772891		100
2	고유동 시멘트계 재료를 이용한 곡면 프리캐스트 구조부재의 제작을 위한 거푸집 장치 및 이를 이용한 곡면 프리캐스트 구조부재의 제작방법	대한민국	한국건설기술연구원	2017.11.20	10-2017-0154533		한국건설기술연구원	18.07.03	10-1876307		100

(라) 저작권 (소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	극한지 LNG 저장탱크 기초 설계프로그램 (LNGT-F/v 3.0)	2019.06.01	한국건설 기술연구원	2019.06.14.	C-2019-016986	한국건설 기술연구원	100
2	LNG 저장탱크 설계용 동결시도 산정 (FDC 1.0) 프로그램	2019.06.01	한국건설 기술연구원	2019.06.14.	C-2019-016987	한국건설 기술연구원	100

(마) 현장시험

현장시험명	시험일	시험장소	주요내용
SCP 구조 성능 평가 시험 (1차)	2017.10.23	한국건설기술연구원 구조시험동 (일산)	UTM 시험장비를 통한 SCP의 휨 (15EA)/압축 (14EA)/전단 (12EA) 강도 측정
SCP 구조 성능 평가 시험 (2차)	2018.06.25	한국건설기술연구원 구조시험동 (일산)	UTM 시험장비를 통한 SCP의 압축 (9EA) 강도 측정
SCP 화재 사고 시험	2018.12.17	한국건설기술연구원 화재시험센터 (화성)	승온조건에 따른 SCP의 화재시 휨강도 측정
HPCP 구조 성능 평가 시험 (1차)	2018.06.25	한국건설기술연구원	UTM 시험장비를 통한 HPCP의 휨 (4EA)/압축 (2EA) 강도 측정
HPCP 화재 사고 시험	2018.12.17	한국건설기술연구원 화재시험센터 (화성)	승온조건에 따른 HPCP의 화재시 휨강도 측정 (2EA)
HPCP 구조 성능 평가 시험 (2차)	2019. 06.20	한국건설기술연구원	UTM 시험장비를 통한 HPCP의 접합부 형태별 휨 (4EA)/압축 (4EA) 강도 측정

다. 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 구조 해석 기법 개발

(1) 연구 내용

(가) SCP 구조형식 최적화

○ 설계기준에 따른 SCP부재 설계

- 국내외 설계 기준(Eurocode 4, KEPIC-SNG, AISC N690 등)에 대한 검토와 기준식 유도를 통해 영향요인을 분석
- SCP 구조 설계지침인 DNV INCA Guidance에 따라 SCP 부재 설계 초안 수립

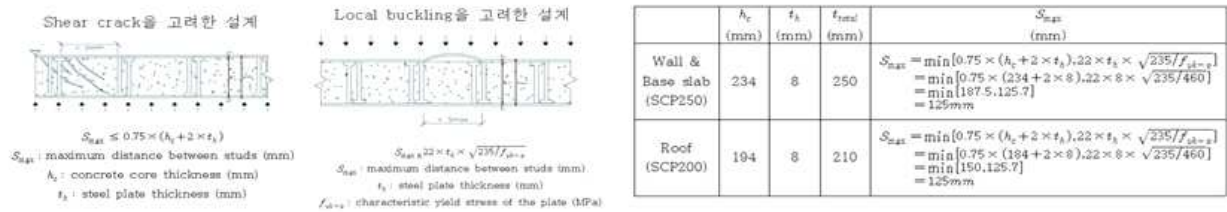


그림 128. INCA Guidance에 따른 전단 스티드 배치

○ SCP 해석 모델 검증

- SCP 부재 시험(휨, 압축, 이음부 휨) 결과를 유한요소해석 결과와 비교함으로써 수립된 모델의 유효성을 검토
- SCP 및 이음부 휨 시험 결과는 해석 결과와 유사한 기울기, 연성 거동 형태, 극한 휨 강도 수준을 보임
- 압축 시험 결과는 해석 결과와 유사한 극한 휨 강도 수준을 보임 (압축 시험시 시편의 상/하부 평탄도가 완벽히 맞지 않아 가력 지그가 하중을 가하는 과정에서 변위가 증가하여 이상적인 시편 형상을 가정하는 FEM과 비교하여 기울기 차이가 남)

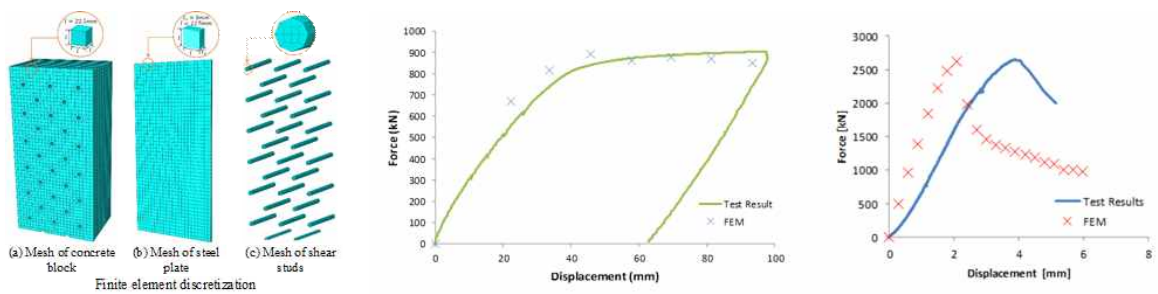


그림 129. 휨 및 압축 시험 결과와 해석치 비교

○ 유효탄성계수를 적용한 단순화 수치해석모델 개발

- SCP 및 HPCP의 강재와 콘크리트 경계면에서 발생하는 부착-슬립과 부분합성거동 특성을 고려하여 강성 및 저항력의 감소를 모사하기 위한 단순화된 유한요소 수치해석모델 개발
- 부재의 구조 파괴형태(강판 항복, 국부 좌굴, 전단 연결재 파괴)에 따른 저항력

저하를 강판의 등가항복강도를 통하여 모사

- 전단 스터드 간격(90/120/150/180mm)에 따른 SCP 실험 결과와 비교하여 검증

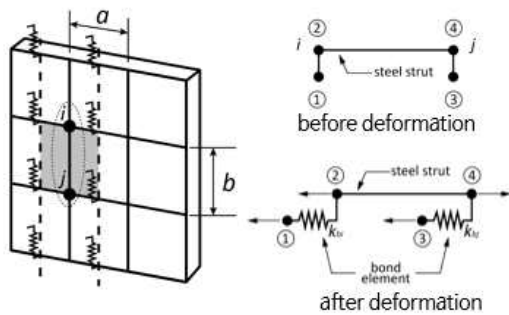


그림 130. 유효탄성계수 적용 개념도

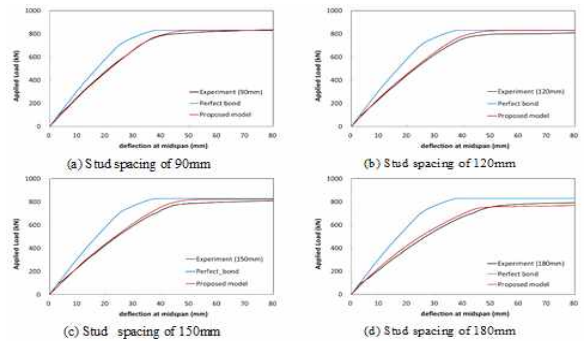


그림 131. 스터드 간격별 실험 및 해석결과 비교

○ 전단 스터드 배치 최적화

- SCP 모듈의 제작성 및 경제성 확보를 위한 스터드 배치 최적화 연구를 수행
- 전단 스터드 간격을 제한하는 강판의 국부좌굴 현상에 대해 부재 단위 좌굴 해석을 수행하여 사용가능한 최대 스터드의 간격을 도출
- 스터드 간격과 강판 두께에 대해 표준화된 세장비와 임계응력에 대한 관계식을 오일러 좌굴공식 형태로 유도
- SCP의 세부 경계조건에 따른 차이를 반영하기 위한 형태별 유효길이계수 도출
- SCP 관련 설계 지침(DNV INCA guidance)에서 제시한 설계 기준과 비교하여 스터드 간격을 (1) 추가적인 보강이 없을 시 1.76배, (2) 측면 채널 및 강판 보강 설치 시 2.13배, (3) 스터드를 포함하는 채널의 설치 시 2.81배로 증가하여 적용하여도 강판의 좌굴 및 콘크리트의 전단균열에 대해 안전함을 해석적으로 확인

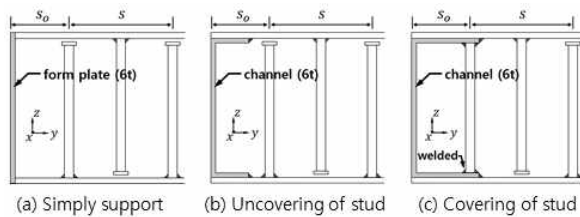


그림 132. SCP의 설계 세부 및 경계조건

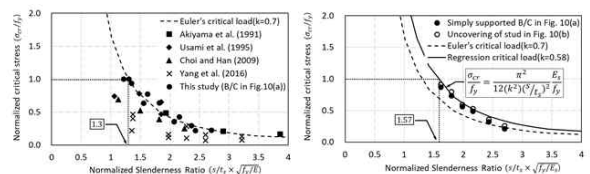


그림 133. SCP의 국부좌굴거동

○ SCP 강재 프레임 이음부 설계

- SCP와 H-beam 사이의 용접부 안전성 검토를 위해 2차원 유한요소 해석을 수행
- Local 좌표계에서 목두께 방향의 축/전단 응력을 도출한 후 합 응력을 기반으로 용접부의 강도 평가
- 유한요소 해석을 통한 최소 요구 용접 각장은 6mm이나, AWS 코드 기반 최소 값은 8mm이므로 실 부재 설계시 8mm 각장의 fillet 용접 적용이 필요

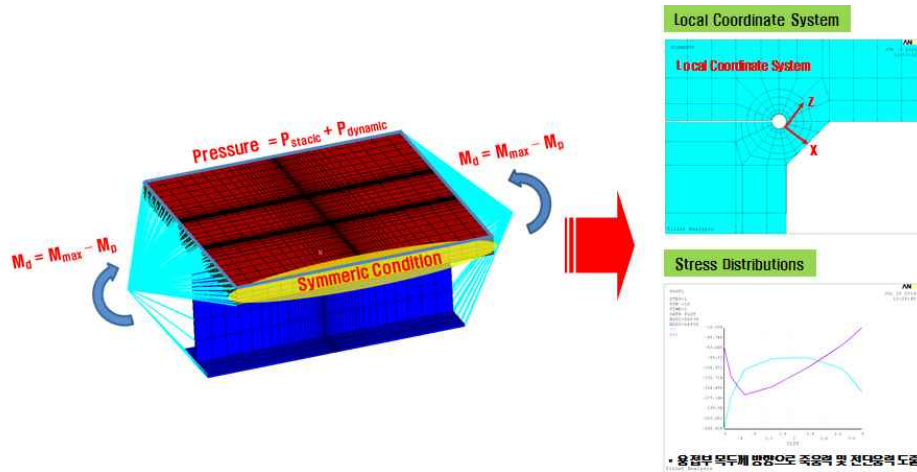


그림 134. SCP 강재 프레임 이음부 상세 해석

(나) SCP 구조계 유체-구조물-지반 상호작용해석 기술 개발

- 액체저장탱크의 Fluid-Structure Interaction(FSI) 효과와 Soil-Structure Interaction(SSI) 효과를 고려한 내진해석 기초기술 조사
 - Eurocode 8과 API 625 설계기준으로부터 FSI 및 SSI 해석에 필요한 관련기준 및 고려사항을 분석
 - LNG 저장탱크의 기초로 적절한 지지층이 존재할 경우, 직접기초가 매우 경제적인 설계가 가능 하지만 지지력 조건이나 침하량 조건을 만족하지 못하면 말뚝기초가 사용됨.
 - 하지만, 설계기준(Eurocode 8, API 650)에서는 말뚝기초로 지지된 LNG 저장탱크의 SSI 효과를 고려하기 위해 정밀 동적해석방법을 적용하도록 하고 있음

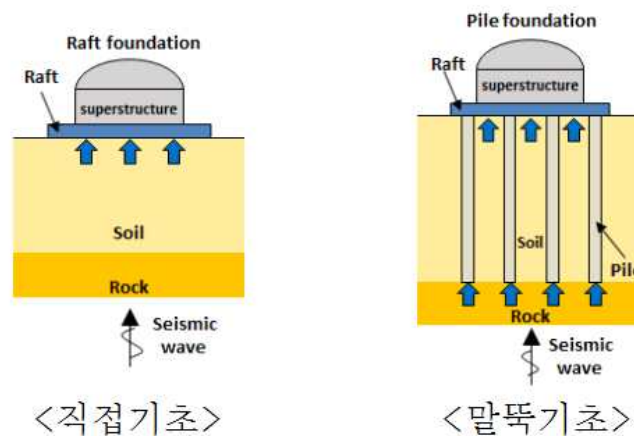


그림 135 LNG 저장탱크 기초 종류

- SCP 구조계에 대한 Fluid-Structure-Soil Interaction(FSSI) 효과 고려방법 연구
 - LPM(Lumped Parameter Method) 해석
 - 이 해석모델은 Beam 요소와 집중질량, 스프링, 댐퍼 등으로 이루어진 해석모델로서 실무적용 용이
 - 하부구조(기초와 지반)에 대한 SSI 해석과 상부구조(내조탱크, 외조탱크,

저장유체)에 대한 FSI 해석을 분리하여 수행할 수 있다는 장점이 있음

－ 정밀 동적 해석

- SSI 효과를 정밀하게 고려할 경우, 지반의 비선형적인 재료감쇠 특성(등가선형해석), 지반을 통한 방사감쇠효과 등을 쉽게 고려할 수 있는 방법임. 또한 SSI 효과를 무시한 경우에 비해 작은 지진력이 산정될 수 있음. 따라서 경제적인 단면 도출이 필요한 경우 정밀 SSI 해석을 수행하는 것이 효과적

－ 사례 연구

- 정밀 동적 해석방법을 이용하여 63 ML 용량의 LNG 저장탱크에 대한 해석을 수행
- 기초의 지름은 35.5 m, 두께 1.0m, 말뚝의 직경 0.75m, 말뚝의 총 개수 229개, 최대 길이는 30m
- 외조탱크는 바닥슬래브, 벽체, 지붕으로 구성되어있고 총 높이는 29.27 m이고, 내조탱크는 높이 20.0m, 유체가 19.0m 채워져 있음.
- 지반은 기반암 위에 깊이 30m인 균질한 토층으로 가정하였고 SHAKE 해석을 수행하여 등가선형방법(지반의 비선형성 고려)을 적용하였음.
- 지진입력은 수평 및 수직방향 가속도 설계응답스펙트럼으로부터 작성된 인공지진파를 사용함
- 이를 이용하여 그림 7과 같은 LNG 저장탱크의 기초형식(얕은 기초, 말뚝기초, 말뚝지지 전면기초)에 따른 구조물의 지진응답을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었음.
 - ① 수평방향 지진해석 시 SSI 해석결과는 고정기초 지진응답에 비해 최대 57% 까지 감소하였고, 기초 형식에 따른 상부구조물의 최대부재력 차이는 10% 이내로 크지 않았음
 - ② 수직방향 지진해석 시 말뚝기초의 경우, 말뚝으로 인한 기초의 수직강성이 커지고 방사감쇠가 작아질 수 있기 때문에 SSI 효과를 고려한 응답이 고정기초응답보다 커지는 경우가 발생하였으므로 설계 시 이러한 부분을 고려할 필요가 있음
 - ③ 수평방향 지진해석 시 말뚝지지 전면기초의 경우 말뚝에 의한 동다짐 효과가 크게 나타났지만, 수직방향 지진해석 시 동다짐 효과가 LNG 저장탱크에 미치는 영향은 매우 작았음
- 또한 그림 8과 같은 결합/비결합 말뚝지지 전면기초로 지지된 LNG 저장탱크의 구조물에 대한 지진응답을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었음.
 - ① 결합/비결합 말뚝지지 전면기초의 구조물 지진응답 차이는 5% 이내로 매우 작았음.
 - ② 비결합 말뚝지지 전면기초 사용 시 결합 말뚝지지 전면기초를 사용한 경우보다 말뚝 머리의 굽힘모멘트가 작아 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단됨

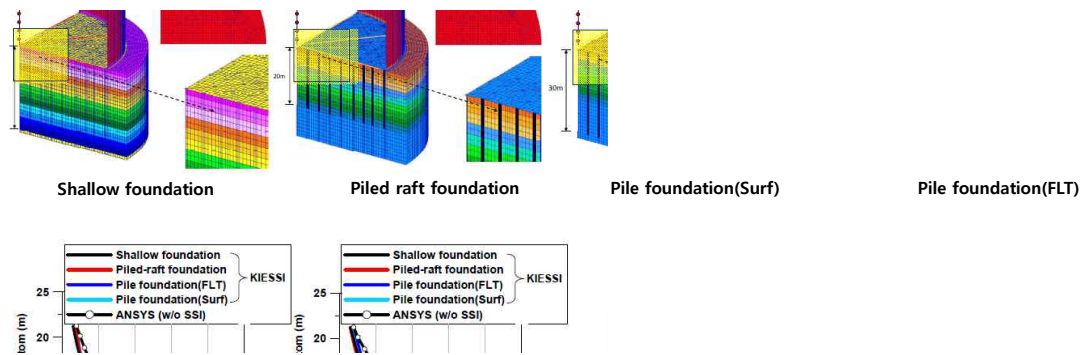
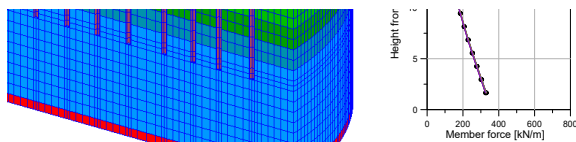


그림 136 KIESSI-3D를 이용한 기초 형식에 따른 LNG 저장탱크의 지진응답 비교
(고정기초결과는 ANSYS 프로그램을 이용하여 수행한 결과)

결합/ 비결합 말뚝지지 전면기초의 말뚝 힘모멘트 비교



결합/ 비결합 말뚝지지 전면기초의 외조 쉘 응력 비교

그림 137 결합/비결합 말뚝지지 전면기초 LNG 저장탱크의 지진응답 비교

○ 3차원 FSSI 해석모델 구축

- 해석 프로그램: 국토교통부 과제(과제번호: 14CTAP-C077514-01)를 통해 개발된 CNU/KIESSI-3D 프로그램 사용
- 상부구조 모델링
 - 외조탱크: 전단변형을 고려한 보 요소 또는 쉘 요소 사용

- 내조탱크: 전단변형을 고려한 보 요소 사용
 - 유체: 부가질량함수를 이용한 질량을 산정하여 내조탱크 보 요소에 적용
 - 면진장치: 스프링 요소 사용
- 기초 및 지반 모델링:
- 기초: 기초 형식(직접기초, 말뚝기초)에 따라 입체 요소 및 쉘 요소 사용
 - 지반: Near field – 입체 요소, Far field – 무한 요소 사용

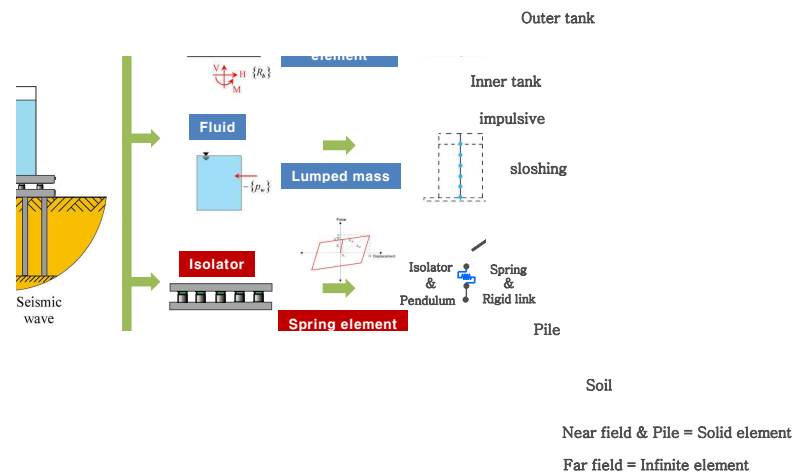


그림 138. 면진 LNG 저장탱크의 지진해석모델 작성방법

(다) 특수하중을 고려한 외조 구조해석 모델 개발

○ 충돌 실험검증해석

– SCP 충돌실험검증해석

- 20%감소단면에 대한 충돌실험 및 이의 검증해석(충돌체중량 50kg, 설계속도50m/s)
- 실험체의 비연속성 및 비선형 조건 고려 해석모델작성

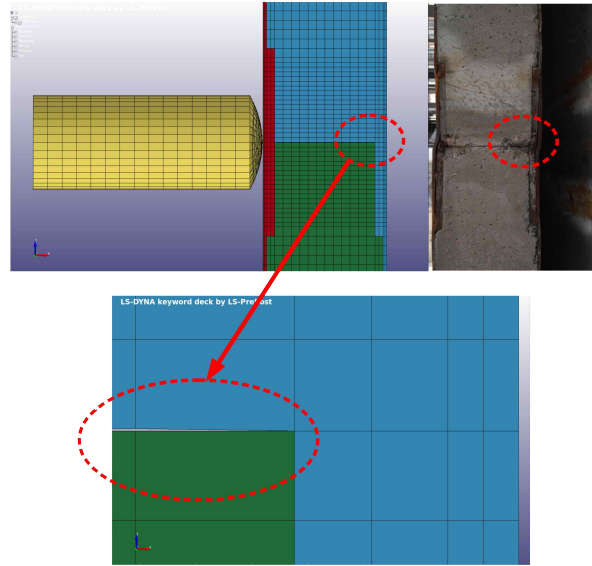


그림 139. 내부불연속을 가진 연결부 충돌해석

충돌해석결과분석

- 설계충돌하중시 관통 미발생
- 해석모델에서 충돌부 후방의 변위를 보수적으로 평가
- 충돌속도를 증가시킨 하중경우에 대한 해석에서도 관통은 발생하지 않음.

해석 조건(콘크리트 강도)에 따른 전/후면 강판변위와 실험결과 비교

	Imp. Speed (m/s)	Front dent (mm)	Rear bump (mm)	Diff. Disp. (mm)	f_{ck} (MPa)
Test#1	53.6	21.0	8.1	12.9	48**
Test#2	55.7	20.9	7.3	13.6	
A#1*	53.6	23.4	17.5	5.9	38
A#2	55.7	19.9	11.3	8.6	
A#1	53.6	21.9	16.1	5.8	48
A#2	55.7	18.5	10.3	8.2	
A#1	53.6	19.7	15.5	4.2	58
A#2	55.7	15.5	9.5	6.0	

* "A" means analysis, number means the corresponding test.

** Value from uniaxial compressive test



그림 141. 충돌전면부의 변위 비교

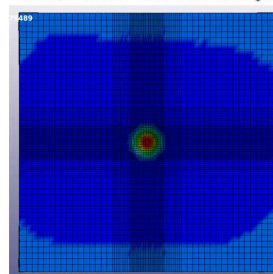
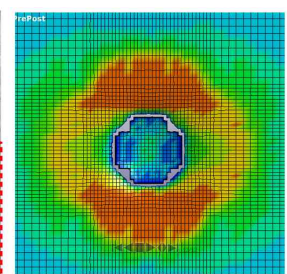
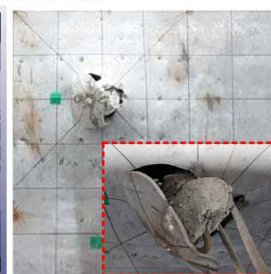


그림 142. 속도를 증가시킨 충돌해석 강판의 파괴형상



SCP 3차원 실구조물 충돌해석

- 개발된 해석방법론에 따라 실구조물의 단면에 설계충돌모델링 및 해석.

- 지붕부와 벽체에 대한 충돌해석수행.
- 구조체에 변형(벽체배면 8mm, 지붕배면12mm)을 남기고 반동.

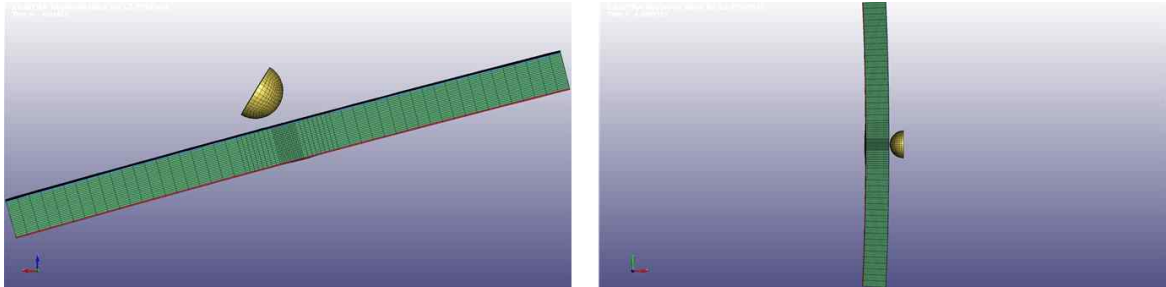


그림 143. 실구조물에 충돌 후 변형 및 충돌체의 반동

○ 외조 부재 형상 불완전성 구조영향 평가

- 배부름 형상 불완전 ISCP (Imperfect Steel Concrete Panel) 모델 수립
 - Plate-Stud 완전고정
 - 형상변화에 따른 프리스트레스 고려
 - Stud - 채움콘크리트(타설콘크리트 void 고려안함)
 - 콘크리트 부착력 고려

Contact Property : Tangential Behavior

Fraction Formulation : Penalty (Isotropic)

Fraction Coefficient : 0.1

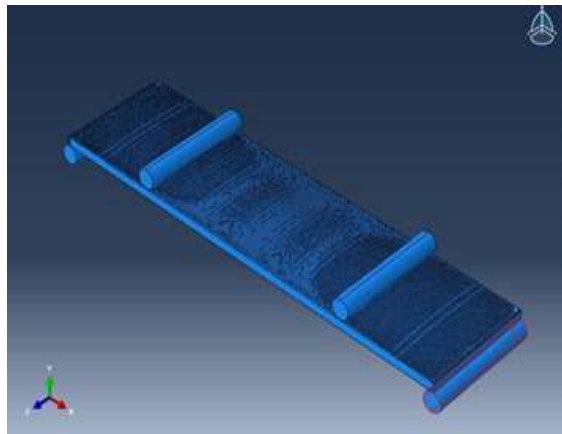


그림 144. ISCP 모델 형상

- ISCP 부재의 강도 산정 해석
 - 단위 모델에 대한 강도 산정 해석 조건을 수립하였으며, 이를 바탕으로 전체 구조계의 하중 전달을 고려하여 ISCP에 가해지는 국부 응력을 평가
- SCP 적치 과정에서 연결 어긋남 영향 기준 정의 및 모델 적용 방안 수립
 - SCP 연결부는 콘크리트 불연속부를 포함하므로 강재가 모든 하중을 부담해야 함
 - 이 때 강재의 연결은 맞대기 용접(butt weld)으로 작업하는데,
DNVGL-OS-C401에서는 계산 및 시험 값을 바탕으로 맞대기 용접 치수 오차 제한값을 최대 두께의 15%로 명시하고 있음

- 연결 어긋남을 유한요소 모델에 반영하면 해석 효율이 현저히 감소함
- 이에 따라 어긋남 정도는 이음부 강판의 유효 두께를 고려하여 모델에 반영함

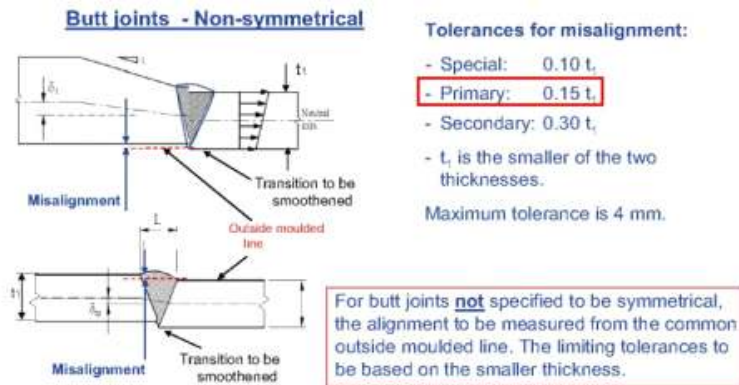


그림 145. 맞대기 용접의 치수 오차 제한

- 지반의 부등침하로 인한 외조 거동 예측
 - ACI376-11 코드 기반의 침하 기준 적용
 - Uniform (planar) tilting: 1/500
 - Dishing settlement: 1/300
 - Perimeter settlement: 1/500
 - 부등침하 특성 유한요소 해석 모델 반영
 - Uniform tilt: 해석 모델의 자중을 Z축 기준 1/500 비율로 수정
 - Dishing settlement: 바닥 슬래브의 H-beam에 Z 방향으로 경사 적용

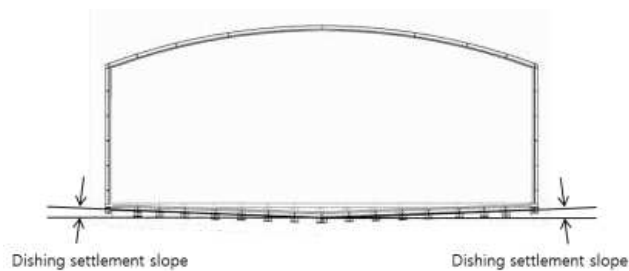


그림 146. Dishing settlement 개념도

- Perimeter settlement: 인접 파일 지지점과 대비해 국부적인 침하가 발생하도록 4가지 조건을 고려

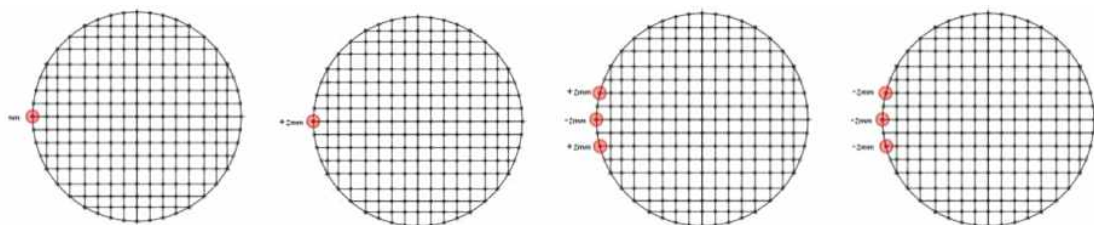


그림 147. Perimeter settlement 적용 조건

- 구조거동 평가 기반 부등침하 한계량 산정
 - Uniform (planar) tiling: 1/500
 - Dishing settlement: 1/600
 - Perimeter settlement: 인접 말뚝 평균높이와 $\pm 3\text{mm}$ 차이

○ 온도 시나리오별 외조 구조 안전성 평가

- 열전달 해석을 위한 기본 해석 모델 구축
 - SCP 구성 요소 간 열전달 특성을 바탕으로 한 구성방정식, 지배방정식 및 경계조건 정의
 - 콘크리트 및 강판, 단열재 재료모델 결정
 - : Density, Conductivity, Specific heat, Thermal Diffusivity 등

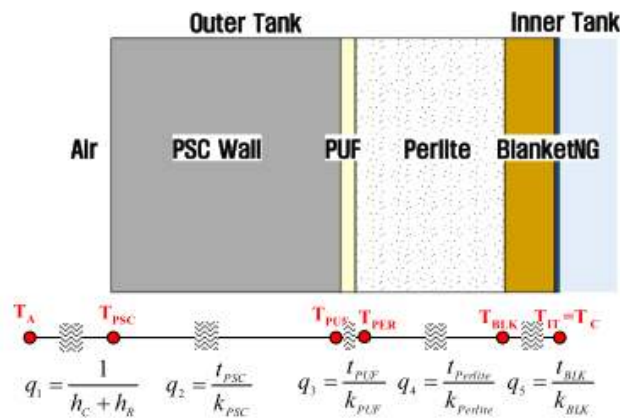


그림 148. 열평형 모델

- 계절 별 온도변화에 따른 LNG 탱크의 정상상태 해석
 - Alaska anchorage를 대상 지역으로 선정하고, 정상 운영 조건에서 해당 지역 일 최고/최저 온도 데이터를 기반으로 여름철/겨울철 외기 온도를 각각 29.4°C , -37°C 로 설정
 - 비정상 운영조건(LNG 누출)에서는 일 최고/최저 온도를 적용할 경우 과다설계 우려가 있으므로, 연 평균 온도인 2.3°C 를 적용

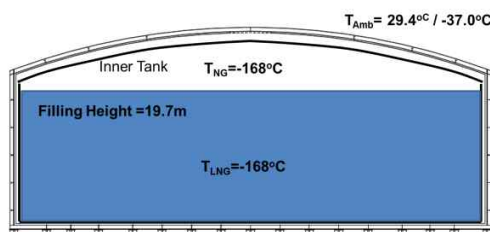


그림 149. 정상 운영 조건

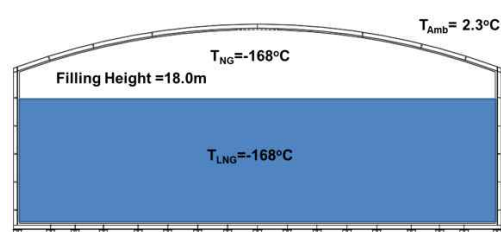


그림 150. 비정상 운영 조건

- 해당 조건에서 강재의 온도를 확인하였고, 외조에 S460 강재를 사용할 경우 취성 파괴로부터 안전함을 확인
- 최고/최저 온도를 적용한 정상 운영조건, 연 평균 온도를 적용한 비정상 운영 조건 하에서 구조적으로 안전함을 확인

(2) 연구 개발 성과

(가) 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	폭발하중을 받는 콘크리트 보의 요소의존성 최소화 인장기준식 (ATensileCriterion to Minimize FEMesh-Dependency in Concrete Beam under Blast Loading)	한국전산구조공학회논문집 (Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea)	곽효경	30 (2)	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2017. 04	pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
2	isogeometric analysis of free vibration of functionally graded plates considering material randomness	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	Ta Duy Hien	318	스위스	Elsevier	SCI	2017. 05	ISSN 0045-7825
3	몬테카를로 해석 기반 확률적 위상최적화 (Topology Optimization based on Monte Carlo Analysis)	한국전산구조공학회논문집 (Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea)	김대영	30 (2)	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2017. 04	pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
4	Analytical method to investigate nonlinear dynamic responses of sandwich plates with FGM faces resting on elastic foundation considering blast loads	Composite Structures	Behzad Mohammadzadeh	Vol. 174	스위스	Elsevier	SCI	2017.8	ISSN 0263-8223
5	Depth-dependent Evaluation of Residual Material Properties of Fire-damaged Concrete	Computers and Concrete	김규진	20 (4)	대한민국	Techno Press	SCI	2017. 10	ISSN 1598-8198
6	국부좌굴 현상을 고려한 강판 콘크리트 패널의 효율적인 스티드 배치 간격 설정	한국전산구조공학회 논문집	김정래	30 (6)	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2017. 12	ISSN 1229-3059
7	LNG외조를 구성하는 샌드위치 콘크리트 패널의 충돌거동해석	한국전산구조공학회 논문집	이계희	30 (6)	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2017. 12	ISSN 1229-3059
8	FE Analyses and Prediction of Bursting Forces in Post-Tensioned Anchorage Zone	Computers and Concrete	김정래	21 (1)	대한민국	Techno Press	SCI(E)	2018. 01	ISSN 1598-8198

9	FE analysis of circular CFT columns considering bond-slip effect: Evaluation of ultimate strength	Journal of Constructional Steel Research	황주영	Vol.145	네덜란드	Elsevier	SCI(E)	2018.2	ISSN 0143-974X
10	중립면 대칭 기능경사재료 보의 자유진동 변화도	한국전산구조공학회 논문집	Nguyen Van Thuan	제31권 제3호	대한민국	전산구조공학회	비SCI	2018.6	ISSN 1229-3059
11	FE analysis of circular CFT columns considering bond-slip effect: A numerical formulation	Mechanical Sciences	황주영	Vol.9, Iss.2	독일	Copernicus GmbH	SCI(E)	2018.7	ISSN 2191-916X
12	An Analytical and Numerical Investigation on the Dynamic Responses of Steel Plates Considering the Blast Loads	International Journal of steel structures	Behzad Mohammadzadeh	Vol.18	대한민국	KOREAN SOC STEEL CONSTRUCTION-KSSC	SCI(E)	2018.8	ISSN 1598-2351
13	Evaluation of post-fire residual resistance of RC columns considering non-mechanical deformations	Fire Safety Journal	황주영	Vol.100	네덜란드	Elsevier	SCI(E)	2018.9	ISSN 0379-7112
14	기초형식에 따른 LNG 저장탱크의 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진 응답 분석	한국전산구조공학회 논문집	손일민	32 (3)	대한민국	전산구조공학회	비SCI	2019. 06	ISSN 1229-3059
15	The variability of dynamic responses of beams resting on elastic foundation subjected to vehicle with random system parameters	Applied Mathematical Modelling	TaDuy Hien	67	미국	Elsevier	SCI(E)	2019. 03	ISSN 0307-904X
16	Bond-slip Effect in Steel-Concrete Composite Flexural Members: Part 2 - Improvement of shear stud spacing in SCP	Steel and Composite Structures	이원호	32 (4)	대한민국	Techno Press	SCI(E)	2019. 08	pISSN 1229-9367 eISSN 1598-6233
17	Design equation to evaluate bursting forces at the end zone of post-tensioned members	Computers and Concrete	김정래	-	대한민국	Techno Press	SCI(E)	게재 승인	ISSN 1598-8198
18	기초형식에 따른 LNG 저장탱크의 지반-구조물 상호작용을 고려한 수직 방향 지진응답 분석	한국전산구조공학회 논문집	손일민	-	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2019. 12 (게재승인)	ISSN 1229-3059
19	모듈형 LNG 외조를 구성하는 샌드위치 콘크리트 패널의 충돌실험 및 해석	한국전산구조공학회 논문집	이계희	-	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2019. 12 (게재승인)	ISSN 1229-3059

(나) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	ASEM17	이원호	2017.08.29	일산 KINTEX	대한민국
2	대한토목학회	노혁천	2017.10.20	부산 BEXCO	대한민국
3	대한토목학회	정무진	2017.10.19	부산 BEXCO	대한민국
4	4th International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2018)	이계희	2018.04.02	창원 컨벤션센터	대한민국
5	4th International Conference on Computational Design in Engineering (CODE2018)	노혁천	2018.04.02	창원 컨벤션센터	대한민국
6	2018 International Symposium on Engineering and Applied Science (ISEAS)	김정래	2018.08.09.	괌 하얏트 리젠시	미국
7	The 2018 World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research	김규진	2018.08.29.	인천 송도 컨벤시아	대한민국
8	The 2018 Structures Congress	이원호	2018.08.29.	인천 송도 컨벤시아	대한민국
9	31st KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	박강규	2018.11.22	일본 교토 대학교	일본
10	31st KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	심민석	2018.11.22	일본 교토 대학교	일본
11	한국전산구조공학회 정기학술대회	손일민	2019.04.04	부경대학교	대한민국
12	한국전산구조공학회 정기학술대회	임재성	2019.04.04	부경대학교	대한민국
13	한국전산구조공학회 정기학술대회	이계희	2019.04.04	부경대학교	대한민국
14	한국전산구조공학회 학술심포지엄	손일민	2019.11.22	목포 현대 호텔	대한민국

(다) 저작권 (소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기 여 율
1	EC8 코드를 이용한 유체 저장탱크 구조물의 지진해석 프로그램	2017.05.01	한국과학기술원	2018.03.06	C-2018-005915	한국과학기술원	100
2	콘크리트-강재 합성구조(보)의 부착-슬립 분포 해석 프로그램	2017.09.11	한국과학기술원	2018.03.06	C-2018-005916	한국과학기술원	100
3	충격하중을받는철근콘크리트 패널의동적해석프로그램	2018.04.10	한국과학기술원	2018.10.30	C-2018-029373	한국과학기술원	100
4	유한요소해석을 이용한 복합 평판구조 해석 프로그램	2018.09.28	한국과학기술원	2018.09.28	C-2018-029374	한국과학기술원	100

(라) 인력양성

번호	분류	기준연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	박사학위	2016	1				1		1				
2	석사학위	2017		2			1	1				2	
3	박사학위	2018	1				1			1			
4	박사학위	2019	3				3		1	2			
5	석사학위	2019		2			2			2			
6	학사학위	2019			2		2					2	

－ 기관별 인력양성 현황 및 연구수행 내용

기관	학위별 현황			연구 수행 내용
	박사	석사	학사	
한국과학기술원	3	2		- SCP 및 HPCP 외조 해석모델 개발, 휨/압축 성능시험 예측 및 분석 - 스터드 배치설계 개선 및 중량 절감을 통한 SCP 구조 최적화 - 정상/비정상 상태의 설계 하중에 대한 LNG 저장탱크 설계 검증
세종대학교	2			- SCP구조의 배부름 관련 영향 분석 및 허용 한계 제시 - 모듈러 저장탱크의 지반 부등침하 한계 기준 분석 및 허용 한계 제시
전남대학교		2		- SCP 적용 저장탱크 FSSI(유체-구조물-지반 상호작용) 해석모델 구축 - 기초 형식에 따른 지진 응답 비교 분석 - 설계 내진성능에 대한 모듈러 저장탱크 안전성 검토
목포해양대학교			2	- 충돌 성능시험 관련 예측 및 거동 분석 - 설계 충돌성능에 대한 SCP 외조의 안전성 검토(변위, 관통 여부 등)

라. 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 콘크리트 타설 및 제작 기술 개발

(1) 연구 내용

(가) 콘크리트 충전성 향상 방안 기본 설계

○ 타설압에 의한 구조물 변형최소화

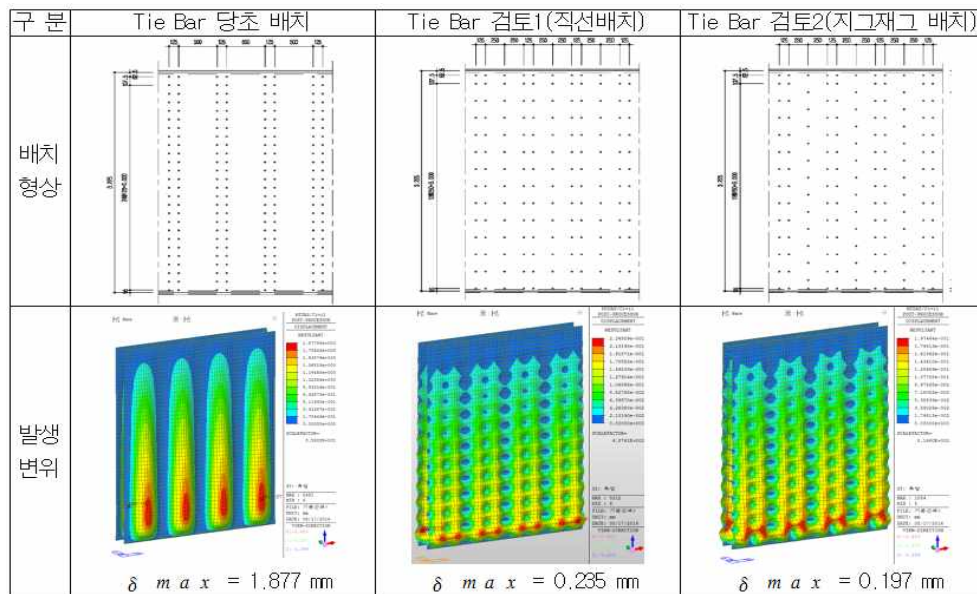


그림 151 Tie-bar 배치에 따른 변위 구조 해석

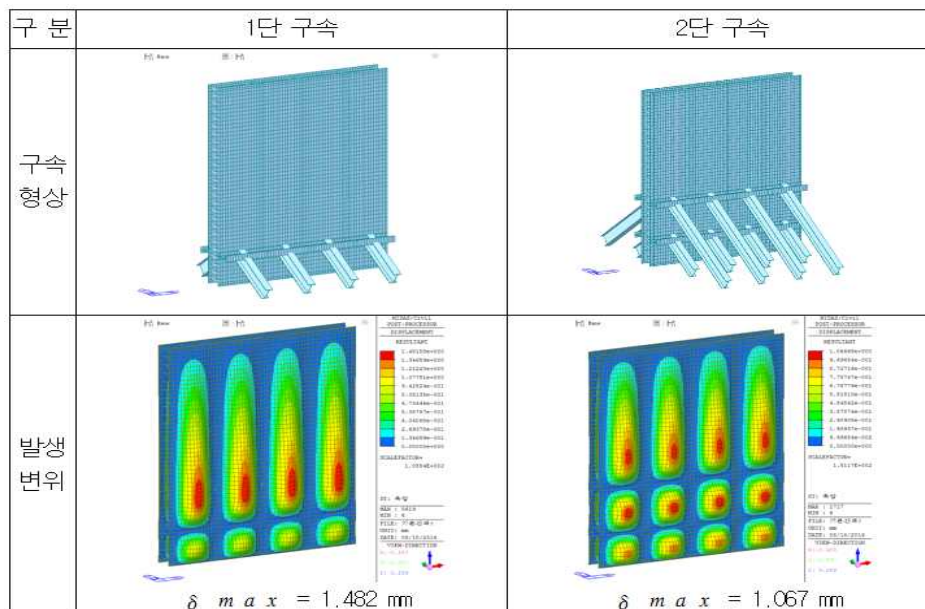


그림 152 외부 구속을 통한 강판 변위 구조 해석

- 검토 결과

- 타설측압에 대한 PANEL 변위제어는 외부구속보다 tie bar 최적배치가 효율적
- 타설측압에 대한 변형의 한계값에 대한 기준은 상세설계를 통하여 설정 예정

○ Air cap 최소화 방안 설정

- 두께대비 연장이 과대한 SCP의 경우 타설순서에 따른 공기배출이 원활하지 않음으로 air cap 발생

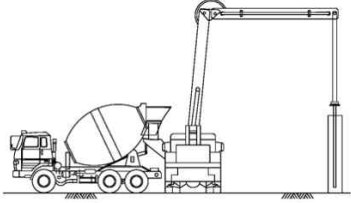
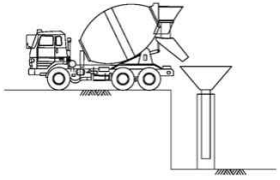
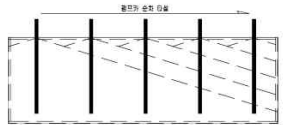
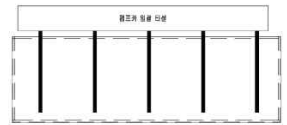
구 분	펌프카 순차 타설	레이콘 동시 타설
개요도		
정면도		
특 징	• 별도의 단차공간 확보 불필요 • 동시타설시 다수 펌프카 필요 • 호퍼 및 트레미관 제작시 펌프카 최소화 가능 • 호퍼 인양장치 추가 설치 필요 • 펌프카 용량을 초과하는 충전 불가능	• 단차공간 확보를 위한 부지 필요 • 레이콘차 동시 충전 가능 • 호퍼 및 트레미관 별도 제작 필요 • 호퍼 인양장치 추가 설치 필요 • 충전속도 향상 가능

그림 153 타설 방법 검토

○ 두께대비 연장이 과대한 콘크리트 외장구조물 사례 조사

- 제 원 : $H \times L \times t = 1.5m \times 6.0m \times 0.08m$
- 3D 비정형 외장재로 상향 자유낙하로 타설 수행
- $f_{ck} = 135MPa$ (유리섬유보강 몰탈)
- 특기사항
 - 거푸집 외벽에 진동바이브레이터 3개 설치
 - 골재가 없는 몰탈로 타설
 - 내부 공기배출이 불가능한 구조로 표면에 미세공극 발생

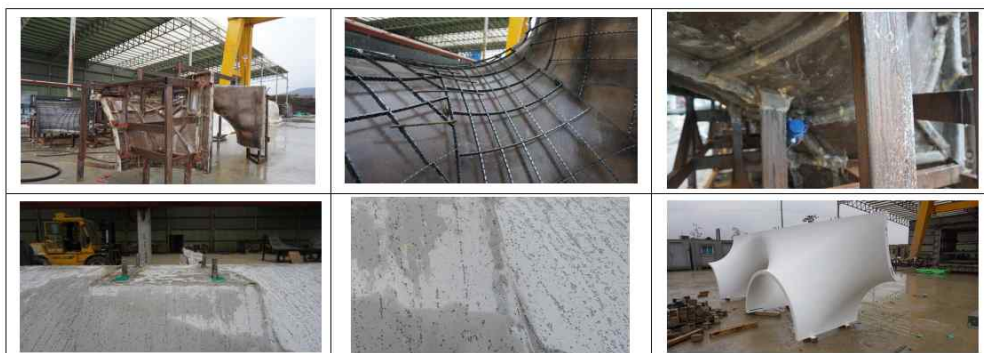


그림 154 얇은 구조의 콘크리트 타설 예

- 착안 사항
 - 외부 진동바이브레이터 적용성 검토 필요

- 복잡한 기하구조로 인한 공기배출이 원활하지 않아 표면공극(상면부에서 집중적으로 발생)이 발생한 것으로 판단됨. SCP 구조물의 L형 곡면부 충전시 공기배출을 위한 air hole은 반드시 필요할 것으로 판단됨

(나) SCP 모듈 콘크리트 충전 및 구조 시험체/open mock-up 제작

○ SCP 모듈 형상별 콘크리트 충전 타설

- SCP 시험체 제작분에 대하여 콘크리트 타설 작업 수행
- 휨시험체 15EA, 전단시험체 12EA, 압축시험체 24EA, 충돌시험체 6EA, 내화시험체 4EA, 채움시험체 1EA
- Open mock-up 제작



그림 155. SCP 시험체 제작

- 세장한 SCP 패널의 충전작업성 향상을 위한 충전전용 호퍼 제작 및 적용
- 투입입구 확장으로 콘크리트 충전효율 증대



그림 156. 전용 호퍼 형상 및 타설 적용

○ SCP 모듈 제작 중 형상 관리 방안 수립

- 교량 바닥판 형상관리에 적용 사례가 있는 3D 스캐너를 적용하여 콘크리트 타설 중 SCP의 형상 변화를 실시간으로 관리하는 기법 개발
- 오차범위 3mm/50m 수준으로 미소변형 측정 가능

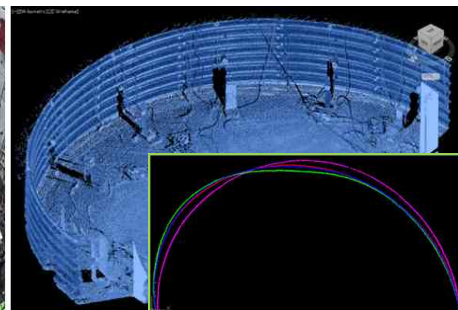
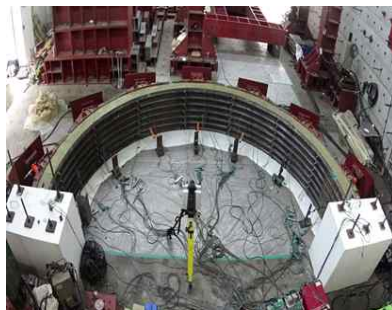


그림 157. 3D 스캐너 사용 변형 관리 적용 예

○ 콘크리트 타설 과정의 air cap 형성 분석

- 콘크리트 타설 내부를 관찰할 수 있는 SCP 충전성능 평가 FILL BOX를 제작
- FILL BOX 충전시험으로 충전콘크리트 충전성능 및 air cap 발생 유무 및 위치 확인



그림 158. fill box 형상 및 air cap 발생 유무 확인 시험

○ Air cap 형성 최소화 타설 방법 개발

- 대형 SCP 모듈에 콘크리트 타설시 관을 삽입하여 낙하 높이를 제어하는 시공 방법을 제안
- 또한 SCP 콘크리트 충전용 먼 다짐기를 적용
- 이는 스테드 이면 및 코너 부의 air cap 형성을 방지하는 효과가 있음

○ 콘크리트 타설 이후 SCP 이음부 용접 작업에 대한 콘크리트 품질 영향 검토

- 충전강관(CFT)의 용접이음부 콘크리트 손상사례 확인(용접두께 22mm)
- SCP 이음부의 경우 용접두께가 6mm로 입열량이 상대적으로 적어 후면의 콘크리트 열화 영향이 크지 않음



그림 159. 충전강관 용접부 후면 콘크리트 열화 사례

(다) HPCP 모듈 HPFRCC 타설 및 구조 시험체 제작

○ HPCP 모듈 형상별 HPFRCC 충전 타설 방안 수립

- HPFRCC 배합 시 팬타입의 전용믹서 또는 배처플랜트내의 트위샤프트 타입의 믹서 사용 여부 결정
- HPFRCC의 경우 고분말의 분체사용과 강섬유 사용으로 믹서의 선택이 중요함. 그러나 HPCP용 HPFRCC의 경우 100 MPa급을 대상으로 하므로 경제성을 고려할 때 트위샤프트 타입의 믹서 사용 가능할 것으로 판단됨

- 다만 SCP용 고유동 충전 콘크리트에 비해 유동성과 점성이 커지므로 타설 시 모듈내 air cap 방지를 위해 SCP 모듈 제작에 사용된 외부 바이브레이터 보다 성능이 우수한 고주파형 바이브레이터 사용 검토가 필요함
- 또한 효율적인 HPFRCC 타설을 위해 타설량을 조절할 수 있는 기능을 가진 호퍼제작 방안 검토 필요



(a) 고주파형 바이브레이터



(b) HPFRCC 타설용 호퍼

그림 160. HPCP 제작을 위한 장치 제작방안

○ HPCP 모듈 HPFRCC 구조시험체 제작을 위한 예비 실험

- HPCP 구조 및 내화성능 시험체 제작에 앞서 KICT와 공동으로 HPCP 모듈 시제품 제작 시 HPFRCC 배합 및 예비타설 실시
- HPCP 모듈은 SCP 구조시험체중 휨시험체의 1/2크기($2,500 \times 500 \times 200$ mm)로 제작되고 스퍼드 간격이 90mm로 되어있음
- HPCP 모듈내 HPFRCC 타설을 통해 보완 대책 마련

○ HPCP 모듈 시험체중 접합방법에 따른 시험체 제작방법(안) 도출

- HPCP 접합부 모듈은 3가지 방법으로 용접을 할 예정
- 아래 그림과 같이 접합부 용접절차 방법을 고안하여 HPCP 접합방법에 따른 구조시험체 모듈제작에 활용

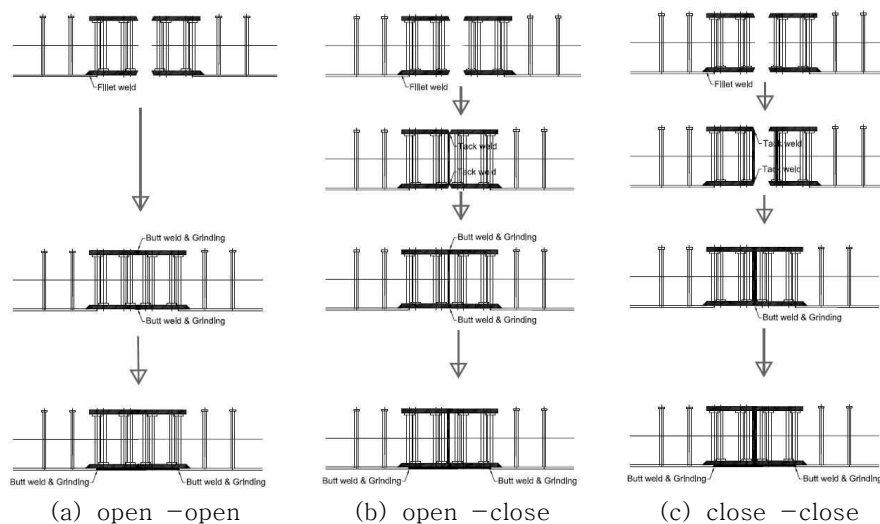


그림 161. HPCP 접합방식에 따른 구조시험체 모듈제작 방안

○ SCP 및 HPCP 모듈 시작품 제작

- 상기 연구결과를 바탕으로 성능시험을 위한 SCP 모듈 및 HPCP 모듈 구조부재 시작품을 제작하였으며, 구조실험을 통해 품질 상태 검증결과 양호함을 확인
- 기존 습식 LNG 저장탱크의 제작과 달리 모듈화를 통한 제작 운송 및 시공으로 자재운반 및 공급이 원활하며 공사기간 단축과 건설비용 절감 등의 장점을 보유
- 강재와 콘크리트를 합성한 구조부재는 구조적으로 얇은 단면으로 인한 강재의 국부좌굴과 휨방향 비틀림 좌굴을 콘크리트가 구속해주기 때문에 효율적인 단면 구성이 가능하고 강재로 인한 콘크리트 구속효과로 높은 강성을 발현함



그림 162. SCP 모듈 구조부재 시작품



그림 163. HPCP 모듈 구조부재 시작품

○ SCP 및 HPCP 모듈 open mock-up (현장 적용)

- SCP 및 HPCP 모듈은 강판과 콘크리트의 합성 구조로 되어 있으며, 일체 거동을 위해 스티드가 좁은 간격으로 배치되어 있음
- skin plate 내부에 설치된 스티드는 콘크리트 및 HPFRCC 충전 시 재료분리 또는 공극을 발생시킬 수 있기에 open mock-up을 통해 내부 충전재료의 충전성능을 평가하고, 제작된 단위모듈의 접합부 연결상태를 확인함
- SCP 모듈의 경우 양면에 부착된 skin plate 중 1면을 제거하여 충전 성능을 확인하였으며, HPCP 모듈은 거푸집을 제거하여 표면 충전 상태를 확인한 결과 충전성능이 양호한 것을 확인



그림 164. SCP 모듈 open mock-up



그림 165. HPCP 모듈 open mock-up

(2) 연구 개발 성과

(가) 시작품

분 류	용 도	제 원(L x H x t) m	수 량	비 고
SCP	화재시험	5.00 x 0.54 x 0.20	4	35MPa급 고유동 콘크리트 적용
	충돌시험	5.00 x 2.00 x 0.20	6	
	압축시험	1.10 x 0.27 x 0.20	12	
	콘크리트 채움 시험	3.30 x 1.25 x 0.20	1	
HPCP	휨 시 험	5.00 x 1.00 x 0.20	4	100MPa 급 HPFRCC 적용
	압축시험	1.10 x 0.27 x 0.20	2	

(나) 현장 적용

분 류	용 도	제 원(L x H x D x t) m	수 량	비 고
SCP	Open mock-up	1.8 x 1.8 x 2 x 0.2	1	35MPa급 고유동 콘크리트 적용
HPCP	Open mock-up	1.8 x 1.8 x 2 x 0.2	1	100MPa급 HPFRCC 적용

(다) 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호*
2018	SCP 실험체 레이저 스캔 보고서	2018.05.17	

마. 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조 콘크리트 특수 혼화제 개발

(1) 연구 내용

(가) 고성능 특수 혼화제 성능 목표 수립

○ 콘크리트 배합 실험 수행 개요

- 목적: 일반 레미콘 배합을 LNG 저장탱크용 고유동 콘크리트 배합으로 변경
- 평가 항목
 - 유동성: 슬럼프 및 슬럼프 플로 (mm)
 - 재료분리 (육안관찰)
 - 압축강도 (MPa)

○ SCP 충전 콘크리트의 목표 강도와 동일한 수준의 레미콘 배합을 1차 선정 한 후 배합비 변경에 따른 유동성 평가

- 레미콘 배합 (배합 1)의 잔골재율을 고정한 후 SCP 충전 콘크리트에서 요구하는 고유동 자기충전 콘크리트의 물성으로 변경 시 목표 유동성 확보가 어려운 것으로 판단됨.
- 이에 따라 굵은골재 최대치수를 13mm로 변경하고 잔골재율을 변경한 3번 배합의 경우 목표 유동성은 확보하였으나, 재료 분리가 발생함.
- 모든 배합의 압축강도는 목표 강도 이상으로 추가 개선이 필요하지 않을 것으로 판단되며, 배합 3을 기준으로 추가 실험을 수행함.

배합사항	배합 1 (레미콘 배합)	SCP 충전 배합 변경	
		배합 2	배합 3
배합 강도(MPa)	45	45	45
W/B(%)	38.4	38.4	38.4
결합재(%)	FA 10 %	FA 10 %	FA 10 %
분체량(kg/m ³)	430	430	430
S/a(%)	46	46	51
혼화제 사용량(%)	0.9	1.6	1.7
굵은골재 최대치수(mm)	25	13	13
목표 유동성(mm)	180±25(슬럼프)	600±100 이상(슬럼프플로)	

그림 166 배합 변경 사항

구분	유동성 (mm)	재료분리 발생여부	압축강도(MPa)		
			1일	7일	28일
배합 1	170	-	22.3	44.6	54.1
배합 2	520	-	21.2	42.5	54.8
배합 3	600	유	20.8	45.8	53.3

그림 167 배합별 성능시험 결과

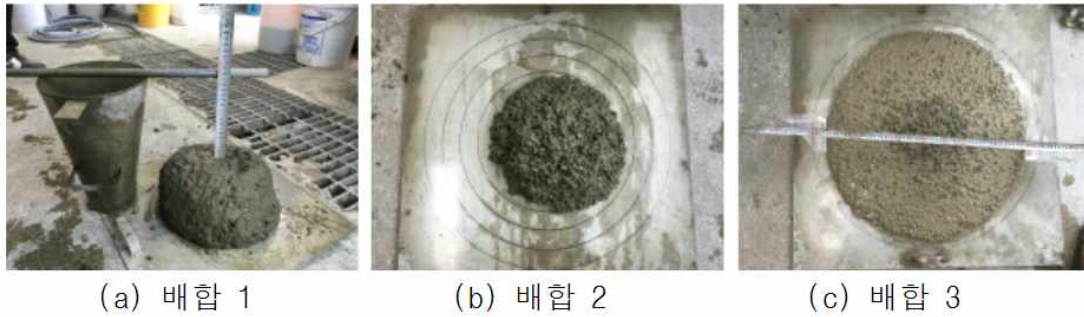


그림 168 배합별 유동성 시험 결과

(나) 고성능 특수 혼화제 원료 선정 및 성능 평가

○ 콘크리트 배합 실험 수행 개요

－ 목적

- SCP 충전 콘크리트의 품질 확보를 위한 혼화제 타입별 성능 검토
- 굳지 않은 콘크리트 품질 확보를 위한 첨가제 타입별 성능 검토

- － 자사 혼화제 타입 중 대표 혼화제 타입을 선별하여 SCP 충전 콘크리트 배합 적용
- － 분리 성능 확인: 혼화제 원료와 첨가제 원료를 각각 동일한 비율의 수용액으로 만든 후 혼화제 수용액과 첨가제 수용액을 혼합하여 7일간 정치 시켜 혼합(분리) 성능을 확인

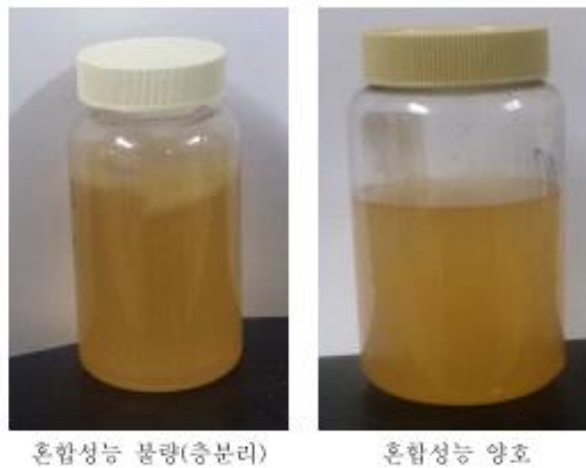


그림 169 혼화제 및 첨가제의 혼합성능 검토 방법

배합 구분	W/B (%)	S/a (%)	배합표 (Kg/m ³)							AD (%/B)	비고
			B	ψ	c	FA	S	CS	G13		
샘플 A	38.4	51	430	165	387	43	434	429	844	1.7	
샘플 B										1.5	
샘플 C										1.6	

그림 170 샘플별 배합 사항

○ 유동성 및 재료분리 성능 검토 후 적정 타입의 혼화제 선정

- 샘플 A는 목표 유동성 600mm를 확보하였으나 약간의 재료분리가 발생하였고, 샘플 B는 분산력 부족으로 목표 유동성에 미달하였으며, 샘플 C는 재료분리 없이 목표 유동성 이상을 확보하였으나 유동성 향상을 위해 혼화제를 추가 투입한 결과 재료분리가 발생하였음.
- 샘플 C 투입량 조절을 통해 목표 유동성을 확보하는 것이 가장 용이할 것으로 판단됨에 따라 샘플 C를 Plain으로 하여 추가 시험을 수행하였음.

구분	혼화제사용량 (%/B)	유동성 (mm)	재 료분리 발생여부	압축강도 (MPa)		
				1일	7일	28일
샘플 A	1.7	600	유	20.8	45.8	53.3
샘플 B	1.5	550	-	19.8	44.2	51.4
샘플 C	1.6	610	-	18.4	42.7	51.1

그림 171 샘플별 실험 결과

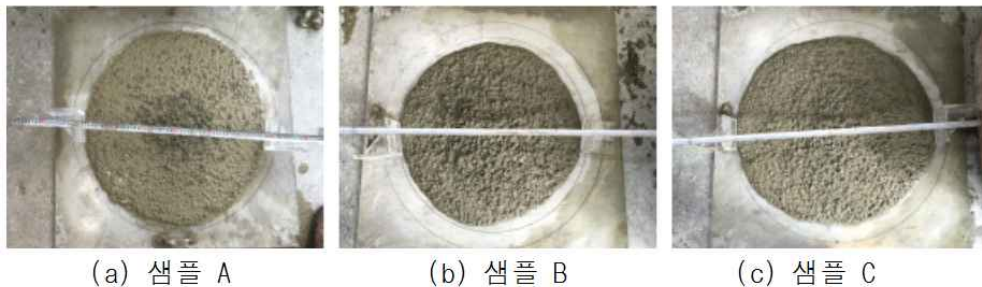


그림 172 혼화제 샘플 종류별 유동성 실험 결과

○ 유동성 향상 및 재료분리 저항성 확보를 위한 첨가제 검토

- 사전 실험을 통해 첨가제 샘플 37 종류와 선정된 혼화제 원료 C와 혼합성능을 검토하였음. 첨가제 수용액을 혼합하여 7일간 정치 시켜 혼합(분리) 성능을 확인함. 그 결과 총 37개의 첨가제 샘플 중 혼화제와 혼합이 가능한 샘플은 4가지(A, B, C, D)로 나타남.
- 사전 실험과 동일한 배합에 첨가제 원료를 적용하여 성능 검토를 실시한 결과, 첨가제 A 투입시 우수한 재료분리 저항성을 보였음.

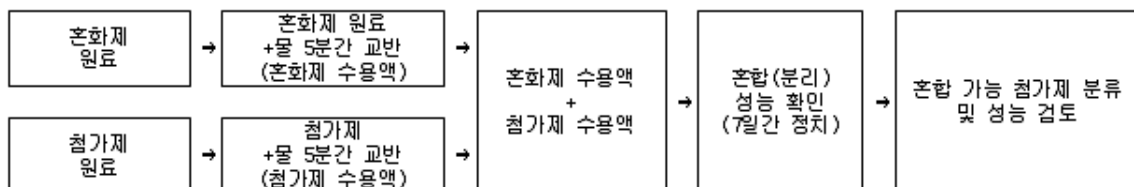


그림 173 첨가제 원료 성능검토 시험절차

구분	혼화제사용량 (%/B)	유동성 (mm)	재료분리 발생여부
Plain	1.6	620	유
첨가제 A	1.7	630	-
첨가제 B	1.6	640	유
첨가제 C	1.6	645	유
첨가제 D	1.5	645	유

그림 174 첨가제 성능검토 시험 결과

(다) 고유동 충전 콘크리트 특수 혼화제 제품화

○ 고유동 충전 콘크리트 특수혼화제 원료성능 별 최적 조합 도출

－ 목적

- 시작품의 추가적인 유동성능 개선을 위한 첨가제 선정
- 고유동 충전 콘크리트의 최적배합을 위한 결합제 및 단위수량에 따른 혼화제 성능 및 재현성 검토

－ 실험 계획

- 실험에 앞서 첨가제 샘플 45종류를 수급하여 사전 실험을 통하여 선정된 혼화제 원료 A와 혼합성능을 검토
- 혼화제 원료와 첨가제의 혼합성능 검토 절차는 혼화제 원료와 첨가제 원료를 각각 동일한 비율의 수용액으로 만든 후 혼화제 수용액과 첨가제 수용액을 혼합하여 7일간 정치시켜 혼합(분리) 성능 확인
- 총 45개의 첨가제 샘플 중 혼화제와 혼합이 가능한 샘플은 4가지(첨가제 A, B, C, D)로 사전 실험 배합과 동일한 배합에 첨가제 원료를 적용하여 성능 검토 실시
- 평가 항목으로는 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 플로 및 재료분리 성능을 평가함

－ 평가 항목

- 유동성: 슬럼프 플로
- 재료분리: 육안 관찰

표 36. 실험 계획

구분	배합사항
배합 강도(MPa)	50
W/B(%)	41.3
분체량(kg/m³)	400
S/a(%)	51
목표 유동성(mm)	600±100 이상
첨가제 원료	A, B, C, D

－ 시험 결과

- 첨가제 종류 변화에 따른 유동성은 모든 배합에서 600 mm 이상의 유동성을

확보하였으나, 첨가제 A을 제외한 모든 배합에서 재료분리가 발생하여 첨가제 B, C, D 3종류의 경우 재료분리 방지에 큰 효과가 없는 것으로 사료되며, 첨가제 샘플 A의 경우 재료분리가 없는 범위에서 목표 유동성을 확보하는데 효과적인 것으로 나타남

- 추가로 첨가제 조합에 따른 유동성은 모든 배합에서 600 mm 이상의 유동성을 확보하였으나, 다른 첨가제 조합에 비하여 첨가제 A을 단독으로 사용하였을 경우 650 mm에 가까운 유동성을 확보하였고 유동성 확보에 효과적인 것으로 나타남
- 따라서, 본 연구 범위에서는 혼화제 원료 A와 첨가제 샘플 A을 조합 사용한 혼화제가 SCP 충전 콘크리트용 혼화제의 시제품으로 적절할 것으로 사료됨

표 37. 실험 결과

구분	실험 변수	혼화제 사용량 (%/B)	유동성 (mm)	재료분리 발생여부
Plain	기준 배합	1.6	620	유
Sample A	첨가제 원료 A	1.7	645	-
Sample B	첨가제 원료 B	1.6	610	유
Sample C	첨가제 원료 C	1.6	650	유
Sample D	첨가제 원료 D	1.5	650	유
Sample E	첨가제 원료 A	1.4	645	-
Sample F	첨가제 원료 A+B	1.5	590	-
Sample G	첨가제 원료 A+C	1.4	620	-
Sample H	첨가제 원료 A+D	1.6	630	-

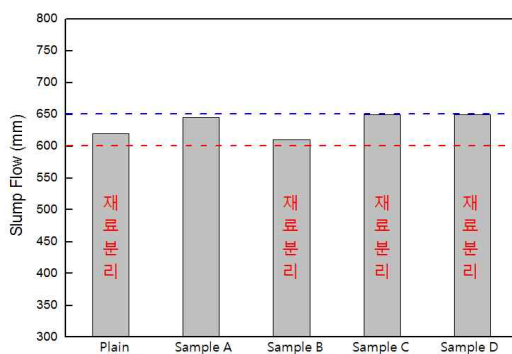


그림 175. 첨가제 종류별 유동성 실험결과

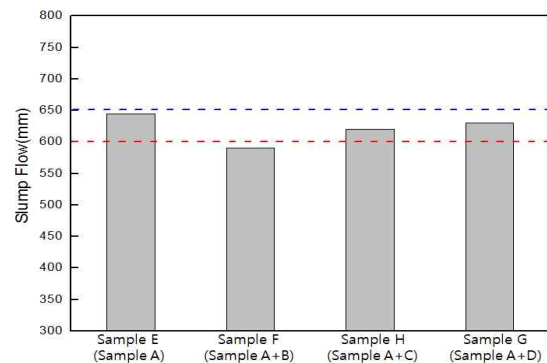


그림 176. 첨가제 조합별 유동성 실험결과

○ 고유동 충전 콘크리트 혼화제 제품 성능 검증 및 재현성 확인

- 목적

- 목표 배합강도(50 MP)를 기준으로 결합재와 단위수량 변화 따른 SCP 충전 콘크리트의 물성을 파악
- 고유동 충전 콘크리트의 최적배합을 위한 결합재 및 단위수량에 따른 혼화제 성능 및 재현성 검토

- 평가 항목

- 유동성: 슬럼프 플로 (mm)

- 재료분리: 육안 관찰
- 압축강도 (MPa)
- 시험 결과
 - 결합재별 유동성 실험의 모든 배합에서 600 mm 이상의 유동성을 확보하였으나, 일반 혼화제를 사용한 배합에서 재료분리가 발생함
 - SCP 충전 콘크리트용 혼화제를 사용한 배합에서는 BS 20% 치환한 배합의 유동성이 630 mm로 다른 배합보다 양호한 유동성을 확보함
 - 단위수량별 유동성 실험의 모든 배합에 결합재별 유동성 평가실험에서 양호하였던 BS 20% 치환 배합을 적용하였을 경우 600 mm 이상의 유동성을 확보하였으나, 분체량 400 kg/m³에서 단위수량이 증가함에 따라 유동성이 증가되는 경향이 나타남
 - 분체량 380 kg/m³에서 단위수량 175 kg/m³을 적용한 배합의 경우 610 mm 유동성을 확보함
 - 단위수량별 재령 경과에 따른 압축강도에서 분체량 400 kg/m³을 적용한 모든 배합이 50 MPa 이상 발현되었으나, 분체량 380 kg/m³에서 단위수량 175 kg/m³을 적용한 배합의 경우 목표 배합강도와 유사하게 강도 발현되어 중소형 LNG 저장탱크에서 사용할 고유동 충전 콘크리트용 혼화제로써의 가능성을 확인함
 - Mock-up 부재 제작 시 고유동 충전 콘크리트용 혼화제 적용을 통해 재료분리가 없는 범위에서 목표 유동성을 확보함으로써 고유동 충전 콘크리트용 혼화제 제품 성능 검증 및 재현성 확인함

표 38. 배합 사항

구분	배합사항
배합 강도(MPa)	50
결합재(%)	BS 20, FA 10%, OPC:BS:FA(7:2:1)
분체량(kg/m ³)	380, 400
단위수량(kg/m ³)	165, 170, 175, 180
S/a(%)	51
목표유동성(mm)	600±100 이상

표 39. 실험 결과

결합제 (%)	구분		혼화제 사용량 (%/B)	유동성 (mm)	재료 분리 발생 여부	압축강도 (MPa)			
	분체량 (kg/m³)	단위수량 (kg/m³)				1일	3일	7일	28일
BS 20	400	165	1.7	610	유	7.9	25.8	37.9	53.2
BS 20			1.8	630	—	7.1	32.7	43.8	60.5
FA 10			2.1	610	—	8.2	30.2	46.0	64.0
OPC:BS:FA (7:2:1)			1.9	610	—	8.3	35.5	41.6	69.9
BS 20	400	165	1.4	600	—	7.8	28.9	45.5	59.1
		170	1.1	610	—	7.9	27.8	42.6	57.4
		175	1.1	630	—	7.7	27.2	41.7	58.0
		180	1.7	650	—	7.5	27.0	44.5	53.0
	380	175	1.1	610	—	6.9	25.7	40.4	51.8

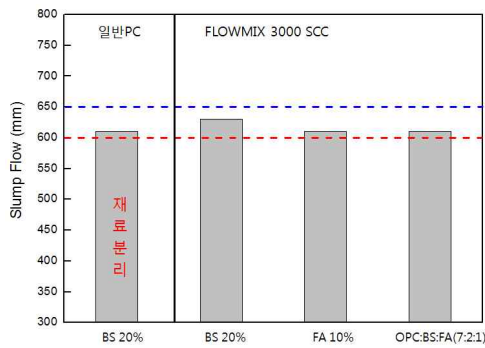


그림 177. 결합제 종류별 유동성 실험결과

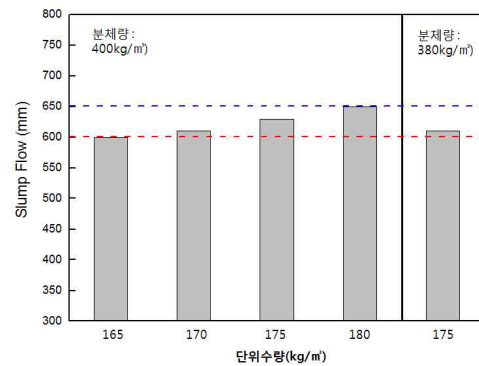


그림 178. 단위수량별 유동성 실험결과

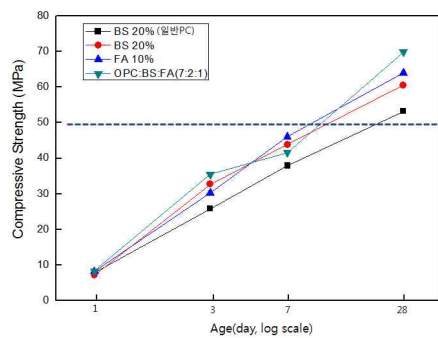


그림 179. 결합제 종류별 재령 경과에 따른 압축강도

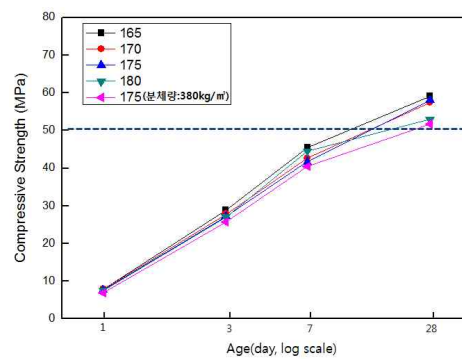


그림 180. 단위수량별 재령 경과에 따른 압축강도

(라) HPFRCC용 특수 혼화제 제품화

○ HPFRCC 특수 혼화제 원료 성능 별 최적 조합 도출

－ 목적

· 혼화제 원료 별 성능 평가를 실시하여 HPFRCC용 특수 혼화제의 적정 원료 선정

－ 실험 계획

· 기존 자사의 주력 혼화제 원료 3타입에 대하여 모르타르의 유동성, 풀림시간 및

압축강도를 검토하여 개발하고자 하는 HPFRCC용 혼화제의 성능 범위를 선정

표 40. 실험 계획

구분	배합사항
배합강도 (MPa)	100 이상
W/B (%)	20
분체량 (kg/m ³)	1200
목표 유동성 (mm)	200 이상
혼화제 사용량 (%/B)	0.75
혼화제 원료	A, B, C

－ 평가 항목

- 유동성 : 미니 플로
- 풀림시간
- 압축강도

표 41. 배합사항

Type	W/B (%)	Unit Weight (kg/m ³)				AD (%/B)
		B	C	Zr	S	
Sample A	20	1200	1080	120	965	0.75
Sample B						0.75
Sample C						0.75

－ 시험결과

- 모든 배합에서 200 mm 이상의 유동성을 확보하고자 하였으나, 혼화제 C의 경우 183 mm로 다른 배합에 비하여 다소 낮은 유동성을 나타냄
- 모든 배합에서 풀림시간은 150 초를 확보함
- 모든 배합에서 재령 28일 압축강도는 100 MPa이상 발현되었으나, 혼화제 A의 경우 135 MPa로 혼화제 B, C에 비하여 높은 압축강도 발현 확인함
- 따라서, 본 연구 범위에서는 혼화제 원료 A를 HPFRCC용 혼화제의 시작품으로 적절할 것으로 사료되며, 추후 유동성 및 강도를 더욱 향상시키기 위한 방안 등 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단됨

표 42. 실험결과

Type	풀림시간	Mini Flow (mm)	압축강도 (MPa)		
			3일	7일	28일
Sample A	150	207	120	124.9	135
Sample B		201	112	113.7	120.1
Sample C		183	107	109.2	115.6

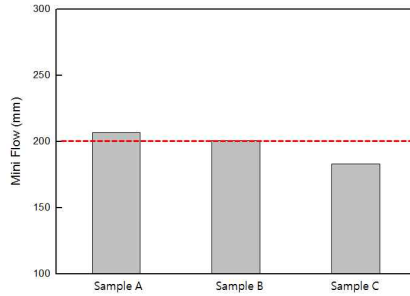


그림 181. 혼화제별 유동성 실험결과

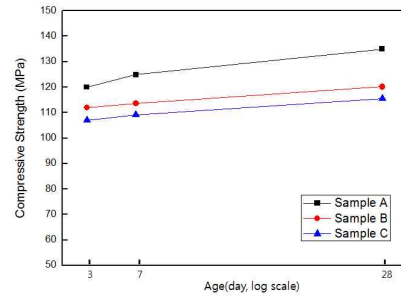


그림 182. 혼화제별 재령 경과에 따른 압축강도

○ HPFRCC 특수 혼화제 제품 성능 검증 및 재현성 확인

－ 목적

- 결합재 종류에 따른 HPFRCC용 특수 모르타르의 물성을 파악
- 혼화제 제품의 성능 검증 및 재현성 확인

－ 시험 계획

표 43. 실험 계획

구분	배합사항
배합강도 (MPa)	100 이상
W/B (%)	20
분체량 (kg/m³)	1200
결합재 (%)	SF A, B, C
목표 유동성 (mm)	200 이상

－ 평가 항목

- 유동성 : 미니 플로
- 풀림시간
- 압축강도

표 44. 배합사항

Type	W/B (%)	Unit Weight (kg/m³)				AD (%/B)
		B	C	SF	S	
SF A	20	1200	1115	85	965	0.7
SF B			1080	120		1.0
SF C			1020	180		0.85

－ 시험결과

- 모든 배합에서 200 mm 이상의 유동성을 확보 하였으나, 풀림시간에서 다소 차이가 나타남
- 풀림시간은 현장 적용 시 작업성과 연관되기에 비교분석 하였는데 SF C의 경우 120 초의 풀림시간을 확보하였으나 SF A, B의 경우 200, 250 초의 풀림시간을 확보하는 것으로 나타남

- 혼화제 종류에 따른 재령 28일 압축강도에서는 SF C의 경우 139.7 MPa로 SF A, B에 비하여 높은 압축강도를 발현한 것을 확인함
- 따라서, HPFRCC용 특수 혼화제 적용 시 결합재 종류 변화에도 목표 유동성을 확보하고 목표 압축강도 이상 발현하는 것을 확인함으로 HPFRCC용 특수 혼화제의 성능 검증 및 재현성을 확인함
- 추후, 추가 실험을 통하여 유동성을 더욱 향상시키기 위한 방안 등 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단됨

표 45. 실험 결과

구분	결합재	풀림시간	Mini Flow (mm)	압축강도 (MPa)		
				3일	7일	28일
1	SF A	200	226	97	100	102.7
2	SF B	250	254	105	113	116
3	SF C	120	248	120	128	139.7

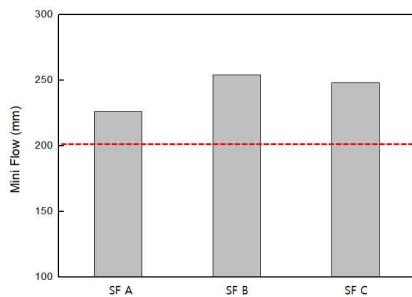


그림 183. 결합재 종류별 유동성 실험결과

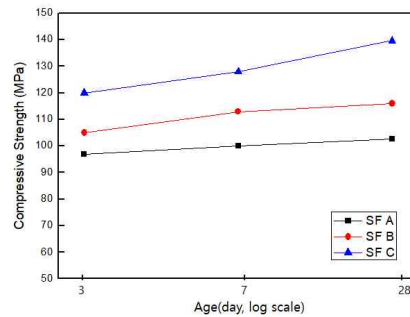


그림 184. 결합재 종류별 재령 경과에 따른 압축강도

(마) 특수 혼화제 실용화

○ Open mock-up 적용

- 총 3 Batch에 적용하여 모든 배합에서 목표 유동성과 재료분리 저항성 확보 및 목표 배합강도를 확보
- 현장 적용성 검증을 위하여 펌프 압송 전·후를 비교 검토한 결과 압송 후 목표 유동성과 재료분리 저항성을 확보함을 실증

○ 고성능 특수 혼화제(FLOWMIX 3000SCC) 공인 인증

- 최종 성능 보정을 완료한 충전용 콘크리트 고성능 특수 혼화제를 공인 성적기관에 의뢰하여 성적서 발급

○ 고성능 특수 혼화제 사용 매뉴얼 수립

- 충전용 콘크리트 고성능 특수 혼화제의 특성, 저장 및 품질관리 방법 가이드라인 제시

(2) 연구 개발 성과

(가) 화학 혼화제 시제품 제작

시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야
FLOWMIX 3000 SCC	18.12.01	동남기업(주)	동남기업(주)	고유동 콘크리트
FLOWMIX 3000 HPFRCC	19.08.01	동남기업(주)	동남기업(주)	초고강도용 콘크리트

(나) 제품 성적서

성적서 명	작성기관
품질시험 · 검사성적서: CMT2018-4333	한국에스지에스(주)

(다) 매뉴얼 작성

매뉴얼 명	작성기관
충전용 콘크리트 고성능 특수 혼화제 사용매뉴얼	동남기업(주)
HPCP용 HPFRCC 혼화제 사용매뉴얼	동남기업(주)

(라) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국콘크리트학회	신재혁	2017.11.02	안동 그랜드호텔	대한민국

(마) 특허

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호*	등록인	등록일	등록번호	등록 번호*	
1	저분체 고유동성 콘크리트용 혼화제 조성물	대한민국	동남기업(주)	17.10.12	10-2017-0132306		동남기업(주)	19.04.10	10-1969328		100

바. 고충전성 레올로지 배합설계를 위한 정량적인 충전성능 평가 및 기준 도출

(1) 연구 내용

(가) SCP 모듈용 콘크리트 충전 성능평가

○ 충전성 및 간극통과성 시험평가

－ 목적

- 레오미터를 통한 SCP 모듈용 정량적 고충전성 콘크리트 유동특성 분석
- T-50 및 소성점도 비례관계 신뢰도 분석을 통한 SCP 모듈용 고충전성 콘크리트 물성 가이드라인 제시

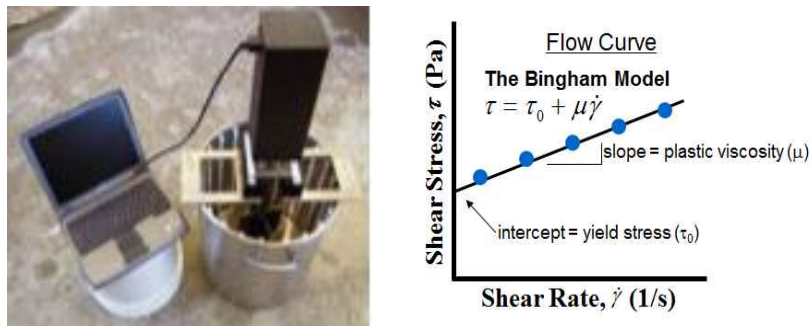


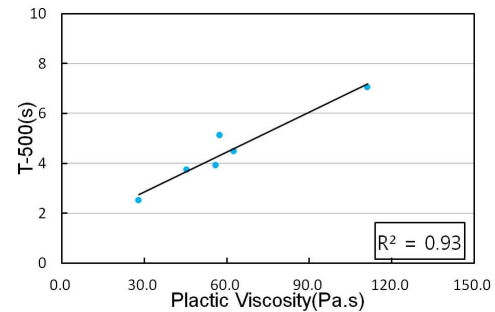
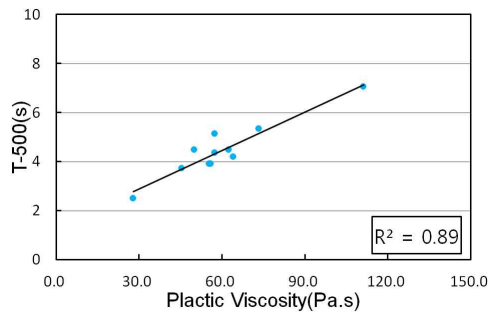
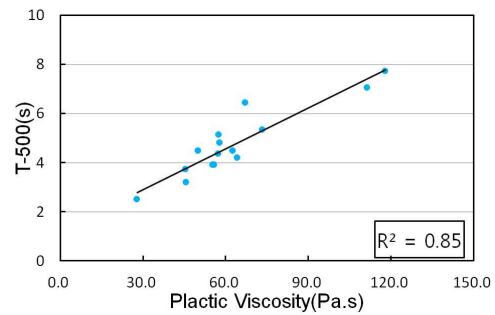
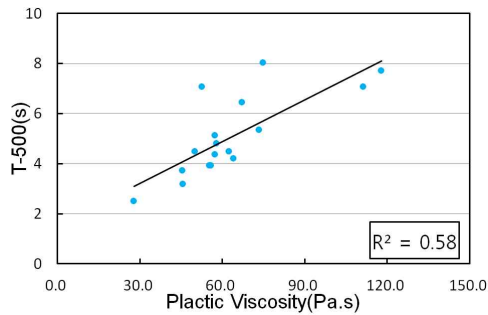
그림 185. 레오미터 실험 개요

－ 콘크리트 유동특성 측정 결과

No	Slump Flow (mm)	T-50 (Sec)	J-ring (mm)	L-Box (h1/h2)	U-Box		Viscosity (Pa.s)	Yield Stress (Pa)
					좌측높이 (mm)	우측높이 (mm)		
1	620	7.71	140	0.44	560	160	117.9	0
2	635	7.05	120	0.46	380	335	111.3	0
3	675	5.34	95	0.65	430	270	73.4	9.9
4	695	4.47	130	0.57	395	320	62.6	0.5
5	645	3.91	95	0.41	405	310	56.0	29
6	665	4.35	195	0.35	420	290	57.4	6.2
7	665	4.79	82.5	0.42	600	120	58.0	5.4
8	605	5.12	35	0.4	385	325	57.5	16.2
9	600	3.72	25	0.47	380	330	45.5	19.4
10	635	3.18	20	0.46	605	110	45.7	19.8
11	585	4.47	15	0.46	420	290	50.1	21.6
12	647.5	6.43	107.5	0.35	535	170	67.2	0
13	667.5	3.91	82.5	0.34	465	240	55.4	0
14	670	4.19	60	0.54	465	240	64.2	4.1
15	610	2.5	135	0.66	365	350	27.9	0
16	587.5	8.03	112.5	—	655	65	75.0	0
17	565	7.06	155	—	665	45	52.7	20.4

- T-50 및 Plastic Viscosity 관계 도출

- 전체 배합에서 신뢰도 0.58을 만족하는 비례관계가 성립
- L-box 시험에서 끝까지 도달하지 못한 배합 제외 후 신뢰도 0.85 성립
- U-box 우측높이를 200mm 이상으로 범위를 지정할 경우 신뢰도 0.89 성립
- U-box 우측높이를 300mm 이상으로 범위를 지정할 경우 신뢰도 0.93 성립
- T-50 및 Plastic Viscosity 비례관계에서 신뢰도 0.90 이상 배합 도출



○ 최종 SCP 모듈용 물성 시험 가이드라인 제시

작업 성능	평가 시험	기존문헌 추천값	제안값 (실험결과)	비고 (기존문헌)
충전성 시험	Slump Flow	600 ~ 700 (mm)	600 ~ 700 (mm)	JSCE
	T-50	3 ~ 15 (sec)	3 ~ 7 (mm)	JSCE
간극통과성 시험	J-ring	< 10 (mm)	< 100 (mm)	EFNARC
	L-box	> 0.8	> 0.5	EN
	U-box	> 300 (mm)	> 300 (mm)	JSCE
Rheometer	Plastic Viscosity	—	< 100 (Pa.s)	—
	Yield Stress	—	< 30 (Pa)	—

(나) HPCP 모듈용 HPFRCC 충전 성능평가

○ HPCP 모듈용 HPFRCC 충전성 시험 및 간극통과성 시험평가

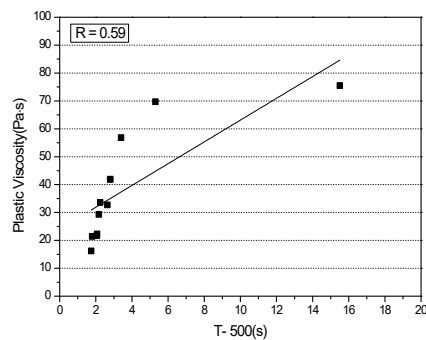
- 목적

- 레오미터를 통한 HPCP 모듈용 HPFRCC 유동특성 분석
- T-50 및 소성점도 비례관계 신뢰도 분석을 통한 HPCP 모듈용 HPFRCC 물성 가이드라인 제시

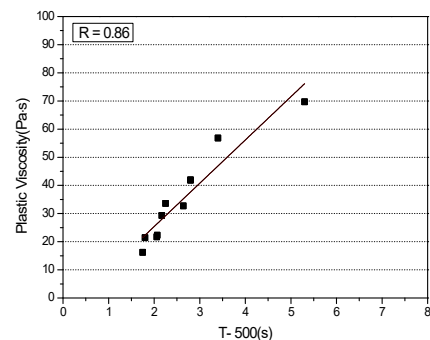
구 분		Slump Flow (mm)	T-500 (Sec)	J-ring (mm)	L-Box (h1/h2)	U-Box		Plastic viscosity (Pa.s)	Yield stress (Pa)	재료 분리 여부	
						좌측높이 (mm)	우측높이 (mm)				
1	plain		960	1.80	70	1.00	350	350	21.4	0.1	O
2	PP 0.2%	강섬유 0.0%	905	2.06	25	1.00	355	345	21.7	2.9	O
3		강섬유 0.5%	900	2.07	30	1.00	360	350	22.3	5.1	O
4		강섬유 1.0%	850	2.17	30	1.00	365	340	29.3	21.8	O
5		강섬유 1.5%	770	2.25	140	1.00	360	340	33.6	23.5	X
6		강섬유 2.0%	690	2.80	210	0.63	370	335	41.9	86.5	X
7		강섬유 2.5%	620	3.40	220	0.38	395	310	56.8	197.3	X
8	강섬유 2%	PP 0%	880	1.75	180	1.00	350	355	16.2	22.0	O
9		PP 0.1%	760	2.64	270	0.94	355	350	32.7	29.7	O
10		PP 0.2%	690	2.80	210	0.63	370	335	41.9	86.5	X
11		PP 0.3%	560	5.30	170	0.49	410	305	69.7	122.7	X
12		PP 0.4%	500	15.51	150	x	455	250	75.5	305.2	X
13		PP 0.5%	440	x	100	x	480	255	112.1	486.3	X

- T-500 및 Plastic Viscosity 관계 도출

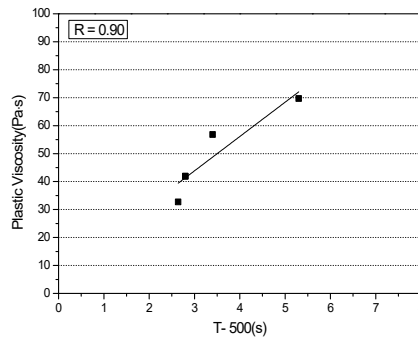
- 전체 배합에서 신뢰도 0.59을 만족하는 비례관계가 성립
- L-box 실험에서 끝까지 도달하지 못한 배합 제외 및 U-box 우측높이를 300mm 이상으로 범위를 지정할 경우 신뢰도 0.86 성립
- 재료분리가 발생하는 배합 제외 후 신뢰도 0.90 성립
- T-500 및 Plastic Viscosity 비례관계에서 신뢰도 0.90 배합 도출



(a) 전체 배합



(b) L-box 도달하지 못한 배합 제외 및 U-box 우측높이 300mm 이상



(C) 재료분리 발생 배합 제외

그림. T-500 & plastic viscosity relationship

○ 최종 HPCP용 HPFRCC 충전성 및 간극통과성 시험결과 제시

작업 성능	평가 실험	기존문헌 추천값	제안값 (HPCP용 콘크리트)	제안값 (SCP용 콘크리트)
충전성 실험	Slump flow	600 ~ 700 (mm)	600 ~ 700 (mm)	600 ~ 700 (mm)
	T-500	3 ~ 15 (sec)	3 ~ 5 (sec)	3 ~ 7 (sec)
간극통과성 실험	J-ring	< 10 (mm)	< 250 (mm)	< 100 (mm)
	L-box	> 0.8	> 0.3	> 0.5
	U-box	> 300 (mm)	> 300 (mm)	> 300 (mm)
Rheometer	Plastic viscosity	—	< 70 (Pa.s)	< 100 (Pa.s)
	Yield stress	—	< 200 (Pa)	< 30 (Pa)

(다) 고충전성 레올로지 배합설계를 위한 정량적인 충전성능 평가 기준 도출

○ CFD 유동해석을 통한 충전성능 정량적 평가

- 유동특성 이산화를 통한 수치기법 기반 정량적 유동해석
 - CFD를 통해 L-box 실험 구조 모델링
 - 콘크리트의 레올로지 입력 값(Viscosity, Yield stress, Shear rate)을 통한 콘크리트 유동 경향성 분석
 - CFD 해석 값을 통한 충전성능기준(안) 도출 방법 제시
- CFD 유동해석 과정

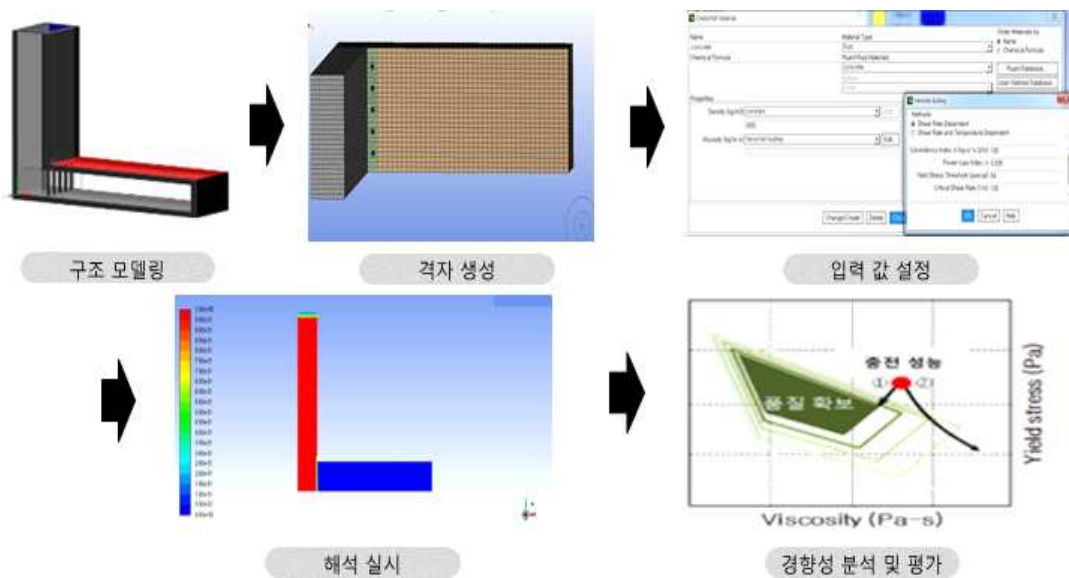


그림 162. CFD 유동해석 과정

- CFD 유동해석 결과

- 임계 전단 속도값에 따른 유동특성 경향 분석

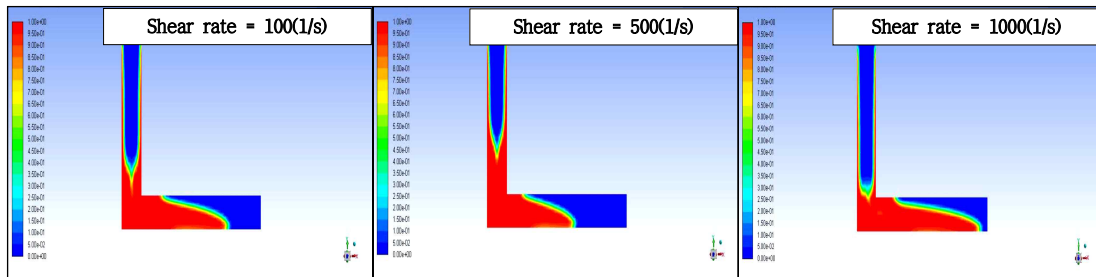


그림. 임계 전단 속도값에 따른 유동특성 경향

- 항복값에 따른 유동특성 경향 분석

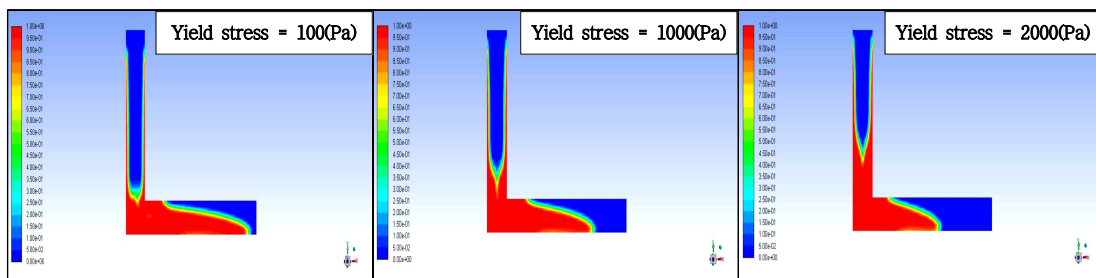


그림. 항복값에 따른 유동특성 경향

- 소성점도값에 따른 유동특성 경향 분석

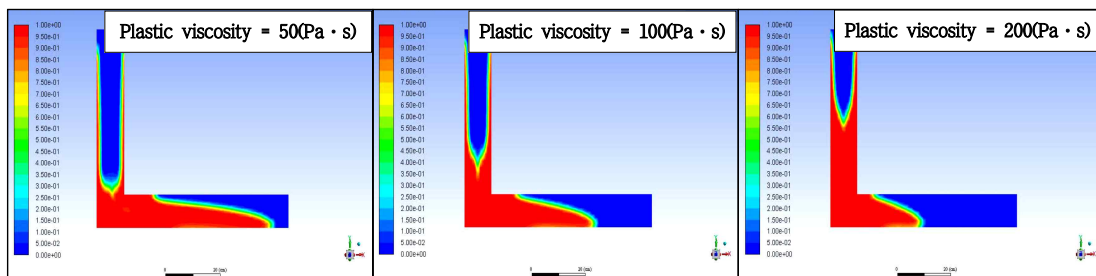


그림. 소성점도값에 따른 유동특성 경향

(2) 연구 개발 성과

(가) 국내·외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호*
1	건설재료의 안전적 제어를 위한 표준물질(Standard Reference Materials) 도출	한국안전학회 논문집	최명성	Vol.3 2	대한민국	한국안전학회	비SCI	2017.10	pISSN 1738-3803
2	모델형 LNG 저장탱크용 콘크리트 충전성능 가이드라인 제시	한국안전학회 논문집	최명성	Vol.3 3	대한민국	한국안전학회	비SCI	2018.08	pISSN 1738-3803
3	모델형 LNG 저장탱크용 자기 충전 콘크리트의 충전 성능평가 실용화 연구	한국안전학회 논문집	최명성	Vol.3 3	대한민국	한국안전학회	비SCI	2018.12	pISSN 1738-3803

(나) 인력양성

번호	분류	기준연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	석사학위	2019		1			1				1		
2	학사학위	2018			1		1				1		

- 기관별 인력양성 현황 및 연구수행 내용

기관	학위별 현황			연구 수행 내용
	박사	석사	학사	
단국대학교		1	1	- SCP 모듈용 콘크리트 충전성능 평가 - 모듈용 LNG 저장탱크용 SCP 콘크리트 충전성능 가이드라인 제시 - HPCP용 HPFRCC 충전 성능 평가 - CFD 유동해석을 통한 충전성능 평가 기준 도출

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 연구개발의 최종 목표(총괄)

○ 핵심성과별 질적 성과지표 및 양적 성과를 대부분 달성함

구분	핵심성과		단위성과		최종 성과점검기준			달성도 (%)		
	(level 1)		(level 2)		질적 성과지표		목표치			
총괄	A	SCP용고유동 충전콘크리트 및 HPCP합성용 고성능 복합재료개발	A-1	SCP용고유동 콘크리트	①	굳지않은 콘크리트	슬럼프플로:600mm 항복강도:30Pa이하	100		
					②	굳은 콘크리트	압축강도: 40 MPa±5	100		
			A-2	HPCP합성용 고성능 복합재료	①	굳은 콘크리트	압축강도: 100MPa 인장강도: 8MPa	100		
	B				구조설계	B-1	모듈구조 성능평가	①	저항력 (축력,휨모멘트)	축력: 3,350kN/m 휨모멘트: 400kN · m/m
	②		접합부이음 효율	1.0				100		
	B-2		외조설계	①		경량화 (60,000m³기준)	30% 경량화	100		
	C	구조해석	C-1	SCP및HPCP 구조 해석 및 최적화	①	SCP 및 HPCP 외조 구조 해석 모델	SCP 및 HPCP 시험결과대비 90%정확성	100		
					②	SCP 외조구조 최적화	Stud 중량 20% 절감	100		
			C-2	SCP 외조 구조 안전성 평가	①	사고하중 구조안전성	내화성능: 15kW/m²,90분이내 내진성능: 최대지반가속도(PGA)0.3g 충돌안전성: 50kg, 45m/s	100		
					②	온도/장기변형 시나리오별 안전성	온도하중안전성 장기변형안전성	100		
					③	지반의 부등 침하 한계산정	침하 한계 기준 제시	100		
			D	제작공법개발	D-1	Mock-up 설계 및 제작	①	시작품 제작	평판시작품 2-Way시작품	100
							②	정도관리	정도관리 Guidance	100
	E	EPC 기술 개발	E-1	EPC 프로세스	①	EPC 전주기 설계	EPC Guidance	100		
	F	실용화	F-1	경제성 평가	①	EPC비용절감효과 (60,000m³습식 탱크기준)	극지:30% 오지:10%	100		
					①	설계 검증	기본 및 상세 설계 검증서	100		
			F-2	국제인증획득	②	사용적합성 인증	사용적합성 인증서	100		
					F-3	국제공동개발 협약	①	협약체결	EPC Guidance 공인화협약체결 상용화 협약체결	70

(2) 핵심기술별 목표

(가) SCP용 고유동 충전 콘크리트 및 HPCP 합성용 고성능 복합재료 개발

－ 해당기관: 한국건설기술연구원, 동남기업, 한국조선해양

단위성과		성과점검기준				양적 성과 건수
		질적 성과지표		목표치	달성치	
1차년도	SCP용 고유동 콘크리트	①	균지않은 콘크리트	슬럼프폴로 600mm	슬럼프폴로 600~610mm	특허출원 1건 비SCI 2건
		②	균은 콘크리트	압축강도 50MPa이하	압축강도 49.1MPa	
	HPCP 합성용 고성능 복합재료	①	균은 콘크리트	압축강도: 170MPa 인장강도: 10MPa	압축강도: 196MPa 인장강도: 13MPa	
2차년도	SCP용 고유동 콘크리트	①	균지않은 콘크리트	항복강도 30 Pa 이하	항복강도 30 Pa 이하	특허출원 2건 특허 등록 1건 SCI 2건 비SCI 1건 시작품 1건 시제품 1건
		②	균은 콘크리트	압축강도 40 MPa±5	압축강도 41.5 MPa* (공인성적서 기준)	
	HPCP 합성용 고성능 복합재료	①	균은 콘크리트	압축강도: 100MPa 인장강도: 8MPa	압축강도: 100MPa 이상 인장강도: 8MPa 이상	
총 괄	SCP용 고유동 콘크리트	①	균지않은 콘크리트	항복강도 30 Pa 이하	항복강도 30 Pa 이하	특허출원 3건 특허 등록 1건 SCI 2건 비SCI 3건 시작품 1건 시제품 1건
		②	균은 콘크리트	압축강도 40 MPa±5	압축강도 41.5 MPa* (공인성적서 기준)	
	HPCP 합성용 고성능 복합재료	①	균은 콘크리트	압축강도: 100MPa 인장강도: 8MPa	압축강도: 100MPa 이상 인장강도: 8MPa 이상	

* 공인성적서 상의 압축강도로써 SCP 모듈용 콘크리트의 목표 설계기준강도는 35 MPa이므로 목표성능을 달성함

(나) 구조설계(단위 모듈 구조 및 모듈러 LNG 저장탱크 외조)

－ 해당기관: 한국조선해양

단위성과		성과점검기준				양적 성과 건수
		질적 성과지표		목표치	달성치	
1차년도	외조설계	①	경량화 (60,000m ³ 기준)	10% 경량화	12.6% 경량화 달성	특허출원 1건
2차년도	모듈구조 성능평가	①	저항력 (축력, 휨모멘트)	축력: 2,848kN/m 휨: 340kN · m/m	축력: 9,000kN/m 휨: 554.9kN · m/m	특허 출원 5건 비SCI 1건 보고서 3건
		②	접합부 이음 효율	1.0	이음 효율 1.0 확보	
	외조설계	①	경량화 (60,000m ³ 기준)	20% 경량화	20.5% 경량화 달성	
3차년도	모듈구조 성능평가	①	저항력 (축력, 휨모멘트)	축력:3,350kN/m 휨:400kN · m/m	축력:9,000kN/m 휨:554.9kN · m/m	특허 출원 5건 비SCI 2건
	외조설계	①	경량화 (60,000m ³ 기준)	30% 경량화	39.7% 경량화	
총괄	모듈구조 성능평가	①	저항력 (축력, 휨모멘트)	축력:3,350kN/m 휨:400kN · m/m	축력:9,000kN/m 휨:554.9kN · m/m	특허 출원 11건 비SCI 3건 보고서 3건
		②	접합부 이음 효율	1.0	이음 효율 1.0 확보	
	외조설계	①	경량화 (60,000m ³ 기준)	30% 경량화	39.7% 경량화	

(다) 구조해석(단위 모듈 구조 및 모듈러 LNG 저장탱크 외조)

－ 해당기관: 한국과학기술원

단위성과		성과점검기준			양적 성과 건수
		질적 성과지표	목표치	달성치	
1 차 년 도	SCP 및 HPCP 구조해석 및 최적화	①	SCP 및 HPCP 외조 구조해석 모델	SCP 해석 모델 구축	SCI 0.5건 비SCI 2건 인력양성 3명 보고서원문2건
		②	SCP 외조구조 최적화	Stud 배치설계 (DNV Guidance)	
	SCP 외조 구조안전성	①	사고하중구조 안전성	내화성능: 15kW/m2, 90분 이내	
2 차 년 도	SCP 및 HPCP 구조해석 및 최적화	①	SCP 및 HPCP 외조 구조해석 모델	SCP 시험결과대비 90%정확성	SCI 1.5건 비SCI 2건 S/W 등록 2건 보고서 3건
		②	SCP 외조구조 최적화	Stud 중량 10% 절감	
	SCP 외조 구조안전성	①	사고하중 구조안전성	내진 성능: 최대지반 가속도(PGA) 0.3g	
		②	온도/장기변형 시나리오별안전성	온도하중 안전성	
3 차 년 도	SCP 및 HPCP 구조해석 및 최적화	①	SCP 및 HPCP 외조 구조해석 모델	HPCP 시험 결과 대비 90% 정확성	SCI 2.5건 비SCI 1건 인력양성 1명 S/W등록 2건
		②	SCP 외조구조 최적화	Stud 중량 15% 절감	
		③	사고하중구조안전성	허용 충돌변위제시	
	SCP 외조 구조안전성	①	온도변형 시나리오별 안전성	온도변형 안전성	
		②	SCP 구조 배부름 허용한계산정	배부름 한계 기준 제시	
4 차 년 도	SCP 및 HPCP 구조해석 및 최적화	①	SCP 외조구조 최적화	Stud 중량 20% 절감	SCI 1.5건 비SCI 2.5건 인력양성 7명 매뉴얼 1건
	SCP 외조 구조안전성	①	사고하중구조안전성	충돌 안전성: 50kg, 45m/s 충돌	
		②	장기변형 시나리오별안전성	장기변형 안전성	
		③	지반의 부등침하한계 산정	침하 한계 기준 제시	
총 괄	SCP 및 HPCP	①	SCP 및 HPCP 외조 구조해석 모델	SCP 및 HPCP 시험결과대비90%정확성	SCI 6건 비SCI 7.5건

	구조해석 및 최적화	②	SCP 외조구조 최적화	Stud 중량 20% 절감	두께 6mm SCP: Stud 중량 17.43% 절감 두께 8mm SCP: Stud 중량 17.19% 절감 해석적 검토: Stud 간격 1.76배 (중량 63.5% 절감) 안전성 및 사용가능성 확인	인력양성 11명 S/W 등록 4건 보고서 5건 매뉴얼 1건
	SCP 외조 구조안전성	①	사고하중구조안전성	내화성능:15kW/m2, 90분 이내 내진성능:최대지반가속도(PGA)0.3g 충돌안전성:50kg,45m/s	화재 조건 하에서 안전율 1.0 이상 확보 내진 안전율 1.0이상 확보 사고하중이 설계기준 이내 확인(관통 미발생)	
		②	온도/장기변형 시나리오별안전성	온도하중안전성 장기변형안전성	LNG leak 온도조건 하에서 안전율 1.0 이상 확보 장기변형 안전율 1.0 이상 확보	
		③	지반의 부등침하한계 산정	침하 한계 기준 제시	기음 침하한계: 1/500 접시 침하한계: 1/600 원주방향 침하: ±3mm	

(라) 제작공법개발(단위 모듈 및 Open mock-up)

－ 해당기관: 한국조선해양, 한국건설기술연구원, 브리콘

단위성과		성과점검기준				양적 성과 건수
		질적 성과지표		목표치	달성치	
1차 년도	Mock-up 설계 및 제작	②	정도 관리	정도관리 기준	역변형을 통한 스티드 용접변형 제어방안 수립	보고서원문 2건
2차 년도	Mock-up 설계 및 제작	①	시작품 제작	평판 시작품	평판 시작품 2건	시작품 2건
3차 년도	Mock-up 설계 및 제작	①	시작품 제작	2-Way 시작품	2-way 시작품 제작 완료	특허 등록 1건 SCI 2건 비SCI 3건 시작품 1건 시제품 1건 현장적용 1건 S/W등록 1건 보고서 5건
		②	정도 관리	정도관리 Guidance	3D 정도관리 기법 개발 완료	
총괄	Mock-up 설계 및 제작	①	시작품 제작	평판시작품 2-Way시작품	평판 시작품 2건 2-way 시작품 제작 완료	특허 등록 1건 SCI 2건 비SCI 3건 시작품 3건 시제품 1건 현장적용 1건 S/W등록 1건 보고서 7건
		②	정도 관리	정도관리 Guidance	역변형을 통한 스티드 용접변형 제어방안 수립 3D 정도관리 기법 개발 완료	

(마) 전주기 EPC 기술 개발

－ 해당기관: 한국조선해양

단위성과		성과점검기준				양적 성과 건수
		질적 성과지표		목표치	달성치	
1차년도	EPC 프로세스	①	EPC 전주기 설계	설계 Guidance	내조/외조설계절차서 작성완료	절차서 2건
2차년도	EPC 프로세스	①	EPC 전주기 설계	자재구매 및 조달 Guidance	자재구매 및 조달 절차서 작성 완료	절차서 1건
3차년도	EPC 프로세스	①	EPC 전주기 설계	조립,운송,설치 Guidance	Construction sequence 작성 완료	매뉴얼 2건 설계지침 1건
총괄	EPC 프로세스	①	EPC 전주기 설계	EPC Guidance	내조/외조설계절차서 자재구매 및 조달 절차서 Construction sequence 작성 완료	절차서 3건 매뉴얼 2건 설계지침 1건

(바) 실용화(경제성 평가 및 국제인증 획득)

－ 해당기관: 한국조선해양

단위성과		성과점검기준				양적 성과 건수
		질적 성과지표		목표치	달성치	
1차년도	경제성 평가	①	EPC비용절감효과 (60,000m3습식탱크기준)	극지:10% 오지:5%	극지:24.1% 오지:7.9%	견적서 1건 검증서 1건 인증서 1건
	국제인증 획득	①	설계 검증	기본설계 검증서	ABSGC 검증서 획득 완료	
		②	사용적합성 인증	사용적합성인증서 (1단계)	DNV-GL TQ1 인증서 획득 완료	
	국제공동 개발협약	①	협약체결	EPCGuidance 공인화협약체결	공인화 협의 수행	
2차년도	국제인증 획득	①	설계 검증	상세설계 검증서	상세설계 검증서 획득	성과홍보 1건 검증서 1건 인증서 1건 보고서 1건
		②	사용적합성 인증	사용적합성인증서 (2단계)	DNV-GLTQ2 인증서 획득	
3차년도	경제성 평가	①	EPC비용절감효과 (60,000m3습식탱크기준)	극지:30% 오지:10%	극지: 30.8% 오지: 14.5%	견적서 1건 보고서 1건
4차년도	국제인증 획득	①	사용적합성 인증	사용적합성인증서 (3단계)	사용적합성 인증서 획득	인증서 1건
	국제공동 개발협약	②	협약체결	상용화 협약체결	업데이트 예정	

총 괄	경제성 평가	①	EPC비용절감효과 (60,000m3습식탱크기준)	극지:30% 오지:10%	극지: 30.8% 오지: 14.5%	견적서 2건 검증서 2건 인증서 3건 성과홍보 1건 보고서 2건
	국제인증 획득	①	설계 검증	기본 및 상세 설계 검증서	기본/상세설계 검증서 획득	
		②	사용적합성 인증	사용적합성 인증서	사용적합성 인증서 획득	
	국제공동 개발협약	①	협약체결	EPC Guidance 공인화협약체결 상용화협약체결	업데이트 예정	

나. 관련 분야 기여도

(1) 기술적 측면

- 육상용 LNG 저장탱크의 모듈화 기술 개발을 통해 기본/상세 설계 기술, 충전 콘크리트 배합 개발, 제작/조립 방법 및 EPC 프로세스의 원천기술을 확보하여 국내 플랜트 설계 기술력 향상을 통한 세계 선진 기술을 선도
- 모듈러 LNG 저장탱크 설계 기술을 국제 공인 기관으로부터 신기술 사용 적합성 인증을 획득함으로써 기술 검증의 신뢰성을 구축했고 해외 기술로부터 기술자립도 실현
- SCP 강-콘크리트 합성구조의 경우 각 재료가 지닌 단점을 보완할 수 있는 장점을 갖으나 자기 충전성 고유동 콘크리트 배합 설계 기술에 대한 취약점을 지니고 있는데, 본 연구를 통하여 충전성을 확보함으로써 LNG 저장탱크의 구조시스템의 혁신적인 전환을 실현
- SCP 외조 모듈러 기술을 적용하여 중소형 LNG 저장탱크의 모듈러 기술을 완성함으로써 기존 습식 LNG 저장탱크 대비 오지 공사 시 공사비 -10%, 공사기간 -35%, 극지 공사 시 공사비 -30%, 공사기간 -35% 달성
- 충전용 콘크리트 및 충전 콘크리트용 특수 혼화제를 국내 기술로 자체개발하여 향후 프로젝트별 맞춤 설계가 가능한 기초자료를 마련

(2) 경제적 측면

- 중소형 LNG 저장탱크 세계시장 규모는 2030년까지 약 50억톤 정도가 예측되며 중소형인 50,000 m³ 용량 기준으로 약 100,000기의 LNG 저장탱크의 선점을 위한 선결과제로서 국제인증기관의 인증과 검증이 필요한데 국제 인증을 획득함으로써 시장 선점의 교두보를 확보
- 모듈구조 설계 및 복합구조용 충전콘크리트 개발로 향후 성장이 예상되는 중소형 LNG 탱크 시장에서 신기술을 토대로 해외 기술료 지급없이 시장 선도가 가능하고 해당기술 수출에 따른 추가적인 수익창출이 기대
- SCP 외조 모듈러 기술을 적용하여 기존 습식 LNG 저장탱크 대비 오지 공사 시 공사비 -10%, 극지 공사 시 공사비 -30%를 달성하여 경제성 확보

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구결과의 활용방안

- (1) 본 과제는 실용화사업으로서 세계 최초로 중소형 LNG 저장탱크를 모듈로 제작하여 현장에서 설치하는 연구사업. 최종 성과물은 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조용 구조 모듈 제품을 개발하고 이를 이용하여 기존 기술인 내조 제작기술과 내조와 외조 사이의 단열기술의 적용성을 검토하여 최종 중소형 LNG 저장탱크의 새로운 형식을 개발, 기술 개발을 완료한 뒤 주로 해외시장을 대상으로 중소형 LNG 저장탱크 EPC 사업에 참여하는데 활용하고자 함. 각 연구개발 분야 별 핵심기술의 구성과 활용방안은 다음과 같음
- (2) 중소형 LNG 저장탱크용 SCP 모듈 구조설계 핵심기술과 활용방안
 - Skin Steel Plate(이하, SSP)와 고유동 충전 콘크리트로 구성된 합성구조 panel을 SCP 기본 모듈로 구성
 - 합성거동을 위해서 SSP에 stud를 설치하여 전단연결을 구성
 - SCP 모듈은 LNG 저장탱크 내·외부 작용하중에 대한 내하력 확보를 위해 사용재료 제원, SSP의 두께, stud 간격 및 충전 콘크리트 설계기준강도 등을 설계
 - 이후 작업성과 모듈연결 적합성 등을 고려하여 panel의 dimension을 설계
 - 이상의 기술들은 「중소형 LNG 저장탱크용 SCP 구조설계지침」으로 제시하여 SCP 모듈 제품을 제작하는 설계법으로 활용
 - SCP 모듈 설계 핵심기술 기술은 관련된 국제 CODE와 제기준을 만족할 수 있게 설계되며 동시에 중소형 LNG 저장탱크 EPC를 통하여 오지 공사 시 공사비 10% 공사기간 15%, 극지 공사 시 공사비 30% 공사기간 35% 절감이 가능한 EPC 기술로 활용
- (3) SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장탱크 설계 핵심기술과 활용방안
 - 모듈러 LNG 저장탱크는 내조 및 외조의 탱크 모듈과 기타 운전 및 보수를 위한 설비로 구성된 platform 모듈을 shop에서 제작하여 육상 및 해상 운송을 통하여 현장에 설치하는 신개념의 LNG 저장 설비 임
 - 모듈러 LNG 저장 탱크는 설치 환경에 대한 제약 조건의 영향을 완전히 100% 배제하기 위해서는 100% 모듈화가 선결조건이며, 이를 위해서는 LNG 저장 탱크의 경량화를 만족하는 동시에 기존의 습식 LNG 저장 탱크 동등 수준 이상의 구조 안전성 확보가 요구됨
 - 모듈러 LNG 저장 탱크의 경량화를 위한 SCP와 I-beam을 이용하여 기존 prestressed 콘크리트 대비 약 40% 이상 경량화가 가능한 구조 설계 기술의 확보와 제작된 LNG 탱크의 육상 및 해상 운송 시 정적 및 동적 구조 안전성 평가에 대한

설계가 선결되어야 함

- 그리고 사용 운전 조건에서 발생 가능한 하중과 지진, LNG 누설과 인접 영역의 화재 그리고 폭발 등의 사고 시나리오 하에서 기존의 습식 LNG 저장 탱크와 동등 수준 이상의 구조 안전성 확보 기술이 요구됨
- 또한 육상 및 해상 운전 조건하에서 발생 가능한 정적 및 동적 하중에 대한 모듈러 탱크의 구조 안전성 확보를 위한 support 배치 및 fastening 기준의 정립이 요구됨
- 이상의 기술들은 「SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장 탱크 설계 지침」으로 제시하여 향후 SCP를 이용한 모듈 제품을 제작하는 설계법으로 활용할 수 있도록 할 예정이며, 기존 습식형 LNG 저장 탱크와 신개념의 LNG 저장 탱크의 개발 과정에서도 활용 가능한 수준의 지침을 작성할 예정임
- 이를 위하여 “SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장 탱크 설계 지침”은 DNV GL과 ABSG Consulting 등 국제인증기관으로부터 설계 지침에 따른 사용적합성 검증과 더불어 시공 및 제작에 대한 설계 검증을 확보할 예정임

(4) SCP·HPCP 모듈 구조해석 및 중소형 LNG 저장탱크 시스템 해석 핵심기술과 활용방안

- 합성거동 해석을 통한 SCP 모듈 내 shear connector 개수 및 단면 최적설계
- 각종 작용하중에 따른 SCP 모듈 유한요소 해석 결과와 실험결과 비교를 통해 SCP 구조해석 기술을 확보하고 「SCP 모듈 구조해석 매뉴얼」구축을 위한 지침으로 활용
- SCP 모듈 적용 LNG 저장탱크의 온도 시나리오에 따른 해석 기술 확보
- LNG 저장탱크의 FSSI를 고려한 정밀 내진해석기술을 확보하여 경제성을 고려한 최적설계기술 확보
- 정상상태 및 특수상황(온도/내진/충돌 등)을 고려한 SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장탱크 시스템 해석 알고리즘 구축
- 향후 모듈러 LNG 저장탱크 설계 시 「SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장탱크 시스템 해석 매뉴얼」구축을 통한 특수상황 별 안전성 및 경제성 확보
- HPCP 모듈 해석을 위해 강섬유를 콘크리트 내에 혼합하여 인장에 취약한 콘크리트의 단점을 보완한 HPFRCC의 재료모델을 구성
- HPFRCC에 대한 해석적 기술을 확보로 HPFRCC의 적용대상이 넓어지며, 부착관계를 고려한 「HPCP 모듈 구조해석 매뉴얼」을 구축하여 가스 저장탱크 외조 모듈의 해석에 활용

(5) SCP 모듈 제작용 고유동 충전 콘크리트 핵심기술과 활용방안

- 일반 고유동 콘크리트는 기존 기술이며, 이미 콘크리트 기술 분야에서 상용화 됨
- SCP 모듈 제작에 필요한 고유동 충전 콘크리트는 자기 충전성을 확보하여야 함. 그러나 일반 건설에서 자기 충전성 콘크리트는 철근의 배근 간격이 100mm 내외 철근콘크리트 구조물 공사에 적용되는 것을 의미함
- SCP 모듈은 좁은 간격의 stud가 배치되어 동일한 슬럼프 플로 값을 지니더라도 SCP 모듈 전체에 air cap이 전혀 발생하지 않는 콘크리트를 제조하기 어려움

- 따라서 SCP 모듈 제작용 고유동 충전 콘크리트는 골재 최대치수의 조절, 특수 혼화재의 개발 및 배합설계의 최적화 핵심기술을 개발
- 이상의 SCP 모듈 제작 콘크리트 재료 핵심기술은 「SCP 모듈 제작용 고유동 충전 콘크리트 제조 매뉴얼」으로 정리되어 SCP 제작용 콘크리트의 제조 및 생산에 활용

(6) HPCP 모듈 제작용 HPFRCC 핵심기술과 활용방안

- HPFRCC는 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료로서 일반 콘크리트와 달리 높은 압축인장강도를 지니며 점성을 지니면서 유동성이 높은 시멘트 복합재료임
- 기존 강섬유보강 초고강도 HPFRCC는 폭열의 위험성이 높아 내화성능이 요구되는 모듈러 LNG 저장탱크 외조에 적용할 수 없음
- 본 연구에서는 높은 강도 (100~180 MPa)를 지니면서 동시에 폭열이 발생하지 않으면서 내화성능을 확보할 수 있는 개선 HPFRCC 재료구성 및 혼합기술을 확보
- 또한 stud의 형식과 배치 간격에 상관없이 air cap 없이 자기 충전성을 확보할 수 있는 핵심기술을 확보
- 이상의 HPCP 모듈 제작용 HPFRCC 재료 핵심기술은 「HPCP 모듈 제작용 HPFRCC 제조 매뉴얼」으로 정리되어 HPCP 모듈 제작용 HPFRCC의 제조 및 생산에 활용

(7) SCP · HPCP 모듈 제작 핵심기술과 활용방안

- SCP 모듈 제작은 우선 SSP에 stud를 설치하는 것으로서, stud 간격의 정밀도 및 압접에 의한 SSP의 변형을 제어
- 이후 cross tie를 설치하여 SSP 모듈을 조립할 때 SSP 사이의 일정한 단면 두께를 유지
- SCP는 SSP 사이에 콘크리트가 밀실하게 충전된 것을 전제로 구성된 구조시스템
- SCP 모듈은 2차원 평면과 3차원 입체면으로 구성될 수 있고 stud가 좁은 간격으로 배치
- 충전 콘크리트의 타설 시 SCP 모듈 내부에 충전 유동흐름 저항을 극복하면서 동시에 타설로 인한 SSP의 변형이 없는 자기 충전성 핵심기술을 확보
- SCP 제작 후 패널 단위의 접합 및 후속 작업을 위한 평탄도를 포함한 정도 관리 기술 확보
- 또한 유사한 구조 환경에서 HPCP 모듈의 충전성을 충분히 확보할 수 있는 핵심기술을 확보
- 이상의 SCP 모듈 제작 핵심기술은 「SCP 모듈 제작 매뉴얼」 및 「HPCP 모듈 제작 매뉴얼」으로 제시하여 SCP 모듈 제작법으로 활용

(8) 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 기초(foundation) 핵심기술과 활용방안

- 영구동토 지역에서의 LNG 저장탱크의 안전한 시공을 위한 기초(foundation) 구조물 설계법
- LNG 저장온도를 고려한 주변 지반의 동결 및 융해 범위를 예측하고, 또한 지반온도 조건(영구동토, 계절동토)을 고려하여 안전하게 기초구조물을 시공(설계)할 수 있는

기술임

- 극한지(영구동토)에는 미개척 에너지의 20% 이상이 매장되어 있으므로, 향후 극한지 에너지·자원 개발 사업(프로젝트)의 LNG 저장탱크 기초지반 설계 및 시공법으로 활용 가능함 (동결 및 융해 문제 극복 가능한 기초설계법)

표 67. 핵심기술별 활용 형태

핵심 성과물	활용 형태			
	소재 상용화	제품 상용화	시스템 상용화	기준 표준화
중소형 LNG 저장탱크용 SCP 모듈 구조설계지침				○
SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장탱크 설계지침				○
중소형 모듈러 LNG 저장탱크 외조용 구조 모듈		○		
중소형 모듈러 LNG 저장탱크		○		
SCP·HPCP 모듈 구조해석 매뉴얼			○	
SCP 모듈 적용 중소형 LNG 저장탱크 시스템 해석 매뉴얼			○	
SCP·HPCP 모듈 제작 매뉴얼			○	
SCP 모듈 제작용 고유동 충전 콘크리트	○			
HPCP 모듈 제작용 HPFRCC	○			
고유동 충전 콘크리트 및 HPFRCC 특수 혼화제	○			

- (9) 모듈러 기술이 적용된 저장탱크 건설 및 운영 등 테스트베드 실증 과제 도출에 활용
- 모듈러 LNG 저장탱크 기술은 Closed Mock-up 구축 및 실증 테스트를 통해서 가스처리시스템을 포함한 전체 구조에 대한 구조 안전성 및 제작성을 점검할 수 있음
 - 기 개발된 모듈러 기술을 통해서 미개척 에너지의 20% 이상이 매장되어 있는 극한지를 우선 대상으로 모듈형 육상 에너지 저장구조 실증 기술 개발에 활용함
 - 상기 실증 기술 개발은 극한지 환경 모듈형 LNG 저장탱크 설계 및 제작 방안 도출, 제작 최적화 기술 확보 및 설치/유지 관리 실증 기술 확보를 목표로 함
 - 실증 기술 개발을 통해 모듈형 LNG 저장탱크의 실증용 Test-bed(1/10 scale)를 구축하여 모듈러 기술의 완성을 확인 할 계획임.

나. 실용화 · 제품화 방안

(1) Open mock-up 제작을 통한 제품 완성 입증

- 중소형 모듈러 LNG 저장탱크의 실용화를 위해서는 개발된 제품의 완성도가 입증되는 것이 우선, 본 연구에서는 연구개발 기간과 연구비를 감안할 때 부분 open mock-up을 제작하고자 함
- Open mock-up 제작은 우선 SCP 및 HPCP 외조 중 full scale 모듈을 다수 제작하고 제작된 full scale 모듈을 접합하여 중소형 LNG 저장탱크의 제작성 검토가 가능하도록 완성함
- Open mock-up 제작을 통하여 모듈러 저장탱크 외조의 제작 절차의 타당성을 검증 · 보완하고 공사기간 단축 및 공사비용의 절감을 정량적으로 분석하여 이를 근거로 최종 제품의 실용화를 추진

(2) 국제인증기관의 인증과 검증 추진

- 중소형 모듈러 LNG 저장탱크는 상용화 시장은 국내보다 오히려 세계시장을 목표로 하고 있음. 이를 위해서는 개발된 제품과 기술에 대한 국제인증기관의 인증과 검증이 필요함
- 국제인증 작업은 3년의 연구기간을 감안하여 1차년도부터 인증 획득 계획을 수립하고 연차별 활동을 통하여 신규조 형식에 대한 DNV-GL의 신기술 사용 적합성 평가(NTQ, New Technical Qualification)와 ABSG Consulting으로부터 모듈러 LNG 저장탱크 설계 기술을 인증 받고자 함

(3) 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 EPC 프로세스 수립

- 중소형 모듈러 LNG 저장탱크의 사업화는 제품만 공급하는 사업영역이 아님. 즉, 제품의 설계와 함께 자재조달, 이송 및 설치하는 Engineering, Procurement, Construction과 Pre-commissioning 프로세스를 일괄적으로 개발하여야 함
- 국제인증과 마찬가지로 3년의 연구기간을 감안하여 1차년도부터 EPC 프로세스 확립 계획을 수립하고 연차별 활동을 통하여 제작 및 내·외조 조립, 이송 절차, 장비 및 장치 등의 조달 절차 프로세스를 개발하고자 함
- 특히 내조, 단열재 및 외조와 바닥 받침 등이 결합된 중소형 모듈러 LNG 저장탱크를 육상 및 해상 운송하는 데는 난이도 높은 기술이 필요하며, 주관연구기관인 현대중공업은 조선 및 해양 플랜트 사업을 수행하면서 이미 세계적 수준의 기술을 확보하고 있기 때문에 새로운 형식의 중소형 LNG 모듈러 저장탱크 EPC 프로세스도 충분히 개발할 수 있음

(4) SCP 중소형 모듈러 LNG 저장탱크 해외시장 진출 전략수립

- 모듈러 LNG 저장탱크의 해외시장 진출을 위해 LNG export terminal, LNG import terminal, bunkering 등 LNG 저장탱크 수요를 파악하고, 수요 특성에 따른 해외시장

진출 전략서 작성

- 동영상, 모형 등을 사용한 국제 LNG 전시회 홍보
- 오일 메이저와 LNG EPC engineering 업체를 대상으로 모듈러 LNG 저장탱크의 road show 시행

(5) 종합 추진계획

- 이상의 핵심기술 확보와 실용화 추진 프로세스를 연구기간 내 확보하여 실용화를 적극 추진 예정
- 기술의 실시는 주관연구기관인 현대중공업이 주도하며 중소기업 육성을 위하여 관련된 핵심기술은 주관연구기관인 현대중공업과 협력 관계를 형성하여 실시하도록 함
- 연구과제 내 개발된 연구 성과물은 참여기업에 기술 이전 실시 예정임

(6) 사업화 관련 예상 달성 실적

- 모듈러 LNG 저장탱크 기술은 실용화 및 사업화 실현을 위해서 제작 기술과 시운전 기술에 대한 Closed Mock-up을 통한 실증 테스트가 반드시 수행되어야 함
- 실증 테스트 이후 개발된 기술에 대한 사업화를 추진 예정이고 개발 종료 후 1년 내 매출 1.2억불, 2년 내 2.4억불, 3년 내 4.8억불을 수주 목표로 추진하고자 함
- 사업 진행을 위해 추가적인 LNG 프로세스 및 탱크 EPC 설계 인력, 극저온 강재 용접시공/품질관리 인력을 확보할 예정이며 강구조물 조립 및 생산능력을 15,000톤 이상으로 확보하기 위한 투자를 진행 예정임

(7) 기타 적용 분야 모색

- 모듈러 LNG 저장탱크를 구성하는 강판-콘크리트 합성 구조(SCP)는 기존 프리스트레스트 콘크리트 구조와 비교하여 폭발이나 충격에 더욱 우수하며 기밀성이 확보된 구조임.
- 외부 충돌과 방사능 차폐를 위한 원자력발전소 격납건물이나 핵연료추진 선박(잠수함 또는 수상함)의 엔진룸 구조로 적용이 가능함
- 또한, 부유식 해상발전 설비 등 중량이 과다한 이동식 콘크리트 구조를 SCP로 대체하여 운송비용, 시공비용을 절감할 수 있을것으로 예상하고 관련 분야에 대한 진출을 모색할 예정임.

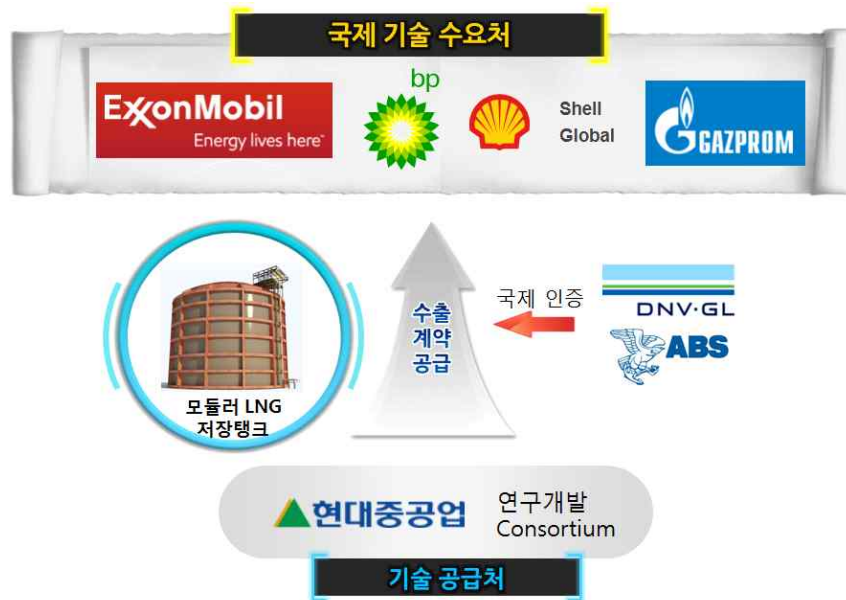


그림 193. 기술개발 및 사업화 chain

다. 사업화 전략

(1) 상용화 방안

– 참여기업 1 (현대중공업)

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ 상용화 형태 : 모듈러 LNG 저장탱크 ○ 수요처 : LNG 저장탱크의 수요지역중 극지/오지(도서지역 포함)/선진국 등 기존 stick-built형 LNG 저장탱크의 건설에 기간 및 비용적 제약이 많은 개발사 ○ 예상 단가 : 25,000 m³ 탱크 기준 0.3억\$ ○ 개발 투입인력 및 기간 : 15명 (36개월)
상용화 능력 및 자원 보유	<상용화 능력> ○ 해외 발전 plant project등 국내 최고 수준의 EPCC 경험 및 실적 ○ 전세계 각지의 해외 기술 영업망 ○ 세계 오일메이저 및 유수 엔지니어링사와의 지속적인 project를 통한 파트너쉽 구성 ○ 세계 최고 수준의 육상 및 해상 plant 모듈화 실정 및 경험 ○ 세계 최고 수준의 강구조물의 품질관리 시스템 ○ 세계 최초 부분 모듈러 LNG 저장탱크 (ALT project)의 내조 제작 경험 <자원보유> ○ LNG 프로세스 및 탱크 EPCC 설계인력 보유 (1500명 이상) ○ 극저온 강재 용접시공 / 품질관리 인력 보유 (500명 이상) ○ 강구조물 조립 및 생산 능력 (15,000톤 이상)
상용화 계획 및 일정	○ 부분 open mock-up 완성 : 2019년 완료 ○ 해외 영업 활동 및 홍보활동 : 2018년 이후 ○ 수주 개시 : 2019년 이후

– 참여기업 2 ((주)브리콘)

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ 상용화 형태 : 콘크리트 충전 강재패널 ○ 수요처 : LNG 저장탱크 외조구조물, 건축슬래브 및 외벽, 임시구조물 ○ 예상단가 : 용도에 따른 탄력적 산정 ○ 투입인력 및 기간 : 8명(36개월)
상용화 능력 및 자원 보유	<상용화 능력> ○ 콘크리트 충전 강재관 거더 및 교각 설계 및 시공 실적 다수 보유 ○ 콘크리트 프리캐스트 제품 설계 및 제작, 시공 기술 보유 <자원 보유> ○ 콘크리트 충전 구조물 및 콘크리트 프리캐스트 설계인력 보유 ○ 프리캐스트 제품 생산 공장 보유 및 운영 ○ 콘크리트 충전 강관 연구 국책과제 다수 수행
상용화 계획 및 일정	○ SCP mock-up 완성 : 2018년 ○ SCP 부재의 다양한 적용시장 개척

– 참여기업 3 (동남기업(주))

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ 상용화 형태 : LNG 저장 탱크 콘크리트용 고성능 특수 혼화제 ○ 수요처 : LNG 저장 탱크 콘크리트의 물성 확보에 제약이 있는 콘크리트 제조사 ○ 예상 단가 : 1200 원/kg ○ 개발 투입 인력 및 기간 : 5 명 36개월
상용화 능력 및 자원 보유	<상용화 능력> ○ 고성능 콘크리트의 물성 확보 경험 및 고기능성 화학혼화제 제조 기술 및 실적 ○ 국내 최고 수준의 고성능 콘크리트용 화학혼화제 제조 기술 <자원보유> ○ 고성능 특수 혼화제 제조를 위한 다수의 원료 보유(약 150종 이상) ○ 고성능 콘크리트 설계, 제조 및 품질관리 기술 인력 보유(20인 이상)
상용화 계획 및 일정	○ 콘크리트의 물성 확보 완성 : 2019년 완료 ○ 개발 기술 홍보 및 영업 활동 개시 : 2018년 이후

(2) 사업화 모형

○ BM 수립 배경

극지에 매장된 천연가스 개발 수요에 따라 LNG 저장탱크의 수요가 증가하고 있으나, 기존 stick-built형의 건설 방식으로는 건설기간이 지나치게 길어져 투자결정의 결림 돌로 작용하고 있음. 또한 호주 및 캐나다 등에서 발견된 천연가스 미개척지의 경우 상대적으로 접근이 어려운 오지에 위치해 LNG 플랜트 건설시 필요한 인력공급의 어려움과 함께 높은 임금으로 인하여 경제성 확보가 어려운 실정임.

이뿐만 아니라 LNG 벙커링 시장을 포함, 강화된 환경규제에 대처하기 위해 청정에너지로 평가받는 LNG 시장은 폭발적으로 늘어날 것으로 예상 되는 것에 반해, LNG 저장탱크의 투자에 필요한 긴 건설기간 및 높은 투자비용에 따라 개발이 미루어지고 있는 실정임. 이에 따라 LNG 저장탱크의 현장 시공 기간을 최소화 하는 모듈러 LNG 저장탱크 개발을 통해 LNG 저장탱크의 미개척지를 대상으로 한 시장개척이 가능할 것으로 판단함.

○ BM 목표 및 핵심경쟁요인

－ BM 목표

극지·오지(도서지역 포함)·선진국(고인건비 국가)에 건설되는 LNG 저장탱크의 시장을 모듈러 LNG 저장탱크를 개발하여 새로운 시장을 창출

－ 핵심경쟁요인

모듈화율을 높여 오지 환경은 공사기간 15%, 공사비용 10%, 극지 환경에서는 공사기간 35% 공사비용 30% 절감이 가능하며 기존 stick-built형 탱크 대비 동일 수준 이상의 안전성을 확보한 경량화 된 중소형 모듈러 LNG 저장탱크

○ 목표 시장 구조

－ 경쟁기업 현황 및 경쟁구조

LNG 저장탱크의 모듈화는 세계 최초로 시도되는 형식이며, 이에 따라 동일제품에 대하여 경쟁기업은 현재로선 파악되지 않음. 다만, 기존의 stick-built형 LNG 저장탱크의 경우 국내의 대형 건설사 및 해외 유수의 엔지니어링 업체에서 다수의 프로젝트를 통해 설계 및 시공의 노하우를 보유하고 있음.

기존 stick-built형 LNG 저장탱크에 대비하여, 모듈러 LNG 저장탱크의 경우 현장공기 절감을 통한 전체적인 CAPEX를 획기적으로 줄일수 있을것으로 판단하여 경쟁시장에서 우위를 점할 것으로 예측됨.

－ 시장진입 장벽

LNG 저장탱크의 경우 사고가 발생할 경우 큰 인적/물적 손해가 발생함에 따라, 발주처에서 탱크의 안전성에 큰 초점을 맞추고 있다. 이에 따라 발주처는 설계 형식에 대해 보수적인 접근을 할 것으로 판단되고, 이는 수주 경험이 없는 신개념의 모듈러 LNG 저장탱크에 시장진입 장벽으로 작용할 수 있음.

그러나 본 과제를 통하여 개발된 모듈러 LNG 저장탱크의 구조 안전성 확보를 위하여 신기술 사용 적합성 평가 기법으로 세계 오일 메이저사에서 보편적으로 요구하고 있는 DNV-GL의 신기술 사용적합성 평가 인증을 거치는 동시에 세계 최대의 LNG 탱크 설계/시공에 대한 검증 및 감리를 수행하고 있는 미국의 ABS Group Consulting 으로부터 관련 설계/시공 인증을 확보할 예정임.

또한 최근 중소형 LNG 설비 투자에 역량을 집중하고 있는 Shell 사와 모듈러 LNG 저장 탱크에 대한 공동 개발 및 상용화에 관한 협약을 통하여 시장 교두보를 확보할 예정임.

○ 수익 확보 전략

－ 주요 고객군

전세계 오일 메이저 등 LNG 액화 플랜트 발주처 그리고 LNG 벙커링 시설 투자처인 항만공사 등

－ BM의 수익창출 방안

실용화 단계 이전에 잠재적 발주처를 대상으로 한 홍보활동 및 빠른 발주처 대응으로 신규 LNG 저장탱크 시장 개척을 통한 수익을 창출코자 함.

LNG의 가격 경쟁력과 친환경성으로 인해서 인구밀도가 높은 아시아, 특히 동남아시아 지역에서 수요가 지속적으로 증가하고 있으나 많은 지역이 오지 또는 도서지역으로 구성되어 LNG 저장시설을 구축하는데 어려움이 큰 상황임.

한-아세안 경제 협의체를 통하여 동남아시아 각국 정부에 모듈러 LNG 저장탱크의 기술 우수성을 홍보하고 사업화에 대한 협의를 통해 SOC 사업 참여를 추진할 예정임.

전체 EPC(설계-구매-제작) 공정뿐만 아니라 모듈러 LNG 저장탱크의 설계 기술을 라이선스 형식으로 판매하여 모듈러 LNG 저장탱크의 건설을 원하는 해외 현장에서 기술료를 지급받는 모델을 구축하여 엔지니어링 부분의 수익을 창출하고자 함.

붙임. 참고문헌

- [1] DNV Public Report, "Assessment of the INCA Steel-Concrete-Steel Sandwich Technology"
- [2] EN 1473, "Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations" , 2016
- [3] British standard, "BS-7777: Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service, Part 1", 1993
- [4] EN 14620, "Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C" ,2006
- [5] EN 10028-3, "Flat products made of steels for pressure purposes - Part 3: Weldable fine grain steels, normalized" , 2017
- [6] EN 10028-1, "Flat products made of steels for pressure purposes - Part 1: General requirements" , 2017
- [7] EN 1992-1-1, "Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings" ,2004
- [8] EN 206, "Concrete - Specification, performance, production and conformity" , 2016
- [9] EN 1990, "Basis of structural design" , 2002
- [10] EN 1993-1-1, "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings" , 2005
- [11] EN 1994-1-1, "Design of composite steel and concrete structure - Part 1-1: General rules and rules for buildings" , 2004
- [12] EN 1991-1-4, "Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions" , 2005
- [13] EN 1998-1, "Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings" , 2004
- [14] EN 1998-4, "Design of structures for earthquake resistance - Part 4: Silos, tanks and pipelines" , 2006
- [15] EN 1991-1-1, "Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings" , 2002
- [16] EN 197-1, "Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements"
- [17] EN 934-2, "Admixtures for concrete, mortar and grout Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling"
- [18] EN 12620, "Aggregates for concrete"
- [19] EN 12350-8, "Testing fresh Concrete"
- [20] EN 12350-7, "Testing fresh concrete. Air content. Pressure methods"
- [21] EN 12350-11, "Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. Sieve segregation test"
- [22] ASTM C232, "Standard Test Method for Bleeding of Concrete"
- [23] EN 12390-3, "Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens"

- [24] EN 12390-6, "Testing hardened concrete. Tensile splitting strength of test specimens"
- [25] IITK-GSDMA, "Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks" , 2007
- [26] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, 'Fundamentals of Heat and Mass Transfer', Wiely, New York, 1993
- [27] S. W. Churchill and H.H. Chu, "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate" , Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, 1975, pp. 1323 ~ 1329.
- [28] S. Globe and D. Dropkin, "Natural convection heat transfer in liquids confined by two horizontal plates and heated from below" , J. Heat Transfer, Vol. 81, 1959, pp. 24 ~ 28..
- [29] Theor. Appl. Climatol. 61, Solar Radiation Climatology of Alaska, pp161-175 , 1998
- [30] API 620, "Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks" , 12th edition, 2013
- [31] API 625, "Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage" , 1st edition, 2010
- [32] API 650, "Welded Tanks for Oil Storage" , 12th edition, 2013
- [33] ASME Sec.VIII Div.2, "Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 2-Alternative Rules" , 2013 edition, 2013
- [34] ASCE 7-10, "Minimum Design Loads for Buildings and other Structures" , 2011
- [35] IBC 2000, "International Building Code 2000" , 2000
- [36] ASTM A553/A553M -10, "Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel, Quenched and Tempered 8 and 9 % Nickel" , 2010