

20RDRP-
B076268-07

국토교통기술지역특성화사업 최종보고서

2020

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개() 발간등록번호()

국토교통기술지역특성화사업 제7차 연도 최종보고서

R&D / 20RDRP-B076268-07

내진성능 향상을 위한 철근콘크리트 기둥의 직물섬유 보강 콘크리트 영구거푸집 개발 최종보고서

2020. 05. 27.

협동연구기관 / 계명대학교
공동연구기관 / 경희대학교
/ 경북대학교
/ 제이와이건설
/ (주)우현레미콘

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

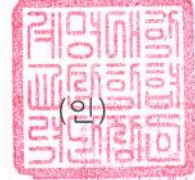
제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'내진성능 향상을 위한 철근콘크리트 기둥의 직물섬유 보강 콘크리트 영구거푸집 개발'(연구 개발 기간 : 2018.07.16 ~ 2020.02.29) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 05. 27.

협동연구기관명 : 계명대학교 산학협력단 (남 재 열)



참여기관명 : 경희대학교 산학협력단 (이 범 석)



참여기관명 : 경북대학교 산학협력단 (임 기 병)

참여기관명 : 제이와이건설 (김 원 태)



참여기관명 : (주)우현레미콘 (우 태 광)

협동연구기관책임자: 김 승 직

참여기관책임자: 김 대 진

참여기관책임자: 추 승 연

참여기관책임자: 김 원 태

참여기관책임자: 이 성 봉

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20RDRP-B148 167-07	해당 단계 연구 기간	2018.07.16.~ 2020.02.29	단계구분	3차년도 / 3차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술지역특성화사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	대경권 국토교통 지역특성화 기술개발			
	세부과제명	내진성능 향상을 위한 철근콘크리트 기둥의 직물섬유 보강 콘크리트 영구거푸집 개발			
연구책임자	김 승 직	해당단계 참여연구원 수	총: 26명 내부: 26명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부:72,500천원 민간:25,000천원 계:97,500천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 37명 내부: 37명 외부: 0명	총 연구비	정부:696,500천원 민간:240,000천원 계:936,500천원
연구기관명 및 소속 부서명	계명대학교 산학협력단			참여기업명: 제이와이건설, (주)우현레미콘	
공동연구	경희대학교 산학협력단 경북대학교 산학협력단				
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반등급				

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	6	출원2	9			1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

보고서 면수

<연구목표>

- 지속적인 지진발생 가능성을 고려하여 우수한 내진성능 확보가 가능한 “내진성능 향상을 위한 RC기둥의 직물섬유 보강 콘크리트(Textile Reinforced Concrete, 이하 TRC) 영구거푸집 개발”을 목표로 함

<연구내용>

- TRC 영구거푸집 상세개발 및 적용 부재의 내진성능평가
- TRC 영구거푸집 재료물성 평가 및 해석모델 개발
- TRC 영구거푸집 BIM 모델링 및 형상 최적화
- 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 현장 적용성 평가
- 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발

요약문

연구의 목적 및 내용	● 최근 대경권 지역에서 연달아 발생하여 많은 구조물의 피해를 야기한 국내 최대 규모의 9.12 경주지진, 11.15 포항지진과 같이 지속적인 지진발생 가능성을 고려하여 우수한 내진성능 확보가 가능한 “내진성능 향상을 위한 RC기둥의 직물섬유 보강 콘크리트(Textile Reinforced Concrete, 이하 TRC) 영구거푸집 개발”을 목표로 함 ● TRC 영구거푸집 상세개발 및 적용 부재의 내진성능평가 – TRC 영구거푸집 모듈 및 접합상세 개발 – TRC 영구거푸집을 적용한 철근콘크리트 기둥의 실험적 성능평가 – TRC 영구거푸집을 적용부재의 이력모델 개발 ● TRC 영구거푸집 재료물성 평가 및 해석모델 개발 – TRC 유효물성치 및 재료강도 산정을 위한 미소역학 기반 해석 및 평가 – TRC 영구거푸집 형상, 물성 최적화 및 구조해석 모델 개발 – TRC 영구거푸집 적용 부재의 구조설계기준(안) 개발 ● TRC 영구거푸집 BIM 모델링 및 형상 최적화 – 파라메트릭 디자인을 이용한 TRC 영구거푸집의 BIM 모델링 – TRC 영구거푸집 3D 모델의 속성정보를 활용한 물량산출 및 Digital Fabrication – TRC 영구거푸집 시공메뉴얼 개발 ● 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 현장 적용성 평가 – RC 기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용사례 분석 – TRC 영구거푸집 현장적용성 평가와 경제성 및 시장성 분석 ● 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발 – TRC PC 영구거푸집 규격화 및 제작 공정 최적화 방법 개발 – 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시				
연구개발성과	● TRC 영구거푸집 모듈/접합상세 개발 및 내진성능검증 ● TRC 영구거푸집 적용 부재의 구조설계기준(안) 제안 ● 거푸집 파라메트릭 모델링 가이드라인 및 TRC 거푸집 시공 매뉴얼 ● TRC 영구거푸집 적용 기술 경제성 분석 보고서 ● TRC 영구거푸집 PC 시제품 및 제작공정의 최적화 방법				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	● 국내 내진성능을 향상시킬 수 있는 영구거푸집에 대한 독자적인 설계기준(안) 확보가 가능하며, 이를 적용한 구조부재의 성능 평가법을 이용하여 국내 기술의 선진화 가능 ● TRC영구거푸집을 통한 내진성능 확보를 통하여 지진과 같은 자연재해로 인한 구조물의 손상 및 피해를 저감시킴으로서, 재난 시 복구에 드는 사회적 비용 절감 가능 ● 높은 부가가치 창출이 가능한 영구거푸집의 국내 독자적인 개발을 통하여 관련 분야의 해외시장 점유율 확대 가능				
국문핵심어 (5개 이내)	직물섬유 보강 콘크리트	영구거푸집	내진성능평가	RC기둥	BIM
영문핵심어 (5개 이내)	Textile Reinforced Concrete	Permanent Form	Seismic Performance Evaluation	RC Column	Building Information Modeling

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구개발 목표 및 개요	1
나. 연구개발 배경 및 필요성	2
다. 연구개발 대상의 국내외 현황	9
2. 연구수행내용 및 성과	14
가. 연구개발 추진전략·방법 및 추진체계	14
나. 연구수행 내용 및 결과	16
다. 연구수행의 개발 성과	104
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	107
가. 최종성과 목표 및 내용	107
나. 연구개발의 창의성·혁신성 등	108
다. 최종성과 목표 달성도 및 자체평가	109
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	116
가. 연구개발성과의 활용 방안	116
나. 연구개발성과의 기대효과	117
다. 사업화 계획	119
붙임. 참고 문헌	123

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목표 및 개요

- 본 연구는 최근 대경권 지역에서 연달아 발생하여 많은 구조물의 피해를 야기한 국내 최대 규모의 9.12 경주지진, 11.15 포항지진과 같이 지속적인 지진 발생 가능성을 고려하여 우수한 내진성능을 확보하고, 건설공사비 절감이 가능한 “내진성능 향상을 위한 RC기둥의 직물섬유 보강 콘크리트(Textile Reinforced Concrete, 이하 TRC) 영구거푸집 개발”을 목표로 함
- **혁신기술(Renovation)** : 연성능력이 우수한 직물섬유와 콘크리트의 융합을 통한 첨단 복합재료를 적용하여 구조물의 내진성능을 확보함으로써 국내·외 독보적인 기술 확보 가능
- **경제성(Economy)** : 내진성능 확보가 가능한 영구거푸집을 적용함으로써 지진 발생 시 구조물에 대한 피해 절감이 가능하며, 건설 공사 시 공기 단축을 통하여 총 건설공사비 절감이 가능
- **안전성(Safety)** : 개발 제품 적용을 통하여 지진에 대한 구조물의 내진성능을 확보함으로써 국가적 경제적 손실 및 인명피해 방지 가능
- **실용성(Practicality)** : 프리캐스트 형식의 영구거푸집 적용을 통하여 공기단축 및 시공성을 요구하는 산업체 요구에 부응할 수 있는 제품을 제공
- 본 연구개발진의 비전과 세부연구목표는 다음과 같다.
- 지진 피해 절감을 통한 국가적 이미지 제고 및 건설공사비 절감을 통한 건설 경제 활성화를 비전으로 함
- 각 세부연구목표는 그림 1.1과 같음



[그림 1.1] 본연구개발의 비전과 개요

나. 연구개발 배경 및 필요성

(1) 연구개발 배경

(가) 지속적인 대경권 지진 발생 가능성

- 대경권에는 이미 알려진 다수의 활성단층이 존재하며, 최근 2016년 9월 국내 지진계 측관측 사상 이래 최대 규모 5.8의 9.12 경주지진과 2017년 11월 최대 지진피해를 유발한 11.15 포항지진이 발생하였음
- 국내 지진계측관측 이래 지역별 지진 발생이력을 분석한 그림 1.2에서 보이듯이, 규모 3.0이상 발생 빈도는 대경권이 54%로 타 지역에 비하여 월등히 많음
- 특히 규모 5.0이상 규모가 큰 지진의 경우 대경권이 80%임에도 불구하고 최근에 발생한 9.12 경주지진 및 11.15 포항지진도 대경권 지역임을 고려한다면 지속적인 대경권 지역의 지진 발생 가능성을 배제할 수 없음
- 11.15 포항지진의 경우, 지난 9.12 경주지진으로부터 북동쪽 약 40km 지점에서 발생한 것으로 현재 지표면상으로 존재가 보고된 적이 없는 단층대를 따라 발생하였다고 한국지질자원연구원에서 보고하였음.
- 또한 11.15 포항지진을 통하여 대경권 전 지역에 걸쳐 이어지는 양산 단층대에서 아직 알려지지 않은 다른 활성단층의 존재가 입증되어 지속적인 지진 발생 가능성을 나타내고 있음
- 9.12 경주지진 이후 단층 방향을 따라 응력이 축적되고 있다고 보고되고 있어, 일부 지진학자의 경우 이번 11.15 포항지진으로 이런 지역이 확대되어 경주 북부지역과 영천, 밀양, 청송지역이 지진 우려 가능성이 높다고 보고함
- 따라서 최근 지진 피해가 발생한 경주, 포항 지역뿐만 아니라 대경권 전체가 지진 우려 지대이며, 이로 인한 지진피해의 가능성을 배제할 수 없음



[그림 1.2] 국내 지진 발생 현황



[그림 1.3] 대경권 주요 단층 현황 (한국경제신문, 2017)

(나) 대경권 구조물의 지진 피해 대응을 위한 내진성능 확보 기술 구축의 시급

- 최근 발생한 11.15 포항지진의 경우 9.12 경주지진보다는 낮은 규모임에도 불구하고, 지진발생 깊이가 얕고 상대적으로 중·저 주파수 영역에서 증폭이 되는 특성을 나타냄으로서 많은 필로티 구조물 및 아파트와 같은 다가구 주택에서도 심각한 전단균열이 발생하였음
- 지진 피해를 입은 구조물의 경우 긴급 보수·보강 작업이 진행되었으나, 일부 구조물에서는 심각한 변형이 발생하거나 구조 요소의 심각한 전단파괴가 발생하여 ‘붕괴’ 수준으로 보수·보강도 불가능한 사례가 발생하였음
- 또한, 국가적 재난 등 비상 시 대피장소로 사용되는 공공 시설물에서도 구조 부재에 대하여 심각한 전단파괴가 발생함에 따라 본래의 역할을 수행할 수 없었으며, 국가적 행사(수학능력시험)가 연기되는 상황이 발생하였음
- 대경권 뿐만 아니라 국내의 주된 주거형식인 필로티 건축물의 주된 피해 원인은 내진설계가 적용되었음에도 불구하고 도면과 상이하게 시공되거나 불량시공으로 인하여 충분한 내진성능이 확보되지 못하였음
- 따라서 충분한 내진성능 확보가 가능하며 설계도면과 상이하게 시공되거나 불량 시공을 방지하기 위해서는 초급자도 쉽게 시공이 가능하며, 균일한 품질 유지·관리가 가능한 제품이 필요



(a) 필로티 구조물 기둥 전단파괴



(b) 아파트 전단균열

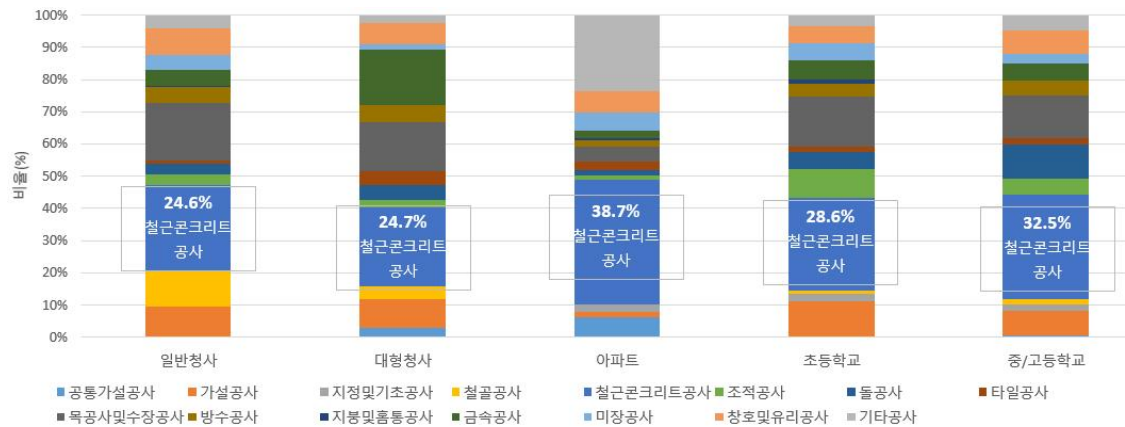


(c) 초등학교 기둥 전단파괴

[그림 1.4] 11.15 포항 지진으로 인한 구조물의 피해 사례(2017)

(다) 전체 건설공사비의 거푸집 공정에 대한 공사비 및 공사기간 절감 가능

- 거푸집 공사비는 일반적으로 골조 공사비의 30~40%, 전체 공사비의 약 10% 정도를 차지하는데 가설 구조물로서는 상당히 높은 공사비를 가지며, 공정은 골조 공정에서 60%, 전체 공사기간 중에서 약 25% 정도의 비중을 차지하는데 단일 공정으로는 상당히 긴 시간이 요구됨

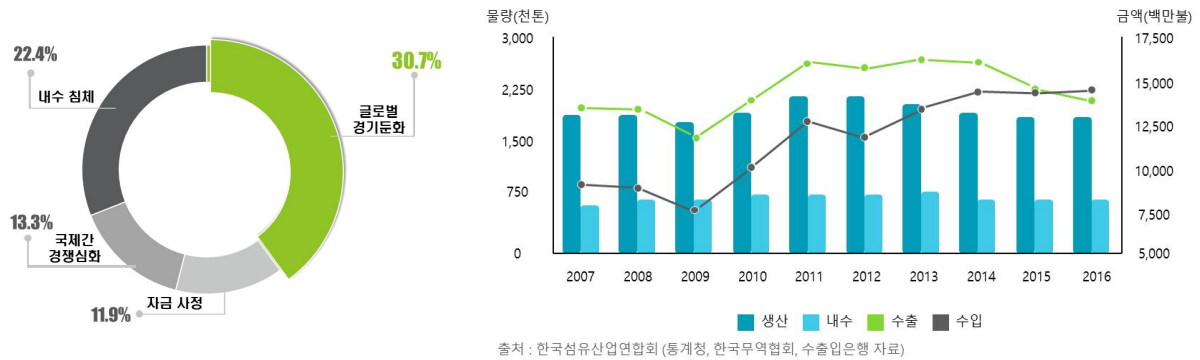


[그림 1.5] 공공시설물 별 골조 공사 비율(조달청)

- 공종별 금액 외 재료비, 노무비, 경비, 기타 등의 간접비용을 비교 분석하면 노무비가 전체 공사비의 평균 40%로 가장 높은 비율을 나타내며, 이는 비탈형 영구거푸집을 활용한다면 불필요한 노무비용의 절감이 가능하므로 전체 공사비저감을 유도할 수 있음
- 또한, 국내 건설현장의 숙련 기능공 부족, 작업자 고령화 등으로 인해 야기된 과거의 지속된 노무비 상승 추세와 함께, 최저임금상승 및 근로시간 단축 등의 정부의 정책을 반영할 경우, 향 후 거푸집 현장 작업 단가는 더욱 상승할 것으로 예상됨
- 건설 산업 분야에서 공사비 절감은 가장 관심을 많이 가지는 분야이며, 많은 연구와 공법들이 적용되고 있음에 따라 공사비를 절감할 수 있는 기술이 개발된다면 대경권 뿐만 아니라 해외시장 진출도 가능

(라) 최근 대구, 경북(이하 대경권) 섬유업계 경기 침체

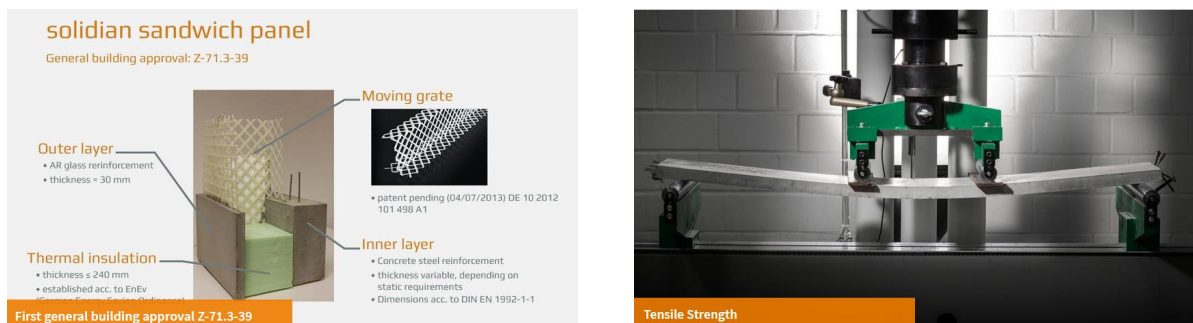
- 최근 대경권의 섬유류 수출 실적이 2009년 23억 4천 200만달러를 기록한 이후 최저치(23억 1천 400만달러)를 기록하였음 (한국섬유개발연구원). 이러한 경영위협 요인으로서는 글로벌 경기둔화(30.7%)로 가장 높았고 내수침체(22.4%), 국제간 경쟁심화(13.3%), 자금 사정(11.9%)을 포함하고 있음
- 특히 대구·경북지역의 섬유류 수출의 약 57%를 차지하고 있는 직물류의 수출이 전년 대비 2.3% 감소한 것으로 조사되었고(2017년) 이와같은 문제점의 원인은 글로벌 경기둔화, 원자재 수급불안, 품질관리, 생산인력부족, 생산설비 부족 등임
- 대구·경북지역 130개 섬유업체를 대상으로 2016년 섬유경기 전망 설문조사를 실시한 결과 기업경영 기회요소로 품질안정화(25.6%), 신시장 개척(20.8%), 신상품 출시(18.4%) 등의 순임
- 대구·경북지역의 경우 섬유산업을 포함하여 메카트로닉스, 전자정보기기 등을 지략산업으로 선정하여 중점 육성하고 있으나 수출추이는 점차 감소하는 추세로 섬유산업의 신분야 개발 등이 이루어질 필요가 있으며, 건설재료로의 활용분야 확대 방안도 검토 할 필요가 있음



[그림 1.6] 연도별 대경권 섬유 산업 동향

(마) 구조물의 내진성능향상을 위한 첨단 복합재료 TRC 적용 연구 중대

- 국내에서는 현재 직물섬유를 적용한 TRC에 대한 기술을 확보하고 있는 업체는 없는 상황이나 국외에서는 일부 연구소에서 TRC 관련 연구를 수행과 동시에 제작을 진행하고 있으며, 극소수의 TRC를 생산하는 업체가 있음
- 독일 아헨공대(RWTH) 기계공학과내 Textile Technology 연구소에서는 Carbon, AR-Glass, Basalt(현무암) Fiber를 이용하여 다양한 직물섬유를 생산하고 있으며, 연구소 구조물의 외벽에 TRC 패널로 시공한 사례가 있음
- 비금속 보강재를 이용한 시공회사 ‘Solidian’에서는 섬유 보강재는 산화하지 않기 때문에 철근을 대체할 경우 부식으로 인한 피해를 방지할 수 있으며, 재활이 가능하다는 장점으로 TRC 제품을 생산하고 있음
- 외관 패널의 경우 TRC를 사용하면 최대 80%의 비용절감이 가능함
- 하지만, 이 기업에서 제작되는 TRC 제품은 철근을 대체하기 위하여 개발된 제품으로서 구조물의 경량, 철근의 부식으로 인한 피해 방지 등의 장점이 있지만 내진성능 향상은 불가능한 상황임
- 따라서 내진성능 확보가 가능한 TRC 첨단 복합재료를 이용하여 개발된 영구거푸집은 국제시장 독점이 가능하며, 경제 활성화에 이바지 할 것으로 판단됨



[그림 1.7] TRC 생산 제품 개요(Solidian)

(2) 연구개발 필요성

(가) 내진성능향상을 위한 RC기둥의 TRC 영구거푸집 개발 연구의 필요성

- 본 연구의 필요성은 (1) 대경권 건축물 RC기둥의 지진 피해 저감 기술 확보, (2) 건설 공사비 저감을 위한 적정기술 확보, (3) 시공 상의 오류에 대한 대응 및 품질 확보, (4) 지진대응기술 정부지원의 필요성으로 크게 4가지로 나눌 수 있음
- 각 필요성에 대한 상세 내용은 아래 그림에서 표현함



[그림 1.8] TRC 영구거푸집 개발 연구의 필요성

(나) 대경권 건축물의 지진 피해 저감 기술 필요

- 최근 발생한 9.12 경주지진과 11.15 포항지진의 발생으로 대경권 지역에서의 추가적인 지진 발생 가능성이 입증되었으며, 특히 11.15 포항지진에서 필로티 및 아파트와 같이 다수의 시민들이 주거하는 구조물에 대한 피해가 심각하게 발생하였음
- 11.15 포항 지진에 의하여 저층 주택인 필로티 구조물에서 가장 많은 피해가 발생하였으며, 필로티 구조물의 피해는 기둥 전단 철근의 부족, 기둥 시공 불량, 코어벽의 편심배치 등의 이유로 지진에 많은 피해가 발생하였음
- 11.15 포항지진의 경우 2개 시·도, 9개 시·군·구에서 551억 원의 재산 피해가 발생한 것으로 집계됨에 따라 9.12 경주지진보다 규모가 작지만 약 5배 많은 피해가 발생하였음

[표 1.1] 9.12 경주 및 11.15 포항지진 피해 현황 (영남일보)

	최고 진도	인명피해	피해액	사유시설 피해액	피해 복구비	여진 2018년도 05월01일 기준
경주지진 (2016.09)	규모 5.8	부상자 23명	110억원	35억원	145억원	124회
포항지진 (2017.11)	규모 5.4	부상자 92명	551억원	294억원	1,455억원	100회

- 건축법 시행령 제 32조의 경우 2017년 10월 24일부로 구조물의 연면적 및 층수와 관계없이 단독주택 및 공동주택 모두 내진설계 적용 대상 구조물임을 개정하였으며, 이는 실질적으로 모든 건축물에 대하여 내진설계 적용을 의무화하는 내용을 내포하고 있음
- 지진 발생 및 피해가 가장 높은 대경권의 내진확보율은 대구가 8.2%로 11번째, 경북이 3.5%로 3번째 낮은 수준임
- 따라서 국내는 지진에 대하여 안전하다고 인식되어왔던 과거와 달리 11.15 포항지진의 피해로부터 이제 더 이상 국내도 안전하지 않음이 입증되었으며, 이에 과거에 내진설계가 고려되지 않은 구조물부터 현재 내진설계를 고려하여 신축되는 구조물까지 충분한 내진성능 확보는 필수적임



(a) 내진설계기준 강화 변천사(건축법 시행령 제 32조) (b) 대경권 주택 내진 확보율 현황

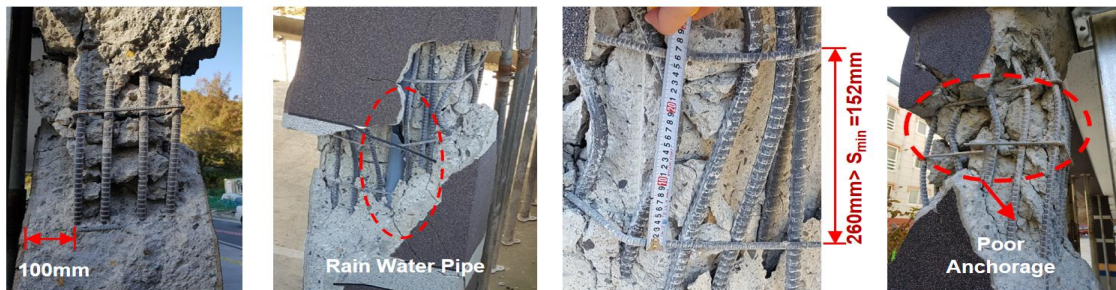
[그림 1.9] 내진설계기준 강화 변천사 및 대경권 주택 내진 확보율 현황

(다) 건설공사비 저감을 위한 적정기술 확보 필요성

- 앞에서 언급되었듯이 공종별 금액 외 재료비, 노무비, 경비, 기타 등의 간접비용 중 노무비가 전체 공사비의 평균 40%로 가장 높은 비율을 나타내, 침체된 건설산업의 활성화를 위하여 노무비를 줄여 전체 공사비를 저감시킬 수 있는 적정기술이 필요함.
- 건설공사비의 많은 비율을 차지하고 있는 거푸집의 경우, 조립 후 콘크리트 타설 후 필요한 강도만큼 경화가 완료되면 탈형을 하는 반복적인 공정임
- 총 공사기간에 약 25%를 차지하고 있는 거푸집 공사에서 성능유지 및 내진성능 확보가 가능하되 공사기간을 단축하여 공사비를 저감할 수 있는 제품 개발은 필요함

○ 11.15 포항 지진 피해를 통해 나타난 시공 상의 오류에 대한 대응 및 품질 확보가 가능한 적정 기술의 필요성

- [그림 1.10]에서 나타나 있듯이 설계도면에서 제시된 바와 상이하게 100mm 가까이 되는 피복두께, 콘크리트 기둥 구조 부재 내부에 배관 포함 및 부적절한 철근의 정착으로 인한 시공상의 오류로 인하여 RC 기둥의 성능이 저하됨에 따라 지진피해가 발생하였음.
- 또한 일부 필로티 구조물의 경우에는 도면상 중간모멘트골조로 기둥의 전단철근이 배근되었으나, 그림에서 나타나듯이 비내진 상세로 시공되어 피해가 발생하였음
- 현재 시공되는 대부분의 구조물에서 설계도면에 따라 시공되어지지만, 11.15 포항 지진 피해 사례에서 나타나 있듯이 철근의 배근과 같은 구조적인 요소에 대한 정확한 검토가 이루어지지 않고 있으며 콘크리트 타설 이후에는 품질 검증이 어려움
- 또한 대부분의 내진성능 향상을 위한 보강 제품은 현장에서 제작 및 시공이 이루어 지므로, 품질이 균일하지 않고 시공자의 기술력에 따라 보강성능이 결정됨
- 따라서 프리캐스트 방식과 같이 개발제품의 공장생산을 통하여 균일한 품질을 확보할 수 있으며, 시공 상의 오류를 극복할 수 있는 대체 기술의 개발이 필수적임



[그림 1.10] 11.15 포항 지진 피해를 통해 나타난 시공 상의 오류에 의한 피해 사례

(라) 지진대응기술 정부지원의 필요성

- 현재 포항지진으로 인해 발생한 건축물의 심각한 피해는 내진설계가 적용되었음에도 불구하고 도면과 상이하게 시공되거나 불량시공으로 인하여 발생한 경우가 많았음.
- 대경권의 경우 지속적인 지진발생 위험도가 높으며 포항지진보다 더 큰 규모의 지진 발생 가능성이 계속 존재한다는 점을 고려할 때, 구조물 전체 취약성의 가장 중요한 부재인 수직부재의 불량시공을 방지하여 내진성능을 확보하지 않는다면 국가적으로 막대한 인적 및 경제적 피해를 야기할 수 있음
- 지속적인 노무비 상승과 함께 최저임금상승 및 근로시간 단축 등의 정부의 정책을 고려할 때, 건설경기 활성화를 위하여 건설분야의 인건비를 절감할 수 있는 기술 개발을 정부에서 적극적으로 지원할 필요가 있음.
- 따라서, 지속적인 지진 발생 가능성을 고려하여 우수한 내진성능을 확보하고, 건설공사비 절감이 가능한 본 연구과제는 국가 내진정책의 신뢰성 확보를 위해 국가적인 지원이 절실한 상황임

다. 연구개발 대상의 국내외 현황

(1) 국내 기술수준 및 시장현황

(가) 특허 동향

- 영구거푸집의 특허의 경우 대부분이 새로운 방식의 영구거푸집 개발보다는 시공방법에 대한 특허가 주를 이루고 있으며 국내의 경우 전 세계를 기준으로 21%의 특허를 보유
- 국내의 영구거푸집 특허 동향을 분석한 결과, 대부분이 공사기간 단축을 위한 용도를 위한 것으로, 내진성능 향상을 목적으로 하는 영구거푸집은 없음
- 거푸집 관련 BIM의 특허의 경우 거푸집에 대한 특허는 전무하지만 건축 견적 산출 및 물량산출에 대한 특허가 주를 이루고 있음
- TRC의 경우 특허명과 초록으로 검색한 결과 국제 특허 총 55여개의 관련특허가 검색되지만, 국내에서는 검색 되지 않으며, 다만 국내의 경우 Textile을 이용한 지오그리드 관련 특허 4건이 존재

번호	출원번호	특허명	내용
1	10-2014-00155726	성형강판을 이용한 기동 영구거푸집	콘크리트 타설 시 거푸집의 역할을 하며, 콘크리트 경화 후 콘크리트와 일체로 합성되고 콘크리트에 대한 구속효과를 부여하는 성형강판을 이용한 영구거푸집임
2	10-2009-0109770	강섬유 보강 시멘트 복합체를 사용한 고내구성 프리캐스트 영구 거푸집	시멘트, 반응성 분체, 모래, 충전재 및 강섬유로 구성된 강섬유 보강 시멘트 복합체를 사용하고, 콘크리트와 일체성을 확보하기 위해 돌기 형태의 리브와 굽은 골재로 구성된 표면을 가진 영구거푸집임
3	10-2012-0018331	선조립 기동용 영구거푸집	PRC 및 PSRC의 철근망 제작 단계에서 거푸집을 미리 부착하고 현장에서 콘크리트 타설만으로 기동이 완성되는 영구거푸집임
4	10-2014-0132740	BIM을 이용한 건축 개산견적을 위한 단위단가 정보 연산 및 분류 방법	BIM을 이용한 구조 및 마감에 단위단가를 연계하여 건축물의 정보모델 생성과 함께 산출물량에 대해 개산견적을 실시간으로 확인할 수 있는 기술임
5	10-2014-0116546	건축설계 단계에서 BIM을 이용한 개산견적을 위한 자동 물량산출 연산 방법 및 정보 분류 시스템	건축설계단계(계획설계, 기본설계, 실시설계)에서 개산견적을 위한 자동 물량산출 연산 방법 및 정보 분류 시스템
6	10-2013-0019028	BIM을 이용한 골조 공사의 개산견적 연산 방법	BIM을 이용한 골조공사의 공사비 및 물량산출을 하는 방법

(나) 연구 동향

- 대다수의 연구들이 콘크리트와 영구거푸집 사이의 일체화를 위한 연구를 수행하였으며 일부 부재적 실험을 통하여 휨 및 전단 거동에 대해 평가하였지만, 수평부재에 한

하여 실험을 통해 평가되어 있음

- TRC를 이용한 영구거푸집에 관한 논문은 없으며, 국내에서는 철근을 대신하여 사용하는 용도로서, 실험적 성능평가가 수행되었지만, 매우 기초적인 상황에 머물러 있음
- 거푸집 관련 BIM에 관련한 논문 동향을 살펴보면, BIM을 이용한 거푸집의 설계에 관한 연구, 또는 BIM을 통한 물량산출로 인한 시공성 개선에 관한 연구는 다수 있었으나 실제 공사현장에서의 공기단축과 공사비 절감에 직접적인 관련을 맺기가 어려운 실정임
- 또한 비정형 거푸집의 논문들의 경우 거푸집 제작 기계의 성능, 모듈 시공 방법 개선에 관한 연구들이 수행되었지만 아직 거푸집의 형태적인 제약에서의 한계를 보이고 있으며, 거푸집 모델의 Mock-up 단계까지 수행하여 실효성 입증한 연구가 미비한 실정임

키워드	저자 및 발행년도	내용
영구거푸집	김우재와 정상진 (2002)	영구거푸집의 가장 큰 문제점 중 하나인 콘크리트와 부착성능을 향상시키기 위하여 무기질계 영구거푸집의 내부에 여러 형상의 보강 재료를 적용하여 실험 후 분석하였음
	유승운과 배한욱 (2007)	FRP 판을 이용한 영구거푸집 및 인장 보강재로 활용을 위한 콘크리트 교량 바닥판 시스템 개발에 대한 기존의 문제인 콘크리트와의 일체성에 대하여 연구하였으며, FRP판과 타설 콘크리트 사이의 부착 및 슬립에 관한 새로운 방안을 제시하였음
TRC (Textile Reinforced Concrete)	정규산 (2017)	TRC의 안전한 사용을 위해 TRC의 박리로 인한 취성적인 거동을 보이는 TRC로 휨 보강된 RC 보의 거동을 예측하고자 실험을 수행하여 분석하였음
	박종호 (2017)	철근을 사용하지 않고 Mesh로 구성된 텍스타일의 횡방향 보강 방법 변화에 따른 부착성능을 비교 분석하고자 실험을 수행하여 분석하였음
3D BIM 거푸집	전기현 외 1인 (2011)	BIM의 건적 활용성에 대하여 알아보고자 기본적인 콘크리트 량과 거푸집 량을 일반 2D 기반의 방식으로 물량을 산출하고, 3차원 캐드를 통해서도 같은 내용의 물량을 산출하여 BIM 건적의 활용성과 그 정확도를 검토하고 문제점들을 분석하여서 BIM의 효율성을 높이는 방법을 연구함
	최창훈 외 4인 (2014)	BIM기반의 물량산출 데이터를 활용하여 생산성을 분석할 수 있는 방안을 제시할 목적으로 진행하여 3D BIM기반 모델을 기반으로 부재의 물량정보를 활용하여 물량을 산출하였으며, 이를 활용하여 현장 생산성을 도출하여 통합 생산성 기준과 비교·분석함
비정형 거푸집	이동운 외 3인 (2017)	비정형 거푸집의 생산성을 향상시키기 위한 QFD 접근법을 이용하여 사용자의 요구를 기술 특성에 반영하고 사용자의 요구 사항과 기술적 특성 간의 상관관계를 분석 한 다음 그 중요도에 따라 가중치를 부여함
	서정환과 홍대희 (2017)	비정형 건축물을 짓기 위한 EPS 거푸집 공법에서 EPS 거푸집을 가공하는 EPS Foam 가공기 메커니즘 개발에 대해 연구함

(2) 국외 기술수준 및 시장현황

(가) 특허 동향

- 영구거푸집에 관련한 특허 중 일본이 약 54%의 특허를 보유하고 있으며 특허의 내용을 살펴보면, 구조물의 외관, 석회 세척양, 공사기간 단축 등 다양한 용도와 재질의 영구거푸집이 존재하지만 TRC를 이용하여 내진성능향상을 위한 용도로 출원된 특허는 없음
- TRC 특허의 경우 국내에서는 전무하였지만 국외의 경우 미국이 27%, 유럽이 22%, 세계지적재산권기구(WIPO)가 25%를 보유하고 있고 일부분이 건축물의 구조적인 요소가 아닌 방음과 같은 용도로 출원되어 있음
- TRC를 보강을 위한 용도로 활용한 특허가 존재하지만 기초적인 방법론을 제시하고 있는 수준이며, 특히, 영구거푸집을 용도로 출원된 사례는 존재하지 않음
- 3D BIM 거푸집 관련 특허출원의 경우 다른 나라에서는 특허출원을 하지 않았음

번호	출원번호	특허명	내용
1	JP -0307827	Fiber-Reinforced Concrete-Made Permanent Form	공장에서 미리 제조 할 수 있는 섬유 강화 콘크리트 영구거푸집으로서, 경량의 형태로 운반이 용이하며, 현장에서 간단하게 조립 후 사용이 가능한 영구거푸집임
2	JP -0232968	Permanent Form Made of Fiber Reinforced Resin for Use of Reinforced Concrete Floor Slabs	섬유 강화 수지로 제조되었으며, 현장에서 운반이 용이 할 만큼 경량이며, 콘크리트 타설 후 슬래브의 일부가 되어 장기간 부식과 같은 외부환경으로부터 보호하는 영구거푸집임
3	JP -0104333	Ceramic Permanent Form and Construction Method Thereof	표면 장식용 보드로서의 역할을 수행하는 영구거푸집임
4	AT -0000337	Prestressed Planar Load-Bearing Structure Made of Fiber Concrete and Textile Reinforced Concrete	섬유 콘크리트 및 직물 보강 콘크리트로 제조된 내하력을 지니는 얇은 벽 형태의 제품으로서 섬유의 프리스트레스에 의해 콘크리트와 함께 결합됨
5	US -0402769	Textile-Reinforced Concrete Component	격자 배열에 의해 형성된 섬유강화 구조물을 포함하고 있으며, 격자모양의 섬유와 섬유 사이에 서브 횡단면을 갖는 이중로드를 포함함으로써 적절한 내하력을 지니는 복합 재료임
6	FR -0051991	Composite System and Method for Reinforcing, In Particular, Structures Made from Reinforced Concrete or Masonry Comprising a Curable or Cured Matrix and Textile Reinforcement Grid Constituting Said System	경화된 매트릭스와 직물 보강 그리드를 포함하는 철근 콘크리트 또는 조적조로 시공된 구조물을 보강하기 위한 복합 시스템

(나) 연구 동향

- 국외의 TRC 논문동향을 살펴보면, TRC를 적용한 RC보에 대하여 기존의 섬유 보강과 비교를 통한 실험적 성능평가를 통해 TRC의 성능이 입증되었지만, 국내와 마찬가지로 TRC를 이용한 영구거푸집의 성능을 평가한 사례는 전무함
- 국외의 3D BIM 거푸집 관련 논문동향을 살펴보면, 3D 프린터를 이용한 거푸집 제작에 관한 연구가 주를 이루고 있으며, 3D 스캐너를 이용한 역설계 등의 연구가 수행되고 있을 뿐, BIM을 이용한 거푸집 모델 자동생성을 하려는 시도는 미비함

키워드	저자 및 발행년도	내용
영구거푸집	Fahmy et al. (2005)	균열 제어 및 충격에 우수하며, 높은 에너지를 흡수하는 영구거푸집 제작을 위해 철근 적층판을 사용하여 거푸집 제작 및 실험을 수행하여 성능을 평가하였음
TRC (Textile Reinforced Concrete)	Larbi et al. (2010)	TRC를 적용한 RC보의 실험적 성능평가를 통하여 운반능력 및 휨 강성이 CFRP로 보강된 실험체보다 높음을 분석하였으며, Ritter-Morsch의 전단강도 예측 모델을 이용하여 실험값과 비교·분석을 통해 충분히 예측 가능함을 분석하였음
	Larbi et al. (2012)	하이브리드 솔루션을 이용하여 TRC 및 CFRP를 적용한 RC보의 실험값과 수치해석적 접근을 통하여 보강된 RC보의 전체 거동을 분석하였음
3D 거푸집	Mehmet Sakin (2017)	미래의 지속 가능한 주택을 위한 건물의 3D 프린터의 새로운 기술을 제시하고 BIM기술과 결합된 3D 프린팅 기술과 전통적인 건축 기술과 비교, 분석함

(3) 선행 연구 내용 및 결과

(가) 타 연구진의 선행 연구 내용 및 결과

- 본 연구제안과 관련하여 기 수행된 유사과제는 다음과 같음
- 수행된 유사과제

번호	부처명	연구기간	과제명	예산(백만원)	비 고
1	한국연구재단	2017.03~2020.02	프리스트레스 TRM(Textile Reinforced Mortar)을 활용한 철근콘크리트 구조물 보강 기술 개발	100.00	
2	교육부	2016.11~2019.10	지속가능한 콘크리트 구조물을 위한 Textile 보강재의 적용	50.70	
3	중소기업청	2004.04~2005.05	레진 콘크리트를 이용한 영구거푸집 개발	92.00	

○ 연구개발과제의 차별화 방안

- 지금까지의 연구나 특허는 TRC를 활용하여 프리캐스트 구조 부재의 보강재로서의 연구만 수행되고 대부분의 영구거푸집이 공사기간 단축을 위한 용도로 제작되어 있으며, 내진성능 향상을 목적으로 하고 있는 영구거푸집 개발은 미비한 상황임. 본 연

구과제는 TRC를 활용한 프리캐스트 형식이지만 구조 부재로 활용보다는 영구거푸집으로서 활용하는 명확한 차별성이 있음

- 특히, 프리캐스트 형식의 부재에서 운반에 따른 감소 및 철근의 부식 문제를 해결하고자 철근 대신 Textile을 활용한 영구거푸집을 적용하여 구조물의 내진성능향상을 목적으로 기존 연구와 비교하여 차별성이 뚜렷함

(나) 본 연구진이 수행한 선행 연구 내용 및 결과

- 본 연구제안과 관련하여 본 과제 제안 연구진이 수행한 유사과제는 다음과 같음

○ 수행된 유사과제

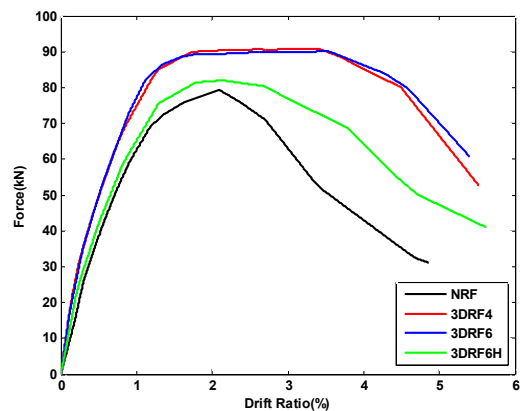
번호	부처명	연구기간	과제명	예산(백만원)	비 고
1	산업통상자원부	2014.05~2017.04	토목용 섬유강화복합체 개발	934.00	

○ 연구 내용 및 결과

- 3D UHMWPE 섬유와 모르타르를 이용하여 구조물의 내진성능을 향상 시킬 수 있는 3D 섬유강화복합체를 개발 및 실험적 내진성능평가를 수행
- 또한, 변수로는 섬유강화복합체 내부의 3D UHMWPE 섬유의 간격을 이용하였으며, 무보강 실험체 및 기존에 사용되는 2D 섬유강화복합체와 비교·분석을 통하여 성능을 검증하였음



[그림 1.11] 3D 섬유강화복합체 보강 실험체



[그림 1.12] 포락곡선 비교

- 실험결과, 3D 섬유강화복합체로 보강된 실험체의 경우 무보강 실험체와 비교하여 최대 전단강도가 약 20%, 연성비가 약 182%, 누적 에너지소산량이 약 123.45% 증진됨을 나타냄

○ 연구개발과제의 차별화 방안

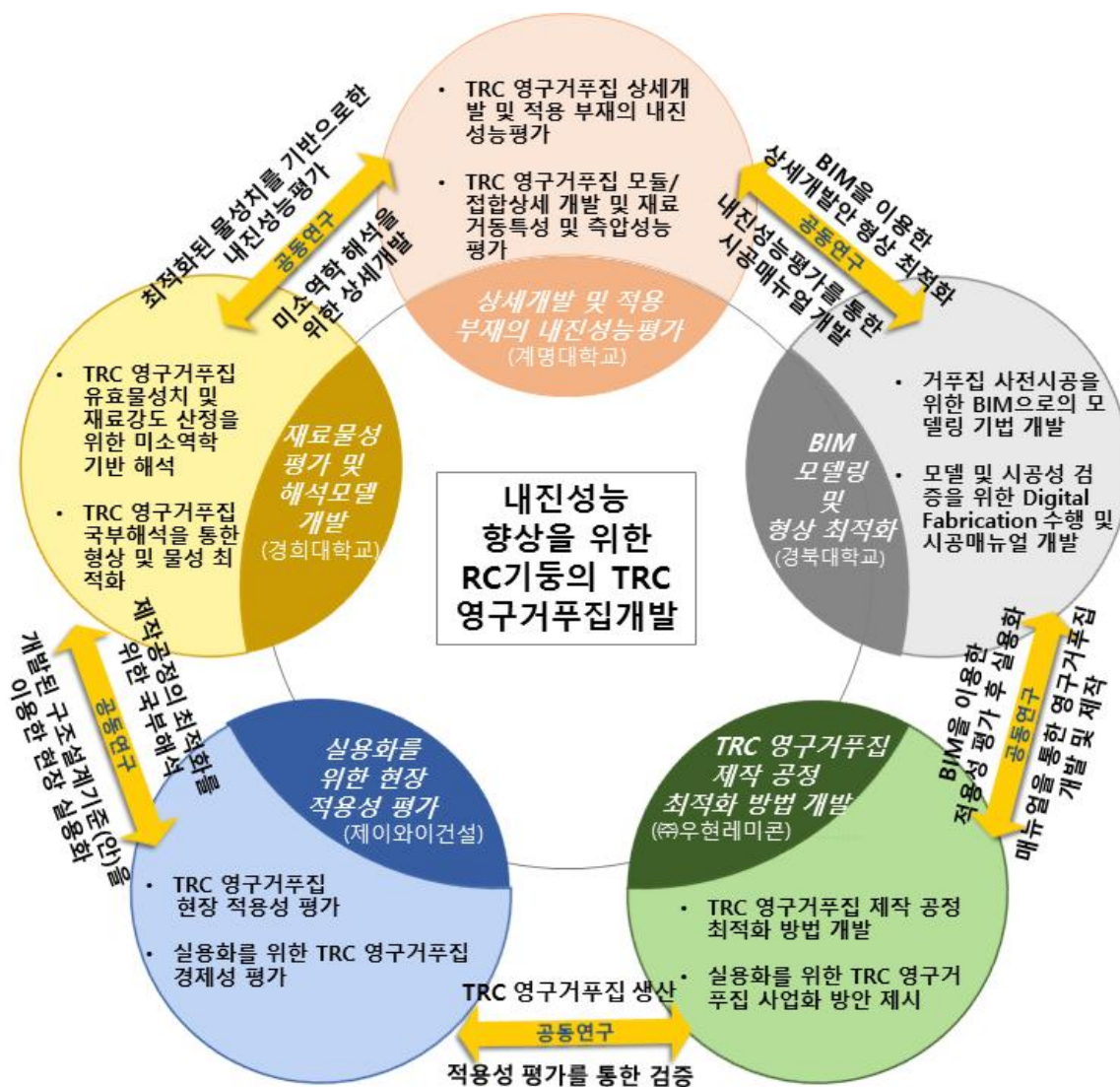
- 기존에 연구진에서 수행된 유사과제는 3D UHMWPE와 모르타르를 이용한 보강재로서 내진성능 향상 측면에서는 본 과제와 유사할 수 있으나, 본 과제에서는 Textile의 활용 및 영구거푸집으로서 구조물에 적용된다는 점은 큰 차이점을 나타냄
- 이에, RC부재에 보강재 부착을 통한 일체화 방안은 본 연구과제에서 수행하려는 영구거푸집으로서의 일체화 방안을 마련하는 부분과는 많은 차이를 나타냄

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구 개발 추진전략 · 체계 및 추진일정

(1) 연구개발 추진전략 및 방법

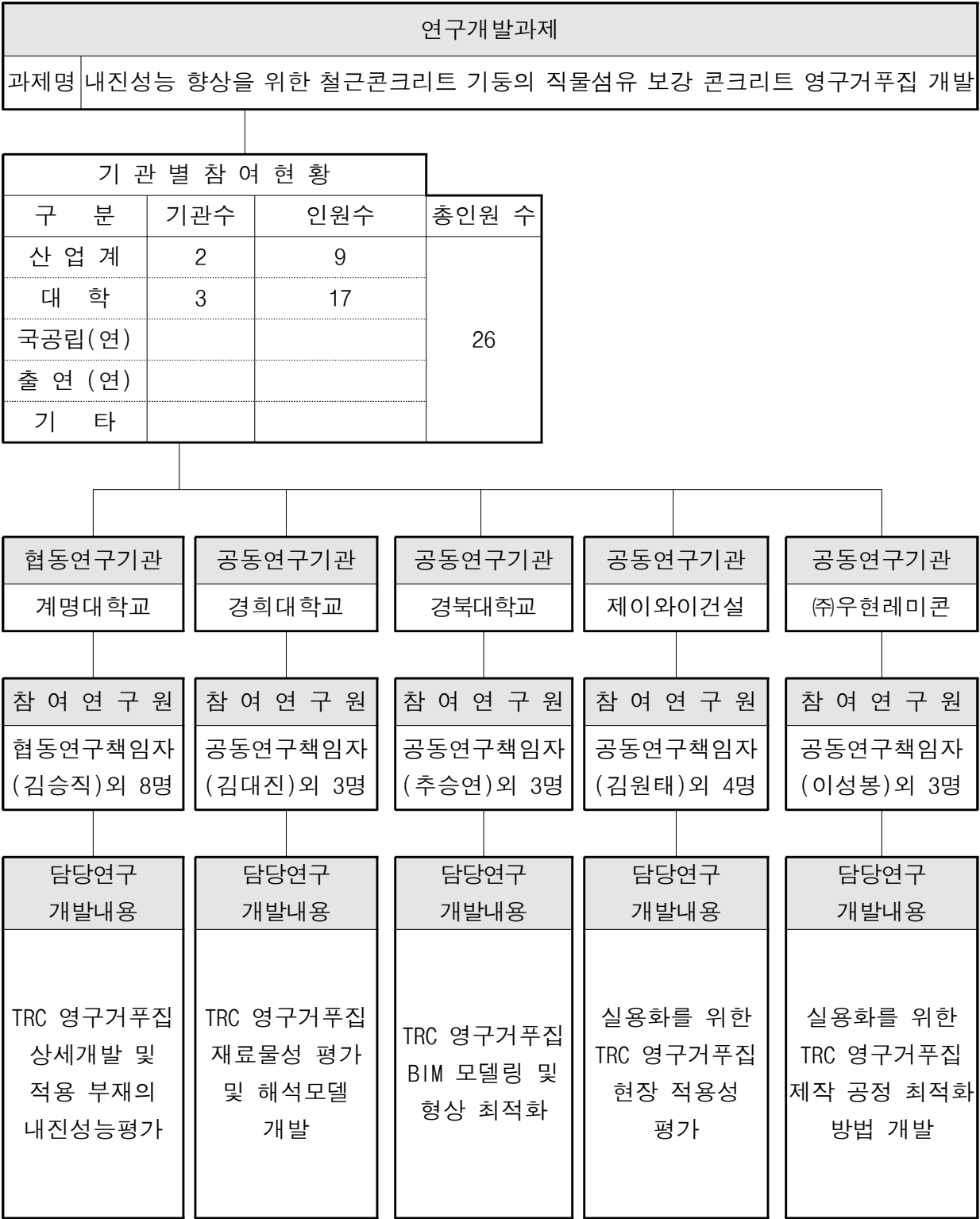
- 본 연구는 1개의 협동기관과 함께 2개의 기업을 포함한 4개의 공동연구기관이 참여하여 연구를 수행하였으며, 추진전략은 [그림 2.1]과 같음



[그림 2.1] 본 과제의 연구개발 추진전략과 방법

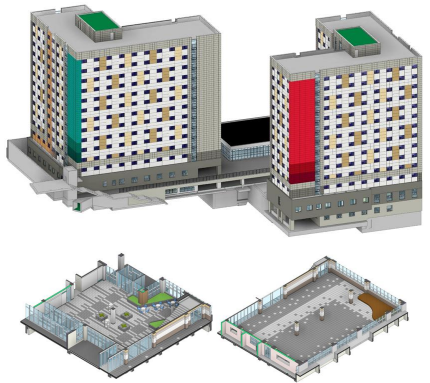
- 상대적으로 짧은 연구기간(1년 9개월) 동안 연구목표를 달성하기 위하여 관련 분야의 전문가들을 활용함
- 연차별 연구보고서 작성 시 성과물의 질적 향상을 통한 신뢰성을 확보하기 위하여 전문가들을 활용함

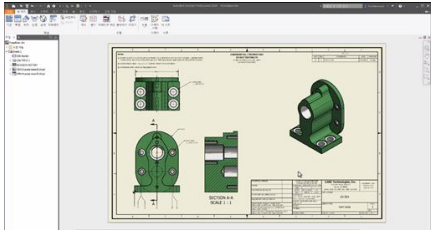
(2) 연구 개발 추진 체계



나. 연구수행 내용 및 결과

(1) 연차별 연구범위 및 연구수행방법

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2018)	[협동] 계명대학교 TRC 영구거푸집 모듈 및 접합상세 개발 및 측압실험 수행	TRC 영구거푸집 모듈 및 접합상세 개발 및 측압실험 수행	콘크리트와의 부착성능 향상을 고려한 TRC 영구 거푸집 및 접합상세 개발	■ 제작공정 및 공기절감을 위한 TRC 영구거푸집 모듈 상세 개발 ■ 부착성능 향상을 고려하여 TRC 영구거푸집 단면에 전단키(Shear Key)가 있는 형상 개발 ■ 접합부에서 발생 가능한 거푸집 떠오름, 시멘트 누수 등의 하자를 방지할 수 있는 접합상세 개발
	[공동1] 경희대학교 TRC 영구거푸집 재료물성 평가 및 해석모델 개발	미소역학 기반 TRC 영구거푸집의 유효물성치 평가	미소역학 기반 TRC 재료 의 유효물성치 평가 기법 개발	■ 미소역학을 기반으로 한 TRC 재료의 유효물성치를 평가할 수 있는 기법 개발 ■ 이론식과 개발된 TRC 복합재료 유효물성치 평가법의 비교 및 4점 휨 실험결과를 이용한 검증
	[공동2] 경북대학교 파라메트릭 디자인을 이용한 TRC 영구거푸집의 BIM 모델링	거푸집 파라메트릭 모델링 가이드라인(안)	BIM 모델 요구정보 분석 필요 정보 추출을 위한 LOD 수준 정립 및 파라메트릭 지원도구를 활용한 모델링 기법 개발 및 구현	■ BIM 모델 적용 사례 조사 및 분석  ■ BIM/파라메트릭 도구 분석 및 Workflow 도출 

				 BIM 요구정보 분석을 통한 거푸집 파라메트릭 가이드라인(안) 도출
	【공동3】 제이와이건설 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 현장 적용성 평가	RC기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용 사례 분석	11.15 포항지진에서 드러난 RC기둥의 시공 불량 사례 및 시공 현장의 문제점 분석 현재 영구거푸집 적용 사례 분석	- 포항 지진 사례를 중심으로 중소규모 RC 구조물 기둥의 시공에 관한 문제점 파악 결과, 1층 필로티 기둥과 코어의 손상도가 심각한 수준으로 평가됨 - 중소규모 RC 구조물의 시공 실태에 대한 설문 조사로 문제점 조사 - RC 구조물의 탈형 거푸집 조사 및 비탈형 영구 거푸집의 사례 조사
	【공동4】 (주)우현레미콘 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발	TRC PC 영구거푸집의 모듈화 개발	- TRC PC 영구거푸집의 모듈화 상세 제시 - TRC PC 영구거푸집의 모듈의 규격화	- 내구성을 위하여 TRC PC 영구거푸집 상/하단부 모듈의 몰드르 철제로 제작 - 탈영이 용이하고 탈영 시 손상을 줄일 수 있는 모듈 제작 - 개발된 모듈을 이용하여 TRC 영구거푸집 시제품 제작

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
2차 연도 (2019)	【협동】 계명대학교 TRC 영구거푸집 적용 RC 기둥의 내진성능평가	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 압축 실험을 통한 성능평가	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 압축실험을 위한 실험체 설계 및 변수 선정	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 압축실험을 위한 실험체 상세 개발 및 계측장비 위치, 보강 섬유 선정
			TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 압축 성능평가	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 압축강도는 무보강 실험체와 비교하여 최대 10.09% 증가
		TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 정적반복가력 실험을 통한 내진성능평가	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 정적반복가력실험을 위한 실험체 설계 및 변수 선정	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 정적반복가력 실험을 위한 실험체 상세 개발 및 계측장비 위치, 보강 섬유 선정
			TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 내진성능평가	- TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 최대 강도는 무보강 실험체와 비교하여 최대 24.43% 증가 - 또한 최대강도 이 후 75%까지 감

			소하였을 때를 분석한 결과, TRC 영구거푸집 적용 RC기둥은 비내진 상세를 가지는 무보강 실험체와 비교하여 층간변위비가 2.47% 확보됨
[공동1] 경희대학교 TRC 영구거푸집 적용 구조부재 설계 및 성능평가를 위한 해석모델 개발	TRC 영구거푸집의 형상 및 물성 최적화	구조적으로 안전하며, 효율적인 형상 및 물성의 평가	▪ TRC 영구거푸집의 운반성과 제작 용이성을 고려하여 모듈 형상 결정 및 유효물성치 평가법을 통한 TRC 물성 평가
	TRC 영구거푸집 적용 구조부재 해석모델 개발	TRC 영구거푸집이 적용된 RC기둥의 거동 예측이 가능한 해석모델 개발	▪ TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 유한요소 해석모델 개발 및 실험전 단강도 ±15% 범위내 예측
[공동2] 경북대학교 TRC 거푸집 물량산출 자동화 알고리즘 개발 및 Digital Fabrication	TRC 영구거푸집 물량산출 자동화 알고리즘 개발	TRC 영구거푸집 물량산출 자동화 알고리즘 개발 및 Digital Fabrication 프로세스	▪ 기존의 물량에 대한 수치를 수기로 작성한 후, 합산, 검토하는 방식이 아닌 BIM 모델을 활용하여 입력된 객체정보에 따라 물량산출할 수 있는 알고리즘을 개발
			▪ 이 알고리즘을 통해 산출된 물량을 사용자가 필요한 정보만을 추출해 낼 수 있는 리포팅 기술을 접목한 알고리즘 또한 연동하여 개발함으로써 정확도 높은 결과물을 손쉽게 얻을 수 있게 됨
[공동 3] 제이와이건설 TRC 영구거푸집 현장 적용성 평가	테스트 베드 기획 및 실증지원	철근콘크리트 공사의 거푸집 작업의 시공 기준 검토	▪ 철근콘크리트 공사의 거푸집 작업 시공기준을 검토함으로 테스트 베드 기획 및 실증지원을 위한 기초 자료 제시
		테스트 베드 현장 적용성	▪ TRC 영구 거푸집 개발 기술의 실

			평가 방법론 검토	증화 작업을 통해 문제점 및 개선 방안을 도출하고자 정성적, 정량적 평가 작업으로 구분하여 기획함 - 정량적 평가는 표준품셈의 현장 실사 지침 및 양식을 준용하여 소요자원과 작업시간을 통한 소요 품을 기존의 공법과 TRC 공법 간에 비교 평가방법을 개발 - 정성적 평가는 시공성, 품질 신뢰성, 안정성 등의 평가방법 개발
		실용화를 위한 현장 적용성 평가	- 현장 적용성 평가 결과 - 실용화를 위한 기술 상세 개선 방안	- 정량적 평가 결과 형틀 목공의 경우 약 9배 이상 작업 생산성 효과가 있는 것으로 조사됨. - 기술 상용화에 장애요소가 될 수 있는 기술적 문제들을 해결할 수 있는 개선 방안을 제시함
	[공동 4] (주)우현레이콘 TRC PC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발	TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발	- 제작 공정 최적화 방법 개발을 위한 강재 - TRC PC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발	- TRC PC 영구거푸집 제작 공정 최적화를 위하여 7가지 공정 단계로 최적화 방안 개발 - TRC PC 영구거푸집의 제작 시방서 작성 - 개발한 최적화 방안을 토대로 한 TRC PC 영구거푸집 시제품 제작

구분 (연도)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
3차 연도 (2020)	[협동] 계명대학교 TRC 영구거푸집 적용 부재의 이력모델 개발	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 이력모델 개발	구조해석 프로그램에 적용가능한 TRC 영구거푸집 적용 RC 기둥의 이력모델 개발	- TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 거동을 나타낼 수 있는 이력모델을 개발 2차년도에서 수행된 실험결과와 이력모델을 이용한 예측값을 분석한 결과 최대강도의 오차가 0.2% 이내임
	[공동1] 경희대학교 TRC 영구거푸집에 대한 구조 설계기준(안) 개발	TRC 영구거푸집 적용 구조 부재의 설계를 위한 구조설계기준(안) 개발	TRC 적용 구조 부재의 구조적 성능을 평가할 수 있는 구조설계기준(안) 개발	직물섬유보강 콘크리트로 보강된 직사각형 기둥의 설계를 위하여 구조설계기준(안) 개발
	[공동2] 경북대학교 TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼 개발	TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼 개발	실무 적용을 위한 TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼 개발	연구를 통해 개발된 모델링 기법, 물량산출 자동화 알고리즘, 표준 템플릿 뿐만 아니라, 앞서 수행한 Digital Fabrication 결과를 바탕으로 실제 시공 시 현장에서 준비해야 할 사항, 거푸집 시공 순서

			및 방법 등을 기술한 매뉴얼을 개발함 ▪ 뿐만 아니라 연구를 통해 개발된 모델링 기법, 물량산출 자동화 알고리즘, 보고서 표준 템플릿을 정리하여 시공자가 쉽게 활용할 수 있도록 함
[공동3] 제이와이건설 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 경제성 분석	현장적용성 평가를 통한 실용화를 위해 경제성 분석	▪ 기존 경쟁 기술과 비교를 통한 기술 차별성 분석 ▪ 소요 원가 분석을 통한 경제성 평가	▪ 경제성 분석을 위해 TRC 영구거푸집의 일위대가의 개발 ▪ 시범 사업 사례 적용을 통한 경쟁 공법과의 공사비 비교 분석 ▪ 시장성 분석 및 사업화 계획을 제시
[공동4] (주)우현레미콘 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시	실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시	▪ 경쟁기술과 비교한 우수성 확보, 특허권 및 타사특허 침해 가능성 분석 ▪ 사업화 심층분석을 통한 사업화 방안 제시	▪ TRC 영구거푸집 수요처 분석 ▪ TRC 영구거푸집 공법 적용 시 기존 공법 대비 우수성 분석 ▪ 투자, 인력운영 등의 분석을 통한 사업화 방안 제시

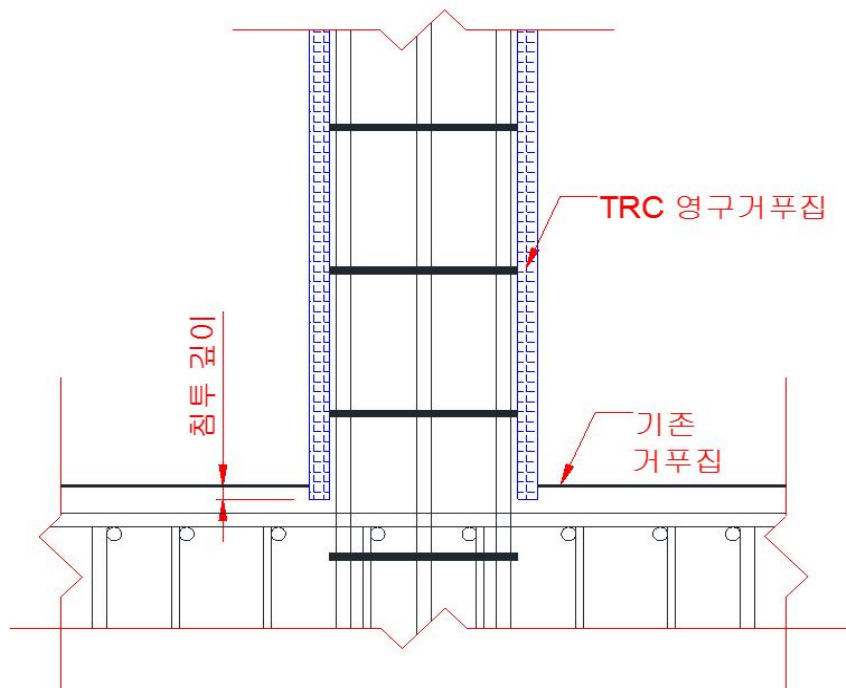
(2) 최종연구수행내용에 따른 결과

(가) 핵심연구성과 A : TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 내진성능평가

A-1 : TRC 영구거푸집 및 접합상세 개발

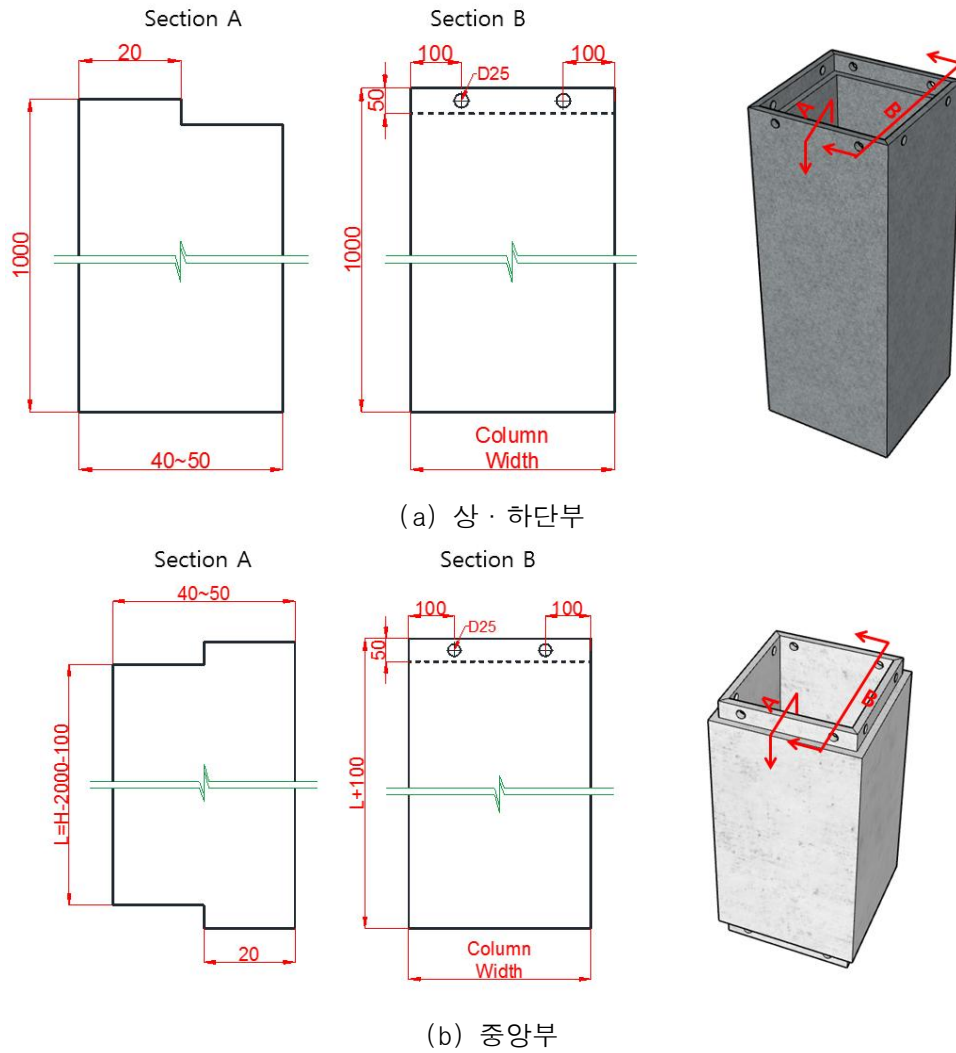
○ TRC 영구거푸집 및 접합상세 개발

- TRC 영구거푸집 모듈은 분할하지 않고 일체화 된 단면으로 개발함
- 하단의 기초 및 슬래브와 RC기둥에 거푸집을 거치 후 콘크리트 일체 타설로 진행됨
- 접합부에서 발생 가능한 거푸집의 떠오름 및 시멘트 페이스트 등의 누수 가능성을 방지하기 위하여 TRC 영구거푸집을 하단의 기초 및 슬래브의 피복두께 절반만큼 삼입하여 거치 후 콘크리트를 타설 할 수 있도록 제시



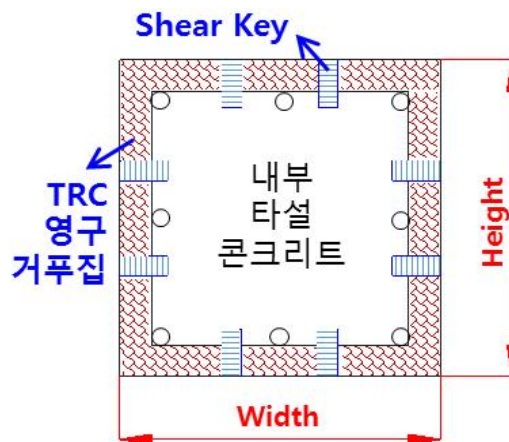
[그림 2.2] 개발 TRC 영구거푸집의 하단부 접합상세

- 제작 공정 및 공기절감을 위하여 TRC PC 영구거푸집의 표준화가 될 수 있도록 개발
- TRC 영구거푸집 패널은 RC기둥 상/하부에 적용이 용이하도록 높이에 관계없이 같은 형상을 가지며 공장화가 가능한 반면 RC기둥 중앙부에 적용이 되는 TRC 영구거푸집 패널은 모든 RC기둥에 대하여 단부 형상은 동일하지만 RC기둥의 높이에 따라 TRC 영구거푸집의 높이가 변화 가능하도록 개발하였음
- TRC 영구거푸집의 두께는 한국건축구조기준 (KBC2016)에서 제시하고 있는 최소 피복두께에 대한 규정에 따라 40~50mm로 선정하였음
- 상/하단부와 중앙부 TRC 영구거푸집의 접합을 위하여 끼워 넣을 수 있도록 접합 상세가 이루어졌으며, 각 단면 마다 2개의 전단키 역할을 하는 볼트를 넣을 수 있도록 25mm 정도의 구멍을 생성하였음



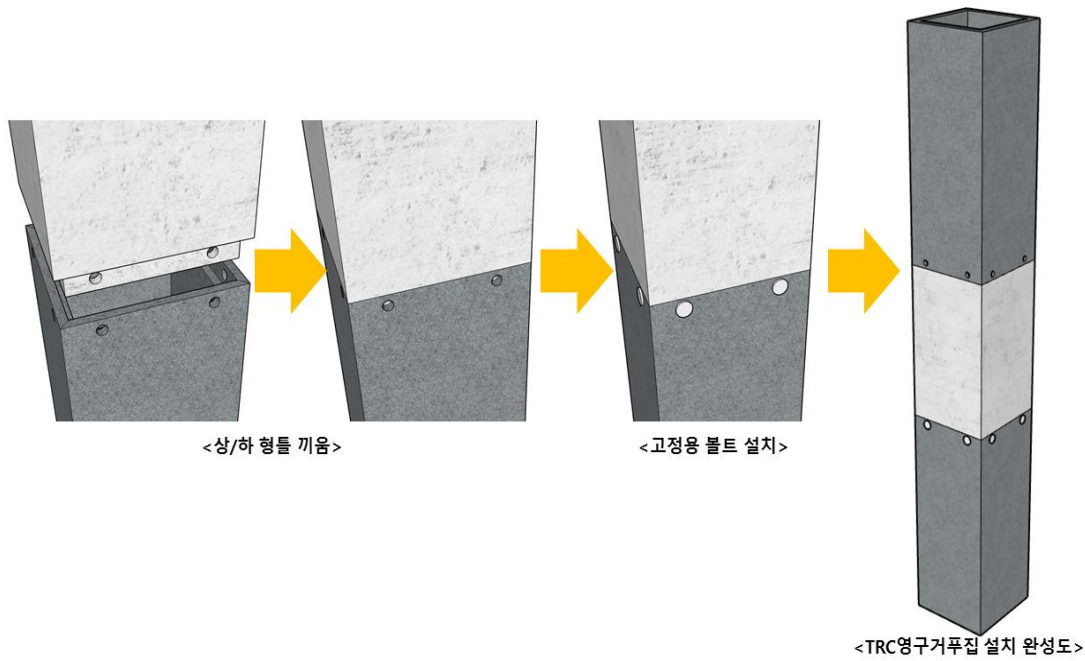
[그림 2.3] 개발 TRC 영구거푸집의 모듈 단면상세

- 각 접합부에 생성된 구멍을 통하여 삽입된 볼트는 콘크리트 타설로 인한 부력으로로부터 TRC 영구거푸집이 위로 상승하는 것을 방지할 수 있으며, 나아가 내부 콘크리트 타설 시 TRC 영구거푸집과 내부 TRC콘크리트의 부착능력을 향상시킬 수 있음



[그림 2.4] TRC 영구거푸집의 단면상세

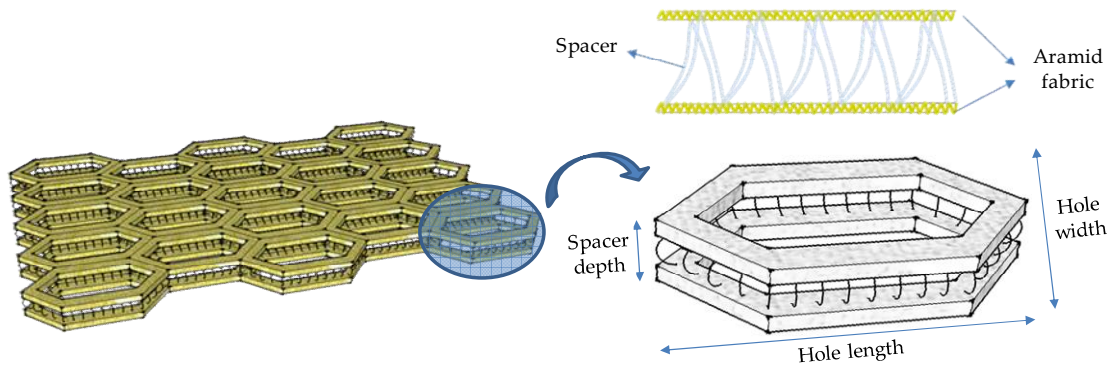
- TRC 영구거푸집의 설치 과정은 1) 하단부 TRC 영구거푸집 패널 설치, 2) 중앙부 TRC 영구거푸집을 하단부 TRC 영구거푸집의 홈에 맞추어 삽입, 3) 전단키(Shear Key, 고정용 볼트)를 설치, 4) 상단부 TRC 영구거푸집을 중앙부 TRC 영구거푸집에 대하여 하단부와 동일하게 시공



[그림 2.5] RC기둥에 대한 TRC 영구거푸집 시공 과정

○ TRC 영구거푸집 1차 재료실험(국내 직물섬유 기반-3차원 직물섬유)

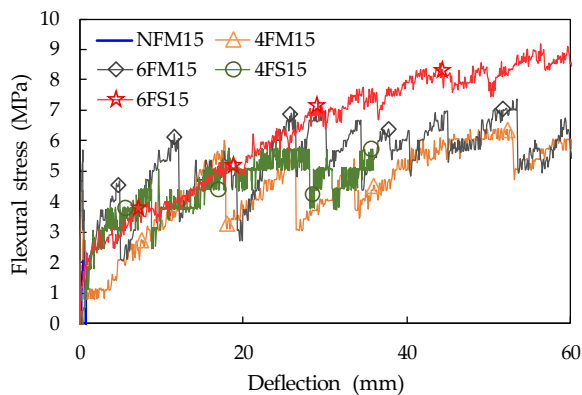
- 3D 형상의 직물섬유와 2D 형상의 직물섬유를 이용하여 TRC 영구거푸집 패널에 대한 휨 성능 시험을 수행하였음
- 시멘트계 자기 수평 모르타르인 유니플로 R (이하, S 모르타르)과 일반 조강 시멘트 모르타르 (이하, M 모르타르) 두 종류의 시멘트 모르타르를 배합하여 사용하였음
- S 모르타르는 (자기 수평 모르타르 시료 : 물) 의 중량비를 100 : 23으로 하여 배합하였고, M 모르타르는 물-시멘트 비 50%, (시멘트 : 모래 : 물) 의 중량비를 15.2 : 45.6 : 7.6으로 하여 배합하였음
- KS F 2405 기준에 따라 압축강도 공시체를 제작하고 28일 재령에 측정한 S 모르타르와 M 모르타르의 압축강도는 각각 43.1MPa, 51.8MPa 이었음
- 3D 형상의 직물섬유를 이용하여 28일 재령에 휨 성능 시험을 수행하였음
- 3D 형상의 직물섬유로 보강된 TRC는 박리에 의한 복합체 파괴 가능성을 줄일 수 있고, 복합체의 전단강도를 향상 시킬 수 있으므로 시멘트 기반 복합체의 역학적 특성을 향상시킬 수 있음



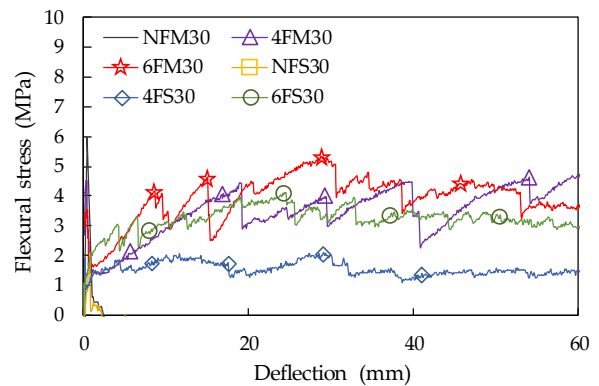
[그림 2.6] 3D 형상의 직물섬유

[표 2.1] 3D 직물섬유의 물성치

Type of Textile Fabric	Abrasion Resistance (cycle)	Tensile Strength (N)
22x9x6mm	over 1300	over 1300
15x8x4mm	3,000	3,000
Test method	KS K0540	KS K0521

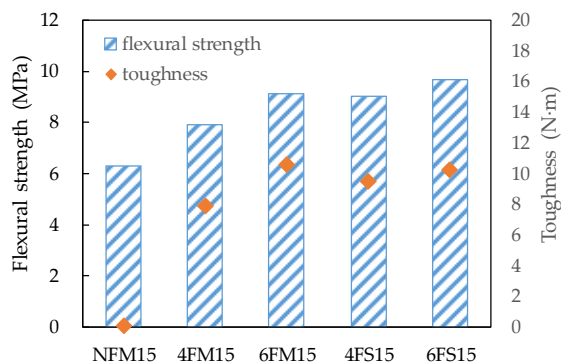


(a) Specimens with 15mm Section Depth

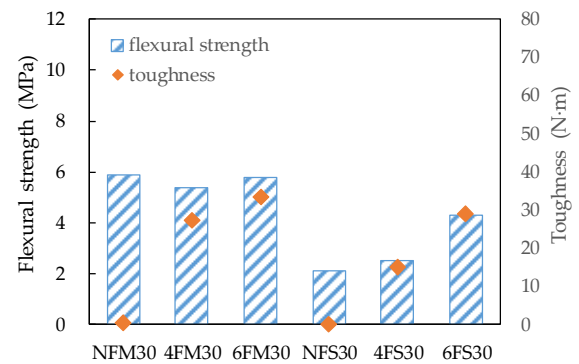


(b) Specimens with 30mm Section Depth

[그림 2.7] 3D TRC 실험체의 휨응력-변위 관계



(a) Specimens with 15mm Section Depth



(b) Specimens with 30mm Section Depth

[그림 2.8] 3D TRC 실험체의 휨강성 및 휨인성 비교

- 실험결과, 전형적인 직물섬유 보강 콘크리트의 휨거동인 균열이 나지 않은 단계, 균열 생성 단계, 균열 안정화 단계, 파괴 단계와 같이 나타냄
- 모든 실험체에서 균열이 나지 않은 단계에서는 첫 휨균열이 발생할 때까지 변위의 증가에 따라 휨응력이 선형적으로 증가하였음
- 모르타르 매트릭스 종류에 따라 첫 균열 휨응력값은 다르게 나타났고, 시멘트계 조강 모르타르가 자기 수평 모르타르보다 약 3배 정도 높은 첫 균열 휨응력을 나타냈음. 이는 자기 수평 모르타르의 낮은 압축강도의 영향과 다짐이 불충분했던 영향이 복합적으로 작용하였기 때문이라고 판단됨
- 같은 매트릭스 내에서는 3D 직물섬유를 보강한 실험체와 보강하지 않은 실험체의 첫 균열 휨응력은 거의 유사하게 나타났고, 직물섬유를 보강하지 않은 실험체가 다소 높은 첫 균열 휨응력을 보였음. 이는 3D 원사의 낮은 탄성계수 때문에 휨강성이 더 작아졌기 때문이라고 판단됨
- 3D 직물섬유가 보강되지 않은 시험체의 경우 첫 휨균열의 발생 직후 취성적으로 파괴되었으며, 첫 휨균열 응력에 도달한 후 하중 재하점 부근 인장 구역에 미세 균열이 발생하면서 파괴 징후를 보이지 않고 갑작스럽게 파괴되었음
- 3D 직물섬유가 보강된 시험체의 경우 첫 휨균열의 발생 직후 갑작스런 하중의 감소가 나타났으며, 이 후 휨강도의 감소, 휨강성 및 휨강도의 회복을 몇 차례 반복하는 현상을 보였음
- 본 연구에서 균열 직후의 하중감소가 매우 크게 나타났는데, 이는 보강된 3D 직물섬유의 보강비가 낮고, 3D 직물섬유의 파형이 크며, 길이방향 신장에 따라 수직방향 위치가 변화하는 3D 직물섬유의 구조상의 특징 등이 복합적으로 작용했기 때문이라고 판단됨
- NFM15 시험체 대비 4FM15, 6FM15 시험체는 각각 25.5% 44.5% 휨강도 증가를 보였고, NFS30 시험체 대비 4FS30, 6FS30 시험체는 각각 19.1%, 104.8% 휨강도의 증가되었지만, 4FM30, 6FM30 시험체는 NFM30 시험체 대비 각각 8.3%, 1.9% 휨강도의 감소를 나타내었음
- 또한, 3D 직물섬유 구조상 보다 인장단에 가깝게 배치되는 6F 직물섬유 보강 시험체가 4F 직물섬유 보강 시험체보다 더 높은 휨강도를 나타내었으며, 이는 6F Series가 4F Series보다 7.1%~15.1% 휨강도가 높게 나타남



[그림 2.9] 3D TRC 실험체의 실험 종료 사진(6FS15)

○ TRC 영구거푸집 2차 재료실험(해외 직물섬유 기반-2차원 직물섬유)

- TRC 패널의 휨 실험

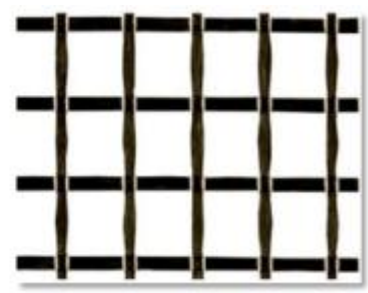
- 산업용 섬유로 많이 이용되는 Carbon성분의 원사를 이용한 직물섬유와 Basalt성분 원사를 이용한 직물섬유를 이용하여 TRC 복합체를 제작하였음
- 프리믹스 모르타르 파우더를 사용하여 중량비 100 : 15.5 (모르타르 파우더 : 물)로 배합하고 굵은골재를 포함하지 않는 콘크리트 매트릭스를 제작하였음
- 2종류의 압축강도 공시체를 KS F 2405와 KS F 2476에 의하여 제작하고 휨시험 당일 (40일 재령) 모르타르의 압축강도를 측정하였고, 그 결과는 각각 51.8 MPa, 61.3 MPa이었음
- 2D 형상의 직물섬유를 적용한 TRC 패널의 휨 성능을 분석하기 위하여 2D 직물섬유의 종류, 직물섬유의 보강 층 개수, 직물섬유의 보강 위치, 직물섬유 배치의 각도를 변수로 설정하였음



(a) Carbon 48K×12K



(b) Carbon 48K×48K

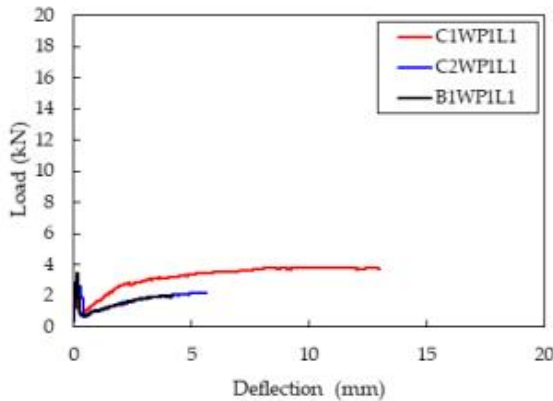


(c) Basalt 2400Tex

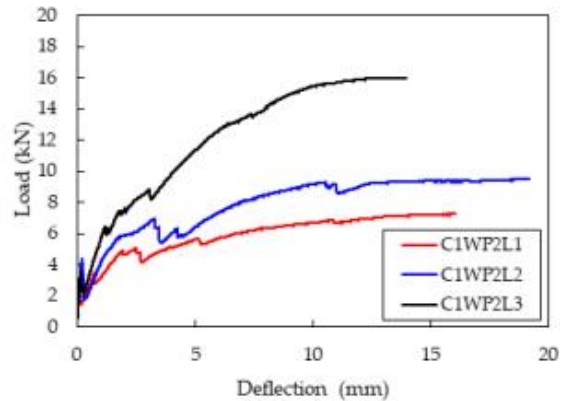
[그림 2.10] 2D 형상의 직물섬유

[표 2.2] 2D 직물섬유의 물성치

Type of Textile Fabric	Tensile Strength (MPa)		Elastic modulus (GPa)		Elongation (%)		Density (g/cm ²)	
	Warp	Weft	Warp	Weft	Warp	Weft	Warp	Weft
Carbon 48k×12K	2,551	2,847	230	218	1.17	1.24	1.8	1.8
Carbon 48k×48K	2,531	2,841	148	193	1.17	1.47	1.8	1.8
Basalt 2400Tex	135	125	73	83	1.86	1.50	2.75	2.75



(a) 경사방향 1층 보강 시



(b) 경사방향 2층 보강 시

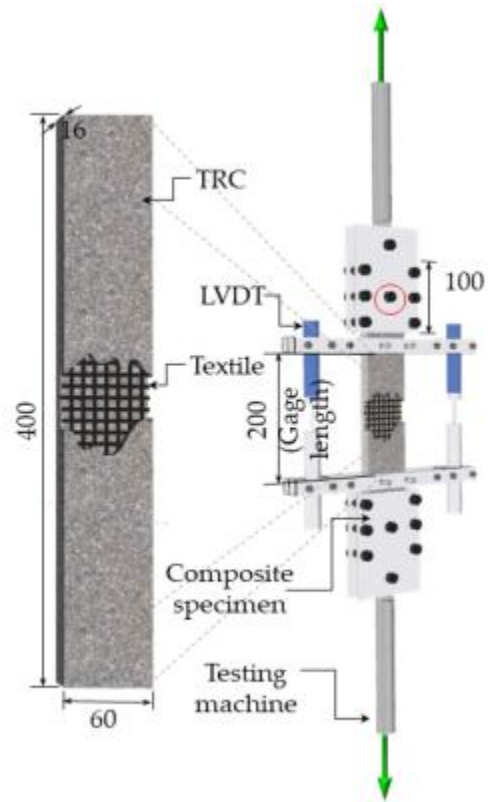
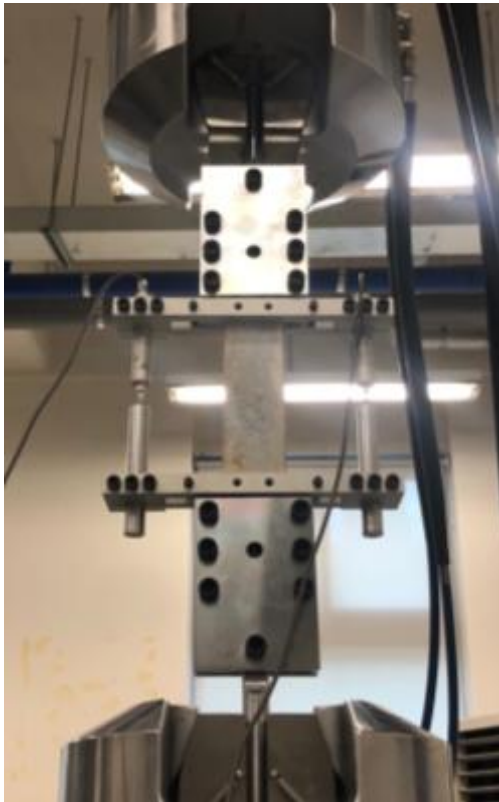
[그림 2.11] 2D TRC 휨 시험체의 하중-처짐 관계

- 무보강 시험체 대비 C1WP1L1, C2WP1L1, B1WP1L1, C1WP1L2 시험체의 첫 균열 발생 시 하중은 평균 99.3%의 수준으로 발생되었으며, 첫 균열 발생 후 극한 하중은 첫 균열 발생 시 하중 대비 평균 133.7%로 발생됨
- 경사방향으로 2겹 보강될 경우부터 모든 시험체에서 첫 균열 발생 시 하중보다 극한 하중이 높게 발생됨. 이는 최소 2겹 이상 보강을 해야 보강의 효과를 볼 수 있음으로 판단됨
- 무보강 시험체 대비 C1WP2L1, C1WP,2L2, C1WP2L3 시험체의 첫 균열 발생 시 하중은 평균 100.5%의 수준으로 발생되었으며, 첫 균열 발생 후 극한 하중은 첫 균열 발생 시 대비 평균 286.7%로 발생됨
- 따라서 직물섬유 보강 콘크리트는 최소 보강비를 만족시켜야 보강효과가 나타나며, 보강효과를 증진시키기 위해서는 보강비의 증가와 복합체 인장부와 근접한 직물섬유의 배치 및 정착길이의 확보를 통한 부착력의 확보가 필요할 것으로 판단됨

- TRC 패널의 직접 인장 실험

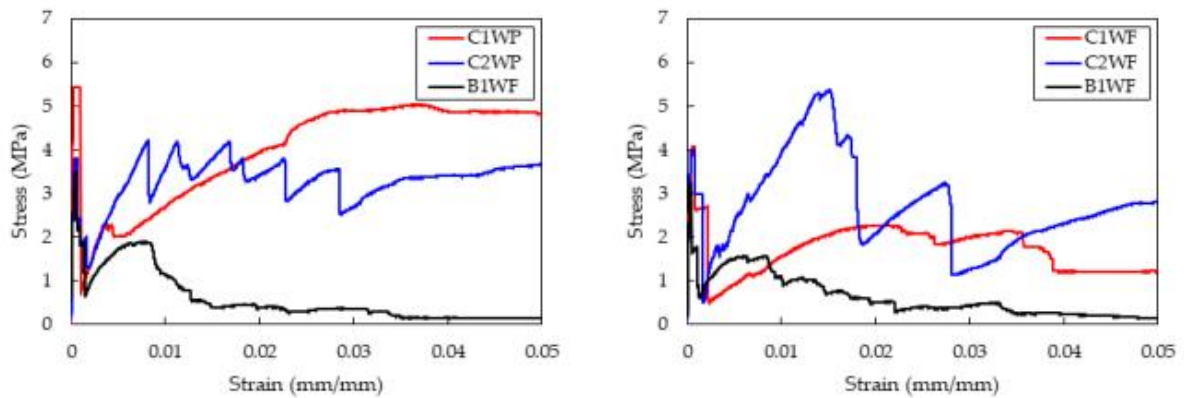
- 2D 패널의 인장 성능 평가는 직인장 방식을 이용하여 수행하였으며, 500kN 용량의 UTM(Universal Testing Machine)으로 0.2mm/min의 속도로 하중을 재하하여 시험을 시작한 후 초기 균열이 발생할 시 0.4mm/min, 균열 안정 시 0.8mm/min으로 시험체 거동단계에 따라 세 가지 속도로 변화하여 하중을 재하하여 시험체가 파괴될 시 시

험을 종료하였음



[그림 2.12] 2D TRC 패널의 인장 시험체 설치

- 무보강 시험체 대비 Carbon48K×48K로 보강된 시험체를 제외한 모든 시험체에서 변형률 연화의 경향을 나타내었음. 이는 직물섬유의 보강 효과가 미비함을 나타내며 Carbon48K×48K섬유와 비교하여 2 종류의 직물섬유는 콘크리트 매트릭스와의 부착력이 떨어진다고 판단됨
- 경사방향으로 배치할 경우 무보강 시험체 대비 C1WP, C2WP, B1WP 시험체의 첫 균열 발생 시 강도는 평균 121.9%의 수준으로 발현하였고, 위사방향으로 배치할 경우 C1WF, C2WF, B1WF 시험체의 첫 균열 발생 시 강도는 108.7%의 수준으로 발현됨



[그림 2.13] TRC 패널의 인장 실험 결과

○ TRC 영구거푸집의 측압실험

- TRC 영구거푸집의 측압실험은 400x400mm RC기둥으로 가정하여 타설 높이 (3,000mm), 타설 속도(중력), 내부 철근량(철근x), TRC 영구거푸집의 두께(50mm), 직물섬유(탄소섬유)를 고려 후 진행하였음
- TRC 영구거푸집의 측압실험을 위한 계측장비의 계획으로는 측압이 가장 많이 발생하는 최하단 에서부터 250mm 높이의 위치에 4개의 LVDT를 설치하고, 거푸집의 내부에는 측압계를 설치하였음



[그림 2.14] TRC 영구거푸집 측압 실험 결과

- 또한, 측압 실험 결과 TRC 영구거푸집의 외관에는 어떠한 미세 균열도 발생하지 않았으며, 이를 통하여 RC 기둥에서의 거푸집으로서의 성능은 충분하다고 판단됨

A-2 : TRC 영구거푸집 적용 RC 기둥의 내진성능평가

○ TRC 영구거푸집 적용 RC 기둥의 압축실험을 통한 성능평가

- TRC 영구거푸집 적용 및 미적용 RC기둥의 단면크기는 300x300mm로 설계 및 제작함
- TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 압축실험을 통한 횡구속 효과를 평가하기 위하여 TRC 영구거푸집이 적용되지 않은 기준 실험체인 N-S1, N-S2, N-S3와 기준 실험체에 영구거푸집을 적용한 11개의 실험체를 제작하였음
- 아라미드를 제외한 섬유는 격자 형태이며 아라미드 섬유는 3D 형태의 섬유와 Strip 형상으로 이루어짐
- TRC 영구거푸집에 적용된 콘크리트 매트릭스는 프리믹스 모르타르 파우더를 중량비 100 : 15.5 (모르타르 파우더 : 물)로 배합하여 제작하였음

[표 2.3] 압축실험체 변수

실험체 명칭	섬유 종류	섬유 겹수 (Layer)	섬유 형태	철근 간격 (mm)
N-S1	-	-	-	100
N-S2	-	-	-	200
N-S3	-	-	-	300
C1-S1	Carbon	1	Textile	100
C1-S2		1		200
C1-S3		1		300
C2-S2	48/12K	2		200
C2-S3		2		300
B-S1	Basalt	1		100
B-S2		1		200
B-S3	2400 Tex	1		300
3DA-S3		1	3D-Textile	300
A1P-S3	Aramid	1	Strip	300
A2P-S3		1		300

- 거푸집 미적용 RC기둥의 경우, 띠철근의 간격이 조밀할수록 수직균열에서 수평균열이 발생하는 경향을 보임
- TRC 영구거푸집을 적용한 RC기둥의 경우, 거푸집 미적용 실험체와는 달리 섬유의 구속효과로 인하여 취성파괴가 나타나지 않음



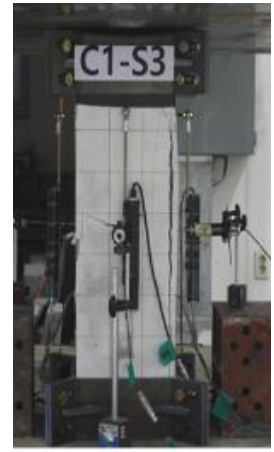
(a) N-S1



(b) N-S2



(c) 3DA-S3

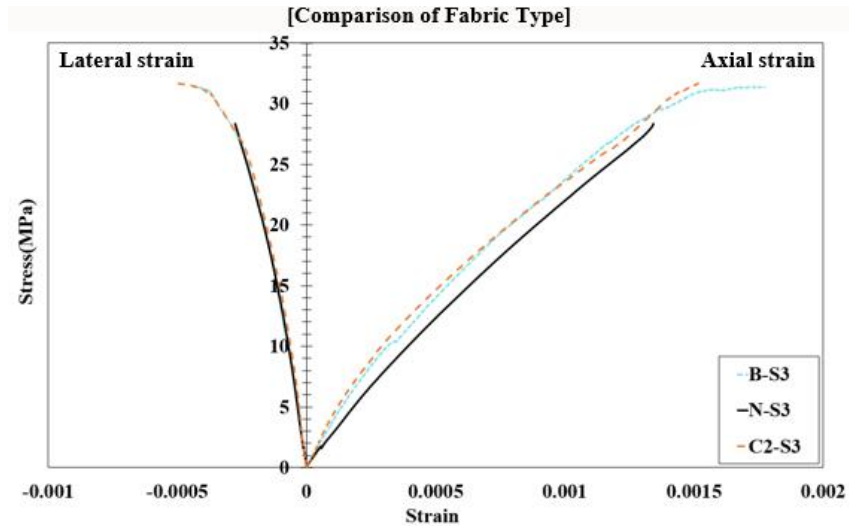


(d) C1-S3

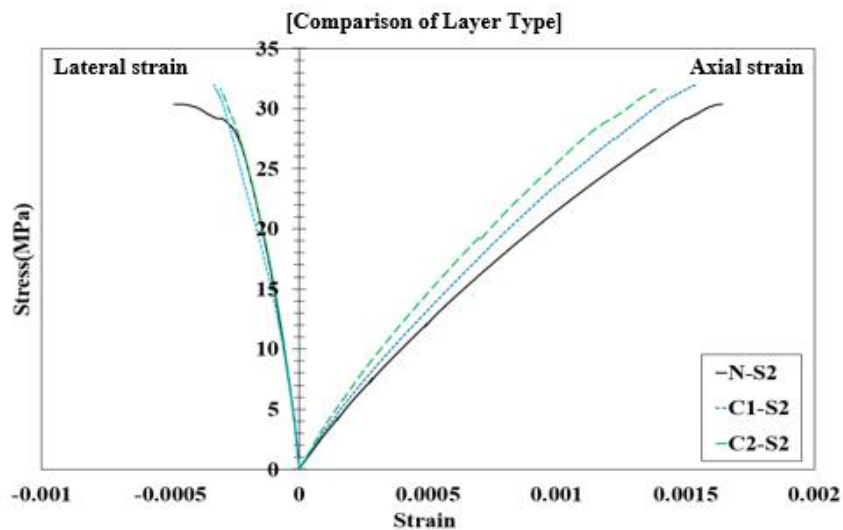
[그림 2.15] 무보강 실험체와 영구거푸집 적용 실험체 균열 비교

[표 2.4] TRC 영구거푸집 적용 RC 기둥 압축실험 결과

실험체 명칭	최대응력 (MPa)	거푸집 미적용 실험체 대비 증가율 (%)
N-S1	31.34	-
N-S2	30.47	-
N-S3	30.45	-
C1-S1	32.11	2.46
C1-S2	32.45	6.50
C1-S3	32.71	7.42
C2-S2	31.96	4.89
C2-S3	31.77	4.35
B-S1	29.03	-7.37
B-S2	32.50	6.66
B-S3	31.49	3.42
3DA-S3	28.89	-5.12
A1P-S3	33.51	10.09
A2P-S3	30.63	0.62



(a) 섬유 종류



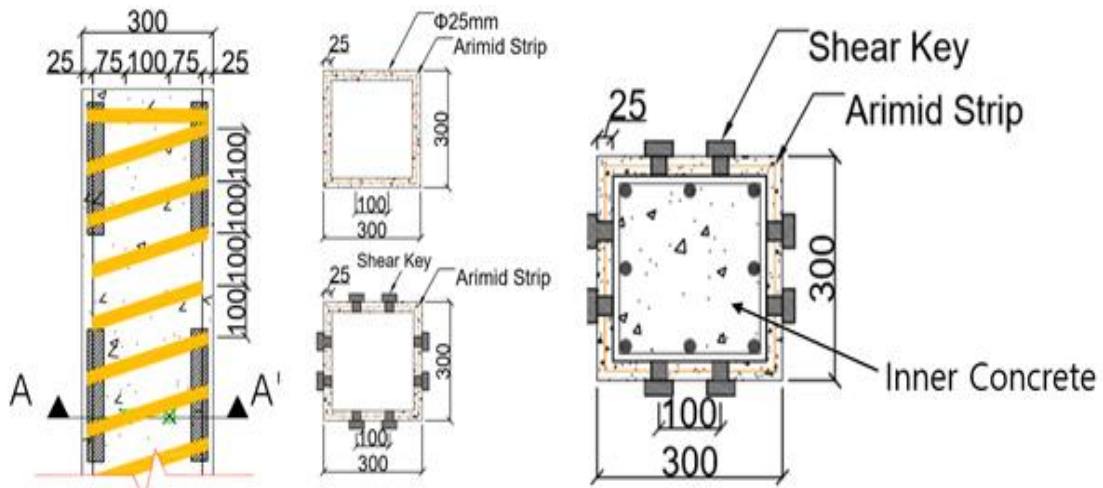
(b) 섬유 겹수

[그림 2.16] 섬유 종류 및 겹수에 따른 응력-변형률 그래프 비교

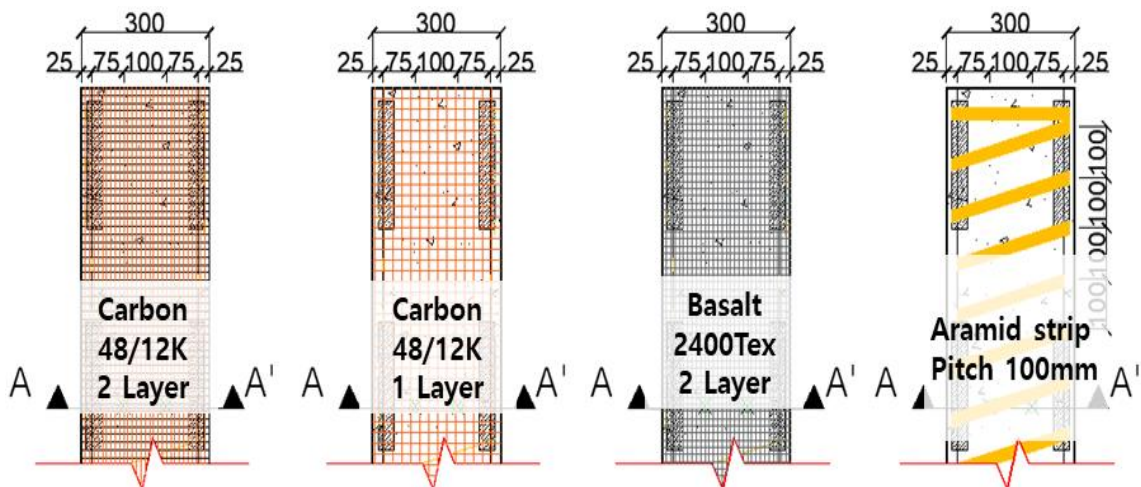
- 띠철근 간격에 따른 거푸집 미적용 실험체를 비교한 결과, N-S1, N-S2 실험체는 N-S3 실험체와 비교하여 각각 3%, 0.12% 증가하였음
- 대부분의 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 응력은 거푸집 미적용 실험체와 비교하여 증가하였으나, B-S1 및 3DA-S3의 경우 축력이 재하될 때 편심으로 인하여 모멘트가 작용하였기 때문에 각각 -7.37%, -5.12% 감소함
- 하중 초기단계부터 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥은 구속효과로 인하여 강성이 높게 나타났으며, TRC 영구거푸집 미적용 실험체의 경우, 낮은 구속효과로 인하여 콘크리트 팽창 이후 파괴가 일어났으며, TRC 영구거푸집을 적용한 실험체는 콘크리트 팽창 이후 TRC 영구거푸집의 영향으로 취성적 거동을 나타내지 않음
- 횡 방향 변형률을 비교·분석할 경우, 무보강 실험체와 비교하여 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥은 낮은 변형률에서 동일한 압축응력을 나타내었음

○ TRC 영구거푸집 적용 RC 기둥의 정적반복가력실험을 통한 성능평가

- TRC 영구거푸집 적용 및 미적용 RC기둥의 단면크기는 300x300mm로 설계 및 제작함



[그림 2.17] TRC 영구거푸집 및 기둥 단면상세



[그림 2.18] 섬유종류에 따른 실험변수

- TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 정적반복가력 실험을 통한 내진성능평가를 위하여 내진 상세와 비내진 상세를 변수로 한 기준 실험체 NC, SC와 비내진 상세에 Carbon, Aramid 및 Basalt 섬유를 변수 TRC 영구거푸집 적용 실험체 C1NC, ANC, B2NC 및 C2NC 총 6개의 RC기둥을 설계 및 제작하였음

[표 2.5] 정적반복가력 실험체 변수

Specimen	Stirrup (mm)	Type of Textile	Layer
NC	300	-	-
SC	150		
C1NC	300	Carbin 48/12K	1
ANC		Aramid strip (pitch 100mm)	1
B2NC		Basalt 2400 Tex	2
C2NC		Carbin 48/12K	2

<균열양상>

- 비내진 상세를 가지는 RC기둥의 경우, 최대강도 도달 이 후 층간변위비 2%에서 전단 균열로 인한 취성적인 파괴 양상을 나타낸 반면 TRC 영구거푸집이 적용된 RC기둥에서는 연성능력의 확보로 휨 거동을 나타내었으며, 파괴 시의 층간변위비가 최대 6%(C2NC)까지 증가함

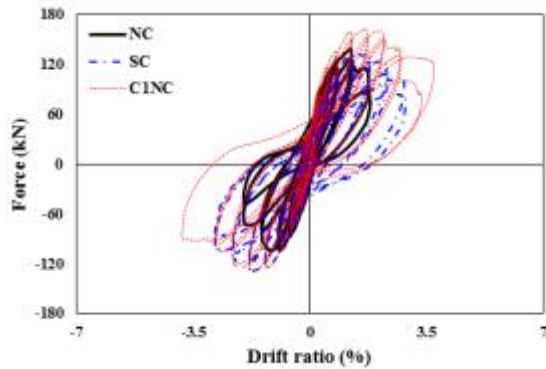


[그림 2.19] C2NC실험체의 균열 및 파괴 양상

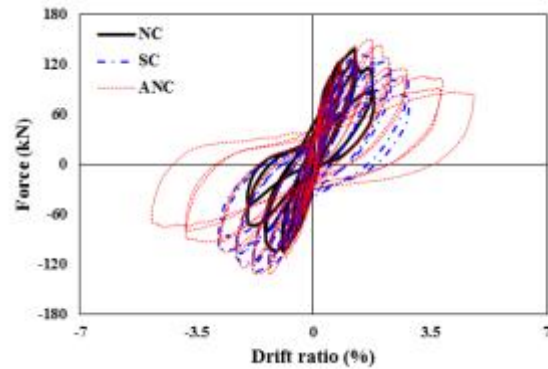
<하중-층간변위비 관계>

- TRC 영구거푸집 적용 실험체의 평균 최대강도 및 초기 강성은 145.78kN 및 32.51kN/mm로 기준 실험체 NC와 비교하여 최대강도 및 강성은 20.82% 및 18.69% 증가하였으며 SC와 비교하였을 때 최대강도 및 강성은 12.37% 및 23.43% 증가하였음

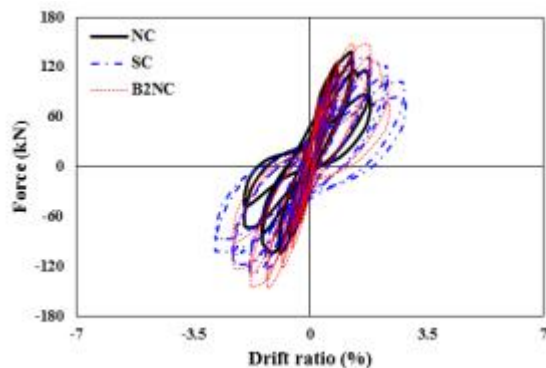
- TRC 영구거푸집 적용 실험체의 경우 섬유로 인한 내진성능이 확보됨에 따라 최대강도 이후 강도유지를 하면서 층간변위비 최대 6%에서 파괴가 일어남
- 또한 모든 실험체에서 최대강도 이후 75%까지 감소하였을 때의 층간변위비를 분석한 결과, TRC 영구거푸집이 적용된 실험체는 비내진 상세를 가지는 실험체와 비교하여 층간변위비가 2.47% 확보됨



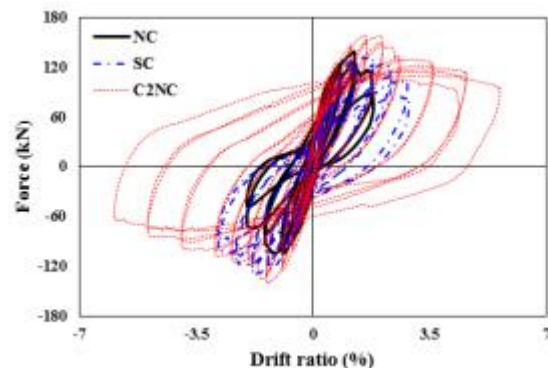
(a) C1NC



(b) ANC



(c) B2NC

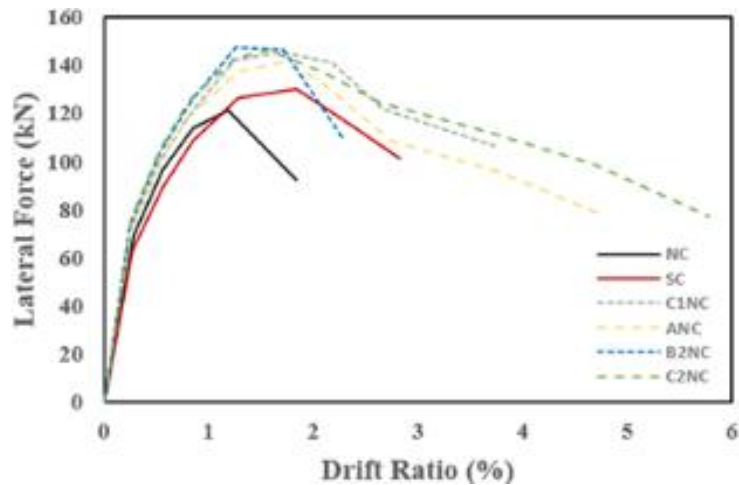


(d) C2NC

[그림 2.20] 하중-층간변위 관계 분석

<연성비(Ductility)>

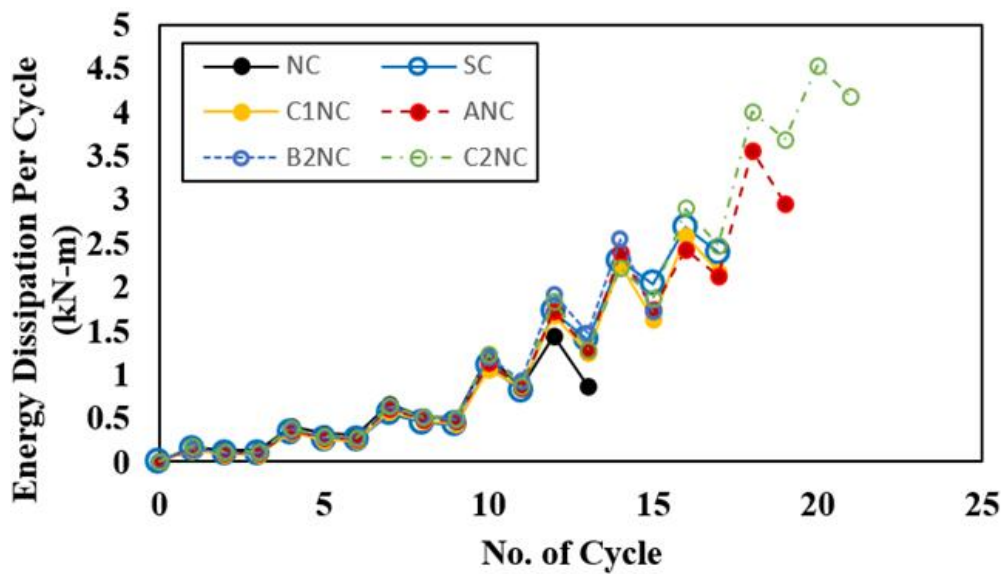
- 연성비를 분석한 결과, 비내진 상세를 가지는 실험체와 비교하여 ANC 및 B2NC 실험체의 연성은 각각 64.95% 및 44.86% 증가하였으며, C1NC 및 C2NC 실험체의 연성은 89.72% 및 122.90% 증가하였음
- 비내진 상세를 갖는 실험체는 TRC 영구거푸집 적용 실험체와 비교하여 항복변위는 크게 나타난 반면에 극한변위는 최대강도 도달 이후 급격한 하중 감소로 매우 작게 나타남
- TRC 영구거푸집 적용 실험체의 경우 항복변위는 비내진 상세를 가지는 실험체보다 낮게 나타났지만 섬유의 영향으로 최대강도 이후 강도 감소가 작게 나타남에 따라 극한변위가 크게 증가함



[그림 2.21] 포락곡선

<에너지 소산량>

- SC와 TRC 영구거푸집 적용 실험체의 각 사이클에서의 에너지 소산량을 비교 분석한 결과, 초기 사이클에서는 TRC 영구거푸집의 에너지 소산량이 높게 나타났음 하지만 13사이클부터 반복되는 사이클의 첫 번째에서는 SC의 에너지 소산량이 높게 나타났으며, 두 번째에서는 TRC 영구거푸집 적용 실험체의 에너지 소산량이 높게 나타남
- 누적 에너지 소산량에 대하여 분석한 결과, NC는 13사이클 이후에서 파괴되었으며, SC는 17사이클 이후에서 파괴됨에 따라 TRC 영구거푸집 적용 실험체의 누적 에너지 소산량은 NC 및 SC와 비교하여 405.3% 및 123.75% 증가하였음

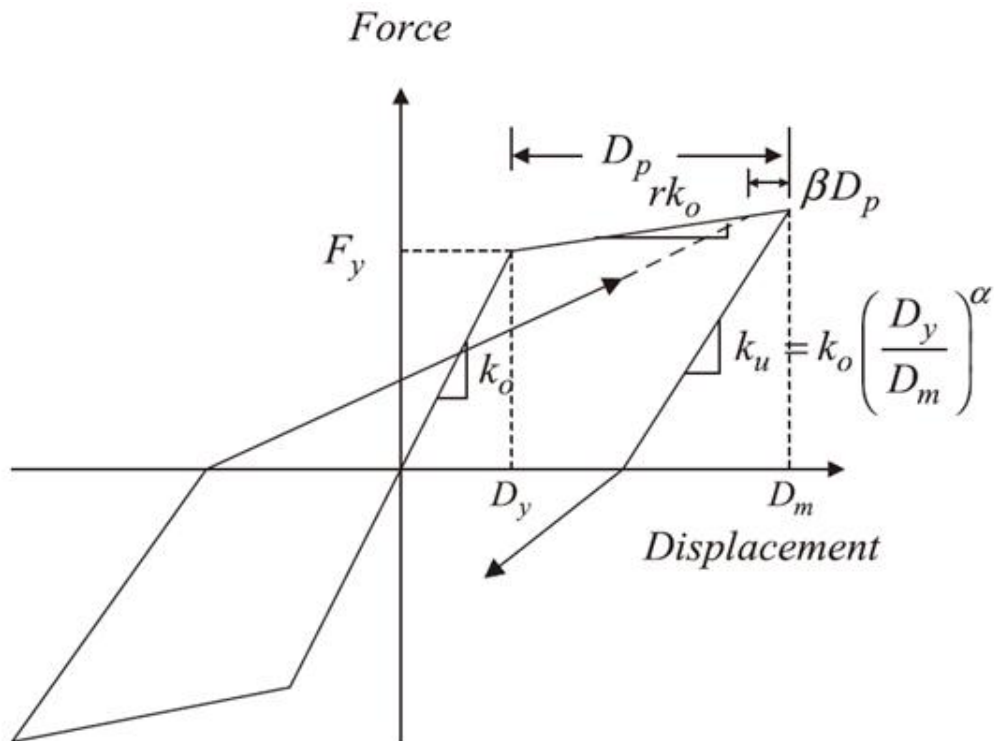


[그림 2.22] 각 사이클에서의 에너지 소산량

A-3 : TRC 영구거푸집 적용 부재의 이력모델 개발

○ TRC 영구거푸집 적용 부재의 이력모델 정의

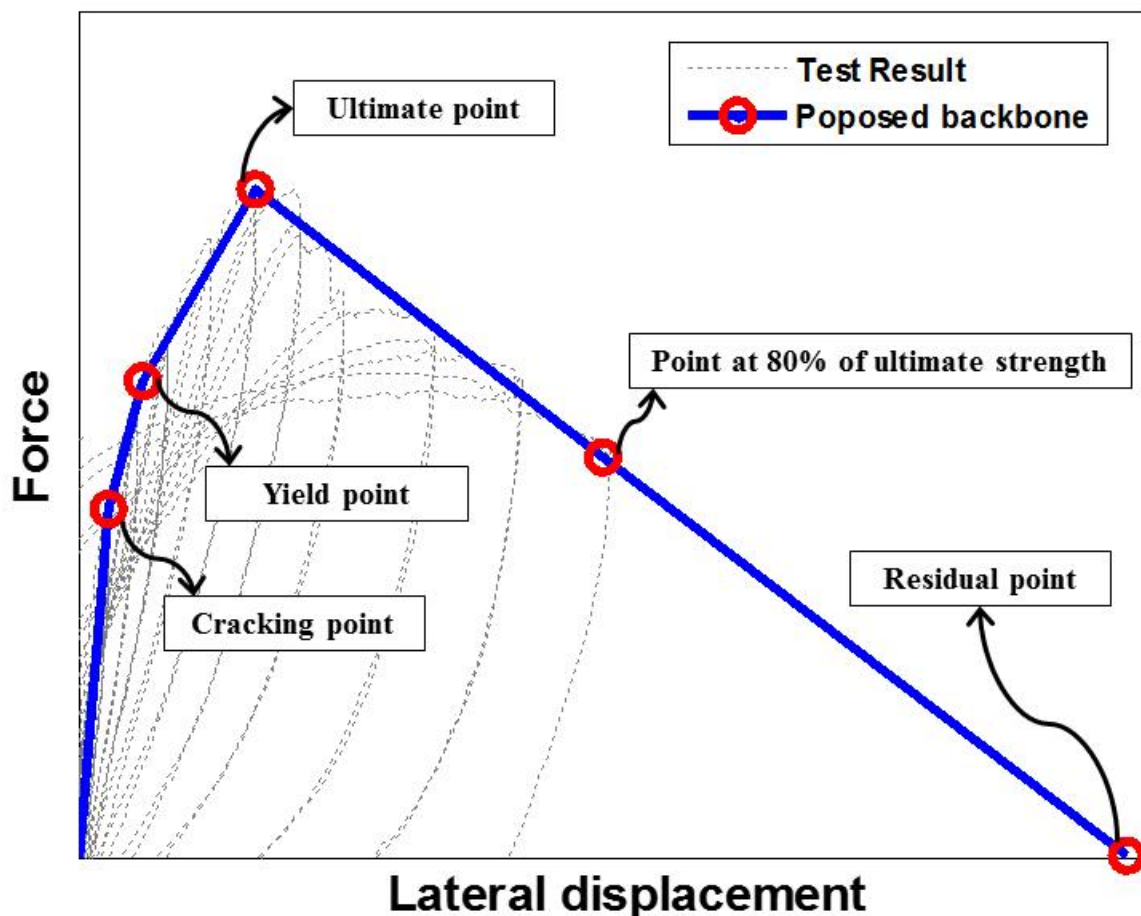
- TRC 영구거푸집 적용 부재의 정적반복가력 실험결과를 토대로 기존의 유한요소해석 프로그램에 적용 가능한 이력모델을 개발함
- TRC 영구거푸집이 적용되는 RC부재의 비탄성 거동은 부재의 강도, 강성, 에너지 소산 특성을 나타낼 수 있는 실제적, 개념적 모델이 요구됨
- TRC 영구거푸집이 적용된 부재의 이력모델은 항복강도, 강성 및 강도의 저감 정도를 반복하중을 받는 경우에 어떠한 방식으로 변화하는가를 평가함으로서 정의하여야 함
- 하중과 변형에 대한 이동경로를 지정하기 위하여 일반적으로 하중의 재하(Loading), 제하(Unloading), 재하(Reloading)의 상태를 고려
- 본 연구에서 TRC 영구거푸집 적용 부재의 이력모델은 ‘Modified TAKEDA’ 이력모델을 기반으로 개발하였음
- ‘Modified TAKEDA’ 이력모델은 재하 상태에 따른 강도 및 강성 저감을 고려하고 있으며, 이는 항복지점(Yield point) 및 극한지점(Ultimate point)으로 정의되는 뼈대곡선(Backbone curve)을 기반으로 함



[그림 2.23] Modified TAKEDA 이력모델

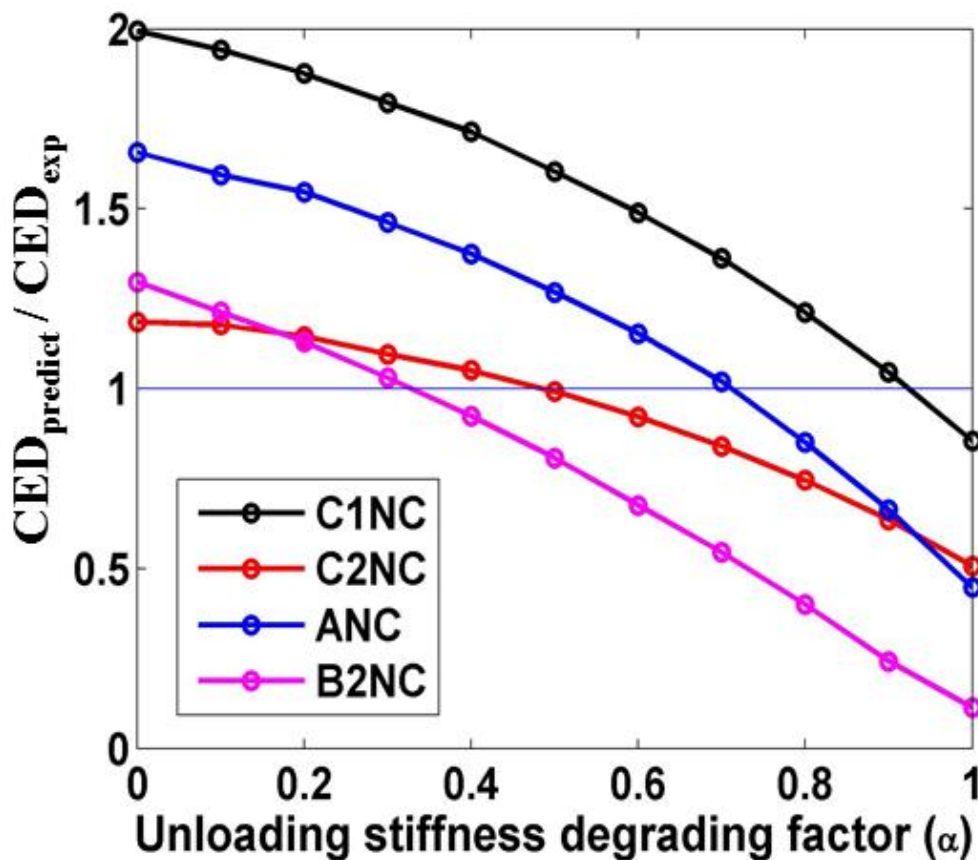
- 여기서 k_o : Initial elastic stiffness, α, β : Stiffness degrading factor, γ : Post yielding stiffness factor, d_y : Displacement of the yielding point, d_m : Displacement of the maximum lateral force point, $k_u = (\frac{d_y}{d_m})^\alpha$ 로 정의함

- TRC 영구거푸집을 적용한 부재의 거동은 내부 직물섬유의 영향으로 극한강도 이 후 하중 감소가 크게 줄어들기 때문에 이를 고려하여야 함
- 따라서 본 연구에서 개발한 이력모델의 뼈대곡선은 총 4개의 점으로 정의되며, 매개 변수들은 각각 순서대로 균열지점(Cracking point), 항복지점, 극한지점, 잔류지점 (Residual point)로 정의하였음
- 각 지점에 따른 정의는 아래와 같음
 - 1) 균열지점 : 초기강성을 기준으로 30% 이상 강성이 저하되는 지점
 - 2) 항복지점 : 부재의 주철근이 처음 항복하는 지점
 - 3) 극한지점 : 최대강도에 도달한 이후 내력이 감소하기 시작하는 지점
 - 4) 잔류지점 : 극한지점 이 후 발생하는 내력 감소 시 극한지점의 80%의 하중에 도달 할 때의 기울기를 가지며 하중이 0.2kN일 때의 지점
- 모든 실험체의 뼈대곡선은 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 실험결과에서 나타난 포락곡선(Envelope curve)를 이용하여 나타내었으며, 이때의 포락곡선은 정가력 및 부가력 방향에서 높은 하중을 나타내는 방향의 포락곡선을 이용하였음
- 따라서 TRC 영구거푸집 적용 부재의 모든 뼈대곡선은 [그림 2.24]에서 나타낸 바와 같이 정의하였음



[그림 2.24] Definition of the proposed backbone

- ‘Modified TAKEDA’ 이력모델에서는 하중의 경로에 따른 강도 및 강성저감을 나타내기 위하여 α 및 β 계수를 제시하고 있음
- α 및 β 는 부재의 단면크기 등 여러 가지 조건에 따라 다르게 정의하는데, 일반적으로 보 부재(TAKEDA Fat, TF)의 경우 $\alpha=0.3$ 및 $\beta=0.6$ 으로 고려하며, 기둥 부재(TAKEDA Thin, TT)의 경우 $\alpha=0.5$ 및 $\beta=0$ 으로 고려함
- β 는 재재하 상태일 때의 강도 및 강성 저감을 고려하는 계수로서 본 연구의 TRC 영구거푸집을 적용한 부재의 거동에서는 직물섬유의 영향으로 재재하 상태일 때의 강성 저감이 거의 나타나지 않기 때문에 0으로 고려하였음
- 또한 본 연구의 실험결과를 분석하면 항복점까지는 제하 상태일 때 강성 저감이 거의 나타나지 않으며, 항복점 이 후 강성 저감이 나타남에 따라 ‘Modified TAKEDA’ 이력모델을 그대로 적용하였음
- TRC 영구거푸집 적용 부재의 실험결과에서 보이듯이 TRC 영구거푸집은 RC부재의 에너지 소산량을 크게 향상시키지만, 일반적으로 기둥 부재(TT)에 적용되는 $\alpha=0.5$ 를 그대로 적용하게 된다면 실험값에 따른 해석값의 차이가 크게 나타남
- [그림 2.25]는 제하 상태에서의 강성저감 계수(α)에 따른 누적 에너지 소산량 차이(실험값/예측값)는 α 가 증가할수록 예측값이 크게 감소하는 경향을 나타내었음



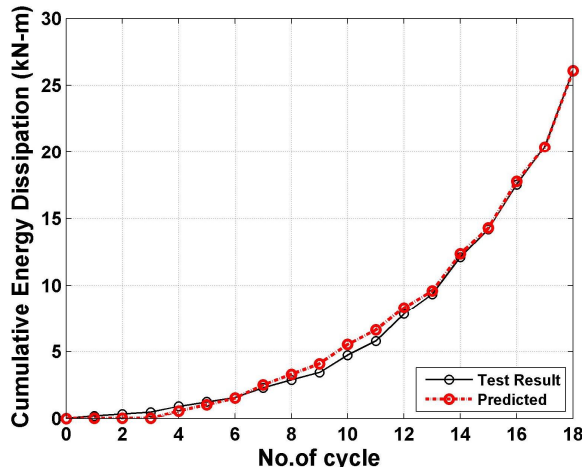
[그림 2.25] ‘ α ’ 에 따른 누적 에너지 소산량 차이(실험값/예측값) 관계

* CED는 누적 에너지 소산량 (Cumulative energy dissipation)

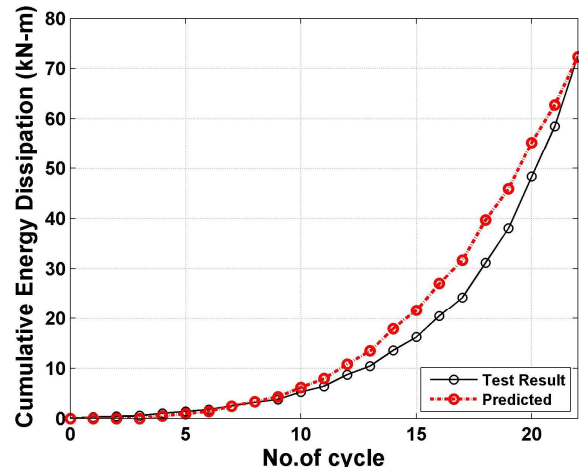
- 따라서 본 연구에서는 실험값에 대한 예측값의 누적 에너지 소산량의 오차가 1% 이하에서 수렴하도록 [표 2.6]과 같이 α 값을 적용하였음
- 각 실험체에 따른 실험값과 예측값에 대한 누적 에너지 소산량은 [그림 2.26]과 같음

[표 2.6] 각 실험체에 따른 α 와 실험값 및 예측값에 따른 누적 에너지 소산량

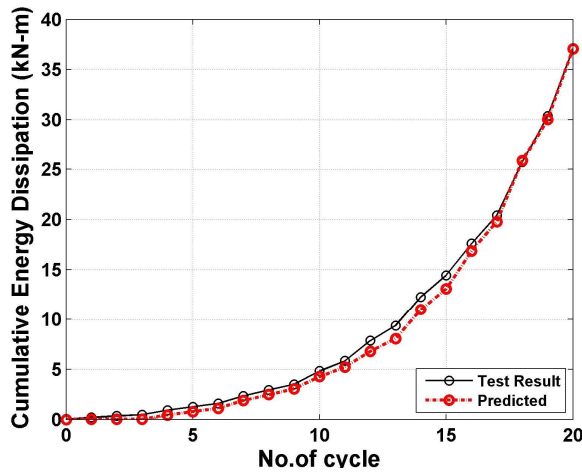
Specimen Name	Cumulative energy dissipation (kN-m)		Effect of predicted data (%)	α
	CED _{predict}	CED _{exp}		
C1NC	26.084	26.105	-0.08	0.924
C2NC	72.334	72.433	-0.14	0.480
ANC	37.073	37.081	-0.02	0.711
B2NC	14.906	14.926	-0.13	0.334



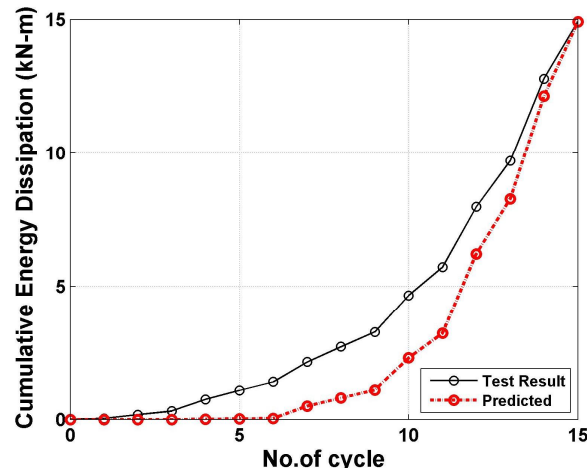
(a) C1NC



(b) C2NC



(c) ANC



(d) B2NC

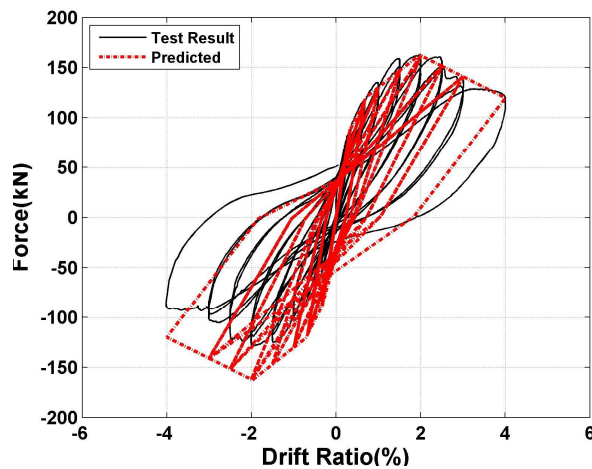
[그림 2.26] 각 사이클에서 실험값과 예측값의 누적 에너지 소산량

- TRC 영구거푸집 적용 부재의 실험결과와 개발된 이력모델을 이용한 예측결과에서 각 사이클에 대한 누적 에너지 소산량을 비교한 결과, C1NC 및 ANC 실험체의 경우 유사한 거동을 나타내었음

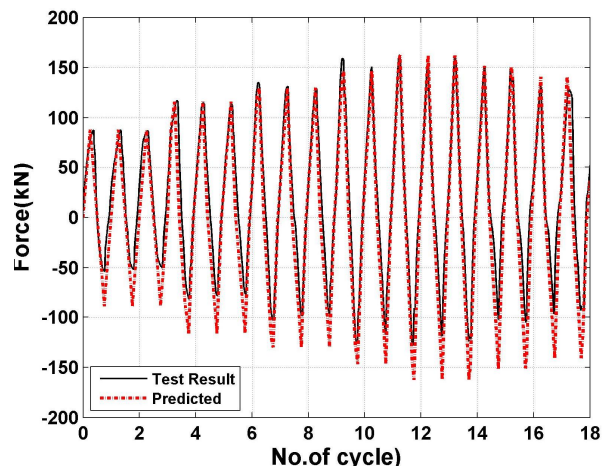
- 하지만 C2NC 실험체에 대한 예측결과와 의 경우 항복점 이 후부터 파괴 시까지의 누적 에너지 소산량이 과대평가되는 경향을 나타내었으며, B2NC의 경우 과소평가되는 경향을 나타냄
- 개발된 이력모델은 [표 2.7] 및 [그림 2.27]에서 보이는 바와 같이 실험값과 비교함
- 실험값에 대한 예측값의 차이는 일반적으로 낮게 나타났지만 오차가 0.2% 미만임

[표 2.7] 각 실험체에서 실험값에 따른 예측값의 최대강도 비교

Specimen Name	Maximum lateral force (kN)		Effect of predicted data (%)
	Predicted data	Test data	
C1NC	162.43	162.55	-0.07
C2NC	157.49	157.69	-0.13
ANC	150.94	151.20	-0.17
B2NC	148.98	149.09	-0.07

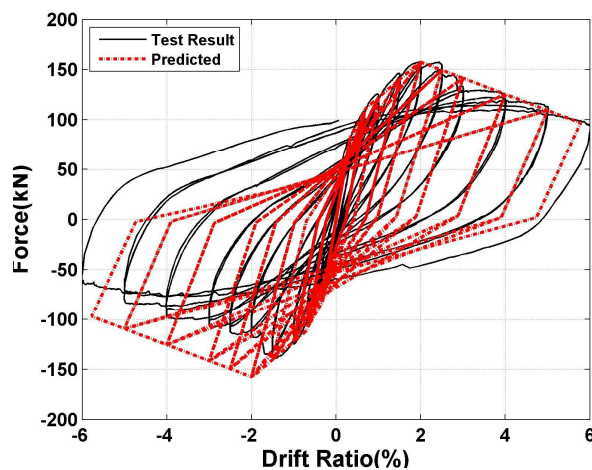


Force-Drift ratio relationship

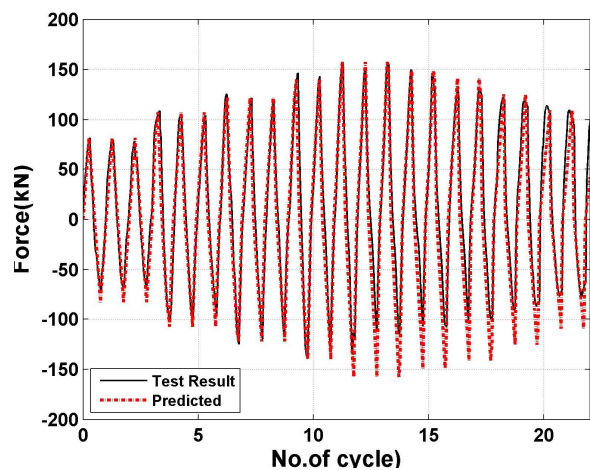


Force-cycle relationship

(a) C1NC

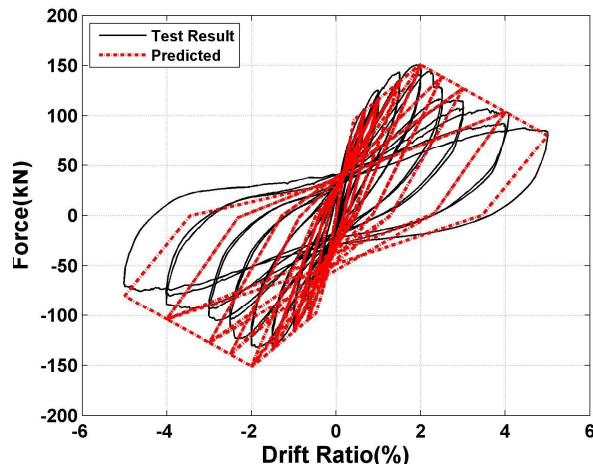


Force-Drift ratio relationship

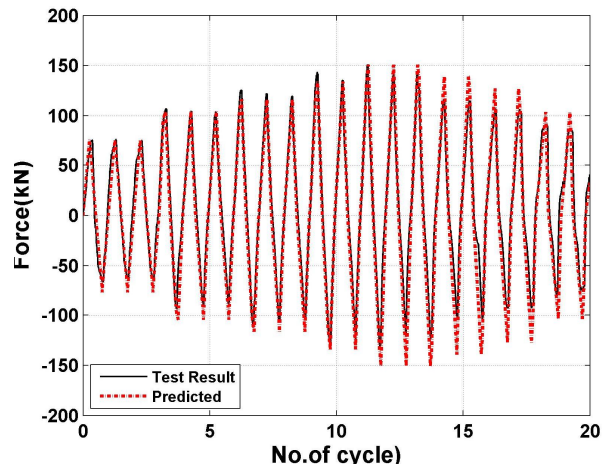


Force-cycle relationship

(b) C2NC

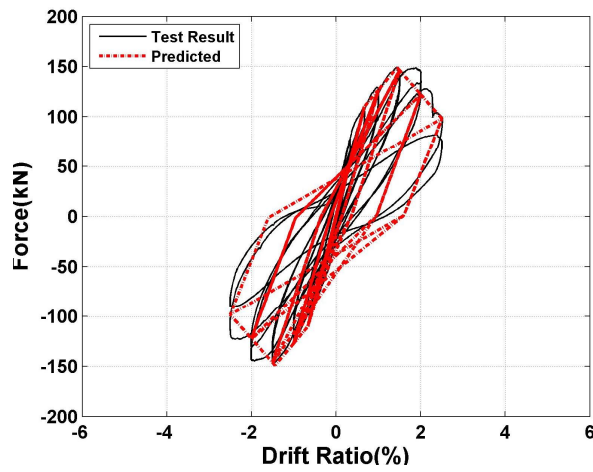


Force-Drift ratio relationship

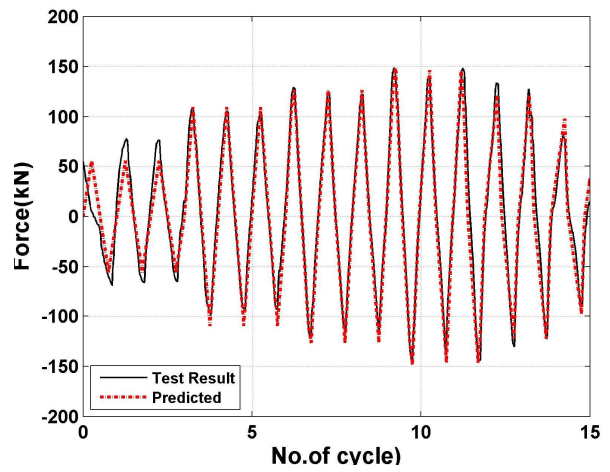


Force-cycle relationship

(c) ANC



Force-Drift ratio relationship



Force-cycle relationship

(d) B2NC

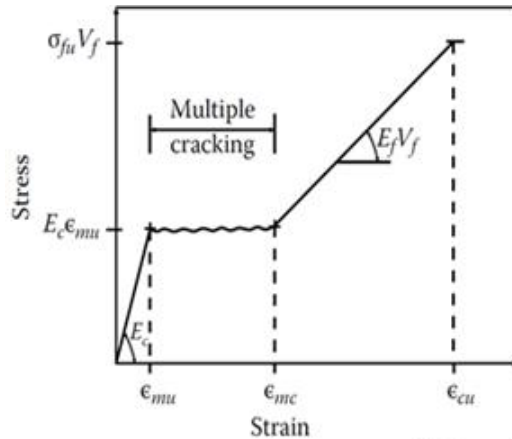
[그림 2.27] 예측값에 대한 실험값 비교

(나) 핵심연구성과 B : TRC 영구거푸집 재료물성 평가 및 해석모델 개발

B-1 : 미소역학 기반 TRC 재료의 유효물성치 평가 기법 개발

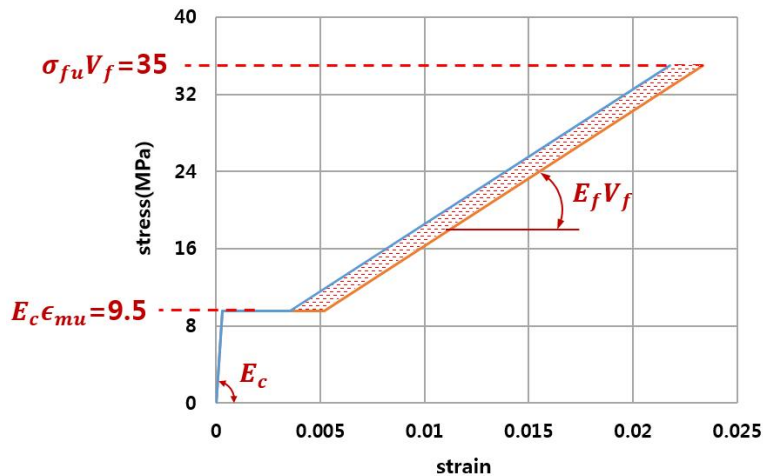
○ 이론식 및 복합재료 해석 프로그램을 활용한 TRC 유효물성치 평가기법 개발

- TRC 재료의 응력-변형률 곡선은 섬유보강복합체의 응력-변형률 관계를 예측하기 위해 제안된 이론식인 ACK (Aveston-Cooper-Kelly) 모델을 활용하여 산정



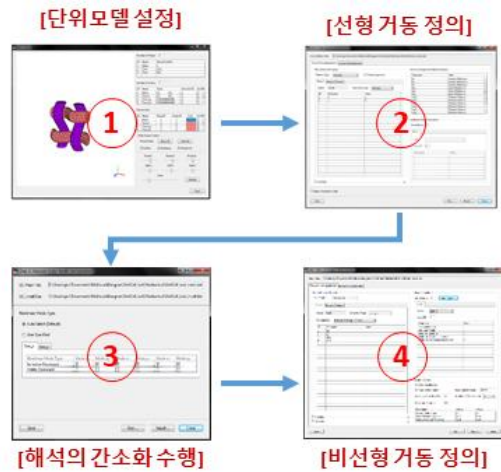
[그림 2.28] ACK 모델 개념도 및 주요 공식

- TRC복합체의 구성요소인 직물섬유 및 매트릭스의 탄성계수, 부피비, 항복강도 등의 기본적인 물성치들을 간단하게 설정하여 응력-변형률 그래프를 도출하였으며, 도출된 그래프가 설정한 변수들의 특성을 잘 반영한다고 판단되어짐

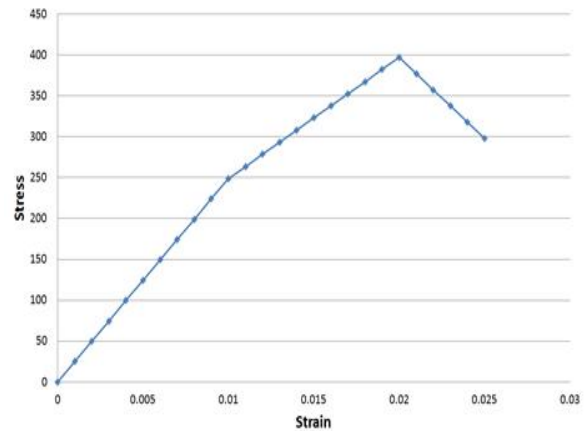


[그림 2.29] 이론식 기반 TRC 복합체의 응력-변형률 그래프

- Altair사에서 개발한 복합재료 해석 소프트웨어인 Multiscale Designer를 활용하였으며, 단위모델의 정의, 재료별 선형거동의 정의, 해석의 간소화 수행, 재료별 비선형 거동 정의 등의 단계를 거쳐 복합재료의 유효물성치를 도출함



[그림 2.30] 복합재료 해석 프로그램 수행 과정

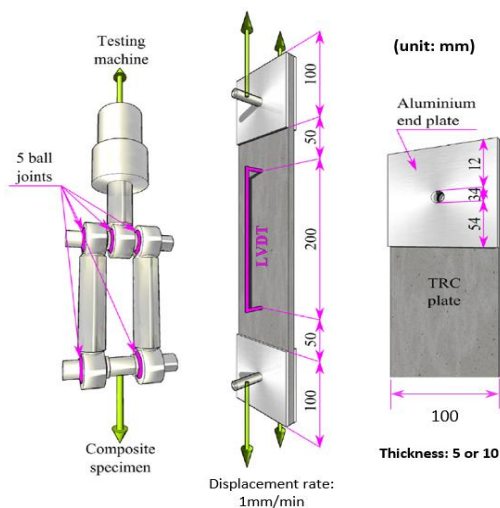


[그림 2.31] 복합재료의 인장응력-변형률 곡선

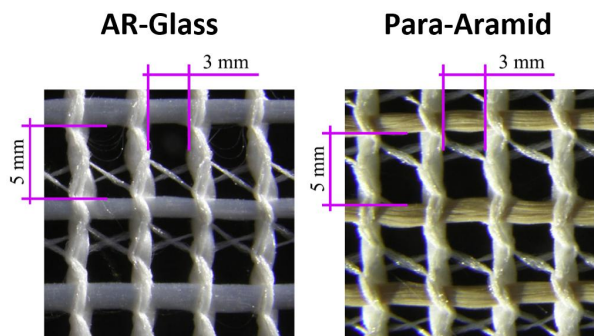
- 매트릭스 및 섬유들의 파괴비, 탄성계수, 비선형 거동등을 간단한 값으로 설정하여 해석 프로그램을 통해 설정한 복합재료의 응력-변형률 그래프를 도출하였으며 그래프 분석을 통해 구간별로 의미있는 탄성계수값이 도출되는 것을 확인함

○ 개발된 TRC 복합재료 유효물성치 평가법의 실험논문의 인장 재료실험결과를 이용한 검증

- 글래스 및 아라미드 직물섬유를 이용한 TRC 복합재료 인장실험 논문에 제시된 응력-변형률 그래프와 개발된 이론식 및 Multiscale Designer를 이용해 유도된 그래프를 비교 분석함

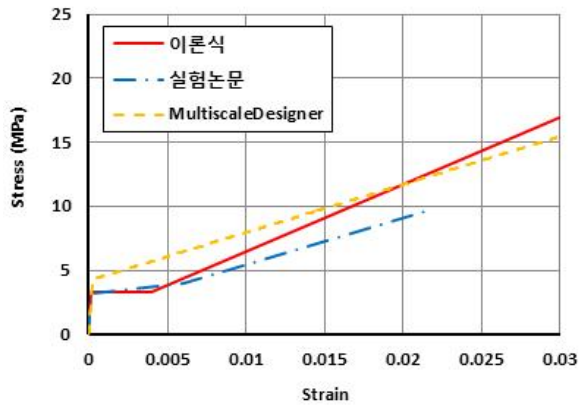


[그림 2.32] 실험논문의 실험체 형상

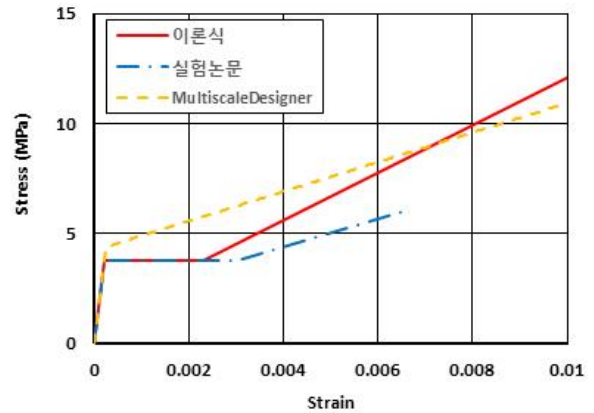


[그림 2.33] 재료별 섬유 간격 및 형상

- 두 평가법 모두 초기 탄성구간에서는 실험논문의 결과값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있지만 이론식에 의한 그래프는 매트릭스에 균열 발생 후 감소된 응력-변형률 기울기를 다소 과대 평가하는 경향이 있으며 Multiscale Designer에 의한 기울기가 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인함

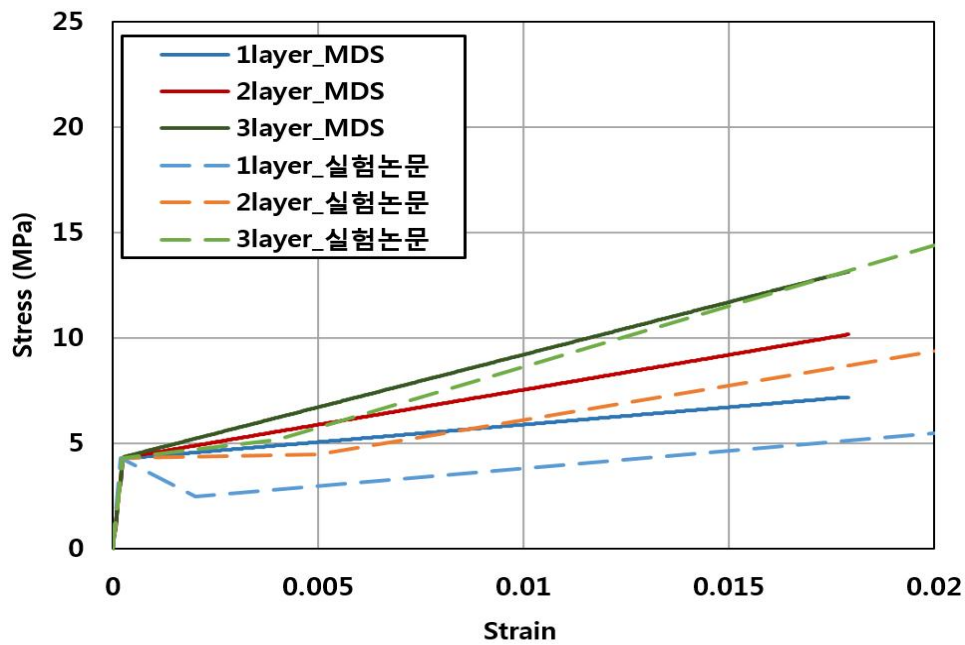


[그림 2.34] 글래스 직물섬유 시험체 응력-변형률



[그림 2.35] 아라미드 직물섬유 시험체 응력-변형률

- TRC 복합재료에 포함된 직물섬유층 개수가 증가할 경우 응력-변형률 관계에 있어 초기 탄성범위의 기울기에 큰 영향을 미치지 못하나 매트릭스 항복 후 기울기는 비례해서 증가하는 경향을 보임

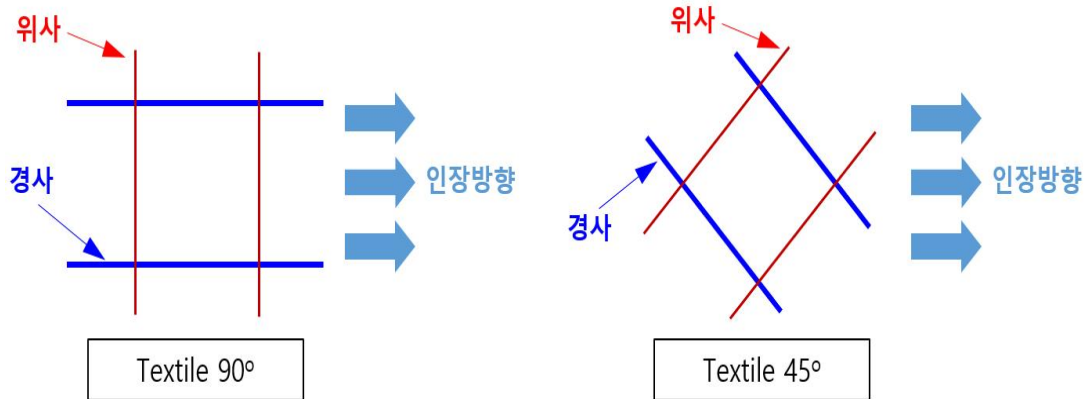


[그림 2.36] 직물섬유층 개수별 응력-변형률 비교

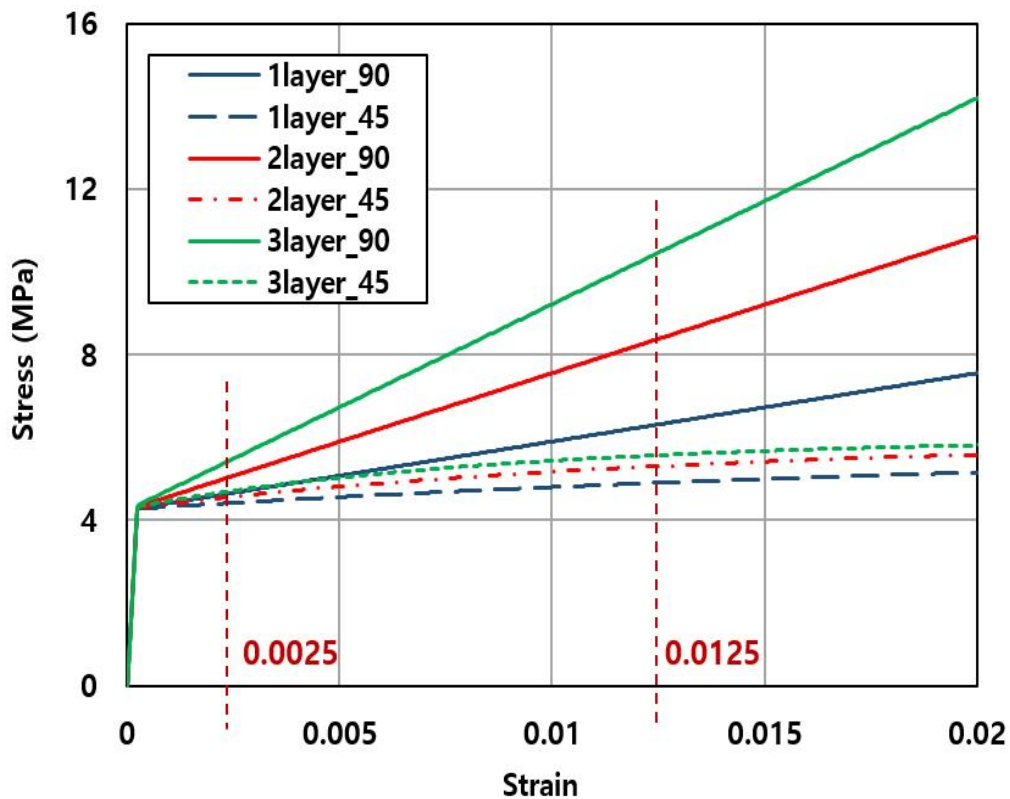
[표 2.8] Layer 개수별 변형률에 따른 탄성계수 비교

		1 layer	2 layer	3 layer
탄성구간	MDS	17800	17900	18100
	실험논문	18000	18000	18000
	오차율	1.11%	0.56%	0.56%
변형률 0.01	MDS	165	331	498
	실험논문	167	325	575
	오차율	1.21%	1.84%	15.46%

- 여러개의 직물섬유층을 포함하는 TRC 복합재료의 경우 섬유층을 평행하게 배치하는 경우가 45도 각도로 배치하는 경우에 비해 매트릭스 항복 후 기울기가 훨씬 더 크게 나타남



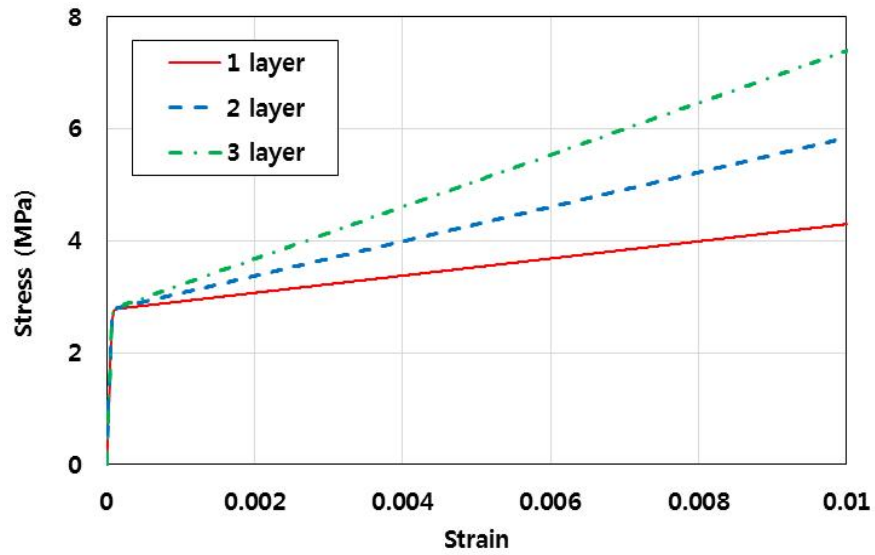
[그림 2.37] 직물섬유층 각도에 따른 형상



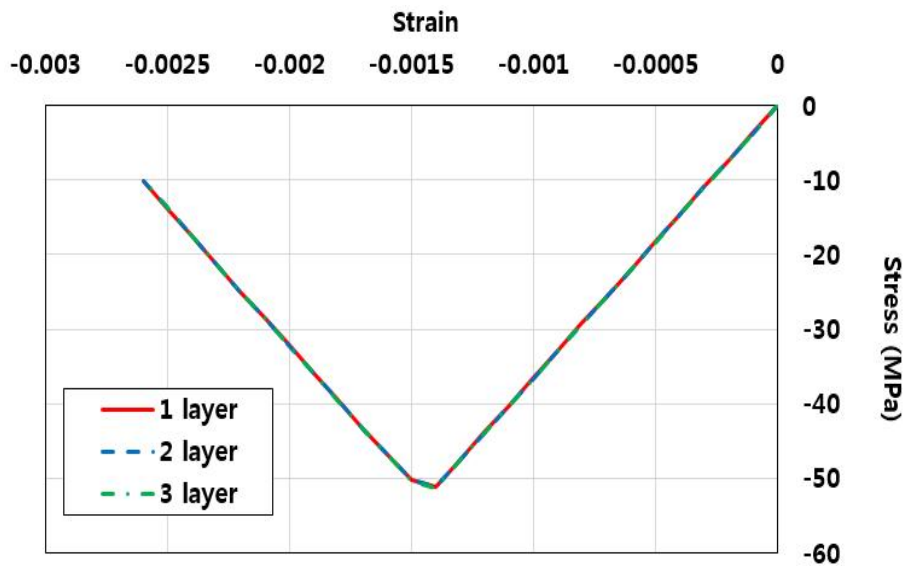
[그림 2.38] 직물섬유층 개수 및 각도에 따른 응력-변형률 곡선

○ 개발된 TRC 복합재료 유효물성치 평가법의 4점 휨 실험결과를 이용한 검증

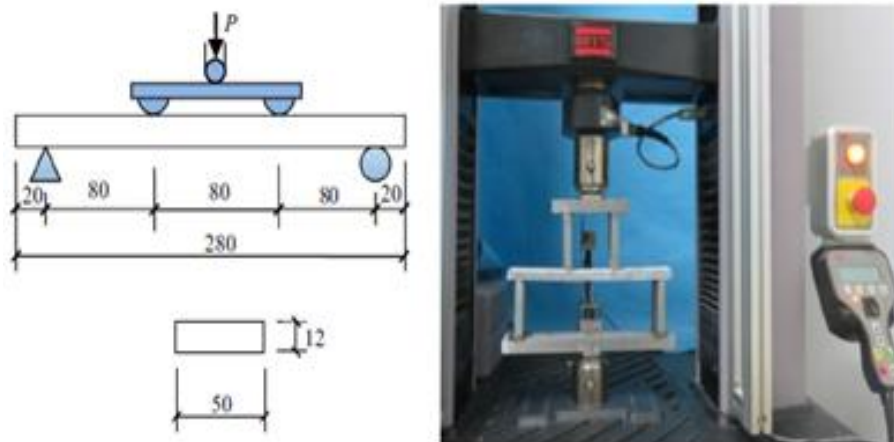
- 개발된 TRC 복합재료 유효물성치 평가법을 통해 도출된 TRC복합재료의 유효물성치의 TRC 구조부재의 유한요소해석 모델로의 적용 가능성을 평가하기 위해 4점 휨 실험논문을 기준으로 유효물성치를 도출하였으며 이를 유한요소해석모델에 적용하였으며, 유한요소해석결과와 실험결과값을 비교함



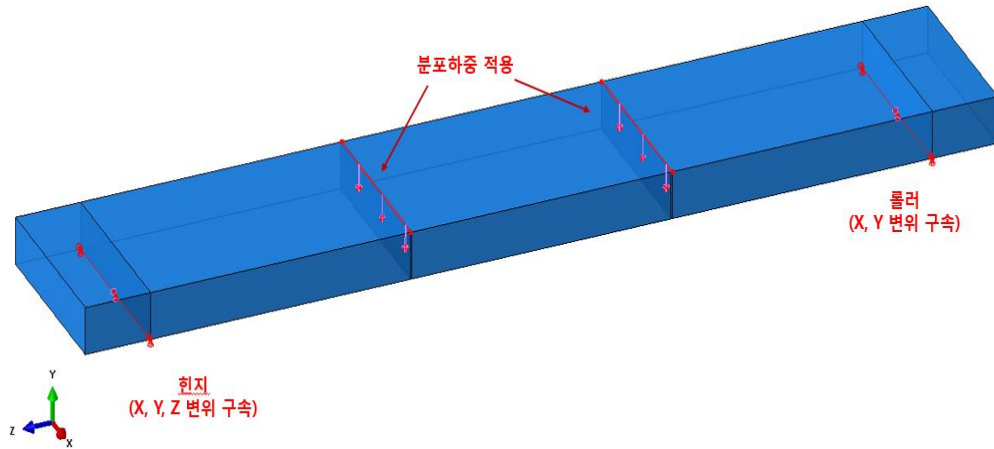
[그림 2.39] 평가법을 통해 도출된 인장응력-변형률 곡선



[그림 2.40] 평가법을 통해 도출된 압축응력-변형률 곡선

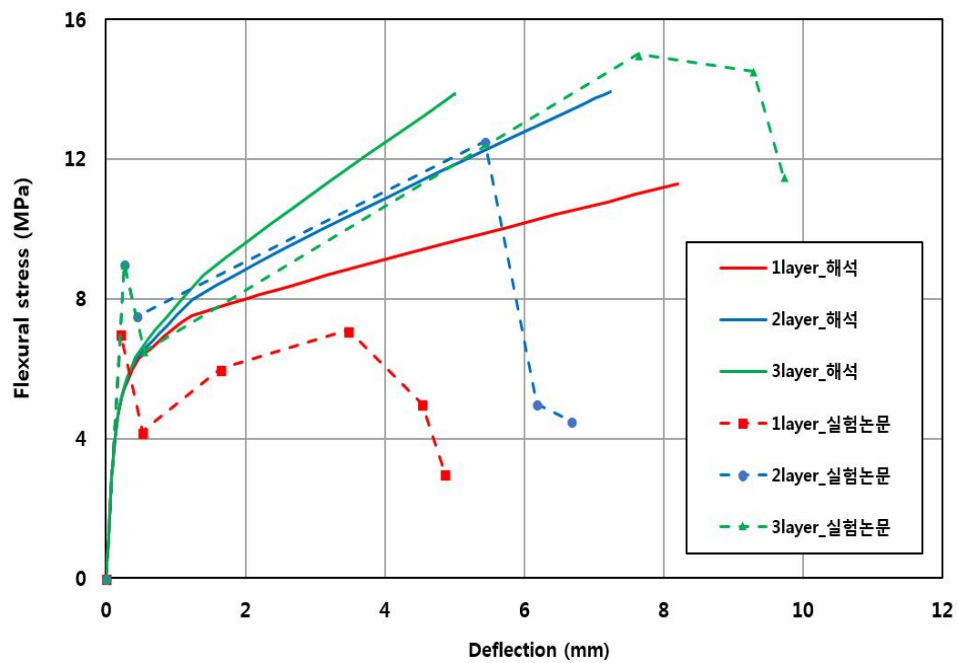


[그림 2.41] 실험논문의 실험체 형상 및 세팅



[그림 2.42] 유한요소해석 모델의 형상 및 경계조건

- 실험 및 개발된 평가법을 적용한 유한요소해석의 휨응력-변위 그래프 비교 시 초기 탄성구간의 기울기가 매우 잘 일치하며 매트릭스 항복 전후 거동이 유사할 뿐 아니라 해석 결과가 직물섬유층 개수 증가에 따른 강성 증대효과를 정확히 평가함

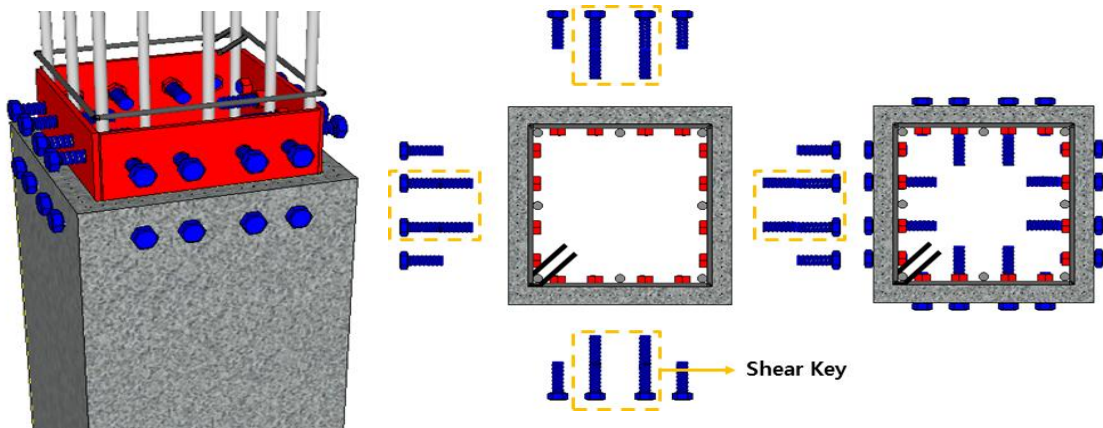


[그림 2.43] 4점 휨 실험 시험체 휨응력-변위 곡선

B-2 : TRC 영구거푸집 형상, 물성 최적화 및 구조부재 해석 모델 개발

○ TRC 거푸집 형상 최적화

- TRC 영구거푸집의 운반성과 제작 용이성을 고려하여 상, 중, 하로 모듈로 구성되는 것으로 고려하며, TRC 영구거푸집과 내부 콘크리트의 일체화를 이루어 연결성을 높이기 위해 모듈 사이 접합부에 접합 플레이트를 와 볼트를 적용함



[그림 2.44] 접합 플레이트와 볼트를 사용한 접합부 형상

○ TRC기둥의 횡방향 가력 실험과의 비교 및 분석

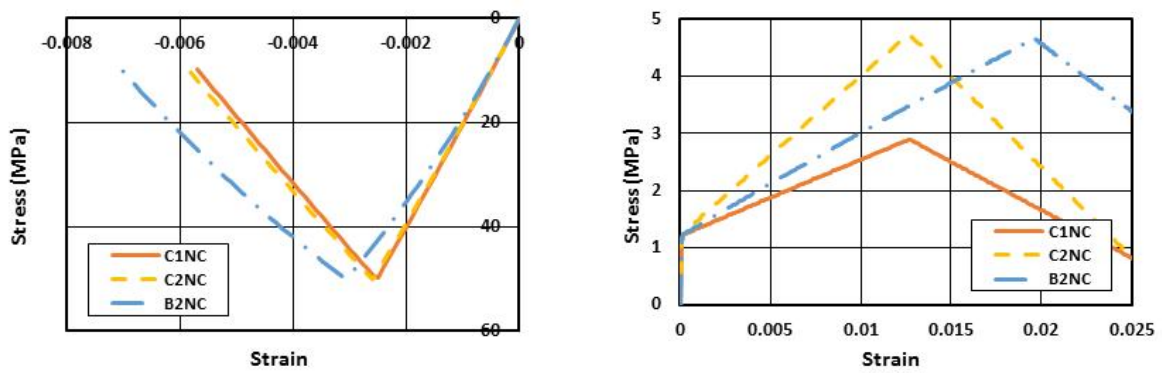
- 정적반복가력 실험의 섬유종류, TRC 모듈 치수, 철근 배근 상세, 등의 자료들을 기반으로 유한요소해석 모델링 및 TRC 복합재료의 물성치를 도출하였으며, 유한요소해석 결과를 실험 결과값과 비교함



[그림 2.45] 실험체 형상 및 실험체 세팅

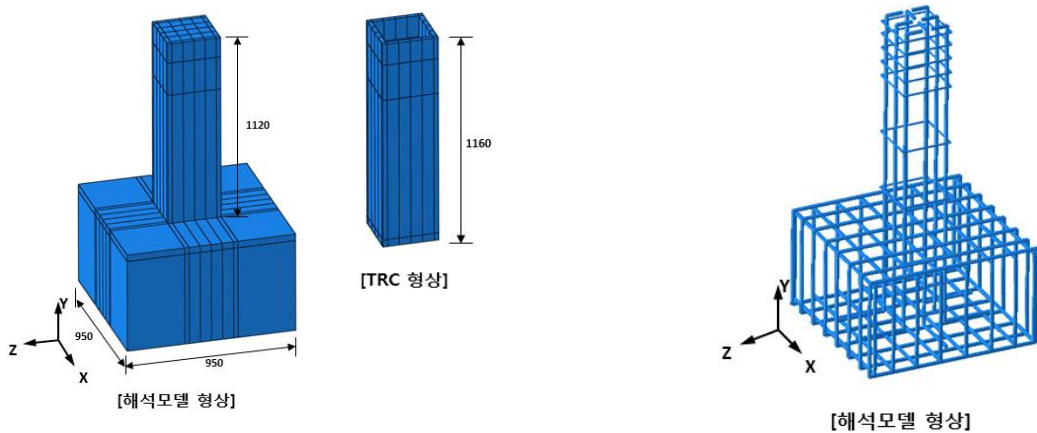
[표 2.9] 실험체 종류별 특징

실험체	내진상세 유무	TRC 영구거푸집 유무	섬유 종류 (Layer개수)
NC	X	X	-
SC	0	X	-
C1NC	X	0	Carbon48/12K(1)
C2NC	X	0	Carbon48/12K(2)
B2NC	X	0	Basalt(2)

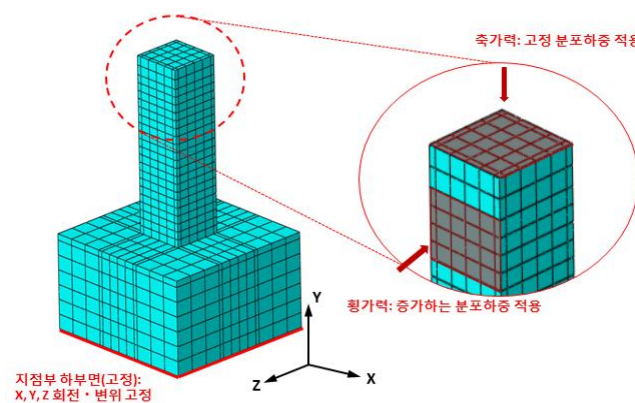


[그림 2.21] 복합재료별 인장응력-변형률 곡선 비교

- TRC 영구거푸집 적용 기둥의 복합재료의 응력-변형률을 압축과 인장에 대하여 도출하였으며, 섬유 종류에 따라 인장응력-변형률이 바뀌는 것을 확인할 수 있으며, 압축응력-변형률의 경우 섬유의 종류에 관계없이 거의 유사한 것을 알 수 있음



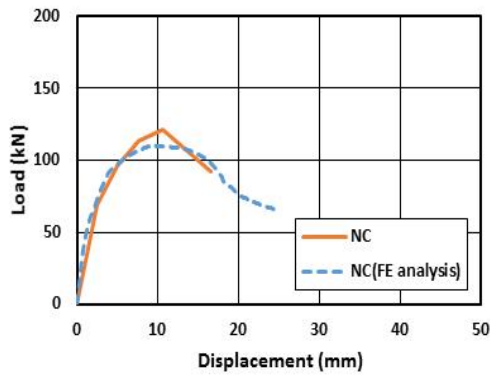
[그림 2.46] 해석모델에 사용된 철근의 형상



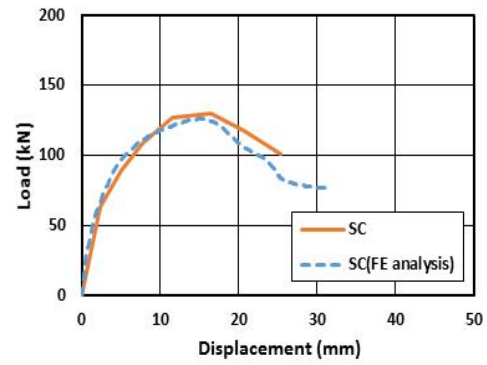
[그림 2.47] 유한요소모델 요소망 및 경계조건

- 정적반복가력 실험종료 후 파괴양상을 확인한 결과, TRC영구거푸집과 내부 타설 콘크리트 사이의 일체화를 위한 전단키(Shear key)의 영향으로 인한 일체거동을 확인하였음. 또한 유한요소해석 결과를 이용하여 실험체 하중-변위 관계를 비교 분석한 결과 유사한 거동을 나타냄

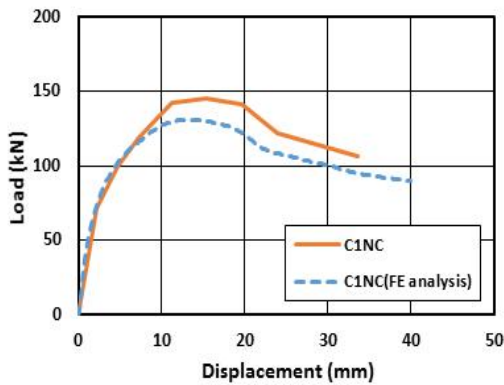
- 정적반복가력 실험의 정가력 및 부가력 평균값과 유한요소해석을 비교한 결과, 유한요소해석을 통해 거의 유사한 하중-변위가 도출되었으며, 최대하중 또한 10%이하의 오차가 나타나는 것을 통해 해석모델이 비교적 정확하게 실험체의 거동을 예측하는 것으로 판단됨



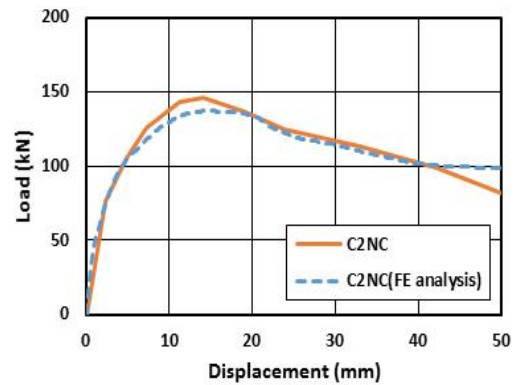
(a) NC



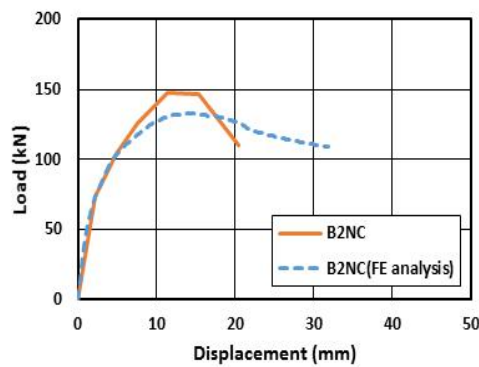
(b) SC



(c) C1NC



(d) C2NC



(e) B2NC

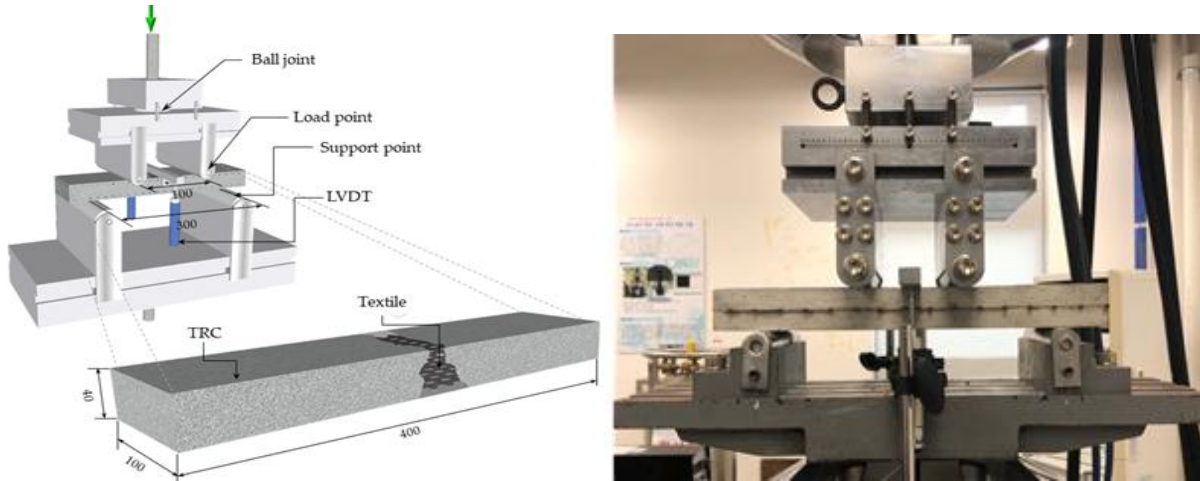
[그림 2.48] 실험 및 해석의 실험체별 하중-변위 관계

[표 2.10] 실물 실험과 유한요소해석의 해석 결과 비교

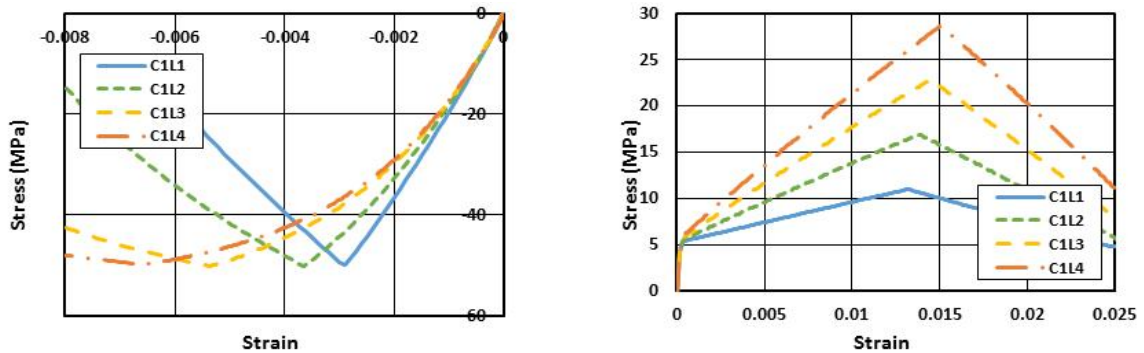
실험체명	Abaqus 최대하중(kN)	실험 최대하중	오차(%)
NC	110.26	121.41	-9.19
SC	125.70	130.11	-3.39
C1NC	130.93	145.32	-9.90
C2NC	136.91	146.28	-6.41
B2NC	132.91	147.66	-9.99

○ TRC패널의 4점 휨실험과의 비교 및 분석

- 4점 휨 실험의 변수로는 섬유 종류, Layer 개수가 있으며 실험자료를 기반으로 유한요소해석 모델링 및 TRC 복합재료의 물성치를 도출하였으며, 유한요소해석결과를 실험 결과값과 비교함



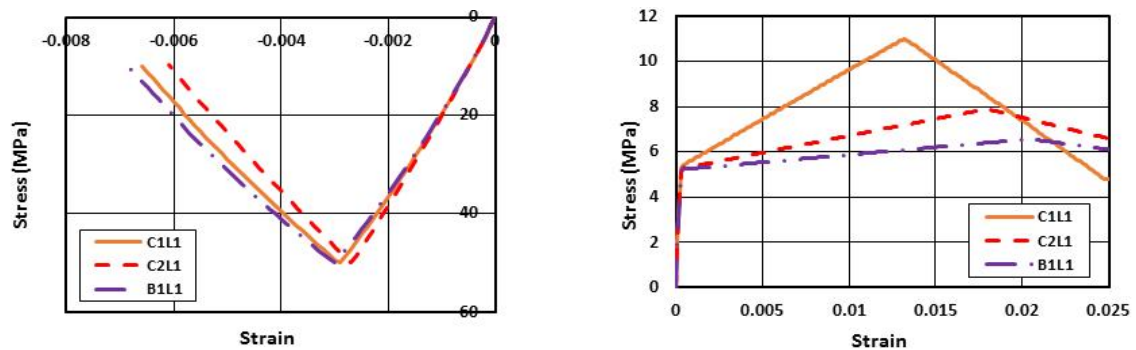
[그림 2.49] 실험체 형상 및 실험체 세팅



(a) 압축응력-변형을 비교

(b) 인장응력-변형을 비교

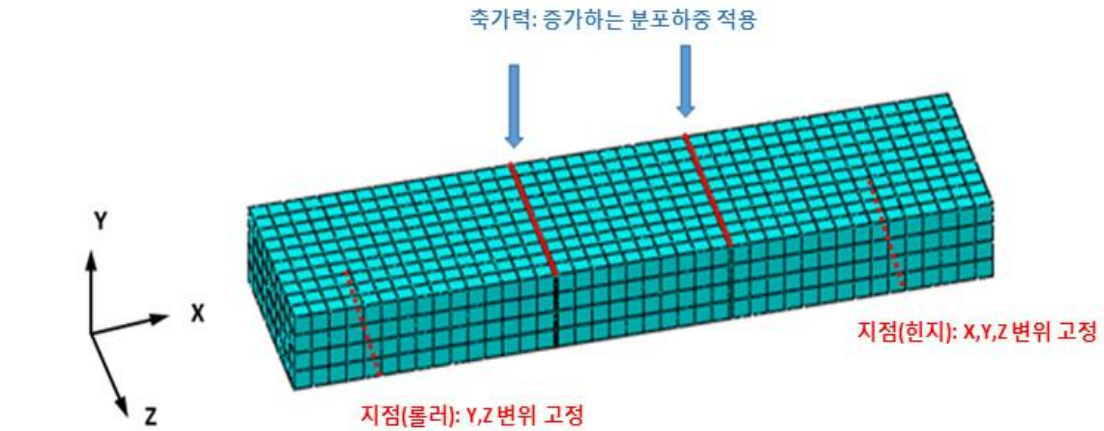
[그림 2.50] 섬유층 개수에 따른 비교



(a) 압축응력-변형을 비교

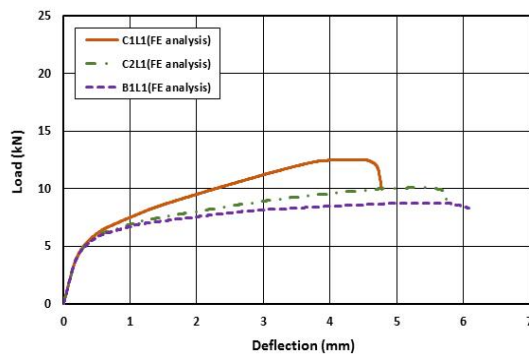
(b) 인장응력-변형을 비교

[그림 2.51] 섬유 종류에 따른 비교

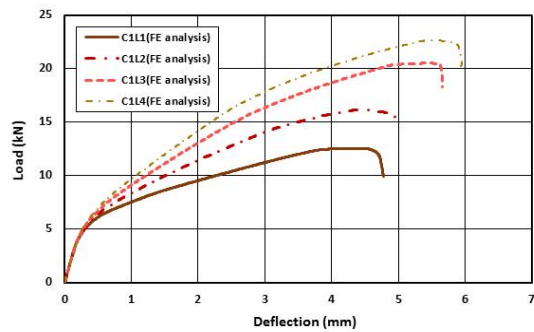


[그림 2.52] 유한요소모델 요소망 및 경계조건

- 섬유층의 개수와 섬유의 종류를 변수로 하여 각각 성능을 비교하였고, 이를 통해 섬유층 개수가 증가할수록 강도가 높아지는 것을 알 수 있으며, 섬유의 종류에 따른 강도는 Carbon48/12K, Carbon48/48K, Basalt 순으로 높게 나타나는 것을 확인함

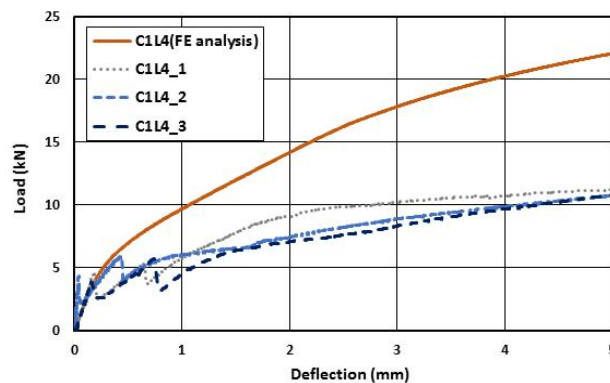


(a) 섬유 종류에 따른 하중-변위 그래프



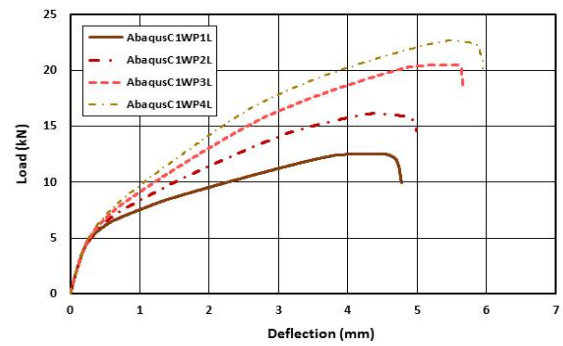
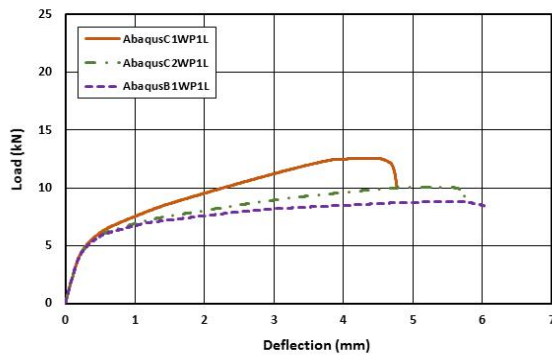
(b) 섬유 Layer 개수에 따른 하중-변위 그래프

[그림 2.53] 섬유 종류 및 Layer 개수에 따른 실험체별 하중-변위 그래프



[그림 2.54] C48/12K Layer-4 실험 및 해석 하중-변위 그래프

- 섬유층의 개수가 증가함에 따라 매트릭스의 인장 항복 이후 비선형 거동에서 하중-변위 그래프의 차이가 감소함을 알 수 있으며, 실물 실험의 TRC 복합패널 실험체의 재료적 특성이 해석모델에서 가정된 균질한 거동에 근접하게 된 것으로 판단됨

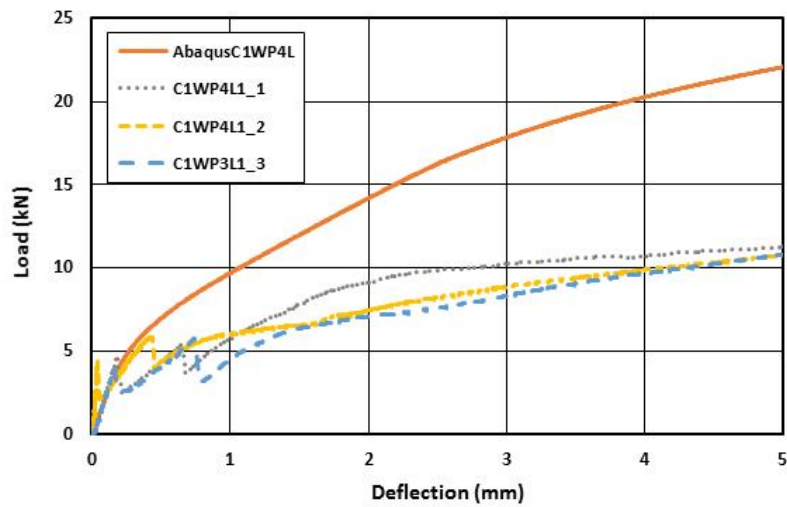


(a) 섬유 종류에 따른 하중-변위 그래프

(b) 섬유 Layer 개수에 따른 하중-변위 그래프

[그림 2.55] 섬유 종류 및 Layer 개수에 따른 실험체별 하중-변위 그래프

- 4점 휨 실험의 변수로는 섬유종류, Layer 개수가 있으며 실험자료를 기반으로 유한요소해석 모델링 및 TRC 복합재료의 물성치를 도출하였으며, 유한요소해석결과를 실험 결과값과 비교함

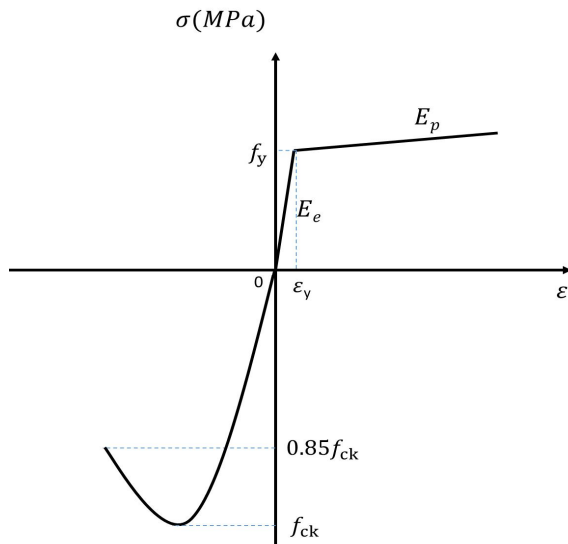


[그림 2.56] C48/12K Layer-4 실험 및 해석 하중-변위 그래프

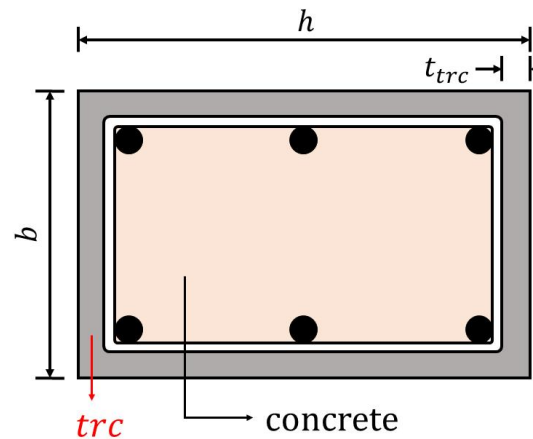
B-3 : TRC 영구거푸집에 대한 구조설계기준(안) 개발

○ 직물섬유보강 콘크리트로 보강된 사각형 기둥의 설계기준(안) 개발

- 직물섬유보강 콘크리트(Textile Reinforced Concrete, TRC)로 보강된 직사각형 기둥의 설계를 위하여 구조설계기준(안)을 개발하였음
- TRC는 인장 상태일 때 일반적인 콘크리트와는 다르게 연성 거동을 보이며, 압축 상태일 때 콘크리트와 유사한 압축 거동이 나타나며, 이와 같은 재료 특성을 지닌 TRC를 영구거푸집으로 활용하면, 내부 콘크리트의 구속 효과 증가 및 전반적인 압축성능이 향상되어 일반적인 철근 콘크리트 기둥 대비 증가된 축강도 및 휨강도를 지님



[그림 2.57] TRC의 인장 및 압축 구조거동



[그림 2.58] TRC 영구거푸집으로 보강된

기둥 형상

- 최대 축 하중의 경우 TRC에 사용되는 모르타르의 경우 일반적으로 콘크리트의 압축 강도보다 강하고 압축성능이 뛰어나지만 콘크리트에 적용되는 계수인 0.85를 그대로 적용하여 보수적으로 설계함

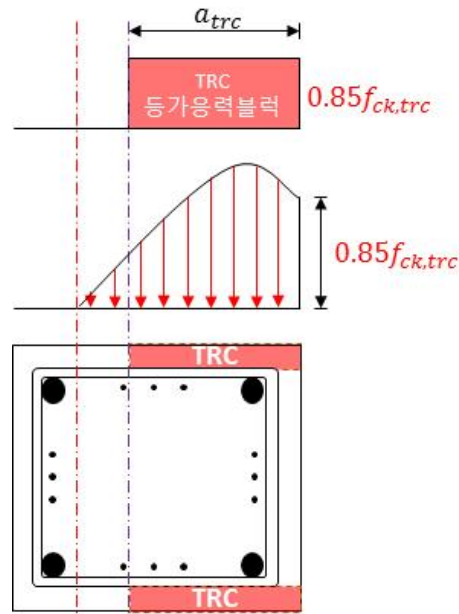
$$P_n = 0.85f_{ck,con'c}(A_g - A_{trc} - A_{st}) + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + f_{y,st}A_{st}$$

- 최대 설계 축하중은 최대 공칭 축 하중(P_n) 식에 편심을 고려한 감소계수 및 띠철근 유형에 따른 강도감소계수를 곱하는 형태이며 본 연구에서의 강도감소계수 ϕ 는 띠철근을 적용한 콘크리트 기둥과 동일한 강도감소계수를 사용함

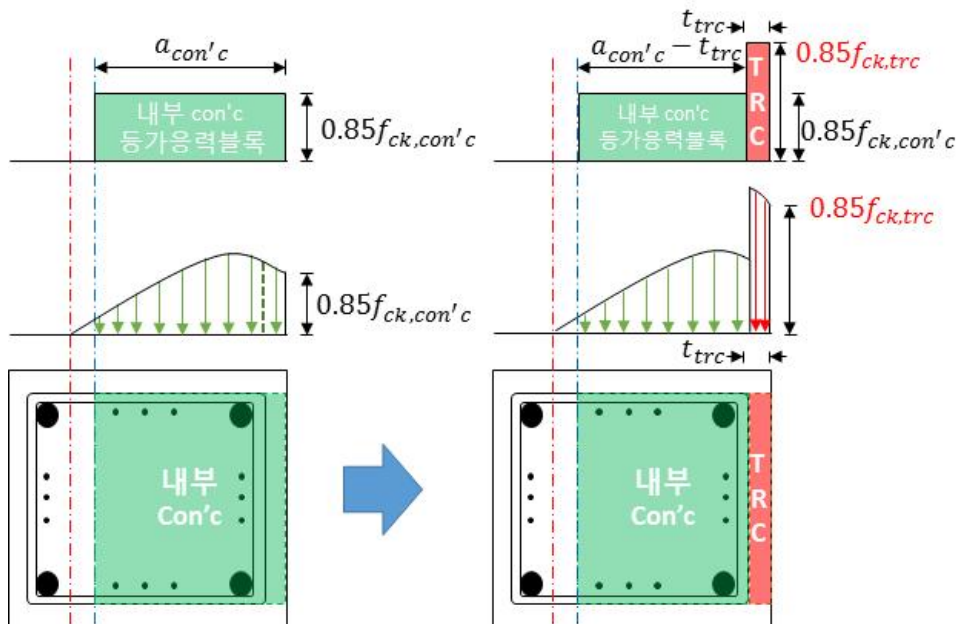
$$\phi P_{n(max)} = 0.80\phi [0.85f_{ck,con'c}(A_g - A_{trc} - A_{st}) + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + f_{y,st}A_{st}]$$

- 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 기둥의 경우, 설계강도는 축력과 휨모멘트에 대해서 고려하므로 P-M 상관도를 통해 확인할 수 있음

- 압축을 받는 면적을 두 구간으로 나누어 등가응력블록의 너비 및 면적을 계산하며, 면적 ①은 TRC로만 구성되어 있기 때문에 TRC의 압축강도를 고려하여 해당 부분의 내력을 산출함
- 면적 ②는 서로 다른 두 재료로 구성되므로 등가응력블록의 크기를 구하기 위해선 복잡한 계산식이 요구되어 간단한 산출과정을 위하여, 면적 ②에 해당하는 부분이 모두 일반 콘크리트로 구성되어있다고 가정해서 $a_{con'c}$ 를 계산한 후, 가정한 일반 콘크리트 응력 선도를 TRC 응력 선도로 치환하여 등가응력블록을 계산함



[그림 2.59] TRC로 구성된 면적 ①의 내력 계산 과정



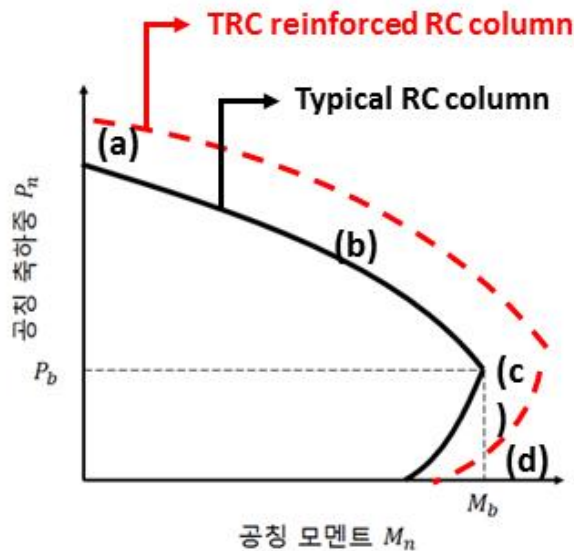
[그림 2.60] TRC와 일반콘크리트로 구성된 면적 ②의 내력 계산 과정

- 기둥에 작용하는 공칭 축 하중과 기둥의 내력들은 힘의 평형조건을 만족하며 공칭 모멘트 또한 기둥의 도심에 대한 모멘트 평형조건으로부터 구할 수 있고, 이를 바탕으로 축하중과 휨모멘트를 받는 TRC 패널로 보강된 콘크리트 기둥의 공칭 축강도 및 휨강도 산출이 가능함

$$P_n = 0.85f_{ck,con'c}A_{con'c} + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + \sum_{i=1}^n N_{si}$$

$$M_n = 0.85f_{ck,con'c}A_{con'c}\left(\frac{h}{2} - d_{con'c}\right) + 0.85f_{ck,trc}A_{trc}\left(\frac{h}{2} - d_{trc}\right) + \sum_{i=1}^n N_{si}\left(\frac{h}{2} - d_{si}\right)$$

- 최외단 철근의 변형률을 변화시켜 가며 각각의 변형률에 대한 공칭축력 및 휨모멘트의 조합 (M_n , P_n)을 계산하여 TRC 영구거푸집으로 보강된 사각형 기둥의 P-M 상관곡선을 구할 수 있으며, 이를 통해 일반 RC 기둥보다 TRC 보강 기둥의 향상된 압축 거동을 확인할 수 있음

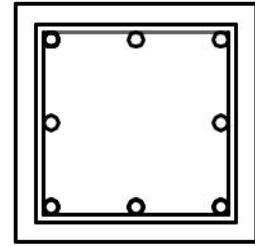


[그림 2.61] 휨과 축 하중을 받는 기둥의 공칭강도 상관곡선

○ TRC 영구거푸집 적용 콘크리트 기둥 P-M 상관도 계산기 작성

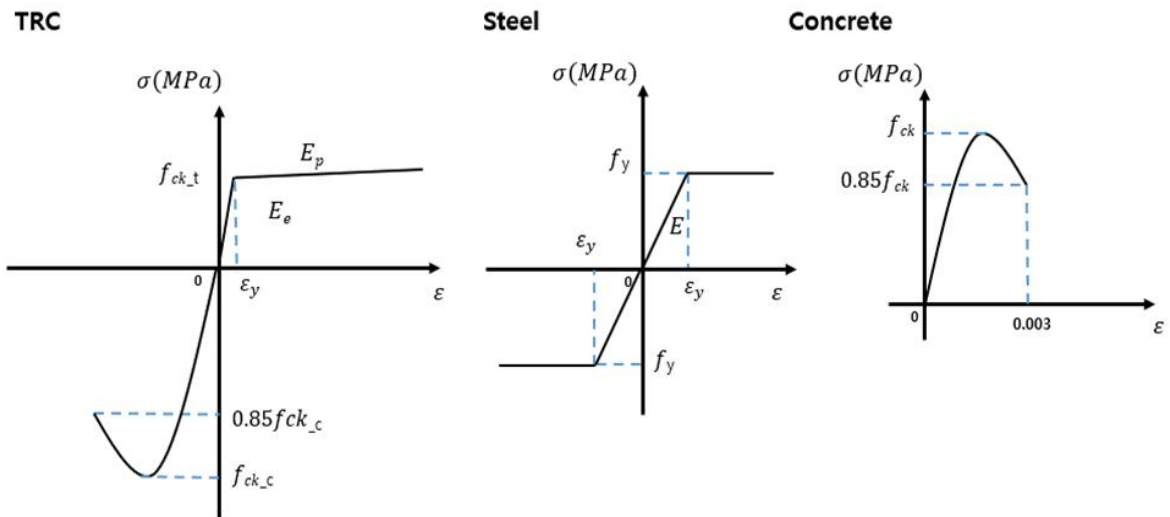
- 스프레드 시트를 이용하여 P-M 상관도 계산기를 만들었으며, 이를 이용하여 TRC 보강 기둥과 RC 기둥의 P-M 상관도 자동 작성이 가능함
- P-M 상관도 계산기에 TRC 영구거푸집 적용 콘크리트 기둥의 높이, 너비와 철근의 개수, 지름을 입력하면 입력한 값을 바탕으로 기둥의 형상이 자동으로 작성됨

기둥의 치수 및 부재 사이즈				재료 물성치		
기둥의 너비	b	300	mm	내부콘크리트		
기둥의 높이	h	300	mm	탄성계수	E	20500 MPa
TRC 두께	t_trc	25	mm	항복강도	f_ck	27 MPa
철근 지름	D-	19	mm	항복변형률	e_ck	0.003
철근 단면적	A_s	283.5	mm ²	철근		
띠철근 지름	D_hoop	10	mm	탄성계수	E	200000 MPa
철근의 개수				항복강도	f_y	400 MPa
1행	2행	3행	4행	항복변형률	e_y	0.002
3	2	3	0	TRC		
				Ee	20700	MPa
				Ep	118	MPa
				f_ck, t	5.53	MPa
				e_y	0.00026715	
				E	19000	
				f_ck, c	47.7	MPa



[그림 2.62] TRC 보강 기둥의 수치 입력 및 작성된 기둥 형상

- 계산기에 사용되는 재료별 재료모델을 제시하였으며, 재료 물성치값을 입력하면, 구조설계기준안을 바탕으로 부재별 변형률에 따른 상세 값 및 내력이 계산되어 표로 확인 가능함



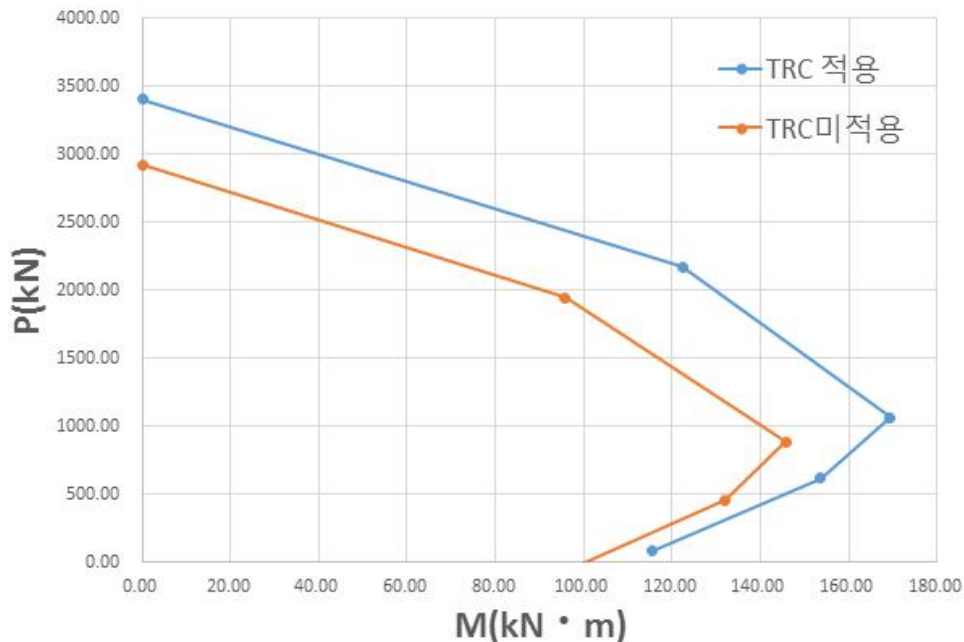
[그림 2.63] 재료별 재료모델

TRC 보강 기둥													
기둥의 압축-인장 상태		s1		s2		s3		s4		TRC		con'c	
e_s1	0.003	e	0.003	e	0.003	e	0.003	e	0.003	e	0.003	Pn	3404.51190 N
c	무한	f	400.00 MPa	f	400.00 MPa	f	400.00 MPa	f	0.00 MPa	f	40.55 MPa	Mn	0.00 N · mm
a	무한	A	851 mm ²	A	567 mm ²	A	851 mm ²	A	0 mm ²	A	27.500 mm ²	gPn	1.770.346.19 N
		N	320.681 N	N	213.787 N	N	320.681 N	N	0 N	N	1.114.988 N	gMn	0.00 N · mm
		M	0 N · mm	M	0 N · mm	M	0 N · mm	M	0 N · mm	M	0 N · mm		
e_s1	0.000	e	0.000000	e	0.001239	e	0.002477	e	0.000000	e	0.000	Pn	2172.99367 N
c	255.50 mm	f	0.00 MPa	f	247.75 MPa	f	400.00 MPa	f	0.00 MPa	f	40.55 MPa	Mn	122.326.646.27 N · mm
a	217.18 mm	A	851 mm ²	A	567 mm ²	A	851 mm ²	A	0 mm ²	A	15.347 mm ²	gPn	1.412.445.88 N
		N	0 N	N	127.461 N	N	320.681 N	N	0 N	N	622.247 N	gMn	79.512.320.08 N · mm
		M	0 N · mm	M	0 N · mm	M	33.831.848 N · mm	M	0 N · mm	M	56615758.2 N · mm		
e_s1	-0.002	e	-0.002000	e	0.000065	e	0.002129	e	0.000000	e	0.000	Pn	1066.70260 N
c	153.30 mm	f	-400.00 MPa	f	12.92 MPa	f	400.00 MPa	f	0.00 MPa	f	40.55 MPa	Mn	169.394.097.98 N · mm
a	130.91 mm	A	851 mm ²	A	567 mm ²	A	851 mm ²	A	0 mm ²	A	11.708 mm ²	gPn	693.356.69 N
		N	-340.200 N	N	7.923 N	N	320.681 N	N	0 N	N	474.711 N	gMn	110.106.163.69 N · mm
		M	35.891.100 N · mm	M	0 N · mm	M	33.831.848 N · mm	M	0 N · mm	M	55959699.2 N · mm		
e_s1	-0.004	e	-0.004000	e	-0.001110	e	0.001781	e	0.000000	e	0.000	Pn	619.432.72 N
c	109.50 mm	f	-400.00 MPa	f	-221.92 MPa	f	356.16 MPa	f	0.00 MPa	f	40.55 MPa	Mn	153.709.471.47 N · mm
a	93.08 mm	A	851 mm ²	A	567 mm ²	A	851 mm ²	A	0 mm ²	A	10.149 mm ²	gPn	485.222.29 N
		N	-340.200 N	N	-125.827 N	N	283.399 N	N	0 N	N	411.481 N	gMn	120.405.752.65 N · mm
		M	35.891.100 N · mm	M	0 N · mm	M	29.898.577 N · mm	M	0 N · mm	M	52391632.9 N · mm		
e_s1	-0.0090000	e	-0.009000	e	-0.004045	e	0.000910	e	0.000000	e	0.000	Pn	81.958.09 N
c	63.88 mm	f	-400.00 MPa	f	-400.00 MPa	f	182.00 MPa	f	0.00 MPa	f	40.55 MPa	Mn	115.287.103.79 N · mm
a	54.29 mm	A	851 mm ²	A	567 mm ²	A	851 mm ²	A	0 mm ²	A	3.524 mm ²	gPn	69.664.38 N
		N	-340.200 N	N	-226.800 N	N	135.269 N	N	0 N	N	345.617 N	gMn	97.994.038.22 N · mm
		M	35.891.100 N · mm	M	0 N · mm	M	14.270.847 N · mm	M	0 N · mm	M	46577787.6 N · mm		
e_s1	0.000000	e	0.000000	e	0.001239	e	0.002477	e	0.000000	e	0.000	Pn	2172.99367 N
c	255.50 mm	f	0.00 MPa	f	247.75 MPa	f	400.00 MPa	f	0.00 MPa	f	40.55 MPa	Mn	122.326.646.27 N · mm
a	217.18 mm	A	851 mm ²	A	567 mm ²	A	851 mm ²	A	0 mm ²	A	15.347 mm ²	gPn	1.412.445.88 N
		N	0 N	N	127.461 N	N	320.681 N	N	0 N	N	622.247 N	gMn	79.512.320.08 N · mm
		M	0 N · mm	M	0 N · mm	M	33.831.848 N · mm	M	0 N · mm	M	56615758.2 N · mm		

[그림 2.64] 부재별 변형률에 따른 상세 값 및 내력

- 결과값 요약본 추출 및 P-M 상관도 자동 작성을 이용하여 TRC 보강 기둥과 같은 형상의 RC 기둥의 성능을 비교 가능하며, 이를 통해 일반 RC 기둥보다 TRC 보강 기둥의 향상된 압축거동을 확인할 수 있음

P-M상관도



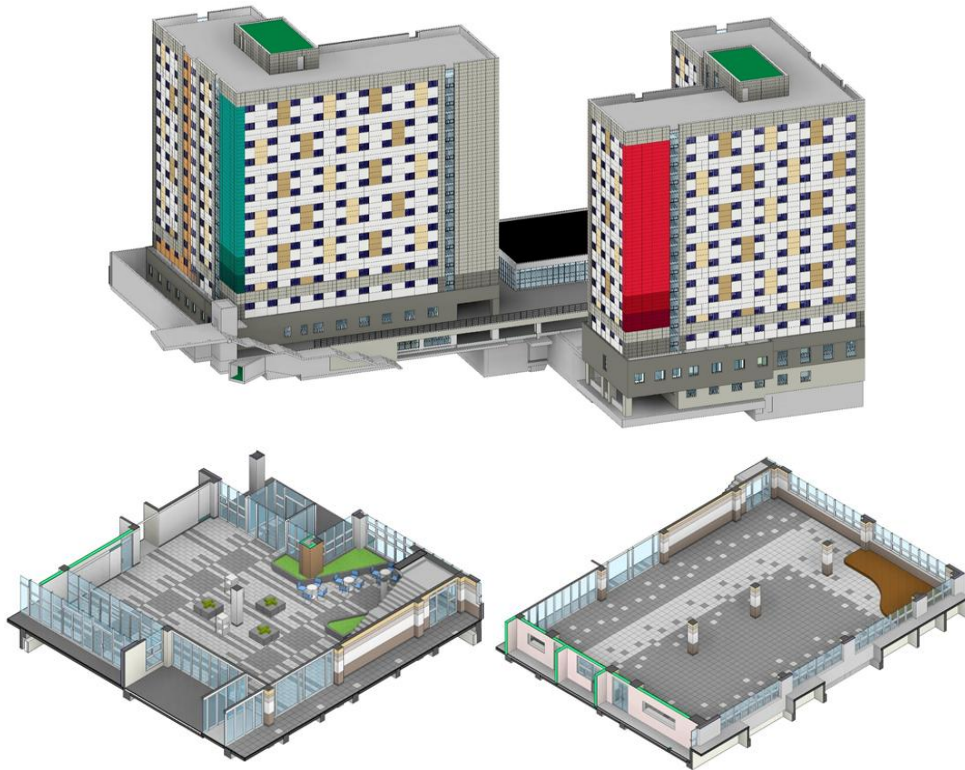
[그림 2.65] TRC 보강 기둥과 RC 기둥 P-M 상관도 비교

(다) 핵심연구성과 C : TRC 영구거푸집 BIM 모델링 및 형상 최적화

C-1 : 파라메트릭 디자인을 이용한 TRC 영구거푸집의 BIM 모델링

○ BIM 모델 정보 구조 분석을 통하여 요구정보 분석

- 사례분석 : 거푸집 생성, 시공, 유지관리단계에서 BIM 모델 활용 사례 조사/분석
- BIM 모델 적용 사례 조사 및 분석 - 경북대학교 시공 BIM 사례



○ 필요한 정보 추출을 위한 LOD(Level of Detail) 수준의 정립 및 파라메트릭 지원 도구 (Rhino, Dynamo, CATIA))등 S/W를 활용한 모델링 기법 개발 및 구현

○ 거푸집 BIM/파라메트릭 모델링 가이드라인작성을 위한 연구 보고서

1. 일반사항

1) 목적

- 「거푸집 BIM/파라메트릭 모델링 가이드라인」(이하 “가이드라인”이라 한다.)은 거푸집 시공의 모델링 작성의 최소 요건을 정의하고, BIM/파라메트릭기반 도서 기준의 정비를 통해 도서작성 환경을 개선하며, BIM을 활용한 시공단계에서 모델링을 최적화할 수 있도록 BIM/파라메트릭 모델링 작성에 대한 기준을 제공하기 위한 목적으로 작성한다.
- 이에 본 보고서는 「거푸집 BIM/파라메트릭 모델링 가이드라인」을 작성하기 위한 사전연구로써, 가이드라인의 목적, 구성, 활용, 용어정리 및 사례 연구에 대한 내용으로 작성되었다.

2) 개방형 BIM의 적용

- 거푸집 모델링단계에서는 “개방형 BIM” 기술을 적용한다.
- “개방형 BIM”이란 공인된 국제표준(ISO 16739)을 지원하는 다양한 소프트웨어들이 공개적으로 BIM 데이터를 공유 또는 교환을 통하여 구현하는 BIM을 의미한다. 개방형 BIM은 다양한 사용자의 여러 소프트웨어 환경(종류, 버전 등)에서 작성된 BIM 데이터를 표준화된 환경에서 검토, 관리 및 재활용하기 위하여 적용한다.

3) 가이드라인의 적용

- 가이드라인은 거푸집의 특성(규모, 형태 등) 및 시공방법(부재

2. LOD 수준 정립

1) LOD(Level of Development)

① LOD의 정의

- 업무 범위 및 항목 설정을 위한 IPD 통합 BIM 설계 프로세스 방법론이다. AIA Document E202 TM -2008에서 LOD는 두 가지 의미로 혼용된다. Level of Development와 Level of Detail은 비슷한 의미로 사용되고 있으나, 혼란을 막기 위해 다음과 같이 정의하도록 한다.
- 우선 LOD(Level of Development)는 모델링 수준에 따른 단계별 업무를 의미한다. 여기에서 업무는 IPD 통합설계 프로세스에서 정의하는 내용을 의미하고, 설계 프로세스의 내용 중 LOD 단계별 통합 BIM 모델 생성을 위한 업무로 한정한다.
- 또 다른 LOD(Level of Detail)는 설계 프로세스 단계별 모델링 수준을 의미하는 것으로 직접적인 모델링 요소 및 방법, 입력 데이터, 통합 모델 활용 등에 대한 구체적이고 직접적인 모델링 작업의 수준을 의미한다.
- 예를 들면, LOD 100 단계에서 설계자는 매스 • 조닝 모델을 생성해야 하는데, 이때 모델을 생성하는 것은 설계자의 업무로서의 LOD(Level of Development)이고, 매스 • 조닝 모델생성을 위한 볼륨 설정, 체적 설정, 형태 생성, 건축물의 위치 데이터 입력, 건축물 유형정보 입력 등은 모델링 작업에 따른 데이터 모델의 수준을 결정하는 것으로서의 LOD(Level of Detail) 이다.

② LOD(Level of Development) 단계별 분류

- LOD 단계는 모델링 수준에 따라 100에서 500까지 단계를 구분하고 있다. LOD는 특정 소프트웨어에 대한 구체적인 모델링 가이드라인 및 모델 콘텐츠의 일반적인 정의를 반영하지 않고 통합설계 프로세스에 따라 단계를 분류하고 있다.
- 아래 표의 내용은 기존 설계 프로세스와 통합설계 프로세스를 통한 LOD 단계를 비교한 것이다.

[표 2.11] 프로세스별 세부 설계 단계 정의

기존 설계 프로세스		통합설계 프로세스	
한국	AIA	IPD	LOD
기획설계	Pre-Design	Conceptualizatio	LOD100
계획설계	Schematic Design	Criteria Design	LOD200
중간설계	Design Development	Detailed Design	LOD300
실시설계	Construction Documentation	Implementation	LOD400
시공	Bidding	Documents Construction	LOD500

③ LOD(Level of Development) 단계별 BIM 통합 모델의 활용

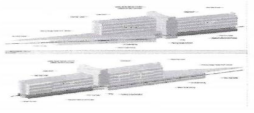
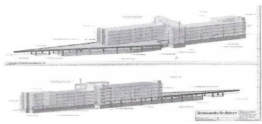
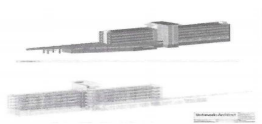
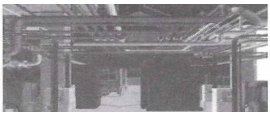
- LOD 단계별 모델링 수준에 따른 업무 범위 및 항목을 정의하기 위해서는 통합 모델의 활용 방안을 이해해야한다.



[그림 2.66] LOD 통합 BIM 모델의 활용

- 통합 모델은 LOD 단계별로 모델링되며, 각 분야의 모델은 하나의 통합 모델로 통합된다. 설계자는 건축 BIM 모델을 만들고, 이를 각 분야의 BIM 모델과 함께 하나의 통합 모델을 생성한다. 이때 BIM 프로젝트 매니저는 모델을 체크하여 간섭과 오류가 없는지 검토하며, 각 분야별로 모델을 추출하여 필요한 시뮬레이션 및 작업을 수행할 수 있도록 관리 감독한다.
- LOD 단계별 BIM 통합 모델을 사용함에 있어서는 각 분야별로 특화된 목적에 따른 소프트웨어를 사용하므로 통합 모델을 변환하여 사용하게 된다. 따라서 표준이 되는 LOD 단계별 BIM 통합 모델의 생성이 매우 중요하다.

[표 2.12] Level of Development 단계별 내용 (Vectorworks Architect, D . C . Riverside Office Building)

LOD	LOD 단계별 BIM 통합 모델의 모델링 수준	
LOD 100 Conceptual		개념설계의 수준으로 매스형이 되며, 전체건물의 면적, 높이, 체적, 위치, 향 등이 설정된다.
LOD 200 Approximate Geometry		개념이 구체화된 계획단계 형태, Space Program, 공간계획 및 공간관계가 정의되고 주요 건축 일반시스템이 결정된다. 개략적인 연면적, 건폐율, 용적률, 층수, 층고, 주 구조, 외피구조, 설비시스템, 견적, 적산 등이 도출된다.
LOD 300 Precise Geometry		LOD 200 단계의 개략적인 내 용이 결정되는 단계로 구체적인 엔지니어 요소를 포함한 빌딩시스템이 결정되고, 모든 건축 요소가 모델링된다.
LOD 400 Fabrication		실제시공을 위한 모델링 단계로 결정된 모든 시스템의 크기, 모양, 수량 등을 모델링한다. 시공, 제작, 조립에 관련된 디테일, 부재, 구조, 설비, 배관, 배선 등의 요소도 모델링한다.
LOD 500 As Built		LOD 500 단계의 모델은 준공 모델로서 모델링 데이터는 실제 건축물과 동일관리·운영 전반을 포함한다.

2) LOD 단계별 모델링 수준에 따른 업무 범위 및 항목

① LOD 100

- 프로젝트 초기에 과업지시서 분석을 거치면서 이슈를 도출하고 콘셉트를 정하게 된다. 이 과정에서 대지의 분석과 프로그래밍 단계 등을 통해 프로젝트의 목표를 명확히 하는 것이 필요하며, 상호 호환성을 고려한 적절한 BIM 및 시뮬레이션 도구를 선택해야 한다.
- 우선 프로젝트를 통해 달성하고자 하는 명확한 목표 설정이 필요하다. 비정형건축, 친환경건축, 초고층건축 등 프로젝트 성격에 따라 필요로 하는 분석 방법 및 종류, 모델링 툴과 시뮬레이션 툴이 상황에 따라 달라질 수 있다.
- LOD 100 단계는 프로젝트 타당성 검토 단계로 이해할 수 있으며, 매스 형태의 모델을 제작하고 모델을 통한 법규 검토, 형태 분석, 대안 검토, 대지환경 분석, 사업성 검토 등이 이루어진다.

② LOD 200

- LOD 200 단계는 다양한 대안을 검토하여 대안선정을 목표로 한다. 각 분야별 전문가

간의 활발한 의사 • 정보 교환을 바탕으로 각종 데이터 모델이 제작된다. 따라서 분업을 통한 업무 범위 설정과 데이터 모델의 통합관리가 중요하다.

- 이 단계에서는 건물의 규모와 형태가 결정되고 대지와 건물과의 관계, 주요 빌딩시스템의 개요가 결정된다. 따라서 가장 활발한 대안 검토가 이루어지며 모델링 수준 또한 시뮬레이션에 적합하도록 기본적인 필수 요소들로 정의되어 있다.
- 모델링 수준은 규모 • 형태에 따른 치수 • 면적이 표현되고 지붕, 바닥, 벽체, 구조기둥, Space 등이 모델링되며 건물 형태, 설비, 일정, 비용 등이 요구된다.

③ LOD 300

- LOD 200 단계에서 대안을 비교 분석하고 평가하여 최적안을 도출했다면, LOD 300단계는 도출된 안을 발전시키는 단계이다.
- 주 빌딩시스템이 결정됨에 따라 주요 부재들이 모델링되며 설계 의도를 전달하기 위한 요소들이 모델링된다.
- 심의 및 인허가를 위한 도면 추출, 시각화를 위한 렌더링 및 이미지 추출, 개산 • 적산을 위한 데이터 추출, 세부 디테일의 개발, 각종 건축물 성능 평가가 모두 이루어진다.
- 즉, 개략적인 빌딩시스템을 모두 확정하고 모델링하는 단계라고 이해할 수 있으며 협의를 통해 자재, 장비, 용량 등이 구체화되어 모델링된다.

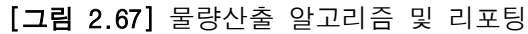
④ LOD 400

- 실질적인 입찰, 계약 및 시공을 위한 BIM 통합 모델 구축 단계이다.
- 각 분야별 모델의 데이터 간섭 체크를 통한 품질 검토가 이루어지므로 공정계획과 정확한 물량산출을 함으로써 적산 및 공사비 내역 산출을 위한 시공성 향상을 목표로 한다.
- 즉 확정된 빌딩시스템 모델을 체크하고 최종 수정 • 보완하는 단계로 이해할 수 있다.

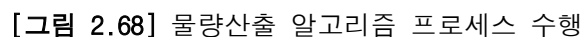
⑤ LOD 500

- BIM을 통한 효율적인 공사 일정계획 및 품질관리를 목적으로 한다. 이를 통해 공사시 발생하는 위험부담을 최소화하고, 시공성 확보를 통해 시공 품질 향상을 도모한다.
- 이 단계에서 LOD 통합 BIM 모델은 실제 준공 데이터 모델을 바탕으로 유지관리 • 운영을 위한 데이터 모델로서의 역할을 수행한다.
- 따라서 유지보수 • 운영에 대한 데이터의 기록 및 수정이 쉬워야 하며, 증축 • 확장, 리모델링 및 폐기정보를 포함할 수 있어야 한다.

○ 거꾸집 모델로부터 물량산출 자동화를 위한 알고리즘 개발

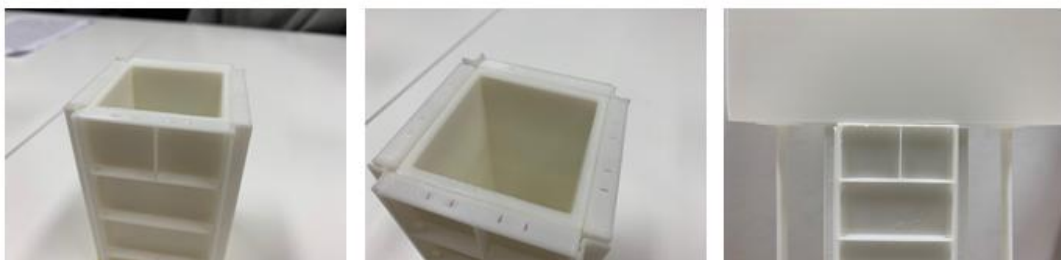
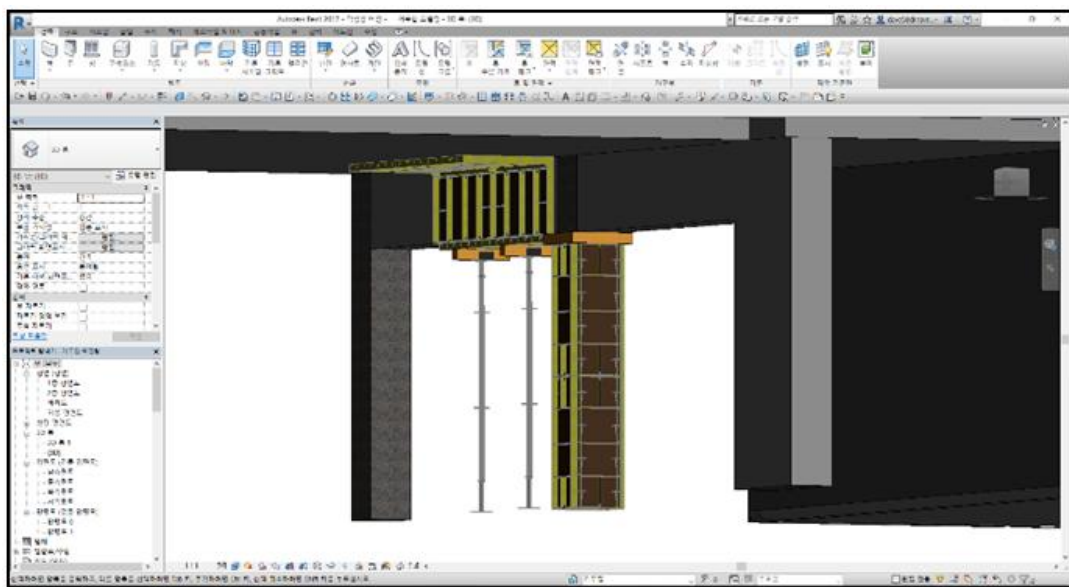
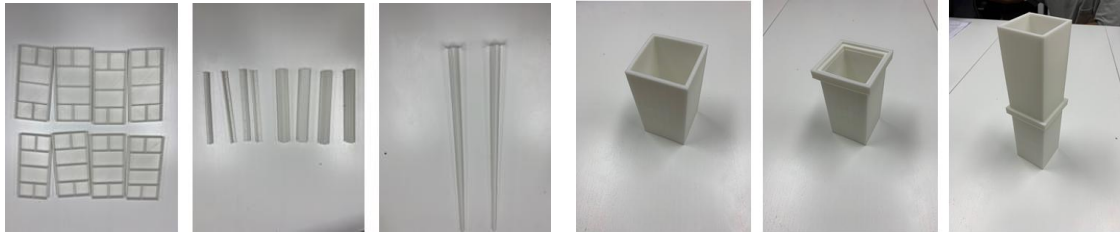


- 기존의 물량에 대한 수치를 수기로 작성한 후, 합산, 검토하는 방식이 아닌 BIM 모델을 활용하여 입력된 객체정보에 따라 물량산출 할 수 있는 알고리즘을 개발
 - 이 알고리즘을 통해 산출된 물량을 사용자가 필요한 정보만을 추출해 낼 수 있는 리포팅 기술을 접목한 알고리즘 또한 연동하여 개발함으로써 정확도 높은 결과물을 손쉽게 얻을 수 있게 됨
- 물량산출 결과 리포팅 표준 템플릿 개발 및 시뮬레이션 결과의 정확도 검증
- 알고리즘을 이용한 기존 거푸집(유로폼) 물량산출 알고리즘 적용을 통한 실효성 검증
 - 현재 가장 많이 사용되고 있는 유로폼 및 각종 거푸집 부재들을 BIM 도구를 사용하여 모델링 후, 알고리즘을 적용하여 물량산출(개수) 수행



○ Digital Fabrication 프로세스 검증

- 여러 타입의 TRC 거푸집을 모델링한 후, 3D 프린터를 이용하여 Digital Fabrication 수행
- 유로폼(기존 거푸집)과 TRC 거푸집의 사전 시공성 검토 및 접합부에 대한 검토



[그림 2.69] Digital Fabrication 프로세스 수행

- BIM 도구(Revit)을 이용하여 개발된 TRC 영구거푸집 형상 모델링
- 전년도에 개발된 BIM 가이드라인 기반 모델링 완료 후, 연동 프로그램인 Dynamo(다이나모)를 활용하여 TRC 영구거푸집 자동 물량산출 알고리즘 개발
- 이와 동시에 물량산출 결과 리포팅 알고리즘 개발
- 기존의 거푸집(유로폼) 및 TRC 영구거푸집 물량산출(개수) 결과 검증
- 모델링된 TRC 영구거푸집을 토대로 3D 프린터를 이용한 Digital Fabrication 프로세스 수행
- 여러 안의 거푸집 프린팅 후, 사전 시공성 검토 및 접합부 상세 검토

C-3 : TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼 개발

○ 목적

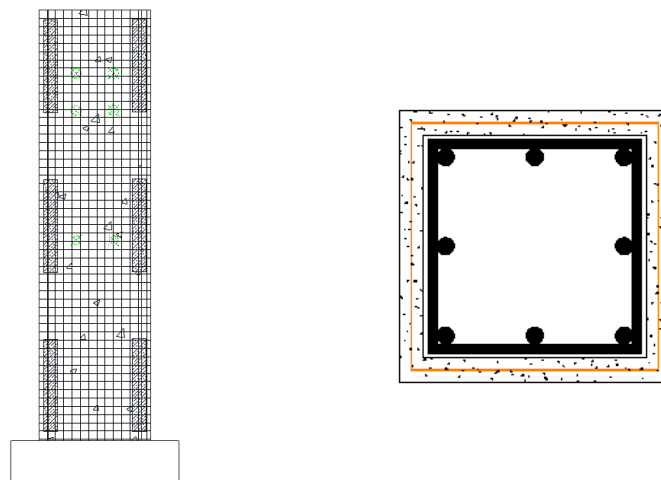
- 「TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼」(이하 “시공 매뉴얼”이라 한다.)은 거푸집의 모델을 결정함에 있어서 구조설계를 바탕으로 형태 및 재료를 정의하고, BIM/파라메트릭 기반 Digital Fabrication 과정을 거쳐 거푸집 제작의 기회비용을 최소화하여, 실제 시공현장에 적용하기 위한 목적으로 작성함

○ 적용범위

- TRC 영구거푸집 : 내진성능 향상을 위한 RC기둥의 직물섬유 보강 콘크리트(Textile Reinforced Concrete)로써, 연성능력이 우수한 직물섬유와 콘크리트의 융합을 통한 복합재료를 적용한 거푸집 구조물
- 본 시공 매뉴얼은 필로티 건축물의 기둥을 대상으로 TRC 영구거푸집의 크기, 형태 결정 및 시뮬레이션, 제작, 타설에 관한 사항을 기술한 것으로 실무자들이 거푸집 시공을 시행하고 협의하는데 적용함
- 본 시공 매뉴얼에 규정되지 않은 사항은 관련 법규 및 이에 근거한 기준, 건축공사 표준시방서, 콘크리트 구조설계를 기준으로 함

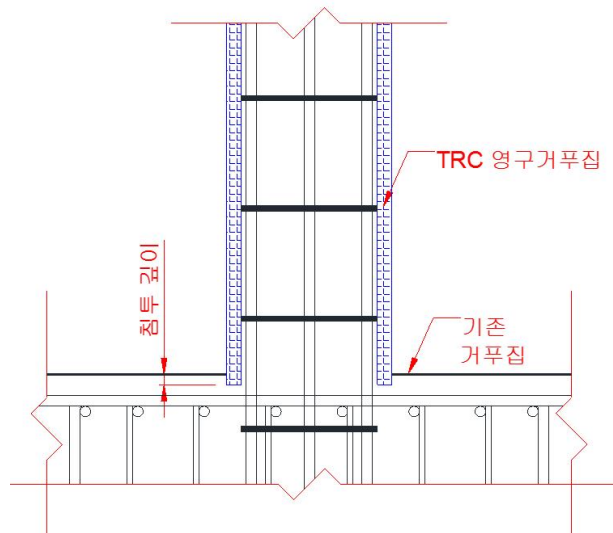
○ TRC 영구거푸집 모델

- 개발한 TRC 영구거푸집은 필로티와 같은 중·저층 구조물의 기둥에 적용함으로써 타설 완료 후 외관에서 보이지 않는 시공불량으로 상실된 성능을 확보하고 추가적으로 내진성능 향상을 목표로 한다. 따라서 TRC 영구거푸집 외부 단면 크기는 기존 기둥 부재의 단면크기와 동일한 크기를 가짐
- TRC 영구거푸집은 기존 철근콘크리트 기둥 부재에서 피복두께를 대체함으로써 피복두께와 동일한 두께를 가짐. 따라서 철근콘크리트 기둥의 피복두께를 대체함으로써 부재의 단면크기가 증가하지 않으며, 영구거푸집 내부에 혼입된 연성능력 및 인장강도가 우수한 보강섬유의 영향으로 철근콘크리트 기둥의 내진성능을 확보할 수 있음
- TRC 영구거푸집 형상 및 단면 상세는 [그림 2-1]과 같다.



[그림 2.70] TRC 영구거푸집 형상 및 단면

- TRC 영구거푸집은 지진과 같은 외부하중으로 인하여 기둥 부재에 횡력이 작용할 때 직물섬유의 영향이 미치지 않는 기둥과 기초사이에서 슬립이 발생하는 것을 방지하기 위하여 [그림 2-2]와 같이 상/하단의 기초 및 슬래브의 피복두께만큼 삽입이 가능하도록 제작되어야 함

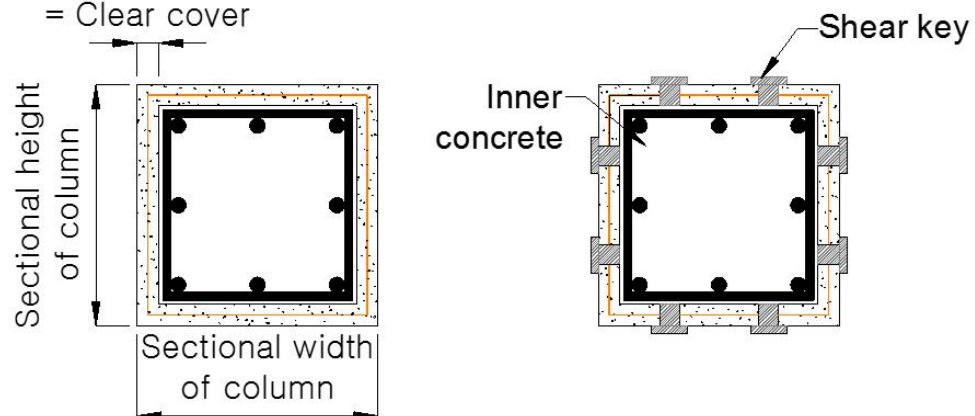


[그림 2.71] TRC 영구거푸집의 하단부 접합상세

- TRC 영구거푸집은 내부 콘크리트 부착성능을 향상시켜 지진과 같은 자연재해 시 일체화 거동을 확보하는 것이 가장 중요함
- 따라서 TRC 영구거푸집의 각 단면마다 2개의 전단키(Shear key)를 적용 할 수 있도록 25mm의 홈을 형성하여야 함. 또한 TRC 영구거푸집 내부의 콘크리트 타설 시 전단키를 사전에 설치 후 타설하여야 하며, 이를 통하여 타설된 내부 콘크리트의 부력으로 TRC 영구거푸집이 위로 상승하는 것을 방지하고 충분한 부착성능을 확보할 수 있음
- TRC 영구거푸집에 전단키 설치 상세는 [그림 2-3]과 같음

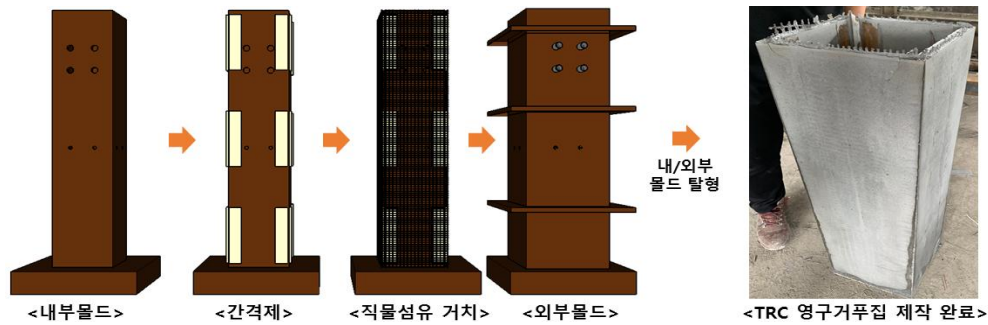
Thickness of TRC permanent form

= Clear cover



[그림 2.72] TRC 영구거푸집 전단키 설치 상세

- TRC 영구거푸집 제작 과정은 [그림 2-4]와 같다.
 - (1) 설계된 기둥 단면크기에서 피복두께만큼 제외한 크기의 내부 몰드를 설치
 - (2) 직물섬유 거치 시 일정한 간격 유지, 충분한 직물섬유의 초기 응력(Pre-stressing) 확보 및 내 콘크리트와 영구거푸집 간의 부착성능을 확보하기 위하여 ‘ㄷ’ 형상의 간격재를 설치
 - (3) 직물섬유의 충분한 인장 응력을 확보하면서 랩핑
 - (4) 설계된 기둥 단면크기와 동일한 외부 몰드를 설치하고 콘크리트를 타설 한 후 충분한 양생 기간을 거쳐 제작을 완료

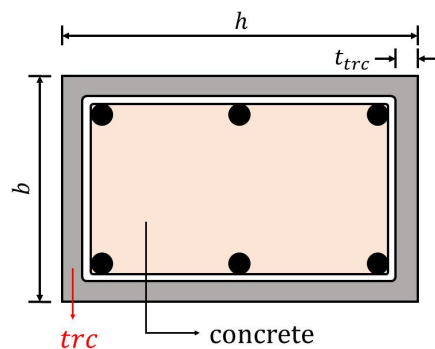
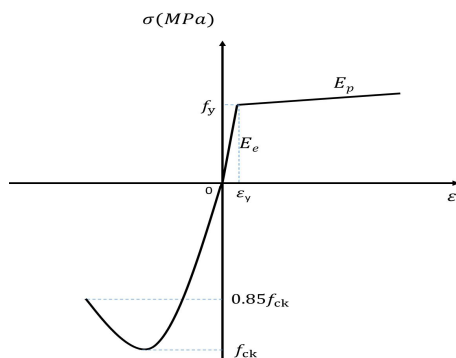


[그림 2.73] TRC 영구거푸집 제작 과정

○ TRC 영구거푸집 구조설계

1) 직물섬유보강 콘크리트 재료 특성 및 단면 형상

- TRC는 연속적인 직물섬유가 시멘트 매트릭스에 일체화된 복합체로 높은 압축 및 인장강도, 내구성 및 연성을 보유하고 있으며 TRC 재료의 응력-변형률 그래프는 아래와 같이 나타낼 수 있다.
- [그림 2-5]에 나타난 바와 같이 TRC는 인장력에 대해서는 철근과 유사한 거동을, 압축력에 대해서는 콘크리트와 유사한 거동을 보인다. TRC 보강으로 인해 내부 콘크리트의 구속 효과 증가 및 전반적인 압축성능이 향상되어 일반적인 철근 콘크리트 기둥 대비 증가된 축강도를 지닌다.
- [그림 2-6]는 TRC 영구거푸집으로 보강된 사각형 기둥의 단면 형상을 나타내며 일반 콘크리트 기둥의 피복에 해당하는 영역이 TRC로 보강되어 있다.



[그림 2.74] TRC 재료의 응력-변형률 그래프 [그림 2.75] TRC 영구거푸집 보강 사각형 기둥 형상

2) 기둥 최대 축 하중

- 세장비의 영향을 고려하지 않아도 되는 짧은 기둥에 중심 축하중이 작용할 경우 최대 공칭 축하중(P_n)은 아래의 식(1)로 나타낼 수 있음

$$P_n = 0.85f_{ck,con'c}(A_g - A_{trc} - A_{st}) + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + f_{y,st}A_{st} \quad (1)$$

- 여기서, $f_{ck,con'c}$ 은 내부 타설 콘크리트의 표준압축강도,

$f_{ck,trc}$ 은 TRC 영구거푸집 패널 사용 콘크리트의 표준압축강도,

$f_{y,st}$ 는 주근의 항복강도,

A_g 는 기둥의 전단면적,

A_{trc} 는 그림 2에 회색으로 나타난 TRC 보강 영역의 면적,

A_{st} 는 주근의 총단면적,

을 나타낸다.

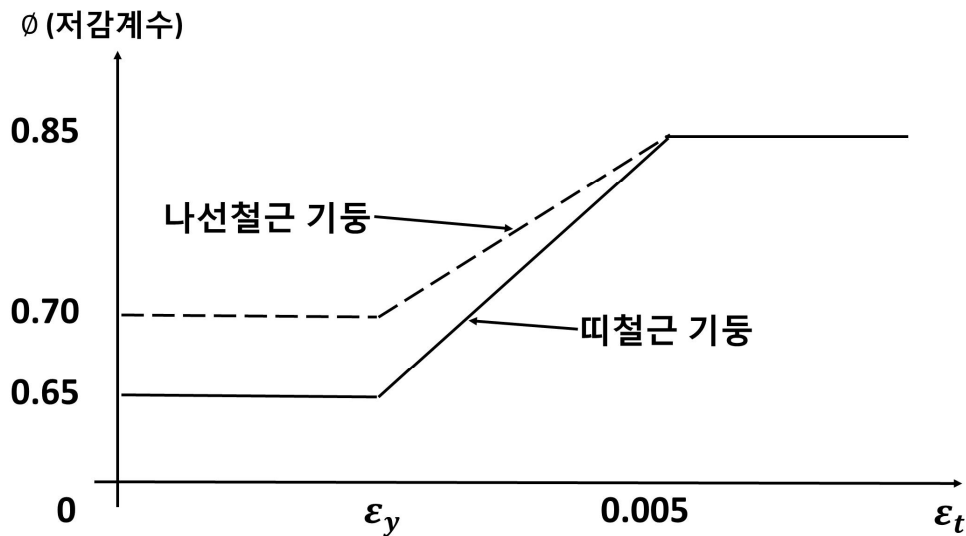
- 최대 설계 축하중은 식(1)에 강도감소계수를 곱하여 식(2)와 같이 나타남

$$\phi P_n = 0.80\phi[0.85f_{ck,con'c}(A_g - A_{trc} - A_{st}) + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + f_{y,st}A_{st}] \quad (2)$$

- 여기서, 강도감수계수 ϕ 는 아래의 식(3)에 의해 계산

$$\phi = 0.65 + \frac{0.85 - 0.65}{0.005 - \epsilon_y}(\epsilon_t - \epsilon_y) \quad (3)$$

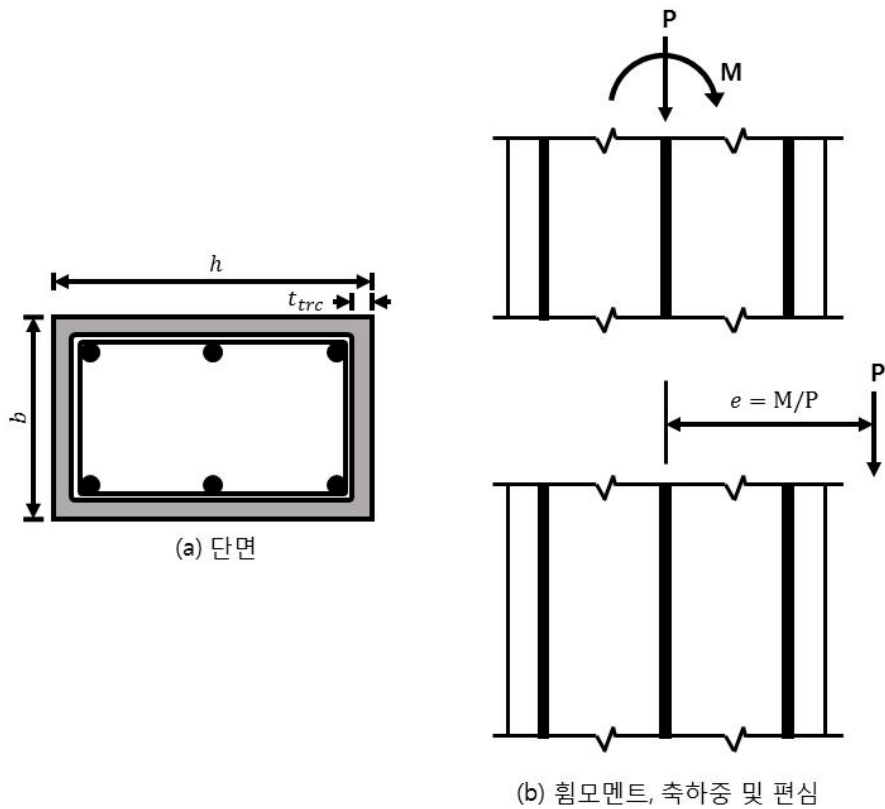
- 여기서, ϵ_t 는 순인장변형율, ϵ_y 는 압축지배 변형률한계를 나타낸다. 식(3)은 아래의 [그림 2-7]에 그래프로 나타나 있으며, 띠철근 콘크리트 기둥의 경우와 동일한 저감계수를 사용



[그림 2.76] 변화구간 단면의 강도감소계수

3) 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 기둥의 설계강도

- 축력 P 와 휨모멘트 M 을 동시에 받는 기둥의 하중은 [그림 2-8]에 나타난 것과 같이 편심 거리 $e = M/P$ 를 가진 축 하중 P 로 나타낸다. 편심거리 e 값이 커지면 인장지배 거동이, 반대로 작아지면 압축지배거동이 나타남



[그림 2.77] 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 기둥의 편심거리

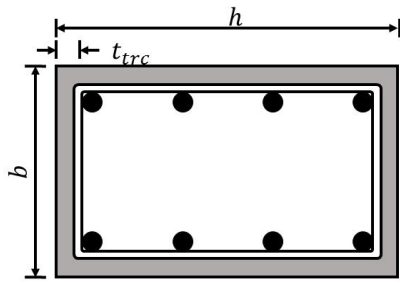
- 축력 P 와 휨모멘트 M 을 동시에 받는 TRC 보강기둥의 구조안전성을 평가하기 위해 아래와 같은 가정에 근거해 P-M 상관도를 유도
 - (1) 선형적인 콘크리트 변형률 분포
 - (2) 콘크리트 극한변형률은 0.003
 - (3) 콘크리트 압축응력분포는 등가의 직사각형 응력분포 사용
- 이로부터 축력 P 와 휨모멘트 M 을 동시에 받는 TRC보강기둥의 변형률 및 힘의 분포를 그림 1-4와 같이 나타낼 수 있으며, 중립축의 위치가 단면 내 위치하는 경우와 그렇지 않은 두 가지의 경우로 구분함
- 다양한 축력 P 와 휨모멘트 M 의 조합에 대해 P-M 상관도를 그리기 위해 콘크리트의 압축축 최대변형률 $\epsilon_u = 0.003$ 에 대한 중립축 거리 c 를 ϵ_{s1} 을 중심으로 나타내면 아래의 식과 같음

$$c = \left(\frac{0.003}{0.003 - \epsilon_{s1}} \right) d_{s1} \quad (4)$$

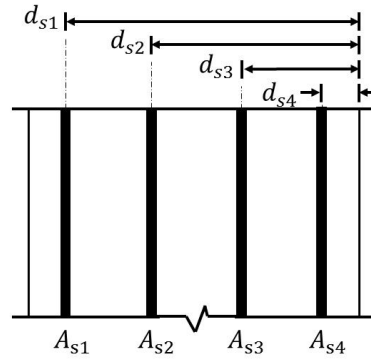
- 이로부터 i 열 철근의 변형률 ϵ_{si} 를 식(5)를 이용해 구할 수 있음

$$\epsilon_{si} = \left(\frac{c - d_{si}}{c} \right) (0.003) \quad (5)$$

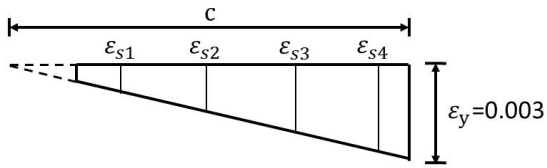
- 계산된 값을 이용해 각 철근에 작용하는 응력 f_{si} 를 다음의 식을 이용해 구할 수 있음



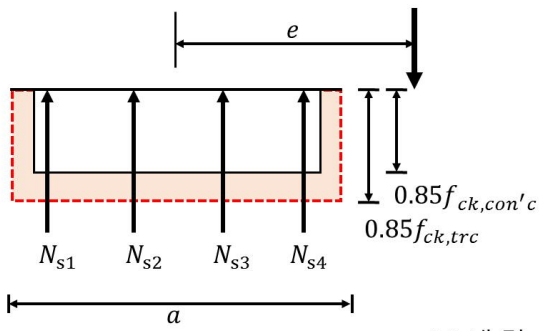
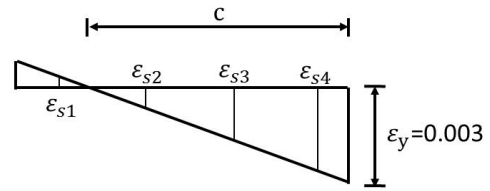
(a) 단면



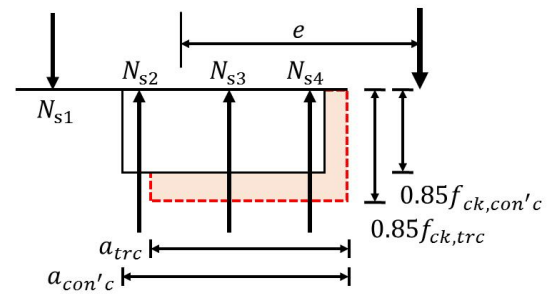
(b) 철근 단면적 및 위치



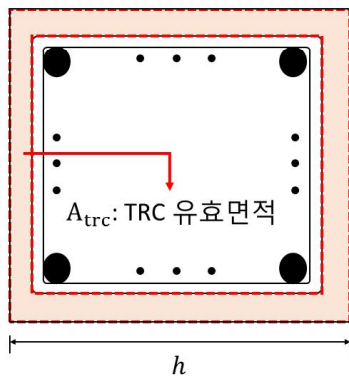
(c) 변형률



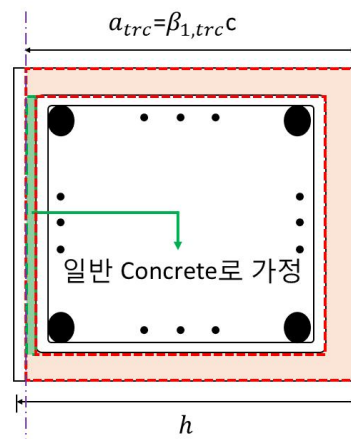
(d) 내 력



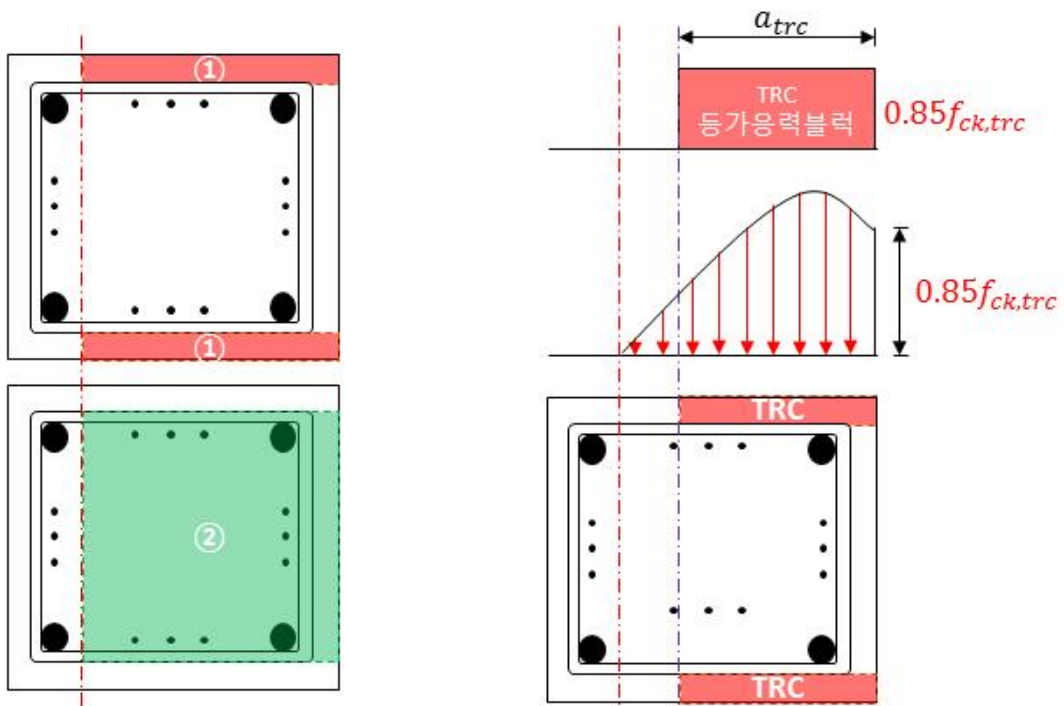
1) $a_{trc} \geq h$



2) $a_{trc} < h$

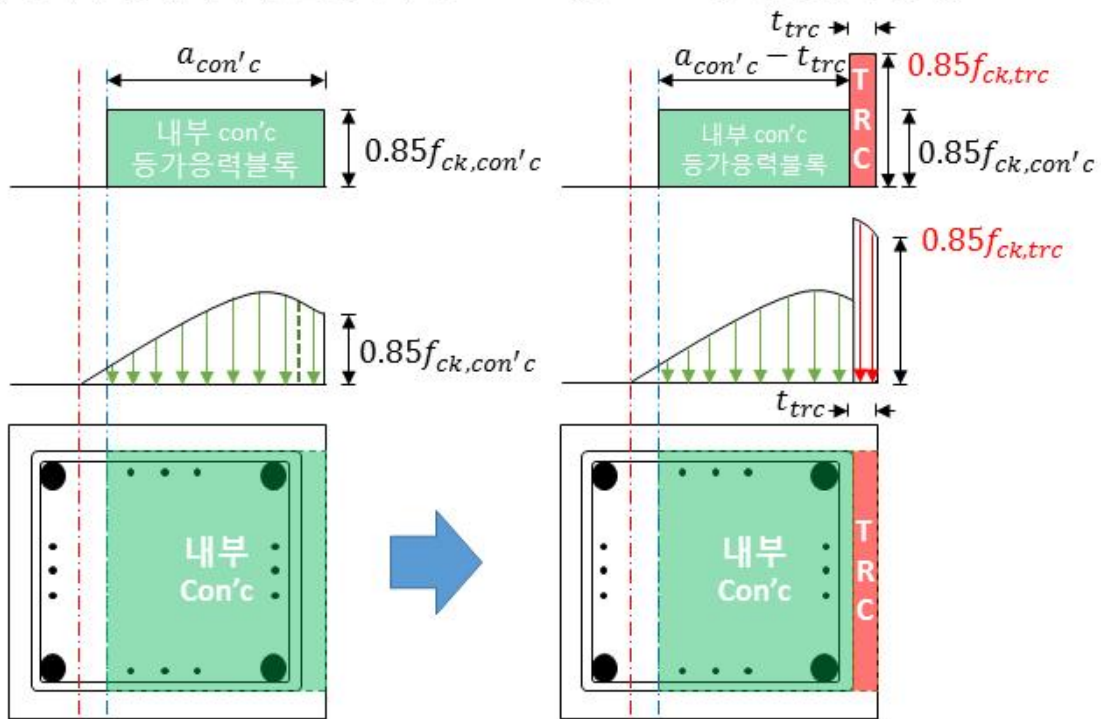


(e) a_{trc} 길이에 따른 TRC 유효면적(A_{trc})



(a) 압축구간에서의 유효면적 구분

(b) TRC로만 구성된 부분 ①



(c) TRC와 일반 콘크리트로 구성된 부분 ②

- 직사각형 등가블록으로 주어지는 콘크리트 및 TRC의 압축응력은 [그림 2-10]에 주어진 개념도에 따라 계산한다. 그림 6에 나타난 내부 콘크리트 및 TRC 영역의 등가응력블록의 깊이 $a_{con'c}$ 와 a_{trc} 는 $a = \beta_1 c$ 으로 계산하며, β_1 의 값은 아래의 식에 의해 결정됨

$$\beta_1 = 0.85 \quad (f_{ck} \leq 28\text{MPa}) \quad (7-1)$$

$$\beta_1 = 0.85 - (0.007)(f_{ck} - 28) \geq 0.65 \quad (f_{ck} > 28\text{MPa}) \quad (7-2)$$

- [그림 2-10]의 개념도에 따라 콘크리트 압축영역에 작용하는 축력 $P_{con'c}$ 는 아래의 식과 같이 계산할 수 있음

$$\begin{aligned} P_{con'c} &= 0.85f_{ck,con'c}(a_{con'c} - t_{trc}) + 2 \times (0.85f_{ck,trc}(a_{trc} \times t_{trc})) + 0.85f_{ck,trc}((b - 2t_{trc}) \times t_{trc}) \quad (8) \\ &= 85f_{ck,con'c}A_{con'c} + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + \sum_{i=1}^n N_{si} \end{aligned}$$

- 철근에 작용하는 축력 P_{st} 를 구하기 위해 인장철근의 경우에는 식(9), 압축철근의 경우에는 식(10)을 이용해 계산할 수 있음

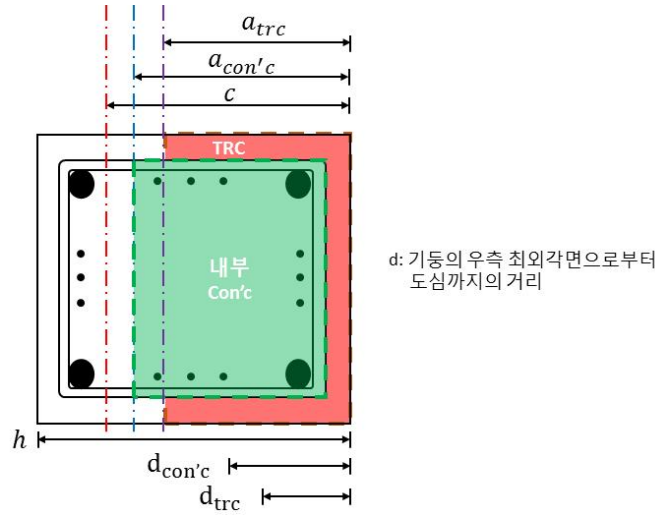
$$N_{si} = f_{si}A_{si} \quad (9)$$

$$N_{si} = (f_{si} - 0.85f_{ck,con'c})A_{si} \quad (10)$$

- TRC 보강 사각형 기둥 단면에 작용하는 공칭 축력 P_n 은 축방향 힘의 평형조건으로부터 아래의 식(11)과 같이 나타낼 수 있음

$$P_n = P_{con'c} + P_{st} = 0.85f_{ck,con'c}A_{con'c} + 0.85f_{ck,trc}A_{trc} + \sum_{i=1}^n N_{si} \quad (11)$$

- 여기서, n 은 철근열의 총 개수를 의미함



[그림 2-78] 콘크리트 및 TRC의 유효면적과 기둥의

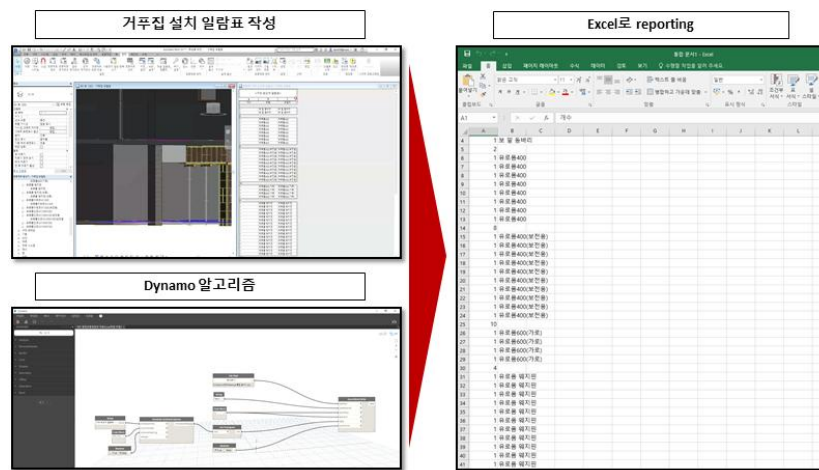
최외각면으로부터 콘크리트 및 TRC의 도심까지 거리

- TRC 보강 사각형 기둥 공칭 휨모멘트 M_n 은 기둥의 도심에 대한 모멘트 평형조건으로부터 아래의 식(12)로 나타낼 수 있음

$$M_n = 0.85f_{ck,con'c}A_{con'c}\left(\frac{h}{2} - d_{con'c}\right) + 0.85f_{ck,trc}A_{trc}\left(\frac{h}{2} - d_{trc}\right) + \sum_{i=1}^n N_{si}\left(\frac{h}{2} - d_{si}\right) \quad (12)$$

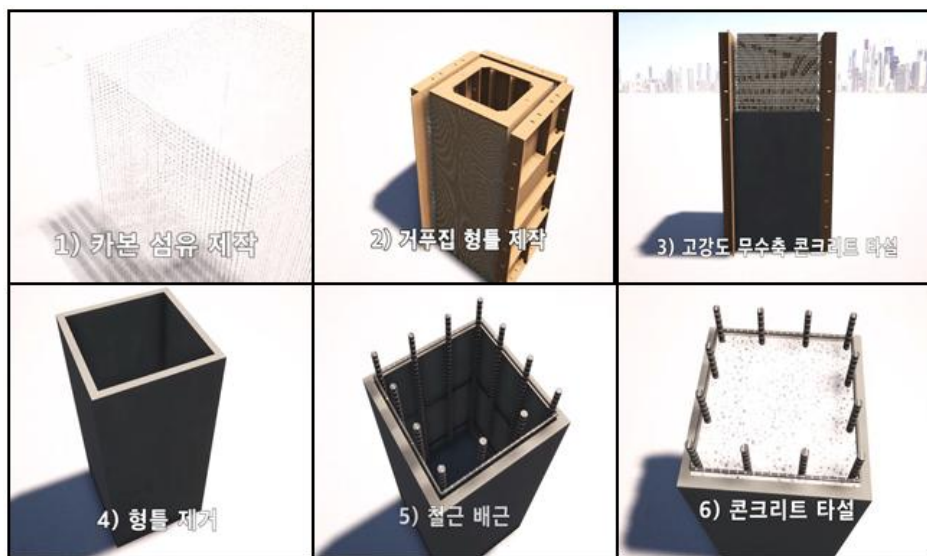
- [그림 2-12]에 제시된 TRC 보강 사각형 기둥의 P-M 상관곡선을 구하기 위해 앞서 3)에 논의된 ε_{s1} 값을 다양하게 변화시켜 다양한 편심거리 e 에 대해 공칭축력 및 휨모멘트의 조합 (M_n , P_n)을 계산하여 그래프로 표현해 완성

- BIM을 활용하여 시공단계에서 모델링을 최적화할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 거푸집 제작, 접합부에 대한 시공법 고려 등 사전 협의를 통해 최적의 시공방법을 모색함
- 개발한 파라메트릭 기반의 「TRC 영구거푸집 물량산출 자동화 알고리즘」을 통해 기존의 방식인 유로폼 뿐만 아니라 TRC 영구거푸집의 시공과정에서 필요한 재료, 부재, 모듈의 양등의 정략적인 물량수치를 Digital Fabrication을 통해 예측
- 「TRC 영구거푸집 물량산출 자동화 알고리즘」은 BIM 기반의 모델링 도구인 ‘Revit’의 3D 모델에 매개변수를 설정하고 값을 입력하여 Add-in 프로그램인 파라메트릭 기반의 ‘Dynamo’의 알고리즘을 활용하여 자동으로 입력 및 수정이 가능함
- 또한 기존에 수작업으로 이루어졌던 일람표작성을 작성된 BIM 모델 및 알고리즘을 통해 입력된 데이터를 Excel 파일로 자동 추출할 수 있음



[그림 2.81] TRC 영구거푸집 물량산출 자동화 알고리즘 구성

- 이후 시공과정에서의 기회비용을 줄이기 위해 Digital 도구를 활용하여 사전에 여러 TRC 영구거푸집의 타입 제작 및 시공법을 시뮬레이션을 통해 최적의 방안을 모색



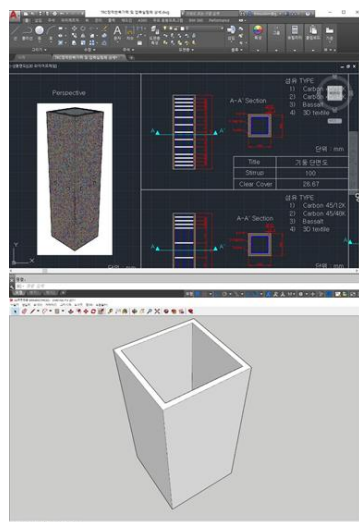
[그림 2.82] TRC 영구거푸집 제작과정 시뮬레이션



[그림 2.83] TRC 영구거푸집 보접합 상세(안) 시뮬레이션

2) Mock-up을 통한 TRC 영구거푸집 조립계획

- Digital Fabrication은 BIM 모델링을 통해 사전 시공성 검토를 실시하며, 3D 프린터를 이용한 시공 전 3D 프린터 Mock-up 과정을 거쳐 기둥과 보의 접합부 및 TRC 거푸집 형태에 대한 고찰을 통해 합리적인 결정을 내릴 수 있음
- 모델링과 시뮬레이션으로 형태 및 접합부에 대한 검토를 진행함과 동시에 3D 프린팅 기술을 활용하여 좀더 가시적인 Mock-up으로 검토를 실시



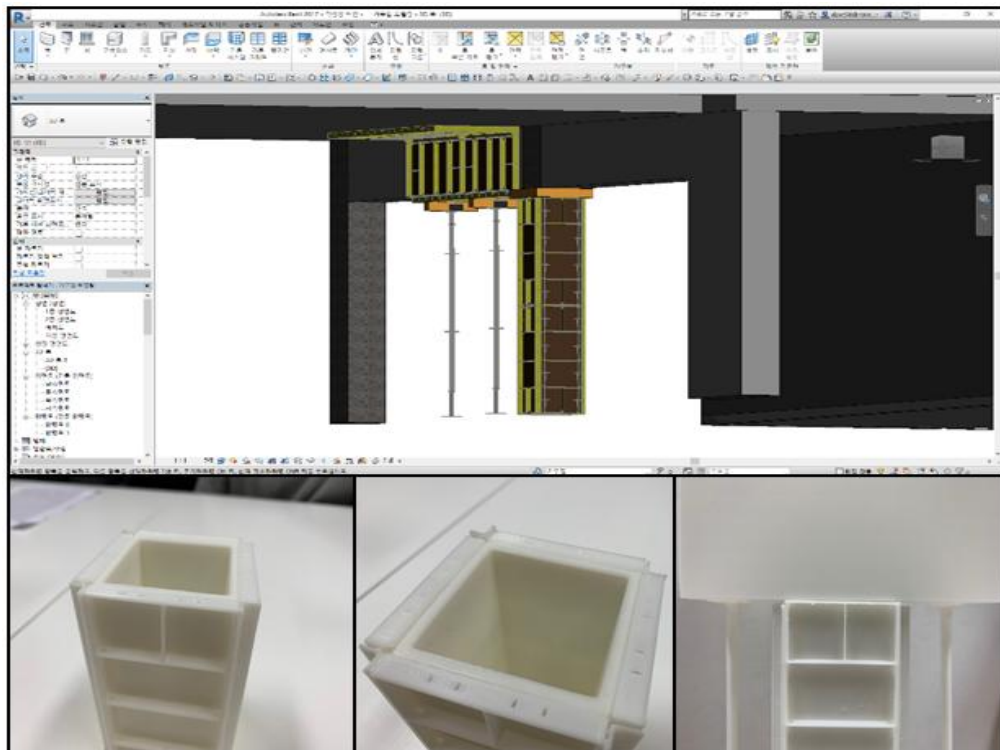
- 인쇄 기술 방식: FFF(Fused Silament Fabrication)
- 인쇄 가능 길이(mm): W-228, D-200, H-300 (max)
- 적층 두께 설정: 0.05~0.4mm
- 인쇄 재료: PLA(플라스틱 필라멘트), 친환경소재
- 지원 파일 형식: *.stl, *.ply, *.obj, *.gcode, *.amf

(3D 모델을 *.stl로 변환 후 *.gcode로 추출하여 수행함)

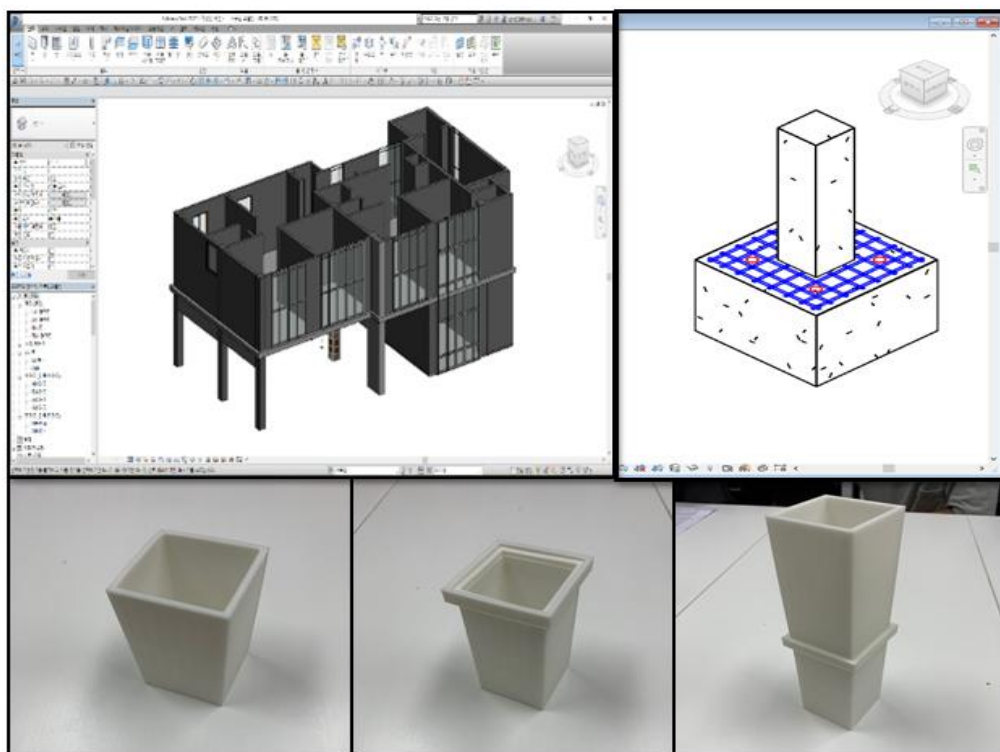


[그림 2.84] 3D 프린터 사양 및 프린팅 전 사전 모델링(예시)

- 1:10 비율로 3D 프린팅을 한 결과물로 유로폼(기존 거푸집)과 TRC 영구거푸집의 사전 시공성 검토 및 접합부에 대한 검토를 실시



[그림 2.85] 유로폼(기존 거푸집) 3D 프린팅을 위한 모델링 및 결과물(예시)



[그림 2.86] TRC 영구거푸집 3D 프린팅을 위한 모델링 및 결과물(예시)

○ 시공 매뉴얼

1) 시공 전 검토사항

• 거푸집

- 거푸집은 견고한 강재구조로 하고, 형상과 치수가 정확하여야 하고 조립 및 해체가 용이한 구조로 하여야 하며, 두께는 6mm 이상을 사용하여야 함
- 거푸집은 표면이 평탄하여야 하고 반복사용에 충분히 견딜 수 있도록 제작하여야 하며, 시멘트 페이스트가 새어나오지 않는 구조로 하여야 함
- 거푸집은 해체 후 청소를 철저히 하여야 하며, 박리제를 사용하여 항상 청결한 상태를 유지하여야 함

• 타설 및 다짐

- 콘크리트는 신속하게 운반하여 즉시 치고, 충분히 다져야 함
- 콘크리트를 치기 전에 운반장치, 치기설비 및 거푸집 안을 청소하여 콘크리트 중에 잡물이 혼입되는 것을 방지해야 함
- 개개 거푸집내의 콘크리트는 치기가 완료될 때까지 연속해서 쳐 넣어야 함
- 콘크리트 타설시 철근변형 및 매입물의 위치가 변화되지 않도록 주의하며, 콘크리트타설 직후 빨리 충분히 다져서 콘크리트가 철근 주위와 거푸집 구석구석까지 잘 채워지도록 함

• 양생

- 콘크리트는 친 후 경화에 필요한 온도, 습도조건을 유지하며, 유해한 작용의 영향을 받지 않도록 하여야 함
- 콘크리트는 양생기간 중에 예상되는 진동, 충격, 하중 등의 유해한 작용으로부터 보호해야함
- 양생방법은 다음과 같은 사항에 유의하여 결정
- 시멘트의 수화작용이 충분히 이루어질 수 있도록 적절한 온도와 충분한 시간으로 양생하여야 함
- 소성상태의 콘크리트가 급격하게 수분이 소실되어 표면에 균열이 발생하지 않도록 해야함.
- 양생을 적정하게 하므로써 색상의 균질성을 유지하고 얼룩 및 균열의 발생을 예방하여야 함
- 제작공장에서는 콘크리트가 몰드안에 있을 때의 초기양생과 2차 양생으로 나누어 양생하되 다음 사항에 유의하여야 함
 - (1) 초기 양생은 탈형과 다루기(handling)에 충분한 강도가 발현되도록 보양하여야하며, 탈형시 부재별 양생기간 및 탈형에 소요되는 기간 등은 기록하여 보존
 - (2) 콘크리트의 배합은 초기양생으로 탈형강도가 나올 수 있도록 하여야 함
 - (3) 증기양생을 할 경우에는 타설 후 2시간 이상 경과된 이후부터 실시

(4) 증기양생실의 온도상승 속도는 1시간당 20℃ 이하로 하고, 최고온도는 65℃로 한다. 양생 후 온도는 서서히 내려 외기의 온도와 큰 차가 없을 정도로 하고 나서 제품을 꺼냄

- 탈형

- 탈형강도는 18 MPa {180 kgf/cm²} 이상으로 하고, 탈형시 콘크리트에 과도한 응력집중과 부분적인 탈락이 없도록 부재의 크기, 무게 및 인서트의 위치 등을 고려하여 조심스럽게 탈형하여야 함

- TRC영구거푸집을 몰드에서 움직일 때는 부재에 과도한 응력 집중현상과 부분적인 탈락이 없도록 조심스럽게 다루어야 함

- 표면마감

- (1) 표면마감에 필요한 제반 기구를 비치하여야 하며, 작업 전 표면마감을 효과적으로 완성하기 위한 제반 자료를 제시하여야 함

- (2) 표면마감은 외관상 균등하게 보이고 결점이 없어야 하며, 작업과정에서 TRC영구거푸집의 품질을 손상시켜서는 안됨

- 저장 및 출하

- 제품검사가 끝난 제품은 야적시 제품의 손상 및 변형이 없도록 하여야 함

- 제품의 출하는 설치순서에 준하여 출하시켜야하며, 1일 설치량, 현장의 적치능력, 진입로등을 고려하여 신속하고 적정하게 납품하여야 함

- TRC영구거푸집 운반시 부재에 유해한 응력이 생기지 않도록 지지함과 동시에 충격이나 비틀림을 주지 않도록 하며, 화물의 편중현상이 발생하지 않도록 중량을 배분하여 대칭으로 적재하여야 함

2) TRC 영구거푸집 시공 계획

- 시공 계획서 작성

- 시공 계획서는 TRC 영구 거푸집 공법의 시공 관리 업무를 효율적으로 수행하기 위해, 현장 시공의 방법, 절차, 상세, 유의 사항 등을 정하여 이를 추후 관리 기준으로 삼는 목적으로 작성되는 도서를 말함

- TRC 영구 거푸집의 시공 계획서는 해당 공사의 설계도서, 계약조건, 일반 및 특기 사항, 시공 매뉴얼 등을 분석한 후 건축물의 구조, 공사 규모, 작업 환경, 현장 접근성, 자재 야적장, 운반 통행로 등의 제반 여건 등을 종합적으로 고려하여, 아래와 같은 현장 적용성과 공법의 경제성을 사전에 검토하여야 함

- (1) TRC 영구 거푸집 공법이 품질, 안전, 후속 공정에 미치는 영향

- (2) TRC 영구 거푸집과 일반 거푸집과의 직접비 및 간접비

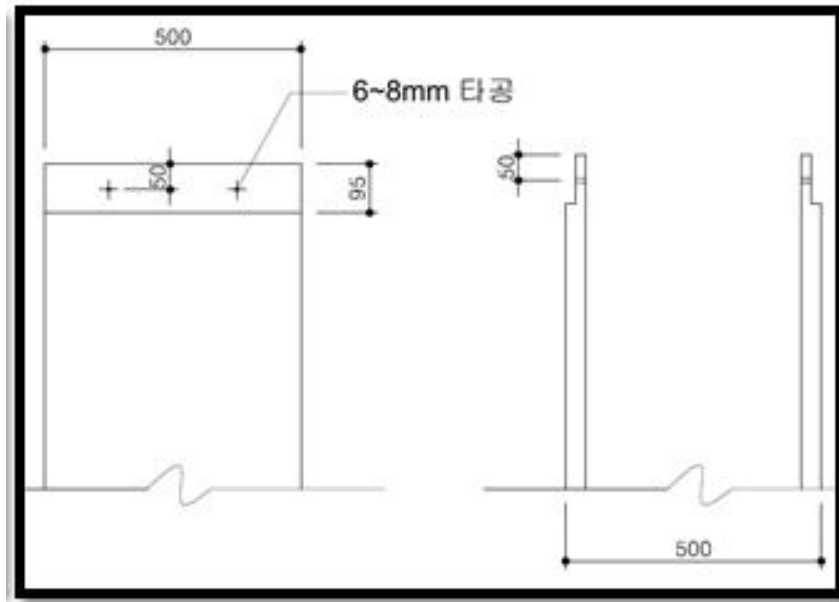
- (3) TRC 영구 거푸집의 선후행 공정에 영향을 미치는 영향

- (4) TRC 영구 거푸집 공사에 필요한 장비, 자재, 기능 인력 가용성

- (5) TRC 영구 거푸집의 제작 기준 및 제작 시간 등을 고려한 발주 시점

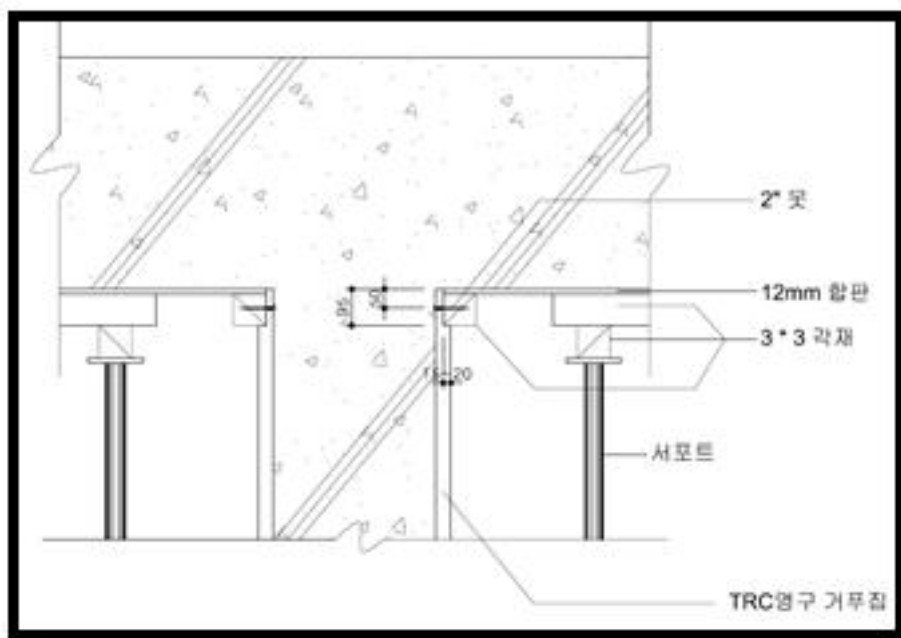
- (6) TRC 영구 거푸집에 가해지는 측압 응력 등을 고려한 안전성

- TRC 영구 거푸집 모듈의 시공 계획서에 명시되어야 할 내용은 아래 내용을 포함하는 것을 원칙으로 하되, 공사 수행 조건과 현장 제반 여건 등을 고려하여 현장 대리인 또는 책임자가 내용 및 상세 수준을 조정할 수 있음
 - (1) 시공 방법 계획 : TRC 영구 거푸집 공법의 경제성, 시공성, 공정 용이성, 안전성 등을 확보할 수 있는 적용 대상 부재 및 범위, 모듈간 접합 방법, 보 및 기둥 접합 방법, 기계/전기/소방 관련 개구부 시공 방법, 가설 수직 및 수평 보강 방법 등을 포함하는 공법 선정 및 관리 방안
 - (2) 공정 계획 : TRC 영구 거푸집 모듈/가설 자재의 반입, 이동, 양중, 설치, 타설, 양생, 해체 작업을 대상으로 전체 공정의 최적화에 요구되는 단위 작업의 설치/시공 방법, 순서, 기간, 소요 자재/인원/장비/외주 계획 등을 포함하는 일정 계획 및 관리 방안
 - (3) 자원 투입 계획 : TRC 영구 거푸집 시공에 투입되는 자원의 효율적 관리를 위해 요구되는 작업반 및 장비 조합, 소요 자재/장비/노무 수급 계획, 자재의 운송/반입/보관/이동/인양/양중 계획 등을 포함하는 자원 관리 계획 및 관리 방안 등
 - (4) 품질 계획 : TRC 영구 거푸집의 현장 설치시 목표로 하는 품질 기준을 충족하기 위해, 품질 관리 기준, 검측 항목 선정, 품질 체크 리스트 작성 등을 포함하는 현장 품질 계획 및 관리 방안 수립 등
 - (5) 안전 계획 : TRC 영구 거푸집 작업에 수반되는 위험 및 유해 작업 요소를 사전에 규명하여 안전 사고를 사전에 방지할 수 있는 작업별/단계별 안전 점검 활동과 조치 등을 포함하는 안전 계획 및 관리 방안 등
- 조립도 작성
 - 조립도는 TRC 영구 거푸집의 모듈의 반입, 저장, 이동, 조립 순서, 임시 수직 및 수평 보강재 설치 및 해체, 파손 방지를 위한 세부 방지책 및 운용계획 등을 포함한 현장 조립 시 준수 또는 준용해야 하는 시공 상세 도서를 말함
 - TRC 영구 거푸집 모듈 조립도에 명시되어야 할 내용은 아래 내용을 포함하는 것을 원칙으로 하되, 공사 수행 조건과 현장 제반 여건 등을 고려하여 현장 대리인 또는 책임자가 내용 및 상세 수준을 조정할 수 있음
 - (1) 영구 거푸집 모듈 부재의 종류 및 치수/단면 형상/설치 위치/접합 상세 등
 - (2) 영구 거푸집 모듈의 임시 수직 보강재(지보공) 및 수평 보강재의 형식/종류/재질/치수/위치/간격 등
 - (3) 영구 거푸집 모듈과 콘크리트 구조물의 각 부재 상호 간의 설치 순서/접합 상세, 개방부와 가설 보강 등에 관련된 시공 상세 계획 등
 - 조립도 작성 예시 : 보와 기둥의 접합부 상세
 - (1) TRC 영구 거푸집 기둥의 최상단 모듈과 보 부재와의 접합부의 단면 상세는 시공성, 구조 안전성, 수밀성 등을 고려하여 모듈 최상부는 두께 15~20mm정도, 최상단 모듈에서 95mm까지 아래의 [그림 2.87]과 같이 하단까지 오목하게 가공 제작



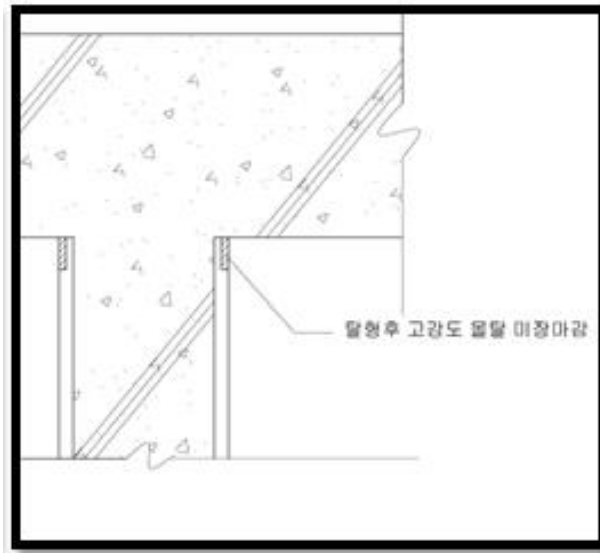
[그림 2.87] 기둥과 보 접합부 모듈 상세 (예시)

- (2) 현장 작업시에는 모듈에서 위에서 50mm정도 내려와서 6~8mm정도의 구멍을 기둥모서리에서 4/1지점에 (한 면에 2곳) 타공 조치하고, 시공 전에 각재를 먼저 설치 작업한 후, 아래의 [그림 2.88]와 같이 보 부분 거푸집을 지지할 수 있도록 결속 조치



[그림 2.88] 기둥과 보 접합부 시공 상세 (예시)

- (3) 거푸집 해체 후 영구거푸집의 오목 부분은 고강도 몰탈 시공으로 마감 처리하여 단면 손실이 없도록 아래의 [그림 2.89]과 같이 조치



[그림 2.89] 보 기둥 접합부 시공 상세 (예시)

- 시공 참조 기준

- TRC 영구 거푸집은 아래와 같은 시공 기준을 준수하여 시공

- (1) 거푸집 시공 및 품질관리(KCS 21 50 05 :2018 거푸집 및 동바리공사 일반사항)

- (2) 콘크리트구조설계(강도설계법) KDS 14 20 50:2018 철근상세 설계기준

- (3) 콘크리트 내진 설계 기준 KDS 14 20 80 : 2016

- (4) 국토교통부 콘크리트표준시방서

- (5) 건축구조기준 2016

- (6) 국토교통부 필로티 건축물 구조설계 가이드라인

- (7) 국토교통부 거푸집 및 동바리, 2016

- (8) 국토교통부 거푸집 및 동바리공사 일반사항, 2018

- (9) 국토교통부 가설공사 일반사항, 2019

- 3) TRC 영구거푸집 시공

- TRC 영구거푸집 반입

- 현장 관리자는 공정 계획, 자재 투입 계획, 현장 적치 가능 여건 등을 고려하여, TRC 영구거푸집의 출하 및 반입 시기를 결정

- TRC 영구거푸집 부재의 현장 반입 후, TRC 영구거푸집의 조립도에 명시된 부재의 사양, 규격, 형상, 치수 등이 모두 일치하는지 여부를 확인

- TRC 영구거푸집 부재의 이동 중 충격 등으로 인해 발생한 손상, 파손, 변형 등이 확인된 경우 보수 보강 조치를 취하거나, 회수 및 재발주 함

- TRC 영구거푸집 인양

- TRC 영구거푸집 부재의 인양 이전에 현장 작업 환경 및 여건 등을 확인하여, 작업의 효율성과 안전성을 확보하는 인양 방식을 선정

- TRC 영구거푸집 부재의 인양 시에는 부재의 손상이나 휨에 따른 균열 등을 방지할 수 있는 적절한 인양 전용 로프, 줄걸이 방식, 갈고리 등을 이용하여야 함
- TRC 영구거푸집의 인양 작업 주변에 작업 인원 이외의 통행을 제한하며, 인양물 하부에 작업자의 출입을 금지하도록 함
- TRC 영구거푸집 설치
 - TRC 영구거푸집의 설치 시 시공계획서의 시공 절차 및 방법을 준수하며, 조립도에 포함된 부재의 위치, 형상, 치수 등에 일치하도록 작업하여야 함
 - TRC 영구거푸집의 설치에 요구되는 장비의 이동 통로, 작업 공간 확보를 위한 비계 설치 등의 사전 준비 작업을 조치하도록 함
 - TRC 영구거푸집의 설치 작업장 주위에는 작업 인원 이외의 통행을 제한하며, 강풍, 폭우, 폭설 등 악천후 시에는 TRC 영구거푸집의 설치 작업을 중단
 - TRC 영구거푸집의 설치 이후, 부재의 이탈, 분리, 이동, 경사, 침하 등이 일어나지 않도록 필요한 곳에 수직 및 수평 보강 가설 자재를 설치하도록 함
 - 기둥 및 보와의 접합부, 부재 간 이음매의 연결은 반드시 허용오차 이내인지 확인하며, 부합하지 않는 경우 수정 조치하도록 함
 - 콘크리트를 타설 시 거푸집의 변형이 예상되는 곳에는 흔들림 막이, 턴버클, 가새 등을 적절히 설치하여야 함
 - TRC 영구거푸집 부재는 비계 및 규준틀 등의 가설 시설물에 연결하지 않아야 함

4) 검사

- 안전 검사
 - 현장 조건에 따라 발생할 수 있는 작업 하중, 응력 계산 등이 모두 반영된 TRC 영구거푸집의 구조 설계로 작업 안정성이 확보되었는지 확인하여야 함
 - TRC 영구거푸집의 구조 안전성에 문제가 예상되는 부위에는 수직 및 수평 보강 가설재의 추가 설치를 통해 구조 안전성 확보해야 함
 - 콘크리트 타설 중, 비정상적인 처짐이 발생하거나 붕괴의 조짐이 나타날 경우, 작업을 즉시 중단하고 안전한 조치를 취해야 함
- 품질 검사
 - 시공계획서에 포함된 TRC 영구거푸집의 품질 관리 기준과 TRC 영구거푸집의 조립도에 표시된 부재의 위치, 형상, 치수 등이 일치하는지 여부를 확인하는 검측 작업을 시행
 - 품질 기준에 미달하는 항목 또는 조립도와의 불일치 작업은 현장 관리자 또는 감독자와의 협의를 거쳐 수정 보완 작업을 시행하여야 함
 - 콘크리트 타설 및 양생 후, 구조물이 도면 및 시방서를 충족하고 있는지를 확인하며, 부합하지 않을 경우 현장 관리자 또는 감독자와의 협의를 거쳐 수정 보완 작업을 시행하도록 함

(라) 핵심연구성과 D : 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 현장 적용성 평가

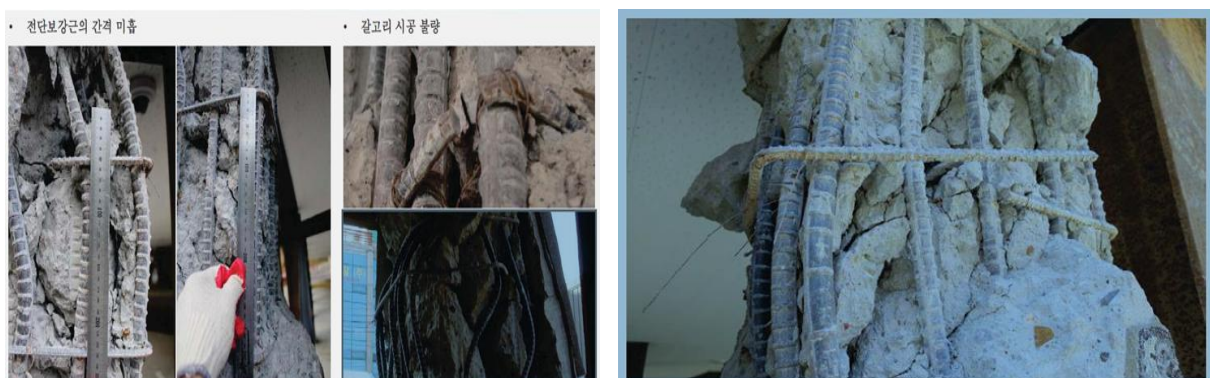
D-1 : RC기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용 사례 분석

- 중소규모 RC 구조물의 피해가 컸던 포항 지진 사례를 조사한 결과, 기존 필로티 구조물은 지진에 매우 취약한 상태로 시공된 것을 확인하였음
- 포항 장성동 필로티 구조물 131개동 피해 사례 조사 결과, 필로티 기둥은 기둥의 전단파괴, 기둥의 휨 및 휨압축 파괴 등이 상당수의 건물에서 발생하였음



[그림 2.90] 포항 장성동 필로티 구조물의 기둥 전단 파괴 사례 예시

- 중소규모 RC 구조물의 1층 필로티 기둥의 구조적 취약성은 곧 구조물 전체의 붕괴로 확장될 수 있으므로 이에 대한 사전 대비가 필요함
- 본 TRC 기술 개발 과제에서 추진하는 있는 목표는 지진의 위험성에 노출된 중소규모 RC 필로티 구조물의 안전도를 크게 개선시킬 수 있는 기여할 수 있다는 것에 연구의 차별화된 의의가 있음
- 중소규모 RC 구조물의 건축 관련 관계자를 대상으로 한 실태 조사 설문 조사 결과, 중소규모 RC 구조물의 구조설계도서의 상세도는 미흡하였으며, 중소규모 RC 구조물의 시공 참여자는 내진상세기준에 대한 이해가 부족하였음
- 철근콘크리트 공사의 전반적 시공 관리 수준, 철근 작업, 거푸집 작업, 콘크리트 양생 작업 품질은 중립적 의견(보통)이 다수를 차지하였지만, 긍정적인 평가와 부정적인 평가가 양분되어 작업 품질의 편차가 큰 실정임



(a) 전단 보강근의 간격 및 갈고리 시공 불량

(b) 콘크리트 품질 미확보 사례

[그림 2.91] 포항 지진 피해 원인 예시

- 중소규모 RC 구조물의 필로티 기둥 일부는 현재 전단보강철근의 갈고리 정착이나 간격 등이 내진 성능을 확보할 수 있는 상태의 시공 기준이 준수되지 않고 있음을 확인하였음
- 기존에 전통적인 유로폼을 이용한 거푸집 작업은 작업 효율성이 우수한 편이지만, 유로 거푸집의 조립, 설치, 탈형 등이 순차적으로 수행되어야하기 때문에, 절대 공기 단축에는 한계가 있으며 작업 품질의 신뢰도가 낮은 문제가 존재함



[그림 2.92] 유로폼을 이용한 중소규모 RC 구조물 1층 필로티 기둥의 거푸집 설치 작업 사례

- 소규모 RC 구조물의 기둥에 적용될 수 있는 특수 탈형 거푸집 종류로는 주름판, 이중판, 스틸폼, 종이거푸집 등이 있지만, 대부분 원형 형상의 기둥에 적합하며, 고가의 가설 부재 소요로 인한 경제성 저하나 탈형 작업 공정이 필요한 추가 공정 필요의 단점이 존재함
- 이러한 종래의 일반 및 특수 탈형 거푸집의 단점이나 공법 적용상의 한계를 극복하기 위해 비탈형 영구거푸집이 개발 및 활용되고 있음



[그림 2.93] 비탈형 영구 거푸집의 현장 설치 사례

- 하지만, 종래의 탈형 영구거푸집의 경우 타 작업 공정간 간섭 사항의 발생, 양중 장비의 설치 및 운영 필요, 영구 거푸집 임시 고정을 위한 긴결재 설치 등의 추가 작업 필요, 임시 고정 영구거푸집의 전도 등에 따른 안전 사고 위험 등의 문제점이 지적되고 있음

D-2 : TRC 영구거푸집 현장 적용성 평가

- 철근콘크리트 구조물에서 거푸집 작업의 시공 기준에 대해 고찰함
- 예시) 거푸집 시공 및 품질관리 유의 사항 (KCS 21 50 05 :2018 거푸집 및 동바리공사 일반사항)
- 거푸집 및 동바리는 콘크리트가 구조적으로 안정되기까지 유동상태의 콘크리트를 지지하고 소정의 강도에 도달할 수 있도록 하여야 하며, 완성된 구조물의 위치, 형상 및 치수가 정확하게 확보되어 만족스러운 콘크리트 구조물이 되도록 시공되어야 함
- 거푸집 및 동바리는 공종별 시공계획서 및 시공상세도에 따라 시공하여야 하며, 콘크리트를 타설했을 때 시공허용오차를 넘는 변형이 발생하지 않도록 제작, 설치하여야 함

○ 정성적 평가

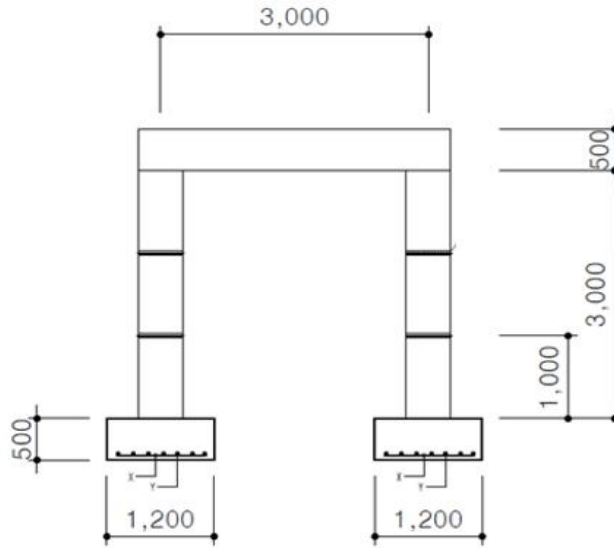
- TRC 비탈형 거푸집의 현장 적용성 평가를 위하여 국토교통과학기술진흥원의 건설신기술 규정을 기반으로 하여 본 개발 기술과 관련성이 낮은 항목을 제외한 후 나머지 모든 항목을 포함하되, 세부 평가 기준과 항목은 본 연구에서 살펴본 각종 시공 기준과 선행 문헌 연구를 통해 도출된 결과를 접목하여 자체 개발하였음
- ‘시공성’에 대한 세부 평가 항목을 선정하기 위하여 ‘건축시공학(2016), 건설신기술매뉴얼(2019), 비탈형 거푸집 관련 선행연구에 대한 조사 및 분석을 통하여 도출된 주요 고려 사항’ 등을 활용하여 총 5개를 선정하였으며 세부 평가 항목은 다음과 같음

[표 2.13] 시공성 세부 평가 항목 및 출처

세부 평가 항목	출처
1. 전체 철근 콘크리트 공정의 간소화	건설신기술매뉴얼 (2019)
2. 거푸집 작업 선후행 공종의 연속성	건설신기술매뉴얼 (2019)
3. 거푸집 작업의 효율성	김형남 외 4인 (1998)
4. 시공 계획 및 관리의 편의성	건축시공학 (2012)
5. 청소 및 검사의 용이성	거푸집 및 동바리공사 일반사항 (2018)

○ 현장 적용성 평가 수행 개요

- TRC 영구거푸집의 개발 기술을 기술 실증을 목적으로 TRC 영구거푸집 기술이 적용되는 철근콘크리트 구조물은 500mm x 500mm 단면의 기둥 2개를 지지하는 기초와 2개의 기둥과 연결되는 보로 구성되는 테스트 베드 구조물로 그림과 같은 상세로 현장 적용성 평가를 수행함



[그림 2.94] 테스트 베드 구조물 도면

- 이후 TRC 영구거푸집 모듈에 대한 현장 적용성 본 평가를 수행하여 기술의 효용성과 경제성 등을 기술 실증 기획 결과인 정량적 기준과 정성적 기준을 통해 분석함



(a) TRC 영구거푸집 모듈 자재 반입



(b) TRC 영구거푸집 모듈 인양 준비



(c) TRC 영구거푸집 모듈 인양



(d) TRC 영구거푸집 모듈 설치



(e) TRC 영구거푸집 모듈 수직 보강



(f) 사전 제작 보 거푸집 조립



(g) 콘크리트 타설



(f) 콘크리트 진동 및 다짐

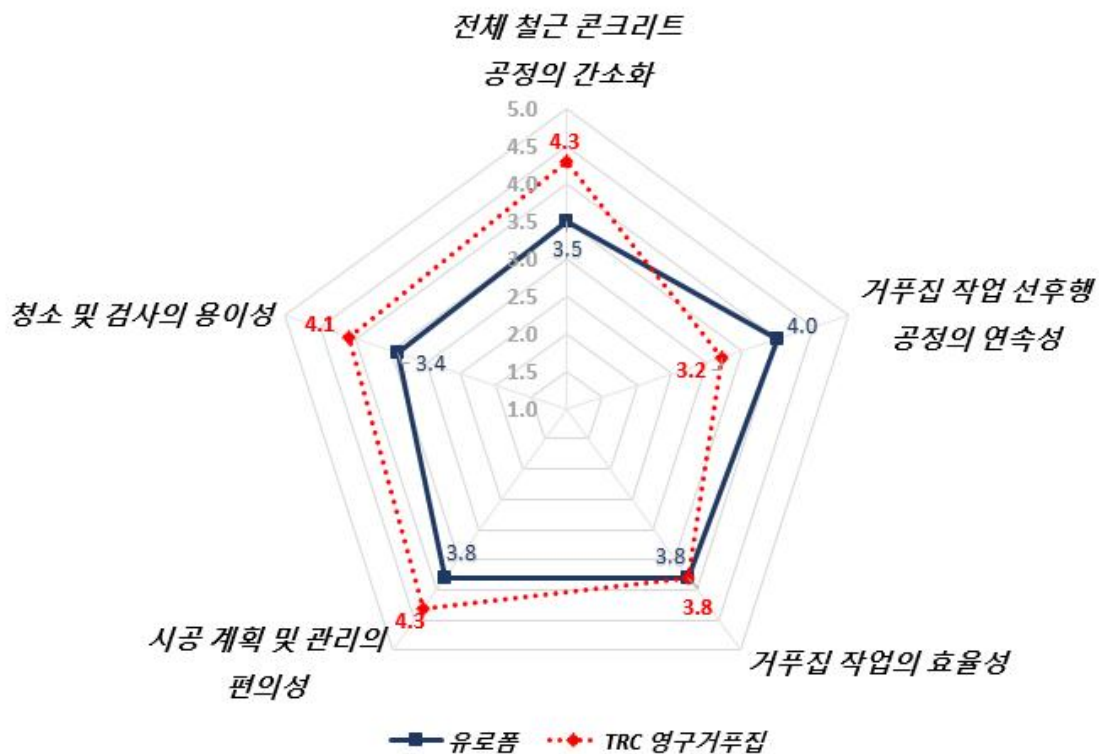
[그림 2.95] TRC 비탈형 영구거푸집의 테스트 베드 현장 적용성 평가 본조사

○ 현장 적용성 정량적 평가 결과

- 기존 재래식 공법 (유로폼)의 표준 품셈을 기준으로 소요 품을 살펴보면, 형틀 목공은 0.14인/㎡ , 보통 인부의 소요품은 0.03인/㎡임
- 따라서, 형틀 목공의 경우 약 10배 이상의 투입 인력 감소 효과가 있는 것으로 조사된 반면, 보통 인부의 경우 유사한 수준의 인력 투입이 요구되었음.

○ 현장 적용성 정성적 평가 결과 : 시공성

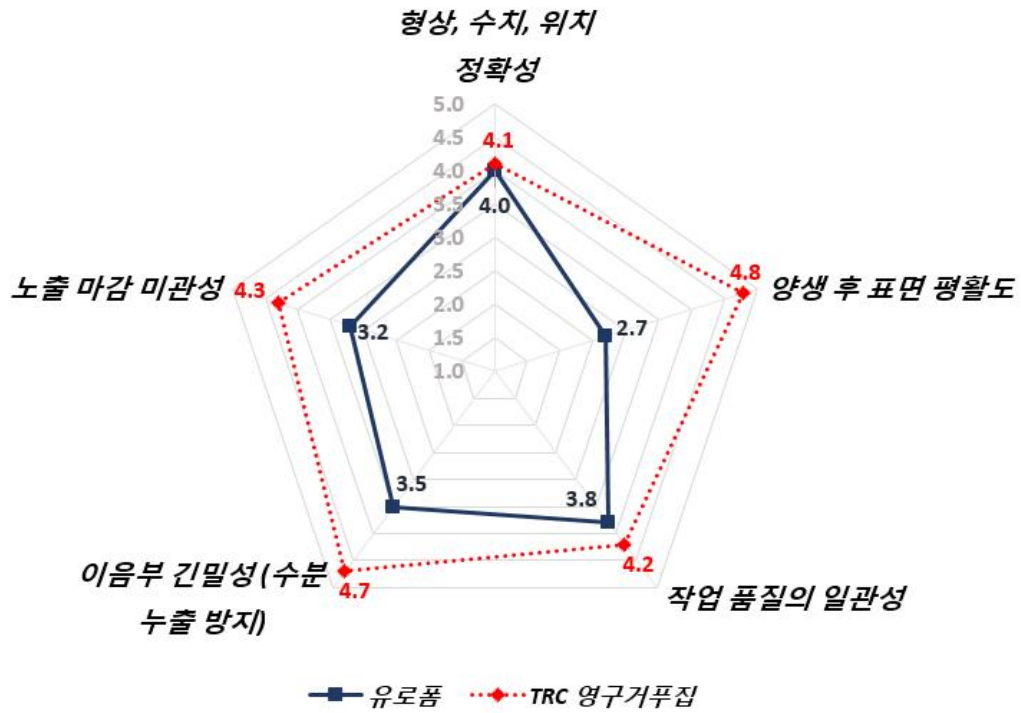
- 테스트 베드 현장의 적용성 평가 중 ‘시공성’ 부분의 평가 결과는 TRC 영구거푸집이 기존 재래식 유로폼에 비해 시공성 측면에서 공정의 간소화, 청소 및 검사의 용이성 차원 등에서 다양한 이점이 있으나, 거푸집 작업 선후행 공정의 연속성 차원에서는 불리한 것으로 평가됨



[그림 2.96] 재래식 유로폼과 TRC 영구거푸집의 시공성 평가 결과 비교

○ 현장 적용성 정성적 평가 결과 : 품질 신뢰도

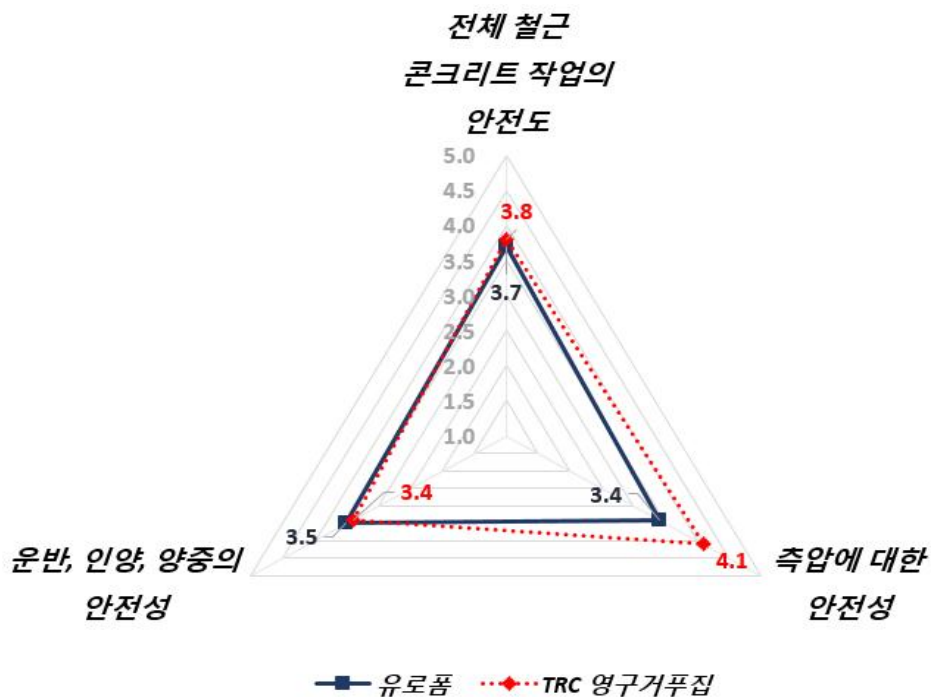
- 테스트 베드 현장의 적용성 평가 중 ‘품질 신뢰도’ 부분의 평가 결과는 세부 평가 항목 중 모든 척도에서 기존 재래식 공법에 비해 TRC 영구거푸집이 우수한 것으로 평가되어 다양한 품질 차원에서의 이점이 존재하고 있는 것으로 평가됨



[그림 2.97] 재래식 유로폼과 TRC 영구거푸집의 품질 평가 결과 비교

○ 현장 적용성 정성적 평가 결과 : 안전도

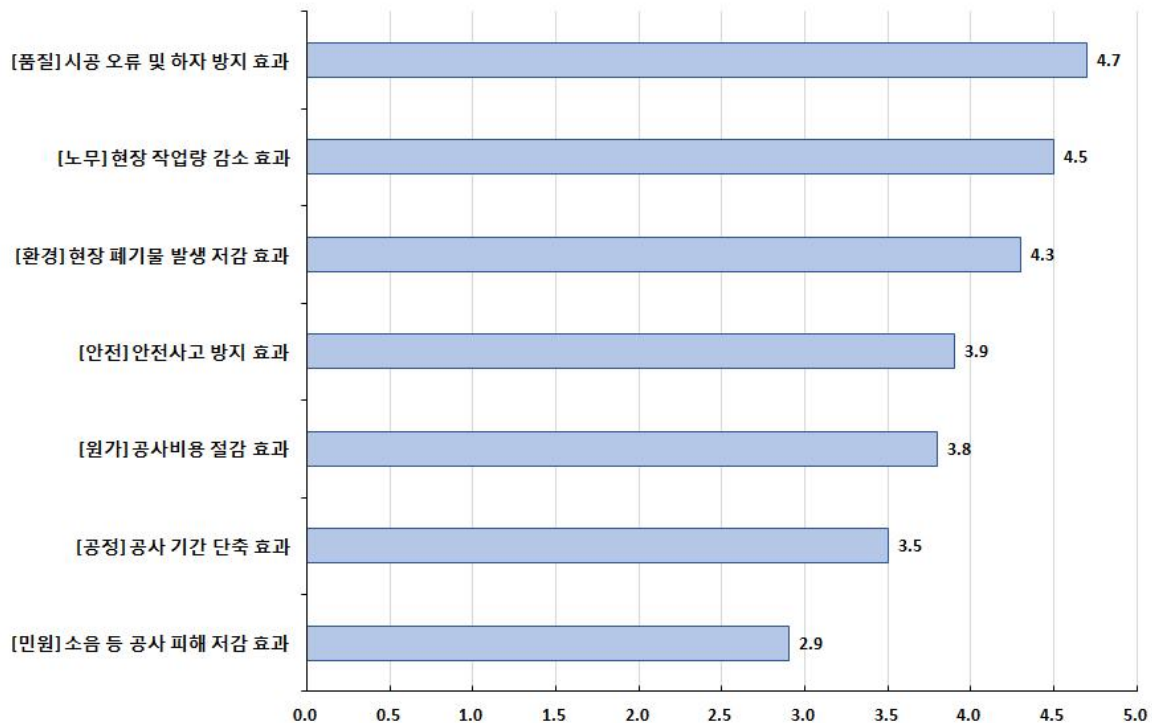
- 테스트 베드 현장의 적용성 평가 중 ‘안전성’ 부분의 평가 결과는 TRC 영구거푸집은 기존 재래식 유로폼에 비해 측압에 대한 안전성 차원에서는 유리한 것으로 평가됨



[그림 2.98] 재래식 유로폼과 TRC 영구거푸집의 안전성 평가 결과 비교

○ 향후 기술의 기대 효과

- 본 현장 적용성 평가를 통해 도출된 개선 사항을 보완하여 향후 TRC 영구 거푸집을 상용화할 경우, 기대 할 수 있는 효과에 대해서 품질 및 하자 방지 효과, 현장 작업량 감소 효과, 현장 폐기물 축소 효과 등의 순으로 긍정적인 평가를 내렸음



[그림 2.99] TRC 영구거푸집의 기대 효과 수준에 대한 평가

○ 모듈 대형화를 통한 시공성 향상 방안

- TRC 영구 거푸집 기둥의 시공은 설계 층 높이에 따라 대형화된 모듈의 공장 생산 및 현장 설치가 가능하다면 현장 시공성의 상당한 개선이 가능할 것으로 판단됨
- 모듈의 대형화 방안으로는 크게 2가지 방안이 있을 수 있는데 1) 펠로티 기둥 전체 층고 높이에 맞춤화된 하나의 TRC 영구거푸집 모듈을 활용하는 방안, 2) 3미터의 표준화된 TRC 영구거푸집 모듈과 나머지 층고 높이의 맞춤화 제작을 통한 2개의 모듈을 활용하는 방안이 있을 수 있음

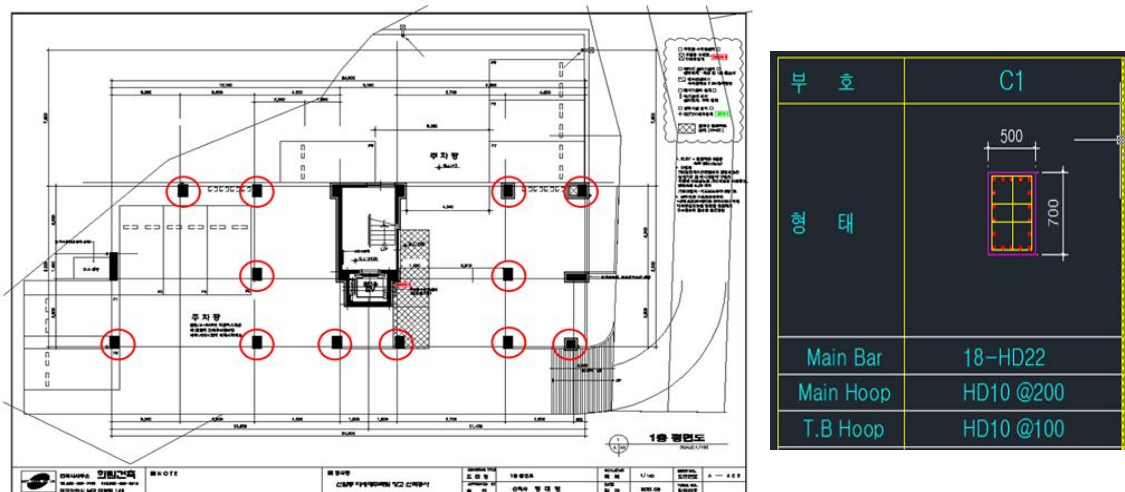
D-3 : 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 경제성 분석

○ TRC 영구거푸집의 소요 원가 분석

- 2차년도에 시행된 현장 적용성 평가에서 실측된 생산성 자료 등을 토대로 TRC 영구거푸집의 일위대가는 86,383원/m²으로 산출됨.
- 추후 상용화 보완 기술 개발로 TRC 영구거푸집 모듈의 양산화를 통한 원가 절감과 함께 공사 수행 실적 축적을 통한 현장 설치 생산성이 개선된다면, 소요 원가는 더욱 더 하락 할 수 있는 여지가 있음.

○ TRC 영구거푸집 경제성 분석 결과

- TRC 영구거푸집 공법의 경제성을 평가하기 위해서 유로폼을 사용한 공법과 프리캐스트 콘크리트 (Precast Concrete) 공법을 대조군으로 설정하고, 시범 사업 사례로 다세대 주택 1층 필로티 기둥(500X700X3,300) 12개의 철근콘크리트공사를 대상으로, 각 공법별 소요 공사비를 비교함으로써 개발 기술의 경제성을 평가함.



[그림 2.100] 시범 사업 사례 건축물의 1층 필로티 도면(좌) 및 샘플프로젝트 도면 평면도(우)

- TRC 영구 거푸집 공사의 경제성을 평가하기 위해 각 공법에 따른 공사비를 비교분석한 결과 1) 유로폼 거푸집을 사용한 경우의 공사비는 11,143,428원으로 산출되었고, 2) PC 업체에 견적 의뢰를 통해 PC공법의 공사비는 20,210,925원으로 산출, 3) 개발된 TRC 영구거푸집의 일위대가를 토대로 계산된 TRC 영구 거푸집의 공사비는 13,888,491원으로 산출됨.
- 공사비 비교 분석 결과, TRC 영구 거푸집은 유로폼 거푸집에 비해서는 약 33.8% (4,700,701원) 높고, PC공법에 비해서는 약 45.5% (6,322,434원) 낮은 것으로 나타났으나, 추후 실용화 및 상용화를 위한 더욱 정밀한 수준의 경제성 평가가 고려됨

[표 2.14] 각 공법에 따른 공사 견적 비교 (단위 : 원)

구분	TRC 영구거푸집 공법	유로폼 거푸집 공법	PC 공법	비고
공사비	13,888,491	11,143,428	20,210,925	
차이	0	-4,700,701	+6,322,434	
비율	0	-33.8%	+45.5%	

- 본 연구에서 성과 목표로 설정한 바 있는, 내진 성능이 보강된 TRC 영구거푸집 기술의 적용으로 발생하는 전체 공사비 증가율 1% 이하는 달성된 것으로 판별할 수 있을 것으로 보임

○ TRC 영구거푸집 시장성 분석

- TRC 영구거푸집의 적용시장은 내진성능 향상과 비탈형 거푸집으로서의 특성을 고려할 때 TRC 영구거푸집은 중소규모 철근 콘크리트 건축물의 수직 부재에 적용 가능함.
- 원룸 및 다세대 주택 건축물의 1층 필로티 기둥에 내진 성능이 강화된 TRC 영구거푸집 공법을 적용하는 것으로 사업화 대상을 가정하여 향후 시장성을 평가해 보면, 향후 잠재적 시장 규모는 약 487억원으로 추정됨.

○ TRC 영구거푸집 사업화 계획

- TRC 영구거푸집의 사업화 계획 수립을 위해 산업 변화 요인 분석을 정책/제도적 요인, 경제적 요인, 사회/문화적 요인, 기술적 요인 측면에서 분석함

[표 2.15] TRC 영구거푸집의 산업변화 요인분석 결과

구분	주요내용
정책/제도적 요인	• 대구 경북권 구조물의 지진 피해 방지 가능한 기술적 대비책 강구 필요 • 지진 대비 국민의 주거 안전도 요구 충족 가능한 선제적 내진 정책 구현 • 최저임금상승 및 근로시간 단축 등 정부 노동 관련 정책의 시행 조치 대응
경제적 요인	• 포항, 경주 지진으로 인한 구조물 파괴 및 손상으로 대규모 재산 피해 발생 • 구조물의 내진 성능 강화를 통한 피해 저감 및 인명 피해 방지 필요 • 구조물 안전도 향상시키는 신기술 개발 및 사업화로 신시장 개척과 부가가치 창출
사회/문화적 요인	• 지진 피해가 빈번한 필로티 구조물의 내진 성능 강화로 국민 불안감 해소 필요 • 국내 건설현장의 숙련 기능공 부족 및 작업자 고령화 문제의 해결 방안 요구 • 대구 경북권의 섬유 업계의 경기 침체를 극복 가능한 섬유 소비 확대 방안 필요
기술적 요인	• 내진 성능이 향상과 현장 시공성 개선을 동시 충족 가능한 대체 기술 필요 • 지속된 노무비 상승 추세에 대비하여 사전 공장 제작화 및 기계화 시공 대응 • 공기 단축 및 공사비 절감이 가능한 혁신 기술의 필요성 증대

- TRC 영구거푸집 공법의 사업화 전략 수립을 위해 SWOT 분석을 통해 내외부적으로 지닌 강점, 약점, 기회, 위험요소를 규명

[표 2.16] TRC 영구거푸집의 SWOT 분석

외부 내부	강점(Strength)	약점(Weakness)
	• 구조물의 내진 설계 기준 강화 • 고령화에 따른 기계화 공장화 요구 • 중소규모 건축물 개발 수요 증가 • 정부의 안전 산업 육성 정책 구현	• 기존 경쟁 기술의 높은 시장 점유율 • 경제성이 높은 대체 기술 공법 존재 • 개발 기술의 낮은 외부 인지도
기회 (Opportunity)	우선 수행 과제 (S0)	우선보완 과제 (W0)
• 연구 개발의 전문성 및 기술력 확보 • 기 확보된 사업화 파트너 존재 • 테스트 베드 사업 시행으로 기술 실증 • 중소기업 특유의 민첩한 시장 대응력	• 후속 시범 사업 확대를 통한 기술 개선 실증 연구 사업의 기획 • 기술 상품화가 용이한 기 개발된 설계 및 시공 매뉴얼 지속 업데이트 및 홍보 • 사업화 파트너의 네트워크를 활용한 지진 지역에서 잠재 수요처 우선 발굴 • 정부 안전 정책에 맞춤형한 홍보 마케팅 전략 수립으로 사업화 지속 확대	• 내진 성능 확보에 경제성이 가장 유리한 본 기술의 홍보 강화 • 건설 신기술 신공법 인증 및 등록을 통한 기술 사용료 확보 • 시범 사업 실적 홍보를 통한 공공 및 민간 수요처 인지도 개선
위험 (Threat)	리스크 해결 과제 (ST)	장기보완 과제 (WT)
• 화재 관련 대비 기술 보완 필요 • 모듈의 양중 및 설치 시 안전 위험 • 경험 부족으로 인한 낮은 생산성 • 모듈의 이동시 파괴 및 손상 위험	• 확보 기술의 신속한 특허권 취득으로 진입 장벽 강화 권리 설정 • 현장 안전사고 방지를 위한 안전 매뉴얼 개발 및 안전 교육 시행 • 사업화 파트너와 지속적 관계 유지를 통해 개발 기술의 지속적 개량 • 새로운 수요처 확보로 매출 경로 다변화	• 내화 성능이 확보 될 수 있는 본 기술의 후속 연구 추진 • 시범 사업 확대로 생산성 개선이 가능한 기술 상세 개발 • 모듈의 이동, 양중 등에서 파괴 및 손상 방지 가설 자재 개발

- 포항, 경주 등 경상권 지진으로 RC 구조물의 취약성을 보완하는 목적으로 수행된 TRC 영구거푸집 개발의 사업화 모형을 아래와 같이 제안함.

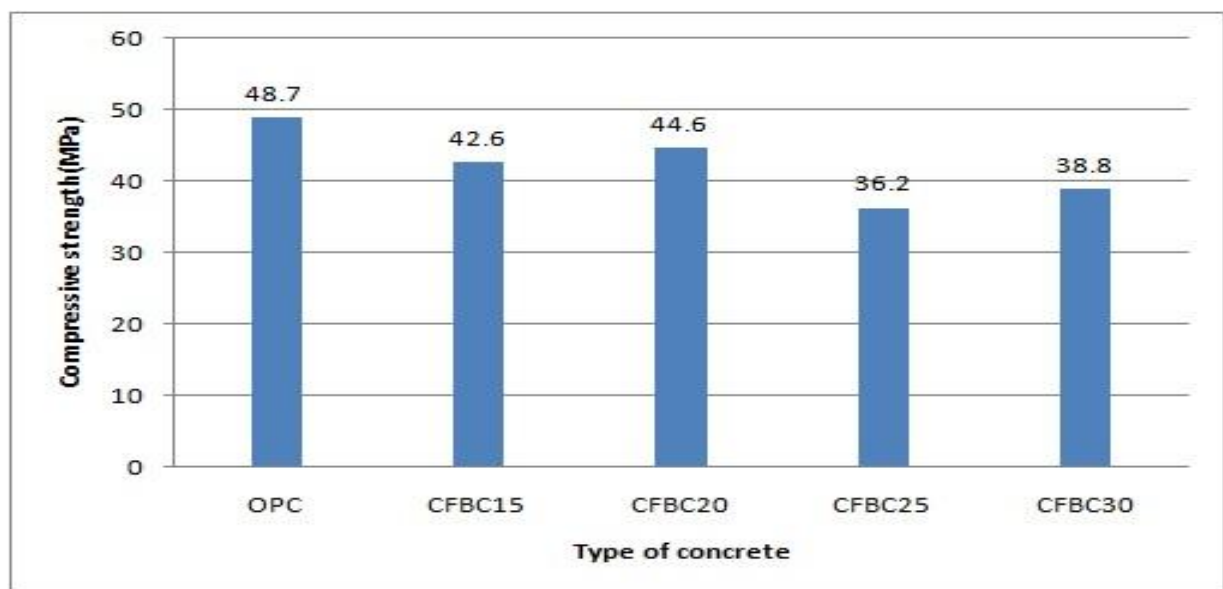
[표 2.17] TRC 영구거푸집의 사업화 모형

핵심파트너	핵심활동	고객관계	고객세분화
• 공동 연구 기관 - 계명대학교 - 경희대학교 - 경북대학교 • 제조 업체 - 우현 레미콘 • 시공업체 - 제이와이건설	• 잠재 수요처 발굴 • 테스트 베드 사업 확대를 통한 검증 • 기술 보완 및 제품 개발 검증 지속 • 수요 제품 규격 조사 및 분석 • 설계 및 시공 매뉴얼 업데이트 • 시범 사업 수행 경험 및 실적 축적	• 기획 • 설계 • 시공 • 유지보수 • 컨설팅	• 건설사 - 중소규모 건축물 시공사 • 설계사 - 중소규모 건축물 설계사 • 건축주 - 원룸 건축주 - 다세대 주택 건축주 - 다가구 주택 건축주 - 빌라 건축주 - 근린생활시설 건축주
	핵심자원		
	• 개발 인력 (공동 연구기관) • 설계 및 시공 지원 인력 • 영업 및 홍보 인력 • 유지보수 인력 • 지식재산권 관리 인력		
비용		수익 흐름	
• 개발 비용 • 생산 비용 • 설치 비용 • 유지관리 비용 • 홍보 및 영업 비용 • 운영 비용 등		• 민간/공공 기관 수요처 수익 창출 - 기술 사용료 판매 - 설계 서비스 및 시공 공사 매출 - 주변 기술 개발을 통한 매출	

(마) 핵심연구성과 E : 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발

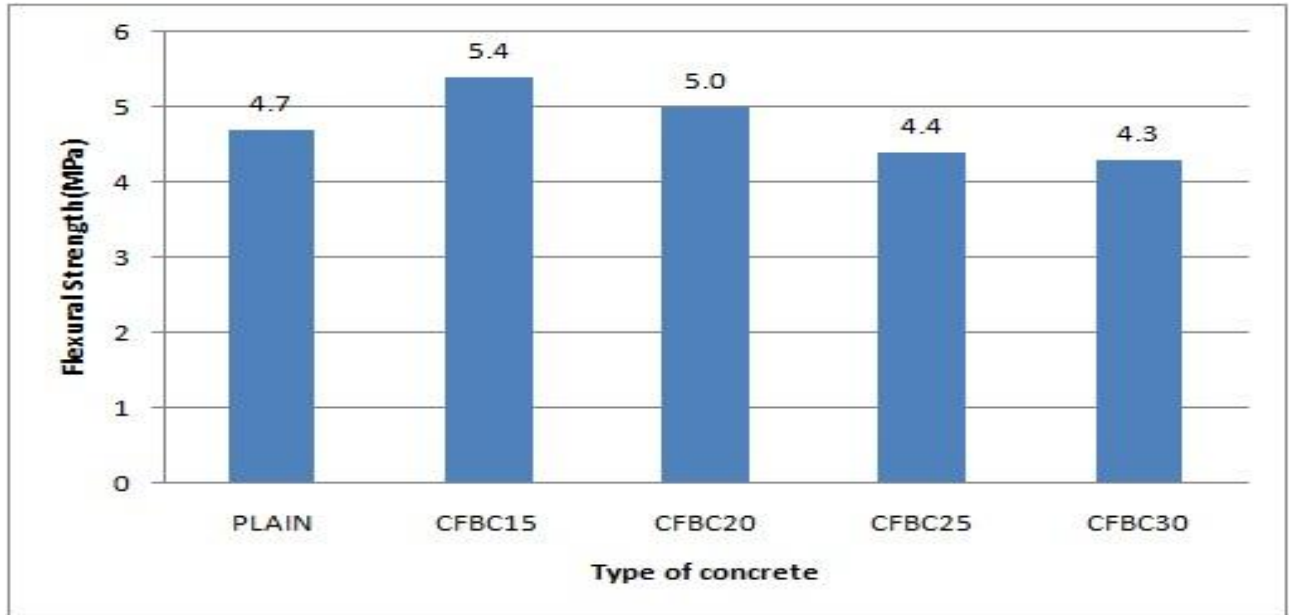
E-1 : TRC PC 영구거푸집의 모듈화 상세 개발 및 규격화

- 기존에 일반 박스형 암거에 사용되고 있는 시멘트를 유동층 플라이애쉬 미분말로 일정 비율 대체하여 사용함으로써 콘크리트의 내구성을 증진시킨 TRC 영구거푸집을 제작하고자 함
- 보통포틀랜드 시멘트(OPC)와 보통포틀랜드 시멘트에 유동층 플라이애쉬 미분말 혼입률을 각각 15(CFBC15), 20(CFBC20), 25(CFBC25) 및 30%(CFBC30) 달리하여 제조한 공시체를 증기양생하고 실험을 수행하였음
- 채령 7일에서의 OPC, CFBC15, CFBC20, CFBC25 및 CFBC30 시험체의 압축강도는 각각 48.7, 42.6, 44.6, 36.2 및 38.8MPa로 나타났으며, 유동층 플라이애쉬 미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 보통포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트보다 혼입율 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났으나, 그 차이는 혼입율이 20%를 기준으로 큰 차이를 나타냄
- 5종류 콘크리트의 활렬인장강도는 각각 3.75, 3.83, 3.92, 3.75 및 3.37MPa 정도의 값을 나타내었으며, 이 값은 압축강도의 약 7~8%임



[그림 2.101] 콘크리트 종류별 압축강도

- 휨강도 실험 결과, 유동층 플라이애쉬 미분말을 혼입한 콘크리트의 휨강도가 OPC 콘크리트보다 큰 값을 나타내었으며, 고로슬래그 미분말을 15% 혼입한 콘크리트의 휨강도가 5.4MPa로 가장 큰 값을 나타냄
- 일반적으로 콘크리트의 휨강도는 압축강도의 약 1/5~1/8정도의 값을 나타내는 결과와 유사하였으나, 유동층 플라이애쉬 미분말의 혼입률을 증가할수록 휨강도 증진률은 크지 않는 것으로 나타남



[그림 2.102] 콘크리트 종류별 휨 강도

- 일반적으로 콘크리트의 휨강도는 압축강도의 약 1/5~1/8정도의 값을 나타내는 결과와 유사하였으나, 유동층 플라이애쉬 미분말의 혼입률을 증가할수록 휨강도 증진률은 크지 않는 것으로 나타남
- Andrade가 제시한 확산계수 산정식을 이용하여 산출한 확산계수의 경우, OPC 콘크리트의 확산 계수는 $0.627 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{g}$ 를 나타낸 반면, 유동층 플라이애쉬 미분말을 15, 20, 25 및 30% 혼입한 경우의 확산계수는 각각 0.365, 0.298, 0.292 및 $0.283 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{g}$ 으로 염해 저항성이 매우 우수함
- 협동연구기관인 계명대학교로부터 개발된 TRC 영구거푸집 모듈에 대한 상세를 개발하였으며, 이를 PC부재로서 생산화 할 수 있도록 규격화 하였음
- TRC 영구거푸집의 모듈은 상/하단부 및 중앙부로 나뉘어서 개발되었으며, 상/하단부의 모듈은 다양한 높이를 가지는 RC기둥에서 모두 동일한 규격을 가지기 때문에 한 가지 규격의 거푸집 몰드를 이용하여 제작 가능함으로 생산 효율을 증대 시킬 수 있음
- 중앙부 TRC 영구거푸집의 경우 높이만 다를 뿐 상/하단의 단면상세는 일정하도록 규격화됨
- 개발된 TRC 영구거푸집의 모듈의 두께는 건축구조기준(KBC2016)을 근거로 하여 40~50mm로 선정되었으며, 1차년도에서는 TRC 영구거푸집의 시제품 제작 및 축압실험을 위하여 50mm 두께로 제작이 가능하도록 거푸집 몰드를 설계 및 제작함

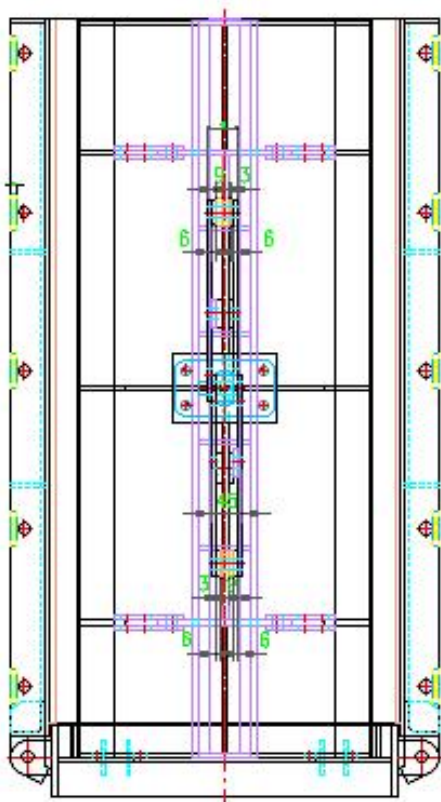
E-2 : TRC PC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발

“TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발”



[그림 2.105] TRC PC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발

- TRC PC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방안으로 1) 강재거푸집 해체 후 내부 탈형유 도포, 2) 직물섬유 고정용 스페이서 부착, 3) 섬유 긴장 및 고정, 4) 강재거푸집 조립, 5) 무수축 모르타르 배합 및 타설, 6) 강재거푸집 진동 및 다짐, 7) 양생을 통하여 완성을 할 수 있도록 총 7가지 공정으로 개발함



[그림 2.106] TRC 영구거푸집 제작용 강재 거푸집 설계 도면 및 시제품

- TRC 영구거푸집 제작용 거푸집은 재사용에 따른 내구성을 확보하기 위하여 강재로 제작하였으며, 내/외부 패널이 사방으로 열려 탈형이 용이하고 제작 시간을 절감할 수 있도록 설계됨
- TRC PC 영구거푸집은 내부 콘크리트와의 일체거동을 확보하기 위해 전단키를 설치할 수 있도록 강재 거푸집 중앙부에 지름 25mm 및 높이 40mm의 공간을 확보할 수 있도록 제작하였음
- 개발된 TRC PC 영구거푸집 모듈의 두께는 건축구조기준(KBC 2016)을 기반으로 하였으며, 1차년도 시제품 제작과 측압실험을 근거로 40mm 두께로 제작하였음
- 수행된 연구를 통하여 제작 시방서, 현장 적용성 평가 및 시제품을 위한 TRC PC 영구거푸집을 제작함
- 향후 대량 생산을 위한 방안
 - 1) 기둥규격과 모양에 따른 TRC 섬유를 사전 긴장이 완료된 상태로 제작하여 공장에서 제품 생산 시 몰드에 바로 부착가능토록 하여 시공 시간 및 섬유 설치에 따른 부대작업을 줄임
 - 2) 제품 양산을 위하여 규격별로 보유 몰드 수를 늘려 일생산량을 증대
 - 3) 콘크리트 타설 후 다짐 작업 시 진동대를 설치하여 진동대 위에 몰드를 적재하여 일정한 진동을 주어 품질확보
 - 4) TRC 영구거푸집 전용 양생실을 도입하여 일정 온도로 제품을 양생하여 품질확보

E-3 : 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시

1) 기둥의 규격화 및 표준화

- TRC 영구거푸집의 현장 적용을 위하여 건축물 구조설계 가이드라인을 충족하는 기둥 크기에 대한 규격화 및 표준화

(예시)

NO	규격	비고
1	300x300	(지진구역1, 지진구역 2를 제외한 지역) 벽체면적비/0.0045+기둥면적비/0.0112 ≥ 1.0
2	400x400	
3	500x500	
4	600x600	(지진구역2, 강원북부 및 제주) 벽체면적비/0.0028+기둥면적비/0.0171 ≥ 1.0
5	700x700	
6	800x800	

2) 생산 계획

구분		(2021년) 개발 종료 후 1년	(2022년) 개발 종료 후 2년	(2023년) 개발 종료 후 3년
국내	시장점유율(%)	100	90	80
	판매량(단위:EA)	2000	4000	10000
	판매단가(원)	80,000	80,000	75,000
	국내매출액(백만원)	160	320	750
당사 생산능력1)		3000	5000	20000

3) 투자 계획

- TRC 영구거푸집 생산을 위한 단계별 투자계획을 수립하여 적절한 예산분배
- 2023년까지 시설물 투자 금액은 200,000,000으로 TRC 영구거푸집 제작을 위한 몰드
- 구매 및 자동화 설비에 예산이 투입될 예정

(단위 : 백만원)

항목		(2021년) 개발 종료 후 1년	(2022년) 개발 종료 후 2년	(2023년) 개발 종료 후 3년
매출원가1)		160	320	750
판매관리비2)		16	32	75
자본적 지출	토지			
	건물/구축물			
	기계장치등	50	50	100
자본적지출 합계		226	402	925

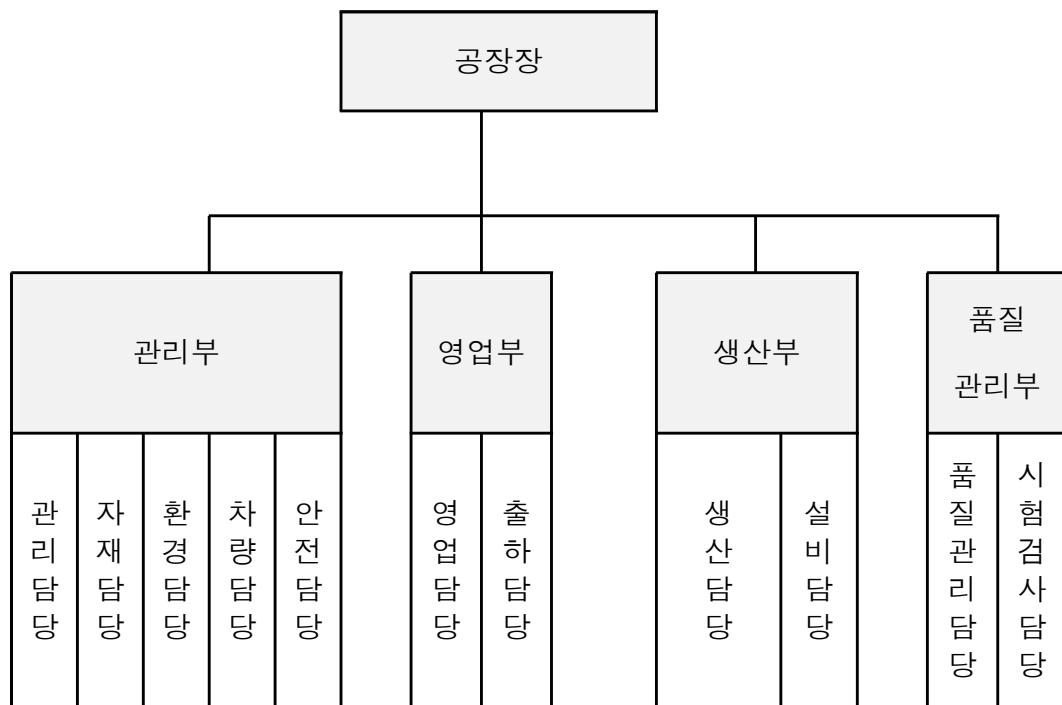
4) 인력운영 계획

가. 조직구성

- 조직의 효율성과 수익성을 위하여 최소조직으로 최대의 효과를 추구함
- 운영조직은 관리부, 영업부, 생산부, 품질관리부 4개의 부서로 구성함

나. 인력운영

- 인력운영은 PC암거 사업부 인력을 활용함



5) 사업화 전략

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ 상용화 형태 : 재래식 거푸집을 대신하는 TRC 영구거푸집 ○ 수요처 : 필로티 구조물이 시공되는 민간/공공시설물 ○ 자가 공장 생산
상용화 능력 및 자원 보유	○ 당사는 2006년 창립이후 레디믹스트 콘크리트, 아스팔트, PC 철근콘크리트암거를 건설사 및 관급용도로 납품한 실적을 보유하고 있음 ○ 당사는 레미콘 KS F 4009 인증 및 PC철근콘크리트암거 단체표준 인증을 획득하였으며, 2018년도 매출액 90억원으로 PC구조물 생산 경험이 풍부함 ○ 프리캐스트 생산설비보유(현재) : 300m³/day
상용화 계획 및 일정	○ 개발종료 후 공장 내 별도 생산라인 구축(2020년 10월)

6) 마케팅 및 홍보계획

- 설계매뉴얼과 시공법 개발을 활용하여 적극적인 마케팅과 홍보를 통하여 많은 현장에 설계
- 세미나 개최, 박람회 참석 등을 통하여 기술적, 경제적으로 우수함을 적극적으로 홍보
- 학회세미나 논문투고 및 참석, 홍보자료 제작(카달로그 등), 물가정보 및 물가자료 등재 등 꾸준한 홍보활동
- 조달청 등록을 통해 전국 공급망 구축

☐ 	세부품명 : 조립식철근콘크리트암거블록 (3013151401) 중소기업자간경쟁제품 회사명 : (주)우현레이콘 [중소기업] 식별번호 : 23468066 다수공급자계약 규격 : 조립식철근콘크리트암거블록, 우현레이콘, WHPC0808, 800×800mm(B×H), 1면, 표준형 [원산지 : 대한민국] [계약종료일 : 2020/10/22] [납품기한 : 50일(납품요구일로부터)] [생산공장 상차도] [전지역] 우선구매대상 : 해당 없음 의무구매대상 : 해당 없음 233,500 원 ☐ m 
☐ 	세부품명 : 조립식철근콘크리트암거블록 (3013151401) 중소기업자간경쟁제품 회사명 : (주)우현레이콘 [중소기업] 식별번호 : 22295669 다수공급자계약 규격 : 조립식철근콘크리트암거블록, 우현레이콘, WHPC1008, 1000×800mm(B×H), 1면, 표준형 [원산지 : 대한민국] [계약종료일 : 2020/10/22] [납품기한 : 50일(납품요구일로부터)] [생산공장 상차도] [전지역] 우선구매대상 : 해당 없음 의무구매대상 : 해당 없음 284,000 원 ☐ m 
☐ 	세부품명 : 조립식철근콘크리트암거블록 (3013151401) 중소기업자간경쟁제품 회사명 : (주)우현레이콘 [중소기업] 식별번호 : 22085779 다수공급자계약 규격 : 조립식철근콘크리트암거블록, 우현레이콘, WHPC1010, 1000×1000mm(B×H), 1면, 표준형 [원산지 : 대한민국] [계약종료일 : 2020/10/22] [납품기한 : 50일(납품요구일로부터)] [생산공장 상차도] [전지역] 우선구매대상 : 해당 없음 의무구매대상 : 해당 없음 310,700 원 ☐ m 
☐ 	세부품명 : 조립식철근콘크리트암거블록 (3013151401) 중소기업자간경쟁제품 회사명 : (주)우현레이콘 [중소기업] 식별번호 : 22085780 다수공급자계약 규격 : 조립식철근콘크리트암거블록, 우현레이콘, WHPC1210, 1200×1000mm(B×H), 1면, 표준형 [원산지 : 대한민국] [계약종료일 : 2020/10/22] [납품기한 : 50일(납품요구일로부터)] [생산공장 상차도] [전지역] 우선구매대상 : 해당 없음 의무구매대상 : 해당 없음 334,300 원 ☐ m 

7) 제품 운송

- TRC 영구거푸집 운송 시 받침목을 이용 하여 제품의 손상이 없도록 적재
- TRC 영구거푸집 전도방지를 위해 카고 차량으로 운송하며 바를 이용하여 결박
- 생산공장 상차도 - 전지역(도서 제외)

다. 연구수행의 개발성과

(1) 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호*
1	3차원 직물섬유 보강 모르타르의 휨성능 평가	한국복합신소재구조학회 논문집	이창민	9 (4)	대한민국	한국복합신소재구조학회	비SCI	2018.12	2287-6979
2	일반유한요소법을 이용한 집중소성현저 모델링	한국전산구조공학회 논문집	김대진	14 (6)	대한민국	한국전산구조공학회	비SCI	2018.12	1229-3059
3	BIM 속성정보를 활용한 4D, 5D 설계 지원 알고리즘 구현 및 검증에 관한 연구 - 공정시뮬레이션과 물량산출을 중심으로 -	대한건축학회 연합논문집	정재원	21 (4)	대한민국	대한건축학회	비SCI	2019.08	1229-5752
4	아라미드 섬유 보강 영구거푸집을 적용한 RC 기둥의 성능평가	한국복합신소재구조학회 논문집	박상화	10 (6)	대한민국	한국복합신소재구조학회	비SCI	2019.12	2288-0232
5	직물섬유 보강 콘크리트 복합패널의 휨성능에 대한 해석적 평가	한국복합신소재구조학회 논문집	양준모	10 (6)	대한민국	한국복합신소재구조학회	비SCI	2019.12	2288-0232
6	탄소 직물 배치위치에 따른 TRC 패널의 휨성능 평가	한국복합신소재구조학회 논문집	이종억	10 (6)	대한민국	한국복합신소재구조학회	비SCI	2019.12	2288-0232

(2) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국구조물진단유지관리공학회 2018년도 가을 학술대회	박상화	2018.10.05	진주 경상대학교	대한민국
2	한국전산구조공학회 학술심포지엄	이승호	2018.11.16	제주 대명리조트	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
3	2019년 봄 한국콘크리트학회 학술대회	이창민	2019.05.08	제주신화월드 랜딩컨벤션센터	대한민국
4	2019년 한국지진공학회 Workwhop 및 학술발표회	박상화	2019.09.20	제주대학교 아라컨벤션홀	대한민국
5	2019년도 가을 한국콘크리트학회 학술대회	이창민	2019.11.06	부산 대명리조트	대한민국
6	2019 한국방재학회 학술발표대회	이종억	2019.02.20	고려대학교 안암캠퍼스 신공학관	대한민국
7	2019 한국복합신소재구조학회 학술발표회	이종억	2019.04.25	강릉 스카이에이 호텔	대한민국
8	2019 한국구조물진단유지관리공학회 학술발표회	이종억	2019.10.10	한화리조트(해운대)	대한민국
9	한국전산구조공학회 2019년 봄 정기 학술대회	이승호	2019.04.04	부산 부경대학교	대한민국
10	한국전산구조공학회 2019년 가을 학술심포지엄	한진주	2019.11.22	목포 현대 호텔	대한민국
11	International Multi-Conference on Engineering and Technology Innovation 2019	손홍준	2019.11.16	Kaohsiung	대만
12	한국CDE학회2019동계 학술대회	김태훈	2019.01.23	평창군 휘닉스파크	대한민국
13	36th ISARC 2019	김태훈	2019.05.23	Fairmont Banff Springs Hotel, Banff	캐나다
14	Creative Construction Conference 2019 (CCC2019)	김원태	2019.06.30	Darubius Grand Hotel	헝가리

(3) 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록 번호*	등록인	등록일	등록번호	등록 번호*	
1	사각형 철근콘크리트 기둥의 모듈형 직물섬유 보강 콘크리트 PC 영구거푸집	대한 민국	김승직 장준호 양준모	2018. 11.02	10-2018 -013388 2						100
2	직물섬유 보강 콘크리트 영구거푸집 및 이를 이용한 시공방법	대한 민국	김대진 손홍준 이승호	2019. 07.10	10-2019 -008296 8						100

(4) 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호*	저작권자명	기여율
1	3D프린터 모델의 Revit(레빌) 연동을 위한 Dynamo(다이내모) 알고리즘	2019.12.03	경북대학교 산학협력단	2019.12.16	C-2019-04 0762	경북대학교 산학협력단	100

(5) 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	2월 졸업	2019		1			1				1		
2	8월 졸업	2019		1			1				1		
3	2월 졸업	2020	1	5			5	1	1		5		

(6) 기타

- 시제품 2건
- 보고서 9건

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 최종성과 목표 및 내용

- 본 연구는 최근 경주, 포항지역 지진피해 등 대경권의 잦은 지진 발생으로 인해 공사비 절감과 동시에 **내진성능 향상을 위한 직물섬유 보강 콘크리트(TRC) 영구거푸집 개발**을 최종목표로 하며, 본 세부 목표는 다음과 같음

구분	내용
세부 목표	① TRC 영구거푸집 상세개발 및 적용 부재의 내진성능평가 - TRC 영구거푸집 모듈 및 접합상세 개발 - TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 내진성능평가 및 이력모델 개발 ② TRC 영구거푸집 재료물성 평가 및 해석모델 개발 - 미소역학 기반 TRC 영구거푸집의 유효물성치 평가 - TRC 영구거푸집 형상, 물성 최적화 및 구조부재 해석 모델 개발 - TRC 영구거푸집에 대한 구조설계기준(안) 개발 ③ TRC 영구거푸집 BIM 모델링 및 형상 최적화 - 파라메트릭 디자인을 이용한 TRC 영구거푸집의 BIM 모델링 - TRC 영구거푸집 물량산출 및 Digital Fabrication - TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼 개발 ④ 실용화를 위한 TRC 영구거푸집의 현장 적용성 평가 - RC기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용사례 분석 - TRC 영구거푸집 현장적용성 평가와 경제성 및 시장성 분석 ⑤ 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발 - TRC PC 영구거푸집 규격화 및 제작 공정 최적화 방법 개발 - 실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시



[그림 3.1] 본 연구과제의 비전, 연구내용 및 기술개발 배경

나. 연구개발의 창의성 · 혁신성 등

- 최근 경주, 포항지역의 지진 발생으로 인하여 많은 필로티 구조물 및 아파트 같은 다가구 주택에서도 심각한 전단균열이 발생하였으며, 대부분 연구 및 사업들은 내진보강에 초점을 맞추고 있는 반면 본 연구에서는 공사비 절감을 고려한 영구거푸집과 인장성능 및 내구성이 우수한 TRC의 융합을 통하여 내진성능 확보가 가능한 첨단 복합재료를 이용하는 도전은 건설 및 섬유 산업분야에 패러다임 전환을 가져올 것으로 판단됨
- 이번 11.15 포항 지진을 통하여 나타난바와 같이 불량 시공 등의 문제로 인한 구조물의 손상에 대한 할증율을 확보할 수 있는 개발제품으로 많은 전문가들이 간과하고 있는 부분에 대한 보안법을 제시함으로서 혁신적이라 할 수 있음
- TRC는 아직 연구 개발단계에 있어 다양한 재료 배합 및 직물섬유의 형상에 대한 TRC의 유효물성치와 구조적 특성을 평가하는 것이 필요하며 이를 비교적 간편하게 많은 비용을 들이지 않고 평가하기 위해 미소역학(micromechanics) 기반의 이론적/해석적 방법을 개발하고자 함
- 모델링 및 물량산출 자동화 구현에는 상당한 어려움이 있으므로 자체적인 기술개발 노력 없이는 이 분야에서의 기술 경쟁력을 가질 수 없으며, 기술격차는 시간이 갈수록 더욱 벌어질 것으로 판단됨
- 시공단계에서는 설계단계에서 작성된 BIM 모델을 활용하지 못하고 새로운 BIM 모델을 만들어 활용하고 있는 실정이나, 본 연구에서는 BIM 모델로부터 자동으로 거푸집 형상을 제작하기 위한 기법을 개발하고 이를 통해 물량산출까지 자동화함으로써 불필요한 시간과 비용의 소모를 최소화 하고 정확성을 최대화 함.
- 이에 그치지 않고 Digital Fabrication까지 수행하여 실제 시공시 발생할 여러 가지 상황을 사전에 확인하여 시공성을 극대화함으로써 특정 알고리즘 개발이나 시스템 개발에 그치는 연구와 차별화됨

다. 최종성과 목표 달성도 및 자체평가

(1) 총괄 성과점검기준표

구분	핵심성과		단위성과		질적 목표 및 성과							해당기관	예산 (백만)	양적 목표 및 성과	
	(level 1)		(level2)		질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치			목표치	달성치
협동 계명대	A	TRC 영구거푸집 및 접합상세 개발	A-1	TRC 영구거푸집 설계도면 및 접합상세	①	설계도면 및 접합상세	설계법	100%	설계완성	상세(안)	7.1	계명대	67.0	특허: 출원 1건 논문: 비SCI 3건 학술발표: 1건 결과보고서: 1건	특허: 출원 1건 논문: 비SCI 3건 학술발표: 7건 결과보고서: 1건
		정적반복가력실험을 통한 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 내진성능평가	A-2	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 내진성능평가 DB	①	TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 실험적 내진성능 검증	충간변위비 2% 확보	100%	실험결과 분석	시험 확인서	23.5		220.6		
		TRC 영구거푸집 상세개발 및 적용 부재의 내진성능평가에 관한 최종보고서 작성	A-3	최종 보고서 작성	①	TRC 영구거푸집 적용부재 이력모델	1건	100%	보고서 작성 여부	전문가 평가	2.5		23.0		
공동1 경희대	B	미소역학 기반 TRC 영구거푸집의 유효물성치 평가법 개발	B-1	TRC 재료의 유효물성치 평가법 개발	①	TRC 재료의 유효물성치 평가법	1건	100%	보고서 작성 여부	전문가 평가	3.8	경희대	35.5	특허: 출원 1건 논문: 비SCI 2건 학술발표: 2건 결과보고서: 2건	특허: 출원 1건 논문: 비SCI 2건 학술발표: 4건 결과보고서: 2건
		TRC 영구거푸집 적용 구조부재 해석모델 개발	B-2	TRC 영구거푸집 적용 부재 해석모델 개발	①	TRC 영구거푸집 적용 부재의 유한요소 해석모델	실험전단 강도 ±15% 범위내 예측	100%	실험결과와 비교 분석	전문가 평가	9.0		84.7		
		TRC 영구거푸집 적용 부재의 구조설계기준(안)	B-3	TRC 영구거푸집 적용 부재의 구조설계기준(안)개발	①	TRC 영구거푸집 구조설계기준(안)	1건	100%	구조설계기준(안) 작성여부	전문가 평가	1.7		16.0		

공동2 경북대	C	거푸집 파라메트릭 가이드라인	C-1	거푸집 파라메트릭 가이드라인	①	거푸집 파라메트릭 가이드라인(안)	1건	100%	개발 여부	전문가 평가	3.8	경북대	35.5	논문: 비SCI 1건 학술발표: 1건 결과보고서: 3건	논문: 비SCI 1건 학술발표: 2건 결과보고서: 3건 저작권: 1건
		TRC 영구거푸집 모델링기반 물량산출 자동화	C-2	TRC 영구거푸집 물량산출 자동화	①	TRC 영구거푸집의 물량산출 자동화 기법 및 산출 보고서	1건	100%	보고서 작성 여부	전문가 평가	9.4		87.9		
		TRC 거푸집 시공 매뉴얼	C-3	TRC 거푸집 시공 매뉴얼	①	시공매뉴얼	1건	100%	보고서 작성여부	전문가 평가	1.7		15.5		
공동3 제이와 이건설	D	RC기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용 사례 분석	D-1	RC기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용 사례 분석	①	시공 문제점 및 영구거푸집 적용 사례 분석 여부	1건	100%	보고서 작성 여부	전문가 평가	3.2	제이 와이 건설	30.0	학술발표: 1건 결과보고서: 2건	학술발표: 1건 결과보고서: 2건
		실용화를 위한 TRC 영구거푸집 기둥의 현장 적용성 평가	D-2	TRC 영구거푸집 기둥의 경제성 평가	①	기존 공법 대비 TRC 개발 기술의 소요 공사비 비교 분석	전체 공사비 증가율 1% 이하	100%	일위대가 분석	원가계산 확인서	13.3		124.8		
		TRC 영구거푸집의 실용화 방안을 위한 경제성 분석	D-3	적용 기술 경제성 분석 보고서	①	적용기술경제 성분석 보고서	1건	100%	보고서 작성 여부	전문가 평가	3.0		28.0		
공동4 (주) 우현 레미콘	E	TRC PC 영구거푸집 모형제작	E-1	테스트용 거푸집 시제품	①	설계기준에 근거한 거푸집 시제품	1건	100%	설계도서	시제품	6.1	(주) 우현 레미콘	57.0	시제품: 2건 결과보고서: 1건	시제품: 2건 결과보고서: 1건
		TRC 영구거푸집 제작공정 최적화 방법 개발	E-2	TRC 영구거푸집 제작공정 최적화 방법 개발	①	TRC 영구거푸집 제작공정 최적화 지침(안)	1건	100%	제작공정 도	제작 시방서	10.3		96.1		
		실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시	E-3	사업화 계획 수립 및 방안 제시	①	실용화 방안에 대한 최종 결과 보고서	1건	100%	보고서 작성 여부	보고서 작성 여부	1.6		15.0		
계												100	936.5	특허: 출원 2건 논문: 비SCI 6건 학술발표: 5건 시제품: 2건 결과보고서: 9건	특허: 출원 2건 논문: 비SCI 6건 학술발표: 14건 시제품: 2건 결과보고서: 9건 저작권: 1건

(2) 정량적 연구개발 성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성건수 (달성도(%))
국내 · 외 논문 게재		6	6 (100)
국내 · 외 학술 회의 발표		5	14 (280)
특허 출원/등록		2	2 (100)
저작권(소프트웨어, 서적)		0	1 (100 ↑)
전문 연구 인력 양성		0	8 (100 ↑)
기타	가이드라인, 매뉴얼, 보고서, 시제품 등	11	11 (100)

(3) 최종성과 목표에 대한 자체평가

A-1	콘크리트와의 부착성능 향상을 고려한 TRC 영구거푸집 및 접합상세 개발	- 개발된 TRC 영구거푸집 모듈의 접합 부분에 콘크리트 타설로 인한 부력 방지 및 부착성능 향상을 고려하여 접합부분을 조립될 수 있도록 상세를 완료하였으며, 전단기를 적용하였음 - 시공성 및 생산성을 고려하여 다양한 높이를 가지는 RC기둥에 모두 적용이 가능하도록 상/하단부 및 중앙부 모듈을 나누어 개발 완료함 - 콘크리트 타설 시 수직부재인 RC기둥은 하단부의 슬래브와 일체화 타설이 진행됨에 따라, TRC영구거푸집의 하단부 기초 및 슬래브와의 접합부 상세를 개발하였음 - 또한, TRC영구거푸집의 단면은 시공 시 시공성 및 인건비 등을 고려하여 분할하지 않고 4각형 일체 단면을 가지도록 개발하였음 - 따라서 “사각형 철근콘크리트 기둥의 모듈형 직물섬유 보강 콘크리트 PC 영구거푸집”에 대한 특허 출원을 완료함
	모듈형 TRC 영구거푸집의 재료 실험 및 콘크리트 유동성을 고려한 측압실험을 통한 형상 개발	- TRC 영구거푸집의 재료 수준에서의 성능을 평가하기 위하여 3D 및 2D 형상의 직물섬유를 이용한 휨 성능 실험을 완료함 1차 휨 성능 실험에서는 3D 직물섬유의 간격, 시멘트의 종류, TRC 복합체의 크기를 변수로 하여 성능평가를 완료함 2차 휨 성능 실험에서는 2D 직물섬유의 종류, 간격을 변수로 하여 성능평가를 완료함 - 또한, 2D 직물섬유를 이용하여 본 연구의 실험체 및 실험 환경을 고려한 인장 실험을 통한 성능평가를 완료함 - 대표 직물섬유를 이용하여 TRC 영구거푸집을 제작 후 타설 높이, 타설 속도, 철근의 유무를

		고려하여 측압실험을 통한 성능평가를 완료함
A-2	내진성능 향상을 위한 TRC 영구거푸집 적용 부재의 성능평가	- 정적반복가력 및 압축 실험을 통하여 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 내진 성능을 평가함 - 영구거푸집으로서의 역할뿐만 아니라 신 복합재료 분야로의 확대 적용이 가능할 것으로 기대됨 - 순수 국내 독자기술로 개발되어 독보적인 기술 확보가 가능한 국내·외 유일 기술로 기술 수출이 기대되며 실험을 바탕으로 내진성능확보에 대한 신뢰성 제고
A-3	TRC 영구거푸집 적용 부재의 이력모델 개발	- 실험결과 기반으로 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 이력모델 개발을 완료함 - 본 연구에서 TRC 영구거푸집 적용 부재의 이력모델은 'Modified Takeda' 이력모델을 기반으로 개발하였음 - 섬유의 종류 및 겹수에 따라 이력모델의 계수를 적절히 설정하였고, 실험 데이터와 비교하여 정확성을 입증함 - 실험결과와 비교를 통하여 최대강도 및 누적 에너지 소산량 오차를 1% 이내로 확보함 - 현재 구조설계/해석 프로그램에 TRC 영구거푸집 적용 RC기둥의 이력모델이 없는 것을 고려하였을 때, 추후 본 연구과제에서 개발한 이력모델을 구조설계/해석 프로그램에서 활용할 수 있을 것으로 기대됨
B-1	미소역학 기반 TRC 재료의 유효물성치 평가 기법 개발	- TRC 복합재료 유효물성치의 이론식 및 해석적 평가법을 개발하고 각각의 방법에 의한 결과의 비교를 통해 정확도 검증 - 개발된 평가법의 유효성 검증을 위해 TRC 복합재료 인장 실험결과를 활용하였으며 직물섬유 타입, 섬유층 개수, 섬유 다층 배열시 각도 등과 같은 다양한 실험변수에 대해 제안된 평가법의 정확성을 확인하였음 - 개발된 평가법의 TRC 적용 부재의 유한요소해석 적용 가능성을 4점 휨 실험결과와의 비교를 통해 검증하였음
B-2	TRC 영구거푸집의 형상, 물성 최적화 및 구조부재 해석모델 개발	- TRC 복합체의 구성 재료들의 물성치 값들을 변수로 설정한 여러 종류의 TRC 복합체의 물성치를 도출할 수 있으며, 이를 활용하여 복합재료가 적용된 다양한 구조부재 해석이 가능할 것으로 판단됨 - 도출한 복합재료의 물성치를 적용한 유한요소해

		석모델의 해석결과와 실물 실험 결과와의 비교를 통해 유사한 거동 및 최대하중이 나오는 것을 확인함
B-3	TRC 영구거푸집에 대한 구조설계기준(안) 개발	■ 직물섬유보강 콘크리트로 보강된 사각형 기둥의 설계기준(안) 개발을 하고, 각 식에 대한 개념도와 상세한 설명을 바탕으로 구조 실무자가 내용을 정확하게 이해하고 설계할 수 있도록 기술함 ■ 개발된 TRC 보강 기둥의 구조설계기준(안)과 유한요소해석모델의 해석결과에 대한 비교를 통해 정확성을 검증
C-1	거푸집 파라메트릭 모델링 가이드라인(안)	■ 조달청 및 국토교통부에서 수행한 BIM 관련 사업을 분석함 ■ 본 기관에서 수행한 경북대학교 기숙사 시공 BIM 사업을 통해 BIM 모델링 요구정보를 분석함 ■ LOD 수준을 정립함으로써 단계별 모델링 매개변수 결정 및 추출정보 활용방안 도출함
C-2	TRC 영구거푸집 물량산출 자동화	■ 기존 거푸집(유로폼) 및 TRC 영구거푸집 물량산출(개수) 시뮬레이션 수행 ■ 개발된 물량산출 리포팅 알고리즘을 활용한 결과 도출 및 검증 ■ 3D 프린터를 활용하여 사전 시공성 검토 수행 및 최적안 모색에 기여
C-3	TRC 영구거푸집 시공매뉴얼	■ TRC 영구거푸집 시공 매뉴얼 개발을 위해 각 기관의 연구내용을 간략하게 요약하였으며, TRC 영구거푸집의 계획-시뮬레이션-제작-시공-검사에 이르는 전 과정을 현장에서 적용가능하도록 작성됨 ■ 개발된 시공 매뉴얼은 TRC 영구거푸집이 사용될 수 있는 시공의 모든 부분에 적용이 가능하며 연구에서 그치는 것이 아니라 실제 현장에 적용이 가능함 • TRC 영구거푸집의 재료 및 형태에 따른 성능분석을 통한 TRC 영구거푸집의 계획과정과 Digital Fabrication 과정을 통한 제작 이전의 시뮬레이션이 포함된 TRC 영구거푸집의 시공매뉴얼을 통하여 시공사 및 거푸집 제작 업체(PC업체)에서 활용하여 업무의 효율성을 높일 수 있다고 생각됨
D-1	RC기둥 시공 문제점 및 영구거푸집 적용 사례 분석	■ 본 1차년도에서 수행한 연구를 통해 RC 구조물의 시공 불량 실태가 포항 지진 사례와 설문 조사 결과를 통해 객관적으로 확인한 것이 중요한 성과라고 자체 평가함. 이는 향후 TRC 대체 기술 개발을 통한 중소규모 RC 구조물의 내진 성능의 향상이 필요하다는 본 연구 과제 수행의 당위성이 다시 한번 더 입증 된 것으로

		사료됨. 특히, 당사 실무진의 풍부한 RC 구조물의 시공관리 경험과 축적된 노하우가 연구 과제 진행 전반에 적절히 반영됨으로써, 추후 TRC 기술 개발의 실용화가 성공되기 위해서 사전에 반드시 고려해야 할 요인을 도출한 것에 큰 의미가 있다고 판단됨.
D-2	실용화를 위한 현장 적용성 평가	- 현장 적용성 평가 방법론을 자체 개발하여 객관적인 기술 검증의 기준을 제시함. - TRC 영구거푸집을 적용한 RC기둥의 현장 적용성 평가를 수행하여 기술 상용화에 장애가 될 수 있는 문제점을 규명하고 이에 대한 기술 상세 및 개선 방안을 도출함.
D-3	실용화를 위한 TRC 영구거푸집 경제성 분석	- TRC 영구거푸집의 경제성 평가를 위해 경제성 평가방법 및 TRC 영구거푸집의 일위대가를 도출하였고, 시범사업 사례에 적용하여 TRC 영구거푸집과 기존 사용 중인 경쟁기술과의 소요 원가를 비교 분석함으로 타당성있는 경제성 평가를 수행하였다고 사료됨 - TRC 영구거푸집의 시장성 분석을 통해 향후 개발 기술의 잠재적 시장 규모를 추정하여 본 개발 기술이 창출할 수 있는 안전 산업화의 기회를 포착함. - 산업변화요인분석, 사업화 SWOT분석, 사업화 추진전략 및 사업화 모형 등 다양한 관점에서 사업화 계획을 수립함으로써 향후 기술 사업화의 시나리오와 상용화 로드 맵을 제시함.
E-1	TRC PC 영구거푸집의 모듈화 개발	- 유동층 플라이애쉬 미분말로 일정 비율 대체하여 사용함으로써 콘크리트의 내구성을 증진시킨 TRC 영구거푸집 제작 하였음 - TRC 영구거푸집을 위한 전용 몰드를 개발 및 제작함으로써 상/하단부 및 중앙부 모듈의 상세를 개발하였음 - 또한, TRC 영구거푸집의 두께, 상/하단부 모듈의 전면 규격, 중앙부 모듈의 양단 단면상세의 규격화 등을 통하여 개발 제품의 PC화를 위한 생산성을 확보하였음
E-2	실용화를 위한 TRC 영구거푸집 제작 공정 최적화 방법 개발	TRC 영구거푸집 제작 공정을 최적화 하여 시제품을 제작한 후 현장 적용성 평가를 통해 검증을 완료함
E-3	실용화를 위한 TRC 영구거푸집 사업화 방안 제시	- TRC 영구거푸집 실용화를 위하여 사업화 방안을 수립하였음 - 사업화 방안 제시를 위하여 6가지 계획을 제시함으로서 신뢰성을 제고

(4) 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 본 연구의 현장 적용성 평가 중 소요 품 조사는 건설공사표준품셈 현장실사지침에 명시된 현장 실사 기준과 요령을 준용하여 객관적 조사를 실시하였으나, 테스트 베드 현장의 작업 물량이 많지 않은 이유로 소요 품 실측 샘플 수가 적어 반복 조사가 어려운 한계가 있었음. 아직 보편화되지 않은 개발 기술의 시범 현장 사업을 통해 제한된 범위에서의 실측된 값으로 도출된 소요 품 조사 결과이므로, 향후 기술 상용화시 현장 실측 작업이 다시 수행되어 본 개발 기술의 소요 자원 품 값의 재확인이 필요할 것으로 판단됨.
- 본 연구 개발의 시간 및 예산의 제약으로 인해 현장 적용성 평가와 경제성 분석은 한정된 영역에서 시행된 연구의 한계가 있으므로, 추후 테스트 베드 시범 사업 확대 등을 통한 아래와 같은 후속 보완 및 개선 연구가 요구됨. 본 개발 기술의 경제성과 사업성 평가를 보완하기 위해서는, 적정 기술료 산출을 위한 본 개발 기술의 가치 평가, 수명주기비용 원가 분석을 통한 경제성 분석 연구, 지진 발생 지역의 시장 판로 개척 시나리오 분석 연구 등이 필요함.

(5) 관련 분야 기여도

- 섬유 보강 적용 TRC 영구거푸집 개발로 향후 지속적으로 발생할 수 있는 지진에 대비하여 구조물의 지진 안전성 확보 가능
- 우수한 성능을 지닌 섬유를 적용한 TRC 영구거푸집 개발을 통한 고성능 보강 기술 확보가 가능하며, 섬유 적용으로 인한 철근량 감소, 공장화 생산으로 인한 공기 단축 및 공사비용 절감이 가능하여 경제적 이윤 추구 가능
- 지진 발생으로 인한 구조물의 피해를 최소화할 수 있으며, 이로 인해 재산피해 및 복구비용 저감 가능
- 내진성능 확보를 목적으로 개발한 TRC 영구거푸집 기술은 국내·외적으로 독자적인 기술로써 향후 섬유보강 영구거푸집 기술 개발의 원천 기술 역할을 수행할 수 있음
- TRC 영구거푸집 적용 구조부재의 구조설계기준(안) 개발로 실무에서 TRC 영구거푸집을 효과적으로 설계할 수 있음
- 신기술을 활용한 기술 경쟁력 강화
 - 4차 산업의 신기술을 활용한 TRC 영구거푸집 시공에 필요한 알고리즘을 개발함으로써 다양한 분야에서의 융합된 자체 기술력 확보 및 개발 기술을 활용한 국내 기술 경쟁력을 강화
- 공장 사전 제작 및 현장 영구 설치 비탈형 하이브리드 거푸집 신기술 개발
 - 종래의 탈형 거푸집 작업은 건설 현장에서 혁신의 대상 영역이었으나 그 동안 관련 기술의 개발은 담보 상태에 머물러 있었지만, 본 기술 개발을 통해 진일보된 원천 기술이 확보된 것으로 판단됨.
- 거푸집 제작 및 시공의 실패비용 절감
 - 거푸집의 구조적 분석을 통한 형태, 재료를 계획하여 이를 Digital Fabrication 과정을 시뮬레이션하여 결정된 거푸집을 제작하여 이에 따르는 실패되는 기회비용을 절감
 - 고효율의 업무 프로세스를 제안함으로써 인력, 시간적, 경제적 절약 효과를 얻을 수 있음

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발성과의 활용 방안

- 내진성능 향상이 가능한 TRC 영구거푸집 개발은 향후 발생할 수 있는 지진재해에 대하여 적극적이고 보다 선진화된 영구거푸집으로서 지속적인 지진 발생 가능성으로 불안에 떨고 있는 대경권 포함 국내 전체 국민의 기대를 충족 할 수 있음
- 기존 영구거푸집과는 달리 내진성능 향상이 가능한 순수 국내 독자기술로 개발되며, 해석 및 실험 데이터를 바탕으로 내진성능 향상에 대한 신뢰성을 확보하며 이를 통해 내진성능 향상이 가능한 영구거푸집으로서 국내·외 유일 기술로 기술수출의 발판을 마련
- TRC 영구거푸집의 시공매뉴얼 및 구조설계기준(안) 개발을 통하여 구조설계사무소 및 시공사에서 활용 가능뿐만 아니라 PC업체 및 거푸집 제작 업체의 매출 향상 가능
- 본 연구에서 개발되어진 TRC 영구거푸집의 적용은 내진성능 향상뿐만 아니라, 시공상의 오류 및 관행으로 인한 구조물 위험에 대한 안정성 확보가 가능
- 후에 본 기술의 확장을 통하여 영구거푸집 용도뿐만 아니라 구조물의 내진성능 향상을 위한 보강재로서 적용을 통하여 사업 영역의 확장으로 새로운 먹거리 부가가치의 창조가 가능
- 미소역학(Micromechanics) 기반의 이론적/해석적 방법을 활용한 재료의 물성 평가 가능
- 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 TRC 영구거푸집 성능 최적화 기술 확보 가능
- TRC 영구거푸집 적용 구조부재의 내진성능 평가 및 구조적 거동의 정확한 묘사 가능

내진성능 향상을 위한 RC기둥의 직물섬유 보강 콘크리트(TRC) 영구거푸집 개발

활용주체	최종 성과물의 활용방안
정부부처 내 내진설계 정책 부서	• 적극적이고 보다 선진화된 영구거푸집으로서 내진성능 향상에 대한 국민의 기대 충족 • 내진성능 향상이 가능한 영구거푸집으로서 국내/외 유일 기술로 기술수출의 발판 마련 • 시공상의 오류 및 관행으로 인한 구조물 위험에 대한 안정성 확보 가능 • 영구거푸집 용도뿐만 아니라 구조물 내진 보강재로서 적용을 통하여 사업의 확장으로 새로운 먹거리 부가가치의 창조가 가능함
건설엔지니어링 설계/시공부서	
PC업체 및 거푸집 제작 업체	

[그림 4.1] RC 영구거푸집의 활용방안

나. 연구개발성과의 기대효과

○ 기술적 측면

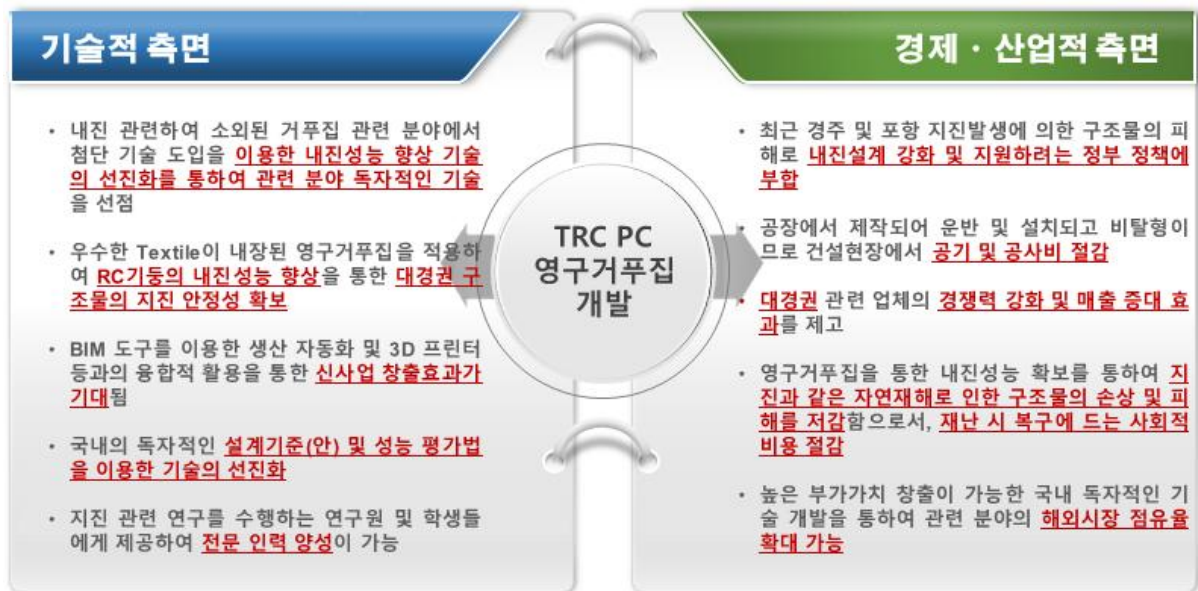
- 내진 관련하여 소외된 거푸집 관련 분야에서 첨단 기술 도입을 이용한 내진성능 향상 기술의 선진화를 통하여 관련 분야 독자적인 기술을 선점하여 국제적인 경쟁력 확보 가능
- 우수한 Textile이 내장된 영구거푸집을 적용하여 RC기둥의 내진성능 향상을 통한 대경권 구조물의 지진 안정성 확보
- 국내의 내진성능 향상 가능한 영구거푸집에 대한 독자적인 설계기준(안) 확보가 가능하며, 이를 적용한 구조부재의 성능 평가법을 이용하여 국내 기술의 선진화 가능
- BIM 도구를 이용한 생산 자동화 및 3D 프린터 등과의 융합적 활용을 통한 신사업 창출효과가 기대됨
- 지진 관련 연구를 수행하는 연구원 및 학생들에게 제공하여 전문 인력 양성이 가능
- 물성이 매우 복잡합 복합재료를 활용한 TRC 영구거푸집을 구조부재에 적용 및 설계하기 위하여, 다양한 재료 배합 및 직물섬유의 형상을 고려한 복합재료의 탄성계수, 포아송비 등과 기본적인 물성치 및 강도 정보가 필요. 미소역학 기반의 이론적/해석적 방법을 활용하여 재료의 물성을 평가하고 TRC 영구거푸집을 장착한 구조 부재의 유한요소해석에 직접적으로 활용할 수 있는 기술의 확보가 가능
- TRC 영구거푸집은 기존의 거푸집과는 다른 재료로 제작되어 이를 구조부재에 적용할 경우 기존의 거푸집과는 다른 구조적 거동을 보임. 본 연구를 통하여 TRC 영구거푸집이 적용된 구조부재의 내진성능을 평가하고 구조적 거동을 정확하게 묘사할 수 있는 새로운 해석모델 확보 가능

○ 경제적 · 산업적 측면

- 공장에서 제작되어 운반 및 설치되고 비탈형이므로 건설현장에서 공기 및 공사비 절감이 가능
- 기존 RC 기둥 대비 전단철근 및 피복두께 감소(하중 저감)을 통한 공사비 절감
- 대경권 관련 업계(직물섬유, PC 및 건설)의 경쟁력 강화 및 매출 증대 효과를 제고
- 영구거푸집을 통한 내진성능 확보를 통하여 지진과 같은 자연재해로 인한 구조물의 손상 및 피해를 저감함으로써, 재난 시 복구에 드는 사회적 비용 절감 가능
- 높은 부가가치 창출이 가능한 영구거푸집의 국내 독자적인 개발을 통하여 관련 분야의 해외시장 점유율 확대 가능
- 거푸집 자동생산 알고리즘을 통한 제품생산 및 물량산출을 통해 공사비 절감 효과가 기대되며, 기존에 없는 기술이므로 개발 후 기술의 수출을 통한 경제적 이윤 창출 또한 기대됨
- 3차원 비선형 유한요소해석을 활용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 다양한 조합에 대해 그 성능을 평가함으로써 제품 개발에 소요되는 비용 및 시간 절감 가능

○ 사회적 측면

- 최근 경주(2016) 및 포항(2017)의 지진발생에 의한 구조물의 피해로 인하여 내진설계를 강화 및 지원하려는 정부정책에 부합
- 최근 잦은 지진과 같은 자연재해 발생으로 인하여 불안감이 고조되고 있으며, 이러한 상황에서 불안감을 억제하고 시민들의 삶의 질 향상 가능
- 조달청에서는 2016년부터 맞춤형 서비스로 집행하는 모든 건설공사에 BIM 설계도입을 의무화함. 이에 발맞추어 시공단계에서 BIM모델을 기반으로 거푸집 생산하여 공기 단축, 공사비 절감을 이뤄 정책에 기여할 것으로 기대됨



[그림 4.2] TRC 영구거푸집 개발을 통한 기대효과

다. 사업화 계획

(1) 생산 계획

(가) 제이와이건설

구분		(2021 년) 개발 종료 후 1년	(2022 년) 개발 종료 후 2년	(2023 년) 개발 종료 후 3년
국 내	시장점유율(%)	100	100	90
	판매량(단위:)	1,000	2,000	20,000
	판매 단가(원)	80,000	75,000	70,000
	국내 매출액(백만원)	80	150	1,260
해 외	시장점유율(%)	-	-	-
	판매량(단위:)	-	-	-
	판매 단가(달러)	-	-	-
	해외 매출액(백만달러)	-	-	-
당사 생산 능력		2,000	4,000	30,000

(나) ㈜우현레미콘

구분		(2021 년) 개발 종료 후 1년	(2022 년) 개발 종료 후 2년	(2023 년) 개발 종료 후 3년
국 내	시장점유율(%)	50	80	100
	판매량(단위: EA)	100	300	500
	판매 단가(원)	2,000,000	1,000,000	1,000,000
	국내 매출액(백만원)	200	300	500
해 외	시장점유율(%)	-	30	50
	판매량(단위: EA)	-	100	300
	판매 단가(달러)	-	2000	1500
	해외 매출액(백만달러)	-	2	4.5
당사 생산 능력		300m³	500m³	700m³

(2) 투자 계획

(가) 제이와이건설

(단위: 백만원)

항목		(2021 년) 개발 종료 후 1년	(2022 년) 개발 종료 후 2년	(2023 년) 개발 종료 후 3년
매출원가		80	150	1,260
판매관리비		8	15	126
자본적 지출	토지	-	-	-
	건물/구축물	-	-	-
	기계 장치 등	-	-	-
	자본적 지출 합계	88	165	1,386

(나) (주)우현레미콘

(단위: 백만원)

항목		(2021 년) 개발 종료 후 1년	(2022 년) 개발 종료 후 2년	(2023 년) 개발 종료 후 3년
매출원가		1.5	0.5	0.5
판매 관리비		0.5	0.5	0.5
자본적 지출	토지			
	건물/구축물		10	50
	기계 장치 등	15	40	50
	자본적 지출 합계	15	50	100

(3) 사업화 전략

(가) 제이와이건설

구분	구체적인 내용
형태/규모	○ 상용화 형태 : 사전 공장 제작 및 현장 설치 영구설치 거푸집 ○ 수요처 : 전국 내진 성능이 요구되는 RC 건물의 기둥 ○ 예상 단가 : 80,000원/m², 개발 투입 인력 : 5M/2Y
상용화 능력 및 자원 보유	○ 1990년 창립 이후 당사는 그동안 RC 구조의 학교시설물, 공동주택, 오피스텔, 근린생활시설 등을 건립한 공사 실적을 축적하고 있음 ○ 당사는 토목건축공사업면허를 보유하며, 2017년 기준 시공능력평가액은 175억원으로 중대형 RC 구조물의 생산 능력과 경험이 상당함 ○ 당사는 2016년도 기준 22명의 기술자를 보유하고 있으며, 철근콘크리트 공종 관련 전문건설업체와 긴밀한 협력 관계를 구축하고 있으므로, 기술 개발 지원 자원을 충분함
상용화 계획 및 일정	○ 1단계 : 상용화 개발 기간(2년) - TRC 영구설치 거푸집 관련 자재의 양산화를 위한 설계 모듈화 검토 - 공장 제작 TRC 관련 자재의 현장 설치 적용성 평가 및 개선 사항 도출 ○ 2단계 : 개발 종료 후 제품 업그레이드 및 양산 - 시범 사업 실증 결과를 기반으로 제품 업그레이드 및 양산

(나) (주)우현레미콘

구분	구체적인 내용
형태/규모	자가공장 생산/ 조달등록(관급자재등록) 및 민간구매방식영업
상용화 능력 및 자원 보유	프리캐스트 생산설비보유(현재) : 300m ³ /day
상용화 계획 및 일정	개발종료 후 공장 내 별도 생산라인 구축(2020년 3월)

(4) 사업화 모형 제시

(가) 제이와이건설

1) 사업화 모형 수립(BM) 배경

- 최근 포항, 경주 등 경상권에 지진으로 인한 RC 구조물의 취약성 개선 필요성 대두
 - 섬유보강콘크리트 영구설치 거푸집 기술 개발을 통한 재난 피해 사전 방지 요구
 - 향후 숙련공 부족 및 노무비 상승 등에 대응할 수 있는 RC 구조물의 생산 시스템 필요

2) 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인

○ 사업화 모형의 목표

- 기존 재래식 형틀 공법을 대신할 TRC 영구설치 거푸집 관련 설계, 제작, 시공 기술 개발
- 향후 형틀 기능공의 수급 부족 또는 인건비 상승에 대비한 선제적 대체 기술 개발

○ 핵심 경쟁 요인

- 사전 공장 제작 최대화 및 현장 시공 물량 최소화를 통한 공기 단축과 공사비 절감
- TRC 영구설치거푸집의 우수한 내진 및 내화 성능, 균일한 자재 마감 품질

3) 목표 시장 구조

가) 경쟁 기업 현황

- 지진에 취약한 RC구조물 기둥에 특화된 영구설치거푸집의 설계, 생산, 시공 기업은 없었음
 - 기존 구조물의 내진 보강 기술을 보유한 유지관리 전문기업은 일부 있음
 - 신규 RC 구조물 신축 시 내진성능 확보를 위한 영구설치거푸집의 기술 보유 기업은 없었음

나) 시장 진입 장벽

- TRC 영구설치거푸집의 설계, 생산, 시공과 관련한 요소 인프라 기술의 실증 자료가 필요함.
 - TRC 영구설치거푸집 모듈 설계, 부재 해석, 부재 생산, 현장 설치 기술 보유 필요
 - 기존 재래식 거푸집과 대비한 TRC 영구설치거푸집의 경제성 입증 자료 필요

4) 수익 확보 전략

가) 주요 고객군

- 내진 성능이 확보되어야 하는 신규 RC 구조물의 수요자 및 생산 공급자

나) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

- TRC 영구설치거푸집 적용 시범 사업의 실증 자료를 통한 경제성과 기술 효과 홍보
 - 대경권 지진 취약 지역의 중대형 RC구조물 신축 시 적용성 검토
 - TRC 영구설치거푸집 관련한 세부 요소 기술 사용료 판매를 통한 수익 창출 실현 가능
 - TRC 영구설치 거푸집 양산 기술을 개발함으로써 시공 단가의 절감을 통한 경제성 개선
 - 지진이 발생하는 해외 시장에 진출은 국내 시장에서의 실적 확보 이후 추진
-

(나) ㈜우현레미콘

1) 사업화 모형 수립(BM) 배경

- 건축물의 지진피해 저감을 위한 내진성능 확보 기술의 개발 필요
- 우수한 내진성과 경제성을 가진 거푸집의 개발 필요
- 건축물 설계 요구에 부합하고 품질확보가 가능한 프리캐스트거푸집 개발 필요

2) 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인

○ 사업화모형의 목표

- 내진성능 향상을 위한 원천 기술의 습득(재료발굴)
 - 건축물의 설계요구에 부합하는 형상의 제품개발
-

-
- 모듈화된 제품의 특성상 연결구조 및 결합방법에 대한 기술의 확보
 - 테스트베드를 통한 현장적용성 확보
 - 표준화 및 규격화된 시제품의 개발
 - 신기술 또는 성능인증을 통한 조달제품등록을 통한 조달구매 실현

○ **핵심경쟁요인**

- 지진에 강한 건축물에 대한 사회적 공감대 형성
- 우수한 내진성능 및 경제성(공사비절감)을 가진 제품의 개발
- 프리캐스트제품으로 품질의 균일성 확보 및 제조원가 절감

3) 목표 시장 구조

가) 경쟁 기업 현황

- 영구거푸집 시장은 별도로 형성된 것이 없음
- 합성폼이나 강재폼 등을 주로 사용

나) 시장 진입 장벽

- 내진에 대한 건축물의 안전기준 또는 건축설계기준 마련 필요
- 정확한 수요예측을 통해 시장을 선점한다면 경쟁력을 갖출 수 있음

4) 수익 확보 전략

가) 주요 고객군

- 정부 및 지방자치단체
- 공기업(LH공사, 각 지자체 도시공사)
- 민간사업자

나) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

- 단계적 전략수립을 통한 사업화 계획 수립
 - 테스트베드를 통한 제품의 실증 및 홍보
 - 표준화 규격화된 제품의 개발을 통한 시장성 확보
 - 지자체 및 공공기관 홍보전시회 참가 및 관련기관 방문 제품 홍보
 - 연계 상품의 개발을 통한 시장의 다각화 추진
-

붙임. 참고문헌

- 국토교통부. (2018). 필로티 건축물 구조설계 가이드라인. 2018.08.
- 국토해양부. (2009). 설계도서 작성기준 개정안. **국토해양부고시 제2009-906호(2009.9.21.)**.
- 김상식. (2018). 철근콘크리트 구조설계. **문운당**. pp304-342.
- 김정탁. (2020). 기술이전 시 수요기업의 내외부 환경요인이 기술사업화 성과 만족도와 기여도에 미치는 영향. **영남대학교**, 박사학위논문.
- 김희철, 서상훈, & 이영학. (2007). 축하중을 받는 콘크리트 충전 탄소섬유튜브 기둥의 소성 이론을 적용한 비선형 유한요소해석. **한국생태환경건축학회 논문집**, 7(6), 119-126.
- 대한건축학회. (2016). BIM 설계도서 작성 지침 -건축, 구조 부문, 2016.05.
- 류정림, 김준규, & 추승연. (2015). 인허가용 건축도면의 표준 요구정보 분류체계 개발 및 BIM 기반 최적화 도면작성 방안에 관한 기초연구. **대한건축학회 학술발표대회 논문집**, 35(1), 137-138.
- 류현욱, 류정림, 김준규, 김구택, & 추승연. (2015). BIM 기반 설계도서 추출을 위한 구조계산서 연동 보조 S/W 개발 및 개선방향에 관한 연구. **대한건축학회 논문집-계획계**, 31(6), 75-83.
- 서울특별시시설관리공단. (2013). 똑똑한 보도공사 길라잡이 보도공사 설계시공 매뉴얼 Ver1.0. **서울특별시 보도환경개선과**.
- SH공사 & 명화엔지니어링(주). (2008). 무거푸집 앵글기둥 구조설계 및 시공매뉴얼. 2008.01.
- 소라삭, 임명관, & 최동욱. (2016). 고연성 PET 섬유로 보강된 철근콘크리트 원형 기둥의 내진성능. **콘크리트학회 논문집**, 28(3), 289-298.
- 우승학. (2014). 유전자 알고리즘을 이용한 비정형 건축외피 디자인의 최적화에 관한 연구. **경북대학교**, 박사학위논문
- 이승현, 류정림, & 추승연. (2017). 건축물 사용승인 제도의 현장조사 자동화를 위한 UAV 활용방안 연구. **한국 CDE 학회 논문집**, 22(1), 44-58.
- 이재은. (2016). 공공연구 성과 확산 활용을 위한 기술사업화 모델 수립 및 검증.
- Altair Engineering, Inc., (2018). Multiscale Designer, User Manual Ver.3.4.
- ASCE-41-17. (2017). ASCE Standard, ASCE/SEI, 41-17: Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Reston, VA: *American Society of Civil Engineers*.
- ATC. (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. *Applied Technology Council*. FEMA 440.
- Aveston, A., Cooper, G. A., & Kelly, A. (1971). Single and multiple fracture, in National Physical Laboratories. The Properties of Fibre Composites, *Conference Proceedings, London*, U.K., IPC Science and Technology Press, England, pp.15-24.
- Banahene Osei, J., & Adom-Asamoah, M. (2017). Incorporating joint flexibility in collapse risk assessment of nonductile rc buildings.
- Ceresa, P., & Negrisoli, G. (2017, October). Hysteretic models considering axial-shear-flexure interaction. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 245, No. 4, p. 042046). IOP Publishing.
- Contamine, R., Junes, A., & Larbi, A. S. (2014). Tensile and in-plane shear behaviour of textile reinforced concrete: Analysis of a new multiscale reinforcement. *Construction and Building Materials*, 51, 405-413.
- Dong, P. (2003). Effect of varying hysteresis models and damage models on damage assessment of r/c structures under standard design level earthquakes obtained using a new scaling method.

- Du, Y., Zhang, X., Zhou, F., Zhu, D., Zhang, M., & Pan, W. (2018). Flexural behavior of basalt textile-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 183, 7-21.
- Eom, T. S., & Park, H. G. (2004). Energy-based hysteretic models for R/C members. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 8(5), 45-54.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*.
- H.K.S. Inc., (2018). ABAQUS, User's Manual Ver.6.18.
- Jang, K. K. (1992). Hysteresis Models of Reinforced Concrete Structures. *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 5(4), 13-23.
- Kang, S. B. (1996). A Study on Analytical Model for Hysteretic Behavior of RC Floor Diaphragm Subjected to In-Plane and Out-of-Plane Load. *Journal of the architectural institute of Korea*, 12(2), 199-206.
- Kunnath, S. K., Reinhorn, A. M., & Park, Y. J. (1990). Analytical modeling of inelastic seismic response of R/C structures. *Journal of Structural Engineering*, 116(4), 996-1017.
- Lee, C. S., Park, Y. S., & Han, S. W. (2020). Bidirectional Lateral Loading of RC Columns with Short Lap Splices. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 24(1), 19-27.
- Peled, A., Bentur, A., & Mobasher, B. (2017). Textile reinforced concrete (Vol. 19). CRC Press.
- Sengupta, P. (2014). Hysteresis models and fragility assessments of reinforced concrete structural components (*Doctoral dissertation*).
- Sezen, H., & Chowdhury, T. (2009). Hysteretic model for reinforced concrete columns including the effect of shear and axial load failure. *Journal of structural engineering*, 135(2), 139-146.
- Zhang, Y., & Han, S. (2018). Hysteretic Model for flexure-shear critical reinforced concrete columns. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(9), 1639-1661.

주 의

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