최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명		
공고번호	공고-제2호	총괄연구개발 식별번호		-	
		연구개발과제번호		21CTAP-C151785-03	
국가과학기술 표준분류	EI1102	50%	EI0499	30%	EI9999	20%
총괄연구개발명	국문	기존 조적조건축물의 내진 및 에너지효율 복합 성능 개선을 위한 TCP 보강기술 개발			
	영문	Development of TCP(Textile-reinforced mortar & Capillary tube Panel) retrofitting technology to simultaneously improve Seismic and Energy Performance of the existing masonry buildings (SEP+)			
연구개발과제명	국문	기존 조적조건축물의 내진 및 에너지효율 복합 성능 개선을 위한 TCP 보강기술 개발			
	영문	Development of TCP(Textile-reinforced mortar & Capillary tube Panel) retrofitting technology to simultaneously improve Seismic and Energy Performance of the existing masonry buildings (SEP+)			

주관연구기관	기관명	국토교통연구인프라운영원	사업자등록번호	142-82-01935	
	주소	(17058)경기도 용인시 처인구 명지로 116	법인등록번호	134522-0001887	
주관연구책임자	성명	백은림	직위	책임연구원	
	연락처	직장전화	051-510-8194	휴대전화	010-6472-9072
		전자우편	ufo35@koced.or.kr	국가연구자번호	1107 2009
연구개발기간	전체	2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)			
	1년차	2019. 04. 05 - 2019. 12. 31 (9개월)			
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31 (12개월)			
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (12개월)			

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		상대국부담비		합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	541,000			480,000	-	1,021,000		1,021,000	-
1년차	141,000			260,000	-	401,000		401,000	-
2년차	200,000			220,000	-	420,000		420,000	-
3년차	200,000			-	-	200,000		200,000	-
									-
									-

공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구기관	EC-JRC	Dionysios Bournas	Scientific Officer	+39 0332 78 5321	dionysios.bournas @ec.europa.eu		
위탁연구기관							
연구기관 외 기관							

연구개발담당자 실무담당자	성명	김태형	직위	책임연구원	
	연락처	직장전화	031-323-6785	휴대전화	010-6703-1107
		전자우편	tommykim@koced.or.kr	국가연구자번호	1103 4091

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 1 월 14 일

주관연구책임자 : 백 은 림 (인)

주관연구기관의 장 : 국토교통연구인프라운영원 권 오 근 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요 약 문 >

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="2">국토교통기술촉진연구사업</td><td colspan="2">총괄연구개발 식별번호</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2">21CTAP-C151785-03</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술
표준분류</td><td>EI1102</td><td>50%</td><td>EI0499</td><td>30%</td><td>EI0999</td><td>20%</td></tr>
<tr><td colspan="2">총괄연구개발명</td><td colspan="6">기존 조적조건축물의 내진 및 에너지효율 복합 성능 개선을 위한 TCP 보강기술 개발-</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">기존 조적조건축물의 내진 및 에너지효율 복합 성능 개선을 위한 TCP 보강기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2019. 04. 05 - 2021. 12. 31(2년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 1,021,000 천원
(정부지원연구개발비 : 541,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원,
지방자치단체 : 천원, 상대국 부담비 : 480,000 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="3">기초[ ] 응용[√] 개발[ ]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="2">착수시점 기준(2)
종료시점 목표(6)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [ ] 자유공모 [√]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">기술선도형</td></tr>
<tr><td rowspan="8">연구
개발
목표
및
내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">국제공동연구를 통한 기존 조적건출물의 내진성능과 에너지 효율을 동시에 개선할 수 있는 TCP 보강기술 및 시공 시스템 개발</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">TCP 공법을 적용한 조적건축물의 내진-에너지 복합 보강기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td colspan="6">조적벽체용 내진-에너지 복합 보강 기술 및 설계 기술 개발(단일 보강패널 부재 개발)</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">(주관연구기관) 조적벽체용 내진-에너지 복합보강 패널 (TCP) 및 설계 기술 개발
• 국내외 기존 조적조 건축물 내진성능 및 에너지 효율 성능 및 보강 사례조사 분석
• 내진-에너지 하이브리드 보강 기술의 국내 조적조 적용성 검토
• 조적벽체용 내진-에너지 복합보강 패널(TCP) 개발
• 모세관 구조를 활용한 벽체용 액티브 단열 공법 개발
• TCP 단일 부재 구조특성 평가 (재료 실험 및 구조 실험)
• TCP 시스템 설계 및 시방서 개발
(공동연구기관) 조적벽체용 내진-에너지 하이브리드 보강 원천기술 개발
• TRM+단열 복합 보강 공법의 성능평가 방법 개발
• 조적벽체의 TRM+단열 복합 보강 공법 원천기술 개발 및 공유
• TRM+단열 복합 공법 실험방법 및 노하우 전수
• TRM+단열 복합 보강 설계 및 시방서 개발 지원
• TRM+단열 복합 보강 공법의 성능평가 방법 개발 지원</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2년차</td><td>목표</td><td colspan="6">TCP 공법을 적용한 모듈화된 패널 시제품 및 시스템 개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">(주관연구기관) TCP 공법을 적용한 모듈화된 보강 패널 시스템 개발 및 시제품 제작
• TCP 공법을 적용한 조적벽체용 보강 패널 시제품 개발 및 제작
• TCP 패널 보강 조적벽체의 내진성능 평가(정적반복가력실험을 이용한 구조특성평가)
• 지진모의실험을 이용한 TCP 패널 보강 조적조 건물의 내진성능 실증 실험
• TCP 패널 보강 조적벽체 에너지 보강 효율 평가(외기 기후조건 고려한 환경 실험)
• 열원을 고려한 TCP 복합 시스템 개발 (태양열 공급 및 축열 고려한 액티브 단열 시스템)
• 기존 TRM+단열재 기술 및 신규 개발되는 TCP기술의 비교 검증실험
(공동연구기관) 기존 TRM+단열 복합 보강 공법 성능 평가
• 기존 TRM + 외단열재 보강공법의 성능 검증 및 결과 분석(실험 및 해석, 기존 연구자료 활용)
• TCP 시제품 및 시스템 개발을 위한 실증실험 기술지원 및 관련 기술자료 공유</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3년차</td><td>목표</td><td colspan="6">TCP 복합 보강 시스템의 현장 적용 실험 및 개선</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">(주관연구기관) TCP 복합 시스템 검증 및 시스템 현장 적용 실험/개선
• 열원 장치를 고려한 TCP 시스템 검증
• TCP 시스템 현장 적용 실험 및 개선사항 도출
• 국내 여건을 고려한 TCP 시스템 개선
• TCP 단열 시스템 최적화 방안 개발(모세관 배치, size 등에 따른 효율고려)
• TCP 시스템 보강 및 시공 가이드라인 개발
(공동연구기관) TRM+외단열 공법 실험 검증
• 국내외 여건을 고려한 TRM+외단열 동시보강 실험 수행</td></tr>
</table>

연구개발성과	○ 조적벽체의 내진 및 에너지 동시보강패널(TCP) 개발 - 조적조 건축물의 모세관 단열패널 및 내진보강 관련 특허 조사 분석 - TCP 설계도 - TCP 내진에너지 복합보강패널 시제품 제작 및 공사 시방서 - TCP 단일패널용 모르타르 실험 결과 - TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 정적 반복가력 실험 보고서 ○ TCP 보강벽체 내진성능 향상(60% 이상 향상) - TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 정적 반복가력 실험 보고서 - TCP+TRM 보강 유무에 따른 조적벽체의 정적 반복가력 실험 보고서 ○ TCP 보강벽체 에너지효율 향상(90%) - TCP 에너지 효율 성능 해석 보고서 ○ TCP 보강 조적건물의 실증 실험 - 비보강 2층 조적채움벽 RC골조 진동대 실험 보고서 - TCP 보강 유무에 따른 2층 조적채움벽 RC골조 진동대 실험 보고서 - TRM+XPS 보강 2층 조적채움벽 RC골조 진동대 실험 보고서 ○ TCP 공법을 적용한 모듈화된 패널시스템 개발 - 열원을 고려한 복합시스템 설계도 ○ TCP 시스템 현장 적용실험 - TCP 시스템 검증 보고서 - 현장시험 검증 성과 확인서 - 시스템 현장적용 실험 보고서 ○ TCP 시스템 개선 - TCP 시스템 개선 보고서 - TCP 시스템 설계서 및 시방서)
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	(활용방안) - 기존 조적조 건물 내진-에너지 복합 보강기술 지침을 통한 실무자 활용 제고 - 내진 및 에너지 복합보강공법의 기술 표준화 기초자료 - 내진보강 지원사업의 보강 기술 기초자료, 관련 연구 및 실무 DB자료로 활용 (기대효과) - 기술적 측면 : 국외 선진기술의 원천기술 확보를 통한 국내 기술의 경쟁력 및 신뢰성 향상 - 경제적 측면 : 효율적 내진보강으로 조적조 건물 붕괴로 인한 직·간접적 경제적 손실 최소화, 저비용 고효율 보강기술의 적용으로 보강 비용 절감 및 에너지 소비량 감소 - 사회적 측면 : 지진 및 에너지 취약시설에 대한 보강기법 적용 및 지원으로 사회 복지 향상등의 효과 기대
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물
	3	2										

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호

국문핵심어 (5개 이내)	조적조	내진성능	에너지효율	보강	-
영문핵심어 (5개 이내)	Masonry	Seismic	Energy	Retrofitting	-

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

❑ 최종 목표

구분	내용
최종 목표	국제공동연구를 통한 **기존 조적건축물의 내진성능과 에너지 효율을 동시에 개선할 수 있는 TCP 보강기술 및 시공 시스템 개발**
세부 목표	**□ 조적벽체용 내진-에너지 복합 보강 기술 개발 및 시스템 설계 기술 개발** – 국내외 조적조 건축물의 내진성능 및 에너지 효율 보강 사례조사 및 분석 – 조적벽체 내진성능 및 에너지효율 동시 보강 핵심원천 기술 개발(국제공동) **□ 국내 실정에 맞는 TCP 모듈화된 패널 시제품 및 시스템 개발** – 섬유보강 모르타르와 모세혈관 튜브로 보강된 복합 보강패널(TCP) 개발 * TCP : TRM(Textile-Reinforced Mortar)+CT(Capillary Tubes) Panel – TCP 공법을 적용한 조적건축물 보강기술 개발 및 시스템 설계 – TCP 공법을 적용한 시제품 및 시스템 개발(시방서 포함) **□ TCP 보강 조적벽체의 성능 검증 실험 및 시스템 현장 적용 실험** – 지진모사장치를 이용한 TCP 보강 조적벽체의 내진성능 실증 실험 – TCP 시제품의 외기 기후조건에 따른 에너지 효율 분석 및 성능 실험 – 기존 TRM + 단열재 기술 및 신규 개발되는 TCP 기술의 비교 검증실험 – TCP 공법을 적용한 시스템의 현장 적용실험

※ 국제공동연구기관인 EC-JRC(European Committee's Joint Research Centre)의 TRM+단열재 공법 원천기술을 바탕으로 TRM과 모세관 튜브를 활용한 TCP를 개발하고 실험 및 분석을 통해 성능 검증 후 전체적인 TCP 시스템을 현장 적용 실험하는 것임

❍ 개발 기술의 정의

◉ 기존 **조적조 건축물**의 **내진성능 보강과 동시에 에너지 효율을 향상**시킬 수 있는 보강기술로, **EC-JRC에서 보유하고 있는 기술** 및 **시험노하우**를 국내의 **첨단 연구인프라를 활용하여 검증**하고 국내 건축 환경을 고려한 **시공기술을 모듈화 한 Panel을 개발**함으로써 시공성과 공사비용을 절감할 수 있는 **내진-에너지 복합 성능 개선 시스템 기술**



[그림 1.1] 개발 기술 개요



[그림 1.2] 연구 비전 및 세부목표

❑ 정량적 목표

○ (내진성능) 비내진 조적벽체 내진성능 20% 향상

- 비내진 조적벽체 면내 및 면외 방향 횡하중에 대한 연성능력 20% 향상

※ 기존 연구에서 TRM을 이용한 내진성능 향상 수준은 10% ~ 50%로 적용조건(조적벽체 재료 및 구성, RC 골조 유무)에 따라 편차가 발생할 수 있으므로 실험실 환경을 고려하여 20% 성능 향상을 연구목표로 설정

- TRM과 CT 패널화(일체화)를 통한 시공성능 개선 포함

○ (에너지효율 성능) 기존 조적벽체 대비 열관류율(또는 열전도율) 성능 20% 향상

- 벽체 내부 모세관 열원공급에 따른 에너지효율 성능에 관한 연구는 부족한 실정으로, 본 연구에서는 조적벽체 내부에 TCP를 보강하여 비보강 조적벽체 대비 열관류율(또는 열전도율) 성능 20% 향상을 목표로 설정

※ 건축물 벽체의 에너지효율 향상은 주로 단열재 개선을 통한 열관류율을 향상시키는 것이나, 본 연구에서 개발되는 TCP는 단열재를 포함하고 있지 않으며, 소량의 에너지 공급 기구를 갖고 있어 단순비교 불가

❑ 적용분야 및 범위

○ 본 연구를 통해 개발하고자 하는 TCP 공법은 비보강 조적벽체의 내진성능과 에너지효율을 동시에 개선할 수 있는 공법으로서, 외부 내력벽(전단벽), 골조 내 채움벽 및 치장벽 등 비보강 조적벽체가 사용되는 기존 건축물의 내진 및 에너지효율 보강 공법으로 적용

- 조적 구조형식은 2~3층 이하의 주거건물(단독주택, 연립주택 등)에 주로 적용되어 있으며, 기존 철근콘크리트 골조 형식의 학교 시설, 경찰서, 소방서, 복지관 등 공공 건축물의 칸막이벽이나 외벽뿐만 아니라 신축 건물의 외장재(마감 치장벽체)로도 적용되고 있음

❑ 연구의 차별화 방안 (기존 공법 대비 차별성)

○ 본 연구는 기존 조적조 건축물에서 가장 문제가 되고 있는 내진성능과 낮은 에너지 효율 문제를 동시에 개선하기 위한 공법을 개발하는 것이며, Textile-Reinforced Mortar 보강과 Capillary tubes(모세관)를 모듈화 된 복합패널 시스템으로 개발하여 내진&에너지 복합성능 보강이 가능함에 따라 기존 공법과의 차별성이 있음

- (내진보강) 조적 벽체에 TRM공법을 적용하여 지진 발생시 벽체의 면외 변형에 의한 전도를 방지

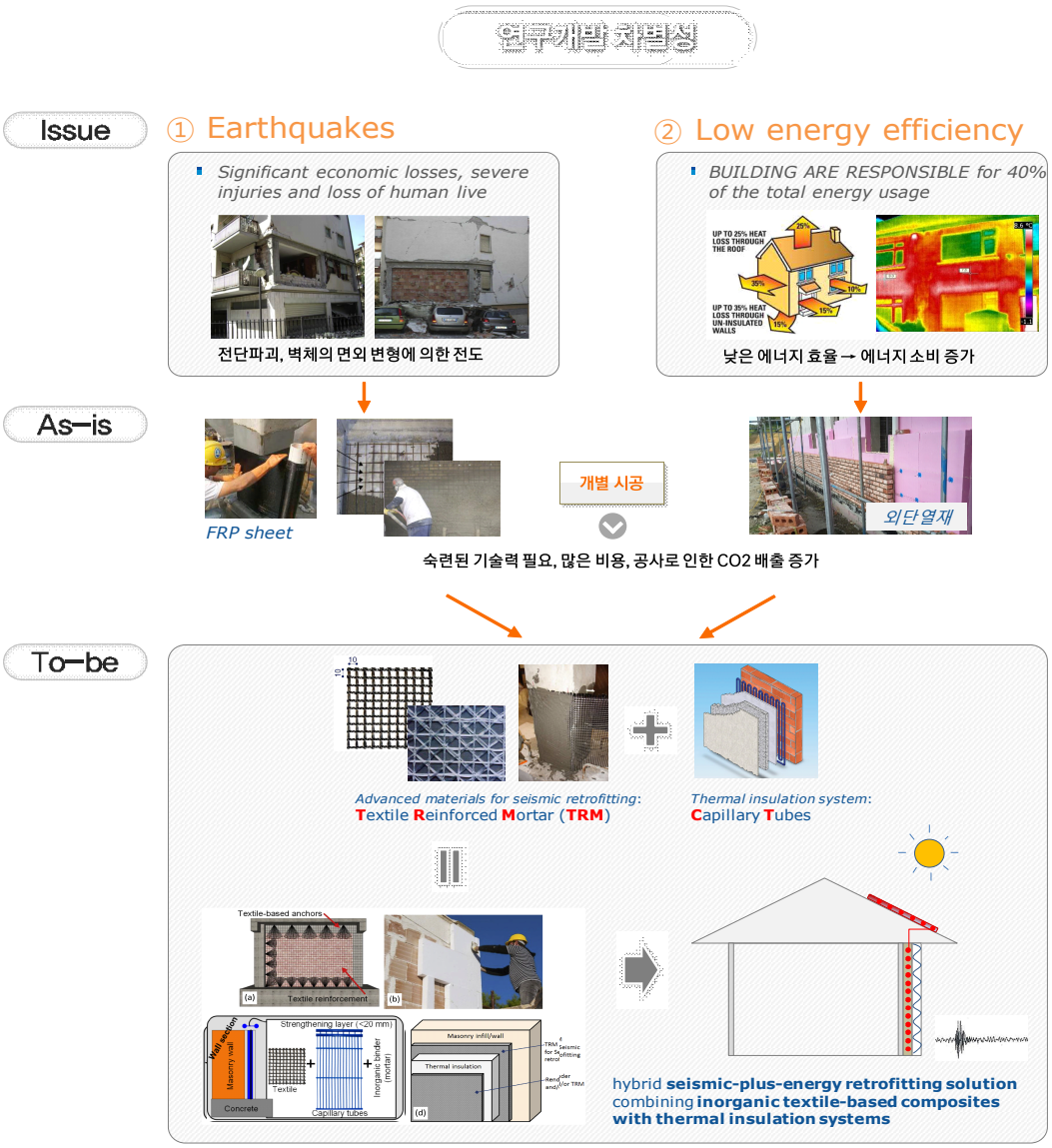
– (단열보강) 태양열(PVT) 시스템과 모세관을 연계하여 외벽 단열을 통해 에너지 효율성 증가

– (시공성능) 모듈화된 패널시스템을 개발하여 시공성을 향상시키고 보강 비용을 절감

※ 기존 공법 : 조적조 내진보강(FRP sheet, 철판, mesh 보강 등)과 단열(외단열공법) 공사를 별도 시공하거나 기존 외단열 벽체 외부에 내진보강공사를 실시함에 따라 각 공법에서 복합성능을 기대할 수 없고, 오히려 시공난이도로 인해 단열성능 및 내진성능 저하우려

○ 기존 공법 대비 경제성

– 해외 사례분석 결과, 기존 조적조 건축물에 TRM+단열 공법을 적용한다면, 내진보강비용m^2당 76,694원, 에너지 보강비용 m^2당 102,272원, 동시보강비용 134,233원(25% 절약 가능)의 경제적 효과를 얻을 수 있을 것으로 추정 <출처: Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials , JRC TECHNICAL REPORTS(2019)>



[그림 1.3] 조적조 건축물의 이슈해결을 위한 연구개발 차별화 방안

○ 국제공동연구 추진 개요

- 본 과제는 우리나라의 첨단 연구인프라를 활용하여 EU의 선진기술을 도입·개선하여 과학기술을 기반으로 사회·생활이슈를 해결하기 위해 국제공동연구를 추진



국제 공동연구를 통한 글로벌 기술협력 체계 마련 및
기존 조적조 건축물의 복합성능 보강분야 선도기술 확보

KOREA-EU 과학기술 협력 방향

KOCED – EC-JRC MOU 체결('16.02)

- (내진분야) 건물 내진보강지침 및 사회적 문제해결 한-EU 구조물의 내진설계 표준 협력
- (연구인프라) 한-EU 인프라 활용 공동연구 추진

『제6차 한-EU과학기술공동위』 채택('17.09)



국제 공동연구
(글로벌 기술선도)

적용 분야

- 과학기술 기반 사회적/기술적 이슈해결
  - 내진보강+건축에너지 성능 향상
- 국내 조적건축물 복합성능 보강기술 개발

공동연구 방향

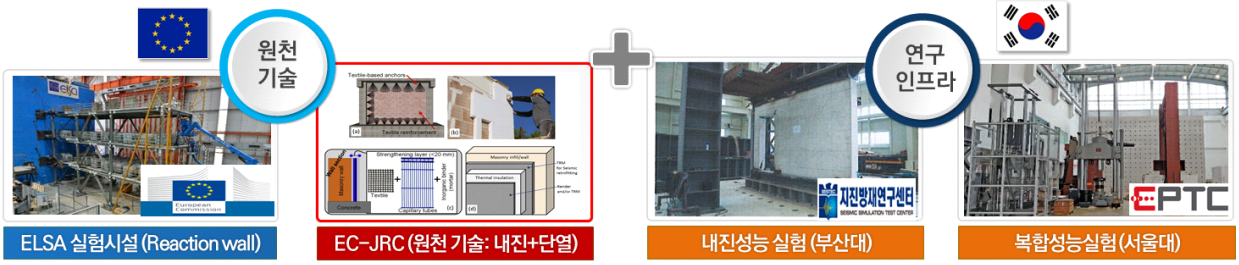
- 양자간 연구개발 예산 공동 투자
- 공동주제의 기술개발 연구
- 국가 연구인프라(실험시설) 공동 활용

국토교통 R&D 정책방향

국토교통과학기술 연구개발 종합계획('18~'27)

- 재난, 재해 예방 등 안전기술 개발
- 예방형 재난 대응시스템
- 저비용 내진보강 공법
- 건축물 제로에너지 기술

해외 선진기술과 국내 연구인프라 활용을 연계한 국제협력 기반 마련



연구인프라 활용 국제공동연구 기반 마련	조적조 건축물 복합성능 보강 선도기술 확보	과학기술 기반 사회이슈 해결 기여
새로운 개념의 국제공동연구 모델 제시 국내 첨단 연구인프라의 해외활용 확대	해외 선진기술의 국산화 글로벌 내진+에너지 복합성능 선도기술 개발	노후 건축물의 지진 대응 안전성 확보 노후 건축물의 저비용 에너지효율 개선

[그림 1.4] 연구 추진 개요

2) 연구개발과제의 년차별 목표

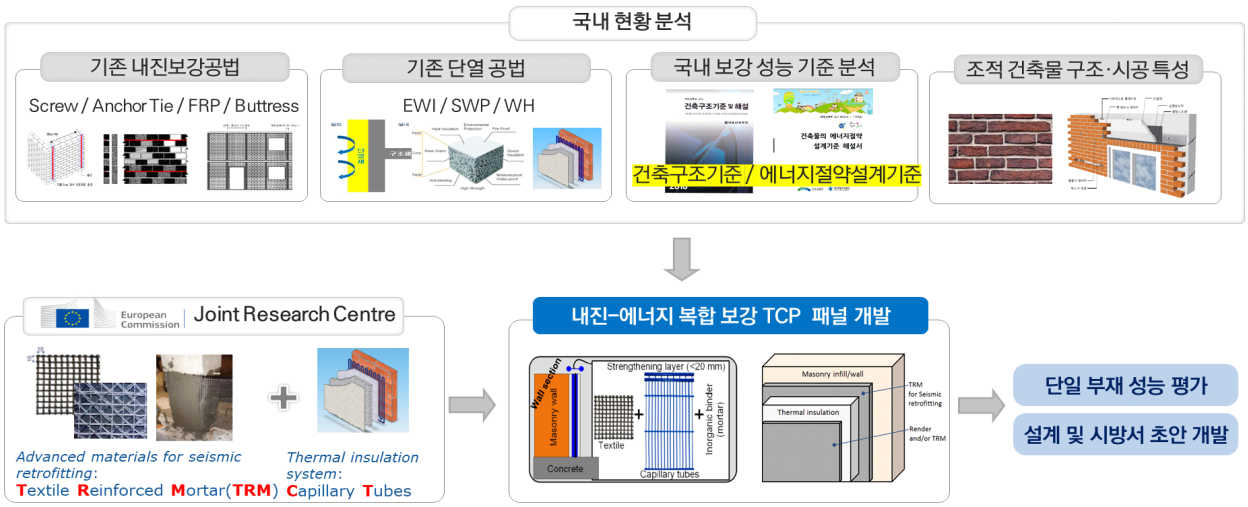
❑ 1차 연도

① 연차 목표 : 조적벽체용 내진-에너지 복합 보강 기술 및 설계 기술 개발 (단일 보강패널 부재 개발)

② 기관별 목표 및 주요 내용

- 주관기관 (국토교통연구인프라운영원)
  - 연구목표 : 조적벽체용 내진-에너지 복합보강 패널 (TCP) 및 설계 기술 개발
  - 연구내용
    - 국내외 기존 조적조 건축물 내진성능 및 에너지 효율 성능 및 보강 사례조사 분석
    - 내진-에너지 하이브리드 보강 기술의 국내 조적조 적용성 검토
    - 조적벽체용 내진-에너지 복합보강 패널(TCP) 개발
    - 모세관 구조를 활용한 벽체용 액티브 단열 공법 개발
    - TCP 단일 부재 구조특성 평가 (재료 실험 및 구조 실험)
    - TCP 시스템 설계 및 시방서 개발
    - TRM+단열 복합 보강 공법의 성능평가 방법 개발

- 공동기관 (EC-JRC)
  - 연구목표 : 조적벽체용 내진-에너지 하이브리드 보강 원천기술 개발
  - 연구내용
    - 조적벽체의 TRM+단열 복합 보강 공법 원천기술 개발
    - TRM+단열 복합 공법 실험방법 및 노하우 전수
    - TRM+단열 복합 보강 설계 및 시방서 개발 지원
    - TRM+단열 복합 보강 공법의 성능평가 방법 개발 지원



[그림 1.5] 1차 연도 연구 개요

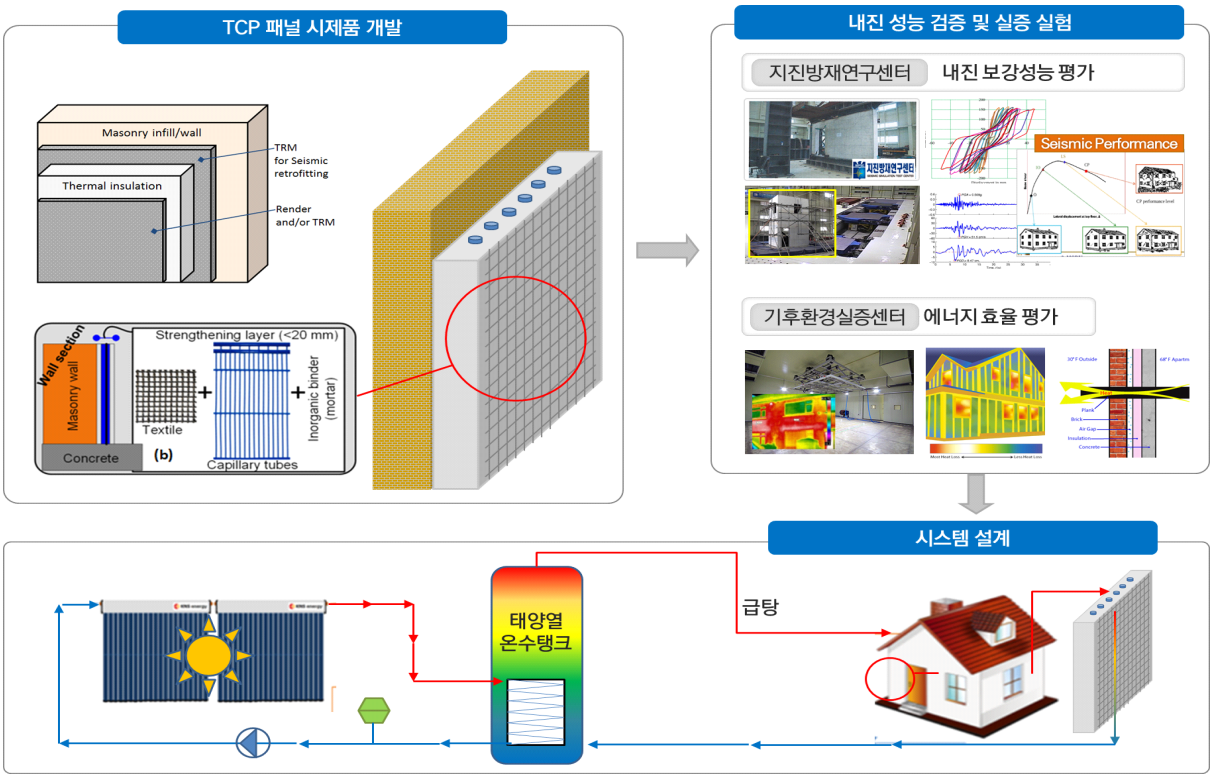
❑ 2차 연도

① 연차 목표 : TCP 공법을 적용한 모듈화된 패널 시제품 및 시스템 개발

② 기관별 목표 및 주요 내용

- 주관기관 (국토교통연구인프라운영원)
  - 연구목표 : TCP 공법을 적용한 모듈화된 보강 패널 시스템 개발 및 시제품 제작
  - 연구내용
    - TCP 공법을 적용한 조적벽체용 보강 패널 시제품 개발 및 제작
    - TCP 패널 보강 조적벽체의 내진성능 평가(정적반복가력실험을 이용한 구조특성평가)
    - 지진모의실험을 이용한 TCP 패널 보강 조적조 건물의 내진성능 실증 실험
    - TCP 패널 보강 조적벽체 에너지 보강 효율 평가(외기 기후조건 고려한 환경 실험)
    - 열원을 고려한 TCP 복합 시스템 개발 (태양열 공급 및 축열 고려한 액티브 단열 시스템)
    - 기존 TRM+단열재 기술 및 신규 개발되는 TCP기술의 비교 검증실험

- 공동기관 (EC-JRC)
  - 연구목표 : 기존 TRM+단열 복합 보강 공법 성능 평가
  - 연구내용
    - 기존 TRM + 외단열재 보강공법의 성능 검증 및 결과 분석(실험 및 해석, 기존 연구자료 활용)
    - TCP 시제품 및 시스템 개발을 위한 실증실험 기술지원 및 관련 기술자료 공유



[그림 1.6] 2차 연도 연구 개요

❑ 3차 연도

① 연차 목표 : TCP 복합 보강 시스템의 현장 적용 실험 및 개선

② 기관별 목표 및 주요 내용

- 주관기관 (국토교통연구인프라운영원)
  - 연구목표 : TCP 복합 시스템 검증 및 시스템 현장 적용 실험/개선
  - 연구내용
    - 열원 장치를 고려한 TCP 시스템 검증
    - TCP 시스템 현장 적용 실험 및 개선사항 도출
    - 국내 여건을 고려한 TCP 시스템 개선
    - TCP 단열 시스템 최적화 방안 개발(모세관 배치, size 등에 따른 효율고려)
    - TCP 시스템 보강 및 시공 가이드라인 개발



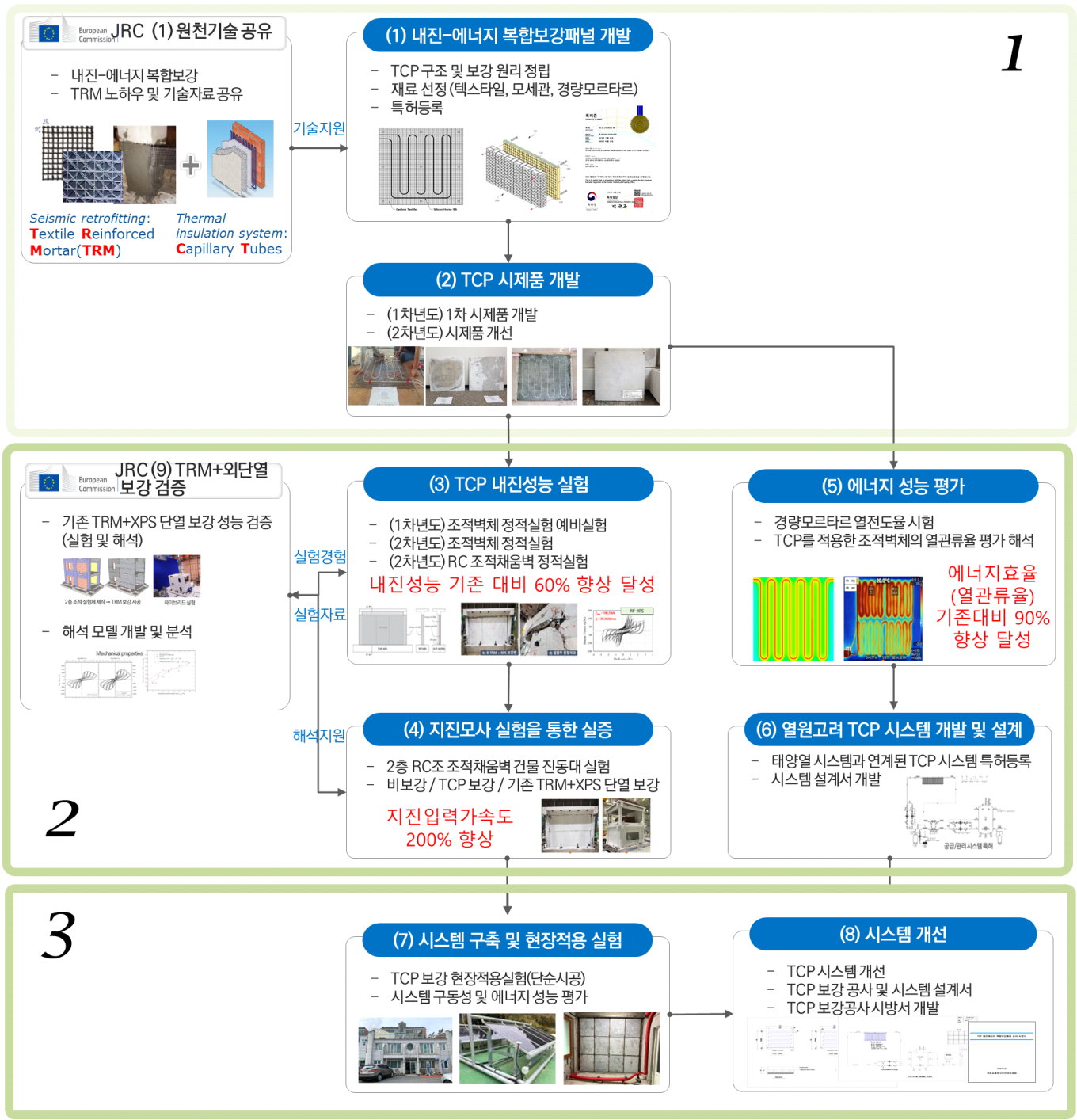
[그림 1.7] 3차 연도 연구 개요

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	내진 및 에너지 동시보강 원천기술 개발 및 시스템 설계	국내외 사례조사 및 분석	-	내진 및 에너지 보강 기술 사례 조사 및 분석	동시 보강 개념 도입을 위한 사례 조사 필요	2
		TCP(TRM+CT) 개발	(국내) 개발 사례 거의 없음 (국외) 개념 정립 및 검증 등 기초 단계 수준	TCP 공법의 설계 및 시방 개발	기존 동시보강패널 사례 없어 기초연구자료 확보를 위함	20
		단일패널 실험 및 결과		단일패널 성능 평가 실험 결과 수집		5
		TRM+단열재 동시보강 공법 개발		JRC 원천기술 공유		3
2년차 (2020)	TCP공법을 적용한 모듈화된 패널 시제품 개발 및 실험검증	TCP 시스템 개발	(국내) 개발 사례 거의 없음 (국외) 개념 정립 및 검증 등 기초 단계 수준	열원을 고려한 복합패널 시스템 설계 및 시방 제시	기존 동시보강패널 사례 없어 기초연구자료 확보를 위함	10
		TCP 패널 내진성능 검증 실험 결과	기존 내진보강 기술 수준은 요구 보강량을 고려했을때 최고기술보유국(일본, 미국) 대비 유사한 수준	기존 대비 20% 향상	동시보강에 대한 기존 성능 결과 비교자료 부족, 기초 연구인 관계로 향상 효과 검증 수준으로 목표 설정	15
		TCP 보강벽체의 에너지효율 성능 검증	기존 에너지보강 기술 수준은 요구 보강량을 고려했을때 최고기술보유국(일본, 미국) 대비 유사한 수준	기존 대비 20% 향상	동시보강에 대한 기존 성능 결과 비교자료 부족, 기초 연구인 관계로 향상 효과 검증 수준으로 목표 설정	5
		TCP 보강 조적조 건물 실증 실험	실험 장비 및 수행 수준은 국내외 유사한 수준, 최고기술보유국 대비 국내 약 70% 수준	보강 유무에 따른 진동대 실험 수행	TCP 보강에 대한 실증 실험을 통한 적용성 및 성능 검증 요구됨	15
3년차 (2021)	TCP 시스템 검증 및 현장 적용실험/개선	TCP 시스템 검증	(국내) 개발 사례 거의 없음 (국외) 개념 정립 및 검증 등 기초 단계 수준	구동성 검증 및 단열/난방 효과 확인	복합보강시스템에 대한 이론 검증 확인 필요	10
		TCP 시스템 현장 적용실험	-	단순 시공을 통한 현장 적용성 평가 수행	시공성을 고려한 현장 적용성 평가 요구됨	10
		개선사항 도출 및 시스템 개선	-	시스템 개선사항 도출 및 보완	시스템 개발 단계 중 기술보완 요구됨	5

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구개발 수행 과정

○ 연구개발 흐름 및 주요 내용



[그림2.1] 연구 흐름 및 주요 성과

2) 주요 연구 수행 내용

(1) 내진-에너지 복합보강패널(TCP) 공법 및 시스템 개발

❑ 건축물의 내진 및 에너지 동시보강에 관한 국내외 사례 조사 및 분석

○ 국내외 기존 조적조 건축물의 내진성능

- (국내외 조적조 건물 지진피해 사례) 2008년 규모 8.0의 중국 쓰촨성 지진, 2011년 뉴질랜드 크라이스트처치 지진, 2016년 경주 지진 등이 발생하여 조적조 건출물의 붕괴로 수많은 인명피해 발생
- (국내 조적조 건물 현황과 형상 및 구조적 특징 분석) 1979년부터 2018년까지 약 120만 동 착공되었으며, 전체건물의 약 24% 수준, 대부분 비보강 조적조로써 모르타르의 인장력으로만 지지하기 때문에 지진에 매우 취약함
- (조적조 건축물의 지진취약부 및 지진시 거동특성) 조적 벽체의 면외 변형, 벽체 교차부, 개구부 모서리, 슬래브 접합부가 특히 취약하며 형상비 1과 2인 벽체의 경우 강체회전과 양단부 압괴 강도에 지배되며, 축응력이 증가할수록 양단부 압괴 강도에 지배되는 경향을 보임
- (조적조 내진보강 국내외 연구현황 및 분석) 국내에서는 조적벽체에 대한 비선형 해석모델, 성능평가 연구 등의 해석 및 실험연구가 일부 수행된바 있지만, 실규모 기반 조적식 건축물의 외벽에 대한 내진보강기법 개발 관련 연구는 미진한 상황, 일본이나 미국은 보강 조적조 건축물을 설계·시공하고 있으며, 비보강 조적건축물의 경우 내진성능이 떨어져서 사용하지 않고 있는 상황
- (국내외 주요 내진보강 연구사례 및 보강기술 현황) 유럽에서는 섬유보강모르타르(이하 TRM)는 무기모르타르와 결합된 메쉬형 고강도 섬유로 구성되어 FRP에 비해 많은 장점을 가진 복합재료로 입증되었으며, 국내에서는 강재 스크류 앵커 보강, 코어링 보강 등의 조적조 건축물의 내진 보강기술을 보유
- (국내외 조적조 내진보강 관련 특허 현황과 분석) 관련특허는 303건(2019년 8월 31일 기준)으로 조사되며, 2008년 쓰촨성 지진 이후부터 출원건수가 갑자기 늘어나기 시작하였음. 이는 조적조 건축물의 파괴로 인한 피해 집중으로 조적조 내진보강의 중요성 인식이 확대되었기 때문인 것으로 판단됨

○ 기존 조적조 건축물 에너지 효율 성능

- (에너지 성능기준, 건물의 에너지 사용 현황) 건축물 분야는 국가 온실가스 배출량의 약 25% 이상을 차지하며, 녹색 건축물 보급을 통한 온실가스 감축 여력이 큼, 에너지 성능기준 강화-에너지 성능 개선-제로에너지 실증으로 건축물 분야 온실 가스 감축에 기여
- (조적조 건축물의 에너지 사용 현황) 조적조 건축물은 연간 약 40.593Gwh 에너지를 사용하며, 벽돌구조가 약 31,770GWh(78%)를 차지하고, 2016년도 이후 점차 에너지 사용량이 증가함
- (단열 성능 기준변화 및 단열성능 강화에 따른 온실가스 감축량) 건물 에너지를 절감하기 위한 방안으로 설비기기의 효율개선, 에너지관리 시스템도입 등으로 절감 가능, 공공 부문의 건물 단열 강화를 적용시 509천CO_2톤의 온실가스 감축가능
- (단열재 관련 국내외 기술 동향) 국내 건물 외벽의 단열방식은 내단열 공법과 외단열 공법으로 구분됨되며, 미국에서는 외벽단열덮개, 독일에서는 기존 외벽에 설치 가능한 외벽난방시스템 등을 사용중
- (국내외 주요 에너지보강 연구사례) 국내에서는 전단 연결재를 적용한 무기계 경량기포 콘크리트(ALC) 샌드위치 외벽 패널의 단열성능에 미치는 영향요인 분석하는 연구, 국외에서는 건축물 외벽에 모세관 매트를 시공하여 유체를 흘려보내 균일한 온도 본포를 가능하게 하는 연구를 수행하고 있음

❑ 건축물의 내진 및 에너지 동시보강 TCP 개발을 위한 원천기술 - EC JRC 노하우 및 기술 공유

○ 내진보강 기술 개발 전략 - 내진보강 기술 개발 시 고려사항

- 조적 건축물 구조적 특징 및 지진시 예측 파괴모드

  • (예측 파괴모드) 형상비가 작고 개구부 옆의 피어 벽체의 경우, 지진하중 발생시 조적벽체 전면에 대각 균열 및 슬라이딩 파괴가 발생할 가능성이 높음.

  ※ 2018년 학교시설 내진성능평가 및 보강 매뉴얼에 따르면, 일반적인 국내 조적벽체의 전단강도를 산정하면 슬라이딩 (가로줄눈파괴) 강도가 대각균열 파괴 강도보다 작은데 이는 보수적인 평가를 위해 조적개체의 재료 특성 기본값을 적용한 경우의 일반적인 결과임. 하지만 가로줄눈 파괴강도는 조적채움벽의 실제 강도보다 상당히 안전적이며, 기존 지진피해 사례를 참조할 때 골조-채움벽 분리 이후(이는 조적건축물의 조적벽체와 동일함) 대각균열파괴 및 대각 압축파괴 모드에 지배되는 것으로 고려할 수 있음.

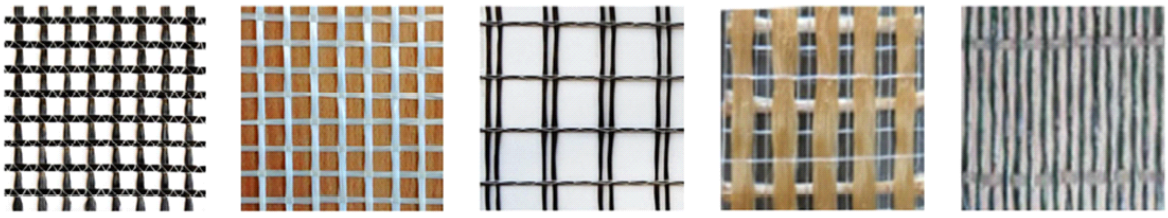
- 조적벽체의 대각균열 파괴 방지를 위한 내진보강 원리

  • 조적벽체의 대각 균열파괴는 수평하중 작용시 대각 방향으로 압축 스트럿이 형성되는데 그 직교방향으로 인장응력이 작용하여 스트럿의 길이 방향으로 균열이 발생하는 현상임.

  • 따라서, 조적벽체의 압축 스트럿 형성시 인장응력을 보강하여 최대 강도를 증대시키고 연성 능력을 향상시킬 수 있는 내진보강 공법을 고려함

○ TRM을 이용한 조적벽체 내진보강 기술

- TRM (Textile Reinforced Mortar)은 종래의 FRP(Fiber Reinforced Polymers) 보강공법의 취약한 내화성, 적용성(습하고 저온인 경우 적용 불가), 에폭시 함침 과정에서의 유해성 등의 단점을 보완하기 위해 제안된 공법으로 섬유 보강재를 2방향의 직물망 (open-mesh) 형태로 직조 가공하여 시멘트 모르타르와 같은 무기화합물로 부착하는 공법임.



(a) 탄소섬유 (b) 유리섬유 (c) 바잘트 섬유 (d) 폴리프로필렌 (e) 강섬유

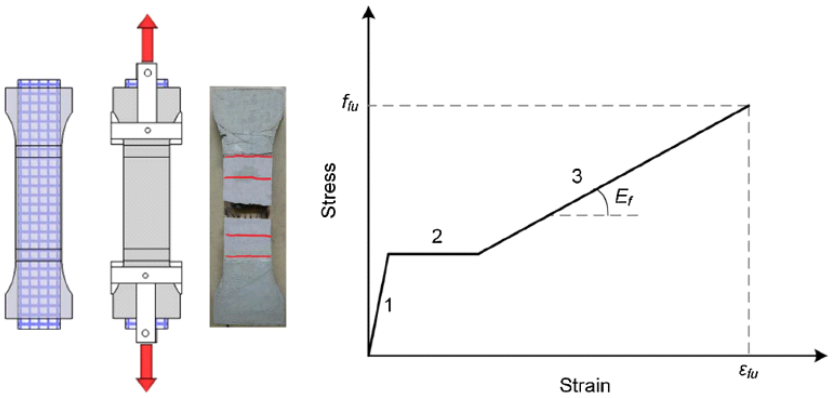
[그림2.2] 섬유 보강재 textile 종류

- TRM의 내진보강 성능은 국외 기존 연구에서 철근콘크리트 부재의 휨보강, 전단보강, 구속보강에 대한 성능이 실험적으로 검증된 바 있으며, 철근콘크리트 골조 내 조적채움벽의 강도 및 연성보강 효과가 입증됨.
- 따라서 본 연구에서 조적벽체의 강도 및 연성 보강을 위해 TRM 기술을 적용하고자 하며 다음과 같은 보강 성능을 기대할 수 있음.

  ① TRM 인장 거동

  - TRM 시편 인장시험 살계 분석 결과, 몰탈의 균열 발생후 균열이 다수로 확대된 이후 균열이 완전히 시편 단면을 관통한 후 내부 텍스타일의 파괴시까지 내력 증가 경향

  ⇒ 조적벽체가 수평하중에 의해 압축스트럿 형성시 TRM 내부 섬유보강 텍스타일에 의해 인장강도가 보강되며, 대각균열 발생 후에도 텍스타일의 인장력에 의해 하중 지지 가능

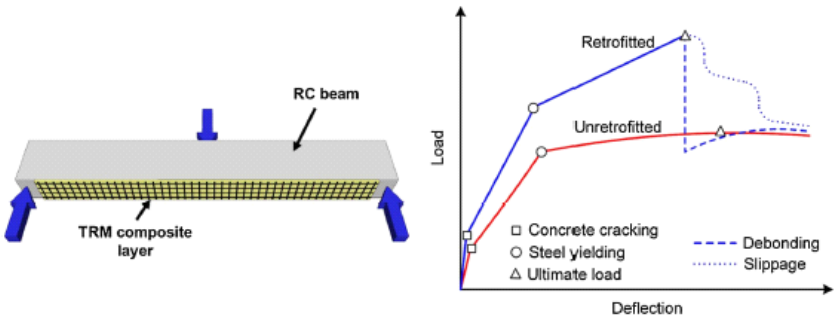


[그림2.3] TRM 인장강도 시험 사례 및 인장 거동 (Koutas et al, 2019)

② TRM 휨 보강 성능

- 철근콘크리트 보 부재의 인장측에 TRM을 보강한 경우 섬유보강재의 인장거동에 의해 부재의 균열강도 및 극한강도가 증가하며 부착 분리된 이후에는 강도 저하 특성 보임

⇒ 조적벽체의 상하부 접합부가 강한 경우 형상비가 작은 피어 벽체의 휨강도 증대

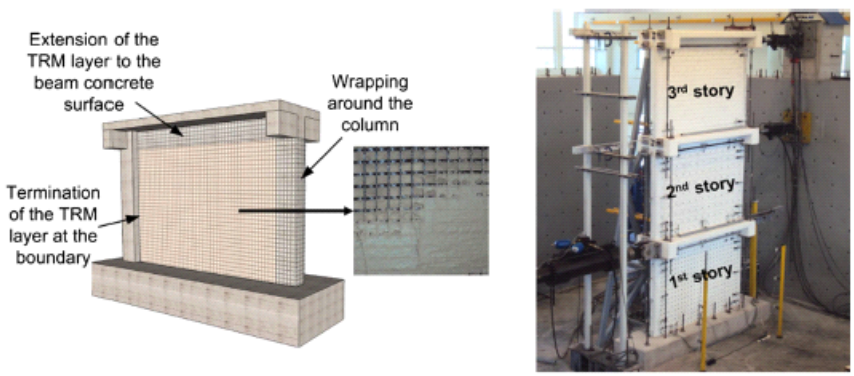


[그림2.4] TRM 휨보강 시험 사례 및 거동 특성 (Koutas et al, 2019)

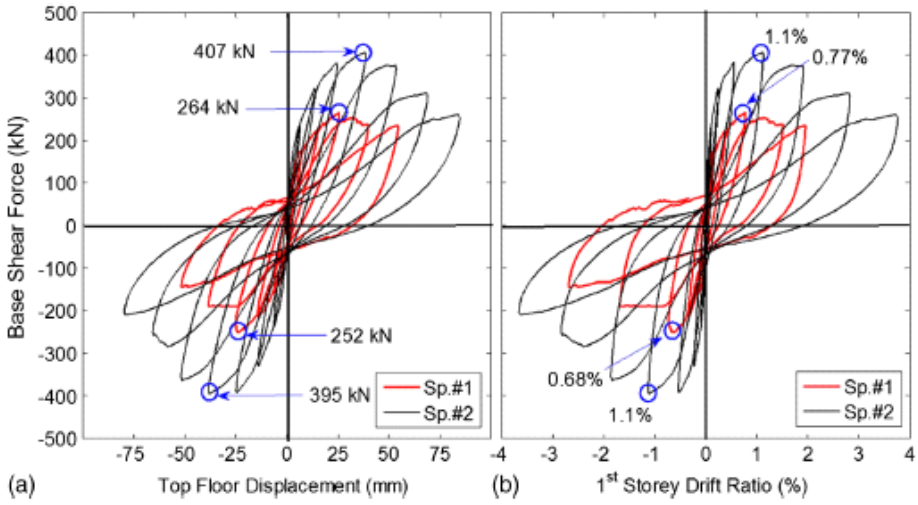
③ TRM 조적채움벽 보강 성능

- 본 연구과제의 공동연구기관인 EC-JRC에서 철근콘크리트 골조 내 조적채움벽 구조에 대한 TRM 내진보강 성능을 검증한 바 있으며, TRM을 벽체에 직접 시공(Jacketing)한 경우에 골조의 강도가 약 150%, 연성이 약 200% 증가

⇒ 국내 기존 노후 조적벽체에 적용할 경우 상당한 강도와 연성 보강 효과 있을 것으로 기대되며, 시공방법에 따른 보강 성능 검증 필요함.



[그림2.5] 철근콘크리트 골조내 조적벽체 TRM 보강 시험 사례(Koutas et al. 2015)



[그림2.6] 철근콘크리트 골조내 조적벽체 TRM 보강 시험 결과(Koutas et al. 2015)

○ **모세관 구조를 활용한 벽체용 액티브 단열 공법**

- (기존 단열 공법) 종래의 조적 건축물 단열 공법으로는 중공벽체 내부에 단열재를 삽입 시공하는 중단열 공법으로 국내에서는 주로 스티로폼이나 우레탄폼 등을 사용함.
- (구조체 난방시스템) 독일에서 구조물 외벽에 난방시스템을 도입하고 열원으로 난방펌프, 빙축열 그리고 태양광·열 집열기등을 적용하는 사례가 있고 온돌이나 바닥 난방의 개념이 없는 국외에서 냉온수 순환관을 내벽 및 지붕에 설치하여 난방하는 사례가 증가하고 있음.
- 모세관 구조를 이용한 난방 및 단열 시스템 도입
  - 국내에서는 전통적으로 온돌과 같은 바닥 난방을 적용하고 있지만 벽체의 난방은 고려하지 않았음.
  - 내벽에 냉온수 순환시스템을 설치할 경우, 실내의 냉난방 효과 기대
  - 외벽에 냉온수 순환시스템을 설치할 경우, 벽체 표면 온도차 조절로 단열 효과 기대
- 태양광 또는 태양열 등 신재생 에너지를 열원으로 활용하여 냉온수 공급

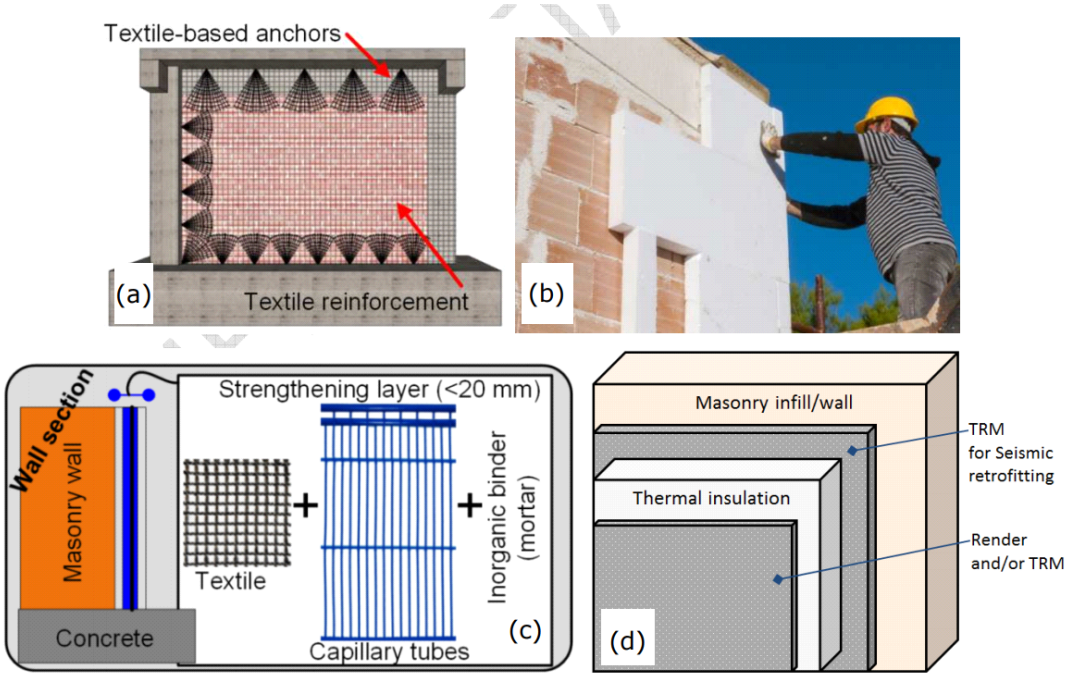


[그림2.7] 모세관 매트(capillary tube)를 활용한 난방 시공 사례

○ TRM + 단열재 동시보강 개념 및 기술 공유

- 공동연구책임자인 Bournas(2018)는 조적채움벽 RC 프레임 건물 그리고/또는 비보강 조적조 건물을 위한 건물 외피의 내진 및 에너지 동시보강을 위한 새로운 보강 개념을 제안
- 내진보강(구조요소 및 비구조요소)을 위해서 고강도 경량 섬유 보강재(예를 들어, 탄소, 유리, 현무암의 양방향 섬유)를 결합한 반면, 에너지 보강을 위해 추가 단열재 또는 난방 시스템을 보강재에 통합함
- 건물외피에 보강재의 결합은 무기 시멘트 기반 모르타르를 사용하여 구현되었으며, 선택된 단열재가 적당한 내화성을 가질 때 TRM 복합재 또한 필요한 내화성을 제공함
- TRM 재킷은 상변화물질(phase change materials, PCM)을 포함하는 매트릭스 또는 그림 (c)와 같이 난방시스템과 통합될 수 있음
- 그림 (d)에서 보듯이 섬유보강에 다양한 단열재를 통합하면 다양한 하이브리드 보강 솔루션(TRM+PUR, TRM+XPS, TRM+Aerogels, TRM+NIM)을 만들 수 있음
- 동시시공으로 필요한 안전 및 에너지성능을 모두 달성하면서 인건비를 크게 줄여 전체 비용을 낮게 유지할 수 있음

- 본 연구와 공동연구인 iRESIST+ 프로젝트를 통해서 TRM + 단열재에 대한 실규모의 검증실험 수행

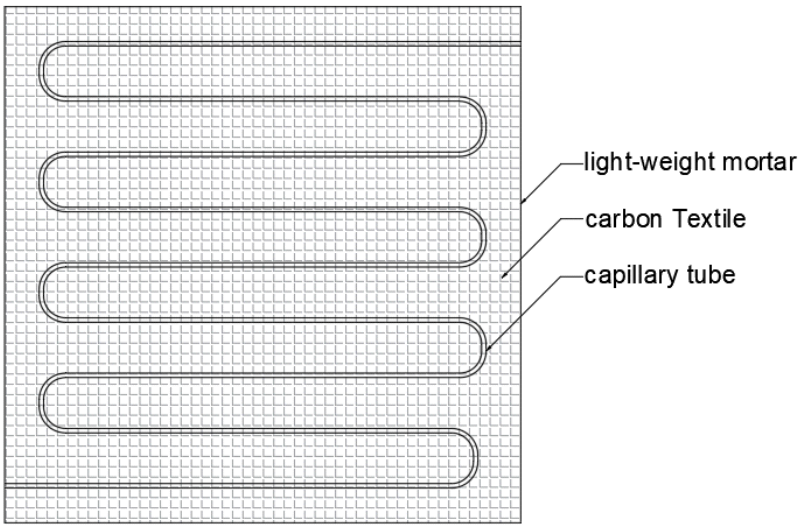


[그림2.8] 건물외피의 내진 및 에너지 동시보강
(a) TRM을 이용한 조적채움벽의 내진보강,
(b) 단열패널을 이용한 건물외피의 에너지 보강,
(c) 얇은 모르타르층안에 설치된 모세관 튜브와 통합된 섬유보강,
(d) 단열패널(샌드위치패널)과 결합된 TRM

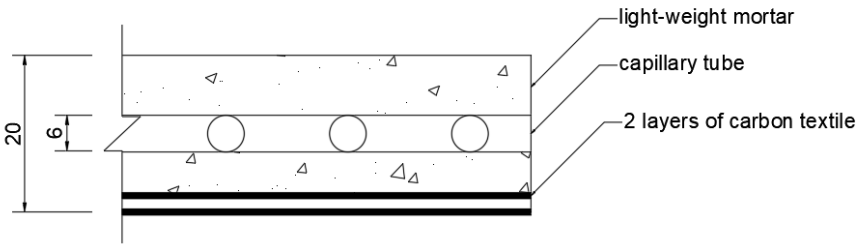
❑ 내진-에너지 복합보강 패널 (TCP, Textile Capillary Tube Panel) 개발

○ TCP (Textile Capillary Tube Panel) 기술

- 본 연구에서는 내진 보강 기술과 단열 기술을 복합적으로 적용하여 조적조 건축물의 내진보강과 에너지 효율 성능을 동시에 향상 시킬 수 있도록 두 가지 기능이 하나의 패널에 구축된 내진 단열 복합보강 패널을 개발함
- (구조 및 보강 원리) 섬유직물망(Textile)과 모세관Capillary tube)을 경량 모르타르 내부에 삽입하여 제작한 내진-단열 복합 보강 패널(TCP)을 기존 조적벽체에 섬유보강모르타르(TRM, textile reinforced mortar)를 이용하여 부착하는 것으로서 내진성능을 향상시키고, 외부 열원 및 동력에 의해 패널 내부에 온수를 순환시켜 벽체에 단열 또는 난방 기능을 수행함.



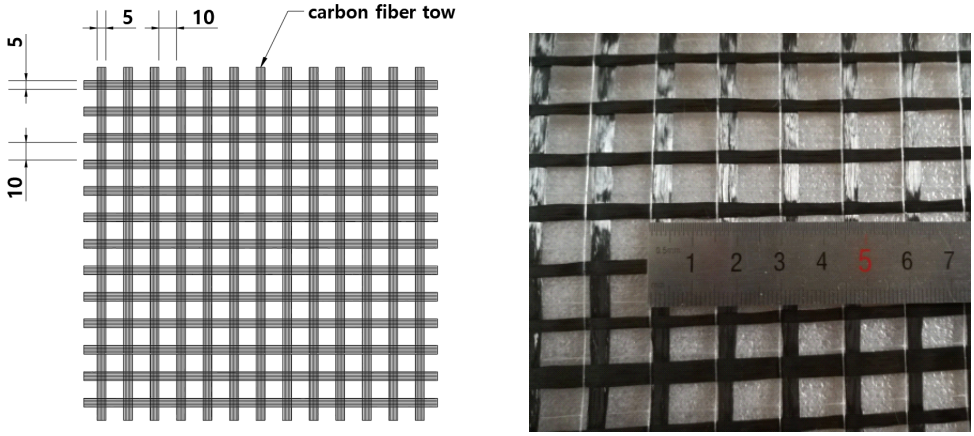
[그림2.9] TCP 구조 평면



[그림2.10] TCP 구조 단면

○ TCP 재료 선정

- (텍스타일) 섬유보강재로 탄소섬유, 유리섬유, 바잘트 섬유 등이 활용될 수 있으며 본 연구에서는 탄소섬유를 사용하고자 하며 아래의 제원에 대해 선행적으로 적용하였음.
  - 인장 강도 및 탄성계수 : 4900 MPa, 240GPa
  - 탄소섬유 토우(toe) 너비, 두께 및 격자망 크기 : 5mm, 0.3mm 이하, 10mm x 10mm



[그림2.11] 탄소섬유 텍스타일 (Carbon fiber textile)

- (모세관) 냉온수 순환관으로 국내에서 수급이 용이한 온수매트용 실리콘 호스를 사용하여 냉온수 순환로를 구성하며, 관의 직경이 작고 충분한 내열성이 확보되어야 함.
  - 직경 : 외경 6mm, 내경 4mm
  - 내열온도 : -60℃ ~ 200℃



[그림2.12] 모세관 (Capillary tube)

- (모르타르) 패널은 시공성을 고려하여 20mm 두께 이하를 만족하여야 하며 취급이나 시공시 취성적 파괴가 예방되어야 하므로 경량의 연성 모르타르가 요구되어 본 연구에서는 경량 연성 모르타르 배합비를 개발하여 사용함.

○ TCP 보강 방법

- (TCP 규격) 국내 일반적인 조적벽체의 크기 및 보강 시공시 TCP 부재의 취급성과 시공성을 고려하여 0.7m x 0.7m x 20mm 크기를 기본 규격으로 함
- (TCP 제작) 조적벽체를 보강하기 위한 TCP는 보강 면적을 고려하여 규격을 결정하고 시방에 따라 사전 제작하여 7일 이상 양생하여 사용
- (TCP 시공) 조적벽체 면에 모르타르를 이용하여 TCP를 부착하여 보강
  - TCP에서 탄소섬유 텍스타일이 배치된 뒷면을 조적벽체에 모르타르를 이용하여 부착

※ 탄소섬유 텍스타일을 모르타르를 이용하여 부착하는 공법이 TRM의 기본 기술로 이는 텍스타일이 격자형태로 구성되어 조적벽돌의 재료와 동일한 무기접합재인 모르타르를 사용하여 부착하므로 부착성능과 기존 구조체와의 일체성이 확보될 수 있음.

❑ TCP 제작을 위한 경량 모르타르 개발

○ 고연성 경량 모르타르 개발 필요성 및 요건

- 본 연구에서 개발하고자 하는 내진-에너지 복합보강 패널은 건식 또는 습식공법에 의해 벽체에 부착하는 형태로 시공성 향상을 위해 시공자가 쉽게 취급할 수 있도록 경량성이 요구됨

- 패널의 보관이나 취급시 취성적 파괴를 방지하기 위한 적절한 연성 능력이 요구됨.

  * TCP에서 경량 모르타르는 패널을 구성하고 최소한의 압축강도를 제공하는 것으로 ECC(Engineered Cementitious Composites)에 기반한 고성능 콘크리트 수준의 연성이 필요한 것은 아님.

○ 1.0 x 1.0m x 0.02m 규격 패널 무게 25kg 이하의 경량 모르타르 개발 고려사항

- 기본 규격 패널의 취급성을 고려하여 패널 무게를 25kg로 선정함에 따라 단위중량 1.25ton/m^3이하의 경량 모르타르를 목표로 설정함.
- 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 주요 결합재로 사용할 경우 50% 이하, 슬래그 또는 플라이애시를 주요 결합재로 사용하는 경우 배합비를 60%까지 사용 가능함.
- 경량골재는 패널의 두께를 고려하여 최대 5㎜ 이하의 골재 사용하며 흡수율, 유동성, 성형성, 강도 등의 특성을 고려하여야 함.
- 활성화재의 종류 및 농도가 중요 영향을 미침

○ 상시 사용시 균열제어 가능한 연성 모르타르 개발 고려사항

- 연성 특성을 확보하기 위해 모르타르 내 보강 섬유를 혼화재로 사용하고, 섬유의 종류와 배합량의 결정시 섬유의 길이, 직경, 배합비와 분포에 영향을 미치는 w/b비와 혼합 방법 등의 고려가 필요함.
- 보강 섬유로 PVA, 나일론, PP 등을 고려할 수 있으며, 섬유 혼입량, 배합비 등에 따른 밀도, 워커빌리티, 압축강도, 휨강도, 탄성계수, 열전도율 등의 성능을 평가한 기존 연구사례를 참조하여 사용량의 범위를 결정하고 예비실험을 통해 최적 비율 결정
- 현재까지 문헌 조사 결과 섬유는 PVA가 다수이므로 PVA부터 실험을 시작함.
- 결합재의 종류와 혼화재료의 선정으로 자기치유 효과도 고려해볼 수 있음.
- 자기치유 효과는 아직 개선할 점은 있으나 무기계 재료를 이용하여 시도할 수 있음.

○ 경량 및 연성 목표 달성 가능한 모르타르 배합비 제안

- 주요 결합재 70~30%, 경량골재 30~70%, 섬유량은 결합재 중량에 대해 1.0~5.0%의 범위로 선정
- 경량골재의 경우 입자의 최대크기가 5㎜를 넘지 않도록 할 것. 이는 패널의 두께가 20㎜이므로 5㎜를 초과하면 재료분리, 타설 등에 영향을 받아 내구성과 강도가 저하될 우려가 있음.
- 섬유는 현재 경량 모르타르/콘크리트 문헌에서 다수 사용한 PVA로 하며, 길이 12㎜ 이하.

  * 섬유 길이가 12㎜ 이상일 경우 패널의 두께가 20㎜이므로 섬유의 분산과 배치에 불리함. 섬유의 뭉침이 발생할 수 있고 고른 분산이 되지 않을 수 있음.

- w/b는 0.5~0.3 범위에서 재료분리가 발생하지 않는 점성과 유동성, 성형성을 가지도록 함
- 예비 실험시 배합의 제조 방법, 성형성, 유동성, 섬유 분산성 등을 관찰함
- 최종적으로 슬래그 기반의 시멘트를 결합재로 한 2가지 배합비를 개발하였음.

  * 경량골재의 비율이 50% 이상으로 높기 때문에 초기 강도 확보를 위해 추가재료로 혼화재를 사용하였으며 유동성 확보를 위해 국내 K사의 s.p 혼화제, 섬유는 PVA(Poly Vinyl Alcohol)를 사용하였으며 섬유량은 결합재_경량골재 중량에 대한 % 비중임.

[표 2.1] 연성 경량 모르타르 배합비

배합안	w/b	결합재 (%)	경량골재 (%)	혼화재 (%)	s.p제 (%)	섬유 (%)	결합재 (g)	경량골재 (g)	혼화재 (g)	s.p제(g)	섬유 (g)
A	0.45	50	50	10	0.3	1.5	25,000	25,000	5,000	150	750
B		40	60	10	0.3	1.5	25,000	25,000	5,000	150	750

○ 강도 평가

- 제안한 연성 경량 모르타르의 물성치 및 품질 확인을 위해 한국생활환경시험연구원에서 공시체 강도 시험을 수행하였음.
- 강도시험 결과 배합안 B의 경우 압축강도 9MPa 이상, 인장 강도 2.0MPa 이상 발현되었음.

- 연성 경량 모르타르는 일반 콘크리트 모르타르와 비교하여 압축강도는 낮은 수준이나 본 연구에서 개발하고자 하는 TCP는 전단에 의해 인장을 받는 구조이므로 높은 강도를 요구하지 않음. 또한 인장강도는 일반 콘크리트 모르타르 수준으로 얇은 두께의 보강패널로 제작 후 취급이나 사용중 취성적 파괴를 방지하는 수준이 요구됨.
- 시험 결과는 TCP 보강 패널의 강도 계산시 기본 재료 물성으로 활용할 예정임.

[표 2.2] 경량 연성 모르타르 강도 시험 결과

시험항목	시험규격	시험 대상		시험결과 (MPa)		시험기관
		대상 및 수량	공시체 규격 (mm)	A	B	
압축강도	KS F 2405	배합안 A, B 각 3개	D 100, H 200	5.63	9.27	한국건설생활환경시험연구원(KCL)
쪼갬인장강도	KS F 2423		D 100, H 200	0.77	2.43	
휨 강도	KS F 2408		W 100, H 100, L 380	1.60	2.10	

○ 인성 평가

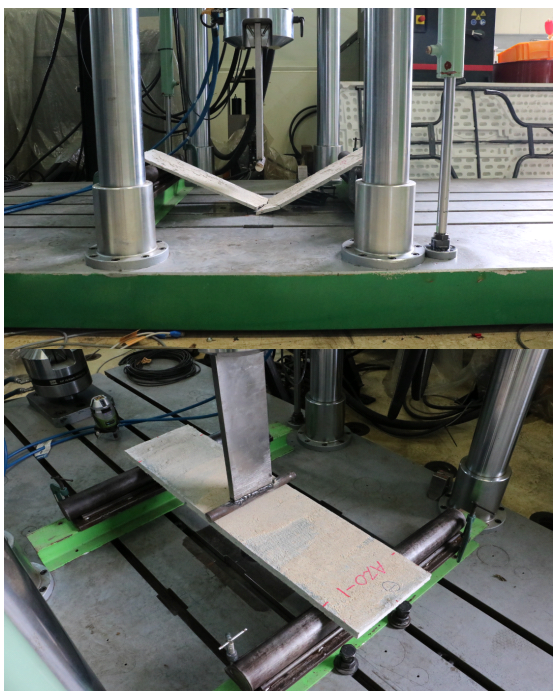
- 제안한 연성 경량 모르타르의 인성을 평가하기 위해 모르타르 패널을 대상으로 휨 실험을 수행하였음.
- 제안한 모르타르 배합안을 이용하여 TCP 규격(1m x 1m x 10㎜ 및 20㎜)을 고려하여 제작성을 시험하고 상시에 균열 및 취성 특성 개선 여부를 확인하기 위함
- 부산대학교 지진방재연구센터의 250kN UTM 기기를 이용하여 3점 재하 실험을 수행하고 최대 하중 및 처짐을 기록함. 배합안 각 2개의 패널을 시험하고 평균으로 다음과 같은 시험 결과 확보
- 시험결과, 배합안 A, B 각각 19㎜, 24.5㎜의 최대 변형이 발생한 후 파괴되었으며 이때의 변형각은 0.048, 0.061으로 분석됨에 따라 콘크리트의 취성적 특성이 개선된 것으로 파악됨.

[표 2.3] 경량 연성 모르타르 강도 시험 결과

배합안	시험 대상	시험결과		시험 장비
		휨강도(MPa)	최대처짐(mm)	
A	모르타르 패널 (W250 x L1000 x t20)	0.91	19.0	지진방재연구센터 (250kN UTM)
B		1.49	24.5	



[그림2.13] 모르타르 패널 실험체 샘플



[그림2.14] 실험 전경

(2) TCP 시제품 개발

❑ (1차연도) 초기 계획안을 이용하여 시제품 제작

- (규격) 국내 일반적인 조적벽체의 크기 및 보강 시공시 TCP 부재의 취급성과 시공성을 고려하여 1.0m x 1.0m x 20mm 크기를 패널의 기본 규격으로 설정하였음.
- (구조) 내진-에너지 복합보강 패널은 내부 냉온수를 순환하기 위한 모세관이 삽입되며 이 모세관은 냉온수 저장·공급 기기 및 열원 기기로부터 연결되어야 하며 패널간 연결이 가능한 장치로 구성되어야 하나, 1차연도에는 TCP의 기능성과 적용 가능성을 확인하기 위해서 타 기기와의 연결을 고려하지 않은 단일 패널 시제품을 개발하고 제작하였음.
- 패널 내부에 설치되는 냉온수 순환로(모세관, capillary tube)는 직렬 순환형과 병렬 통과형 2가지 순환 타입에 대한 설계서를 개발함.

❑ (2차연도) 다수의 TCP 연결 고려한 개선된 시제품 제작

- (개선안) 인접한 TCP 및 구조부재간 접합부 성능향상을 위한 탄소섬유 그리드 배치
  * 탄소 텍스타일 위치를 패널의 중앙부에서 바닥면으로 변경하여 부착성능 향상
  * TCP 패널 연결부로 텍스타일 확정하여 부착성 및 일체성 향상
- (규격) 국내 조적 규격 및 시공 시 취급성과 시공성을 고려하여 0.7ｍ x 0.7ｍ x 0.02ｍ 크기로 결정
  ※ 패널 무게 약 20㎏ 이하
- (TCP 간 연결) TCP 간 온수 공급 및 배출 수단으로 모세관 튜브 시장 현황을 조사하고 내식성을 고려하여 니플형 플라스틱 연결 부품으로 선정하고, 시공성 개선을 위한 TCP 가장자리 형상 개선



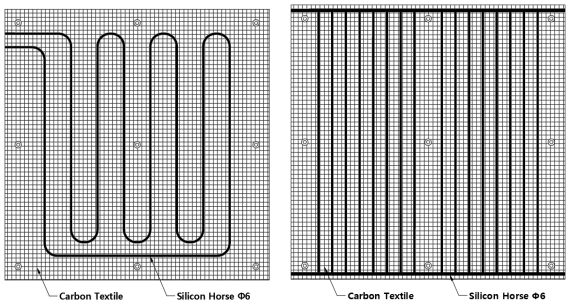
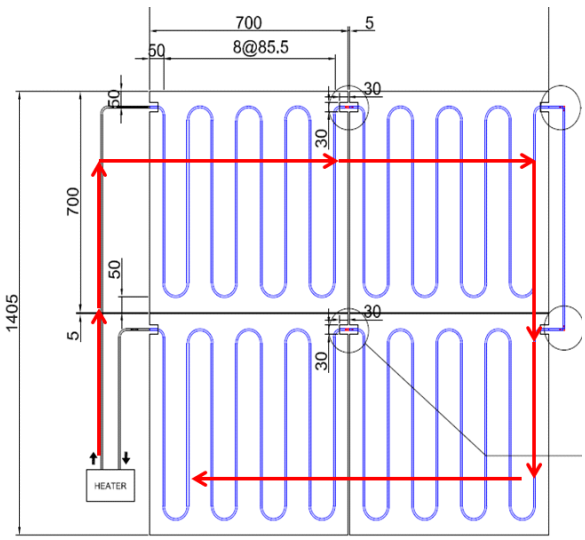
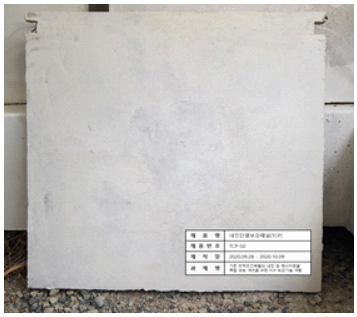
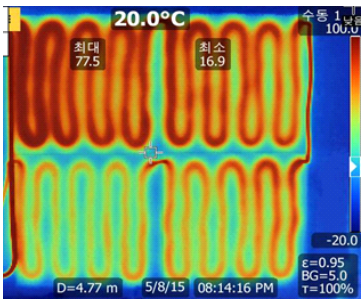
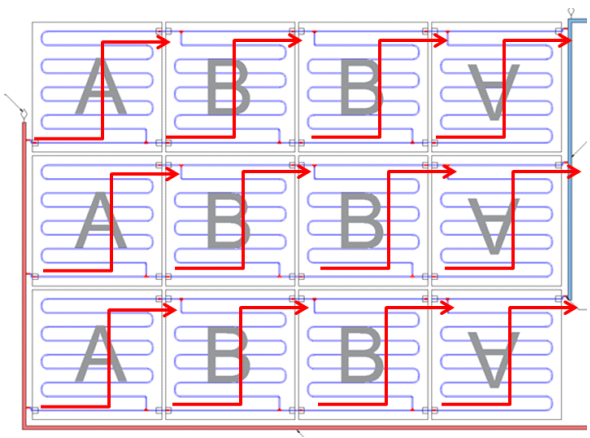
[그림2.15] 니플형 연결 부품 및 연결 상태

- (시제품 검사) 시제품의 외형에 대한 육안조사 및 교정 줄자를 이용한 검측을 실시하였으며, 각 TCP 간 온수 연결 방법의 적정성 및 열순환 기능을 확인하기 위하여 4개의 TCP 시제품을 시공(2 x 2 격자) 하여 검증. 수행결과, 20㎜ 두께에도 불구하고 TCP 각 구성이 모두 포함되어 제작이 가능함을 확인하였으며, 열에너지 전달에 문제가 없는 것으로 확인

❑ (3차연도) 온수 순환경로에 따른 에너지 효율을 고려하여 모세관 배치 형상 개선

- (규격) 현장적용 test bed를 고려하여 맞춤형으로 규격(0.68m x 0.83m x 0.02m)결정
- (모세관 배치) 기존 시제품 제작시 모세관이 전체 패널에 직렬로 연결된 경우 출수관 온도가 저하되어 에너지 효율이 저하됨에 따라 공급주관은 직렬로 연결하되 패널은 각 병렬로 연결한 혼합형 배치로 개선
- (보강 패치) TCP 접합부 부착성 및 구조체와의 일체성 향상을 위한 탄소섬유 텍스타일 보강 패치 시공

[표 2.4] TCP 시제품 설계서 -모세관 배치 형상에 따른 개선안

TCP No.	크기(m)	배치 형상	시제품 현황
2019 #A-01, #A-02	1.0 x 1.0 x 0.02	 [직렬 순환형] [병렬 통과형]	 [시제품 형상]
2020 #B-01	0.7 x 0.7 x 0.02	 [직렬 통과형] - 공급수가 전체 패널을 모두 통과한 후 환수	  [시제품 및 구동 검사]
2021 v03-01 (최종 개선안)	0.7 x 0.7 x 0.02	 [혼합 통과형] - 패널 내부에서 직렬 순환형, 각 패널은 병렬형	 [시제품 현장 적용]

(3) TCP 공법의 내진성능 검증 실험

❑ TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 거동 특성 평가 (예비실험)

○ 실험 개요

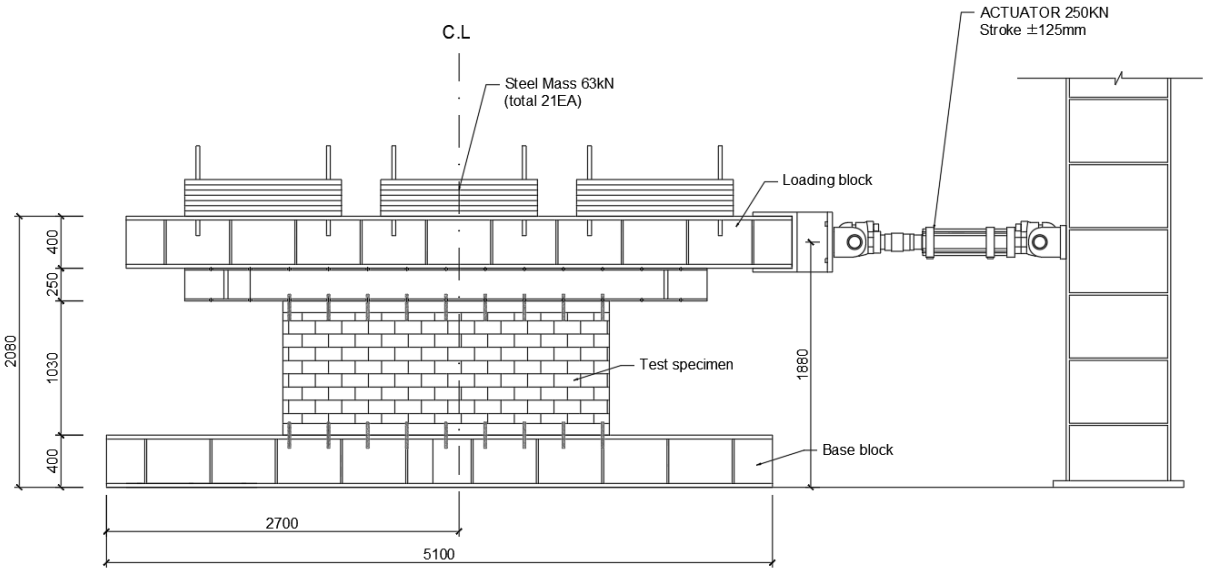
- (추진현황) TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 거동 특성 및 성능 평가 실험전 패널 시제품 제작, 정착 및 부착 방법에 따른 거동 특성을 사전에 검토하기 위해 예비 실험을 수행하였음.
- (실험대상) TCP 보강 유무 및 TCP 부재 고정 방법에 따른 조적벽체 3종

[표 2.5] TCP 보강 유무 및 고정방법에 따른 실험체

실험체	규격 (mm)	실험체 형상	변수
URM	(조적벽체) 길이 2,500 높이 1,030 두께 190		비보강 조적벽체
RM-TCP-AB	(조적벽체) 길이 2,500 높이 1,030 두께 190		TCP 보강 셋트앵커+에폭시 고정 (셋트 앵커 Φ10, 8ea)
RM-TCP-A	(TCP) 길이 800 높이 800 두께 20		TCP 보강 셋트앵커 고정 (셋트 앵커 Φ10, 8ea)

○ 실험 방법

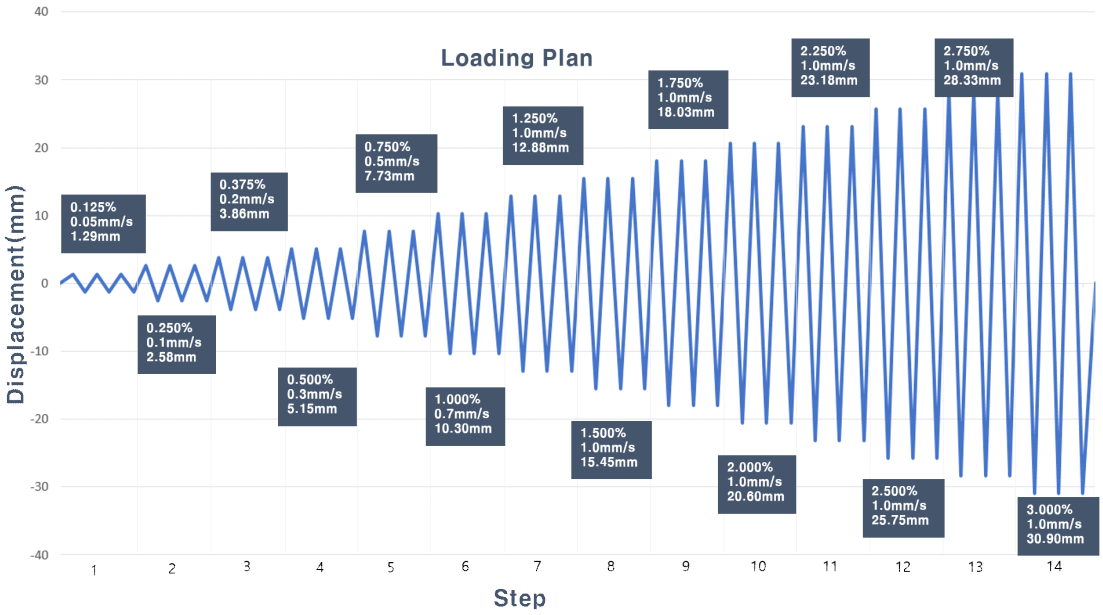
- (정적반복가력실험) 실험체의 횡방향 저항 거동 특성을 평가하기 위하여 250kN 용량의 유압 엑츄에이터를 이용하여 부재의 상부에 목표 수평 변위를 반복 가력함. 반복가력 패턴은 기존 조적벽체 정적실험 연구를 참조하여 층고를 기준으로 변형각 0.125% ~ 3% 까지 단계별로 목표 가력변위를 증가시키며 단계별 3 싸이클을 반복 가력하였음.



[그림2.16] 정적 반복가력 실험 셋업



[그림2.17] 실험 전경



[그림2.18] 정적반복가력 패턴

○ **실험 결과**

- 비보강 조적벽체(URM)와 TCP 보강벽체(RM-TCP) 모두 최대하중은 100kN 정도로 유사하게 발현
- 파괴모드의 경우, 보강 유무에 관계없이 가력 단계 초기에 조적벽체 하부에 슬라이딩 균열이 발생하고 가력 변위가 증가함에 따라 벽체가 회전하는 Rocking 현상이 두드러짐.
- 하중-변위 이력 곡선에서 TCP 보강 실험체의 경우 우수한 에너지 소산 특성을 보였으나 TCP 부재의 손상은 거의 발생하지 않았기 때문에 보강 실험체의 에너지 소산 메커니즘에 대한 추가적인 분석이 필요함.

○ **TCP 보강 효과 및 접합 방법에 따른 분석**

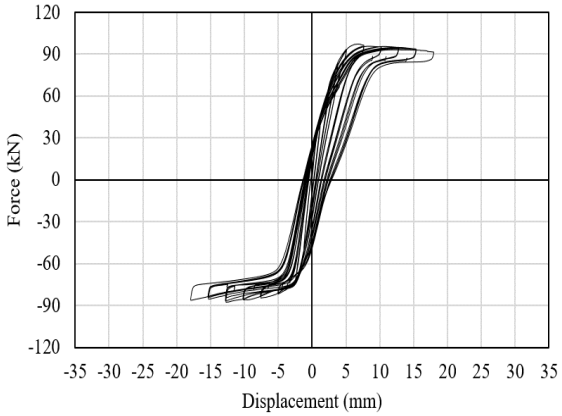
- TCP 부재의 보강 성능은 조적벽체가 대각 균열 파괴 강도 보강 및 균열 제어의 효과가 있을 것으로 기대하였으나 실험에서 조적벽체 하부 슬라이딩 파괴가 선행됨에 따라 TCP 부재의 보강 성능을 확인하기 어려웠음.
- 접합방법에 따른 결과로는, 전면에 에폭시 퍼티로 부착하고 셋트 앵커로 접합한 경우(TCP-AB)에 조적벽체와 일체성이 확보되어 강성이 증대된 것으로 판단되며(하부 슬라이딩 균열이 가력 초기 단계에 발생하고 균열이 확장되지 않고 집중되었기 때문), 셋트 앵커로만 고정한 경우(TCP-A)에는 앵커 고정부에 응력이 집중되어 조적벽체의 Crushing이 발생함에 따라 일체화에 어려움이 있는 것으로 판단됨.

○ **추가 실험 연구시 고려 사항**

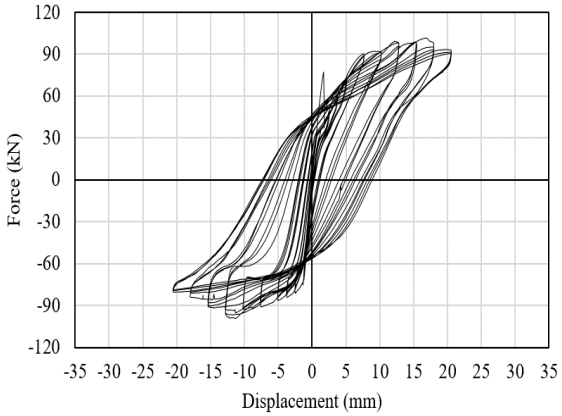
- TCP 부재의 성능 발현을 위해 조적벽체의 파괴모드 제어 필요
- TCP 부재의 고정방법에 따른 보강 성능을 평가하기 위해 다양한 고정방법에 대한 실험 필요
- TCP 부재의 고정시 벽체의 강성 및 강도 증대에 따른 조적벽체 파괴모드 변화 발생 가능성 검토하고 벽체의 접합부에 대한 추가적인 보강 필요성 검토

[표 2.6] TCP 보강 유무 및 고정방법에 따른 실험체

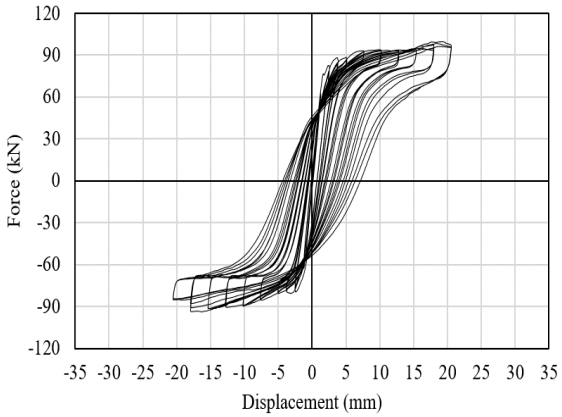
Specimen	Direction	Maximum force (kN)	Displacement at maximum force (mm)	Failure mode
URM	Positive (+)	97.13	20.52	Sliding, Rocking
	Negative (-)	-87.52	-20.54	
RM-TCP-AB	Positive (+)	101.80	23.13	Sliding, Rocking, toe crushing, diagonal tension
	Negative (-)	-99.16	-23.12	
RM-TCP-A	Positive (+)	99.71	30.86	Sliding, Rocking, Diagonal tension
	Negative (-)	-93.54	-30.87	



[그림2.19] Force-Displacement relationships (URM)



[그림2.20] Force-Displacement relationships (MR-TCP-AB)



[그림2.21] Force-Displacement relationships (MR-TCP-A)

❑ TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 내진성능 평가 (정적반복가력실험을 이용한 구조특성 평가)

○ 실험 개요

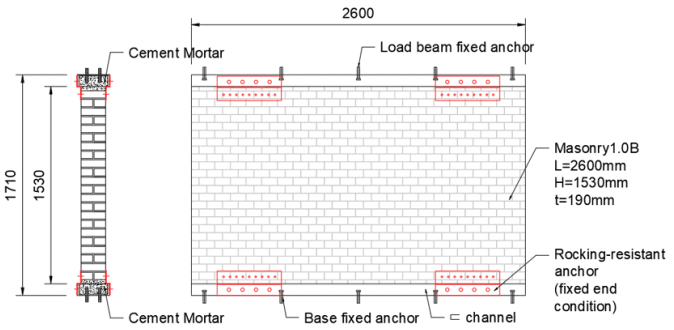
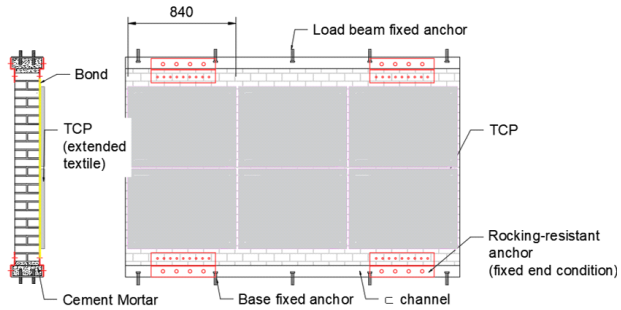
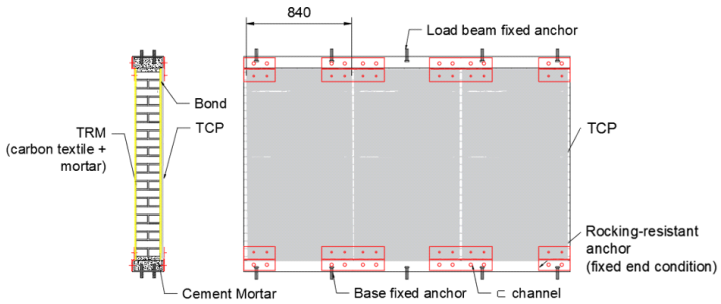
- (실험목표) TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 정적반복가력 실험을 통해 TCP 내진보강성능 평가
- (실험대상) TCP 보강 유무에 따른 조적벽체 3종

① URM (비보강 조적벽체) : 조적벽체의 파괴모드를 고려하여 길이 2.6m, 높이 1.53m 형상비(H/L=0.59)로 고려하고, 2종 보통 시멘트 벽돌을 이용하여 1.0B 쌓기 적용(강체회전모드 방지를 위하여 벽체 하부에 강체회전 방지 철물 적용)

② RM-TCP (TCP 보강 조적벽체) : 조적벽체의 한 면에 TCP(탄소섬유시트 2겹, 석재본드 부착)를 적용하였으며, TCP 내부의 탄소시트를 벽체 접합부까지 연장하여 보강 패치로 활용

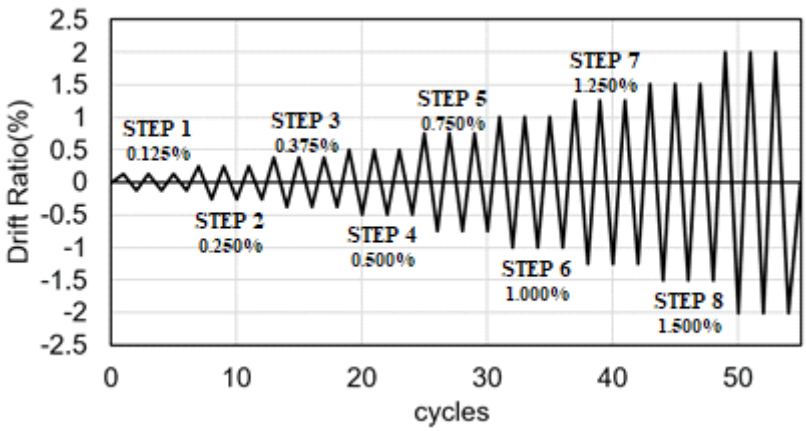
③ RM-TCP-TRM (TCP 및 C-TRM 보강) : 조적벽체의 한 면에 TCP 보강을 적용, 다른 한 면에 탄소섬유시트와 모르타르를 이용하여 C-TRM(carbon textile reinforced mortar) 공법 적용하여 보강

[표 2.7] TCP 보강 유무 및 방법에 따른 실험체 형상

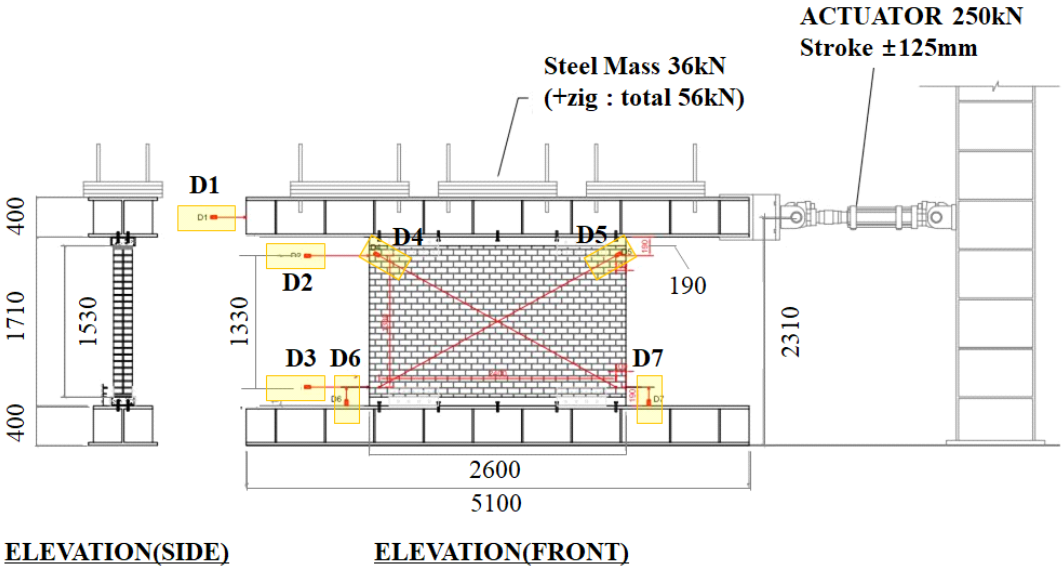
실험체	규격 (mm)	실험체 형상	변수
URM	(조적벽체) 길이 2,600 높이 1,530 두께 190		비보강 조적벽체
RM-TCP	(TCP) 길이 800 높이 700 두께 20		TCP 1면 보강 석재본드 고정 탄소섬유 연장
RM-TCP-TRM	(TCP) 길이 800 높이 1,500 두께 20		TCP 1면 보강 C-TRM 1면 보강 모르타르 고정 탄소섬유 연장

○ 실험 방법

- (정적반복가력실험) 실험체의 횡방향 저항 거동 특성을 평가하기 위하여 250 kN 용량의 유압 엑추에이터를 이용하여 부재의 상부에 목표 수평 변위를 반복 가력. 가력 패턴은 기존 조적벽체 정적실험 연구를 참조하여 층고를 기준으로 변형각 0.125% ~ 3% 까지 단계별로 목표 가력변위를 증가시키며 단계별 3 사이클 반복 가력



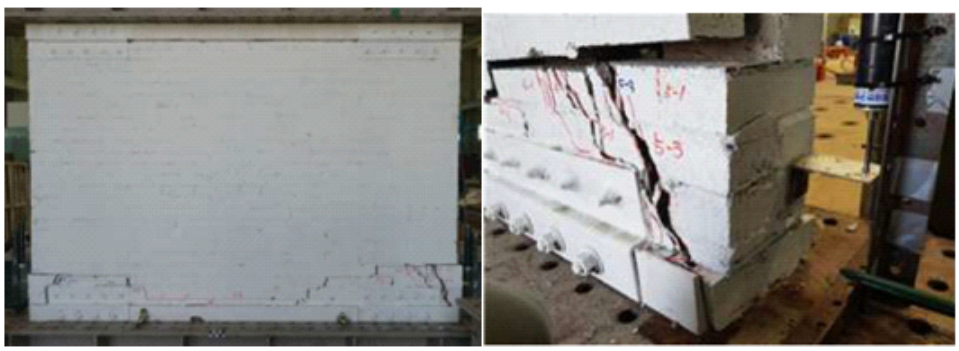
[그림2.22] 가력 프로토콜



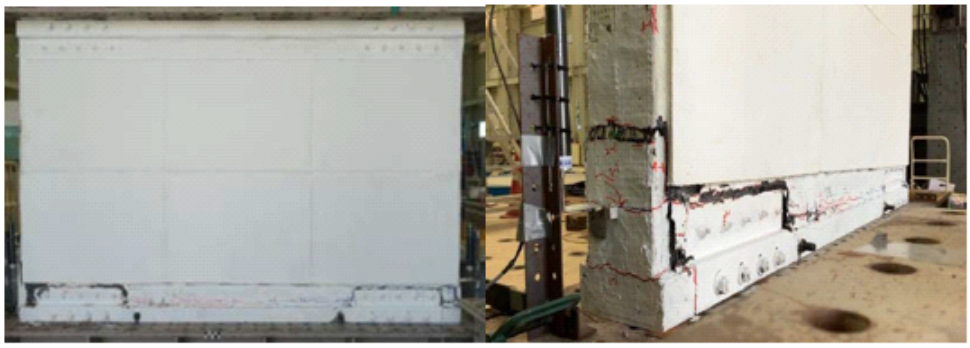
[그림2.23] 계측 센서

○ 실험결과

- (비보강 조적벽체, URM) 초기 강체회전방지 철물의 가장자리를 따라 슬라이딩 균열이 발생하고, 이후 강체회전 및 슬라이딩 거동을 보였으며 층간변위비가 증가함에 따라 조적벽체 단부의 하부에 압축파괴가 발생. 초기강성은 16.6 kN/mm이었으며, 변형각 0.56%에서 최대 하중 52.67kN에 도달. 변형각 1.25% 이후 압축파괴된 하부 조적벽체가 분리됨에 따라 실험 종료
- (TCP 보강, RM-TCP) 비보강 조적벽체와 유사하게 강체회전방지 철물과 TCP 보강체의 가장자리를 따라 수평 줄눈균열이 발생한 후 강체회전 거동 발생. 다만, 강체회전 거동에 의해 균열 폭이 증가함에 따라 TCP 내부 및 연장된 탄소섬유가 인장 거동하였으며 조적 개체를 구속하는 역할을 수행하여 조적 개체의 탈락파괴 발생방지. 초기강성은 27.5 kN/mm로 평가되었으며, 변형각 0.25%에서 78.79 kN의 최대 하중 확인, 최대 2.0% 변형각 도달 시 실험체의 전도 우려로 실험 종료
- (TCP & C-TRM 보강, RM-TCP-TRM) 조적벽체 하부에서 줄눈 균열이 발생하면서 강체회전 거동하였으나 강체회전방지 철물의 하부면에 부착 시공된 TCP와 볼트 접합 위치에서 TCP 파괴가 발생하였으며, 층간변형각 증가에 따라 줄눈 균열폭이 증가하면서 탄소섬유의 인장 거동이 두드러짐. 초기강성은 33.57 kN/mm로 평가되었으며, 변형각 0.75% 도달 시 127.14 kN의 최대하중 확인. 변형각 1.0% 이후 하중이 저하되면서 변형각 2.0% 도달 시 실험 종료



(a) URM

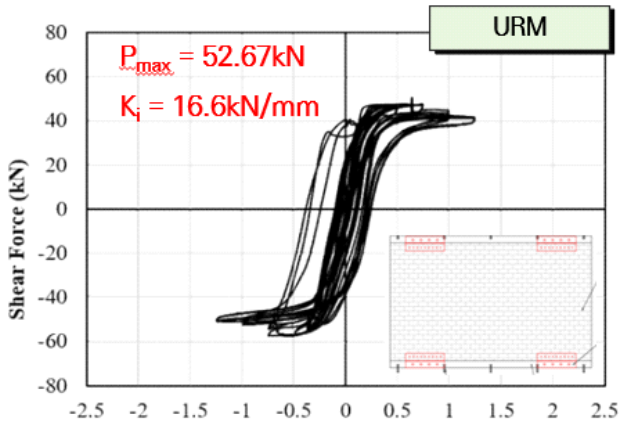


(b) RM-TCP

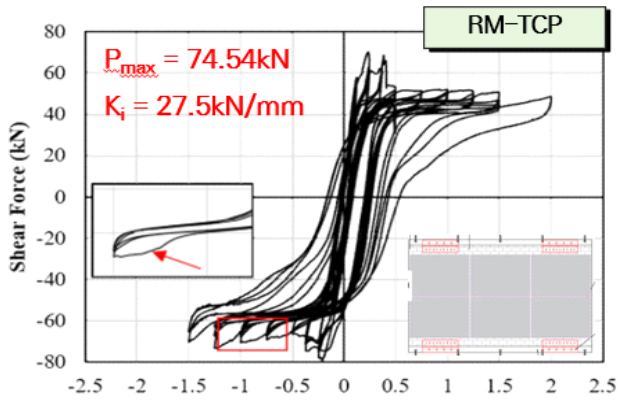


(c) RM-TCP-TRM

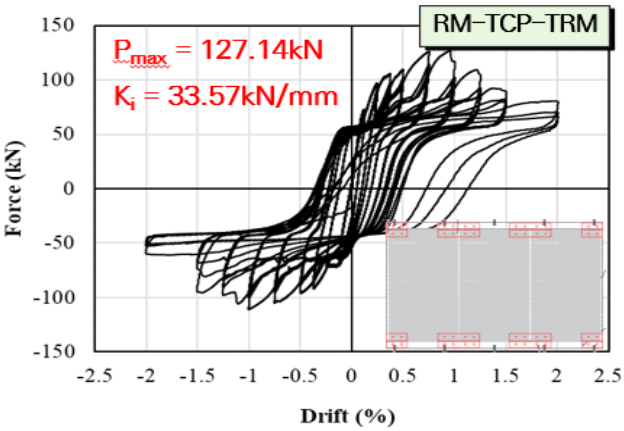
[그림2.24] TCP 보강 유무 및 방법에 따른 실험 파괴 형상



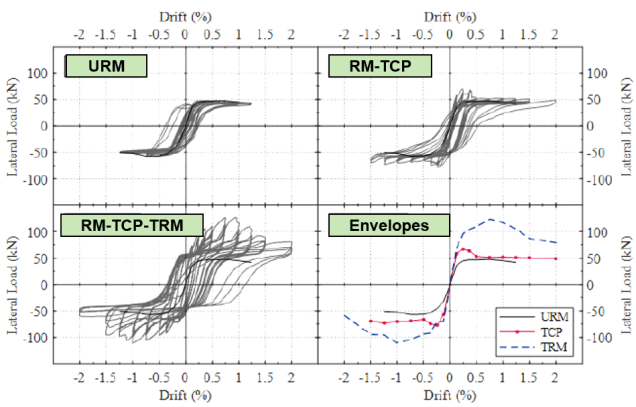
(a) URM



(b) RM-TCP



(c) RM-TCP-TRM



(d) 골격곡선 비교

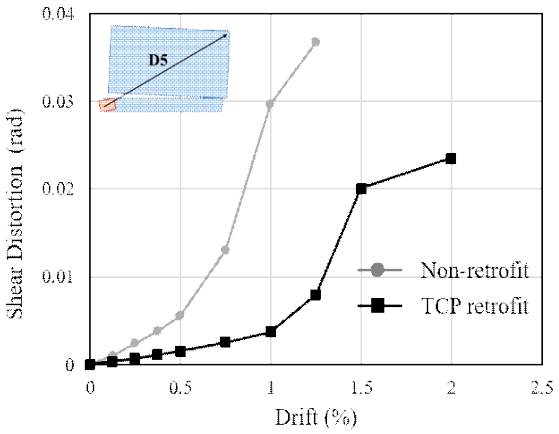
[그림2.25] TCP 보강 유무 및 방법에 따른 실험 하중-변위 관계 곡선

○ 내진보강 효과 및 분석

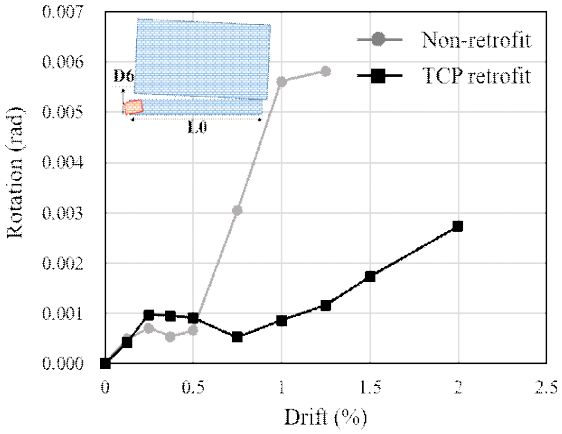
- (내력 및 연성능력) TCP 보강 유무에 따른 정적실험결과, TCP를 조적벽체에 1면 부착 보강한 경우 비보강조적벽체 대비 초기강성은 1.66배, 최대 하중은 1.42배, 최대 변형각은 1.6배 증가함에 따라 TCP 보강에 의해 내력 및 연성능력 증진 효과가 있는 것으로 평가. 또한, 조적벽체의 1면에 TCP를 보강하고, 다른 면에 탄소섬유를 이용한 C-TRM 보강 시, 초기강성 2.0배, 최대 하중 2.41배, 최대 변형각이 1.6배 증가함에 따라 내진 성능이 부족한 경우 C-TRM을 적용하여 내진보강이 가능할 것으로 판단
- (균열 및 손상 제어 능력) 비보강 조적벽체와 TCP 보강벽체의 전단변형각, 들뜸변위를 비교한 결과, 동일 변형각 1.2%에서 TCP 보강벽체의 변형각이 약 25% 이하 수준으로 발생함에 따라 TCP의 탄소섬유시트에 의해 균열 및 변형 제어능력이 우수하며 이로 인해 조적벽체의 취성적 파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단

[표 2.8] 실험 결과

실험체	초기 강성 (kN/mm)	최대 하중 (kN)	최대 변형각 (rad)
URM	16.6	52.67	1.25
RM-TCP	27.5 (66% 증가)	74.54 (42% 증가)	2.0 (60% 증가)
RM-TCP-TRM	33.6 (102% 증가)	127.14 (41% 증가)	2.0 (60% 증가)



[그림2.26] 조적벽체 전단변형각



[그림2.27] 조적벽체 들뜸변형각

❑ TCP 보강 유무에 따른 조적채움벽 RC 골조의 내진성능 평가

○ 실험 개요

- (실험목표) TCP 보강 유무에 따른 조적채움벽 RC 골조의 정적반복가력 실험을 통해 TCP 내진보강성능 평가
- (실험대상) TCP 보강 유무에 따른 조적채움벽 RC 골조 2종
  - ① URIF (비보강 조적채움벽): 국내 학교건축물의 표준 도면과 이탈리아 비내진 조적채움골조 건물의 배근 상세를 참고하여 기둥, 보, 조적벽체의 형상 및 배근 상세를 결정
  - ※ 실험 여건을 고려하여 실제 건물의 약 60% 축소 모형 설계
  - ② RIF-TCP (TCP, B-sheet + B-anchor 보강) : 기준 실험체인 URIF의 내진보강을 위해 골조에 C-TRM, 조적벽체 한 면에 TCP 보강, 다른 한 면에 바잘트 섬유시트를 이용한 B-TRM 보강을 적용

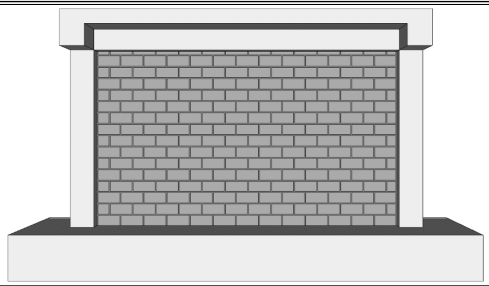
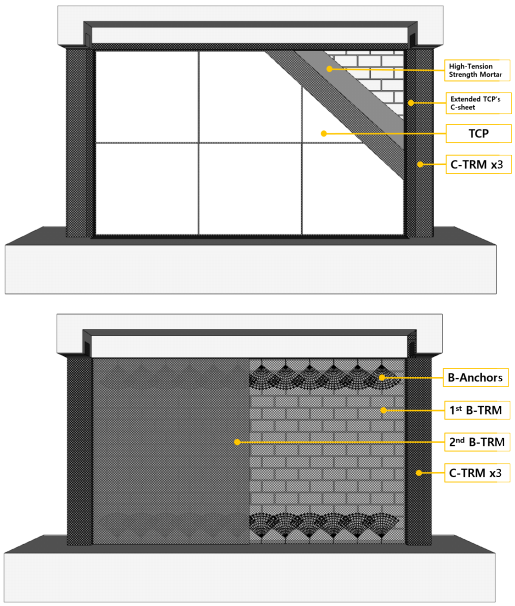
○ 보강 상세

- 비보강 조적채움벽 RC 골조 기준 실험체의 실험 결과를 고려하여 결정
- C-TRM : RC 골조의 접합부 및 기둥 상하단부 보강 목적으로 기둥 및 기둥-보 접합부에 탄소 섬유시트를 모르타르로 부착 시공

- B-TRM : 조적벽체의 한 면에 바잘트 섬유시트(basalt textile)와 모르타르를 이용하여 B-TRM 시공, 골조와 조적벽체의 일체 거동을 유도하기 위하여 바잘트 앵커(basalt anchor)를 제작하여 조적채움벽과 RC 골조에 시공(1st B-TRM → B-Anchor → 2nd B-TRM)

- TCP : 가로 840mm, 세로 620mm, 두께 20mm의 TCP 6개를 모르타르를 이용하여 부착 시공, 조적채움벽과 골조의 일체성을 확보하기 위하여 TCP 제작 시 내부에 매립되는 탄소시트를 패널 규격보다 크게 하여 TCP 부착 시 기둥과, 보, 기초까지 연장하여 시공

[표 2.9] 실험체 형상

실험체	규격 (mm)	실험체 형상	변수
URIF	길이 3,000 높이 1,830		비보강 조적채움벽 골조
RIF-TCP	길이 3,000 높이 1,830		TCP 보강 채움벽 골조

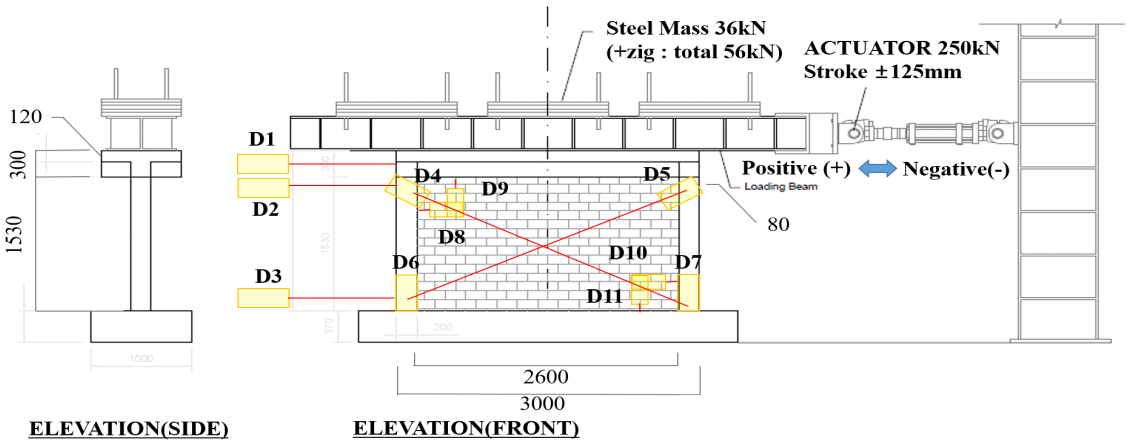
[표 2.10] 실험체 상세

실험체	규격 (mm)	실험체 형상	변수
기둥	200 x 200	주근 : 4-D13 후프 : D6@120, 90°갈고리	fck = 18MPa fs = 400MPa (SD400)
보	200 x 300	주근 : 4-D13 스트럽 : D6@120, 90°갈고리	fck = 18MPa fs = 400MPa (SD400)
조적채움벽	2600 x 1530 (H/L=0.59)	2종 시멘트 벽돌(190 × 90 × 57) .0.5B 쌓기, 축소비 고려하여 세워 쌓기 (두께 57mm)	

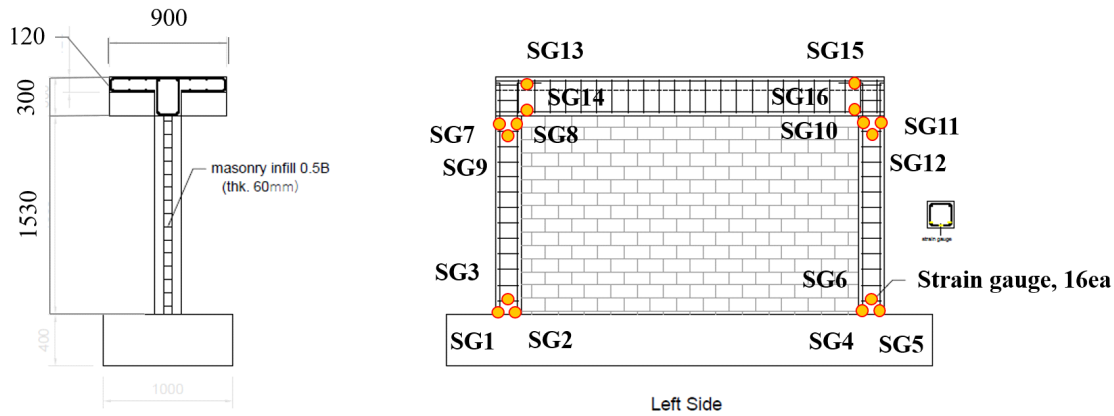
○ 실험 방법

- (정적반복가력실험) 실험체의 횡방향 저항 거동 특성을 평가하기 위하여 250 kN 용량의 유압 엑추에이터를 이용하여 부재의 상부에 목표 수평 변위를 반복 가력. 반복가력 패턴은 기존 조적벽체 정적실험 연구를 참조하여 층고를 기준으로 변형각 0.125% ~ 4% 까지 단계별로 목표 가력변위를 증가시키며 단계별 3 사이클을 반복 가력. 축력을 고려하기 위하여 상부에 54 kN의 질량체 설치

- (계측센서) 엑추에이터에 피드백용 로드셀 및 변위계를 이용하여 전체 가력 하중 및 변위를 계측하고, 이와 별도로 조적벽체의 수평 및 대각 방향 변형과 들뜸 변위, 지그와 실험체의 슬립 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 그림 1.16과 같이 설치. 또한, 골조 내 철근의 변형률을 측정하기 위하여 주요 부위에 스트레인게이지(strain gauge) 설치



[그림2.28] LVDT 설치위치 및 방향

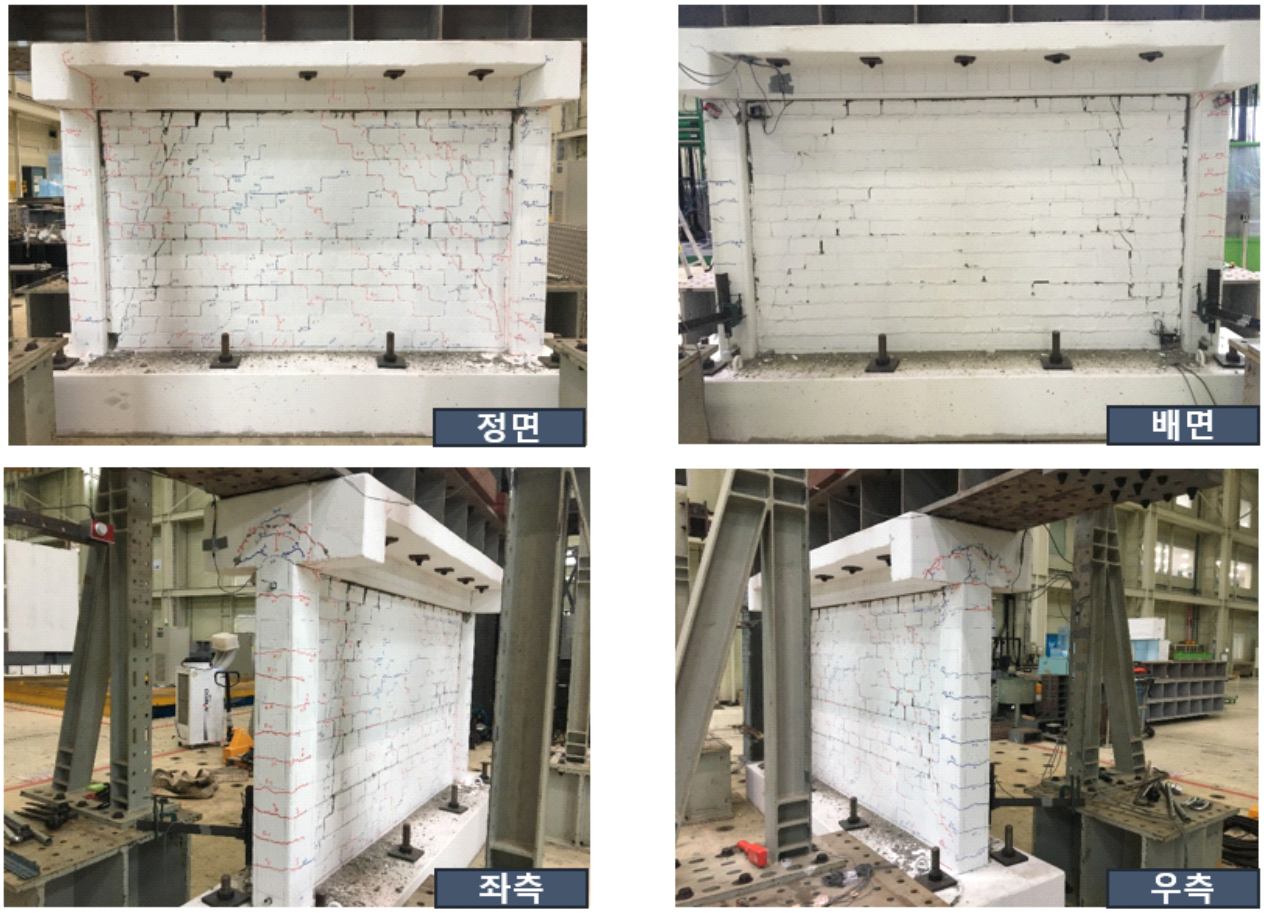


[그림2.29] 스트레인게이지 설치 위치

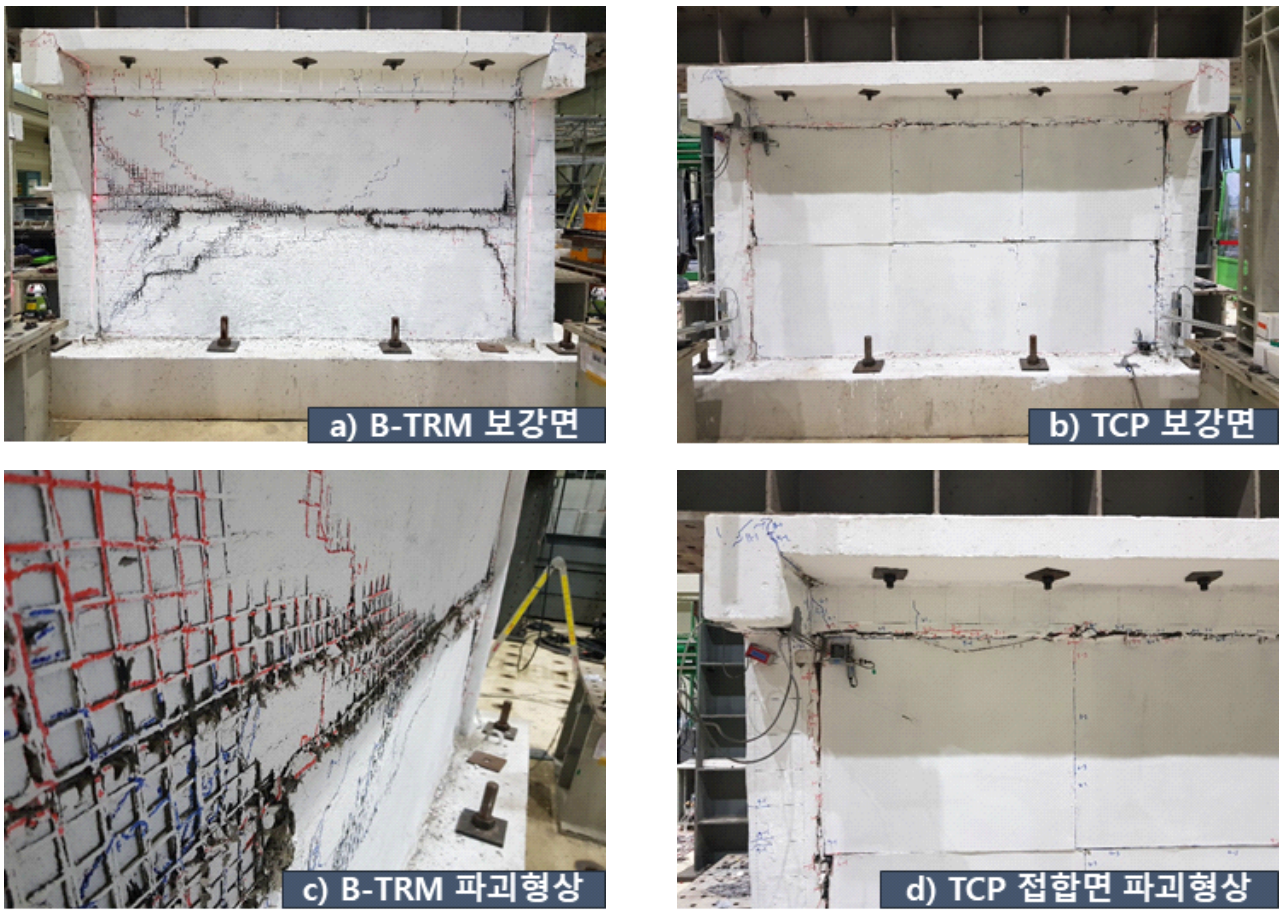
○ 실험 결과

- (비보강 조적채움골조, URIF) 실험 초기인 0.125%(step 1) 변형각 도달 시 골조와 채움벽 사이의 접합부 균열 발생하였으며 최종 2.0%(step 9) 변형각 가력시 까지 약 20㎜까지 균열 폭 확대. 조적채움벽은 상·하부 모서리에서 대각균열이 발생한 이후 대각균열과 중앙부 슬라이딩 균열로 연장되었으며 채움벽 전체에 균열이 확장. RC 골조의 경우 0.25%(step 2) 변형각에서 기둥과 보에서의 휨균열과 기둥-보 접합부 균열이 발생한 이후, 0.5%(step 4) 변형각에서 접합부 펀칭균열이 발생하였으며 최종 가력시 까지 펀칭파괴가 심화. 최종 2.0%(step 9) 변형각에서 최대하중의 40% 수준으로 하중이 감소함과 동시에 펀칭파괴 및 채움벽의 파괴로 인한 면외전도의 우려로 인해 종료

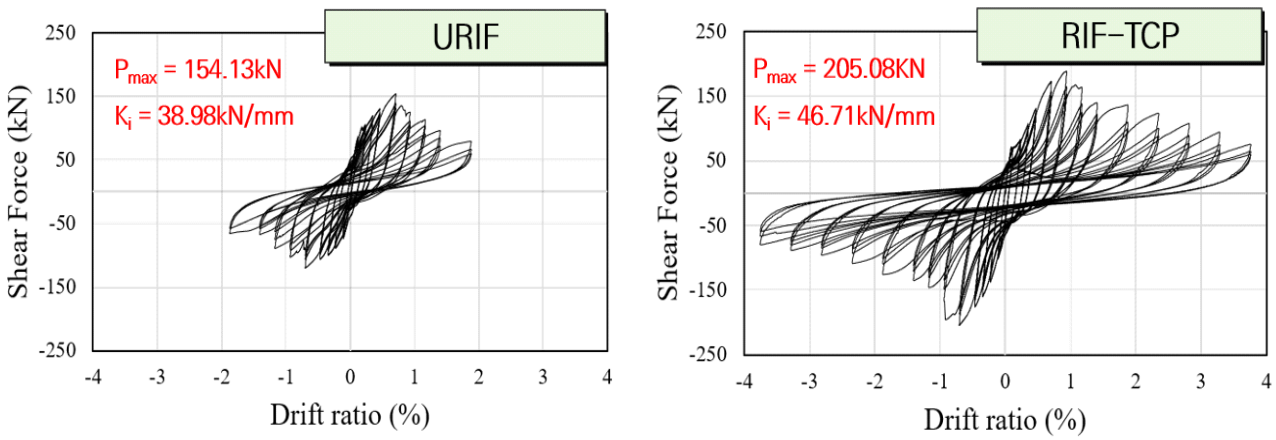
- (TCP 보강 조적채움골조, RIF-TCP) URIF 실험체와 유사하게 초기 0.25%(step 2) 변형각까지 골조와 채움벽 사이의 접합부 균열이 발생하고 보-기둥 접합부 균열로 확장됨. 0.5%(step 4) 변형각에서 기둥의 휨균열이 발생. 0.75%(step 5) 변형각에서 조적채움벽에 대각균열이 발생한 이후 대각균열과 슬라이딩 균열 동반. URIF 실험체가 종료된 2.0%(step 9) 변형각에서 채움벽체 균열부의 Basalt sheet와 상부의 Basalt Anchor가 파단되기 시작하였으며, 상부 모서리 압괴파괴가 발생. 2.5%(step 10) 변형각에서 보-기둥 접합부 파괴가 가속화되고 펀칭 파괴 현상이 나타났으며 이후 펀칭균열, 기둥의 휨균열, 벽체의 균열 등이 추가적인 균열없이 균열폭의 확장이 이루어지다 4.0%(step 13) 변형각에서 확장된 균열로 인하여 채움벽의 면외방향 전도 우려로 실험 종료. 실험 종료 시까지 TCP의 균열은 발견되지 않았으나 2.5%(10step) 변형각 도달 이후부터 패널 간의 면내방향 어긋남으로 인하여 TCP로부터 연장한 탄소섬유의 파단 관찰



[그림2.30] 최종 파괴 형상 (2.0% 변형각) - URIF



[그림2.31] 최종 파괴 형상 (변형각 4.0%) - RIF-TCP



[그림2.32] 하중-변위 관계(URIF와 RIF-TCP)

[표 2.11] 실험 결과

실험체	초기 강성 (kN/mm)	최대 하중 (kN)	최대 변형각 (rad)
URM	38.98	154.13	2.0
RM-TCP	46.71 (20% 증가)	205.08 (33% 증가)	4.0 (100% 증가)

○ 내진보강 효과 및 분석

- (강도 및 연성 보강) TCP 및 B-TRM 보강을 적용한 결과 비보강 조적채움골조에 비해 초기강성 1.2배, 최대 하중은 약 1.33배, 최대 변형각은 약 2.0배 증대됨에 따라 내력 및 연성능력 향상 효과가 있는 것으로 평가
- (취성파괴 및 조적벽체 전도 방지) 비보강 조적채움벽 골조의 경우 조적벽체와 RC 골조의 부착파괴로 인해 조적벽체의 전도 파괴 및 붕괴가 우려되는 반면, 보강 채움벽 골조의 경우, TCP 내부 탄소 시트 및 바잘트 앵커를 이용하여 조적벽체와 RC 골조의 부착력을 증대시킴에 따라 조적벽체의 전도 및 붕괴 방지 효과가 우수한 것으로 판단

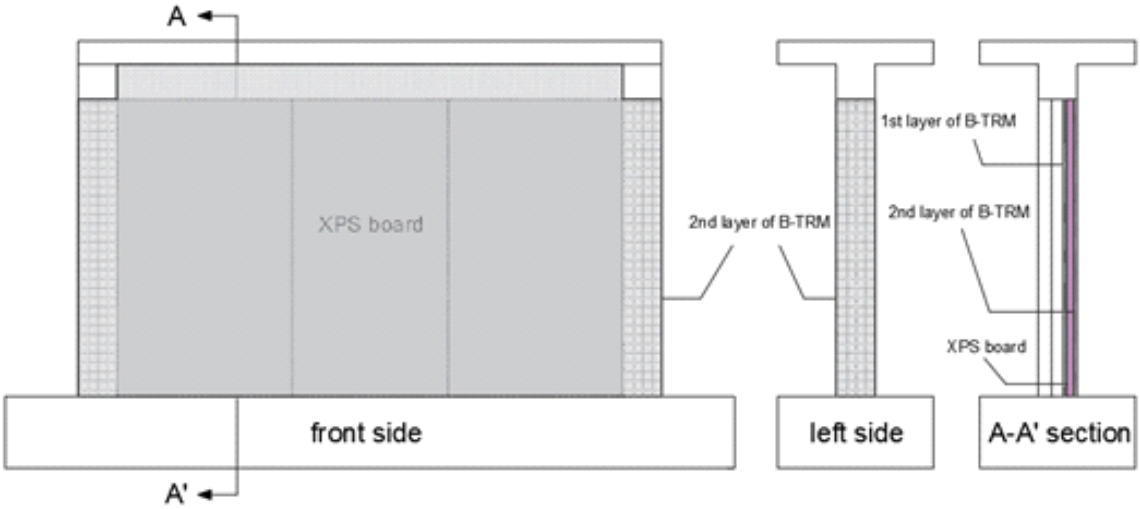
❑ 기존 내진-단열(TRM+XPS) 보강공법의 정적반복가력 실험을 통한 성능 검증 (JRC 공동)

○ 실험개요

- (목적) 공동연구기관인 JRC에서 제안한 기존의 TRM 공법과 단열재(XPS)를 단순 결합한 보강 공법에 대하여 내진성능을 검증하기 위하여 정적반복가력실험을 수행
- (실험방법) 실험체 및 실험방법은 당해연도에 수행한 조적채움벽 골조 및 TCP 보강 골조의 정적반복가력 실험과 동일한 방법으로 수행

○ TRM-XPS 보강 방법

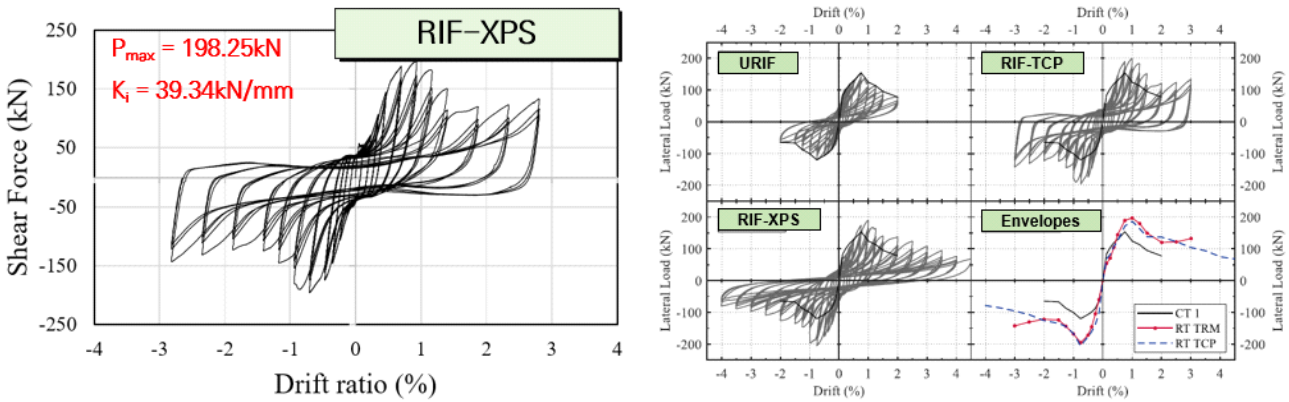
- 조적벽체 한 면에 바잘트 섬유시트를 이용하여 TRM 보강 2겹과 바잘트 앵커 보강을 실시하고, 다른 한 면에는 B-TRM 1겹 + 단열재 + B-TRM 1겹을 덧씌워 보강 실시.
- 단열재는 XPS 보드(Thk.50mm) 사용. 특히 단열재 상면에 모르타르 바름 후 바잘트 시트를 부착하며, 바잘트 시트는 기둥 3면을 감쌀 수 있도록 시공하며 보 측면까지 확장하여 접합면에서 보강 패치로 작용할 수 있도록 시공



[그림2.33] TRM+XPS 보드 보강 적용 실험체

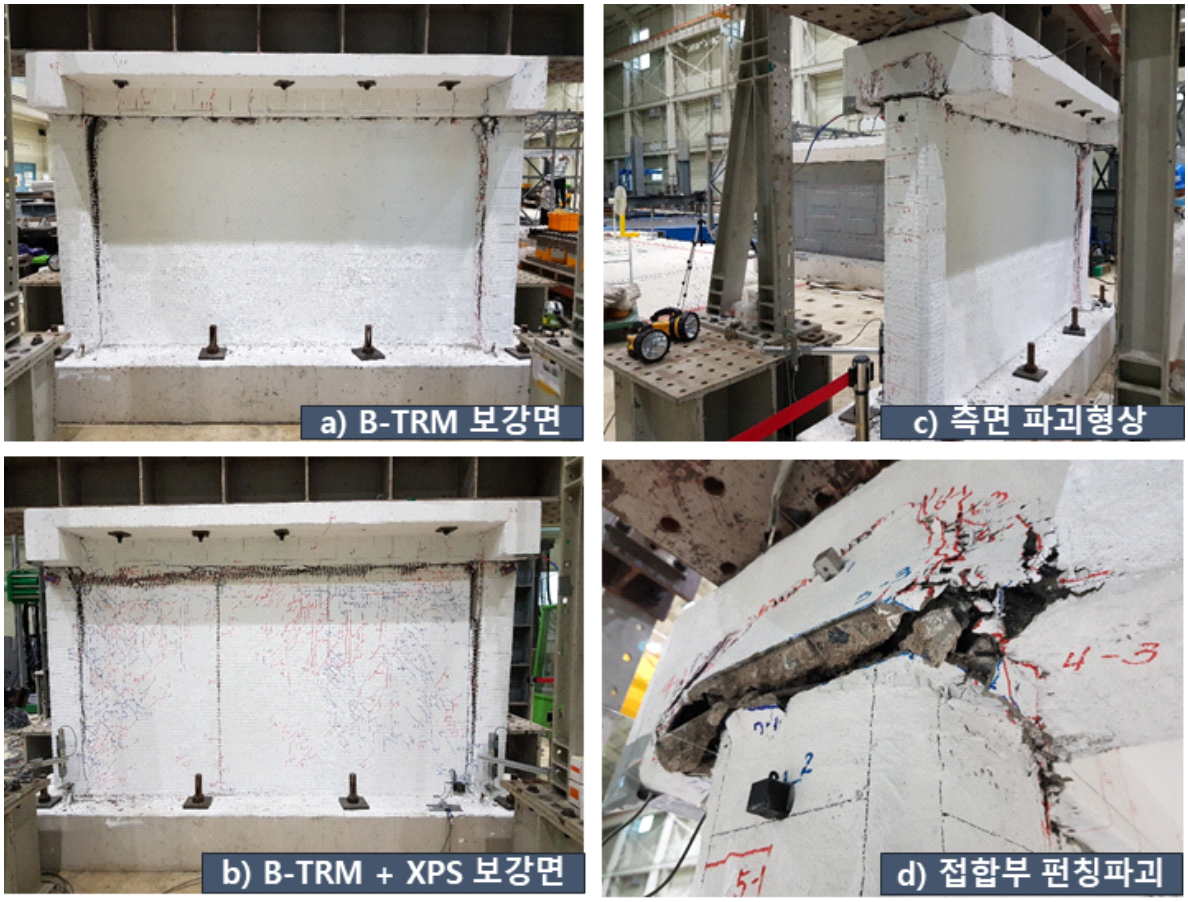
○ 실험 결과

- (TRM+XPS 보강 조적채움골조, RIF-XPS) 초기 0.375%(step 3) 변형각까지 골조와 채움벽 사이 접합부의 균열이 발생한 후 보-기둥 접합부 균열로 연장되는 양상을 보이다 0.5%(step 4) 변형각 도달 시 XPS 부착면의 최외측 Basalt TRM에서 다수의 표면균열이 발생. 0.75%(step 5) 변형각 도달 시 기둥의 휨균열이 발생하였으며 이후, 기둥-접합부 균열이 확장되며 1.0%(step 6) 변형각에서 펀칭 균열이 발생. 1.25%(step 7) 변형각 도달 시 상부의 Basalt Anchor의 파단 발생, 2.0%(step 9) 변형각 도달 이 후 골조와 벽체 사이의 Basalt TRM이 탈락하고 보-기둥 접촉부에서의 펀칭 파괴가 심화되며 기둥의 띠철근이 육안으로 관찰. 이후 펀칭파괴로 인한 실험체의 불안정으로 인해 3.0%(step 11) 변형각에서 실험을 종료.
- B-sheet + B-anchor 로 보강한 면에서 벽체의 손상은 골조와의 접합면을 제외하고는 발생하지 않은 것으로 조사,
- 최대내력은 0.92% 변형각에서 198.25 kN



(a) RIF-XPS 보강 골조 하중-변위 관계 (b) 조적채움벽 구조실험 골격곡선 비교

[그림2.34] RIF-XPS 보강 골조 실험 결과 및 조적채움벽 구조실험 결과 골격곡선 비교



[그림2.35] 최종 파괴 형상 (3.0% 변형각) - RIF-XPS

○ TCP 보강과 TRM-단열재 보강 공법의 비교

- (내력 및 연성능력) TCP는 기존 조적벽체에 비하여 강성은 약 20%, 내력은 약 33%, 연성은 약 100% 증대되었으며, TRM+단열재(XPS) 보강 공법의 경우 강성은 유지, 내력은 약 29%, 연성은 약 50% 증대되는 수준을 보임에 따라, 두 보강공법에 의해 내력은 비슷한 수준으로 증대되었으나 연성능력에 있어서 TCP 보강이 보다 우수한 것으로 판단
- (파괴모드) TCP 보강의 경우 TCP 보강의 접합면을 따라 슬라이딩 균열이 발생하였으며, 층간변형각이 증가함에 따라 골조와 조적벽체에 전단 및 슬라이딩 균열이 고르게 분포한 반면, TRM-XPS 보강공법의 경우 조적벽체와 골조와의 부착균열이 발생한 이후 접합면에 균열이 집중되고 골조의 기둥-보 접합부에 응력이 집중되며 펀칭파괴가 발생. 이는 TCP와 XPS의 부착 형태에서 기인한 결과로 판단
  * TCP의 경우 조적채움벽의 높이에 걸쳐 2열로 패널이 배치됨에 따라 다소 강성이 약한 TCP 접합면에서 균열이 발생, 조적벽체 전반에 걸쳐 응력이 분산되며 슬라이딩 파괴가 발생한 것으로 파악
  * XPS 단열재의 경우 조적벽체의 높이 방향으로 1열만 배치되어 상대적으로 벽체의 가장자리가 취약부위가 되어 균열이 집중되었고, 상대적으로 조적벽체의 강성이 강해져 RC 골조의 접합부에 추가 전단력이 집중되어 골조 파괴가 발생한 것으로 판단

[표 2.12] 실험 결과 비교

실험체	초기 강성 (kN/mm)	최대 하중 (kN)	최대 변형각 (rad)
URIF	38.98	154.13	2.0
RIF-TCP	46.71 (1.20)	205.08 (1.33)	4.0 (2.0)
RIF-XPS	39.34 (1.00)	198.25 (1.29)	3.0 (1.5)

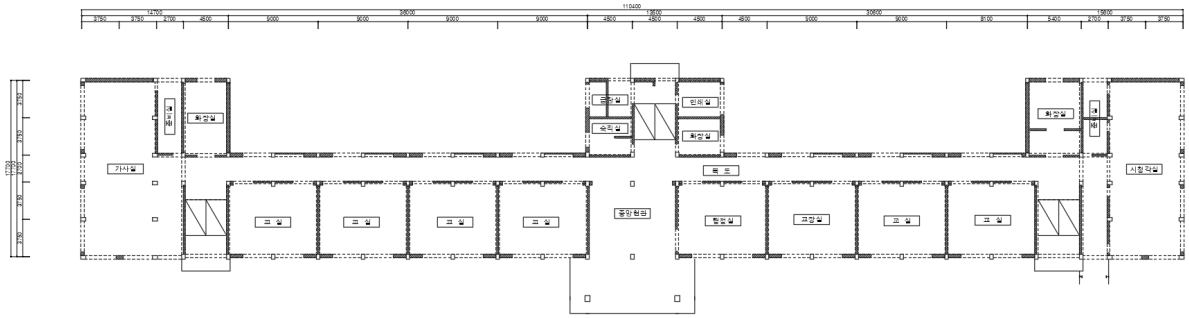
(4) 지진모의실험을 이용한 TCP 패널 보강 조적조 건물의 내진성능 실증 실험

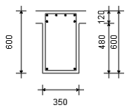
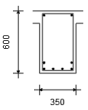
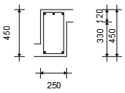
❑ 비보강 조적채움벽 RC골조 건물 실험체 설계

○ 실험체 설계 전략

- (실험 목적) : 기존 조적채움벽 RC골조 건물의 내진성능을 평가하고, TCP 보강 및 TRM+단열 보강 공법에 의한 보강성능 비교 평가
- (실험 대상) 국내 RC 골조 내 조적채움벽은 학교건축물에서 표준적으로 사용되며, 그 외 상업건물이나 주거 건물에서도 사용. 본 연구에서는 표준도면을 적용하는 학교건축물을 대상으로 40% 축소모델에 대한 진동대 실험을 수행하여 기존 건물의 내진성능 보강효과에 대한 확인 수행

  * 학교건축물에 적용된 비내진 상세 사항은 공동연구 기관의 경험 및 해석지원을 통해 결정



부 호	NG1		NG3		부 호	C1	C2
형 태 및 배 근					형 태 및 배 근		
구 분	양단부	중앙부	양단부	중앙부	위 치	3층~옥상층	3층~옥상층
크 기	350x600	350x600	250x450	250x450	크 기	350X500	350X400
상 부 근	D22 - 6EA	D22 - 2EA	D19 - 3EA	D19 - 2EA	주 근	8 - D19 2 - D16	10 - D19
하 부 근	D22 - 2EA	D22 - 6EA	D19 - 2EA	D19 - 3EA	HOOP	D10 - @900	D10 - @900
늑 근	2 - D10 @200	2 - D10 @300	2 - D10 @200	2 - D10 @300	상.하 HOOP	D10 - @300	D10 - @300

[그림2.36] 학교건축물 표준도면

- 설계 고려사항

① 조적채움벽 RC 골조의 파괴모드 : 채움벽의 전단파괴 및 RC 기둥 상하 단부의 전단파괴의 예측, RC 골조와 채움벽의 강성 및 강도 분석, 채움벽 인접골조와 관계 사전 검토 필요

② 보강공법 적용 시 RC 골조의 보강 고려 : 조적채움벽의 강도 증진 시 상대적으로 RC 골조가 취약부가 되어 골조 파괴 가능성 있으므로 RC골조의 전단파괴 방지를 위한 기둥 상하단부 보강 고려

○ 실험체 규격 및 사양

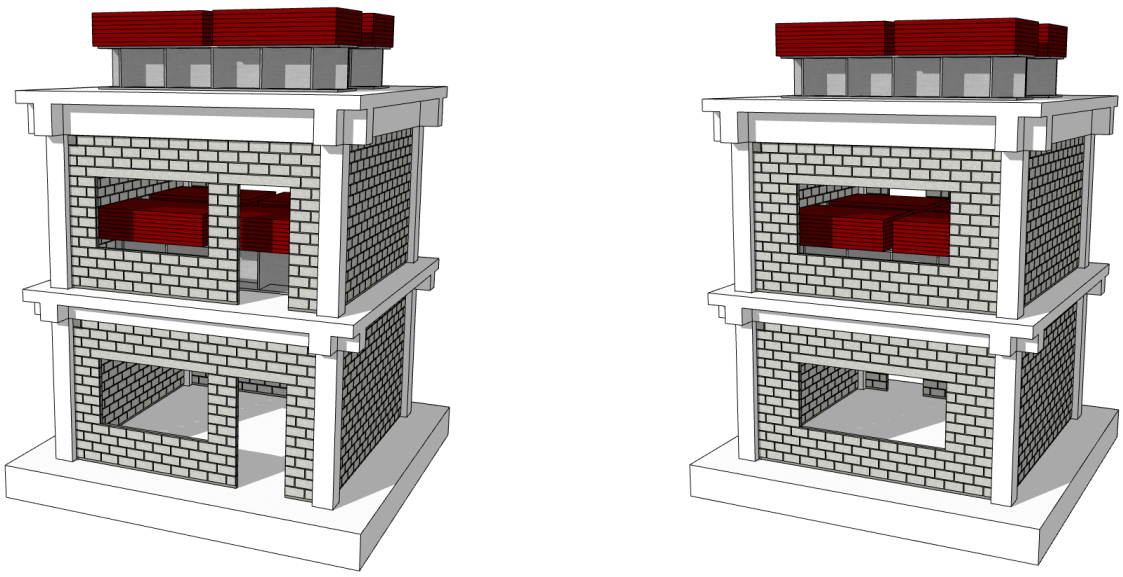
[표 2.13] 실험체 설계 내역

항목	원형(학교건축물)	축소모형	축소비	
			상사비	적용
크기	7.0 × 9.0 × 3.6	2.8 × 3.6 × 1.8	0.4	0.6 (높이 0.5)
층수	3	2		
기둥 사이즈	0.35 × 0.4 (3), 0.35 × 0.5 (3)	0.2 × 0.2 (4)	0.4	0.5 ~ 0.57
단면적	0.93m2	0.16m2	0.16 (0.42)	0.17
철근	Long. 8-D19 Hoop D10@300	Long. 4-D13 Hoop D6@120		
철근비	0.015 ~ 0.02	0.013		
휨에 의한 전단력(장변)	240 kN	37 kN	0.16 (0.42)	0.15
휨에 의한 전단력(단변)	161 kN	37 kN	0.16 (0.42)	0.23
기둥 축력비	0.13	0.17		
보 사이즈	0.3 × 0.6, 0.3 × 0.45	0.2 × 0.3	0.16 (0.42)	0.33
조적채움벽 두께	0.19 (1.0B)	0.06 (0.5B, 벽돌 세워 쌓기)	0.4	0.32

❑ 비보강 조적채움벽 RC 골조 건물의 진동대 실험

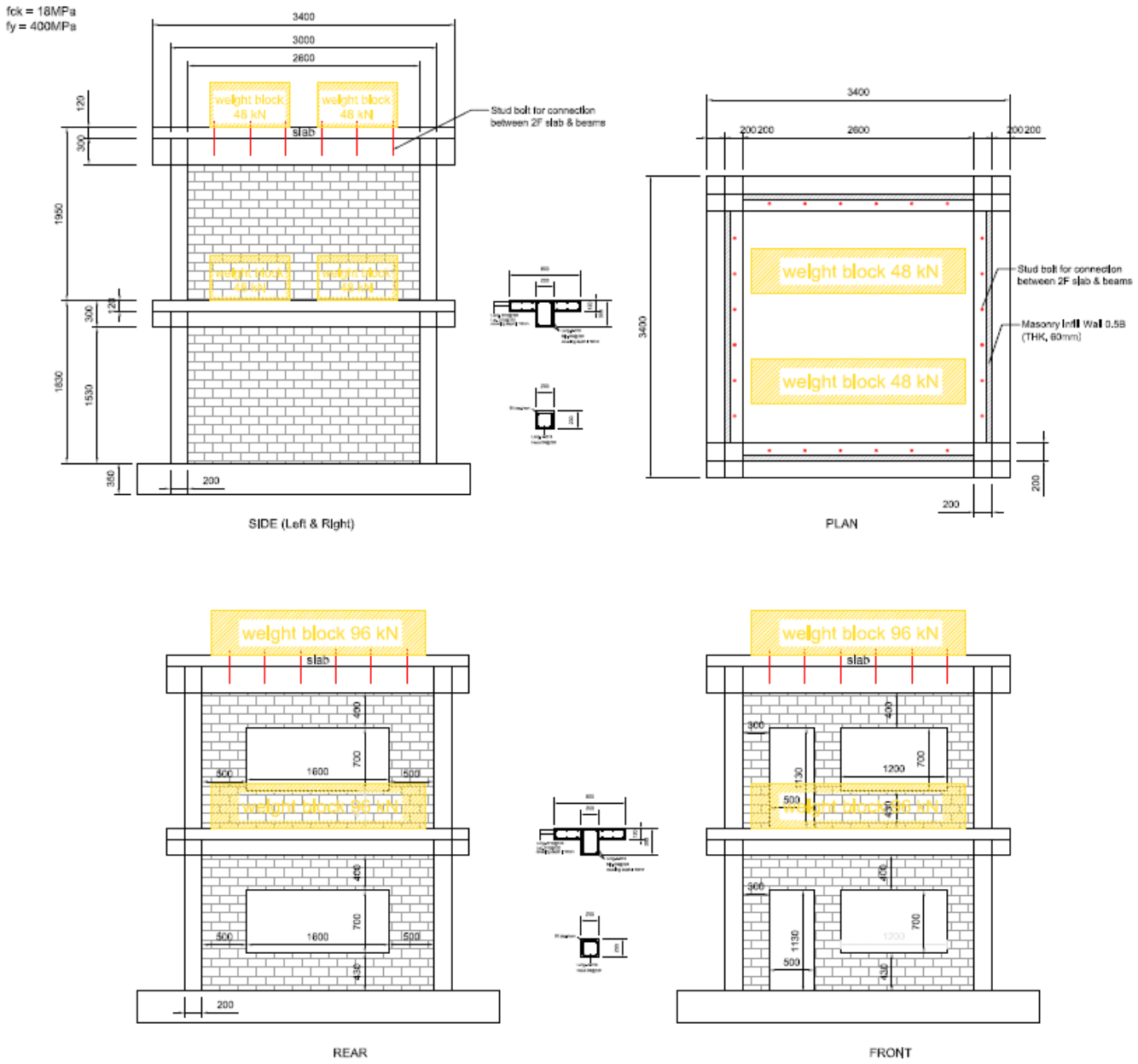
○ 실험 개요

- (실험목표) 국내 및 이탈리아의 비내진 상세를 가지는 전형적인 기존 조적채움벽 RC 골조 건축물의 지진시 동적 거동 및 파괴 거동을 파악하고, TCP 및 TRM+단열재 보강 공법의 최적 적용 방안을 마련하기 위한 기초자료로 활용하기 위하여 실제 지진파를 이용한 진동대 실험을 수행함.
- (실험대상) 실물 건물을 모형화한 2층 실험체. 기둥, 보, 조적벽체의 상세는 조적채움벽 RC골조 정적실험체와 동일하며, 기둥의 축하중 및 상부 하중을 고려하여 1층과 2층 상부에 각각 총 96 kN의 중량체 적용. 실제 건물 형상을 고려하여 정면과 배면에 개구부 고려

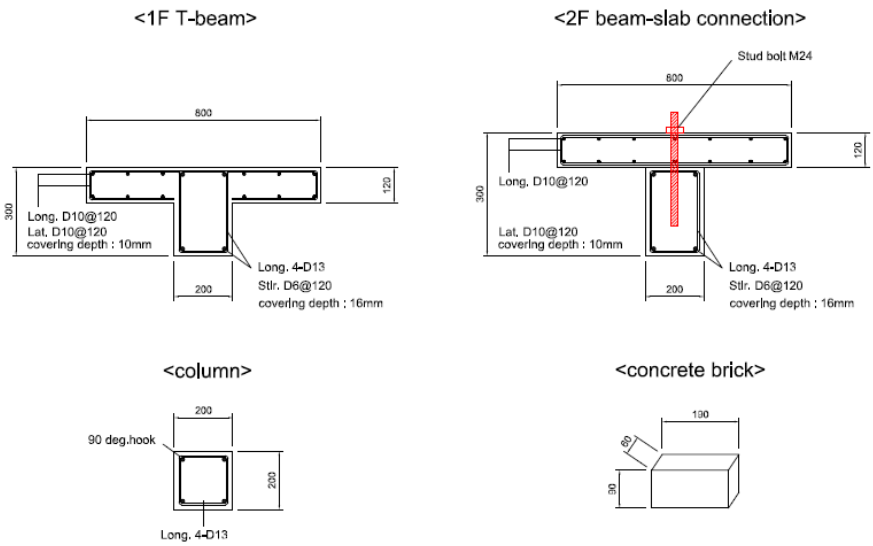


(a) 정면 및 우측면 (b) 배면 및 좌측면

[그림2.37] 실험체 형상



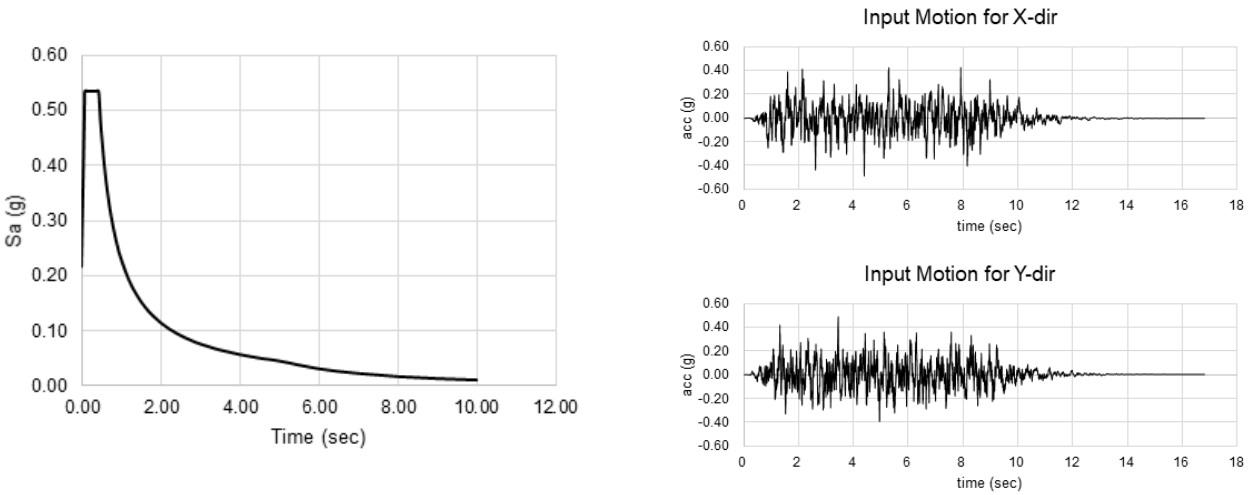
[그림2.38] 2층 조적채움벽 RC골조 건물 실험체 형상



[그림2.39] 2층 조적채움벽 RC골조 건물의 배근 상세

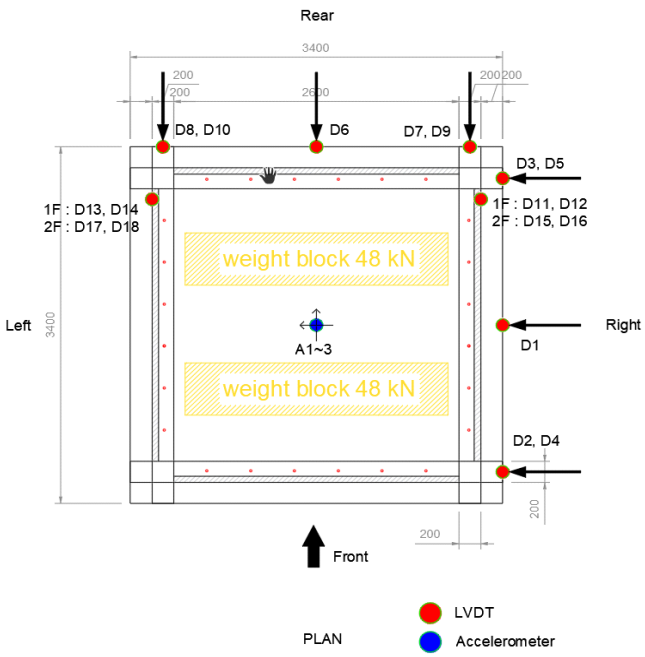
○ 실험 방법

- (공진 주파수 탐색 실험) 실험체의 동특성인 고유주기를 평가하기 위하여 임의진동(random) 파형을 이용하여 전후(Y), 좌우(X) 방향으로 실험 실시. 임의진동의 가속도 크기는 RMS(Root Mean Square) 평균 0.05g로하고 입력 주파수의 범위는 진동대의 사양을 고려하여 0.5Hz ~ 50.0Hz, 지속시간은 30초
- (지진모사실험) 국내 설계지진하중 크기에 부합하는 인공지진파를 이용하여 지진모사 실험 수행하였으며 기준 지진파의 가속도를 기준으로 30%, 60%, 100%, 150% 배율로 점증 가진하며 실험 수행
  ① 시험스펙트럼 : KDS 41 17 00 건축물 내진설계기준 (건축구조기준 2019)에서 제시하고 있는 설계가속도 스펙트럼(지진구역 1, S3 지반, 단주기설계스펙트럼가속도 SDS = 0.54g)
  ② 입력지진파 : 설계스펙트럼에 부합하는 인공지진파(규모 7 기준)를 작성하고 실험체가 축소모형임을 고려하여 상사법칙에 따라 가속도 크기(PGA = 0.48g) 및 시간간격을 배율 조정하여 적용
- (계측센서) 실험체의 층별 횡변위, 벽체와 골조의 유격 거리를 측정하기 위하여 실험체의 주요 부위에 변위계(LVDT) 설치



(a) 설계스펙트럼 (b) 입력 지진파형

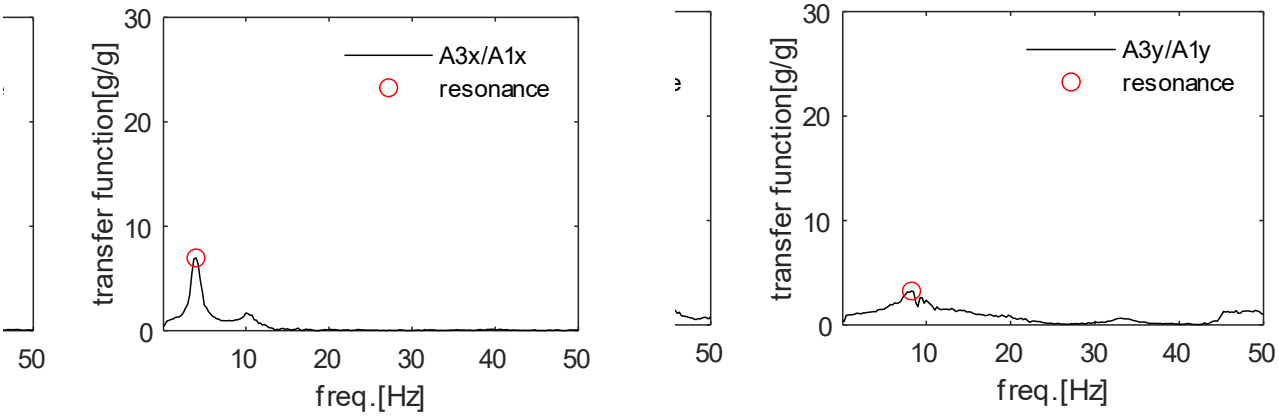
[그림2.40] 설계스펙트럼 및 입력 지진파형



[그림2.41] 계측 센서 설치계획(평면계획)

○ 실험 결과

- (고유 진동수) 2층 실험체의 최상단부 슬래브에 설치한 가속도계를 이용하여 측정한 응답가속도를 입력가속도에 대한 전달함수를 산정하는 방식으로 고유 진동수를 분석. 지진모사실험 전에 수행한 공진 주파수 탐색 시험 결과, X 방향 4.0Hz (0.25 sec), Y 방향 8.25Hz (0.12 sec)로 분석. X 방향의 경우 조적채움벽에 개구부로 인해 고유 진동수가 Y 방향에 비해 약 2배 감소



(a) X 방향 (b) Y 방향

[그림2.42] 공진 주파수 시험 결과

- (파괴모드) 가진 단계가 증가함에 따라 조적채움벽의 균열이 증가하였으며, 벽체의 면외방향 거동 육안 확인

① 설계지진(DBE, Design Based Earthquake)에 해당하는 100% 배율 가진 시 전면 개구부 사이의 피어벽체(pier wall)의 상하부 줄눈 균열이 심화되어 벽체가 분리되는 파괴가 발생. 또한 Y 방향으로 배치된 전체 조적채움벽가 골조 보와의 접합면에서 부착파괴 되어 면외방향으로 기울어짐 발생 [DS3 붕괴방지 수준]

② 최대고려지진(MCE, Maximum Considered Earthquake)에 해당하는 150% 배율 가진 시 2층 조적채움벽 3면이 붕괴되는 파괴 발생함. 이때 2층 기둥의 경우 하단부에서 주근을 따라 균열이 심화되었으며 상단부에서 전단파괴 균열이 발생 [DS4 붕괴]



[그림2.43] 파괴형상(DBE, 100% scale)



[그림2.44] 파괴형상(MCE, 150% scale)

❑ TCP 보강 조적채움벽 RC 골조 건물의 진동대 실험

○ 비보강 실험체의 진동대 실험결과 분석을 통한 내진보강 방안 수립

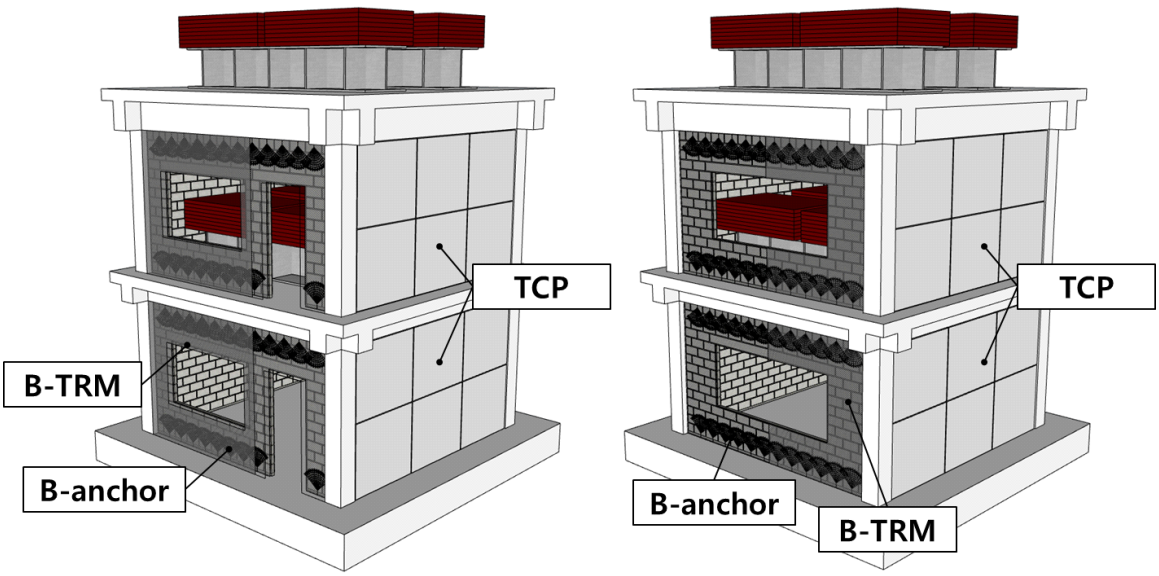
- RC 골조 내 조적채움벽은 면내방향으로 전단하중을 지지하지만 골조와의 접합부에 부착 균열이 발생한 이후에는 면외방향 하중 작용에 의해 전도 및 붕괴 위험이 증가. 따라서 지진 하중 작용 시 조적채움벽에 의한 지지력를 확보 및 유지하기 위해서는 골조와 조적채움벽의 일체 거동을 확보 요구
- 조적벽체의 슬라이딩 및 전단 균열에 의해 면외방향으로의 붕괴가 발생할 가능성이 있어 내진보강 시 벽체 전체의 연성능력을 증대시키거나 손상제어가 가능한 공법을 적용하는 것이 적절한 것으로 판단
- 조적채움벽에 개구부가 있는 경우, 개구부 주변 균열이 발생하면서 피어벽체 및 인방벽체의 지지구조가 상실되기 쉬워 개구부 벽체의 내진 보강 시 내력 보강 및 취성적 붕괴 방지 요소가 고려될 필요가 있는 것으로 판단
- 상기의 조적채움벽 골조 건물에 대한 진동대 실험 결과를 분석한 결과, 기존 건물의 내진보강 시 본 연구에서 개발한 TCP 보강 및 TRM 보강을 혼용하여 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, RC 골조와 조적벽체의 일체거동을 확보하기 위한 앵커링 등 상세 적용

○ 2층 실물형상의 조적채움벽 RC 골조 건물의 TCP 보강방안

- (조적채움벽) 개구부가 없는 벽체의 경우 개구부 벽체에 비하여 내력이 확보되어 있고, 개구부에 비해 열 손실이 작은 점을 고려하여 본 연구에서 개발한 내진 및 단열 복합 보강공법인 TCP 보강공법을 적용. 다만, TCP 보강을 한 면에만 적용하는 경우 조적 벽체의 양쪽 면에 불균질 손상이 발생할 가능성이 있으므로 외부 한 면에 대해서는 바잘트 섬유를 이용한 TRM 보강을 적용. 이때, 골조와 조적벽의 일체화를 위해 골조에 바잘트 앵커를 시공하여 보강
- (개구부 벽체) 개구부로 인한 열손실이 크고 벽체 형태의 다양함으로 인해 TCP 보강 효율이 크지 않을 것으로 판단. 따라서 개구부 벽체의 내력 및 균열 손상 제어를 위해 벽체의 양쪽 면에 바잘트 섬유를 이용한 TRM을 적용하고 상부 골조에 바잘트 앵커를 고려
- (RC 골조) 조적벽체의 TRM 및 TCP 보강으로 인해 내력이 증대됨에 따라 RC 골조에 추가적인 전단력이 작용하여 상대적으로 골조가 취약해 질 가능성 증대. 따라서 RC 골조에 탄소섬유를 활용한 TRM을 적용하여 기둥의 강도 보강 유도

○ 실험 방법 및 절차

- 비보강 실험과 동일하게 수행



(a) 정면 및 우측면 (b) 배면 및 좌측면

[그림2.45] 조적채움벽 RC 골조 보강 방안



(a) TCP 보강 시공 (b) 바잘트 앵커 보강 시공

[그림2.46] 조적채움벽 RC 골조 보강 시공

○ 실험 결과

- (고유 진동수) 2층 실험체의 최상단부 슬래브에 설치한 가속도계를 이용하여 측정한 응답가속도를 입력가속도에 대한 전달함수를 산정하는 방식으로 고유 진동수를 분석한 결과, X 방향 8.0Hz (0.125 sec), Y 방향 13.5Hz (0.074 sec)로 비내진 실험체에 비하여 X 방향은 2배, Y 방향은 1.63배 증가한 것으로 분석됨. X 방향은 개구부 벽체로 채움벽에 비해 TRM 보강으로 인한 강성 증대 효과가 큰 것으로 판단됨

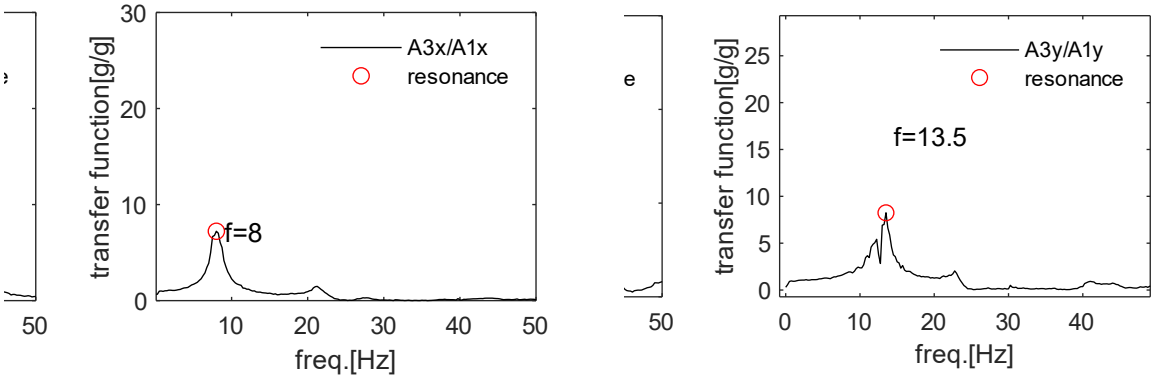
- (파괴모드) DBE 지진시 미소한 균열 발생하였으며 지진하중 증가에 따라 균열 증가하였으나 DBE 200% 가진시까지 인명보호 수준의 손상이 발생함.

① 설계지진(DBE, Design Based Earthquake)에 해당하는 100% 배율 가진 시 전면 개구부 사이의 피어벽체(pier wall)의 상하부에 수평 균열이 최초로 발생, 개구부 주변으로 초기 균열이 대각방향으로 연장됨. 또한 Y방향 조적채움벽체와 2층 정면에서 골조와 채움벽체 사이의 접합부 균열이 발생함. [DS1, 즉시거주]

② 최대고려지진(MCE, Maximum Considered Earthquake)에 해당하는 150% 배율 가진 시 기존에 발생한 균열들이 연장되고 균열폭이 다소 증가하는 등 손상이 증가함. 또한 1층 피어벽체에 전단균열이 발생하

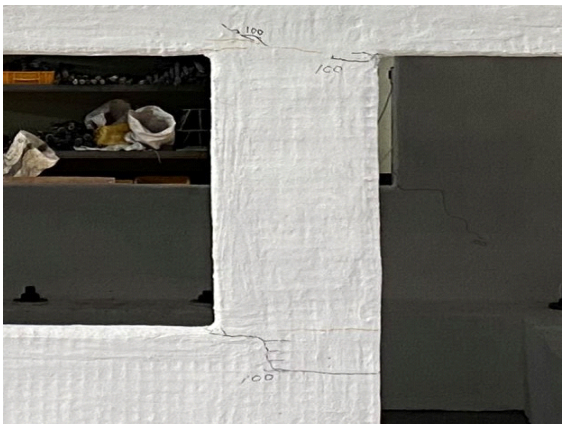
고 피어 벽체 상하부 및 개구부 주위의 균열 폭이 증가하였으나 섬유보강으로 균열이 제어되는 양상을 보임. 한편 TCP가 보강된 조적채움벽에서는 골조와의 접합면을 따라 미소 균열 발생으로 인명보호 수준의 손상 [DS2, 인명보호]

③ DBE 지진의 200% 배율 가진 시 모든 균열이 연장되고 균열폭이 증가함. 2층의 모든 면에서 골조와 조적 채움벽 사이의 접합부 균열이 발생하였으나 벽체의 탈락, 낙하 등의 붕괴손상은 발생하지 않았으며 붕괴방지 수준 손상 발생 [DS3, 붕괴방지]

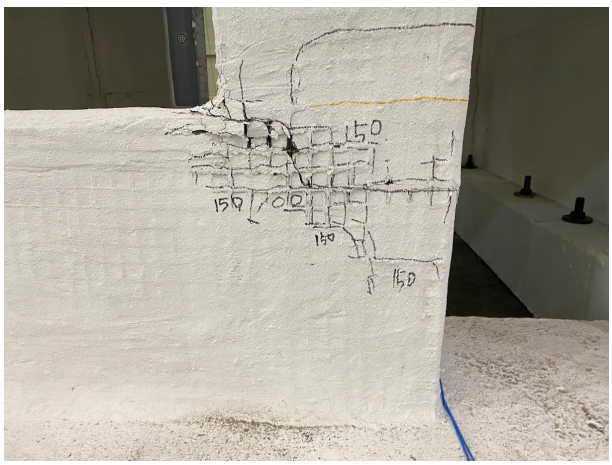


(a) X 방향 (b) Y 방향

[그림2.47] 전달함수 결과



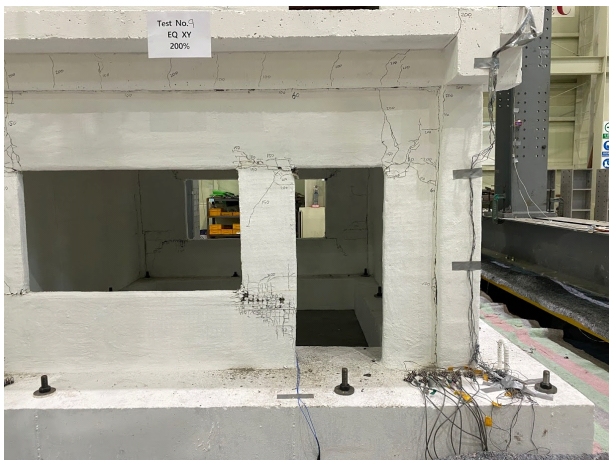
(a) EQ 100% 정면 개구부 피어 벽체



(b) EQ 150% 정면 개구부 피어 벽체 하부



(c) EQ 150% 정면 개구부 피어 벽체 상부



(d) EQ 200% 정면

[그림2.48] TCP 보강 실험체의 손상상태

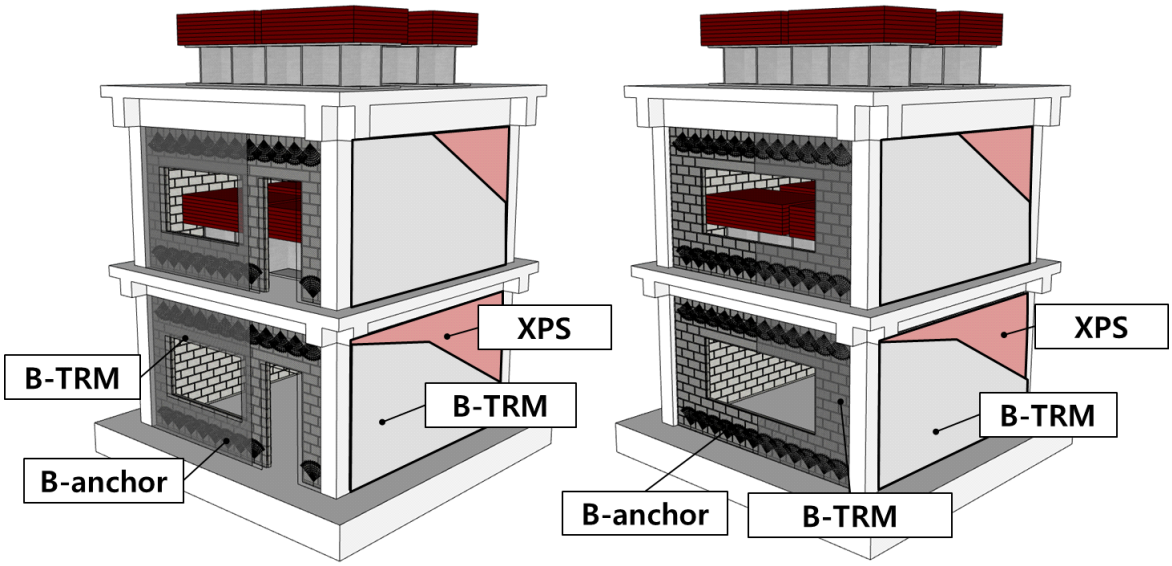
❑ TRM-XPS 단열재 보강 조적채움벽 RC 골조 건물의 진동대 실험 ; JRC 공동

○ TRM-XPS 단열 보강 상세

- 공동연구기관인 JRC 제안사항으로, 내진보강을 위해 바잘트 섬유시트를 이용한 TRM 보강공법과 단열재 XPS 보드를 동시에 시공함.
- 조적채움벽에 대하여 벽체 내부면에 바잘트 TRM - XPS 단열 보드(60T) - 바잘트 TRM 보강 시공, 외부면에 바잘트 TRM 2겹과 바잘트 앵커 적용.
- 개구부 벽체의 경우 TCP 보강실험체와 동일하게 바잘트 TRM 2겹과 바잘트 앵커 적용

○ 실험 방법 및 절차

- 비내진 실험체와 동일하게 수행



(a) 정면 및 우측면 (b) 배면 및 좌측면

[그림2.49] TRM-XPS 보강 실험체



(a) 바잘트 TRM 보강 상세

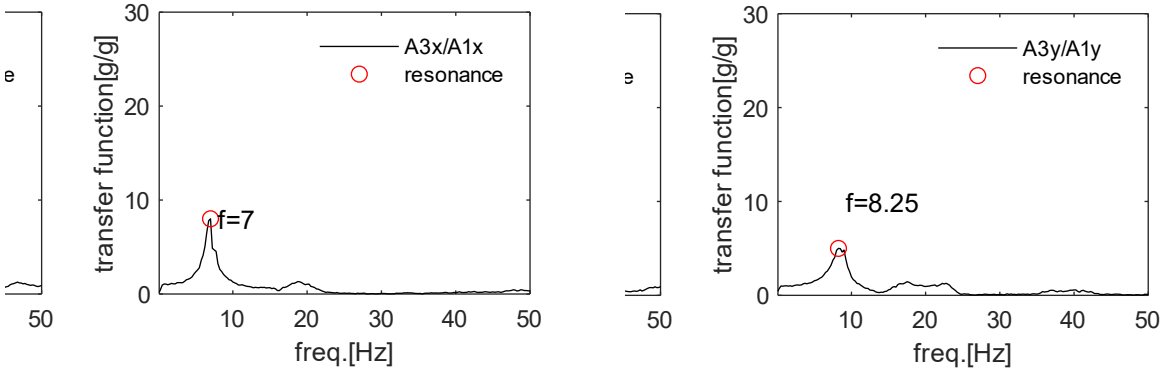


(b) XPS 단열재 시공

[그림2.50] TRM-XPS 보강 실험체 시공 현황

○ 실험 결과

- (고유 진동수) 2층 실험체의 최상단부 슬래브에 설치한 가속도계를 이용하여 측정한 응답가속도를 입력가속도에 대한 전달함수를 산정하는 방식으로 고유 진동수를 분석한 결과, X 방향 7.0Hz (0.142 sec), Y 방향 8.25Hz (0.12 sec)로 비내진 실험체에 비하여 X 방향은 2배 증가하였으나 Y 방향은 동일한 결과를 나타냄. 이는 TRM 보강시트 내부에 XPS 단열 보드가 시공되면서 구조체와 일체성이 확보가 다소 저해되었기 때문으로 판단됨.



(a) X direction (b) Y direction

[그림2.51] 공진 주파수 시험 결과 (TRM+XPS보강 실험체)

- (파괴모드)

① 설계지진(DBE, Design Based Earthquake)에 해당하는 100% 배율 가진 시 전면의 개구부 사이 피어벽체 상부에 전단균열이 발생하였으며, 채움벽의 경우 바잘트 앵커가 설치되지 않은 기둥 접합면을 따라 텍스타일의 부착균열이 전체적으로 발생하였고, 우측 벽체 내부에는 벽체의 중앙부에 XPS 단열재 연결부를 따라 수평 균열이 발생함. [DS2, 인명보호]

② 최대고려지진(MCE, Maximum Considered Earthquake)에 해당하는 150% 배율 가진 시 전면 피어 상부의 전단균열과 하부의 대각 균열은 피어 전체를 관통하여 진전되었고, 1층 개구부 주위의 대각 균열부에서 B-TRM의 마감모르타르가 탈락, 바잘트 텍스타일과 조적벽체 부착면이 탈락하여 텍스타일의 들뜸 현상이 발생함. [DS3, 붕괴방지]

③ DBE 지진의 200% 배율 가진 시 1층 개구부 주위의 균열폭이 크게 확대됨에 따라 피어벽체의 조적 줄눈을 따라 하부 벽체와 거의 분리되었으나 바잘트 텍스타일 자켓팅으로 벽체의 붕괴되지 않음. 바잘트 텍스타일은 균열이 관통되는 부부분에서 다수 절단되었으나 텍스타일을 구성하는 전체 격자중 일부에 해당하며 균열 관통부 외에는 벽체와 부착이 유지됨. 이러한 파괴모드가 벽체의 붕괴를 방지하는 역할을 하는 것으로 판단됨. [DS3, 붕괴방지]

[표 2.14] 조적 채움벽의 손상상태 정의(Cardon and Perrone, 2015)

Fragility group	Damage states
Masonry walls w/o openings	DS1: Separation of the infill from the frame (top beam and mid-height columns), light diagonal cracking (width<1mm) DS2 : Extensive diagonal cracking (1mm<width<2mm), possible failure of brick units DS3 : Corner crushing, brick spalling, detachment of large plaster area, sliding in the mortar joints. Collapse of interior partitions. DS4 : In-plane or ou-of-plane collapse of exterior infills
Masonry walls with openings	DS1: Separation of the infill from the frame (top beam and columns), light diagonal cracking (width<1mm) DS2 : Extensive diagonal cracking (1mm<width<2mm), possible failure of brick units DS3 : Corner crushing, brick spalling, detachment of large plaster area, sliding in the mortar joints. Collapse of interior partitions. DS4 : In-plane or ou-of-plane global collapse of exterior infills (frame included).



(a) EQ 100% 정면



(b) EQ 150% 정면



(a) EQ 150% - 채움벽 내부



(b) EQ 200% 정면

[그림2.52] TRM-XPS 보강 실험체의 손상상태

❑ 보강공법에 따른 거동 특성 및 성능 비교 분석

○ 고유 진동수

- TCP 보강 및 TRM+XPS 단열재 보강에 의해 개구부 벽체의 고유진동수 약 2배 증가
- 개구부가 없는 채움벽의 경우 TCP는 고유진동수가 약 1.7배 증가하였으나 TRM+XPS 단열재 보강시 고유 진동수 증가 없어 기존에 강성이 충분한 경우에 강성 보강 효과가 미미한 것으로 판단됨

[표 2.15] 공진 주파수 (Hz)

비보강		TCP		TRM+XPS	
X	Y	X	Y	X	Y
4.0	8.25	8.0	13.5	7.0	8.25

○ 손상상태

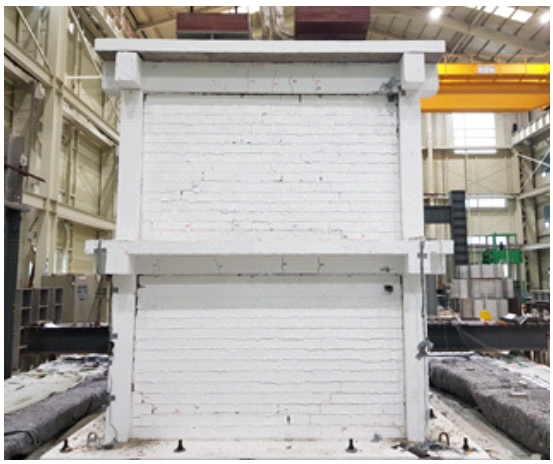
- 비보강 건물의 경우 DBE 수준에서 조적채움벽에 광범위한 균열이 발생하고 조적채움벽의 면외방향 이탈이 발생하여 DS3 붕괴방지 수준의 손상 발생하였고, MCE 수준에서 조적채움벽이 붕괴
- TCP 보강의 경우 DBE 수준에서 미소 균열 정도로 즉시거주 DS1 수준의 손상만이 발생하였고, DBE 200% 수준에서도 개구부 피어 벽체의 균열이 크게 발생하여 DS3 붕괴방지 수준이었으나 TRM의 효과로 개체의 탈락이나 낙하 손상 등은 발생하지 않음
- TRM-XPS 단열재 동시 보강의 경우에도 TCP 보강체와 유사한 수준의 손상수준을 보였으나 손상 상태는 다소 TCP 보다 다소 심화된 수준을 보임

[표 2.16] 실험체별 손상상태

	비보강	TCP	TRM+XPS
30%	·골조와 조적채움벽 사이 접합부 균열 ·개구부 사이 피어벽체 상하부 균열 발생	·실험전 발생한 초기균열 연장	·실험전 발생한 초기균열 연장
60%	·개구부 균열 확대 ·개구부 상단 인방보 균열 발생 ·개구부 없는 조적채움벽에 줄눈따라 균열 발생	·1층 전면, 배면에서 조적채움벽과 보, 슬래브 접합부 부착균열 발생 ·2층 개주부 주위 균열 발생 ·기둥의 TRM보강부에 수직균열 발생	·1층 개구부 주변 균열 발생 ·1층과 2층의 채움벽 균열 발생
100%	·개구부사이 피어벽체의 줄눈 균열 심화, 벽체 분리 파괴 ·개구부 없는 조적채움벽은 부착파괴가 심화되어 면외방향으로의 기울어짐 발생	·개구부 사이의 피어벽체 상하부에 수평균열 발생	·전면의 창문과 문 사이 피어벽체 상부 전단균열 발생 ·채움벽의 경우 바잘트앵커 미설치 기둥접합면을 따라 텍스타일 부착균열 발생
150%	·개구부 없는 조적채움벽 한면을 제외한 나머지 3면 붕괴 ·2층 기둥 하단부 주근을 따라 균열 발생, 전단파괴균열 발생	·1층 피어벽체에 전단균열이 발생하고 손상이 심화되었지만, 섬유보강으로 상하부 연속되어있는 벽체가 탈락하지는 않음	·전면 피어 상부의 전단균열과 하부의 대각 균열은 피어전체를 관통하여 진전 ·1층 개구부 주의 B-TRM의 마감 모르타르 탈락 ·바잘트 텍스타일과 조적벽체 부착면이 탈락하여 텍스타일의 들뜸 현상 발생
200%		·2층의 모든 면에서 골조와 조적채움벽 사이의 접합부 균열 발생 ·벽체가 탈락, 낙하하는 등의 파괴는 발생하지 않음	·1층 개구부 주위의 조적 줄눈을 따라 하부벽체가 거의 분리되었으나 바잘트 텍스타일이 감싸고 있어 붕괴되지는 않음



(a) 비보강 실험체 전면



(b) 비보강 실험체 좌측면



(c) TCP실험체 전면



(d) TCP 실험체 좌측면



(e) TRM+XPS 실험체 전면



(f) TRM+XPS 실험체 후면

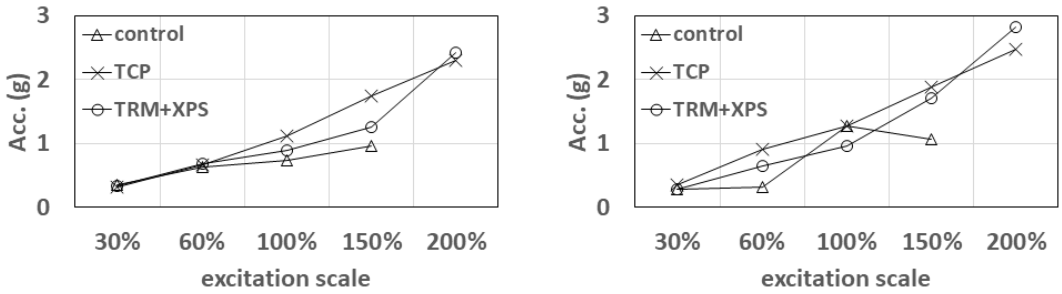
[그림2.53] Damage state of MCE

○ 가속도 응답

- 입력지진파의 가속도가 증가할수록 3개의 실험체의 가속도 응답도 증가하였으며, 실험체의 상부층으로 갈수록 가속도 응답이 증폭되는 경향을 나타내었으며 전반적으로 유사한 수준의 응답 발생

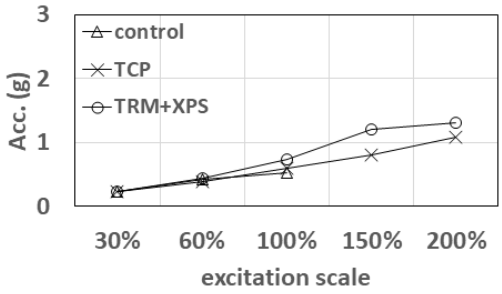
[표 2.17] 가진단계별 최대 가속도

scale (%)	control		TCP		TRM+XPS	
	X-direction	Y-direction	X-direction	Y-direction	X-direction	Y-direction
30	0.23	0.22	0.22	0.18	0.23	0.25
60	0.42	0.46	0.38	0.36	0.43	0.65
100	0.53	0.83	0.6	0.66	0.73	0.99
150			0.81	1.11	1.20	1.23
200				1.50	1.31	1.14

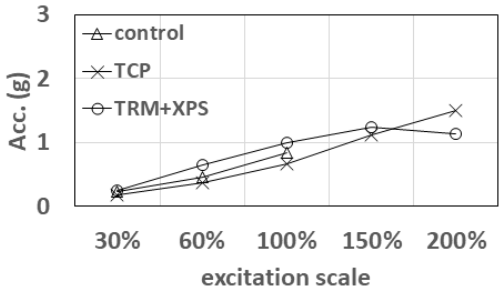


(a) 2F, X-direction

(b) 2F, Y-direction



(c) 1F, X-direction



(d) 1F, Y-direction

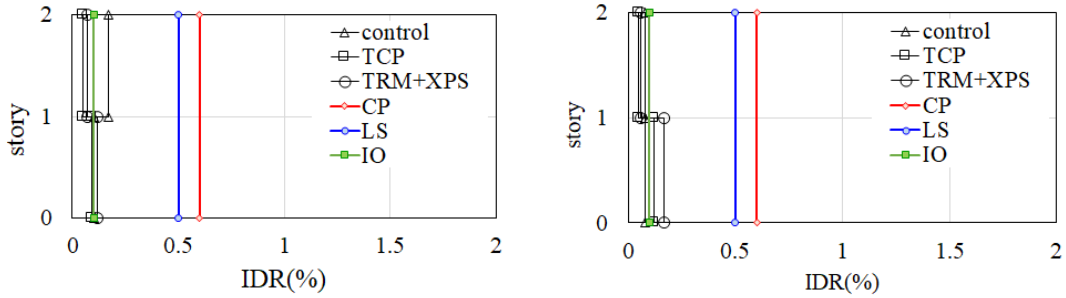
[그림2.54] 최대 가속도 응답

○ 최대 층간변형각

- 가진 단계가 증가함에 따라 각 층의 변위 응답이 증가하였으며 전반적으로 개구부 벽체가 있는 X 방향이 무개구부 채움벽이 있는 Y 방향보다 변위 응답이 2배 이상 크게 발생함
- 비보강실험체는 100% 가진시 FEMA 356에서 제시하고 있는 비보강 조적 채움벽 부재의 붕괴방지(CP) 성능 수준인 0.6%를 초과하는 수준
- TCP실험체는 150% 가진시까지는 인명보호(LS) 성능 수준인 0.5%을 만족하며, 200% 가진시 붕괴방지(CP) 성능 수준을 초과
- TRM+XPS실험체는 2층 층간변형각이 1층 층간변형각보다 현저하게 작으며 100% 가진시 인명보호(LS)를 초과하는 수준이며 200% 가진시 붕괴방지(CP) 성능수준을 초과
- TCP 및 TRM+XPS 동시보강을 통해 변형능력이 향상되어 200% 가속도 수준에서 1.5% 이상의 최대 층간변형각 발생에도 조적벽체의 붕괴가 방지되었음.

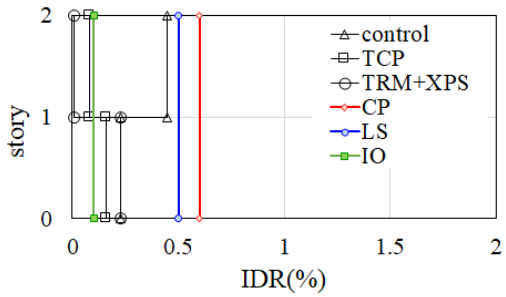
[표 2.18] 가진 단계별 최대 층간 변형각

scale (%)	control				TCP				TRM+XPS			
	1F		2F		1F		2F		1F		2F	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
30	0.1	0.08	0.17	0.08	0.09	0.12	0.05	0.05	0.12	0.17	0.07	0.06
60	0.23	0.14	0.45	0.19	0.16	0.16	0.08	0.11	0.23	0.11	0.01	0.15
100	0.35	0.28	0.78	0.32	0.37	0.23	0.16	0.17	0.52	0.23	0.20	0.23
150	0.76	0.52	2.6	1.15	0.37	0.33	0.31	0.25	0.52	0.56	0.38	0.3
200	-	-	-	-	1.58	0.64	0.51	0.29	2.41	1.56	0.63	0.45

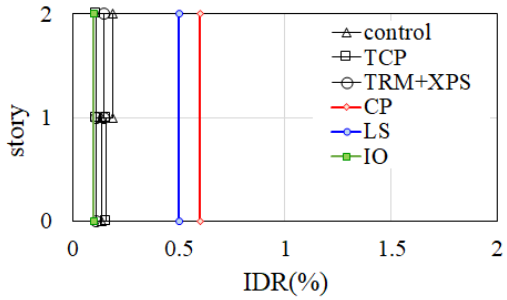


(a) 30%, X-direction

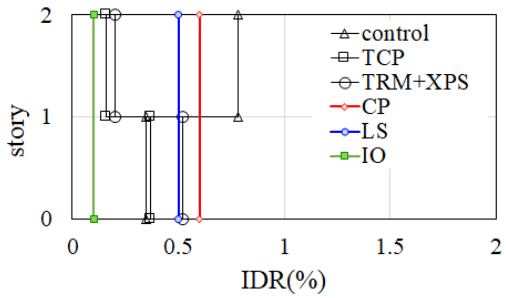
(b) 30%, Y-direction



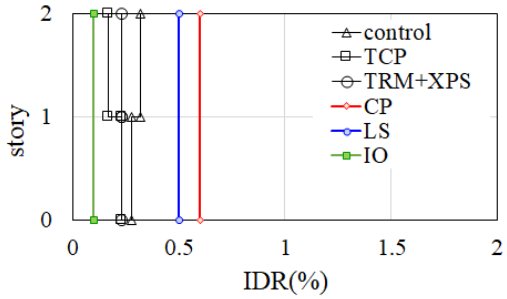
(c) 60%, X-direction



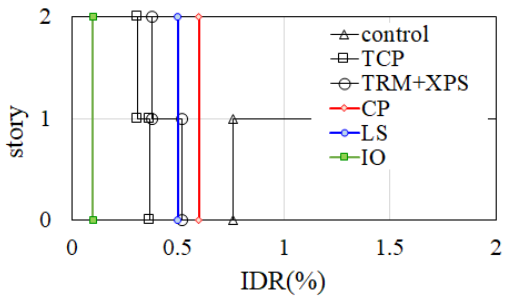
(d) 60%, Y-direction



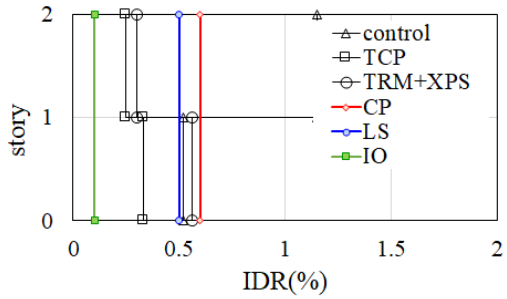
(e) 100%, X-direction



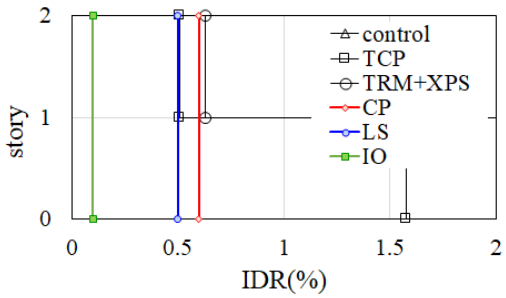
(f) 100%, Y-direction



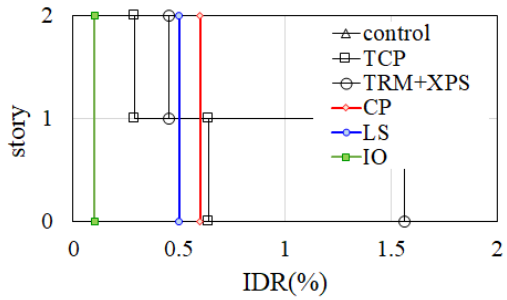
(g) 150%, X-direction



(h) 150%, Y-direction



(i) 200%, X-direction



(j) 200%, Y-direction

[그림2.55] 층간 변형각 응답

(5) TCP 공법의 에너지 효율 평가

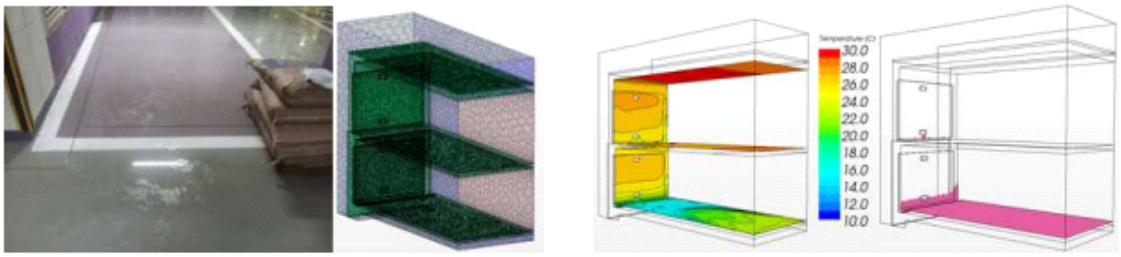
❑ CFD 해석을 통한 에너지 TCP 패널의 열성능 분석

○ 전산 유체역학(CFD) 프로그램(STAR-CCM+)을 활용한 열성능 분석

- 전산유체역학(CFD)은 전산 모의를 기반으로 한 기법으로 유체유동, 열전달 및 화학반응 등 유체의 다양한 물리적 현상을 포함하는 시스템에 대한 해석 기법을 말함

  * 본 기법은 건축 설비분야에서 외풍부하, 냉난방 부하, 구조물의 배치, 최적 설계, 결로, 열섬, 구조 연성 해석 등의 다양한 분야에서 사용됨

- STAR-CCM+는 통합 환경 CAE 소프트웨어로 압력, 온도, 속도 등 사용자가 관심 있는 물리량들을 형상 표면 및 유동공간에서 실시간으로 분석 내용을 업데이트하여 결과를 제공함



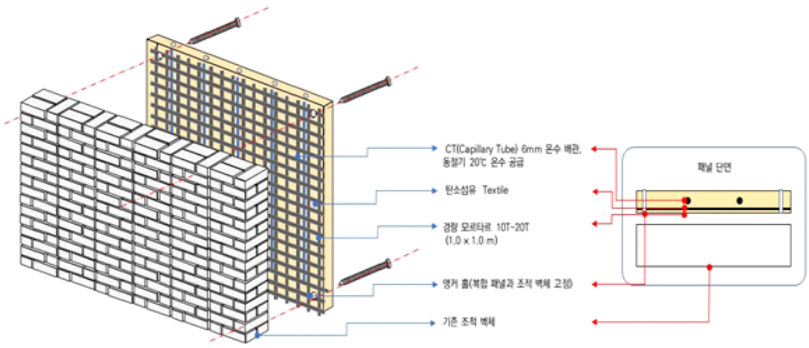
<결로 사진 및 3차원 해석 모델> <벽체 표면 온도 및 결로 발생 위치 예측>

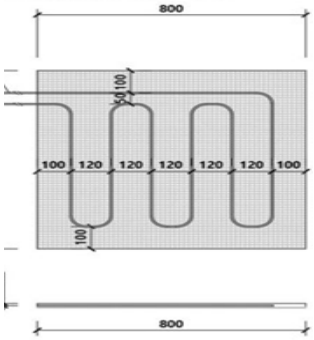
*출처 : 진봉용 외 1인, 통합환경 CAE S/W STAR-CCM+ 소개 및 설비 분야 적용사례, 설비공학회 2014 논문집 pp.126~129(재구성)

[그림2.56] STAR-CCM+의 결로 해석 및 벽체 온도 분석 사례

○ TCP 패널의 열관류율 분석

- 단열재의 경우 KS F2277(건축용 구성재의 단열성 측정방법- 열교정 상자법 및 보호 열상자법)에 따라 열관류율을 측정할 수 있으나, 단열재 내부에 발열체가 포함될 경우 해당 방법으로는 열관류율 측정이 불가함(해당 방법은 밀폐된 구조로 온도 측정 센서가 시험체와 밀착해 있어 단열재 내부 발열체로 인해 온도차에 대한 측정이 불가함)
- 전산 유체역학(CFD) 프로그램의 시뮬레이션을 통해 사전 TCP 복합 패널의 열관류율을 분석해 해당 시험체의 열관류율을 예측함





<TCP 패널의 구성도> <TCP 패널 규격>

[그림2.57] TCP 패널의 구성 및 규격

- CFD 해석을 위한 기본 조건으로 실내외 온도 조건은 동절기로 가정해 실내 24℃, 실외 10℃로 하고, 단일 부재로 인해 배관 유속을 3LPM으로 설정함
- 기존 조적조 벽체와 TCP 패널의 열관류율 값을 비교하기 위해 조적조 벽체를 1.0m×0.96m으로 구성해 TCP 패널을 부착하고 공급 온수를 20℃, 40℃로 설정함

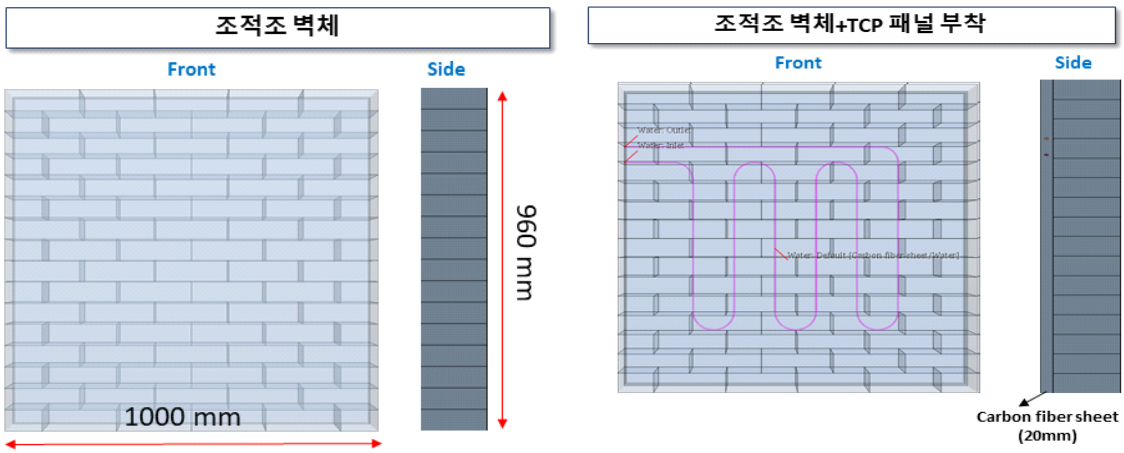
  * TCP 패널은 0.8m×0.8m×0.02m의 규격으로 경량 모르타르(20T)에 탄소 섬유를 보강하고, 6㎜ 모세관이 포함되어 있는 구조

[표 2.19] CFD 해석을 위한 TCP 패널의 물성치

구 분	밀도(kg/㎥)	비열(J/kg・℃)	열전도율(W/m・K)
모르타르	1,250	766	0.431
벽돌	8,790	795	1.004
탄소 섬유	950	657	0.209

[표 2.20] CFD 해석을 위한 기본 조건

구 분	세부 조건	구 분	세부 조건
온도조건	실내 : 24℃	열전달 계수	실내 : 9 W/㎡・K
	실외 : 10℃		실외 : 23W/㎡・K
공급 온도	20℃, 40℃	유속	3 LPM

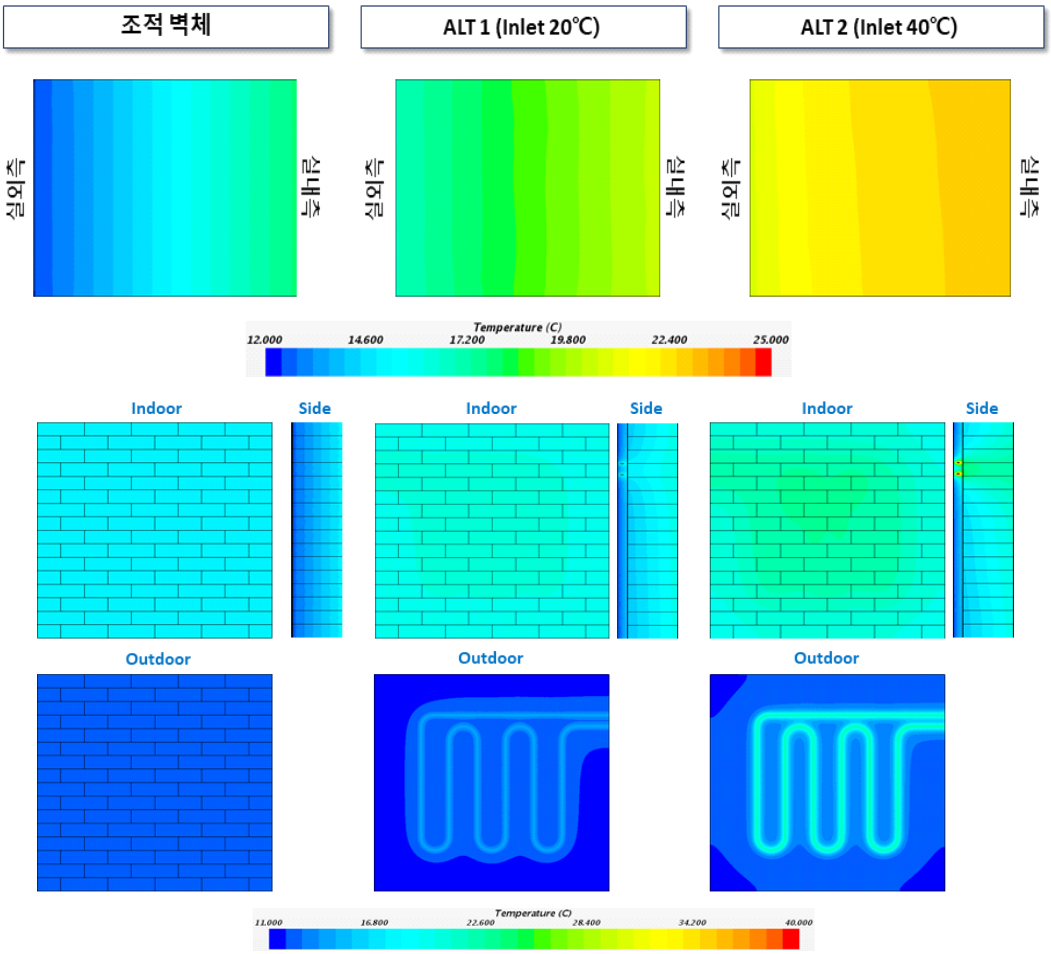


[그림2.58] CFD 해석을 위한 조적벽체 및 TCP 패널 부착 벽체 조건

- CFD 해석 결과 실외 표면 온도는 비슷하였으나 실내 온도는 ALT 1(공급 온도 20℃)과 ALT 2(공급 온도 40℃) 모두 표면 온도가 약 20℃로 분석되어, 조적 벽체보다 약 2℃정도 상승하였으며, 기존 조적 벽체의 열관류율은 3.97(W/㎡・K), ALT 1 2.6(W/㎡・K), ALT 2 1.62(W/㎡・K)로 기존 벽체의 열관류율 대비 최대 약 60% 이상 성능이 향상된 것으로 분석됨

[표 2.21] CFD 해석을 통한 부위별 온도 및 열관류율

구 분	조적 벽체	ALT 1(Inlet 20℃)	ALT 1(Inlet 40℃)
실내 표면 온도(℃)	17.88	20.00	21.51
실외 표면 온도(℃)	12.39	12.26	13.92
열관류율(W/㎡・K)	**3.97**	**2.60**	**1.62**
출구 온도(℃)	-	19.70	38.74



[그림2.59] CFD 해석을 통한 벽체 열관류율 분석 결과

○ 열화상 카메라를 이용한 TCP 패널의 온도 분포 측정

- 온도 분포 측정을 위한 TCP 패널은 소규모로 인해 별도의 열원공급 장치를 연결하기 어려워 온수매트의 본체(공급 온도 표시와 온도 조절이 가능하며, 전기공급으로 작동됨, 이하 '보일러')와 연결해 측정을 위한 시제품을 구성함

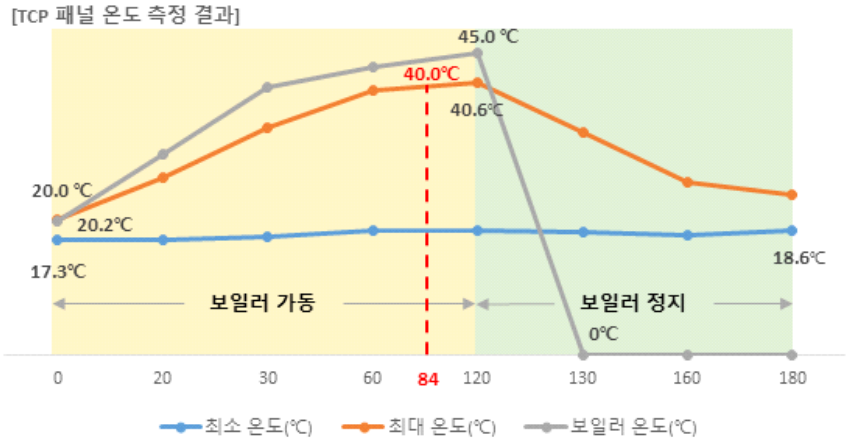
  * 열화상 카메라는 비 접촉식 온도 측정시 사용되는 장비로 적외선 온도계(Infrared Thermometer : IR)를 이용해 물체의 표면 온도를 측정

- 보일러의 온도는 55℃로 설정하고, 패널 내 목표 온도를 도달하는데 까지 소요 시간과 패널 내 최소 및 최대 온도를 측정함

- 측정 결과 배관의 온도는 보일러 가동 후 60분이 지났을 때, 목표 온도인 40℃에 도달하였고, 120분 지났을 때에는 최대 온도인 40.6℃에 도달함(보일러 가동 후 84분 후 40℃에 도달)

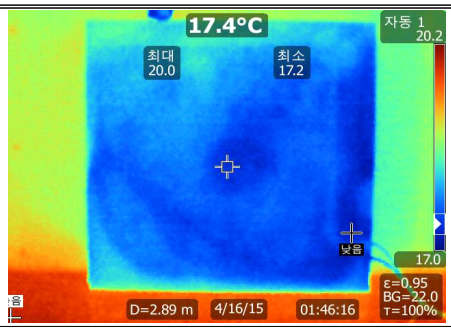
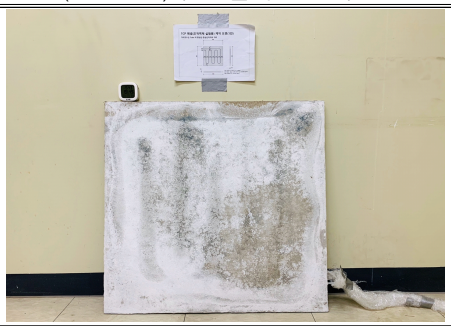
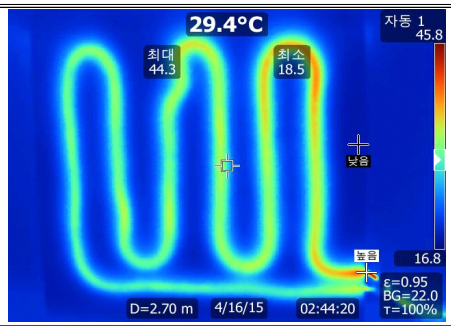
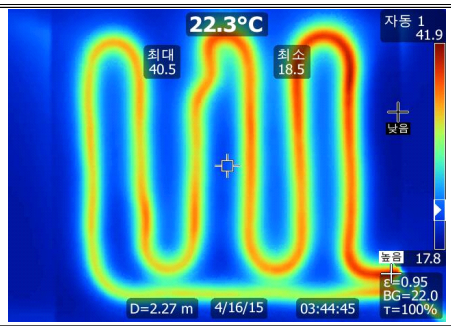
  * 보일러의 설정온도는 55℃였으나, 온수매트의 공급 열원기기를 사용함으로 인해 설정온도까지 도달하지 않음

- 온도 측정 결과 시제품 1개에 온수를 공급함으로 인해 패널 내 온수가 지속되지 않았으나, 전면 벽체 구성시 온수 지속시간이 증가할 것으로 사료됨



[그림2.60] TCP 패널의 소요 시간별 온도 추이

[표 2.22] TCP 패널의 열화상 카메라를 통한 온도 측정

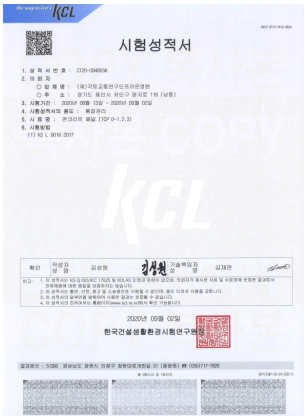
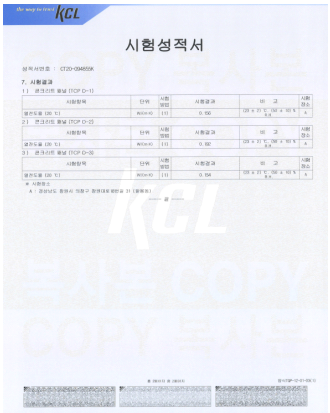
①	14 : 20 (+0 min) / 보일러 20℃ / IR 17.3 ~ 20.2 ℃	
		
②	15 : 20 (+60 min) / 보일러 43℃ / IR 18.5 ~ 39.6 ℃	
		
③	16 : 20 (+120 min) / 보일러 45℃ / IR 18.5 ~ 40.6 ℃	
		
④	17 : 20 (+180 min) / 보일러 -℃ / IR 18.6 ~ 24.0 ℃	
		

❑ TCP 보강 조적벽체 에너지효율 평가(외기 기후조건을 고려한 환경 해석)

○ 개발 경량모르타르 열전도율 평가

- 공인시험기관(한국건설생활환경시험연구원에 의뢰하여 개발 경량모르타르의 열전도율 확인(KS L 9016:2017, 보온재의 열전도율 측정방법)

[표 2.23] 모르타르의 열전도율 시험결과

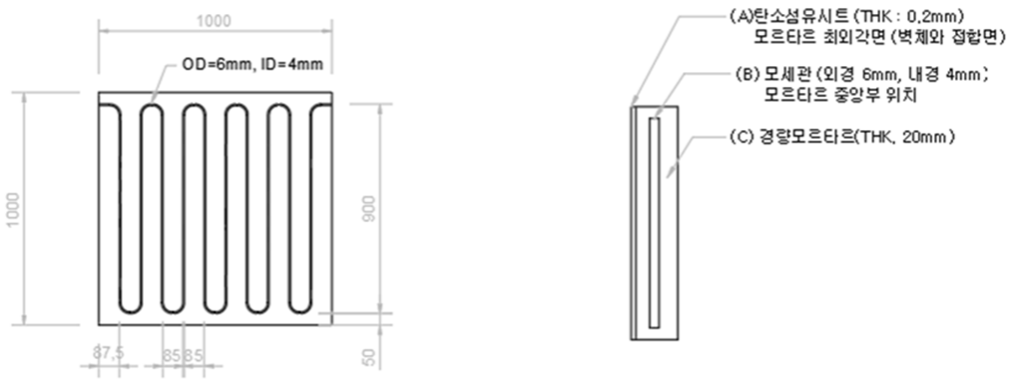
시료	시험항목	단위	시험결과	비고 (시험성적서)
TCP T-1	열전도율(23℃)	W/(m·K)	0.156	 
TCP T-2			0.192	
TCP T-3			0.154	
평균	-	-	0.167	

○ CFD 해석을 통한 TCP 패널의 열관류율 분석 업데이트

- 단열재의 경우 KS F2277(건축용 구성재의 단열성 측정방법- 열교정 상자법 및 보호 열상자법)에 따라 열관류율을 측정할 수 있으나, 단열재 내부에 발열체가 포함될 경우 해당 방법으로는 열관류율 측정이 불가(해당 방법은 밀폐된 구조로 온도 측정 센서가 시험체와 밀착해 있어 단열재 내부 발열체로 인해 온도차에 대한 측정이 불가)
- 본 연구에서는 전산 유체역학(CFD) 시뮬레이션을 이용하여 TCP 벽체의 구성 및 내부 순환유체의 온도에 따른 열관류율 분석을 통하여 벽체 에너지효율 성능평가 검토
- 내부 발열 및 공조는 고려하지 않았으며, 상·하부 및 측면에 공조공간(23℃)이 존재하는 것으로 경계조건 설정하고, 외기조건(3.5℃) 및 TCP 벽체 내부의 열교환기의 열교환 성능에 따라 벽체 온도 및 실내 공기온도를 계산할 수 있도록 시뮬레이션 모델 구축
- 열교환기 내부 순환 유체의 유동 및 열전달을 보다 정확하게 해석하기 위해서 Polyhedral 타입의 volume mesh를 적용하였으며, 순환 유체와 통로 경계면에는 Prism layer mesh 사용
- 탄소섬유시트는 얇은 두께로 인해 벽체의 열관류 측면에서 해석 시 영향이 적을 것으로 판단하여 시뮬레이션 모델의 Geometry는 생성하지 않고 열저항 값(9.57E-4$m^2 \cdot K/W$)을 Interface에 설정
- 조적벽 사이의 모르타르 줄눈도 각각의 조적 벽돌 간 Interface에 열저항 값(0.0232$m^2 \cdot K/W$)으로 설정
- 유량은 난류가 형성되는 레이놀즈수 4,000 이상이 되도록 설계하였고, 입수온도는 20℃ & 45℃ 2가지 조건으로 나누어 시뮬레이션 수행

[표 2.24] TCP 패널의 입력 물성치

구분	밀도(kg/㎥)	비열(J/kg・℃)	열전도율(W/m・K)
모르타르	1,250	766	0.167
벽돌	8,790	795	1.004
탄소 섬유	950	657	0.209



[그림2.61] TCP 벽체 모델 구성

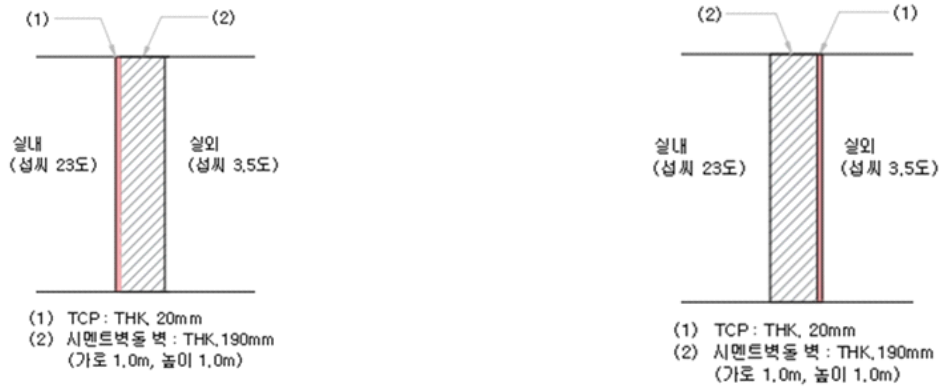
[표 2.25] 해석 조건

열 저항값	모르타르 : 0.0232 $m^2 \cdot K/W$
	탄소섬유시트 : 9.57E-4 $m^2 \cdot K/W$
온도조건	실내 : 23℃
	실외 : 3.5℃
열전달 계수	실내 : 9 $W/m^2 \cdot K$
	실외 : 23 $W/m^2 \cdot K$
공급 온도	20℃ & 45℃
유속	1.5 LPM (1.27 m/s)

- TCP 복합패널의 위치에 따라 동일한 유체 설정 조건에서도 열교환 성능이 어떻게 달라지는 해석하기 위해서 시뮬레이션 모델을 2개로 구성하고, 20℃와 45℃의 순환 유체 입수온도 조건에 따라 정적 열에너지 시뮬레이션 수행(상용 CFD 시뮬레이션 툴인 Star CCM+ 사용)

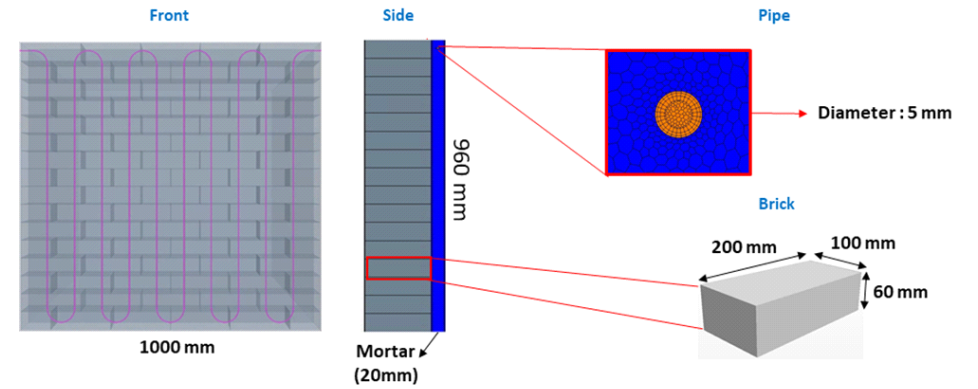
[표 2.26] Case 조건

구분	TCP 위치	입수온도
Base case	내측	-
Case 1	내측	45℃
Case 2	외측	45℃
Case 3	내측	20℃
Case 4	외측	20℃



(a) Case 1(TCP 내측 설치)　　(b) Case 2(TCP 외측 설치)

[그림2.62] TCP 위치에 따른 시뮬레이션 모델링 조건

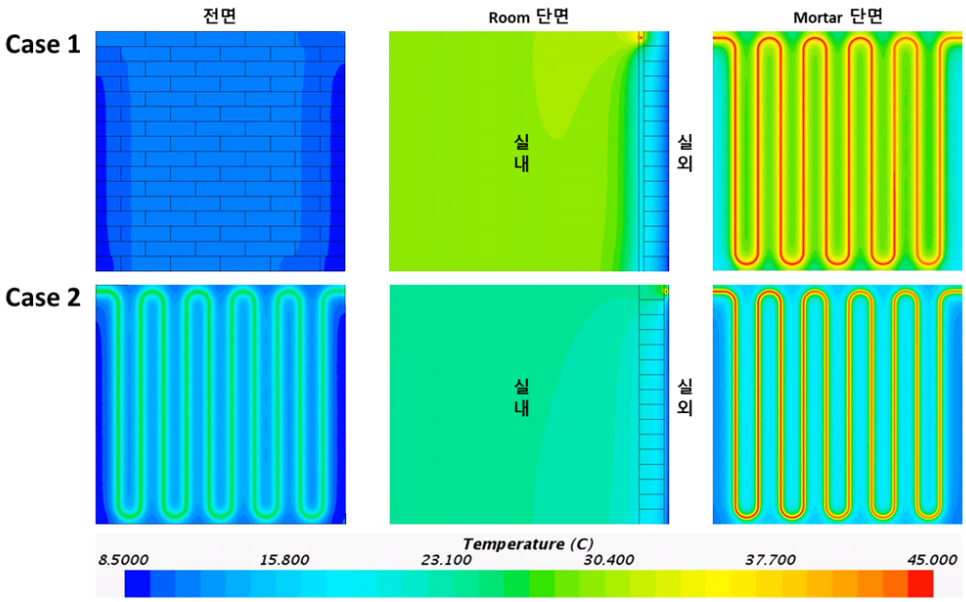


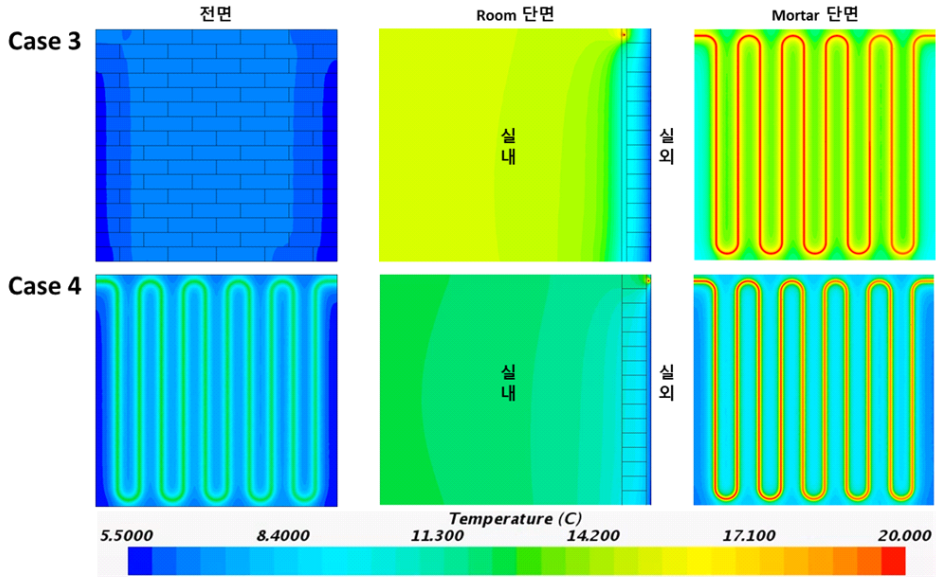
[그림2.63] 시뮬레이션 모델

- 시뮬레이션 결과, TCP 복합패널이 적용되지 않은 조적 벽체는 실내 공기온도가 약 4℃, 벽체 표면온도는 외기 영향으로 인해 3.5℃로 나타났고 TCP 복합패널 내측 설치 및 입수온도 45℃ 조건(Case 1)에서는 실내 공기온도가 30℃ 수준으로 일반적인 난방 설정 온도보다 높았으며 실내·외측 표면온도가 20℃ 이상 차이 나는 것으로 확인. 또한, TCP 복합패널 외측 설치 및 입수온도 45℃ 조건(Case 2)에서는 실내 공기온도가 23℃ 수준이었으며, 실내·외측 표면온도 차이가 TCP 복합패널 내측 설치 조건(Case 1)보다 15℃ 이상 작은 것으로 확인
- 입수온도 20℃ 조건(Case 3 & 4)에서 TCP 복합패널 설치 조건에 따라 45℃ 조건과 유사하였으며, 실내 공기온도는 모두 11℃이상으로 나타나 난방부하 절감에 효과적일 것으로 판단

[표 2.27] 시뮬레이션 결과(온도값)

구분	실내 공기온도	내측 표면온도	벽체 내부온도	외측 표면온도
Base case	3.93℃	3.51℃	3.50℃	3.50℃
Case 1	30.15℃	31.26℃	27.52℃	10.48℃
Case 2	23.41℃	23.32℃	23.32℃	16.45℃
Case 3	14.97℃	14.54℃	13.06℃	6.39℃
Case 4	11.96℃	11.42℃	11.42℃	8.66℃





[그림2.64] 시뮬레이션 결과 온도값의 scalar scene

- CFD 결과로 산출된 실내 공기온도와 내측 표면온도를 이용하여 TCP 벽체의 열관류율을 산출하였으며, 입수온도 45℃인 Case 1은 온도구배가 일반적인 열관류의 형태와 다르고 TCP 내부에서의 발열이 실내로 유입되는 영향이 크기 때문에 열관류율이 음수로 계산. 일반 벽체와 비교하여 TCP 벽체는 단열 성능이 우수한 것으로 판단되며, 입수온도가 높을수록 열교환기가 실내 측에 가깝게 설치될수록 단열 성능이 우수한 것으로 판단

[표 2.28] 열관류율, 내측 열유속 및 열교환량 비교

케이스	TCP 위치	입수온도	열관류율	내측 열유속	열교환량
Case 1	내측	45℃	−0.037 $W/m^2 \cdot K$	−0.068 W/m^2	−162.94 W
Case 2	외측	45℃	0.04 $W/m^2 \cdot K$	−0.005 W/m^2	−291.36 W
Case 3	내측	20℃	0.34 $W/m^2 \cdot K$	0.021 W/m^2	−63.94 W
Case 4	외측	20℃	0.57 $W/m^2 \cdot K$	0.029 W/m^2	−114.70 W

- 입수온도 45℃를 지속적으로 공급할 경우, 난방 시스템으로서의 역할을 할 수 있을 것으로 판단되나, 열원의 지속적 공급이 가능하도록 시스템을 구성할 필요가 있음. 또한, 외부로의 열손실을 고려하면 난방 이용보다는 저온의 열을 활용하는 단열재로서의 역할이 에너지 효율적일 것으로 판단
- TCP 패널은 입수온도 20℃ 조건(case 3)에서 벽체의 열관류 성능을 향상시킬 수 있는 기술로 판단되며, Case 3 기준, 열관류 측면에서 일반 벽체(열관류율 3.32 $W/m^2 \cdot K$)의 10% 수준의 열관류율을 확인

❑ 기존 TRM+XPS 단열재의 에너지 효율 성능

- TRM+단열재 공법에서 단열 효과는 적용되는 단열재의 종류에 의존함. 본 연구에서는 TRM+단열재 공법의 내진성능 검증을 위해 기존에 단열재로 주로 사용되는 XPS(압출발포폴리스틸렌)를 적용하였으며, XPS의 열전도율은 0.027~0.031 W/mK로 단열 성능이 우수한 재료임.
- 본 연구에서 개발한 TCP의 경우 건물 내부 벽체에 사용할 경우 난방 기구로 작용하는 반면, 벽체 외부에 적용할 경우 내기와 외기의 온도차에 의해 열 흐름을 차단함으로써 단열 효과를 발생시킴. 따라서 TCP의 단열 효과는 내기와 외기의 온도 및 TCP 내부 온수관의 공급 온도에 의존함.
- 따라서 TRM+단열재 공법과 TCP의 에너지 효율 성능의 검증은 다양하고 복잡한 통제 변인 설정이 필요하며, TCP의 에너지 효율 성능 향상을 위해 추가적인 연구가 요구됨.

(5) 열원을 고려한 TCP 시스템 설계

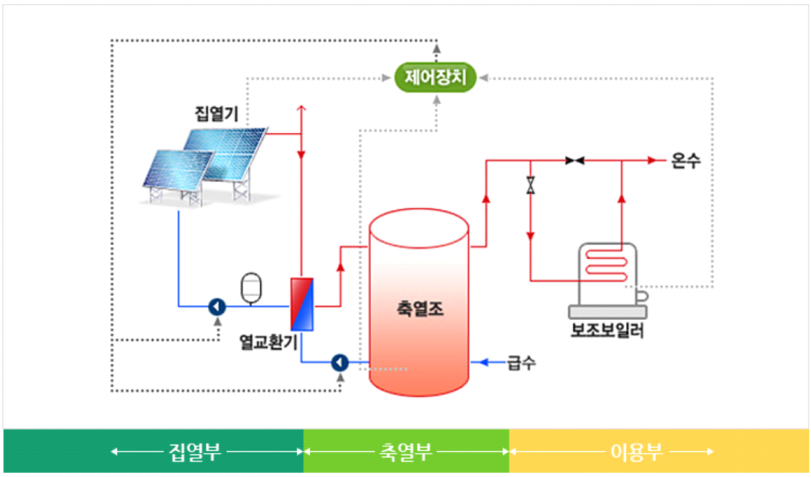
❑ TCP 보강공법 적용을 위한 태양 에너지 열원시스템 검토

○ 태양열 시스템(Solar Thermal System)

- 원리 및 구성

  * 원리: 태양으로부터 입사되는 복사에너지를 열에너지로 변환하여 이를 이용하는 것으로 집열체를 통해 태양열을 집열하고 집열된 태양에너지를 열저장매체를 통해 축열한 후 난방용이나 급탕용으로 열을 생산하는 시스템

  * 구성: 집열부, 축열부, 이용부, 제어장치



[그림2.65] 태양열 시스템 구성도(한국에너지공단)

- 유형

  * 활용 용도에 따른 분류

    · 자연형(passive): 태양열에 의해서 얻어지는 열을 이동하는 펌프나 팬과 같은 구동장치가 없이 직접 이용하는 시스템(토롬월(tromb wall), 축열벽, 부착온실 등)

    · 설비형(active): 열에너지로 변환된 열(열매체)을 구동 장치에 의해서 이용부로 이동되는 시스템

    ※ 설비형 시스템은 집열온도에 따라 저온, 중온, 고온으로 구분가능하며, 건물에 적용되는 시스템은 주로 저온(냉난방, 온수급탕)이나 중온(냉난방), 산업공정열이나 열발전에는 주로 고온용 활용

  * 집열 열전달 매체에 따른 분류

    · 액체식: 집열 열전달 매채로서 물이나 부동액을 축열체로서는 물을 사용(집열기는 입사된 태양복사에너지를 가용 열에너지로 전환, 이 에너지는 수조식 축열조에 감열의 형태로 저장되고, 난방 및 온수급탕에 열이 필요한 경우 공급됨), 액체-공기식 열교환기를 이용하여 축열조로부터 건물내로 난방을 위한 열을 공급 가능

    · 공기식: 태양열 집열기로부터 더워진 공기가 실내나 축열조로 보내지도록 함(집열된 태양복사에너지는 더워진 공기에 의하여 자갈을 덥혀 가용 열에너지로 저장되고, 난방이 필요한 경우 태양열 집열기로부터의 열이 불충분하면 자갈식 축열조로 통하여 공기가 순환되어 실내로 열을 공급함), 공기-액체식 열교환기를 이용하여 온수 급탕 가능

- 장 · 단점

[표 2.29] 태양열 시스템의 장·단점

장점	단점
· 무공해, 무제한 청정에너지원 · 기존의 화석에너지에 비해 지역적 편중이 적음 · 다양한 적용 및 이용성 · 저가의 유지보수비 · 주로 저온 분야에 활용할 경우 효율이 높음	· 밀도가 낮고, 간헐적임 · 유가의 변동에 따라 영향이 큼 · 초기 설치비용이 비교적 많음 · 봄, 여름은 일사량 조건이 좋으나, 겨울철에는 조건이 불리함 · 집열효율은 집열온도와 외기온도차에 따라 변화가 큼(온도차가 클수록 효율이 낮음)

*출처: 양영원(2007), “건물 적용을 위한 공기식 태양광·열 복합시스템의 성능평가에 관한 연구”, 공주대학교 대학원 건축공학과, 석사논문

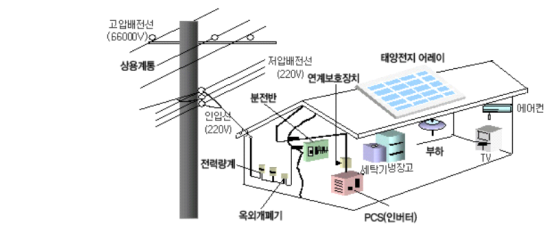
- 태양열 시스템의 건물적용

* 설비가 간단하고 비교적 가격 경쟁력을 가지고 있는 태양열 온수 급탕설비 위주로 보급됨
  · 가정용의 태양열 온수기와 복지시설, 목욕탕 여관 등 숙박시설, 식당, 온실 등에 적용된 중대규모 온수급탕 시스템이 대부분
  · 태양광, 지열에너지 등과 복합적으로 제로에너지건물에 적용
* 난방용으로 이용하는 경우 온수급탕보다 고온의 열이 필요하여 집열효율과 시스템 효율이 저하됨
  · 온실과 같이 비교적 저온의 열원으로 난방이 가능한 곳은 태양열시스템 적용가능
* 냉 · 난방 급탕시스템으로 이용하는 경우 부하가 발생하는 시기(하절기)에 일사의 강도도 크고 태양열 시스템을 연중 이용 가능한 장점

○ 태양광 시스템(Photovoltaic System, PV)

- 원리 및 구성

* 원리: 태양으로부터 오는 빛에너지를 태양전지(solar cell)를 통해 전기에너지로 변환하여 생산된 직류(DC) 전기를 인버터를 통해 교류(AC)로 바꿔 주어 축전지에 저장하거나, 직접 필요 부하에 공급하는 방식
* 구성: 태양전지(모듈), 전력조절장치, 인버터, 축전지, 보조발전기





[그림2.66] 태양광 시스템 구성도(한국에너지공단)

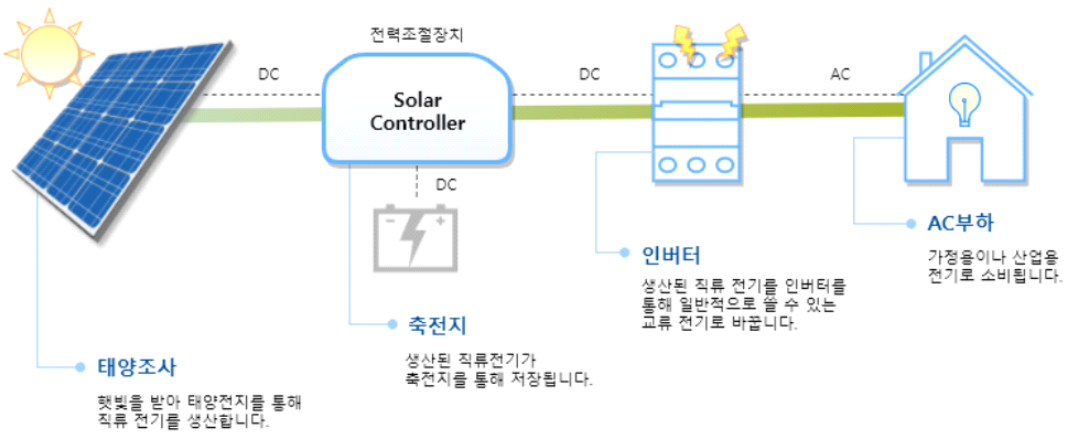
- 유형

* 독립형 시스템(Stand Alone System): 외딴 섬과 같이 전기가 들어오지 않는 지역에서 태양광발전으로

만 전기를 공급하는 방식이며, 전기를 발전하는 태양광 모듈, 심야나 악천후에도 전기를 쓰기 위한 전기를 저장해 둘 축전지, 발전된 직류를 이용가능한 교류로 전환시켜주는 인버터로 구성

· 심야나 악천후에 축전지에 저장해둔 전기를 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 축전지가 환경파괴의 원인이 된다는 점, 충전 및 방전에 따른 효율저하, 3~4년으로 짧은 축전지 수명에 따른 교체 비용 등이 단점

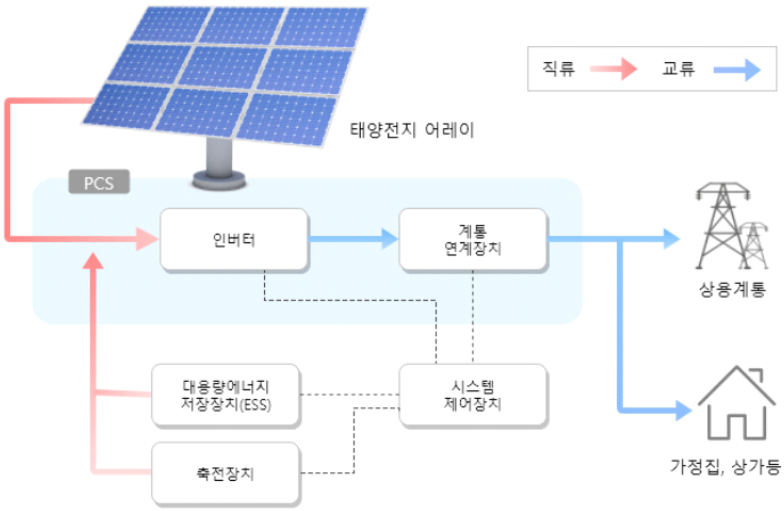
· 가정용 독립형(off-grid domestic: 오지, 도서지역의 주택 전력공급용)과 비가정용 독립형(off-grid non-domestic: 통신, 양수펌프, 약품 냉동보관, 안전표지, 제어 및 항해 보조도구 등 소규모 전력공급용)로 구분가능



[그림2.67] 독립형 시스템 구성도(출처: 현대솔라에너지(주)

* 계통연계형 시스템(Grid-Connected System): 태양광발전으로 얻은 전기와 전력회사에서 공급하는 전기를 함께 사용하는 시스템으로, 주요 구성장치는 태양광발전기와 생산된 전기를 교류로 바꾸어서 전선망으로 보내는 역 송전장치(인버터)

· 심야나 악천후처럼 태양광전기를 공급받을 수 없을 때는 기존 전력시스템으로부터 전기를 공급받고, 태양광발전으로 얻은 전기가 남을 때에는 전력회사로 보낼 수도 있으며, 축전지가 불필요



[그림2.68] 계통연계형 시스템 구성도(현대솔라에너지(주)

- 장 · 단점

[표 2.30] 태양광 시스템의 장·단점

장점	단점
· 에너지원이 청정·무제한 · 필요한 장소에서 필요량 발전가능 · 유지보수가 용이, 무인화 가능 · 긴수명(20년 이상)	· 전력생산량이 지역별 일사량 의존 · 에너지밀도가 낮아 큰 설치면적 필요 · 설치장소가 한정적, 시스템 비용이 고가 · 초기투자비와 발전단가 높음

*출처: 한국에너지공단

- 태양광 시스템의 건물적용

* 건물일체형 태양광발전(Building Integrated Photovoltaic, BIPV): 아파트나 주택의 지붕에 설치하거나 건물의 외벽에 외부마감재로 일체화 시키거나 채광형으로 커튼월, 차양, 유리창 등 건물과 통합적으로 일체화시켜 설치가능

  · 전기에너지 생산과 동시에 지붕, 피사드, 블라인드 등과 같이 건물외피와 결합하여 또 다른 기능 제공 가능, PV시스템을 위한 별도의 부지확보 비용과 PV시스템 지지를 위한 구조물 건립비용 불필요

  · BIPV 시스템의 효율에 있어서 가장 큰 문제는 PV 모듈의 온도상승(25° C 기준으로 모듈온도가 1° C 상승할 때마다 모듈의 전기효율은 0.5%씩 저하됨)

○ 태양광 · 열 시스템(Solar Photovoltaic Thermal System, PVT)

- 원리 및 구성

* 원리: 기존 PV 시스템에서 폐열(모듈 후면에서 발생)로서 버려졌던 열을 난방이나 온수의 열원으로 활용하여 전기와 열을 동시에 생산, 즉 태양열 시스템과 태양광 시스템이 하나로 통합된 시스템

  · PV모듈 후면의 폐열을 이용하여 건물이나 시설에 소요되는 난방에너지의 사용을 줄일 수 있으며, 여름철에는 공간내에서 더워진 내부공기를 외부로 배출함으로써 건물의 냉각효과 증대

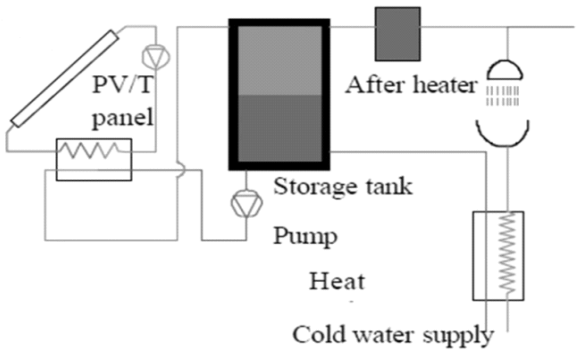
  · PV모듈의 전기 생산과정에서 발생하는 열을 건물내부로 유입시킴으로써 PV모듈 온도 감소를 통해 PV 시스템의 효율 극대화

* 구성: PV모듈과 태양열 집열장치를 결합함

- 유형(열 전달매체에 따른 분류)

* 액체식: PV모듈에 흡수판과 열매체 도관이 부착된 형태로 열매체를 물이나 부동액 등의 액체를 이용함, 공기식보다 좀 더 적극적으로 집열하여 건물 난방이나 온수 활용

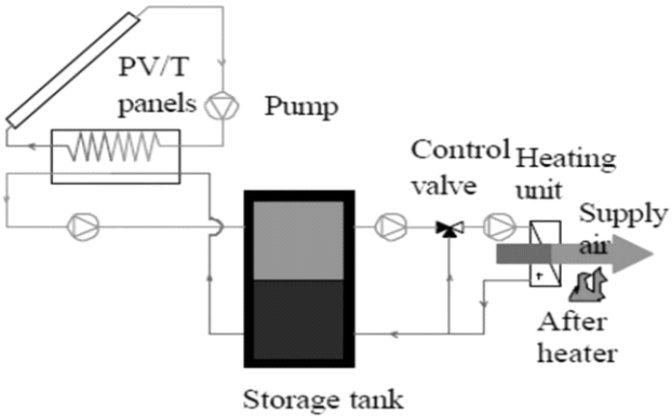
  · 공기식에 비해 작은 용적의 덕트를 흐르는 유체를 이용하여 시간적, 물리적인 냉각효율향상, 열의 효율적인 저장이 용이하나, 동결 및 과열, 누수에 의한 결함 및 피해 위험성 증가



[그림2.69] 액체식 PVT 시스템 구성도
(출처: 김상열 외 1인(2014), "태양광열(PVT) 복합 시스템의 연구 동향 분석")

* 공기식: PV모듈에 공기층 및 채널을 설치하여 열매체를 공기로 이용하며, 열을 직접 건물의 실내로 유입(팬으로 강제순환 또는 자연 통풍)하여 난방 및 온수 설비에 사용

  · 동결 및 과열, 누수에 의한 결함 및 피해 위험성이 적으나, 열효율을 위해 높은 공기유량 및 큰 용적의 덕트가 요구되며 팬 소음 발생



[그림2.70] 공기식 PVT 시스템 구성도
(출처: 김상열외 1인(2014), "태양광열(PVT) 복합 시스템의 연구 동향 분석")

- 장점

* 전기와 열을 동시에 생산하기 때문에 태양광발전시스템과 태양열 집열기를 개별적으로 설치하는 것에 비해 설치면적을 줄일 수 있고, 설치면적을 고려했을 때 단독적인 태양광발전이나 태양열 집열기보다 많은 양의 에너지를 동시에 생산가능

- 태양광 · 열 시스템의 건물적용

* 건물일체형 태양광·열시스템(Building Integrated Photovoltaic/Thermal, BIPVT)

  · BIPV 시스템 개념의 연장선으로 태양광 · 열 복합시스템을 건물의 한부분으로 활용

  · 기존 BIPV 시스템의 낮은 효율과 초기 투자비가 높다는 단점을 보완하는 기술로 BIPV 시스템에 태양열을 집열하는 기능이 추가된 기술

* 건물외피에 적용되는 위치에 따라 지붕통합형, 입면통합형으로 구분

  · 지붕통합형: 기존 건물에 적용이 용이하며 일사획득이 가장 용이한 방법으로 표면적 대비 지붕 면적이 큰 건물 유형에 적합함, 경사지붕에 자연스럽게 모듈 설치가 가능하고 기존 지붕공사공법을 그대로 사용하여 쉽게 시공가능

  · 입면통합형: 입면에 일반적으로 사용하는 벽돌, 석재, 금속판넬을 대신하여 PVT시스템을 건물에 통합적으로 적용가능함, PV모듈과 외벽사이에 공기층을 두어 단열효과 증가와 모듈 후면의 발생하는 열로 건물의 에너지 부하 감소효과(외벽의 기능을 만족하기 위해 유수의 차단, 단열 차음 등의 기술적인 부분과 최적의 향과 경사각, 음영영향 등 환경적인 부분 고려 필요)

* PVT는 각국의 제로에너지건물정책과 관련 필수적인 아이템으로 각광받고 있으나 국내의 경우, PVT 상용화를 위한 개발단계에 있고, 빠른 보급을 위해 PVT 기준과 표준마련 등이 시급

[열원시스템 검토 결과]

본 연구에서는 TCP 내 모세관 튜브에 유체의 흐름이 필수적이므로 에너지효율 향상을 위한 열원시스템으로 액체식 태양열 시스템 또는 액체식 태양광·열 시스템이 적절한 것으로 판단

액체식 태양광 · 열 시스템이 보다 이상적이나, 국내에서는 아직 개발단계이고 설치사례가 많은 태양열시스템 설비를 쉽게 활용할 수 있는 측면에서 액체식 태양열 시스템을 우선적으로 고려

❑ TCP 복합시스템 특허 출원

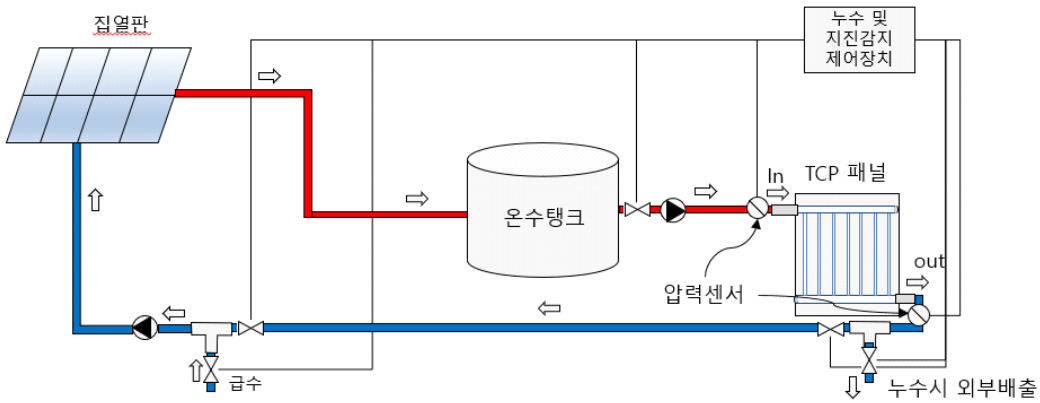
○ TCP 복합시스템 특허 출원

- 본 연구에서는 이상의 난방용 패널, 태양열 난방시스템, 온수배관 누수감지 및 난방시스템 고장진단과 관련하여 기 출원 또는 등록된 특허들에 대한 조사 및 분석을 통해 열원으로 태양열을 고려한 TCP 복합시스템(발명의 명칭: “복합패널시스템 및 이을 이용한 조적조 건축물의 보강방법”) 특허를 출원함(제10-2020-0131690호)

  * 1차년도에 기출원된 “텍스타일 그리드 보강재 및 모세관 튜브 매립형 복합패널 및 이를 이용한 조적조 건축물의 보강방법”은 2020년 4월 28일 특허등록됨(특허 제10-2107836호)

- 본 특허는 텍스타일 그리드 보강재 및 모세관 튜브 매립형 복합패널을 현장에서 신속하게 연결 설치할 수 있도록 하면서, 지진감지와 누수제어, 내진성능 및 단열성능 향상이 가능한 복합패널시스템 및 이를 이용한 조적조 건축물의 보강방법에 관한 것임

  * 지진감지와 누수제어 기능은 본 연구에서 구현되지는 않음



[그림2.71] 본 발명의 복합패널시스템 구성예시도

❑ 열원(태양열)을 고려한 TCP 복합 시스템 설계 시방 개발

○ TCP 태양열 복합시스템 개요

- 태양열 패널에 의해 태양열 에너지를 흡수, 저장하고 TCP 내 CT를 이용한 열교환을 통해 조적조 건축물 내부 에너지효율을 향상시키는 시스템으로 다음으로 구성

  ① 집열부 : 태양 에너지를 집열하는 장치

  ② 축열부 : 집열되는 에너지를 보관, 열교환 하는 장치

  ③ 이용부 : TCP 보강재

○ TCP 태양열 복합시스템 설계 방향

- 태양열 설치요건

  ① 건축물 위치에서의 현재 및 미래 태양광 확보 가능성 확인

  ② 보강 건축물의 기본적 단열성능 확보(부족한 경우 단열에 대한 보강 필요)

- 기본계획

  ① 태양열은 주간에서 집열이 가능하므로 축열조 설치

  ② 열부하가 적도록 온수 이동 경로 단축

  ③ 축열조, 온수관에 대한 보온재 설치로 열손실 최소화

  ④ 온수의 이동은 외부 전원사용을 최소화하고 대류 등 활용

  ⑤ 가능한 경우 보조열원 계획 수립

  ⑥ 기타 유지관리 사항에 대한 계획 수립

- 집열기 배관은 내식성이 있고 시스템의 최고 도달온도(45℃)에 견딜 수 있는 배관재료 선정하고 이종금속이 동일 배관계에 존재하는 시스템에서는 매개 이음을 사용. 집열기 배관에서는 동결방지대책을 수립(낙수시스템의 채용, 부동액 사용)

○ TCP 태양열 복합시스템 설계 기준

- 일반건물 대상 시스템 설계도



(태양열 시스템)

◪ 진공관형 태양열 집열기

장비 번호	수 량 (대)	형 식	용 도	재 질	크 기 (mm) (L x W x H)	설 치 위 치	비 고
SC 1	4SET	단일진공관형	태양열 집열	-	-	지상	표준 부속품 일체 구비
CB 1	1	태양열자동제어	시스템제어	-	-	보일러실	표준 부속품 일체 구비

◪ 태양열 탱크류(Tank)

장비 번호	수 량 (대)	용 량 (LIT)	형 식	용 도	크 기 (D x H x t1 x t2) (mm)	설 치 위 치	재 질	비 고
DT 1	1	600	밀 폐 형	태양열 축열	ø900 x 1,100H	보일러실	STS304	표준 부속품 일체 구비
ET 1	1	12	밀폐형평창탱크	집열측 평창수저장	-	보일러실	SS400	표준 부속품 일체 구비
ET 2	1	100	밀폐형평창탱크	축열조 평창수저장	-	보일러실	SS400	표준 부속품 일체 구비
ET 3	1	30	열매체보충탱크	열매체보충탱크	-	보일러실	PE	표준 부속품 일체 구비

◪ 태양열용 기타장비

장비 번호	수 량 (대)	형 식	용 도	재 질	용 량 (kcal/h)	소비전력 (kW)	전 원 (ph/V/Hz)	설치위치	비 고
HE 1	1	브레이징열교환기	집열 : 축열 열교환	STS304	15,000	-	-	보일러실	표준 부속품 일체 구비

◪ 태양열용 펌프류

장비 번호	수 량 (대)	형 식	용 도	유 량 (LPM)	양 정 (m)	구 경 (mm) 흡 입	구 경 (mm) 토 출	전 동 기 *동 력 (W)	전 동 기 전 원 (ph/V/Hz)	설 치 위 치	비 고
SP 1	2	순환용	집열측 순환펌프	10	5	25	25	115	1/220/60	보일러실	표준 부속품 일체구비
SP 2	2	순환용	축열측 순환펌프	16	4.5	25	25	115	1/220/60	보일러실	표준 부속품 일체구비
SP 3	1	가압용	보충수 가압펌프	20	21	32	32	200	1/220/60	보일러실	표준 부속품 일체구비

1 M 태양열 장비 일람표

HLMEC

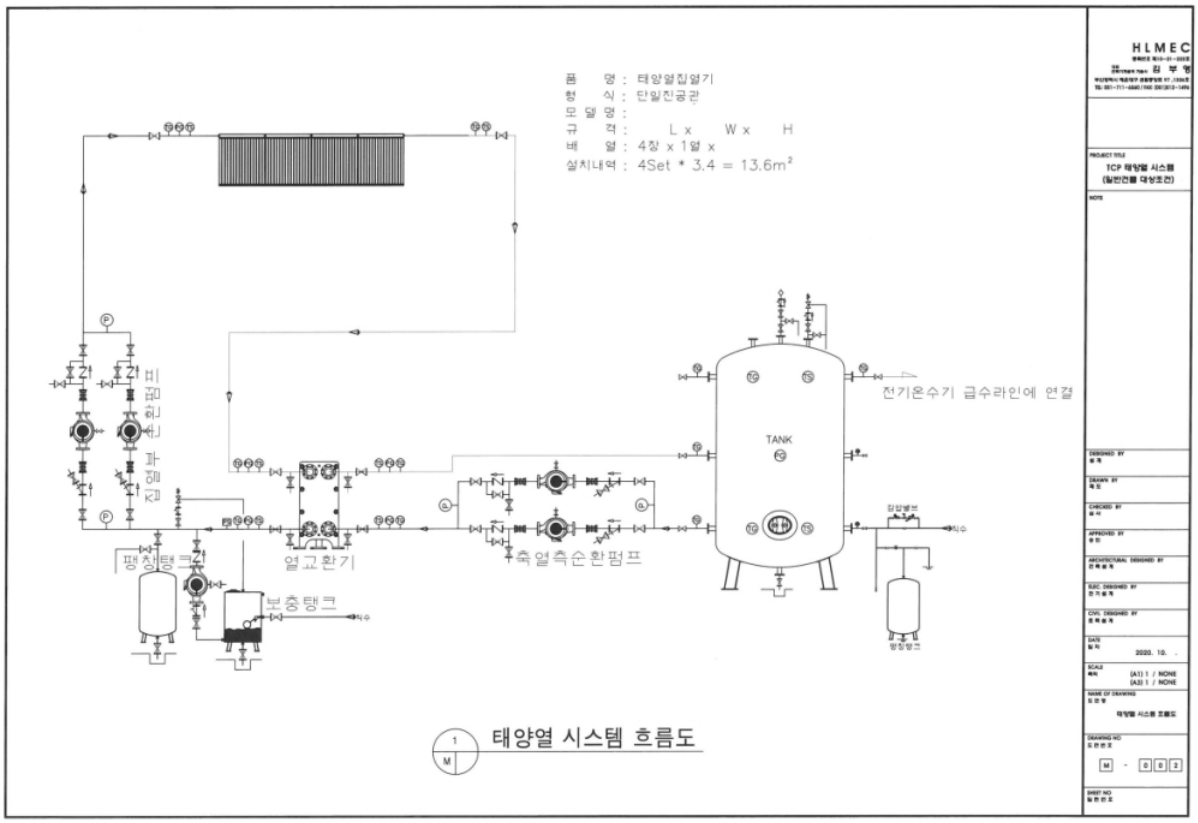
TCP 태양열 시스템 (일반건물 대상조건)

2020. 10.

(A1) 1 / NONE
(A3) 1 / NONE

M - 001

(a) 태양열 장비 일람표(일반건물 대상)



1 M 태양열 시스템 흐름도

HLMEC

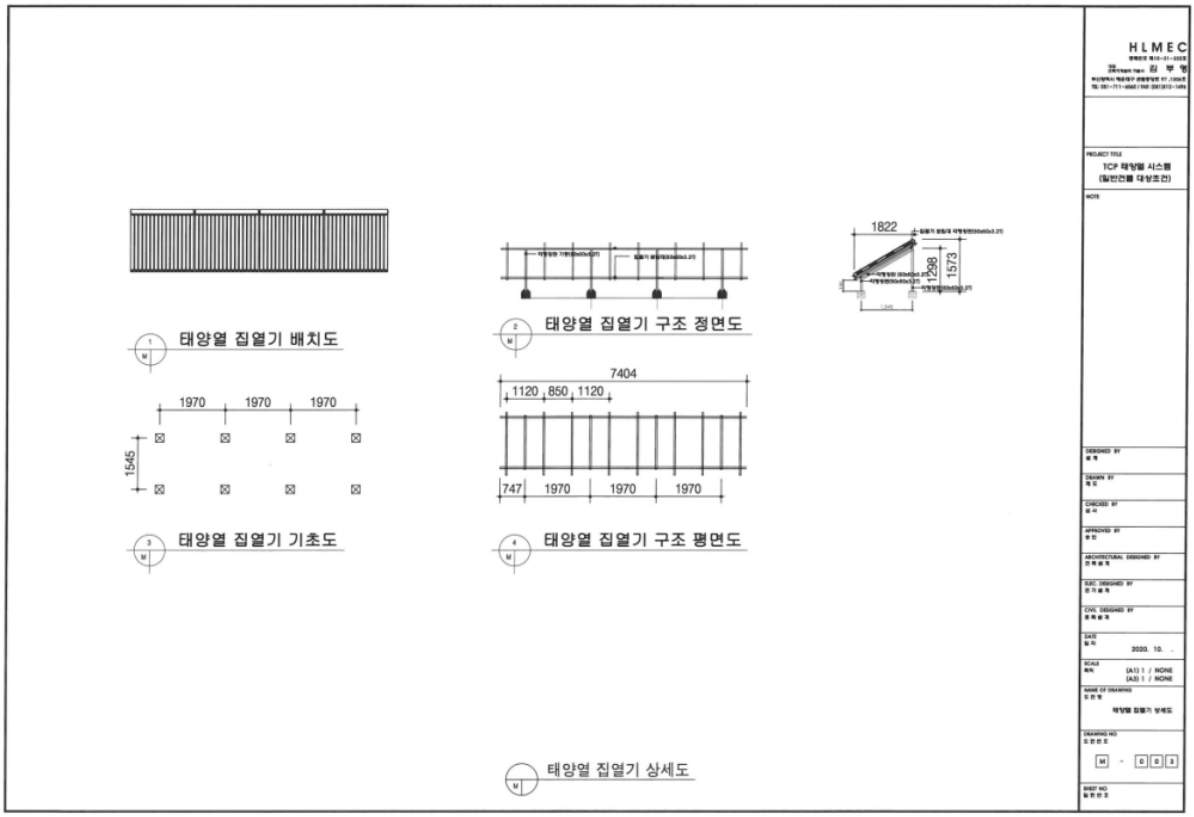
TCP 태양열 시스템 (일반건물 대상조건)

2020. 10.

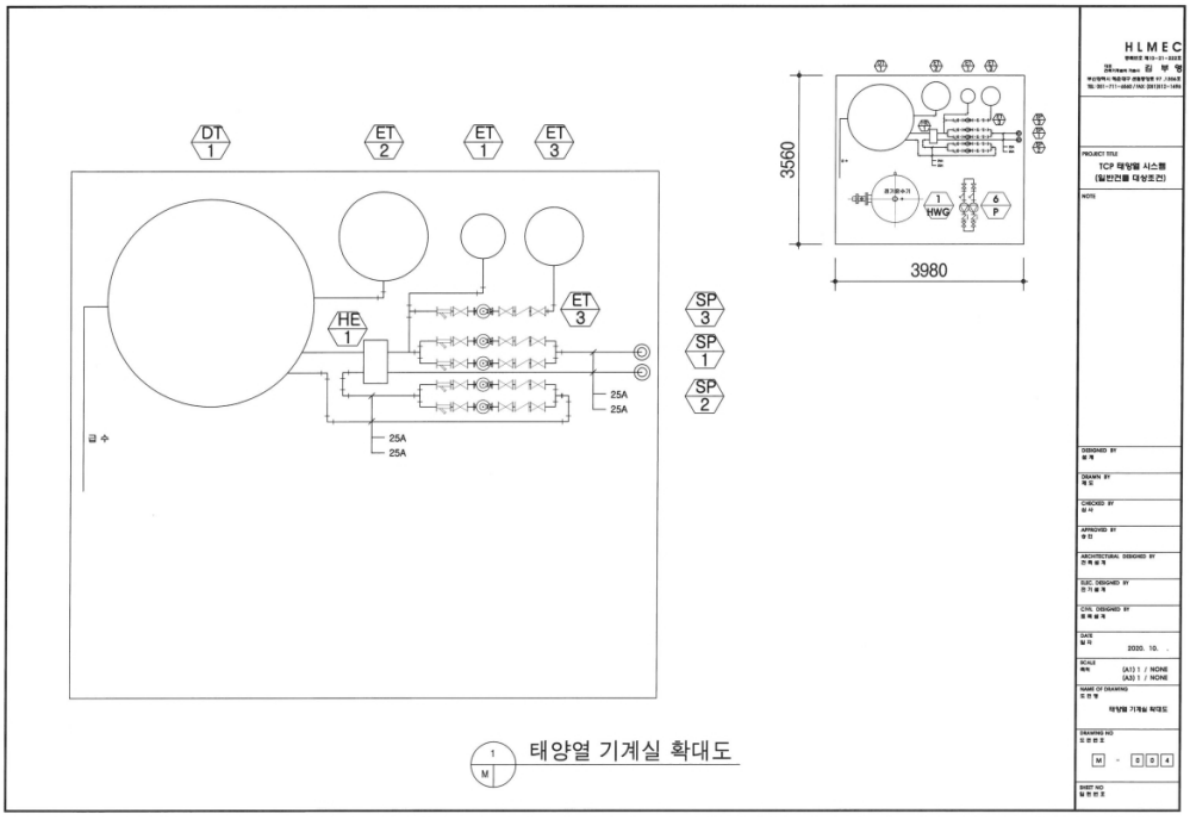
(A1) 1 / NONE
(A3) 1 / NONE

M - 002

(b) 태양열 시스템 흐름도(일반건물 대상)



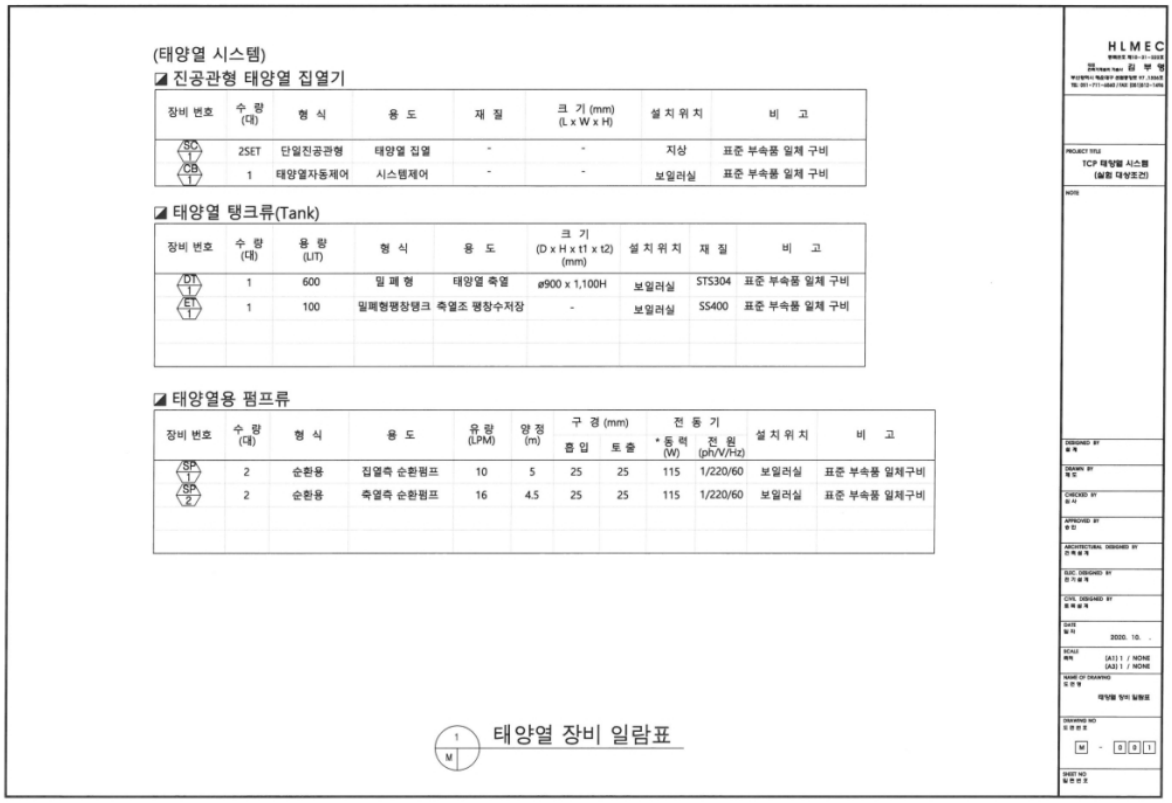
(c) 태양열 집열기 상세도(일반건물 대상)



(d) 태양열 기계실 확대도(일반건물 대상)

[그림2.72] 일반건물 대상 시스템 설계도

- 실험 대상 시스템 설계도



(태양열 시스템)

◪ 진공관형 태양열 집열기

장비 번호	수 량 (대)	형 식	용 도	재 질	크 기 (mm) (L x W x H)	설 치 위 치	비 고
SC 1	2SET	단일진공관형	태양열 집열	-	-	지상	표준 부속품 일체 구비
CB 1	1	태양열자동제어	시스템제어	-	-	보일러실	표준 부속품 일체 구비

◪ 태양열 탱크류(Tank)

장비 번호	수 량 (대)	용 량 (LIT)	형 식	용 도	크 기 (D x H x t1 x t2) (mm)	설 치 위 치	재 질	비 고
DT 1	1	600	밀 폐 형	태양열 축열	ø900 x 1,100H	보일러실	STS304	표준 부속품 일체 구비
ET 1	1	100	밀폐형평창탱크	축열조 평창수저장	-	보일러실	SS400	표준 부속품 일체 구비

◪ 태양열용 펌프류

장비 번호	수 량 (대)	형 식	용 도	유량 (LPM)	양정 (m)	구 경 (mm)		전 동 기		설 치 위 치	비 고
						흡 입	토 출	* 동 력 (W)	전 원 (ph/V/Hz)		
SP 1	2	순환용	집열측 순환펌프	10	5	25	25	115	1/220/60	보일러실	표준 부속품 일체구비
SP 2	2	순환용	축열측 순환펌프	16	4.5	25	25	115	1/220/60	보일러실	표준 부속품 일체구비

1 M 태양열 장비 일람표

HLMEC

PROJECT TITLE: TCP 태양열 시스템 (실험 대상조건)

NOTE

DESIGNED BY 설 계

DRAWN BY 작 도

CHECKED BY 검 사

APPROVED BY 승 인

ARCHITECTURAL DESIGNED BY 건축설계

ELEC. DESIGNED BY 전기설계

CIVIL DESIGNED BY 토목설계

DATE 일 자 2020. 10. .

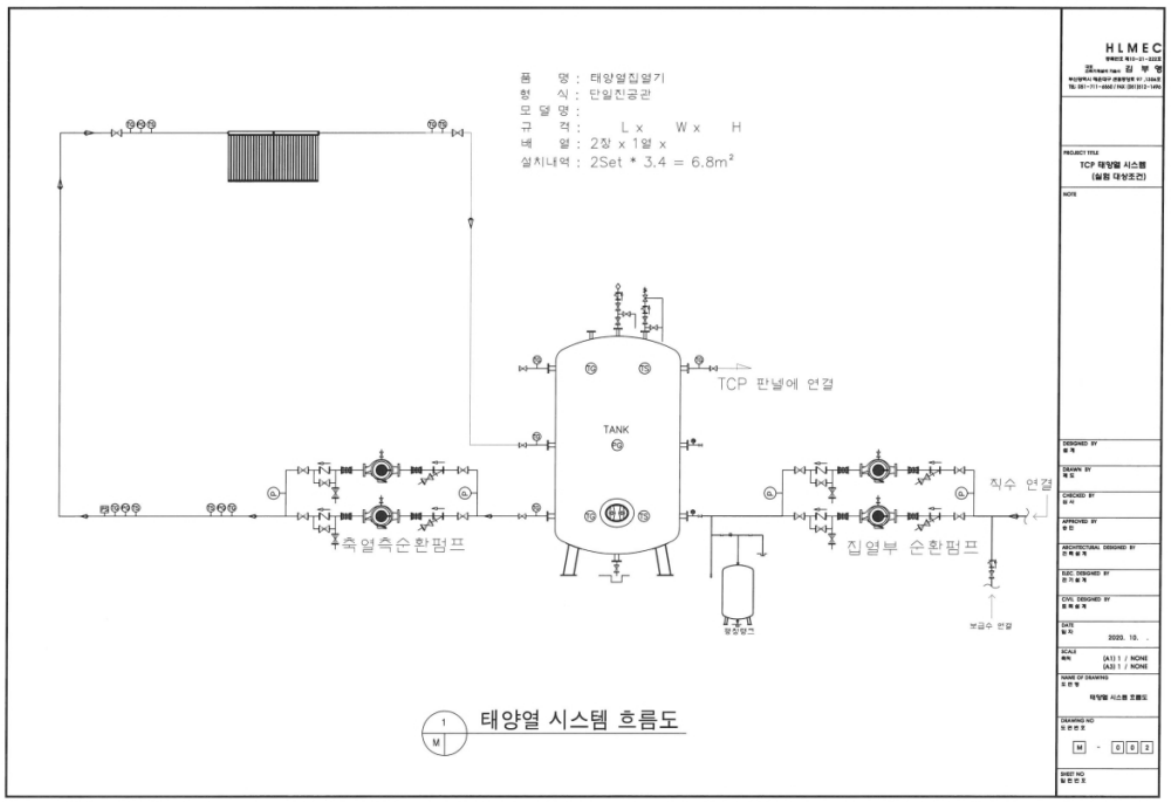
SCALE 축척 (A1) 1 / NONE (A3) 1 / NONE

NAME OF DRAWING 도면명 태양열 장비 일람표

DRAWING NO 도면번호 M - 001

SHEET NO 일련번호

(a) 태양열 장비 일람표(실험 대상)



1 M 태양열 시스템 흐름도

HLMEC

PROJECT TITLE: TCP 태양열 시스템 (실험 대상조건)

NOTE

DESIGNED BY 설 계

DRAWN BY 작 도

CHECKED BY 검 사

APPROVED BY 승 인

ARCHITECTURAL DESIGNED BY 건축설계

ELEC. DESIGNED BY 전기설계

CIVIL DESIGNED BY 토목설계

DATE 일 자 2020. 10. .

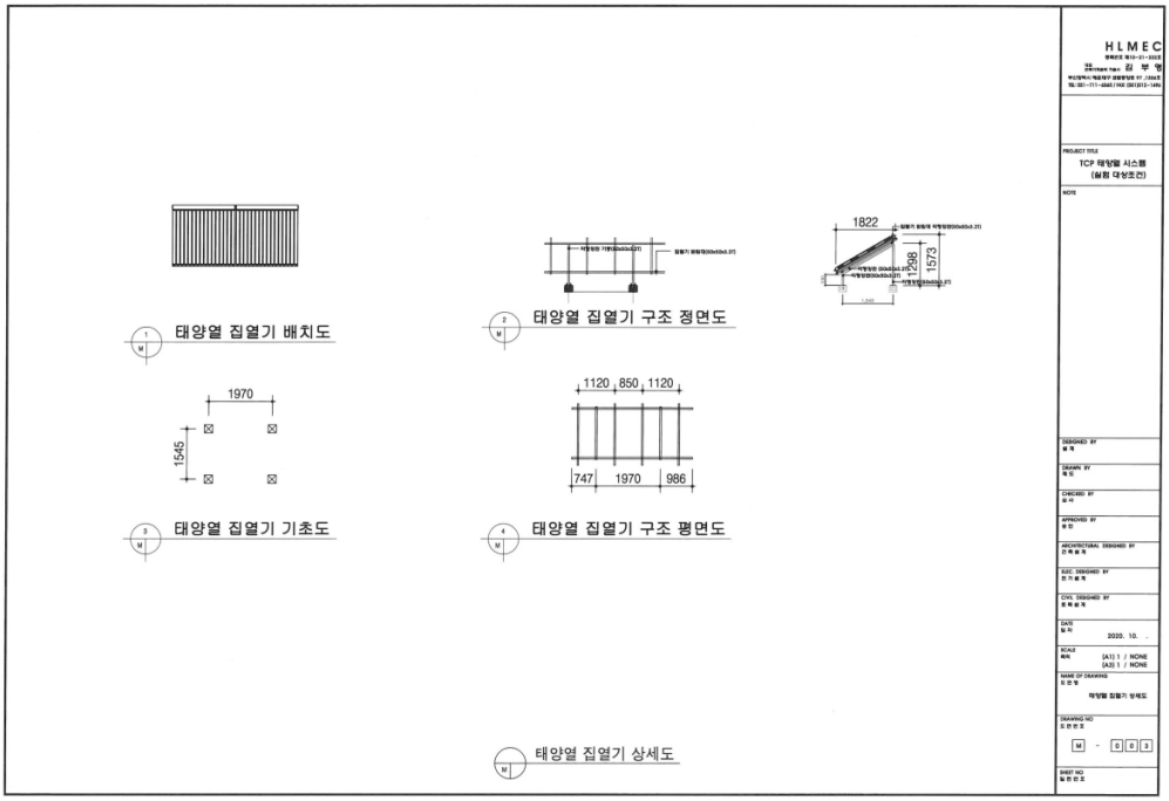
SCALE 축척 (A1) 1 / NONE (A3) 1 / NONE

NAME OF DRAWING 도면명 태양열 시스템 흐름도

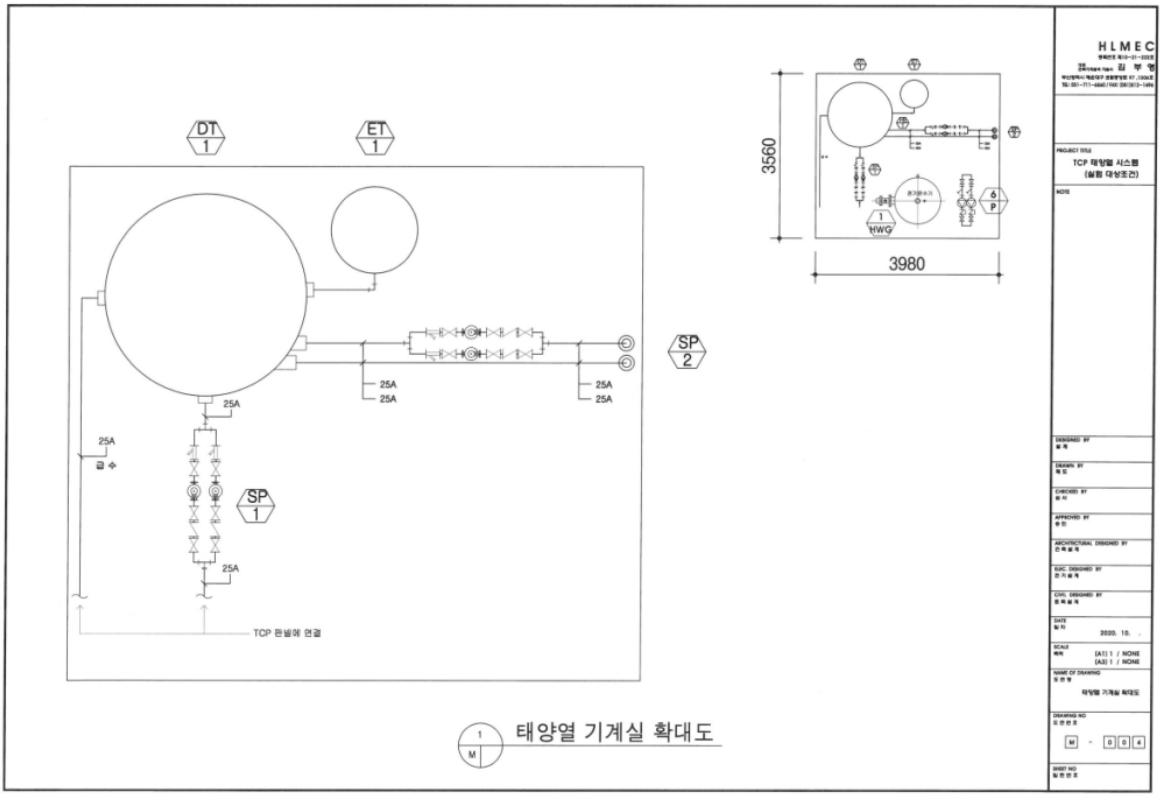
DRAWING NO 도면번호 M - 002

SHEET NO 일련번호

(b) 태양열 시스템 흐름도(실험 대상)



(c) 태양열 집열기 상세도(실험 대상)



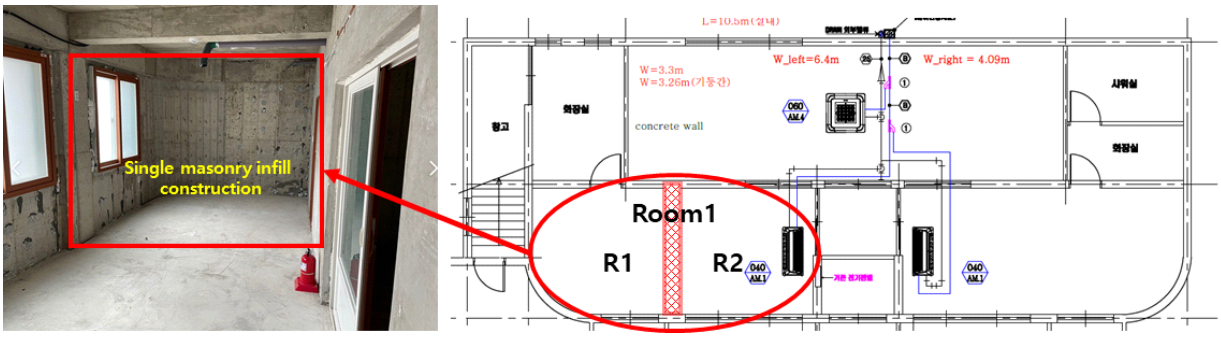
(d) 태양열 기계실 확대도(실험 대상)

[그림2.73] 실험 대상 시스템 설계도

(7) TCP 시스템의 현장적용 실험

○ TCP 현장적용 TEST BED 및 실험 환경

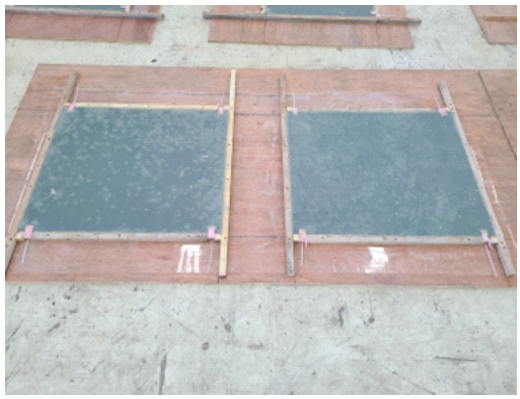
- (TEST BED) 부산 소재의 (구)무량마을회관으로 철근콘크리트조 지상 2층 건물(연면적 240.2㎡)
- (현장 조건) 철근콘크리트 골조 형식의 내부 공간에 2.5m x 2.88m 조적벽체를 시공하여 두 개의 공간으로 분리하여 실내외 환경을 조성하여 현장적용 실험 수행
  * 실내환경 : 24도 유지, 실외환경 : 개구부 개방하여 외기 조건과 유사하게 조성
- (실험 방법) 실제 건물에 TCP 보강 공사를 수행하여 시공성과 현장적용성 평가, 열원시스템 구축하여 구동성 및 에너지 성능 평가
- (실험 기간) 2021.01.18. - 2021.02.15



[그림2.74] 현장 평면도 및 조적벽 신설 위치



(a) 조적벽체 시공후



(b) TCP 제작

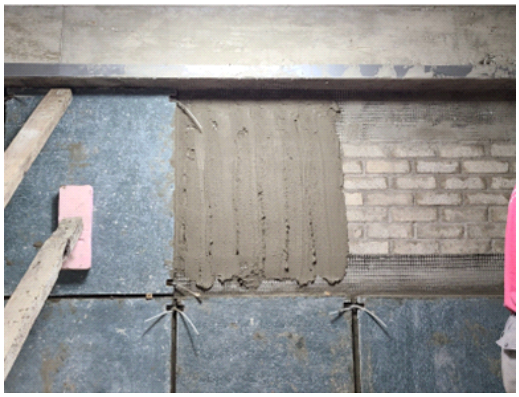


(c) TCP 시공전 연결부 사전 보강



(d) TCP 부착면

[그림2.75] TCP 시공 실험 (계속)



(e) TCP 부착

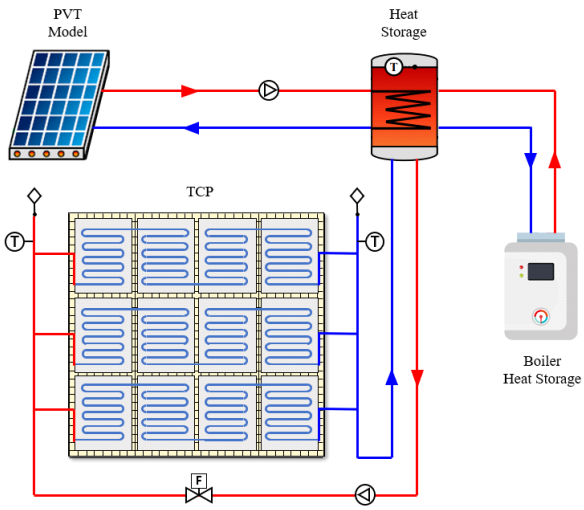


(f) TCP 부착완료후 양생

[그림2.76] TCP 시공 실험

○ TCP 시스템 구축

- 주열원으로 태양열 적용하였으며 현장에 기존연구에서 사용한 태양광열(PVT) 시스템을 활용하여 TCP 시스템의 열원시스템을 구축
- 태양열의 경우 기후 조건에 따라 집열이 원활하지 않을 것을 고려하여 보조열원으로 보일러 채용



[그림2.77] TCP 시스템 구성



[그림2.78] TCP 배관연결 현황



(a) PVT : 발전용량 3kW



(b) 축열조 : 용량 300L



(c) 보일러 : 22,000kcal/hr

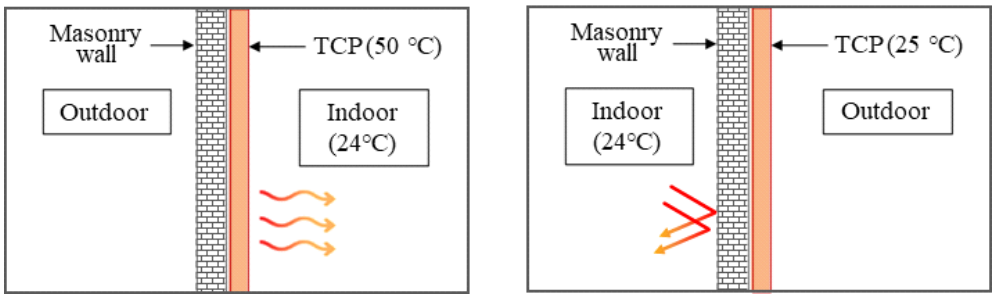
[그림2.79] 시스템 재원

○ TCP 시스템 구동 검사 및 에너지 성능 평가

- (시스템 구동 방법) 주열원(태양열)과 보조열원(보일러) 사용 조건에 따라 2가지 구동 방법 설정
  * 주열원 사용(보조열원 미사용)시 축열 방법 : 태양열 물탱크 → 실험체 인입관 → 순환펌프 → 유량계 → 수압계 → 온도계(인입) → TCP 인입 → TCP 인출 → 온도계(출수) → 출수관 → 태양열 물탱크
  * 보조열원 사용시 축열 방법 :보일러 작동 → 태양열 물탱크 → 온수 출수 → 실험체 인입관 → 순환펌프 → 온도계(인입) → 유량계 → 수압계 → TCP 인입 → TCP 인출 → 온도계(출수) → 출수

관 → 태양열 물탱크

- (에너지 성능 평가 실험 조건) TCP는 설치 위치에 따라 단열과 난방의 기능 수행 가능함. 본 실험에서는 실내에 조적벽을 설치하고 한쪽 공간을 실내, 반대쪽 공간을 실외로 가정하여 환경을 조성함. TCP의 시공 위치는 부동이므로 시공된 면을 실내와 실외 환경으로 각각 조성하여 실내측 설치와 실외측 설치 조건을 가정하여 단열과 난방 기능 수행 가능성을 평가함.
  * 단열 : 외벽의 외부면에 설치하여 실내 온도보다 최소 2~3℃ 정도 높은 온수를 공급하면 열 이동 원리(고온→저온)에 따라 실내의 열이 외부로 방출되지 않아 단열 기능을 수행
  * 난방 : 실내 벽면에 설치하여 난방수(50℃ 이상)를 공급하여 실내 공기를 데우는 난방 보조 기능을 수행



(a) 실내측 설치 (난방기능) (b) 실외측 설치 (단열기능)

[그림2.80] 에너지 성능평가를 위한 현장 실험 조건

- (에너지 성능 평가 방법) 실내외 온도 및 TCP 공급, 환수관의 온도변화를 측정, TCP에서 발생하는 열에너지(Q)를 산정하여 난방 · 단열 효과 및 효율 평가
  * 실험 케이스

[표 2.31] 에너지성능 평가 실험 케이스

Case	축열	방열	보조열원
1	태양열 08시~18시 (10H) 예상출수온도 : 25℃	내측설치 가정 20시 ~ 익일 06시 (10H)	X
2	태양열 08시~18시 (10H) 예상출수온도 : 25℃	외측설치 가정 20시 ~ 익일 06시 (10H)	X
3	태양열 08시~18시 (10H), 보일러 18시~20시 (2H) 예상출수온도 : 50℃	외측설치 가정 20시 ~ 익일 06시 (10H)	O
4	태양열 08시~18시 (10H), 보일러 18시~20시 (2H) 예상출수온도 : 50℃	내측설치 가정 20시 ~ 익일 06시 (10H)	O
5	태양열 08시~18시 (10H), 보일러 45℃ 축열 후 운전 예상출수온도 : 45℃	외측설치 가정 20시 ~ 익일 06시 (10H)	O
6	태양열 08시~18시 (10H), 보일러 25℃ 축열 후 운전 예상출수온도 : 25℃	외측설치 가정 20시 ~ 익일 06시 (10H)	O

(에너지성능 평가결과)

- 태양열 축열량이 충분할 경우, 단열 및 난방 성능을 가질 수 있음을 확인하였음. 다만 외기온의 변화 조건이 단열시 에너지 효율에 큰 영향을 미치는 것을 확인함.
  * case 1, case 2 : TCP 구동 이후 5시간 정도 태양열 축열을 통한 단열 효과가 나타났으나 그 이후에는 축열 온도 저하로 패널이 실내 공기의 열을 흡수하는 역전현상이 발생하였음. 또한 실내와 외기 온도차가 큰 조건에서는 단열 효율성이 저하
  * case 3, case 4 : 보조열원을 이용하여 고온수를 이용한 경우 실내 벽면온도가 실내 온도보다 높은 온도로 유지되었음. 이는 보조열원을 이용할 경우 난방효과도 가질수 있음을 시사함.

* 다만, 보조열원을 이용하는 경우 평균 약 2kW 수준의 난방에너지가 필요하므로 에너지 효율 및 경제적 타당성을 확보하기 위해서는 보조열원을 구동하기 위해 친환경에너지(태양광, 태양광열 등)를 사용하는 것이 바람직함.
* TCP 패널에 필요한 용량 설계는 설치 지역의 최대 난방 부하일을 기준으로 설계할 수 있으며 일일 부하량 만큼 태양열이나 보조열원이 대응할 수 있도록 열원 용량 설계 수반되어야 함.

(8) TCP 시스템 개선

○ 시스템 개선 방법 및 과정

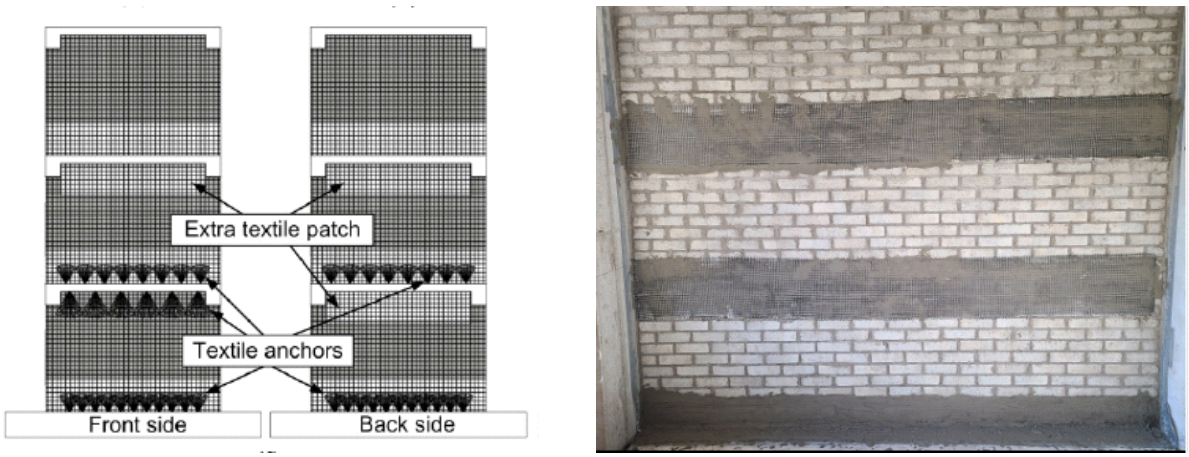
- 연구기간 동안 시제품 제작, 실험체 시공, 내진성능 실험, 현장적용 실험 결과 등을 바탕으로 개선사항을 도출하였으며, 연구기간동안 다음과 같은 과정을 통해 시스템 개선을 수행함.

[표 2.32] TCP 개선사항 요약

항목	문제점	개선사항
구조	보강패널 줄눈 및 가장자리 손상 취약	보강패널 연결부와 가장자리 취약부 위치에 탄소 텍스타일 패치 보강
	비대칭 보강에 따른 손상	TCP 보강 반대면에 TRM 보강 적용
	패널 규격	시공성 고려하여 0.7m × 0.7m 이하 벽체 높이 방향으로 3개 이하 패널 배치할 수 있도록 현장 맞춤형으로 제작
	부착성능 및 줄눈부 강도	탄소섬유를 패널 하부에 배치 TCP 강도와 비슷한 고인장 모르타르 사용
	진동시 시스템 구동 검증	진동대 실험을 통한 손상 여부 검증 배관시스템 및 태양열 시스템의 내진성능 검증은 별도 사항임
시스템	모세관 연결 부품	볼트 조임형 연결 부품(투터치 피팅) 사용
	누수	내압성능(10kgf/cm2)이 있는 볼트조임형 연결부품 사용
	보강공법 적용 위치	단열재로 사용시 실외측 설치 난방재로 사용시 실내측 설치
	복사난방에너지 효율 증가를 위한 외부 보온판	실내측 TCP 적용시 실외측에 TRM-XPS 동시 보강
	배관 배치 계획	천장 또는 슬래브 측에 배관 매립을 위한 공간 확보
시공	모듈화 및 대량 생산 시공시설	모듈화를 위한 추가 연구 필요
	TCP 시공 방법	모듈화 및 대량생산 시공시 시방 준수
	TCP 양생시 위치 고정	끼움목 및 버팀대 사용 시방 추가
	모세관 연결부 시공	볼트 조임형 연결부품 사용 이물질 삽입 방지를 위한 시방 추가

○ 구조체와 보강체의 일체화를 위한 텍스타일 보강 패치 적용

- 패널내 모세관을 연결하고 보강 패널의 시공성 확보를 위해 10㎜ 정도의 줄눈부가 필연적으로 발생하게 됨.
- 보강패널 연결부에 보강체의 연속성과 일체화를 위해 줄눈부의 위치에 탄소 텍스타일 패치를 선시공 후 보강 패널 부착 보강
- 조적벽체면에 TCP를 부착하는 경우에 벽체면의 강도 및 연성 보강효과가 있으나 구조체와 일체화를 위해 TCP 가장자리에 탄소 텍스타일을 연장하여 골조 부재 또는 벽체 접합면을 보강함. 이 때 탄소 텍스타일을 연장하기 어려운 경우 별도의 보강 패치를 선시공함.
  ※ 텍스타일 보강 패치 (Textile reinforcing patch)
- 구조체와 TRM 보강체의 연속성 및 일체화를 위해 구조체(RC 골조, 슬래브, 기초 등)와 TCP 접합면에 걸쳐 섬유 텍스타일을 부착 보강하는 것으로 기존 국외연구(Koutas, 2014)에서 적용됨.
- (성능검증) 조적채움벽 RC 골조의 정적 실험 및 진동대 실험시 RC 구조체와 조적벽체 접합부에 보강패치 적용하여 실험을 수행하여 정적실험시 접합면에서 보강패치에 의해 붕괴 손상이 제어가능함을 확인하였으며, 2층 구조물에 적용하여 진동대 실험을 수행한 결과 구조체와 보강체의 일체화에 효과가 있음을 확인함.
- (개선적용) 현장적용실험시 패널의 수평 줄눈부 및 기초 접합면에 텍스타일 패치 적용



(a) Textile patch 적용 사례(Koutas, 2014) (b) 현장 적용

[그림2.81] TCP 연결부 개선사항 - 텍스타일 보강 패치 적용

○ 부착성능 및 줄눈부 강도 보강을 위한 고인장 모르타르 사용

- TCP 분절에 따른 줄눈부, 특히 수평 줄눈부의 강도가 보강패널부에 비해 상대적으로 강도가 약해 줄눈부가 조기 파괴될 수 있음.
- 조적벽체에 작용하는 인장력에 의해 대각 균열이 발생하며 줄눈부 전단강도가 부족함에 따라 슬라이딩 균열이 발생할 수 있어 줄눈부의 강도 보강이 필요함.
- 이에 대한 개선책으로 TCP 부착 및 줄눈부 모르타르 사춤시 고인장, 고성능 모르타르를 사용하여 강도를 보강하여 개선함.
- 고인장, 고성능 모르타르의 요구사양

압축강도	인장강도
20 MPa 이상	4 MPa 이상

* 조적미장용 모르타르의 압축강도 이상

* TCP 휨강도(3.5 MPa)에 준하는 인장 또는 휨강도 이상

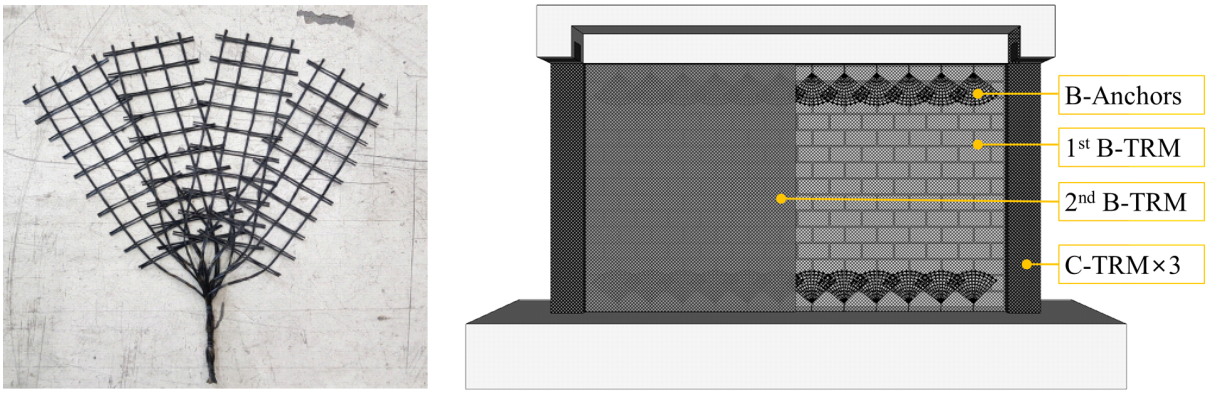
○ TCP 보강 반대면의 보강방법

- TCP는 단열 및 난방을 위해 내부에 모세관을 포함하고 있음. TCP의 보강 목적(단열 또는 난방)에 따

라 벽체의 실외측 또는 실내측 한면에만 설치함.

- 벽체의 대칭적 보강을 위해 반대면에 탄소 또는 바잘트 섬유를 이용한 TRM 공법을 적용함.
- TRM 공법 상세

* 벽체에 탄소 또는 바잘트 텍스타일을 고인장 모르타르를 이용하여 부착 시공하며, 구조체와 조적벽체의 일체화를 위하여 텍스타일 앵커 시공하여 보강



(a) 텍스타일 앵커 (b) TRM 시공 방법

[그림2.82] TCP 반대면 TRM 보강 개선

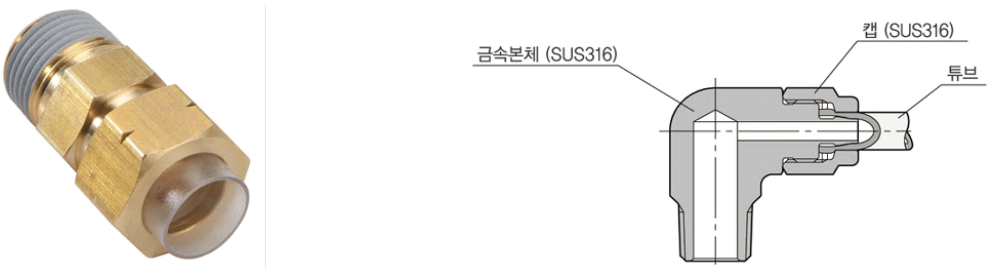
○ 사용압력에 대한 내압성능을 가지는 모세관 연결 부품 개선

- 기존에 니플형 플라스틱 호스 연결부품을 사용하였으나 실리콘의 유연성으로 인해 연결부 누수가 발생하는 것을 개선하기 위해 볼트조임형 연결부품(투터치 피팅)을 사용하는 것으로 개선

※ 투터치 방식 피팅 : 호스를 피팅에 삽입하고 나사체결을 통해 조이는 방식으로 기밀성 및 체결력 우수

- 모세관 연결 부품의 요구 사양

내열온도	내압력	체결방식
60℃ 이상	10 kgf/cm2 이상	볼트조임형



(a) 투터치 피팅 예 (b) 투터치 피팅재 단면

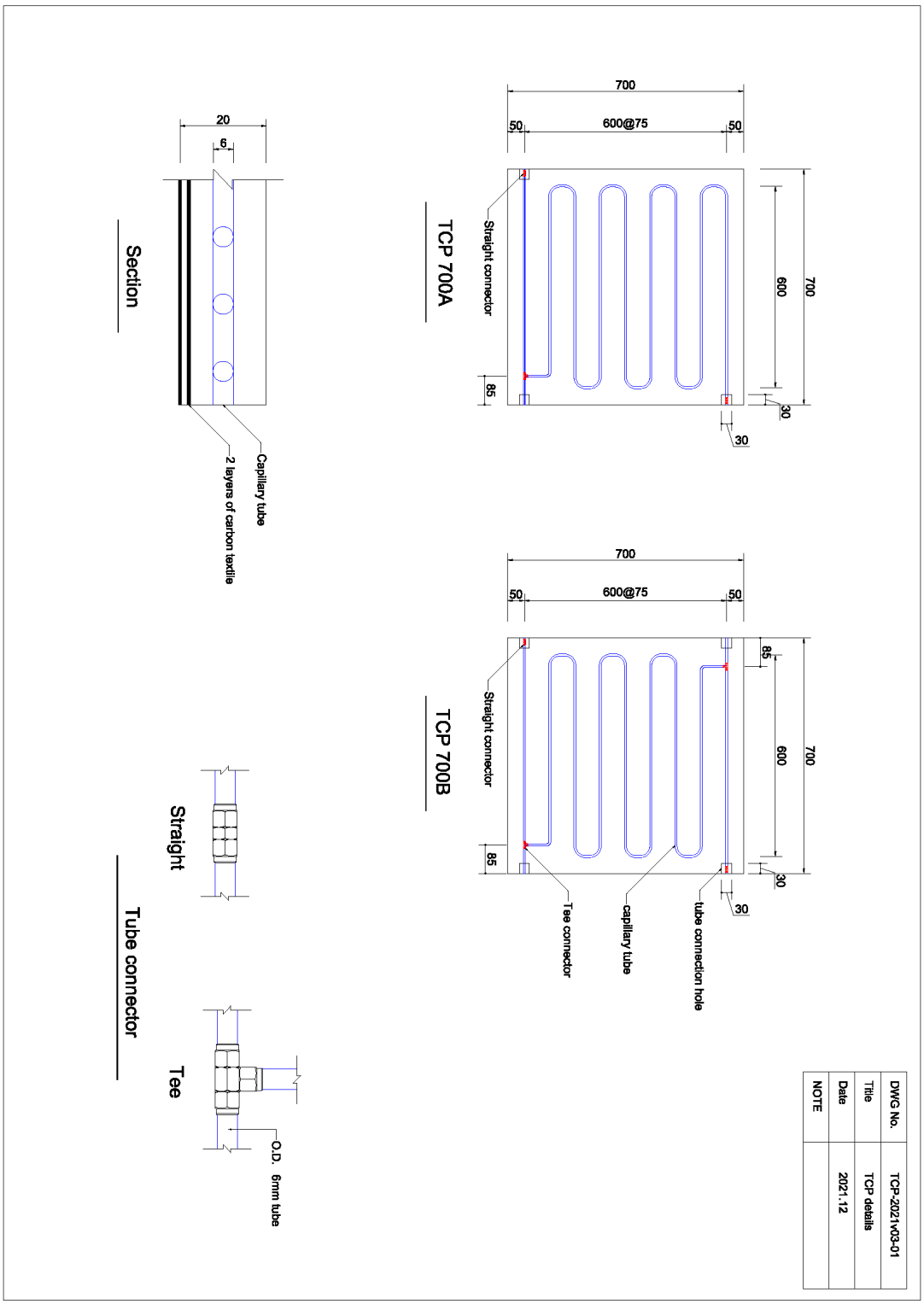
[그림2.83] 모세관 연결 부품 개선사항

○ 보강공법 적용 위치 및 사용사항

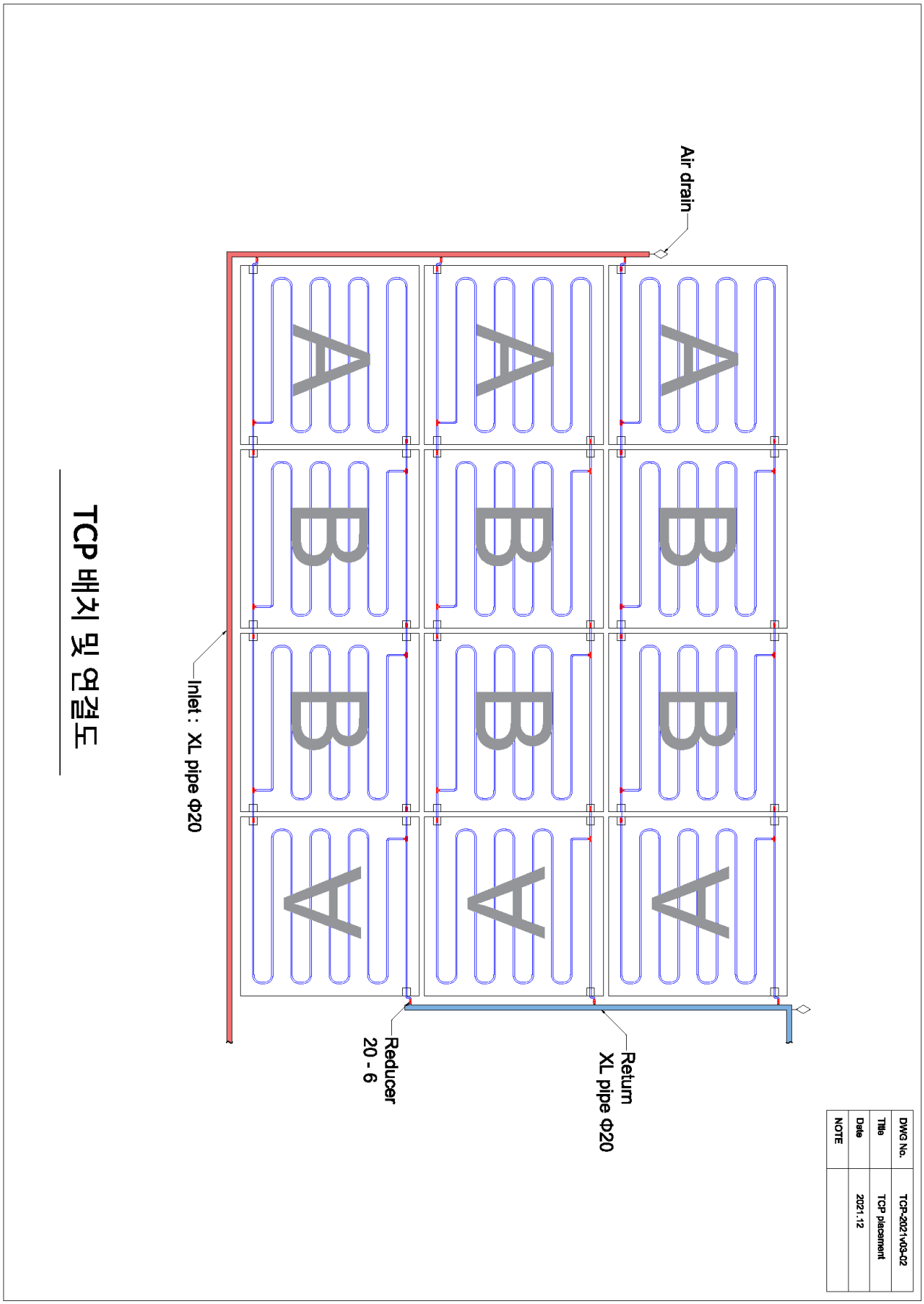
- TCP는 실외 또는 실내 설치 위치에 따라 단열 기능 또는 난방 기능을 수행할 수 있음
- 현장적용실험 결과 실외 설치시 단열효과가 있음을 확인하였으며, 실내 설치시 난방효과가 있음을 검증하였음
- 단열재로 사용시 실외측에 사용하며 패널 내 순환수의 온도는 실내온도보다 2~3도 정도 높게 유지하여야 함
- 난방재로 사용시 실내측에 시공하며 순환수의 온도는 45도 이상 유지하여야 함.
- 이와 같은 사항을 시방서 사용상 유의사항으로 반영

○ 시스템 개선사항의 반영 (설계도 및 시방서 참조)

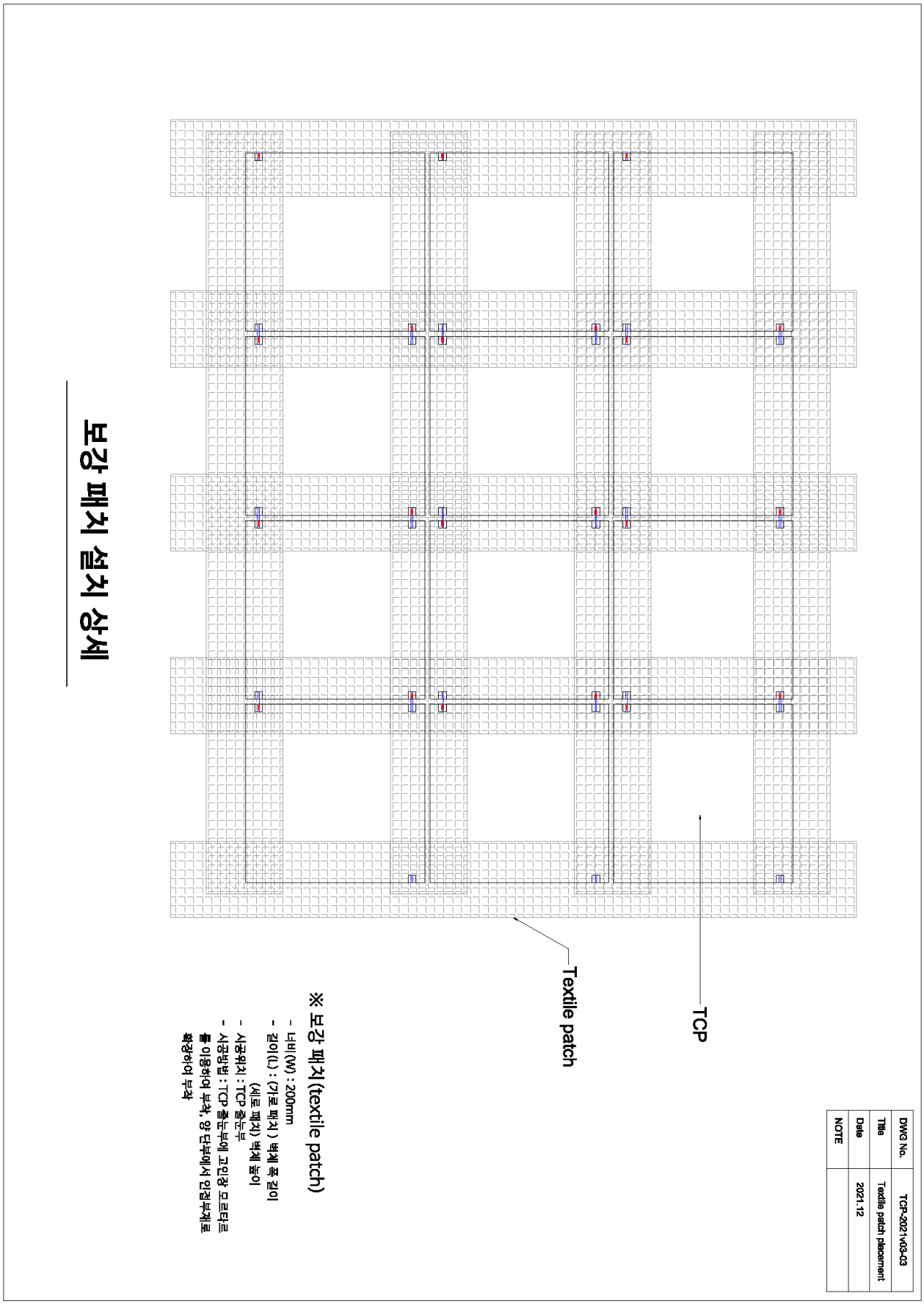
- TCP 설계도



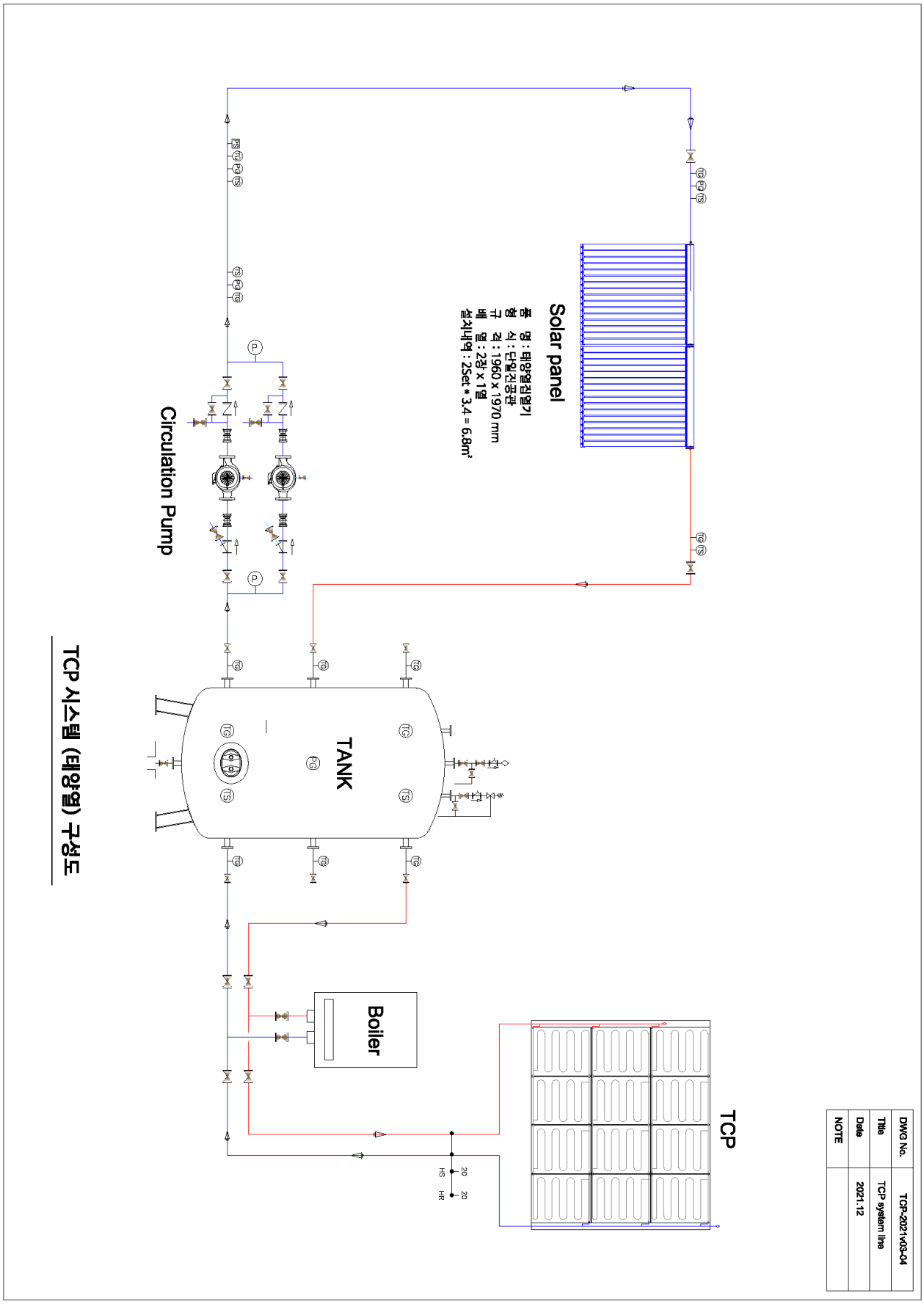
- TCP 배치 및 연결도


TCP 배치 및 연결도
Air drain
Inlet : XL pipe Φ20
Reducer
20 - 6
Return
XL pipe Φ20
A
B
DWG No.
TCP-2021v03-02
Title
TCP placement
Date
2021.12
NOTE

- TCP 줄눈부 보강패치 설치 상세도



- TCP 시스템 설계도


TCP 시스템 (태양열) 구성도
Solar panel
명 칭 : 태양열집열기
용 식 : 단일진공관
규 격 : 1960 x 1970 mm
배 열 : 2장 x 1열
설치내역 : 2Set * 3.4 = 6.8㎡
Circulation Pump
TANK
Boiler
TCP
DWG No.
TCP-20211v03-04
Title
TCP system line
Date
2021.12
NOTE

TCP 내진에너지 복합보강패널 공사 시방서

2021.12

국토교통연구인프라운영원

목 차

1. 일반사항 ---- 1
2. 주요 재료 ---- 2
3. 경량모르타르 배합 ---- 5
4. TCP 제작 ---- 7
5. 텍스타일 앵커 제작 ---- 11
6. TCP 보강 시공 ---- 12
7. 철근콘크리트 골조의 조적채움벽 TRM 보강 시공 ---- 14
8. 조적건물의 조적벽체 TRM 보강 시공 ---- 16

첨부. 제작 시공 예 ---- 18

(9) JRC iRESIST+ 기존 TRM+외단열재 보강공법의 성능 검증 및 결과분석(실험 및 해석, 기존 연구 자료 활용)

❑ 연구 개요

○ 배경 및 목적

- 현재 EU 건축물 현황 중 80%는 현대적인 지진 및 에너지 성능 규정이 시행된 1990년대 이전에 건설됨에 따라 현재의 지진 및 에너지 설계 기준을 만족하려면 이러한 건축물들은 보강이 필요
- 에너지 및 지진 보강을 통합하여 비용 효율성과 인센티브 혁신을 달성할 가능성을 연구한는 것을 목표로 함
- 무기 섬유 기반 복합 재료(TRM)와 단열재를 결합한 새로운 보강 접근방식에 대한 실규모 건물 실험체에 대한 실험 평가를 수행(ELSA Lab)

○ 수행 내용

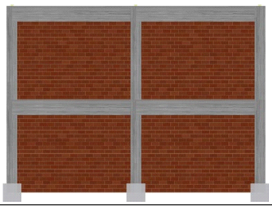
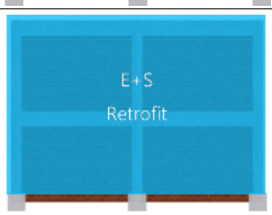
- (실험체) 1970년대 전형적인 철근콘크리트 구조물을 대표하는 프로토타입의 실규모 조적채움벽 RC 건물 실험체 계획 및 제작(2019년 완공)
- (하이브리드 실험) 비보강 건물에 대한 정적 및 유사동적실험 수행 - COVID-19 사태로 연기되어 2021년 수행
- (시뮬레이션) RC 프레임의TRM 내진보강공법에 대한 최신 기술 검토 및 TRM 보강 골조에 대한 해석모델 개발, 보강 전후 실험체에 대한 지진응답해석 수행

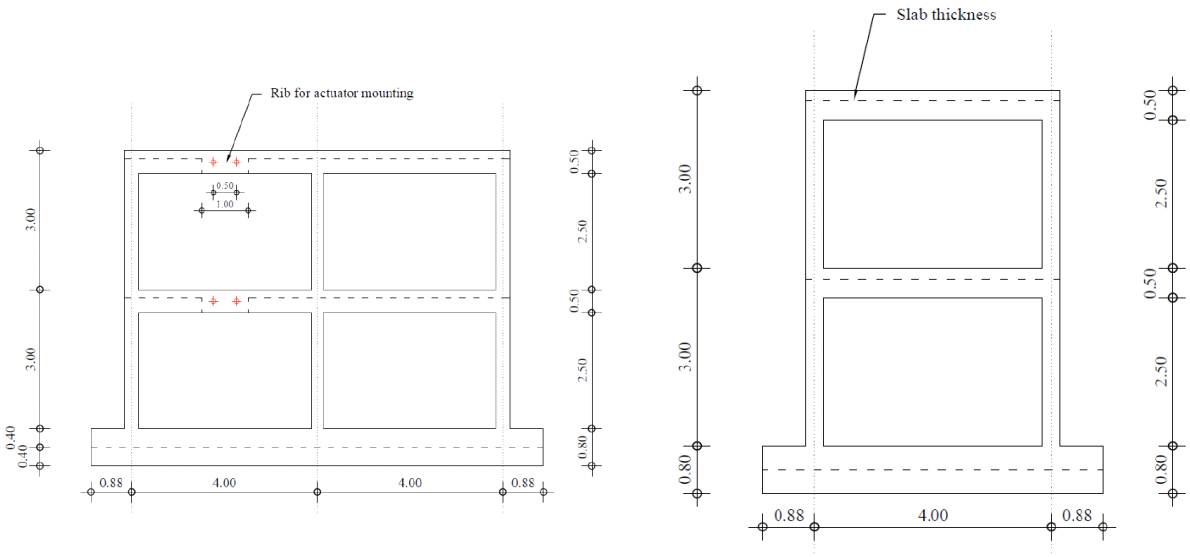
❑ 실규모 2층 조적건축물 하이브리드실험

○ TRM+외단열재 보강 실험 계획 수립 및 실험체 제작

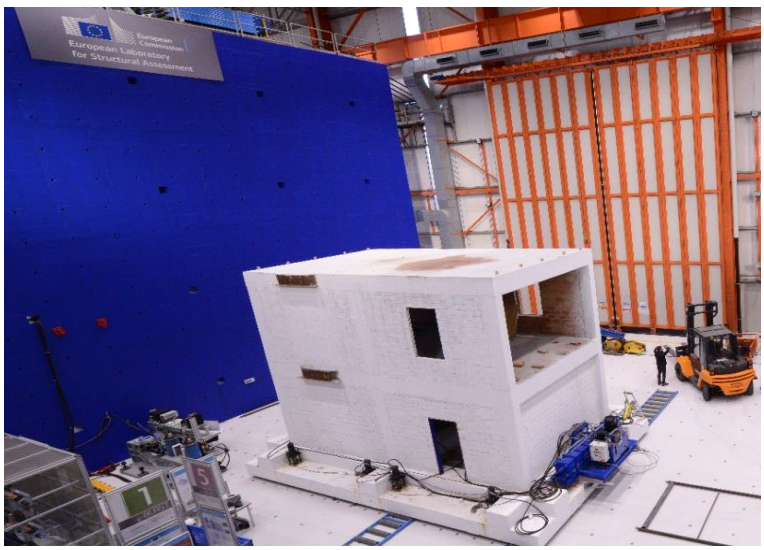
- (목적) TRM+외단열재 보강구조의 내진성능평가 및 해석기술 검증
- 유럽에서 1970년대 초반 일반적으로 시공된 5층 규모 조적채움벽 RC 골조를 원형으로 선정하고 지진에 취약한 하부 2개 층에 대한 하이브리드 준동적실험(hybrid pseudo-dynamic testing) 계획

[표 2.33] iRESIST+ 시험계획

시험체	구조	에너지 보강	내진 보강	에너지 (열) 시험	내진 시험
대조시험체				√	√
복합보강 (TRM 이용)		√	√	√	√



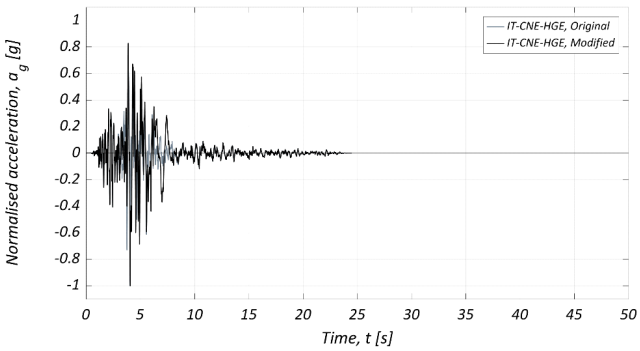
[그림2.84] 조적조 건축물 실험체



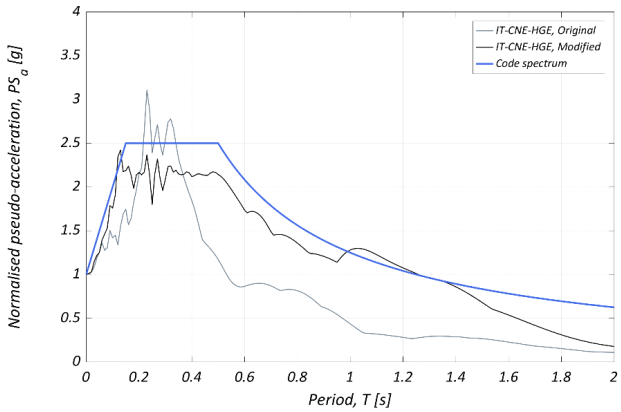
[그림2.85] 원형 실험체 제작 현황(EC-JRC)

○ 비보강 대조 실험체에 대한 하이브리드 지진시뮬레이션 (COVID-19로 실험 연기되어 2021년 수행)

- 유사 동적 시험 절차에 사용된 하이브리드 모델은 5층 건물로 구성
- 실험체는 2개층의 물리적 모델로 제작하고 2~5층의 응답은 수치 모델에 의해 지진응답해석을 수행하여 하여 각 층의 응답을 지진파로 입력
- 유사동적실험에서 해석 모델의 타당성 확보가 중요하며, 실험의 모든 단계에서 정적반복가력실험에 의한 이력거동이 재보정됨.
- 지진 입력 거동은 2016년 중부 이탈리아에 발생한 지진가속도기록(10월 30일 노르시아 인근에서 06시 40분 18초의 이벤트 중(EMSC-20161030_0000029)) 적용
- 지진 입력 신호는 원하는 지진 강도에 도달하기 위해 건물의 심각한 손상 상태까지 점진적으로 진폭을 조정하며 가진하였으며, 하이브리드 지진 시뮬레이션 사이에 건물은 반복적 pushover 시험 수행



[그림2.86] 선정된 지진 입력 거동의 수정 전 및 수정 후 가속도 시계열

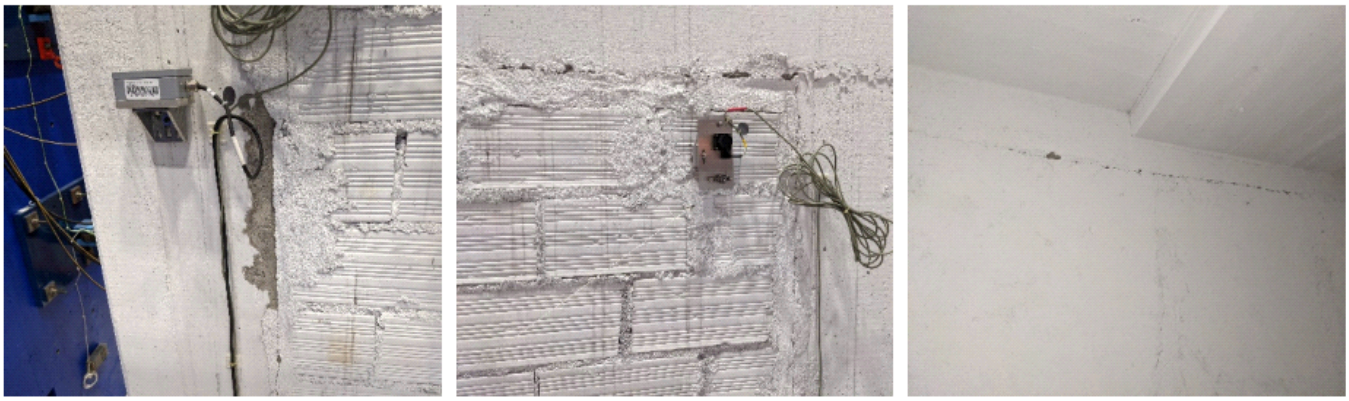


[그림2.87] 정규화된 유사 가속도 응답 스펙트럼 및 가속도 변위 응답 스펙트럼

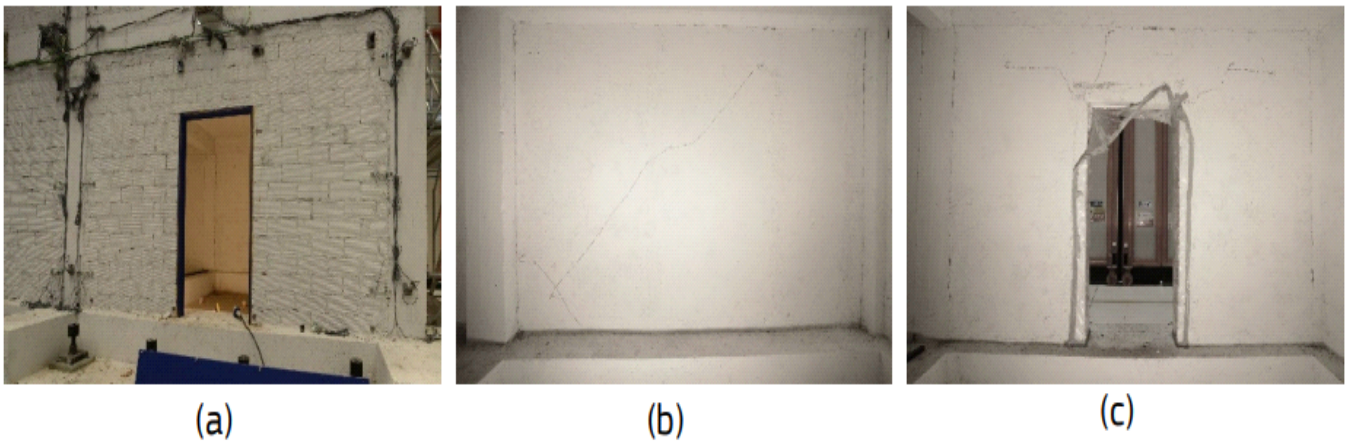
[표 2.34] 주요 지진시뮬레이션, 반복 pushover 시험 요약

Test name	Target displ. [mm]	Loading pattern & displ. restraints	PGA [g]	Hybrid model components	
				physical sub-structure	numerical model
blower door test 1					
mod CNE - 0.10 g	-	-	0.10	storeys 1 and 2	storeys 3 to 5
mod CNE - 0.15 g	-	-	0.15	storeys 1 and 2	storeys 3 to 5
cyclic push. - 7.0 mm	7.0	$F_1/F_2 = 0.5$	-	-	-
blower door test 2					
cyclic push. - 4.5 mm	4.5	$F_2 = 0$	-	-	-
mod CNE - 0.20 g	-	-	0.20	storeys 1 and 2	storeys 3 to 5
mod CNE - 0.20 g	-	-	0.20	first storey only	storeys 2 to 5
blower door test 3					
mod CNE - 0.25 g	-	-	0.25	first storey only	storeys 2 to 5
cyclic push. - 18.0 mm	18.0	$F_1/F_2 = 0.5$	-	-	-
blower door test 4					
mod CNE - 0.30 g	-	-	0.30	first storey only	storeys 2 to 5
cyclic push. - 16.0 mm	-	$F_2 = -F_1$; $u_1 = 0$	-	-	-

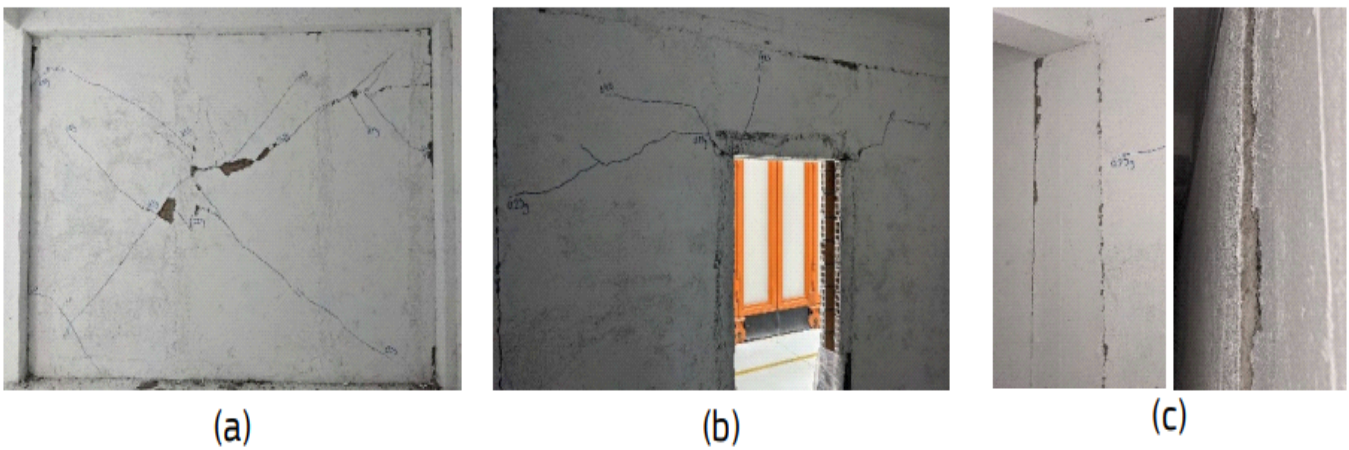
- (지진시뮬레이션 실험결과) 매 지진 시뮬레이션이 끝날 때마다 구조적 손상을 조사하고 균열 맵핑 수행, PGA 0.15g 및 0.20g의 지진 시뮬레이션에서 구조체는 약에서 중간 정도의 손상을 입었으며, 채움벽-프레임 경계면을 따라 균열과 조적채움벽의 얇은 대각선 인장 균열이 발생함. PGA 0.25g의 거동 하에서 1층은 전체 횡하중 저항력에 도달하였으며 이는 큰 압축 응력으로 인한 1층 조적채움벽 스트럿의 가장자리 분쇄파괴로 나타남. 0.30g에서 시험 결과 기둥과 기둥-보 접합부의 휨 균열뿐만 아니라 1층의 조적채움벽에 보다 심각한 손상 발생
- (하중-변위 이력 관계) 그림 2.92 ~ 그림 2.95에 1층과 2층 각각의 이력거동 응답과 건물의 전반적인 하중-변위 이력거동 응답을 나타냄. 각 층에 대한 이력거동 응답은 층 전단력 대비 층간 변위 비율(Vb,i - δi)이며, 전체 이력거동 응답은 기본 전단력 대비 전체 변위 비율(Vb,1 - δAVG)으로 산정, 후자는 2층 높이에 대한 2층 변위의 비율로 정의되며, h = 6 m(기초 상단에서 측정)임.



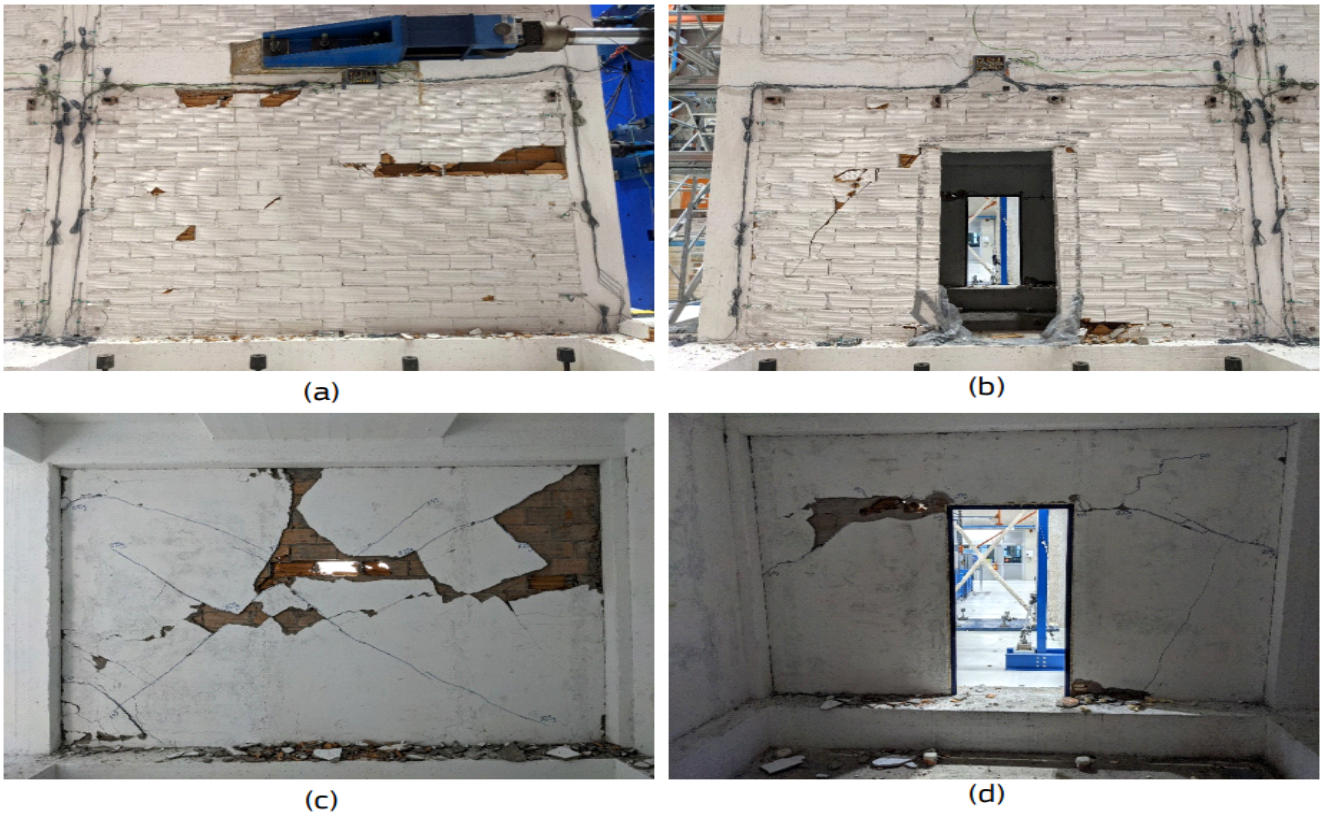
[그림2.88] 0.15g 규모의 수정된 2016년 Norcia 지진에서 시험 후 1층 조적채움벽에서 관찰된 손상



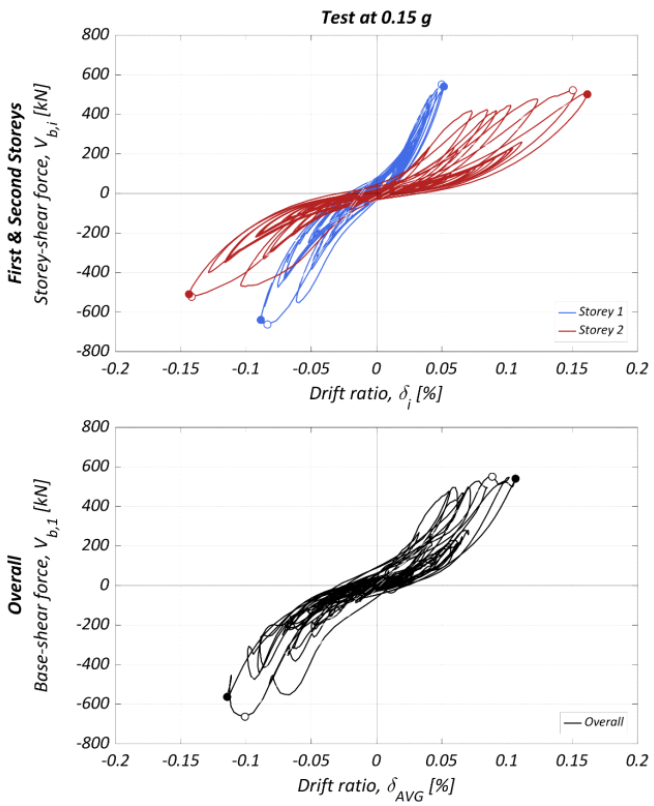
[그림2.89] 0.20g 규모의 수정된 2016년 Norcia 지진에서 시험 후 1층 조적채움벽에서 관찰된 손상



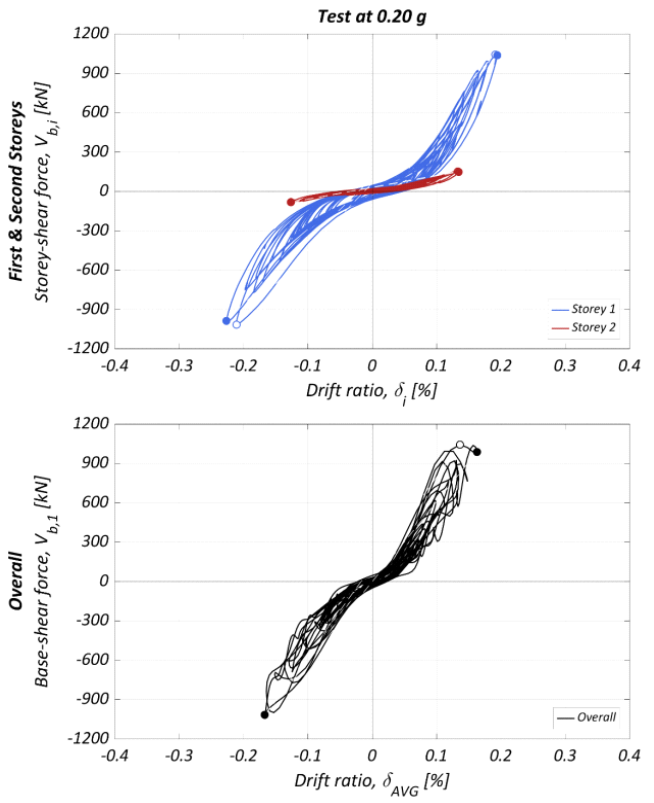
[그림2.90] 0.25g 규모의 수정된 2016년 Norcia 지진에서 시험 후 1층 조적채움벽에서 관찰된 손상



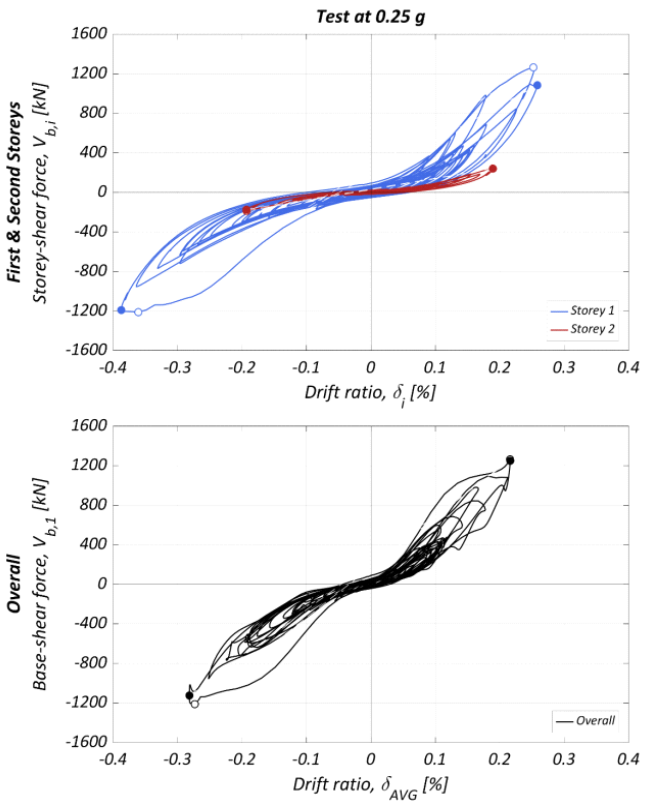
[그림2.91] 0.30g 규모의 수정된 2016년 Norcia 지진에서 시험 후 1층 조적채움벽에서 관찰된 손상



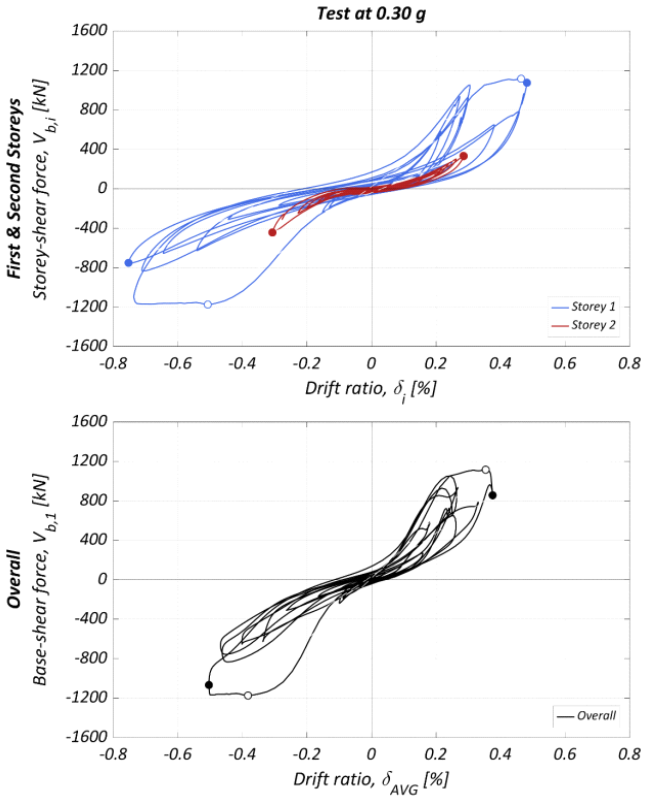
[그림2.92] 0.15g 가진 이력



[그림2.93] 0.2g 가진 이력

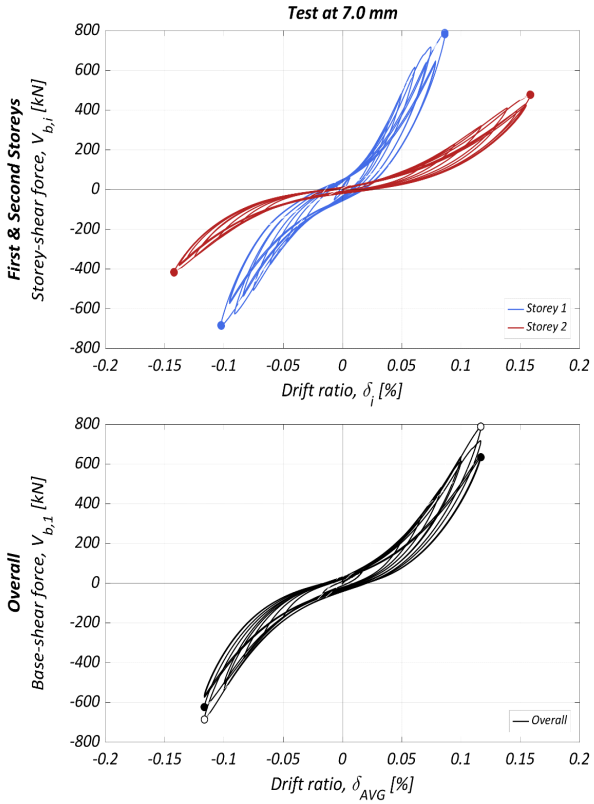


[그림2.94] 0.25g 가진 이력

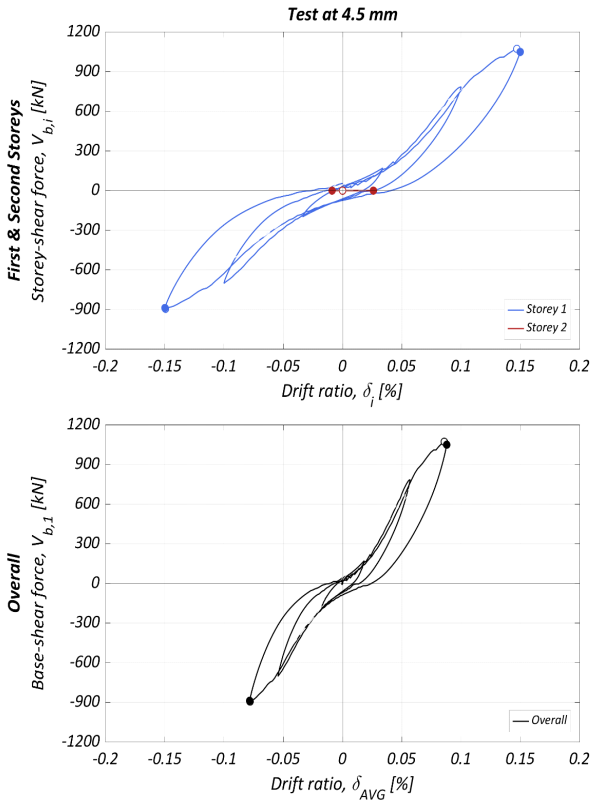


[그림2.95] 0.3g 가진 이력

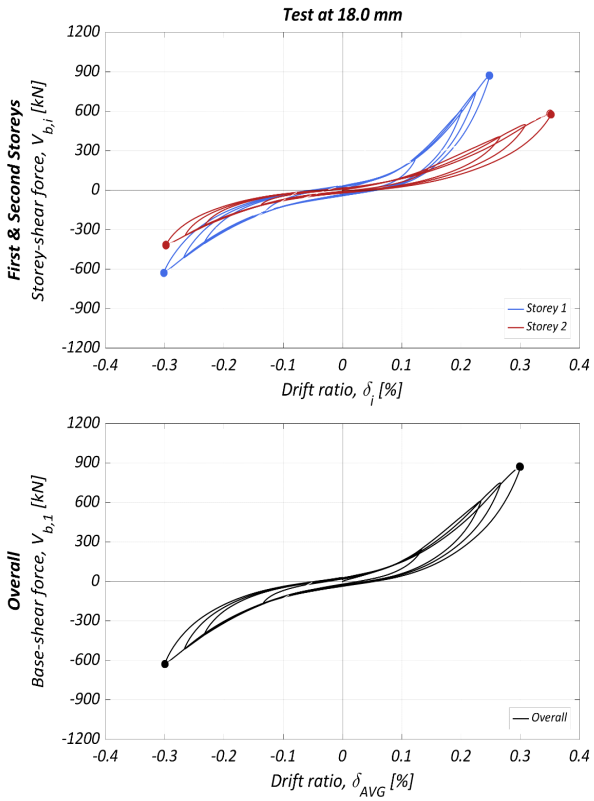
- (준정적 반복 시험) 조적조로 채워진 구조물의 이력거동 응답 특성에 대한 더 깊은 이해와 함께 수치 이력 모델의 보정을 위한 데이터를 수집하기 위한 목적으로 하이브리드 지진 시뮬레이션 사이에 변위 제어의 반복적 pushover 시험 수행함.
- (이력거동) 그림 20 ~ 그림 22의 응답은 3가지의 목표 2층 변위(각각 7.0㎜, 4.5㎜ 및 18㎜)에 대한 준정적 반복 하중 시험에서 도출한 이력거동을 나타냄. 1, 3차 시험에서 1층과 2층에 가해지는 횡력의 비율은 1:2의 비율을 보였다. 2차 시험에서 1, 2층의 변위는 동일하게 적용(힘은 1층에만 가해졌고, 2층에서는 0을 유지)



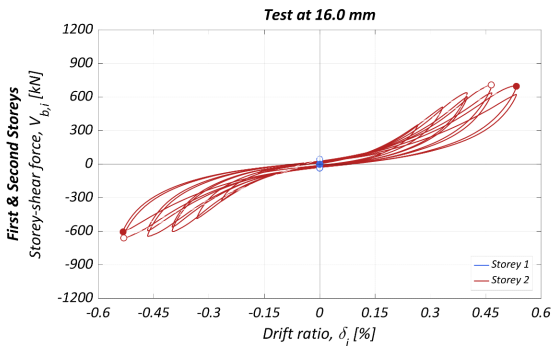
[그림2.96] 목표 2층 변위 7mm에 대한 이력거동



[그림2.97] 목표 2층 변위 4.5mm에 대한 이력거동



[그림2.98] 목표 2층 변위 18mm에 대한 이력거동



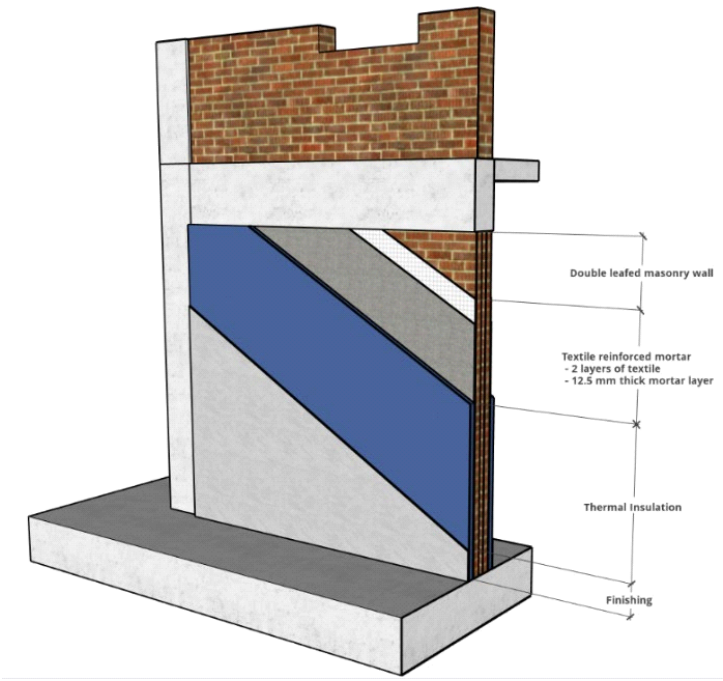
[그림2.99] 목표 2층 변위 16mm에 대한 2층의 이력거동 (*실험 종료후 1층에 손상집중되어 2층에 대해서만 추가적인 준정적실험 수행)



[그림2.100] 모든 시험 후 RC 프레임과 2층 조적채움벽의 관찰된 손상

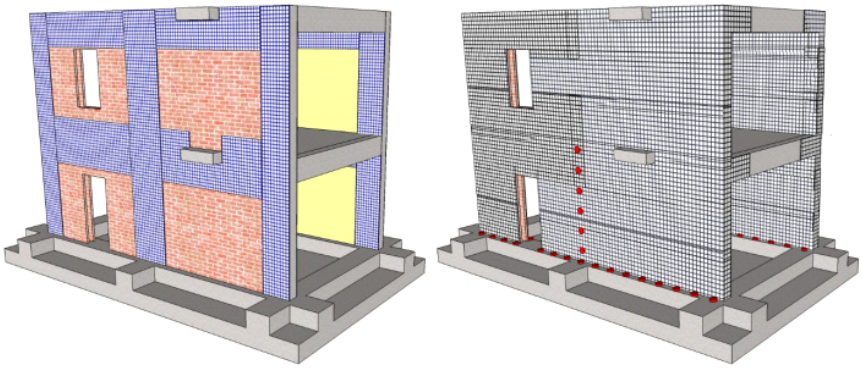
○ iRESIST+ 보강계획 (COVID-19로 ELSA Lab 실험은 2022년으로 연기)

- iRESIST+에서 제안하는 복합보강 계획은 그림 29와 같이 TRM과 단열재의 결합 사용을 포함함.



[그림2.101] iRESIST+ 복합 보강

- TRM 보강에 사용된 재료는 고강도 섬유 강화 보수 시멘트 모르타르(MEGACRET-GRID)에 매립된 25mm x 25mm 격자 크기의 바잘트 텍스타일(BAS Mesh 190 25x25)로, 텍스타일의 공칭 중량은 190g/m2, 밀도는 2.67kg/dm3.



[그림2.102] iRESIST+ 프로토타입 건물의 보강계획

- 먼저 수평 및 수직 TRM 패치가 채움벽-프레임 경계(파란색)에 양방향으로 적용(그림 30 왼쪽). 다음 채움벽은 B-TRM의 수평 레이어로 전면에 보강되며, 여기서 기둥 주위의 U자 재킷은 가능한 모든 곳에서 적용함. TRM의 수평 레이어 간의 겹침은 최소 길이 250mm에서 최대 400mm로 제안하며 일반 채움벽의 경우 TRM을 적용하기 전에 단열재를 내측에 배치 중공벽의 경우 TRM은 조적채움벽에 직접 적용함.
- 바잘트 앵커는 지상층에만 적용(그림에서 빨간색 점). 앵커의 기능은 벽과 프레임사이의 일체성을 향상시키고 콘크리트 TRM 층의 분리를 지연 또는 방지하는 것으로, 앵커의 배치는 균등하게 분산하며 권장 거리는 최대 500mmdla.
- 예비 분석 결과 지상층에서 연층(soft-storey) 메카니즘이 나타난다는 점을 감안할 때 지상층에서 맨 위까지 보강레이어를 점진적으로 줄이는 것이 바람직함. 따라서 지상층은 수평 B-TRM의 2개 레이어로 보강되고, 상부층에는 1개 레이어로 보강

❑ TRM+외단열재 공법에 대한 정적 및 동적 해석

○ 수치해석 모델

- iRESIST+ 프로토타입 구조를 시험하기 전에 TRM 보강의 효율성을 평가하기 위해 수치해석을 수행함. 실험체 대상 프로토타입 4층 구조에 대하여 TRM 매크로 모델을 사용하여 TRM 보강유무에 따라 2가지 모델 개발함.
- TRM을 사용한 내진 보강의 효과는 Pohoryles and Bournas(2020b)의 반복 및 동적 분석을 통해 수치적으로 검토되었으며, 모델링을 통해 TRM 재킷이 프로토타입 구조의 면내 내진성능을 증가시키는 효과가 있고 건물의 동적 거동을 개선하여 더 높은 지진 강도에서 손상을 줄이는 것으로 나타남.
- 실험 연구의 최종 보강 계획은 Basalt TRM을 사용하지만 예비 분석에서는 재료 테스트의 가용성으로 인해 Koutas et al.(2015a)의 속성을 기반으로 Glass TRM의 사용을 가정함. 모델링을 위해 가정한 재료 특성은 표 7에 요약, 내진 보강재의 경우 TRM은 강화 모르타르에 매립된 메쉬 크기가 25mm × 25mm이고 무게가 405g/m² 인 폴리머 코팅 E-유리 섬유의 직물로 구성되는 것으로 가정

[표 2.35] 재료 특성

	f_{cm}	f_y	f_m	f_b	$f_{m,inf}$	E_f	E_{t1}	E_{t2}
[MPa]	35	520	12.5	11.0	3.57	73,000	520	750

- RC 프레임의 모델링 측면에서 직사각형 철근콘크리트 단면은 요소의 16.7%의 소성 힌지 길이를 갖는 비탄성 섬유 요소로 모델링함. Mander et al.의 제한된 콘크리트 모델. (Mander et al., 1988) 및 Menegotto-Pinto 모델(Menegotto 및 Pinto, 1973)은 콘크리트아 철근 요소로 사용되었으며, 조적채움벽은 Crisafulli, (1997)에서 제안된 비선형 이력거동을 사용하여 정의된 재료의 반복적 거동과 함께 압축 스트럿으로 모델링함. 최대 전단력을 얻기 위해 등가 스트럿 너비 w와 실제 채움벽 두께 t에서 정의된

채움벽 영역에 의해 전달되는 최대 압축 응력을 산정하였으며, 스트럿 속성은 (Mainstone, 1974)에 의해 경험적 방정식을 사용하여 정의함. 개구부의 경우, Asteris et al.에 의해 개발된 스트럿 너비 감소 계수가 고려함Asteris et al., 2016). 채움벽의 코너 크러싱으로 인한 최대 압축 응력은 식(6)과 같이 수직 채움벽 압축 강도 fm,inf, 스트럿 각도 θ, 상대적인 패널-프레임 강도 λ에 기초한 Decanini et al.의 경험 방정식으로 정의함(Decanini 및 Fantin, 1986).

$$f_{m\theta} = \frac{1.12 \times f_{\min f} \times \sin\theta \times \cos\theta}{K1 \times (\lambda \times H)^{-0.12} + K2 \times (\lambda \times H)^{0.88}}$$

여기서 H는 층고이고 K1과 K2는 λ값을 기반으로 정의된 경험적 매개변수(Decanini and Fantin, 1986).

- TRM으로 보강된 조적채움벽 골조의 경우 간단한 스트럿 타이 방식을 적용함(Pohoryles and Bournas, 2020a). 유한 요소 프로그램 Seismostruct(Seismosoft Ltd, 2018)에서 타이를 구현하기 위해 채움벽의 대각선 타이에서 최대 인장력까지 탄성 재료 속성을 갖는 단순한 트러스 요소로 구현함.

[표 2.36] 압축 스트럿의 모델링 매개변수

Parameter	Description	Equation	Value
$f_{m,inf}$	Compressive strength of the infill	$f_{m,inf} = 0.4 \cdot {f_b}^{0.65} \cdot {f_m}^{0.25}$ (CEN, 2005)	3.57 MPa
$f_{m,\theta}$	Compressive strength of the strut	Eq. (5) (Decanini and Fantin, 1986)	2.88 MPa
ε_m	Axial strain at maximum (masonry)	$\varepsilon_m = \frac{\frac{l_w}{h_w} \cdot \sin\theta \cdot ISD(DS3) \cdot H}{d_m}$	0.36%
ε_u	Ultimate axial strain (masonry)	$\varepsilon_u = 5 \cdot \varepsilon_m$	1.81%
w	Strut width	$w = 0.56(\lambda \cdot H)^{-0.875} \cdot d_m$ (Mainstone, 1974)	0.95 m
w_{op}	Strut width (opening)	$w_{op} = w\,(1 - 2\alpha_w^{0.54} + 2\alpha_w^{.14})$ (Asteris et al., 2013)	0.38 m (window) 0.32 m (door)
α_w	Infill wall opening percentage	$\alpha_w = \frac{A_{opening}}{h_w \cdot l_w}$	14.3% (window) 18.6% (door)
θ	Strut and tie angle	$\tan^{-1}\frac{h_w}{l_w}$	34.5°

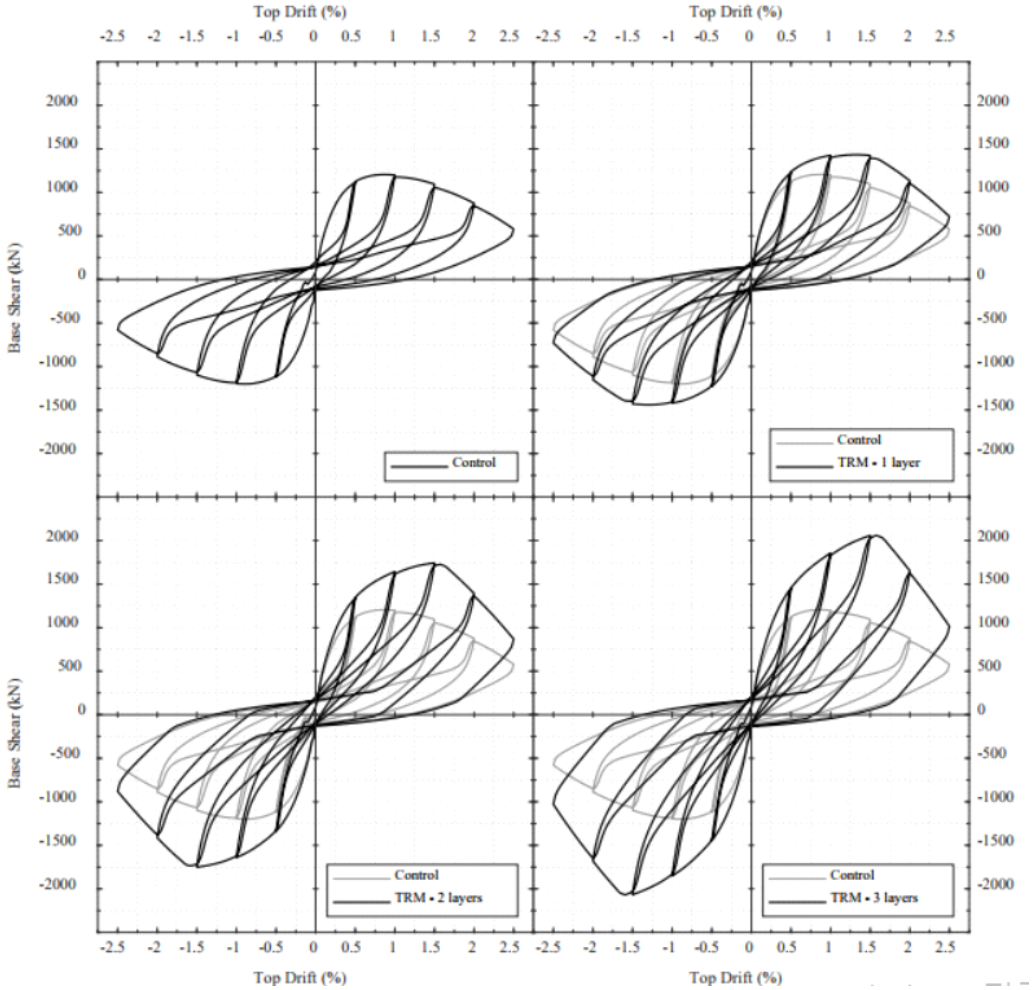
[표 2.37] 인장 타이의 모델링 매개변수

Parameter	Description	Equation	TRM layers		
			1 layer	2 layers	3 layers
ρ_t	Area ratio of TRM	$\rho_t = \frac{A_t \cdot \cos\theta}{h_w \cdot l_w}$	1.05%	2.10%	3.15%
ε_{eff}	Effective diagonal strain in TRM	$\varepsilon_{eff} = \frac{1.40 \cdot \rho_t}{\sqrt{E_f}}$ (Pohoryles and Bournas, 2020a)	0.17%	0.34%	0.50%
F_{tie}	Tie strength	Eq. (1) (Koutas et al., 2015b)	35.7 kN	142.6 kN	321.0 kN

○ 정적반복해석 결과

- 0.5% 상단 변위에서 최대 2.5%까지 증가하는 5주기로 구성된 반복 변위 프로토콜을 사용하여 반복 하중 하에서 분석, 수평 변위는 삼각형 변위 패턴에 따라 각 층에 적용함. 비보강 실험체 건물은 벽체의 측면에 1, 2, 3개의 TRM 보강 레이어 사용을 검토함.
- 비보강 실험체는 0.87% 최대 변형각 도달시 밑면 전단력은 1204.9kN으로 분석됨

- 3가지 다른 TRM 보강재로 보강된 건물의 경우 1층의 TRM 19.5%에서 3층의 71.7%까지 밑면 전단력 증가 효과를 나타냄. 최대 하중에 도달하는 최대 층간변형각 또한 비보강 실험체에 비하여 크게 증가하였으며 TRM의 1~3개 레이어에 대해 최대하중시 상단 변위는 각각 1.3%와 1.6% 사이의 값으로 분석됨



[그림2.103] 대조 및 보강건물의 반복 분석으로부터 히스테리시스 곡선

[표 2.38] 반복하중 하에서 4개의 시편에 대한 피크 응답 매개변수

시편	피크 기초 전단력(kN)	피크 상단변위(%)
대조	1204.9	0.87
TRM - 1 레이어	1439.5(+19.5%)	1.30
TRM - 2 레이어	1750.3(+45.3%)	1.50
TRM - 3 레이어	2068.6(+71.7%)	1.60

○ 증분동적해석(IDA)

- 동적 하중에 대한 건물의 응답을 평가하기 위해 일련의 14개의 지진 기록(표 11 참조)이 선택되었고 증분 동적 해석을 수행하기 위해 pga가 0.05g에서 0.6g까지 조정(Vamvatsikos 및 Cornell, 2002).

[표 2.39] 증분 동적 해석에 사용된 지진기록 리스트

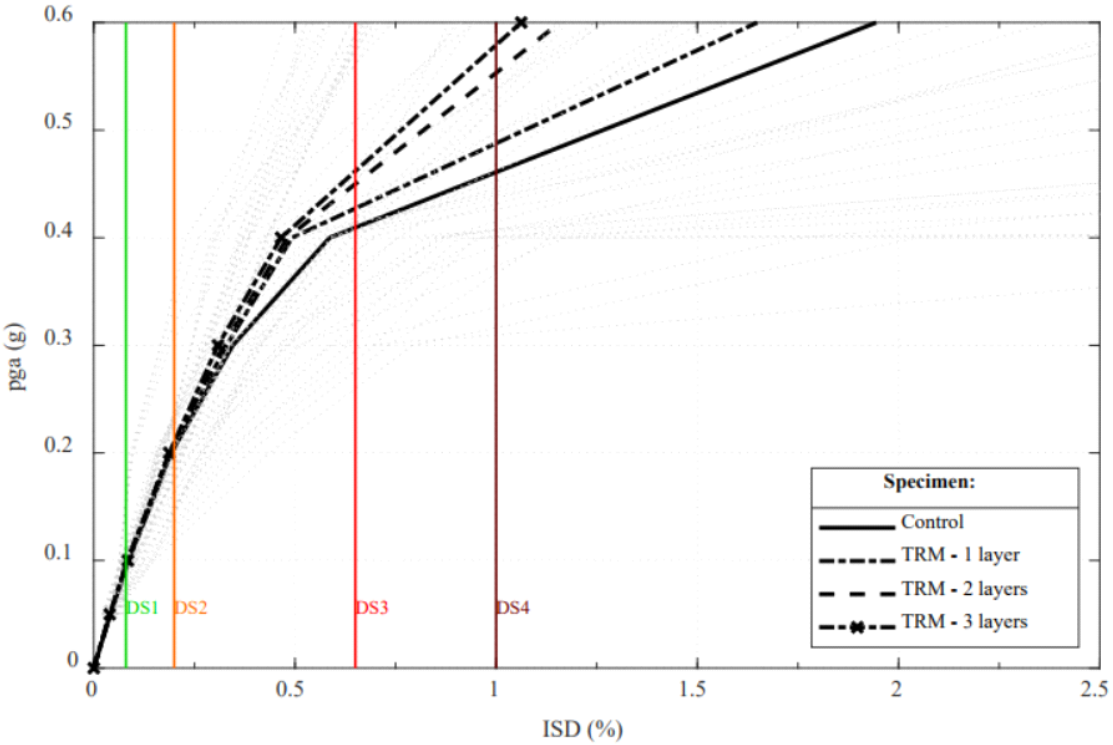
연도	위치	국가	pga(g)
1940	Imperial Valley(El Centro)	USA	0.32
1976	Fiuli	Italy	0.48
1976	Fiuli(Tolmezzo)	Italy	0.37
1979	Herceg-Novi	Montenegro	0.22
1986	Kalamata	Greece	0.29
1989	Loma Prieta	USA	0.35
1990	Roma	Italy	0.34
1994	Northridge	USA	0.37
1995	Aegion	Greece	0.52
1995	Kobe	Japan	0.82
1999	Athens	Greece	0.32
1999	Izmit(Skarya)	Turkey	0.63
2014	Kefalonia	Greece	0.41
2015	Lefkada	Greece	0.56

- 손상 평가로서, 표 2.40의 손상 상태 정의에 따라 pga의 모든 수준에서 최대 층간 변위(ISD)를 평가함

[표 2.40] 손상상태 정의(Cardone et al., 2018)

손상상태	한계상태	ISD(%)
DS1 - light	Zero Loss(ZL)	0.08
DS2 - moderate	Operatioinal(OP)	0.2
DS3 - extensive	Damage Control(DC)	0.65
DS4 - partila collapse	Life Safety(LS)	1.0

- 모든 모델에서 최대 층간 변위값은 4층 구조의 최하층에서 발생하는 것으로 나타났으며 증분 동적 분석에서 얻은 최대층간변형각(ISD)는 그림 36의 4개 시편에 대한 최대 가속도에 대해 나타냄.
- 건물의 취약성은 보강 레이어의 양이 증가함에 따라 감소하였으며, Zero Loss 및 Operational limit state의 경우 보강유무에 따른 차이는 미미하지만 손상 한계상태가 높을수록 차이가 뚜렷이 나타남.
- 광범위한 손상에 도달하는 데 필요한 평균 pga는 0.4g이며, 이는 세 개의 보강 실험체 모두에서 향상되었으며, TRM의 3개 레이어에 대해 DS3는 평균 0.46g에 도달함.
- 유사하게, Life Safety 한계 상태는 비보강 실험체는 평균 pga 0.44g에서 먼저 도달하는 반면, 3층 보강의 경우 0.58g으로 증가함. TRM의 단일 레이어와 이중 레이어 사이에는 큰 개선이 보이지만 TRM의 2개 레이어와 3개 레이어 사이의 거동 향상은 크지 않음.
- IDA의 결과는 지진 강도의 각 수준에서 건물의 피해 감소를 확인할 수 있음. 이는 경제적 손실 감소 및 지진 발생 후 보수 필요성 감소와 관련됨
- 해석 결과는 국내 조적조 건물 보강을 위한 TCP 보강과 TRM 보강의 기초 자료로 활용함.



[그림2.104] 대조 및 보강된 건물에 대한 증분 동적 해석 결과

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

1차 연도 (2019)		
세부 연구 목표	**연구개발 수행 내용**	**연구 결과 및 성과**
내진 및 에너지 동시보강 원천기술 개발 및 시스템 설계	국내외 사례조사 및 분석 *(A-1-1)* ***조사분석 보고서 1건***	○ 국내 조적조 건축물 내진 관련 현황 및 기술 사례 조사 분석 - 기존 조적조 건축물의 시공 및 구조 특성을 분석, 기존 연구 사례 및 기술 통향 특허사례 분석 수행 - 국내 조적조 건축물의 지진취약부와 파괴특성을 분석하고 내진보강기술개발시 고려 사항 도출 ○ 국내 조적조 건축물 에너지 성능 관련 현황 및 기술 사례 조사 분석 - 국내 건축물 에너지성능 특성 및 정책 분석 - 국내 조적조 건축물의 에너지 소비현황 분석 - 단열 공법에 관한 기술 및 연구사례 조사 분석 수행
	내진 및 에너지 동시보강 핵심원천 기술 개발 *(C-1-1)* ***JRC 원천기술 공유 보고서***	○ TCP(Textile Capillary Tube Panel) 보강 기술 개발 - (주관) 섬유보강재 직물망(textile)을 이용한 내진보강기술과 모세관 내부에 온수를 순환시켜 단열특성을 개선 시킬 수 있는 내진단열복합보강패널(TCP) 보강 기술 및 특허출원 실시 ○ TRM + 단열재 보강 기술 개발 - (공동) EC JRC에서 TRM과 단열재를 활용한 내진 및 에너지 동시보강 기술 개발 수행, 보강 성능을 평가하기 위한 실험계획 진행
	TRM+단열재 공법과 TCP 공법의 설계 및 시방 개발 *(A-1-2)* ***TCP 설계도 2건*** ***TCP 시방서 2건***	○ TCP(Textile Capillary Tube Panel) 설계서 개발 - 패널 내부 모세관 배치에 따른 설계서 2종 ○ TCP 시제품 제작 시방서 및 TCP 보강 시공 시방서 개발 - TCP 시제품 제작을 위한 재료, 제작방법 등 일반사항 도출 - 기존 조적벽체의 TCP 보강을 위한 일반사항 도출하고 시공 방법(앵커 고정 및 에폭시 퍼티 고정)에 따른 시방 제시
	단일패널 부재실험 및 결과분석 *(A-1-3)* ***실험 보고서 2건***	○ 경량 모르타르 패널의 재료특성 및 휨실험 수행 및 결과 분석 ○ TCP 보강 유무에 따른 조적벽체 정적반복가력실험(예비실험) 수행 - 거동 특성 분석 및 기술 보완사항 도출

2차 연도 (2020)		
세부 연구 목표	**연구개발 수행 내용**	**연구 결과 및 성과**
(주관, KOCED) TCP 공법을 적용한 모듈화된 보강 패널 시스템 개발 및 시제품 제작	TCP 공법을 적용한 조적벽체용 보강 패널 시제품 개발 및 제작 ***(B-1-1)*** ***시제품 설계도 1건*** ***시방서 1건***	❍ TCP 개선 및 시제품 제작 - 격자구조 탄소섬유시트 및 CT 일체화 경량모르타르 패널 시제품 제작(약 20 kgf) - TCP 및 구조부재 간 접합부 성능향상 방안 개발 - TCP 보강공법 표준시공절차, 설계서 및 시방서(안) 개발 - TRM 공법을 연계활용한 TCP 보강공법 개선방안 개발
	정적반복실험에 의한 TCP 패널 보강 조적벽체의 내진성능 평가 ***(B-1-2)*** ***실험보고서 2건***	❍ **TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 내진성능 평가** - **비보강 조적벽체 대비 내력 42%, 연성능력 60% 증가** ❍ TCP 보강 유무에 따른 조적채움벽 RC 골조의 내진성능 평가 - 비보강 대비 내력 33%, 연성능력 100% 증가
	지진모의실험을 이용한 TCP 패널 보강 조적조 건물의 내진성능 실증 실험 ***(B-1-4)*** ***실험보고서 2건***	❍ 비보강 조적채움벽 RC골조 건물 실험체 설계 ❍ 비보강 조적채움벽 RC 골조 건물의 진동대 실험 - 국내 설계수준 지진파(DBE)에서 조적벽체 벽체분리 등 손상 발생, 최대 고려 지진(MCE) 시 조적벽체 붕괴 ❍ TCP 보강 조적채움벽 RC 골조 건물의 진동대 실험 - 비보강 실험체 진동대 실험결과 분석을 통한 TCP 보강 개선 - 진동대 실험 결과 비보강 건물 대비 손상제어 효과 확인
	TCP 패널 보강 조적벽체 에너지효율 보강 평가 (외기 기후조건 고려한 환경 해석) ***(B-1-3)*** ***해석보고서 1건***	❍ TCP 에너지효율 평가 - KS L 9016:2017에 따른 개발 경량 모르타르 열전도율 시험 수행 - CFD 해석을 통한 TCP 패널의 열관류율 분석 수행, 입수온도 20℃인 경우에도 90% 열관류율 감소
	열원을 고려한 TCP 복합 시스템 개발 ***(B-1-1)*** ***복합시스템 설계도 2건***	❍ TCP 보강공법 적용을 위한 태양 에너지 열원시스템 검토 ❍ TCP 복합시스템 특허(복합패널시스템 및 이를 이용한 조적조 건축물의 보강방법) 출원 ❍ 열원을 고려한 TCP 복합시스템 설계서 개발
	기존 TRM+단열재 기술 및 신규 개발되는 TCP 기술의 비교 검증 실험 ***(B-1-4)*** ***실험보고서 1건***	❍ TRM+단열재 보강기술 현황조사 ❍ TRM+단열재 보강 공법의 정적반복가력 실험 - TCP의 경우 내력 및 연성능력에서 TRM+단열재 보강공법 대비 우수성 확인
(공동, JRC) 기존 TRM+단열 복합 보강 공법 성능 평가	기존 TRM+외단열재 보강공법의 성능 검증 및 결과분석 ***(C-2-1)*** ***실험보고서 1건***	❍ TRM+외단열재 보강 실험 계획 수립 및 실험체 제작 - 실험 및 해석, 기존 연구자료 활용
	TCP 시제품 및 시스템 개발을 위한 실증 실험 기술 지원 및 관련 기술자료 공유 ***(C-1-1)*** ***보고서 1건***	❍ TRM 공법 복합재료, 실험데이터 최신자료 공유 ❍ TCP 개발 관련 기술지원 ❍ TRM+외단열재 공법에 대한 해석모델 구축 방법 및 평가 결과 공유

3차 연도 (2021)		
세부 연구 목표	**연구개발 수행 내용**	**연구 결과 및 성과**
(주관-KOCED) TCP 복합 보강 시스템의 현장 적용 실험 및 개선	TCP 시스템 현장적용 실험 *(B-2-1)* ***현장적용 실험보고서 1건***	○ TCP 보강공법 현장적용 실험 - 실제 기존 건축물을 대상으로 TCP 보강공사 실시하여 현장 적용성 및 시공성 평가 수행 - TCP 제작의 모듈화 및 시공 정밀도가 요구되는 것으로 평가
	열원을 고려한 TCP 시스템 구축 및 시스템 검증 *(B-2-1)* ***시스템 검증 보고서 1건***	○ TCP 시스템 구축 - 현장적용 실험 시 기존 연구에서 구축한 PVT 시스템 활용하여 태양열을 열원으로 TCP 시스템 구축 ○ TCP 시스템 검증 - 태양열 이용한 시스템 구동성 검증 - 에너지 성능 평가 실험 수행한 결과 단열 및 난방 성능 확인하였으며 적정 사용 환경 도출
	TCP 시스템 개선 *(B-2-2)* ***개선 보고서 1건*** ***설계서 및 시방서 각 1건***	○ TCP 시스템 개선사항 도출 - 구조성능 실험 결과 및 현장적용 실험 결과를 바탕으로 구조, 에너지, 시공 측면에서 개선사항 도출함 - 구조 측면에서 TCP 접합부 및 구조체와 일체화 개선(텍스타일 보강 패치 적용)하여 설계서 적용 - 에너지 측면에서 모세관 연결구조(내압 연결부품) 개선 - 시공 측면에서 시방서 개선
	기존 TRM+단열재 기술 성능 검증 실험 *(B-1-4)* ***실험보고서 1건***	○ TRM+XPS 단열재 보강 공법의 진동대 실험 - TRM+XPS 단열재 보강 실험체 제작 - TRM+XPS 단열재 보강을 적용한 2층 RC 채움벽 건물 실험체의 진동대 실험 수행 (JRC 온라인 참여) - TCP 공법과의 성능 비교 분석
(공동-JRC) 기존 TRM+단열 복합 보강 공법 성능 평가	기존 철근콘크리트 채움벽 구조물 구조 실험 및 해석 *(C-2-1)* ***보고서 1건***	○ 실대형 비보강 실험체 하이브리드 실험 수행 ○ TRM+외단열 보강계획 수립 및 실험체 제작 ○ TRM+외단열재 공법에 대한 해석모델 구축 방법 및 평가 결과 공유

(2) 정량적 연구개발성과

❑ 기술적 정량 성과

○ (내진성능) 비내진 조적벽체 대비 내진성능 60% 향상

- 연구개발목표 : 조적벽체의 면내 및 면외 방향 횡하중에 대한 연성능력 20% 향상

※ 기존 연구에서 TRM을 이용한 내진성능 향상 수준은 10% ~ 50%로 적용조건(조적벽체 재료 및 구성, RC 골조 유무)에 따라 편차가 발생할 수 있으므로 실험실 환경을 고려하여 20% 성능 향상을 연구목표로 설정

- 연구개발성과 검증 : TCP 보강 유무에 따른 단위조적벽체의 정적반복가력실험, 철근콘크리트골조 채움벽체의 정적반복가력실험, 2층 실물모형에 대한 진동대 실험 및 결과분석

❍ **(에너지효율 성능) 기존 조적벽체 대비 열관류율(또는 열전도율) 성능 90% 향상**

- 벽체 내부 모세관 열원공급에 따른 에너지효율 성능에 관한 연구는 부족한 실정으로, 본 연구에서는 조적벽체 내부에 TCP를 보강하여 비보강 조적벽체 대비 열관류율(또는 열전도율) 성능 20% 향상을 목표로 설정

※ 건축물 벽체의 에너지효율 향상은 주로 단열재 개선을 통한 열관류율을 향상시키는 것이나, 본 연구에서 개발되는 TCP는 단열재를 포함하고 있지 않으며, 소량의 에너지 공급 기구를 갖고 있어 단순비교 불가

- 연구개발성과 검증 : TCP 주요 재료인 경량모르타르에 대한 열전도율 시험 수행, 온수 시스템이 고려된 TCP 보강 조적벽체에 대한 공인시험 불가로 경량모르타르 열전도율 시험결과를 활용하여 TCP 보강 유무에 따른 조적벽체의 CFD 해석을 통한 열관류율 성능 검증

❑ 정량적 연구 성과

❍ 기술 개발 지식재산권(특허) : 총 2건
- 내진 및 에너지 동시보강을 위한 TCP 공법 개발 특허 출원 및 등록 각 1건
- 열원을 고려한 TCP 공법을 적용한 모듈화된 패널 시스템 특허 출원 및 등록 각 1건

❍ SCI 학술지 게재 및 투고 : 총 2건
- TCP 시스템의 에너지 성능 해석 관련 Energy & Buildings 저널 게재완료 1건
- TCP 시스템을 적용한 내진 및 에너지 동시보강기술 관련 Composite Structures 투고 심사중 1건

❍ KCI 학술지 게재 : 총 2건
- 기존 비보강 조적조 건축물의 내진 및 에너지 동시보강패널의 정적실험 논문 게재완료 1건
- 에너지 성능 및 내진성능을 동시에 개선하는 외벽보강시스템 가능성 분석 논문 게재완료 1건

❍ TCP 시제품 제작 : 총 2건
- 내진단열복합보강패널 TCP 시제품 1건
- 개선된 내진단열복합보강패널 TCP 시제품 1건

❍ 국내학술발표 : 총 8건
- 한국지진공학회, 대한건축학회 등 국내학술발표대회 참석 및 발표

❍ 국내 기술 홍보 : 총 1건
- 기존 조적조 건축물의 내진-에너지 효육 복합보강기술 개발에 관한 JTBC 사이언스 방송 참여

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	기존 비보강 조적조 건축물의 내진 및 에너지 동시보강패널 정적반복가력실험	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	최형욱	2020년 9월, Vol.24	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCIE	2020.08.27	2287-6939	100
2	에너지성능 및 내진성능을 동시에 개선하는 외벽보강시스테의 적용 가능성 분석 -에너지성능분석을 중심으로	한국생태환경건축학회지	남유진	2021년 10월 No.5 Vol. 21	한국	한국생태환경건축학회	비SCIE	2021.10.25	2288-9695	100
3	Energy performance analysis of textile and capillary tube composite panel system by computational fluid dynamics and real scale experiments	Energy and Buildings	배상무	258 (2022)	한국		SCIE	2021.12.27	0378-7788	100
4	Innovative seismic and energy retrofitting of wall envelopes using prefabricated textile-reinforced concrete panels with an embedded capillary tube system.	Composite structures	백은림		포르투갈	Construction and Building Materials	SCIE	투고, 심사중		100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국구조물진단유지관리공학회 2020 여름 학술발표회 및 포럼	기존 조적조 건축물의 내진-에너지 효율 복합 보강 기술 개발	최형욱	2020.07.07	제주 라마다프라자	한국
2	한국지진공학회 2020년 온라인 Workshop 및 학술발표회	실험연구 분석을 통한 비보강 조적조의 내진성능	백은림	2020.09.25	온라인	한국
3	한국지진공학회 2020년 온라인 Workshop 및 학술발표회	조적조의 내진 및 단열 보강 패널에 관한 실험연구	백은림	2020.09.25	온라인	한국
4	2020 대한건축학회 부산 울산 경남지회 추계학술발표대회	TCP 보강 시스템을 적용한 조적채움벽의 내진성능평가실험	최형욱	2020.11.27	온라인	한국
5	2020 대한건축학회 부산 울산 경남지회 추계학술발표대회	비보강 조적채움벽을 갖는 2층 RC골조의 진동대실험	조현우	2020.11.27	온라인	한국
6	2021년 한국지진공학회 학술발표회	조적채움벽 골조의 내진 및 단열보강에 관한 실험연구	백은림	2021.03.19	온라인	한국
7	2021년 한국지진공학회 학술발표회	스마트폰을 활용한 2층 조적조 건물 동특성평가	강재도	2021.03.19	온라인	한국
8	2021년 대한건축학회 추계학술발표대회	태양광열 시스템을 결합한 에너지 및 내진 동시보강 패널의 적용 가능성 검토에 관한 연구	배상무	2021.10.29	여수 엑스포컨벤션센터	한국

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	텍스타일 그리드 보강재 및 모세관 튜브 매립형 복합패널 및 이를 이용한 조적조 건출물의 보강방법	한국	재단법인 국토교통 연구인프라운영원	2019.10.02	10-2019-0122018(접수번호 1-1-2019-1008286-10)	재단법인 국토교통 연구인프라운영원	2020.04.28	10-2107836	100	-
2	특허	복합패널시스템 및 이를 이용한 조적조 건축물의 보강방법	한국	재단법인 국토교통 연구인프라운영원	2020.10.13	10-2020-0131690(접수번호1-1-2020-1077683-42)	재단법인 국토교통 연구인프라운영원	2021.04.02	10-2237732	100	-

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	내진단열복합보강패널 TCP-01	2019.09.23.-2019.10.04	(재)국토교통 연구인프라운영원	지진방재연구센터	연구	-	-	-
2	개선된 내진단열복합보강패널 TCP 시제품 명세서	2020.09.28.-2020.10.09	(재)국토교통 연구인프라운영원	지진방재연구센터	연구	-	-	-

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)
1	내진 및 에너지 보강을 위한 TCP 시스템	2021.01.18.-2021.02.15	국토교통연구인프라운영원	부산대학교	(구)무량마을회관

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○ 해당 없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○ 해당 없음

2) 목표 달성 수준

○ 총 연구개발기간 동안의 연구개발 목표를 대부분 100% 달성하였으나, COVID-19 영향으로 공동연구기관인 EC JRC에서 2020년 수행하고자 했던 기존 TRM-단열재 보강공법에 대한 보강실험이 2022년으로 연기되어 일부 정성적 목표가 미달성 되었음.

○ 미달성 성과 달성 방안 : 공동연구기관인 EC JRC와 지속적 교류 유지 및 공동 학술논문 투고 및 게재
- 2023년 수행예정인 ELSA test 온라인 참석 및 실험 결과 공유 예정
- SCI급 학술논문 및 국제학술발표논문 공동 저술, 투고 예정(2022년 2건 투고 예정)

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용		달성도(%)
조적벽체용 내진-에너지 복합 보강 기술 및 설계 기술 개발(단일 보강패널 부재 개발)	조적조 건축물 내진성능 및 에너지효율 보강사례 조사 및 분석	- 국내외 사례 조사 분석 보고서 1건	100
	TCP(TRM+CT Panel) 개발	- 특허 출원 1건, 등록 1건 - TCP 공법 설계서 및 시방서 초안 및 개선안 개발 각 2건 - 시제품 제작 2건 - 학술발표 7건	100
	단일패널 실험 및 결과분석	- 단일패널 실험 수행 및 결과보고서 작성 2건	100
	(공동) 동시보강 원천기술 개발	- JRC 원천 기술 공유 보고서 1건	100
TCP 공법을 적용한 모듈화된 패널 시제품 및 시스템 개발	모듈화된 패널시스템 개발 및 제작	- 특허 출원 1건, 등록 1건 - - 시스템 설계서 및 시방서(안) 개발 각 1건	100
	TCP 보강 벽체의 내진성능 향상	- TCP 보강 유무에 따른 실험 3건 수행 및 실험 보고서 3건 - SCI 논문 1건 투고 심사중	80
	TCP 보강벽체의 에너지효율 성능 향상	- TCP 보강 패널의 열관류율 평가 해석 및 보고서 2건 - KCI 논문 1건 게재 - SCI 논문 1건 게재	100
	TCP 보강 조적건물의 실증 실험 및 결과분석	- TCP 보강 및 TRM 보강 유무에 따른 진동대 실험 3건 수행 및 실험 보고서 3건	100
	(공동) 비교실험 및 기술지원	- 기술 지원 및 해석모델 개발 보고서 1건 - TRM+외단열 보강 하이브리드 실험(비보강 실험체)	50
TCP 복합 보강 시스템의 현장 적용 실험 및 개선	TCP 시스템 현장 적용실험	- 현장적용실험 수행 1건 - TCP 시스템 구축 및 검증 수행 보고서 각 1건 - 학술발표 1건	100
	TCP 시스템 개선	- TCP 시스템 개선사항 도출 및 보완 - TCP 시스템 설계서 및 공사 시방서 각 1건	100

4. 목표 미달 시 원인분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 공동연구기관의 소재지인 이탈리아 지역의 COVID-19 영향
- 기존 TRM-단열재 보강공법과 TCP 공법의 성능 비교 검증을 위해 JRC ELSA Lab에서 비보강 및 보강 실대형 실험체에 대한 하이브리드 실험을 수행하고자 하였으나 유럽에서 COVID-19으로 인한 봉쇄 및 Lab 미운영 사태로 실험이 2022년으로 연기되어 수행하지 못함. (달성도 50%)
- 관련으로 공동연구 협업을 위한 세미나, 국외출장 등이 원활이 수행되지 못한 관계로 국외 학술지 논문 투고 일정 등이 지연되어 심사중인 관계로 학술적 성과의 목표가 미달성됨 (80%)

2) 자체 보완활동

○ TRM-단열재 보강공법의 일환으로 국내에서 실험 연구 수행
- 본 연구과제를 통해 내진-에너지 복합보강패널인 TCP와 비교를 위해 국내에서 JRC의 기술 협조를 받아 TRM-XPS 단열재 동시보강 공법에 대한 정적 및 동적 실험을 수행하고 성능 비교 분석을 수행

○ 공동기관 수행 목표인 TRM-단열재 보강 공법에 대한 해석을 통한 기술 지원
- 실험이 연기된 관계로 TRM-단열재 보강공법 도출 및 TCP 보강시 기술지원을 위해 TRM 보강에 대한 수치해석을 수행하여 성능을 예측, 주관기관 실험 수행에 있어 기술 지원을 수행함.

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 연구개발 전 기간 동안의 개발 시스템 개선 및 보완 노력
- 기존 건축물의 내진 및 에너지 동시보강을 위한 기술 개발이 국내에서 거의 시도된 바 없기 때문에 시스템 개발과정에서 개선 및 보완 사항 도출을 위해 노력함.
- 특히 조적조 건물의 경계조건이나 철근콘크리트 건물의 조적채움벽 등 기존에 계획하지 않은 다양한 조건에서 TCP 및 TRM-단열재 보강공법에 대한 성능을 파악하고자 다양한 변수에 대한 실험연구를 수행하였음.

○ 연구개발내용 홍보
- 본 연구과제에서 개발하고자 한 내진 및 에너지 동시보강은 최근 기존 건축물의 내진보강사업과 그린리모델링 사업을 동시에 수행하는 종합성능개발사업의 추진 근거로 활용되어 관련 사업(국토안전관리원)에 연구 및 기술 지원하여 성과 홍보에 노력함.
- 관련으로 기술 홍보를 위해 국내학술발표 및 다큐멘터리 방송 등에 참여하여 기술 홍보에 노력함.

○ 국제공동연구 온라인 세미나
- COVID-19 영향으로 공동연구기관과 대면 세미나 및 실험 참여 등을 수행할 수 없게됨에 따라 연구 추진회의, 진도회의 등을 온라인으로 연 2회 개최하여 공동연구 추진함.
- 각 기관에서 실험 수행시 실험 생중계 및 온라인 회의를 통해 공동 수행을 추진함.

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 국내 및 아시아권역의 건축물 내진 및 에너지 동시 보강 기술 선도
- 현재 국내에서 건축물의 내진과 단열/난방 등 에너지 보강을 동시에 추구하는 기술 개발은 극히 미진한 수준임.
- 내진-에너지 동시 보강 개념은 최근 유럽에서 시작되어 국내 및 아시아권에서는 관련 연구개발이 거의 수행되지 않음에 따라 관련 기술을 선도하는데 기여함.

○ 국가 내진-에너지 동시보강사업 추진에 기여
- 최근 국내(국토안전관리원 등)에서도 내진보강사업과 그린리모델링사업의 이중 추진에 따른 사회·경제적 비용을 절약하는 차원에서 기존 건물의 내진 및 에너지 동시보강사업을 추진하고자 노력중임.
- 본 연구에서 내진 및 에너지 동시 보강 기술을 선제적으로 개발함에 따라 국가 기존건축물 종합성능보강사업의 추진 근거 제공

○ 기술적 측면
- 국외 선진기술의 원천기술 확보를 통한 국내 기술력 향상에 기여
- 내진-에너지 복합 보강에 따른 고부가가치 보강기술 개발로 국제 기술 경쟁력 강화에 기여
- 실증에 기반한 내진보강 및 에너지 보강 기술 개발로 기술의 신뢰성 향상

❍ 경제적 측면
- 기존 조적조 건축물의 효율적 내진보강으로 지진피해를 최소화하여 조적조 건물 붕괴로 인한 직·간접적 경제적 손실 최소화
- 조적조 건축물의 내진보강과 에너지 보강을 동시에 달성하는 저비용 고효율 보강기술의 적용으로 보강비용 절감
- 기존 노후 조적조 에너지 보강 및 효율 증대로 에너지 소비량 감소
- 예방형 재난대응기술로 향후 지진 발생시 피해 및 복구비용 저감 기대

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 지속적 연구개발성과 관리
- 연구 종료 2년 이내 국제공동학술논문 2건 게재 : 본 연구에서 수행한 실대형 진동대 실험 결과 및 JRC 수행 예정인 TRM-단열재 보강 실험 내용 등에 관한 SCI급 학술논문 2건 투고 예정이며 국제학술발표에도 관련 내용을 발표하고자 함.

○ 실용화를 위한 추가 연구
- 본 연구를 통해 TCP 또는 내진-단열 동시보강을 통해 내진과 에너지 보강 가능성을 확인하였으며 보강 목표를 적절히 달성할 수 있을 것으로 판단되나, 시공성 및 기존 대비 보강 성능 향상 측면에서 개선된 동시보강 공법 개발에 관한 추후 연구가 필요하며 본 연구의 결과를 기초 연구로 활용하고자 함.
- 본 연구를 통해 개발한 TCP 기술을 실용화(현장적용) 및 향후 사업화하기 위하여 다음과 같은 다양한 조건에 대한 보완 연구가 추가적으로 필요함.
  * (구조 및 시공 특성) TCP 자체의 신축 팽창 특성, 1면 보강시 양생에 따른 컬링 현상, 장기 균열 발생 특성
  * (시공성 및 사업성) 시공법 개선 및 모듈화된 공장제품 개발 방안

○ 국제공동연구 추진 활용
- 본 연구에서 수행한 내진-에너지 동시보강의 개선을 위해 본 연구 성과를 활용하여 국제공동연구 추진
- 합성목재를 사용한 동시보강 기술 개발 관련 공동연구 추진 시 연구 성과 활용

별첨 1. 참고문헌

Architectural Institute of Korea (2018), Site Inspection and Damage Investigation of Buildings by Earthquakes in Gyeongju and Pohang, Architectural Institute of Korea, Seoul.

Akhoundi, F., Vasconcelos, G., Lourenço, P., Silva, L. M., Cunha, F., and Fangueiro, R. (2018a). "In-plane behavior of cavity masonry infills and strengthening with textile reinforced mortar." Engineering Structures, 156, 145-160.

Akhoundi, F., Vasconcelos, G., Lourenço, P., Vasconcelos, G., and Lourenço, P. (2018b). "In Plane Behavior of Infills using Glass Fiber Shear Connectors in Textile Reinforced Mortar (TRM) Technique." International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research, 2(1), 1-14.

Almusallam, T. H., and Al-Salloum, Y. A. (2007). "Behavior of FRP Strengthened Infill Walls under In-Plane Seismic Loading." Journal of Composites for Construction, 11(3), 308-318.

Altin, S., Anil, Ö., and Kara, M. E. (2008a). "Strengthening of RC nonductile frames with RC infills: An experimental study." Cement and Concrete Composites, 30, 612 621.

Altin, S., Anil, Ö., Kara, M. E., and Kaya, M. (2008b). "An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips." Composites Part B: Engineering, 39(4), 680-693.

Asdrubali, F., Baldassarri, C., and Fthenakis, V. (2013). "Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimisation of conventional Italian buildings." Energy and Buildings, 64, 73-89.

Asteris, P. G., Antoniou, S. T., Sophianopoulos, D. S., and Chrysostomou, C. Z. (2011). "Mathematical Macromodeling of Infilled Frames: State of the Art." Journal of Structural Engineering, 137(12), 1508-1517.

Asteris, P. G., Cavaleri, L., Trapani, F. D., and Sarhosis, V. (2016). "A macro-modelling approach for the analysis of infilled frame structures considering the effects of openings and vertical loads." Structure and Infrastructure Engineering, 12(5), 551-566.

Asteris, P. G., Chrysostomou, C. Z., Giannopoulos, I., and Ricci, P. (2013). "Modeling of Infilled Framed Structures." Computational Methods in Earthquake Engineering, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, and V. Plevris, eds., Springer Netherlands, Dordrecht, 197-224.

Ayatar, M. E., Canbay, E., and Binici, B. (2018). "Strengthening of reinforced concrete frames with engineered cementitious composite panels." Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, 1-15.

Bournas, D. A. (2018). "Concurrent seismic and energy retrofitting of RC and masonry building envelopes using inorganic textile-based composites combined with insulation materials: A new concept." Composites Part B: Engineering, 148, 166-179.

Breveglieri, M., Camata, G., and Spacone, E. (2018). "Strengthened infilled RC frames: Continuum and macro modeling in nonlinear finite element analysis." Composites Part B: Engineering, 151, 78-

91.

Calvi, G. M., Sousa, L., and Ruggeri, C. (2016). “Energy Efficiency and Seismic Resilience: A Common Approach.” Multi-hazard Approaches to Civil Infrastructure Engineering, P. Gardoni and J. M. LaFave, eds., Springer International Publishing, Cham, 165-208.

Cardone, D., Rossino, M., and Gesualdi, G. (2018). “Estimating fragility curves of pre-70 RC frame buildings considering different performance limit states.” Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

CEN. (2005). BS EN 1996-1-1:2005 Eurocode 6. Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. BSI, London.

Crisafulli, F. J. (1997).“Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills” PhD, University of Canterbury, New Zealand.

De Luca, F., Verderame, G. M., Gómez-Martínez, F., and Pérez-García, A. (2014).“The structural role played by masonry infills on RC building performances after the 2011 Lorca, Spain, earthquake” Bulletin of Earthquake Engineering, 12(5), 1999-2026.

Decanini, L. D., and Fantin, G. E. (1986). “Modelos simplificados de la mampostería incluida en porticos.” Caracteristicas de stiffnessy resistencia lateral en estado limite. Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, 2, 817-836.

Dehghani, A., Nateghi-Alahi, F., and Fischer, G. (2015). “Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames.” Engineering Structures, 105, 197-208.

ECOFYS. (2007). U-values for Better Energy Performance of Buildings. 65.

Erol, G., and Karadogan, H. F. (2016). “Seismic strengthening of infilled reinforced concrete frames by CFRP.” Composites Part B: Engineering, 91, 473-491.

European Commission. (2018). CORDIS Results Pack on Deep Renovation.

European Commission. (2019). The European Green Deal - Communication From The Commission To The European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions. European Commission, Brussels.

European Parliament, and Council of the European Union. (2018). Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance). 156.

EUROSTAT. (2011). “Census 2011.” <https://ec.europa.eu/CensusHub2/> (Aug. 22, 2019).

Fikri, R., Dizhur, D., Walsh, K., and Ingham, J. (2018). “Seismic performance of Reinforced Concrete Frame with Masonry Infill buildings in the 2010/2011 Canterbury, New Zealand earthquakes.” Bulletin of Earthquake Engineering.

Gkournelos, P. D., Bournas, D. A., and Triantafillou, T. C. (2019). “Combined seismic and energy upgrading of existing reinforced concrete buildings using TRM jacketing and thermal insulation.” Earthquakes and Structures, 16(5), 625-639.

Heat Roadmap Europe. (2017). Heating and Cooling facts and figures.

Ismail, N., El-Maaddawy, T., and Khattak, N. (2018). “Quasi-static in-plane testing of FRCM strengthened non-ductile reinforced concrete frames with masonry infills.” Construction and Building Materials, 186, 1286-1298.

Kappos, A. J., and Panagopoulos, G. (2010). “Fragility curves for reinforced concrete buildings in Greece.” Structure and Infrastructure Engineering, 6(1-2), 39-53.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (1997), Development of thermal insulation design and construction system of buildings, KICT, 77-94.

Korkmaz, S. Z., Kamanli, M., Korkmaz, H. H., Donduren, M. S., and Cogurcu, M. T. (2010). “Experimental study on the behaviour of nonductile infilled RC frames strengthened with external mesh reinforcement and plaster composite.” Natural Hazards and Earth System Science, 10(11), 2305-2316.

Kouris, L. A., Borg, R. P., and Indirli, M. (2010). “The L’Aquila Earthquake, April 6th, 2009: a review of seismic damage mechanisms.” Proceedings of the Final Conference of COST Action C26, Urban Habitat Constructions Under Catastrophic Events, Mazzolani, FM September, 16-18.

Koutas, L., Bousias, S., and Triantafillou, T. (2015a). “Seismic Strengthening of Masonry Infilled RC Frames with TRM: Experimental Study.” Journal of Composites for Construction, 19(2), 04014048.

Koutas, L. N., and Bournas, D. A. (2019). “Out-of-Plane Strengthening of Masonry-Infilled RC Frames with Textile-Reinforced Mortar Jackets.” Journal of Composites for Construction, 23(1), 04018079.

Koutas, L., Triantafillou, T. C., and Bousias, S. N. (2015b). “Analytical Modeling of Masonry Infilled RC Frames Retrofitted with Textile-Reinforced Mortar.” Journal of Composites for Construction, 19(5), 04014082.

Koutromanos, I., Kyriakides, M., Stavridis, A., Billington, S., and Shing, P. B. (2013). “Shake Table Tests of a 3-Story Masonry-Infilled RC Frame Retrofitted with Composite Materials.” Journal of Structural Engineering, 139(8), 1340-1351.

Kyriakides, M. A., and Billington, S. L. (2014). “Cyclic Response of Nonductile Reinforced Concrete Frames with Unreinforced Masonry Infills Retrofitted with Engineered Cementitious Composites.” Journal of Structural Engineering, 140(2), 04013046.

Li, Y., Zhu, J., and Wang, Z. (2019). “Investigation on Mechanical Properties of Masonry Infill Wall Strengthened with ECC.” KSCE Journal of Civil Engineering, 23(1), 295-306.

Loga, T., Stein, B., and Diefenbach, N. (2016). “TABULA building typologies in 20 European countries

—Making energy-related features of residential building stocks comparable." Energy and Buildings, Towards an energy efficient European housing stock: monitoring, mapping and modelling retrofitting processes, 132, 4-12.

Mainstone, R. J. (1974). "Supplementary note on the stiffness and strength of infilled frames." Current paper CP13/74, Buildings Research Establishment, London.

Mander, J. B., Priestley, M. J., and Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete." Journal of structural engineering, 114(8), 1804-1826.

Menegotto, M., and Pinto, P. E. (1973). "Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal forces and bending moment." IASBE Proceedings.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice 2017-881(2017), Energy Saving Design Standards of Buildings, MOLIT, Korea.

National Institute for Disaster Prevention (2009), Study on Seismic Retrofitting Techniques for Unreinforced Masonry Buildings, NEMA.

Ozcebe, S., Crowley, H., Baker, H., Spence, R., and Foulser-Piggott, R. (2014). NERA D7.5 Census data collection and harmonisation for Europe. 25.

Ozkaynak, H., Yuksel, E., Buyukozturk, O., Yalcin, C., and Dindar, A. A. (2011). "Quasi-static and pseudo-dynamic testing of infilled RC frames retrofitted with CFRP material." Composites Part B: Engineering, 42(2), 238-263.

15. Park, J.M., Kim, D.H., and Suh, D.J. (2012), Recent research trends for green building thermal insulation materials, Clean Technology, 18(1), 14-21.

Pohoryles, D. A., and Bournas, D. A. (2020a). "Seismic retrofit of infilled RC frames with textile reinforced mortars: State-of-the-art review and analytical modelling." Composites Part B: Engineering, 183, 107702.

Pohoryles, D. A., and Bournas, D. A. (2020b). "Combined seismic and energy retrofit of RC buildings: in-plane strengthening of masonry infills using textile reinforced mortars." Proc. 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, 3b-0106.

Pohoryles, D. A., and Bournas, D. A. (2020c). "A unified macro-modelling approach for masonry-infilled RC frames strengthened with composite materials." Engineering Structures, 223, 111161.

Pohoryles, D. A., Maduta, C., Bournas, D. A., and Kouris, L. A. (2020). "Energy performance of existing residential buildings in Europe: A novel approach combining energy with seismic retrofitting." Energy and Buildings, 223, 110024.

Porter, K. A. (2003). "An overview of PEER's performance-based earthquake engineering methodology." Proceedings of ninth international conference on applications of statistics and probability in civil engineering.

da Porto, F., Guidi, G., Verlato, N., and Modena, C. (2015). "Effectiveness of plasters and textile

reinforced mortars for strengthening clay masonry infill walls subjected to combined in-plane/out-of-plane actions / Wirksamkeit von Putz und textilbewehrtem Mörtel bei der Verstärkung von Ausfachungswänden aus Ziegelmauerwerk, die kombinierter Scheiben- und Plattenbeanspruchung ausgesetzt sind." Mauerwerk, 19(5), 334-354.

Ricci, P., De Luca, F., and Verderame, G. M. (2011). "6th April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: reinforced concrete building performance." Bulletin of Earthquake Engineering, 9(1), 285-305.

Sagar, S. L., Singhal, V., and Rai, D. C. (2019). "In-Plane and Out-of-Plane Behavior of Masonry-Infilled RC Frames Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix." Journal of Composites for Construction, 23(1), 04018073.

Seismosoft Ltd. (2018). SeismoStruct. Seismosoft Ltd, Pavia (PV) - Italy.

Selim, M., Okten, C., Ozkan, M., and Gencoglu, _. (2015). "Behavior of RC Frames with Infill Walls Strengthened by Cement Based Composites." International Society of Offshore and Polar Engineers.

Statistical Office of the Republic of Serbia of Serbia. (2011). "Census 2011." <http://data.stat.gov.rs/Home/Result/3102030601?languageCode=en-US> (Sep. 4, 2019).

Stein, B., Loga, T., and Diefenbach, N. (Eds.). (2016). Scenario analyses concerning energy efficiency and climate protection in local residential building stocks: examples from eight European countries. EPISCOPE synthesis report, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt.

TABULA. (2012). Application of building typologies for modelling the energy balance of the residential building stock. IWU, Darmstadt.

Tetta, Z. C., Koutas, L. N., and Bournas, D. A. (2018). "Shear strengthening of concrete members with TRM jackets: Effect of shear span-to-depth ratio, material and amount of external reinforcement." Composites Part B: Engineering, 137, 184-201.

Turkish Statistical Institute (TurkStat). (2011). "Census 2011." <http://www.turkstat.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1047> (Sep. 4, 2019).

U.S. Department of Energy (Ed.). (2018). EnergyPlusTM Version 8.9.0 Documentation Engineering Reference. U.S. Department of Energy.

Vamvatsikos, D., and Cornell, C. A. (2002). "Incremental dynamic analysis." Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 31(3), 491-514.

Varum, H. (2003). "Seismic Assessment, Strengthening and Repair of Existing Buildings." PhD Thesis, University of Aveiro, Portugal.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 국토교통기술촉진연구사업 '기존 조적조 건축물의 내진 및 에너지효율 복합 성능 개선을 위한 TCP 보강기술 개발' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.