주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

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

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

18CTAP-C117263-03

산업광물을 이용한 복합기능성 건축물내장재 및 마감재 실용화 기술 개발 최종보고서

2019

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

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

국토교통기술촉진연구사업 제3차연도 최종 보고서

18CTAP-C117263-03

산업광물을 이용한 복합기능성 건축물 내장재 및 마감재 실용화 기술 개발 최종보고서

2019. 4. 27.

주관연구기관 / (주)엠에스이엔씨
공동연구기관 / (주)지아이
한국해양대학교
대진대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘산업광물을 이용한 복합기능성 건축물 내장재 및 마감재 실용화 기술 개발’(연구개발 기간 : 2016.06.28. ~ 2019.04.27.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 04. 27.

주관연구기관명 : (주)엠에스이엔씨 (대표자) 김성환 (인)

공동연구기관명 : (주)지아이 (대표자) 김성욱 (인)

공동연구기관명 : 한국해양대학교 산학협력단 (대표자) 김정렬 (인)

공동연구기관명 : 대진대학교 산학협력단 (대표자) 김성수 (인)

주관연구기관책임자: (주)엠에스이엔씨 김성환
공동연구기관책임자: (주)지아이 김성욱
공동연구기관책임자: 한국해양대학교 김태형
공동연구기관책임자: 대진대학교 김성수

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C117263-03	해당 단계 연구 기간	2016.06.28.-2019.04.27	단계구분	(1단계)/(1단계)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	세부과제명	산업광물을 이용한 복합기능성 건축물 내장재 및 마감재 실용화 기술개발			
연구책임자	김성환	해당단계 참여연구원 수	총: 21명 내부: 21명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:840,000천원 민간:282,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,122,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 21명 내부: 21명 외부: 명	총 연구비	정부:840,000천원 민간:282,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,122,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	주관	주식회사 엠에스이엔씨		참여기업명 주식회사 엠에스이엔씨 주식회사 지아이	
	공동	주식회사 지아이			
	공동	한국해양대학교			
	공동	대진대학교			
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제				

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록・기탁 번호	4(2)	4	1			1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

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

요약

- 기능성 산업광물의 전/자기적 특성과 양이온치환용량 개선을 위한 나노분말 제조 및 경량기포 배합기술 적용기술 개발
- 2차 처리기술(소성, 결합재, 결합촉매)을 활용한 기능성 증대
- 에너지 효율 증대 및 자동 수평 기능 축열층 모르타르 제품의 실용화
- 재료의 흡착과 압축강도를 높인 복합기능 벽면 내장재(미장 재료, 패널) 시제품의 실용화
- 재료의 부착 강도를 강화한 복합기능 천장 내장재 시제품의 실용화
- 현장 조건을 반영한 실대형 모형을 구축하고 기능성 및 개선점 보완과 성능을 검증
- 시공 및 유지관리 편의성, 기존 탄산염계 시멘트와의 경쟁, 그리고 기업화를 위한 경제성을 고려한 제조 기술 개발

보고서 면수

265

(부록 포함)

요약문

연구의 목적 및 내용	- 나노분말, 경량기포 배합기술을 이용한 복합 기능성(축열, 단열, 흡음, 항균) 건축 내장 및 마감재 실용화 기술을 개발 - 2차 처리기술(결합촉매, 저온소성)로 성능 증대 및 시공 편의성과 경제성을 확보 - 에너지 효율 30% 상승, 소음 · 진동 20% 저감을 달성 - 기능성 산업 광물의 전/자기적 특성과 양이온치환용량 개선을 위한 나노분말 제조 및 경량기포 배합기술의 적용기술 개발 - 2차 처리기술(소성, 결합재, 결합촉매)을 활용한 기능성 증대 - 에너지 효율 증대 및 자동 수평 기능 축열층 모르타르 제품의 실용화 - 재료의 흡착과 압축강도를 높인 복합기능 벽면 내장재(미장 재료, 패널) 시제품의 실용화 - 재료의 부착 강도를 강화한 복합기능 천장 내장재 시제품의 실용화 - 연구개발 1차년부터 현장 조건을 반영한 실대형 모형을 구축하고 기능성 및 개선점 보완과 성능을 검증 - 시공 및 유지관리 편의성, 기존 탄산염계 시멘트와의 경쟁, 그리고 기업화를 위한 경제성을 고려한 제조 기술 개발
연구개발성과	- 복합기능성 경량 건축 재료 제조 매뉴얼 - (1차년) 바닥 축열재(모르타르) 실용화 - (2차년) 벽면 내장재(미장용, 가변형 경량패널) 시제품 및 실용화 - (3차년) 천장 내장재(미장용, 고강성 부착패널) 시제품 및 실용화
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 공공분야 신사업 육성정책에 연계한 건축에 활용 - 민간분야 건축에 활용 - 에너지 손실 절감, 층간 소음 완화, 미적 기능개선, 건축 재료원가 감축 - 건축 내장재의 수입대체 및 수출 시장 확대, 관련 분야 일자리 창출

국문핵심어 (5개 이내)	건축내장재	결합촉매	축열	나노분말	경량기포
영문핵심어 (5개 이내)	Interior materials	Combinatorial catalysis	Thermal energy storage	Nano-powder	Light-weight foaming agent

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

가. 연구 목적 ····· 1

(1) 목적 ····· 1

(2) 배경 ····· 2

(3) 필요성 ····· 3

(4) 연구개발 대상의 국내외 현황 ····· 6

(5) 연차별 연구개발 목표 및 내용 ····· 7

나. 연구 범위 ····· 11

(1) 규산염 산업광물의 이용 ····· 11

(2) 재료의 내구성 개선 ····· 12

(3) 최적 배합비 및 시공법 개발 ····· 13

다. 연구 방법 ····· 14

(1) 산업광물의 특성 분석 ····· 14

(2) 바닥 축열층 ····· 14

(3) 경량 벽체 블록 ····· 15

(4) 천장 마감재 ····· 16

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 18

가. 재료원 특성 ····· 18

(1) 규산염 산업광물 ····· 18

(2) 결합제 ····· 32

(3) 소결 ····· 35

나. 2차처리기술 ····· 35

(1) 경량화 ····· 35

(2) 고화 ····· 54

(3) 소결 ····· 60

다. 강도특성 ····· 60

(1) 압축강도 ····· 62

(2) 직접인장강도 ····· 66
(3) 휨인장강도 ····· 67
(4) 소결 ····· 69
라. 변형 ····· 70
(1) 수축 및 팽창 ····· 70
(2) 내화성 ····· 71
(3) 유동 특성 ····· 80
(4) 소결 ····· 82
마. 최적 배합비 산정 ····· 82
(1) 바닥 축열 모르타르 ····· 82
(2) 경량 벽체 블록 ····· 84
(3) 천장 마감재 ····· 85
(4) 소결 ····· 86
바. 실대형 모형 ····· 86
(1) 모형 제작 ····· 87
(2) 실험동 및 기준동 제작 ····· 89
(3) 난방 및 냉방 설비 ····· 91
(4) 소결 ····· 92
사. 바닥 축열층 실험 ····· 92
(1) 축열층 시공 ····· 92
(2) 모니터링 시스템 구축 ····· 96
(3) 축열 특성 및 에너지 효율 분석 ····· 99
(4) 소음 · 진동저감 특성 ····· 126
(5) 소결 ····· 128
아. 경량 벽체 실험 ····· 128
(1) 벽체 규격 및 제작 ····· 128
(2) 모니터링 시스템 구축 ····· 132
(3) 축열 특성 및 에너지 효율 분석 ····· 132
(4) 소결 ····· 148

자. 천장 마감재 실험 ····· 148
(1) 마감재 제작 ····· 148
(2) 친환경 특성 ····· 150
(3) 천장마감재의 축열성능 ····· 151
(4) 실내온도 축열성 비교 ····· 162
(5) 소결 ····· 164

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 166

가. 목표 달성도 ····· 166
(1) 정성적 목표 달성도 ····· 166
(2) 정량적 목표 달성도 ····· 167
나. 목표 달성여부 ····· 168
(1) 정성적 목표 ····· 168
(2) 정량적 목표 ····· 170
다. 목표 미달성시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성) ····· 171

4. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 173

가. 건축 소재의 활용 계획 ····· 173
(1) 제조 기술의 활용 ····· 173
(2) 요소기술의 활용 ····· 173
나. 타 연구에의 응용 ····· 174
다. 사업화 방안 ····· 175
(1) 에너지 저감 ····· 175
(2) 주거환경 개선 ····· 176
(3) 핵심경쟁 요인 ····· 176
(4) 기대효과 ····· 177

(5) 수익확보 전략 ····· 178
라. 추가 연구의 필요성 ····· 178
(1) 외단열 및 난연성 소재 개발 ····· 178
(2) 내진성능 개선을 통한 재난안전산업 분야 연계 ····· 178
(3) 미세먼지 저감과 연계한 주거환경 개선 ····· 180

5. 연구비 집행실적 대비표 ····· 183
가. 연구비 사용명세서(총괄) ····· 183
나. 연구비 사용명세서(기관별) ····· 184
(1) 엠에스이엔씨 ····· 184
(2) 지아이 ····· 185
(3) 한국해양대학교 ····· 186
(4) 대진대학교 ····· 187

붙임 참고문헌 ····· 188

〈 부 록 〉

1. 실대형 모형 제작 ····· 1

2. 기능성 산업광물 경량화 ····· 2

3. 바닥축열층 모르타르 시공법 ····· 13

4. 경량 벽체 시공법 ····· 16

5. 천장 마감 시공법 ····· 21

6. 엑셀기반 최적 배합비 산정 ····· 25

7. 열전도 센서 프로토타입 설계 ····· 54

첨부: 실대형모형의 설계 및 시공 도면 원본 ····· 63

〈 표 목 차 〉

표 1.1 일본의 친환경 건축자재 목록 ····· 6
표 1.2 연구개발의 목표 ····· 7
표 1.3 1차년 각 기관의 목표 ····· 8
표 1.4 2차년 각 기관의 목표 ····· 9
표 1.5 3차년 각 기관의 목표 ····· 10
표 1.6 입경에 따른 밀도변화 ····· 12
표 1.7 공시체의 일축압축강도 ····· 12
표 2.1 장석의 X-선 형광분석 결과 ····· 21
표 2.2 여러 가지 광물의 양이온치환용량 비교 ····· 23
표 2.3 분체에 따른 양이온치환용량 비교 ····· 24
표 2.4 항균성 실험 시료 ····· 24
표 2.5 건축 소재로 적용한 모르타르의 항균도 ····· 26
표 2.6 장석 공시체를 이용한 중금속 흡착시험 ····· 27
표 2.7 제올라이트의 종류 ····· 29
표 2.8 제올라이트의 X-선 형광분석 결과 ····· 30
표 2.9 보통 포틀랜드 시멘트의 평균 화학조성 ····· 32
표 2.10 보통 포틀랜드 시멘트 클린커의 주요 화합물의 성질 ····· 33
표 2.11 보통 포틀랜드 시멘트의 X-선 형광분석 결과 ····· 34
표 2.12 가열과정 중의 밀도 변화 ····· 40
표 2.13 입경에 따른 밀도 변화 ····· 42
표 2.14 입경별 양이온치환용량의 변화 ····· 44
표 2.15 시멘트 배합비에 따른 모르타르의 양이온치환용량 ····· 44
표 2.16 경량기포 배합 비율에 따른 밀도 변화 ····· 47
표 2.17 경량기포비율에 따른 일축압축강도의 변화 ····· 51
표 2.18 경량기포양에 따른 수리전도도 ····· 53
표 2.19 고화제의 화학조성(XRF) ····· 55

표 2.20 고화제의 화학조성(SEM-EDS) ····· 55
표 2.21 공시체 규격 ····· 57
표 2.22 공시체의 일축압축강도 ····· 58
표 2.23 공시체의 SEM-EDS에 의한 화학조성 ····· 59
표 2.24 바닥 축열 모르타르 배합율에 따른 압축강도 변화 ····· 62
표 2.25 경량 벽체 밀도변화에 따른 압축강도 변화 ····· 63
표 2.26 경량 벽체 물시멘트비에 따른 압축강도 변화 ····· 64
표 2.27 경량 벽체 배합 변화와 혼화재 사용에 따른 일축압축강도 변화 ····· 65
표 2.28 경량 벽체 연속섬유 및 PVA섬유 첨가에 따른 직접인장강도 변화 ····· 67
표 2.29 경량 벽체 PVA섬유 첨가에 따른 휨인장강도 변화 ····· 68
표 2.30 천장 마감재 PVA섬유 첨가에 따른 휨인장강도 변화 ····· 69
표 2.31 배합비에 따른 건조수축 변화 측정 ····· 70
표 2.32 내화구조의 성능 기준 ····· 73
표 2.33 소성온도에 따른 밀도 변화 ····· 75
표 2.34 소성온도에 따른 X-선 회절분석 결과 ····· 80
표 2.35 자동수평기능 축열층 모르타르 배합비 ····· 81
표 2.36 모르타르의 유동성 측정결과 ····· 82
표 2.37 바닥 축열 모르타르 배합표 ····· 83
표 2.38 바닥 모르타르 가열 실험시 소비전력 ····· 83
표 2.39 경량 벽체 모르타르 배합표 ····· 84
표 2.40 경량 벽체 가열 실험 시 소비전력 ····· 85
표 2.41 천장마감재 배합표 ····· 85
표 2.42 천장마감재 가열 실험시 소비전력 ····· 85
표 2.43 열화상 카메라 제원 ····· 97
표 2.44 설치된 센서 제원 ····· 98
표 2.45 가열냉각변화 ····· 105
표 2.46 기준동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표 ····· 107
표 2.47 시험동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표 ····· 110
표 2.48 기준동과 시험동의 바닥 축열층 1차 가열 냉각 온도 측정 ····· 114

표 2.49 기준동과 시험동의 바닥 축열층 1차 가열실험의 전력량 ····· 115
표 2.50 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열 냉각 온도 측정(45℃) ····· 117
표 2.51 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열시험 전력사용량(45℃) ····· 117
표 2.52 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열 온도 측정(65℃) ····· 119
표 2.53 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열시험 전력사용량(65℃) ····· 120
표 2.54 기준동과 시험동의 바닥 축열층 3차 가열 온도 측정(50℃) ····· 122
표 2.55 기준동과 시험동의 바닥 축열층 3차 가열시험 전력사용량 ····· 124
표 2.56 진동센서 측정값 ····· 126
표 2.57 기준동의 추가 가열시 시험동의 에너지 절감량 ····· 127
표 2.58 가열시 벽체의 온도 변화 ····· 134
표 2.59 냉각시 벽체의 온도 변화 ····· 134
표 2.60 경량블록 벽체의 가열 냉각 시 온도 변화 ····· 136
표 2.61 50℃ 가열실험 인한 벽체의 온도상승(1차 시공-2차 실험) ····· 143
표 2.62 경량블록 벽체의 1차 시공의 전력량 비교 ····· 145
표 2.63 경량블록 벽체의 2차 시공의 전력량 비교 ····· 147
표 2.64 기준동과 시험동의 천장부 가열 온도변화 ····· 157
표 2.65 기준동과 시험동의 천장부 냉각 온도변화 ····· 159
표 2.66 기준동과 시험동의 천장부 가열시험 전력사용량 ····· 161

〈 그 림 목 차 〉

그림 1.1 연구개발의 목표 ····· 1
그림 1.2 파리 기후변화협약 체결과 한국의 온실가스 감축목표 ····· 2
그림 1.3 층간소음으로 인한 사회적 문제(연합뉴스) ····· 5
그림 1.4 층간소음 저감기술 특허 동향(컨슈머와이드) ····· 6
그림 1.5 미국 친환경 건축 자재 시장규모(2014년 기준) ····· 7
그림 1.6 연차별 핵심기술 및 성과지료 ····· 7
그림 1.7 1차년 각 기관별 목표 ····· 8
그림 1.8 2차년 각 기관별 목표 ····· 9
그림 1.9 3차년 각 기관별 목표 ····· 10
그림 1.10 다공성 재료의 표면구조와 고온소성시 발생하는 용융구조 ····· 11
그림 1.11 규산염 재료원의 입경별 강도 변화 ····· 12
그림 1.12 결합촉매 사용 전과 후의 공시체 구조 ····· 13
그림 1.13 결합촉매 배합(0.5%) 후의 압축강도 변화 ····· 13
그림 1.14 나노분말의 항균성 ····· 14
그림 1.15 모르타르 가열 및 냉각 중의 온도 변화 ····· 15
그림 1.16 경량기포 및 기포혼입 모르타르 ····· 15
그림 1.17 레드세일 입자와 활성탄 입자 ····· 16
그림 2.1 다공질을 가진 장석반암의 사진 ····· 18
그림 2.2 다공질 장석의 편광현미경 사진(×40) ····· 19
그림 2.3 장석의 SEM 영상(좌: ×2000, 우: ×7000) ····· 19
그림 2.4 강제풍화에 의한 사장석의 장석의 표면 구조의 변화 ····· 20
그림 2.5 다공질 장석의 X-선 회절분석에 의한 조성 ····· 21
그림 2.6 장석의 중화성능 실험(상: 산성 중화능력, 하:염기성 중화능력) ····· 22
그림 2.7 분체정도에 따른 양이온치환용량의 변화 ····· 23
그림 2.8 2차 가공전 항균시험 결과 ····· 25
그림 2.9 2차 가공후 항균시험 결과 ····· 26

그림 2.10 중금속 흡착성능 평가 ····· 26
그림 2.11 다공질 장석의 원적외선 방사율 ····· 27
그림 2.12 다공질 장석의 원적외선 방사에너지 ····· 28
그림 2.13 제올라이트의 X-선 회절분석에 의한 조성 ····· 30
그림 2.14 보통 포틀랜드 시멘트의 X-선 회절분석에 의한 조성 ····· 33
그림 2.15 건축용 PVA섬유(좌)와 인장강도 거동(우) ····· 34
그림 2.16 풍화된 장석의 표면 ····· 36
그림 2.17 산성 환경(pH 2.0)에서 사장석의 풍화실험 ····· 36
그림 2.18 장석반암의 표면 구조 변화 ····· 37
그림 2.19 상온에서 400℃ 까지의 가열과정에서의 광물조성 ····· 38
그림 2.20 가열전과 600℃ 가열 후 장석반암의 광물조성 ····· 39
그림 2.21 장석반암의 내화실험사진 ····· 39
그림 2.22 가열과정의 밀도변화 ····· 40
그림 2.23 분체과정과 분급 ····· 41
그림 2.24 자동입도 분석기 ····· 41
그림 2.25 가열과정의 밀도변화 ····· 42
그림 2.26 다공질 장석 분말의 입도분포곡선 ····· 42
그림 2.27 입경에 따른 밀도 변화와 감소율 ····· 43
그림 2.28 다양한 입경별 공시체 제작 ····· 45
그림 2.29 입경별 일축압축강도 ····· 45
그림 2.30 기포제의 종류에 따른 기포 형상 ····· 46
그림 2.31 경량기포 제조장치 ····· 46
그림 2.32 경량기포 배합 순서 ····· 47
그림 2.33 경량기포 배합 비율에 따른 밀도 변화 ····· 48
그림 2.34 기포양에 따른 기포 형태 ····· 48
그림 2.35 기포제의 종류에 따른 기포 형상 ····· 49
그림 2.36 기포의 소포현상 ····· 49
그림 2.37 경량기포의 팽창과 수축 ····· 50
그림 2.38 사용된 일축압축분석 시험장비 ····· 50

그림 2.39 경량기포의 양에 따른 밀도와 일축압축강도의 관계 ····· 51
그림 2.40 활성장석 50%와 시멘트 50% 공시체의 일축압축강도 변형율 ····· 51
그림 2.41 기포량에 따른 공시체의 일축압축강도 시험 사진 ····· 52
그림 2.42 경량기포혼입시료의 투수실험 ····· 52
그림 2.43 경량기포공시체의 수리전도도 ····· 53
그림 2.44 고화제의 원리 ····· 54
그림 2.45 고화제 분말(좌)과 고화제 수용액(우) ····· 55
그림 2.46 고화제의 SEM영상 ····· 56
그림 2.47 고화제 ①의 X-선회절분석 결과 ····· 56
그림 2.48 고화제 ②의 X-선회절분석 결과 ····· 57
그림 2.49 공시체의 SEM 이미지 ····· 59
그림 2.50 일축압축강도 공시체(좌)와 일축압축강도시험(우) ····· 60
그림 2.51 휨인장강도 공시체(좌)와 휨인장강도 시험 ····· 61
그림 2.52 직접인장강도 공시체(좌)와 직접인장강도 시험 ····· 61
그림 2.53 만능재료시험기(좌: 일축압축강도, 우: 직접인장강도) ····· 61
그림 2.54 바닥 축열 모르타르 일축압축강도 ····· 62
그림 2.55 경량 벽체 밀도에 따른 압축강도 ····· 63
그림 2.56 경량 벽체 물시멘트비에 따른 압축강도 ····· 64
그림 2.57 경량 벽체 연속섬유 및 PVA섬유 혼입에 따른 직접인장강도 ····· 67
그림 2.58 경량 벽체 PVA섬유 혼입에 따른 휨인장강도 ····· 68
그림 2.59 천장 마감재 PVA섬유 혼입에 따른 휨인장강도 ····· 69
그림 2.60 배합비에 따른 건조수축 변화 ····· 71
그림 2.61 내화 실험(좌: 가열 전, 우: 가열 후) ····· 72
그림 2.62 표준화재 시간-온도곡선(화재보험협회, 2018) ····· 73
그림 2.63 내화실험용 전기로(좌), 실험장면(우) ····· 74
그림 2.64 가열 온도에 따른 시료 사진 ····· 74
그림 2.65 가열 온도에 따른 강열감량(상)과 휨인장강도 측정결과(하) ····· 75
그림 2.66 가열실험 전 공시체의 주사전자현미경을 이용한 표면 관찰 ····· 76
그림 2.67 400℃ 가열실험 후 공시체의 주사전자현미경을 이용한 표면 관찰 ···· 77

그림 2.68 900℃ 가열실험 후 공시체의 주사전자현미경을 이용한 표면 관찰 ···· 78
그림 2.69 400℃ 및 900℃ 가열실험 후 공시체의 X-선회절분석 결과 ····· 79
그림 2.70 모르타르 흐름기 및 유동성테스트 ····· 80
그림 2.71 타격 후 흐름 분석 ····· 81
그림 2.72 시공 시 발생한 분진, 균열과 최적 배합비로 시공된 사진 ····· 83
그림 2.73 표면탈락과 균열이 발생한 블록과 최적배합으로 제작된 블록 ····· 84
그림 2.74 기준동 천장(좌)과 시험동 천장(우) ····· 85
그림 2.75 실대형 모형 부지(좌: 부지 위성사진, 우: 실대형모형 실험동) ····· 86
그림 2.76 실대형 모형 실험동 증축 과정 ····· 87
그림 2.77 그라우트 전후의 개략도 ····· 87
그림 2.78 바닥 기초 그라우트 ····· 88
그림 2.79 실대형 모형 (정면도, 측면도, 배면도, 단면도) ····· 89
그림 2.80 실대형 모형 설계도면 ····· 89
그림 2.81 ①단계 하부 거푸집 조립 ····· 90
그림 2.82 ②단계 하부 거푸집 조립 및 기초 철근 배근 ····· 90
그림 2.83 ③단계 수직 거푸집 조립 및 철근 배근 ····· 90
그림 2.84 ④단계 콘크리트 타설 및 양생 ····· 91
그림 2.85 ⑤단계 기둥 거푸집 조립 ····· 91
그림 2.86 ⑥단계 상부 슬래브 타설 및 양생 ····· 91
그림 2.87 축열실험 보일러 ····· 92
그림 2.88 냉방 실험 (좌: 이동식 에이컨, 우: 냉방기 설치 운용) ····· 92
그림 2.89 축열층 설계도면(좌) 및 축열층 단면도(우) ····· 93
그림 2.90 축열층 시공순서 ····· 93
그림 2.91 축열층 시공순서) ····· 93
그림 2.92 배관 및 보일러 설치 ····· 93
그림 2.93 바닥 모르타르 타설 ····· 94
그림 2.94 실험 후 바닥 철거 및 재시공 ····· 94
그림 2.95 바닥 모르타르 마감 시공 ····· 94
그림 2.96 1차 축열실험에 적용된 배합비 ····· 95

그림 2.97 2차 축열실험에 적용된 배합비 ····· 95
그림 2.98 3차 축열실험에 적용된 배합비 ····· 96
그림 2.99 실험에 사용된 FLIR사 열화상 카메라 모델 ····· 96
그림 2.100 열화상카메라의 촬영 방법 및 촬영 영상 ····· 97
그림 2.101 원격 온도 모니터링 시스템 모식도 ····· 98
그림 2.102 센서 ····· 98
그림 2.103 IBM사 Bluemix 데이터 서버 화면 ····· 98
그림 2.104 온도계 설치 및 센서 배치 ····· 99
그림 2.105 적산전력계와 라즈베리 파이 모뎀 ····· 99
그림 2.106 열화상 카메라를 이용한 온도측정 ····· 99
그림 2.107 55℃ 온수 공급 시 시험동과 기준동 열적특성 변화 ····· 100
그림 2.108 45℃ 온수 공급 시 시험동과 기준동 열적특성 변화 ····· 101
그림 2.109 50℃ 온수 가열 시 시험동과 기준동 열적특성 변화 ····· 102
그림 2.110 50℃ 온수 가열 후 냉각 시 시험동과 기준동 열적특성 변화 ····· 103
그림 2.111 이동식 에어컨을 사용한 바닥 냉각 시험 ····· 104
그림 2.112 2일 동안의 가열 냉각 변화 그래프 ····· 104
그림 2.113 보일러 배관 출구의 수온의 변화 그래프(상: 기준동, 하: 시험동) 106
그림 2.114 바닥 축열층 1차 가열 냉각 사이클 전기사용량과 온도 측정 ····· 113
그림 2.115 바닥 축열층 2차 모형실험의 가열냉각 온도(45℃) 및 전력사용량 ·· 116
그림 2.116 바닥 축열층 2차 모형실험의 가열냉각 온도(65℃) 및 전력사용량 ·· 118
그림 2.117 바닥 축열층 3차 모형실험의 가열냉각 온도(50℃) 및 전력사용량 ·· 121
그림 2.118 진동센서 측정값 ····· 126
그림 2.119 소음 측정(좌: 소음측정기, 중: 타격위치 선정, 우: 하부타격) ····· 127
그림 2.120 소음 측정값 ····· 127
그림 2.121 실대형 모형 벽체 패널 철거 ····· 128
그림 2.122 1차 시공 경량 벽체블록 철거 ····· 128
그림 2.123 블록제작과정 ① : 재료준비 및 혼합 ····· 129
그림 2.124 블록제작과정 ② : 경량기초 제조와 교반 ····· 129
그림 2.125 블록제작과정 ③ : 혼압용액 타설 및 양생 ····· 130

그림 2.126 블록제작과정 ④ 경량 벽체 탈형 및 적재 ····· 130
그림 2.127 시공 균열 및 시멘트 뭉침현상(좌: 시공 균열, 우: 시공불량) ····· 130
그림 2.128 기준동 블록 시공 과정 ····· 131
그림 2.129 시험동의 블록시공 과정 ····· 131
그림 2.130 벽면 촬영 현장 및 센서 사진 ····· 132
그림 2.131 열화상 카메라를 이용한 경량 벽체의 온도변화 관찰 ····· 133
그림 2.132 경량블록 벽체의 온도 변화 그래프 ····· 134
그림 2.133 경량블록 벽체의 온도 변화 ····· 135
그림 2.134 50℃ 온수 가열 시 시험동 벽체의 열적특성 변화 ····· 137
그림 2.135 50℃ 온수 가열 시 기준동 벽체의 열적특성 변화 ····· 138
그림 2.136 50℃ 온수 가열 후 냉각시 시험동 벽체의 열적특성 변화 ····· 139
그림 2.137 50℃ 온수 가열 후 냉각 시 기준동 벽체의 열적특성 변화 ····· 140
그림 2.138 50℃ 냉각시 기준동 벽체의 열적특성 변화(상), 현장사진(하) ····· 141
그림 2.139 온수온도 75℃ 설정 시 복사열로 인한 벽체의 온도상승(1차 시공) 142
그림 2.140 50℃ 가열실험 인한 벽체의 온도상승(1차 시공-2차 실험) ····· 142
그림 2.141 1차 벽체 에너지 효율 분석 ····· 144
그림 2.142 2차 벽체 에너지 효율 분석 ····· 146
그림 2.144 천장마감재 제작과정(좌: 재료 계량, 중: 교반, 우: 모르타르) ····· 148
그림 2.145 분사형 장비 및 천장 마감 도장 ····· 149
그림 2.146 패널형 천장 마감재 ····· 149
그림 2.147 직물을 이용한 패널 ····· 149
그림 2.148 다양한 노출면의 미장 마감 ····· 150
그림 2.149 흡착필터1, 2의 등온흡착시험 ····· 151
그림 2.150 흡착필터1, 2의 동적흡착시험 ····· 151
그림 2.151 50℃ 온수 가열 시 시험동 천장의 열적특성 변화 ····· 152
그림 2.152 50℃ 온수 가열 시 기준동 천장의 열적특성 변화 ····· 153
그림 2.153 50℃ 온수 가열 후 냉각시 시험동 천장의 열적특성 변화 ····· 154
그림 2.154 50℃ 온수 가열 후 냉각시 기준동 천장의 열적특성 변화 ····· 155
그림 2.155 50℃ 온수 가열(상) 및 냉각(하) 시 천장의 열적특성 그래프 ····· 156

그림 2.156 천장 마감재 모형실험에서의 가열 온도 및 전력사용량 ····· 160
그림 2.157 50℃ 온수를 이용하여 가열과 냉각한 실내온도 시험 ····· 163
그림 2.158 목표온도 21℃까지 50℃ 온수로 가열 시 온도 변화 ····· 164
그림 4.1 친환경 건축 소재의 필요성 ····· 175
그림 4.2 친환경 건축 소재의 필요성 ····· 176
그림 4.3 제천 사우나(좌)와 밀양 세종병원 화재(우) ····· 178
그림 4.4 섬유를 적용한 시편의 인장 시험 ····· 179
그림 4.5 미세먼지와 오존노출로 인한 조기사망자 수(OECD, 2016) ····· 180
그림 4.6 WHO 국제암연구소(IARC, 2013)의 발암물질 항목 ····· 180

1 연구개발과제의 개요

가. 연구 목적

나. 연구 범위

다. 연구 방법

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 목적

(1) 목적

금속 및 비금속 광물은 다양한 분야에 활용된다. 그중 소재원료로 이용되는 비금속광물을 산업광물이라고 한다. 국내 산업에 활용되는 광물자원은 모두 43종이며 이 중에서 산업광물이 25종에 이른다. 산업광물의 상당수는 품위 저하, 인건비 상승. 해외광물의 수입 등으로 경쟁력이 약화되고 있으며 더불어 광물소재의 응용기술개발 또한 침체되고 있다.

장석은 규산염광물에 속하는데 지각상에서 가장 흔한 자연계의 기반물질이어서 산출범위가 매우 넓다. 따라서 산업 분야의 적용기술을 접목하면 중요한 산업광물로 활용할 수 있다. 본 연구는 다공질 장석을 이용하여 건축물의 에너지 사용량을 저감하고 산업광물의 주요 특징인 친환경적 기능을 높여서 건축 내장재로써 소재개발을 위한 핵심기술을 개발하며, 또 실용화를 위한 기반을 조성하기 위한 목적에서 수행되었다.

본 연구의 최종 목표는 다음과 같다.

○ 친환경적 제로에너지 건축물을 위한 바닥 축열재 및 건축 내장재 상용화 기술개발

○ 환경 위해물질의 흡착, 흡음, 단열, 축열 기능을 가진 자료원 개발과 이에 연계된 시제품 제작

본 연구의 세부 연구목표는 다음과 같다.

○ 산업 광물의 복합기능 향상을 위한 2차 처리기술 및 내장재 제조 기술개발

○ 에너지 효율 30% 향상, 기존 기능성 제품 대비 40% 이상의 제조원가 절감

○ 에너지 효율 증대 및 자동수평 기능을 가진 축열 층 모르타르 시제품 개발

○ 복합기능(축열, 단열, 소음·진동 흡수, 항균, 탈취) 기능의 벽면 내장재 실용화

○ 복합기능(축열, 단열, 소음·진동 흡수, 항균, 탈취) 기능의 천장 내장재 실용화



그림 1.1 연구개발의 목표

(2) 배경

(가) 기후 변화 대응과 에너지 전환

리우환경회의(1992년) 이후, 환경오염, 자원고갈 그리고 지구온난화에 대응하여 환경의 보전과 지속 가능한 도시개발에 대한 연구 및 사회제도 개선을 위한 노력이 지속되고 있다. RIO+20 정상회의(2014년)에서 채택된 2014년 지속가능발전목표 SDG의 16개 중점분야에는 에너지(7), 지속 가능한 도시 및 인간정주(10)가 포함되었다. 이에 따라 우리 정부는 2017년 패시브하우스, 2025년 제로에너지 수준의 건축물 확보를 추진키로 하였다.

2015년 12월 파리 기후변화협약을 계기로 한국은 온실가스 감축 목표를 2030년 BAU 대비 37%로 설정하였고, 정책적 관점에서 “기후기술”을 반드시 확보해야 할 핵심대상으로 설정하였다. 2015년 4월 경제관계장관회의에서는 8대 에너지산업 정책 로드맵으로 제로에너지 빌딩(주관: 국토부, 협조: 산업부)을 추진하기로 결정하였다(그림 1.2).

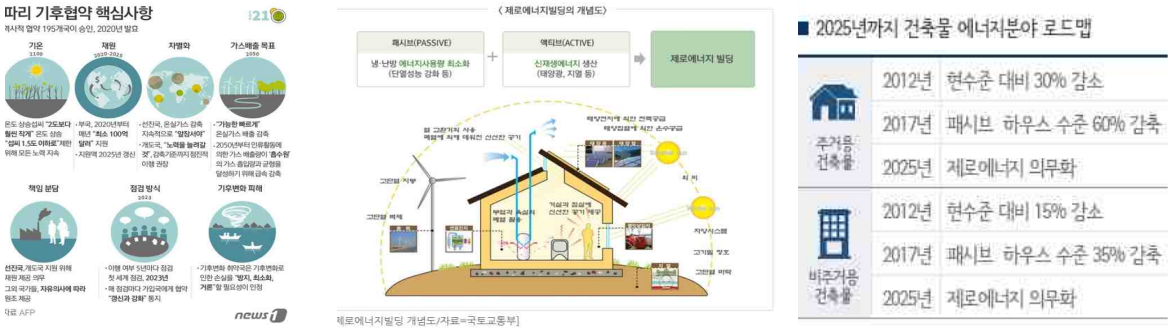


그림 1.2 파리 기후변화협약 체결과 한국의 온실가스 감축 목표

유엔 산하 ‘기후변화에 관한 정부 간 패널(IPCC)’의 2014년 연구에 따르면 2050년에는 건축물과 에너지 사용 설비의 증가로 에너지 소비가 50% 이상 증가할 것으로 예상된다고 한다. 국내의 경우 건축물은 전체 에너지 사용량의 20% 이상을 차지하고 있으며, 향후 40% 수준까지 지속적으로 증가할 것으로 예상된다고 한다.

국내에서는 에너지 소비를 줄이고 온실가스를 감축하기 위해 저탄소 녹색성장기본법을 제정하고 ‘고효율 저소비 선진국형 소비구조 달성’을 목표로 관련 지침을 정비하였다. 이를 위해 2027년부터는 에너지 소비 총량을 감소세로 전환시키려는 목표가 제시되었다.

제3차 에너지기본계획(안)의 주요 내용은 다음과 같다. 이는 에너지를 안정적으로 확보하고 관리하는 대책과 더불어 에너지 절약 및 이용 효율을 향상시키는 기술을 개발하는 것이 주요 내용으로 포함되어 있다.

○ 에너지 기본계획의 주요 내용(저탄소녹색성장기본법 제41조 제2항)
- 국내외 에너지 수요와 공급의 추이 및 전망
- 에너지의 안정적 확보, 도입·공급 및 관리를 위한 대책
- 에너지 수요 목표, 에너지 구성과, 절약 및 에너지 이용 효율 향상
- 신재생에너지 등 환경친화적 에너지의 공급 및 사용을 위한 대책

- 에너지 안전관리를 위한 대책
- 기술개발, 전문인력 양성, 국제협력, 자원개발, 에너지 복지 등

예시적으로 개발사업 시행 과정에서도 에너지 사용계획의 협의와 함께 건물, 자동차, 기기 에너지효율등급인증, 에너지절약계획서 작성, 친환경 주택 성능평가 등을 통하여 에너지 기기뿐만 아니라 도시, 주택 분야에 있어서 에너지 사용 저감 및 효율성을 제고하기 위한 정책을 설정하고 관련 제도를 도입 및 시행하고 있다. 건축물의 에너지 효율 향상을 위해서는 건물에너지의 수요관리를 개선하는 데 목적을 두고 있다. 예로 신규 대형빌딩은 에너지효율향상을 위해 설계기준을 강화하고, 노후 건축물은 레노베이션을 통해서 에너지 효율을 개선하고, 소형주택은 단열기준강화를 하고, 지역에 따라 열관류율을 계산하여 단열재 유무와 단열재 설치 두께의 지침이 되고 있다. 건축물의 에너지 절감을 위해서는 대지의 방향, 일조, 주풍향 등의 고려하는 방법과 축열성능이 없는 단순한 단열재의 설치유무에 따라 에너지 절감 방법을 개선하는 것이 일반적이다. 그런데 이는 기존의 단열재에 의한 보강에서 크게 변화된 것이 없으며 설계 기준에서도 단열재의 시공 부위, 두께에 대한 기준이 전무하다. 따라서 설계기준의 강화와 축열성 재료의 도입이 시급한 실정이다.

(3) 필요성

(가) 기술적 관점

① 신소재

탄산염계 광물을 기반으로 하는 시멘트는 시공의 편의성, 경제성 등의 이유로 대표적인 건설소재로 자리하고 있으나 중금속 용출, 강염기성으로 인한 토양 및 지하수 오염. 새집증후군 등과 같이 인체에 유해성이 제기되고 있다. 이러한 이유로 친환경적인 건설재료 개발에 대한 요구가 증대되고 있다.

특히 시멘트는 생산과정에서 많은 에너지를 요구하는 산업으로 1톤당 약 700 kg의 이산화탄소를 발생시키고 있어 2015년 12월 파리 기후변화 협약에 의해 국가적 차원에서 온실가스 배출을 감소시켜야 하는 상황에서 시멘트의 사용량을 줄일 수 있는 대책이 필요하다.

이에 따라 친환경적인 건축소재의 필요성이 증대되는 추세에 있고 대표적으로 친환경적인 자원 활용을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다. 친환경적인 자원 활용은 황토 등의 규산염계 점토광물을 이용한 사례가 대표적인데, 탄산염계 시멘트에 비해 낮은 압축강도와 표면경도를 보완하기 위한 재료의 처리기술에 집중되어 있다(최희용, 2002; 황혜주&강남이, 2008; 강연구, 2015).

과거의 광물산업은 광산을 중심으로 한 단순 일차산업으로 취급되어 학술적이나 정책적으로 소홀하게 취급되었다. 근래에 들어서는 대기, 주거 등 생활과 밀접한 환경에 대한 관심이 증가하고 있는데 그 가운데 천연 광물의 활용분야가 확대되고 있다. 그런데 국내 자원은 고갈의 수준에 처해 있어 광물자원은 대부분을 수입에 의존하고 있다. 최근에 이르러서는 암석과 광물에 대한 분석기법과 처리기술이 발달되어 과거에는 기능성을 인정받지 못했던 광물들이 재조명되고 있다. 아울러 주거환경 개선과 에너지 절감에 대한 관심이 높

아지면서 규산염광물 친환경 재료에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Hwang et al., 2006; Nam et al., 2006; Lee et al., 2009; Kim et al., 2011; Kim et al., 2015 a; Kim et al., 2017 a; Kim et al., 2017 b).

② 축열

건축물은 한 번 지으면 최소 30년 이상 유지되기 때문에 초기에 에너지 성능을 높게 설정하여 지으면 그 효과가 장기간 누적되는 효과가 있다. 그러기에 에너지 효율 증대를 위한 축열기술 개발이 필요한 것이다.

(나) 정책적 관점

세계적으로 지구온난화에 따른 기후 변화가 초래되어 지구 환경과 크게 생존환경이 위협을 받게 되었다. 기상이변, 해수면 상승, 강우량의 변화 등의 자연재난 발생이 점차 대형화 다양화 되어가는 추세이다. 이러한 기후 변화를 막고자 세계적으로 많은 노력을 시작하고 있는 바 우리나라는 2015년 파리 기후변화협약 체결을 계기로 우리나라는 온실가스 감축 목표는 2030년의 온실가스 배출전망치 대비(Business As Usual, BAU) 37%까지 감축하는 것으로 하고 있으며, 이에 따른 관련 법령 및 지원을 하고 있다(법제처 저탄소 녹생성장 기본법시행령 제25조의1). 2020년 BAU 대비 30% 감축(건물부문 26.9%)에서 2030년 BAU 대비 37%(건물부문 미정)로 국가 온실가스 감축목표를 상향 조정하였고, 특히 건축물분야에서는 국가 온실가스 배출량의 25% 이상을 차지하며, 녹색건축물 보급을 통한 온실가스 감축 여력이 큰 것으로 보고 있다(국토교통부, https://www.molit.go.kr; 정복만, 2016).

에너지 경제연구원(2019년)에 따르면 현재 수준의 인구와 경제 구조에서 에너지 소비패턴이 지속될 경우 2017-2040년 기간의 장기에너지 기준전망(BAU)은 총에너지 사용량은 0.6%, 최종에너지 소비는 0.8% 증가하는 것으로 예상되고 있다. 이제 에너지 소비구조의 혁신이 필요한 시점에 있다.

주거환경에 있어서 2008년 07월 일본 토야코에서 열린 G8 정상회의와 함께 선보인 미래형 탄소제로주택(Zero Emission House) '그린 홈'은 많은 사람들의 이목을 끌었다. 에너지 절약은 '제5의 에너지'로 생활속에서 낭비되는 에너지 소비를 절감함으로써 에너지 소비를 20%이상 줄일 수 있다고 한다. 따라서 낭비되는 에너지를 효율적으로 이용하기 위한 다각적인 기술개발이 필요하다.

국가 8대 에너지신산업 정책 로드맵(제로에너지 빌딩) 정책에 따라 축열 성능이 우수한 내장재의 필요성이 제기되었다. 실행 방안으로 다수의 단열재 개발과 상용화가 요구되나 아직은 경제성이 매우 취약한 실정이다. 따라서 적용 범위가 넓은 복합기능 내장재의 개발이 필요하다.

(다) 환경적 관점

① 새집증후군(Sick house syndrome; SHS)

2000년대 초반부터 언론에 집중적으로 부각되면서 실내공기 오염 및 건축자재에 대한 관

심이 증가되고 있고, 최근에는 미세먼지와 곰팡이 서식 등의 문제를 해결하기 위한 기술적 대응이 요구되고 있다. 국내의 건축 내장재 기술개발은 주로 환경오염물질(포름알데이드, VOCs, 라돈 등) 문제에 집약되어 있었으나, 최근 들어서는 환경개선과 유지비용 절감을 위한 고에너지 재료와 층간소음 분야에 대한 기술투자가 관심사사 되고 있다. 연구개발이 시공기술쪽에 치우쳐 있어 재료분야도 균형을 이루어야할 것이다.

해외의 경우, 친환경 소재를 사용하여 환경오염물질의 방출을 미연에 방지하고, 흡방습 기능, 악취 제거와 같은 다양한 기능을 갖는 내장재가 계속 개발되면서 세계 건축 재료 시장을 선점하고 있다. 이제 우리나라도 수입대체 효과는 물론 수출경쟁력 확보를 이룰 수 있는 건축 소재의 개발이 필요하다.

② 미세먼지

IPCC 평가보고서(IPCC, 2013)가 공개되면서, 기후변화에 따른 자연재해에 대한 경각심이 고조되고 있고, 온실가스로 인해 2100년까지 지구 평균기온이 3.7도 오르고 해수면은 약 63cm가 상승할 것으로 전망되었다. 전 세계적으로 온실가스 배출을 완전히 줄인다고 해도 이미 배출된 이산화탄소의 20% 이상이 1,000년 이상 대기 중에 잔류하며 이로 인해 기후변화양상은 수백 년간 지속될 것으로 전망된다.

현재에도 기후 변화로 전 세계 모든 지역이 극한의 자연재해에 노출되는 빈도가 증가하고 있다. 특히 기후 변화는 기상재해, 생태계 파괴, 공공시설 훼손, 산업계 영향 등의 다양한 형태로 표출되어 인류 생존의 위협요인으로 작용한다.

2015년 세계경제포럼에서 우리나라의 미세먼지환경지수는 전체 178개 조사국 중 171위를 차지할 정도로 미세먼지에 대한 노출 위험성이 높아지고 있다. 국립환경과학원(2009년)의 연구에 따르면 미세먼지(PM10) 농도가 10 ㎍/㎥ 증가할 때마다 대기오염에 민감한 집단의 사망률은 0.4%씩 증가하는 것으로 보고되고 있다. 국내의 미세먼지 농도는 경제협력개발기구(OECD) 주요 도시의 평균에 비해 2배 이상이다. 따라서, 미세먼지(PM 10)와 초미세먼지(PM 2.5)에 대한 개인적·국가적 차원의 준비가 시급하다.

③ 층간소음

도시의 인구 밀집으로 고층형 건물이 많아짐에 따라 세대 간 갈등이 증가하며, 대표적으로 예로 층간소음은 단순한 마찰이 아닌 공동체의 갈등과 사회범죄로 확대되고 있다(그림 1.3). 정부차원의 문제해결을 위해 2014년 공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙(시행 2014.6.3.)이 제정되었는데 그 기술적 뒷받침이 필요하다(그림 1.3).

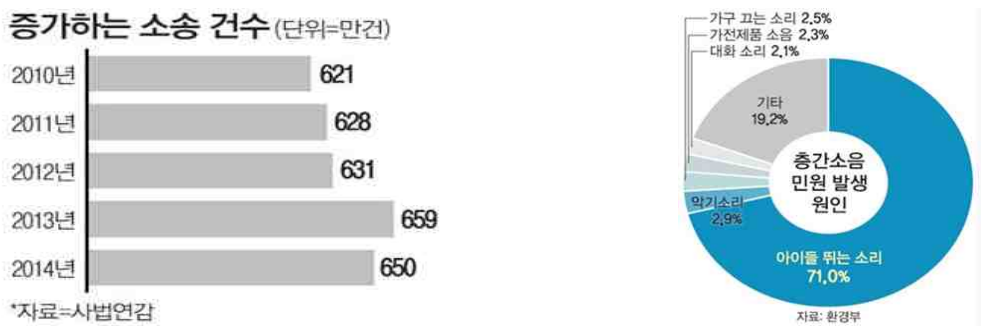


그림 1.3 층간소음으로 인한 사회적 문제(연합뉴스)

(4) 연구개발 대상의 국내외 현황

○ 국내 현황

(축열/단열) 국내의 광물기반 기능성 건축소재는 다양하게 개발된 편이기는 하나 특정한 1-2가지의 기능에 제한되어 있고 비싼 비용으로 인해 적용에 한계가 있다. 그 예시로 단열재로 이용되는 그라스울은 단열에 그칠 뿐이고 축열 기능은 없다.

(축열/단열) 패시브하우스에 사용되는 단열재는 단열 기능이 국내 건축 기준의 3배 이상이 되어야하며, 가격 면에서도 경쟁력이 떨어진다. 이를 대신해서 PCM(상변화 축열재)가 주목을 받고 있으나, 건축물에 사용하기 위한 형태의 안정화가 필요하며, 고비용으로 인해 확대적용에 취약성이 있다.

(흡음) 최근 사회적 이슈가 되는 층간소음 저감 기술은 출원이 증가하는 추세이나, 시공 및 설비기술 분야에 집중되어 있어 재료 및 자재에 대한 기술 개발이 필요하다.



그림 1.4 층간소음 저감기술 특허 동향(컨슈머와이드)

○ 국외 현황

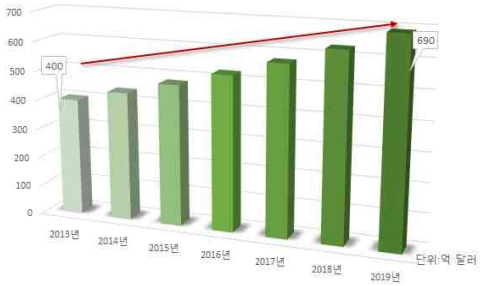
(독일/오스트리아) 친환경 건축 분야의 선두국가이고 2012년을 기준으로 13,000개 이상의 패시브하우스를 보유하고 있다. 이들의 세대별 난방 소비량은 평균 9.2 kWh/㎡·yr로서 독일 일반주택의 평균 난방에너지 소비량인 170 kWh/㎡·yr에 비교할 때 5% 수준에 불과하다 (Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2012)

(일본) 다습한 기후적 특성과 입주자의 요구 등으로 인해 최근 기능성 건축자재의 개발과 적용이 활발히 이루어지고 있다(표 1.1).

표 1.1 일본의 친환경 건축자재 목록

회사명	제품명	특징	비 고
DAIKEN사	사라리아	흡방습기능, 탈취기능, VOCs/포름알데히드 흡착기능	흡음/흡착
	Premiart	방수성, 방오코팅	
INAX사	Ecocara	흡방습기능, 탈취기능	흡음/흡착
아사히카세이건재	사라라	흡방습기능, 포름알데히드 흡착분해, 악취 제거기능	흡음/흡착

(미국) 미국의 친환경 건축 자재 시장은 2013년 400억 달러, 2014년 438억 달러로 증가 추세이며, 2019년 까지 약 9.5%의 증가율을 보일 것으로 추정된다(그림 1.5).



단위 : 달러

구분	2013년	2014년	2019년
시장규모	400억	438억	690억
The U. S. Market for Green Building Materials, 2015, BCC Research			

그림 1.5 미국 친환경 건축 자재 시장규모(2014년 기준)

(5) 연차별 연구개발 목표 및 내용

연구는 3차년에 걸쳐 진행되며, 1차년 산업광물의 기능성을 증대 개발 및 바닥 축열 모르타르 개발을 진행하고, 2차년에는 벽체 블록 개발, 3차년은 천장 마감재 및 미장재료의 개발을 하는 것으로 진행하였으며, 연구의 최종 목표는 표 1.2에 정리하였다.

표 1.2 연구개발의 목표

구분	내용
최종 목표	- 친환경성 제로에너지 건축물을 위한 바닥 축열재 및 건축 내장재 상용화 기술 개발 - 환경위해물질 흡착, 흡음, 단열, 축열 기능 재료원 개발과 연계한 시제품 제작
세부 목표	- 산업광물의 복합기능 향상을 위한 2차 처리기술 및 내장재 제조 기술개발 - 에너지 효율 30% 향상, 기존 기능성 제품 대비 40% 이상 제조 원가 절감 - 에너지 효율 증대 및 자동수평 기능을 가진 축열층 모르타르 시제품 개발 - 복합기능(축열, 단열, 소음·진동 흡수, 항균, 탈취) 기능의 벽면 내장재 실용화 - 복합기능(축열, 단열, 소음·진동 흡수, 항균, 탈취) 기능의 천장 내장재 실용화



그림 1.6 연차별 핵심기술 및 성과지표

(가) 1차년 개발 목표 및 범위

본 연구의 1차년도에서는 기능성 산업광물을 선정하여 기능성의 증가, 재료의 경량화 방법 도출,바닥 축열 모르타르의 개발, 실대형 모형 시공, 모니터링 시스템 제작을 한다. 주관연구기관(MsEnc) 에서는 실대형 모형 제작, 바닥 모르타르 시제품 제작을 하였고, 참여기관(지아이)는 기능성 산업광물 제조 기술 개발, 실시간 모니터링 시스템 구축, 적산 계측 시스템 구축, 바닥 축열 모르타르 실험을 진행하였고 참여기관(한국해양대학교)는 저변형 고강도 경량기포 축열재 제조 기술 개발을 했으며, 참여기관(대진대학교)는 바닥 모르타르 시제품의 슬럼프, 압축강도, 인장강도의 평가를 하였다(표 1.3, 그림 1.7).

표 1.3 1차년 각 기관의 목표

주관연구기관(MsEnc)	실대형 모형 제작, 바닥 모르타르 시제품 제작
참여기관(지아이)	실시간 모니터링 시스템 구축, 기능성 산업광물 제조 기술 개발, 적산 계측 시스템 구축, 바닥 축열 모르타르 실험
참여기관(한국해양대학교)	저변형 고강도 경량기포 축열재 제조 기술 개발
참여기관(대진대학교)	바닥 모르타르 시제품의 슬럼프, 압축강도, 인장강도 평가

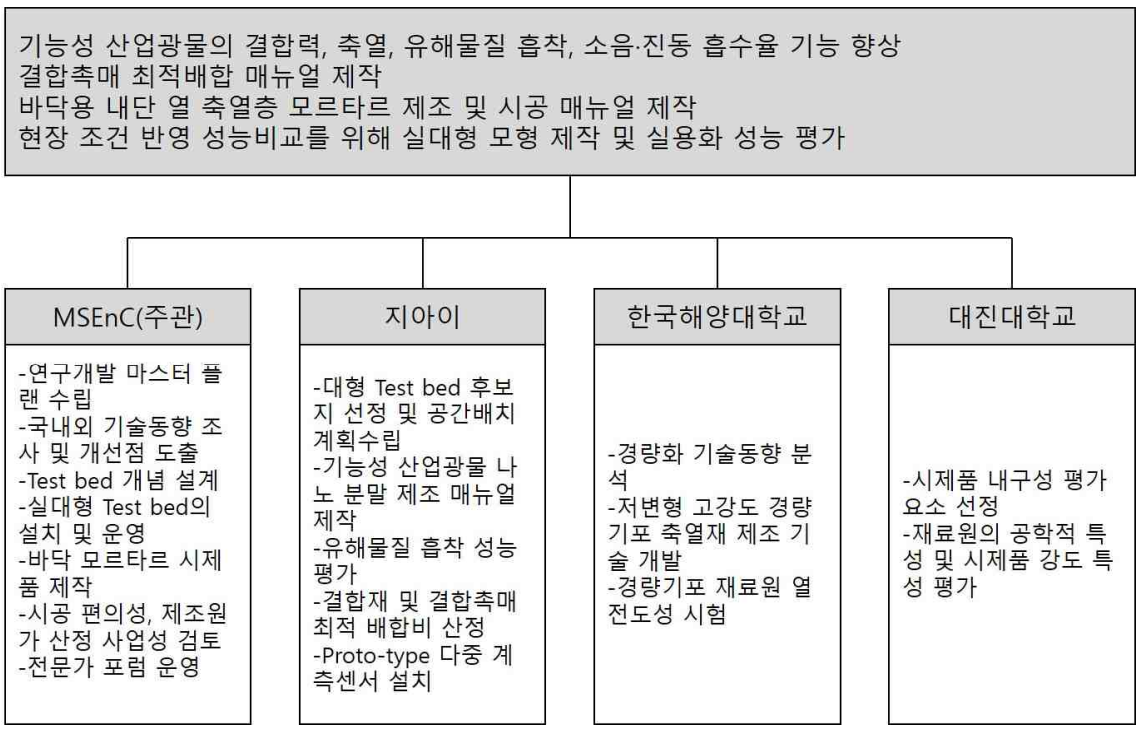


그림 1.7 1차년 각 기관별 목표

(나) 2차년 개발 목표 및 범위

2차년에서는 경량 블록의 시공을 목표로 진행하였으며, 각각의 연구기관에서는 주관연구기관(MsEnc)은 경량 벽체 블록 시제품을 제작하였고 참여기관(지아이)은 실대형 시험 모형 설치 및 운영, 경량 벽체 블록 시공 및 해체, 벽체 축열 시험을 하였고 참여기관(한국해양대학교)은 시제품 기능성 개선 사항의 보완, 참여기관(대진대학교)은 경량 블록의 압축, 인장, 슬럼프 실험을 하였다(표 1.4, 그림 1.8).

표 1.4 2차년 각 기관의 목표

주관연구기관(MsEnc)	경량 벽체 블럭 시제품 제작
참여기관(지아이)	실대형 시험 모형 설치 및 운영, 경량벽체 블록 시공 및 해체, 벽체 축열 시험
참여기관(한국해양대학교)	시제품 기능성 개선 사항 보완
참여기관(대진대학교)	경량 블록 압축, 인장, 슬럼프 실험

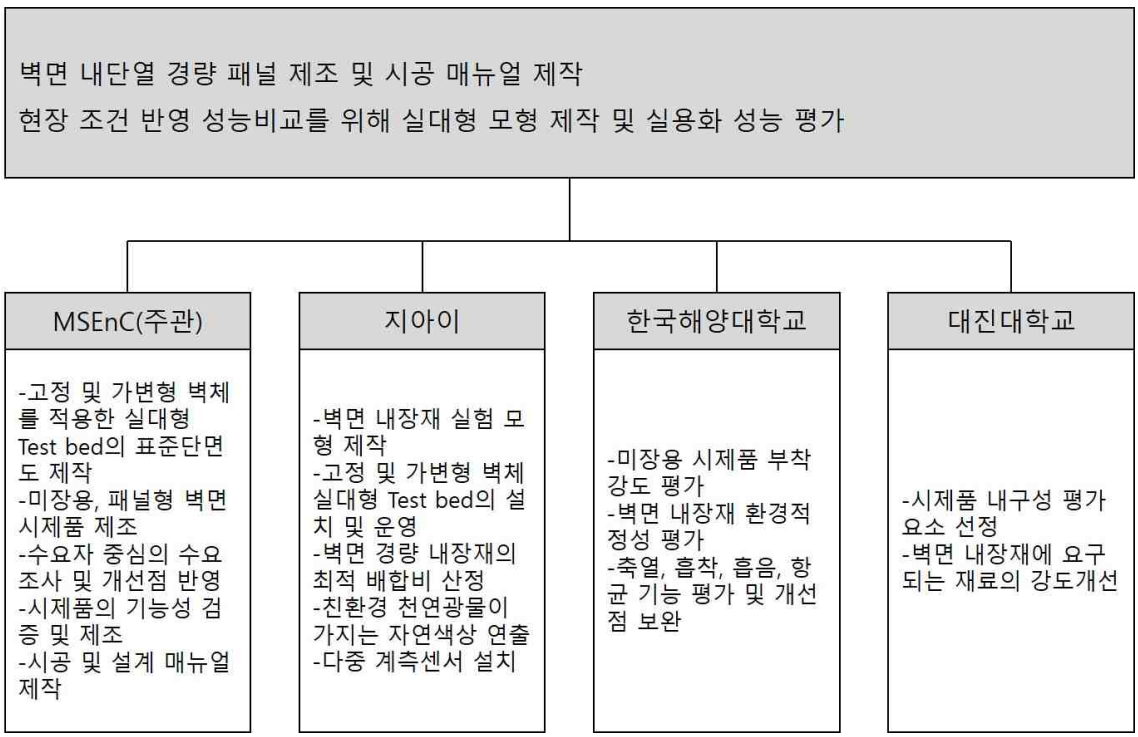


그림 1.8 2차년 각 기관별 목표

(다) 3차년 개발 목표 및 범위

3차년에서는 천장 마감재 및 패널형의 제조 및 시공을 목표로 진행하였으며, 각각의 연구기관에서는 주관연구기관(MsEnc)은 천장 내장재 시제품을 제작하였고 참여기관(지아이)은 실대형 시험 모형 설치 및 운영, 천장 마감재 및 패널형 시공, 바닥, 벽체, 천장의 축열 시험을 하였고 참여기관(한국해양대학교)은 천장 내장재 부착강도 개선, 참여기관(대진대학교)은 천장 마감재의 압축, 인장, 슬럼프 실험을 하였다(표 1.5, 그림 1.9).

표 1.5 2차년 각 기관의 목표

주관연구기관(MsEnc)	천장 내장재 시제품(2건, 미장재, 패널형) 제작
참여기관(지아이)	실대형 시험 모형 설치 및 운영, 천장 마감재 및 패널형 시공, 건축 내장재(바닥, 벽체, 천장)의 축열 실험
참여기관(한국해양대학교)	천장 내장재 부착강도 개선
참여기관(대진대학교)	천장 마감재의 압축, 인장, 슬럼프 실험

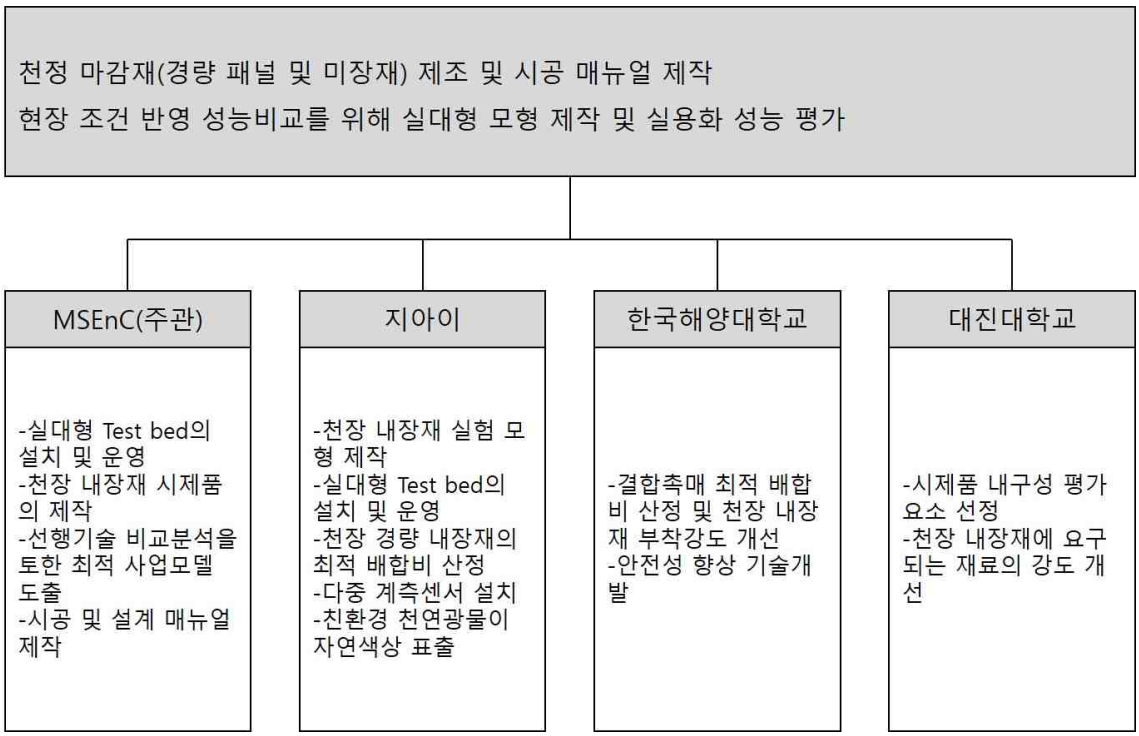


그림 1.9 3차년 각 기관별 목표

나. 연구 범위

(1) 규산염 산업광물의 이용

본 연구에서는 우리나라에서 가장 흔한 광물 중 하나인 규산염 재료원을 이용하여 친환경 산업광물로서의 부가가치를 높이기 위해 소성, 분체를 이용하여 축열, 흡착, 흡음, 항균의 기능성을 증대시켰다. 최적의 소성온도 및 시간을 적용하면 기능성 광물의 일부는 풍화과정의 특징인 다공체의 표면조직이 만들어져서 비표면적이 증대되어 반응력이 커진다. 또한, 나노분말의 형태가 되면 반응력이 더욱 증대되는 특징을 가진다.

그림 1.10의 전자현미경(SEM) 영상에서 관찰되는 다공체의 빈도는 1㎤의 부피에 80,000에서 200,000개의 공동을 함유한다. 무기질 결합재의 제조는 고온에서 가열하는 방법이 일반적이다. 고온 소성의 경우에는 용융으로 인해 다공체 구조가 소멸하는 것을 관찰할 수 있다. 그러므로 재료원의 물리적 표면구조를 이용하는 경우 광물에 따라 용융되는 온도를 확인하여 온도를 설정하는 것이 매우 중요하다(Kim et al., 2015).

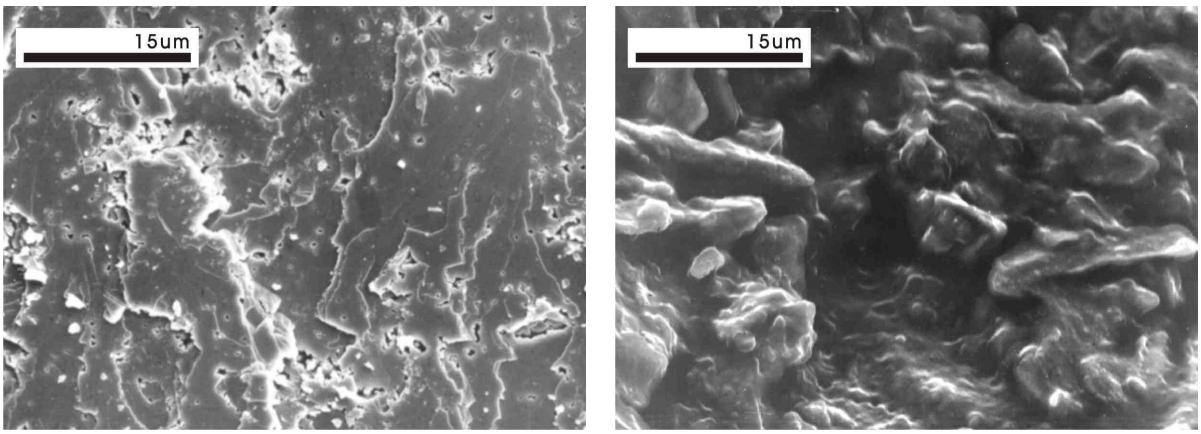


그림 1.10 다공성 재료의 표면구조(좌)와 고온 소성 시 발생하는 용융구조(우)(kim et al., 2015)

분체는 재료원을 경량화 하는 방법의 하나인데 원석을 부수어 밀도를 낮추며 비표면적을 증대시켜서 에너지 효율을 증가시켜주는 역할을 한다. 그림 1.11은 규산염 재료원의 입경별 압축강도 그래프로서 50㎛ 전까지 상승하다가 이후 강도가 약해지는 것을 알 수 있다(Kim et al., 2015).

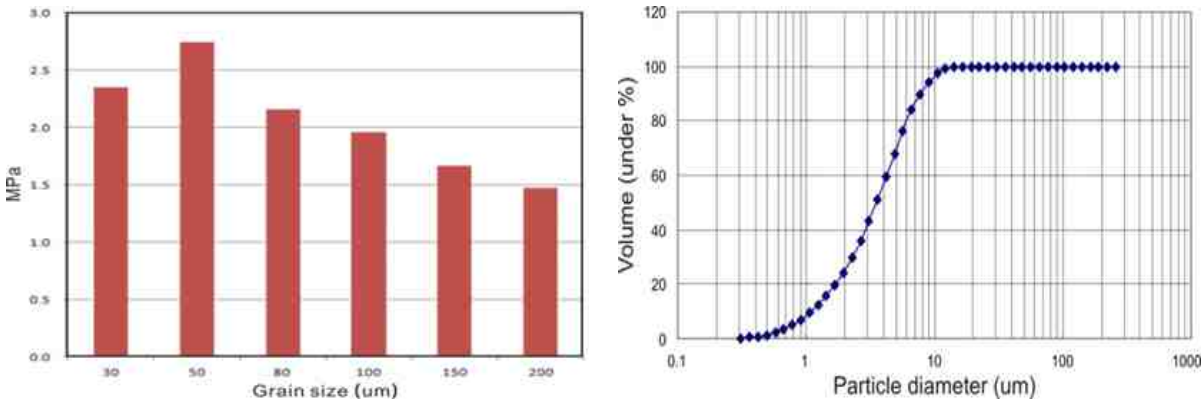


그림 1.11 규산염 재료원의 입경별 강도 변화(kim et al., 2015)

표 1.6에서 모암(원석)의 밀도는 2.56인데, 입경이 작아짐에 따라 1.06까지 밀도가 감소하는 것을 알 수 있다.

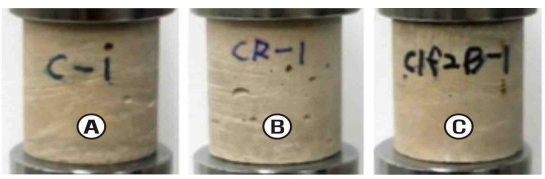
표 1.6 입경에 따른 밀도변화

입경(㎛)	원석	500	100	80	40	30	20
밀도	2.56	1.58	1.37	1.29	1.12	1.08	1.06

(2) 재료의 내구성 개선

기능성 산업광물의 성능 제고를 위해 차별화 기술을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 선행연구에서 보통 포틀랜드 시멘트 공시체의 압축강도는 12.2 - 14.7 MPa의 범위로 측정되었고, 기능성 산업광물과 결합촉매를 첨가한 공시체의 압축강도는 15.4 - 19.1 MPa의 범위로 관찰되었다(Kim et al., 2015; Kim et al., 2017) (표 1.7).

표 1.7 공시체의 일축압축강도(kim et al., 2015)

구분	일축압축강도(MPa)				공시체
	①	②	③	AVE.	
A	13.3	12.2	14.7	13.4	
B	19.1	15.4	18.8	17.8	
C	18.2	15.4	17.9	17.2	

결합촉매는 경량 재료의 밀도 감소에 수반된 강도 저감을 보완하는 기술이다. 결합촉매는 적정배합비 산정을 위한 기술 개발에 사용된다. 기존 기술에서 경량화 재료의 문제점은 시공 중에 변형으로 인하여 체적 변화가 수반된다는 점이다. 결합촉매는 경량재료의 변형을 최소화하는데 활용된다(Kim et al., 2015)(그림 1.12).



그림 1.12 결합촉매 사용 전(좌)과 후(우)의 공시체 구조(kim et al., 2015)

압축강도나 부착강도 등 일반적으로 재료원의 강도(내구성)를 높이기 위해서는 시멘트 함량을 높이는 방법을 쓰고 있다(Kim et al., 2015)(그림 1.13). 그런데 환경적, 비용적 관점에서 경량재료의 실용화에 걸림돌이 된다. 본 연구에서는 2차 처리 기술을 개발함과 아울러 결합촉매 배합의 최적 기술을 개발하여 환경적이고 저비용인 내장재를 개발하는 것을 목표로 하였다.

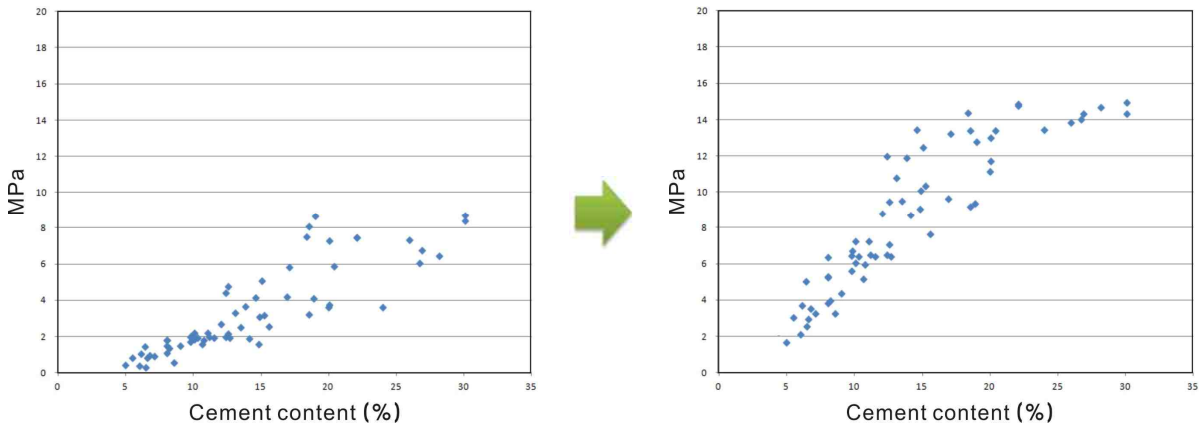


그림 1.13 결합촉매 배합(0.5%) 후의 압축강도 변화(kim et al., 2015)

(3) 최적 배합비 및 시공법 개발

내장재로 사용될 모르타르의 에너지 효율을 증대하고 유동성과 평활성을 증대시키기 위해서는 광물의 분체기술이 가장 중요하다. 입자크기를 너무 터무니없이 낮게 분체하면 비표면적 증가로 에너지 효율은 증가하나 공정비용 또한 아주 높게 증가한다. 비용의 증가는 상업적 채산을 떨어뜨리므로 최적 배합비를 도출해야 한다. 에너지 효율을 보전하는 최적의 입경을 개발해야 한다.

일반적 건축물에서는 바닥 모르타르에 균열이 많이 발생한다. 이러한 모르타르 층의 균열은 부재에 작용하는 응력(인장력)이 대응력(와이어 메시의 지지력)보다 크거나 건조수축 때문이다. 건축물 시공 시에 바닥 슬래브를 철근콘크리트로 시공하면 그 위에 모르타르를

시공하는 것이 일반적이다. 모르타르는 철근 콘크리트 구조부인 슬래브보다 얇게 시공된다. 이는 모르타르 층에 진동이 생기기 쉬운 단점을 낳는다. 진동은 균열을 동반하여 층간 소음으로 이어진다. 이러한 진동과 균열을 저감하기 위해서는 결합촉매를 이용하여 수축 및 팽창 균열을 저감시킬 최적 배합비를 개발해야 한다.

다. 연구 방법

(1) 산업광물의 특성 분석

규산염 재료원이 산업광물로서의 기능성, 친환경적인 특성을 가지고 있는지 분석한다. 교환성 양이온을 흡착할 수 있는 능력인 양이온치환용량시험을 선별된 입도별로 수행한다. 양이온치환용량의 능력치를 판단하여 최적의 입경을 선정하여 오염원의 흡착성능을 개선하여 주거환경에 도움이 되도록 한다. 또한, 재료원에 산성배수를 통과시켜 중금속의 흡착 및 여과 성능 실험을 통해 재료원의 흡착성능을 평가한다. 원적외선 방사율을 측정하여 건축물 내장재로서 인체에 유해한지 판단기준으로 사용한다. 재료원 나노광물 분말의 항균성을 검토한다. 그림 1.14은 일정한 기능성을 가진 광물의 경우라도 선행연구에서 입자 크기에 따라 항균성은 45%에서 99.8%의 범위를 보이며, 나노분말은 98.4% - 99.8%의 미생물이 제거되는 결과를 보인 사례이다. 건축 재료 적용을 위해서 분체 기술을 개발하는 것이 목표이다.

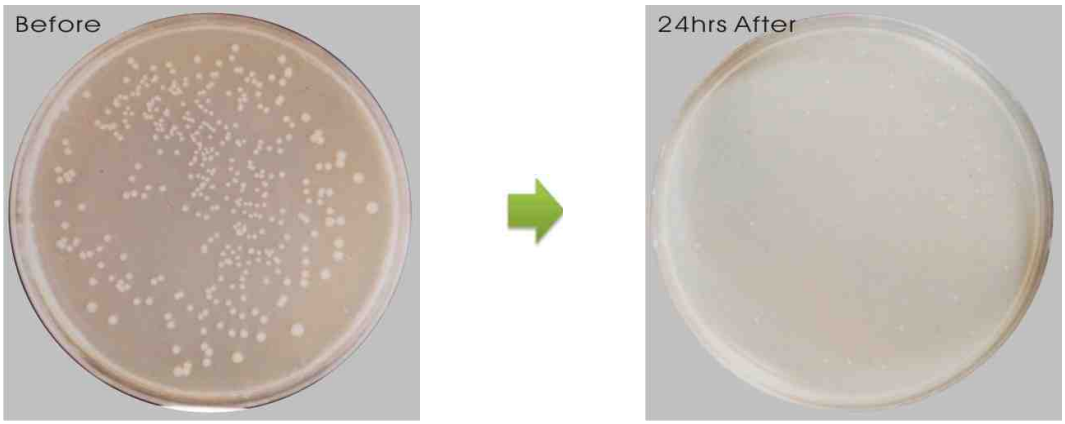
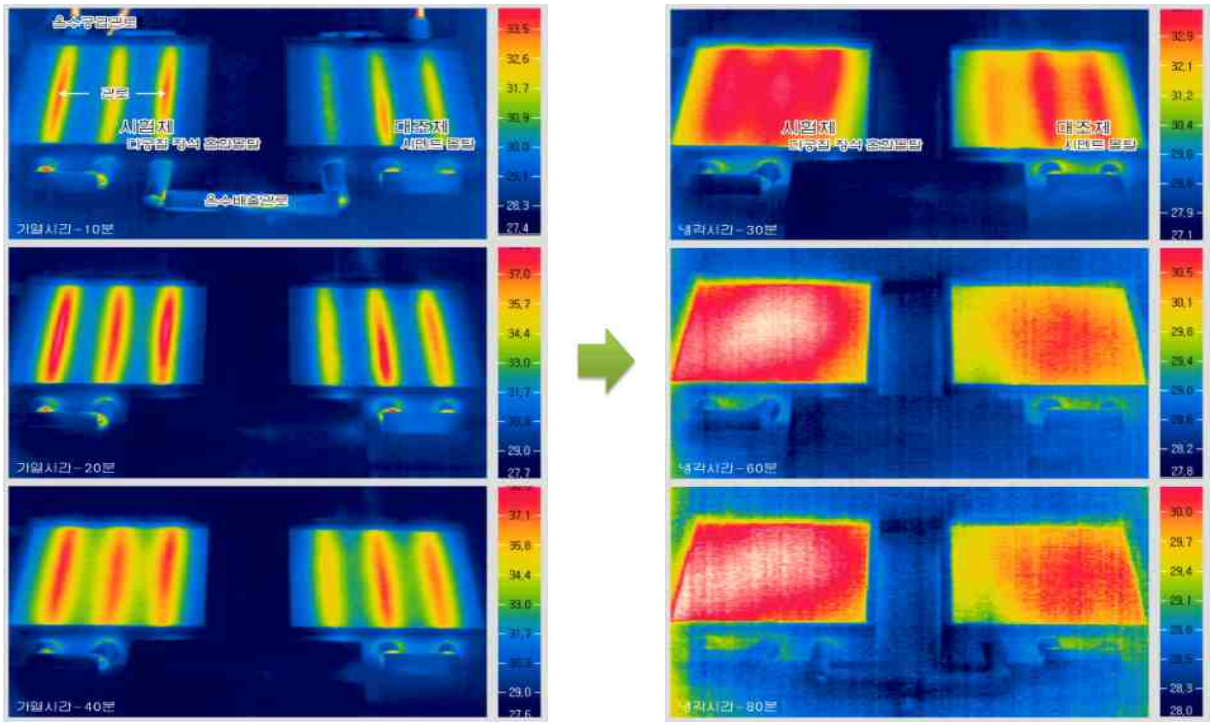


그림 1.14 나노분말의 항균성 : 98.3-99.8%의 항균성을 보임

(2) 바닥 축열층

축열 실험을 통해 친환경 기능성 광물의 내단열 축열성을 관찰하였고, 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 열전도가 우수하며, 냉각과정에서 축열 성능은 매우 우수한 것으로 파악되었다(그림 1.15). 본 연구에서 나노분말과 경량기포 배합기술을 적용하여 재료원의 축열 성능과 시공의 편의성을 개선하는 것에 목표이다.

종래의 기능성 축열재는 기능이 제한적이면서도 재료비가 고가이어서 제한적이다. 이를 보완하기 위해 제조의 원가를 60% 이상 절감하여 일반 모르타르와 유사한 수준의 경제성 구현을 위한 제조기술을 개발한다.



가열 냉각

그림 1.15 모르타르 가열 및 냉각 중의 온도 변화(좌: 나노분말, 우: 보통 포틀랜드 시멘트)

(3) 경량 벽체 블록

보통 공동주택의 구조물은 가변성 및 경량성이 요구되는데, 현재 시중에는 가변식 경량 벽체라는 이름으로 다양한 제품계열 시스템이 있다. 경량 벽체는 재료와 공법에 따라 분류된다. 본 연구에서의 경량 벽체 블록은 소성과 분체를 거친 규산염 재료원을 골재로 사용한 모르타르에 경량기포를 주입하여 믹싱을 통해 경량화한 블록이다(그림 1.16). 이는 기존의 경량블록에 비해 단열성능과 축열 성능이 더해진 것으로 일반의 블록보다 무게절감 및 시공성의 용이함을 확보하는데 목표를 두었다.



그림 1.16 경량기포 및 기포혼입 모르타르(좌: 경량기포, 우: 경량기포모르타르)

(4) 천장 마감재

규산염 재료원을 이용하여 개발할 천장 마감재는 실내 주거환경에 노출되는 면으로 온, 습도 조절이 가능하며, 친환경적이어야 한다. 규산염 재료원의 천장 마감재는 천연광물 자체의 자연스러운 색상으로 제작이 가능하고, 천연광물인 레드셰일과 활성탄을 사용하여 색상의 톤의 조절이 가능하다(그림 1.17).



그림 1.17 레드셰일 입자와 활성탄 입자(좌: 레드셰일, 우: 활성탄)

2 연구수행내용 및 성과

가. 재료원 특성

나. 2차 처리기술

다. 내구성

라. 변형

마. 최적 배합비 산정

바. 실대형 모형

사. 바닥 축열층 실험

아. 경량 벽체 실험

자. 천장 마감재 실험

2. 연구수행내용 및 성과

가. 재료원 특성

(1) 규산염 산업광물

(가) 다공질 장석

① 암석학적 특성

장석은 칼륨(K), 나트륨(Na), 칼슘(Ca)를 풍부하게 함유하고 있는 알루미늄 규산염광물에 속하며, 지각의 60%를 차지할 만큼 흔한 자연계의 기반 물질이다(Kauffman and Van Dyk, 1994). 광물학적으로 장석군은 조장석(Albite-$NaAl_2Si_2O_8$), 정장석(Orthoclase-$KAlSi_3O_8$), 회장석(Anorthite-$CaAl_2Si_2O_8$)의 단성분과 이들의 고용체로 이루어진 복잡한 광물상을 가지고 있는데, 자원 활용의 측면에서 연구가 거의 이루어지지 않아 잠재적 가치가 상당히 낮게 평가되어 왔다(한국자원정보서비스 발췌, www.kores.net).

본 과제에 활용된 장석을 포함한 충주지역의 화강장석반암에서는 채광되었다. 회녹색의 기질에 홍색 또는 담홍색의 알칼리 장석과 백색의 사장석, 그리고 무색의 석영이 반정상으로 나타난다. 반정의 비율은 40% 정도이며, 반정의 크기는 전체적으로 작다. 또한, 기질부의 구성광물의 입자는 다소 큰 경향이 있다. 5-7mm 크기의 알카리 장석은 칼스바드 쌍정을 보이며, 광물 입자의 변질 정도가 심하고 사장석과 타형의 석영을 함유한다. 자형 내지 반자형의 사장석은 알바이트 쌍정을 보이며 견운모를 비롯한 2차 광물로 심하게 변질되어 있다. 석영은 3-5mm 크기의 반정으로 산출될 뿐 만 아니라, 미정질의 석기 부분을 이룬다. 자형의 흑운모는 거의 완전히 녹니석화 되어 있다(그림 2.1).

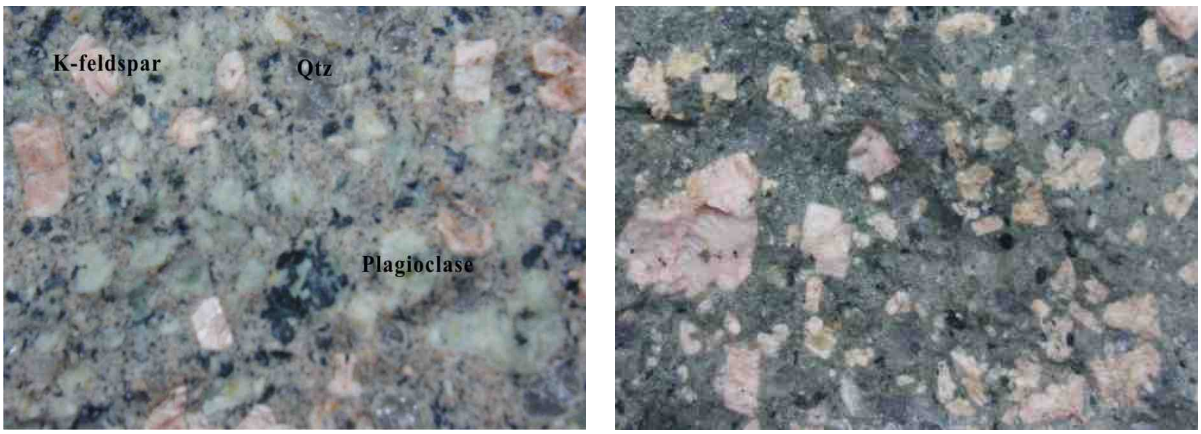


그림 2.1 다공질을 가진 장석반암의 사진(녹회색: 사장석, 분홍색: 정장석, 무색: 석영)

장석반암의 육안관찰 시 암석은 비교적 신선한 상태를 보이나 현미경에서 관찰되는 쌍정(Twin)과 누대구조(Zoning)를 보여주는 장석은 변질 정도가 심하고 견운모(Sericite), 녹니석(Chlorite) 등의 변질광물로 치환되어 있다(kim et al., 2015).

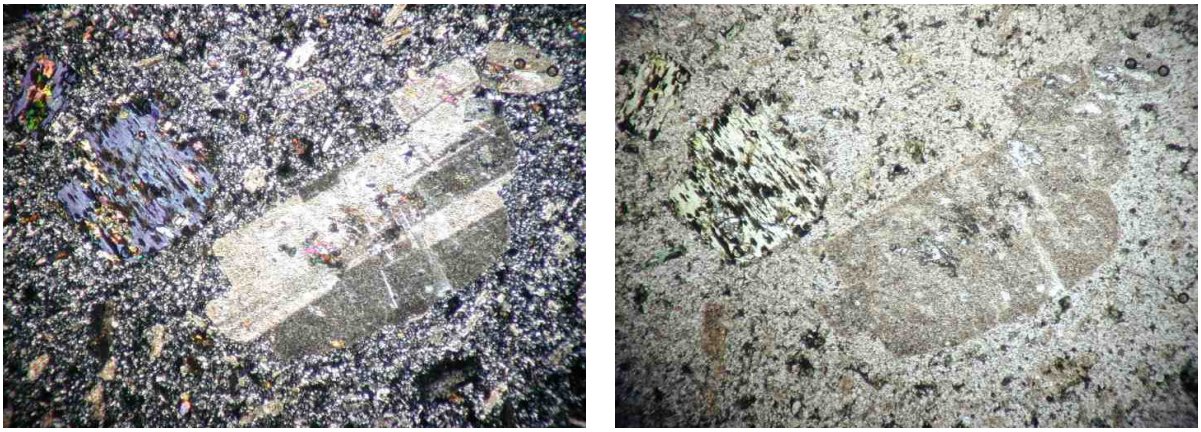


그림 2.2 다공질 장석의 편광현미경 사진(×40) (좌: 직교니콜, 우: 개방니콜)

암석은 풍화과정에서 다공성 구조가 관찰된다. 다공체 구조는 입자 크기의 감소에 의한 원자 비율의 증가 외에도 비표면적이 증가하여 체적특성을 감소하고 표면특성이 증대되고 이에 따른 전기/자기적, 광학적 성질이 발현되는 특징을 가지고 있다(Park & Lee, 2000).

장석은 풍화나 열수변질을 통해 고령토화, 불석화, 녹염석화, 또는 몬모릴로나이트화하는 경우가 일반적이다. 또한, 풍화에 수반된 변질작용은 광물 조성은 물론이고 표면 조직의 변화를 수반한다. 암석의 풍화면에서 소규모 공동이 관찰되며 경우에 따라 점토광물을 충전시킨다. 이러한 공동은 흡착과 밀접한 관계가 있다. 공동의 밀도는 반응면적에 관계되는 비표면적을 높이고 이온의 용출과 흡착에 관계되는 것으로 알려져 있다(Bansal and Goya, 2005; Cecen, 2014; Park et al., 2016).

풍화된 장석반암의 표면에서 0.5-10 ㎛ 크기의 공동이 불규칙하게 산재하며 특히 장석반정의 표면에서 빈도가 증가하여 다공성의 구조가 발달된다. 공동의 수는 석영반정 1 ㎠의 면적에서 수백여 개 정도지만 장석 반정에서는 20,000에서 수십만 개의 공동이 관찰되며, 풍화작용에 의해 생성된 변질광물이 충전되기도 한다. 그림 2.3은 배율에 따른 전자현미경 사진으로 수 ㎛ 크기의 공동이 불규칙한 형태로 산재해 있는데, 공동은 비어있는 경우도 있지만 대부분 변질작용 및 풍화작용으로 생성된 2차 광물 즉 점토광물이 충전되어 있다 (Kim et al., 2015).

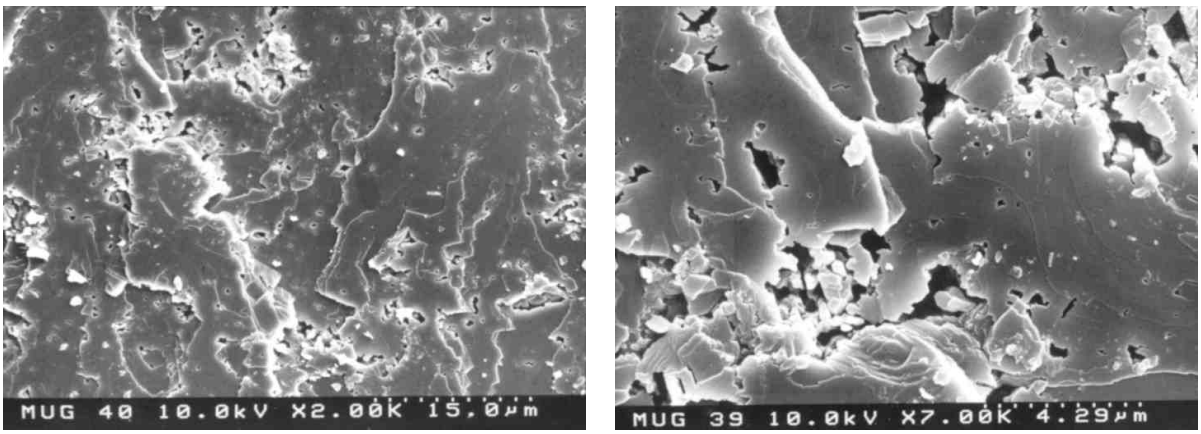


그림 2.3 장석의 SEM 영상(좌: ×2000, 우: ×7000)

Lee et al. (2006)은 광물 풍화에 따른 특성을 분석하기 위하여 사장석에 대해 강제 풍화 실험을 수행한 후 SEM 영상을 촬영하였다. 그림 2.4는 Lee et al. (2006) 논문에서 발췌한 그림으로 pH 2.0의 조건으로 90일간의 풍화시험 후 촬영한 SEM 영상이다. 좌측의 백운모의 경우 풍화에 의하여 구조 표면에서 약간의 변화를 보여주고 있으나, 우측의 장석의 경우에는 물과 반응하는 동안에 광물 표면에 많은 용식각(etch pit)과 미세균열들이 형성되었으며, 운모류에 비해 표면 부식 혹은 풍화의 정도가 두드러졌고, 용출된 Al 성분들이 2차적으로 침전하여 광물표면을 부분적으로 덮고 있다.

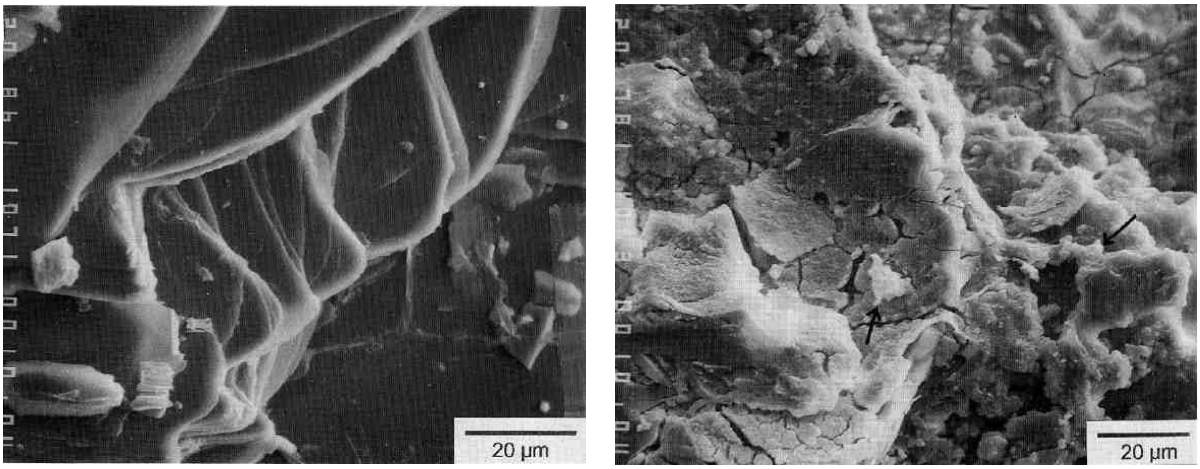


그림 2.4 강제풍화에 의한 사장석의 표면 구조의 변화(Lee et al., 2006)

Casey et al.(1989)에 의하면 수소이온의 공격에 의해 광물구조 성분 중 양이온이 치환되면서 광물표면이 용해되고 실라놀(>Si-OH) 구조가 형성되며, 추후에 실록산(>Si-O-Si<) 형태로 발전하면서 광물이 수축된다고 하였다. 풍화된 광물 표면에서 H_2O 성분이 빠져나가는 탈수 현상에 의해 표면 수축이 일어나고 이것은 풍화표면의 미세 공극을 증가시키는 요인이 된다. 특히 pH가 낮은 조건에서 용해된 장석일수록 이러한 현상이 두드러진다.

② 정량, 정성적 분석

㉮ 광물 조성(XRD)

본 과제에서 재료원으로 사용되는 다공질 장석을 대상으로 하여 구성광물의 종류를 정성/정량적으로 구분하기 위하여 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 분석을 위하여 다공질 장석 시편을 분체하여 2um 이하의 분말시료를 제작하고, X-선 회절분석을 수행하였다. 분석에 이용된 장비는 부산대학교 공동실험실습관의 Xpert 3이었으며, 분석된 결과는 Siroquant program을 이용하여 정량분석하였다.

그 결과 주구성광물은 석영(Quartz, 26.5%), 사장석(Plagioclase, 38.5%), 정장석(K-feldspar, 22.7%)이었으며, 풍화로 인한 2차 광물로 운모(Mica, 2.3%)와 점토광물인 카올린(Kaolin, 2.7%), 녹니석(Chlorite, 7.4%)이 포함되어 있다. 그림 2.5는 다공질 장석의 광물조성 분석결과를 정리한 것이다. 좌측은 X-선 회절 피크이며, 우측은 정량분석결과이다.

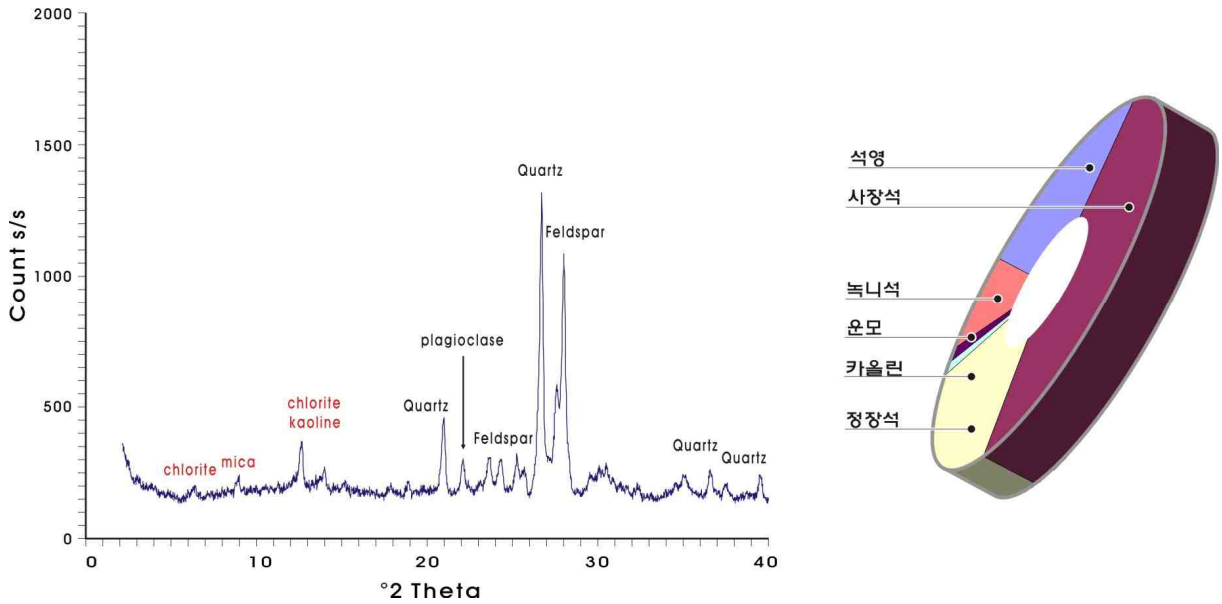


그림 2.5 다공질 장석의 X-선 회절분석에 의한 조성

㉯ 화학 조성(XRF)

다공질 장석에 함유된 원소의 종류와 함량을 정량적으로 구분하기 위하여 X-선 형광분석(XRF)을 실시하였다. 다공질 장석은 SiO_2 와 Al_2O_3가 평균 80% 이상 함유되어 있는 것으로 측정되었으며, 다른 원소들에 대한 정량적 X-선 형광분석의 결과는 다음 표 2.1과 같다

표 2.1 장석의 X-선 형광분석 결과

구분	함량비(%)			
	1회	2회	3회	평균
SiO_2	68.95	69.00	68.99	68.98
Al_2O_3	14.59	14.60	14.59	14.60
TiO_2	0.37	0.36	0.37	0.37
Fe_2O_3	3.03	3.04	3.04	3.04
MnO	0.08	0.08	0.08	0.08
MgO	0.67	0.67	0.66	0.67
CaO	1.29	1.30	1.29	1.29
Na_2O	3.39	3.34	3.36	3.36
K_2O	4.63	4.63	4.63	4.63
P_2O_5	0.10	0.10	0.10	0.10
LOI	2.71	2.71	2.71	2.71
Total	99.81	99.83	99.83	99.82

③ 친환경 특성

㉮ 중화작용

풍화단계에서 장석은 활성도가 증가되는데 그 결과로 흡착작용, 용출작용, 중화작용 및 이온작용이 활성화되는 것으로 알려져 있다(황진봉 외, 1996). 장석(활성장석: Active feldspar, AF)은 산성 및 염기성 물질이 중성으로 중화하는 특성을 평가하기 위하여 산성용액과 염기성용액에 장석 분말을 반응시켜 시간에 따른 수소이온농도의 변화를 관찰하였다. 재료원을 pH=3.03의 산성용액에 반응시킨 결과, 다공질 장석 분말의 경우 0.1시간 이후부터 pH가 급격하게 증가하여 거의 중성에 가깝게 유지되는 경향을 보였고, 입자의 경우는 소폭 증가했다. pH=10.0의 염기성용액에 반응시킨 결과, 입자시료와 분말시료 모두 소폭의 pH 감소보였다(그림 2.6).

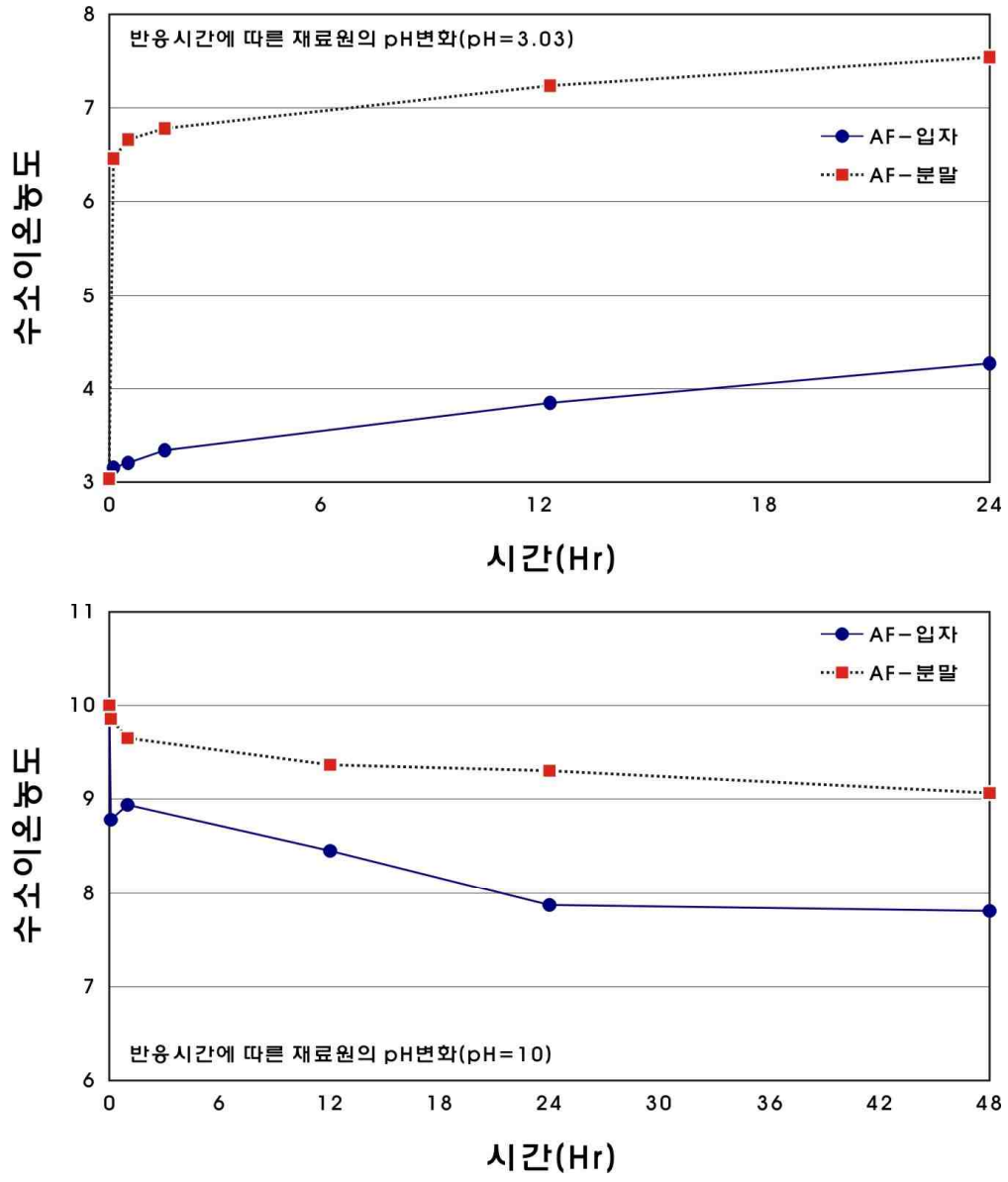


그림 2.6 장석의 중화성능 실험(상: 산성 중화능력, 하:염기성 중화능력)

㉣ 양이온치환용량(CEC)

양이온치환용량이란 특정 pH에서 일정량의 토양에 전기적 인력으로 다른 양이온과 교환이 가능한 형태로 흡착된 양이온의 총량을 말하는데 일반적으로 점토광물에서 높게 나타난다. 표 2.2는 대표적인 점토광물들의 양이온치환용량을 정리한 것이다. 스멕타이트와 질석은 대표적으로 CEC가 높은 광물에 해당된다.

표 2.2 여러 가지 광물의 양이온치환용량 비교

광물	양이온치환용량(meq/100g)
카올린(Kaolin)	3-15
7-할로이사이트(Halloysite)	5-10
10-할로이사이트(Halloysite)	40-50
스멕타이트(Smectite)	80-150
일라이트(Illite)	10-40
질석(Vermiculite)	100-150
녹니석(Chlorite)	10-40
해록석(Glauconite)	11-20
세피올라이트(Sepiolote)	3-15
알로페인(Allophane)	25-200

동일한 성분의 시료에서 분체 정도에 따른 CEC 변화를 확인하기 위하여 장석을 4단계(1mm, 74㎛, 40㎛, 23㎛)로 분체하여 CEC를 측정하였다. 표 2.3은 입도에 따른 양이온치환용량 분석 결과를 정리한 것이다. 분석결과 장석분체의 양이온치환용량은 1㎜에서 1.49 meq/100g를 보였으며, 입경 10㎛에서 114.63 meq/100g로 측정되었다. 동일한 성분이라 할지라도 분체가 많이 진행된 경우 양이온치환용량이 높아진다(Kim et al., 2015)(그림 2.7).

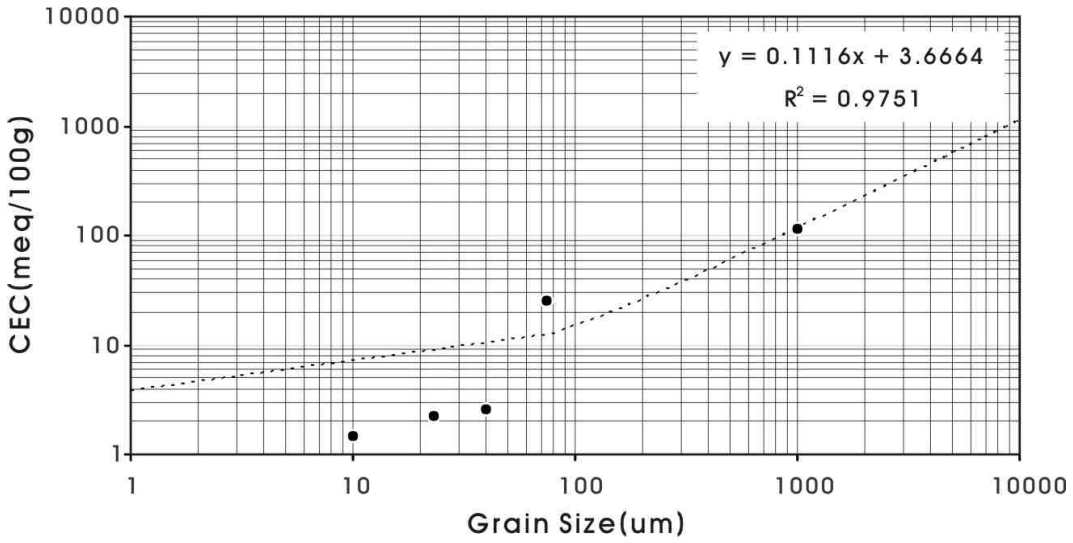


그림 2.7 분체정도에 따른 양이온치환용량의 변화(kim et al., 2015)

표 2.3 분체에 따른 양이온치환용량 비교

입자크기	1㎜	74㎛	40㎛	23㎛	10㎛
양이온치환용량(meq/100g)	1.49	2.28	2.62	25.33	114.63

㉰ 항균성

① 2차가공 전

다공질 장석의 항균성 시험은 실험용 배지에 입자 크기에 따른 항균성과 항균도를 평가하는 것이다. 분석을 위한 시료는 섬유 원단(pp, 백색)을 사용하였고 분말은 증류수에 중량비 3%로 현탁하여 도포하였다(kim et al., 2017b) (표 2.4).

표 2.4 항균성 실험 시료

시료 상태	함량	시료
pp(백색)	-	
pp(백색) + 다공질 장석 입자	-	
pp(백색) + 다공질 장석 분말	50 ㎛, 3%	
	10 ㎛, 3%	

항균성 실험의 공시균주는 Gram positive bacteria: Staphylococcus aureus (ATCC 6538)와 Gram negative bacteria : Klebsiella pneumoniae (ATCC 4352)를 사용하였다. 다공질 장석의 항균성은 Agar plate method: halo test (Agar Plate Method)를 이용하였고, 항균도는 Shake flask method를 이용하였다. 장석 입자와 분말을 가공 처리한 시료의 항균성 시험으로 halo test(Agar plat method)를 시행한 결과 일부 시료에서 항균환을 관찰할 수 있었으나 대부분의 시료에서는 항균환을 관찰할 수 없었다. 이것은 광물 입자가 배지 상에 확산되지 않은 결과로 halo test에 의한 항균성 시험은 부적합하며 부착된 상태에서 확산 및 이동이 낮은 광물질의 경우 shake flask method가 항균도 시험이 적합한 것으로 평가되었다.

항균성 시험은 광물입자를 도포한 시험편과 대조편을 모두를 공시균으로 접종 및 배양시킨 후 일정량의 액체 속에서 진탕시켜 배양된 세균을 추출한다. 이 액체 속에 존재하는 세균의 수가 측정되면, 항균성을 가진 시험편에서의 세균감소율이 계산된다. 즉, 이것은 직물의 향균 정도를 정량적으로 나타내는 것이다.

입자와 분말상태의 다공질 장석으로 도포한 시편에 대한 항균도 측정 방법은 다음과 같다.

① 접종 직후 접촉시간 “0” 시에 초기 생균수를 측정한다. 이때의 생균수를 초기 생균수(A)라고 한다.

② 초기 생균수를 측정한 후 접종한 shake flask를 37℃, 24hr 배양 후에 감소된 균수를

측정한다. 이때의 생균수를 24hr후 생균수(B)라 한다.

③ 공시험: 시험편을 가하지 않은 shake flask 준비하고, ①, ②실험을 실행한다.

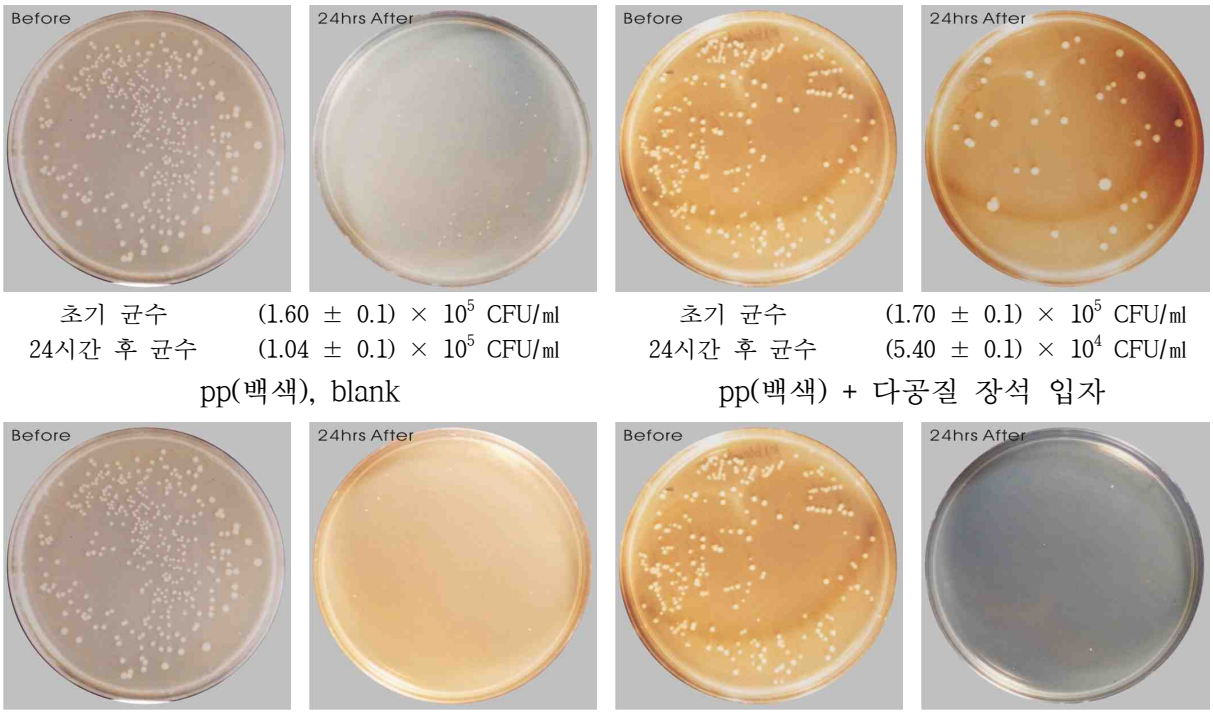
④ 항균도(감균율)의 계산

$$\text{항균도}(\%) = \frac{\text{초기생균수}(A) - \text{생균수}(B)}{\text{초기생균수}(A)} \times 100$$

다공질 장석 입자와 분말의 항균도 시험은 그림 2.8에서 보는 바와 같이 처리하지 않은 PP(백색) 원단의 항균도가 Gram positive bacteria의 경우 35.00%, Gram negative bacteria의 경우 46.30%로 나타났다. 이는 무처리한 상태의 재료에서 최소 30-40%의 항균도가 나타나는 것을 의미한다. 이를 재료의 항균성능의 분석자료로 활용하였다.

다공질 장석 입자를 도포한 시료의 항균도는 70.10 % (Gram +), 68.20 % (Gram -)를 보였고 PP(백색)에 다공질 장석 분말 50 ㎜를 도포한 시료의 항균도는 98.20 % (Gram +), 99.10 % (Gram -)를 보였다. PP(백색)에 다공질 장석 분말 10 ㎜를 도포한 시료의 항균도는 99.97 % (Gram +), 99.97 % (Gram -)를 나타내어 입경이 작아질수록 항균도는 증가하는 경향을 보였다(그림 2.8). 공시균주별로 Gram positive bacteria와 Gram negative bacteria를 비교하면 일반적으로 Gram negative bacteria에서 항균도가 다소 높게 관찰되었다.

이상의 실험에서 다공질 장석은 50㎛이하의 입자 상태에서 미생물이 98.4-99.9% 제거되는 결과를 확인할 수 있었다. 재료의 항균성 실험에 사용한 시편에서 다공질 장석 분말의 중량비는 3%이었는데, 이는 건축 재료원의 배합비를 결정하는데 미분말의 첨가율을 결정하는데 자료로 활용하였다.



초기 균수 (1.60 ± 0.1) × 10^5 CFU/㎖
24시간 후 균수 (1.04 ± 0.1) × 10^5 CFU/㎖
pp(백색), blank

초기 균수 (1.70 ± 0.1) × 10^5 CFU/㎖
24시간 후 균수 (5.40 ± 0.1) × 10^4 CFU/㎖
pp(백색) + 다공질 장석 입자

초기 균수 (1.60 ± 0.1) × 10^5 CFU/㎖
24시간 후 균수 (2.70 ± 0.1) × 10^3 CFU/㎖
pp(백색) + 다공질 장석 분말(50 ㎛)

초기 균수 (1.70 ± 0.1) × 10^5 CFU/㎖
24시간 후 균수 (0.50 ± 0.1) × 10^2 CFU/㎖
pp(백색) + 다공질 장석 분말(10 ㎛)

그림 2.8 2차 가공전 항균시험 결과

② 2차가공 후

실대형 모형의 바닥 축열층과 경량블록, 천장 마감재에 배합비 조건으로 항균시험을 수행하였다. 축열층의 세립질 소재로 사용한 장석입자의 항균도(ATCC 4352)는 57.4%이며, 축열층 모르타르와 경량블록, 접합을 위해 제조한 실런트 조성물에 해당하는 배합재료의 항균성능은 99.9%의 제거율을 보였다(그림 2.9, 표 2.5).

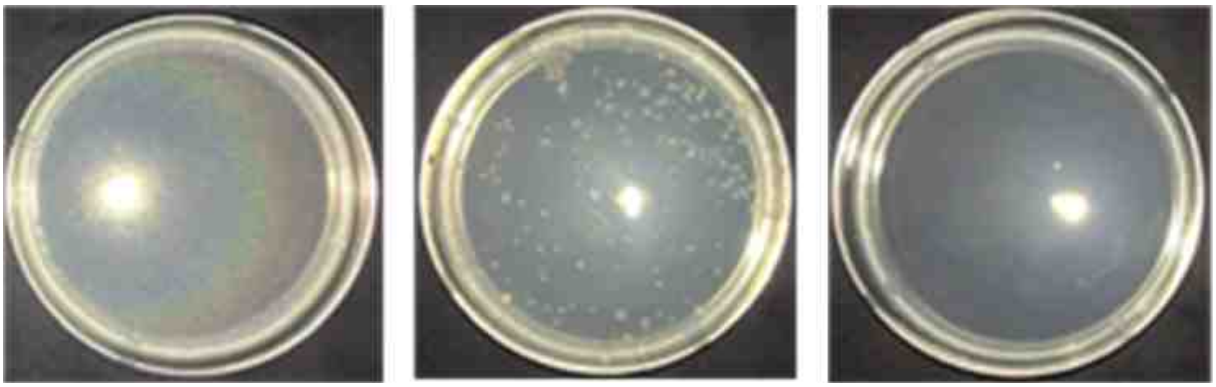


그림 2.9 2차 가공후 항균시험 결과

표 2.5 건축 소재로 적용한 모르타르의 항균도

재료원	항균성능(ATCC 4352)
다공질 장석 입자(0.5-1.0㎜)	57.4%
다공질 장석 + 보통 포틀랜드 시멘트	99.9%

㉮ 중금속 흡착 및 여과

장석을 이용해 제작한 두 종류의 공시체 specimen A(경량기포 150mL)와 specimen B(200mL)에 대해 일광광산에서 채취한 산성배수(AMD)를 이용하여 흡착 및 여과 성능시험을 수행하였다. 경량기포의 양에 따라 통과하는 원소의 차이를 보이지만 중금속 전체에 대한 평균 흡착-여과율은 99.4%로 매우 우수한 성능을 보였다(그림 2.10, 표 2.6.).

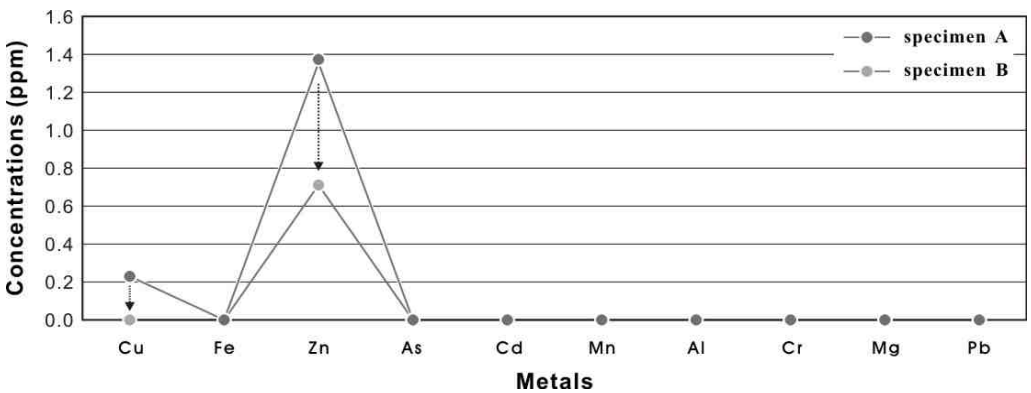


그림 2.10 중금속 흡착성능 평가(kim et al., 2017a)

표 2.6 장석 공시체를 이용한 중금속 흡착시험

원소	이온 농도 (ppm)		흡착 비율(%)	
	Specimen A	Specimen B	Specimen A	Specimen B
Cu	0	0.232	100%	99.2%
Fe	0	0	100%	100%
Zn	0.714	1.355	97.1%	94.5%
As	0	0	100%	100%
Cd	0	0	100%	100%
Mn	0	0	100%	100%
Al	0	0	100%	100%
Cr	0	0	-	-
Mg	0	0	100%	100%
Pb	0	0	-	-

㈐ 원적외선 방사율

적외선은 파장의 범위에 따라 근적외선, 중적외선, 원적외선으로 세분되고 원적외선(Far-Infrared) 중에서도 6-18μm 파장대는 인체에 흡수되면 활성화 작용을 하고 있는 것으로 밝혀져 있다. 다공질 장석 재료의 원적외선 방사율은 0.925로 측정되었으며(그림 2.11), 방사에너지는 3.57×10^{2} W/m^{2}㎛ (37℃)로 우수한 열적 특성을 보인다(그림 2.12).

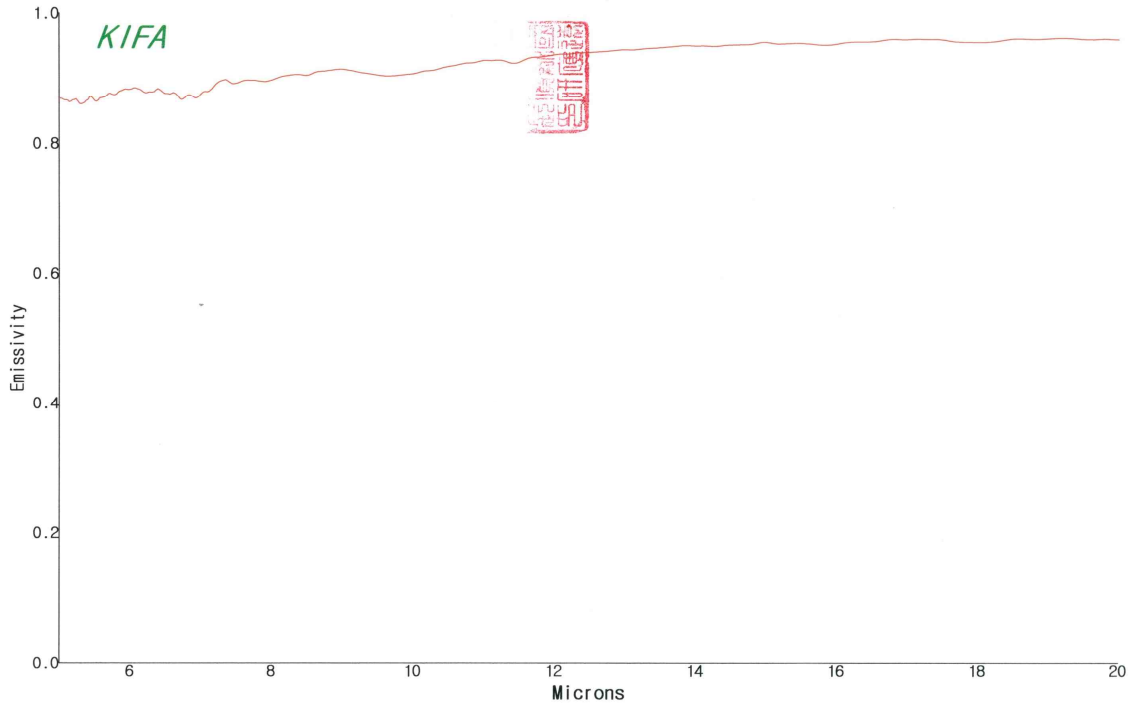


그림 2.11 다공질 장석의 원적외선 방사율

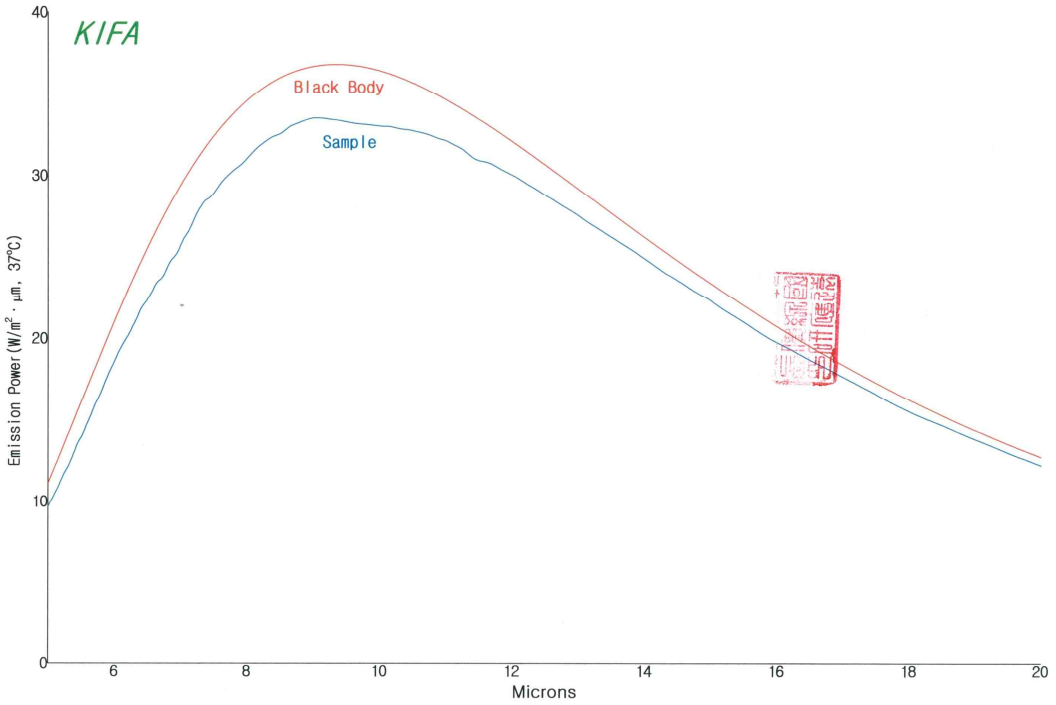


그림 2.12 다공질 장석의 원적외선 방사에너지

(나) 제올라이트(클리놉틸로라이트)

① 암석학적 특성

제올라이트는 대체로 Na, K, Ca를 함유하고 망상구조를 이루고 있는 함수 알루미늄규산염 광물들에 대한 총칭이다. 제올라이트는 망상구조 내부에 큰 공간을 가지고 있어 물과 양이온을 함께 지닌다(김수진, 2001).

제올라이트 광물들은 공통적으로 물을 함유하는데 이는 함수시스템에서 생성됨을 지시한다(김수진, 2001). 제올라이트 광물은 보통 점토광물과는 구별되는 온도, 압력, 화학적 변수(Si/Al, Ca^{2+}, Na^{+}, K^{+}, H_20 분압)의 조건에 의해 결정된다(Barrows, 1980).

결정구조상 제올라이트는 규산염 광물의 기본 단위의 하나인 $(Si,Al)O_4$ 사면체의 모든 산소들이 또 다른 사면체에 의해서 공유되면서 3차원으로 연결되는 망상규산염광물의 구조를 이룬다. 이러한 구조는 결정 내에 2.3-7.5Å 크기의 큰 공동이 형성될 정도로 엉성한 격자 구조다. 이 공동의 크기는 Si 또는 Al에 결합된 4-12개의 산소들이 이루는 산소 고리의 형상과 개입되는 산소의 숫자에 의해 결정된다.

자연 상태의 제올라이트는 약 46여종이 알려져 있으며 합성제올라이트는 약 200여종이 제조되고 있다. 탈수된 제올라이트는 안정적이고 균질하다. 또, 분자 크기의 틈을 가지고 있는데, 그 크기나 형태에 따라 분자를 선택해서 흡수할 수 있다.

제올라이트의 주요 용도는 이온교환, 핵폐기물 처리, 야금폐기물 처리, 양식업, 탈취, 가축사료 첨가제, 토양개량용, 물과 가스의 흡착 등인데, 시멘트 및 콘크리드의 경량제로도 활용되고 있다. 이온교환 특성은 느슨하게 결합하고 있는 이온들이 비교적 쉽게 다른 이온

으로 치환되는데에 있다. 또 암석 내에 공간이 존재하고, 기공의 표면적이 넓기 때문에 제올라이트는 촉매나 촉매의 운반체 역할을 한다(한국자원정보서비스, 2016).

천연 제올라이트는 약 46종이 알려져 있으나, 이중, 9종류 만이 상업적 관심의 대상이고(표 2.7), 그중에서도 클리놉틸로라이트(Clinoptilolite)와 모데나이트(Mordenite)가 우리나라나 일본에서 상업적으로 가장 폭넓게 활용되고 있다(장윤희, 2001). 본 연구에서는 국내외에서 판매하는 천연 제올라이트를 제품을 분석하였으며, 오염물에 대한 흡착성능이 가장 광범위하고, 우수한 것으로 알려진(노진환, 2001, 2003; 김영규, 2001) 클리놉틸로라이트의 함량이 높은 재료원을 선택하였다. 여러 제품 중 최적의 천연 제올라이트 제품을 선정하였고, 이것을 이용하여 본 연구에 이용하였다. 본 연구에 재료원으로 이용되는 제올라이트는 이후 클리놉틸로라이트라고 통일하여 표기하였다.

표 2.7 제올라이트의 종류(한국자원정보서비스, 2016)

제올라이트	분자식
Analcime(Analcite)	$NaAlSi_2O_6.13H_2O$
Chabazite	$Ca_2\{(AlO_2)_4(SiO_2)_8\}.13H_2O$
Mordenite	$Na_8\{(AlO_2)_8(SiO_2)_{40}\}.24H_2O$
Ferrierite	$(K,Na)_2(Mg,Ca).2Al_6Si_{30}O_{72}.18H_2O$
Heulandite	$(Ca,Na_2)4Al_8Si_{28}O_{72}.24H_2O$
Erionite	$(Ca,Mg,Na_2,K_2)_{4.5}\{(AlO_2)9(SiO_2)_{27}\}.27H_2O$
Clinoptilolite	$Na_6\{(AlO_2)6(SiO_2)_{30}\}.24H_2O$
Laumontite	$Ca_4Al_8Si_{16}O_{48}.19H_2O$
Phillipsite	$(K_2,Na_2,Ca)_2Al_4Si_{12}O_{32}.12H_2O$

② 정량, 정성적 분석

㉮ 광물 조성(XRD)

본 과제에 활용한 클리놉틸로라이트의 구성 광물의 종류를 정성/정량적으로 분석하기 위하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 분석에 이용된 장비는 부산대학교 공동실험실습관의 Xpert 3이었고, 이로부터의 결과를 Siroquant program을 이용하여 정량분석하였다.

재료원은 제올라이트의 주요 매장국이자, 수출국인 중국에서 생산된 시료를 이용하였다.

정량결과 주 구성광물은 석영(Quartz, 28.6%), 사장석(Plagioclase, 24.55%), 정장석(K-Feldspar, 19.9%), 클리놉틸로라이트(Clinoptilolite, 19.3%), 아날사이트(Analcite, 7.6%)이었다. 여기서 제올라이트군에 포함되는 광물은 클리놉틸로라이트, 아날사이트인데, 그 함량은 26.9%에 이른다.

그림 2.13은 제올라이트라고 판매된 재료원 시료의 광물조성을 분석한 결과로 좌측은 X-선 회절 피크이며, 우측은 정량분석 결과이다.

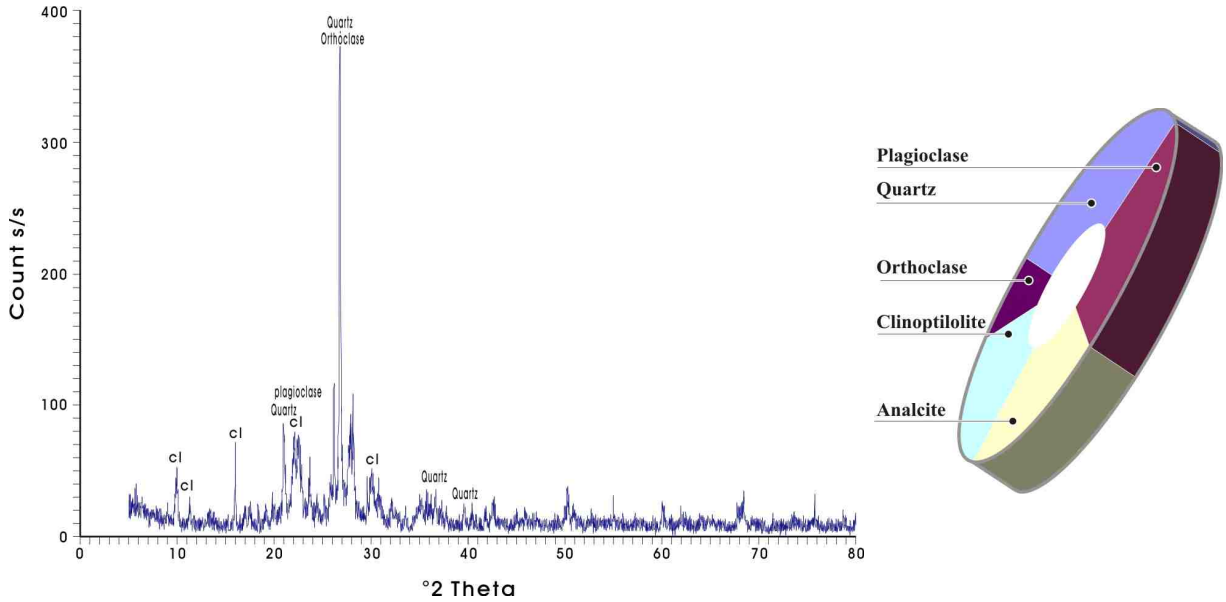


그림 2.13 제올라이트의 X-선 회절분석에 의한 조성

㉯ 화학 조성(XRF)

X-선 형광분석 (XRF, 전암분석)은 주로 암석의 화학적 특성을 검증하고 대비하기 위해 암석의 SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, FeO^t, CaO, MgO, MnO, K_2O, Na_2O, P_2O_5 등의 성분을 분석하고 그 함량비를 측정하는 것이다.

실험에 이용된 대표적인 제올라이트의 구성성분을 분석하기 위해서 부경대학교의 SHIMADZU (Japan)의 XRF-1700을 이용하였다. 각 시료는 3번 측정하여 그 평균값을 정리하였다(표 2.8).

표 2.8 제올라이트의 X-선 형광분석 결과

구분	1회	2회	3회	평균
SiO_2	62.97	62.99	62.94	62.96
Al_2O_3	13.72	13.72	13.72	13.72
TiO_2	0.31	0.31	0.31	0.31
Fe_2O_3	2.10	2.11	2.11	2.11
MnO	0.08	0.08	0.08	0.08
MgO	0.90	0.91	0.89	0.90
CaO	3.10	3.10	3.10	3.10
Na_2O	2.05	2.04	2.04	2.04
K_2O	1.72	1.72	1.72	1.72
P_2O_5	0.11	0.11	0.11	0.11
LOI	12.81	12.81	12.81	12.81
Total	99.88	99.90	99.83	99.87

③ 친환경 특성

㉮ 양이온치환용량

제올라이트의 양이온치환용량력은 단순히 씻어주는 정도의 처리만으로도 100g당 200-400meq를 보인다. 이는 유사한 용도로 사용되는 스멕타이트의 2배 이상의 값이다. 제올라이트 광물군은 각각의 광물 종류에 따라 선택적인 양이온의 교환특성을 보인다(노진환, 2001). 본 연구에 사용된 제올라이트의 양이온치환용량 분석 결과 103.47 meq/100g으로 측정되었다. 제올라이트는 고양이류의 배설물 처리 및 신발냄새 제거 등 다양한 종류의 탈취제로 이용되고 있으며, 일반 점토광물에 비해 약 4배 정도 암모니아를 제거시키고 먼지의 발생도 적다. 이외에도 제올라이트는 애완동물, 닭, 비육우, 돼지, 말들의 배설물처리에도 이용된다(한국자원정보서비스, 2016). 이러한 효능은 불석의 양이온치환용량력 및 암모늄 이온에 대한 선택적인 이온 교환능력 때문이다.

㉯ 흡착 및 분자체능

일반 제올라이트는 구조상 공동의 양이온들 주위에 많은 양의 물을 함유하고 있지만 350-400℃로 가열하면 쉽게 탈수된다. 탈수된 클리놉틸로라이트는 서로 다른 분자들을 분리해내는 있는 뛰어난 분자체능의 특성을 보이며 이는 공동의 유효구경에 따라 다르게 나타난다(노진환, 2001).

제올라이트는 핵폐기물과 야금폐기물 처리에도 활용된다. 핵반응에 의해 방출된 세슘 134, 137 및 스트론튬 90을 제올라이트로 채워진 필터기로 통과시키면 제올라이트에 의해 선택적으로 흡착된다. 특히 클리놉틸로라이트와 차바자이트 등은 30여년 동안 핵처리에 사용되어 왔다. 이들은 Chernobyl, Three mile island, Bikini atoll, British nuclear fuels ltd 등에서 성공적으로 사용했다. Three mile island에서 chabazite는 합성된 유사종과 같이 사용되었는데, 오염된 물을 총 10m^3의 천연 및 합성 제올라이트가 채워진 일련의 기둥을 통하여 펌핑했다. 발전소는 오염수로부터 총 227만 리터의 50만 퀴리(curie)의 방사능을 제거할 수 있었다(한국자원정보서비스, 2016).

㉰ 촉매 특성

클리놉틸로라이트는 높은 공동 체적율 때문에 높은 표면활성을 갖게 되고, 따라서 우수한 촉매효과를 보인다. 이에 영향을 미치는 요소로서 클리놉틸로라이트의 구조, 양이온의 성격과 구조상 위치, Si/Al의 함량비, 활성의 금속원소들의 존재 여부가 있다(노진환, 2001).

㉱ 탈수 및 재흡수 특성

제올라이트는 구조상의 특이성으로 불석수라고 불리는 물을 10-15 wt% 정도 함유한다. 이러한 불석수의 함유 정도는 광종과 양이온의 성격 그리고 습도와 온도에 따라 매우 가변적이다(노진환, 2001).

제올라이트가 결정구조의 결손 없이 물 분자를 흡착하는 뛰어난 능력을 이용한 것이 건조와 탈수 그리고 습도를 낮은 상태로 조절하는데 유용하게 이용된다. 또한, 제올라이트가 물을 흡수하고 방출하는 독특한 성질을 갖고 있어 열교환제로 사용되기 시작했다. 솔벤트 물질보다 50% 이상의 냉각효율이 있는 것이 밝혀졌다. 또한, 탈/흡수 성질은 냉장고에 이용되기도 하며, 1톤의 제올라이트를 200ft^2에 뿌리면 1톤의 공기가 정화된다는 것이 밝혀졌

다(한국자원정보서비스, 2016).

제올라이트는 가스를 흡착하는 특성을 가지고 있다. 기체의 흐름에서 제올라이트가 어떤 성분들을 효과적으로 제거시키는데 사용될 수 있다는 것이 증명된 바 있다. 미국에서는 chabazite가 L.A. 지역 내 가스정에서 CO_2, H_2S 그리고 H_2O의 25%를 성공적으로 제거시켰다.

재생원료면에서 보면 제올라이트는 매립지에 모인 메탄의 정화에도 사용된다. 이러한 가스는 약 40%의 CO_2와 수분, 황화수소 등을 함유하는데 이러한 불순물은 제올라이트로 충전된 흡착기를 통과하기 전에 우선적으로 제거된다. 매립지에서 메탄가스가 발생한다는 사실에도 불구하고 CO_2의 존재로 인해 메탄가스가 에너지로 사용되는데 방해물이 되고 있다. 그러나 제올라이트를 방출가스의 정화와 연료가스의 함량을 높이는데 사용함으로써 매립지가 하나의 중요한 에너지 공급원이 될 수 있다. 즉, 도시 쓰레기 처리공장, 폐기물 매립지 그리고 가축 배설물 등에서 수집 가능한 전체 메탄의 양은 방대하다.

제올라이트로 해결할 수 있는 또 다른 환경문제는 굴뚝가스의 정화이다. 그 예로 금속황화광물을 제련할 때 다량의 아황산가스가 발생된다. 현재 대부분의 동 제련소는 불석을 이용하여 아황산가스를 황산으로 전환시키는 설비를 갖추고 있다. 이때 회수된 황산은 부산물로 판매가 가능하다. 같은 용도로 화력발전소의 굴뚝 정화에도 이용된다. 현대식 탈황연료 가스공장에서는 부산물로 석고를 생산하기도 한다(한국자원정보서비스, 2016).

(2) 결합제

(가) 보통 포틀랜드 시멘트

① 특성

시멘트란 미분쇄된 무기물질의 혼합분말로 물과 혼합되면 화학반응을 일으켜서 경화하는 재료이다. 이 화학반응을 수화 혹은 수화반응(hydration)이라고 말하며, 물의 존재하에서 경화하는 성질을 수경성(hydraulic)이라고 말한다. 보통 포틀랜드 시멘트의 평균 화학조성은 표 2.9와 같으며, 물, 잔골재(모래), 굵은골재(자갈)와 혼합하여 콘크리트 모르타르를 제조한다.

표 2.9 보통 포틀랜드 시멘트의 평균 화학조성

산화물성분	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	(Na_2O+K_2O)
조성범위(%)	60.0-67.0	17.0-25.0	3.0-8.0	0.5-6.0	0.1-4.0	1.0-3.0	0.5-1.3

석회질원료와 점토질원료를 분쇄혼합하여, 킬른에서 가열(소성)하면 단단한 괴상의 클린커로 된다. 이때 클린커를 현미경으로 관찰하면, 규산칼슘의 결정이 알루민산 칼슘, 철알루민산 칼슘에 둘러싸여 있다. 주요 클린커 화합물의 단순화한 화학조성식을 표 2.10과 같이 정리하였다. 냉각한 클린커를 석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)와 혼합, 분쇄하면 보통 포틀랜드 시멘트가 된다.

표 2.10 보통 포틀랜드 시멘트 클린커의 주요 화합물의 성질

화합물과 조성식	클린커 중의 상태	반응속도	수화열
C3S(3CaO·SiO2) Tricalcium silicate	alite	빠르다(시간)	중-500 J/g
β-C2S(2CaO·SIO2) Dicalcium silicate	belite	느리다(일)	저-250 J/g
C3A(3CaO·A2lO3) Tricalcium aluminate	aluminate (C3A alkali 고용체)	순간적	매우 높음-850 J/g
C4AF(4CaO·A2lO3·Fe2O3) Tetracalcium aluminoferrite	ferrite (ferrite고용체)	매우 빠르다(분)	중-420 J/g

② 정량, 정성적 분석

㉮ 광물 조성(XRD)

본 과제에 활용되는 보통 포틀랜드 시멘트를 X-선 회절분석하고, 그 결과를 Siroquant program을 이용하여 정량분석하였다. 그림 2.14는 다공질 장석의 광물조성 분석결과를 그림으로 정리한 것이다. 좌측은 X-선 회절 피크이며, 우측은 정량분석결과이다. X-선회절분석 결과 C3S가 43.4%, C2S가46.4%, 방해석이 10.3%로 나타났다.

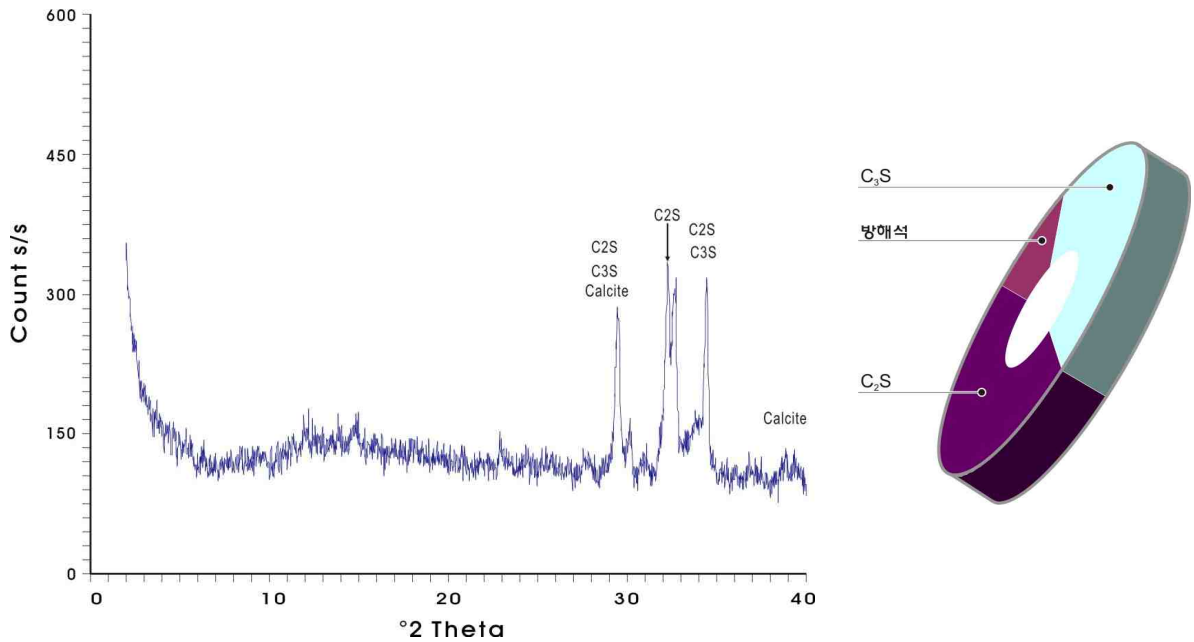


그림 2.14 보통 포틀랜드 시멘트의 X-선 회절분석에 의한 조성

㉯ 화학 조성(XRF)

표 2.11은 보통 포틀랜드 시멘트의 X-선 형광분석 결과를 정리한 것이다.

표 2.11 보통 포틀랜드 시멘트의 X-선 형광분석 결과

Analyte	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	P_2O_5
Result	62.55%	21.77%	4.06%	3.84%	3.45%	3.01%	1.14%	0.19%
Line	CaKa	SiKa	AlKa	MgKa	FeKa	S Ka	K Ka	P Ka
Net Int.	1131.784	123.456	26.944	8.719	40.271	28.052	32.593	2.061
BG Int.	2.871	0.552	1.275	0.29	1.324	0.584	1.535	0.331

(나) 섬유

건설 재료로서 휨모멘트 또는 인장력 작용 시 그리고 균열발생 후에도 응력의 저하가 없고, 변형의 증가에 따라 응력이 증가하는 변형강화 특성, 그리고 인장응력 구간에 무수한 미세균열이 분산되는 다중균열 또는 균열분산 특성을 나타내는 변형경화형 고인성 시멘트 복합재료가 활발하게 개발되고 있다. 이러한 건축 섬유로 대표적인 것이 ECC (Enginnered Cementitious Composites)인데, 이는 미시건(Michigan)대학의 Victor C. Li에 의해 개발된 재료이다. 본 재료의 최대 특징은 인장응력 하에 변형경화를 나타내고 미세하고 고밀도의 복수균열을 형성함으로서 최대인장변형이 8%까지 달하여 매우 고인성인 반면 연성인 재료거동을 보인다는 점이다. ECC는 마이크로 메카닉스(Micro-mechanics) 파괴역학을 설계원리로 하고 있으며, 이를 이용하여 재료거동의 예측과 설계 양 방향이 모두 가능하다.

폴리비닐알코올(poly vinyl alcohol, PVA)은 1924년 Herrmann과 Haehnel이 폴리비닐아세테이트(poly vinyl acetate, PVAc)의 비누화 도중에 처음으로 합성하였다(김효대 외, 2004). 그 특징을 활용한 사례에는 지진에너지 흡수 디바이스, 보수/보강용 재료(단면수복 또는 증후), 강재피복 재료 등이 있다(황문규, 2008).

그림 2.15는 본 과제에 이용한 건축용 PVA 섬유(좌)와 이를 혼입하였을 때 인장강도 시험의 거동(우)을 나타낸 것이다.

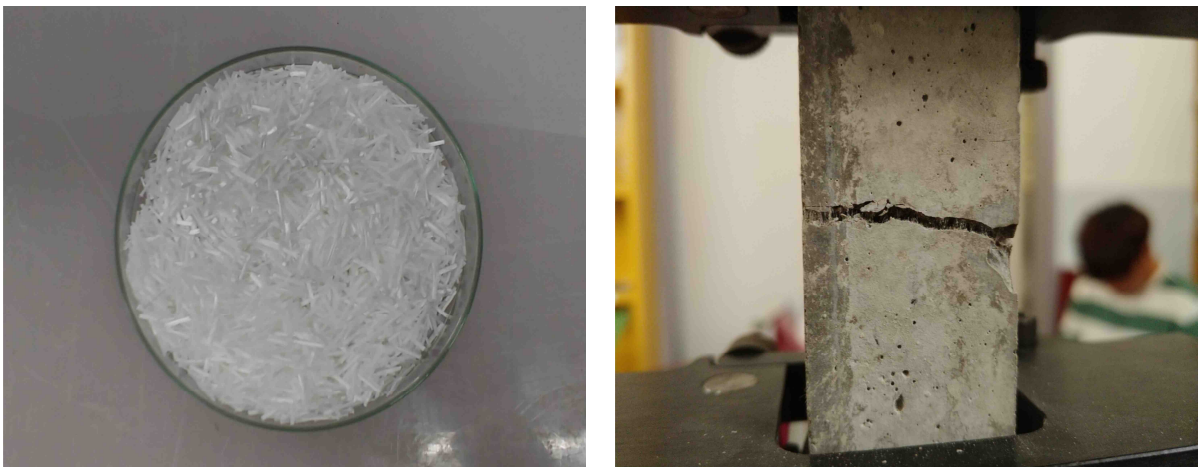


그림 2.15 건축용 PVA섬유(좌)와 인장강도 거동(우)

(3) 소결

본 연구에서는 건설재료로 가장 광범위하게 이용되는 시멘트를 대체할 수 있는 주요 재료원으로서 규산염산업광물인 장석과 제올라이트를 선정하였다.

특히 풍화가 진행됨에 따라 장석에서 다공성 구조가 증가하고, 이에 따라 비표면적이 증가하여 중금속의 흡착능력이 향상되는 점에 착안하여 시멘트를 대체하는 주요 재료원으로 다공성 장석을 활용하였다. 또한, 천장 재료원으로 제올라이트 중 클리놉틸로라이트의 함량이 높은 원료를 선정하였다.

주요 결합제로는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 경량 블록과 천장 재료의 제작에서는 건축용 PVA섬유도 첨가하였다. 이때 시멘트의 함량비가 감소할 때 나타나는 강도 저하를 보완하기 위해서는 소량의 첨가물로 금속염 고화제를 이용하였다. 한편, 팽창 및 수축을 방지하기 위해 사용한 소량의 결합제는 다음 단원인 2차 처리기술에서 상세하게 다루었다.

나. 2차처리 기술

(1) 경량화

산업광물의 2차적인 처리는 암석 내 공극의 비율을 증가시키고 이를 통해 반응력을 높이는 연구를 진행하였다.

다공질에 기반한 소재는 공동의 크기, 기원, 모양, 배열 등에 따라 다양한 특성을 나타낸다. 공동은 크기에 따라 미세공(micropore; < 2.0 nm), 중간공(mesopore; < 2.0～50 nm), 거대공(macropore; > 50 nm)으로 구분된다. 미세공은 광물의 결정구조나 분자체 구조에 해당하며 천연 소재로는 제올라이트와 같이 암석이 형성될 당시 분자체(molecular sieve)의 결정구조를 가지는 것이 일반적이다. 중간공은 촉매, 기체 흡착제, 약물전달, 바이오센서, 중금속 흡착제 등의 제조에 이용되며, 거대공동에 대한 제조 기술은 에멀젼, 기포(foam), 고분자 라텍스(polymer latex) 입자 등을 주형으로 제조하는 방법이 대표적이다. 거대 공동을 갖는 다공성 재료는 고분자, 세라믹, 금속, 탄소 소재 등 다양한 물질로 제조할 수 있으며, 응용 분야로는 촉매, 센서, 광산란 및 반사체, 형광체 등을 들 수 있다. 특히 1990년대 후반 이후 콜로이드 광자 결정에 대한 연구가 활발해지면서, 거대 공동을 갖는 다공체에 대한 다양한 연구 결과가 심도 있게 축적된 바 있다(조영상, 2013).

연구의 주요 재료로 활용한 장석은 풍화과정에서 수반되는 공동은 1-200㎛ 크기로 거대공에 해당하며 2차적인 처리기술도 거대공의 확장을 통한 기능성을 파악하였다. 다공질 장석의 기능 개선은 활성도를 증가시켜 소재로서 적합성은 물론 경제성을 확보하기 위한 방법으로 수행하였다. 연구에서 적용한 활성기법은 경량화에 중점을 두고 수행하였다, 경량화는 무게 대비 체적을 증가시키면 반응에 기여하는 비표면적을 높일 수 있다. 반응성을 증대시키기 위해서 기계적 방법으로 분체하는 과정에따라 재료의 특성 변화를 파악하였으며 열적인 변화 및 재료의 혼합에 따른 변화를 관찰하였다, 이와는 별개로 경량재료를 혼합하여 반응력을 높이는 방법도 함께 시도하였다.

(가) 풍화

장석은 매장량이 풍부하고 건설재료의 활용측면에서 연구가 거의 이루어지지 않아 잠재적 가치가 상당히 낮게 평가되고 있다. 규산염광물에 속하는 장석은 풍화과정에서 1-200㎛ 크기의 공동이 무질서하게 배열된 다공질 구조를 보인다(그림 2.16).

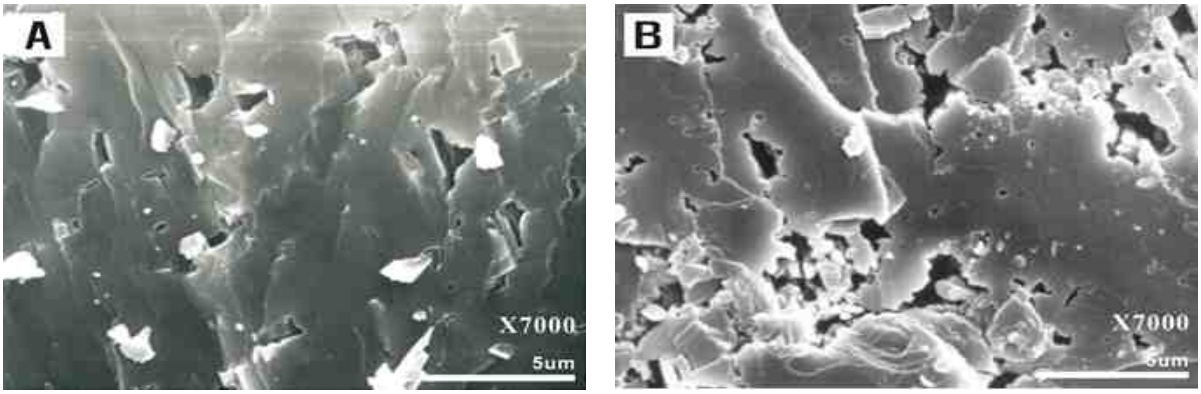


그림 2.16 풍화된 장석의 표면

Lee 등(2006)은 사장석에 대해 강제 풍화과정의 표면을 전자현미경(SEM)으로 관찰하였다(그림 2.17). 장석이 물과 반응하는 동안에 광물 표면에 많은 용식각(etch pit)과 미세균열들이 형성되었고, 운모류에 비해 표면 부식 혹은 풍화의 정도가 두드러졌고, 용출된 Al 성분들이 2차적으로 침전하여 광물표면을 전체 또는 부분적으로 피복하는 것을 확인하였다. Casey 등(1989)은 수소이온에 의해 광물의 양이온이 치환되는 과정에 광물표면이 용해되고 실라놀(>Si-OH)구조가 형성되고, 이후 실록산(>Si-O-Si<)으로 발전하면서 수축현상이 발생한다고 제시하였다. 광물 풍화에서 H_2O가 빠져나가는 탈수 현상에 의해 표면 수축이 일어나고 이것은 풍화표면의 미세 공극을 증가시키는 요인이 된다. 그림 2.17과 같이 수소이온농도(pH)가 낮은 산성 환경에서 장석의 분해 현상이 가속된다. 국내에서는 장석반정을 포함하는 모암 중 풍화 상태에 놓인 암석은 산출 범위가 넓다. 그래서 풍화과정을 통해 다공질 구조를 증가시키는 방법은 시간과 비용적 측면을 고려하여 경량화 방안에서 제외하였다.

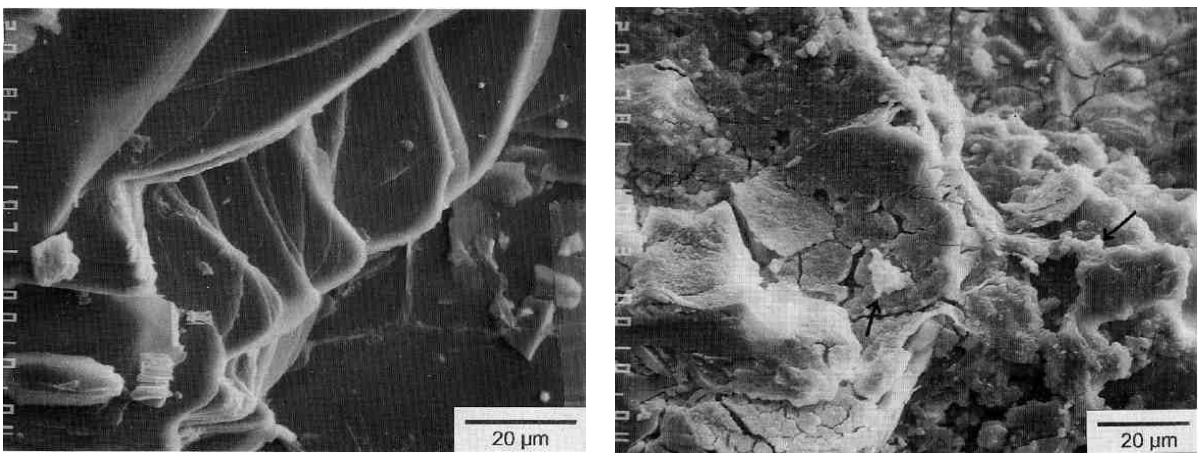


그림 2.17 산성 환경(pH 2.0)에서 사장석의 풍화실험(Lee 등, 2006)

(나) 강열감량

소재의 가열처리 방법은 원석의 개발과 분체과정에서 포함될 수 있는 유기물과 이물질 제거하기 위해 그리고 최적의 소성온도를 결정하는 데 필요하다. 대표적인 무기질 건축 소재인 시멘트는 제조과정에 혼입된 이물질을 제거하는 한편 반응력 향상할 목적으로 고온 소성의 방법이 사용된다. 보통 포틀랜드 시멘트는 1,450℃ 정도의 온도로 가열한 후 냉각하는 과정을 통해 제조된다. 가열 온도는 광물의 폐색 온도(임계 온도)와 상변화 등을 고려해야하며 너무 낮은 온도는 재료의 변화를 수반하지 못하며 임계온도 이상으로 가열하면 조직의 물리적 변화가 발생한다, 특히 다공질 장석과 같이 입자 표면에 다공성 조직이 발달되어 있는 재료의 경우 소성온도의 설정은 매우 중요하다.

장석반암 원석을 대상으로 폐색온도를 확인하기 위해 가열 실험을 수행하였다. 가열실험은 임의의 온도를 설정하고 가열로의 내부온도가 그 온도에 도달하면 20분간 유지한 후에 상온에서 냉각하였다. 육안관찰이나 200배의 실체현미경으로는 가열에 의한 암석의 표면 변화를 확인 할 수 없으나 전자현미경을 통해서 사장석을 관찰하면 상온부터 480℃까지는 풍화로 형성된 공동이 형태를 잘 유지하나 온도가 증가함에 따라 부분적인 용융이 시작되고 600℃에서는 공동이 완전히 닫힌 것을 관찰할 수 있다. 정장석의 경우 사장석보다는 높은 온도에서 폐색이 시작되었다. 600℃로 가열하면 사장석과 동일하게 용융으로 공동이 닫혔다(그림 2.18). 사장석과 정장석은 공통적으로 풍화과정에서 공동이 만들어지며 다공질의 물리적 특성을 이용한 소재의 개발에서는 폐색온도 이하에서 열처리를 위한 최적온도를 설정해야 한다. 온도의 유지는 20분이면 충분하다고 판단하였다.

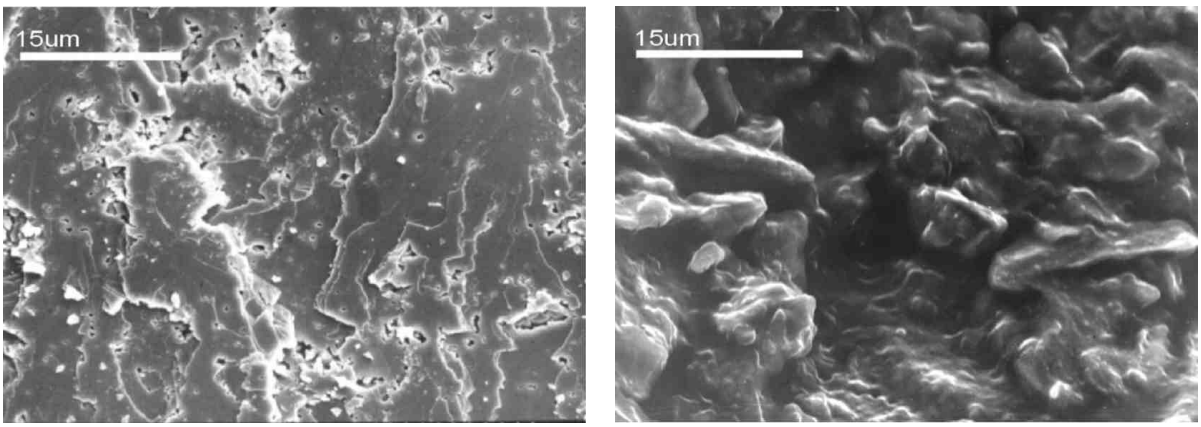


그림 2.18 장석반암의 표면 구조 변화(좌: 가열 전, 우: 600℃ 가열 후)

단계적 가열을 통하여 표면 변화에 수반되는 광물조성의 변화를 관찰하였다. 장석반암 시료를 건조시킨 후 분말 시편으로 제작하여 X선 회절분석(XRD)을 실시하여, 구성광물의 종류를 정성적으로 구분하였다. X-선 회절분석 결과에서 볼 수 있는 바와같이 정량해석프로그램(Siroquant)을 적용하여 정량적 변화를 파악하였다. 그림 2.19에서 400℃까지는 가열에따른 광물조성의 변화가 나타나지 않는 반면 600℃까지 가열한 시료에서 사장석의 피크와 운모와 점토광물이 감소하는 것을 관찰할 수 있다(그림 2.20).

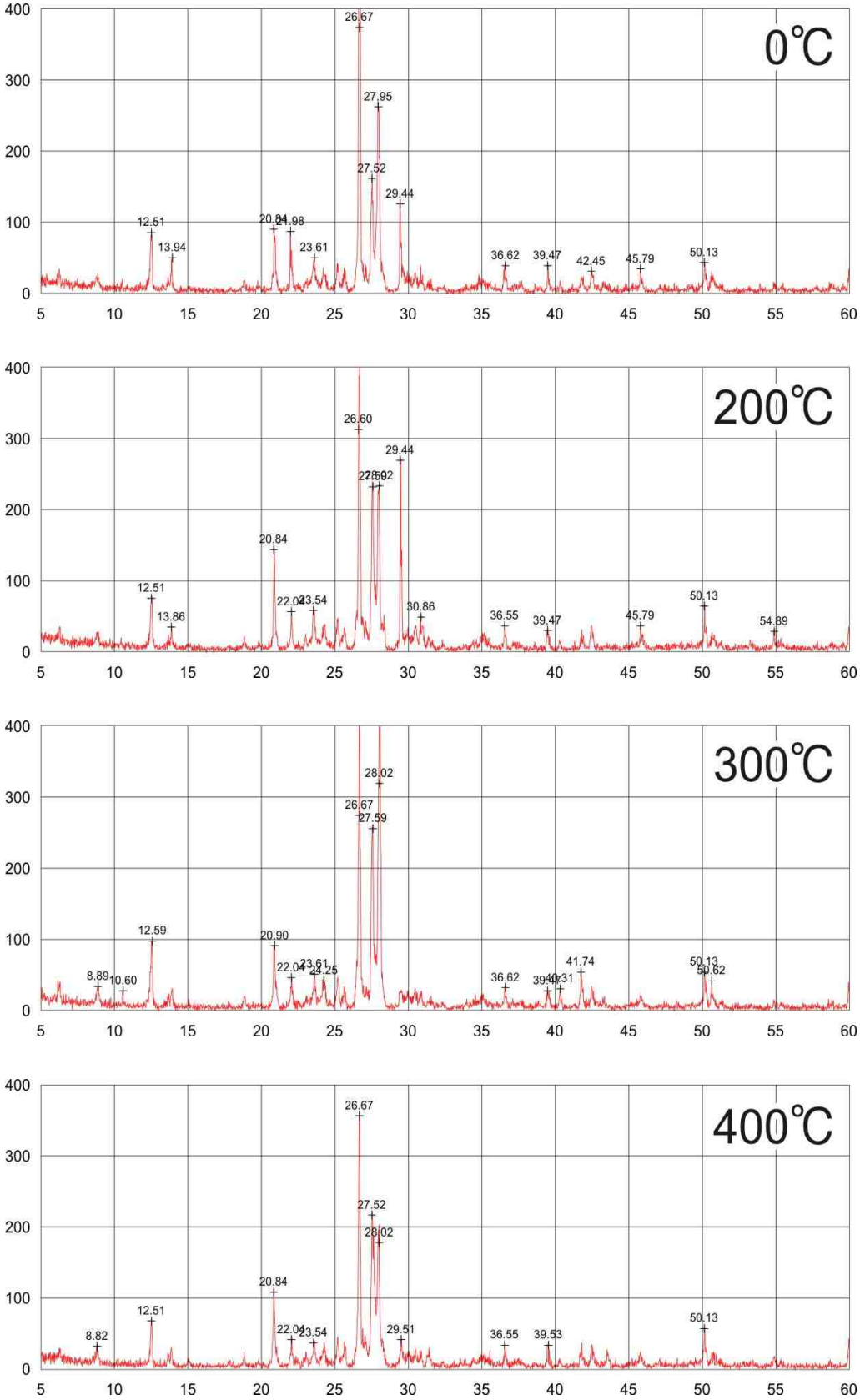


그림 2.19. 상온에서 400℃ 까지의 가열과정에서의 광물조성

즉 고온 소성에 따라 장석의 부분 용융에 의한 물리적 변화뿐 아니라 광물조성의 변화가 수반되는 것을 알 수 있다. 따라서 다공질 장석반암을 기반으로 한 소재의 개발과 2차적인 처리에서 가열 온도의 설정은 매우 중요한 요소인 것이다.

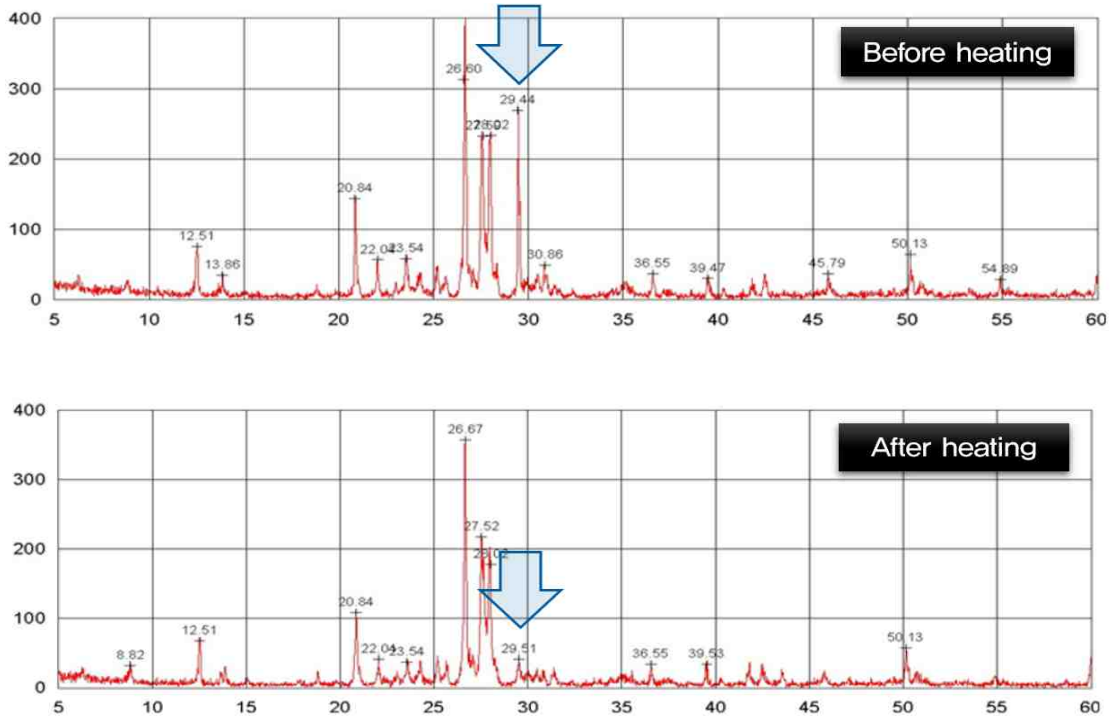


그림 2.20. 가열전과 600℃ 가열 후 장석반암의 광물조성

한편 단계적 소성 과정에서 밀도의 변화를 관찰하였다. 실험을 위한 시료는 장석반암을 평균입경 200㎛로 분쇄하고 장석분말과 보통 포틀랜드 시멘트를 8:2의 무게비로 혼합하여 가로×세로×높이를 4㎝×4㎝×12㎝ 크기의 공시체를 6개 제작하였다. 제작한 공시체는 상온, 100 ℃, 200 ℃, 300 ℃, 400 ℃, 600 ℃, 900 ℃에서 1시간 가열하고 상온에서 냉각하여 무게를 측정하였다(그림 2.21).

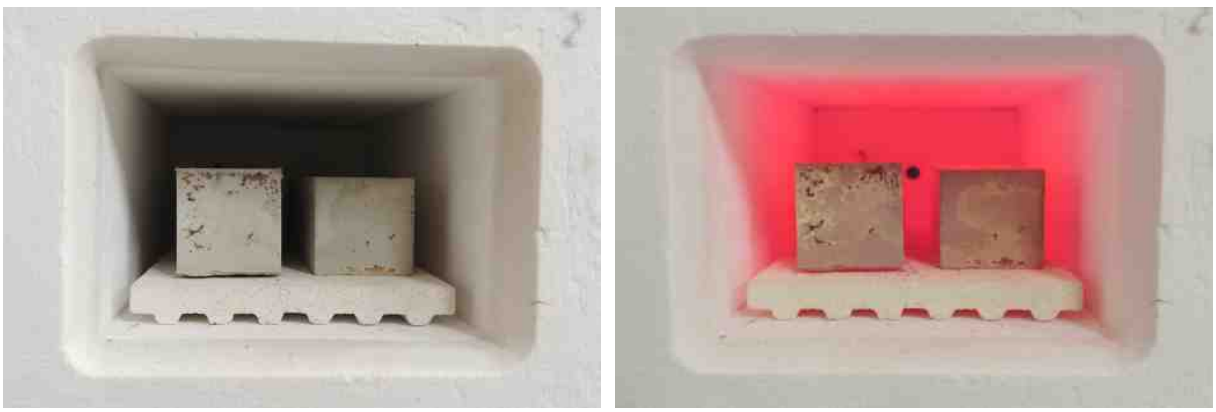
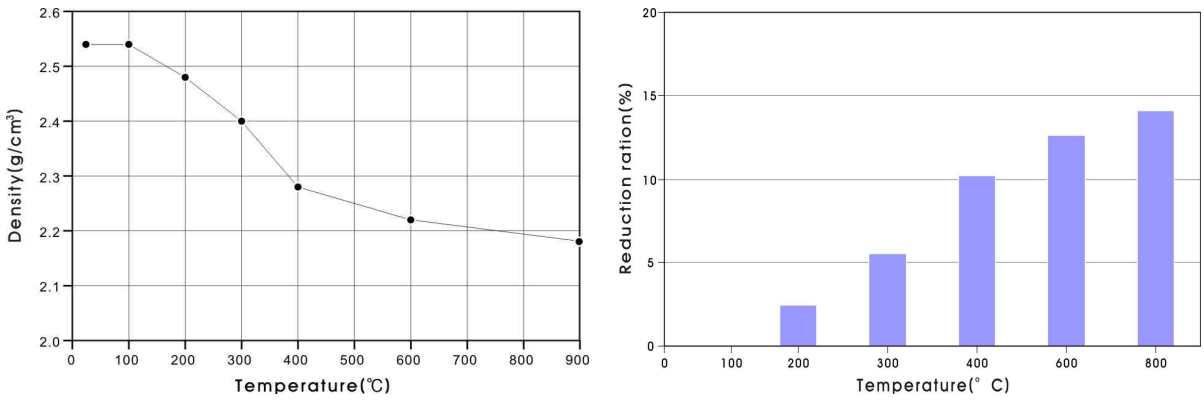


그림 2.21 장석반암의 내화실험사진(좌: 가열 전, 우: 900 ℃가열 후)

체적과 강열감량으로 인한 무게 변화로부터 계산된 밀도는 표 2.12, 그림 2.22와 같다. 가열전 6개 공시체의 밀도는 2.53-2.56 g/㎤의 범위로 일정하였으며 900 ℃에서 최대 14.1 % 밀도가 감소하여 2.18 g/㎤를 보였다. 단계적으로 100 ℃의 가열에서는 밀도 변화가 나타나지 않았으나 200 ℃-400 ℃의 범위에서 밀도 감소율이 크게 나타났고 이후 900 ℃까지 점이적인 변화를 보였다. 단계적 소성에서 체적의 감소는 공시체의 장축을 기준으로 최대 0.1 % 감소하였다. 소성 실험으로부터 장석반암은 강열감량에 의해 14 % 정도 밀도가 감소하며, 표면구조와 광물조성의 변화가 나타나는 400 ℃-600 ℃ 구간에서 10 % 내외의 경량화를 기대할 수 있다. 즉 장석 원석의 다공질 구조를 보존하는 조건에서 소성에 의해 밀도를 최대 10 % 정도 경량화 할 수 있다.

표 2.12 가열과정 중의 밀도 변화

온도(℃)	상온	100	200	300	400	600	900
밀도(g/㎤)	2.54	2.54	2.48	2.40	2.28	2.22	2.18
감소율(%)	-	0	2.4	5.5	10.2	12.6	14.1



소성 단계별 밀도변화　　소성 단계별 밀도 감소율

그림 2.22 가열과정의 밀도변화

(다) 분체

① 분말 제작

분체는 재료의 입경을 조정하는 것으로서 일반적으로 입경이 작아질수록 비표면적이 증가하여 재료의 반응성이 증가한다. 따라서 건축용으로 사용하는 무기질 결합재는 대부분 분말의 형태로 제조한다. 특히 암석의 입자가 감소하면 전/자기적 성질의 변화에 따른 물리적 특성도 달라진다. 풍화에 의한 다공체 구조는 입자 크기의 감소에 의한 원자 비율의 증가 외에도 비표면적이 증가하여 체적특성은 감소하고 표면특성이 증대되고 이에 따른 전기/자기적, 광학적 특성이 발현된다(Park & Lee, 2000).

연구를 위한 소재는 원석을 채광한 후 고품위의 장석반암을 선별하고 1차와 2차의 건식

분쇄를 통해 1㎜에서 500㎛의 크기의 입자를 분별하였다. 3차 분쇄는 볼밀과 레이먼드밀을 이용하였는데 분쇄 후 분급과정을 통해 입자를 크기별로 구분하였다. 실대형 모형 제작을 위해 분체과정은 전문업체에 위탁하여 제작하였으며 입도에 따른 경량화 조건은 모형 제작에 사용한 분체를 대상으로 하였다(그림 2.23).



선광



1-2차 분쇄



3차 분쇄 :레이먼드밀



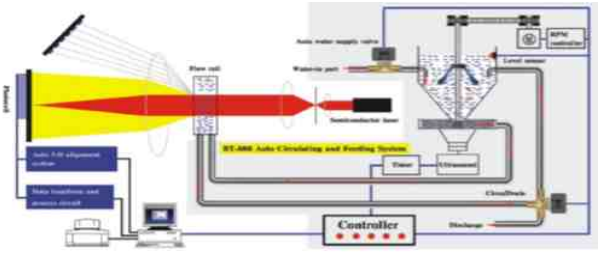
분급

그림 2.23 분체과정과 분급

입자 크기에따라 분급된 장석반암 분말은 BT-9300S 레이져 자동입도 분석기를 통해 분급도를 평가하여 입도 분포가 평균입경을 중심으로 ±5%의 범위가 되도록 하였다(그림 2.24). 정확한 입도의 검증을 위해 공인시험기관에 의뢰하여 입도분석을 수행하였다. 그림 2.25와 그림 2.26은 분체 후의 입자사진과 입도분포를 나타낸 것이다.



BT-9300S 레이져 자동입도 분석기



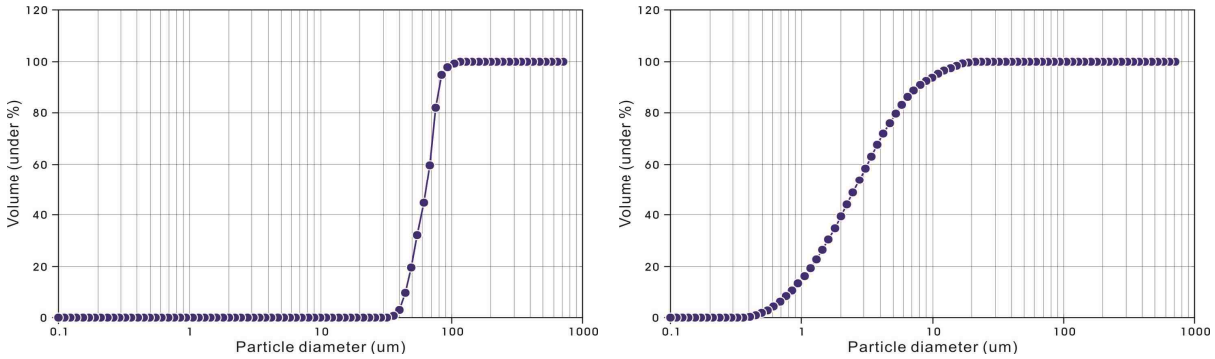
자동입도분석의 원리

그림 2.24 자동입도 분석기



평균입경, 1㎜ 평균입경, 80㎛ 평균입경, 10㎛

그림 2.25 가열과정의 밀도변화



입도분포곡선, 입경 〈 100㎛ 입도분포곡선, 입경 〈 20㎛

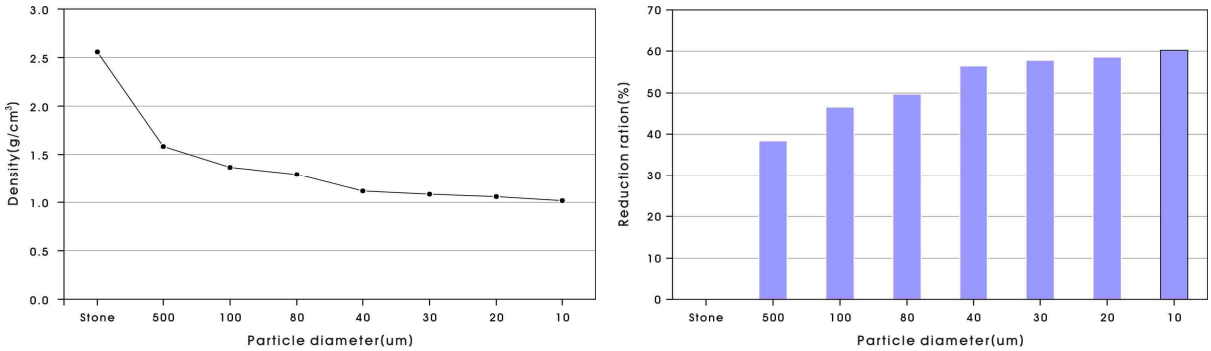
그림 2.26 다공질 장석 분말의 입도분포곡선

② 입경별 밀도

분체의 밀도의 변화를 파악하기 위해서 1-3차 과정에서 획득한 분말을 입도(500 ㎛, 100 ㎛, 80 ㎛, 40 ㎛, 30 ㎛, 20㎛, 10 ㎛)별로 원통형의 틀에 다짐한 후 체적과 무게를 측정하여 밀도를 산정하였다(표 2.13, 그림 2.27). 가공 전 원석의 밀도는 2.56 g/㎤이었으며 평균 입경이 80 ㎛일 때 밀도는 50 % 감소하였으며 10 ㎛에서 60 % 까지 감소하여 1.02 g/㎤가 되었다. 입자 크기를 조절한 경량화는 소성에 비해 효과적인 방법이라고 판단되며, 입자 크기에 따른 반응성과 경제성을 고려하여 실대형 모형 실험에 사용된 입자의 크기를 사용하였다. 위탁 업체를 통한 생산 과정에서 원석 대비 500 ㎛ 크기의 입자는 수율이 90 % 정도였으나 10 ㎛의 입자는 20 %정도로 제품화를 대상으로 할 때 원가 산정에 상당한 차이를 보여주므로 계획 단계에서 상당한 주의가 필요하다.

표 2.13 입경에 따른 밀도 변화

입경(㎛)	원석	500	100	80	40	30	20	10
밀도(g/㎤)	2.56	1.58	1.37	1.29	1.12	1.08	1.06	1.02
감소율	-	38.3	46.5	49.6	56.3	57.8	58.6	60.2



입경별 밀도 변화　　입경별 밀도 감소율

그림 2.27 입경에 따른 밀도 변화와 감소율

③ 입경별 양이온치환용량(CEC)

양이온치환용량(Cation Exchange Capacity; CEC)은 양이온을 흡착하거나 교환하는 물질 능력의 척도로서, 보통 건조 물질 100g당 양이온의 밀리 당량(當量)으로 표시한다. 특정한 pH에서 전기적 인력에 의하여 다른 양이온과 교환이 가능한 형태로 흡착된 양이온의 총량을 지시하며, 개방된 환경에서 물질의 변화, 이동, 광물의 풍화에 관계된다. 장석반암의 입자별 양이온치환용량의 변화를 살펴보고자 1N-초산암모니움 침출법을 사용하여 분석을 실시하였다.

물질이 양이온을 교환할 수 있는 능력은 광물의 종류와 반응 환경에 의해 달라지는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 세립질의 모래 토양이 1.0 meq/100g 정도의 양이온치환용량을 가지는 것에 반해 실트처럼 입자 크기가 작은 토양은 10-30 meq/100g 범위로 입자의 크기가 작아질수록 증가한다. 광물별 양이온치환용량은 조암광물보다 점토광물이 커서 카올린은 3-15 meq/100g, 녹니석 2-10 meq/100g, 일라이트 25-40 meq/100g, 몬트모릴로나이트 60-100 meq/100g, 버미큐라이트 80-150 meq/100g 등으로 큰 비표면적을 가지는 점토광물일수록 교환되는 양이온이 증가한다(Donahue et al., 1977).

동일한 물질일 경우라도 수소이온농도(pH)가 증가할수록 치환되는 양이온의 총량은 급격하게 증가한다(Weil and Brady, 2016). 일반적으로 탄산염계 시멘트와 활성탄 등의 재료가 높은 양이온치환용량을 보이는 것은 강염기 상태에서 측정 결과를 제시하기 때문이다.

입경별 양이온치환용량은 pH 7의 조건에서 입자의 크기별로 분급된 다공질 장석반암의 이온치환용량을 측정한 것이다(표 2.14). 평균입경이 중립질 모래(1 ㎜)와 세립질 모래(140 ㎛) 크기에서 양이온치환용량은 각각 1.49과 2.28 meq/100g였고 입자의 크기가 감소할수록 양이온치환용량은 급격하게 증가하여 10 ㎛ 입경에서 양이온치환용량은 114.63 meq/100 g에 도달하였다. 세립질 모래 크기에서 양이온치환용량은 자연상태의 모래와 유사하거나 다소 높은 수준이었으나 평균 입경이 30 ㎛가 되면 자연상태의 실트에 비해 2배 이상 증가하였고, 점토 입자에 가까운 10 ㎛의 입경에서는 114.6 meq/100g으로 증가하였다. 입도가 줄어들수록 양이온치환용량이 증가하는 것은 일반적이나 다공질 장석에서의 양이온치환용량의 증가율은 자연상태의 입자보다 높게 측정되었다. 따라서 세립화될수록 장석의 다공질 구조의 반응력이 높게 기여하는 것으로 추정된다.

표 2.14 입경별 양이온치환용량의 변화

입경	양이온치환용량 (CEC)
980 ㎛	1.49 meq/100g
140 ㎛	2.28 meq/100g
28 ㎛	25.33 meq/100g
10 ㎛	114.63 meq/100g

표 2.15는 실대형 모형의 바닥 축열층과 미장 및 마감재에 사용된 주 재료원인 다공질 장석 및 클리놉틸로라이트 모르타르의 양이온치환용량을 나타낸 것이다.

표 2.15 시멘트 배합비에 따른 모르타르의 양이온치환용량

시료			양이온치환용량 (meq/100g)
구분	이름	배합비	
다공질 장석	Fe-A	장석:시멘트=9:1	114.63
	Fe-B	장석:시멘트=8:2	245.01
	Fe-C	장석:시멘트=7:3	318.48
	Fe-D	장석:시멘트=6:4	439.43
	Fe-E	장석:시멘트=5:5	493.87
클리놉틸로라이트	Ze-A	클리놉틸로라이트:시멘트=9:1	228.74
	Ze-B	클리놉틸로라이트:시멘트=8:2	338.37
	Ze-C	클리놉틸로라이트:시멘트=7:3	460.14
	Ze-D	클리놉틸로라이트:시멘트=6:4	611.56
	Ze-E	클리놉틸로라이트:시멘트=5:5	549.27

④ 입경별 압축강도

장석을 포함하여 무기질의 규산염 재료는 비표면적 변화에 따라 입자내의 물리적 특성이 변화된다. 건축용 소재는 강도 의존적이므로 장석 분말의 입도와 압축강도의 상관성을 파악하기 위해 다공질 장석을 이용하여 지름×높이가 5 ㎝×10 ㎝의 공시체를 제작하고 이를 건조 후 압축강도를 측정하였다(그림 2.28). 공시체는 결합력을 유지하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트를 체적대비 10 %를 혼합하여 제작하였다. 제작된 공시체는 수중에서 28일간 양생후 압축강도를 측정하였다. 그림 2.29에 제시된 압축강도는 3개 공시체의 평균값을 나타낸 것이다. 그림에서 입경이 작아질수록 압축강도는 증가하는 경향을 보이며, 50 ㎛에서 최대강도를 나타내며가 이후 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

공시체를 제작할 때 충분한 혼합과 교반을 거쳤으나 불균질 혼합이나 기포에 의한 강도 저감을 완전히 배제할 수 없었다. 그러나 실험의 결과에 따라 50 ㎛의 내외의 입경을 미분

말의 입도로 선정하였다.

이상의 실험 결과로부터 무기질 재료의 경량화와 반응면적의 크기는 재료의 입도에 따라 변화한다는 것을 확인할 수 있었으며, 재료의 단위중량 및 일축압축강도가 다공성 장석의 입도에 따라 조절된다는 것이 확인되었다.

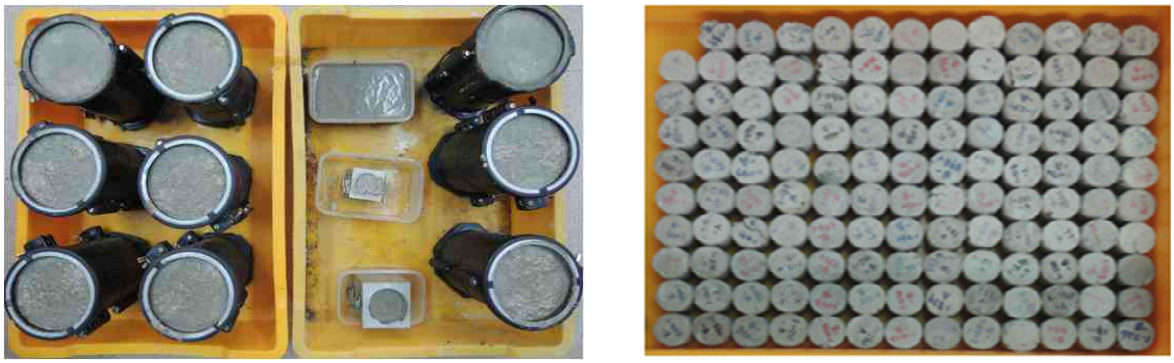
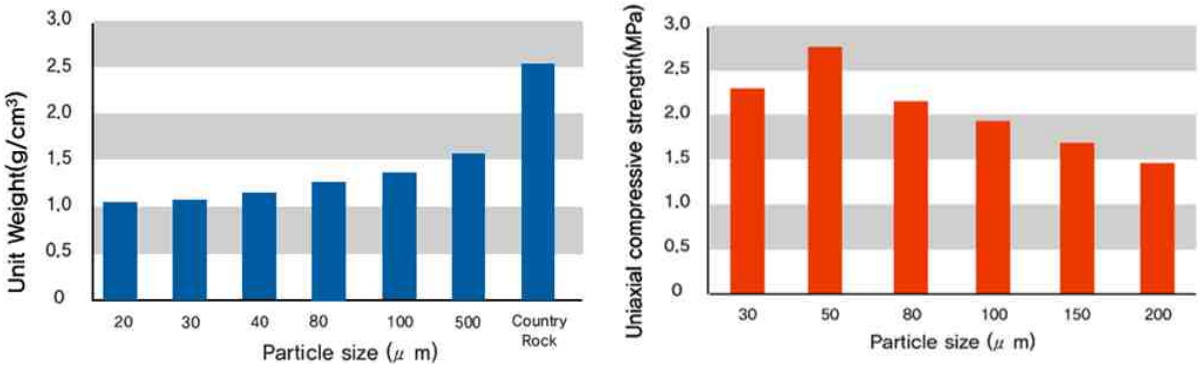


그림 2.28 다양한 입경별 공시체 제작



입경별 밀도 입경별 압축강도

그림 2.29 입경별 일축압축강도

(라) 경량기포 배합

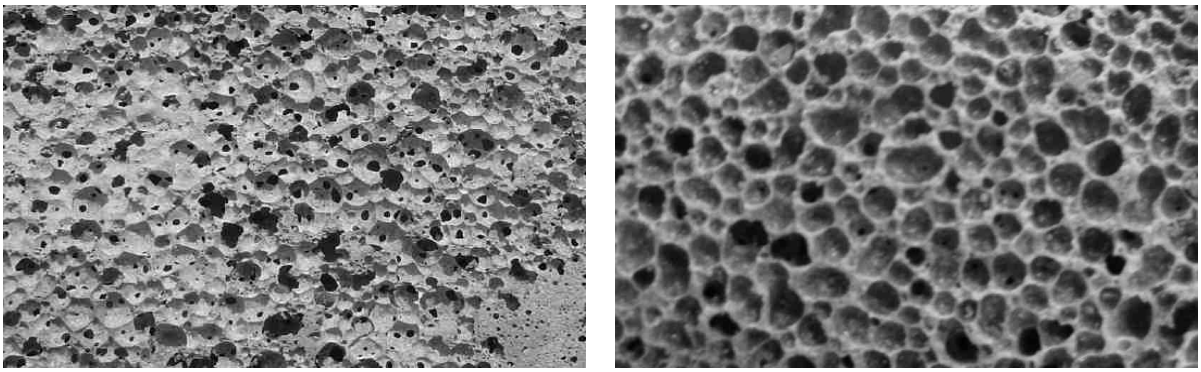
① 경량기포 혼합토

경량화는 경량기포를 혼합하여 재료의 밀도를 조절하는 것으로서 경량화 효과 외에 반응면적 증대로 인한 흡착, 단열, 흡입 성능 개선이 가능하다. 선행연구에서 경량기포를 이용한 경량화 기술은 주로 연약지반의 개량에 적용되고 있다. 지지력이 약한 지반에 구조물을 건설하는 경우 성토하중에 의해 지반의 침하가 발생된다. 만약 기존 구조물에 근접하여 이러한 성토가 이루어진다면 침하발생으로 인한 기존구조물에 큰 피해를 줄 것이다. 연약지반에서 성토로 인한 침하량을 최소화함으로써 축조된 기존 지반에 피해가 없도록 시공하는 방안이 경량성토공법이다(Satoh et al., 2001).

국내에서도 경량기포를 이용한 성토공법 중의 하나로 경량기포 혼합토가 사용되고 있다. 경량기포 혼합토는 경량에 따른 하중 경감, 유동성, 시공성 등의 장점을 가져서 일반 흙으

로는 시공이 곤란한 장소에 적합하다. 그러나 Yoon and You (2004)과 황중호 (2010) 등은 경량기포 혼합토가 초기 함수비 및 점토, 모래, 실트 등 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라 기포의 형성 정도가 다르게 되어 균질한 품질을 구현하기 어려운 단점을 제시했다. 따라서 이러한 경량기포 혼합토의 단점이 보완된 균질한 품질의 대체 경량기포 혼합토의 개발이 요구 되고 있다(Lee et al., 2012).

국내에서 사용되는 기포제는 식물성 기포제, 동물성 기포제, 고분자 기포제 등이 있다. 이번 연구에서는 동물성 기포제를 사용하였다. 동물성 기포제는 단백질계 기포제로서 동물의 혈액, 유제 성분인 카세인, 동물의 뼈, 뿔의 분말인 젤라틴 등이 단백질의 원료이다. 연구의 초기 단계에서 식물성 기포제와 동물성 기포제의 시편을 제작하고 실체 현미경으로 관찰한 결과 식물성 기포제에 비하여 동물성 기포제는 기포의 형태가 균질했으며, 각 기포들도 독립된 형태를 유지하고 있었다(그림 2.30). 따라서 규산염 분말과 혼합 시 동물성 기포제가 안정적인 형태를 유지하고 균질한 품질을 구현하는데 유리할 것으로 판단된다.



식물성 기포제　　동물성 기포제

그림 2.30 기포제의 종류에 따른 기포 형상

② 경량기포 제조장치

일정한 크기의 경량기포를 제조하기 위해서 공기 압축기와 기포제 유입펌프, 사출관으로 구성된 장치를 제작하였다(그림 2.31). 실험실 모형과 실대형 모형 제작을 위해 2대의 장치를 제작하였고, 실험실용은 5마력의 공기 압축기를 사용하였고 모형 제작을 위해서는 10마력의 압축기를 사용하였다. 실험실과 모형의 조건을 동일하게 되도록 압력계를 설치하고 동일 압력에서 기포가 생성되도록 하였다.



공기 압축기　　기포제 공급 펌프　　사출관

그림 2.31 경량기포 제조장치

공기압축기의 압력이 증가할수록 기포의 크기가 감소하며, 사출된 기포는 점성을 유지하고 있는 상태에서만 소포에 의한 변형을 방지할 수 있다. 반복 실험을 통해 공기 압축기와 기포제의 압력 조건은 150psi에서 최적의 조건임을 알 수 있었다. 기포는 상온에서 30분 이상 유지되었다. 모르타르 제조 시 경량기포는 재료 배합의 최종단계에서 수행하였다. 그림 2.32와 같이 모르타르 재료를 건조 상태에서 배합한 후 물배합비에 따라 물을 첨가하고 교반 후 경량기포를 혼합하여 공시체, 블록, 패널을 제작하였다. 기포의 첨가량은 목표로 하는 밀도에 따라 적정량을 배합하게 된다. 기포와 재료원의 혼합액의 교반 시간은 대상 재료가 충분히 혼합될 때까지 인데, 기포가 파괴되지 않도록 한다. 일반적으로 교반 시간은 고속회전 교반기의 경우 1분 이내로 하고, 저속의 경우 5-10분간으로 한다. 마지막으로 교반된 액체상태의 혼합물을 준비된 틀에 넣고 건조하면 된다.



그림 2.32 경량기포 배합 순서

건축용 소재로 활용되는 재료는 대부분 밀도가 크고 무거운 단점이 있다. 내력 기둥이나 하중에 대한 영향이 없는 내장재는 재료의 경량화를 통해 기능성을 강조할 수 있다. 그림 2.33과 표 2.16은 경량기포 체적비에 따른 밀도의 변화를 나타내고 있다.

표 2.16 경량기포 배합 비율에 따른 밀도 변화

기포 비율	A	B	C	D	E	F
	0%	15%	30%	45%	60%	85%
AF9 C1	2.71	2.26	1.81	1.36	0.95	0.40
AF8 C2	2.75	2.30	1.93	1.45	1.00	0.45
AF7 C3	2.76	2.37	1.92	1.47	1.02	0.50
AF6 C4	2.80	2.35	1.96	1.55	1.06	0.59
AF5 C5	2.85	2.48	2.03	1.58	1.13	0.65

경량기포를 넣지 않고 장석과 시멘트만을 사용한 경우의 평균 밀도는 2.77 g/cm^3 이다. 이후 점차 경량기포의 양이 증가하면서 밀도의 변화가 발생하고, 최종적으로 경량기포를 85% 혼합 시 공시체의 평균 밀도는 0.5 g/cm^3 으로 감소하였다. 경량기포 첨가에 따른 표면구조의 변화는 전자현미경(SEM) 관찰에서 잘 나타나는데 기포의 혼합량이 증가할수록 표면의 공극이 증가하고 단면적의 범위가 감소한다(그림 2.34). 이는 밀도와 직접적인 상관관계가 있고 공극이 많을수록 밀도는 낮아진다는 것을 확인할 수 있다.

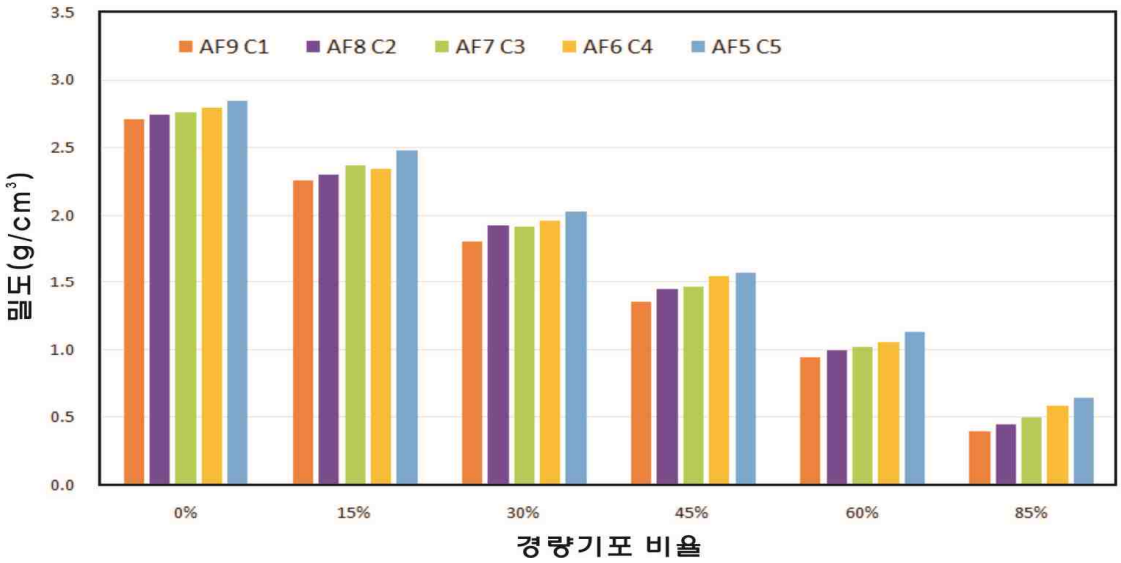
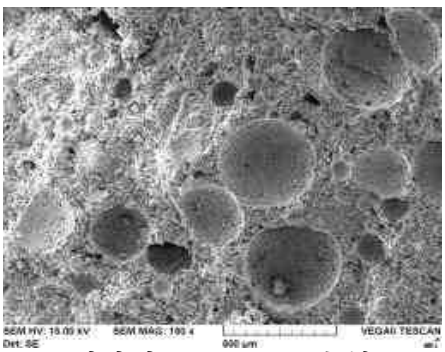
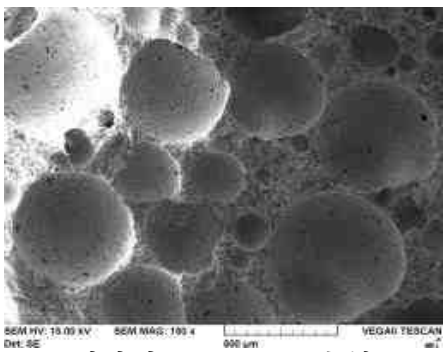


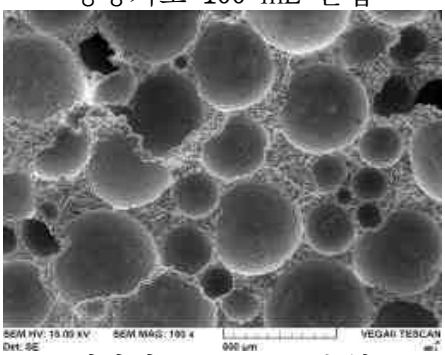
그림 2.33 경량기포 배합 비율에 따른 밀도 변화



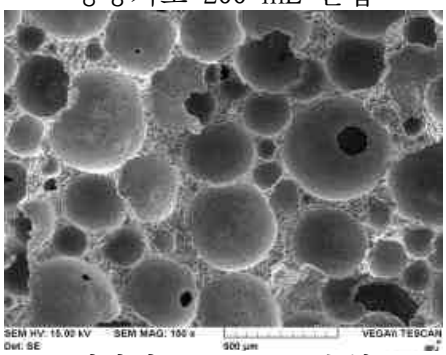
경량기포 100 mL 혼합



경량기포 200 mL 혼합



경량기포 300 mL 혼합



경량기포 400 mL 혼합

그림 2.34 기포양에 따른 기포 형태

③ 수축 및 팽창

기포제의 점도가 너무 묽은 경우나 양생과정의 환경조건에 따라 공시체의 변형이 발생한다. 그림 2.35의 좌측 그림은 기포의 점도가 충분하지 못한 경우 양생 초기에 소포로 인해 변형이 발생한 사례로 입자가 고형화되기 전에 소포로 인해 입자의 분리 현상이 발생하여 공시체의 형태를 유지하지 못한 경우에 해당한다. 이와는 달리 양생 시 온도 조건에 따라 수축현상과 기포의 팽창이 발생한다(그림. 2.36, 그림 2.37). 경량기포를 혼합한 경우 양생의 최적조건은 온도 25℃, 습도 80% 정도이며, 단위중량은 3.5 N/㎥이다. 점도가 낮은 경우나 대상물의 밀도가 가벼운 경우 경화의 속도를 단축할 필요가 있고 이 경우 적당량의 속성경화제와 고화제를 첨가하면 변형을 방지 할 수 있다. 그림 2.35의 우측그림은 A와 동일 조건에서 0.3%의 수용성 고화제를 첨가하여 제작한 공시체로 시편은 원통형의 공시체의 형태를 그대로 유지하고 있고 입자의 분리현상이 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 즉 수용성 고화제가 전술한 바와 같이 입자의 결합력을 증가시키고 내구성 증가에 기여하는 것을 알 수 있다.



고화제 미첨가 0.3% 고화제 첨가

그림 2.35 기포제의 종류에 따른 기포 형상

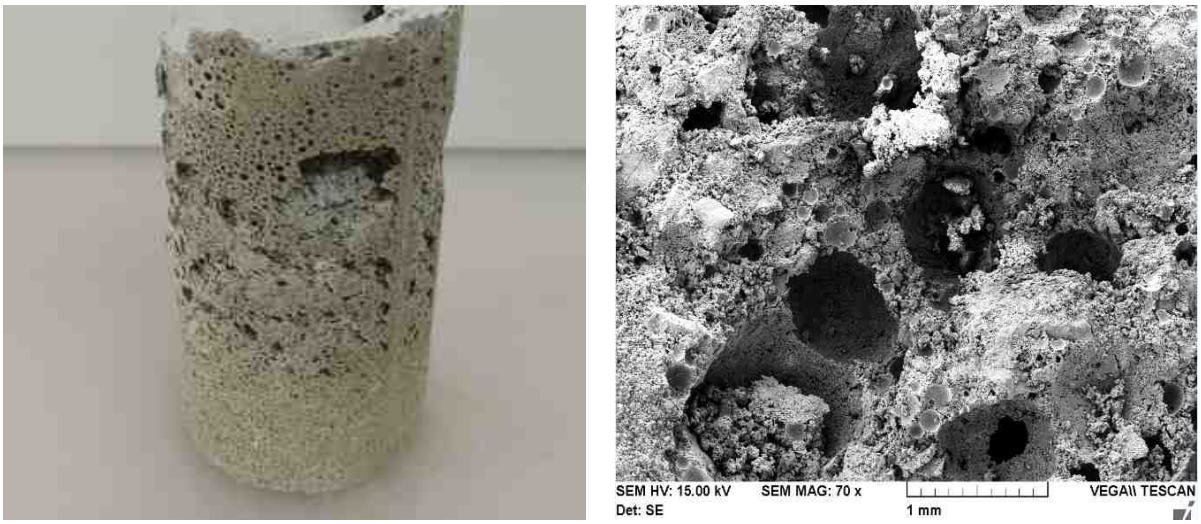
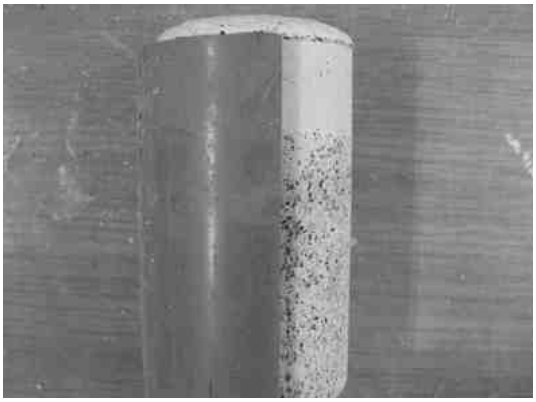


그림 2.36 기포의 소포현상



기포의 팽창 현상



기포의 수축 현상

그림 2.37 경량기포의 팽창과 수축

④ 압축강도의 변화

장석, 시멘트, 경량기포의 배합 조건에 따른 경량기포 혼합토의 응력-변형 특성을 조사하기 위하여 일축압축강도 시험을 수행하였다. 일축압축강도 시험은 측압이 없는 상태에서 상하로 축하중을 주어 시료를 간접 전단파괴 시키는 방법으로 비배수 삼축압축 시험에서 구속압력이 0인 경우의 시험에 해당한다. 시험 방법은 KS F 2314에 따라 한국해양대학교와 대구대학교의 일축압축시험기를 사용하였다(그림 2.38).

압축시험을 위한 공시체는 내경 5 ㎝, 높이 10 ㎝ 몰드를 이용하여 제작하였다. 장석:시멘트의 비율은 50:50으로 하였으며, 경량기포 혼합량을 100 ㎖ - 500 ㎖로 변화시켜가며 압축강도를 측정하였다. 표 2.17과 그림 2.39-2.41은 장석 50%, 시멘트 50%를 사용한 시료의 일축압축강도 시험결과를 나타내고 있다. 100 ㎖의 경량기포를 사용하였을 때는 평균 밀도 1.44 g/cm3, 7.18 MPa의 일축압축강도 값을 나타내며, 경량기포 혼합량이 증가함에 따라 밀도와 일축압축강도 값이 감소하는 경향을 나타낸다. 500 ㎖의 경량기포를 사용하였을 때는 평균 밀도 0.6 g/cm3, 0.6 MPa의 일축압축강도 값을 나타낸다. 이러한 결과는 일축압축강도 성능을 자유롭게 조절할 수 있다는 것을 보여주고 있으며, 현장의 조건에 따라 최적화시킬 수 있다.



일축압축시험기(한국해양대학교)

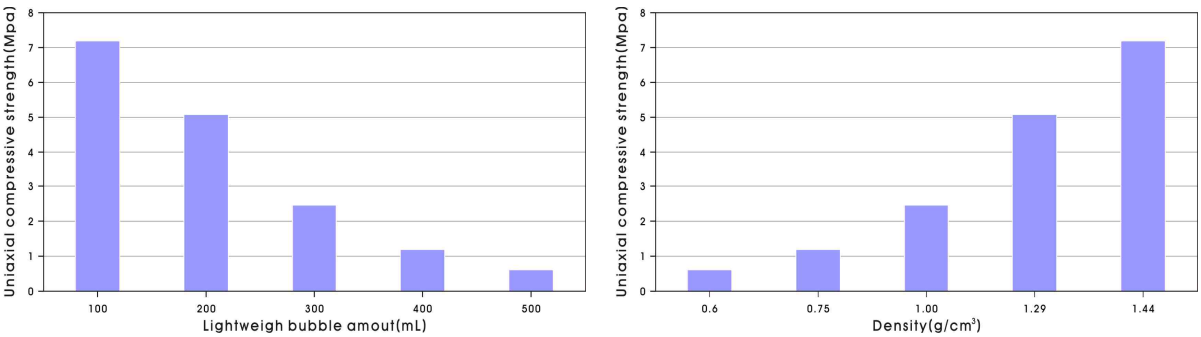


일축압축시험기(대구대학교)

그림 2.38 사용된 일축압축분석 시험장비

표 2.17 경량기포비율에 따른 일축압축강도의 변화

시료명	A-4	B-4	C-4	D-4	E-4
밀도 (g/cm^3)	1.44	1.29	1.00	0.75	0.60
다공질 장석 (%)	50				
보통 포틀랜드 시멘트(%)	50				
고화제 (g)	0.6				
경량기포 (mL)	100	200	300	400	500
일축압축강도 (MPa)	7.18	5.06	2.45	1.17	0.60



기포량과 밀도 밀도와 일축압축강도

그림 2.39 경량기포의 양에 따른 밀도와 일축압축강도의 관계

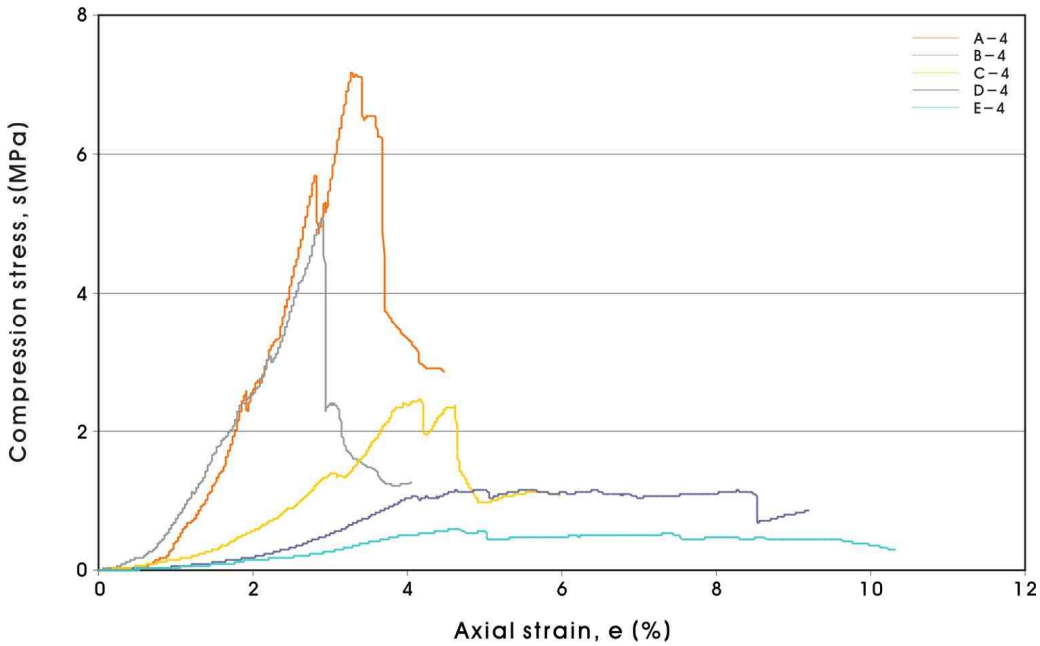
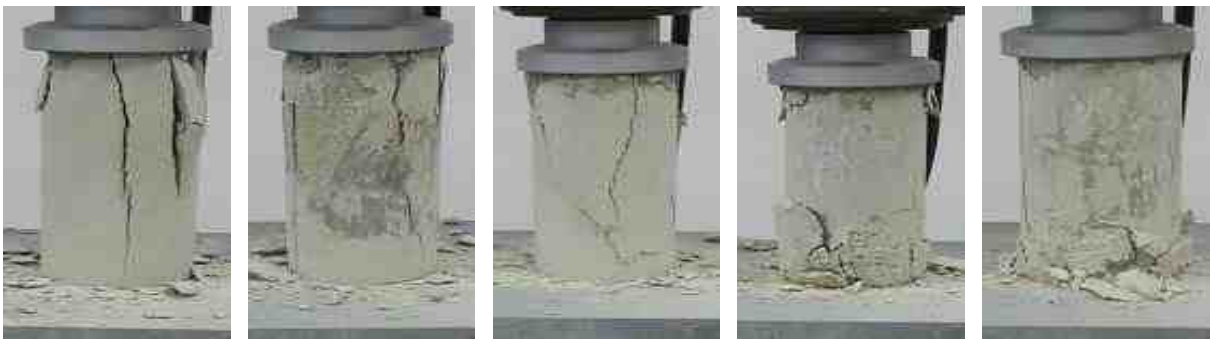


그림 2.40 활성장석 50%와 시멘트 50% 공시체의 일축압축강도 변형율



A-4 B-4 C-4 D-4 E-4

그림 2.41 기포량에 따른 공시체의 일축압축강도 시험 사진

⑤ 투수성

투수실험은 경량기포 배합조건에 따른 함수능과 투수와 불투수의 수리적 상관관계를 분석하고, 건축내장재의 마감재 사용 시 습도 조절과 함수에 따른 변형유무를 확인하기 위해 수행되었다. 실험에 사용한 공시체에서는 경량기포의 혼합량을 100 ㎖ 간격으로 조절하였다. 실험을 위해 정수압 실험 장치를 제작하여 투수계수를 측정하였으며 이때 시료와 공시체 케이스의 벽면에 유체가 침투하는 현상을 방지하고자 측면 틈새를 파라핀으로 밀봉하여 실험을 수행하였다(그림 2.42).



투수실험장치 투수실험용 공시체의 파라핀 마감

그림 2.42 경량기포혼입시료의 투수실험

경량기포 공시체의 투수계수 실험결과를 보면 300 ㎖의 경량기포를 사용하였을 때는 평균 1×10^{-7} cm/sec의 투수계수 값을 나타내며 이는 실트질 점토층의 투수계수에 해당된다. 기포량이 400 ㎖에서 500 ㎖에서는 평균 1×10^{-4} cm/sec로 높아지는데 이는 투수성이 좋은 모래 지반에 해당한다. 또한, 경량기포의 혼합량을 800 ㎖-900 ㎖으로 증가시킬 경우 1×10^{-3} cm/sec까지 높아진다(표 2.18).

표 2.18 경량기포양에 따른 수리전도도

	경량기포량 (mL)	투수계수 (cm/sec)
A	100	4.71E-09
B	300	2.26E-07
C	400	2.72E-04
D	800	3.12E-03
a	-	1.02E-09
b	-	1.08E-09
c	-	1.33E-09
d	-	1.01E-09

그림 2.43은 표 2.18의 대푯값과 일반적인 시멘트 콘크리트의 투수계수를 비교하여 나타낸 것이다. X축의 A-D는 경량기포를 사용한 공시체이고, a- d는 일반적인 시멘트를 사용한 공시체이다. a- d의 투수계수는 1×10^{-8} cm/sec 이하로 불투수층을 이루고 있다는 것을 알 수 있다. 경량기포를 사용한 공시체의 경량기포 혼합량의 경우 A는 100 ㎖, B는 300 ㎖, C는 400 ㎖, D는 800 ㎖ 인데 경량기포의 체적 증가에 따라 비례하여 투수계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 투수계수의 성능을 자유롭게 조절할 수 있다는 것을 보여주고 있는데, 현장의 조건에 따라 최적화시킬 수 있다.

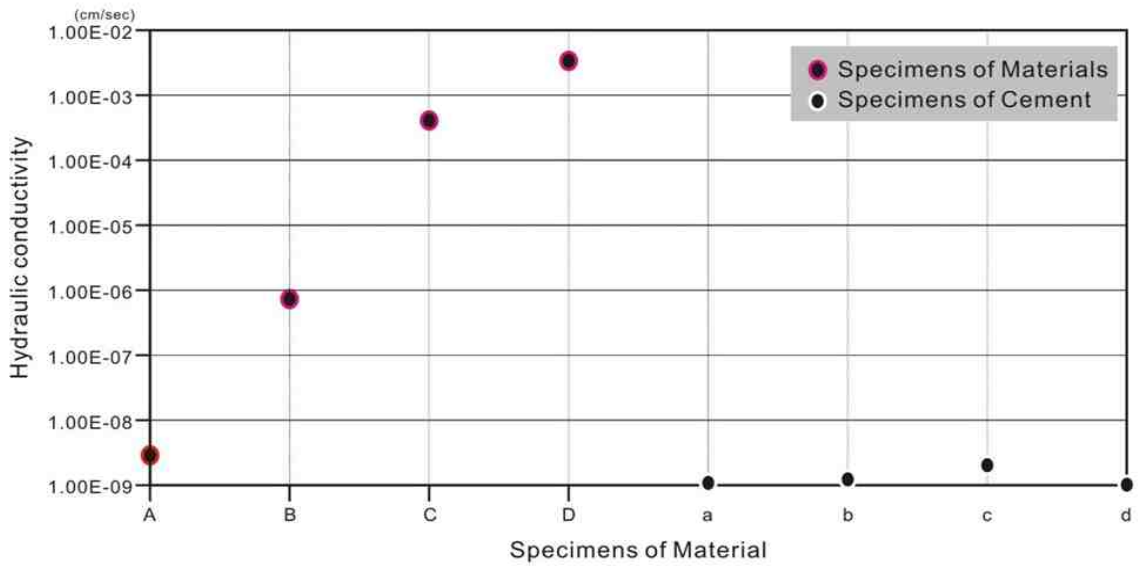


그림 2.43 경량기포공시체의 수리전도도

(2) 고화

(가) 고화제

① 고화제 특성

고화제는 일반적으로 화학적 결합반응을 통해서 재료의 결합력을 향상시키는 것으로서 본 연구에서는 무기질 고화제 첨가를 통하여 강도증진 효과와 최적 첨가량을 결정하였다. 고화제는 광물의 시멘팅 이론을 바탕으로 한 경화물질과 경화물질의 결합력을 높이기 위해 첨가되는 물질로 구성된다. 이러한 첨가 물질은 시멘트 등의 결합재와 혼합 시 부식산(Humic Acid)의 작용을 약화시키고 입자간의 반발력을 제거하고 및 양이온을 공급해서 부착력을 증대시킨다(그림 2.44).

일반적으로 많이 사용하는 고화제는 유기질토, 고함수토 등 연약지반 안정용으로 이용되는 것과 대기오염 및 수질오염에 의한 산업폐기물의 안정화 등의 용도로 사용되는 것이다. 국내에서 흔히 사용되는 고화제는 포졸란 물질, 시멘트, 무수석고, 칼슘설포네이트계 화합물(calcium sulfur aluminate: CSA) 등을 혼합하여 시멘트의 사용량을 줄이면서 강도증진과 팽창저감 효과를 발휘할 수 있도록 개발된 제품이 일반적이다. 현재 개발되어 사용되는 고화제의 형태는 분말형과 액상형으로 구분된다. 분말형은 비산이 발생하는 작업환경을 고려한 발진 억제형 고화제, 유동화처리공법에 사용되는 속경성고화제, 입상화 처리를 위한 고화제, 고화제의 성능향상을 고려한 초지경성 고화제와 초고유기질토용 고화제, 산업폐기물을 이용한 고화제 등이 있다. 현장에서 물과 희석시켜 수용액 상태로 분사 혼합하는 방식의 액상형 고화제가 있다(그림 2.45). 액상형 고화제는 수용액 상태로 혼합되기 때문에 혼합과정에서 함수비의 조절이 가능한 장점이 있다(강연구, 2015).

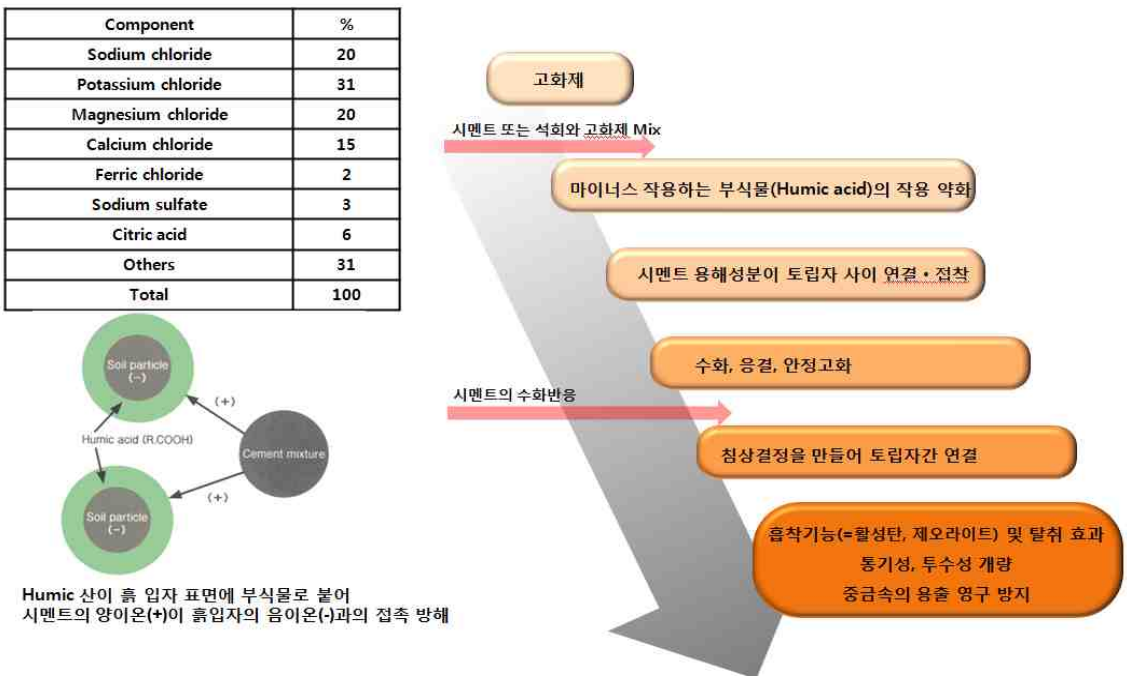


그림 2.44 고화제의 원리



그림 2.45 고화제 분말(좌)과 고화제 수용액(우)

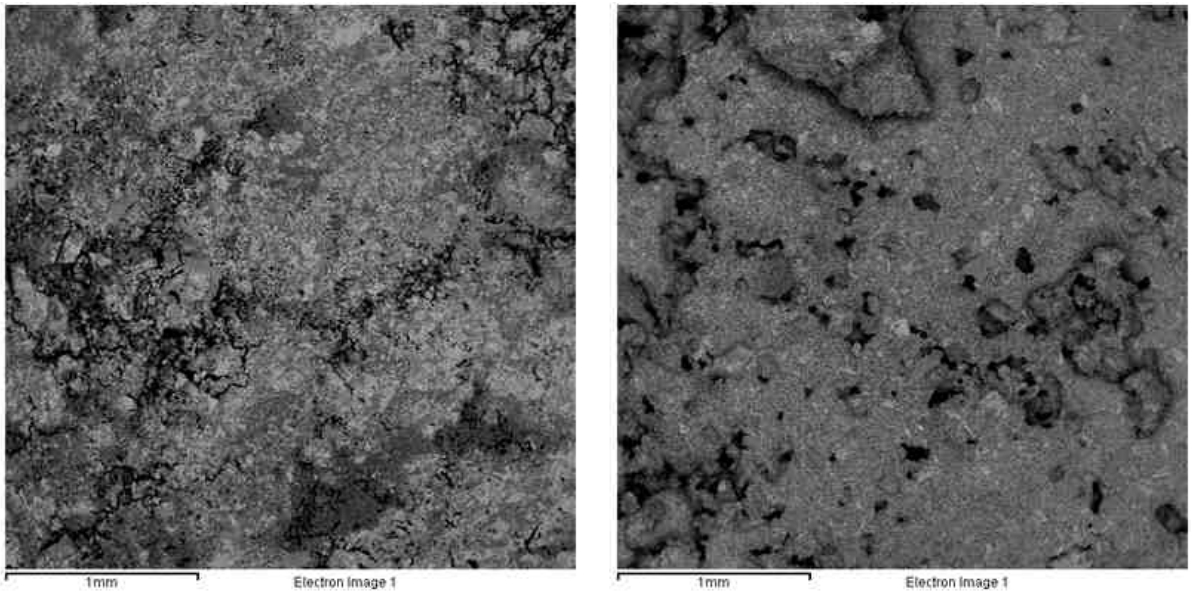
본 연구에 사용한 고화제는 무기질과 금속염류, 구연산 등의 화합물로 제조되었고 토양과 수환경에 위해성이 높은 중금속과 독성원소를 포함하고 있지 않은 친환경적인 재료로 구성되었다(표 2.19, 표 2.20). 그림 2.46은 고화제의 전자현미경 영상을 나타낸 것이다. 그림 2.47와 그림 2.48은 각각의 고화제의 X-선 회절분석 영상이다.

표 2.19 고화제의 화학조성(XRF)

	고화제 ① Weight %	고화제 ② Weight %
Na^{+}	1.5253	8.6106
Mg^{2+}	0.4238	2.6284
K^{+}	6.5789	34.4202
Ca^{2+}	0.9728	4.7458
Fe^{2+}	0.0000	0.5185

표 2.20 고화제의 화학조성(SEM-EDS)

	고화제 ①		고화제 ②	
	Weight %	Atomic %	Weight %	Atomic %
Na^{+}	6.85	10.29	8.04	12.01
Mg^{2+}	3.88	5.51	4.26	6.02
Cl^{-}	60.19	58.68	60.22	58.36
K^{+}	20.16	17.82	16.50	14.50
Ca^{2+}	8.93	7.70	9.71	8.33
Fe^{2+}	-	-	1.27	0.78
Sum	100.0	100.0	100.0	100.0



고화제 ①　　고화제 ②

그림 2.46 고화제의 SEM영상

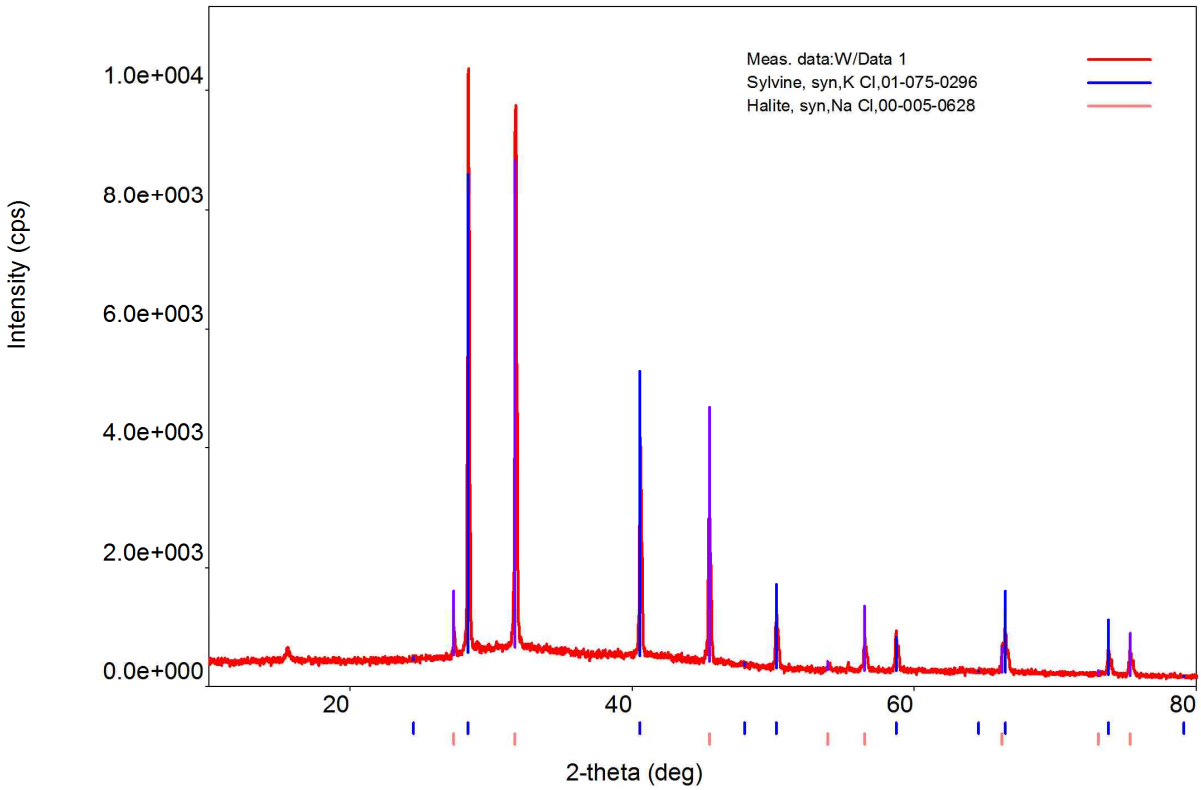


그림 2.47 고화제 ①의 X-선회절분석 결과

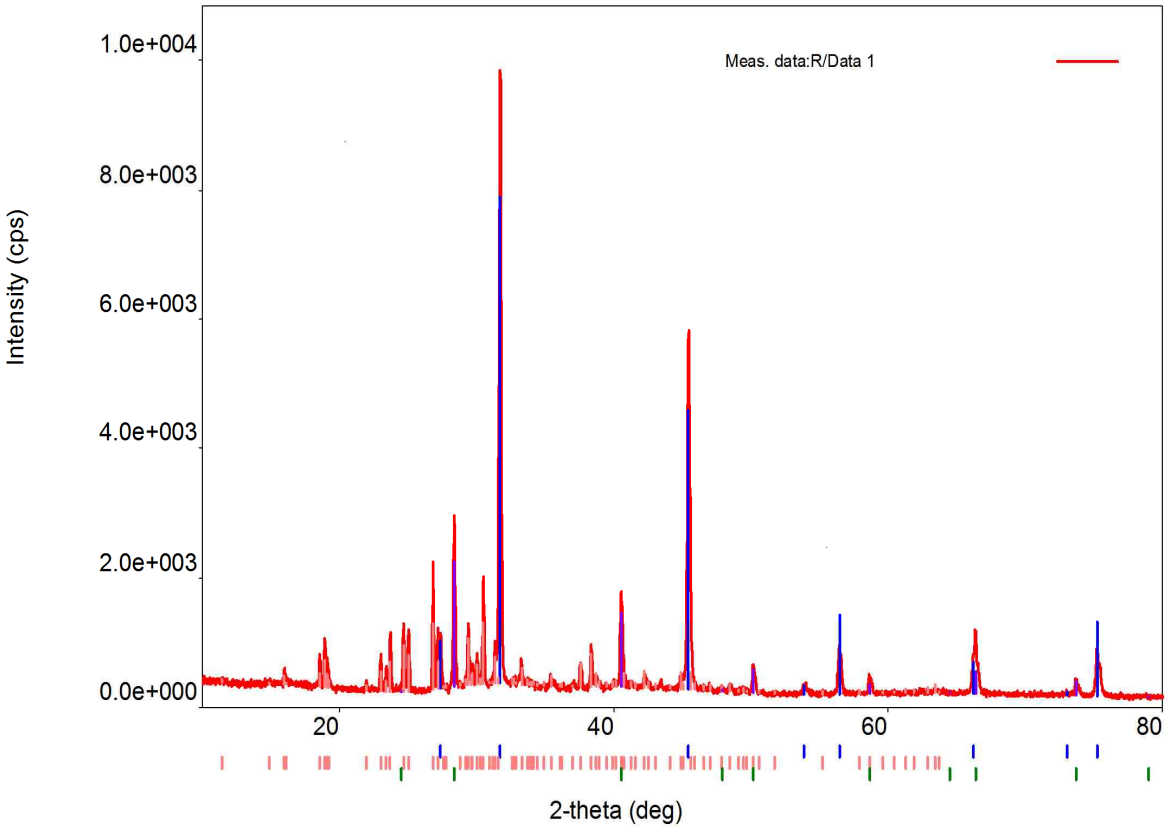


그림 2.48 고화제 ②의 X-선회절분석 결과

② 일축압축강도 및 표면조직의 변화

규산염 결합재(장석 분말)와 수용성 고화제의 강도 특성을 파악하기 위한 공시체는 지름 3.5 ㎝, 높이 4.1 ㎝의 원통형으로 제작하였다. 사용한 탄산염계 시멘트는 KS L 5201 규정에 적합한 S사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 규산염 결합재로 이용한 장석은 시멘트 중량의 70%에 해당하는 무게만큼 혼합하였고, 입자의 평균입경은 80 ㎛로 하였다. 수용성 고화제는 공시체 전체 중량의 0.5%에 해당하는 분말형 무기질 고화제를 용해하여 혼합하였다. 표 2.21은 공시체의 특성을 정리한 것으로 규산염 결합재를 첨가한 시편의 무게가 9% 감소하였다.

표 2.21 공시체 규격

	중량비(%)			개수	Diameter (mm)	Length (mm)	Volume (cm^3)	Ave. weight (g)
	시멘트	다공질 장석	고화제					
A	100.0	-	-	4	35	41	39.4	63.2
B	100.0	-	0.5	4	35	41	39.4	63.1
C	30.0	70.0	0.5	4	35	41	39.4	57.6

보통 포틀랜드 시멘트와 장석 분말, 고화제를 첨가하여 제작한 공시체의 일축압축강도를 측정하였다. 보통 포틀랜드 시멘트로 제작된 공시체의 압축강도는 12.2～14.7 MPa의 범위를 보였고, 중량비 0.5%의 고화제를 첨가한 공시체에서는 15.4～19.1 MPa 범위의 압축강도가 측정되었다. 그 결과 고화제를 첨가한 시편의 압축강도는 보통 포틀랜드 시멘트에 비해서 33% 정도 강도가 증가하였다. 보통 포틀랜드 시멘트의 중량 중 70%를 장석분말로 대체한 시편의 압축강도는 15.4～18.2 MPa의 범위를 보였고 평균 압축강도는 보통 포틀랜드 시멘트에 비해 28% 증가하였다(표 2.22).

규산염 결합재와 수용성 고화제를 이용한 실험 결과는 수용성 고화제가 결합공시체의 강도 증가에 큰 효과가 있음을 보인다. 또한, 규산염 분말을 결합재로 첨가한 시편의 압축강도가 시멘트에 비해 증가한 것을 볼 때 활성도가 높은 장석이 결합재의 역할을 하는 것으로 판단된다.

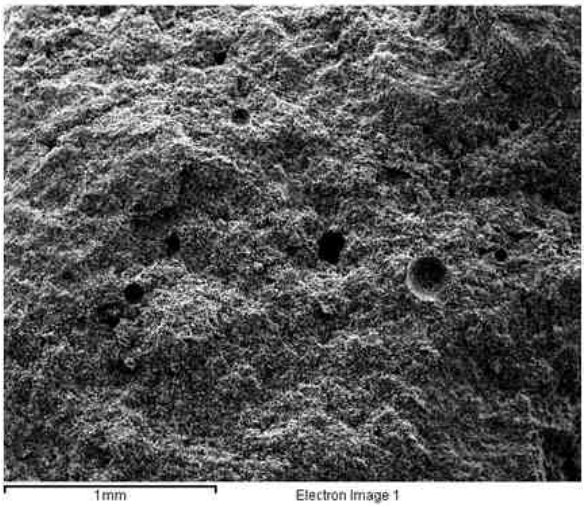
표 2.22 공시체의 일축압축강도

구분	일축압축강도(MPa)			
	①	②	③	평균
A	13.3	12.2	14.7	13.4
B	19.1	15.4	18.8	17.8
C	18.2	15.4	17.9	17.2

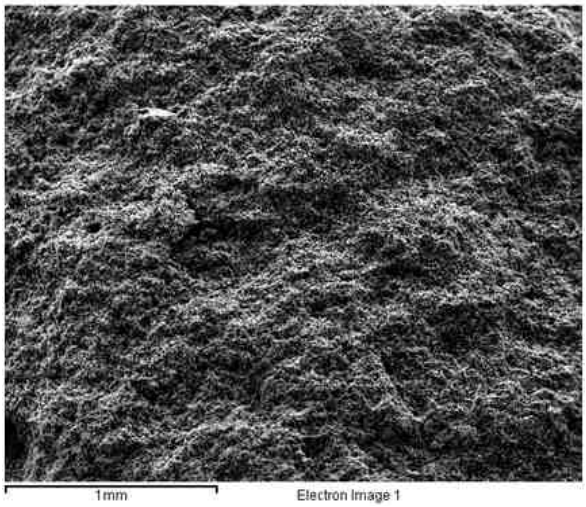
일축압축강도 시험에 사용된 공시체의 표면조직과 화학조성을 주사전자현미경(SEM-EDS)으로 분석하였다(그림 2.49).

보통 포틀랜드 시멘트 시편(그림 2.49의 a)에 비해 고화제를 첨가한 시편(그림 2.49의 b)과 장석 분말을 첨가한 시편(그림 2.49의 c)에서는 입자 사이의 조직이 치밀해진 것을 볼 수 있다. 일축압축강도가 낮게 측정된 공시체(표 2.22의 ②)는 혼합과정에서 발생한 구형의 기포가 포함되어 다른 시편들에 비해 낮은 강도를 나타낸다(그림 2.49의 d). 결합재와 고화제의 비교 평가를 위해서는 충분한 수량의 공시체 제작과 기포발생을 줄이기 위한 충분한 교반이 필요할 것으로 판단된다.

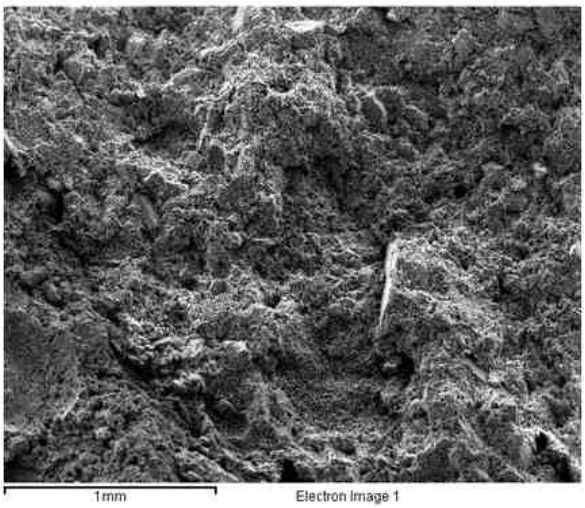
표 2.23은 보통 포들랜드 시멘트와 고화제 및 규산염 분말을 첨가한 공시체의 SEM-EDS 화학조성을 나타낸 것으로 고화제가 첨가된 시편(B, C)은 고화제 성분 중 Na와 Cl가 검출되고 있다. 고화제를 중량 대비 0.5%로 일정하게 적용하였고 효과적인 배합을 위해 분산이 용이한 수용성 재료를 물에 희석하여 사용하였으나 분석 결과에서 다소의 차이를 보이고 있다. 고화제를 이용한 연약지반 개량이나 토양 안정제 이용 시 일정한 지반강도를 유지하기 위해서 주의가 요구된다. 공시체 C의 경우 탄산염의 주요 원소인 Ca의 함량이 44% 정도인데, 보통 포틀랜드 시멘트로 구성된 A와 B 시편의 74%에 비해 낮은 수치를 보인다. 반면 Al과 Si는 각각 7%와 30% 정도로 탄산염의 시멘트에 비해 2～3배 높은 함량이 나타난다. 이러한 물질은 대표적인 포졸란 물질로서 탄산염계 시멘트에서 기원된 $Ca(OH)_2$와 반응하여 결합능력 증가에 기여한 것으로 판단된다. 그러므로 규산염의 포졸란 반응에 대한 지속적인 연구가 요구된다.



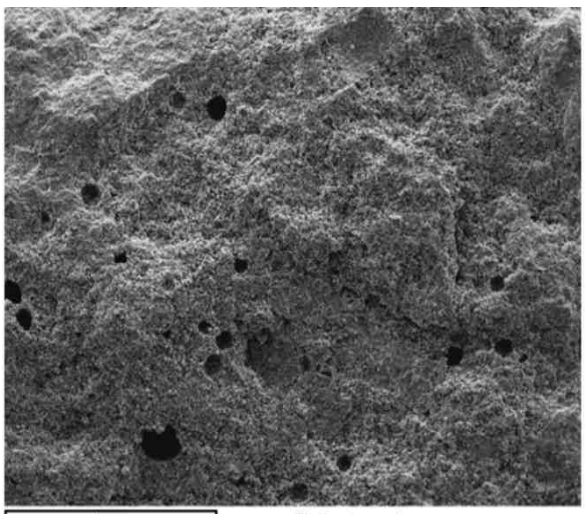
(a) 보통 포틀랜드 시멘트 공시체



(b) 고화제가 첨가된 공시체



(c) 장석분말과 고화제가 첨가된 공시체



(d) 경량기포가 포함된 공시체

그림 2.49 공시체의 SEM 이미지

표 2.23 공시체의 SEM-EDS에 의한 화학조성

	함량비(%)									
	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Total
A	-	1.94	2.94	13.28	3.47	-	1.16	73.77	2.55	100.0
B	0.82	1.72	3.12	11.16	2.73	0.89	3.15	73.63	2.80	100.0
C	1.60	3.14	7.24	29.55	2.49	1.33	4.69	43.89	6.06	100.0

(3) 소결

본 단원에서는 구조물의 건설재료의 대부분을 차지하는 시멘트를 대체할 수 있는 기능성 산업광물에 대해서 다루었다. 이 대체물질은 환경 위해물질을 흡착하고, 단열과 축열기능을 가진 친환경적인 재료이다. 또한 이 단원에서는 이를 사용하기 위해 필요한 2차 처리기술도 다루었다. 산업광물의 2차적인 처리는 암석 내의 공극 비율을 증가시키고 이를 통해 반응력을 높이는 방향의 연구로 진행하였다. 먼저 반응력을 증가시키기 위해 재료를 경량화 하였는데, 이러한 목적으로 풍화가 진행되어 미세 공극의 발달이 우수한 재료원을 선정하였고, 기능적인 강열감량(소성), 분체 및 경량기포를 배합하는 기술을 적용하여 반응력을 증대시켰다. 이때 비용경제적인 측면을 함께 고려하여 처리기술이 최적 조건을 도출하였다. 다른 한편으로는 재료원의 경량화로 인해 발생하는 강도저감을 개선하기 위하여 고화재 기술을 적용하였고 이를 통해 최적의 배합비를 도출하였으며 이를 실대형 모형에 적용하여 단열, 축열, 흡착, 흡음 등의 기능을 평가할 수 있는 기반을 마련하였다.

다. 강도특성

바닥 축열 모르타르, 경량 벽체, 천장마감재의 성능평가를 위하여 다음과 같이 공시체를 제작하여 시험을 수행하였다.

일축압축강도 공시체는 직경(D) 5㎝에 높이(H) 10㎝ 크기의 원통형 공시체로 제작하였으며(그림 2.50) 휨인장강도 공시체는 KS L ISO 679 (2006)에 규정된 40×40×160㎜ 크기의 공시체로 제작하였다(그림 2.51). 직접인장 공시체는 직접인장 시험용으로 설계된 공시체를 사용하여 시험을 수행하였는데 그 형상은 그림 2.52와 같다. 제작된 공시체는 타설 종료 후 24시간 동안 기건 양생 후에 탈형과정을 거쳐 20±3℃의 수조에서 수중 양생한 후 재령에 따른 압축강도, 휨인장강도 및 직접인장강도 평가를 실시하였다. 압축강도 및 휨인장강도 측정시험은 200 ton 용량의 만능재료시험기(UTM)로 진행하였으며(그림 2.53) 직접인장강도 측정시험은 그림 2.52의 우측그림과 같이 25 ton 용량의 만능재료시험기(UTM)로 진행하였다.

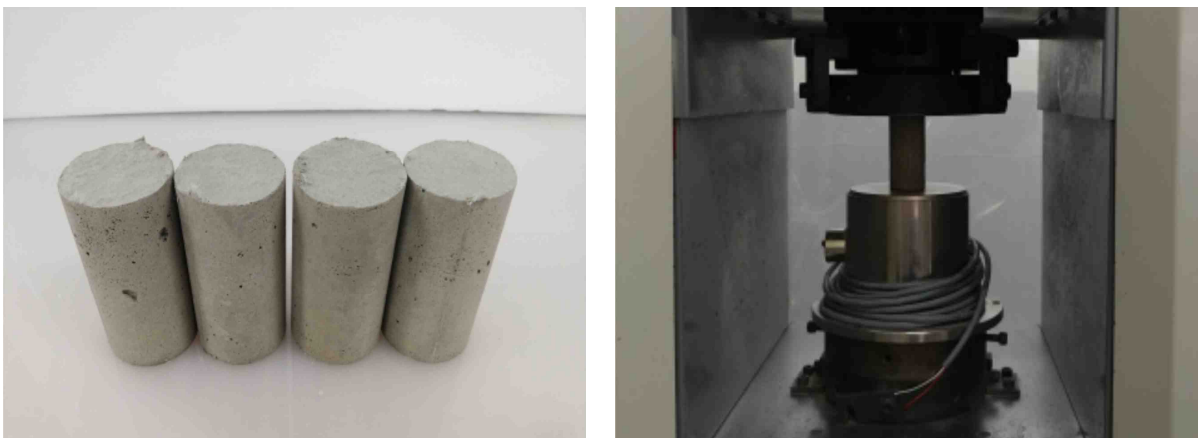


그림 2.50 일축압축강도 공시체(좌)와 일축압축강도시험(우)



그림 2.51 휨인장강도 공시체(좌)와 휨인장강도 시험



그림 2.52 직접인장강도 공시체(좌)와 직접인장강도 시험



그림 2.53 만능재료시험기(좌: 일축압축강도, 우: 직접인장강도)

(1) 압축강도

(가) 바닥 축열 모르타르 압축강도

실대형모형 시험동에 사용될 바닥 축열 모르타르를 15MPa 이상으로 제작하기 위하여 다공질 장석, 보통 포틀랜드 시멘트, 배합수의 혼입량을 변수로 재령 28일 압축강도 시험을 수행하였다.

바닥 축열 모르타르 압축강도 시험결과는 1차 배합의 경우 다공질 장석 44㎛ 40%, 다공질 장석 1㎜ 40%, 시멘트 20%를 사용하였으며 압축강도는 16.1MPa로 나타났다. 2차 배합의 경우 1차 배합과 비교하여 다공질 장석 44㎛ 혼입량을 10% 증가하고 다공질 장석 1㎜ 혼입량을 10% 감소시켜 사용하였으며 압축강도는 17.9MPa로 1차 배합에 비해 약 11.1% 증가하였다. 3차 배합의 경우 1차 배합과 비교하여 다공질 장석 44㎛ 혼입량을 22.5% 감소, 다공질 장석 1㎜ 혼입량을 35% 증가, 시멘트 혼입량을 12.5% 감소하여 사용하였으며 압축강도는 20.3MPa로 1차 배합에 비해 약 26.1% 증가하였다. 1차, 2차, 3차로 진행될수록 압축강도가 증가하는 것을 통해서 다공질 장석의 입경에 따른 강도변화를 확인할 수 있었다(그림 2.54, 표 2.24).

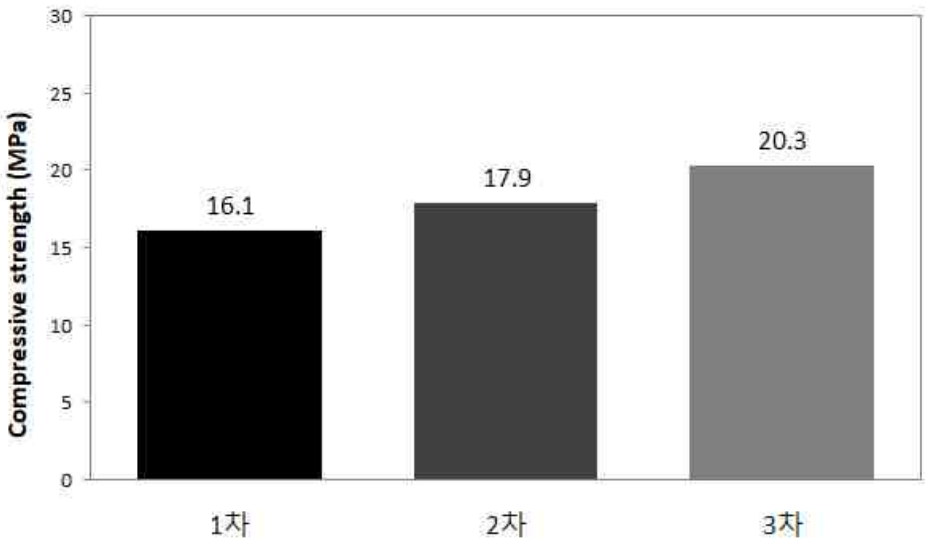


그림 2.54 바닥 축열 모르타르 일축압축강도

표 2.24 바닥 축열 모르타르 배합율에 따른 압축강도 변화

구 분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 1㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/B (%)	압축강도 (MPa)
1차	40	40	20	0.05	40	16.1
2차	50	30	20	0.05	30	17.9
3차	17.5	75	7.5	0.05	20	20.3

(나) 경량 벽체

① 경량 벽체 밀도에 따른 압축강도

실대형모형 시험동에 사용될 벽체의 공시체를 물시멘트비(W/C) 100%를 기준으로 제작하였으며 배합비 도출을 위하여 공시체 밀도에 따른 28일 재령 압축강도 시험을 수행하였다. 공시체 제작 밀도는 1.5, 1.2, 1.0의 변수로 설정하였고 일축압축강도 결과는 그림 2.55와 표 2.25와 같다.

공시체 밀도에 따른 압축강도 시험결과는 공시체 밀도 1.0의 C 배합까지 경량 벽체 블록 목표압축강도 2MPa 이상으로 측정되었다. 밀도 1.0의 C 배합이 가장 낮은 4.6MPa, 밀도 1.5의 A 배합이 가장 높은 20MPa 결과를 나타내었다. 재령 28일 압축강도의 결과 A 배합 압축강도에 비해 B 배합은 밀도 0.3 감소로 압축강도가 67% 감소하였고 C 배합은 밀도 0.5 감소로 압축강도가 77% 감소하였다. 밀도 저하에 따른 강도감소는 저밀도 공시체 제작을 위한 경량기포 혼입량이 증가함에 따라 공시체 내부의 공극이 증가하여 강도에 직접적인 영향을 주는 시멘트 입자 간 거리가 멀어져 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다.

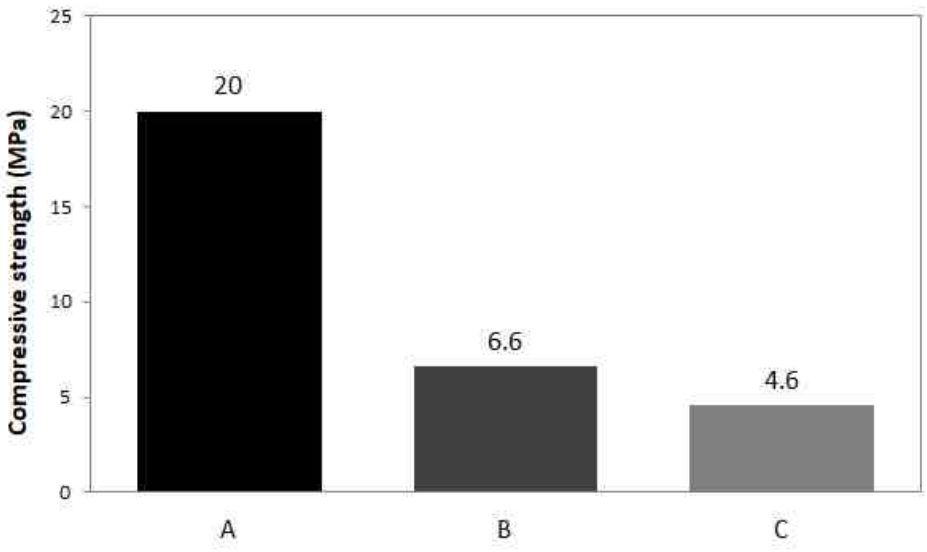


그림 2.55 경량 벽체 밀도에 따른 압축강도

표 2.25 경량 벽체 밀도변화에 따른 압축강도 변화

구 분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 0.2㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/C (%)	밀도	압축강도 (MPa)
A	35	35	30	0.05	100	1.5	20.0
B	35	35	30	0.05	100	1.2	6.6
C	35	35	30	0.05	100	1.0	4.6

② 경량 벽체 물시멘트비에 따른 압축강도

실대형모형 시험동에 사용될 벽체의 공시체를 밀도 1.2를 기준으로 제작하였으며 최종 배합비 도출을 위하여 배합수의 혼입량에 따른 7일, 28일 재령별 압축강도 시험을 수행하였다. 배합수는 물시멘트비 75%, 115%, 140%의 변수로 설정하였는데 압축강도 결과는 다음과 같다.

표 2.26과 그림 2.56에서 배합수 혼입량에 따른 압축강도 시험결과는 물시멘트비(W/C) 140% 배합인 W140이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 물시멘트비(W/C)를 감소시켜 제작한 W75이 압축강도가 가장 높은 결과를 나타내었다. 재령 7일 압축강도의 경우 W75 압축강도에 비해 W115는 압축강도가 약 10.4% 감소하였고 W140은 압축강도가 약 74.3% 감소하였다. 재령 28일 압축강도의 경우 W75 압축강도에 비해 W115는 압축강도가 약 17.4% 감소하였고 W140은 압축강도가 약 77.1% 감소하였다. 배합수가 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타나는데, 이는 물시멘트비(W/C)가 높은 배합에서는 시멘트가 완전히 수화되기 위해 필요한 수량(이론수량) 이상의 여유분의 물이 들어 있어서 그 물이 차지하던 부분이 공극이 되어 시멘트 입자간의 거리가 멀어져 압축강도와 밀도가 감소 되는 것으로 판단된다.

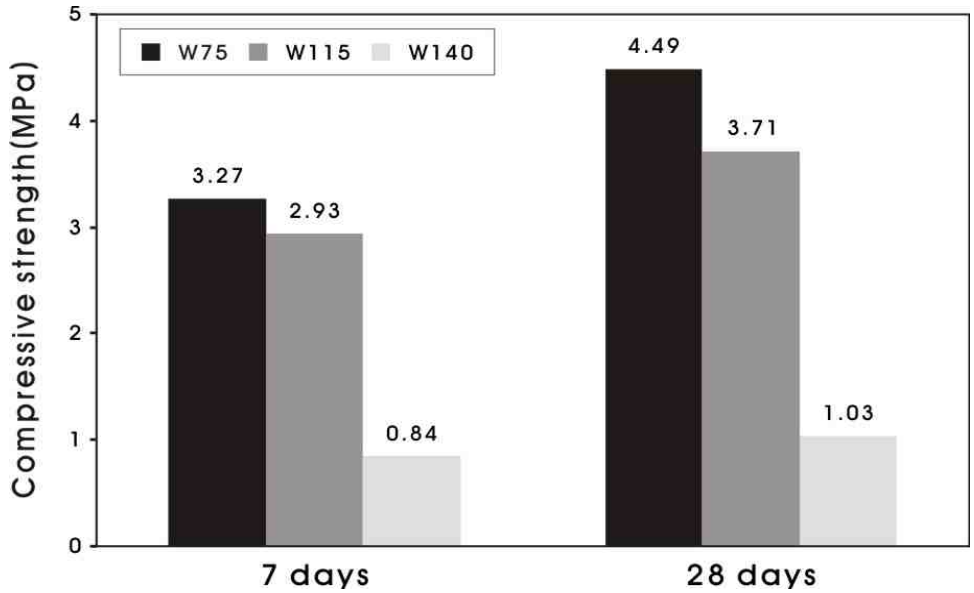


그림 2.56 경량 벽체 물시멘트비에 따른 압축강도

표 2.26 경량 벽체 물시멘트비에 따른 압축강도 변화

구 분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 0.2㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/C (%)	밀도	압축강도(MPa)	
							7d ay	28 day
W75	35	35	30	0.05	75	1.2	3.27	4.49
W115	35	35	30	0.05	115	1.2	2.93	3.71
W140	35	35	30	0.05	140	1.0	0.84	1.03

③ 경량 벽체 혼화재 사용에 따른 압축강도 결과

실대형모형 시험동에 사용될 벽체의 공시체를 밀도 저하에도 충분한 압축강도 확보하기 위하여 초속경 시멘트 실리카흄, 구연산, 고화제, 생석회, 석고, PVA섬유 등 다양한 혼화재와 특수시멘트를 사용하여 재령 28일 압축강도 시험을 수행하였다(표 2.27).

표 2.27 경량 벽체 배합 변화와 혼화재 사용에 따른 일축압축강도 변화 (단위: %, MPa)

구분	다공질 장석		시멘트	생석회	초속경 시멘트	PVA 섬유	실리카흄	석고	구연산	고화제	W/C	밀도	압축강도
	44㎛	0.2㎜											
A-1	35	35	-	-	30	-	-	-	-	0.05	150	0.6	0.94
A-2	35	35	-	-	30	-	-	-	0.1	0.05	150	0.6	0.79
A-3	35	35	-	-	30	-	-	-	1	0.05	150	0.6	0.48
A-4	35	35	-	-	30	-	1	-	-	0.05	150	0.6	0.75
A-5	35	35	-	-	30	-	3	-	-	0.05	150	0.6	0.73
A-6	35	35	-	-	30	-	5	-	0.1	0.05	150	0.6	0.63
B-1	35	35	25	-	5	-	-	-	-	0.05	150	0.6	0.8
B-2	35	35	20	-	10	-	-	-	-	0.05	150	0.6	0.46
B-3	35	35	15	-	15	-	-	-	-	0.05	150	0.6	0.5
B-4	35	35	10	-	20	-	-	-	-	0.05	150	0.6	0.73
B-5	35	35	5	-	25	-	-	-	-	0.05	150	0.6	0.75
C-1	35	35	30	-	-	-	-	-	-	0.05	120	0.81	0.80
C-2	20	20	40	5	-	-	5	10	-	0.05	90	0.98	0.85
C-3	25	25	40	5	-	-	5	5	-	0.05	90	0.79	1.18
C-4	20	20	40	5	-	-	10	5	-	0.05	90	0.90	1.67
C-5	25	25	45	-	-	-	5	5	-	0.05	90	0.80	1.79
C-6	25	25	45	-	-	-	5	-	-	0.05	90	0.85	2.33
C-7	25	25	45	-	-	-	5	-	-	0.05	90	0.97	3.32
D	35	35	30			0.25				0.05	120	0.95	1.48
E	20	50	30			0.25				0.05	80	1.1	5.72

A 배합의 경우 수축 전 조기경화 효과에 따른 저밀도 공시체를 제작하기 위해 초속경 시멘트를 사용하여 실리카흄과 구연산 혼입량을 변화해가며 밀도 0.6의 공시체를 제작하였다. B 배합의 경우 초속경 시멘트의 조기경화에 따른 강도변화를 살펴보기 위하여 보통 포틀랜드 시멘트를 초속경 시멘트로 5%, 10%, 15%, 20%, 25%까지 치환량을 변화해가며 밀도

0.6 공시체를 제작하였다. C 배합의 경우 밀도저감 공시체 제작시 적절한 팽창유도와 균열 수축 저감을 목적으로 생석회, 실리카흄, 석고 혼입량에 따라 목표밀도 0.8-1.0의 공시체를 제작하였다. D, E 배합의 경우 저밀도에 따른 공시체 표면탈락방지와 충분한 강도 확보를 위하여 PVA섬유를 혼입하여 목표밀도 1.0-1.1의 공시체를 제작하였다.

혼화재 사용량에 따른 압축강도 시험결과는 A 배합의 경우 실리카흄과 구연산의 혼입량이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다. 구연산 1% 혼입한 A- 3 배합이 가장 낮은 0.48MPa, 혼화재를 혼입하지 않은 A-1배합이 가장 높은 0.94MPa를 나타내었다.

B 배합 보통 포트랜드 시멘트를 초속경 시멘트로 치환량을 증가시키며 강도변화를 관찰한 결과, B-1 배합에 비해 B-2 배합 압축강도는 약 42.5% 감소, B-3 배합의 압축강도는 약 37.5% 감소, B-4 배합 압축강도는 약 8.8% 감소, B-5 배합 압축강도는 약 6.3% 감소하였다. 이러한 결과로 볼 때 초속경 시멘트 치환량 10%까지는 강도가 크게 감소하지만 그 후 치환량 25%까지는 강도가 점차적으로 증가하는 것으로 나타났다.

C 배합의 경우 혼화재를 혼입하지 않은 기준배합 C-1과 생석회, 실리카흄, 석고 혼입 배합의 압축강도를 비교한 결과로 배합 C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, C-7의 압축강도는 기준배합 C-1에 비해 0.05MPa, 0.38MPa, 0.87MPa, 0.99MPa, 1.53MPa, 2.52MPa 증가되었다. 밀도 0.98 혼화재 혼입율이 가장 많은 20%의 C-2배합이 가장 낮은 압축강도가 0.85MPa, 밀도 0.97 혼화재 혼입율이 가장 적은 5%의 C-7배합이 가장 높은 압축강도가 3.32MPa를 나타냈다. 기준배합에서 연구목표 압축강도 2MPa를 상회하기 위하여 다공질 장석 혼입율을 줄이고 시멘트 혼입율을 증가시켰으나 팽창유도와 균열수축 저감을 위한 생석회, 실리카흄, 석고의 혼입율이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다.

D 배합은 C-1 배합에 PVA 섬유를 0.25% 혼입한 배합이다. C-1 배합에 비해 압축강도가 85% 증가하여 1.48MPa까지로 나타났으나 연구목표 압축강도 2MPa를 상회하지는 못하는 것으로 나타났다.

E 배합은 연구목표 압축강도 2MPa를 상회하기 위해 골재로 이용한 다공질 장석 44㎛ 입경의 혼입율을 35%에서 20%로 감소시키고 다공질 장석 0.2㎜ 입경의 혼입율을 35%에서 50%로 증가시켰다. 다공질 장석 골재의 혼입율이 바뀜에 따라 경량기포 모르타르 제작 물시멘트(W/C)를 120%에서 80% 감소하였다. 재령 28일 압축강도는 5.72MPa로 D배합에 비해 4.27MPa가 증가하여 연구목표 압축강도 2MPa를 상회하는 것으로 나타났다.

(2) 직접인장강도

(가) 연속섬유 및 PVA섬유 혼입에 따른 직접인장강도

경량기포 모르타르의 인장강도를 보강하기 위한 기본실험으로 시멘트 페이스트에 연속섬유 및 PVA섬유를 사용하면서 직접인장강도 성능시험을 수행하였다. Plain 배합은 시멘트 100%, 물시멘트(W/C) 40%로 연속섬유와 PVA섬유를 사용하지 않은 일반페이스트 배합이다. M배합은 Plain 배합에 연속섬유를 부착한 배합이며 MP배합은 Plain 배합에 PVA섬유를 5% 혼입한 배합이다. 시험결과는 그림 2.57, 표 2.28과 같다.

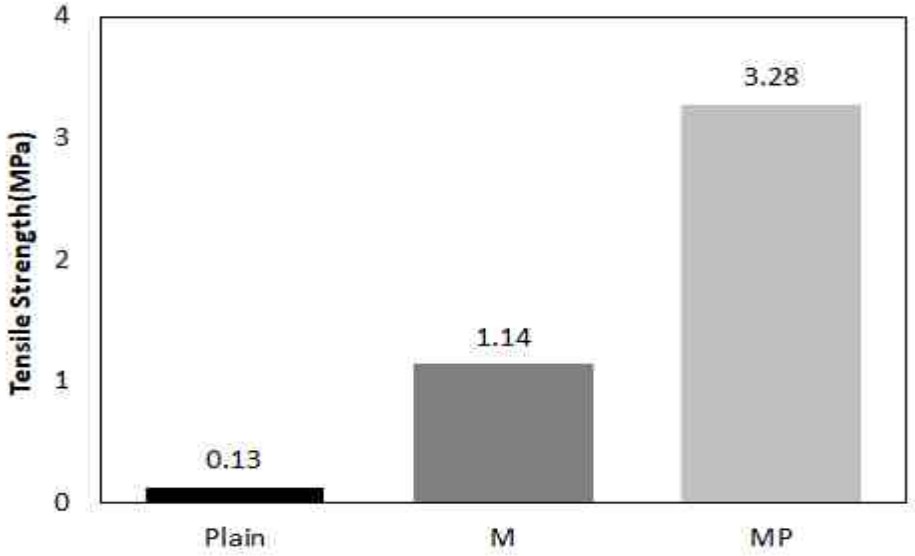


그림 2.57 경량 벽체 연속섬유 및 PVA섬유 혼입에 따른 직접인장강도

시멘트 페이스트의 직접인장강도 시험결과는 연속섬유와 PVA섬유를 사용하지 않은 Plain 배합의 경우 인장강도가 0.13MPa으로 나타났다. 연속섬유를 사용한 M배합의 경우 인장강도가 1.14MPa로 Plain 배합에 비해 약 7.8배 증가했다. PVA섬유를 사용한 MP배합의 경우 인장강도가 3.28MPa로 Plain 배합에 비해 약 24배 증가했으며 연속섬유를 사용한 M 배합 보다 PVA섬유를 사용한 MP배합의 인장강도가 더 높은 것으로 나타났다. 이는 공시체에 인장력이 가해지면 공시체 내부에 분포된 PVA섬유가 시멘트와 섬유 사이에 발생하는 인발저항마찰과 다수의 미세균열을 유도하여 인장강도가 크게 증가하는 때문으로 판단된다.

표 2.28 경량 벽체 연속섬유 및 PVA섬유 첨가에 따른 직접인장강도 변화

구분	시멘트 (%)	W/C (%)	감수제 (%)	증점제 (%)	연속 섬유	PVA섬유 (%)	인장강도 (MPa)
Plain	100	40	-	-	-	-	0.13
M	100	40	-	-	사용	-	1.14
MP	100	40	0.15	0.15	-	0.5	3.28

(3) 휨인장강도

(가) 경량 벽체 PVA섬유 혼입에 따른 휨인장강도

실대형모형 시험동에 사용될 경량 벽체의 PVA섬유 혼입량에 따른 재령 28일 휨인장강도 성능시험을 수행하였다. 제작된 공시체의 체적대비 PVA섬유의 혼입율 변화를 0%, 0.1%, 0.5%, 1% 로 설정하였다. 휨인장강도 시험결과는 그림 2.58과 표 2.29와 같다. G배합의 경우 PVA섬유를 사용하지 않았으며 휨인장강도는 2.66MPa로 나타났다. F배합의 경우 PVA섬

유를 0.1% 사용하였을 때 휨인장강도는 3.13MPa로 G배합의 비해 약 17.7% 증가하였다. E배합의 경우 PVA섬유를 0.5% 사용하였을 때 휨인장강도는 9.69MPa로 G배합에 비해 약 264% 증가하였다. D배합의 경우 PVA섬유를 1% 사용하였을 때 휨인장강도는 10.94MPa로 G배합에 비해 약 311% 증가하였다. 결국, PVA섬유 혼입량이 증가할수록 휨인장강도가 증가하며 0.1-0.5% 혼입에서 가장 크게 증가하였다.

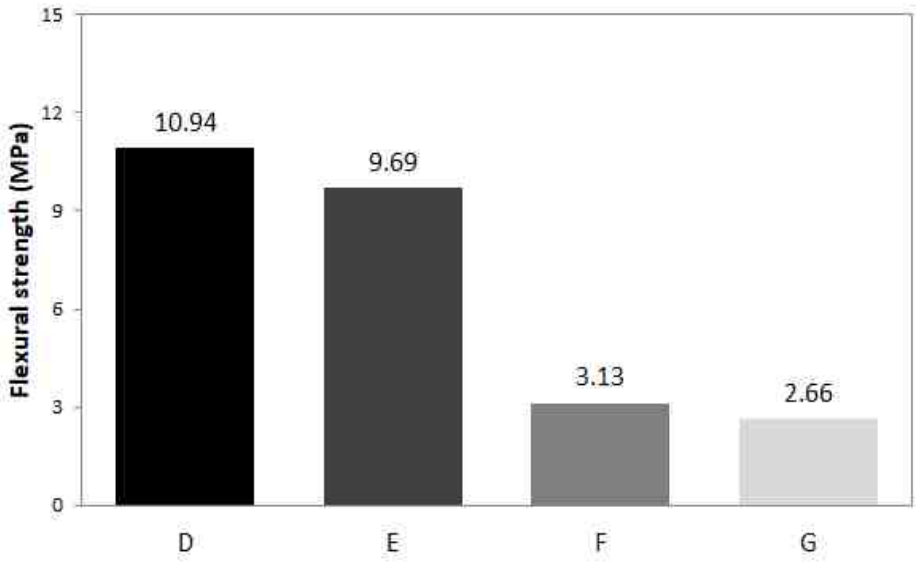


그림 2.58 경량 벽체 PVA섬유 혼입에 따른 휨인장강도

표 2.29 경량 벽체 PVA섬유 첨가에 따른 휨인장강도 변화

구분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 0.2㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/C (%)	PVA 섬유 (%)	감수제 (%)	증점제 (%)	밀도	인장강도 (MPa)
D	35	35	30	0.05	100	1	1	0.2	2.0	10.94
E	35	35	30	0.05	100	0.5	1	0.2	2.0	9.69
F	35	35	30	0.05	100	0.1	1	0.2	2.0	3.13
G	35	35	30	0.05	100	-	1	0.2	2.0	2.66

(나) 천장 마감재 PVA섬유 혼입에 따른 휨인장강도

실대형모형 시험동에 사용될 천장 마감재에 PVA섬유 혼입과 연속섬유 혼입에 따른 재령 28일 휨인장강도 성능시험을 수행하였다. 제작된 공시체의 체적대비 PVA섬유 혼입율 0%, 0.25%와 연속섬유 부착 여부를 변수로 설정하였다. 연속섬유를 포함한 MS와 MPS는 고화제를 첨가하지 않고, 연속섬유에 의한 강도를 파악하는데 사용하였다. 이에 따른 휨인장강도 시험결과는 그림 2.59와 표 2.30와 같다. M배합의 경우 연속섬유 미부착, PVA섬유를 사

용하지 않았을 때 휨인장강도는 3.9MPa로 나타났다. MP배합의 경우 연속섬유 미부착, PVA섬유 0.25% 사용하였을 때 휨인장강도는 6.95MPa로 M배합에 비해 약 78.2% 증가하였다. MS배합의 경우 연속섬유 부착, PVA섬유를 사용하지 않았을 때 휨인장강도는 3.7MPa로 나타났다. MPS배합의 경우 연속섬유 부착, PVA섬유 0.25% 사용하였을 때 휨인장강도는 4.65MPa로 MS배합에 비해 약 25.7% 증가하였다. PVA섬유를 0.25% 혼입한 MP 배합의 휨인장강도가 연속섬유를 부착한 MPS 배합에 비해 49.5% 더 높은 것으로 나타났다.

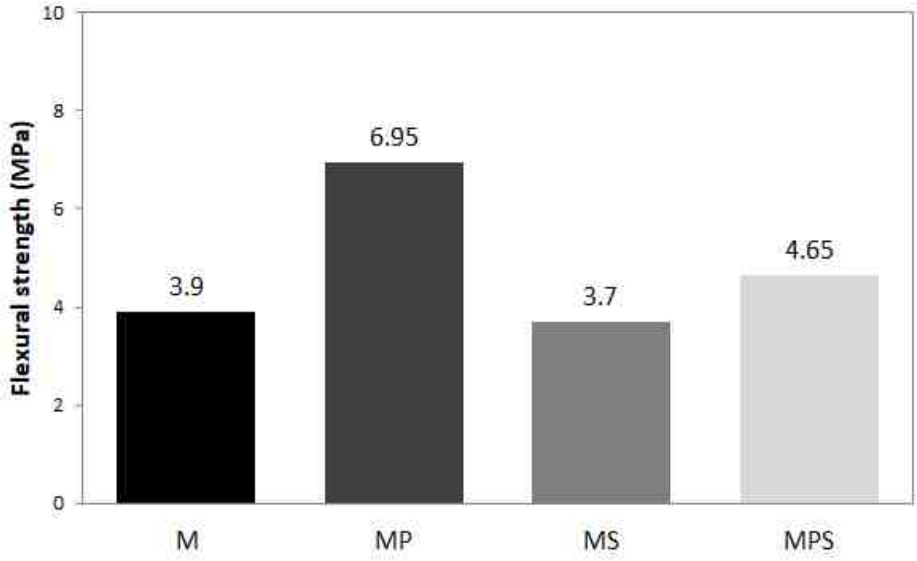


그림 2.59 천장 마감재 PVA섬유 혼입에 따른 휨인장강도

표 2.30 천장 마감재 PVA섬유 첨가에 따른 휨인장강도 변화

구분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 0.2㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/C (%)	PVA섬유 (%)	연속 섬유	밀도	인장 강도 (MPa)
M	20	60	20	0.05	100	-	미부착	2.0	3.90
MP	20	60	20	0.05	110	0.25	미부착	2.0	6.95
MS	20	60	20	-	100	-	부착	2.0	3.70
MPS	20	60	20	-	110	0.25	부착	2.0	4.65

(4) 소결

바닥 축열 모르타르, 경량 벽체, 천장마감재의 성능평가 및 최적 배합비 도출을 위하여 압축강도, 직접인장강도, 휨인장강도 시험을 수행하였다. 바닥 축열 모르타르는 압축강도가 20.3MPa로 다공질 장석 44㎛ 혼입율 17.5%, 다공질 장석 1㎜ 혼입율 75%, 시멘트 혼입율 7.5%, 고화제 혼입율 5%, 물결합재비(W/B) 40%가 최적 배합비로 판단된다. 경량 벽체의 경우는 밀도가 증가할수록 압축강도가 증가하며 밀도 1.2에서 1.5 구간에서 강도 증가율이 가장 높은 것으로 나타났다. 물시멘트비가 증가할수록 압축강도와 밀도가 감소했다. 혼화

재 사용에 따른 배합에서는 PVA섬유를 0.25% 혼입한 배합이 5.72MPa로 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났다. 직접인장강도는 연속섬유시트 혼입 배합에 비해 PVA섬유 혼입 배합이 3.28MPa로 더 높은 것으로 나타났다. 경량 벽체 휨인장강도는 PVA섬유 혼입율이 증가할수록 인장강도가 증가하며 PVA섬유 0.1% 내지 0.5% 혼입율에서 강도 증가율이 가장 높은 것으로 나타났다. 천장마감재는 PVA섬유 0.25% 혼입으로 휨인장강도가 증가하는 것으로 나타났다.

라. 변형

(1) 수축 및 팽창

콘크리트나 모르타르의 건조수축은 시멘트와 물이 수화반응을 하고 남은 수분이 증발하면서 체적 변화가 발생하는 현상이다. 이는 크리프와 더불어 콘크리트나 모르타르의 특유의 문제로 콘크리트의 물성 중 강도 다음으로 중요한 성질의 하나로 인식된다. 시멘트 등의 결합재는 건조과정에서 체적의 1-3% 정도가 수축되는데, 이때 균열이 발생할 가능성이 매우 높아져 건축물 내장재의 품질저하의 원인이 된다.

시멘트의 구성화합물 측면에서 보면 건조 수축량은 시멘트 조성화합물 속의 C3A의 양에 따른다. 또한, 시멘트의 분말도도 건조수축에 영향을 미치는데, 시멘트의 분말도가 커지면 건조수축도 증가한다. 콘크리트 내부수분의 변화에 관련된 물은 건조수축에 있어서 가장 중요한 인자이다. 물시멘트비(W/C)비가 낮을수록 수축률이 적고, 높을수록 수축률이 많다. 이런점들을 고려하여 최적의 배합비를 도출하는것이 중요하다. 그런데, 기상 조건에 따라 적정의 배합비라 할지라도 건조수축이 생기는 경우도 발생한다.

본 연구에서 건조수축을 저감하는 용도로 석고를 사용했다. 석고는 단사정계(單斜晶系) 광물(화학식 $CaSO_4 2H_2O$)로 물을 포함하는 결합재로 이용되고 있다. 또한, 석고는 시멘트의 응결 지연제로 많이 쓰고 있는데 황산염에 대한 저항성을 향상시켜서 수축을 감소하는 것으로 알려져 있다. 실험에서는 배합비에 따른 건조 수축량을 보기 위해서 소석회와 석고의 비율과 물결합재비(W/B)를 조절하여서 배합하고, 공시체의 길이를 측정하였다. 공시체 케이스에 일정량의 시료를 담아 길이를 측정한 후, 24시간이 지난 뒤 또 다시 측정하여 수축량을 결정하였다.

표 2.31의 구분 A - D는 소석회와 석고의 사용 유무에 따라 건조수축의 변화량을 관찰한 것이다. 반응을 극적으로 관찰하기 위해 소석회와 석고의 사용량은 10%로 하였다.

표 2.31 배합비에 따른 건조수축 변화 측정

구분	함량비(%)					W/B (%)	반응 전 길이(cm)	반응 후 길이(cm)
	장석	시멘트	소석회	석고	고화제			
A	80	10	10	-	0.05	50	5.9	5.6
B	80	10	-	10	0.05	50	3.3	3.4
C	80	-	10	10	0.05	50	6.0	6.0
D	70	10	10	10	0.05	50	7.3	7.3

그림 2.60의 A는 소석회를 첨가하고 수화반응 전후에 길이를 측정한 것이고, 그림 2.60 B는 석고를 첨가한 경우이다. 그림 2.60 C와 D는 시멘트 유무의 차이이다. 이 경우 건조수축이나 팽창성이 발생하지 않는 것으로 관찰되었다.


A 수화반응전


A 수화반응후



B 수화반응전


B 수화반응후



C 수화반응전



C 수화반응후


D 수화반응전



D 수화반응후

그림 2.60 배합비에 따른 건조수축 변화

(2) 내화성

(가) 개요

건축물에서 가장 많이 사용되는 콘크리트 구조는 철골구조에 비해 화재에 대해 비교적 우수한 것으로 알려져 왔다. 그러나 강도를 내기 위해 콘크리트 부재에 혼화재를 추가하는데 이것은 내부 조직을 조밀하게 하여 화재 시에 발생되는 수증기를 배출시키지 못하여 고온에서 갑작스럽게 심한 폭음과 함께 부재 표면이 박리 및 탈락하는 단점이 최근 보고되고 있다. 이러한 급작스러운 폭렬(Spalling) 현상은 콘크리트 부재 파편의 비산뿐만 아니라 부재단면감소로 인한 구조내력의 감소, 철근의 노출로 인한 부재의 내력 성능 저하를 일으켜 구조물의 안전에 위험을 주게 된다. 폭렬현상의 주원인은 수증기압의 상승이외에도 열응력과의 복합 작용에 의한 결과로 알려져 있다. 열응력은 화재 시 부재 내부의 온도차이로 인하여 발생하며, 수증기압은 100℃ 이상에서 부재 내부의 수분 증발로 인해 발생하는 수증기가 수밀한 콘크리트에 갇혀 발생한다. 그리고 폭발성 폭렬이 발견되는 가열초기에는

수증기압에 의한 영향이 지배적인 것으로 보고되었다. 지금까지 연구된 폭렬 방지를 위한 방법은 유로 코드와 최근에 연구동향을 살피면 알 수 있다. 그 방법 중에는 첫째로 온도상승을 억제하는 방안으로 부재에 내화 도료를 도포하거나 모르타르를 피복하여 내부로의 온도 전달을 지연시키는 방법이있다. 둘째는 내부 수분의 이동을 원활하게 하는 방안인데 콘크리트에 가연성 섬유를 혼입하여 열응력을 완화시키거나 온도 상승으로 섬유가 용융되어 생긴 내부 공극을 내부 수분 이동 통로로써 활용하는 방안이 있다. 이를 위해 사용하는 가연성 섬유로는 폴리플로필렌 섬유, 셀룰로오스 섬유, 폴리 비닐 섬유(PVA 섬유) 등이 있다.

(나) 내화실험

① 다공질 장석의 용융점

장석은 내화성 재료의 주로 이용되는 소재인 산업광물로서 장석은 국내 자급율 100%를 초과하는 광물자원(산업광물은행, 한국과학재단, 2004)이다. 소재의 활용분야는 카리-장석의 경우 판유리용, 위생도기용, 도자기 및 기화의 유약, 용접봉 코팅용으로 사용되며, 소다-장석은 도자기 유약용, 위생도기, 도자기의 제조에 사용된다.

다공질 장석의 내화 특성을 파악하기 위한 선행 실험으로 밀양 소재의 도자기 제작소의 가마를 이용하여 다공질 장석의 용융 온도를 관찰하였다. 실험을 위해 지름 5㎝. 높이 10㎝의 원통형 공시체를 제작하였다. 공시체의 재료 배합은 다공질 장석과 보통 포틀랜드 시멘트의 비율을 90:10으로 하였고 다공질 장석 분말의 평균입경은 20㎛, 50㎛, 80㎛, 100㎛로 하였다. 가열은 800℃까지 100℃간격으로 단계적으로 가열하였고 해당 온도에 도달 후 2분씩 유지하였다. 800℃ 온도에서는 50℃간격으로 가열하였으며 해당 온도에서 30분간 유지하였다. 1200℃ 가열 후 최종적으로 1240℃에서 30분간 가열 후 냉각하였다. 그림 2.61은 가열전 공시체의 모습과 냉각 후의 사진으로 950℃까지 공시체는 형태를 유지하였으나 1000℃ 이상의 온도에서 부분 용융과 색의 변화가 나타났으며 1200℃에 도달하기 전에 용융되었다.

이상의 실험에서 다공질 장석은 1000℃ 이상의 온도에서 부분 용융이 시작되며 이후의 온도에서 용해되어 자연유 상태의 액상으로 변화되는 것을 알 수 있다.



그림 2.61 내화 실험(좌: 가열 전, 우: 가열 후)

② 내화 실험 기준

건축물 구조 부재의 내화 실험은 내화실험의 표준 조건을 만족하기 위해서 일반 요구 사항(KS F 2257-1)에서 제시되는 표준화재 곡선으로 알려진 시간-온도곡선(그림 2.62)의 화재 가혹도(Fire Severity)에 준하여 시간대별 최대 온도를 도출하였다. 화재보험협회에서 제공하는 내화구조 성능 기준표를 이용하여 내화구조의 내구시간을 도출하였다(표 2.32).

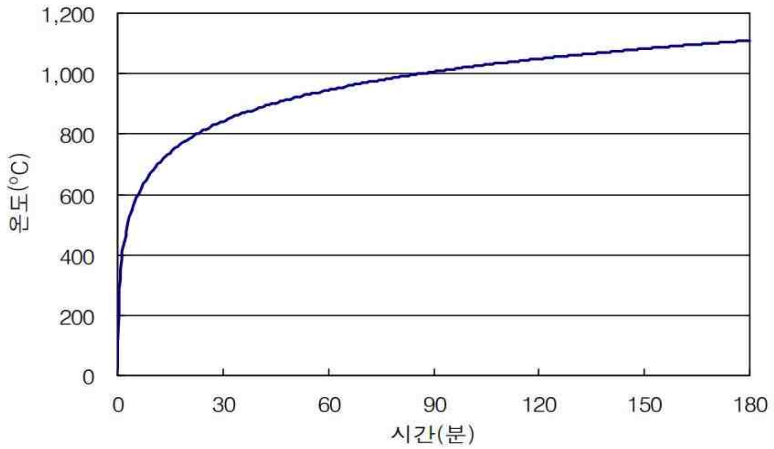


그림 2.62 표준화재 시간-온도곡선(화재보험협회, 2018)

표 2.32 내화구조의 성능 기준 (단위: 시간)

구성 / 부재용도	용도구분	용도규모 층수/ 최고 높이(m)		벽						보, 기둥	바닥	기둥
				외벽			내벽					
				내력벽	비내력		내력벽	비내력				
					연소 우려가 있는 부분	연소 우려가 없는 부분		칸막이벽	샤프트실 구획벽			
일반시설	업무시설, 판매 및 영업시설, 공공용시설 중, 군사시설, 방송국, 발전소, 전신전화국, 촬영소 기타 이와 유사한 것, 통신용시설, 관광휴게시설, 온동시설, 문화 및 집회시설, 제1종 및 제2종 근린생활시설, 위락시설, 묘지관련시설 중 화장장, 교육연구 및 복지시설, 자동차 관련 시설(정비공장 제외)	12/50	초과	3	1	0.5	3	2	2	3	2	1
			이하	2	1	0.5	2	1.5	1.5	2	2	0.5
		4/20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
주거시설	단독주택 중 다중주택, 다가구주택, 공관, 공동주택, 숙박시설, 의료시설	12/50	초과	2	1	0.5	2	2	1	3	2	1
			이하	2	1	0.5	2	1	2	2	2	0.5
		4/20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5
산업시설	공장, 창고시설. 분뇨 및 쓰레기처리시설, 자동차 관련시설 중 정비공장, 위험물 저장 및 처리시설	12/50	초과	2	1.5	0.5	2	1.5	1.5	3	2	1
			이하	2	1	0.5	2	1	1	2	2	0.5
		4/20 이하		1	1	0.5	1	1	1	1	1	0.5

본 연구의 건축용 내장재인 경량블록은 비내력벽-칸막이벽의 용도로 개발되었으며 약 900℃의 온도에서 60분간 그 형태가 유지되면 내화성능을 만족한다고 평가한다. 내화실험은 소형의 공시체를 제작하여 사용하였고 소형전기로를 이용하였다(그림 2.63). 전기로의 규격은 가마의 내부 크기가 130㎝ × 250㎝ × 90㎝ 이며, 최대 도달온도는 1,000 ℃이며 1℃ 간격으로 온도조절이 가능한 장치이다.

내화실험용 공시체는 전기로의 내부 규격에 맞게 4cm × 4cm × 16cm의 크기의 직육면체로 제작하였다. 공시체는 단계별 온도변화를 확인하기 위해 동일한 배합비 조건으로 총 6개조를 제작하였다. 또한, PVA 섬유를 첨가한 공시체도 제작하여 변화를 관찰하였다. 실험에 사용된 배합비는 2차년도 벽체 제작에 사용된 배합비를 사용하였다. PVA 섬유가 포함되지 않은 공시체는 다공질 장석 0.2mm가 60%, 다공질 장석 44㎛가 20%, 보통 포틀랜드 시멘트가 20% 사용되었으며, 이때 물시멘트비(W/C)는 100%로 제작되었다. PVA 섬유가 포함된 시료는 0.25%의 섬유가 추가되었으며, 동일한 배합비에 물시멘트비(W/C)는 110%로 제작되었다. 이때 경량기포는 첨가하지 않은 배합비를 사용하였다.



그림 2.63 내화실험용 전기로(좌), 실험장면(우)

③ 내화 실험결과

가열 실험은 상온에서 900℃까지 단계적으로 가열과 냉각을 반복하며 표면의 변화를 관찰하였고 최종적으로는 KS F 2257-4 규정에 따라 900℃에서 2시간씩 가열후 상온에서 냉각하였다. 냉각된 공시체의 무게 변화와 휨인장강도를 측정하였고, 전자현미경을 이용하여 입자의 미세 조직 변화를 관찰하였고, XRD를 통해 구성광물의 변화도 관찰하였다(그림 2.64-2.69). 그림 2.64는 내열실험후의 공시체로 가열에 따라 공시체의 색상이 변화되었다.



그림 2.64 가열 온도에 따른 시료 사진(좌측: 0℃ 중앙: 400℃ 우측: 900℃)

그림 2.65의 위 그림은 가열 온도에 따른 밀도의 변화를 나타내며, 그림 2.65의 아래그림은 PVA섬유 혼입유무에 따른 휨인장강도 값을 정리하였다. 표 2.33에서 초기밀도에 비해 900℃ 가열 후 85.8%로 감소하였으며, 휨인장 강도는 PVA섬유 미혼입시 33.3%, 혼입시 21.4%로 감소하였다. 휨인장강도의 감소율은 PVA섬유가 혼입된 시료에서 더 크게 나타나지만, 최종 측정된 휨인장강도 측정값은 PVA섬유를 혼입한 B 공시체에서 0.1MPa 높게 측정되었으며, 0.98MPa로 휨인장강도값임을 거려할 때 일축압축강도값은 이보다 높은 값을 보일것으로 판단된다.

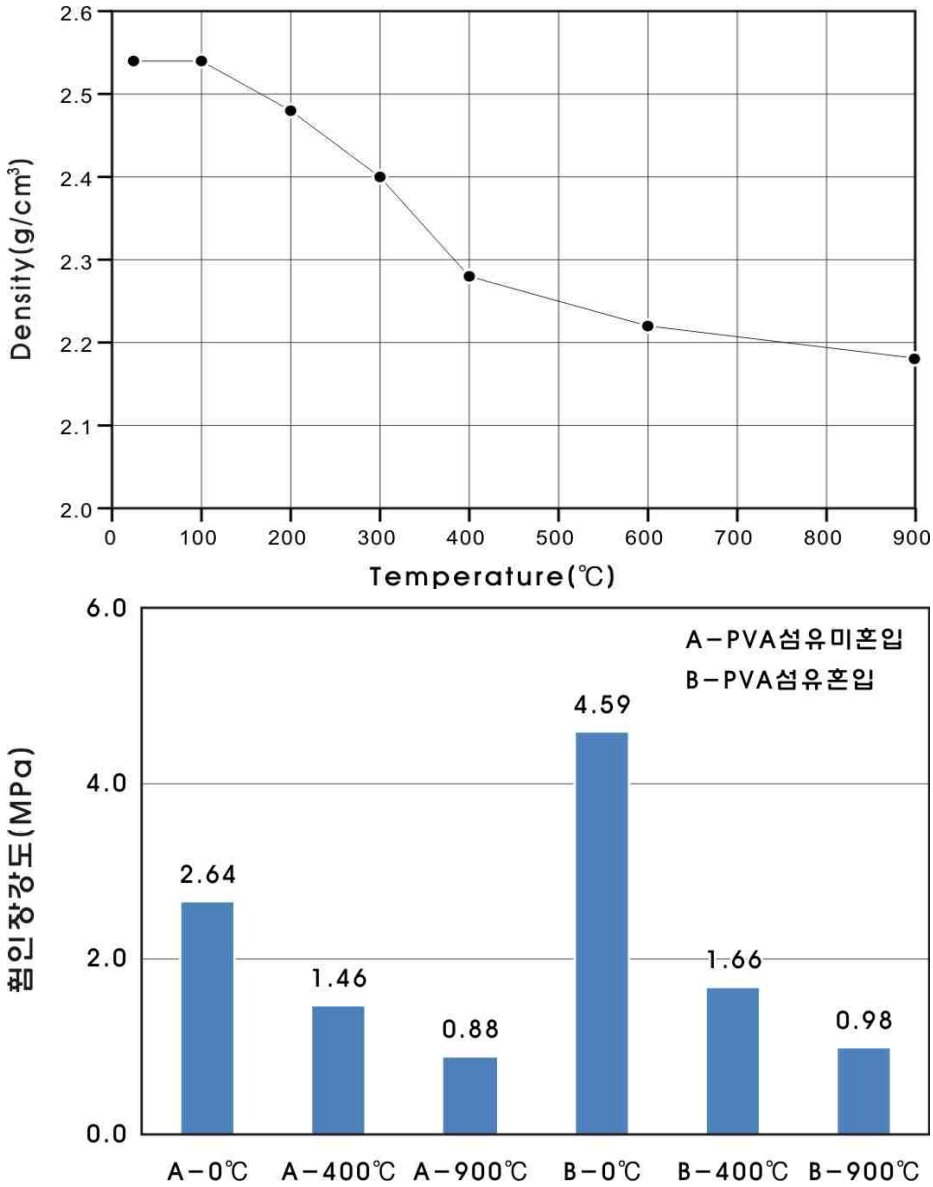
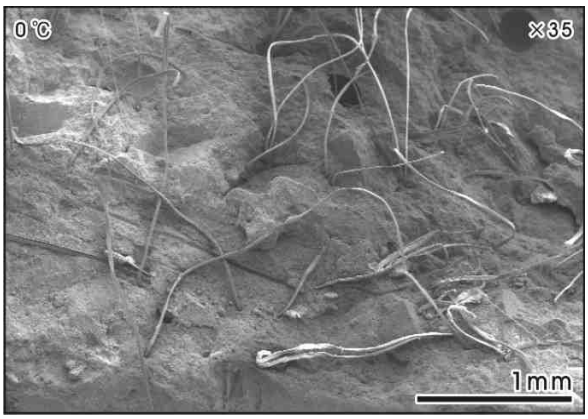


그림 2.65 가열 온도에 따른 강렬감량(상)과 휨인장강도 측정결과(하)

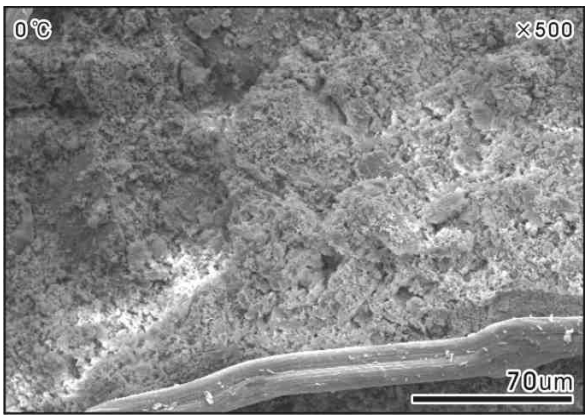
표 2.33 소성온도에 따른 밀도 변화

온도(℃)	상온	100	200	300	400	600	900
밀도(g/㎤)	2.54	2.54	2.48	2.40	2.28	2.22	2.18

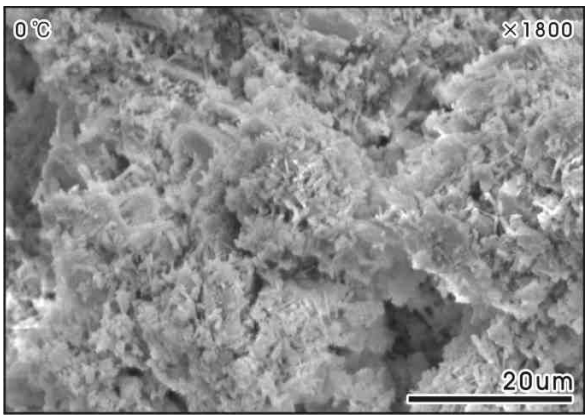
그림 2.66은 PVA 섬유를 포함한 공시체와 포함하지 않은 공시체를 제작하여 내화 실험 후 저배율에서 고배율까지 주사전자현미경으로 표면을 관찰한 것이다. 저배율에서 PVA섬유가 포함된 공시체에서는 섬유가 재료원과 잘 결합되어 있으며, 고배율에서 시멘트 수화 시 발생 된 침상의 결정광물인 에트링가이트(ettringite)가 잘 관찰되고 있다.



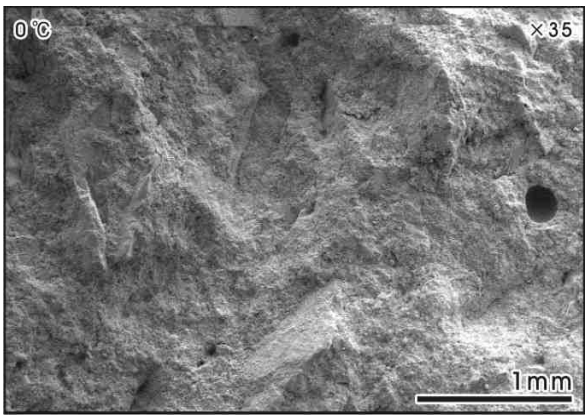
PVA(유) 35배



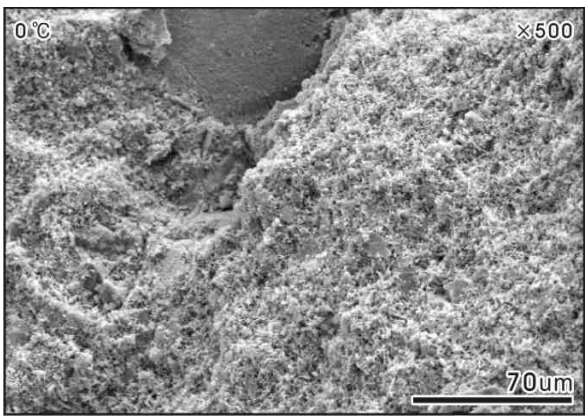
PVA(유) 500배



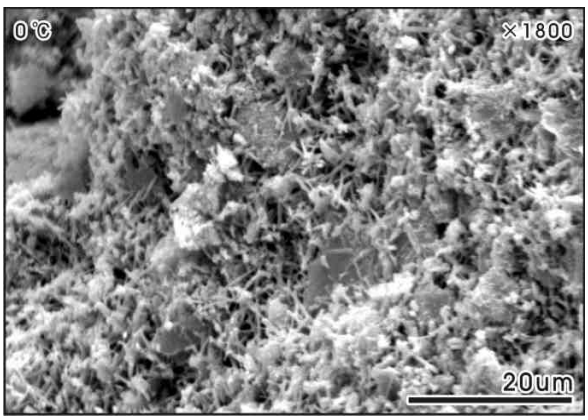
PVA(유) 1800배



PVA(무) 35배



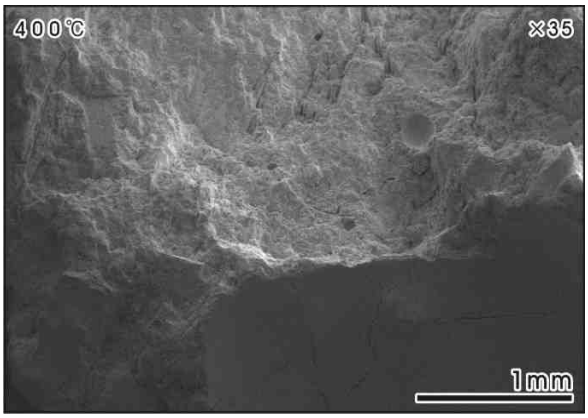
PVA(무) 500배



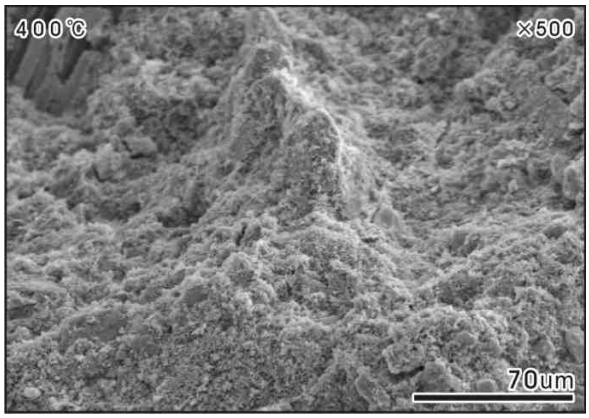
PVA(무) 1800배

그림 2.66 가열실험 전 공시체의 주사전자현미경을 이용한 표면 관찰

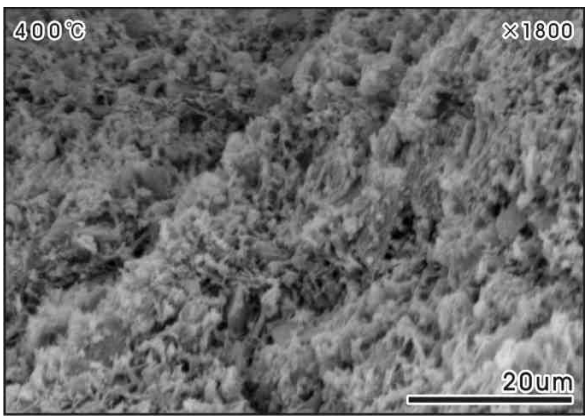
그림 2.67은 가열로에 400℃ 가열한 공시체의 주사전자현미경 영상이다. 500배 이하의 배율에서 혼입한 PVA섬유가 연소되고 남은 흔적이 공동 형태로 남아있 있다. 고배율에서는 가열실험을 하지 않은 공시체와 유사하게 침상의 결정광물인 에트링가이트가 관찰된다.



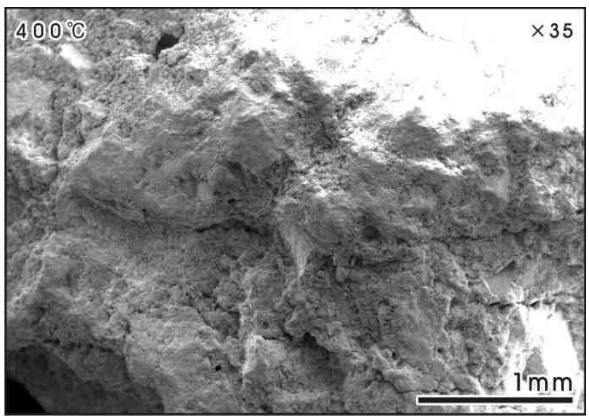
PVA(유) 35배



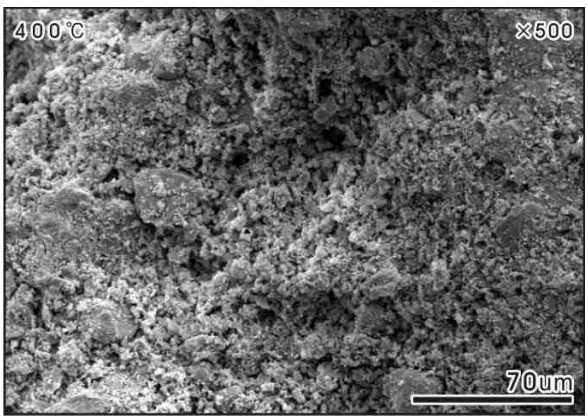
PVA(유) 500배



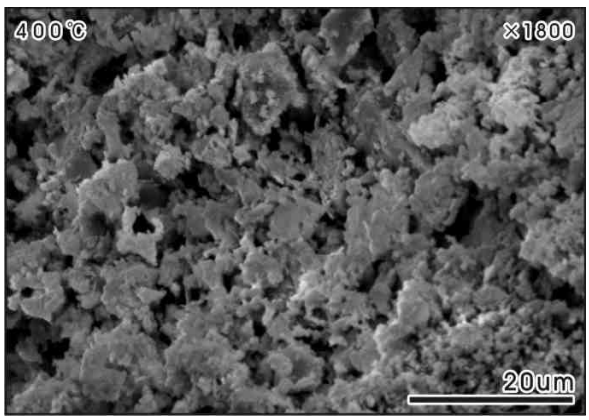
PVA(유) 1800배



PVA(무) 35배



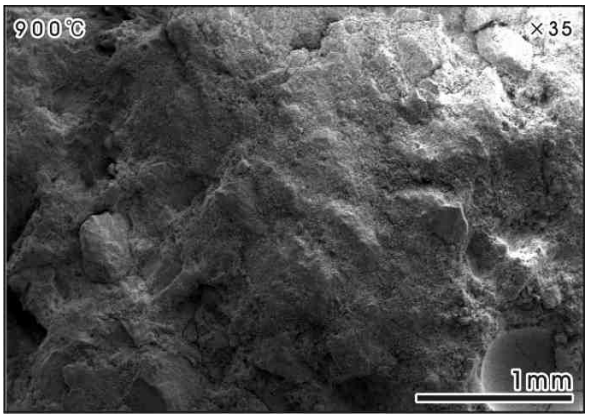
PVA(무) 500배



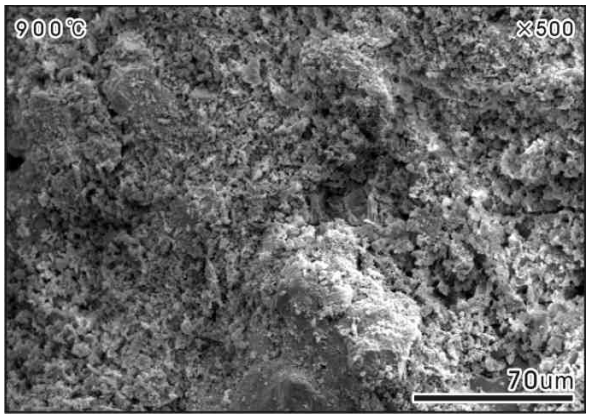
PVA(무) 1800배

그림 2.67 400℃ 가열실험 후 공시체의 주사전자현미경을 이용한 표면 관찰

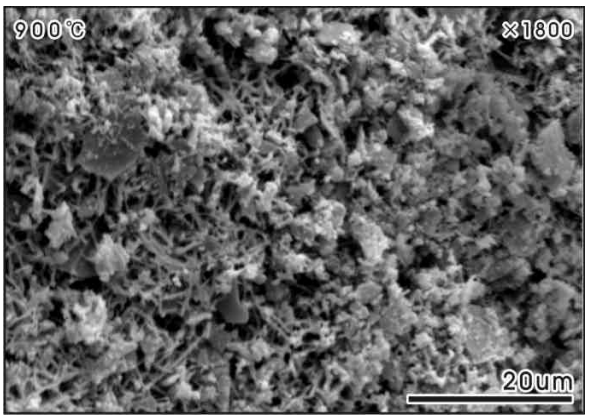
그림 2.68은 가열로에서 900℃로 온도를 설정하여 내화실험을 수행한 공시체의 주사전자현미경 영상이다. 저배율에서는 400℃ 연소 후 관찰되던 섬유가 있었던 흔적은 일부 광물의 용융으로 인해 보이지 않으나, 고배율에서는 침상의 결정광물인 에트링가이트가 관찰되고 있다.



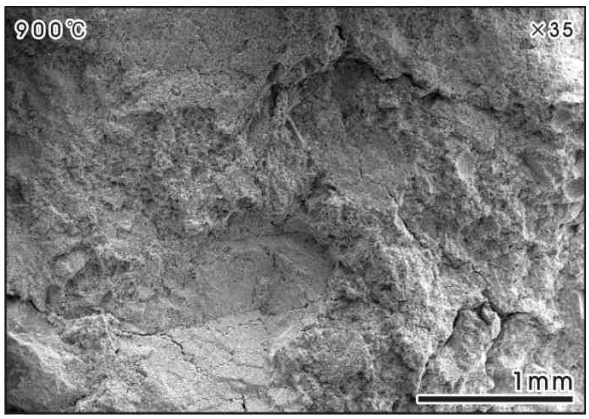
PVA(유) 35배



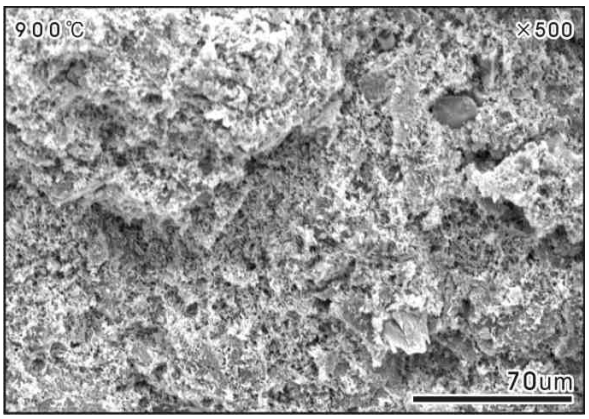
PVA(유) 500배



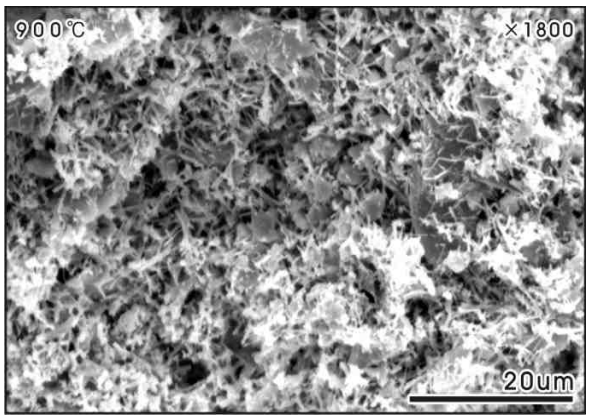
PVA(유) 1800배



PVA(무) 35배



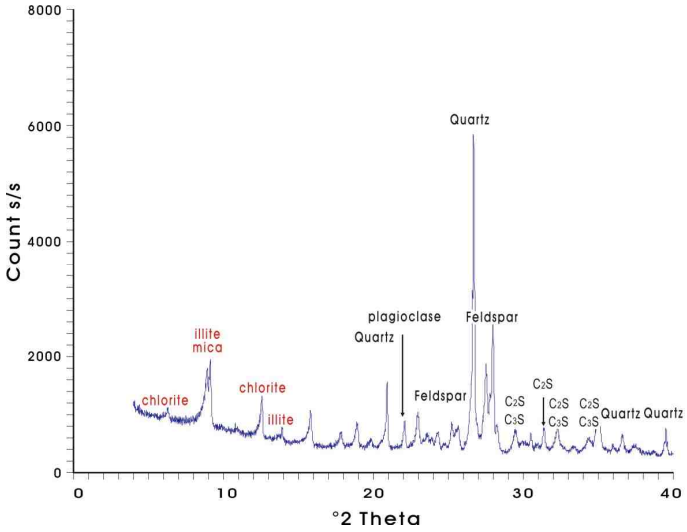
PVA(무) 500배

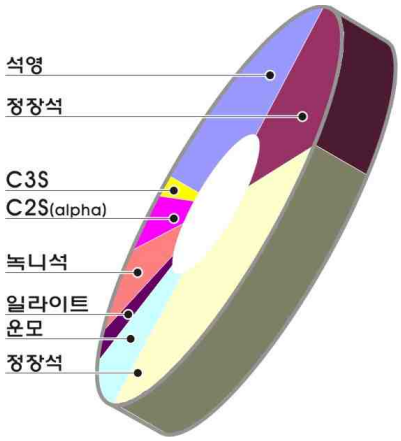


PVA(무) 1800배

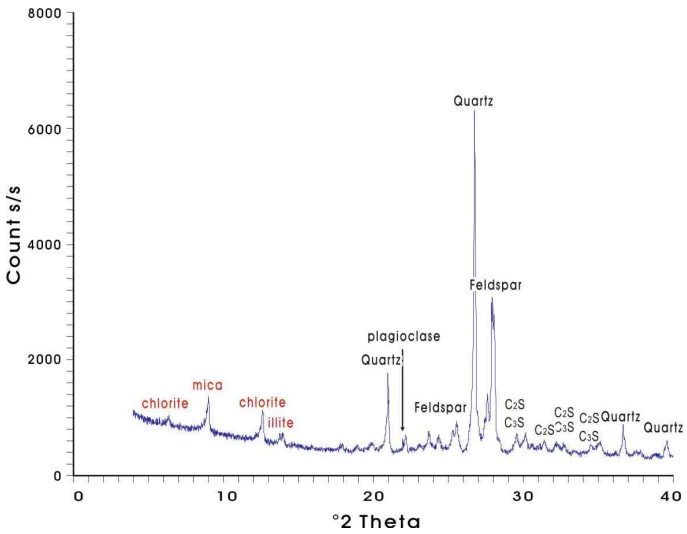
그림 2.68 900℃ 가열실험 후 공시체의 주사전자현미경을 이용한 표면 관찰

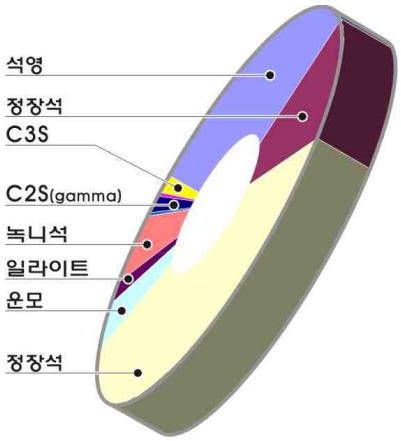
PVA 섬유를 포함하지 않은 시료의 가열 후 X-선 회절분석과 정량분석을 통하여 가열에따른 광물학적 변화를 관찰하였다. 그림 2.69는 X-선 회절분석과 정량분석 결과이다.표 2.34에서 석영은 가열로 인한 함량 변화가 나타나지 않으나 정장석의 경우 상대적으로 증가하고 있다. 사장석도 저온 소성에 비해 고온소성에 의해 함량비가 감소하였으며, 운모와 점토광물들의 경우 대부분이 소성으로 제거되었다. 시멘트성분은 저온가열에서 C2Sα와 C3S가 감소하고, C2Sγ가 나타나며, 고온 소성에서는 이전의 성분들은 보이지 않고, C2Sβ 성분만이 남는 것으로 분석되었다.



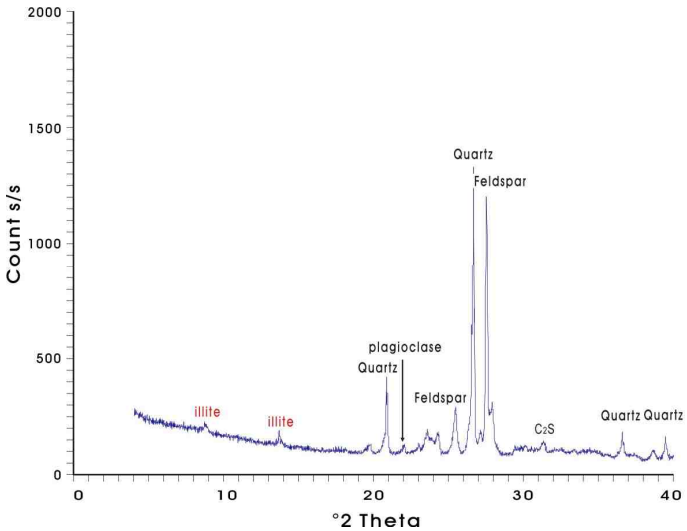


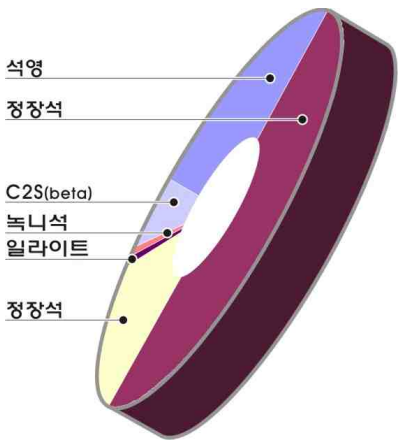
상온 공시체





400℃ 가열 공시체





900℃ 가열 공시체

그림 2.69 400℃ 및 900℃ 가열실험 후 공시체의 X-선회절분석 결과

표 2.34 소성온도에 따른 X-선 회절분석 결과

	상온 공시체	400℃ 가열 공시체	900℃ 가열 공시체
석영(Quartz)	22.9	28.5	23.6
정장석(K-feldspar)	20.0	13.9	50.5
사장석(Plagioclase)	30.1	41.9	18.6
운모(Mica)	9.7	5.0	0.0
일라이트(Illite)	3.7	2.0	0.8
녹니석(Chlorite)	7.6	5.4	0.9
카올린(Kaolin)	0.0	0.4	0.0
C2S β	0.0	0.0	5.6
C2S γ	0.0	1.2	0.0
C2S α	4.2	0.4	0.0
C3S (Nishi)	1.8	1.4	0.0

(3) 유동 특성

바닥 축열층 모르타르 시공에 사용되는 배합의 유동성 측정을 위하여 그림 2.70과 같이 모르타르 흐름기를 사용하여 KS L 5111에 따라 슬럼프 콘에 모르타르를 2층으로 25회씩 다짐하고 슬럼프 콘을 들어 올려 슬럼프 콘을 제거한 후 25회 타격 후 모르타르가 이동한 거리를 측정하는 방법으로 슬럼프 플로우 시험을 실시하였다.



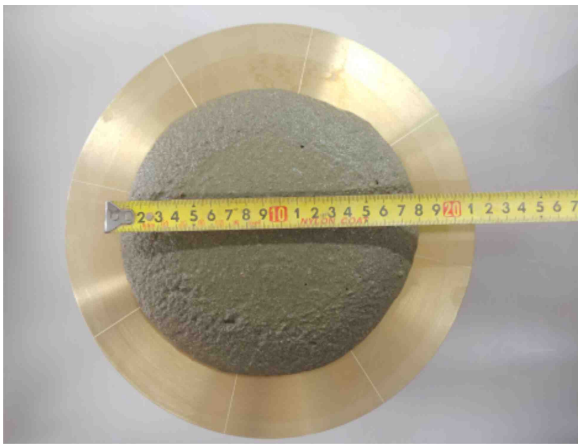
그림 2.70 모르타르 흐름기 및 유동성테스트

슬럼프 플로우 허용범위 값은 건설현장에서 적용되는 기준을 고려하여 현장타설시 200±20㎜의 범위를 기준으로 축열층 모르타르 배합비를 도출하고 슬럼프 플로우 시험을 실시하였다(표 2.35). 기준동과 시험동에 사용된 배합의 슬럼프 플로우 시험결과(표 2.36)를 보면 기준동에 사용되는 일반 모르타르는 KS L ISO 679에 따라 시멘트와 모래의 비를 1:3 중량비와 물결합재비(W/B) 17.5%의 배합으로 제작하여 슬럼프 플로우 측정하였고 측정값

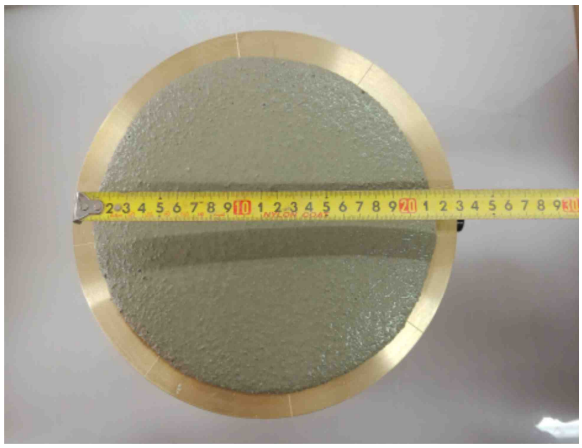
은 180㎜로 측정되었다. 시험동 배합은 1차, 2차, 3차 순으로 물결합재비(W/B)를 40%, 30%, 20%로 감소시키고 각 배합의 시멘트, 다공질 장석 44㎛, 다공질 장석 1㎜의 혼입율에 따라 배합하여 슬럼프 플로우 시험을 수행하였다. 시험동 배합의 슬럼프 플로우 시험결과 1차배합, 2차배합, 3차배합 순으로 220㎜, 210㎜, 200㎜ 값으로 측정되었다. 기준동과 시험동의 슬럼프 플로우 측정값은 180-220㎜로 슬럼프 플로우 허용범위 값인 200±20㎜ 범위내로 측정되어 바닥 축열 모르타르 배합 및 시공에 적절한 것으로 판단된다.

표 2.35 자동수평기능 축열층 모르타르 배합비

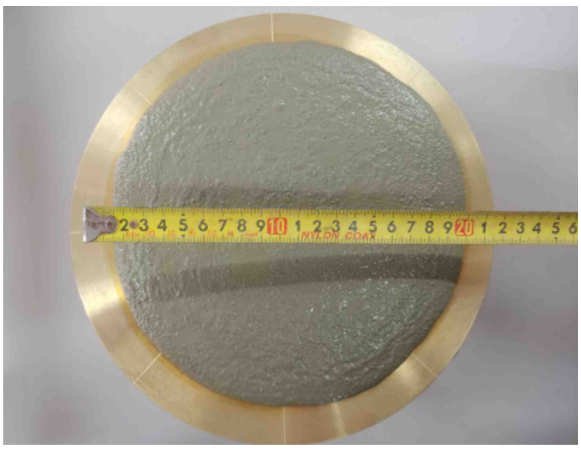
구분		W/B(%)	시멘트(%)	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 1mm(%)	모래(%)	고화제(%)
기준동	일반모르타르	17.5	25.0	-	-	75.0	-
시험동	1차배합비	40	20.0	40	40	-	0.05
	2차배합비	30	20.0	50	30	-	0.05
	3차배합비	20	7.5	17.5	75.0	-	0.05



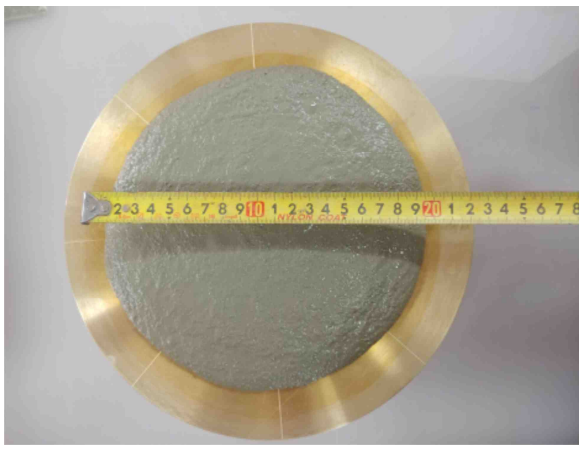
일반모르타르



1차배합비



2차배합비



3차배합비

그림 2.71 타격 후 흐름 분석

표 2.36 모르타르의 유동성 측정결과

	일반모르타르	1차배합비	2차배합비	3차배합비
슬럼프플로우(mm)	180	220	210	200

(4) 소결

모르타르의 건조수축은 시멘트가 물과 수화반응을 하고 남은 수분이 증발하면서 체적의 변화가 발생하면서 발생하는 현상이다. 이는 크리프와 더불어 콘크리트나 모르타르 특유의 문제로 콘크리트의 물성 중에서도 강도 다음으로 중요한 성질의 하나로 인식되어 왔다. 시멘트 등의 결합재는 건조과정에서 체적의 1-3% 정도 수축현상이 발생하며, 이때 균열이 발생할 가능성이 매우 높아지며 건축물 내장재의 품질저하의 원인이 된다.

시멘트의 구성화합물 측면에서 보면 건조 수축량은 시멘트 조성화합물 속의 C3A의 양에 따르며 건조수축 가감이 되며, 또한 시멘트의 분말도도 건조수축에 영향을 미치며, 시멘트의 분말도가 커지면 건조수축이 증가하는 것으로 나타났다. 물은 콘크리트 내부수분의 변화에 의해 일어나는 건조수축에 있어서 가장 중요한 인자로 물시멘트비(W/C)비가 낮을수록 수축률이 적고, 높을수록 수축률이 많다. 그러하기에 최적의 배합비 도출이 중요하며, 또한 기상 조건에 따라 적정의 배합비라 할지라도 건조수축이 생기는 경우도 발생한다.

본 연구에서 건조수축을 저감하는 용도로 석고를 사용하며, 석고는 단사정계(單斜晶系)에 속하는 광물로 화학식은 $CaSO_4 2H_2O$로써 물을 포함하는 결합재로 이용되고 있다. 또한 석고는 시멘트의 응결 지연제로 많이 쓰고 있고 황산염에 대한 저항성을 크게 향상시키고 수축감소를 하는 것으로 알려져 있다. 실험에서 건조수축의 수축량을 물리적 변화는 공시체의 길이를 측정하기로 한다. 배합 비에 따른 건조 수축량을 보기위해서 소석회와 석고의 비율과 물결합재비(W/B)를 조절하여서 배합하였다. 공시체 케이스에 일정량의 시료를 담아 길이를 측정 후, 24시간이 지난 뒤 또다시 길이 측정을 하여 수축량을 측정하였다.

표 2.31의 구분 A - D는 소석회와 석고의 사용 유무에 따라 건조수축의 변화량을 관찰하기 위해서 제작하였다. 반응의 극적으로 관찰하기 위해 소석회, 석고의 사용량은 10%를 사용하였을 때 길이변화를 관찰하였다.

마. 최적 배합비 산정

(1) 바닥 축열 모르타르

바닥 축열 모르타르 최적 배합비 도출을 위하여 1차, 2차, 3차 배합비로 바닥 축열 모르타르를 배합하였다. 각 배합비 별로 실대형 모형 시공을 통해 바닥 축열 모르타르의 열적 특성분석과 압축강도시험을 수행하였다.

바닥 축열 모르타르 압축강도는 다공질 장석과 시멘트 혼합비율에 따라 물결합재비(W/B)를 1차, 2차, 3차 순으로 점차적으로 감소시켜 배합하였다. 압축강도 시험결과 1차 배합은 16.1MPa, 2차배합은 17.9MPa, 3차 배합은 20.3MPa로 측정되었고 분체량을 감소시켜 물결합재비(W/B)가 가장 작은 3차 배합이 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났다(표 2.37).

표 2.37 바닥 축열 모르타르 배합표

구분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 1㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/B (%)	압축강도 (MPa)
1차	40	40	20	0.05	40	16.1
2차	50	30	20	0.05	30	17.9
3차	17.5	75	7.5	0.05	20	20.3

실대형모형 시험동의 1차, 2차, 3차 바닥 축열 모르타르와 기준동의 바닥 일반 모르타르 축열시험결과 1차 시험에서는 34.4℃의 가열까지 사용된 시험동의 소비전력은 8.74kWh였고 기준동의 소비전력은 9.84kWh로 시험동의 소비전력 감소율은 약 11.2%로 나타났다. 2차 시험에서는 39.2℃의 가열까지 사용된 시험동의 소비전력은 11.04kWh였고 기준동의 소비전력은 12.48Wh로 시험동의 소비전력 감소율은 약 11.5%로 나타났다. 3차 시험에서는 25.0℃의 가열까지 사용된 시험동의 소비전력은 21.62kWh였고 기준동의 소비전력은 25.22kWh로 시험동의 소비전력 감소율은 약 14.26%로 나타났다. 1차, 2차, 3차 시험에서의 소비전력 감소율은 각 11.2%, 11.5%, 14.26%로 유사한 것으로 나타났으며 3차 배합에서는 다공질 장석 44㎛, 시멘트 소비량 감소로 인하여 바닥 축열 모르타르 제작에 필요한 재료 비감소를 기대할 수 있다(표 2.38).

표 2.38 바닥 모르타르 가열 실험시 소비전력

구분	바닥온도 (℃)	소비전력 (kWh)		소비전력 감소율 (%)
		기준동	시험동	
1차	34.4	8.74	9.84	11.2
2차	39.2	11.04	12.48	11.5
3차	25.0	25.22	21.62	14.26

1차, 2차 실대형모형 시공에서는 다공질 장석 44㎛ 분체를 다량 혼입하여 시공완료 후에는 그림 2.72의 좌측과 중앙의 그림과 같이 분진과 균열이 발생하였다. 다공질 장석 44㎛ 분체 혼입량을 줄인 3차 실대형모형 시공에서는 그림 2.72의 우측그림과 같이 시공 후 상태가 양호한 것으로 판단된다. 다공질 장석 44㎛ 혼입율 17.5%, 다공질 장석 1㎜ 혼입율 75%, 시멘트 혼입율 7.5%, 고화제 혼입율 5%, 물결합재비(W/B) 40%의 3차 배합이 압축강도, 축열성능, 재료비감소, 시공상태 등을 고려할 때 최적 배합비로 판단된다.



그림 2.72 시공 시 발생한 분진(좌측), 균열(중앙)과 최적 배합비로 시공된 사진(우측)

(2) 경량 벽체 블록

경량 벽체 블록의 최적 배합비 도출을 위하여 1차, 2차 배합으로 블록을 제작하였다. 각 배합별 실대형모형 시공을 통한 경량 벽체의 압축강도시험과 경령벽체 시공 후 축열시험을 수행하였다.

경량 벽체 블록 압축강도는 다공질 장석과 물시멘트비(W/C), PVA섬유 혼입에 따라 1차, 2차 배합으로 제작하여 압축강도시험을 수행하였다. 압축강도 시험결과 1차 배합은 4.49MPa, 2차 배합은 5.72MPa로 다공질 장석 44㎛ 분체 혼입량을 35%에서 20%로 감소시키고 PVA섬유를 0.25% 혼입한 2차 배합은 1차 배합에 비해 27.4% 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 실대형모형 시험동의 1차, 2차 경량 벽체와 기준동의 시멘트 벽돌의 축열시험결과 1차 시험에서는 11.81℃의 가열까지 사용된 시험동의 소비전력은 8.28kWh 였고 기준동의 소비전력은 16.50 kWh로 시험동의 소비전력 감소율은 약 49.83 %로 나타났다. 2차 시험에서는 15.67℃의 가열까지 사용된 시험동의 소비전력은 8.28kWh 였고 기준동의 소비전력은 16.56 kWh로 시험동의 소비전력 감소율은 약 50.0 %로 나타났다. 1차, 2차 시험에서의 소비전력 감소율은 각 49.83%, 50.0%로 2차 배합의 소비전력 감소율이 더 높은 것으로 나타났다.

1차 경량 벽체 블록은 제작 후 탈형과정에서 블록의 표면 탈락과 균열이 발생하였고(그림 2.73 좌) 이러한 문제점을 보완하고자 2차 경량 벽체 블록에서는 그림 2.73과 같이 PVA섬유를 혼입하여 기존 블록의 표면 탈락과 균열을 방지하여 다량의 양호한 경량 벽체 블록을 제작할 수 있었다.



그림 2.73 표면탈락과 균열이 발생한 블록(좌)과 최적배합으로 제작된 블록(우)

다공질 장석 44㎛ 혼입율 20%, 다공질 장석 0.2㎜ 혼입율 50%, 시멘트 혼입율 30%, 고화제 혼입율 0.05%, 물시멘트비(W/C) 80%의 2차 배합이 압축강도, 축열성능, 경량 벽체 블록 제품상태 등을 고려할 때 최적 배합비로 판단된다(표 2.39-2.40).

표 2.39 경량 벽체 모르타르 배합표

구분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 0.2㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	PVA섬유 (%)	W/C (%)	압축강도 (MPa)
1차	35	35	30	0.05	-	75	4.49
2차	20	50	30	0.05	0.25	80	5.72

표 2.40 경량 벽체 가열 실험 시 소비전력

구분	벽체온도 (℃)	소비전력 (kWh)		소비전력 감소율 (%)
		기준동	시험동	
1차	11.81	8.28	16.50	49.83
2차	15.67	8.28	16.56	50.00

(3) 천장 마감재

천장 마감재의 최적 배합비 도출을 위하여 휨인장시험과 천장 마감재 시공 후 축열시험을 수행하였다. 천장 마감재의 휨인장강도는 3.90MPa로 목표 휨인장강도인 1MPa 이상을 상회하는 것으로 나타났으며 천장 마감재 시공 후 축열시험에서는 10.2℃의 가열까지 사용된 소비전력은 22.08kWh 였고 기준동의 소비전력은 25.88kWh로 시험동의 소비전력 감소율은 약 14.7%로 나타났다. 측정된 천장 마감재의 휨인장강도는 목표 휨인장강도를 상회하고 있으므로 천장 마감재를 시공한 시험동의 소비전력이 감소하는 것으로 나타나 최적 배합비로 판단된다.

표 2.41 천장마감재 배합표

구분	다공질 장석 44㎛(%)	다공질 장석 0.2㎜(%)	시멘트 (%)	고화제 (%)	W/C (%)	인장강도 (MPa)
최종	20	60	20	0.05	100	3.90

표 2.42 천장마감재 가열 실험시 소비전력

구분	천장온도 (℃)	소비전력 (kWh)		소비전력 감소율 (%)
		기준동	시험동	
최종	10.2	22.08	25.88	14.7



그림 2.74 기준동 천장(좌)과 시험동 천장(우)

(4) 소결

본 단원에서는 바닥 축열 모르타르, 경량 벽체 블록, 천장 마감재 각 배합의 압축강도, 휨인장강도, 축열 특성 및 에너지 효율 등을 고려한 최적배합비 도출에 관한 내용을 다루고 있다. 바닥 축열 모르타르에서는 다공질 장석 44㎛ 혼입율 17.5%, 다공질 장석 1㎜의 혼입율 75%, 시멘트 혼입율 7.5%, 고화제 혼입율 0.05%, 물결합재비(W/B) 20%의 3차 배합비가 압축강도 20.3MPa, 전력 감소량 14.26%의 결과로 바닥 축열 모르타르의 최적배합비로 판단된다. 경량 벽체 블록에서는 다공질 장석 44㎛ 혼입율 20%, 다공질 장석 0.2㎜의 혼입율 50%, 시멘트 혼입율 30%, 고화제 혼입율 0.05%, PVA섬유 혼입율 0.25%, 물시멘트비(W/C) 80%의 2차 배합비가 압축강도 5.72MPa, 전력 감소량 50.00%의 결과로 경량 벽체 블록의 최적배합비로 판단된다. 천장 마감재에서는 다공질 장석 44㎛ 혼입율 20%, 다공질 장석 0.2㎜의 혼입율 60%, 시멘트 혼입율 20%, 고화제 혼입율 0.05%, 물시멘트비(W/C) 100%의 배합비가 인장강도 3.90MPa, 전력 감소량 14.7%의 결과로 천장 마감재의 최적배합비로 판단된다.

바. 실대형 모형

규산염 재료원을 사용하여 제작한 바닥 모르타르 마감용 제품과 경량블록, 천장마감재 및 천장패널에 대한 성능실험, 그리고 일반 건축물의 마감재와 비교 분석을 위해서 충청북도 충주시 대소원면 217(그림 2.75)에 위치한 단열 패널 건축물에 천장을 증축하였다. 내부에는 12m^{2}의 크기로 실대형 모형 시험동과 기준동을 시공하였고 시험동은 규산염 재료원을 사용한 모형이고, 기준동은 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 건축 자재를 사용하여 시공했는데, 온도, 소음, 진동에서 시험동과 비교가 될 모형이다.



그림 2.75 실대형 모형 부지(좌: 부지 위성사진, 우: 실대형모형 실험동)

(1) 모형제작

(가) 시공 준비

실대형 모형 실험동의 제작에 고려되어야 할 사항들은 층간소음, 진동, 에너지절감(축열성) 등 실제 사람들이 주거하는 공간에서 생기는 문제점들을 개선할 수 있도록 해야한다는 점이다. 또한, 실대형 모형이 실제 사람이 거주하는 층고 높이로 지어져야 하고, 하부의 소음과 진동을 측정할 수 있도록 공간을 약 50cm 정도의 필요하다.

이러한 조건을 충족하면 대략 3m의 층고가 계산된다. 그래서 실험동의 높이를 2.8m로 하여 을 시공하기엔 층고가 부족하여 증축을 실시하였다(그림 2.76).



그림 2.76 실대형 모형 실험동 증축 과정

한편, 실험동 내부에 실대형 모형 시공하는 데 있어서 바닥부 기초의 불균질성으로 인해 모형실험 결과의 차이가 발생할 수 있으며, 시공으로 인한 부등 침하의 우려가 있으므로 외부 효과를 최소화하기 위하여 하부 지반의 균일화와 기초보강을 위해 바닥 그라우팅을 선행적으로 시공하였다(그림 2.77). 그림 2.78의 a에서 보강 시공할 부위를 천공하고 그라우팅제를 삽입할 파이프를 시공하여 고압 분사를 위한 준비를 한 후, b와 같이 충전재를 배합비에 맞게 혼합하여 건비빔 후 물과 함께 배합하였다. 그라우트는 땅속의 공극을 메우는 역할을 하기에 고압의 분사장치를 별도로 필요하므로 고압 펌프를 사용하여 분사를 한다(c). 그림 2.78 d는 그라우트 채움이 끝난 후 충전용 파이프를 제거하고 바닥 마감을 한다.

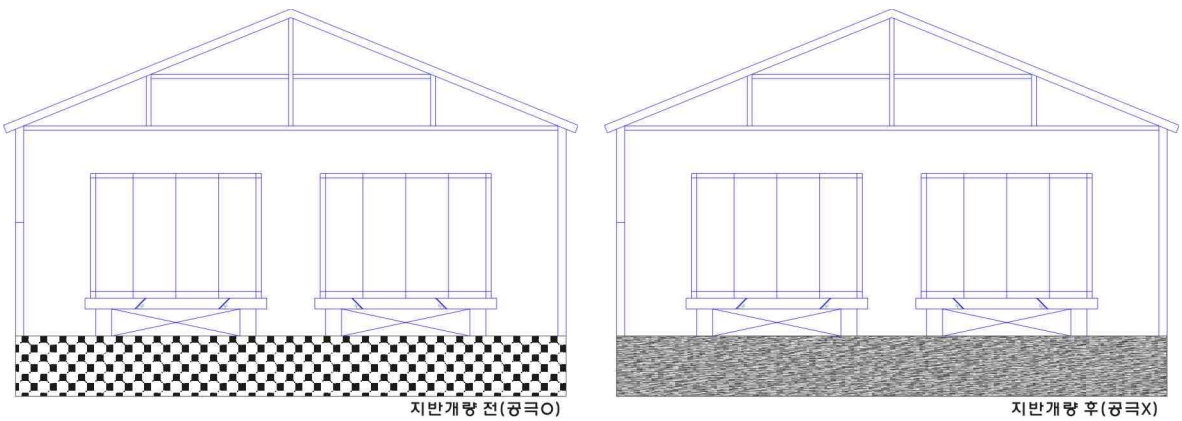


그림 2.77 그라우트 전후의 개략도



(a) 천공



(b) 충전재 혼합



(c) 주입 펌프설치



(d) 충전 완료

그림 2.78 바닥 기초 그라우트

(나) 모형의 규격 및 설계도

그림 2.79와 그림 28.0은 실대형 모형의 설계도이다. 열전도 특성과 에너지 사용량을 평가하기 위한 실대형 모형의 외부 온도 영향을 줄이기 위해 높이 3.5m 면적 80m^2 넓이의 경량 단열패널 컨테이너를 시공하였고, 내부에 가로×세로×높이를 3m×4m×3m으로 하여 무량판구조의 철근콘크리트 모형 2개 동(기준동과 시험동)을 제작하였다. 모형의 바닥과 기둥, 천장은 국토교통부 기준에 따라 두께 200mm의 철근콘크리트조로 제작하였고 벽체는 150mm 두께의 단열패널로 제작하여 내부의 온도가 보존되도록 시공하였다.

실험은 부분적으로 바닥 마감재의 비교 실험을 시작으로 바닥 마감재와 + 비내력 벽체를 비교하는 것으로 마무리된다. 바닥의 비교실험을 위해서 패널 벽체를 시공하였고 바닥 + 벽체의 비교를 위해서 벽체를 시공하였다. 벽체간의 축열, 소음, 진동 실험을 위해 패널벽을 해체하고 시험동은 다공질 장석을 사용한 경량 벽체블록을 시공하였으며, 기준동은 시멘트 벽돌을 시공 후 미장 마감하였다. 시험동과 기준동의 시공은 LH공사 시방 기준을 따랐다.

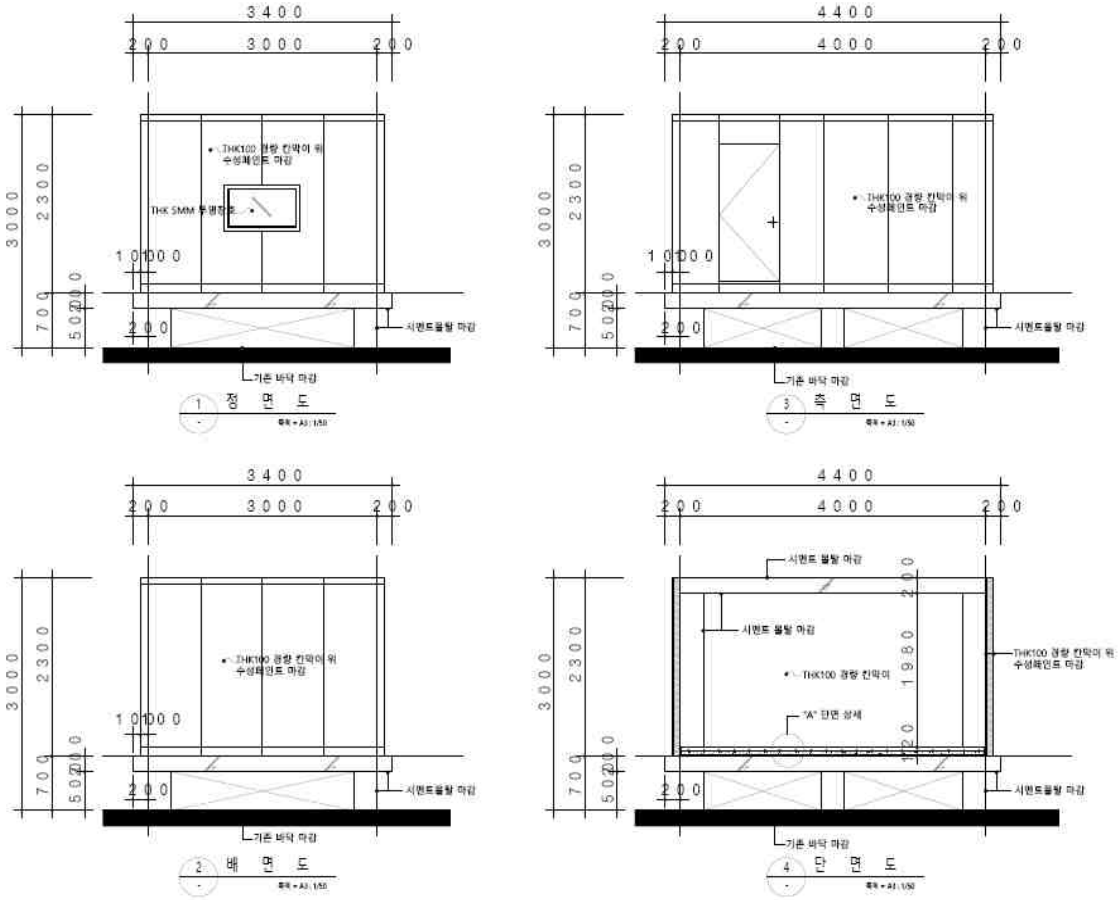


그림 2.79 실대형 모형 (정면도, 측면도, 배면도, 단면도)

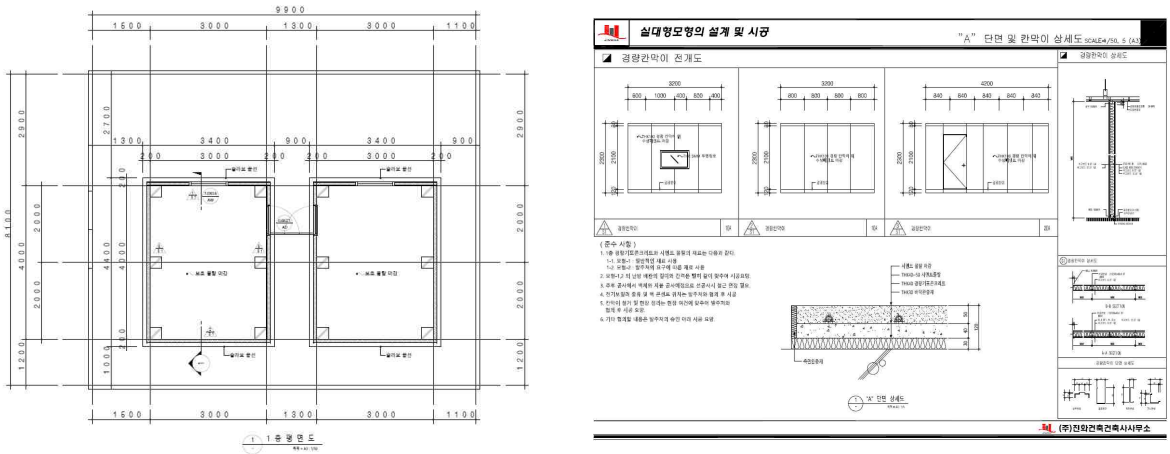


그림 2.80 실대형 모형 설계도면(좌: 평면도, 우: 패널 설계도 및 바닥 단면도)

(2) 실험동 및 기준동 제작

다공질 장석의 축열성, 소음, 진동, 에너지 절감율의 정량적 평가를 위해 실대형 모형 2개동을 무량판구조로 설치하였다. 그림 2.81-2.86은 실험동 및 기준동의 하부구조를 제작하는 과정을 단계적으로 나타낸 것이다.

일반적으로 건축물의 구조의 종류로는 벽식구조, 라멘구조, 무량판구조가 가장 많이 사용하고 있지만 사용 목적에 따라 방법이 달라지기도 한다. 이 연구에서는 단층 건물의 바닥, 벽체, 천장의 시험이 필요한 실대형 모형의 특수성을 고려하여 기둥+슬래브 구조로 되어있는 무량판구조를 사용하여 시공하였으며, 라즈베리파이와 아두이노로 온도센서, 소음진동의 정밀 관측을 가능하도록 제작하였다. 건물의 하부에는 기초지반의 온도 영향을 줄이고 소음과 진동을 측정하기 위한 공간을 조성하기 위하여 지면으로부터 50cm 높이로 이격하였다. 두 개의 실대형 모형 중 하나의 모형은 주택시공기준의 배합비에 따라 축열층을 시공하였고(기준동), 다른 하나는 다공성 장석을 이용한 축열층을 제작하였다(시험동). 축열층이 완전히 건조된 후 온수관을 통한 가열과 냉각실험을 실시하였고 시간적, 공간적 온도변화를 토대로 축열, 열전도율, 단열효과를 검증하였다.



그림 2.81 ①단계 하부 거푸집 조립



그림 2.82 ②단계 하부 거푸집 조립 및 기초 철근 배근



그림 2.83 ③단계 수직 거푸집 조립 및 철근 배근




그림 2.84 ④단계 콘크리트 타설 및 양생




그림 2.85 ⑤단계 기둥 거푸집 조립




그림 2.86 ⑥단계 상부 슬래브 타설 및 양생

(3) 난방 및 냉방 설비

축열 실험을 위해서 경량콘크리트 위에 온수파이프를 시공하여 전기보일러와 연결하여 시험하였다. 시험동과 기준동은 동일 규격의 전기보일러를 사용하였으며, 각각 독립된 전기를 사용하였다. 시험동에서는 다공질 장석을 골재로 사용한 모르타르 마감을 하고, 기준동에서는 시중에 판매 중인 레미탈을 시공하였다(그림 2.87). 전기보일러를 이용한 가열실험과 반대로 이동식 에어컨을 이용하여 냉방 실험을 진행하였다. 이동식 에어컨은 동일규격의을 사용하여 소비전력을 관찰하였고 사용된 에어컨의 냉방능력은 9,000-10,000 BTU / 2640W이며, 소비전력은 1135W, 제품크기는 349×381× 749mm (W×D×H)이고 온도설정은 17-30℃ 사이로 설정이 가능하다. 일반 에어컨은 환풍기가 건물의 외부에 설치되어 뜨

거운 공기를 외부로 보내는 시스템으로 되어있지만 연구에 사용한 이동식 에이컨은 본체 내부에 환풍 시스템이 연결되어 있어서 본체 뒤쪽에 송풍구를 연결해야 뜨거운 공기를 밖으로 배출해야 되는 번거로움이 있다. 하지만 본체를 한 공간에 배치하지 않고 이동할 수 있다는 장점이 있어 본 연구에 채택하였다(그림 2.88).



그림 2.87 축열실험 보일러(좌: 온수파이프 설치, 중:보일러 설치, 우: 적산전력계 설치)

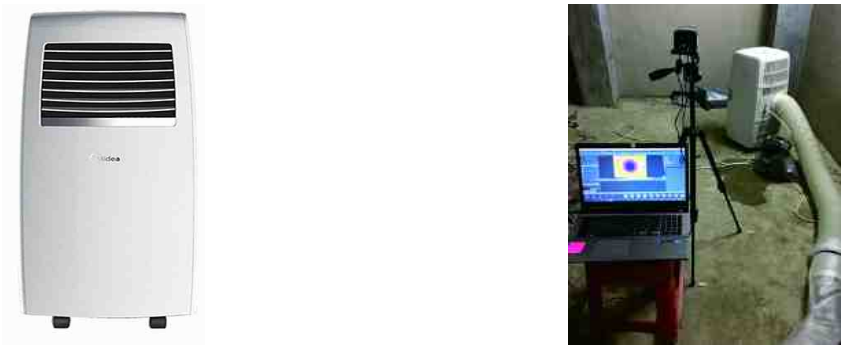


그림 2.88 냉방 실험 (좌: 이동식 에이컨, 우: 냉방기 설치 운용)

(4) 소결

본 연구에서는 단순히 실험실에서 배합만을 가지고 강도 측정하고 축열특성을 분석을 하는 것에서 그치지 않고, 실대형 모형 2개동을 시공하여 건설재료원의 성능평가를 실시하였다. 시공의 기준은 LH 공사의 시방서 기준을 따라 시공을 진행하였고 바닥 모르타르를 평가 하기 위해서 동일 사양의 전기 보일러 2개를 사용하여 시험동과 기준동에 설치를 하여 독립적으로 전기를 배분하고 적산전력계를 이용하여 전기사용량을 측정하였다. 또한 경량블록을 시공할 수 있도록 가변형 단열 패널을 사용하여 철거를 간편하게 하였고, 동시에 시멘트 벽돌 조적과 경량 벽체블록을 조적에 용의하게 만들어서 실험을 진행하였다.

사. 바닥 축열층 실험

(1) 축열층 시공

보통 포틀랜드 시멘트를 이용한 모르타르 축열층(기준동)과 다공성 장석을 이용한 축열층(시험동)의 성능을 비교하기 위해 2개의 실대형 모형의 바닥면에 “소음방지를 위한 바닥충격음 차단구조기준(국토교통부 고시제2015-319호)” 의 바닥 상세단면도(그림 2.89, 좌)를 기준으로 하여 30mm 완충단열재를 시설하고 상부에 KS F 2459의 기준에 맞게 경량기포콘크리트 50mm를 시공하였다(그림 2.89, 우). 재령 2주후 축열과 열전도 실험을 위해

250mm 간격으로 온수관을 설치하고, 시험동과 기준동의 바닥 모르타르를 시공하였다. 기준동은 기성품으로 제조된 레미탈을 구매하여 시공하였고, 시험동은 다공질 장석을 골재로 가공하여 연구에서 도출된 배합비를 사용하여 시공하였다. 온수 공급을 위한 보일러는 2 kW 용량의 전기보일러를 기준동과 시험동에 독립적으로 설치하였고 소비전력을 파악하기 위해 단상 2선식 적산전력계를 보일러와 직접 연결하였다(그림 2.90-2.93).

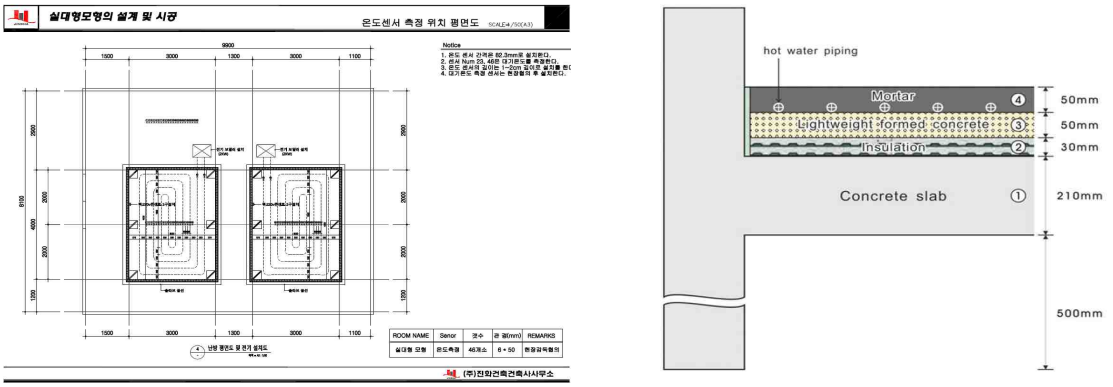


그림 2.89 축열층 설계도면(좌) 및 축열층 단면도(우)



그림 2.90 축열층 시공순서(좌: 단열재/와어어메쉬 시공, 중:배합준비, 우: 재료원 배합)



그림 2.91 축열층 시공순서(좌: 경량기포 배합, 중:바닥 타설, 우: 천장 타설)



그림 2.92 배관 및 보일러 설치 (좌: 온수배관 설치, 중: 보일러 설치, 우: 적산전력계 설치)



그림 2.93 바닥 모르타르 타설(좌: 배합믹싱, 중: 기준동 타설, 우: 시험동 타설)

콘크리트 슬래브 상부에 단열재와 경량기포 콘크리트를 시공하고 14일 후 온수 배관을 설치하였다.

1, 2차 모두에서 기준동은 모래와 보통 포틀랜드 시멘트를 3:1 비율로 배합한 모르타르를 제작하고 두께 50mm로 시공하였다. 시험동은 평균 입경 1.0mm 크기로 제작한 다공성 장석 모래와 44㎛ 입경의 규산염 분말과 시멘트를 2:1로 혼합하여 분말 바인더를 만들고 이를 장석 모래와 3:1 비율로 배합하고 0.1%의 수용성 고화제를 첨가한 모르타르를 제작한 후 온수관이 설치된 부분에 50mm 두께로 시공하였다. 동일 실험 조건을 위해 기준동과 시험동은 동시에 시공하였고 재령 28일이 지난 후 축열 및 열전도 특성에 관한 측정을 수행하였다. 축열층은 재료의 배합비를 달리하며 3회에 걸쳐 제작하였고 회차별로 열전도 실험을 수행하였다.

다공성 장석의 최적 배합비 산정을 위해 1차 실험에 사용한 축열층(단열재 + 경량기포 + 바닥 모르타르)을 제거한 후(그림 2.94) 새로운 배합비로 모르타르를 제작하여 1차와 같은 방법으로 축열층을 재시공 하였다(그림 2.95). 시험동과 기준동의 실대형 모형의 철거 및 재시공은 시험동은 총 3회 시공 했으며, 기준동은 2회 시공하였다.



그림 2.94 실험 후 바닥 철거 및 재시공



그림 2.95 바닥 모르타르 마감 시공

그림 2.96-2.98은 1차, 2차, 3차 모형실험에서 사용한 축열층 모르타르의 배합비이다.

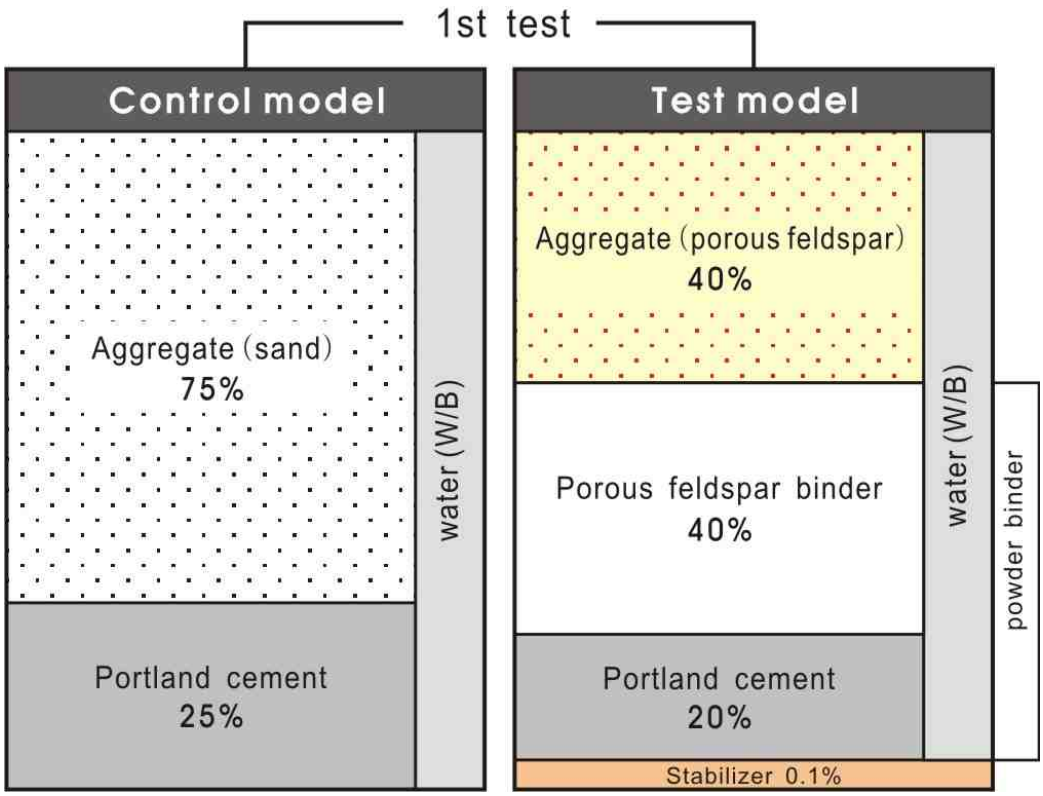


그림 2.96 1차 축열실험에 적용된 배합비

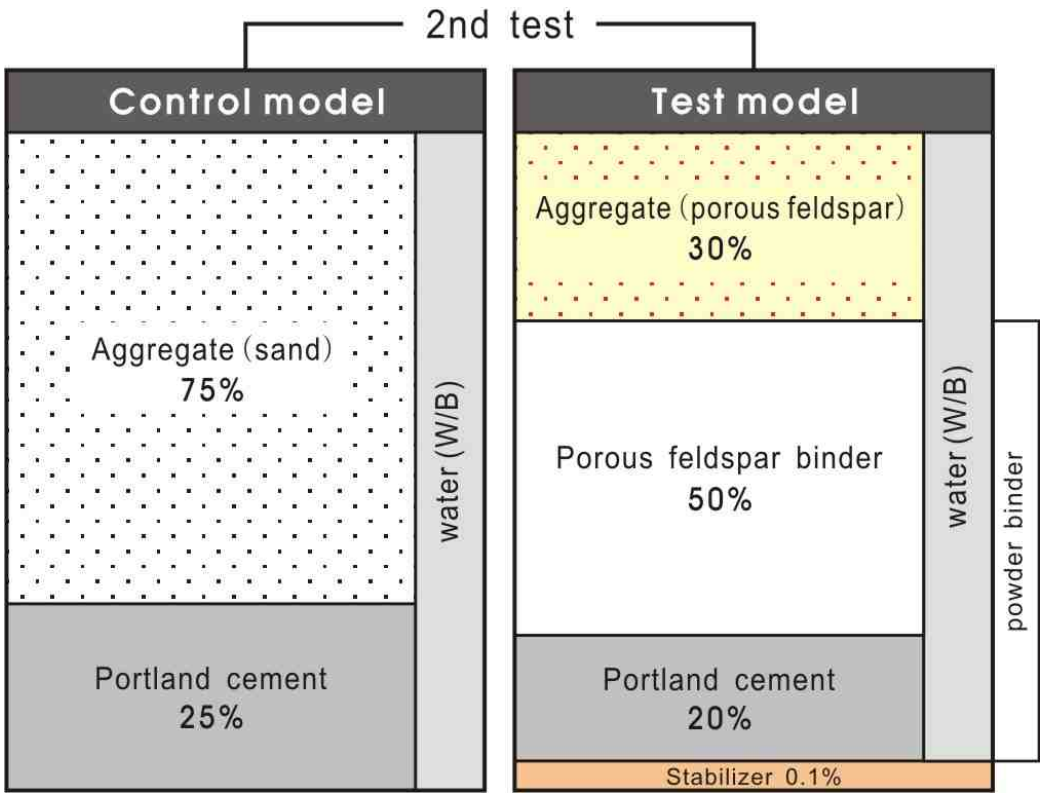


그림 2.97 2차 축열실험에 적용된 배합비

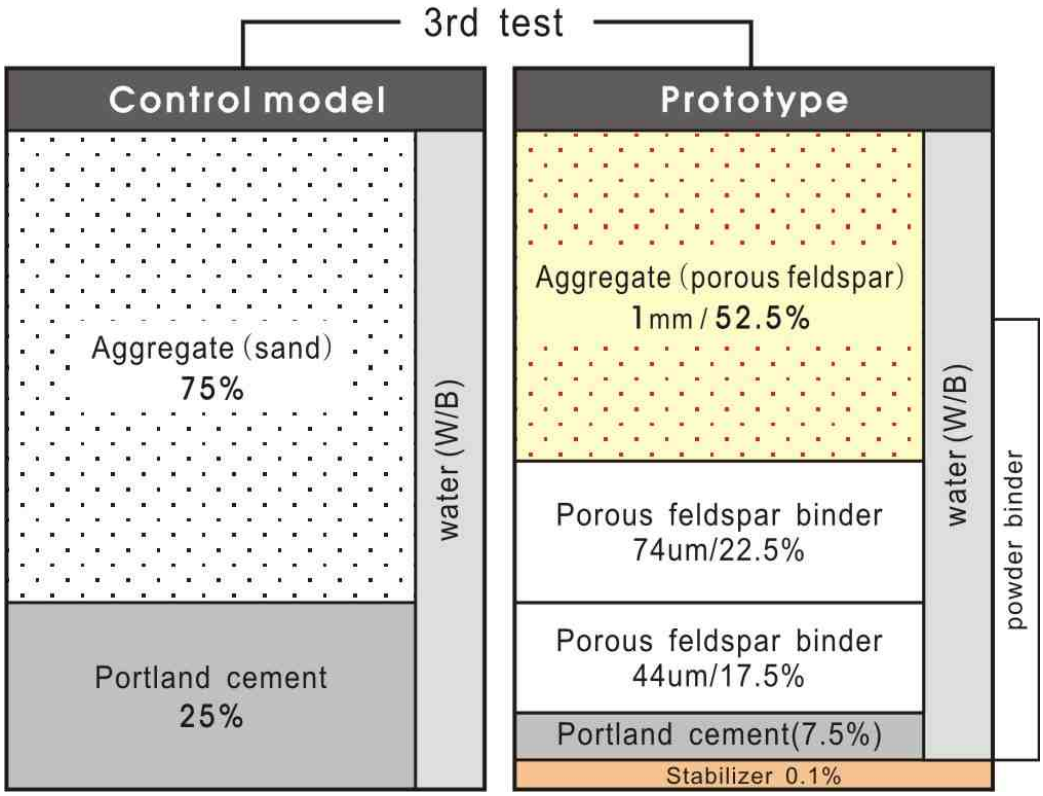


그림 2.98 3차 축열실험에 적용된 배합비

기준동의 배합비는 동일하게 적용하였으며, 시험동은 골재로 사용한 모래 크기의 다공성 장석 비율을 10% 줄이는 한편 분말 바인더의 비율을 증가시켰다. 1차 2차의 시험에서 문제점으로 나타난 점으로 다공질 장석 44㎛ 비율이 높아 물시멘트비(W/C)의 비율이 높아지며, 건조수축이 발생하여 바닥 일부에서 미세 균열이 발생하고, 분진의 많이 발생하였다. 그래서 다공성 장석 1mm와 다공질 장석 74㎛ 크기의 골재를 추가 도입하여 강도 증진에 목표를 두고 최종 배합비로 선정하였다.

(2) 모니터링 시스템 구축

축열층의 표면 온도 관찰을 위하여 적외선 열화상 카메라를 이용하였다(그림 2.99).



그림 2.99 실험에 사용된 FLIR사 열화상 카메라 모델(좌: T335, 중: A615, 우:E85)

일반 모르타르로 시공한 기준동과 다공성 장석을 이용한 시험동 모두에 적외선 열화상 카메라를 설치한 후 축열층의 가열과 냉각과정의 온도변화를 모니터링 하였다. 외적 요인을 최소화하기 위해 카메라와 바닥까지의 거리를 일정하게 유지하였고 초점거리와 시야각을 동일하게 적용하였다. 1차 모형실험에서 열화상 측정은 IR 분해능 320×240픽셀을 가지는 FLIR의 T335 모델을 사용하였고 2차 실험은 IR 분해능 640×480픽셀의 FLIR A615와 334×288의 픽셀을 가지는 FLIR E85 모델을 사용하였다. 표 2.43은 시험에 이용된 열화상 카메라의 제원을 정리한 것이다.

표 2.43 열화상 카메라 제원

구분	T335	A615	E85
열화상 해상도	320 × 240 pixels	640 × 480 pixels	384 × 288 pixels
디지털 카메라	320 × 240 pixels	640 × 480 pixels	640 × 480 pixels
시야각	25 × 19° / 0.4 m	25 × 19° / 0.25 m	24 × 18°
파장대역	7.5-13 ㎛	7.5-14 ㎛	17 ㎛
공간 분해능	1.36 mrad	0.68 mrad	1.09 mrad
열감도	<0.05℃ @ +30℃ /50 mK	<0.05℃ @ +30℃ /50 mK	24° @+30° <40 mK
대상온도범위	-20 ~ +120 ℃ 0 ~ +350 ℃ +200℃ ~ +650℃	-20 ~ +150 ℃ +100 ~ +650 ℃ +300 ~ +2000 ℃	-20 ~ +120 ℃ 0 ~ +650 ℃ +300 ~ +1200 ℃

측정 온도의 범위와 오차는 각각 20-150℃와 0.1℃ 이하로 열전달 실험에 맞도록 구성하였으며, 열화상 카메라는 고정식과 이동식 두가지 방법으로 고정하여 상황에 맞게 사용할 수 있도록 준비하였다(그림 2.100).



그림 2.100 열화상카메라의 촬영 방법 및 촬영 영상(좌: 고정식, 중: 이동식, 우:촬영 화면)

그림 2.101은 원격 모니터링 시스템의 모식도로 IP카메라, 라즈베리파이(Raspberry PI)로부터 시작해 유무선공유기를 거쳐 인터넷을 통해 IBM사 Bluemix 클라우드 서비스로 이용하여 이용자가 개인 컴퓨터나 핸드폰으로 언제 어디서나 쉽게 데이터를 실시간으로 확인할 수 있다는 장점이 있다. 원격계측을 위해서는 라즈베리파이의 확장 GPIO(General Purpose IO) 포트를 이용하여 온도, 진동, 소음 센서(그림 2.102, 표 2.44)를 부착하였고, 매 10초간 측정된 자료는 라즈베리파이의 내부에 장착된 무선랜 카드를 이용하여, 무선공유기를 통해 인터넷망과 연결하고 IBM사의 Bluemix 클라우드 서버에 데이터를 저장하였다. 매 10초마다 보내진 데이터들은 Bluemix 클라우드 서버에서 GUI화(그림 2.103) 하여 Bluemix 내부 보드에서 데이터를 편집하거나 통계, 비교, 분석하도록 개발을 하였다.

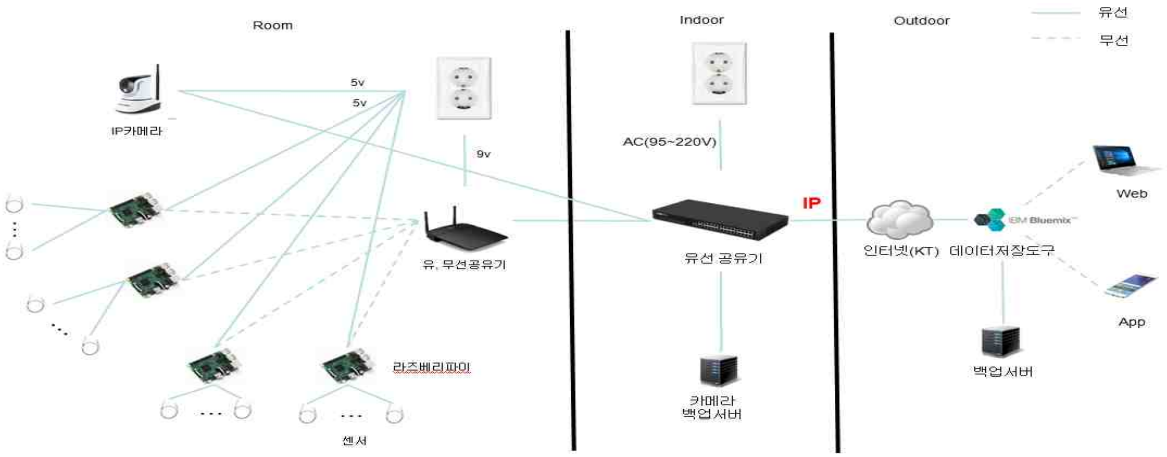


그림 2.101 원격 온도 모니터링 시스템 모식도



그림 2.102 센서 (좌:진동센서 DFR0052, 중: 소음센서 : CA4, 우: 온도센서 DS18B20)

표 2.44 설치된 센서 제원

구분	DFR0052	CA4	DS18B20
공급 전압	3.3 - 5 V	3.3 - 5 V	3.0 - 5 V
크기	22 × 30 ㎜	17 × 32 ㎜	6 × 1,000
감지	미세한 진동감지 가능	가변저항을 이용한 감도 조절 가능	-55 ~ 125 ℃ 온도측정 가능



그림 2.103 IBM사 Bluemix 데이터 서버 화면

온도, 진동, 소음 센서들과 라즈베리 파이를 조립하고 모듈화하여 현장 온수파이프 위에 일정한 간격으로 시공하였으며(그림 2.104) 실시간 CCTV를 이용하여 정해진 시간의 전기 사용량를 측정할 수 있게 제작하였고 또한 정해진 같은 시간대의 온도데이터는 서버에서 온라인으로 관측이 가능하도록 제작하였다(그림 2.105).



그림 2.104 온도계 설치 및 센서 배치(좌: 바닥 타공, 중: 온도계 삽입, 우: 온도계 배치)



그림 2.105 적산전력계와 라즈베리 파이 모뎀(좌:CCTV 화면, 중: 카메라 세팅, 우: 모뎀)

(3) 축열 특성 및 에너지 효율 분석

(가) 열화상 카메라를 이용한 분석

① 전기보일러를 이용한 가열 냉각 실험

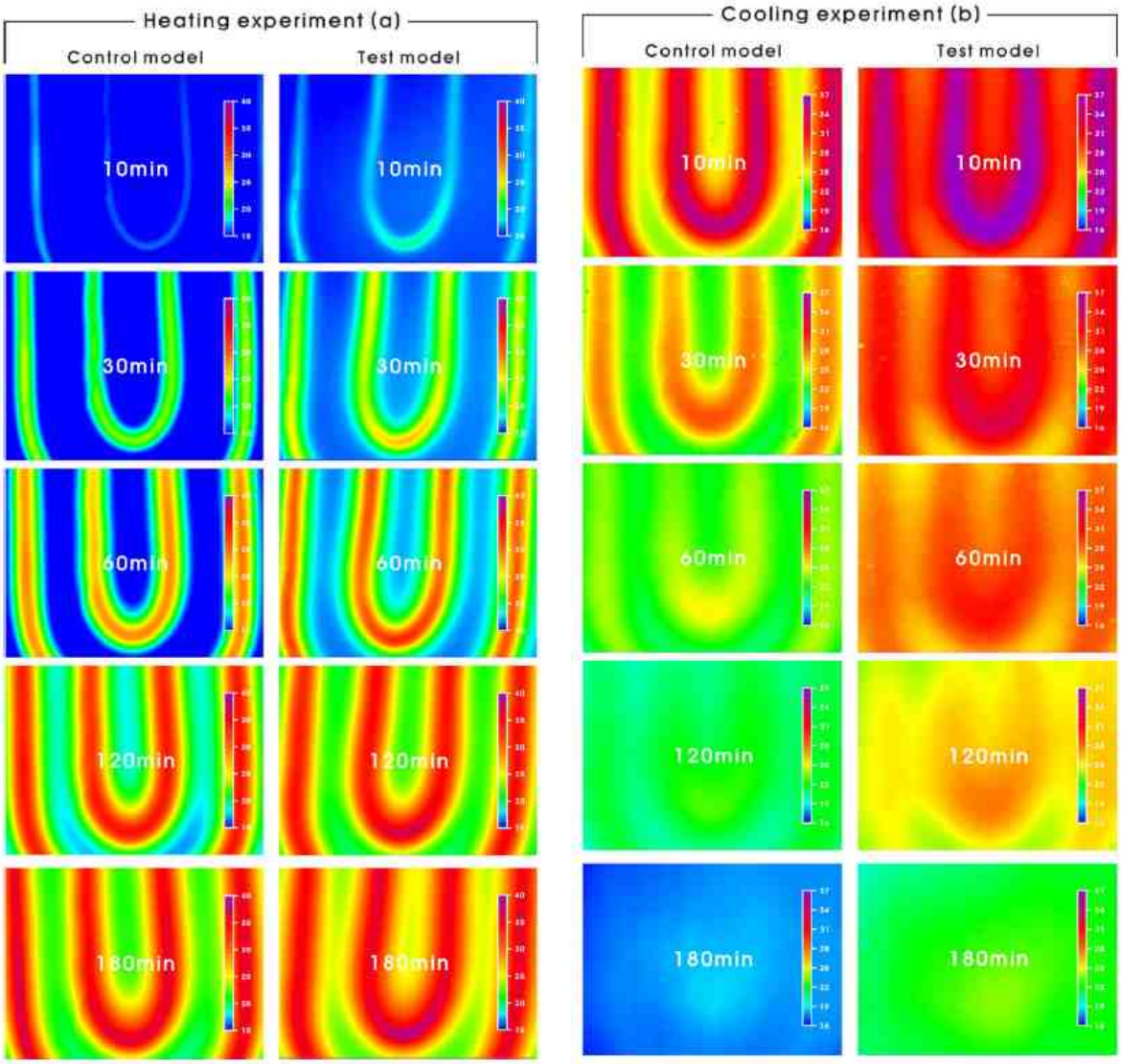
열화상 카메라를 이용한 축열층의 온도변화 측정은 3회에 걸쳐 수행하였다(그림 2.106).



그림 2.106 열화상 카메라를 이용한 온도측정

1차 실험은 재령 28일 후에도 축열층에 남아 있는 수분을 제거하기 위해 3일간 40℃의 온수를 공급하여 건조한 후 24시간 동안 냉각하여 열화상 카메라를 이용하여 실험을 진행하였다. 그림 2.107과 그림 2.108은 가열과 냉각과정의 온도분포를 나타낸 것으로 색도를 동일하게 구성하기 위해 각 픽셀의 온도 자료를 시간대별로 추출하고 크리깅(kriging) 공간

보간법을 이용하여 재구성한 것이다. 그림 2.107의 (a)는 1차 실험은 기준동과 시험동에 55 ℃의 온수를 3시간 공급하였고 축열층의 표면 최고온도가 되었을 때 온수 공급을 차단하고 창호를 개방하여 냉각과정의 온도변화를 관찰하였다. 가열 실험은 축열층 표면이 15 ℃인 상황에서 시작하여 단열을 유지한 상태에서 3시간 동안 온수를 공급하며 실시간 온도변화를 관찰하였다. 그림 2.107의 (a)는 55℃ 온수를 공급한 1차 가열 실험이 온도분포를 나타낸 것으로 가열 후 2분 이내에 관로 주변으로 온도가 상승함에 따라 축열층 내부에 시설된 배관의 실제 규격과 같은 크기의 열화상을 볼 수 있으며 가열 10분 후 다공성 장석을 적용한 모형에서 관로에 인접한 부분의 온도가 2 ℃ 정도 온도가 높아진다. 30분과 60분 후는 관로 사이의 축열제 부분의 온도가 기준동에 비해 증가하는 것을 관찰할 수 있고 가열 2시간 영상에서 기준동과 시험동의 최대온도는 3 ℃ 차이가 발생한다. 기준동의 경우 관로에서 거리가 가장 먼 곡선 부분의 온도는 17.5 ℃ 인 것에 반해 시험동은 22.3 ℃로 4.8 ℃의 차이가 나며 3시간의 가열에서 관로 인접부의 최대온도는 거의 동일하나 관로에서 가장 떨어져 있는 12.5 ㎝ 지점의 온도는 4 ℃ 이상의 차이를 보인다.

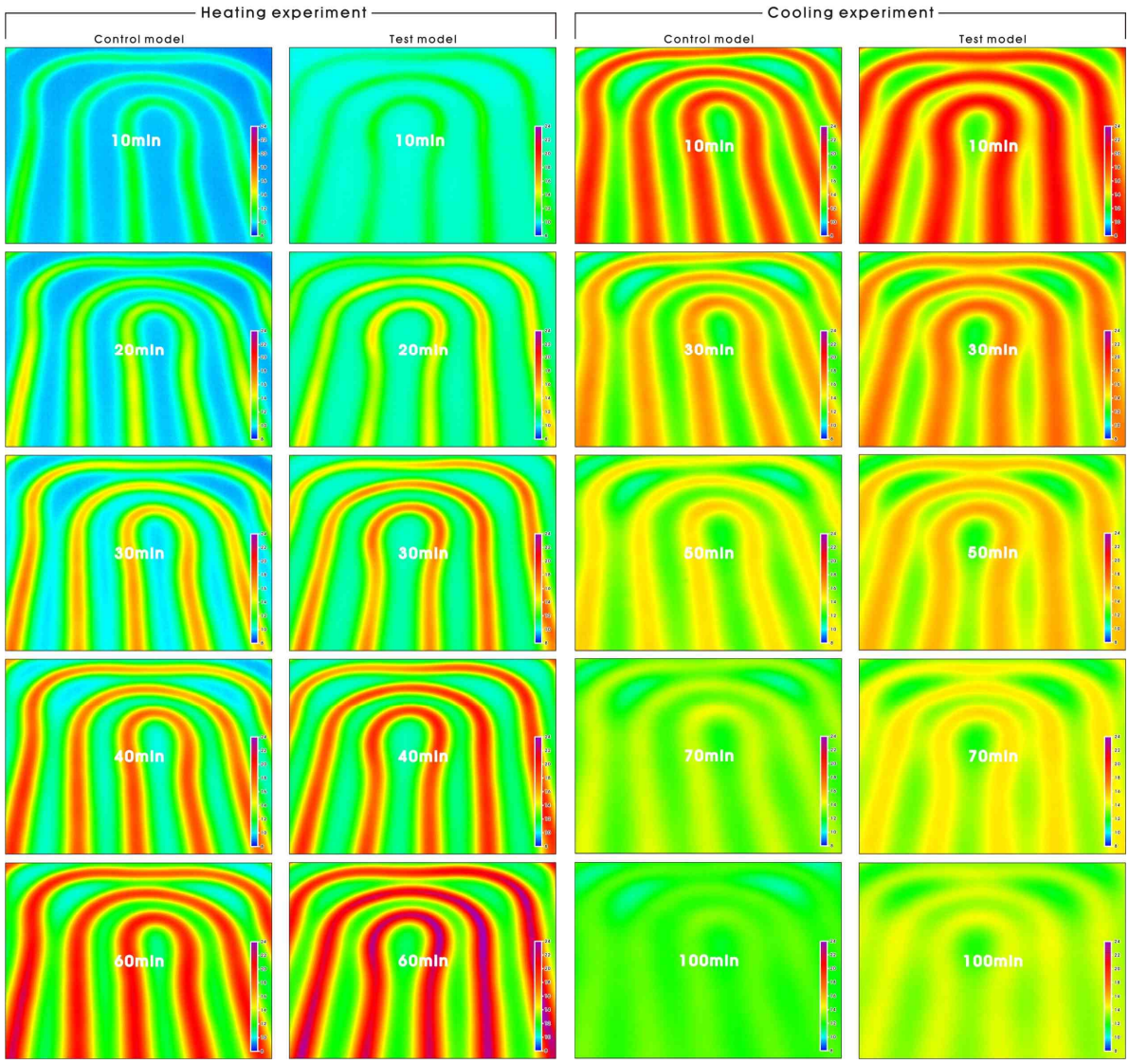


(a) 가열구간 (b) 냉각구간

그림 2.107 55℃ 온수 공급 시 시험동과 기준동 열적특성 변화

만약 지속적으로 온수를 공급한다면 축열제의 온도는 열적 평형 상태에 도달하겠으나 상당한 시간 차이를 예상할 수 있다. 그림 2.107의 (b)는 가열 실험에서 축열층의 최대온도는 37 ℃에 도달하였고, 온수 공급을 중단한 채 창호(단열)를 개방하고 냉각과정의 온도를 관찰하였다. 그림 2.107의 (b)는 냉각 중 온도분포를 나타낸 것으로 기준동은 온수관에서 거리가 먼 곳부터 냉각되며 60 분 후에는 관로 인접부와 관로의 온도가 거의 같아져 관로가 배열된 모양이 불분명해졌다. 냉각 2시간과 3시간 후 축열제의 온도는 평균 21 ℃와 18 ℃로 가열 실험 이전 상태에 근접하였다. 한편 다공성 장석을 적용한 시험동은 축열에 의해 관로 주변의 온도가 기준동에 비해 2 ℃ 이상 높았고, 3시간의 냉각 후에도 23 ℃ 이상의 온도를 보여준다. 시간에 따른 온도변화를 살펴보면 가열 180 분의 기준동 축열층의 온도는 시험동 130 분과 유사하며 50 분의 차이를 보여준다. 한편 180 분 냉각 시 시험동의 온도는 기준동 100 분과 유사하며 80 분 정도 냉각이 지연되는 효과를 나타낸다.

그림 2.108은 2차 실험은 45 ℃의 온수를 공급하며 온도변화를 관찰하였다.

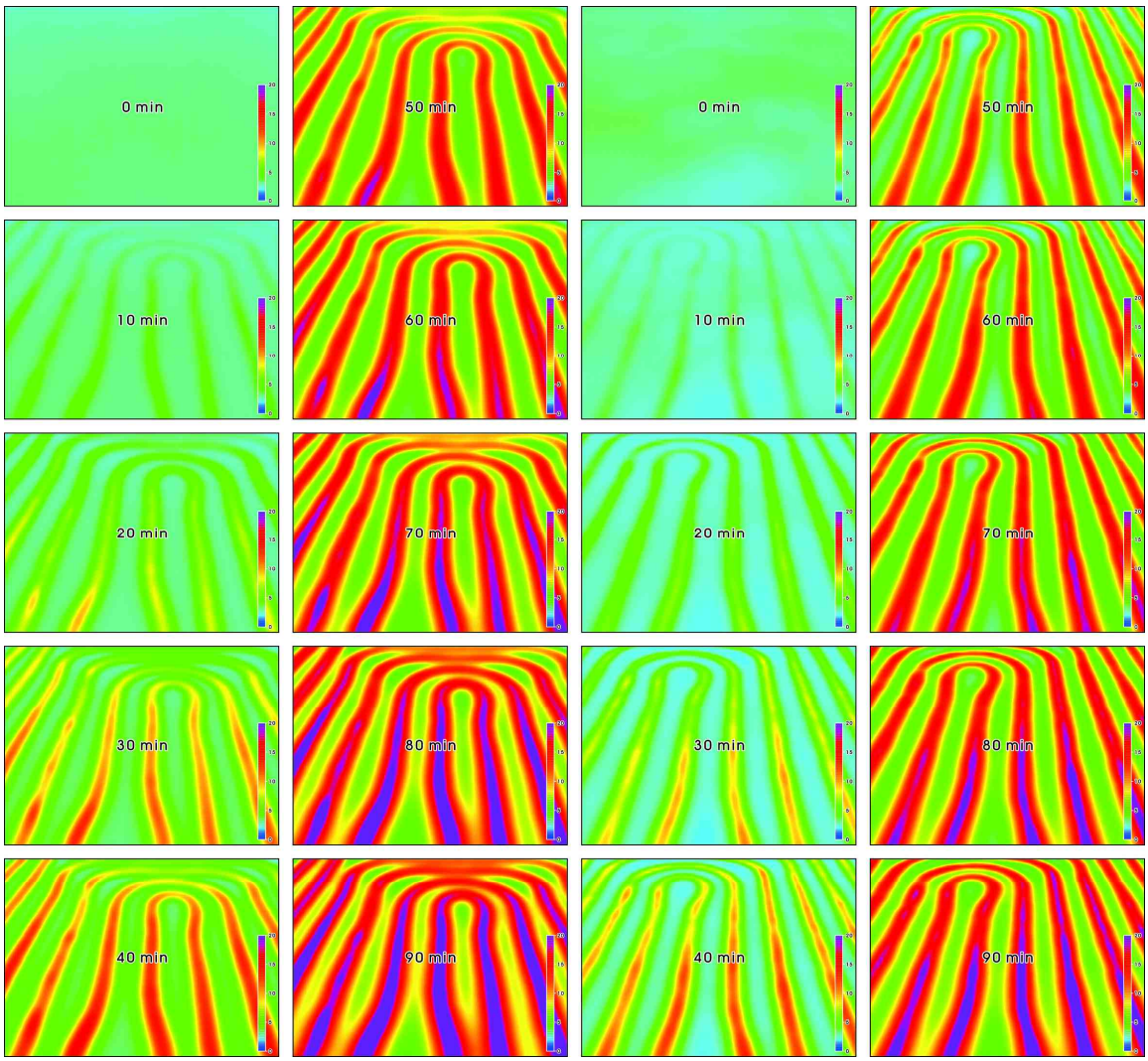


(a) 가열구간 (b) 냉각구간

그림 2.108 45℃ 온수 공급 시 시험동과 기준동 열적특성 변화

실험은 평균 입경이 40 ㎛ 크기의 다공성 장석 분말을 증가시킨 배합비의 축열층과 기준동에 대한 온도변화를 관찰하였고, 2회에 걸쳐 45 ℃와 65 ℃ 온수를 공급하였다. 그림 106은 45 ℃ 온수의 공급과정과 냉각과정의 온도변화를 나타낸 것으로 1차 실험과 같이 같은 조건의 가열과정에서 온도의 상승 속도가 빠르고 온수 배관을 중심으로 열전달 범위가 넓게 나타난다. 기준동의 냉각은 축열층의 냉각으로 배관의 모습이 뚜렷해지며 100 분 이후로는 축열층의 냉각으로 배관의 모습을 볼 수 없다. 반면 시험동은 축열로 인해 배관 주변의 온도가 기준동에 비해 3.5 ℃ 이상 높고 열화상 카메라의 영상에서 배관의 흔적을 분명하게 관찰할 수 있다. 65 ℃의 온수를 공급한 3회 실험의 가열과정은 45 ℃와 유사하였고 냉각과정 중 실대형 모형 외부의 경량패널 건축물의 단열이 개방되어 냉각과정의 온도변화는 제외하였다. 동일한 시간대의 1차 시험동 축열층의 온도와 비교하면 가열과정은 장석 모래 함량이 높은 1차의 시험동 축열층에서 온도가 빨리 상승하여 축열효과가 뛰어난 것으로 판단되며 냉각과정은 1차, 2차 실험의 냉각패턴이 유사하였다.

3차 실험은 앞서 선행으로 실험한 1차, 2차 배합비의 문제점을 개선하는 배합비를 선정하여 시공하였다(그림 2.109).

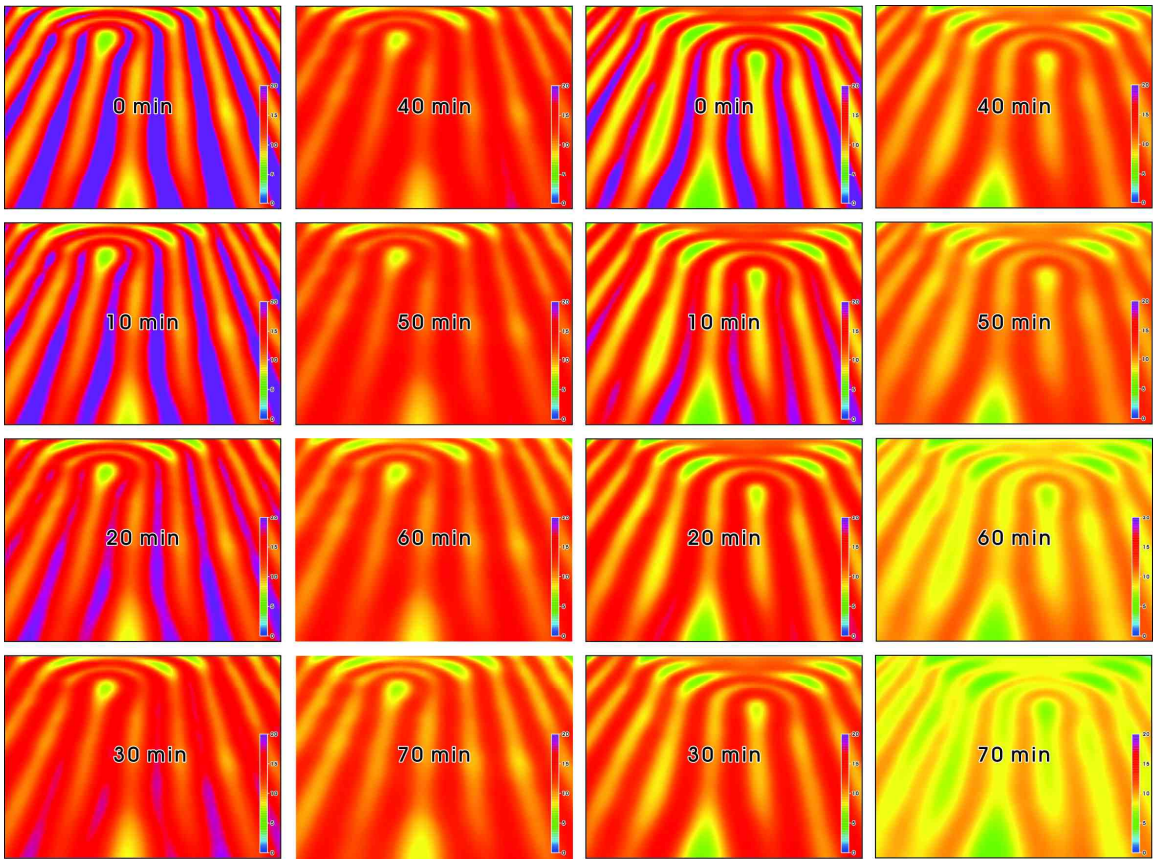


(a) 시험동 가열 (b) 비교동 가열

그림 2.109 50℃ 온수 가열 시 시험동과 기준동 열적특성 변화

1차, 2차에서 많이 사용된 분체 44㎛의 사용비중을 많이 줄여 W/C를 개선하였고 골재를 1mm, 0.2mm 두 가지의 유형으로 공극을 줄여 압축강도를 개선하는 배합비이다. 50℃의 온수를 90분간 가열하여 바닥의 열적특성을 관찰하였다(그림 2.109). 겨울철에 실험을 진행하여 초기 온도는 시험동은 최대온도 3.1℃ 최저온도 2.4℃의 상태로 실험을 진행하였고, 기준동은 최고온도 3.0℃ 최저온도 2.5℃로 두 실험동의 바닥은 같은 상태였다. 가열 후 10분 만에 관로 주변에 온도가 상승함에 따라 배관의 모습이 보이며, 10분당 약 2℃의 온도가 상승하며, 최대온도가 24℃까지 상승하며 관 사이의 온도는 시험동과 기준동의 온도 차이는 약 2℃차이가 난다.

그림 2.110에서는 가열 실험 후 실험동의 문과 창문을 개방하여 냉각 실험을 진행하였다. 0분에서도 파이프 사이의 온도가 가장 낮으며, 시험동의 온도는 11.5℃, 기준동의 온도는 9.2℃ 온도 차이는 2.3℃차이를 보인다. 온도 변화 폭은 온수 파이프 쪽의 경우, 기준동에서는 2.1-2.5℃사이로 온도가 하강하며, 시험동에서는 1.6-1.8℃로 차이가 나며 냉각 시에 장석의 축열 성능이 관찰되었다.



(a) 시험동 가열 (b) 비교동 가열

그림 2.110 50℃ 온수 가열 후 냉각 시 시험동과 기준동 열적특성 변화

② 이동식 에어컨을 이용한 냉각 가열 실험

그림 2.111은 실대형 모형 실험동에 여름철 기온이 가장 높은 시간, 오후 2시를 기점으로 이때 외부의 온도는 38℃일 때 실험을 진행하였다. 시험동과 기준동의 축열층의 시작

온도는 27.6℃로 에어컨의 가동을 하여 180분 가동하고 120분 환기를 진행하였다. 초기 20분 동안 두 실험동에서 급격하게 온도가 하강하여 시험동은 26.2℃, 기준동은 26.6℃로 떨어지면서 0.4℃의 온도 차이를 보이나 60분 이후부터 최대 1.1℃의 온도 차이를 보이며 두 실험동의 온도 차이를 내면서 온도 변화의 가감은 있고 300분에서 온도 차이는 1.2℃로 마감이 되고 이동식 에어컨의 가동을 중단 후, 다시 온도 회복 진행 시, 시험동의 온도 변화가 조금 더 민감 것으로 관찰된다.

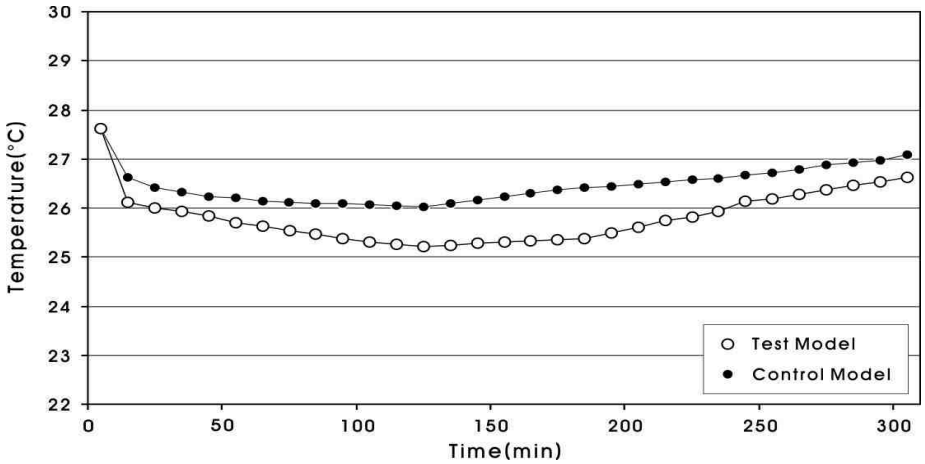


그림 2.111 이동식 에어컨을 사용한 바닥 냉각 시험

(나) 온도센서를 이용한 분석

열화상 카메라에 의한 온도 분석은 바닥층의 전체적인 온도변화를 파악하기 편리하며, 온도센서를 이용하여 바닥층의 축열성능을 다른 시각에서 분석하였다.

그림 2.112는 2일간의 보일러 온수온도 75℃에 맞추어 가열 7시간 냉각 14시간 하여 축열층의 온도변화를 나타내고 있다(표 2.45). 열화상카메라로 분석한 결과와 마찬가지로 다공성 장석의 높은 열전도율 및 축열 성능으로 인하여 실험동의 온도가 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 기준동에 비하여 약 2℃ 높은 온도를 유지하며 가열되고 냉각이 된다.

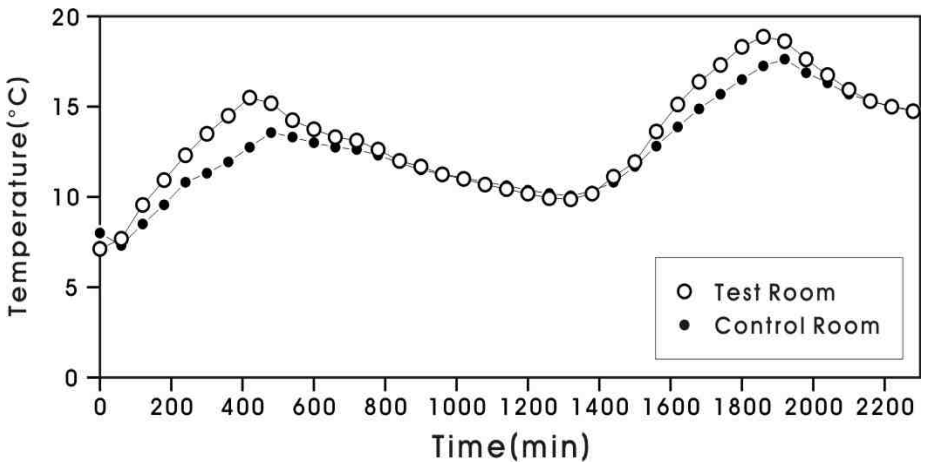


그림 2.112 2일 동안의 가열 냉각 변화 그래프

표 2.45 가열냉각변화

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	8.00	시험동	0	7.13
	60	7.31		60	7.69
	120	8.50		120	9.56
	180	9.56		180	10.94
	240	10.81		240	12.31
	300	11.31		300	13.50
	360	11.94		360	14.50
	420	12.75		420	15.50
	480	13.56		480	15.19
	540	13.31		540	14.25
	600	13.00		600	13.75
	660	12.75		660	13.31
	720	12.63		720	13.13
	780	12.31		780	12.63
	840	11.88		840	12.00
	900	11.50		900	11.69
	960	11.25		960	11.25
	1020	11.06		1020	11.00
	1080	10.81		1080	10.69
	1140	10.63		1140	10.44
	1200	10.38		1200	10.19
	1260	10.19		1260	9.94
	1320	10.06		1320	9.88
	1380	10.31		1380	10.19
	1440	10.81		1440	11.13
	1500	11.69		1500	11.94
	1560	12.81		1560	13.63
	1620	13.88		1620	15.13
	1680	14.88		1680	16.38
	1740	15.69		1740	17.31
	1800	16.50		1800	18.31
	1860	17.25		1860	18.88
	1920	17.63		1920	18.63
	1980	16.88		1980	17.63
	2040	16.31		2040	16.75
	2100	15.69		2100	15.94
	2160	15.31		2160	15.31
	2220	15.00		2220	15.00
	2280	14.81		2280	14.75

그림 2.113은 보일러 내부 물통의 가열된 물의 Input 부분과 Output 부분의 손실되는 온도를 나타내고 있다. 실험은 보일러 가동온도 55℃에 맞추어 약 한 달간 진행되었으며, 최대 온도가 도달하면 자동으로 보일러가 꺼지고 켜지고를 반복하였다. 두 개체군의 그래프 데이터는 Input온도-Output 온도의 차이 값으로 일반 모르타르를 사용한 기준동의 비교군의 경우 온도의 변화의 폭이 크게 관찰되나, 다공성 장석을 사용한 시험동의 경우 기준동과 비교할 때 상당히 안정적으로 온도를 유지하고 있는 것을 알 수 있다(표 2.46-2.47).

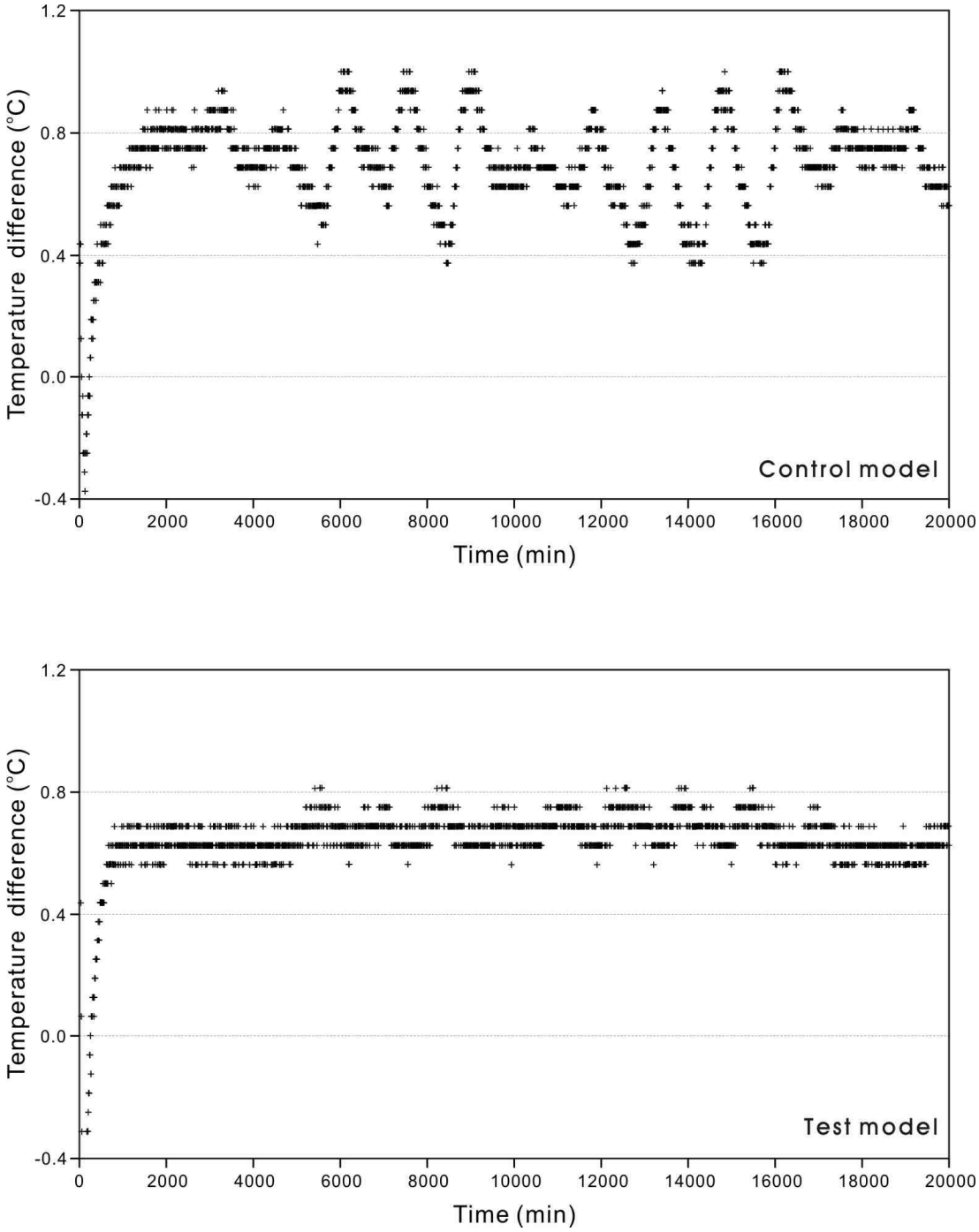


그림 2.113 보일러 배관 출구의 수온의 변화 그래프(상: 기준동, 하: 시험동)

표 2.46 기준동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표(계속)

시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
0	0.375	1680	0.813	3360	0.875	5040	0.687
60	-0.125	1740	0.812	3420	0.812	5100	0.563
120	-0.312	1800	0.812	3480	0.750	5160	0.625
180	-0.250	1860	0.813	3540	0.875	5220	0.562
240	-0.063	1920	0.812	3600	0.750	5280	0.625
300	0.188	1980	0.813	3660	0.687	5340	0.625
360	0.312	2040	0.813	3720	0.687	5400	0.562
420	0.375	2100	0.750	3780	0.750	5460	0.562
480	0.312	2160	0.875	3840	0.688	5520	0.563
540	0.375	2220	0.750	3900	0.625	5580	0.500
600	0.438	2280	0.750	3960	0.688	5640	0.562
660	0.438	2340	0.812	4020	0.688	5700	0.563
720	0.500	2400	0.812	4080	0.687	5760	0.687
780	0.563	2460	0.812	4140	0.687	5820	0.750
840	0.625	2520	0.750	4200	0.687	5880	0.812
900	0.562	2580	0.687	4260	0.750	5940	0.813
960	0.687	2640	0.812	4320	0.750	6000	0.938
1020	0.625	2700	0.813	4380	0.750	6060	0.937
1080	0.688	2760	0.750	4440	0.812	6120	0.938
1140	0.688	2820	0.812	4500	0.750	6180	1.000
1200	0.688	2880	0.750	4560	0.812	6240	0.937
1260	0.750	2940	0.875	4620	0.812	6300	0.875
1320	0.687	3000	0.875	4680	0.750	6360	0.812
1380	0.687	3060	0.875	4740	0.750	6420	0.750
1440	0.750	3120	0.812	4800	0.813	6480	0.750
1500	0.750	3180	0.812	4860	0.687	6540	0.750
1560	0.875	3240	0.812	4920	0.687	6600	0.750
1620	0.687	3300	0.937	4980	0.750	6660	0.750

표 2.46 기준동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표(계속)

시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
6720	0.750	8400	0.500	10080	0.625	11760	0.813
6780	0.687	8460	0.375	10140	0.625	11820	0.875
6840	0.687	8520	0.438	10200	0.625	11880	0.812
6900	0.625	8580	0.500	10260	0.688	11940	0.750
6960	0.688	8640	0.625	10320	0.687	12000	0.812
7020	0.625	8700	0.750	10380	0.813	12060	0.750
7080	0.562	8760	0.812	10440	0.813	12120	0.625
7140	0.688	8820	0.937	10500	0.750	12180	0.625
7200	0.687	8880	0.875	10560	0.687	12240	0.625
7260	0.813	8940	0.937	10620	0.687	12300	0.563
7320	0.812	9000	0.938	10680	0.687	12360	0.625
7380	0.937	9060	0.937	10740	0.687	12420	0.625
7440	0.938	9120	0.938	10800	0.687	12480	0.562
7500	0.937	9180	0.938	10860	0.687	12540	0.562
7560	0.938	9240	0.875	10920	0.687	12600	0.500
7620	0.937	9300	0.812	10980	0.625	12660	0.437
7680	0.937	9360	0.750	11040	0.625	12720	0.437
7740	0.875	9420	0.687	11100	0.625	12780	0.437
7800	0.812	9480	0.625	11160	0.625	12840	0.438
7860	0.750	9540	0.687	11220	0.562	12900	0.500
7920	0.812	9600	0.687	11280	0.625	12960	0.500
7980	0.688	9660	0.625	11340	0.625	13020	0.500
8040	0.625	9720	0.687	11400	0.688	13080	0.625
8100	0.563	9780	0.625	11460	0.625	13140	0.625
8160	0.563	9840	0.687	11520	0.687	13200	0.750
8220	0.500	9900	0.687	11580	0.688	13260	0.812
8280	0.562	9960	0.625	11640	0.750	13320	0.875
8340	0.500	10020	0.625	11700	0.812	13380	0.875

표 2.46 기준동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표

시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
13440	0.875	15120	0.750	16800	0.688	18480	0.812
13500	0.875	15180	0.625	16860	0.688	18540	0.750
13560	0.750	15240	0.625	16920	0.688	18600	0.812
13620	0.750	15300	0.563	16980	0.625	18660	0.750
13680	0.688	15360	0.563	17040	0.688	18720	0.750
13740	0.625	15420	0.500	17100	0.688	18780	0.688
13800	0.563	15480	0.437	17160	0.688	18840	0.750
13860	0.500	15540	0.500	17220	0.625	18900	0.813
13920	0.500	15600	0.438	17280	0.625	18960	0.750
13980	0.438	15660	0.437	17340	0.750	19020	0.812
14040	0.437	15720	0.437	17400	0.812	19080	0.875
14100	0.375	15780	0.500	17460	0.750	19140	0.875
14160	0.375	15840	0.438	17520	0.875	19200	0.813
14220	0.437	15900	0.625	17580	0.813	19260	0.813
14280	0.375	15960	0.687	17640	0.813	19320	0.750
14340	0.438	16020	0.812	17700	0.750	19380	0.750
14400	0.562	16080	0.875	17760	0.812	19440	0.687
14460	0.562	16140	1.000	17820	0.812	19500	0.687
14520	0.687	16200	1.000	17880	0.750	19560	0.687
14580	0.812	16260	0.938	17940	0.688	19620	0.625
14640	0.875	16320	0.937	18000	0.750	19680	0.625
14700	0.937	16380	0.875	18060	0.687	19740	0.625
14760	0.875	16440	0.875	18120	0.750	19800	0.625
14820	0.938	16500	0.750	18180	0.750	19860	0.688
14880	0.937	16560	0.812	18240	0.750	19920	0.625
14940	0.938	16620	0.812	18300	0.750	19980	0.625
15000	0.875	16680	0.688	18360	0.750	20040	0.563
15060	0.812	16740	0.688	18420	0.750	-	-

표 2.47 시험동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표(계속)

시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
0	1.00	1680	0.625	3360	0.625	5040	0.625
60	-0.313	1740	0.625	3420	0.625	5100	0.625
120	-0.688	1800	0.562	3480	0.625	5160	0.687
180	-0.313	1860	0.562	3540	0.625	5220	0.687
240	-0.063	1920	0.563	3600	0.562	5280	0.625
300	0.063	1980	0.625	3660	0.688	5340	0.750
360	0.188	2040	0.625	3720	0.625	5400	0.687
420	0.312	2100	0.625	3780	0.563	5460	0.750
480	0.438	2160	0.687	3840	0.687	5520	0.750
540	0.437	2220	0.688	3900	0.625	5580	0.813
600	0.500	2280	0.625	3960	0.625	5640	0.750
660	0.500	2340	0.625	4020	0.625	5700	0.625
720	0.563	2400	0.625	4080	0.562	5760	0.750
780	0.625	2460	0.625	4140	0.625	5820	0.688
840	0.562	2520	0.688	4200	0.625	5880	0.750
900	0.562	2580	0.625	4260	0.563	5940	0.687
960	0.625	2640	0.625	4320	0.562	6000	0.687
1020	0.687	2700	0.562	4380	0.625	6060	0.688
1080	0.625	2760	0.688	4440	0.625	6120	0.688
1140	0.625	2820	0.563	4500	0.563	6180	0.687
1200	0.562	2880	0.625	4560	0.625	6240	0.625
1260	0.688	2940	0.563	4620	0.625	6300	0.625
1320	0.688	3000	0.625	4680	0.625	6360	0.625
1380	0.687	3060	0.625	4740	0.625	6420	0.688
1440	0.625	3120	0.563	4800	0.687	6480	0.625
1500	0.625	3180	0.562	4860	0.563	6540	0.750
1560	0.563	3240	0.625	4920	0.687	6600	0.688
1620	0.625	3300	0.625	4980	0.625	6660	0.688

표 2.47 시험동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표(계속)

시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
6720	0.688	8400	0.687	10080	0.625	11760	0.625
6780	0.688	8460	0.813	10140	0.687	11820	0.625
6840	0.688	8520	0.687	10200	0.687	11880	0.687
6900	0.750	8580	0.750	10260	0.625	11940	0.625
6960	0.750	8640	0.687	10320	0.625	12000	0.687
7020	0.750	8700	0.687	10380	0.625	12060	0.687
7080	0.750	8760	0.688	10440	0.625	12120	0.688
7140	0.750	8820	0.688	10500	0.625	12180	0.750
7200	0.688	8880	0.625	10560	0.625	12240	0.688
7260	0.625	8940	0.625	10620	0.625	12300	0.687
7320	0.625	9000	0.625	10680	0.688	12360	0.750
7380	0.687	9060	0.625	10740	0.688	12420	0.688
7440	0.625	9120	0.625	10800	0.688	12480	0.750
7500	0.687	9180	0.625	10860	0.688	12540	0.813
7560	0.563	9240	0.625	10920	0.688	12600	0.813
7620	0.625	9300	0.625	10980	0.750	12660	0.687
7680	0.625	9360	0.625	11040	0.750	12720	0.750
7740	0.625	9420	0.625	11100	0.750	12780	0.688
7800	0.625	9480	0.687	11160	0.750	12840	0.688
7860	0.687	9540	0.750	11220	0.750	12900	0.688
7920	0.625	9600	0.687	11280	0.750	12960	0.688
7980	0.625	9660	0.688	11340	0.687	13020	0.625
8040	0.688	9720	0.688	11400	0.687	13080	0.688
8100	0.688	9780	0.750	11460	0.687	13140	0.687
8160	0.750	9840	0.688	11520	0.687	13200	0.625
8220	0.688	9900	0.625	11580	0.687	13260	0.625
8280	0.688	9960	0.625	11640	0.625	13320	0.687
8340	0.813	10020	0.687	11700	0.687	13380	0.688

표 2.47 시험동 보일러 배관 출구의 수온 변화 표

시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)	시간(분)	온도(℃)
13440	0.625	15120	0.750	16800	0.625	18480	0.625
13500	0.688	15180	0.750	16860	0.625	18540	0.625
13560	0.625	15240	0.688	16920	0.750	18600	0.625
13620	0.687	15300	0.750	16980	0.625	18660	0.625
13680	0.625	15360	0.688	17040	0.625	18720	0.625
13740	0.750	15420	0.750	17100	0.688	18780	0.562
13800	0.750	15480	0.813	17160	0.688	18840	0.625
13860	0.750	15540	0.750	17220	0.688	18900	0.625
13920	0.812	15600	0.687	17280	0.625	18960	0.562
13980	0.688	15660	0.625	17340	0.562	19020	0.562
14040	0.750	15720	0.688	17400	0.563	19080	0.563
14100	0.687	15780	0.688	17460	0.625	19140	0.625
14160	0.687	15840	0.625	17520	0.562	19200	0.562
14220	0.625	15900	0.688	17580	0.688	19260	0.562
14280	0.688	15960	0.625	17640	0.625	19320	0.625
14340	0.687	16020	0.687	17700	0.562	19380	0.625
14400	0.688	16080	0.687	17760	0.625	19440	0.625
14460	0.688	16140	0.625	17820	0.562	19500	0.625
14520	0.750	16200	0.688	17880	0.625	19560	0.625
14580	0.688	16260	0.625	17940	0.625	19620	0.625
14640	0.687	16320	0.625	18000	0.625	19680	0.625
14700	0.625	16380	0.625	18060	0.625	19740	0.688
14760	0.625	16440	0.625	18120	0.625	19800	0.625
14820	0.625	16500	0.625	18180	0.625	19860	0.625
14880	0.625	16560	0.625	18240	0.625	19920	0.688
14940	0.625	16620	0.625	18300	0.625	19980	0.688
15000	0.563	16680	0.625	18360	0.562	20040	0.750
15060	0.625	16740	0.625	18420	0.625	-	-

(다) 에너지 효율 분석

실대형 모형실험에서 온수 공급은 전기보일러를 이용하였으며 내부 코일 온도가 설정 값에 도달하면 보일러의 동작이 정지되고 설정된 온도 이하로 떨어지면 재가동된다. 본 실험에서 확인하고자 하는 중요한 요소의 하나가 에너지 절감이며 보일러의 전기사용량을 이용하여 다공성 장석을 활용한 축열층의 효율을 분석하였다. 소비전력은 보일러 자체의 사용량도 무시할 수 없겠으나 연구에서는 보일러의 전기사용량을 포함한 소비전력을 산정하였으며 사용량은 보일러에 공급되는 전력선에 개별적으로 한국전력 인증의 아날로그 적산전력계를 설치하고 서버와 동기화된 CCTV를 통하여 실시간 사용량을 확인하였다. 온도 측정 지점은 기준동과 실험동의 온수 배관에서 같은 거리에 위치한 온도계의 평균온도와 소비전력을 나타내었다.

그림 2.114는 1차 실험기간 동안의 온도와 소비전력을 나타내고 있다. 시험동은 가열 후 100 분까지 기준동과 비교하면 온도 상승률이 크게 나타나며, 30 ℃ 이상의 온도에서는 온도 증가율이 감소한다. 기준동은 20 ℃까지 시험동과 유사한 온도상승률을 보이나 이후는 시험동에 비해 낮은 상승률을 보여준다(표 2.48). 190분의 가열 시간 동안 보일러의 소비전력은 두 개의 모형에서 같았으나 목표 온도를 30 ℃로 설정하면 그림 2.114의 Ⓐ와 같이 시험동의 보일러는 70 분만에 중지되는 것에 반해 기준동의 보일러는 170 분까지 지속적으로 가동된다. 이때 가열 시작부터 70 분과 170 분까지 소비된 전력은 각각 3.22 kWh와 7.82 kWh로 2.4배 차이가 난다(표 2.49). 190분 가열에서 최고온도는 기준동이 32.3 ℃였고 시험동은 34.4 ℃이며, 냉각과정에서 기준동의 온도감소율이 크게 관찰되었고 보일러의 재가동 온도를 25 ℃로 가정하면 기준동은 230 분에 재가동 되는 것에 반해 시험동은 290 분에 재가동된다. 바닥 축열층에 대한 1차 실험의 결과 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 11.20 %로 절감할 수 있었다(그림 2.114, 표 2.48-2.49).

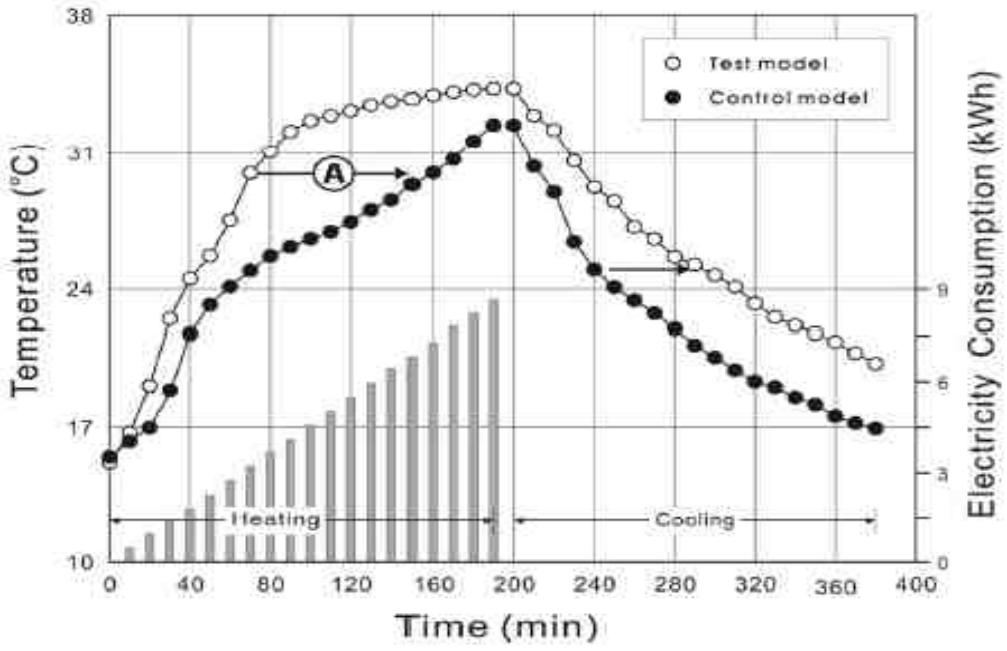


그림 2.114 바닥 축열층 1차 가열 냉각 사이클 전기사용량과 온도 측정

표 2.48 기준동과 시험동의 바닥 축열층 1차 가열 냉각 온도 측정(계속)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	15.52	시험동	0	15.21
	10	16.41		10	16.64
	20	16.85		20	19.07
	30	18.83		30	22.70
	40	22.81		40	24.45
	50	23.41		50	25.61
	60	23.97		60	26.96
	70	24.79		70	30.92
	80	25.98		80	32.07
	90	26.02		90	32.13
	100	26.52		100	32.69
	110	26.73		110	32.86
	120	27.16		120	33.15
	130	28.08		130	33.53
	140	28.12		140	33.68
	150	29.53		150	33.72
	160	29.91		160	33.74
	170	29.99		170	34.02
	180	31.70		180	34.39
	190	32.32		190	34.44
	200	30.36		200	32.99
	210	29.45		210	32.49
	220	26.28		220	30.50
	230	24.95		230	28.88
	240	24.08		240	28.73
	250	23.48		250	26.91
	260	22.98		260	26.87
	270	22.23		270	25.34
	280	20.83		280	25.31
	290	20.65		290	24.69
	300	20.01		300	24.19

표 2.48 기준동과 시험동의 바닥 축열층 1차 가열 냉각 온도 측정

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	310	19.41	시험동	310	23.26
	320	19.15		320	22.57
	330	18.64		330	22.15
	340	18.28		340	21.73
	350	17.61		350	21.33
	360	17.26		360	20.90
	370	17.11		370	20.13

표 2.49 기준동과 시험동의 바닥 축열층 1차 가열실험의 전력량

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0.00	시험동	0	0.00
	10	0.46		10	0.46
	20	0.92		20	0.92
	30	1.38		30	1.38
	40	1.84		40	1.84
	50	2.30		50	2.30
	60	2.76		60	2.76
	70	3.22		70	3.22
	80	3.68		80	3.68
	90	4.14		90	4.14
	100	4.60		100	4.60
	110	5.06		110	5.06
	120	5.52		120	5.52
	130	5.98		130	5.98
	140	6.44		140	6.44
	150	6.90		150	6.90
	160	7.36		160	7.36
	170	7.82		170	7.82
	180	8.28		180	8.28
	190	8.74		190	8.74
	200	9.11		200	-
	210	9.47		210	-
	220	9.84		220	-

그림 2.115는 2차 모형실험에서 45℃의 온수를 공급한 후 온도와 소비전력의 변화를 나타낸 것으로 축열층의 온도는 배관에서 10㎝ 떨어진 지점에서 매 30초 단위로 계측하였다. 배관을 통해 60분간 온수를 공급하였는데 가열 종료 시 시험동 축열층의 온도는 22.4℃에 도달하였고 기준동은 19.6℃이었다. 시험동 보일러의 운전을 중단하고 기준동 축열층의 온도가 22.4℃가 될 때까지 보일러를 계속 가동한 결과 80분에 22.4℃에 도달하였다. 초기 60분까지 사용한 소비전력은 3.22kWh로 같았고 60분부터 80분까지 추가로 가열된 전력은 0.75kWh 이었다(그림 2.115의 ①, ③). 이후 80분부터 190분까지 창호를 개방하고 축열층을 냉각하였다. 190분에 시험동의 온도는 14.0℃까지 떨어졌고 기준동은 12.6℃까지 내려갔다. 이후 기준동의 보일러를 가동하여 14.0℃까지 가열하였고 0.92kWh의 전력이 추가적으로 소모되었다(표 2.50-표 2.51). 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 18.97%로 절감할 수 있다(그림 2.115, 표 2.50-2.51).

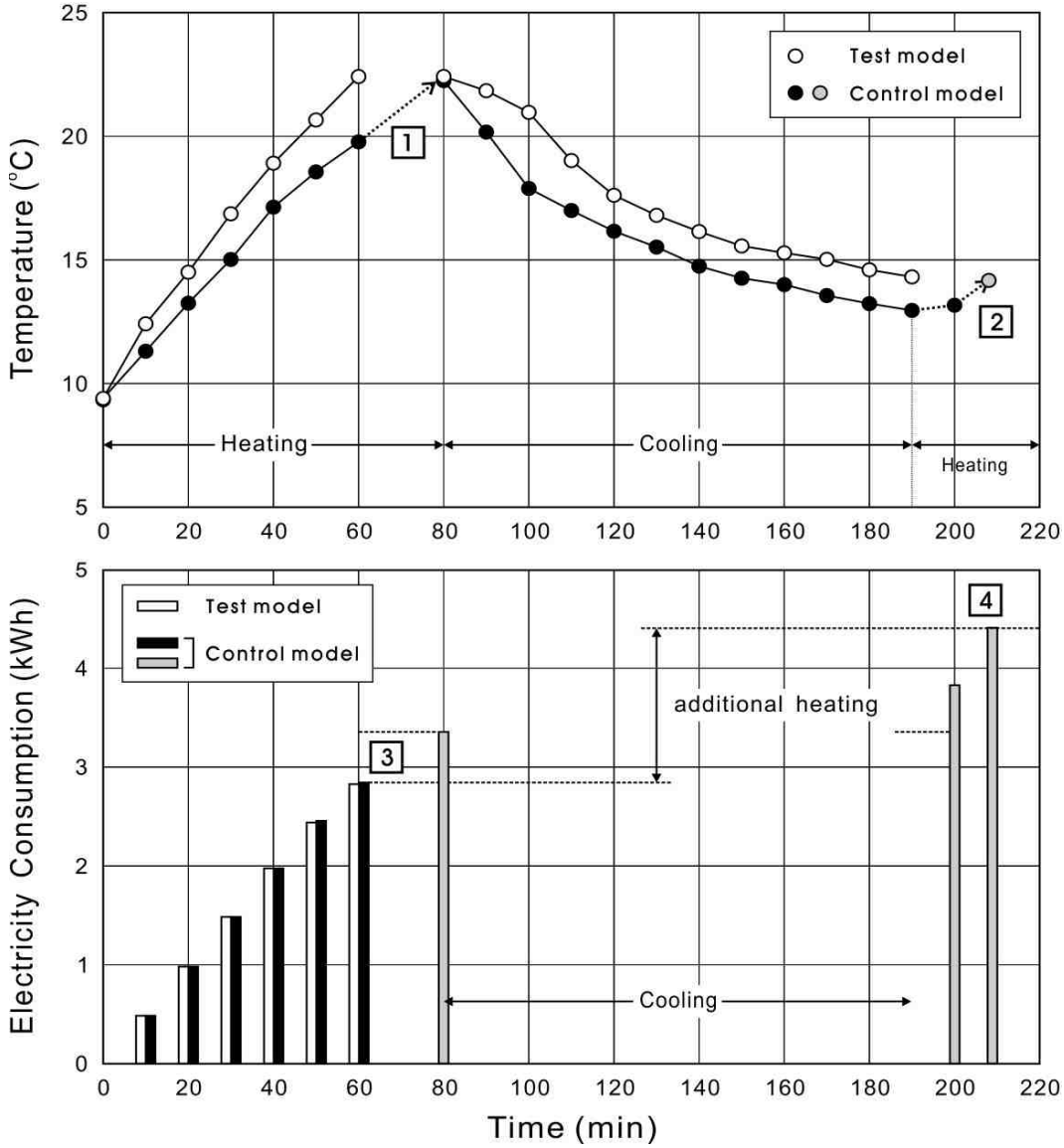


그림 2.115 바닥 축열층 2차 모형실험에서의 가열냉각 온도(45℃) 및 전력사용량

표 2.50 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열 냉각 온도 측정(45℃)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	9.33	시험동	0	10.32
	10	11.29		10	12.41
	20	13.23		20	14.51
	30	15.03		30	16.88
	40	17.12		40	18.88
	50	18.55		50	20.6
	60	19.62		60	22.43
	70	21.6		70	22.43
	80	22.4		80	22.42
	90	18.93		90	20.9
	100	17.9		100	18.69
	110	16.34		110	17.56
	120	15.54		120	16.77
	130	14.21		130	16.08
	140	14.3		140	15.51
	150	14.18		150	14.97
	160	13.64		160	15.02
	170	13.37		170	14.55
	180	13.1		180	14.22
	190	12.66		190	14.04
	200	13.35		200	-
	210	14.04		210	-

표 2.51 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열시험 전력사용량(45℃)

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0	시험동	0	0
	10	0.54		10	0.54
	20	1.07		20	1.07
	30	1.61		30	1.61
	40	2.15		40	2.15
	50	2.68		50	2.68
	60	3.22		60	3.22
	70	3.60		70	-
	80	3.97		80	-

그림 2.116은 2차 모형실험에서 65℃의 온수를 공급한 축열실험의 결과로 가열과정 온도와 소비전력을 나타낸 것이다. 4시간 동안 연속해서 온수를 공급하였고 기준동과 시험동의 축열층 온도는 각각 36.2℃와 39.2℃까지 올라갔으며, 소비된 전력은 11.04 kWh였고 시험동의 온수공급을 중단하고 기준동의 온도가 시험동과 같아질 때까지 추가로 가열하였고 이때 소비된 전력은 1.44 kWh로 측정되었다. 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 44.44 %로 절감할 수 있다(그림 2.116, 표 2.52-2.53).

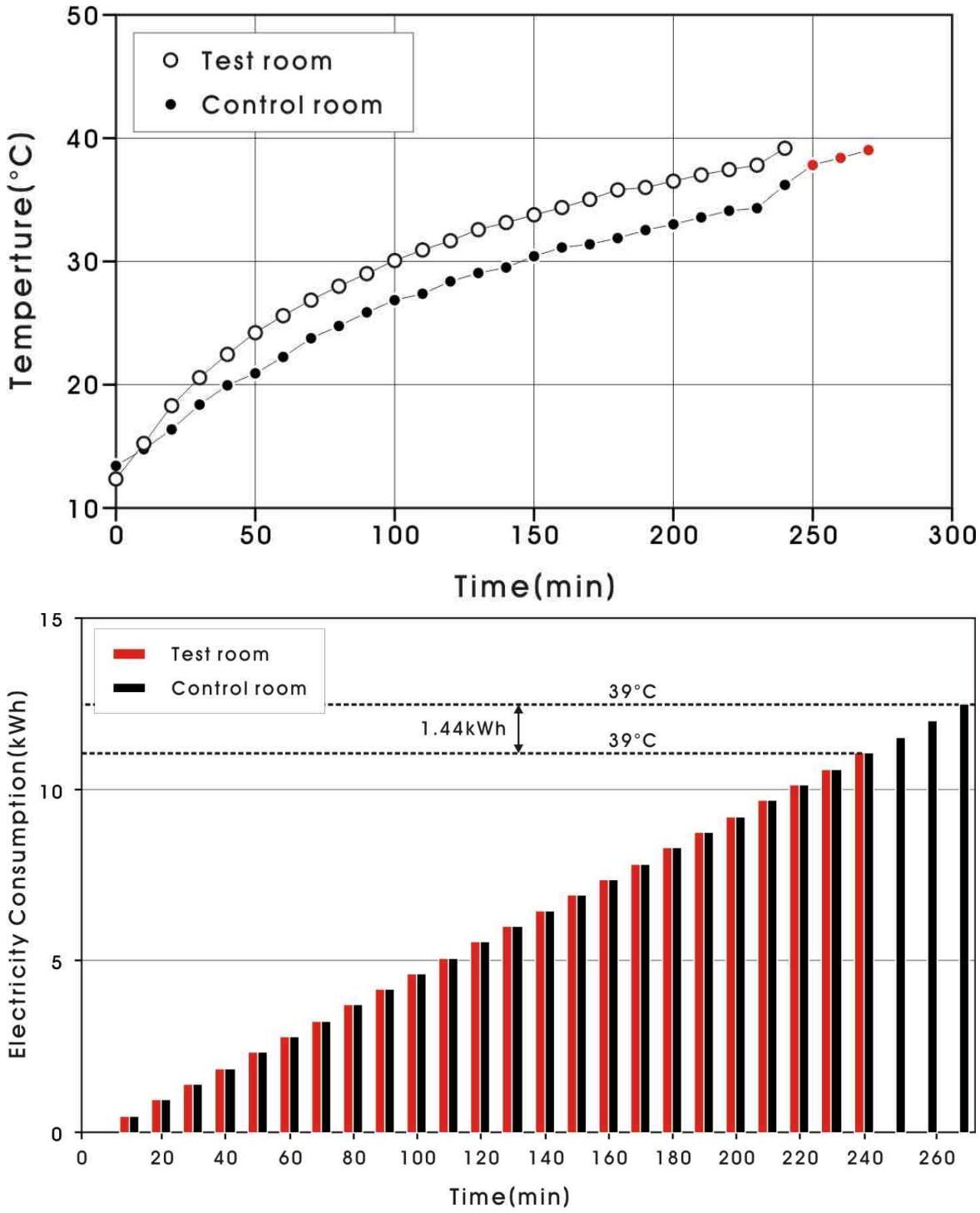


그림 2.116 바닥 축열층 2차 모형실험에서의 가열냉각 온도(65℃) 및 전력사용량

표 2.52 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열 온도 측정(65℃)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	13.42	시험동	0	12.35
	10	14.76		10	15.23
	20	16.37		20	18.30
	30	18.38		30	20.57
	40	19.95		40	22.46
	50	20.92		50	24.22
	60	22.25		60	25.60
	70	23.77		70	26.86
	80	24.76		80	27.99
	90	25.87		90	29.01
	100	26.86		100	30.07
	110	27.38		110	30.93
	120	28.38		120	31.68
	130	29.06		130	32.58
	140	29.51		140	33.15
	150	30.42		150	33.78
	160	31.13		160	34.37
	170	31.39		170	35.03
	180	31.89		180	35.80
	190	32.54		190	36.10
	200	33.01		200	36.54
	210	33.57		210	37.05
	220	34.11		220	37.68
	230	34.52		230	38.35
	240	35.41		240	39.18
	250	36.07		250	-
	260	36.70		260	-
	270	37.13		270	-

표 2.53 기준동과 시험동의 바닥 축열층 2차 가열시험 전력사용량(65℃)

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0.00	시험동	0	0.00
	10	0.46		10	0.46
	20	0.92		20	0.92
	30	1.38		30	1.38
	40	1.84		40	1.84
	50	2.30		50	2.30
	60	2.76		60	2.76
	70	3.22		70	3.22
	80	3.68		80	3.68
	90	4.14		90	4.14
	100	4.60		100	4.60
	110	5.06		110	5.06
	120	5.52		120	5.52
	130	5.98		130	5.98
	140	6.44		140	6.44
	150	6.9		150	6.90
	160	7.36		160	7.36
	170	7.82		170	7.82
	180	8.28		180	8.28
	190	8.74		190	8.74
	200	9.20		200	9.20
	210	9.66		210	9.66
	220	10.12		220	10.12
	230	10.58		230	10.58
	240	11.04		240	11.04
	250	11.52		250	-
	260	12.00		260	-
	270	12.48		270	-

그림 2.117은 3차 모형실험에서 50℃의 온수를 공급한 축열실험의 결과로 가열과정 온도와 소비전력을 나타낸 것이다. 470분 동안 연속해서 온수를 공급하였고 기준동과 시험동의 축열층 온도는 각각 22.4℃와 25.0℃까지 올라갔으며, 소비된 전력은 21.62 kWh였고 시험동의 온수공급을 중단하고 기준동의 온도가 시험동과 같아질 때까지 추가로 가열하였고 이때 소비된 전력은 3.60 kWh로 측정되었다(표 2.54-2.55). 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 14.26 %로 절감할 수 있다(그림 2.115, 표 2.50-2.51).

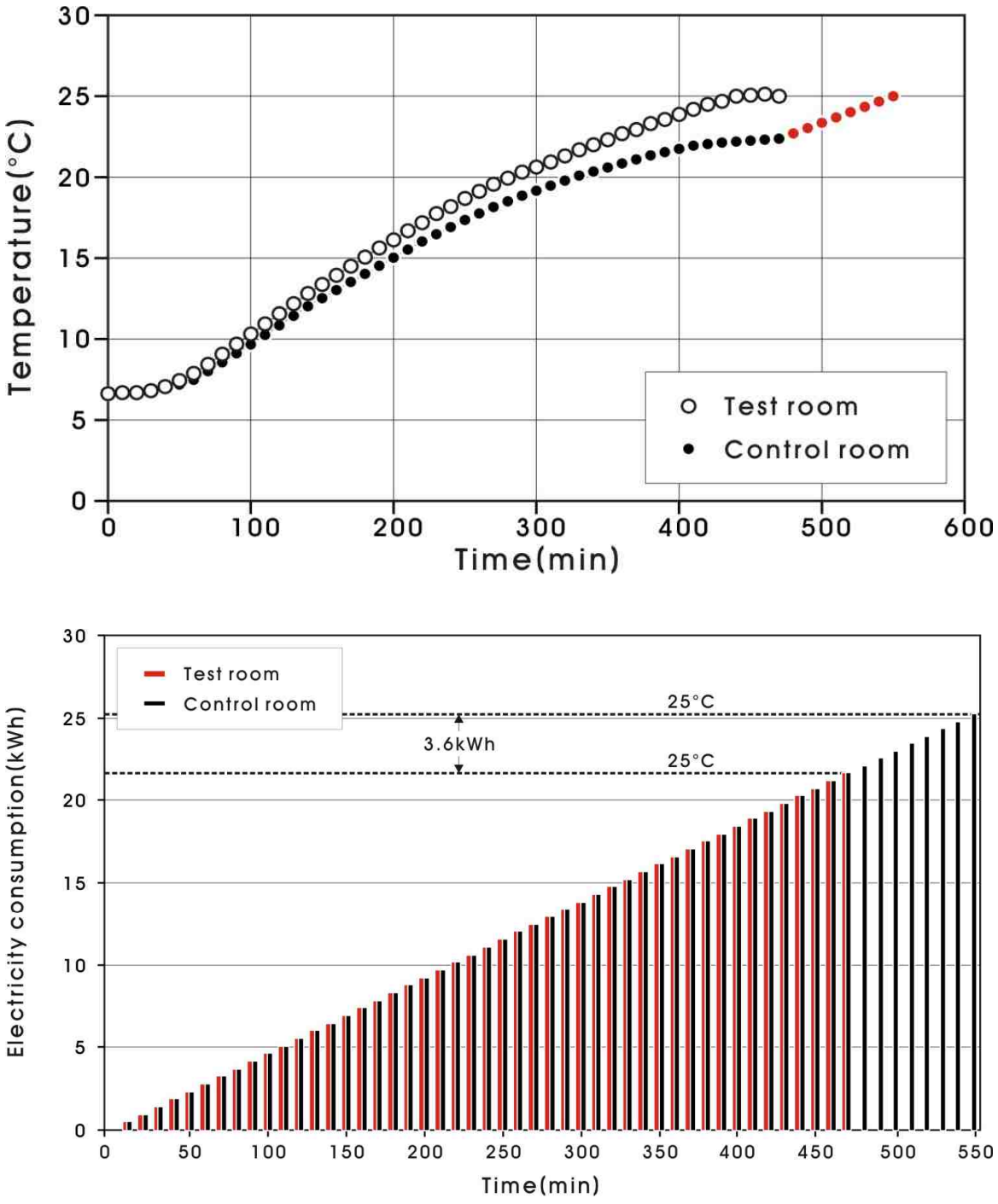


그림 2.117 바닥 축열층 3차 모형실험에서의 가열냉각 온도(50℃) 및 전력사용량

표 2.54 기준동과 시험동의 바닥 축열층 3차 가열 온도 측정(50℃)(계속)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	6.63	시험동	0	6.63
	10	6.69		10	6.69
	20	6.69		20	6.69
	30	6.81		30	6.81
	40	7.06		40	7.06
	50	7.18		50	7.44
	60	7.48		60	7.88
	70	8.02		70	8.44
	80	8.57		80	9.06
	90	9.12		90	9.69
	100	9.67		100	10.31
	110	10.26		110	10.94
	120	10.85		120	11.56
	130	11.44		130	12.19
	140	12.03		140	12.81
	150	12.53		150	13.38
	160	13.03		160	13.94
	170	13.53		170	14.50
	180	14.03		180	15.06
	190	14.53		190	15.63
	200	15.03		200	16.13
	210	15.53		210	16.69
	220	16.03		220	17.19
	230	16.48		230	17.75
	240	16.92		240	18.19
	250	17.36		250	18.69
	260	17.76		260	19.13

표 2.54 기준동과 시험동의 바닥 축열층 3차 가열 온도 측정(50℃)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	270	18.16	시험동	270	19.56
	280	18.51		280	19.94
	290	18.86		290	20.31
	300	19.17		300	20.63
	310	19.48		310	20.94
	320	19.79		320	21.31
	330	20.10		330	21.69
	340	20.35		340	22.00
	350	20.60		350	22.31
	360	20.85		360	22.69
	370	21.10		370	22.94
	380	21.35		380	23.31
	390	21.55		390	23.56
	400	21.75		400	23.88
	410	21.95		410	24.19
	420	22.05		420	24.50
	430	22.14		430	24.69
	440	22.20		440	25.00
	450	22.26		450	25.06
	460	22.32		460	25.13
	470	22.38		470	25.00
	480	22.70		480	-
	490	23.03		490	-
	500	23.36		500	-
	510	23.69		510	-
	520	24.02		520	-
	530	24.34		530	-
	540	24.67		540	-
	550	25.00		550	-

표 2.55 기준동과 시험동의 바닥 축열층 3차 가열시험 전력사용량(계속)

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0	시험동	0	0
	10	0.46		10	0.46
	20	0.92		20	0.92
	30	1.38		30	1.38
	40	1.84		40	1.84
	50	2.3		50	2.3
	60	2.76		60	2.76
	70	3.22		70	3.22
	80	3.68		80	3.68
	90	4.14		90	4.14
	100	4.6		100	4.6
	110	5.06		110	5.06
	120	5.52		120	5.52
	130	5.98		130	5.98
	140	6.44		140	6.44
	150	6.9		150	6.9
	160	7.36		160	7.36
	170	7.82		170	7.82
	180	8.28		180	8.28
	190	8.74		190	8.74
	200	9.2		200	9.2
	210	9.66		210	9.66
	220	10.12		220	10.12
	230	10.58		230	10.58
	240	11.04		240	11.04
	250	11.5		250	11.5
	260	11.96		260	11.96

표 2.55 기준동과 시험동의 바닥 축열층 3차 가열시험 전력사용량

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	270	12.42	시험동	270	12.42
	280	12.88		280	12.88
	290	13.34		290	13.34
	300	13.8		300	13.8
	310	14.26		310	14.26
	320	14.72		320	14.72
	330	15.18		330	15.18
	340	15.64		340	15.64
	350	16.1		350	16.1
	360	16.56		360	16.56
	370	17.02		370	17.02
	380	17.48		380	17.48
	390	17.94		390	17.94
	400	18.4		400	18.4
	410	18.86		410	18.86
	420	19.32		420	19.32
	430	19.78		430	19.78
	440	20.24		440	20.24
	450	20.7		450	20.7
	460	21.16		460	21.16
	470	21.62		470	21.62
	480	22.07		480	-
	490	22.52		490	-
	500	22.97		500	-
	510	23.42		510	-
	520	23.87		520	-
	530	24.32		530	-
	540	24.77		540	-
	550	25.22		550	-

(4) 소음·진동저감 특성

(가) 진동 평가

기준동과 시험동 슬라브를 기준으로 슬라브 위에서 3지점을 측정하였고 슬라브 하부에서 5점을 측정하였다. 슬라브 위에서 3지점은 실험동 내부의 중심을 기준으로 3지점을 선정하였고, 슬라브 하부는 방 중심에서 X를 그어서 각 꼭지점과 X 의 중심에서 측정하였다.

타격원은 저주파 음원도 사용하였으나, 실험 환경에서 배경소음의 문제로 인해 고주파 음원을 타격 원으로 선택하여 실험을 진행하였고, 바닥 위·아래에 진동센서를 부착한 뒤 바닥 위에서 충격을 주어 진동 센서에 감지된 진동 값을 측정하여 기준동과 시험동의 진동 흡수량을 분석하였다.

기준동에서 바닥체 상부에 26dB의 충격을 가해 하부에 전달되는 진동값은 8.07dB이며, 시험동 바닥체 상부에서 29dB의 충격을 가하여 하부에 전달되는 진동값은 8.07dB으로 측정되었다. 시험동 상부에서 일반동에 비해 3dB 더 충격을 가하여 하부로 전달되는 진동값은 8.07dB로 전달되는 진동 및 흡음은 같았으며 기준동에 비교해 시험동은 16.7% 흡음율을 나타난다(그림 2.118, 표 2.56).

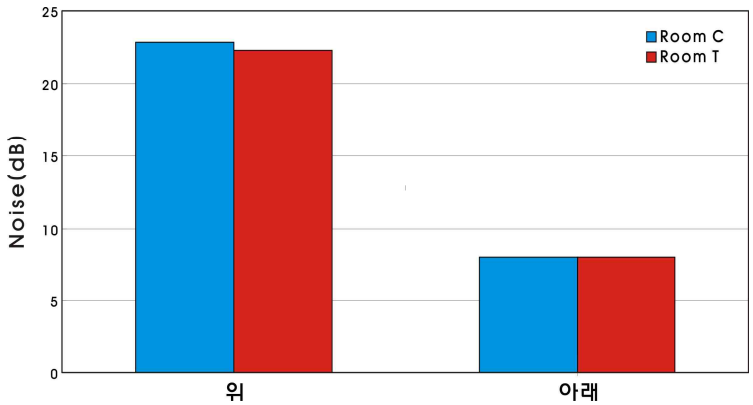


그림 2.118 진동센서 측정값

표 2.56 진동센서 측정값

구분		소음(dB)	구분		소음(dB)
기준동	상부	22.87	시험동	상부	22.33
	하부	8.06		하부	8.06

(나) 소음 평가

기준동과 시험동의 소음특성평가를 위해 소음 측정 어플리케이션(Decibel Ultra)을 활용해 바닥충격음에 대한 차단성능 비교실험을 실시하였다. 소음발생원은 배경소음레벨보다 10dB 이상이 되도록 설정해야하는 조건(KSF 2810-1, KSF 2810-2)에 따라 고주파 소음원인 슈미트해머를 사용하였다. 진동실험과 동일한 조건으로 실험을 진행 하였으며 상·하부에서 흡음량을 비교하였다(그림 2.119).



그림 2.119 소음 측정(좌: 소음측정기, 중: 타격위치 선정, 우: 하부타격)

바닥체 기준 하부에서 흡음량을 측정하여 기준동과 시험동의 흡음량의 차이를 비교하였다. 실험결과를 그래프화 하여 타격원이 타격하였을 때, 최대로 측정되는 지점에서 최댓값에 도달하여 흡음량 값을 기준동과 시험동 비교해 본 결과 7% 가량 흡음효과를 나타난다(그림 2.120, 표 2.57).

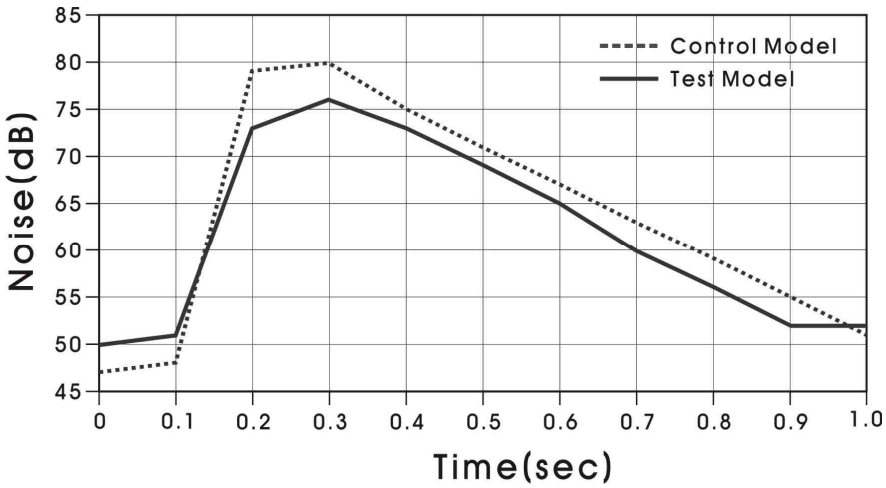


그림 2.120 소음 측정값

표 2.57 기준동의 추가 가열시 시험동의 에너지 절감량

구분	시간(초)	소음(dB)	구분	시간(분)	소음(dB)
기준동	0.0	47	시험동	0.0	50
	0.1	48		0.1	51
	0.2	79		0.2	73
	0.3	80		0.3	76
	0.4	75		0.4	73
	0.5	71		0.5	69
	0.6	67		0.6	65
	0.7	63		0.7	60
	0.8	59		0.8	56
	0.9	55		0.9	52
	1.0	51		1.0	52
	1.1	49		1.1	53

(5) 소결

바닥 축열층은 1차, 2차, 3차에 걸쳐 실험이 진행 되었으며, 1차 2차에서 문제점으로 드러난 미세균열, 건조수축, 분진현상을 막고 시멘트를 저감하여 친환경적인 건축재료로 사용하기 위해서 배합 설계하였다. 바닥모르타르의 축열성능을 검증하기 위해서 라즈베리 파이를 사용하여 온도센서, 진동센서, 소음센서를 부착한 모듈형 온도 측정 장비를 제작하여 바닥에 일정한 간격으로 시공하였고, 측정 된 데이터들은 유무선 공유기를 통해서 IBM사 Bluemix 클라우스 서비스로 실시간 데이터 연계를 하여 GUI화 한 데이터 보드에서 사용자가 각각의 센서의 데이터를 관찰할 수 있도록 제작하였다. 또한, 열화상 카메라를 이용하여 축열실험을 실시간으로 촬영하여 이미지 데이터화를 하는 데 사용하였다. 시험동과 기준동의 축열실험에서 온도의 차이는 시험동이 약 2.6℃가 높은 것으로 나타났으며, 같은 온도로 사용한다고 가정 시에 전기사용량이 3.6 kWh가 추가적으로 사용되는 것으로 14.3%의 에너지가 절감된다.

아. 경량 벽체 실험

(1) 벽체 규격 및 제작

(가) 실험 준비

벽체 실험에서는 선행으로 시험동과 기준동의 기존의 단열패널을 제거를 하였다(그림 2.121-그림 2.122). 기존의 내벽 역할을 하던 패널 전체 제거하고 전선과 보일러가 연결되어 있어 패널부도 철거하였고 시험동은 규산염 재료원을 이용하여 제작한 경량 벽체블록을 사용하여 3차례에 걸쳐 시공하고 1차 시공에서는 미장 마감없이 실험을 진행하였다. 2차-3차 시공에서는 내부 미장 마감하여 실험을 진행하였다. 기준동은 1차례 시공 후 시중에 판매하는 레미탈로 내외부를 미장으로 마감을 하였다.



그림 2.121 실대형 모형 벽체 패널 철거



그림 2.122 1차 시공 경량 벽체블록 철거

(나) 블록제작과정

바닥 층의 시공은 재료의 배합으로 타설 과정만을 거치지만, 벽체 시공을 위해서는 다공성 장석을 이용한 경량 벽체 블록의 제작공정을 하나 추가해야만 한다. 재료의 단위중량 변화를 자유롭게 하고, 단열 및 흡음 효과 개선을 위한 경량기포를 추가하였다.

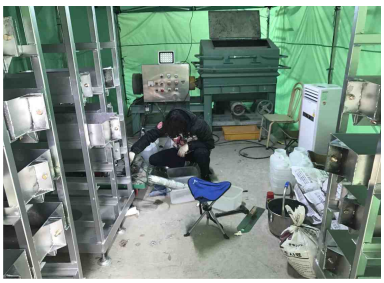
1차 실험에서는 경량 기포만을 사용하여 밀도를 저감한 경량블록을 제작하였고, 2차 실험에서는 PVA섬유를 사용하여 압축, 인장강도를 보강하여 밀도를 좀 더 저감한 경량 벽체 블록을 제작하였다. 제작 과정은 재료를 계량하고 믹싱기를 이용하여 건비빔을 하고 물과 경량기포를 넣어 타설하고 양생하지만 2차의 PVA섬유의 첨가로 섬유를 전체적으로 확산시켜야 하므로 건비빔을 하는 시간을 조금 더 증가시켰다. 조적식 경량 벽체의 크기는 KS F 2701(경량기포 콘크리트 블록)기준에 의거해 크기를 산정하였으며, 손쉬운 탈형을 위해 조립식으로 제작하였다. 그림 2.123은 블록제작을 위하여 재료를 준비하고 혼합하는 과정이며, 2차 PVA 섬유가 추가되면서 건비빔의 비빔시간은 최소 20-30분으로 잡고 섬유의 풀림 상태를 보고 판단하여 비빔을 한다. 그림 2.124는 건비빔이 끝나고 물과 함께 비빔 후에 경량기포와 함께 비빔을 해야하며, 경량기포 생성기에서 기포를 제작하여 모르타르 풀에 배합 비빔시 기포와 재료의 분리되는 것을 막기 위해 아래에 최소 10분이상 배합을 해야하며, 비빔의 상태에 따라 타설한다. 거푸집에 타설 시에 W/C의 비율이 80%넘지 않도록 해야한다. 경량기포의 경우 W/C의 비율이 매우 중요한 요인 중에 하나로 W/C의 비율이 ±5%의 차이만이라도 기포의 계면활성제 때문에 시멘트 입자들만 뭉쳐 강도 저하의 원인이 되며, 반대로 높아지면 재료분리현상이 발생한다. 그림 2.125-2.126에서 타설하고 20-24℃에서 양생을 진행하였으며, 시공 후 일주일 후 탈형을 진행하였고 탈형 후 28일이상 기건양생을 하였다.


재료 준비 및 개량


재료 투입


건조 혼합

그림 2.123 블록제작과정 ① : 재료준비 및 혼합


경량기포 제조


물, 경량기포 교반


혼합 용액 사출

그림 2.124 블록제작과정 ② : 경량기초 제조와 교반

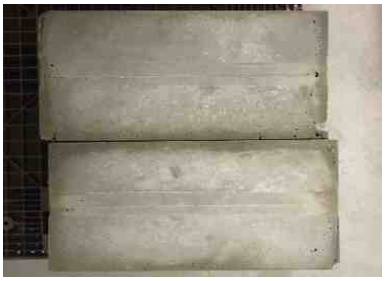

혼합 용액 타설


적재함 거치


양생 중 경량블록

그림 2.125 블록제작과정 ③ : 혼압용액 타설 및 양생


경량 벽체 탈형




경량 벽체 적재

그림 2.126 블록제작과정 ④ 경량 벽체 탈형 및 적재

1차 실험에서 블록을 경량화하는데 중점을 두어 설계 및 제작을 하여 압축강도와 인장력의 저하가 발생하였고, 품질의 균일화를 하는 데에 어려움이 있었다. 이로 인해 벽체의 자체 하중으로 인해 균열이 발생하였고 배합 시에도 기포층의 밀도가 가벼워 시멘트, 골재 등의 재료는 가라앉고 기포는 위로 뜨는 재료분리 현상이 일어나는 경우가 발생하여 제품의 품질이 일정하지 못하고 불량품도 나타났다. 또한, 타설 시 연속 배합을 하는데 첫 번째 배합 후 믹싱기 내부에 남은 수분으로 인해 결정된 W/C의 배합 품질이 일정하지 않아 일부 블록에서 강도가 저하가 발생하였다(그림 2.127). 1차 시험에서 이러한 문제점을 보완하고자 토목에서 과다철근구간에 많이 사용되는 E.C.C (Engineered Cementitious Composite)에 주 원료인 PVA (Poly Vinyl Alcohol)섬유를 사용하여 부족한 인장력과 압축력을 개선하도록 설계하였다. 또한, W/C의 비는 초기 타설비와 연속타설비율을 다르게 적용하여 적정한 W/C비를 도출할 수 있게 실험을 통하여 개선하였고 시멘트의 뭉침현상은 W/C의 개선으로 품질 향상을 할 수 있었다.





그림 2.127 시공 균열 및 시멘트 뭉침현상(좌: 시공 균열, 우: 시공불량)

(다) 블록시공

기준동은 LH공사 41510의 벽돌공사 기준에 따라 KS F 4004기준에 부합하는 시멘트 벽돌을 이중으로 쌓고 미장 마감을 한 벽체를 1차례 시공하였다. 그림 2.128은 기준동의 블록을 시공하는 과정이며, 그림 2.129는 시험동의 블록을 시공하는 과정이다. 1차 경량블록의 열적특성평가 후, 설치된 경량블록을 철거하고 2차 배합비에서 설계된 경량블록을 제작하여 시공하였다. 기존의 블록 시공이 된 자리를 깨끗이 청소 후, 시공 위치를 잡고 블록이 설치되는 제일 하부에 다공질 장석으로 만든 실런트를 발라 블록의 수평을 잡고 이어서 수평을 맞추어 블록을 시공한다. 블록과 수직은 우레탄폼을 사용하여 틈이 없이 막고 수평은 다공질 장석을 이용한 실런트를 사용하여 접착하여 시공한다.



그림 2.128 기준동 블록 시공 과정



그림 2.129 시험동의 블록시공 과정(계속)



그림 2.129 시험동의 블록시공 과정

(2) 모니터링 시스템 구축

벽체의 온도 상승은 바닥의 온수파이프에서 올라오는 열의 복사열로 인해 가열되는 것으로 실험을 위해서 벽면에 3cm의 구멍을 낸 후 온도센서를 30cm 간격으로 바닥에서 천장까지 등 간격으로 배치를 하여 온도를 측정하였다(그림 2.130).



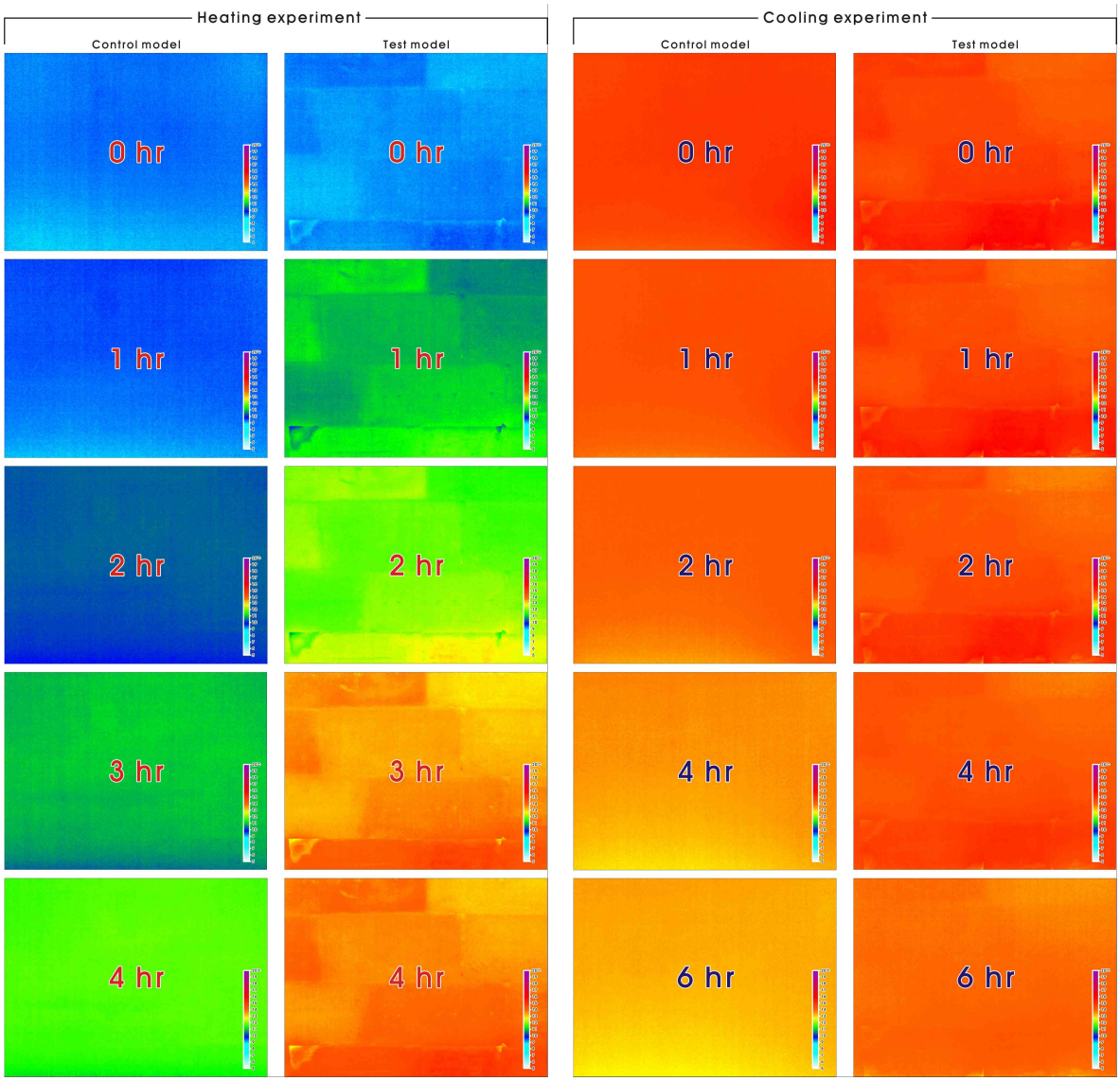
그림 2.130 벽면 촬영 현장 및 센서 사진

(3) 축열 특성 및 에너지 효율 분석

(가) 열화상 카메라를 이용한 분석

① 전기 보일러를 이용한 가열 냉각실험

그림 2.131은 보통 포틀랜드 시멘트 벽돌로 시공 후 모르타르로 미장 마감한 기준동과 다공성 장석 및 경량기포를 사용한 경량 벽체 블록으로만 사용된 시험동에 75℃ 온수를 공급 후 가열과 냉각과정의 온도변화를 나타내고 있다. 가열기간 동안의 온도 변화는 4시간 기준으로 비교동에서 11.5℃를 온도상승이 있었고 시험동에서는 14.5℃의 온도상승 하였다. 이후 보일러를 끄고 6시간의 냉각과정에서 시험동의 6시간 온도는 비교동의 2시간 후의 온도와 유사하다. 이러한 실험 결과는 다공성 장석은 가열과정에서 높은 열전도율로 인하여 빠른 온도 상승 효과를 가지며, 냉각과정에서 축열성으로 인한 낮은 온도 하락을 보여 축열효과가 뛰어난 것으로 판단된다.



(a) 가열구간 (b) 냉각구간

그림 2.131 열화상 카메라를 이용한 경량 벽체의 온도변화 관찰

열화상 카메라는 각각의 픽셀이 모여서 이미지화를 구현하는데 시험동과 기준동의 최고 온도의 픽셀의 온도 차이를 가열과 온도를 그래프화 하였다. 그림 2.132에서 가열에서 시험동의 경우 13.8℃을 기록하며 기준동은 11.6℃로 2.2℃의 온도 차이를 보이며 시험동의

높은 축열성을 보인다. 냉각에서는 14.8℃로 두 모형에서 같은 온도를 맞추고 냉각을 실행하였으며, 6시간의 냉각시간을 가지면서 온도의 하강에서도 차이점을 보인다. 시험동에서 6시간이 지난 후 13.9℃로 관찰되며 기준동은 13.6℃의 온도차이를 보인다(표 2.58-2.59). 가열과 냉각에서 온도 변화량이 차이점은 냉각 시작 온도 15℃내외에서 실험을 진행하여 큰 차이점을 보이지 않는다. 벽체의 경우 복사열로 가열하는 방식이라 15℃이상 가열 실험하기에는 현장 여건상 어려움이 있다.

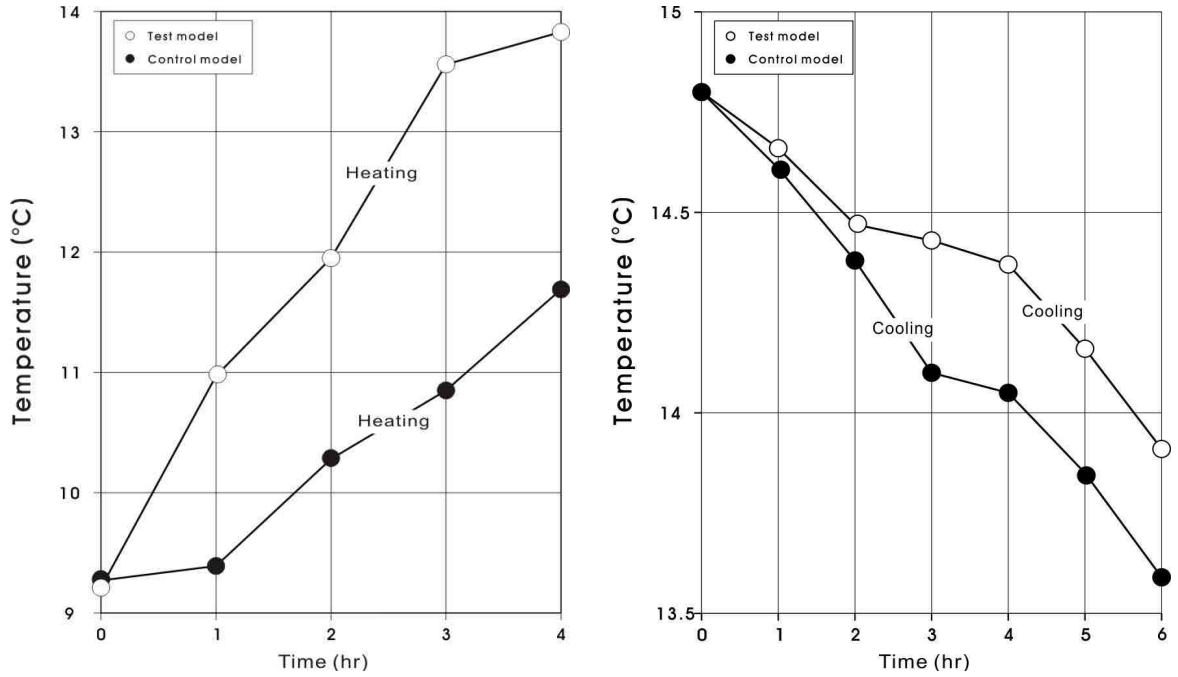


그림 2.132 경량블록 벽체의 온도 변화 그래프(좌: 가열, 우: 냉각)

표 2.58 가열시 벽체의 온도 변화

구분	시간(시)	온도(℃)	구분	시간(시)	온도(℃)
기준동	0	9.27	시험동	0	9.21
	1	9.39		1	10.97
	2	10.28		2	11.95
	3	10.85		3	13.56
	4	11.69		4	13.83

표 2.59 냉각시 벽체의 온도 변화

구분	시간(시)	온도(℃)	구분	시간(시)	온도(℃)
기준동	0	14.80	시험동	0	14.76
	1	14.38		1	14.66
	2	14.05		2	14.47
	3	13.59		3	14.43
	4	13.46		4	14.37
	5	13.37		5	14.16
	6	13.24		6	13.91

1차에서 실험 후, 벽체를 철거하여 배합비를 변경하여 재시공후 실험을 진행하였다. 이전과 마찬가지로 온수 보일러에서 가열하여 바닥의 복사열로 인해 벽체를 가열시키는 방법은 동일하지만, 1차 실험에서는 기준동의 미장 마감만 진행하여 실험하였고 2차 실험에서는 시험동의 미장 마감을 하여 조건을 동일하게 하여 실험을 진행하였다.

2차 실험에서는 50℃ 온수 공급을 하여 바닥 배관을 타고 올라오는 복사열을 사용하여 축열성 테스트 하였으며, 실험의 조건은 가열에서 180분 진행하였고 가열 후 문을 개방하고 냉각시간을 150분 가지며 실험을 종료하는 순으로 진행하였다. 가열실험에서 시험동과 기준동에서 눈에 띄게 차이를 보인다. 시작 후 10분에서 기준동의 벽체 온도는 12.119℃로 관찰되며, 시험동의 벽체온도는 12.347℃로 관찰되며 시험동의 경우 가열하는 동안 꾸준하게 비례하게 상승한다(그림 2.133-2.137, 표 2.60).

그림 2.133은 벽면의 온도를 그래프로 표현한 것으로 시험동과 기준동의 온도변화 차이를 한눈에 확인할 수 있다. 가열최고 시간인 180분에 벽체의 온도는 기준동은 최고온도 13.8℃을 기록하였고, 시험동은 180분에서 15.67℃을 기록하였다. 최도 온도 차이는 1.88℃로 대략 10분당 0.1℃ 가정 시에 기준동은 180분을 추가 가열해야 시험동과의 온도를 맞출 수 있다. 이때의 추가 전기 사용량은 8.28 kWh가 추가 사용되어야 한다.

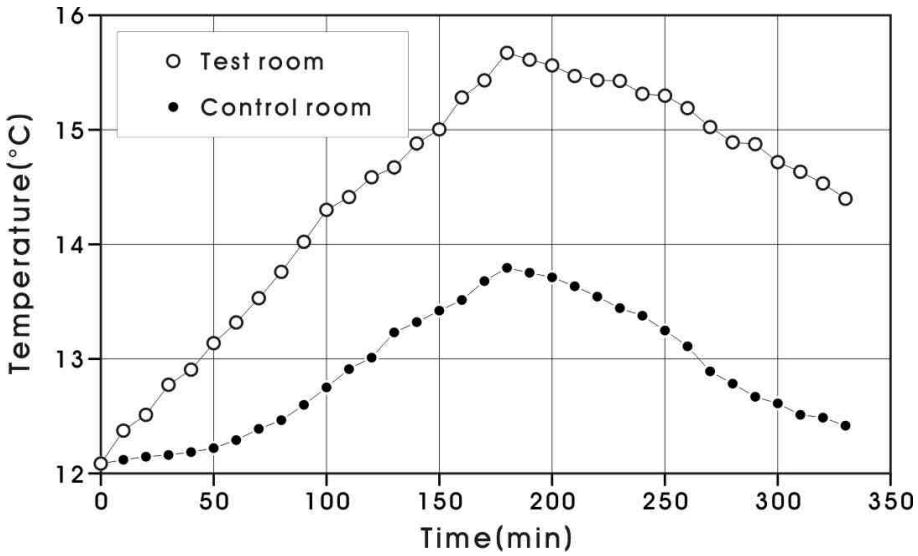


그림 2.133 경량블록 벽체의 온도 변화

그림 2.136-2.137은 시험 후 벽체를 냉각하면서 열손실을 관찰하였다. 냉각구간의 20분 부근에서 시험동과 기준동의 최고온도는 15.7℃, 13.8℃에서 시작하여 10분간 기준동의 경우 0.1℃씩 떨어지는 것을 관찰하였고 시험동의 경우 높은 축열성능으로 20분간 온도 상승을하며 최고온도 도달 후, 0.1℃로 조금씩 하강하는 모습을 관찰할 수 있다. 시험동의 경우 온도의 상승률이 꾸준하게 비례하게 증가하는 추세로 가열이 끝나고도 축열 성능으로 10~20분 온도를 유지하며, 점차 내려가는 모습을 관찰할 수 있으며, 온도의 하락은 기준동에 비해 더디게 하락한다. 기준동은 가열 초기에 온도가 불안정하게 상승하면서 가열이 끝난 직후 일정시간 유지되는 듯, 하지만 빠르게 하강 곡선을 그리며 냉각된다.

표 2.60 경량블록 벽체의 가열 냉각 시 온도 변화

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	12.086	시험동	0	12.086
	10	12.119		10	12.374
	20	12.146		20	12.512
	30	12.161		30	12.774
	40	12.186		40	12.906
	50	12.221		50	13.137
	60	12.291		60	13.318
	70	12.389		70	13.53
	80	12.465		80	13.76
	90	12.599		90	14.022
	100	12.751		100	14.301
	110	12.911		110	14.413
	120	13.011		120	14.586
	130	13.231		130	14.672
	140	13.321		140	14.881
	150	13.421		150	15.004
	160	13.514		160	15.282
	170	13.679		170	15.432
	180	13.795		180	15.672
	190	13.752		190	15.612
	200	13.712		200	15.562
	210	13.634		210	15.47
	220	13.544		220	15.433
	230	13.443		230	15.427
	240	13.377		240	15.314
	250	13.248		250	15.298
	260	13.11		260	15.189
	270	12.891		270	15.024
	280	12.784		280	14.891
	290	12.669		290	14.875
	300	12.611		300	14.718
	310	12.512		310	14.634
	320	12.487		320	14.532
	330	12.417		330	14.398

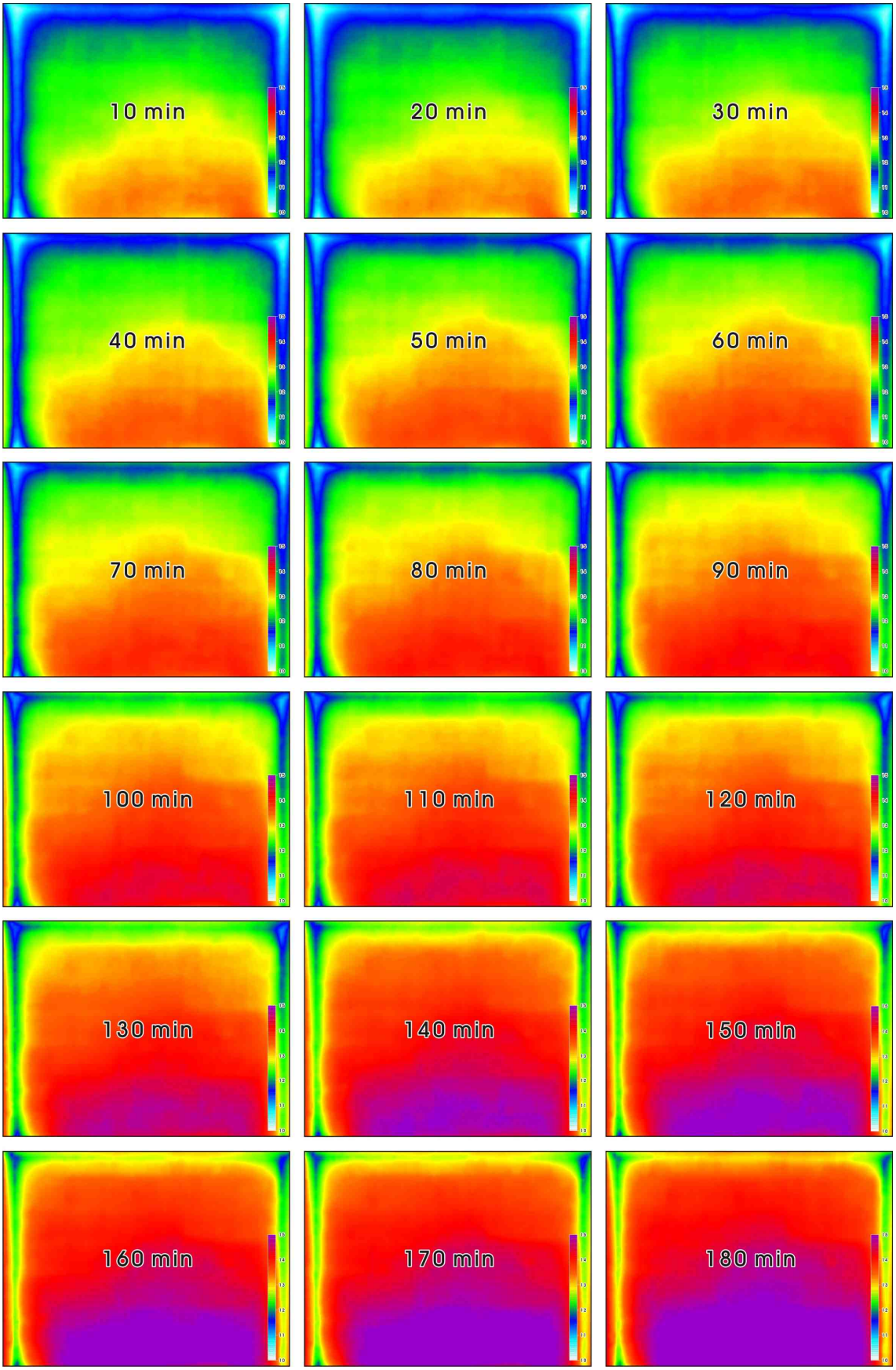


그림 2.134 50℃ 온수 가열 시 시험동 벽체의 열적특성 변화

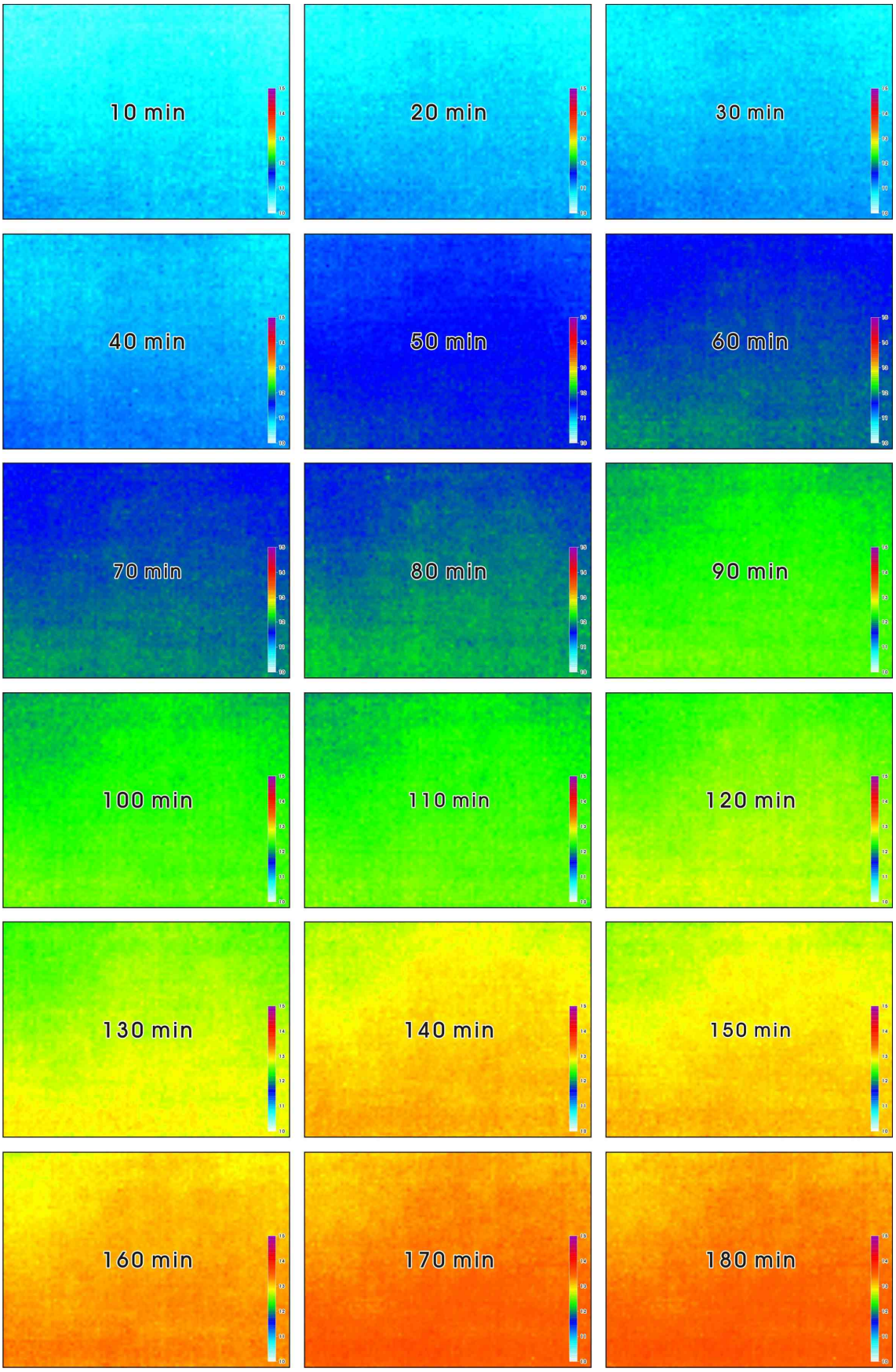


그림 2.135 50℃ 온수 가열 시 기준동 벽체의 열적특성 변화

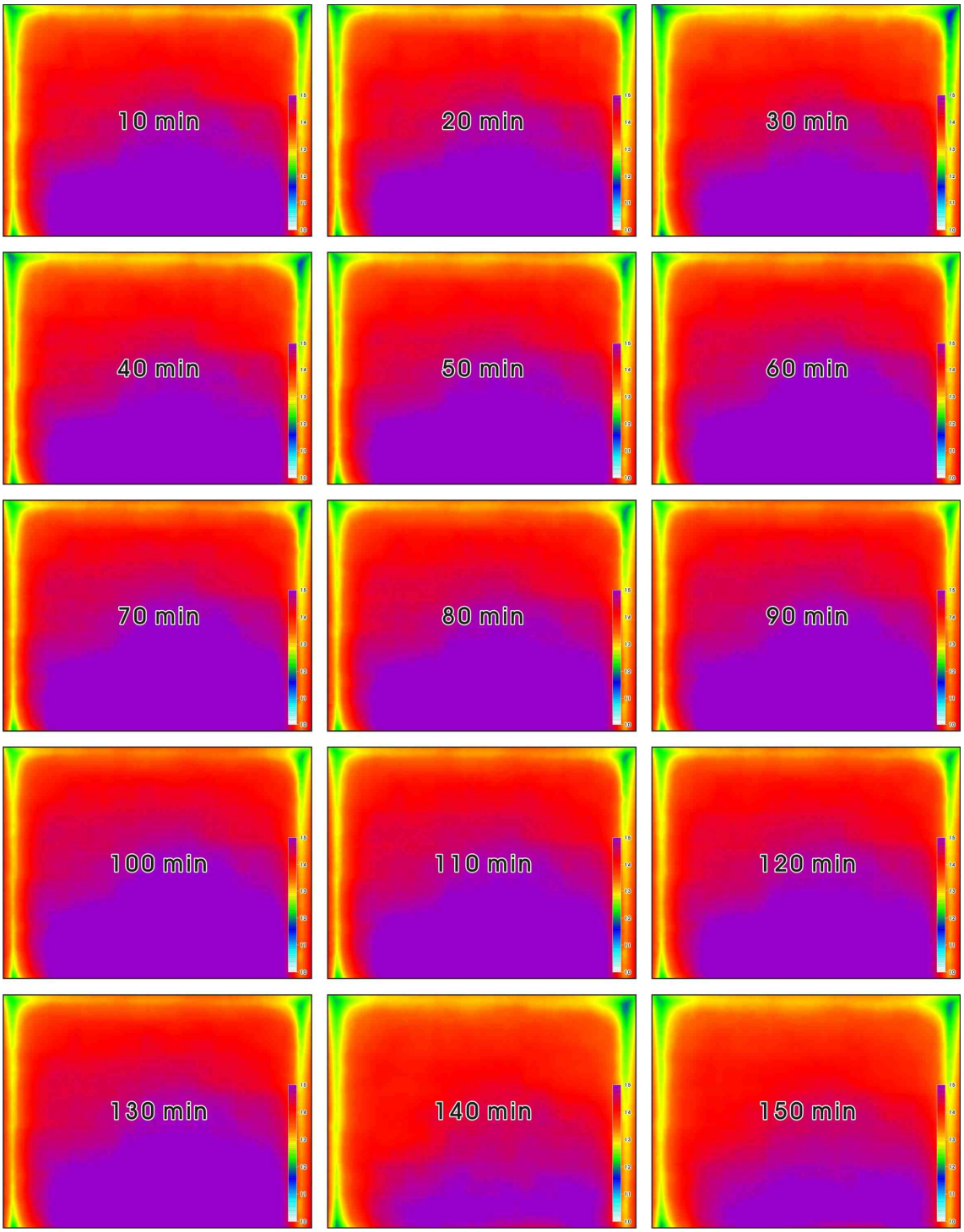


그림 2.136 50℃ 온수 가열 후 냉각시 시험동 벽체의 열적특성 변화

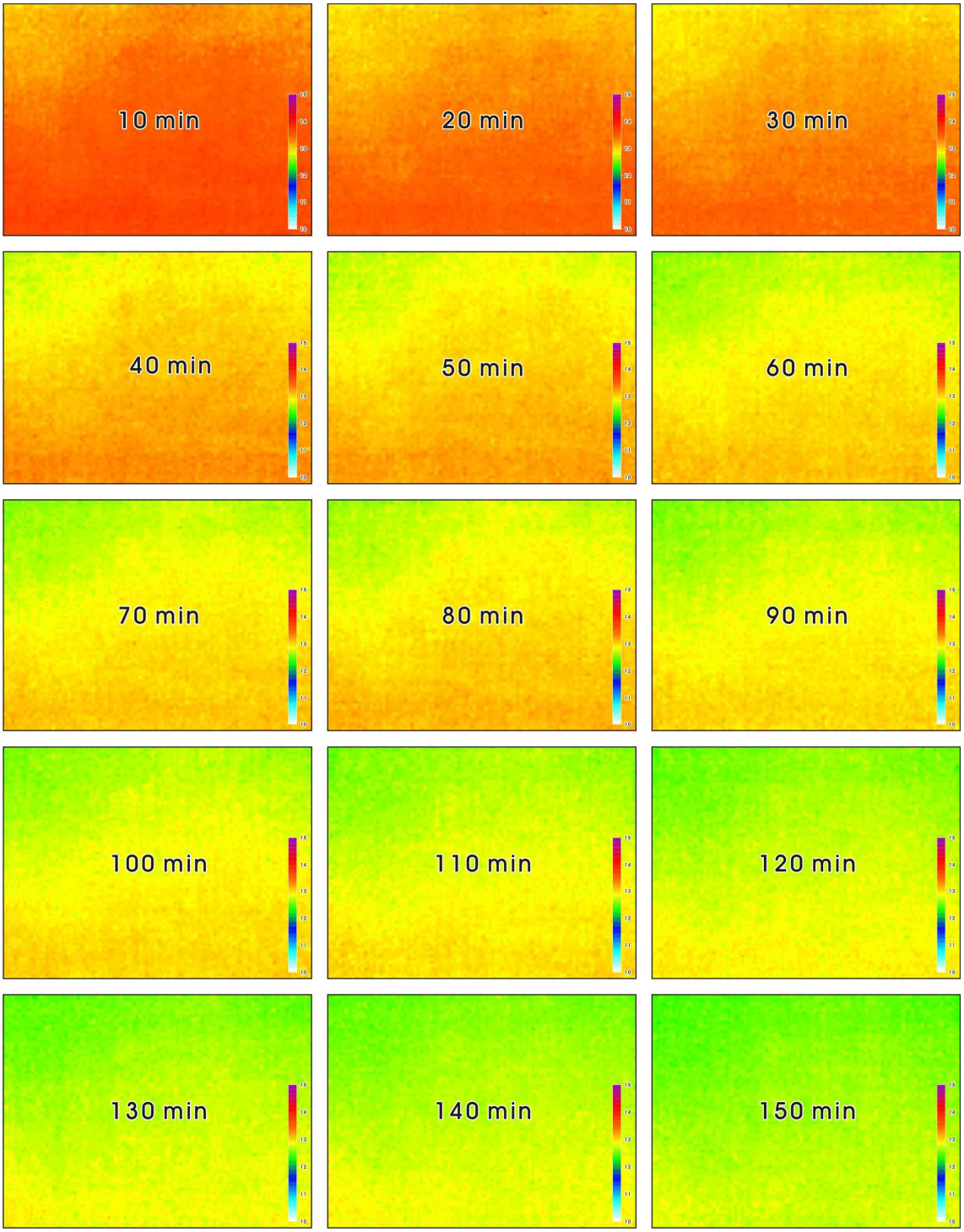


그림 2.137 50℃ 온수 가열 후 냉각 시 기준동 벽체의 열적특성 변화

② 이동식 에어컨을 이용한 냉각 가열 실험

실험은 여름철에서 에어컨을 이용하여 벽체의 냉각 후 문을 열고 자연 환기 시에 대기온도에 의해서 재가열로 인한 온도변화를 관찰하였다. 그림 2.138은 동일 스펙의 이동식 에어컨 2대를 각 시험동과 기준동의 벽면에 설치 후 180분의 냉각과 120분의 환기를 진행하였다.

시험동과 기준동의 벽체의 온도는 27.5℃에서 시작하여 30분 만에 시험동 25.8℃, 기준동 26.7℃으로 떨어지며 기준동의 경우 26℃에서 더 이상 온도가 하강하지 않으며 일정한 수준으로 수평이동하는 것을 관찰할 수 있다. 시험동의 경우 30분 이후 하락의 폭이 크며, 최대 24.9℃까지 떨어지는 것이 관찰되며, 180분 이후 환기 시에 온도가 회복에서 초기 210분까지 급격하게 상승하나 이후 시험동과 기준동 0.4℃ 차이를 두고 평행하게 상승한다.

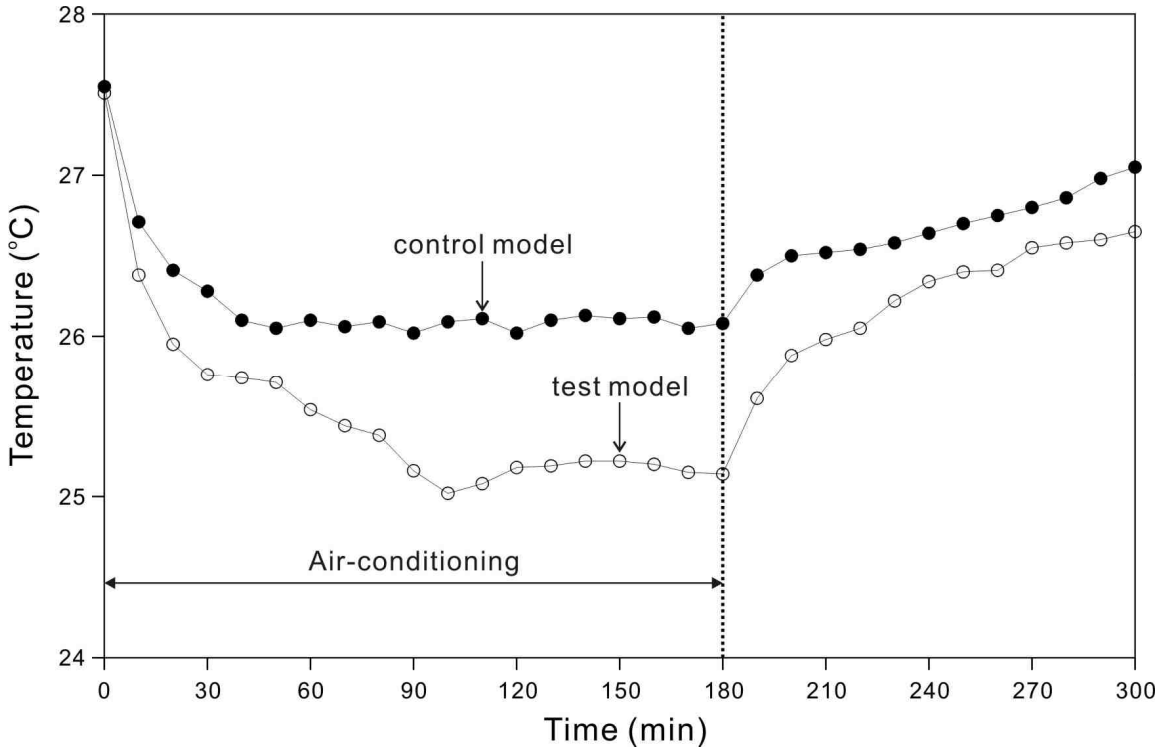




그림 2.138 50℃ 냉각시 기준동 벽체의 열적특성 변화(상), 현장사진(하)

(나) 온도센서를 이용한 분석

그림 2.139는 온수온도를 75℃로 7시간 동안 보일러 가동 시 복사열로 인한 벽체의 온도 상승 경향을 나타내고 있다. 초기 온도 기준동과 시험동 모두 6.5℃로 같았으며, 가열 시작 1시간 후 0.3℃, 2시간 후 0.7℃, 3시간 후 1℃, 4시간 후 1.3℃, 5시간 후 1.7℃, 6시간 후 1.8℃, 7시간 후 2℃의 온도 차이를 보인다. 이러한 실험 결과는 다공성 장석의 비표면적 특성에 의하여 가열과정에서 높은 열전도율로 인하여 빠른 온도 상승 효과를 나타낸 것으로 판단된다.

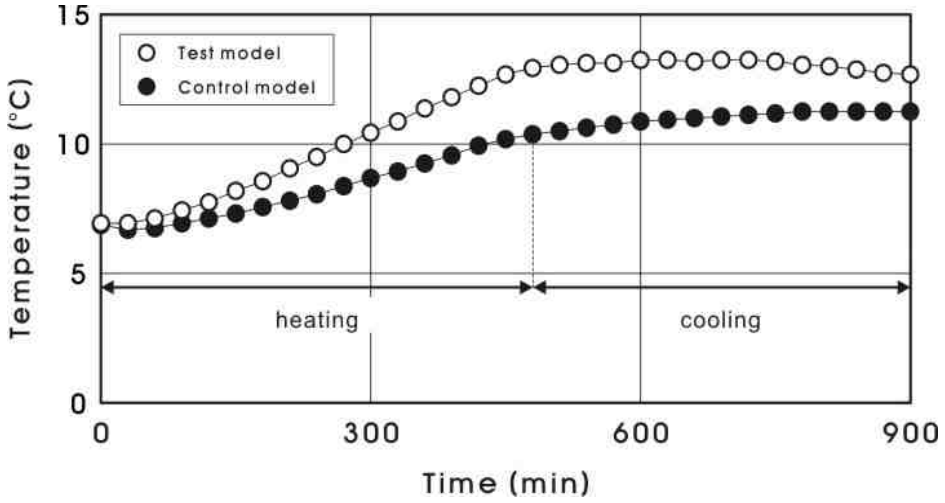


그림 2.139 온수온도 75℃ 설정 시 복사열로 인한 벽체의 온도상승(1차 시공)

그림 2.140은 온수온도를 50℃로 180분 가열하여 온도 센서를 이용하여 벽체의 열적특성 변화를 관찰하였다. 초기온도는 9.51℃로 시작하여 180분에 도달시에 시험동 11.96℃, 기준동 10.91℃에 도달 한다. 이때의 온도 차이는 1.05℃의 차이를 보인다. 180분의 가열 후, 시험동의 온도 보일러를 가동을 중단 후, 기준동의 온도가 시험동의 온도까지 도달하는 시간을 측정하였고, 140분의 가열시간을 거치면서 시험동과 동일한 온도로 도달하였다.

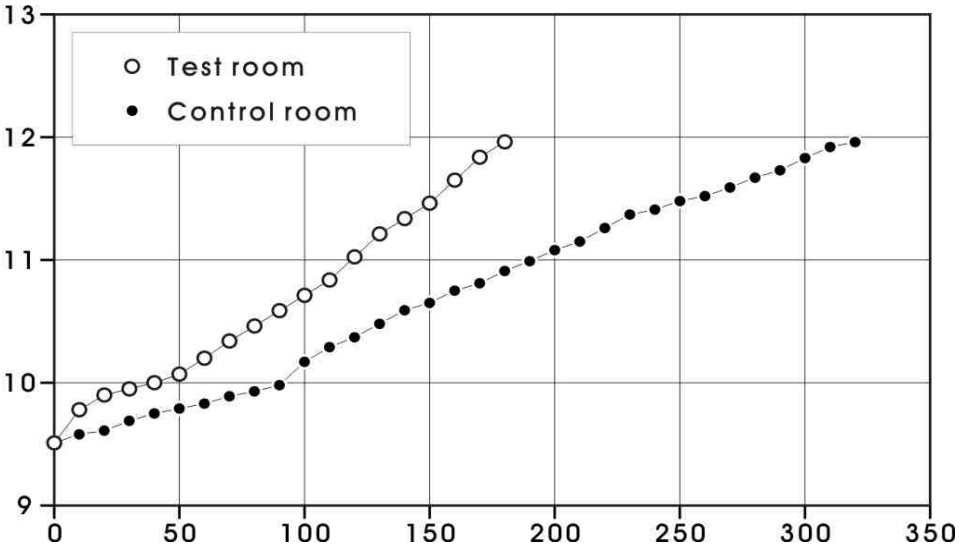


그림 2.140 50℃ 가열실험 인한 벽체의 온도상승(1차 시공-2차 실험)

표 2.61 50℃ 가열실험 인한 벽체의 온도상승(1차 시공-2차 실험)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	9.51	시험동	0	9.51
	10	9.58		10	9.78
	20	9.61		20	9.90
	30	9.69		30	9.95
	40	9.75		40	10.00
	50	9.79		50	10.07
	60	9.83		60	10.20
	70	9.89		70	10.34
	80	9.93		80	10.46
	90	9.98		90	10.59
	100	10.17		100	10.71
	110	10.29		110	10.84
	120	10.37		120	11.03
	130	10.48		130	11.21
	140	10.59		140	11.34
	150	10.65		150	11.46
	160	10.75		160	11.65
	170	10.81		170	11.84
	180	10.91		180	11.96
	190	10.99		190	-
	200	11.08		200	-
	210	11.15		210	-
	220	11.26		220	-
	230	11.37		230	-
	240	11.41		240	-
	250	11.48		250	-
	260	11.52		260	-
	270	11.59		270	-
	280	11.67		280	-
	290	11.73		290	-
	300	11.83		300	-
	310	11.92		310	-
	320	11.96		320	-

(다) 벽체 에너지 효율 분석

① 1차 벽체 에너지 효율

경량 블럭 1차 온도시험은 가열 180분 진행하였고, 경량 블록 2차 온도시험은 180분 가열 150분 냉각으로 시간을 동일하게 설정하여 실험을 진행하였고, 벽체의 에너지 효율을 분석하였다.

경량블럭 1차 온도시험은 초기 온도는 6.51℃로 동일하게 시작하여 가열을 시작하여 180분에서의 시험동의 온도는 8.81℃, 기준동의 온도는 7.38℃로 가열을 종료하였다. 이때 온도차이는 1.44℃이고 이때의 시험동의 온도로 기준을 맞추면 추가 가열이 150분이 더 필요하다. 이때의 소요되는 전기 사용량은 총 14.90 kWh가 필요하며, 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 44.44 %로 절감할 수 있다(그림 2.141, 표 2.62).

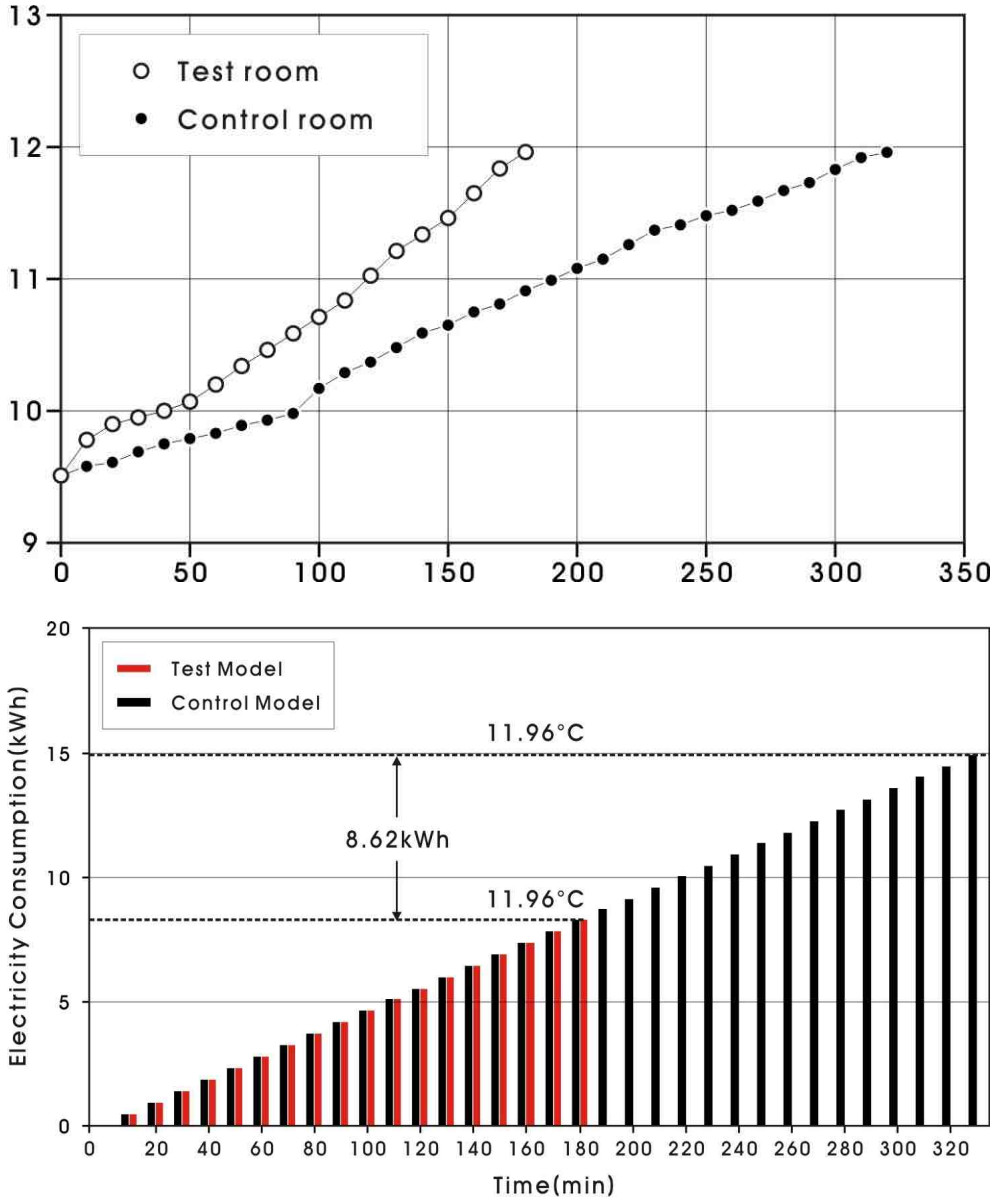


그림 2.141 1차 벽체 에너지 효율 분석

표 2.62 경량블록 벽체의 1차 시공의 전력량 비교

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0.00	시험동	0	0.00
	10	0.46		10	0.46
	20	0.92		20	0.92
	30	1.38		30	1.38
	40	1.84		40	1.84
	50	2.30		50	2.30
	60	2.76		60	2.76
	70	3.22		70	3.22
	80	3.68		80	3.68
	90	4.14		90	4.14
	100	4.60		100	4.60
	110	5.06		110	5.06
	120	5.52		120	5.52
	130	5.98		130	5.98
	140	6.44		140	6.44
	150	6.90		150	6.90
	160	7.36		160	7.36
	170	7.82		170	7.82
	180	8.28		180	8.28
	190	8.72		190	-
	200	9.16		200	-
	210	9.60		210	-
	220	10.05		220	-
	230	10.49		230	-
	240	10.93		240	-
	250	11.37		250	-
	260	11.81		260	-
	270	12.25		270	-
	280	12.69		280	-
	290	13.13		290	-
	300	13.58		300	-
	310	14.02		310	-
	320	14.46		320	-
	330	14.90		330	-

② 2차 벽체 에너지 효율

경량블록 2차 온도 시험에서 초기 온도는 12.086℃로 동일하게 시작하여 가열을 시작하여 180분에서의 시험동의 온도는 15.672℃, 기준동의 온도는 13.795℃로 가열을 종료하였다. 이때 온도차이는 1.877℃이고 이때의 시험동의 온도로 기준을 맞추면 추가 가열이 180분이 더 필요하다. 이때의 소요되는 전기 사용량은 총 16.56 kWh가 필요하며, 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 50.00 %로 절감할 수 있다(그림 2.142, 표 2.63).

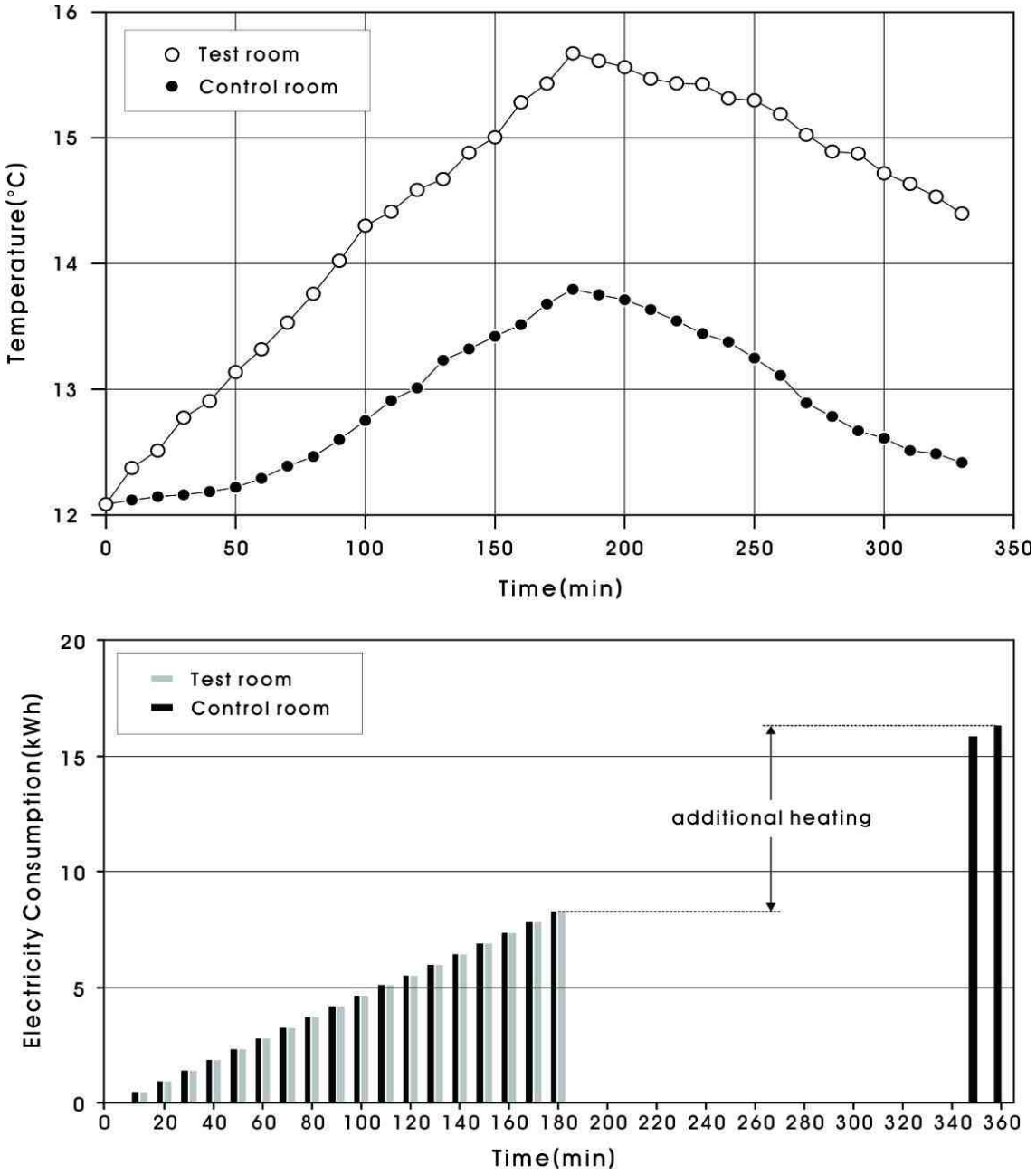


그림 2.142 2차 벽체 에너지 효율 분석

표 2.63 경량블록 벽체의 2차 시공의 전력량 비교

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0.00	시험동	0	0.00
	10	0.46		10	0.46
	20	0.92		20	0.92
	30	1.38		30	1.38
	40	1.84		40	1.84
	50	2.30		50	2.30
	60	2.76		60	2.76
	70	3.22		70	3.22
	80	3.68		80	3.68
	90	4.14		90	4.14
	100	4.60		100	4.60
	110	5.06		110	5.06
	120	5.52		120	5.52
	130	5.98		130	5.98
	140	6.44		140	6.44
	150	6.90		150	6.90
	160	7.36		160	7.36
	170	7.82		170	7.82
	180	8.28		180	8.28
	190	8.73		190	-
	200	9.17		200	-
	210	9.62		210	-
	220	10.06		220	-
	230	10.51		230	-
	240	10.95		240	-
	250	11.40		250	-
	260	11.84		260	-
	270	12.29		270	-
	280	12.74		280	-
	290	13.18		290	-
	300	13.63		300	-
	310	14.07		310	-
	320	14.52		320	-
	330	14.96		330	-
	340	15.41		340	-
	350	15.85		350	-
	360	16.30		360	-

(4) 소결

시험동의 경량블록의 시공은 1차, 2차로 나뉘어 시공하였고, 기준동은 시멘트 벽돌 조적조로 내외부 미장을 하여 1차례 시공만 진행하였다. 경량블록은 다공질 장석을 골재로 사용하여 시멘트와 경량기포로 제작된 블록은 1차에서 사용하였고, 다공질 장석, 시멘트, 경량기포와 PVA섬유를 사용한 2차 경량 블록 배합비로 사용되었다. 1차와 2차의 차이점은 경량기포만으로 밀도를 저감하고 비표면적을 늘려 축열성을 개선하는 방법은 압축강도와 인장강도의 저하를 초래하여 이를 해결하고자 토목섬유의 일종인 PVA섬유를 사용하여 부족한 강도의 보강을 하게 되었다.

1차 시공 된 경량 블록의 열적 특성의 열화상 실험은 4시간 가열, 6시간 냉각을 진행하여 2.2℃의 온도차이가 발생한다는 것을 관찰할 수 있었으며 냉각구간에서도 높은 축열성을 띄며 온도의 하강이 기준동에 비해 적다는 것을 관찰할 수 있었다. 1차 시공의 2차 실험에서 온도 센서를 이용한 실험에서 가열 180분을 하여 열적특성을 전력감소량으로 계산하면 온도 차이는 1.44℃가 발생하며, 기준동의 추가 전기사용량은 14.90 kWh에 발생하며, 시험동의 전력감소량은 44.44 %의 차이를 보인다.

2차 시공에서는 180분 가열에서의 온도 차이는 1.877℃의 온도차이가 발생한다는 것을 관찰할 수 있었다. 시험동과 기준동의 온도 차이에 따른 전기 사용량은 16.56 kWh가 사용되며, 이는 시험동의 경량블록은 기준동에 비해 50%의 에너지를 절감한다고 볼 수 있다.

자. 천장 마감재 실험

(1) 마감재 제작

천장 마감재는 바닥 모르타르 마감, 경량블록과 달리 외기에 노출되기에 오염물질을 흡착하며 습도조절이 가능한 클리놉틸로라이트를 혼입한 천장 마감제를 제작하였다. 제작방식은 타일형, 미장형, 도장(분사)형으로 개발하였고 선택에 따라 사용이 가능하여 용도나, 표면에 따라 사용 방법을 선택하면 된다. 또한, 다양한 색상변화를 주기위해서 레드셰일과 흡착재를 단계별로 사용하여 색상조절이 가능하다.

제작은 그림 2.144에서 각 재료를 계량하여 교반조에 교반을 하여 모르타르로 제작한다.



그림 2.144 천장마감재 제작과정(좌: 재료 계량, 중: 교반, 우: 모르타르)

(가) 도장(분사)

물시멘트비(W/C)의 제어로 유동성이 높은 모르타르를 배합하여, 0.8 MPa의 압력의 에어 컴프레서를 이용하여 분사를 한다. 이때 배출량은 120 L/min의 속도로 분사를 하며, 모르타르의 입경을 미세하게 조절하여(50 ㎛) 미세하게 분사를 하여 도장처리한다(그림 2.145).



그림 2.145 분사형 장비 및 천장 마감 도장

(나) 몰드형 패널형

패널형은 1 cm 내외의 두께의 거푸집을 제작하여 패널 형식으로 제작을 하며, 두께가 얇은 관계로 인장력 보강을 위해서 소량의 PVA섬유를 첨가하여 부족한 인장력을 보강한다. 패널형의 규격은 30 cm×20 cm로 제작(그림 2.146)이 되며, 규격은 자체 시험용으로 제작하였으며, 추후 KS F 1001 규격으로 변경이 가능하다.

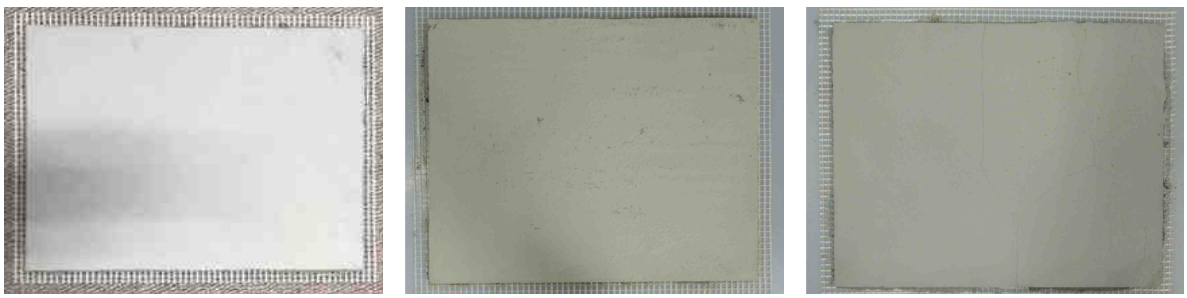


그림 2.146 패널형 천장 마감재 (좌: 규산염재료원패널, 중: 섬유혼입패널, 우:활성탄패널)

패널형의 마감재로 부착형 직물을 이용하여 패널형으로도 제조하였다. 부착형 직물을 바닥에 깔고 1 cm 두께로 제작하였으며, 콘크리트, 나무, 돌 등 어떠한 재료원에 부착이 가능하며 내구성이 뛰어난 것이 장점으로 다양한 형태로 제작이 가능하다(그림 2.147).



연속섬유 부착형 천장 패널

그림 2.147 직물을 이용한 패널

(다) 미장

건축 시공시에 주거공간의 마감은 미장으로 마감을 하며, 이때 마감은 모래와 시멘트를 배합하여 마감을 하는 것이 일반적이다. 규산염 재료원을 이용하여 미장재로 사용하여 이때 중요한 것 요소 중 하나로 일반적으로 벽면의 미장마감은 작업자에 따라 조금씩 다르지만 쉽게 흘러내리지 않기에 작업자의 편의성에 따라 물시멘트비(W/C)가 결정된다. 하지만 천장부의 미장 배합은 일반적인 벽면의 미장 마감의 물시멘트비(W/C)와는 조금 수정하여 미장 배합을 설계하였다(그림 2.148). 일반적인 미장마감은 건조 수축 및 균열 발생하나, 규산염 재료원의 배합의 장점은 건조수축의 저감, 습도 조절, 항균성, 오염원의 흡착성능이 뛰어난 것이 장점이다. 배합에 따라 표면의 색상의 톤을 조절가능도 가능하다.



그림 2.148 다양한 노출면의 미장 마감

(2) 친환경 특성

본 연구에서 시멘트를 대체할 수 있는 재료원으로 친환경적이며, 다양한 기능을 가진 규산염 산업광물들을 이용하였다. 그 중 다공질 장석은 본 연구에서 수행된 실험을 통해 산성중화능력, 항균성, 높은 원적외선 방사능력과 탁월한 중금속 흡착성능을 보여주었다. 천장 미장의 재료원에는 바닥 축열모르타르와 벽체 블록을 제작하는데 주요 재료원으로 사용된 다공질 장석에 클리놉틸로라이트를 추가하여 제작하였다. 클리놉틸로라이트의 대표적인 특성은 이온교환으로 느슨하게 결합하고 있는 이온들이 다른 이온으로 비교적 쉽게 치환됨으로써 기공의 표면적이 넓고 암석 내에 공간이 존재하기 때문에 촉매나 촉매의 운반체로 주로 활용된다. 또한, 핵폐기물 처리, 야금폐기물 처리, 양식업, 탈취, 가축사료 첨가제, 토양개량용으로 이용된다. 특히 물과 가스의 흡착능력이 있어 습도조절과 유해가스의 흡착에도 우수한 성능을 보여준다, 2000년대 초반부터 언론에 집중적인 관심을 받고 있는 새집증후군은 20년이 지난 지금까지도 건축 내·외장재의 기술개발에 환경오염물질(포름알데이드, VOCs, 라돈 등)를 제거하는 기술 개발이 활발히 진행중에 있다.

2018년 폐기물 해상최종처리기술개발 연구에서 클리놉틸로라이트와 장석과 시멘트를 혼합한 재료의 중금속 흡착필터에 대한 연구가 수행되었다. 그 보고서에서 제작한 흡착필터는 2가지 종류로 클리놉틸로라이트와 시멘트로 제작된 흡착필터1과 다공질 장석, 클리놉틸로라이트와 시멘트가 혼합된 흡착필터2를 제작하였으며, 이를 이용하여 중금속 흡착 성능 시험을 수행하였다. 그 실험에서 납(Pb), 카드뮴(Cd), 구리(Cu)와 비소(As)가 혼합된 혼합 중금속용액의 등온흡착시험(그림 2.149)과 동적흡착시험(그림 2.150)결과 클리놉틸로라이트와 장석이 모두 포함된 흡착필터2에서 흡착성능이 더 우수하다는 결과를 보여주고 있다(한국

해양과학기술원, 2018). 이는 본 과제에서 사용된 미장 마감재가 친환경적인 건축자재로서 충분한 기능을 보여줄 수 있을 것으로 기대한다.

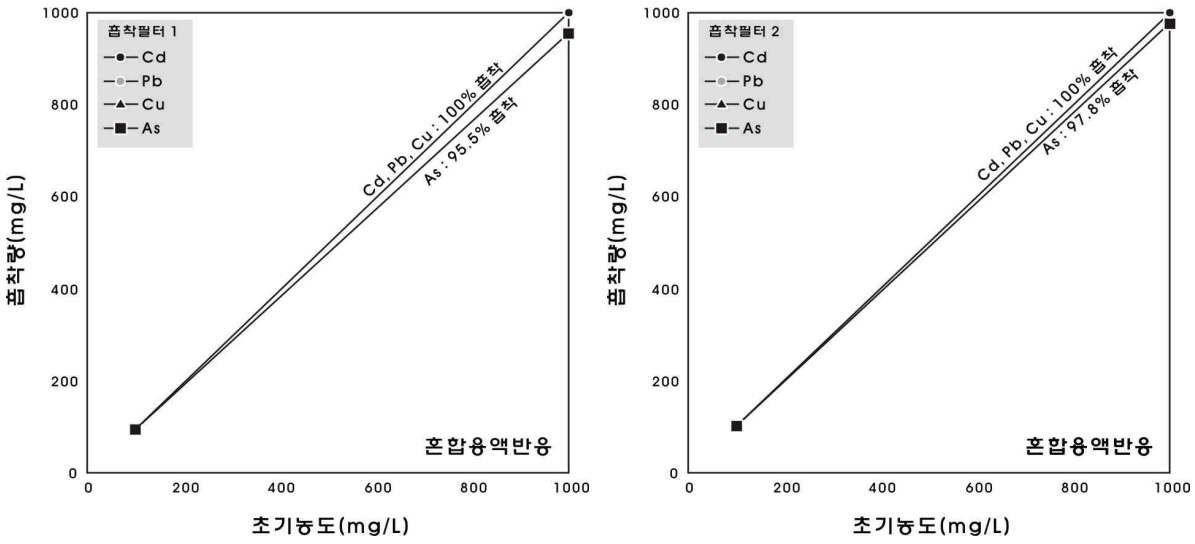


그림 2.149 흡착필터1, 2의 등온흡착시험(한국해양과학기술원, 2018)

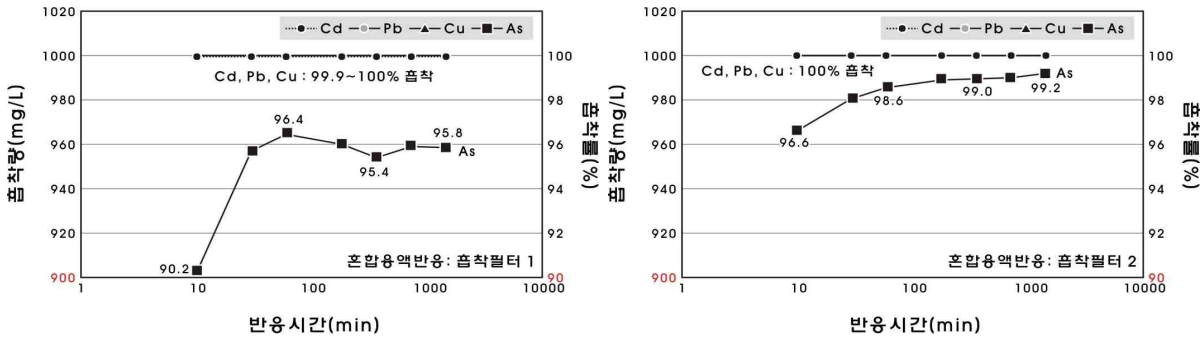


그림 2.150 흡착필터1, 2의 동적흡착시험(한국해양과학기술원, 2018)

(3) 천장 마감재의 축열성능

(가) 열화상 카메라를 이용한 분석

미장 마감은 2차 시공한 경량 벽체 블록을 시공 후, 벽면의 규산염 재료원으로 미장 마감을 하고 천장의 규산염 재료원을 사용하여 시공을 하였다. 시험동은 1cm 두께로 규산염 재료원을 사용하여 미장 마감을 한 천장 부분을 촬영하였다. 축열성능 실험은 가열실험 480분, 냉각실험 240분 동안 진행하였다. 열화상으로 촬영된 천장부의 온도 범위는 가열실험에서 기준동은 4.8-5.4℃, 시험동은 4.2 -4.6℃에서 시작되었으므로 최저온도에서 0.6℃, 최고온도 0.8℃ 차이를 보인다(그림 2.151-2.152). 냉각실험에서는 설정된 픽셀부를 벽체부의 최고온도인 15℃과 유사하게 실험을 진행하려고 하였으나 천장부분은 축열층이나 벽체부와 달리 복사열을 이용하므로 가열시간이 너무 오래 소요되어 천장부의 최고온도가 13.4℃가 도달할 때까지 실내를 가열한 후 냉각 실험을 진행하였다(그림 2.153-2.154).

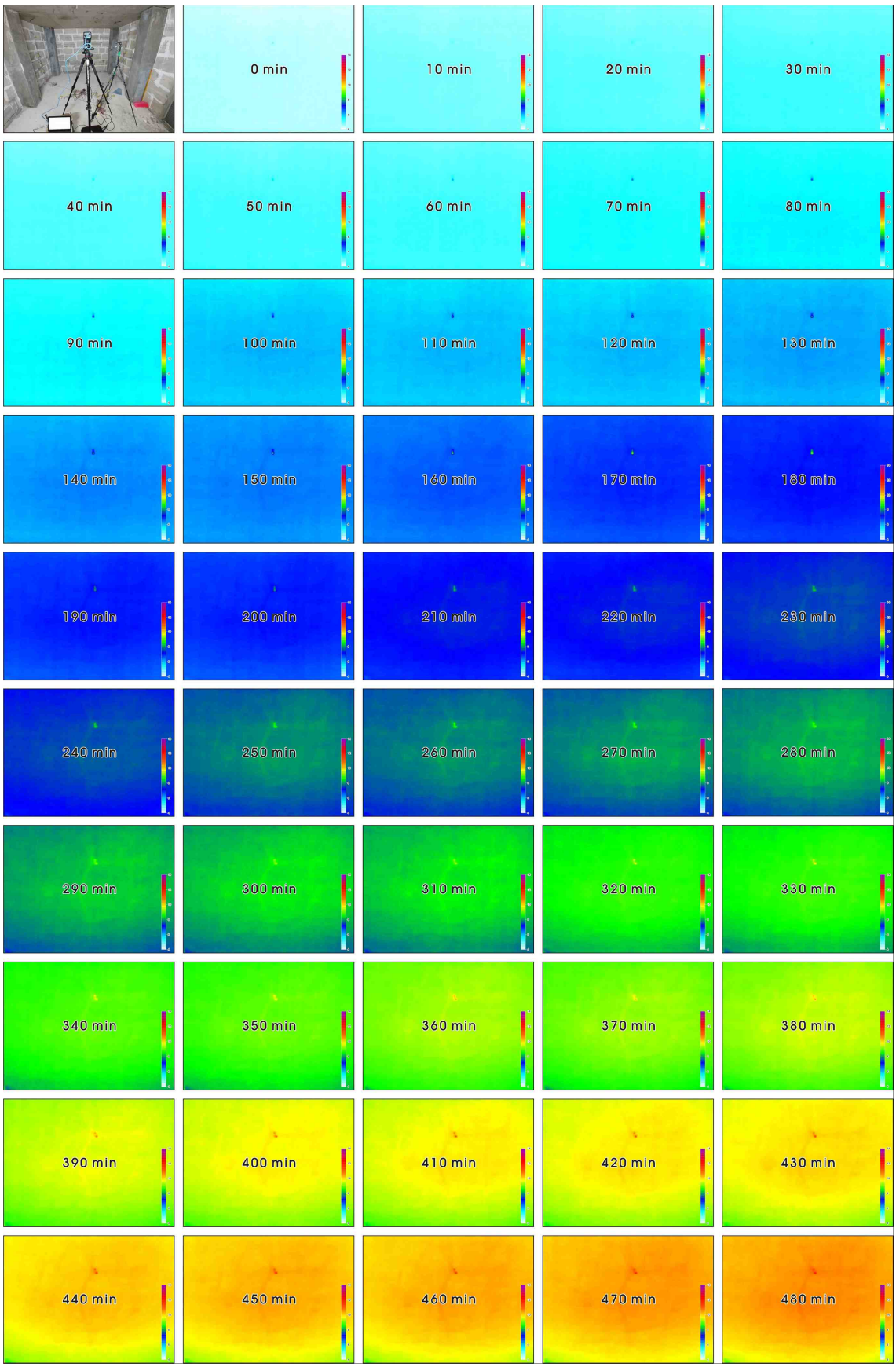


그림 2.151 50℃ 온수 가열 시 시험동 천장의 열적특성 변화

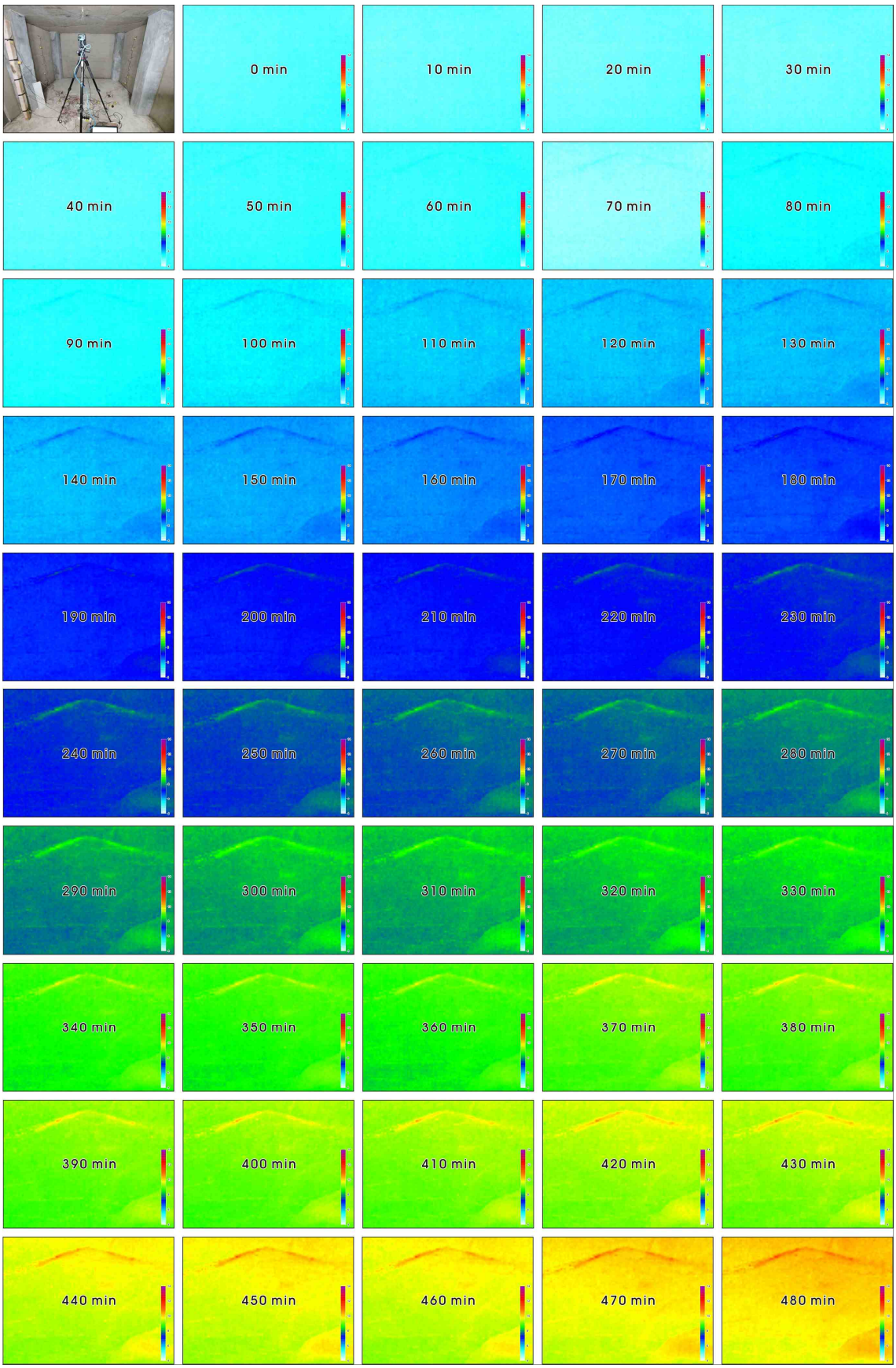


그림 2.152 50℃ 온수 가열 시 기준동 천장의 열적특성 변화

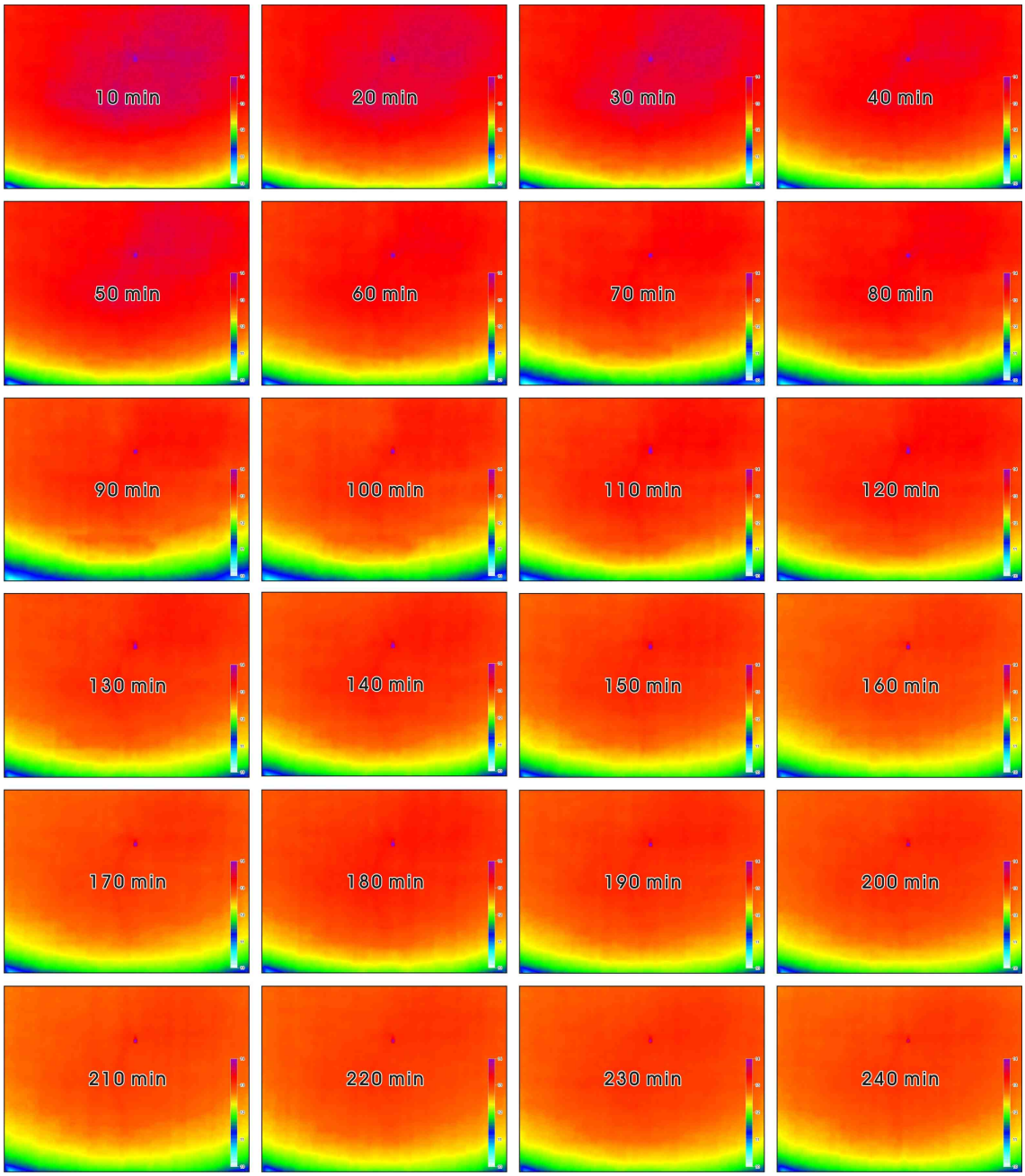


그림 2.153 50℃ 온수 가열 후 냉각시 시험동 천장의 열적특성 변화

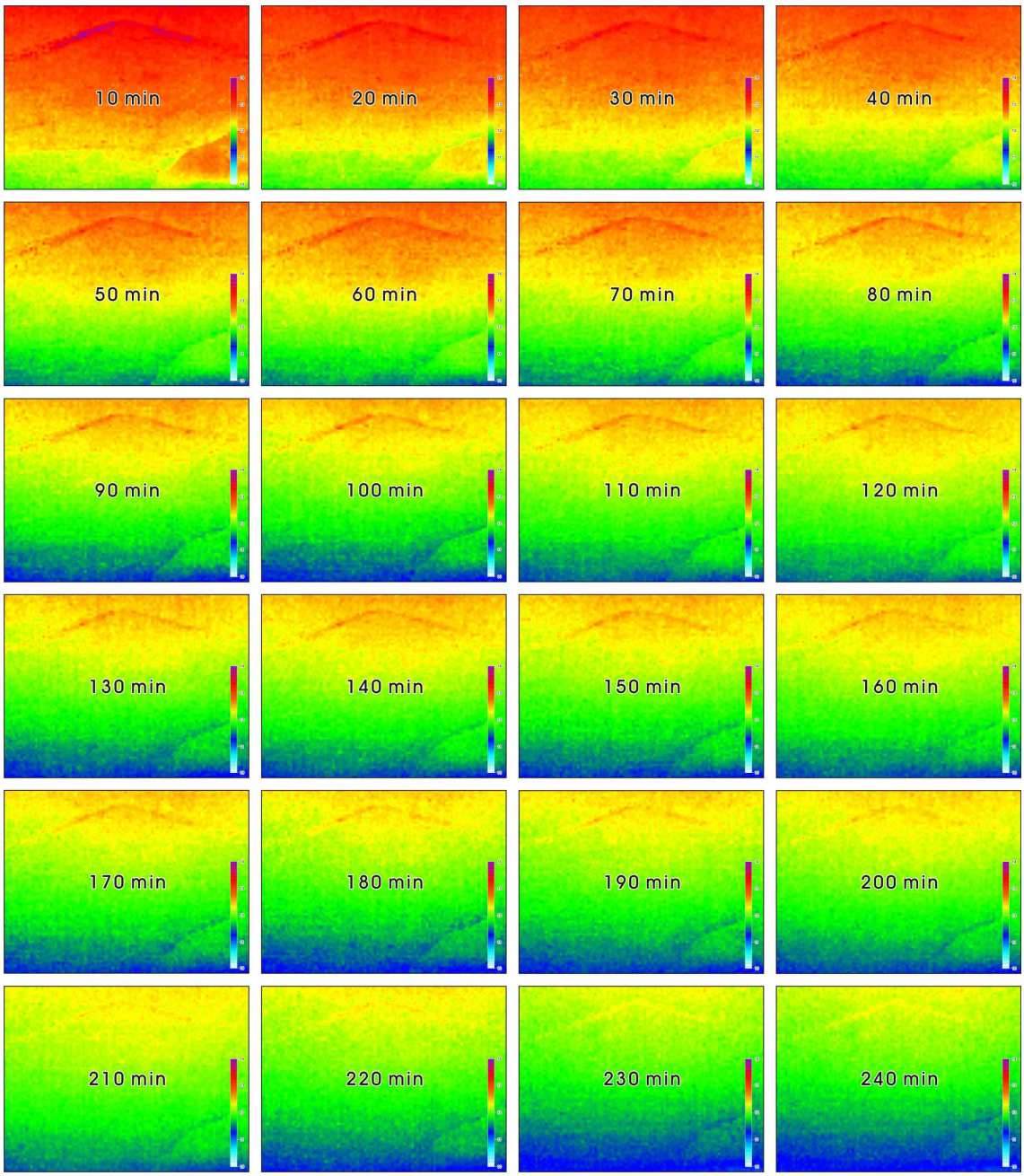


그림 2.154 50℃ 온수 가열 후 냉각시 기준동 천장의 열적특성 변화

그림 2.155와 표 2.64-2.65에서 80분 전까지 시험동과 기준동 두 모형의 온도상승이 비슷하게 상승되는 것을 확인할 수 있고 80분 이후 점차적으로 온도 상승을 한다. 시험동과 기준동 가열에서 300분의 시간동안 비슷하게 오르는 것이 시험동의 축열성 때문에 점진적으로 시험동의 온도가 상승하는 것을 관찰할 수 있으며, 480분이 지난 시험동은 10.20℃를 기록하고 기준동은 9.44℃로서 온도의 차이는 0.76℃ 차이를 보이며, 추가의 시간으로 좀 더 가열하면 온도 차이가 더 벌어질 것으로 예상한다.

냉각구간에서 축열 성능을 비교하였다. 시작온도는 13.4℃로 초기의 하강은 시험동과 기준동이 비슷하나 100분이 지난 후, 시험동의 온도 값이 수평하게 이동하는 것을 알 수 있으며, 기준동은 비례하게 하강하는 것을 관찰할 수 있다. 240분의 온도 차이는 시험동 12.94℃이고 기준동 11.982℃로 차이는 0.958℃의 차이를 보인다.

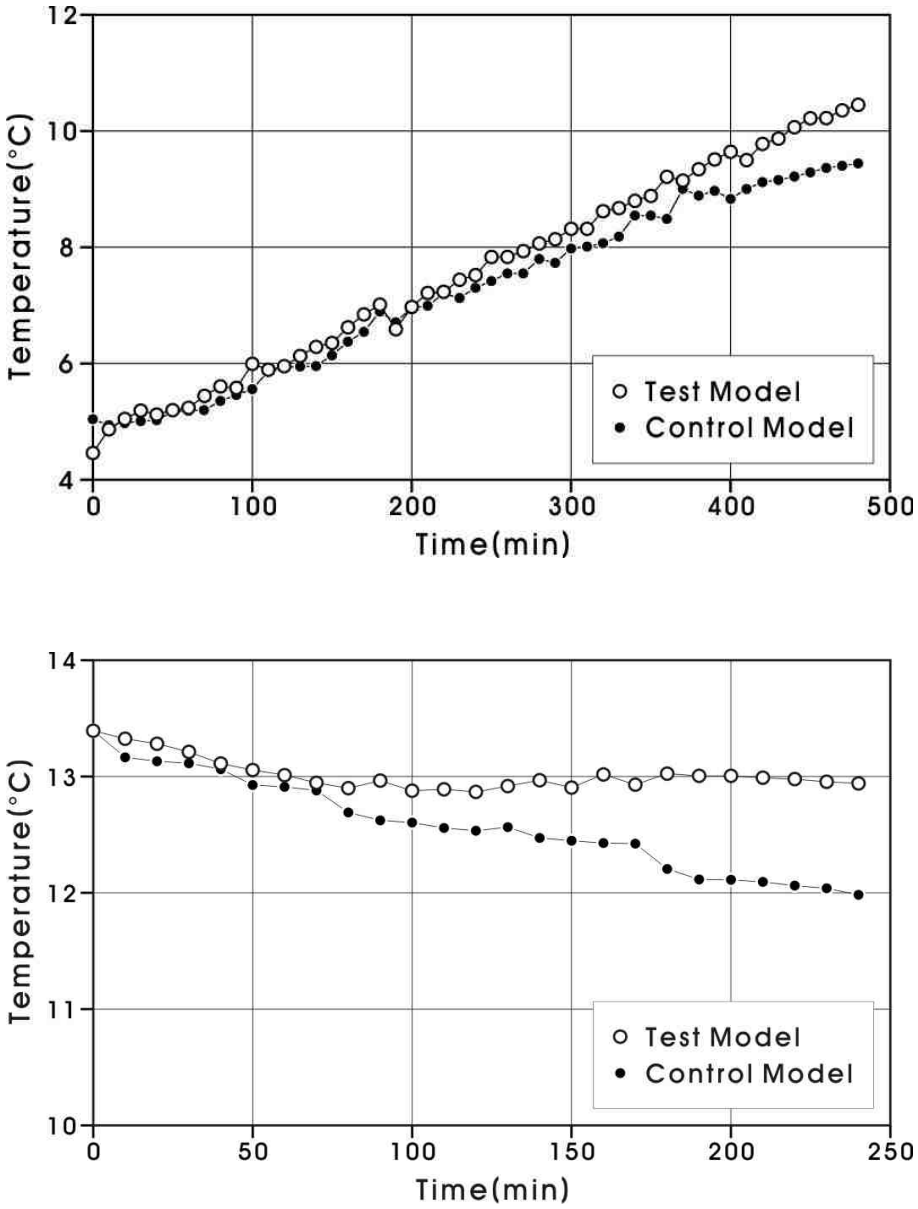


그림 2.155 50℃ 온수 가열(상) 및 냉각(하) 시 천장의 열적특성 그래프

표 2.64 기준동과 시험동의 천장부 가열 온도변화(계속)

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	5.042	시험동	0	4.461
	10	4.940		10	4.868
	20	4.974		20	5.046
	30	5.008		30	5.190
	40	5.03		40	5.122
	50	5.17		50	5.197
	60	5.19		60	5.24
	70	5.25		70	5.44
	80	5.36		80	5.61
	90	5.46		90	5.58
	100	5.56		100	5.99
	110	5.86		110	5.89
	120	5.93		120	5.95
	130	5.95		130	6.13
	140	5.96		140	6.29
	150	6.14		150	6.35
	160	6.38		160	6.62
	170	6.54		170	6.85
	180	6.89		180	7.01
	190	6.71		190	6.59
	200	6.96		200	6.97
	210	6.99		210	7.21
	220	7.20		220	7.23
	230	7.13		230	7.44
	240	7.30		240	7.52
	250	7.42		250	7.83
	260	7.55		260	7.83
	270	7.55		270	7.93

표 2.64 기준동과 시험동의 천장부 가열 온도변화

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	280	7.80	시험동	280	8.07
	290	7.73		290	8.14
	300	7.98		300	8.32
	310	8.01		310	8.32
	320	8.07		320	8.62
	330	8.19		330	8.67
	340	8.55		340	8.80
	350	8.55		350	8.88
	360	8.49		360	9.21
	370	9.00		370	9.15
	380	8.89		380	9.34
	390	8.97		390	9.51
	400	8.83		400	9.64
	410	9.00		410	9.50
	420	9.12		420	9.78
	430	9.16		430	9.87
	440	9.22		440	10.07
	450	9.29		450	10.22
	460	9.37		460	10.23
	470	9.40		470	10.36
	480	9.44		480	10.20
	490	9.54		490	-
	500	9.63		500	-
	510	9.73		510	-
	520	9.82		520	-
	530	9.92		530	-
	540	10.01		540	-
	550	10.11		550	-
	560	10.20		560	-

표 2.65 기준동과 시험동의 천장부 냉각 온도변화

구분	시간(분)	온도(℃)	구분	시간(분)	온도(℃)
기준동	0	13.393	시험동	0	13.393
	10	13.164		10	13.324
	20	13.130		20	13.281
	30	13.113		30	13.211
	40	13.062		40	13.111
	50	12.926		50	13.055
	60	12.910		60	13.011
	70	12.879		70	12.945
	80	12.690		80	12.899
	90	12.622		90	12.964
	100	12.603		100	12.877
	110	12.557		110	12.889
	120	12.533		120	12.867
	130	12.564		130	12.917
	140	12.471		140	12.967
	150	12.447		150	12.904
	160	12.427		160	13.017
	170	12.422		170	12.929
	180	12.204		180	13.024
	190	12.114		190	13.005
	200	12.111		200	13.005
	210	12.093		210	12.989
	220	12.061		220	12.977
	230	12.038		230	12.954
	240	11.982		240	12.940

(나) 천장 마감재 에너지 효율 분석

천장 마감재 모형실험에서 50 ℃의 온수를 공급한 축열실험의 결과로 에너지 효율 분석을 위하여 축열시험은 8시간 동연 연속해서 온수를 공급하였고 기준동과 시험동의 축열층 온도는 각각 9.44 ℃와 10.20 ℃까지 올라갔으며, 소비된 전력은 22.08 kWh였고 시험동의 온수공급을 중단하고 기준동의 온도가 시험동과 같아질 때까지 추가로 가열하였고 이때 소비된 전력은 3.8 kWh로 측정되었다(표 2.64-2.66). 이때의 소요되는 전기 사용량은 총 25.88 kWh가 필요하며, 기준동에 비해 시험동의 전력 감소량은 14.7 %로 절감할 수 있다(그림 2.156, 표 2.66).

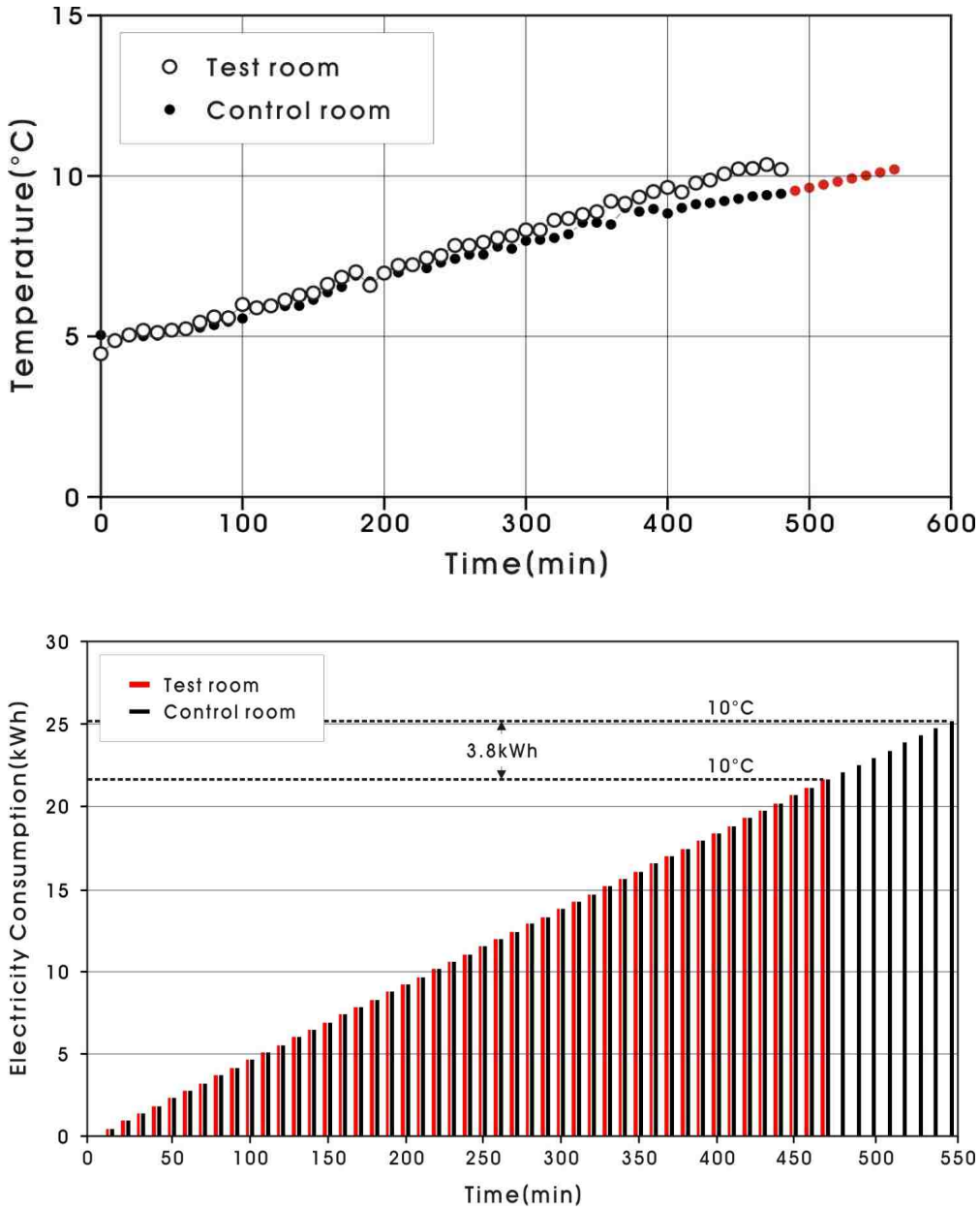


그림 2.156 천장 마감재 모형실험에서의 가열 온도 및 전력사용량

표 2.66 기준동과 시험동의 천장부 가열시험 전력사용량(계속)

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	0	0	시험동	0	0
	10	0.46		10	0.46
	20	0.92		20	0.92
	30	1.38		30	1.38
	40	1.84		40	1.84
	50	2.3		50	2.3
	60	2.76		60	2.76
	70	3.22		70	3.22
	80	3.68		80	3.68
	90	4.14		90	4.14
	100	4.6		100	4.6
	110	5.06		110	5.06
	120	5.52		120	5.52
	130	5.98		130	5.98
	140	6.44		140	6.44
	150	6.9		150	6.9
	160	7.36		160	7.36
	170	7.82		170	7.82
	180	8.28		180	8.28
	190	8.74		190	8.74
	200	9.2		200	9.2
	210	9.66		210	9.66
	220	10.12		220	10.12
	230	10.58		230	10.58
	240	11.04		240	11.04
	250	11.5		250	11.5
	260	11.96		260	11.96
	270	12.42		270	12.42
	280	12.88		280	12.88
	290	13.34		290	13.34
	300	13.8		300	13.8
	310	14.26		310	14.26
	320	14.72		320	14.72
	330	15.18		330	15.18

표 2.66 기준동과 시험동의 천장부 가열시험 전력사용량

구분	시간(분)	전력량(kWh)	구분	시간(분)	전력량(kWh)
기준동	340	15.64	시험동	340	15.64
	350	16.1		350	16.1
	360	16.56		360	16.56
	370	17.02		370	17.02
	380	17.48		380	17.48
	390	17.94		390	17.94
	400	18.4		400	18.4
	410	18.86		410	18.86
	420	19.32		420	19.32
	430	19.78		430	19.78
	440	20.24		440	20.24
	450	20.7		450	20.7
	460	21.16		460	21.16
	470	21.62		470	21.62
	480	22.08		480	22.08
	490	22.56		490	-
	500	23.03		500	-
	510	23.51		510	-
	520	23.98		520	-
	530	24.46		530	-
	540	24.93		540	-
	550	25.41		550	-
	560	25.88		560	-

(4) 실내온도 축열성 비교

3차년에 걸쳐 바닥 모르타르 마감, 경량블록, 다공질 장석 미장 모르타르, 규산염 재료원 천장 마감을 사용하여 실대형 모형에 적용한 시험동과 조적식 벽체와 시판 중인 레미탈로 외부, 내부 미장 마감한 기준동에서 50℃온수를 사용하여 720분 가열, 240분 냉각을 거치면서 실내온도를 측정하여 축열 성능을 비교 시험하였다(그림 2.157). 시작온도는 기준동의 경우 7.9℃, 시험동은 7.8℃의 온도 시작하여 가열이 끝나는 시점에서 기준동은 17.3℃,

시험동은 21.0℃로 3.7℃차이를 보인다. 그림 2.158에서와 같이 실내온도를 21.0℃로 목표로 두고 보일러를 가열한다면 시험동이 720분에서 보일러의 가동이 중단되고 기준동은 970분까지 보일러가 가동된다. 실험에서 시험동의 전기사용량은 33.12 kWh, 기준동의 전기사용량의 44.51 kWh으로 25.58 % 소비전력이 줄일 수 있으며, 발생하며, 다른 의미로 다공질 장석, 규산염 재료원을 사용한 건축 내장재를 사용할 시에 건축물의 전체적인 에너지가 절감된다고 평가하였다.

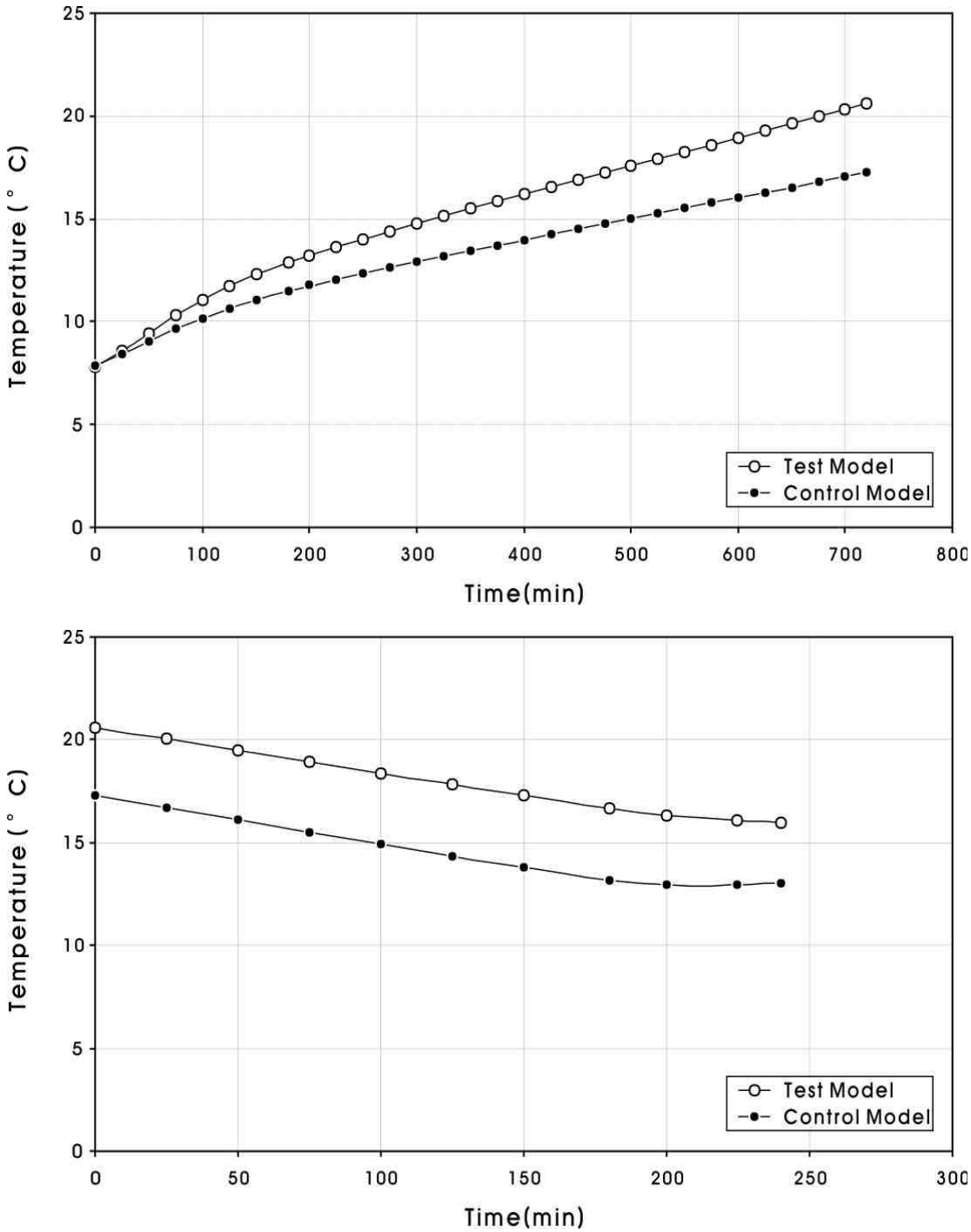


그림 2.157 50℃ 온수를 이용하여 가열과 냉각한 실내온도 시험

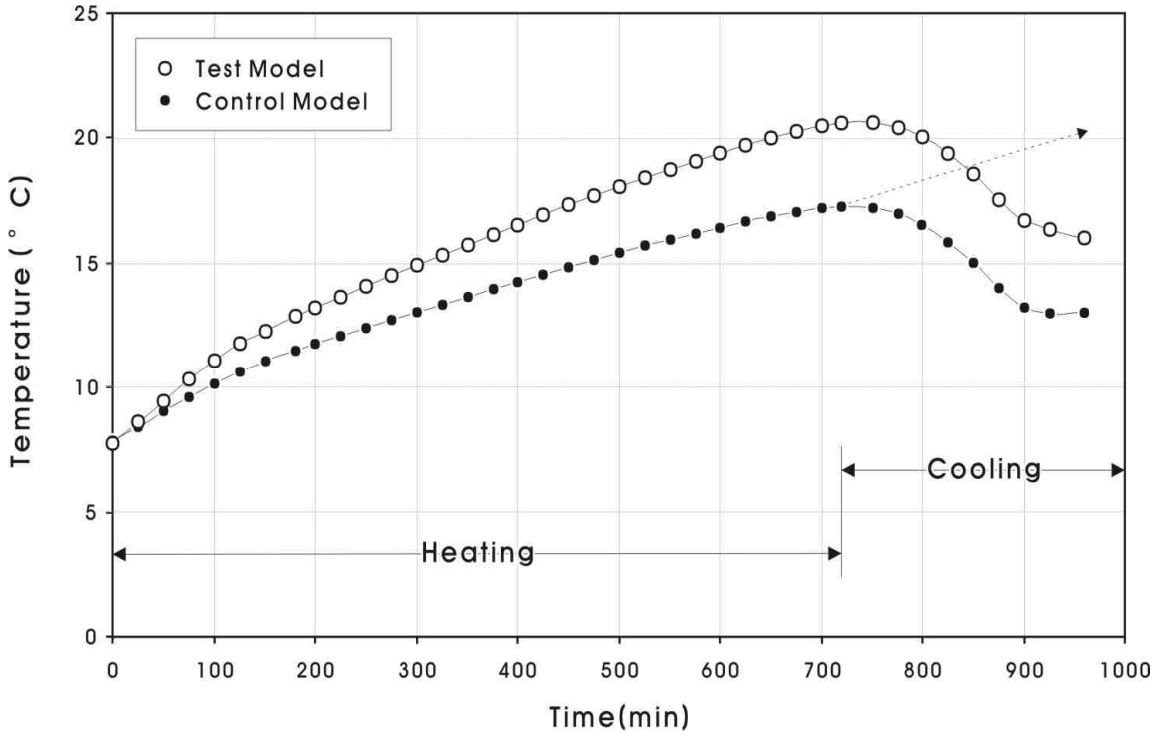


그림 2.158 목표온도 21℃까지 50℃ 온수로 가열 시 온도 변화

(5) 소결

본 연구의 3차년 계획인 천장 마감재 개발은 다공질 장석만이 아니라 클리노틸로라이트가 함유된 재료원을 사용하여 제작하였으며 클리노틸로라이트의 특성은 오염물질을 흡착하고 습도 조절을 할수 있어 최적한 주거공간의 창출할 수 있는 것이 장점이다. 이러한 규산염 재료원을 사용하여 모르타르로 배합하여 도장(분사), 몰드형 패널형, 미장의 형태로 제작이 가능하며, 마감면의 상태에따라 원하는 방법으로 시공이 가능하다. 또한 레드셰일과 흡착재를 사용하여 색상의 다변화를 줄 수 있다.

천장 마감재를 사용한 시험동과 기준동에서 열화상 카메라를 50℃ 온수를 주어 가열 480분, 냉각 240분을 진행했을 때, 열적특성 변화를 관찰하였으며, 두 실험동의 온도 차이는 약 0.76℃로 시험동의 축열성이 뛰어나다는 것이 관찰되었다. 이어지는 냉각시험에서는 시험동이 240분동안 기준동이 11.982℃온도의 저하를 보이는 반면 시험동은 12.94℃온도의 저하를 보이면서 둘의 0.958℃온도차이가 나타난다.

실내온도는 시작온도는 기준동 7.9℃ 시험동은 7.8℃로 시험동이 0.1℃낮게 시작하고 720분 전기보일러 가열 후, 시험동 21.0℃, 기준동 17.3℃로 3.7℃의 온도 차이가 발생한다. 실내온도 21℃로 목표로 두면 시험동의 전기사용량은 33.12 kWh, 기준동의 전기사용량 44.15 kWh으로 기준동에 비해 시험동의 전기 절감은 25.58 % 절감된다고 판단된다.

3 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표달성도

나. 목표 달성여부

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책
(후속연구의 필요성)

라. 연구실적

마. 관련분야 기여도

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표달성도

(1) 정성적 목표달성도

핵심성과 구분		단위성과	성과점검기준
1 나노분말 및 저변형 고강도 경량기포 축열재 제조	1-1	기능성 산업광물 기능성평가	- 건축재료원 기능성 평가 : 흡착율 90% - 시제품 제조 재료원 선정 : 기존재료와 비교평가를 통한 최적 재료 선정
	1-2	경량화(나노분말 및 경량기포 배합) 기술 개발	- 시편(공시체) 제작 기능성 검증 : 소포율 2% 미만 - 시품 제조의 최적 입도 선정 : 목표치 <100㎛ (자동 입도분석을 통한 검증)
2. 친환경 산업광물의 기능성 향상을 위한 2차 처리기술 개발	2-1	결합재/결합촉매 개발	- 친환경 결합촉매 개발로 기능증대와 시공편의성을 위한 배합비 선정 : 일축압축강도 증가(공인시험성적서 제시)
	2-2	기능개선을 위한 처리기술 개발	- 축열, 흡읍, 흡착, 탈취, 항균성 개선 : 양이온치환용량 40meq/100g - 저온 소성 최적화 기술 개발 및 경제성 검토 : 비표면적증가, SEM을 통한 측정
	2-3	바닥용 모르타르 기능개선	- 평활도, 유동성, 균열저감 기능 개선 : 균열발생없음(동결융해시험을 통한 자체 평가)
	2-4	벽면 마감재 기능개선	- 벽면 시공용 미장 및 패널 제작을 위한 강도최적화 : 일축압축강도 2MPa (공인시험성적서)
	2-5	천장 마감재 기능개선	- 천장 시공용 미장 및 패널 제작을 위한 강도최적화 : 인장강도 1MPa (공인시험성적서)
3. 에너지 효율증대 및 자동 수평기능 축열층 모르타르 제품 실용화	3-1	실대형 모형 시공	- 현장 조건을 반영한 시험시공 (시공사업 1개소, 시공매뉴얼) - 자동수평, 유동성, 평활도, 시공 및 유지관리 편의성 검토 : 현장시공 모니터링 - 비교를 위한 모형을 별도 제작하며 개선된 성능을 검토 : 실내모형시험
	3-2	시제품의 기능성 검증	- 모니터링 계측으로 시공전과 후의 상태평가 : 현장 모니터링(단열/흡음/차음) - 시제품 제작 : 전문가 평가
4. 건축용 벽면 내장재 시제품의 실용화	4-1	실대형 모형 시공	- 현장 조건을 반영한 시험시공 : 시공사업 1개소, 시공매뉴얼 - 수직 벽체시공에 적합한 시제품의 강도 개선 성능 검증 : 일축압축강도 2MPa (공인시험성적서) - 시공 및 유지관리 편의성 검토 : 전문가평가

핵심성과 구분		단위성과	성과점검기준
4. 건축용 벽면 내장재 시제품의 실용화	4-2	시제품의 기능성 검증	- 모니터링 계측으로 시공전과 후의 상태 평가 : 현장 모니터링(단열/흡음/차음) 1건 - 문제점 도출 및 개선점 보완 : 최적제작(안) 도출 - 시제품 제작 2건 : 전문가평가
5. 건축용 천장 내장재 시제품의 실용화	5-1	실대형 모형 시공	- 현장조건을 반영한 시험시공 : 시범사업1개소, 시공 매뉴얼 - 천장 시공에 적합한 시제품의 부착강도 개선 및 성능 검증 : 일축압축강도 1MPa (공인시험성적서) - 시공 및 유지관리 편의성 : 전문가 평가
	5-2	시제품의 기능성 검증	- 모니터링 계측으로 시공전과 후의 상태 평가 : 현장 모니터링(단열/흡음/차음) 1건 - 문제점 도출 및 개선점 보완 : 최적제작(안) 도출 - 시제품 제작 2건 : 전문가평가

(2) 정량적 목표달성도

핵심성과 구분	양적 성과지표	양적 성과목표
1 나노분말 및 저변형 고강도 경량기포 축열재 제조	국내(비SCI)논문	1건
	특허:출원(국내)	1건
	특허:등록(국내)	-
	시제품	1건
2. 친환경 산업광물의 기능성 향상을 위한 2차 처리기술 개발	국내(비SCI)논문	2건
	특허:출원(국내)	-
	특허:등록(국내)	2건
	시제품	-
3. 에너지 효율증대 및 자동 수평기능 축열층 모르타르 제품 실용화	국내(비SCI)논문	1건
	특허:출원(국내)	1건
	특허:등록(국내)	-
	시제품	1건
4. 건축용 벽면 내장재 시제품의 실용화	국내(비SCI)논문	-
	특허:출원(국내)	2건
	특허:등록(국내)	1건
	시제품	2건
5. 건축용 천장 내장재 시제품의 실용화	국내(비SCI)논문	1건
	특허:출원(국내)	1건
	특허:등록(국내)	1건
	시제품	2건
합계	국내(비SCI)논문	5건
	특허:출원(국내)	5건
	특허:등록(국내)	4건
	시제품	6건

나. 목표 달성여부

(1) 정성적 목표 달성

구분	세부연구내용	성과점검기준	성과점검 결과	달성도
1-1	기능성 산업광물 기능성평가	- 건축재료원 기능성 평가 : 흡착율 90%	- 중금속 흡착율 99.4%	100%
		- 시제품 제조 재료원 선정 : 기존재료와 비교평가를 통한 최적 재료 선정	- 산업광물의 반응성을 개선함으로써 건축소재의 축열, 흡착, 항균성을 재고	100%
1-2	경량화(나노분말 및 경량기포 배합) 기술 개발	- 시편(공시체) 제작 기능성 검증 : 소포율 2% 미만	- 목표 밀도 조건의 경량기포 배합비 산정 - 재료의 소포·팽창 저감을 위한 배합비 도출	100%
		- 시품 제조의 최적 입도 선정 : 목표치 <100㎛ (자동입도분석을 통한 검증)	- 산업광물 분체의 입경별 강도(압축강도, 인장강도, 휨강도) 파악 및 최적 입경 도출	100%
2-1	결합재/결합촉매 개발	- 친환경 결합촉매 개발로 기능증대와 시공편의성을 위한 배합비 선정 : 일축압축강도 증가(공인시험성적서 제시)	- 결합촉매 기술을 적용한 바닥 모르타르의 일축압축강도 개선 : 28일 재령에서 4.1MPa→25.6MPa로 개선(공인시험성적서)	100%
2-2	기능개선을 위한 처리기술 개발	- 축열, 흡음, 흡착, 탈취, 항균성 개선 : 양이온치환용량 40meq/100g	- 반응성 개선을 위해 양이온치환용량 증가 - 다공질 장석은 분체를 통해 CEC 증가(114.63meq/100g)	100%
		- 저온 소성 최적화 기술 개발 및 경제성 검토 : 비표면적증가, SEM을 통한 측정	- 강열감량을 통한 경량화 기법의 임계온도 확인 - 다공질 장석 재료원의 용융온도를 분석하고, 공시체의 소성으로 공동구조와 결합구조가 유지되는 것을 SEM 사진으로 확인	100%
2-3	바닥용 모르타르 기능개선	- 평활도, 유동성, 균열저감 기능 개선 : 균열발생없음(동결융해시험을 통한 자체 평가)	- 기준동 2회, 시험동 3회의 시공을 통해 기능 개선과 최적 배합비 도출 - 평활도, 유동성 개선 - 바닥의 건조 균열 저감: 경제성 및 결합력 개선을 위한 고화제 배합비 도출	100%
2-4	벽면 마감재 기능개선	- 벽면 시공용 미장 및 패널 제작을 위한 강도최적화 : 일축압축강도 2MPa (공인시험성적서)	- 단순 혼합 공정으로 0.9㎤/g의 밀도와 2Mpa의 압축강도를 달성 - 일축압축강도 4.6 MPa 달성 (공인시험성적서)	100%

구분	세부연구내용	성과점검기준	성과점검 결과	달성도
2-5	천장 마감재 기능개선	- 천장 시공용 미장 및 패널 제작을 위한 강도최적화 : 인장강도 1MPa (공인시험성적서)	- 모르타르 배합을 통한 휨인장강도에서 3.5MPa, 4.3MPa로 측정(공인시험성적서) - 연속섬유가 포함된 모르타르 배합 공시체 휨인장강도는 3.6 MPa, 3.8MPa로 측정(공인시험성적서)	100%
3-1	실대형 모형 시공	- 현장 조건을 반영한 시험시공 (시공사업 1개소, 시공매뉴얼)	- 실대형 모형 제작을 위한 증축과 바닥 기초 지반보강 - 배합비에 따라 기준동 2회, 시험동 3회의 시공 - 바닥 모르타르 시공 매뉴얼 제작(별첨)	100%
		- 자동수평, 유동성, 평활도, 시공 및 유지관리 편의성 검토: 시공모니터링	- 배합비에 따라 기준동 2회, 시험동 3회의 시공을 통한 현장 시공 모니터링	100%
		- 비교를 위한 모형을 별도 제작하며 개선된 성능을 검토 : 실내모형시험	- 실용화 조건을 반영한 모형 제작 - 기준동과 시험동의 모형을 제작하고, 현장 실내모형시험을 통해 개선된 최적의 배합비 도출	100%
3-2	시제품의 기능성 검증	- 모니터링 계측으로 시공 전후의 상태평가 : 현장 모니터링(단열/흡음/차음)	- 최종 배합비에서 적정실내온도 유지 조건에서 전력사용량 11.2-19.0% 개선 - 층간소음 16.7% 개선 - 시제품 제작 및 유지관리 편의성 제고	100%
		- 시제품 제작 : 전문가 평가	- 전문가 평가(별첨)	100%
4-1	실대형 모형 시공	- 현장 조건을 반영한 시험시공 : 시공사업 1개소, 시공 매뉴얼	- 배합비에 따라 기준동 1회, 시험동 3회의 시공 - 경량 벽체 블록 시공 매뉴얼 제작(별첨)	100%
		- 수직 벽체시공에 적합한 시제품의 강도 개선 성능검증 : 일축압축강도 2MPa (공인시험성적서)	- 최종배합비의 일축압축강도 6.3MPa(공인시험성적서)	100%
		- 시공 및 유지관리 편의성 검토 : 전문가평가	- 전문가 평가(별첨)	100%
4-2	시제품의 기능성 검증	- 모니터링 계측으로 시공 전후의 상태 평가: 현장 모니터링(단열/흡음/차음) 1건	- 적정실내온도 유지 조건에서 전력사용량 44.4-50.0% 이상 개선	100%

구분	세부연구내용	성과점검기준	성과점검 결과	달성도
4-2	시제품의 기능성 검증	- 문제점 도출 및 개선점 보완 : 최적제작(안) 도출	- 1차 시공 문제점을 반영한 2차 배합비 시공으로 축열 및 내구성 개선	100%
		- 시제품 제작 2건 : 전문가 평가	- 전문가 평가(별첨)	100%
5-1	실대형 모형 시공	- 현장조건을 반영한 시험 시공 : 시범사업1개소, 시공매뉴얼	- 배합비에 따라 기준동 1회, 시험동 1회의 시공 - 천장 시공 매뉴얼 제작(별첨)	100%
		- 천장 시공에 적합한 시제품의 부착강도 개선 및 성능 검증 : 일축압축강도 1MPa (공인시험성적서)	- 휨인장강도에서 3.9MPa-7.4MPa로 측정(공인시험성적서) - 최종배합비에서 사용한 배합은 평균 3.9MPa로 기준을 상회함	100%
		- 시공 및 유지관리 편의성 : 전문가 평가	- 전문가 평가(별첨)	100%
5-2	시제품의 기능성 검증	- 모니터링 계측으로 시공 전과 후의 상태 평가 : 현장모니터링(단열/흡음/차음) 1건	- 내부온도 900℃에서 2시간 이상 내화성 확보 - 적정실내온도 유지 조건에서 전력사용량 14.7% 개선	100%
		- 문제점 도출 및 개선점 보완 : 최적제작(안) 도출	- PVA섬유와 연속시트를 이용하여 휨인장강도를 개선 - 경제성을 고려하여 강도조건을 만족하는 최적의 배합비로 시공	100%
		- 시제품 제작 2건 : 전문가 평가	- 전문가 평가(별첨)	100%

(2) 정량적 목표 달성

양적 성과지표	목표/달성	달성도	성과증빙자료집	비고
국내(비SCI)논문	5건/4건 (1건)	80% (100%)	96-142p (175-193p)	논문 1건 심사중 (완료시 100% 달성)
특허:출원(국내)	5건/4건	80%	6-95p	제 10-1935319호 제 10-1935320호 제 10-1994961호 제 10-1994962호
특허:등록(국내)	4건/4건	100%	1-5p	제 10-2018-0028805호 제 10-2018-0028806호 제 10-2018-0077461호 제 10-2018-0077462호

양적 성과지표	목표/달성	달성도	성과증빙자료집	비고
시제품	6건/7건	120%	297-307p	재료원 1건, 바닥 모르타르 1건 경량 벽체 블록 1건, 실런트 1건 천장 마감재 3건
SCI 투고논문 (심사중)	0건/(1건)	(100%)	143-174p	논문 1건 심사중 (완료시 100% 달성)
국내외 학술발표회	0건/5건	500%	194-213p	국내 2건, 국외 3건
상표권 등록	0건/1건	100%	214-217p	ECO HEATAR 에코히탈
시공매뉴얼	3건/3건	100%	218-232p	바닥 슬래브 시공 매뉴얼 경량 블록 시공 매뉴얼 천장 마감재 시공 매뉴얼
업무협약서	0건/1건	100%	233-234p	주식회사 주일건설
인력양성	0건/5건	500%	235-245p	해양대2명, 대진대3명
소프트웨어등록	0건/1건	100%	246-248p	실내환경 실시간 모니터링 프로그램
공인시험성적서	5건/16건	320%	249-296p	강도 시험 13건 항균도 시험 2건 원적외선시험 1건
전문가평가서	5건/5건	100%	308-322p.	단위성과 1-1, 3

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성)

학술적 성과 4건의 논문을 게재하였고 2건이 심사 중에 있어 게재가 승인되면 목표를 달성하게 된다. 국내외 학술대회 발표가 5건으로 당초 계획을 초과달성하였다. 인력양성도 5건으로 당초 계획을 초과달성 하였다.

특허는 등록은 모두 완료되었으나 출원 1건이 미달성 상태이며 경량블록의 제조 및 시공법, 천장마감재의 제조 및 시공법에 대한 특허를 계획 중에 있다. 사업화를 목적으로 상표과 소프트웨어를 각 1건씩 등록하였다. 소재 특성을 파악하기 위한 공인시험성적서는 320% 초과달성 하였다.

실대형모형을 기반으로 계획된 연구의 특성 상 동절기 및 하절기 기상 조건의 영향을 받아 시간적 제약이 있다. 특히 3차년 냉방효과에 대한 시험은 당해년도 하절기 수행이 불가피한 상황으로 연구진은 실대형 모형을 이용하여 난방과 냉방과정의 축열 특성에 대한 연구를 지속할 계획이다. 또한, 주거환경조건에서 실내오염물질의 저감에 대한 연구를 후속해서 수행하고자 한다.

4 연구개발성과의 활용 계획

가. 추가 연구의 필요성

나. 타 연구에의 응용

다. 기업화 추진 방안

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 건축 소재의 활용 계획

(1) 제조 기술의 활용

본 연구에서는 기능성 산업광물을 이용하여 건축 내장재 제조에 관하여 소재의 환경성과 실대형 모형을 대상으로 축열 및 소비전력 절감에 관한 분석을 수행하였다. 3년간 단계별로 소재의 가공법과 축열층 모르타르와 벽면용 경량블록, 천장 마감재를 개발하였다. 연구개발성과물의 성격에 따라 다음과 같이 활용방안을 수립하였다.

번호	연구개발성과	활용방안
1	건축 소재로써 산업광물의 2차 처리기술 개발	· 최적 소성·분체·경량기포를 배합비를 이용한 건축소재 제조 및 상품화에 활용 · 시작품 제작에 활용
2	친환경 결합제 및 실런트 제조기술 개발	· 산업광물 소재 기반으로 건축내장재의 조적 및 접합, 미장 마감제에 활용
3	바닥 축열층 모르타르 제조 기술 개발	· 온돌 시공과 연계한 최적 시공법 마련과 소재의 확대 적용 · 논문, 설비 전시회 등을 통한 기술 홍보 및 사업화에 활용 · 방통모르타르 시작품 제작에 활용
4	경량블록 제조기술 개발	· 조적 시공과 연계한 소재의 확대 적용 · 레미콘 제조사 등의 기술이전를 통한 사업화 추진 · 논문, 설비 전시회 등을 통한 기술 홍보 및 사업화에 활용 · 시작품 제작에 활용
5	마감재 제조기술 개발	· 시작품 제작에 활용 · 전시회 등을 통한 기술 홍보 및 사업화에 활용

(2) 요소기술의 활용

본 연구의 요소기술은 소재의 개발 단계에서 에너지 사용량을 줄이고 재료의 특성을 극대화하기 위한 방법을 시도하였다. 주요 요소기술로는 재료의 반응성을 높이기 위한 방법으로 적용한 경량화 기법의 실용화 기반을 확보한 것이다.

기존의 열처리 기술은 대부분 고온 소성으로 광물의 물리·화학적 구조의 변화가 수반되며, 소성과정에서 발현되는 기능에 초점이 맞춰져 있으나 연구를 통해 산업광물의 고유한 특성을 보존한 상태에서 최적 소성을 시도하였고 임계온도와 가열시간을 도출하였다. 이로

인해 소재의 생산에 소요되는 경비를 절감할 수 있고 연소로 인한 이산화탄소와 미세먼지 등의 위해요소를 줄일 수 있다.

건축물의 단열층 시공, 연약지반의 개량 등에 경량기포를 활용한 기술이 적용되고 있으나 제품의 품질이 일정하지 않고 재령기간 중 기포의 소포와 팽창으로 인한 품질저하가 확대적용의 걸림돌이 되었다. 연구를 통해 경량기포의 변형을 줄이기 위한 첨가제의 배합비를 도출하였고 건축 내장재에서 단순혼합에 의한 경량기포 사용을 가능케 하였다. 더불어 낮은 밀도로 인한 내구성 저하를 일정 부분 해소함으로써 활용 범위를 확대할 수 있는 기반을 마련하였다.

다공질의 산업광물은 일반적인 규산염광물에 비해 분체과정에서 비표면적이 증가하며 마감재와 실런트에 적용한 규산염광물은 기능성 점토광물에 비해 1-4배의 반응성을 가지는 것으로 평가되었다. 이러한 기술은 건축 소재의 결합재나 주거환경 개선을 위한 실내공기질 정화, 층간소음을 줄이는 것 외에도 유기화합에 의존하고 있는 충전재료에 활용할 수 있고 화재로 인한 유독 물질 배출을 제로 수준으로 절감할 수 있다.

번호	요소기술	활용방안
1	소재의 경량화 기법	· 열처리 분야의 경제성을 제고 · 경량기포의 변형률 저감으로 적용범위 확대
2	소재의 흡착・중화・내화성	· 다공질 재료의 흡착 특성에 기초한 주거환경 개선 소재로 활용 · 흡착과 내마모성 개선을 통한 수처리 시설 및 장치 개발에 활용 · 불연성 접합재료 및 충전재 개발에 활용

나. 타 연구에의 응용

재료의 경량화와 고화제를 이용한 고형화기술은 유기질토, 고함수토 등 연약지반 안정용으로 응용될 수 있고, 대기오염 및 수질오염에 의한 산업폐기물의 안정화 등의 용도로 활용 가능하다. 현재도 지반 개량을 위해 다양한 고화제가 이용되고 있고 경량기포를 이용한 시공은 일부의 연약지반에 적용되고 있다. 연약지반에 구조물을 건설하는 경우 성토하중에 의해 지반의 침하가 발생하며 기존 구조물에 근접하여 이러한 시공이 이루어진다면 침하발생으로 인한 기존구조물에 큰 피해를 줄 것이다. 연약지반에 성토로 인한 침하량을 최소화함으로써 축조된 기존 지반에 피해가 없이 시공하는 방안으로 경량성토공법이 대안으로 제시되고 있으나(Satoh et al., 2001) 초기함수비 및 점토, 모래, 실트 등 현장에서 발생하는 다양한 원료토에 따라 기포의 형성 정도가 다르게 되어 품질관리에 문제점이 제기되고 있다. 특히 재령기간의 소포와 팽창은 품질관리의 핵심적인 사항으로 본 연구의 기술은 이러한 분야에 응용될 수 있는 기술에 해당한다.

연구에서 제시된 고형화 방법, 블록제조 방법을 적용하며 중금속 내지 유기화합물에 의한 오염을 제거할 수 있는 수처리 시설을 제작할 수 있을 것으로 기대된다. 다공질 장석과 클리놉틸로라이트를 이용한 소재는 중금속(Pb, Cd, Cu, As)을 흡착제거하며 환경기준 이하로 저감하는데 활용 가능하다. 탁월한 중금속 정화능력을 이용하여 폐광주변의 오염된 토

양과 수질의 개선에 적용 가능하며, 저수지 현장실험과 같이 녹조와 같은 미생물의 저감등에 적극적인 활용이 가능한 기술이며, 오염원 저감을 위한 선제적 대응과 연안 환경 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 물관리 통합(2018.6)의 일환으로 물관리 기본법과 물기술산업법이 제정되어 수질관리의 중요성이 부각되고 있다. 즉, 친환경적인 수자원 확보 기술이 중요하며, 오염에 취약한 소하천 및 저수지 등 수생태계의 오염원 제거와 관리 기술이 요구되고 있다.

다. 사업화 방안

기후대응과 파리기후변화협약을 계기로 한국의 온실가스 감축 목표(2030년 BAU 대비 37%) 설정하였고 8대 에너지산업 정책 로드맵에서 제로에너지 빌딩(주관: 국토부, 협조: 산업부)에 대해 추진하기로 결정하였다. 에너지 사용 측면에서 건축물은 전체 에너지의 20%를 사용하며 향후 40% 수준까지 지속적으로 증가할 것으로 예상하고 있다. 또한, 2017년부터 에너지 전환이 논의되고 있고 건축물 에너지 효율 제고를 위한 축열 성능 개선을 통한 에너지 절감과 단열, 유해물질 흡착 및 항균/항습 기능을 가진 경제적, 복합적 기능의 건축재료/자재의 필요한 시점이다. 본 연구의 수행 방법과 성과들은 실용화와 나아가 사업화를 목적으로 수행되었다. 사업화의 대상은 신축되는 건축물은 물론이고 기존 건축물의 유지관리에 편의성이 있는 소재의 상용화 기술을 기반으로 사업화를 추진을 계획하고 있다.

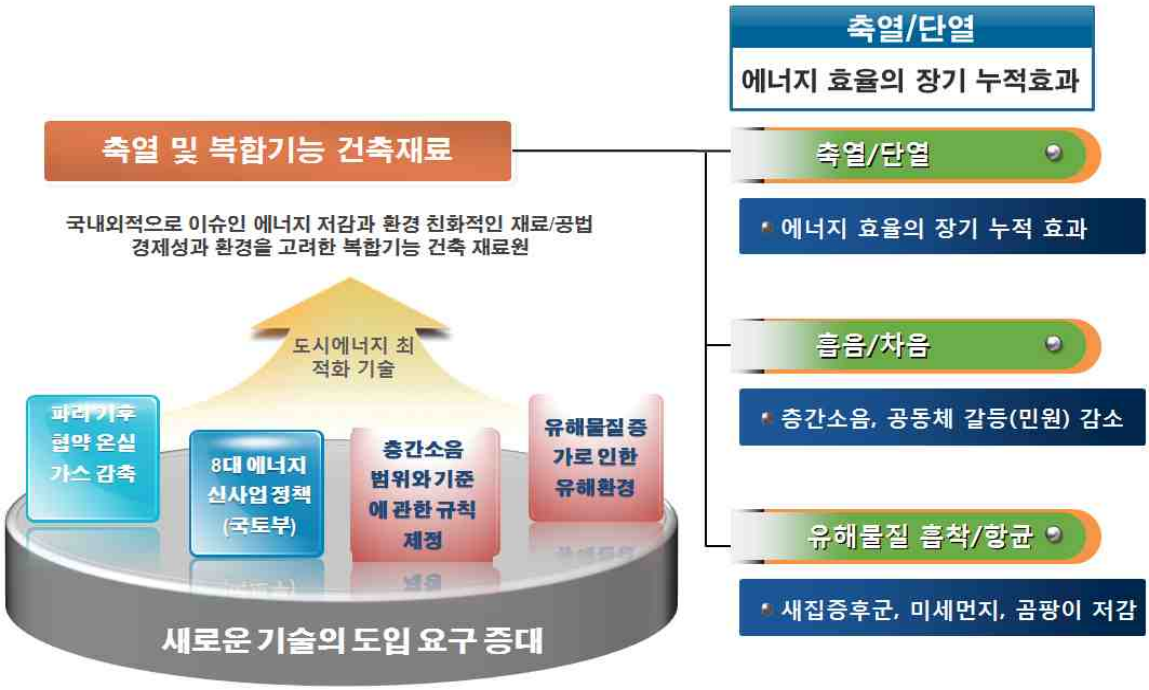


그림 4.1 친환경 건축 소재의 필요성

(1) 에너지 저감

실대형 모형의 조건에서 확인된 건축 소재는 동일 조건의 기준동에 비해 30% 이상의 에너지 절감 효과를 나타내고 있다. 이는 연구의 당초 목적에 부합하는 것으로 패시브하우스와 제로에너지 건축을 지원하는 효과적인 소재로 판단된다.

연구의 시작단계부터 기존 제품의 단점으로 지적된 고비용의 문제점을 보완하기 위해 경제성을 제고한 소재를 개발하였고, 뿐만아니라 친환경 및 내화성을 고려한 제조기술을 염두에 두고 단계별 연구를 수행하였다. 연구 기간 종료 후에도 실제 건축물에 적용하기 위한 사업화를 수행할 것이며, 산업광물 기반의 건축 소재 분야의 확대에 매진할 것이다.

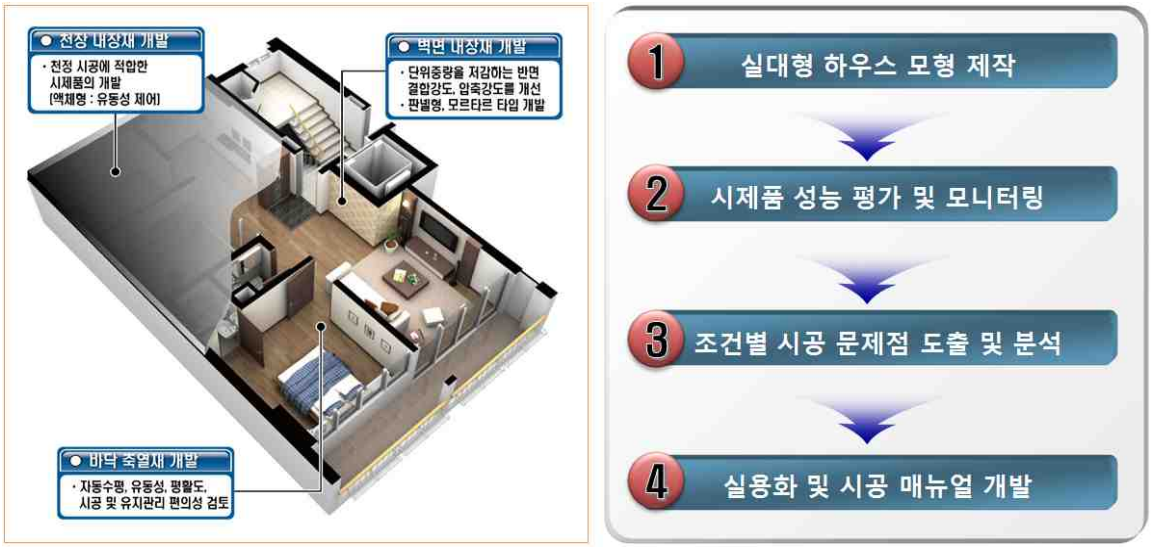


그림 4.2 친환경 건축 소재의 필요성

(2) 주거환경 개선

공동주택 층간소음 범위와 기준에 관한 규칙 제정 및 새집증후군(SHS) 해결 방안이 요구된다. 층간소음의 경계부에 위치하는 축열층의 소음 저감은 물론 경량불록의 흡음, 그리고 친환경 천연소재를 이용한 새집증후군 완화을 위한 제품의 개발도 계획 중이다. 대표적으로 생활환경에 노출되는 미장재료와 본 연구의 기술을 이용한 타일, 패널 등의 제조 기반을 마련하고자 한다.

(3) 핵심경쟁 요인

국내건설기술은 시공 및 설비 분야에 집약되어 있고, 기능성 재료원은 기존 상용제품에 비해 고비용으로 적용에 한계가 있다. 연구진은 연구 단계별로 사업화를 위해 안정화 기술 확보와 원가산정을 통해 저비용 제조 기술 확보하여 사업화의 기반을 마련하였다.

연구를 통해 도출된 소재의 특화된 기술은 특허, 인증을 통해 제품의 성능 개선 효과를 관련 국내외 학회, 포럼을 통해 홍하고 에너지 저감 및 사회문제 해결 기여를 대상으로 공공기관 홍보와 영업을 병행하며, 건설관련 민간시설과 연계한 판매 전략을 계획하고 있다.

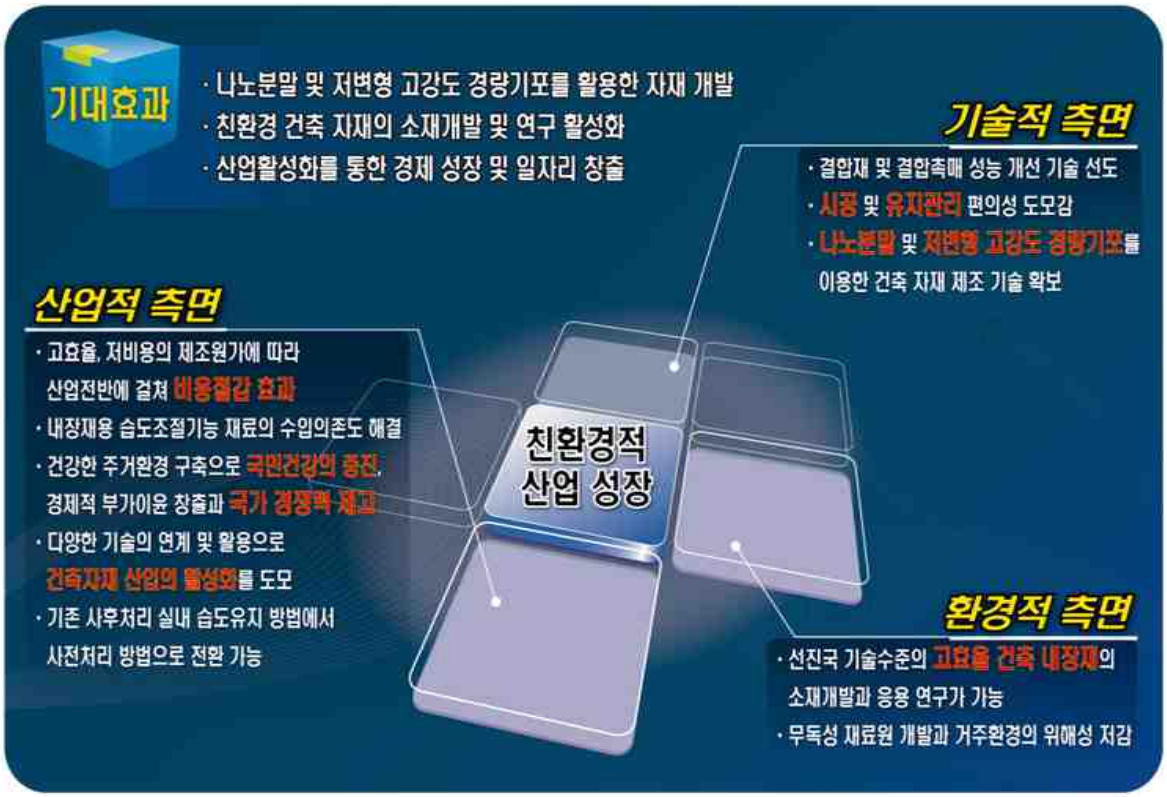
사업화의 당면한 목표는 건축 자재 산업 활성화에 기여하는 것이며, 고효율, 저비용 복합 범위(바닥, 벽면, 천장) 건축물 내장재의 보급을 통해 거주 및 업무공간의 에너지 비용 절감과 환경을 개선하는 것이다. 개발 기술의 경쟁에서 시장 진입 장벽은 다음과 같다.

- 친환경, 저에너지 자재 사용 필요성에 대한 기존 영세 주택건설사 들의 인식 부족
- 건축 초기 비용 상승 요인에 대한 거부감
- 유사 재료/제품 제조사들과의 경쟁

(4) 기대효과

□ 기술적 측면

- 건축 소재로써 산업광물의 활용성을 제고하고 에너지 사용량을 저감하기 위한 바닥축열층, 경량블록, 마감제 기술과 시작품을 제조
- 다공질 매질을 이용한 친환경 소재를 개발하였고 반응력을 증대하기 위한 소성, 분체, 경량기포의 최적 배합비를 산정
- 에너지 효율에 대한 연구개발은 기술적인 완성도를 필요로 하며 1차년부터 실대형모형을 대상으로 한 실험을 수행하여 현장 조건의 연구를 수행하였고 실용적인 기술을 개발



□ 산업적 측면

- 건축 소재의 축열과 에너지 저감으로 인한 생산성 증대
- 국내의 산업광물을 활용한 건축 내장재 제조기술 개발과 수입의존도를 절감
- 다양한 기술의 연계 및 활용으로 건축 자재산업 활성화에 기여

□ 환경적 측면

- 선진국 기술수준의 고효율 건축 내장재의 소재 개발과 미세먼지 등과 같이 위해 환경에 대응하는 기술로 관련분야 응용연구가 가능
- 무독성의 다공질 천연재료를 기반으로 한 제조 기술을 개발하였고 이를 통해 주거환경 개선에 기여
- 소재의 반응성을 높이기 위한 2차처리를 개발하였고 수질 및 대기질 개선에 활용할 수 있는 기반을 마련

(5) 수익확보 전략

□ 주요 고객군

- 공공기관: 에너지 신산업 육성과 제로에너지 주택단지와의 연계
- 민간 소비자: 냉난방비 절감 및 건강한 주거 환경에 대한 욕구 충족
- 건설사 : 특화된 브랜드의 공공주택을 건축/판매로 매출 증대에 대한 수요 충족
- 인테리어 시공업체 : 건물 개・보수시 적용

□ 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

- 미장용 재료를 기존 공법 대비 10% 이내의 가격 경쟁력 유지
- 30%이상의 난방비 절감으로 추가 비용 조기 회수
- 벽체, 천장패널은 기존 건축 자재의 80%-100%에 공급하여 초기 건축비 절감 효과홍보
- 지속적인 R&D로 차별화된 기술력 확보
- 대형 건설사와의 Module화 및 표준화 추진

라. 추가 연구의 필요성

(1) 외단열 및 난연성 소재 개발

연구는 건축 내장재 개발에 중점을 두고 수행하였으나 소재의 내화성과 축열 특성과 강도를 외단열 소재에 적용될 수 있다. 2017년 12월 제천 사우나 화재와 2018년 밀양시 세종병원 화재 등과 같이 동절기의 화재가 빈번하여, 인적, 물적 피해의 상당수는 외장형 스티로폼, 드라이비트 등의 가연성 건축 소재와 유기 성분의 접합제에서 발생한 유독가스로 피해 규모가 증가되었다. 최근 화재로 인한 재난의 발생 빈도와 피해규모가 증가하고 있어 에너지 저감의 관점에서 외단열 소재의 개발 이와 더불어 내화성 소재에 대한 연구는 시기적으로 적절하다.



그림 4.3 제천 사우나(좌)와 밀양 세종병원 화재(우)

(2) 내진성능 개선을 통한 재난안전산업 분야 연계

경주지진과 포항지진으로 2017년부터 내진설계 의무 대상이 확대 시공되고 있다. 본 연구에서 도출된 소재의 경량화와 섬유를 활용한 기술은 비내력벽의 하중을 감소시키고 인

장력을 높이는 기술로 건축물의 내진 성능 개선에 기여할 것으로 기대하며 재난안전산업 분야의 기술로도 확대될 수 있을 것이다. 연구 과정에서 토목섬유를 이용한 인장강도 시험에서 무기질 재료는 파괴 후에도 일정기간 1Mpa 이상의 인장력을 일정기간 지속적으로 확보하였다(그림 4.4). 내진 성능 강화가 재료원의 압축강도와 집중된 것과는 다름 관점에서 건축물의 하중을 분산하고 줄이는 방법과 시설물의 붕괴 시 대피시간 확보는 인적 피해를 줄이는 적극적인 방법이 된다. 이러한 관점에서 경량소재와 재료의 인장력을 개선하는 연구가 본 연구의 성과는 이러한 분야의 추가적 연구에 활용될 수 있다.



그림 4.4 섬유를 적용한 시편의 인장 시험

□ 연구 배경 및 필요성

(경주지진) 2016년 9월 지진규모 5.8의 경주지진이 발생한 후 국민의 안전 불안감 증가하고 있으며 재해 예방을 위한 내진성능 강화의 필요성이 요구되고 있음

(내진기준 강화) 2017년부터 국토부는 내진설계 의무 대상을 확대해나가고 있으며 경주지진 진앙지에 인접한 부산시는 ’ 내진설계 책임실명제’ 를 도입

(안전시설의 확보) 안전시설의 기능 강화를 위한 저비용의 내진재 개발이 필요하며 특히 노후된 건축물에 적합한 내진공법이 필요

(생활환경의 개선) 기존 주택시방에 따른 내진 성능강화는 기둥 규격의 증가와 내력벽으로 인한 공간 축소와 주거환경 공간의 축소가 불가피하며 해소하기 위한 방안 필요

□ 기대효과

(국민 안전 확보) 학교, 병원, 공공기관 등 건축물에 대한 재난 대응 대피 및 응급구호시설의 내구성과 내진성이 확보됨으로써 지진에 대한 1차적인 대처 가능

(주거환경 공간 확보) 섬유 등을 활용하여 개선된 주택시방에 맞는 건축물을 만들어 기둥 규격과 내력벽의 치수를 줄임

(내진여유도 확보) 노후 시설물(건축 및 토목)의 부분 시공으로 내진 여유도 증대

(비용 절감) 기존 내진 시공 대비 90% 이상 비용 절감

(3) 미세먼지 저감과 연계한 주거환경 개선

연구에서 개발된 건축 내장재 소재는 유해물질의 흡착성능이 우수하며 경제적인 측면에서 비교우위에 있다. 미세먼지 저감을 위한 다양한 방안이 마련되고 있는 시점에서 본 연구에서 개발된 소재를 이용한 실내 공기질과 주거환경을 개선한 제품개발 기술이 가능하며 추가적인 연구의 필요가 있다.

□ 연구 배경 및 필요성

최근에는 이상기후에 수반되어 계절과 관계없이 한반도 전역에서 고농도 미세먼지 발생이 빈번해짐에 따라 국민 건강에 대한 우려가 증가하고 있다. 2015년 세계경제포럼에서 국내의 미세먼지환경지수가 전체 178 개 조사국 중 171 위를 차지할 정도로 미세먼지에 대한 노출 위험성이 높아지고 있다. 국립환경과학원(2009년)의 연구에 따르면 미세먼지(PM10) 농도가 10 ㎍/㎥ 증가할 때마다 대기오염에 민감한 집단의 사망률은 0.4%씩 증가하는 것으로 보고되었다.

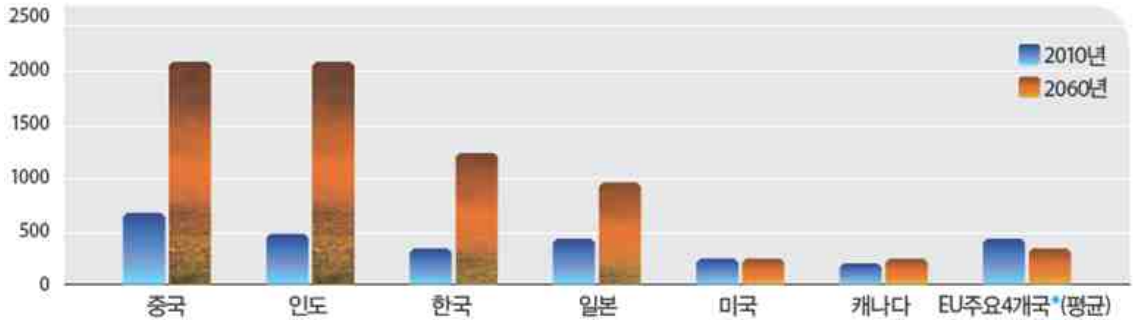


그림 4.5 미세먼지와 오존노출로 인한 조기사망자 수(OECD, 2016)

국내의 미세먼지 농도는 경제협력개발기구(OECD) 주요 도시의 평균에 비해 2배 이상이며 미세먼지(PM 10)와 초미세먼지(PM 2.5)에 대한 개인적·국가적 차원의 준비가 시급한 실정으로 실천의 일환으로 미세먼지 환경 기준을 선진국 수준으로 강화(현행 50 → 35㎍/㎥, 미국, 일본)하고, 민감계층 이용시설(학교, 어린이집)의 실내 미세먼지 유지기준 신설 등을 준비하고 있다. OECD의 자료에 따르면 미세먼지와 오존노출에 의한 조기사망자수는 급격하게 증가하고 있고, WHO 산하 국제암연구소에서 1급 발암물질로 규정하였다. 특히, 어린이와 노약자 등 건강 취약계층에게는 치명적인 악영향을 미칠 수가 있다.

등급		발생가능성	해당 물질 예
Group 1		• 인체 발암물질	• 비소, 코크스, PCB, 디젤매연, 대기오염, 미세먼지 외 107종
Group 2	A	• 인체 발암성이 있다고 추정되는 물질	• 납화합물, 석유정제, 질소겨자 외 63종
	B	• 인체 발암 가능성이 있는 물질	• 아세트알데히드, 벤조퓨란, 카본블랙, 퓨란 외 281종
Group 3		• 발암 가능성 여부가 분류가 안된 물질	• 카페인, 크롬화합물, 페놀, 에틸렌 외 51종
Group 4		비 발암물질	• 카프로락탐

그림 4.6 WHO 국제암연구소(IARC, 2013)의 발암물질 항목

미세먼지는 국민건강을 위협하는 가장 중요한 문제로 인식되고 있으며 지난해 정부가 특별대책을 발표하고 각종 정책을 시행하고 있음에도 불구하고 여전히 개선의 기미가 보이지 않음에 따라 갈수록 국민들의 불안을 증폭시키고 있는 상황에서 국민건강에 미치는 위해를 예방하고 보다 쾌적한 생활환경을 조성하기 위해 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법을 제정하여 미세먼지 저감을 위한 사업 및 지원, 취약계층 등 국민에 대한 보호 대책을 마련토록 하였다.

미세먼지의 제거기술의 상당수는 흡착 및 필터 방식에 의존하고 있으며 본 연구에 적용된 소재의 흡착기능은 좁게는 실내환경의 개선에 기여하고 나아가 미세먼지 제거을 위한 소재기술에 활용될 수 있다.

- “미세먼지“를 「대기환경보전법」 제2조제6호에 따른 먼지 중 각 목의 흡입성 먼지로 정의하고 대기 중에서 미세먼지로 전환되는 질소산화물 등의 물질을 “미세먼지 생성물질“로 정의
- 정부는 5년마다 미세먼지관리종합계획을 수립하여 미세먼지특별대책위원회의 심의를 거쳐 확정하여야 하고, 시 · 도지사는 종합계획의 시행을 위한 세부계획을 수립하여야 함(제7조 및 제8조)
- 미세먼지 저감 및 관리를 효율적으로 추진하기 위하여 국무총리를 위원장으로, 대통령령으로 정하는 관계 중앙행정기관의 장 등을 위원으로 하는 국무총리 소속의 미세먼지특별대책위원회를 두도록 함(제10조 및 제11조)
- 미세먼지 저감 및 관리의 원활한 추진과 미세먼지특별대책위원회의 사무 및 운영의 효율적인 지원을 위하여 국무총리 소속으로 미세먼지개선기획단을 설치하도록 함(제12조)
- 환경부장관은 미세먼지 배출량의 정확한 산정과 관련 정보의 효율적 관리를 위하여 국가미세먼지정보센터를 설치함(제17조)
- 시 · 도지사는 일정 요건 충족 시 자동차의 운행제한 또는 환경부령으로 정하는 대기오염물질 배출시설의 가동시간 변경이나 가동률조정, 대기오염방지시설의 효율 개선 등의 비상저감조치를 시행할 수 있도록 함(제18조부터 제20조까지)
- 환경부장관은 계절적, 비상시적 요인 등으로 미세먼지 저감 및 관리를 효율적으로 수행하기 위하여 필요하다고 인정하는 경우 관계 중앙행정기관의 장, 지방자치단체의 장 또는 시설운영자에게 대기오염물질 배출시설에 대한 가동률 조정을 요청할 수 있음(제21조)
- 시 · 도지사, 시장 · 군수 · 구청장은 관할구역 내에 미세먼지 집중관리구역을 지정하고 미세먼지 저감 개선사업의 지원을 확대하도록 함(제22조)
- 정부는 어린이 · 노인 등 미세먼지로부터 취약한 계층의 건강을 보호하기 위하여 일정 농도 이상 시 야외단체활동 제한, 취약계층 활동 공간 종사자에 대한 교육 등 취약계층 보호대책을 마련하여야 함(제23조)

5 연구비 집행실적의 대비표

가. 연구비 사용명세서(총괄)

나. 연구비 사용명세서(기관별)

5. 연구비 집행실적의 대비표

가. 연구비 사용명세서(총괄)

구분 / 비목	당초계획	변경예산	사용금액	증감	증감사유	이월액
직접비	356,035,000	356,035,000	355,921,700			
인건비	59,760,000 (79,179,000)	59,760,000 (79,179,000)	59,760,000 (79,179,000)	-		
학생인건비	30,600,000	32,780,000	32,780,000	2,180,000	학생인건비 증액	
연구시설·장비·재료비	105,241,000 (6,020,000)	104,641,000 (6,020,000)	127,130,896 (6,020,000)	22,489,896	재료비 사용 증가	
연구활동비	29,526,000	29,226,000	6,354,074	-22,871,926	재료비 사용 증가로 인한 감소	
연구과제추진비	37,222,000	35,942,000	36,210,730	-268,730	재료비 사용 증가로 인한 감소	
연구수당	8,487,000	8,487,000	8,487,000			
위탁연구비						
간접비	18,631,000	18,631,000	18,631,000			

비 고

1. 이 연구비 사용명세서(총괄용)는 필요한 경우에만 작성합니다.
2. ( )안에는 각 비목별 금액중 참여기업 등이 부담한 현물을 적어야 합니다.

* 다만, 학생인건비는 현금지급액만 적습니다.

나. 연구비 사용명세서(기관별)

(1) 엠에스이엔씨

(단위 : 원)

구분 / 비목	당초계획	변경예산	사용금액	증감	증감사유	이월액
직접비		-		-	-	
인건비	(55,989,000)	-	(55,989,000)	-	-	
학생인건비		-		-	-	
연구시설·장비·재료비	91,594,000	-	117,335,117	+25,741,117	재료비 사용 증가	
연구활동비	25,100,000	-	4,100,000	-21,000,000	재료비 사용 증가로 인한 감소	
연구과제추진비	15,440,000	-	10,698,883	-4,741,117	재료비 사용 증가로 인한 감소	
연구수당	5,287,000	-	5,287,000			
위탁연구비		-		-	-	
간접비	6,800,000	-	6,800,000		-	
현금소계	144,221,000	-	144,221,000	-	-	
현물소계	(55,989,000)	-	(55,989,000)	-	-	
합계	200,210,000		200,210,000	-	-	

비 고 : ( )안에는 각 비목별 금액 중 참여기업 등이 부담한 현물을 적어야 합니다.

* 학생인건비는 현금지급액만을 적습니다.

(2) 지아이

(단위 : 원)

구분 / 비목	당초계획	변경예산	사용금액	증감	증감사유	이월액
직접비	90,246,000 (29,210,000)		90,246,000 (29,210,000)			
인건비	59,760,000 (23,190,000)		59,760,000 (23,190,000)			
학생인건비						
연구시설·장비·재료비	9,100,000 (6,020,000)		5,854,779 (6,020,000)	-3,245,221 (-)		
연구활동비	3,826,000		1,954,074	-1,871,926		
연구과제추진비	17,560,000		22,677,147	+5,117,147	재료비 사용감소로 인한 증가	
연구수당						
위탁연구비						
간접비						
현금소계	90,246,000		90,246,000			
현물소계	(29,210,000)		(29,210,000)			
합계	119,456,000		119,456,000			

(3) 한국해양대학교

(단위 : 천 원)

구분 / 비목	당초계획	변경예산	사용금액	증감	증감사유	이월액
직접비	23,622	23,622	23.622	0		
인건비						
학생인건비	18,000	20,180	20.180	2,180	학생인건비 증액	
연구시설·장비·재료비	600	0	0	-600		
연구활동비	600	300	300	-300		
연구과제추진비	3,222	1,942	1,942	-1,280		
연구수당	1,200	1,200	1,200	0		
위탁연구비	-	-	-	-		
간접비	6,378	6,378	6,378	0		
현금소계	30,000	30,000	30,000	0		
현물소계	-	-	-			
합계	30,000	30,000	30,000	0		

(4) 대진대학교

(단위 : 원)

구분 / 비목	당초계획	변경예산	사용금액	증감	증감사유	이월액
직접비	19,547,000	-	17,433,700	-	-	
인건비				-	-	
학생인건비	12,600,000	-	12,600,000	-	-	
연구시설·장비·재료비	3,947,000	-	3,941,000	-	-	
연구활동비	-	-	-	-	-	
연구과제추진비	1,000,000	-	892,700	-	-	
연구수당	2,000,000	-	2,000,000	-		
위탁연구비	-	-	-	-	-	
간접비	5,453,000	-	5,453,000	-	-	
현금소계	25,000,000	-	24,886,700	-	-	
현물소계		-		-	-	
합계	25,000,000		24,886,700	-	-	

붙임. 참고문헌

김수진 (2001) 천연제올라이트와 그 응용 : 제올라이트의 산출상태와 성인, 제2회 산업광물 심포지움 논문요약집, 1-19

강연구 (2015) 고화재를 사용한 황토다짐 구조체의 역학적 성능개선에 관한 연구, 경상대학교 박사학위 논문

김성욱, 최은경, 조진우, 이주형, 이규환 (2015) 수용성 고화재와 규산염광물 결합재를 활용한 지반개량재의 실험적 연구한국복합신소재구조학회논문집, 6(4), 8-15

김성욱, 고대홍, 최은경, 김성환, 김태형, 이규환, 조진우 (2017a) 다공질 장석으로 제조한 축열층의 열전도 특성, 자원환경지질, 50(2), pp. 159-170

김성욱, 최은경, 조진우 (2017b) 다공성 구조가 발달한 장석반암의 흡착과 항균성 연구, 암석학회지, 26(2), p. 143-152

김영규 (2001) 천연제올라이트와 그 응용 : 제올라이트와 환경오염물질과의 흡착반응, 제2회 산업광물 심포지움 논문요약집, 73-84

김효대, 오세영, 김준호 (2004) 고강력 PVA 섬유의 개발 동향, 고분자과학과 기술, 15(1), pp.12-19

노진환 (2001) 천연제올라이트와 그 응용 : 제올라이트의 광물상 및 응용광물학적 특성 평가, 제2회 산업광물 심포지움 논문요약집, 30-42

산업광물은행, 한국과학재단 (2004) 장석과 그 응용, 제5회 산업광물심포지움 논문집

정복만 (2016) 제로에너지 건축물 구현을 위한 BEMS 적용방법에 관한 연구, 인천대학교 공학석사 졸업논문

장윤희 (2001) 천연제올라이트와 그 응용 : 천연 제올라이트의 산업응용 현황, 제2회 산업광물 심포지움 논문요약집, 54-62

조영상 (2013), 거대 기공 및 중간-거대 기공을 갖는 다공성 미립자, NICE, 31(4), 477-485

최희용 (2002) 활성황토의 건설자원화에 관한 연구, 충남대학교 박사논문

황중호 (2010) 경량기포토의 역학적 특성, 석사학위논문, 한국해양대학교.

황문규 (2008) PVA 섬유를 사용한 고인성 콘크리트의 물리적 특성에 관한 연구, 대전대학교 석사논문

황진봉, 양미옥, 김민아, 박성훈 (1996) 한국산 맥반석의 미네랄 용출 및 중금속제거 효과, 분석과학, 9(3), pp. 310-319

황혜주, 강남이 (2008), 친환경 무시멘트 황토결합재의 적용가능성에 관한 연구, 한국생태환경건축학회 논문집, 8(1), 81-87

한국에너지공단, 국토교통부 2017 건축물 에너지절약 설계기준 해설서

한국해양과학기술원 (2018) 폐기물 해상 최종처리 기술개발, R&D / 20160281, 2197pp

국토교통부, “https://www.molit.go.kr”

법제처, “저탄소 녹색성장 기본법 시행령”, 제25조 1항, 제 41조 2항

한국자원정보서비스 https://www.kores.net

Bansal, R.P. and Goya, M. (2005) Activated Carbon Adsorption, CRC Press, Taylor & Francis Group

Barrows, K. J. (1980) Zeolitization of Miocene volcanic rocks, southern Desatoya Mountains, Nevada, Geol. Soc. Amer. Bull. Part Ⅰ, 91, 199-210

Casey W.H., Westrich, H.R., Massis, T., Banfield, J,F. and Arnold, G.W. (1989) The surface of labradorite feldspar after acid hydrolysis. Chem. Geology, 78, 205-218

Cecen, F. (2014) Activated Carbon, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley and Sons, New York

Donahue, R.L., Miller, R.W., and Shickluna, J.C. (1977) Soils: an introduction to soils and 535 plant growth, Prentice-Hall, New Jersey

Ferdoush, S. and Li, X. (2014) Wireless sensor network system design and Raspberry Pi and arduino for environmental monitoring applications. Procedia Computer Science, v. 34, p. 103-110.

Gleize, P.J.P., Cyr, M. and Escadeillas, G. (2007) Effects of metakaolin on autogenous shinkag e of cement paste. Cement & Concrete Composites, v. 29, p. 80-87.

Hwang, H.Z., Kim, J.G., and Yang, J.H. (2006) A Study on the Chemical Properties and Strength Development of Regional Hwangto, KIEAE Journal, 6, 11-18

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013) CLIMATE CHANCE 2013 - The Physical science Basis

Kim, J.H., Kim, H.J., and Yoon, D.W. (2011) Evaluation Studies on the Adsorption VOCs Performance of the Natural Porous Materials for the Development of Absorptive Building Materials, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 5, 115-121

Kim, K.M,. Ryu, S.H. and Moon, H.J. Evaluation of the Moisture Sorption Properties of the Wallpapers with Porous Mineral Material, Architectural Institute of Korea, 33, 279-280 (in Korean).

Korea Environmental Industry & Technology Institute (2012) The trend of indoor environmental management in eco-buildings, 2012-86, 119p

Lee, M. A., Kim, S. W., Choi, D. K., Park, L. K., and Kim, T. H. (2012) Effect of Curing Temperature on the Strength Characteristics of lightweight Air-Trapped soil. Journal of the Korean geotechnical society. 20(9), 125-131 (in Korean)

Lee, S.S., Lee, Y.S., and Lee, K.P. (2009) A Study on the Mechanical and Flowing Properties of High-strength Mortar Binding Admixture, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 8, 105-110

Lee, S.Y., Kim S. and Cho, W.J. (2006) Laboratory Weathering Experiment on Mica and Feldspar and Their Mineralogical Characteristics, J. Miner. Soc. Korea, 19(2), 63-69

Nam, Y.S., Kyeong, U.S., Choi, W.H. and Jung, Y.G. (2006) Development of fabrication technology for eco-friendly wallpaer, CERAMIST, 9, 24-32

Noh, J.H. (2003), "Study of utilization of natural zeolites as functional materials for water purification(II): Adsorption properties of heavy metal ions by domestic zeolites", Journal of Mineralogical Society of Korea, 16, 201-213

Park, B.J., Do, S.H., Kim, T.Y., and Hong, S.H. (2016) Evaluation on Filter/Adsorber Granular Activated Carbon using in Advanced Drinking Water Treatment: Abrasion number, Floater, Water-soluble ash, and Adsorption characteristics, Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, 30, 77-85

Park, J.K. and Lee, K.J. (2000), "Current status of the nanotechnology development. Trends in Metals & Materials Engineering, 13, 38-52

Satoh, T., Tsuchida, T., Mitsukuri, K. and Hong, Z. (2001) Field placing test of lightweight treated soil under seawater in Kumamoto Port, Soils and Foundations, 41(5), 145-154

Weil, R.R. and Brady, N.C. (2016) The Nature and Properties of Soils, 15th edition, Pearson Education

Yoon, G. L., and You, S. K. (2004) Strength and Deformation Characteristics of Lightweight Foamed Soil Using In-situ Soil. Journal of the Korean Geotechnical Society, 20(9), 125-131 (in Korean)

국 토 교 통 기 술 촉 진
연 구 사 업

[산업광물을 이용한 복합기능성 건축물 내장재 및 마감재 실용화 기술 개발]

- 부록 -

2019. 04

주관연구기관 : (주)엠에스이엔씨

〈 목 차 〉

1. 실대형 모형 제작 ····· 1
2. 기능성 산업광물 경량화 ····· 9
3. 바닥축열층 모르타르 시공법 ····· 13
4. 경량 벽체 시공법 ····· 16
5. 천장 마감 시공법 ····· 21
6. 엑셀기반 최적배합비 산정 ····· 25
7. 열전도 센서 프로토타입 설계 ····· 54

첨부 : 실대형모형의 설계 및 시공 도면 원본 ····· 63

1. 실대형 모형 제작

□ 외단열 건축물 시공

□ 기초지반 보강

□ 시험동 및 기준동 건축

□ 온수배관 및 냉방기 설치

□ 외단열 건축물 시공

○ 목적

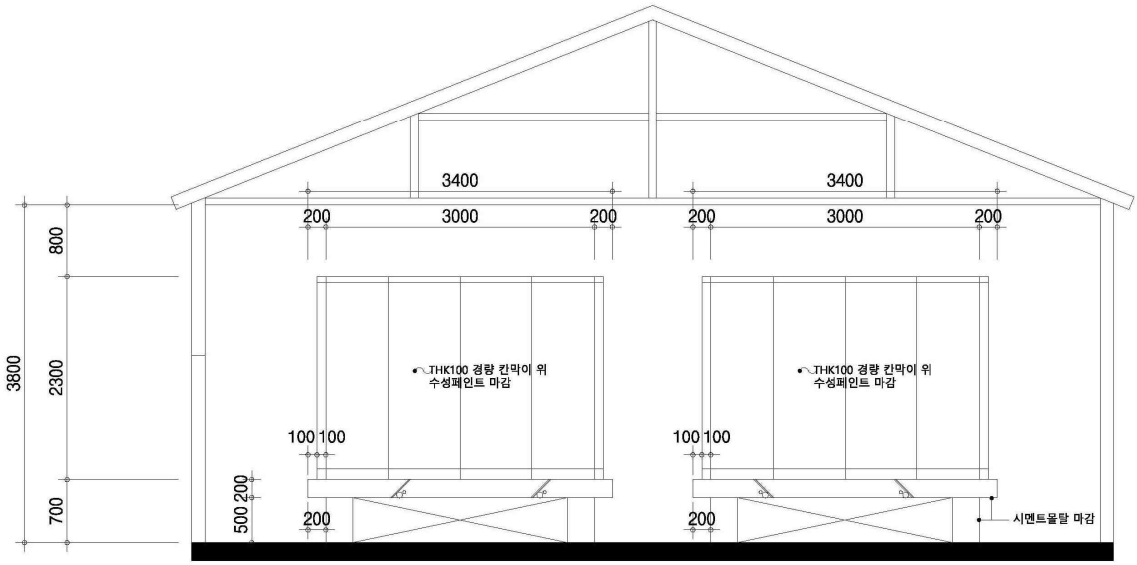
- 축열 시험 과정에서 외부 기온의 영향을 최소화하고 동일 조건에서 시험동과 기준동 축열 실험을 위해 실대형 모형 외부에 단열 패널을 이용하여 실험동 건축물을 제작

○ 위치

- 충청북도 충주시 대소원면 외동길 217

○ 규격

- 높이: 3.8m
- 내부면적: 80m^2



[외단열 실험동 개념도]



[외단열 실험동 시공]

□ 기초지반 보강

○ 기초지반 보강

- 실대형 모형 하부 지반을 균일화를 위하여 기초지반을 보강
- 천공기를 이용하여 바닥면 천공 후 고압공기로 서징(Surging)하여 이물질을 제거하고 충전재를 공내로 주입

○ 배합비/중량비

구분	배합비			고화재	비고
	시멘트	다공질 장석	석고		
충전재료	33%	62%	5%	0.05%	

○ 배합비/중량 기준 (kg/m^3 당)

구분	배합비				고화재(0.05%)	비고
	시멘트	광물(장석)	석고	물		
충전재료	465	715	53	550	0.62	W/C 45%기준
비중	3.15	2.56	2.30	1.00	-	



[천공]



[충전재 혼합]



[주입 펌프설치]

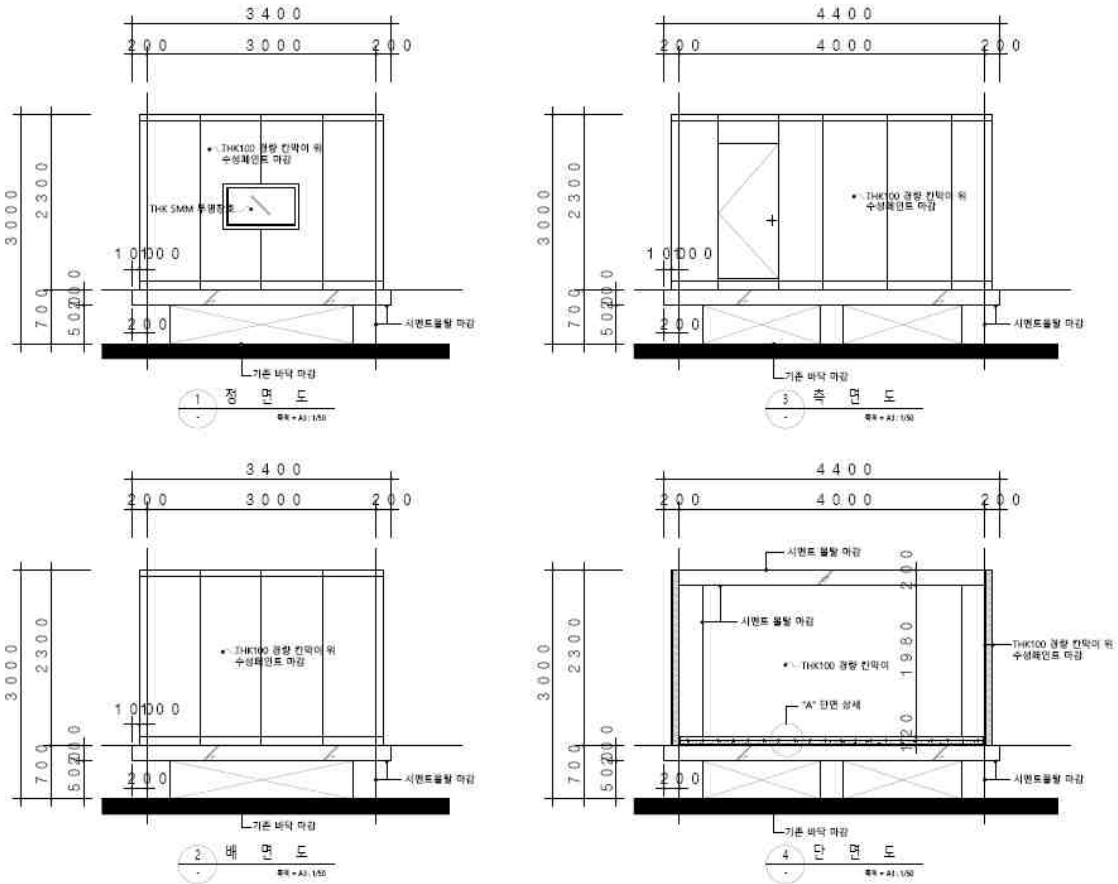


[충전 완료]

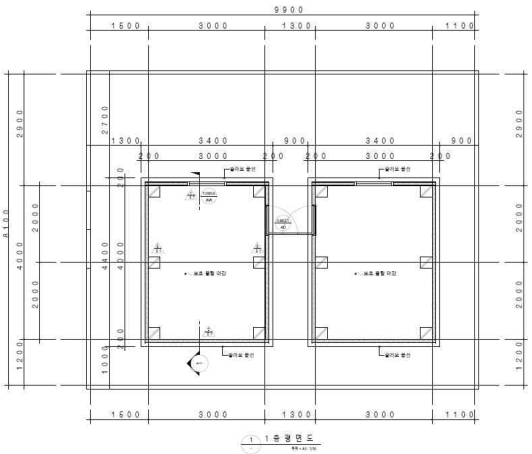
□ 시험동 및 기준동 건축

○ 실대형 모형 제작

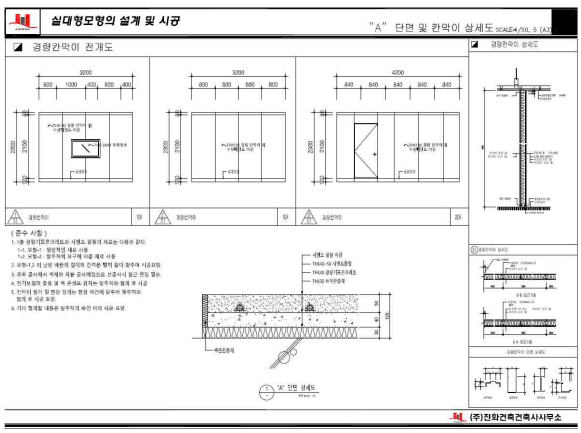
- 동일 조건 성능 평가를 위해 외부에 경량패널 건축물을 시공한 후 주택시방기준으로 3m(가로)×4m(세로)×3m(높이)로 2개동의 철근콘크리트조를 제작
- 모형의 기둥은 지반에 설치하고 슬래브는 지표면에서 0.5m 이격하여 기초지반의 영향을 배제하였고, 실내공간의 높이는 2.3m가 되도록 하였음



[정면도/측면도/배면도/단면도]



[평면도]



[경량칸막이 전개도]

○ 시험동과 기준동 시공 순서

- 격납 건축물 내 시험동과 기준동은 철근 배근 후 거푸집을 설치하고, 콘크리트를 타설
- 바닥 슬래브는 소음, 진동 평가를 위하여 하부를 50cm 이격하여 설치
- 거푸집 철거 후 표면 미장을 실시하고, 건조 후 벽체 경량 패널 벽체를 시공



[바닥 철근 배근]



[바닥 거푸집 설치]



[레미콘 주입]



[바닥 타설 작업]



[타설 완료된 바닥면]



[이격된 바닥부]



[기둥 및 천장부 거푸집 설치]



[기둥 및 천정부 타설]



[타설 완료된 기둥 및 천장부]



[기둥 미장]



[벽체 패널 시공]

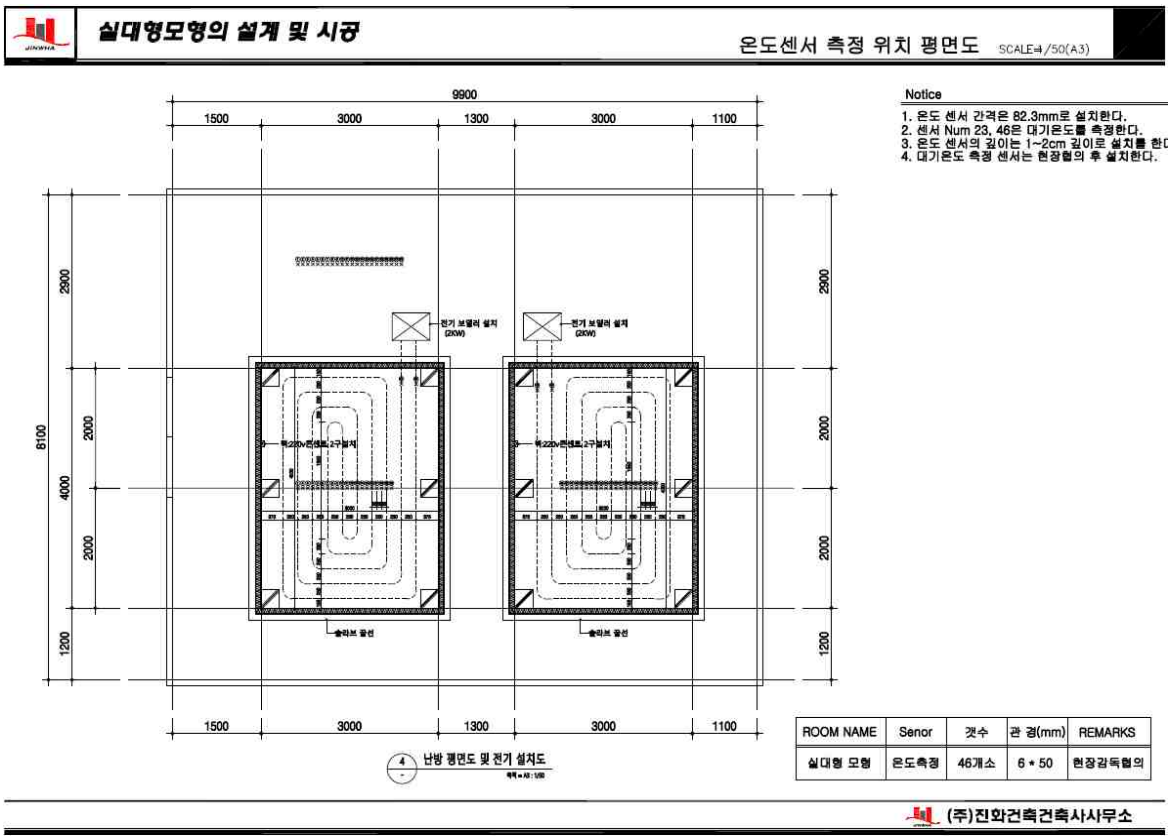


[전원 설치 및 모형 내부]

□ 온수배관 및 냉방기 설치

○ 시험동과 기준동의 보일러 설치

- 단열재 및 격자망을 설치하고, 재료원을 배합하여 바닥부와 천장부에 경량기포 콘크리트 타설
- 시험동과 기준동의 온수관로와 전기보일러를 설치하고, 일반 모르타르와 실험을 통해 도출된 배합비를 적용하여 제작한 모르타르를 각각 혼합하여 타설
- 온수배관은 동일 구격과 길이의 엑셀파이프를 이용하여 시험동과 기준동을 대칭으로 설치



[온수배관도]

- 바닥 슬래브의 상부는 무량판구조로 제작하였고, LH 공사 시방서 42310 온돌마감기준과 기포콘크리트 KS규격(KS F 4039:2004)을 기준으로 단열층과 단열재 상부에 격자망을 설치
- 단열층 상부는 기포콘크리트 KS규격을 기준으로 5㎝두께로 경량기포층을 시공



[단열재/격자망시공]



[경량기포 재료 준비]



[재료원 배합]



[경량기포 배합]



[바닥 경량기포 타설]



[천장 경량기포 타설]

- 축열과 소비전력을 관찰하기 위해 동일 규격의 전기보일러를 시험동과 기준동에 설치하였고 제어부와 온수의 온도를 측정하여 제품을 검증
- 온수보일러는 구분된 적산전력계로부터 전기를 공급받도록 하여 전기보일러의 전기사용량을 파악하도록 하였음



[시험동/기준동 온수관로 설치]



[시험동/기준동 전기보일러 설치]



[적산전력계 설치]

- 온수배관이 매설되는 축열층은 5㎝ 두께로 시공하였고 시험동은 연구에서 도출된 배합비를 이용하여 재료를 배합하였고 기준동은 기성품으로 제조된 레미탈을 5㎝두께로 시공



[기준동 모르타르믹싱]



[기준동 모르타르 축열층타설]



[시험동 모르타르 축열층타설]

- 하절기 동안의 축열과 소비전력을 관찰하기 위해 동일 규격의 에어컨을 시험동과 기준동에 설치하고 냉방조건에서 소비전력을 관찰
- 에어컨 규격

  냉방능력 : 9,000-10,000BTU/2640W

  소비전력 : 1135W

  제품규격 : 349×381×749㎜ (W×D×H)

  온도설정범위 : 17-30℃



[이동식 냉방기 설치]

□ 시험동 / 기준동 실대형 모형의 철거 및 재시공

○ 시험동 및 기준동의 바닥부 축열층/온수배관 철거 및 재시공

- 시험동 : 3회 시공, 기준동 : 1회 시공



[축열층 철거]





[단열재 및 경량기포 2차 시공]





[온수관 재설치]



[축열층 재시공]

○ 시험동 및 기준동의 경량 벽체의 철거 및 재시공

- 시험동 : 2회 시공, 기준동 : 1회 시공



[출입문 제거]



[보일러 패널 철거]



[전선 철거]



[패널 철거]







[경량블록 철거]

2. 기능성 산업광물 경량화

□ 강열감량에 의한 경량화

□ 분체에 의한 경량화

□ 경량기포 혼합에 의한 경량화

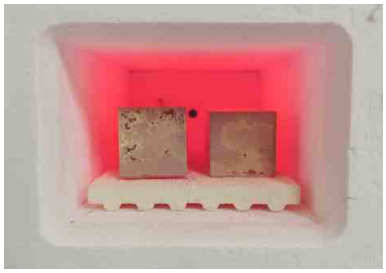
□ 강열감량에 의한 경량화

○ 단계적 소성에 의한 경량화

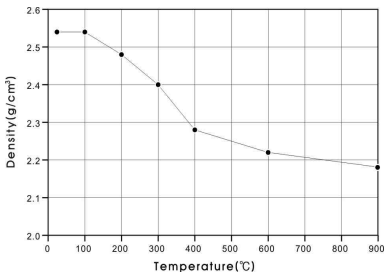
- 다공질 장석 분말을 육면체의 성형 후 소성과정의 체적과 밀도변화를 관찰
- 900℃까지 가열에서 체적은 0.1%, 밀도는 14% 감소



[가열 전]



[가열과정]

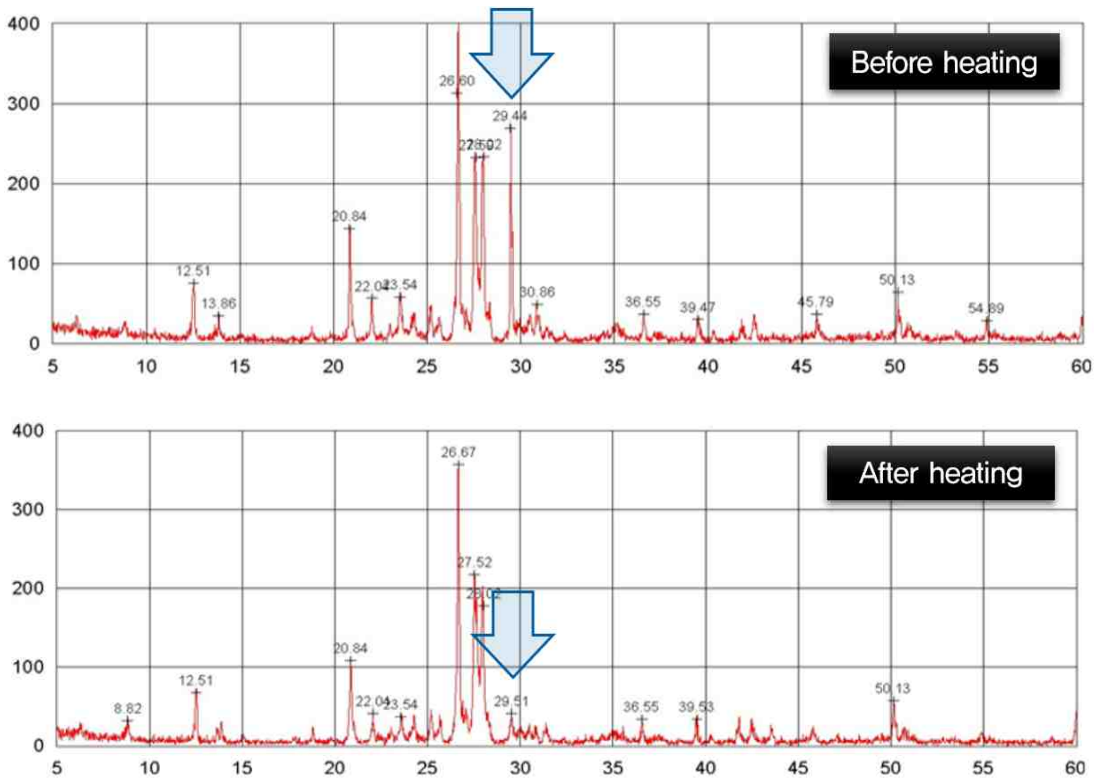


[강열감량]

온도(℃)	상온	100	200	300	400	600	900
밀도(g/㎤)	2.54	2.54	2.48	2.40	2.28	2.22	2.18

○ 광물조성

- 소성으로 사장석과 정장석의 비율이 변화되며 고온 소성에서 운모와 점토광물이 감소하며 특히 다공질 구조가 나타나는 사장석의 함량이 감소 → 저온 소성이 필요

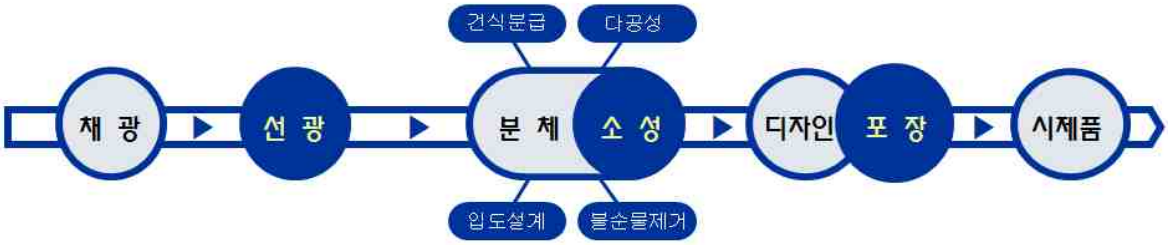


[가열에 따른 광물조성의 변화]

□ 분체에 의한 경량화

○ 다공질 장석의 입경

- 입경별 다공질 장석 분말 제작 공정



[다공질 장석 제작 공정]

- 입경별 밀도 : 분체의 크기가 작아질수록 밀도는 감소하며 100㎛ 크기에서 원석대비 47%, 20㎛에서 59% 감소



[평균입경 1㎜]



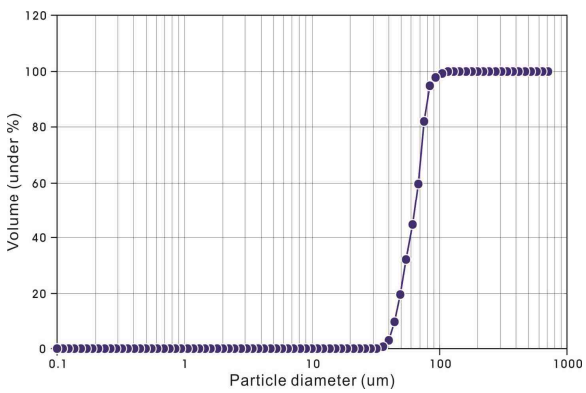
[평균입경 80㎛]



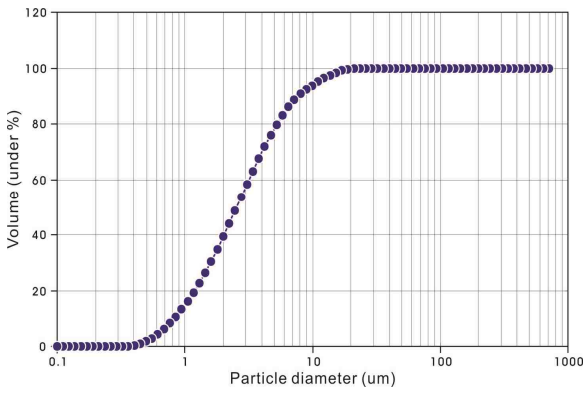
[평균입경 10㎛]

입경(㎛)	원석	500	100	80	40	30	20	10
밀도(g/㎤)	2.56	1.58	1.37	1.29	1.12	1.08	1.06	1.02

- 다공질 장석 분말의 입도분포곡선



[입도분포곡선, 입경 〈 100㎛]



[입도분포곡선, 입경 〈 20㎛]

□ 경량기포 혼합에 의한 경량화

○ 경량기포 배합 순서



[①-재료 배합]



[②-건조 혼합]



[③-물 배합]



[④-기포 사출]



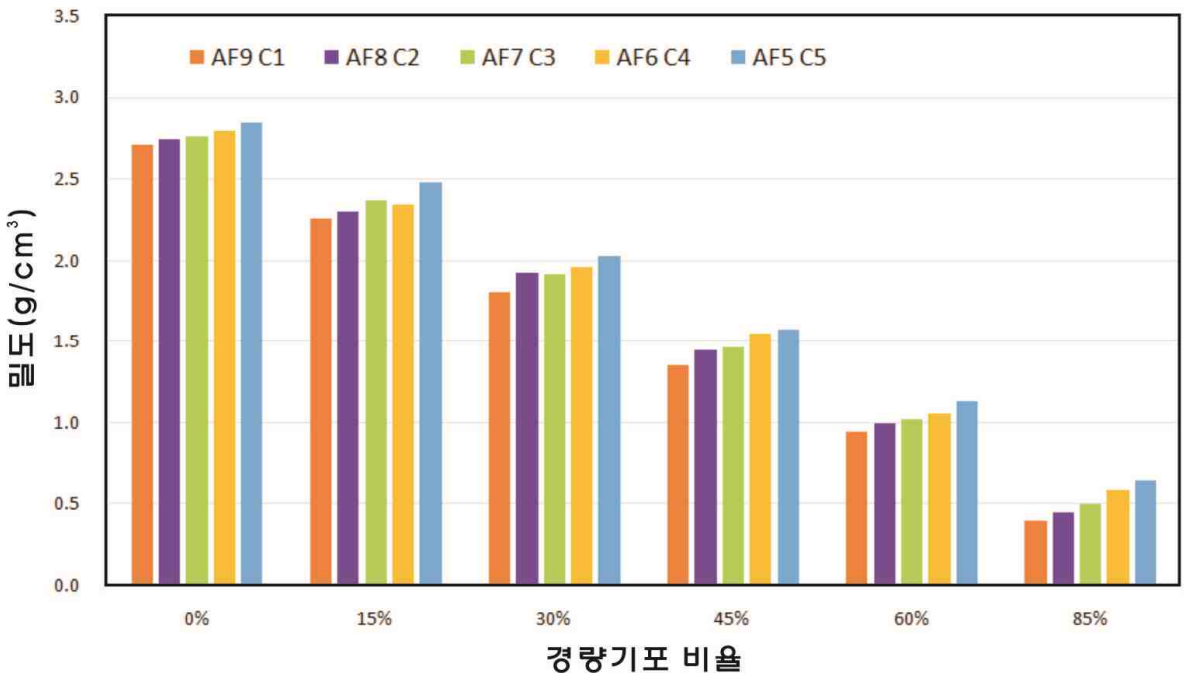
[⑤-기포 혼합]



[⑥-공시체 제작]

○ 경량기포 배합비에 따른 밀도

- 경량 기포 혼입 비율에 따라 밀도 조절 가능하며, 각각의 재료의 고유 밀도를 측정 후, 체적 비를 기준으로 밀도를 산정



[경량기포 배합 비율에 다른 밀도 변화]

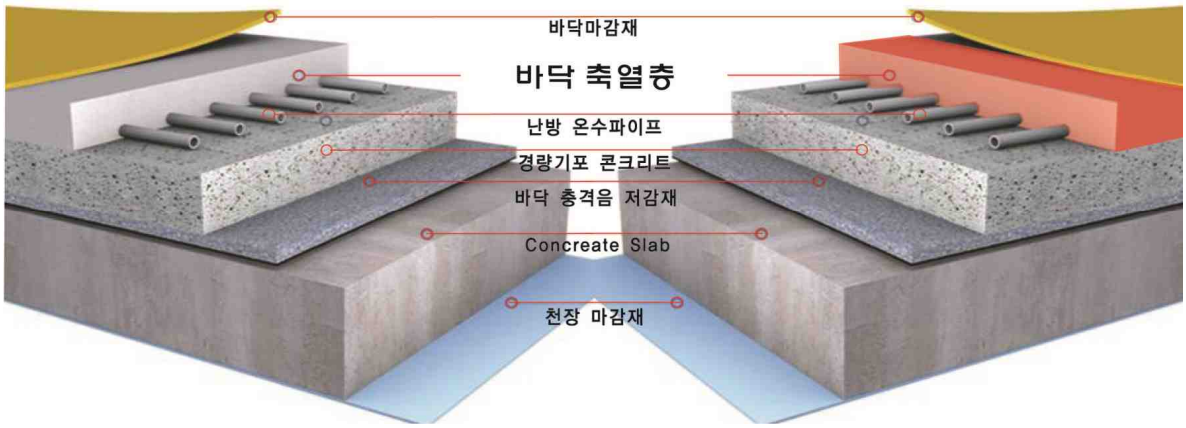
3. 바닥 축열층 모르타르 제조 및 시공

□ 바닥 축열층(온돌)의 시공

□ 바닥 축열층(온돌)의 시공

○ 바닥 축열층 단면

- 일반적인 주거용 건축물의 바닥은 콘크리트 슬라브 위에 바닥 충격음 저감재, 경량기포콘크리트, 난방 온수파이프, 마감 모르타르의 순서로 시공

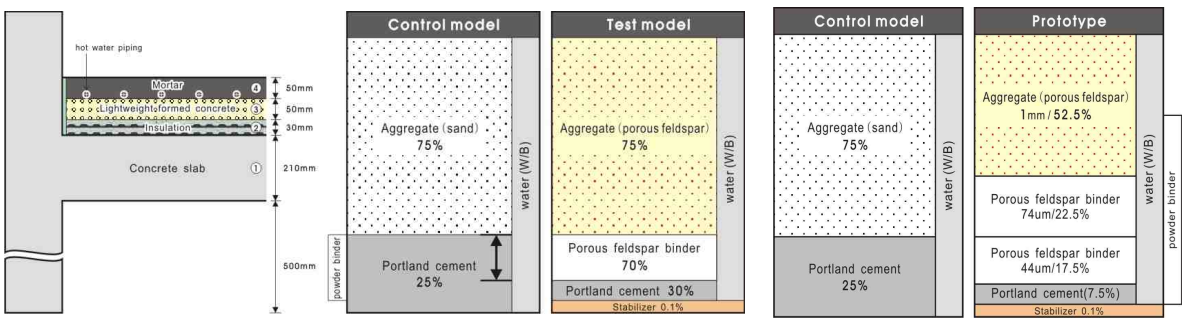


[축열층 단면도]

- 시공은 LH공사 시방서의 규정을 준수하였고, 시험동과 기준동의 바닥완층재, 경량기포콘크리트까지는 동등한 조건으로 시공

○ 축열층의 재료 배합 비율

- 기준동은 모래와 보통포틀랜드시멘트를 3:1 비율로 배합한 모르타르를 50 ㎜ 두께로 시공
- 시험동은 평균 입경 1.0 ㎜ 크기로 제작한 다공성 장석 모래와 40 ㎛ 입경의 규산염 분말과 시멘트를 2:1로 혼합하여 분말 바인더를 만들고 이를 장석 모래와 3:1 비율로 배합하고 0.1 %의 수용성 고화제를 첨가한 모르타르를 제작
- 현장에서 혼합한 모르타르는 온수관이 설치된 부분에 50 ㎜ 두께로 시공하고 28일간 양생함



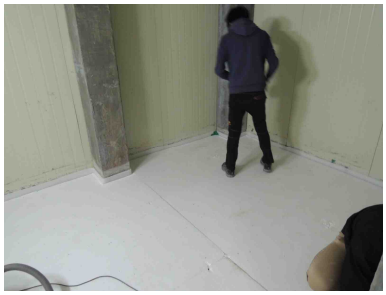
[시공 차수별 재료 배합비]

○ 시공순서

- 시공은 콘크리트 슬래브로부터 하부→상부층의 순서로 수행
- 1-2차 축열시험을 위한 바닥층은 최상부 축열층을 제외한 부분은 동시에 시공하여 실험조건을 균등하게 조성



[충격음 저감재 설치]



[측면완충재 설치]



[와이어메쉬 설치]



[경량가포콘크리트 시공]



[온수배관 설치]



[축열층 시공]

- 기준동은 1-2차 시공에서 양생과정에서 건조 수축에 의한 균열이 관찰되는 반면 시험동은 1차에서 기준동과 유사한 균열이 발생하였으나 3차에서는 육안으로 구분되는 균열 현상이 관찰되지 않음



[기준동 바닥 표면]



[시험동 바닥 표면]

4. 조적식 경량 벽체 시공법

□ 경량블록(벽돌) 제작

□ 조적용 모르타르(실런트) 제조

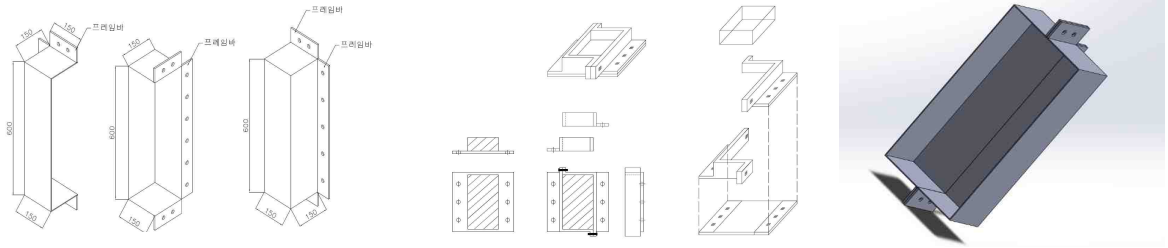
□ 시공

□ 경량블록(벽돌) 제작

○ 거푸집 제작

- 조적식 경량 벽체 제작을 위해 KS F 2701(경량기포 콘크리트 블록)기준을 의거해 600(L)×300(H)×150(T)㎜으로 조립식 금속 거푸집을 제작

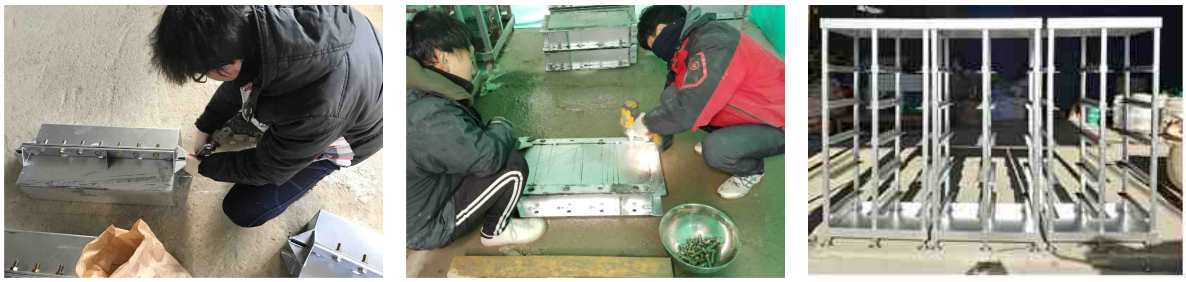
- 거푸집은 2개의 형태로 60개를 제작



조립식 금속 거푸집 설계(2종) 모형

- 경량 블록 건조를 위해 3개조의 거푸집 적재함을 제작

- 적재함 규격: 2.5m × 0.8m × 2.0m



[금형1 거푸집 조립] [금형2 거푸집 조립] [거푸집 적재함]

○ 양생용 간이제작소 설치

- 경량 블록의 품질 관리를 위해 외부와 차단된 2개동의 간이제작소를 설치하여 블록을 제작

- 제작 기간 중 동절기는 현장 기온이 -20℃ 이하의 저온이었고 보온을 위해 2대의 전기히터를 설치하여 운용하였고 간이제작소 외부에 비닐하우스를 시설하여 블록의 양생 중 불량을 최소하였음



[간이제작소 설치] [제작실 내부]

○ 경량기포 제조

- 10마력의 에어 펌프와 Procon 펌프, 압축식 노즐을 이용하여 경량기포를 제작



[Procon 펌프]



[경량기포 발생기]


[경량기포]

○ 재료 혼합

- 소형(전체용적 200L), 대형(전체용적 400L) 혼합기를 임대 및 제작하여 경량블록을 교반


[대형 교반기]


[소형 교반기]


[간이 교반기]

○ 경량블럭 제작

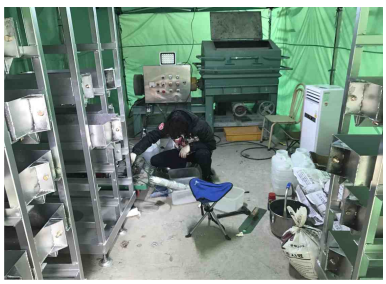
- 일반 포틀랜드 시멘트, 규산염 재료원, PVA섬유를 20분간 건조 교반

- 물과 함께 5분 교반 후 경량기포와 함께 5분간 교반 후 금형에 채워 넣음


[재료 준비 및 개량]


[재료 투입]


[건조 혼합]


[경량기포 제조]


[물, 경량기포 교반]


[경량 기포 모르타르 사출]



[경량 기포 모르타르 타설]



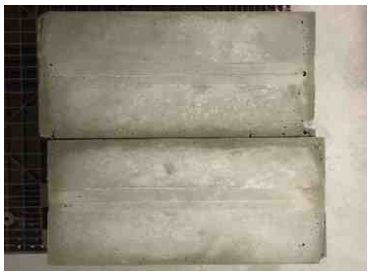
[적재함 거치]



[양생 중 경량블록]

- 영상 21℃에서 14일 양생 후 탈형





[경량 벽체 탈형]



[경량 벽체 적재]

□ 조적용 모르타르(실런트) 제조

○ 재료배합

- 경량블록 조적을 위한 실런트 제작

- 입자크기 20㎛ 이하의 다공질 장석 분말, 포틀랜드시멘트, 고화재 및 경화제를 건조 혼합하고 물 배합비에 따라 교반하여 신축성이 있는 연고성의 접합제로 제작



[재료준비]



[재료원 계량]



[규산염 재료원 개량]

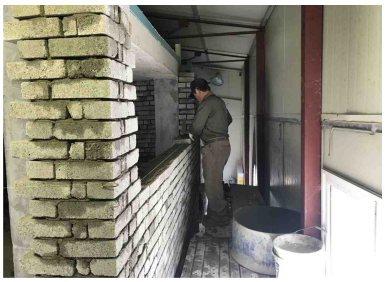
□ 시공

○ 기준동 시공

- 시험동 : 2회 시공, 기준동 1회 시공

- 기준동은 시멘트 벽돌을 사용하여 조적시공 후 미장 마감





[기준동 시멘트 벽돌 조적]




[기준동 시멘트 벽돌 조적]



[시멘트 벽돌 미장]

○ 시험동 시공

- 시험동은 총 2번의 시험을 하였으며 1회 실험시 210개의 경량 블록을 사용

- 시험동의 내부는 다공질 장석 모르타르를 이용하여 미장 마감




[시험동 조적]



[시험동 조적 내부]




[시험동 조적 외부]



[시험동 내부 미장]

5. 천장 마감 시공법

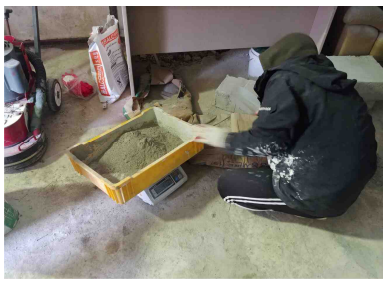
□ 천장 마감재 제작 및 시공법

□ 시험동 시공

□ 천장 마감재 제작 및 시공법

○ 모르타르 제작

- 오염물질 흡착을 고려해 다공질 장석과 클리놉틸로라이트를 혼합한 소재를 적용하여 천장 마감재를 제작



[계량]



[교반]



[교반된 모르타르]

○ 도장(분사)

- 합판 위에 에어컴프레서를 이용하여 가압하고 유동성의 모르타르를 분사
- 모르타르의 평균입경은 50㎛로 하였고 압력은 0.8 Mpa, 배출량은 120 L/min의 속도로 분사
- 도장 후 흘러내림 현상을 관찰하고 이를 통해 물 배합비를 도출



[분사형 장비]

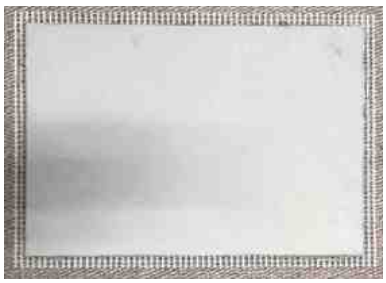




[분사형 천장 마감]

○ 몰드형 패널형

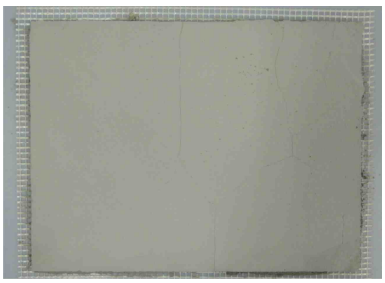
- 1㎝두께의 틀을 제작하고 섬유을 혼합한 모르타르를 이용하여 몰드형의 마감재를 제작
- 유색광물 및 활성탄을 다양한 색상의 표출이 가능
- 패널형 규격 : 30 × 20 ㎝



[천장 마감 패널형]



[섬유 혼합 천장 패널형]



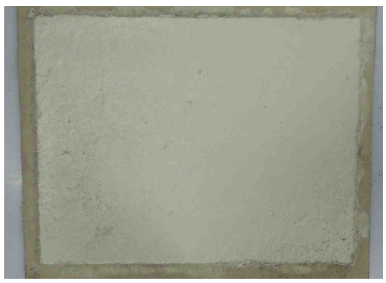
[활성탄 천장 패널형]

○ 부착형 천장 패널

- 연속 섬유에 친환경 기근의 모르타르를 분사하여 부착형 패널을 제작
- 연속 섬유를 사용하여 콘크리트면에 부착이 가능하며 다양형태로 제작 가능



[연속 섬유]





[부착형 천장 패널]

○ 미장

- 콘크리트 노출면과 합판에 대하여 미장도구을 이용하여 마감을 수행
- 기존의 미장 방법을 이용하여 마감을 수행하였고 중복 미장에서 재료의 분리현상이 나타나지 않음



[콘크리트 노출면 미장]

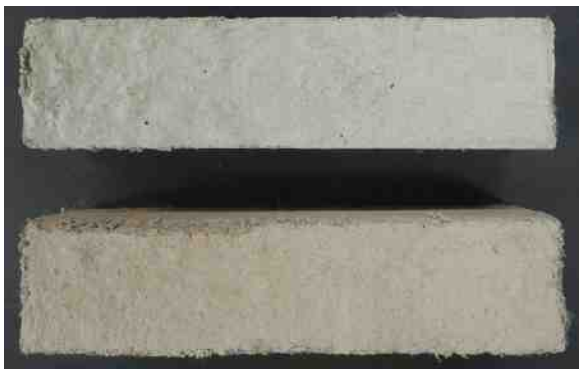




[합판 미장]

○ 천연색조

- 노출면 마감 재료의 색조를 표현하기 위해 천연재료를 첨가하여 마감재의 색상 변화를 관찰
- 천연재료의 색상 변화를 관찰하기 위해 적색 세일과 활성탄을 사용하였고, 적색 세일 분말은 무게 대비 5, 10, 20, 30%로 단계별로 첨가, 활성탄은 2, 5, 10% 비율로 첨가



[적색 세일 첨가]



[활성탄 첨가]

□ 시험동 시공

○ 시험동 미장 마감

- 다공질 장석과 클리놉틸로라이트를 혼합한 모르타르를 제작한 후 실대형 모형의 천장마감용으로 적용



재료원 배합



천장 미장 마감



천장 미장

6. 엑셀기반 최적배합비

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
160826-A-1	10	90									300	50
160826-A-2	10	90									300	50
160826-A-3	10	90									300	50
160826-A-4	10	90									300	50
160826-B-1	20	80									300	50
160826-B-2	20	80									300	50
160826-B-3	20	80									300	50
160826-B-4	20	80									300	50
160826-C-1	30	70									300	50
160826-C-2	30	70									300	50
160826-C-3	30	70									300	50
160826-C-4	30	70									300	50
160826-D-1	40	60									300	50
160826-D-2	40	60									300	50
160826-D-3	40	60									300	50
160826-D-4	40	60									300	50
160826-E-1	50	50									300	50
160826-E-2	50	50									300	50
160826-E-3	50	50									300	50
160826-E-4	50	50									300	50
160829-A-1	10	90								1g	300	50
160829-A-2	10	90								1g	300	50
160829-A-3	10	90								1g	300	50
160829-A-4	10	90								1g	300	50
160829-B-1	20	80								1g	300	50
160829-B-2	20	80								1g	300	50
160829-B-3	20	80								1g	300	50
160829-B-4	20	80								1g	300	50
160829-C-1	30	70								1g	300	50
160829-C-2	30	70								1g	300	50
160829-C-3	30	70								1g	300	50
160829-C-4	30	70								1g	300	50
160829-D-1	40	60								1g	300	50
160829-D-2	40	60								1g	300	50
160829-D-3	40	60								1g	300	50
160829-D-4	40	60								1g	300	50
160829-E-1	50	50								1g	300	50
160829-E-2	50	50								1g	300	50

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
160829-E-3	50	50								1g	300	50
160829-E-4	50	50								1g	300	50
160831-A-1	8	90							2*	0.05		50
160831-A-2	8	90							2*	0.05		50
160831-A-3	8	90							2*	0.05		50
160831-A-4	8	90							2*	0.05		50
160831-B-1	16	80							4*	0.05		50
160831-B-2	16	80							4*	0.05		50
160831-B-3	16	80							4*	0.05		50
160831-B-4	16	80							4*	0.05		50
160831-C-1	24	70							6*	0.05		50
160831-C-2	24	70							6*	0.05		50
160831-C-3	24	70							6*	0.05		50
160831-C-4	24	70							6*	0.05		50
160831-D-1	32	60							8*	0.05		50
160831-D-2	32	60							8*	0.05		50
160831-D-3	32	60							8*	0.05		50
160831-D-4	32	60							8*	0.05		50
160831-E-1	40	50							10*	0.05		50
160831-E-2	40	50							10*	0.05		50
160831-E-3	40	50							10*	0.05		50
160831-E-4	40	50							10*	0.05		50
160901-A-1	9	90							1*			50
160901-A-2	9	90							1*			50
160901-A-3	9	90							1*			50
160901-A-4	9	90							1*			50
160901-B-1	18	80							2*			50
160901-B-2	18	80							2*			50
160901-B-3	18	80							2*			50
160901-B-4	18	80							2*			50
160901-C-1	27	70							3*			50
160901-C-2	27	70							3*			50
160901-C-3	27	70							3*			50
160901-C-4	27	70							3*			50
160901-D-1	36	60							4*			50
160901-D-2	36	60							4*			50
160901-D-3	36	60							4*			50
160901-D-4	36	60							4*			50

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
160901-E-1	45	50							5*			50
160901-E-2	45	50							5*			50
160901-E-3	45	50							5*			50
160901-E-4	45	50							5*			50
160902-A-1	10	90								1g		50
160902-A-2	10	90								1g		50
160902-A-3	10	90								1g		50
160902-A-4	10	90								1g		50
160902-B-1	20	80								1g		50
160902-B-2	20	80								1g		50
160902-B-3	20	80								1g		50
160902-B-4	20	80								1g		50
160902-C-1	30	70								1g		50
160902-C-2	30	70								1g		50
160902-C-3	30	70								1g		50
160902-C-4	30	70								1g		50
160902-D-1	40	60								1g		50
160902-D-2	40	60								1g		50
160902-D-3	40	60								1g		50
160902-D-4	40	60								1g		50
160902-E-1	50	50								1g		50
160902-E-2	50	50								1g		50
160902-E-3	50	50								1g		50
160902-E-4	50	50								1g		50
160905-A-1	10	90								6g	500	50
160905-A-2	10	90								6g	500	50
160905-A-3	10	90								6g	500	50
160905-A-4	10	90								6g	500	50
160905-B-1	20	80								6g	400	50
160905-B-2	20	80								6g	400	50
160905-B-3	20	80								6g	400	50
160905-B-4	20	80								6g	400	50
160905-C-1	30	70								6g	300	50
160905-C-2	30	70								6g	300	50
160905-C-3	30	70								6g	300	50
160905-C-4	30	70								6g	300	50
160905-D-1	40	60								6g	300	50
160905-D-2	40	60								6g	300	50

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
160905-D-3	40	60								6g	300	50
160905-D-4	40	60								6g	300	50
160905-E-1	50	50								6g	300	50
160905-E-2	50	50								6g	300	50
160905-E-3	50	50								6g	300	50
160905-E-4	50	50								6g	300	50
160919-A-1	20	80								0.05	100	50
160919-A-2	20	80								0.05	100	50
160919-A-3	20	80								0.05	100	50
160919-A-4	20	80								0.05	100	50
160919-B-1	20	80								0.05	200	50
160919-B-2	20	80								0.05	200	50
160919-B-3	20	80								0.05	200	50
160919-B-4	20	80								0.05	200	50
160919-C-1	20	80								0.05	300	50
160919-C-2	20	80								0.05	300	50
160919-C-3	20	80								0.05	300	50
160919-C-4	20	80								0.05	300	50
160919-D-1	20	80								0.05	400	50
160919-D-2	20	80								0.05	400	50
160919-D-3	20	80								0.05	400	50
160919-D-4	20	80								0.05	400	50
160919-E-1	20	80								0.05	500	50
160919-E-2	20	80								0.05	500	50
160919-E-3	20	80								0.05	500	50
160919-E-4	20	80								0.05	500	50
160920-A-1	10	90								0.05	100	50
160920-A-2	10	90								0.05	100	50
160920-A-3	10	90								0.05	100	50
160920-A-4	10	90								0.05	100	50
160920-B-1	10	90								0.05	200	50
160920-B-2	10	90								0.05	200	50
160920-B-3	10	90								0.05	200	50
160920-B-4	10	90								0.05	200	50
160920-C-1	10	90								0.05	300	60
160920-C-2	10	90								0.05	300	60
160920-C-3	10	90								0.05	300	60
160920-C-4	10	90								0.05	300	60

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
160920-D-1	10	90								0.05	400	60
160920-D-2	10	90								0.05	400	60
160920-D-3	10	90								0.05	400	60
160920-D-4	10	90								0.05	400	60
160920-E-1	10	90								0.05	500	60
160920-E-2	10	90								0.05	500	60
160920-E-3	10	90								0.05	500	60
160920-E-4	10	90								0.05	500	60
160923-A-1	30	70								0.05	100	35
160923-A-2	30	70								0.05	100	35
160923-A-3	30	70								0.05	100	35
160923-A-4	30	70								0.05	100	35
160923-B-1	30	70								0.05	200	40
160923-B-2	30	70								0.05	200	40
160923-B-3	30	70								0.05	200	40
160923-B-4	30	70								0.05	200	40
160923-C-1	30	70								0.05	300	40
160923-C-2	30	70								0.05	300	40
160923-C-3	30	70								0.05	300	40
160923-C-4	30	70								0.05	300	40
160923-D-1	30	70								0.05	400	50
160923-D-2	30	70								0.05	400	50
160923-D-3	30	70								0.05	400	50
160923-D-4	30	70								0.05	400	50
160923-E-1	30	70								0.05	500	50
160923-E-2	30	70								0.05	500	50
160923-E-3	30	70								0.05	500	50
160923-E-4	30	70								0.05	500	50
160926-A-1	60	40								0.05	100	35
160926-A-2	60	40								0.05	100	35
160926-A-3	60	40								0.05	100	35
160926-A-4	60	40								0.05	100	35
160926-B-1	60	40								0.05	200	40
160926-B-2	60	40								0.05	200	40
160926-B-3	60	40								0.05	200	40
160926-B-4	60	40								0.05	200	40
160926-C-1	60	40								0.05	300	40
160926-C-2	60	40								0.05	300	40

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
160926-C-3	60	40								0.05	300	40
160926-C-4	60	40								0.05	300	40
160926-D-1	60	40								0.05	400	50
160926-D-2	60	40								0.05	400	50
160926-D-3	60	40								0.05	400	50
160926-D-4	60	40								0.05	400	50
160926-E-1	60	40								0.05	500	50
160926-E-2	60	40								0.05	500	50
160926-E-3	60	40								0.05	500	50
160926-E-4	60	40								0.05	500	50
160930-A-1	50	50								0.05	100	40
160930-A-2	50	50								0.05	100	40
160930-A-3	50	50								0.05	100	40
160930-A-4	50	50								0.05	100	40
160930-B-1	50	50								0.05	200	40
160930-B-2	50	50								0.05	200	40
160930-B-3	50	50								0.05	200	40
160930-B-4	50	50								0.05	200	40
160930-C-1	50	50								0.05	300	50
160930-C-2	50	50								0.05	300	50
160930-C-3	50	50								0.05	300	50
160930-C-4	50	50								0.05	300	50
160930-D-1	50	50								0.05	400	55
160930-D-2	50	50								0.05	400	55
160930-D-3	50	50								0.05	400	55
160930-D-4	50	50								0.05	400	55
160930-E-1	50	50								0.05	500	55
160930-E-2	50	50								0.05	500	55
160930-E-3	50	50								0.05	500	55
160930-E-4	50	50								0.05	500	55
161004-A-1	14	80							6*	0.05	100	40
161004-A-2	14	80							6*	0.05	100	40
161004-A-3	14	80							6*	0.05	100	40
161004-A-4	14	80							6*	0.05	100	40
161004-B-1	21	70							9*	0.05	100	40
161004-B-2	21	70							9*	0.05	100	40
161004-B-3	21	70							9*	0.05	100	40
161004-B-4	21	70							9*	0.05	100	40

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161004-C-1	28	60							12*	0.05	100	45
161004-C-2	28	60							12*	0.05	100	45
161004-C-3	28	60							12*	0.05	100	45
161004-C-4	28	60							12*	0.05	100	45
161006-A-1		80				20					400	72.5
161006-A-2		80				20					400	72.5
161006-A-3		80				20					400	72.5
161006-A-4		80				20					400	72.5
161006-B-1		80				20					400	75
161006-B-2		80				20					400	75
161006-B-3		80				20					400	75
161006-B-4		80				20					400	75
161006-C-1		80					20				400	75
161006-C-2		80					20				400	75
161006-C-3		80					20				400	75
161006-C-4		80					20				400	75
161012-A-1	70	30								0.05	300	50
161012-A-2	70	30								0.05	300	50
161012-A-3	70	30								0.05	300	50
161012-A-4	70	30								0.05	300	50
161012-B-1	70	30								0.05	400	50
161012-B-2	70	30								0.05	400	50
161012-B-3	70	30								0.05	400	50
161012-B-4	70	30								0.05	400	50
161012-C-1	80	20									300	50
161012-C-2	80	20									300	50
161012-C-3	80	20									300	50
161012-C-4	80	20									300	50
161012-D-1	80	20									400	50
161012-D-2	80	20									400	50
161012-D-3	80	20									400	50
161012-D-4	80	20									400	50
161012-E-1	80	20								0.05	300	50
161012-E-2	80	20								0.05	300	50
161012-E-3	80	20								0.05	300	50
161012-E-4	80	20								0.05	300	50
161012-F-1	80	20								0.05	400	50
161012-F-2	80	20								0.05	400	50

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161012-F-3	80	20								0.05	400	50
161012-F-4	80	20								0.05	400	50
161021-A-4	10	80						10		0.05		50
161021-B-4	10	80					10			0.05		45
161021-C-4		80					10	10		0.05		45
161021-D-4	10	70					10	10		0.05		50
161021-E-4	50	30					10	10		0.05		45
161026-A-1		90				10				0.05	200	50
161026-A-2		90				10				0.05	200	50
161026-A-3		90				10				0.05	200	50
161026-B-1		80				20				0.05	200	50
161026-B-2		80				20				0.05	200	50
161026-B-3		80				20				0.05	200	50
161026-C-1		70				30				0.05	200	50
161026-C-2		70				30				0.05	200	50
161026-C-3		70				30				0.05	200	50
161026-D-1		60				40				0.05	200	50
161026-D-2		60				40				0.05	200	50
161026-D-3		60				40				0.05	200	50
161026-E-1		50				50				0.05	200	50
161026-E-2		50				50				0.05	200	50
161026-E-3		50				50				0.05	200	50
161108-A-1	20	60					10	10		0.05	100	50
161108-B-1	20	60					10	10		0.05	150	50
161108-C-1	20	60					10	10		0.05	200	50
161108-D-1		60				20	10	10		0.05	100	50
161108-E-1		60				20	10	10		0.05	150	50
161108-F-1		60				20	10	10		0.05	200	50
161111-A-1	40	60									100	50
161111-A-2	40	60									100	50
161111-A-3	40	60									100	50
161111-A-4	40	60									100	50
161111-A-5	40	60									100	50
161111-B-1	40	60									200	40
161111-B-2	40	60									200	40
161111-B-3	40	60									200	40
161111-B-4	40	60									200	40
161111-B-5	40	60									200	40

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161111-C-1	40	60									300	50
161111-C-2	40	60									300	50
161111-C-3	40	60									300	50
161111-C-4	40	60									300	50
161111-C-5	40	60									300	50
161111-D-1	40	60									400	60
161111-D-2	40	60									400	60
161111-D-3	40	60									400	60
161111-D-4	40	60									400	60
161111-D-5	40	60									400	60
161111-E-1	40	60									500	60
161111-E-2	40	60									500	60
161111-E-3	40	60									500	60
161111-E-4	40	60									500	60
161111-E-5	40	60									500	60
161111-F-1	20	80									100	50
161111-F-2	20	80									100	50
161111-F-3	20	80									100	50
161111-F-4	20	80									100	50
161111-F-5	20	80									100	50
161111-G-1	20	80									200	50
161111-G-2	20	80									200	50
161111-G-3	20	80									200	50
161111-G-4	20	80									200	50
161111-G-5	20	80									200	50
161111-H-1	20	80									300	50
161111-H-2	20	80									300	50
161111-H-3	20	80									300	50
161111-H-4	20	80									300	50
161111-H-5	20	80									300	50
161111-I-1	20	80									400	60
161111-I-2	20	80									400	60
161111-I-3	20	80									400	60
161111-I-4	20	80									400	60
161111-I-5	20	80									400	60
161111-J-1	20	80									500	60
161111-J-2	20	80									500	60
161111-J-3	20	80									500	60

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161111-J-4	20	80									500	60
161111-J-5	20	80									500	60
161121-A-1						95.2	4.8				100	50
161121-A-2						95.2	4.8				100	50
161121-A-3						95.2	4.8				100	50
161121-A-4						95.2	4.8				100	50
161121-B-1						95.2	4.8				200	50
161121-B-2						95.2	4.8				200	50
161121-B-3						95.2	4.8				200	50
161121-B-4						95.2	4.8				200	50
161121-C-1						95.2	4.8				300	50
161121-C-2						95.2	4.8				300	50
161121-C-3						95.2	4.8				300	50
161121-C-4						95.2	4.8				300	50
161121-D-1						95.2	4.8				400	50
161121-D-2						95.2	4.8				400	50
161121-D-3						95.2	4.8				400	50
161121-D-4						95.2	4.8				400	50
161121-E-1						95.2	4.8				500	50
161121-E-2						95.2	4.8				500	50
161121-E-3						95.2	4.8				500	50
161121-E-4						95.2	4.8				500	50
161122-A-1	90						10					43.3
161122-B-1	90							10				50
161122-C-1	90							10				46.7
161122-D-1	80						10	10				50
161122-E-1	80						10	10				50
161122-F-1	80							10				55
161122-G-1	70						10	10				50
161122-H-1	90						10					40
161122-H-2	90						10					40
161122-I-1						90	10					45
161122-I-2						90	10					45
161122-J-1	90						10					45
161122-J-2	90						10					45
161122-K-1						90	10					45
161122-K-2						90	10					45
161202-A-1	10	75					10	5				40

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161202-A-2	10	75					10	5				40
161202-A-3	10	75					10	5				40
161202-B-1	10	75						15				40
161202-B-2	10	75						15				40
161202-B-3	10	75						15				40
161202-C-1		75					10	15				40
161202-C-2		75					10	15				40
161202-C-3		75					10	15				40
161202-D-1	10	65					10	15				40
161202-D-2	10	65					10	15				40
161202-D-3	10	65					10	15				40
161202-E-1	30	55						15				40
161202-E-2	30	55						15				40
161202-E-3	30	55						15				40
161202-F-1	30	55					10	5				40
161202-F-2	30	55					10	5				40
161202-F-3	30	55					10	5				40
161202-G-1	30	45					10	15				40
161202-G-2	30	45					10	15				40
161202-G-3	30	45					10	15				40
161205-A-1	35	50					10	5		0.05		40
161205-A-2	35	50					10	5		0.05		40
161205-A-3	35	50					10	5		0.05		40
161205-B-1	30	50					10	10		0.05		35
161205-B-2	30	50					10	10		0.05		35
161205-B-3	30	50					10	10		0.05		35
161205-C-1	40	45					10	5		0.05		40
161205-C-2	40	45					10	5		0.05		40
161205-C-3	40	45					10	5		0.05		40
161206-A-1						100				0.05		60
161206-A-2						100				0.05		60
161206-A-3						100				0.05		60
161206-B-1	90						5	5		0.05		45
161206-B-2	90						5	5		0.05		45
161206-B-3	90						5	5		0.05		45
161206-C-1	85						5	10		0.05		45
161206-C-2	85						5	10		0.05		45
161206-C-3	85						5	10		0.05		45

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161206-D-1	85						10	5		0.05		40
161206-D-2	85						10	5		0.05		40
161206-D-3	85						10	5		0.05		40
161206-E-1	80						10	10		0.05		40
161206-E-2	80						10	10		0.05		40
161206-E-3	80						10	10		0.05		40
161206-F-1	60						20	20		0.05		30
161206-F-2	60						20	20		0.05		30
161206-F-3	60						20	20		0.05		30
161206-G-3	50						40	10		0.05		35
161206-H	50							50		0.05		
161207-A-1	20	40					20	20		0.05		40
161207-A-2	20	40					20	20		0.05		40
161207-A-3	20	40					20	20		0.05		40
161207-A-4	20	40					20	20		0.05		40
161207-A-5	20	40					20	20		0.05		40
161207-A-6	20	40					20	20		0.05		40
161207-B-1	30	30					20	20		0.05		40
161207-B-2	30	30					20	20		0.05		40
161207-B-3	30	30					20	20		0.05		40
161207-B-4	30	30					20	20		0.05		40
161207-B-5	30	30					20	20		0.05		40
161207-B-6	30	30					20	20		0.05		40
161207-C-1	30	55					10	5		0.05		40
161207-C-2	30	55					10	5		0.05		40
161207-C-3	30	55					10	5		0.05		40
161207-C-4	30	55					10	5		0.05		40
161207-C-5	30	55					10	5		0.05		40
161207-C-6	30	55					10	5		0.05		40
161207-D-1	30	50					10	10		0.05		50
161207-D-2	30	50					10	10		0.05		50
161207-D-3	30	50					10	10		0.05		50
161207-D-4	30	50					10	10		0.05		50
161207-D-5	30	50					10	10		0.05		50
161207-D-6	30	50					10	10		0.05		50
161207-E-1	20	40					20	20		0.05		45
161207-E-2	20	40					20	20		0.05		45
161207-E-3	20	40					20	20		0.05		45

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
161207-F-1	30	30					20	20		0.05		45
161207-F-2	30	30					20	20		0.05		45
161207-F-3	30	30					20	20		0.05		45
161209-A-1	20	40					20	20				30
161209-A-2	20	40					20	20				30
161209-A-3	20	40					20	20				30
161209-A-4	20	40					20	20				30
161209-A-5	20	40					20	20				30
161209-A-6	20	40					20	20				30
161209-B-1	30	30					20	20				30
161209-B-2	30	30					20	20				30
161209-B-3	30	30					20	20				30
161209-B-4	30	30					20	20				30
161209-B-5	30	30					20	20				30
161209-B-6	30	30					20	20				30
161209-C-1	30	55					10	5				40
161209-C-2	30	55					10	5				40
161209-C-3	30	55					10	5				40
161209-C-4	30	55					10	5				40
161209-C-5	30	55					10	5				40
161209-C-6	30	55					10	5				40
161209-D-1	30	50					10	10				35
161209-D-2	30	50					10	10				35
161209-D-3	30	50					10	10				35
161209-D-4	30	50					10	10				35
161209-D-5	30	50					10	10				35
161209-D-6	30	50					10	10				35
170104-A-1	20	40			(40)							30
170104-A-2	20	40			(40)							30
170104-A-3	20	40			(40)							30
170104-A-4	20	40			(40)							30
170104-A-5	20	40			(40)							30
170104-A-6	20	40			(40)							30
170111-A-1	20	10			(70)							15
170111-A-2	20	10			(70)							15
170111-A-3	20	10			(70)							15
170111-A-4	20	10			(70)							15
170111-A-5	20	10			(70)							15

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170111-A-6	20	10			(70)							15
170111-B-1	20	20			(60)							17.5
170111-B-2	20	20			(60)							17.5
170111-B-3	20	20			(60)							17.5
170111-B-4	20	20			(60)							17.5
170111-B-5	20	20			(60)							17.5
170111-B-6	20	20			(60)							17.5
170111-C-1	20	30			(50)							20
170111-C-2	20	30			(50)							20
170111-C-3	20	30			(50)							20
170111-C-4	20	30			(50)							20
170111-C-5	20	30			(50)							20
170111-C-6	20	30			(50)							20
170111-D-1	20	40			(40)							22.5
170111-D-2	20	40			(40)							22.5
170111-D-3	20	40			(40)							22.5
170111-D-4	20	40			(40)							22.5
170111-D-5	20	40			(40)							22.5
170111-D-6	20	40			(40)							22.5
170124-A-1	20	10			(70)					0.05		15
170124-A-2	20	10			(70)					0.05		15
170124-A-3	20	10			(70)					0.05		15
170124-A-4	20	10			(70)					0.05		15
170124-A-5	20	10			(70)					0.05		15
170124-A-6	20	10			(70)					0.05		15
170124-B-1	20	20			(60)					0.05		17.5
170124-B-2	20	20			(60)					0.05		17.5
170124-B-3	20	20			(60)					0.05		17.5
170124-B-4	20	20			(60)					0.05		17.5
170124-B-5	20	20			(60)					0.05		17.5
170124-B-6	20	20			(60)					0.05		17.5
170124-C-1	20	30			(50)					0.05		21.7
170124-C-2	20	30			(50)					0.05		21.7
170124-C-3	20	30			(50)					0.05		21.7
170124-C-4	20	30			(50)					0.05		21.7
170124-C-5	20	30			(50)					0.05		21.7
170124-C-6	20	30			(50)					0.05		21.7
170124-D-1	20	40			(40)					0.05		25

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170124-D-2	20	40			(40)					0.05		25
170124-D-3	20	40			(40)					0.05		25
170124-D-4	20	40			(40)					0.05		25
170124-D-5	20	40			(40)					0.05		25
170124-D-6	20	40			(40)					0.05		25
170125-D-1	20	40	40							0.05		14
170125-D-2	20	40	40							0.05		14
170125-D-3	20	40	40							0.05		14
170125-D-4	20	40	40							0.05		14
170125-E-1	25									0.05		19
170125-E-2	25									0.05		19
170125-E-3	25									0.05		19
170125-E-4	25									0.05		19
170214-A-1	20	60	20							0.05		28.64
170214-A-2	20	60	20							0.05		28.64
170214-A-3	20	60	20							0.05		28.64
170214-A-4	20	60	20							0.05		28.64
170214-A-5	20	60	20							0.05		28.64
170214-A-6	20	60	20							0.05		28.64
170214-G-1	20	70	10							0.05		40
170214-G-2	20	70	10							0.05		40
170214-G-3	20	70	10							0.05		40
170214-G-4	20	70	10							0.05		40
170214-G-5	20	70	10							0.05		40
170214-G-6	20	70	10							0.05		40
170214-H-1	20	50	30							0.05		40
170214-H-2	20	50	30							0.05		40
170214-H-3	20	50	30							0.05		40
170214-H-4	20	50	30							0.05		40
170214-H-5	20	50	30							0.05		40
170214-H-6	20	50	30							0.05		40
170221-A-1	40	60								0.05	100	47.5
170221-A-2	40	60								0.05	100	47.5
170221-A-3	40	60								0.05	100	47.5
170221-A-4	40	60								0.05	100	47.5
170221-A-5	40	60								0.05	100	47.5
170221-A-6	40	60								0.05	100	47.5
170221-B-1	40	60								0.05	200	52.5

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170221-B-2	40	60								0.05	200	52.5
170221-B-3	40	60								0.05	200	52.5
170221-B-4	40	60								0.05	200	52.5
170221-B-5	40	60								0.05	200	52.5
170221-B-6	40	60								0.05	200	52.5
170221-C-1	40	60								0.05	300	55
170221-C-2	40	60								0.05	300	55
170221-C-3	40	60								0.05	300	55
170221-C-4	40	60								0.05	300	55
170221-C-5	40	60								0.05	300	55
170221-C-6	40	60								0.05	300	55
170221-D-1	40	60								0.05	400	55
170221-D-2	40	60								0.05	400	55
170221-D-3	40	60								0.05	400	55
170221-D-4	40	60								0.05	400	55
170221-D-5	40	60								0.05	400	55
170221-D-6	40	60								0.05	400	55
170221-E-1	40	60								0.05	500	57.5
170221-E-2	40	60								0.05	500	57.5
170221-E-3	40	60								0.05	500	57.5
170221-E-4	40	60								0.05	500	57.5
170221-E-5	40	60								0.05	500	57.5
170221-E-6	40	60								0.05	500	57.5
170222-A-1	20	60	20									30
170222-A-2	20	60	20									30
170222-A-3	20	60	20									30
170222-A-4	20	60	20									30
170222-A-5	20	60	20									30
170222-A-6	20	60	20									30
170222-B-1	20	70	10									35
170222-B-2	20	70	10									35
170222-B-3	20	70	10									35
170222-B-4	20	70	10									35
170222-B-5	20	70	10									35
170222-B-6	20	70	10									35
170222-C-1	20	50	30									30
170222-C-2	20	50	30									30
170222-C-3	20	50	30									30

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170222-C-4	20	50	30									30
170222-C-5	20	50	30									30
170222-C-6	20	50	30									30
170223-A-1	30	70								0.05	100	47.5
170223-A-2	30	70								0.05	100	47.5
170223-A-3	30	70								0.05	100	47.5
170223-A-4	30	70								0.05	100	47.5
170223-A-5	30	70								0.05	100	47.5
170223-A-6	30	70								0.05	100	47.5
170223-B-1	30	70								0.05	200	55
170223-B-2	30	70								0.05	200	55
170223-B-3	30	70								0.05	200	55
170223-B-4	30	70								0.05	200	55
170223-B-5	30	70								0.05	200	55
170223-B-6	30	70								0.05	200	55
170223-C-1	30	70								0.05	300	55
170223-C-2	30	70								0.05	300	55
170223-C-3	30	70								0.05	300	55
170223-C-4	30	70								0.05	300	55
170223-C-5	30	70								0.05	300	55
170223-C-6	30	70								0.05	300	55
170223-D-1	30	70								0.05	400	60
170223-D-2	30	70								0.05	400	60
170223-D-3	30	70								0.05	400	60
170223-D-4	30	70								0.05	400	60
170223-D-5	30	70								0.05	400	60
170223-D-6	30	70								0.05	400	60
170223-E-1	30	70								0.05	500	60
170223-E-2	30	70								0.05	500	60
170223-E-3	30	70								0.05	500	60
170223-E-4	30	70								0.05	500	60
170223-E-5	30	70								0.05	500	60
170223-E-6	30	70								0.05	500	60
170224-T-1												
170224-T-2												
170224-T-3												
170224-T-4												
170224-T-5												

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170224-T-6												
170224-C-1												
170224-C-2												
170224-C-3												
170224-C-4												
170224-C-5												
170224-C-6												
170511-D-1	20	80										40
170511-D-2	20	80										40
170511-D-3	20	80										40
170511-E-1	30	70										40
170511-E-2	30	70										40
170511-E-3	30	70										40
170511-F-1	40	60										40
170511-F-2	40	60										40
170511-F-3	40	60										40
170511-G-1	100											40
170511-G-2	100											40
170512-A-1	20	80									36.5	40
170512-A-2	20	80									36.5	40
170512-A-3	20	80									36.5	40
170512-A-4	20	80									36.5	40
170512-A-5	20	80									36.5	40
170512-A-6	20	80									36.5	40
170512-A-7	20	80									36.5	40
170512-A-8	20	80									36.5	40
170515-A-1	20	80									40.97	30
170515-A-2	20	80									40.97	30
170515-A-3	20	80									40.97	30
170515-A-4	20	80									40.97	30
170515-A-5	20	80									40.97	30
170515-A-6	20	80									40.97	30
170515-A-7	20	80									40.97	30
170515-A-8	20	80									40.97	30
170515-B-1	20	80								0.05	40.97	30
170515-B-2	20	80								0.05	40.97	30
170515-B-3	20	80								0.05	40.97	30
170515-B-4	20	80								0.05	40.97	30

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170515-B-5	20	80								0.05	40.97	30
170515-B-6	20	80								0.05	40.97	30
170515-B-7	20	80								0.05	40.97	30
170515-B-8	20	80								0.05	40.97	30
170515-C-1	20	80									81.94	30
170515-C-2	20	80									81.94	30
170515-C-3	20	80									81.94	30
170515-C-4	20	80									81.94	30
170515-C-5	20	80									81.94	30
170515-C-6	20	80									81.94	30
170515-C-7	20	80									81.94	30
170515-C-8	20	80									81.94	30
170515-D-1	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-2	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-3	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-4	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-5	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-6	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-7	20	80								0.05	81.94	30
170515-D-8	20	80								0.05	81.94	30
170515-E-1	30	70									41.37	30
170515-E-2	30	70									41.37	30
170515-E-3	30	70									41.37	30
170515-E-4	30	70									41.37	30
170515-E-5	30	70									41.37	30
170515-E-6	30	70									41.37	30
170515-E-7	30	70									41.37	30
170515-E-8	30	70									41.37	30
170515-F-1	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-2	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-3	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-4	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-5	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-6	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-7	30	70								0.05	41.37	30
170515-F-8	30	70								0.05	41.37	30
170515-G-1	30	70									82.73	30
170515-G-2	30	70									82.73	30

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170515-G-3	30	70									82.73	30
170515-G-4	30	70									82.73	30
170515-G-5	30	70									82.73	30
170515-G-6	30	70									82.73	30
170515-G-7	30	70									82.73	30
170515-G-8	30	70									82.73	30
170515-H-1	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-2	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-3	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-4	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-5	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-6	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-7	30	70								0.05	82.73	30
170515-H-8	30	70								0.05	82.73	30
170518-A-1	7.5	17.5	75									40
170518-A-2	7.5	17.5	75									40
170518-A-3	7.5	17.5	75									40
170518-A-4	7.5	17.5	75									40
170518-B-1	7.5	17.5	75									40
170518-B-2	7.5	17.5	75									40
170518-B-3	7.5	17.5	75									40
170518-B-4	7.5	17.5	75									40
170518-C-1	7.5	17.5	75									40
170518-C-2	7.5	17.5	75									40
170518-C-3	7.5	17.5	75									40
170518-C-4	7.5	17.5	75									40
170518-D-1	7.5	17.5	75									40
170518-D-2	7.5	17.5	75									40
170518-D-3	7.5	17.5	75									40
170518-D-4	7.5	17.5	75									40
170518-E-1	7.5	17.5	75									40
170518-E-2	7.5	17.5	75									40
170518-F-1	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-F-2	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-F-3	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-F-4	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-G-1	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-G-2	7.5	17.5	56.25		18.75							40

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170518-G-3	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-G-4	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-H-1	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-H-2	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-H-3	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-H-4	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-I-1	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-I-2	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-I-3	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-I-4	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-J-1	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170518-J-2	7.5	17.5	56.25		18.75							40
170519-K-1	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-K-2	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-K-3	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-K-4	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-L-1	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-L-2	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-L-3	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-L-4	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-M-1	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-M-2	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-M-3	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-M-4	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-N-1	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-N-2	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-N-3	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-N-4	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-O-1	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-O-2	7.5	17.5	18.75		56.25							40
170519-A-1	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-A-2	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-A-3	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-A-4	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-B-1	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-B-2	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-B-3	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-B-4	7.5	17.5	75							0.5		40

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (ml)	W/B% (W/C%)
170519-C-1	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-C-2	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-C-3	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-C-4	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-D-1	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-D-2	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-D-3	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-D-4	7.5	17.5	75							0.5		40
170519-E-1	7.5	17.5	75							0.5		40
170601-A-1	20	80									10%	40
170601-A-2	20	80									10%	40
170601-A-3	20	80									10%	40
170601-B-1	20	80								0.05	10%	40
170601-B-2	20	80								0.05	10%	40
170601-C-1	20	80									20%	40
170601-C-2	20	80									20%	40
170601-C-3	20	80									20%	40
170601-C-4	20	80									20%	40
170601-C-5	20	80									20%	40
170601-C-6	20	80									20%	40
170601-C-7	20	80									20%	40
170601-C-8	20	80									20%	40
170601-C-9	20	80									20%	40
170601-C-10	20	80									20%	40
170601-D-1	20	80								0.05	20%	40
170601-D-2	20	80								0.05	20%	40
170601-E-1	30	70									10%	40
170601-E-2	30	70									10%	40
170601-F-1	30	70								0.05	10%	40
170601-F-2	30	70								0.05	10%	40
170601-G-1	30	70									20%	40
170601-G-2	30	70									20%	40
170601-H-1	30	70								0.05	20%	40
170601-H-2	30	70								0.05	20%	40
170726-A	25	75									43%	35
170822-A-1	7.5		92.5							0.05		25
170822-A-2	8.5		94.5							0.05		25
170822-A-3	9.5		96.5							0.05		25

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
170822-A-4	10.5		98.5							0.05		25
170822-B-1	11.5	17.5	75							0.05		25
170822-B-2	12.5	18.5	77							0.05		25
170822-B-3	13.5	19.5	79							0.05		25
170822-B-4	14.5	20.5	81							0.05		
170823-A-1	20		80							0.05		18.5
170823-A-2	20		80							0.05		18.5
170823-A-3	20		80							0.05		18.5
170823-A-4	20		80							0.05		18.5
170823-A-5	20		80							0.05		18.5
170823-A-6	20		80							0.05		18.5
171102 SP0-W140-1	30	35	35							0.05	558	(140)
171102 SP0-W140-2	30	35	35							0.05	558	(140)
171102 SP0-W140-3	30	35	35							0.05	558	(140)
171102 SP0-W140-4	30	35	35							0.05	558	(140)
171102 SP0-W140-5	30	35	35							0.05	558	(140)
171102 SP0-W140-6	30	35	35							0.05	558	(140)
171103 SP0-W115-1	30	35	35							0.05	624	(115)
171103 SP0-W115-2	30	35	35							0.05	624	(115)
171103 SP0-W115-3	30	35	35							0.05	624	(115)
171103 SP0-W115-4	30	35	35							0.05	624	(115)
171103 SP0-W115-5	30	35	35							0.05	624	(115)
171103 SP0-W115-6	30	35	35							0.05	624	(115)
171103 SP1-W85-1	30	35	35						1****	0.05	650	(85)
171103 SP1-W85-2	30	35	35						1****	0.05	650	(85)
171103 SP1-W85-3	30	35	35						1****	0.05	650	(85)
171103 SP1-W85-4	30	35	35						1****	0.05	650	(85)
171103 SP1-W85-5	30	35	35						1****	0.05	650	(85)
171103 SP1-W85-6	30	35	35						1****	0.05	650	(85)
C30-W150-1		35	35			30				0.05	1400	(150)
C30-W150-2		35	35			30				0.05	1400	(150)
C30-W150-3		35	35			30				0.05	1400	(150)
C30-W150-4		35	35			30				0.05	1400	(150)
C30-W150-5		35	35			30				0.05	1400	(150)
C30-W150-6		35	35			30				0.05	1400	(150)
C30-W150-CA0.1-1		35	35			30			0.1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA0.1-2		35	35			30			0.1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA0.1-3		35	35			30			0.1**	0.05	1400	(150)

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
C30-W150-CA0.1-4		35	35			30			0.1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA0.1-5		35	35			30			0.1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA0.1-6		35	35			30			0.1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA1-1		35	35			30			1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA1-2		35	35			30			1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA1-3		35	35			30			1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA1-4		35	35			30			1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA1-5		35	35			30			1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-CA1-6		35	35			30			1**	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF1-1		35	35			30			1***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF1-2		35	35			30			1***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF1-3		35	35			30			1***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF1-4		35	35			30			1***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF1-5		35	35			30			1***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF1-6		35	35			30			1***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF3-1		35	35			30			3***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF3-2		35	35			30			3***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF3-3		35	35			30			3***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF3-4		35	35			30			3***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF3-5		35	35			30			3***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF3-6		35	35			30			3***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF5CA0.1-1		35	35			30			0.1**,5***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF5CA0.1-2		35	35			30			0.1**,5***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF5CA0.1-3		35	35			30			0.1**,5***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF5CA0.1-4		35	35			30			0.1**,5***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF5CA0.1-5		35	35			30			0.1**,5***	0.05	1400	(150)
C30-W150-SF5CA0.1-6		35	35			30			0.1**,5***	0.05	1400	(150)
C5-W150-1	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C5-W150-2	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C5-W150-3	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C5-W150-4	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C5-W150-5	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C5-W150-6	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C10-W150-1	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C10-W150-2	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C10-W150-3	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C10-W150-4	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C10-W150-5	20	35	35			10				0.05	1400	(150)

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 일반 재료 배합비

배합비	포틀랜드 시멘트(%)	장석 (44㎛) (%)	장석 (0.2㎜) (%)	장석 (1.0㎜) (%)	규사 (백운석) (%)	속성 경화재 (%)	팽창재 (석고) (%)	염화칼슘 (소석회) (%)	기타(%)	고화재 (%)	경량 기포 (㎖)	W/B% (W/C%)
C10-W150-6	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C15-W150-1	15	35	35			15				0.05	1400	(150)
C15-W150-2	15	35	35			15				0.05	1400	(150)
C15-W150-3	15	35	35			15				0.05	1400	(150)
C15-W150-4	15	35	35			15				0.05	1400	(150)
C15-W150-5	15	35	35			15				0.05	1400	(150)
C15-W150-6	15	35	35			15				0.05	1400	(150)
C20-W150-1	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C20-W150-2	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C20-W150-3	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C20-W150-4	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C20-W150-5	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C20-W150-6	20	35	35			10				0.05	1400	(150)
C25-W150-1	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C25-W150-2	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C25-W150-3	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C25-W150-4	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C25-W150-5	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
C25-W150-6	25	35	35			5				0.05	1400	(150)
압축2.0-1		35	35			30			1**	0.05		(100)
압축2.0-2		35	35			30			1**	0.05		(100)
압축2.0-3		35	35			30			1**	0.05		(100)
압축1.5-1		35	35			30			1**	0.05	230	(100)
압축1.5-2		35	35			30			1**	0.05	230	(100)
압축1.5-3		35	35			30			1**	0.05	230	(100)
압축1.2-1		35	35			30			1**	0.05	430	(100)
압축1.2-2		35	35			30			1**	0.05	430	(100)
압축1.2-3		35	35			30			1**	0.05	430	(100)

※ 기타재료원: 플라이애쉬*, 응결지연재**, 실리카흄***, 감수재****

□ 벽체 및 천정 시공을 위한 PVA섬유 포함 재료 배합비

배합비	포틀랜드시멘트(%)	장석(44㎛)(%)	장석(0.2㎜)(%)	장석(1.0㎜)(%)	제올라이트(벤토나이트)(%)	백운석(실리카흄)(%)	속성경화재(%)	응결지연재(%)	생석회(석고)(%)	ECC(%)	감수제(%)	증점제(%)	고화재(%)	경량기포(㎖)	W/B%(W/C%)
170727-A	25	75								1	0.05	0.05		43%	35
휨PVA1-1		35	35				30	1		1	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA1-2		35	35				30	1		1	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA1-3		35	35				30	1		1	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA0.5-1		35	35				30	1		0.5	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA0.5-2		35	35				30	1		0.5	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA0.5-3		35	35				30	1		0.5	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA0.1-1		35	35				30	1		0.1	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA0.1-2		35	35				30	1		0.1	1	0.2	0.05		(100)
휨PVA0.1-3		35	35				30	1		0.1	1	0.2	0.05		(100)
휨Plain-1		35	35				30	1			1	0.2	0.05		(100)
휨Plain-2		35	35				30	1			1	0.2	0.05		(100)
휨Plain-3		35	35				30	1			1	0.2	0.05		(100)
CaO1-W50	100								1				0.05		(50)
CaO1-W40	100								1				0.05		(40)
CaO5-W40	100								5				0.05		(40)
CaO10-W40	100								10				0.05		(40)
CC-10	20	35	35						10				0.05		130
CC-15	15	35	35			(5)			15				0.05		130
CC-20	10	35	35						20				0.05		130
FC-10	10	30	30			(5)			10				0.05		80
FC-15	15	25	30						15				0.05		80
FC-20	20	25	25			(5)			20				0.05		80
CC-10	20	35	35						10				0.05	60	150
CCS-10	15	35	35						10				0.05	60	160
FC-10	30	30	30						10				0.05	60	110
FCS-10	25	30	30						10				0.05	60	120
5C	40		55						5				0.05	60	60
5C5S	40		50						5				0.05	60	70
10C	40		50						10				0.05	60	65
ECC0.5-W120	30	35	35							1.00	1.00	0.20	0.05	66	(120)
ECC0.25-W120	30	35	35							0.25	1.00	0.20	0.05	66	(120)
ECC0.25-W110	30	35	35							0.25	1.00	0.20	0.05	71	(110)
S25	40	25	25			(5)			5				0.05	62	90
S20	40	20	30			(5)			5				0.05	62	80
S15	40	15	35			(5)			5				0.05	62	70
S10	40	10	40			(5)			5				0.05	62	60
G0(밀도0.6)	40	25	25			(5)			5				0.05	60	90

※이때 사용된 백운석의 입자범위는 (*)는 0.35~0.70㎜, (**)는 0.10~0.35㎜, (***)는 0.20㎜이하임

□ 벽체 및 천정 시공을 위한 PVA섬유 포함 재료 배합비

배합비	포틀랜드시멘트(%)	장석(44㎛)(%)	장석(0.2㎜)(%)	장석(1.0㎜)(%)	제올라이트(벤토나이트)(%)	백운석(실리카흄)(%)	속성경화재(%)	응결지연재(%)	생석회(석고)(%)	ECC(%)	감수제(%)	증점제(%)	고화재(%)	경량기포(ml)	W/B%(W/C%)
G5(밀도0.6)	40	25	25			(5)			5(5)				0.05	60	90
G10(밀도0.6)	40	25	25			(5)			5(10)				0.05	60	90
G15(밀도0.6)	40	25	25			(5)			5(15)				0.05	60	90
G0(밀도0.8)	40	25	25			(5)			5				0.05	50	90
G5(밀도0.8)	40	25	25			(5)			5(5)				0.05	50	90
G10(밀도0.8)	40	25	25			(5)			5(10)				0.05	50	90
GG0	45	25	25			(5)							0.05	60	90
GG5	45	25	25			(5)			(5)				0.05	60	90
GG10	45	25	25			(5)			(10)				0.05	60	90
A0%	100														(35)
A50%	100													50	(45)
CG55	40	25	25			(5)			5(5)				0.05	55	90
CG00-850	45	25	25			(5)							0.05	55	90
CG00-1000	45	25	25			(5)							0.05	60	90
CG05	45	25	25			(5)			(5)				0.05	60	90
W75(120)	30	35	35										0.05	57	(120)
SF0	40	20	20						10(10)				0.05	55	90
SF5	40	20	20			(5)			5(10)				0.05	55	90
SF10	40	20	20			(10)			5(5)				0.05	55	90
A0%	100														(35)
A50%	100													50	(45)
Plain	30	35	35										0.05	50	(110)
B5	30	32.5	32.5		(5)								0.05	50	(110)
Plain	30	35	35										0.05	48	(130)
B5	30	32.5	32.5		(5)								0.05	48	(130)
F-Dry	30	35	35							0.25			0.05	49	(120)
F-Dry	30	35	35							0.25			0.05	48	(120)
FD-W110	30	35	35							0.25			0.05	42	(110)
FD-W120	30	35	35							0.25			0.05	41	(120)
FD-W100	30	35	35							0.25			0.05	43	(100)
FD-W100	30	35	35							0.25			0.05	43	(100)
FD-W80	30	35	35										0.05	46	(80)
FD-W90	30	35	35										0.05	44	(90)
FD-W100	30	35	35										0.05	43	(100)
FD-W90(1)	30	35	35											44	(90)
FD-W90(2)	30					35**, 35***								58	(90)
FD-W70	30					70**								47	(70)
FD-W75	30					70**				0.25			0.05	47	(75)

※이때 사용된 백운석의 입자범위는 (*)는 0.35~0.70㎜, (**)는 0.10~0.35㎜, (***)는 0.20㎜이하임

□ 벽체 및 천정 시공을 위한 PVA섬유 포함 재료 배합비

배합비	포틀랜드시멘트(%)	장석(44㎛)(%)	장석(0.2㎜)(%)	장석(1.0㎜)(%)	제올라이트(벤토나이트)(%)	백운석(실리카흄)(%)	속성경화재(%)	응결지연재(%)	생석회(석고)(%)	ECC(%)	감수제(%)	증점제(%)	고화재(%)	경량기포(ml)	W/B%(W/C%)
FD-W65	30					70*				0.25			0.05	47	(65)
FD-W67.5	30					35*, 35**				0.25			0.05	47	(67.5)
S6-A500	30					70*				0.25			0.05	49	(65)
S7-A500	30					70**				0.25			0.05	50	(75)
S6S7-A500	30					35*, 35**				0.25			0.05	51	(67.5)
S6-A400	30					70*				0.25			0.05	44	(65)
S7-A400	30					70**				0.25			0.05	44	(75)
S6S7-A400	30					35*, 35**				0.25			0.05	45	(67.5)
FS6-A300	30	10				60*				0.25			0.05	34	(75)
FS6-A250	30	10				60*				0.25			0.05	28	(80)
FS6-A200	30	10				60*				0.25			0.05	22	(85)
S6-A300	30					70*				0.25			0.05	33	(65)
163-G000	30	10	60							0.25			0.05	36	(80)
253-G000	30	20	50							0.25			0.05	36	(85)
163-G004	30	10	60						(4)	0.25			0.05	36	(85)
253-G004	30	20	50						(4)	0.25			0.05	35	(90)
F-Dry1.1	30	20		50						0.25			0.05	45	(80)
1.0(fail)	30	20		50									0.05	49	(70)
1.0	30	20		50									0.05	48	(80)
0.9	30	20		50									0.05	55	(80)
0.8	30	20		50									0.05	61	(80)
PVA0.25%	10		70		20								0.05		(340)
PVA0.5%	10		70		20								0.05		(340)
M(PVA섬유X)		20	60			20							0.05		(100)
MP(PVA섬유O)		20	60			20		1.00		0.25			0.05		(110)
UC-523-A800		20	50			30		1.00		0.25			0.05	56	(101)
UC-523-A600		20	50			30		1.00		0.25			0.05	49	(86)
NC-523-A450	30	20	50							0.25			0.05	42	(80)

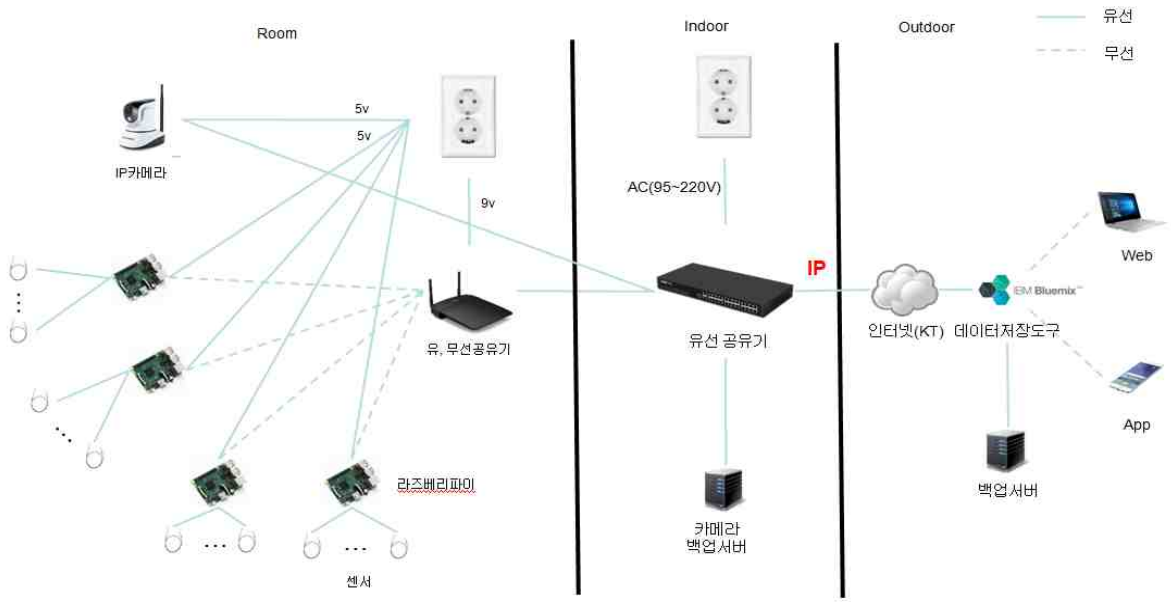
※이때 사용된 백운석의 입자범위는 (*)는 0.35~0.70㎜, (**)는 0.10~0.35㎜, (***)는 0.20㎜이하임

7. 열전도 센서 프로토타입 설계

□ 실시간 온도 및 소음 계측 시스템 구축

○ 시험동과 기준동의 온도계측기 설치

- 시험동과 기준동에 온도 계측을 위한 계측기 시스템 설계 및 현장 설치



[원격 온도 모니터링 시스템 모식도]

- 온도/소음/진동 모니터링 시스템 구축을 위한 센서



[진동센서 : DFR0052]



[소음센서 : CA4]



[온도센서 : DS18B20]

- 시험동과 기준동에 온도 계측기 매립 예정위치 타공 후 온도계 설치. 자료전송을 위한 라즈베리파이 및 아두이노 셋팅 후 무선공유기를 이용한 자료전송 프로그램 구축
- 적산전력계 확인용 카메라와 무선공유기를 이용한 영상 전송 시스템 구축



[온도계 매립을 위한 타공]





[온도계 설치]



[적산전력계 확인용 카메라세팅]

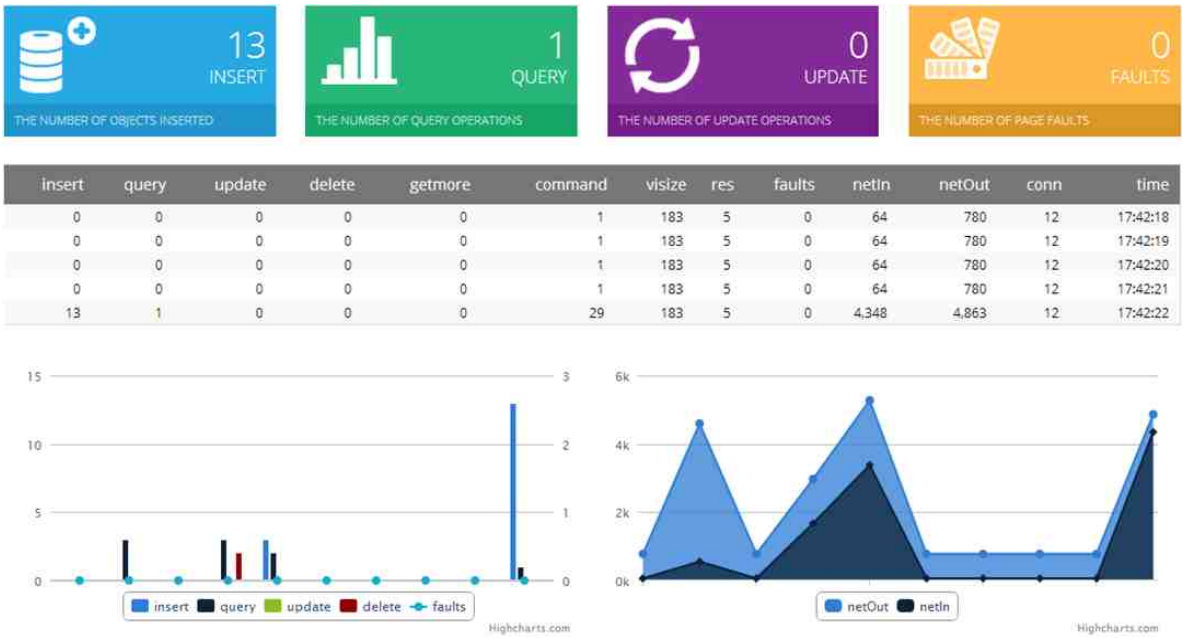


[적산전력계 확인용 카메라]



[데이터로그 및 모뎀]

- 온도센서 데이터는 라즈베리 파이를 거쳐 IBM사 Bluemix 클라우드 서비스에서 실시간 모니터링을 가능할수 있게 GUI화로 제작
- 온도센서 데이터들은 매 10초마다 측정을 하며, 측정된 데이터들은 실시간으로 클라우드 서버에 전송



[데이터 서버 화면]

○ 열화상 카메라 모듈 설치

- Flir사의 E85와 A615 모델을 사용하여 온도 이미지 자료를 구축
- 측정 자료의 공간해상도는 2.00mrad/픽셀(E85)과 1.36mrad/픽셀(A615)로 측정



[고정식]



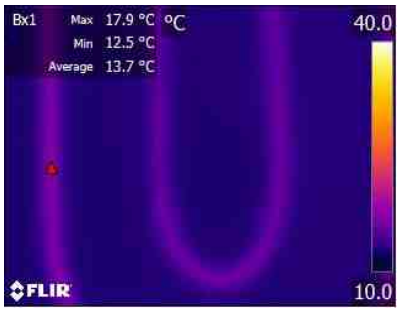


[열화상 카메라]

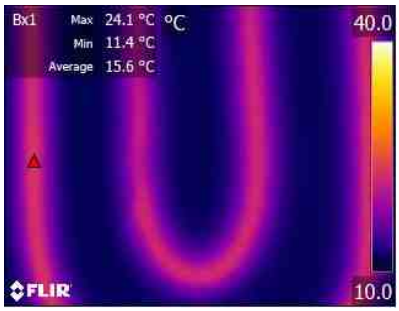
- 바닥 축열층 열화상 영상 : 온수 공급 과정의 온도 변화



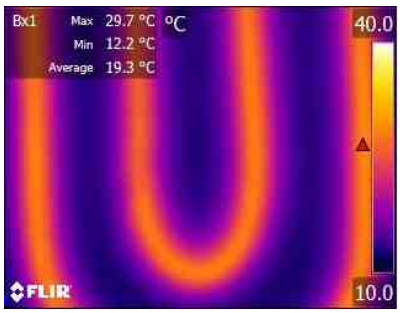
[난방 전]



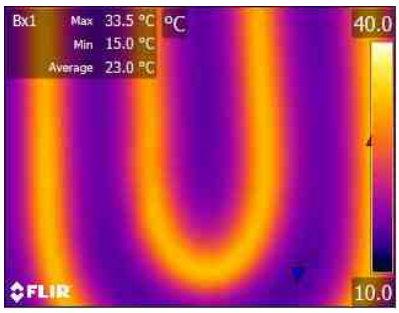
[난방 10분]



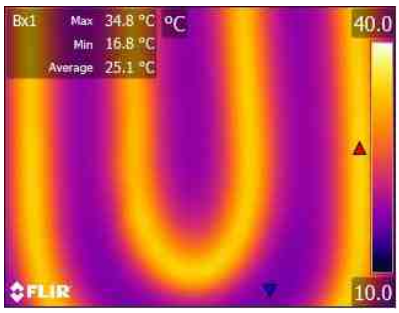
[난방 30분]



[난방 60분]

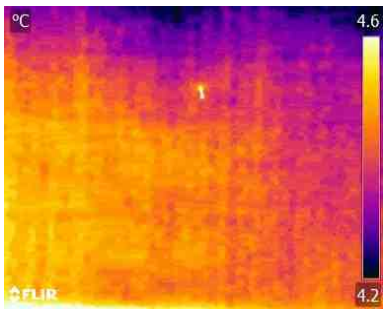


[난방 90분]

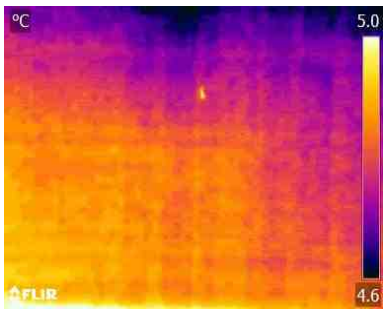


[난방 120분]

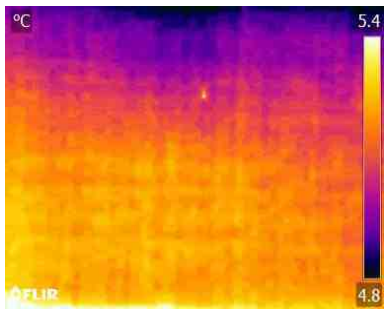
- 경량 벽체 열화상 영상 : 온수 공급 과정의 온도 변화



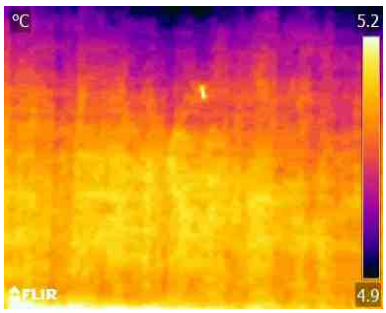
[난방 전]



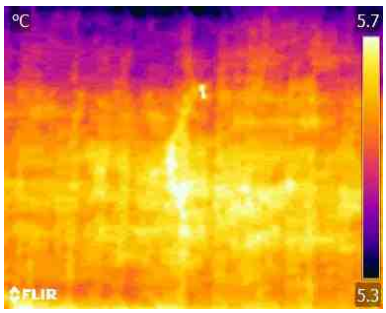
[난방 10분]



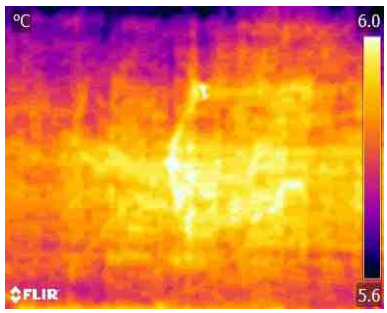
[난방 20분]



[난방 60분]



[난방 90분]



[난방 120분]

□ 열전도 센서 프로토타입 설계 코드

○ Realtime monitoring of indoor environments

- 실내에서 발생되는 온도, 진동, 소음을 센서로 측정하여 클라우드 서버에 전달하는 역할을 하는 프로그램으로 측정되는 센서 값은 사용되는 센서의 종류에 따라 상이하며 이를 보정하기 위해선 필터가 수반되어야 함
- 프로그램에서 DS18B20 온도센서와 SW-18010P 진동센서 NS-SDSM 소리감지 센서를 사용했으며, 센서로부터 수집된 데이터는 소프트웨어 필터링을 거친 후 메타데이터가 추가되어 실제 전송되는 데이터로 취합. 데이터는 클라우드 서버에 저장되기 위해 Ethernet을 통해 전송됨
- 주요기능은 온도센서, 진동센서, 소음센서를 초단위로 읽어 들여 값을 보정하고 클라우드 서버에 저장하는 역할이며, 사용방법은 ① 온도센서, 진동센서, 소음센서를 측정하고자 하는 곳에 설치한 후 전원과 데이터선을 Embedded board에 연결 ② 경로(/sys/bus/w1/devices)에서 해당 센서를 board가 인식하고 있는지 확인 ③ board를 무선으로 AP에 연결 ④ 연결 확인 후 실행

○ 센서수집 노드 소스(Sensing_system.py)

```
import os
import glob
import time
import sys
import ibmiotf.application
import ibmiotf.device
import time
import datetime
import serial

deviceOptions = {
        "org": "2b6lze",
        "type" : "RaspberryPi_3",
        "id": "b827ebc53b05",
        "auth-method": "apikey",
        "auth-key": "a-2b6lze-r2el4zsdr3",
        "auth-token": "0oxxdR3UiRhRP3Eg*s"
}

os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

base_dir = '/sys/bus/w1/devices/'
device_1 = base_dir + '28-800000036d08'
```

```
device_2 = base_dir + '28-8000000372e3'
device_3 = base_dir + '28-800000037be9'
device_4 = base_dir + '28-800000038a65'
device_5 = base_dir + '28-80000003729d'
device_6 = base_dir + '28-80000003932e'
device_7 = base_dir + '28-80000003a2b5'
device_8 = base_dir + '28-8000000368ec'
device_9 = base_dir + '28-80000003a0a2'
device_10 = base_dir + '28-800000039412'
device_11 = base_dir + '28-800000038d86'
device_12 = base_dir + '28-800000037909'
device_13 = base_dir + '28-800000037892'
device_14 = base_dir + '28-800000036b3c'
device_15 = base_dir + '28-800000039818'
device_16 = base_dir + '28-800000036bbb'
device_17 = base_dir + '28-80000003703c'
device_18 = base_dir + '28-800000036ea1'
device_19 = base_dir + '28-800000036a04'
device_20 = base_dir + '28-800000038079'
device_21 = base_dir + '28-8000000398a2'
device_22 = base_dir + '28-800000039ebe'
device_23 = base_dir + '28-800000039f50'

ser = serial.Serial("/dev/ttyACM0", 9600)

def read_temp_raw(folder):
        f = open(folder + '/w1_slave' , 'r')
        lines = f.readlines()
        f.close()
        return lines

def read_temp(folder):
        lines = read_temp_raw(folder);
        while lines[0].strip()[-3:] != 'YES' :
                time.read(0.2)
                lines = read_temp_raw()
        equals_pos = lines[1].find('t=')
        if equals_pos != -1:
                temp_string = lines[1][equals_pos+2:]
                temp_c = float(temp_string) / 1000.0
                return temp_c

try:
```

```
        deviceCli = ibmiotf.application.Client(deviceOptions)
except Exception as e:
        print("Caught exception connecting device : %s" % str(e))
        sys.exit()

time.sleep(20)
deviceCli.connect()

while True:
        s = datetime.datetime.now()
        now = time.localtime()
        ps = "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d" % (now.tm_year, now.tm_mon, now.tm_m
 day, now.tm_hour, now.tm_min, now.tm_sec)

        if now.tm_sec%60 == 0:
                t1 = read_temp(device_1)
                t2 = read_temp(device_2)
                t3 = read_temp(device_3)
                t4 = read_temp(device_4)
                t5 = read_temp(device_5)
                t6 = read_temp(device_6)
                t7 = read_temp(device_7)
                t8 = read_temp(device_8)
                t9 = read_temp(device_9)
                t10 = read_temp(device_10)
                t11 = read_temp(device_11)
                t12 = read_temp(device_12)
                t13 = read_temp(device_13)
                t14 = read_temp(device_14)
                t15 = read_temp(device_15)
                t16 = read_temp(device_16)
                t17 = read_temp(device_17)
                t18 = read_temp(device_18)
                t19 = read_temp(device_19)
                t20 = read_temp(device_20)
                t21 = read_temp(device_21)
                t22 = read_temp(device_22)
                t23 = read_temp(device_23)

                v1 = ser.readline().split()[0]
                v2 = ser.readline().split()[0]
                v3 = ser.readline().split()[0]
                v4 = ser.readline().split()[0]
```

```
                s1 = ser.readline().split()[0]

                print ps
        print("%.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f %.3f" % (t1, t2, t3, t4, t5, t6, t7, t8, t9, t10, t11, t12, t13, t14, t15, t16, t17, t18, t19, t20, t21, t22, t23))
                print v1 + " " + v2 + " " + v3 + " " + v4 + " " + s1
                data = { 't01' : t1, 't02' : t2, 't03' : t3, 't04' : t4, 't05' : t5, 't06' : t6, 't07' : t7, 't08' : t8, 't09' : t9, 't10': t10, 't11' : t11, 't12' : t12, 't13' : t13, 't14' : t14, 't15' : t15, 't16' : t16, 't17' : t17, 't18' : t18, 't19' : t19, 't20' : t20, 't21' : t21, 't22' : t22, 't23' : t23, 'v1' : v1, 'v2' : v2, 'v3' : v3, 'v4' : v4, 's1' : s1, 'time' : ps}
                deviceCli.publishEvent("RaspberryPi_3", "b827ebc53b05", "room1", "json", data)
                time.sleep(1)

deviceCli.desconnect()
```

○ 센서수집 노드 소스(Sensing_system.py)

```
var express = require('express')
var app = express()

app.use(express.static('public'))

app.get('/', function(req, res) {
    res.send('Hello World!')
})

app.get('/temp/a',function(req2, res2) {
        var http = require("http");

        var options = {
        "method": "GET",
        "hostname": "gi.mybluemix.net",
        "port": null,
        "path": "/temp/a",
        "headers": {
                "cache-control": "no-cache",
                "postman-token": "bc1e85ae-549e-3b1f-d601-77cdf5397993"
        }
        };

        var req = http.request(options, function (res) {
        var chunks = [];
        res.on("data", function (chunk) {
        chunks.push(chunk);
```

```
        });
        res.on("end", function () {
                var body = Buffer.concat(chunks);
                res2.send(body.toString());
            });
        });

        req.end();
})

app.get('/temp/b',function(req2, res2) {
        var http = require("http");

        var options = {
        "method": "GET",
        "hostname": "gi.mybluemix.net",
        "port": null,
        "path": "/temp/b",
        "headers": {
                "cache-control": "no-cache",
                "postman-token": "bc1e85ae-549e-3b1f-d601-77cdf5397993"
            }
        };

        var req = http.request(options, function (res) {
        var chunks = [];

        res.on("data", function (chunk) {
                chunks.push(chunk);
        });

        res.on("end", function () {
                var body = Buffer.concat(chunks);

                res2.send(body.toString());
            });
        });
req.end();
})

app.listen(3000, function() {
    console.log('Example app listening on port 3000!')
})
```

산업광물을 이용한 복합기능성 건축물 내장재 및 마감재 실용화 기술개발 연구 중 실대형 모형의 설계 및 시공

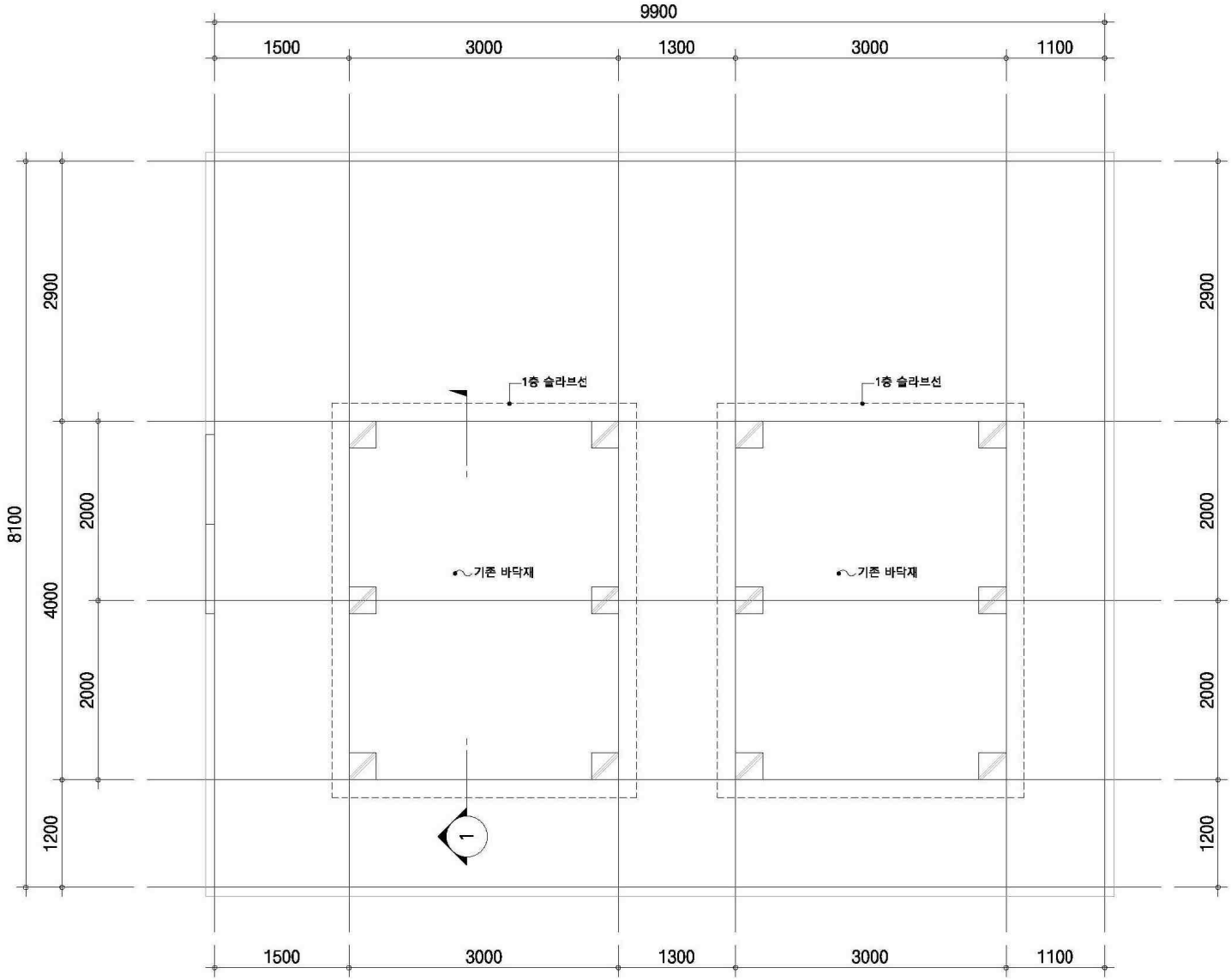
2016. 11. (1차 수정분)

기획설계[사업성 검토] / PREDESIGN[FEASIBILITY STUDY] □
계획설계 / SCHEMATIC DESIGN □
기본설계 / DESIGN DEVELOPMENT □
인허가 / PERMISSION □
실시설계 / CONSTRUCTION DOCUMENTS ■
준공도서 / AS-BUILT DOCUMENTS □
현상설계 / COMPETITION □

JINWHA ARCHITECTURE INC
WOOYOUNG B/D 4F, GAEPO-DONG 1219-5, GANGNAM-GU, SEOUL, KOREA
TEL.82-2-575-6523,6524 / FAX.82-2-578-4148 / JINWHA.WEBHARD.CO.KR(GUEST/GUEST)

바닥 평면도 SCALE=1/50(A3)

01



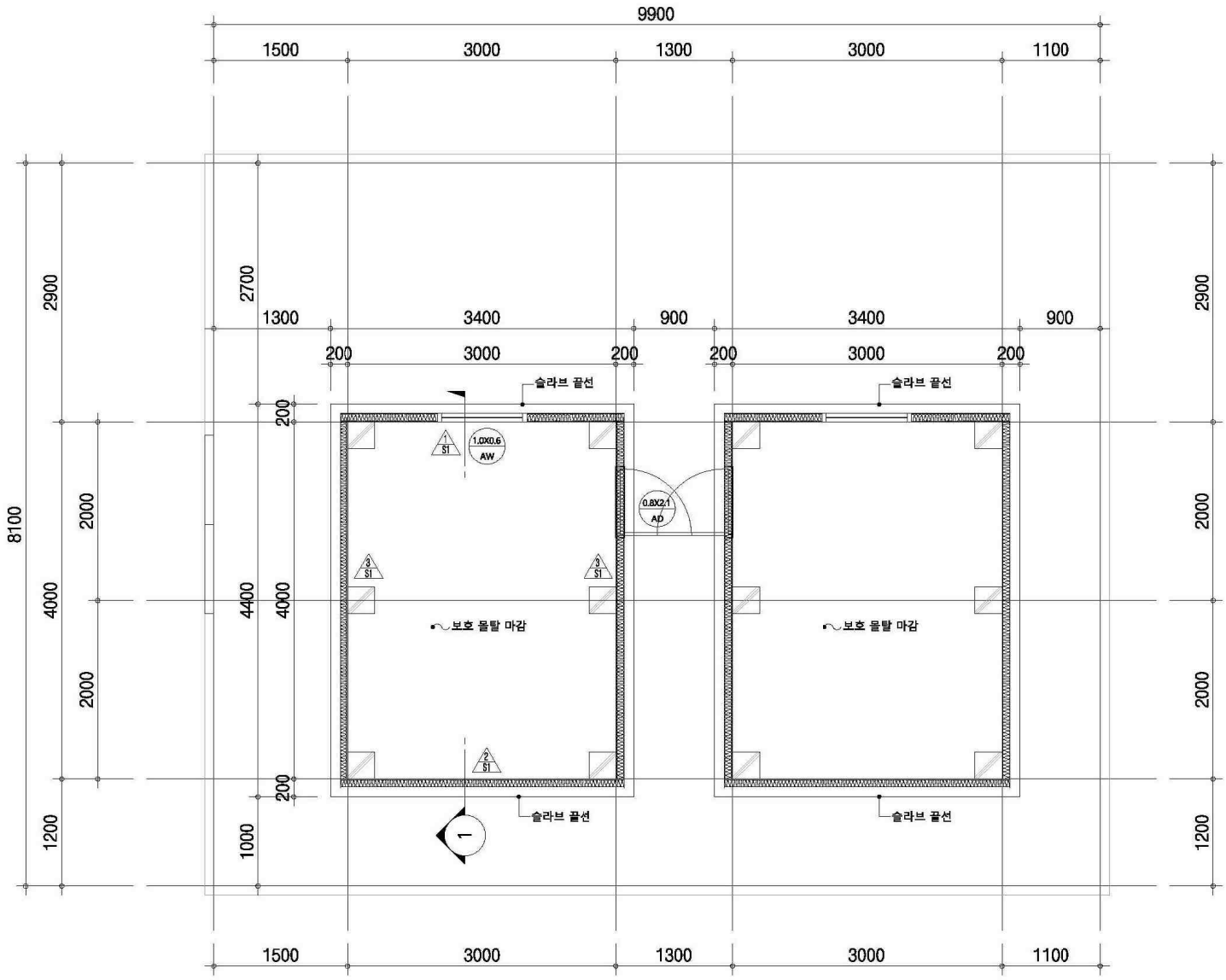
1 / - 바 닥 평 면 도

축척 = A3 : 1/50

(준수 사항)

1. 1층 경량기포콘크리트와 시멘트 몰탈의 재료는 다음과 같다.
   1-1. 모형-1 : 일반적인 재료 사용
   1-2. 모형-2 : 발주처의 요구에 따른 재료 사용
2. 모형-1,2 의 난방 배관의 길이와 간격은 필히 같이 맞추어 시공요망.
3. 추후 공사에서 벽체와 지붕 공사예정으로 선공사시 철근 연장 필요.
4. 전기보일러 종류 및 벽 콘센트 위치는 발주처와 협의 후 시공
5. 칸막이 철거 및 현장 정리는 현장 여건에 맞추어 발주처와 협의 후 시공 요망.
6. 기타 협의할 내용은 발주처의 승인 아래 시공 요망.

1층 바닥 평면도 SCALE=1/50(A3)



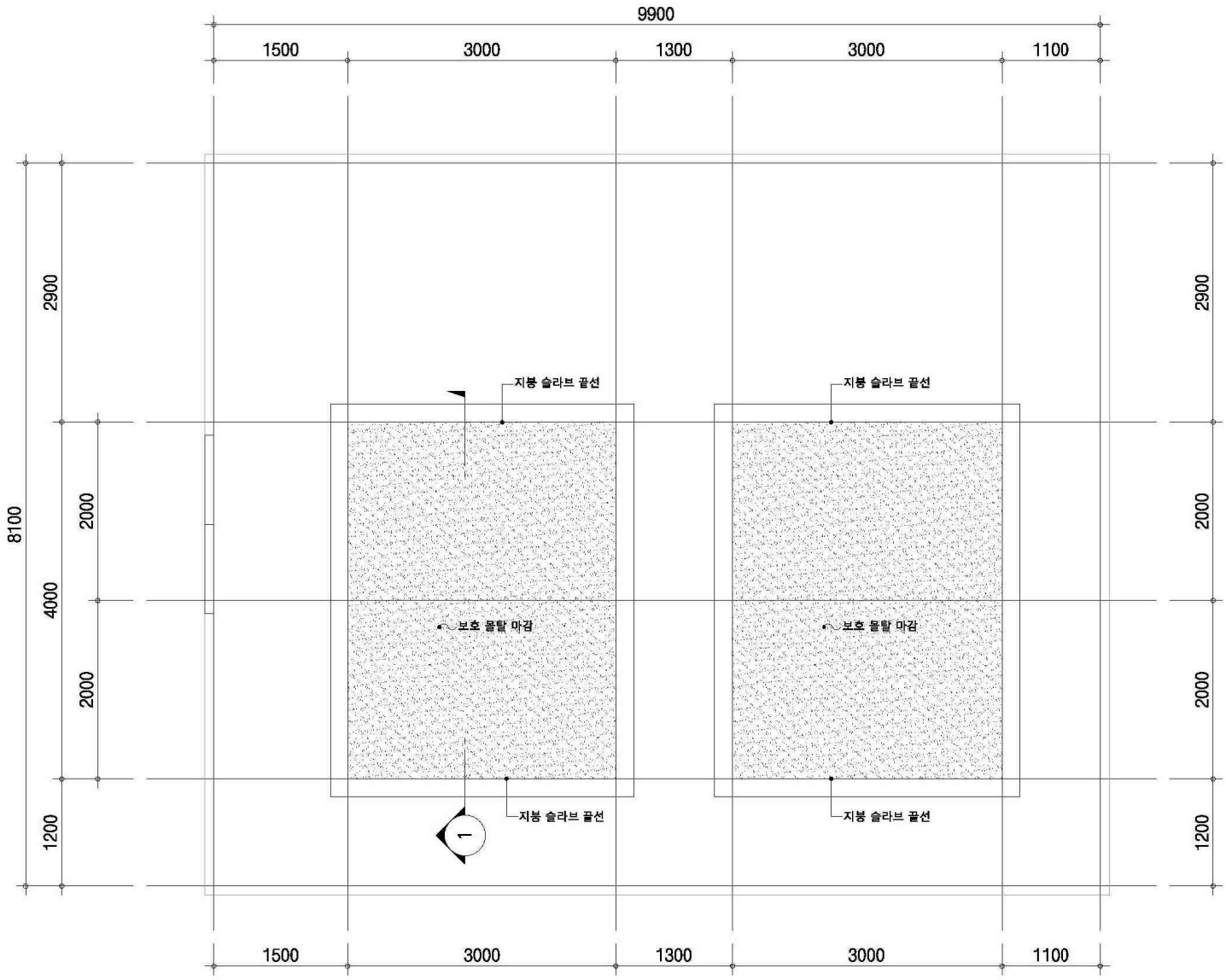
1 층 평 면 도

축척 = A3 : 1/50

(준수 사항)

1. 1층 경량기포콘크리트와 시멘트 몰탈의 재료는 다음과 같다.
   1-1. 모형-1 : 일반적인 재료 사용
   1-2. 모형-2 : 발주처의 요구에 따른 재료 사용
2. 모형-1,2 의 난방 배관의 길이와 간격은 필히 같이 맞추어 시공요망.
3. 추후 공사에서 벽체와 지붕 공사예정으로 선공사시 철근 연장 필요.
4. 전기보일러 종류 및 벽 콘센트 위치는 발주처와 협의 후 시공
5. 칸막이 철거 및 현장 정리는 현장 여건에 맞추어 발주처와 협의 후 시공 요망.
6. 기타 협의할 내용은 발주처의 승인 아래 시공 요망.

지붕 평면도 SCALE=1/50(A3)



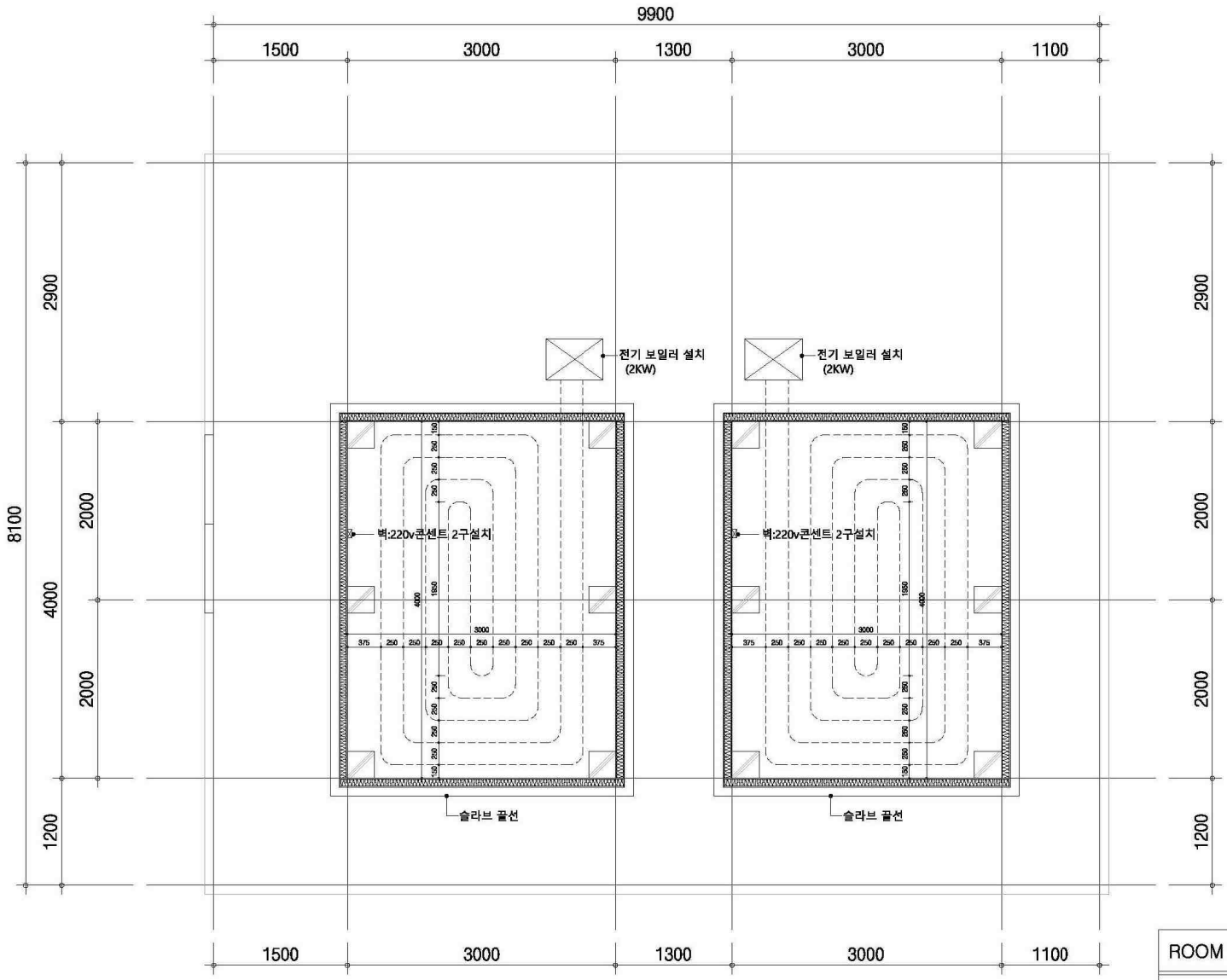
1 / - 지 붕 평 면 도

축척 = A3 : 1/50

(준수 사항)

1. 1층 경량기포콘크리트와 시멘트 몰탈의 재료는 다음과 같다.
   1-1. 모형-1 : 일반적인 재료 사용
   1-2. 모형-2 : 발주처의 요구에 따른 재료 사용
2. 모형-1,2 의 난방 배관의 길이와 간격은 필히 같이 맞추어 시공요망.
3. 추후 공사에서 벽체와 지붕 공사예정으로 선공사시 철근 연장 필요.
4. 전기보일러 종류 및 벽 콘센트 위치는 발주처와 협의 후 시공
5. 칸막이 철거 및 현장 정리는 현장 여건에 맞추어 발주처와 협의 후 시공 요망.
6. 기타 협의할 내용은 발주처의 승인 아래 시공 요망.

바닥 난방 평면도 SCALE=1/50(A3)



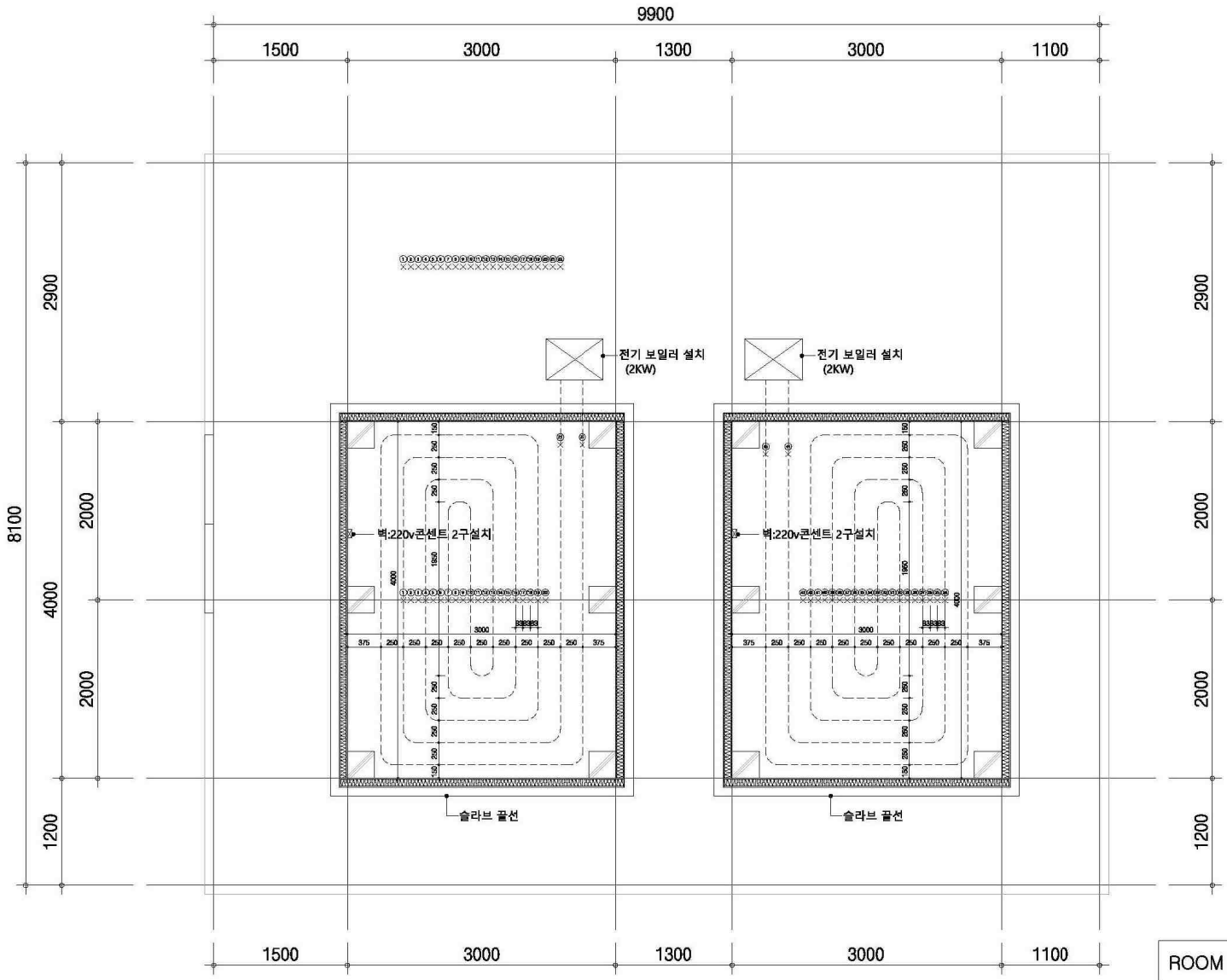
4 - 난방 평면도 및 전기 설치도

축척 = A3 : 1/50

ROOM NAME	COIL	PITCH	관 경 (ø)	REMARKS
실대형 모형	PB관	250	15	현장감독협의

* 난방적용 방식은 현장에서 협의후 변경할수 있음.

온도센서 측정 위치 평면도 SCALE=1/50(A3)



4 - 난방 평면도 및 전기 설치도

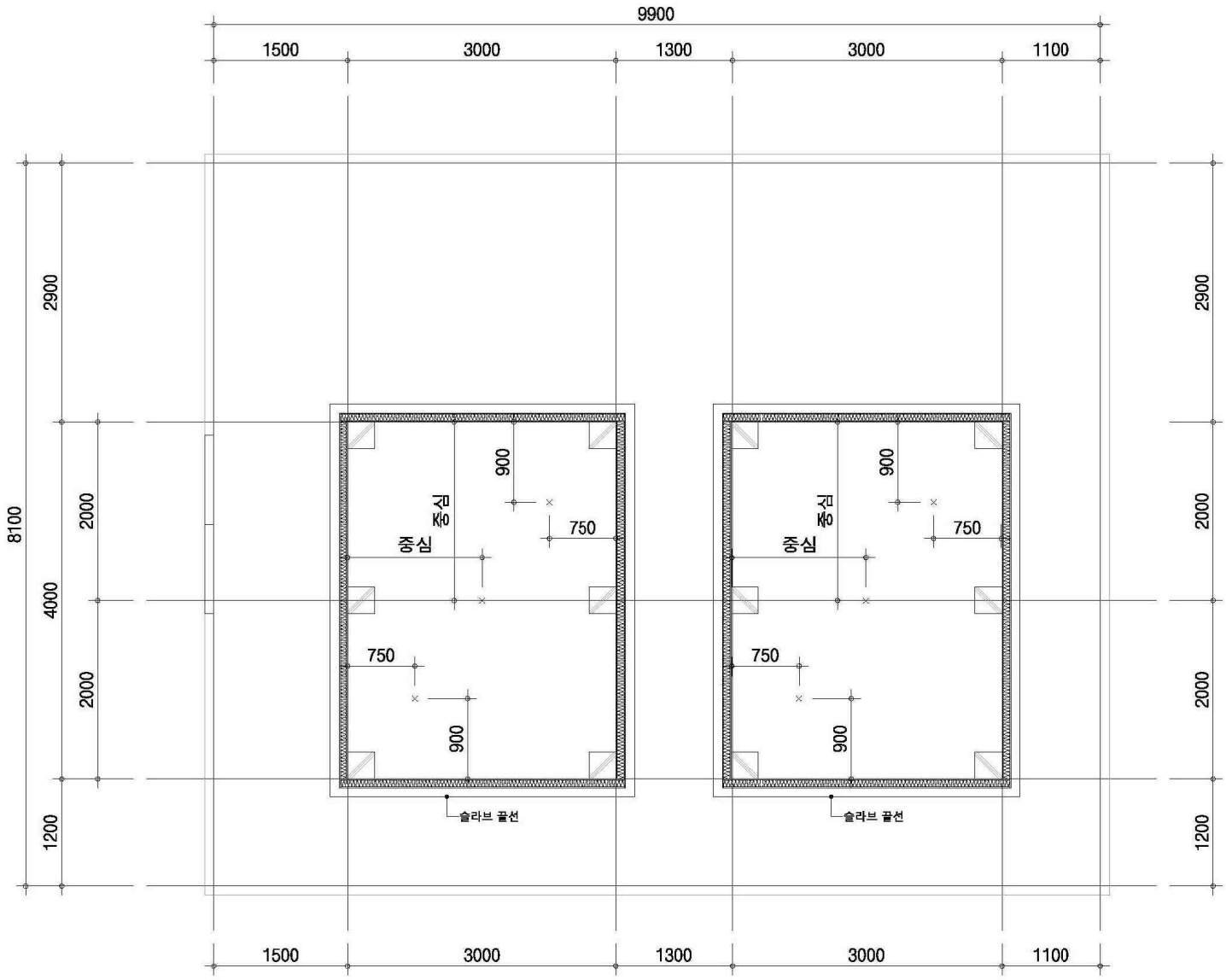
축척 = A3 : 1/50

Notice

1. 온도 센서 간격은 82.3mm로 설치한다.
2. 센서 Num 23, 46은 대기온도를 측정한다.
3. 온도 센서의 깊이는 1~2cm 깊이로 설치를 한다.
4. 대기온도 측정 센서는 현장협의 후 설치한다.

ROOM NAME	Senor	갯수	관 경(mm)	REMARKS
실대형 모형	온도측정	46개소	6 * 50	현장감독협의

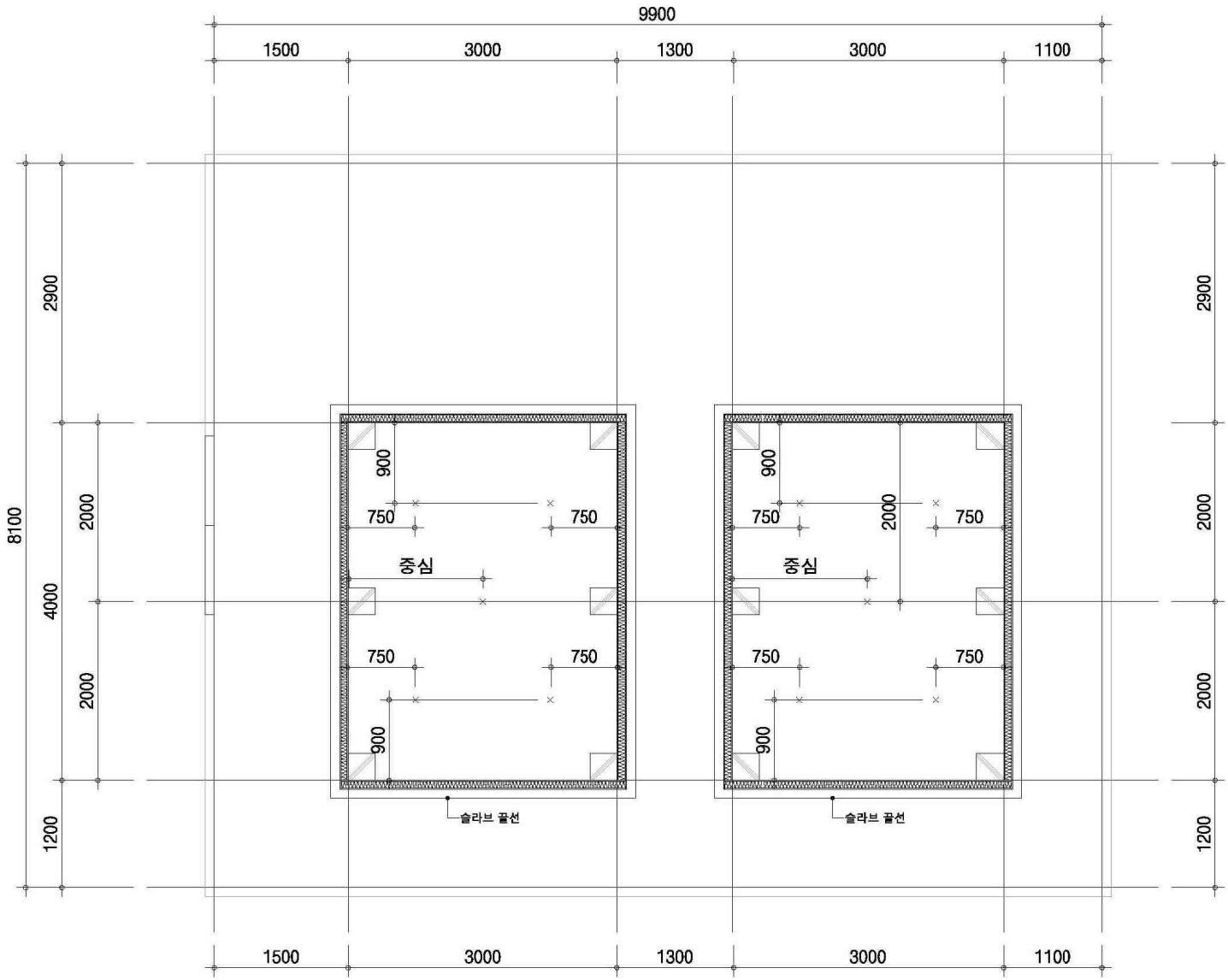
소음실험 설치 평면도 SCALE=1/50(A3)



6 - 소음실험 타격 위치 평면도

축척 = A3 : 1/50

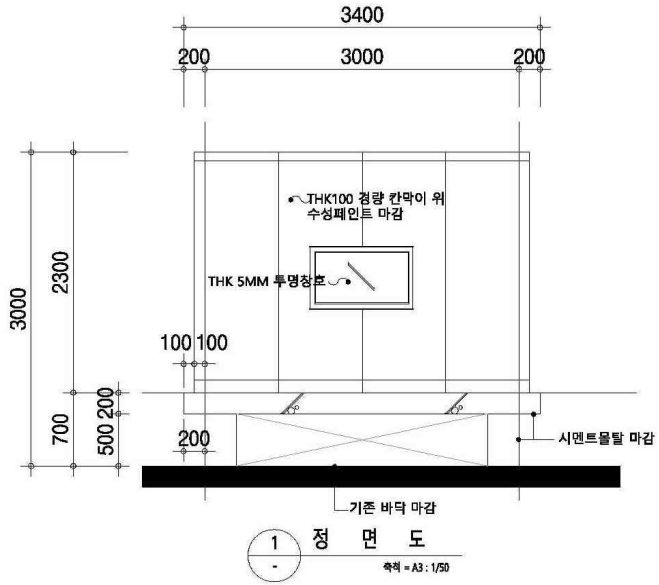
소음실험 설치 평면도 SCALE=1/50(A3)



7 - 소음실험 계측 위치 평면도

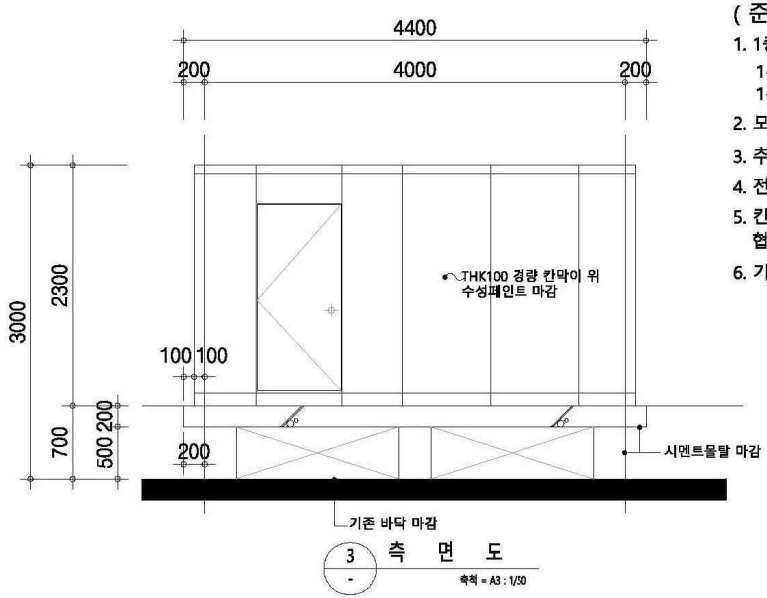
축척 = A3 : 1/50

입면도, 단면도 SCALE=1/50 (A3)



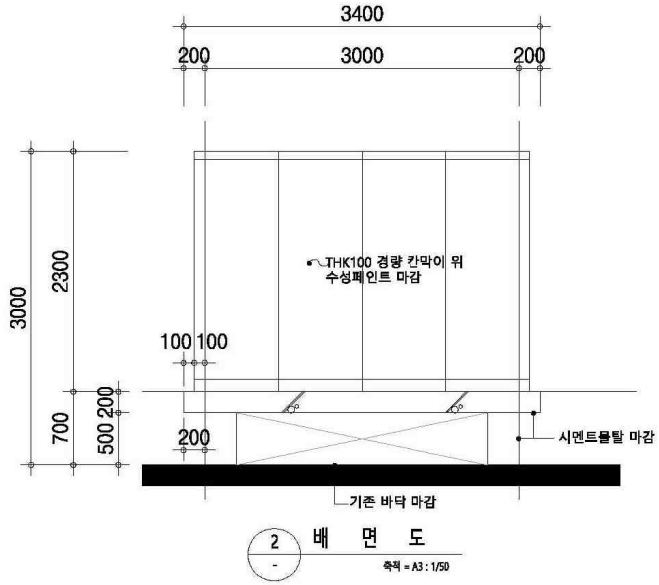
1 - 정 면 도

축척 = A3 : 1/50



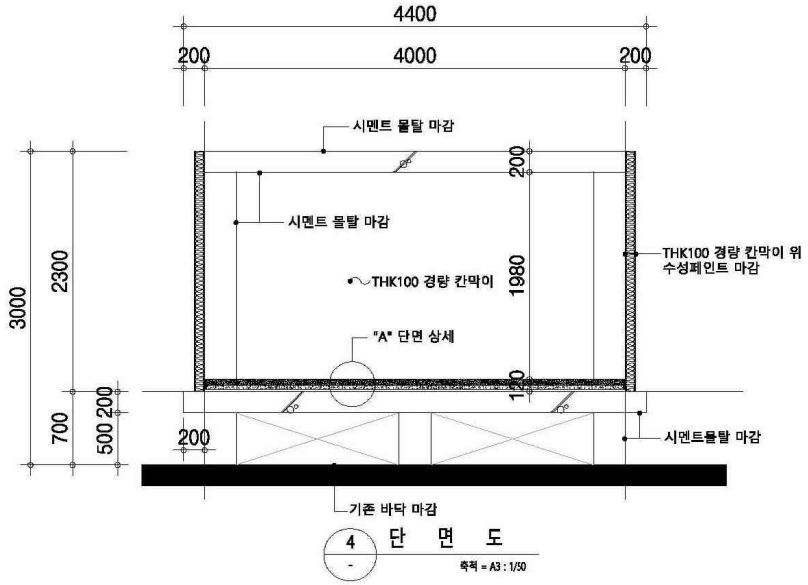
3 - 측 면 도

축척 = A3 : 1/50



2 - 배 면 도

축척 = A3 : 1/50



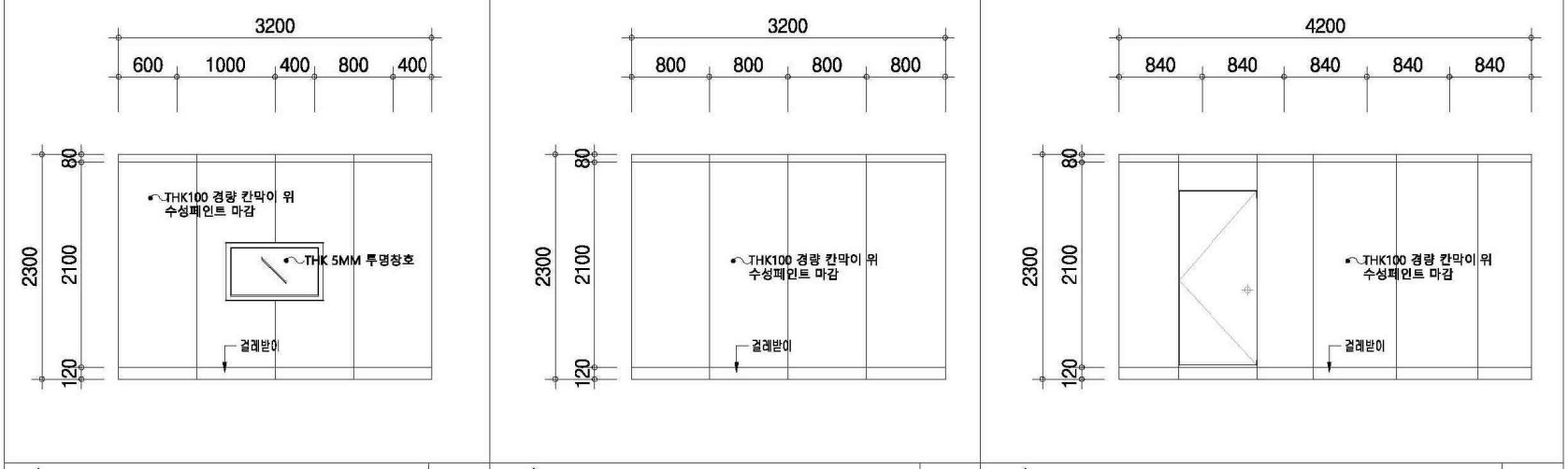
4 - 단 면 도

축척 = A3 : 1/50

(준수 사항)

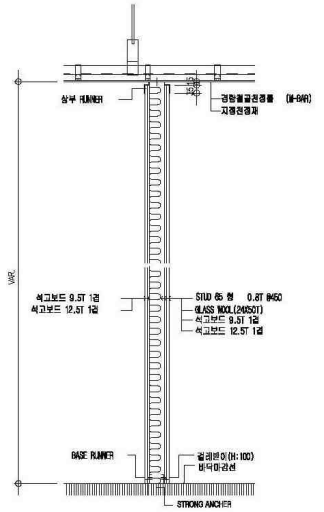
1. 1층 경량기포콘크리트와 시멘트 몰탈의 재료는 다음과 같다.
   1-1. 모형-1 : 일반적인 재료 사용
   1-2. 모형-2 : 발주처의 요구에 따른 재료 사용
2. 모형-1,2 의 난방 배관의 길이와 간격은 필히 같이 맞추어 시공요망.
3. 추후 공사에서 벽체와 지붕 공사예정으로 선공사시 철근 연장 필요.
4. 전기보일러 종류 및 벽 콘센트 위치는 발주처와 협의 후 시공
5. 칸막이 철거 및 현장 정리는 현장 여건에 맞추어 발주처와 협의 후 시공 요망.
6. 기타 협의할 내용은 발주처의 승인 아래 시공 요망.

경량칸막이 전개도

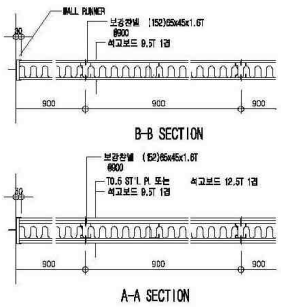


1/S1	경량칸막이	1EA
2/S1	경량칸막이	1EA
3/S1	경량칸막이	2EA

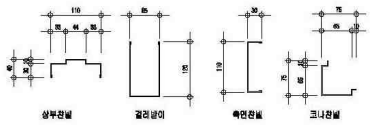
경량칸막이 상세도



S1 경량칸막이 상세도

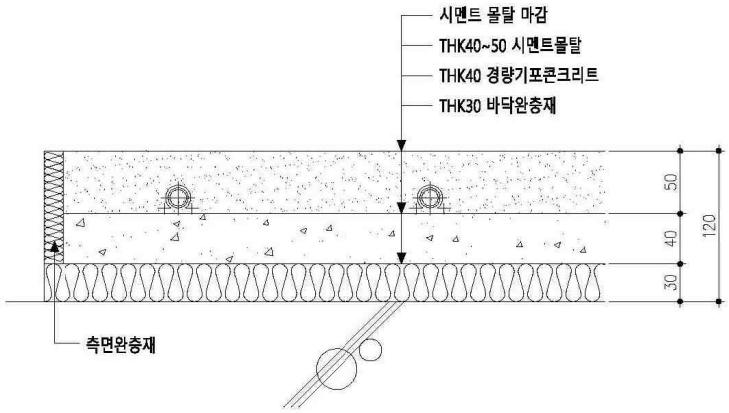


경량칸막이 단면 상세도

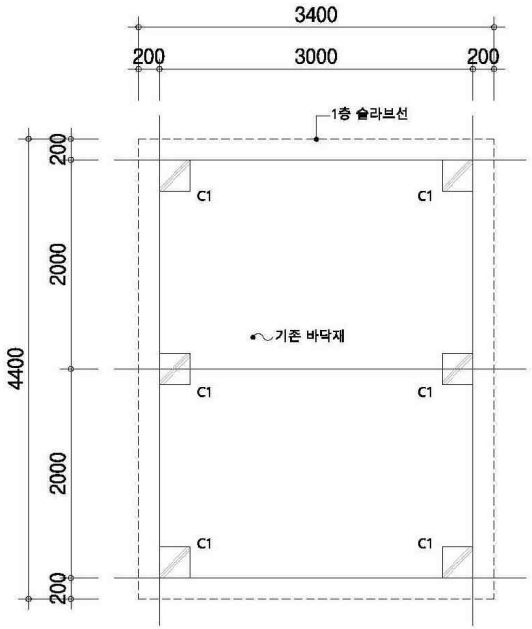


(준수 사항)

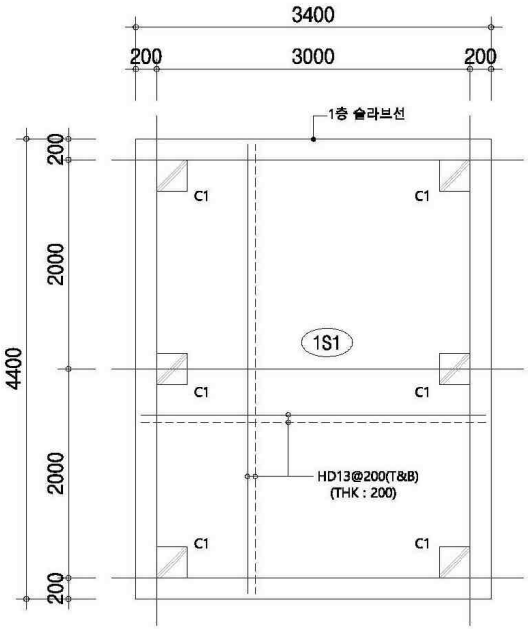
1. 1층 경량기포콘크리트와 시멘트 몰탈의 재료는 다음과 같다.
   1-1. 모형-1 : 일반적인 재료 사용
   1-2. 모형-2 : 발주처의 요구에 따른 재료 사용
2. 모형-1,2 의 난방 배관의 길이와 간격은 필히 같이 맞추어 시공요망.
3. 추후 공사에서 벽체와 지붕 공사예정으로 선공사시 철근 연장 필요.
4. 전기보일러 종류 및 벽 콘센트 위치는 발주처와 협의 후 시공
5. 칸막이 철거 및 현장 정리는 현장 여건에 맞추어 발주처와 협의 후 시공 요망.
6. 기타 협의할 내용은 발주처의 승인 아래 시공 요망.



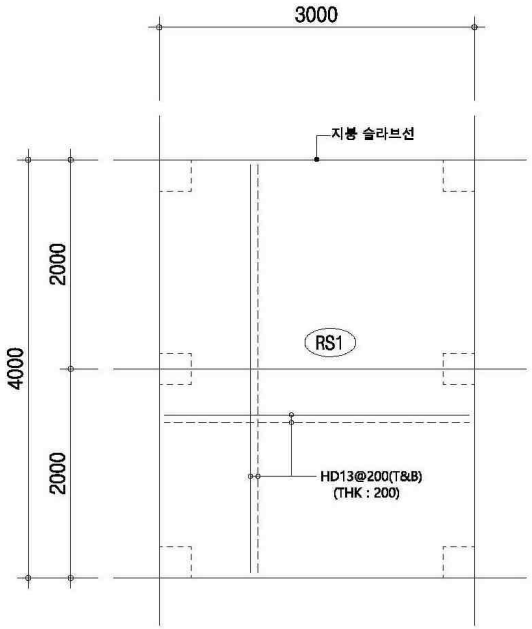
1/- "A" 단면 상세도
축척 = A3 : 1/5



1 기 둥 일 람 표
축척 = A3 : 1/50

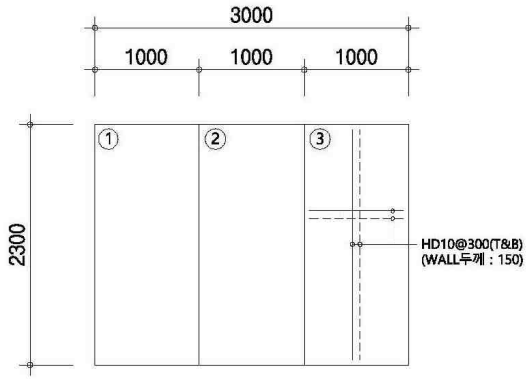


2 일 층 배 근 도
축척 = A3 : 1/50



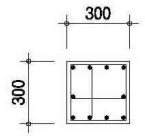
3 지 붕 배 근 도
축척 = A3 : 1/50

(추후 공사분 구조 도면) - 금회 공사분은 아님.

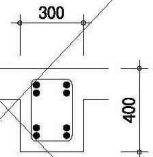


벽 체 배 근 도
축척 = A3 : 1/50

□기둥 리스트

부 호	C1
형 태	
크 기	300 X300
MAIN BAR	8-HD16
HOOP BAR	D10@300

□ 보 리스트

부 호	B1
형 태	
상부근	4-HD16
하부근	4-HD16
늑근	D10@200

(준수 사항)

1. 1층 경량기포콘크리트와 시멘트 몰탈의 재료는 다음과 같다.
   1-1. 모형-1 : 일반적인 재료 사용
   1-2. 모형-2 : 발주처의 요구에 따른 재료 사용
2. 모형-1,2 의 난방 배관의 길이와 간격은 필히 같이 맞추어 시공요망.
3. 추후 공사에서 벽체와 지붕 공사예정으로 선공사시 철근 연장 필요.
4. 전기보일러 종류 및 벽 콘센트 위치는 발주처와 협의 후 시공
5. 칸막이 철거 및 현장 정리는 현장 여건에 맞추어 발주처와 협의 후 시공 요망.
6. 기타 협의할 내용은 발주처의 승인 아래 시공 요망.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

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

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