19CTAP-C151900-01

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개( ) / ISBN: 979-11-957481-3-6

건설교통기술촉진연구사업 제2차년도 최종보고서

발 간 등 록 번 호
11-B552989-000378-01

R&D / 19CTAP-C151900-01

열관류율 0.21 W/m^2·K의 성능을 확보한 지속가능 열메타 PC 판넬 개발 최종보고서

2021 . 01 . 21

주관연구기관 / 경기대학교
공동연구기관 / 아이에스동서 ㈜

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

열관류율 0.21 W/m^2·K의 성능을 확보한 지속가능 열메타 PC 판넬 개발 최종보고서

2020

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

'열관류율 0.21 W/m²·K의 성능을 확보한 지속가능 열매타 PC 판넬 개발'
(연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 7부를 제출합니다.

2021 . 01. 21

주관연구기관명 : 경기대학교 산학협력단 (윤여강) (인)
협동연구기관명 : 아이에스동서 ㈜ (박영식) (인)

주관연구기관책임자: 양 근 혁
공동연구기관책임자: 박 영 식

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C151900-01	해당 단계 연구 기간	2019.04.15. -2020.12.31	단계구분	4/4
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천분야			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	열관류율 0.21 W/m^2·K의 성능을 확보한 지속가능 열메타 PC 판넬 개발			
연구책임자	양 근 혁	해당단계 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: – 명	해당단계 연구비	정부:370,000천원 민간:250,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:620,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: – 명	총 연구비	정부:370,000천원 민간:250,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:620,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	경기대학교 산학협력단(건축공학과)			참여기업명: 아이에스동서(주)	
국제공동연구	상대국명: 해당없음.			상대국 연구기관명: 해당없음.	
위탁연구	연구기관명: 해당없음.			연구책임자: 해당없음.	

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

요약

본 연구에서 제안되는 기술은 고단열 소재인 열메타 구조체와 EPS 또는 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 융합을 통해 고단열·지속가능한 PC 판넬의 개발임. 이 연구의 최종목표는 아이디어 검증의 학술적·실험적 연구 뿐만 아니라 사업화를 위한 기반구축에 중점을 두었음. 주요 핵심 기술로서는 단열성을 고려한 열메타 구조체의 재질 및 배열방법, EPS 또는 기포가 첨가된 단열 콘크리트의 배합기술, 열메타 구조체와 EPS 또는 기포가 첨가된 단열 콘크리트를 이용한 고단열·지속가능한 PC 판넬의 제작 기술임.

특허 등록 1건(현재 우선 심사권 진행 중; 2월 등록 예상)을 제외한 나머지 정량적 성과의 달성수준은 목표 이상을 달성하였음. 또한, 이 연구를 통하여 열메타 구조체와 EPS 또는 기포가 첨가된 단열 콘크리트를 이용한 고단열·지속가능한 PC 판넬을 제작할 수 있는 원천기술, 다양한 실내실험 및 구조실험, 실용화를 위한 기반구축으로 기존 목표 TRL 4단계를 6단계로 상향하였음.

<u>성과 달성 현황</u>

· 학술적 성과: 목표－국내 3편 및 해외 SCI(E) 3편

달성－국내 6편 및 해외 SCI(E) 5편(외 국내 1건 게재예정)

학술발표: 3건

· 특허 성과: 목표－출원 3건, 등록 1건

달성－출원 3건, 등록 0건 (1건 우선 심사 중이며 2월 중 등록 예정: 변리사 의견 첨부)

· 시작품 제작: 목표－ 2건

달성－ 2건

보고서 면수

289 페이지

<요약문>

연구 개발 목표	열 차단에 효과적인 열메타 기술의 융합을 통한 건축물 내·외장재용 PC 판넬의 원천기술 개발이 최종 목표임. 특히 제안기술의 지속가능성 및 경량화를 위하여 선기포, 바텀애시 골재 및 하이볼륨 혼화재 기술을 적용함. 제품의 실용화를 고려한 목표성능은 다음과 같음. · 압축강도 : 5(내장재), 10 MPa(외장재) / · 기건밀도 : 1.4 g/cm^3 이하 / · 휨 강도 : 2 MPa 이상 / · 열전도율 : 0.11 W/m·K 이하 / · 건조수축량 1,000 μ 이하
연구 개발 내용	열메타 구조의 최적화 기술과 콘크리트 지속가능성의 학제간 융합연구로서 각 세부목표별 주요 연구내용을 요약하면 다음과 같음. **1) 열메타 구조체의 최적화 기술의 확립.** · 열메타 소재 스크리닝 · 열메타 형상 및 배치의 최적화 · PC 판넬의 열전달 전산 시뮬레이션 **2) 기포와 바텀애시 골재를 활용한 지속가능 경량 콘크리트의 최적 배합기술의 확립.** · 선기포와 바텀애시 골재를 활용한 구조용 경량콘크리트 제조 가능성 평가 · 개발된 콘크리트의 밀도와 압축강도 및 열저항성 상관관계 평가 · 개발된 콘크리트의 프리캐스트 제조 기술 제시: 최적의 양생이력 평가 **3) 사용성과 구조 안전성을 고려한 열메타 기반 PC 판넬의 설계기술 확립.** · 열메타 구조를 고려한 PC 판넬의 단면상세 개발 · 지속가능 열메타 기반 PC 판넬의 구조성능(휨 및 전단성능) 평가 · 지속가능 열메타 기반 PC 판넬의 시작품 제작 **4) 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 생산 시스템 기반 구축** · 제안기술의 비즈니스 모델 제시 · 지속가능 열메타 기반 PC 판넬에 사용된 재료들의 수급성 및 경제성 평가

연구개발성과

구분	논문	특허		보고서 원문	제조가이드라인	시작품	인력양성
		출원	등록				
성과 (N/Y)	국내6(Y) (외 1건 게재 예정) 해외5(Y)	국내2(Y) 해외1(Y)	국내0 (1건 우선 심사중)	1(Y)	1(Y) ***기술요약 정보**	2(Y) ***신품종**	1(Y)

활용 계획 및 기대효과	**1) 활용계획(기술수요처)** · 건축물의 외벽 판넬 및 내·외벽 단열재 분야(샌드위치 판넬 대체) · 패시브하우스 또는 건축물 리모델링 시 단열 벽체 **2) 기대효과** · 열메타 소재를 융합한 건설 단열재료 기술의 경쟁력 제고 및 국내 원천기술 확보. · 건축물 냉·난방에 소비되는 에너지의 20% 이상 절감. · 경량콘크리트 PC 또는 샌드위치 판넬 시장 5% 대체시 연간 약 200억 사업화 가능.

핵심어 (5개 이내)	열메타	바텀애시 골재	지속가능	단열	PC 판넬

〈 SUMMARY 〉

Purpose	The ultimate objective of this study is to develop an original technology of sustainable thermal-meta precast (PC) panels for building interior and exterior insulation. In particular, for sustainable and lightweight characteristics of thermal-meta PC panel, the advanced approaches including pre-foam, bottom ash aggregates and high-volume admixtures are further considered as a source technique. For the practical application of the proposed PC panel, the following targets are designed: · Compressive strength: 5 MPa (for indoor application) and 10 MPa (for outdoor application) / · Dry density: less than 1.4 g/cm^3 / · Rupture of modulus: more than 2 MPa / · Thermal conductivity: less than 0.11 W/m·K / · Shrinkage strain: less than 1,000 μ
Contents	As an interdisciplinary convergence research of optimization of thermal-meta and sustainable concrete technologies, the primary contents can be summarized as follows: 1) Establishment of optimization of thermal-meta structures. · Screening of thermal-meta materials · Optimized shape and arrangement of thermal-meta. · Computer simulation for heat transmission performance of thermal-meta PC panel. 2) Establishment of mixture proportioning procedure for sustainable lightweight concrete using bottom ash aggregate and pre-formed foam. · Estimation of potential for structural lightweight concrete using bottom ash and foam. · Evaluation of corelation between density and compressive strength and thermal resistance. · Proposals of precast concrete process of the developed concrete: optimized curing history. 3) Establishment of design details of sustainable thermal-meta PC panels · Development of connection details in PC panels considering the thermal-meta arrangement. · Evaluation of structural performance (flexure and shear) of the developed PC panel. · Proposals for prototype of sustainable thermal-meta PC panel. 4) Infra establishment for sustainable thermal-meta PC panel. · Proposal of business model (BM). · Estimation of supply and economic feasibility
Results	· Academic outcome: 6 papers (including 3 papers published in SCI(E) Journal) · Intellectual property rights: 3 application of patents and 1 domestic registration of patents · Professional manpower training: 1 masters · Practical outcome: 1 design guidelines and 2 prototype sample
Expected Contribution	1) Application plan(technology users) · Alternative to EPS panel or conventional PC panel and interior or exterior insulation · Insulation wall in passive house or remodelled buildings. 2) Expected contribution · Development of new and original technology for building insulation materials using thermal-meta technique. · 20% reduction of energies consumed for air conditioning and heating of buildings. · Business competitiveness of annual 20 billions for 5% replacement of lightweight concrete PC panel or sandwich panel market.

Keywords	thermal-meta	bottom ash aggregate	sustainability	insulation	precast panel

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
1-1. 연구개발의 목적 ····· 1
1-2. 연구개발의 필요성 ····· 1
1) 정책적 · 사회적 중요성 ····· 1
2) 경제적 · 산업적 동향 및 중요성 ····· 2
3) 기술적 중요성 ····· 3
1-3. 연구개발의 범위 ····· 6
1) 주관연구기관(경기대학교) ····· 6
2) 공동연구기관(아이에스동서) ····· 7

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 8
2-1. 연구수행계획 및 달성사항 ····· 8
2-2. 연구수행내용 ····· 10
Ⅰ. 열메타 재질 및 구조배열의 최적화 ····· 10
1. 고단열 경량콘크리트 PC 패널용 열메타 구조체 개발 ····· 10
1.1 열메타 ····· 10
1.2 기술 방향설정 ····· 11
1.3 판형 메타 구조의 열차단 평가 ····· 11
1.4 연구 결과 및 분석 ····· 12
1.5 요약 ····· 18
2. 판형 메타 구조의 간격 조절을 통한 열 차단 평가 ····· 19
2.1 시뮬레이션 모델 ····· 19
2.2 주요 물질의 변수 ····· 19
2.3 연구결과 및 분석 ····· 19
2.4 요약 ····· 23
3. PC 판넬의 단면상세를 고려한 열교 제어용 열메타의 열전도율 평가 ····· 24
3.1 실험체 상세 및 실험 방법 ····· 24
3.2 실험결과 분석 ····· 24
4. 시작품 제작 ····· 25
5. 결론 ····· 26

Ⅱ. 바텀애시 골재기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 배합설계 및 성능 평가 ····· 27
1. 바텀애시 골재 기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 목표 성능 설정 ····· 27
1.1 특허 기술동향 및 전망 ····· 27
1.2 기존 단열 콘크리트 분석 ····· 30
1.3 바텀애시 경량콘크리트의 분석 ····· 34
1.4 바텀애시 골재 콘크리트의 연구동향 ····· 42

1.5 요구 성능 결정 ····· 45
2. 바텀애시 골재 기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트의 실내 배합 실험 ····· 46
2.1 사용재료 ····· 46
2.2 배합계획 ····· 49
2.3 실험결과 및 분석 ····· 55
3. 바텀애시 골재 기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트의 물리적 · 역학적 및 열적 특성 평가 ····· 65
3.1 시리즈 I (기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트) ····· 65
3.2 시리즈 2 (EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트) ····· 81
4. 바텀애시 골재 기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트의 전단거동 평가 ····· 91
4.1 직접전단 실험 ····· 91
4.2 직접전단 실험결과 분석 ····· 93
4.3 전단마찰강도에 대한 예측모델 ····· 96
5. 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 PC 경량 콘크리트의 건조수축 평가 ····· 100
5.1 자유 건조수축 ····· 100
5.2 구속 건조수축 ····· 103
5.3 소성건조수축 ····· 105
6. 결론 ····· 106

Ⅲ. 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 단면설계와 휨 및 전단성능 평가 ····· 109
1. 바텀애시 골재 기반 고단열 · 지속가능경량 콘크리트 판넬의 휨 및 전단거동 평가 ····· 109
1.1 실험체 상세 ····· 109
1.2 재료 ····· 111
1.3 실험체 가력 및 측정방법 ····· 112
1.4 실험결과 및 분석 ····· 113
2. 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬 심재의 지압성능 평가 ····· 118
2.1 유한요소해석 ····· 118
2.2 재료 ····· 122
2.3 실험결과 및 분석 ····· 122
3. 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 휨 및 전단거동 평가 ····· 124
3.1 실험체 상세 ····· 124
3.2 재료 ····· 126
3.3 실험체 가력 및 측정방법 ····· 128
3.4 실험결과 및 분석 ····· 129
4. 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 난연성능 및 가스 유해성 평가 · 132
4.1 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 난연성능 평가 ····· 132
4.2 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 가스 유해성 평가 ··· 135
4.1 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 난연성능 평가 ····· 136

5. 결론 ····· 138

Ⅳ. 특허맵 및 경제성 분석을 통한 생산 시스템 기반 구축(IS동서) ····· 139
1. 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 특허맵 ····· 139
1.1 기술 개발 배경 ····· 139
1.2 개발기술의 특징 ····· 141
1.3 특허 동향 분석 ····· 143
1.4 정량 분석 ····· 144
1.5 출원인별 특허 동향 ····· 147
1.6 핵심 특허분석 ····· 149
1.7 선행특허 저촉 가능성 및 회피 방안 ····· 154
1.8 본 개발기술의 차별성 및 특허 권리화 방안 ····· 157
1.9 결여 ····· 163
2. 열메타 기반 프리캐스트 콘크리트 판넬의 연구편익 및 기술가치 분석 ····· 165
2.1 개요 ····· 165
2.2 분석대상 연구사업의 개요 ····· 165
2.3 분석 방법론 ····· 166
2.4 분석 방향 ····· 173
2.5 경제성 분석 ····· 175
2.6 개발기술 관련 정책 분석 ····· 184
2.7 사업화 전략 ····· 187
2.8 개발 공법 관련 보유특허의 기술가치평가 ····· 195
3. 결론 ····· 203

Ⅴ. 개발된 배합 및 생산라인을 이용한 현장 실험과 단기 실용화 기반 구축 ·· 205
1. 시장조사를 위한 PC 판넬에 대한 기존 상용화 기술 및 설계기준의 분석 ··· 205
1.1 기술의 동향 ····· 205
1.2 PC 판넬의 설계기준 ····· 207
2. 풍하중을 고려한 패널 간의 접합 상세 ····· 214
2.1 타설전 ····· 214
2.2 타설후 ····· 214
3. 생산라인을 이용한 고단열 경량콘크리트 패널용 현장 배합 ····· 215
3.1 사용 재료 ····· 215
3.2 실험 상세 ····· 215
3.3 실험 방법 ····· 216
3.4 재현성 평가 ····· 216
4. 단기 실용화 기반 구축 ····· 221
4.1 평가용 엑셀 프로그램 및 배합설계 작성 ····· 221
4.2 판넬의 단면상세 안 ····· 226

4.3 재료들의 수급성 ····· 227
4.4 경제성 ····· 228
5. 열관류율 0.15 W/m^2·K의 성능을 확보한 지속가능 열메타 PC판넬 제작(안) 230
5.1 적용 범위 ····· 230
5.2 일반사항 ····· 230
5.3 제출물 ····· 235
5.4 제조 ····· 236
5.5 콘크리트 혼합 ····· 236
5.6 제품 검사 및 품질 관리 ····· 240
5.7 제작예시(시작품) ····· 241
5.8 생산라인검토 ····· 242
5.9 시공성 및 경제성 평가 ····· 244
6. 결론 ····· 248

Ⅵ. 열메타 기반 콘크리트 PC 판넬의 설계 가이드라인 ····· 252
1. 열메타 기반 콘크리트 PC 판넬의 설계 가이드라인 ····· 252
1.1 일반사항 ····· 252
제1장 설계일반 ····· 253
제2장 단열 콘크리트 제조 ····· 254
제3장 열메타 구조체 설계 ····· 261
제4장 열메타 기반 프리캐스트 콘크리트 판넬의 단면 설계 ····· 265
제5장 열메타 기반 프리캐스트 판넬의 제조 및 시공방법 ····· 269

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 273
3-1 목표 및 목표 달성여부 ····· 273
3-2. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등) ····· 277
3-3 관련분야 기여도 ····· 277

4. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 278

붙임. 참고 문헌 ····· 279

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발의 목적

- 열 차단에 효과적인 열메타와 저량의 기포가 첨가된 바텀애시 골재를 활용한 경량 콘크리트 및 다량의 산업부산물의 시멘트계 재료의 융합을 통한 고단열·지속가능 PC 판넬의 제조기술.

1-2. 연구개발의 필요성

1) 정책적·사회적 중요성 : 건축물 에너지 소비에 대한 정책적·사회적 요구 증가

(1) 국내 건축물의 냉·난방에 의한 에너지 소비 현황

- 국내 에너지 소비량 및 CO_2 배출량은 세계 8위 수준으로(2015년 기준), 2000년 대비 약 40% 이상 증가하였음.
- 국내 건축물의 냉·난방을 위해 소비되는 에너지는 전체 에너지 소비의 58.7%이며, 공동주택의 냉·난방을 위해 소비되는 유류는 연간 17.5 ℓ/m^2에 달함.
- 국내 에너지 소비효율은 일본의 1/3 수준(그림 1.1)으로 전체 에너지의 35.7%가 건축물의 조명 및 냉·난방에 의해 소비되고 있으며, 특히 인구 과밀인 서울의 경우 총 에너지 사용량 중 58%가 건축물 운영에 의해 소비되고 있음(그림 1.2).

(2) 건축물의 에너지 절감정책 강화

- 정부는 2030년까지 국가 탄소감축목표를 배출전망치(BAU) 대비 37%로 설정하였으며, 건설부분은 31%의 감축목표를 제시함
- 국토부는 에너지 기준 강화를 위해 2017년부터 신축 건축물의 냉·난방 에너지에 대해 90% 감축(09년 대비)의 목표를 설정하였음.
- 제로에너지 빌딩 국가 로드맵에 따라 2017년부터 제로에너지 건축물 인증제가 시행되며 2020년 공공부문, 2025년 민간부분까지 인증제도가 확대될 예정임.
- 건축물 에너지 소비 비율이 높은 서울시의 경우 건축물 에너지소비 총량제 실시를 통해 2030년까지 건축물 에너지 소비량의 20%를 절감할 목표임.

(3) 건축물 열관류율 및 내화 법규 강화

- 건축물 에너지 절감 정책에 따라 2018년부터 중부지역의 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율 기준은 0.15 W/m^2·K 이하로 적용되고 있는데, 이는 독일의 패시브하우스 수준임(표 1.3).
- 유기 단열재 시공에 따른 화재 발생예방 및 내화규제 강화를 위해 2018년부터 3층 이상 건물에 불연, 준불연 마감재 적용이 의무화되었음.

(4) 건축물 에너지 절감에 대한 국제 정책 현황

- 유럽과 미국은 1990년대부터 강도 높은 건물 에너지 절약정책을 추진하고 있으며, 유럽의 경우 EU의 FPBD 정책에 따라 모든 회원국은 건물에너지 성능 증명서를 의무적으로 제출해야 함.

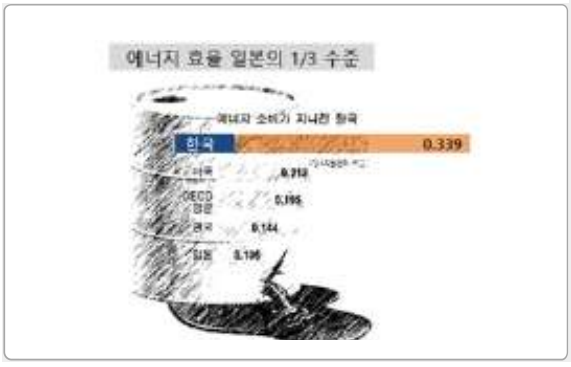


그림 1.1 국내 에너지 소비 효율성

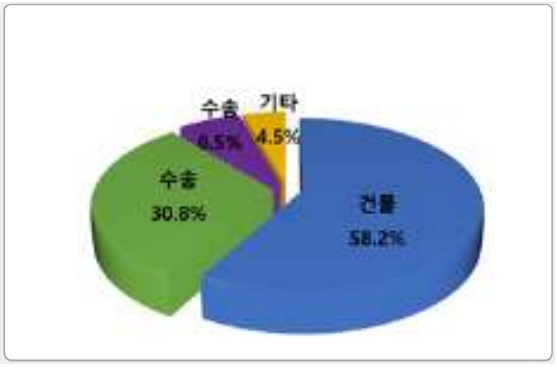


그림 1.2 서울시 부문별 에너지 소비현황

표 1.1 친환경 주택의 단열성능 기준

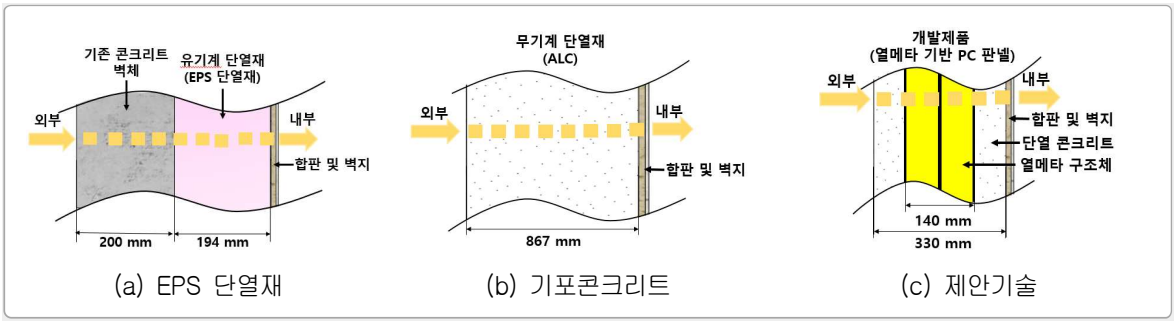
항목		평균 열관류율(W/m^2·K)			
		중부1	중부2	남부	제주
창 (발코니 내측 창호 포함)	외기 직접	0.90 이하		1.00 이하	1.50 이하
	외기 간접	1.20 이하	1.50 이하	1.70 이하	
거실의 외벽	외기 직접	0.15 이하	0.17 이하	0.22 이하	0.25 이하
	외기 간접	0.21 이하	0.24 이하	0.31 이하	0.35 이하
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기 직접	0.15 이하		0.18 이하	0.25 이하
	외기 간접	0.21 이하		0.26 이하	0.35 이하
최하층에 있는 거실의 바닥	외기 직접	0.15 이하	0.17 이하	0.22 이하	0.29 이하
	외기 간접	0.21 이하	0.24 이하	0.31 이하	0.41 이하
바닥 난방인 층간 바닥		0.81 이하			

- 독일의 패시브하우스, 프랑스의 에피네르기 등의 저에너지 빌딩 관련 인증기관을 설립하고 인증제도를 기반으로 건물의 에너지를 최대 85%까지 감축시키도록 독려함.
- 영국은 2016년부터 모든 신규주택에 대해 이산화탄소 배출을 완전히 제로화할 것을 규정하였음.
- 일본은 2010년 에너지 기본계획을 시작으로 2030년까지 모든 신축건물(공공 및 민간)에 대해 제로에너지 빌딩을 달성하도록 제시하였음.
- 미국은 이그제큐티브 오더에 따라 2020년까지 미국전역의 주거건물, 2030년까지 모든 연방정부건물, 2050년까지 모든 상업용 건물에 대해 제로에너지 빌딩의 목표를 설정하였음.
- 국내에서는 2020년 공공건축물(연면적 1,000 m^2 이상)에 단열성능을 극대화하여 에너지부하를 최소화한 제로에너지건축에 대한 시범사업을 진행하였으며, 2030년부터 민간·공공건축물(연면적 500 m^2 이상)에 대해서 제로에너지건축을 의무화 할 예정임.

2) 경제적·산업적 동향 및 중요성 : 시장규모의 성장 및 에너지 절감 기술수요 증가

(1) 에너지 절감을 위한 고품질의 단열성능을 갖는 건설재료에 대한 기술수요 증가

- 외벽에서 열관류율 0.15 W/m^2·K를 달성하기 위해서 가연성 재료인 기존 유기계 단열재(EPS, 열전도율 = 0.043 W/m·K)는 397 mm(기존 콘크리트 벽체 200 mm포함) 이상의 시공이 필요하며, 이를 불연재료인 콘크리트 무기단열재(기존 경량기포콘크리트 및 ALC 블록, 열전도율=0.15 W/m·K) 로 대체하게 되면 단열재 두께는 867 mm 이상으로 증가함(그림 1.3).
- 소요 열관류율(0.15 W/m^2·K)에 대해 벽체의 두께(단열재 140 mm포함)를 330 mm로 낮추기 위해서는 단열재 및 콘크리트의 열전도율은 0.05 W/m·K이하가 요구됨.
- 최근 건축물의 리모델링 및 패시브하우스에 대한 수요가 증가함에 따라 경량기포콘크리트 블록 시장은 성장하고 있지만, 기존 경량 콘크리트의 열전도율은 건축물의 벽두께를 증가시켜 내부 공간의 활용성 및 시공성과 경제성을 상당히 저하시킴.
- 열전도율 0.05 W/m·K인 열메타 기반 고단열 PC 판넬은 건축물의 열손실을 약 30% 이상 줄일 수 있으며, 이는 건축물의 냉·난방을 위해 소비되는 전체 에너지를 약 20% 이상 감소시킬 수 있는데, 이를 경제적 이익으로 환산한다면 약 6,200억원 이상의 효과임.



(a) EPS 단열재 (b) 기포콘크리트 (c) 제안기술

그림 1.3 열관류율 0.15 W/m^2·K를 만족시키는 단열재의 최소요구 두께

(2) 고단열 건설재료에 대한 시장규모 급성장

- 전세계적 건축물 에너지 절감정책을 고려하면 향후 건설분야 소재에서 가장 뜨거운 이슈 중 하나는 단열재임.
- 세계 단열재료 시장은 현재 약 400억 달러 수준의 규모로 형성되어 있는데, 에너지 및 탄소관련 정책과 경제적 중요성을 고려하면 이 시장은 지속적 성장이 전망됨.
- 국내의 경우 2015년 단열재 시장은 약 6,700억원 규모였으며, 2030년에는 1조원의 규모로 성장할 전망임.
- 국내 단열재 시장은 유기계 단열재가 70%(EPS 포함), 무기계 단열재가 30% 정도를 차지하고 있는데, 유기단열재는 난연성 및 인체 유해성이나 자외선에 의한 품질저하 등의 문제로 인해 적용성에 대한 제한이 증가하고 있음. 특히 3층 이상 건축물에 대해 준불연 또는 불연인증 없이는 적용 불가.
- 결국, 차세대 국가 신성장동력 산업의 하나인 단열재 시장은 유기 단열재가 갖는 단점을 해결하면서 단열성능을 향상시킬 수 있는 새로운 기술을 요구하고 있음.

3) 기술적 중요성 : 원천기술에 대한 경쟁력 제고의 시급성

(1) 유기계 단열재의 내화성 및 내구성의 취약

- 건축물의 단열을 위해 가장 많이 사용되고 있는 발포 플라스틱계 유기재인 EPS의 경우 열전도율은 0.043 W/m·K수준으로 우수한 열전도율을 갖고 있지만, 화재에 취약함. 준불연 등급을 확보한 EPS의 제품들은 대부분 외피(철판 또는 흑연)에서 확보된 난연성능이므로 심재에서 화재에 취약한 구조를 가지고 있음.
- 건축물 단열을 위한 EPS 사용은 화재발생 시 대형화재로 발전(그림 1.4)하며, 이는 많은 인명과 재산 피해로 연계됨(의정부 아파트 화재, 대구 서문시장 화재 등).
- 진공 단열재는 유리섬유를 주원료로 하며, 단열성이 높아 두께를 현저하게 감소시킬 수 있음. 이에 따라 타 제품 대비 더 넓은 주거공간의 확보가 가능함. 하지만, 진공단열재는 시공이 매우 어렵고 외피의 찢어짐으로 인한 가스가 누출 될 가능성이 높아 장기적인 환경에서 지속적인 단열성능 확보가 어려움.

(2) 무기계 단열재 기술에 대한 국내기술 수준 및 개선방향

- 일반적으로 사용되고 있는 무기계 단열재료인 경량기포콘크리트(ALC 포함)의 경우 압축강도 및 사용성을 고려하였을 때 약 0.13 W/m·K 이하의 열전도율을 얻기 어려울 뿐만 아니라, 모서리파괴, 균열발생 및 방습성 저하 등의 사용성 문제가 있음(그림 1.5(a)와 (b)).
- 글라스 울, 미네랄 울 등의 무기단열재는 열전도율은 0.04 W/m·K 수준으로 우수하지만, 상당히 고가(250,000원/m^3)일 뿐만 아니라 고흡수성으로 수분의 흡수에 의한 부피감소에 따른 장기적 단열성능의 저하되며, 특히 유리 가루로 인한 인체에 유해한 성분을 가지고 있어 단열재로의 적용에 한계가 있음.

(a) 외벽 단열재로 인한 화재 확산

(b) 가연성 단열재에 의한 화재 확산(대구)

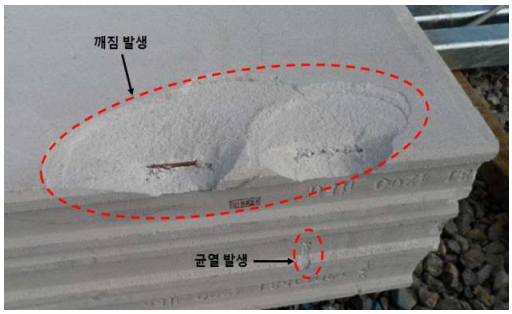
그림 1.4 유기단열재에 의한 화재확산 사고사례

- PC 판넬은 공장 생산제품으로 대량 생산 및 건설비용을 저감할 수 있지만, 콘크리트의 높은 단위용적중량으로 단열성 확보에 한계가 있음.
- 따라서 언급한 판넬들의 장기적인 환경에서 내화성, 내구성, 단열성능과 높은 단위용적중량의 문제점을 해결할 수 있는 경량성, 내구성 및 단열성을 갖춘 무기계 기반의 콘크리트 판넬의 개발이 필요함.

(3) 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 개발의 필요성

(3.1) 배합설계 측면

- 콘크리트의 단열성능은 기건 밀도에 매우 중요한 영향을 주는 요인이므로 판넬에서 소요 단열성을 확보하기 위해서는 1~1.3 g/cm^{3}의 낮은 수준의 기건 밀도가 요구됨.
- 또한, 콘크리트 판넬은 높은 노무비 절감 및 제품상의 품질관리를 위해서 공장의 PC 공정이 요구됨.
- 콘크리트 PC 판넬에서 배합상의 품질관리를 위한 공장의 PC공정은 가능하지만, 소요단열성능을 확보하면서 기건 밀도의 감소는 높은 단위용적중량을 갖는 콘크리트의 재료 특성측면에서 현실적으로 불가능함.
- 콘크리트 수준에서 기건 밀도를 감소시킬 수 있는 유일한 방법은 투입되는 재료들의 중량을 감소시키는 방법임. 이를 위해 천연골재 보다 비중이 상대적으로 낮은 점토질계 또는 산업부산물계의 경량골재 계열이 주로 사용되고 있음. 특히 바텀애시 골재의 비중은 0.93~1.52로 경량골재 중에서 가장 가볍지만, 이를 이용한 콘크리트의 기건 밀도는 1.4~1.8 g/cm^{3}의 범위의 수준으로 콘크리트 판넬에서 단열성확보를 위해 필요한 기건 밀도보다 높은 수준에 있음.
- 이에 따라 콘크리트 수준의 단열성능을 더욱 향상시키기 위해서 기건 밀도를 저감시키는 방법은 저량의 기포를 첨가하는 것이 추천될 수 있음. 콘크리트 체적 대비 40% 수준으로 첨가되는 기포는 경량골재 콘크리트의 기건 밀도를 약 0.25~0.5 g/cm^3 저감시킬 수 있으므로 콘크리트 판넬에서 단열성 확보를 위해 최소로 필요로 하는 기건 밀도의 범위를 만족 시킬 수 있음.
- 기포 콘크리트는 단열성 확보를 위해 70~80%의 기포로 이루어져 있어 일반 콘크리트보다 높은 흡수율과 압축강도 및 균열저항성이 낮음. 이에 따라 시공시 균열 및 파괴가 발생할 수 있음.
- 국내의 시멘트 생산량은 2012년에 46,800만 톤에서 2016년에 56,700만 톤으로 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 시멘트 1 톤 생산 시 이산화탄소(CO_2) 발생량은 약 0.9 톤임을 감안할 때 건설 산업에서 발생되는 CO_2 배출량도 지속적으로 증가하고 있음(그림 1.6).
- 건설산업에서도 국제적 정서흐름에 부합하게 탄소배출량 및 환경부하에너지를 절감시키기 위해서 다양한 측면에서 기술개발이 진행되고 있음. 특히 산업부산물을 이용한 시멘트의 사용량의 저감은 이산화탄소 배출량을 직접적으로 감소시킬 수 있는 재료적 측면의 지속가능형 기술로 인정받고 있음.
- 따라서 고단열·지속가능 경량 콘크리트 PC 판넬의 경제적이면서 실용적인 배합설계 개발을 위해서는 시멘트 사용량을 줄이면서 바텀애시 골재와 저량의 기포의 융합 기술은 좋은 대안이 될 수 있음.



(a) ALC 패널 깨짐 및 균열 발생

(b) 습기 흡수에 따른 처짐 발생

그림 1.5 무기단열재 사용의 문제점

(3.2) 열메타 기술 융합의 필요성

- 일반적으로 이용한 경량골재 콘크리트를 이용한 PC 판넬의 열관류율은 두께 200 mm와 300 mm 에서 각각 2.215와 1.665 W/m^2·K으로 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율 기준 보다 약 90% 낮음.
- 정부의 중부지방의 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율을 만족하기 위해서는 PC 판넬의 두께가 약 3,000 mm가 요구됨. 따라서 건설산업의 콘크리트의 기술로만으로는 PC 판넬 단열성의 확보에 한계가 있음.
- 열메타는 열전도성이 낮은 소재를 망상형 또는 판형으로 배치하여 열전달을 효율적으로 차단할 수 있는 구조를 가지고 있음. 콘크리트 내부에서 열전달 억제 역할을 하는 열메타 구조는 그 형상 및 배열에 따라 그 효율성이 다름(그림 1.7).
- 이를 이용한 콘크리트 내부에 설치되는 열메타 구조체는 화재 피해를 저감시킬 수 있으며, 기본적으로 난연등급을 확보할 수 있음.
- 따라서 콘크리트 단열의 한계를 극복하고 열전도성을 낮추면서 시공성 및 내구성 확보 등을 고려하면 콘크리트와 열메타 소재의 융합은 좋은 대안이 될 수 있음.

(3.3) PC 판넬 접합 모듈화 기술의 필요성

- PC 판넬은 상호 결합시 열교현상을 고려한 접합상세가 적용되지 않을 경우 단열성능이 오히려 저하될 수 있으므로 이를 고려한 접합상세 개발이 필요함.
- 또한, 이들의 접합상세 기술은 PC 판넬의 현장 시공성과 경제성에 직결되므로 현장조건을 반드시 고려하여야 함.

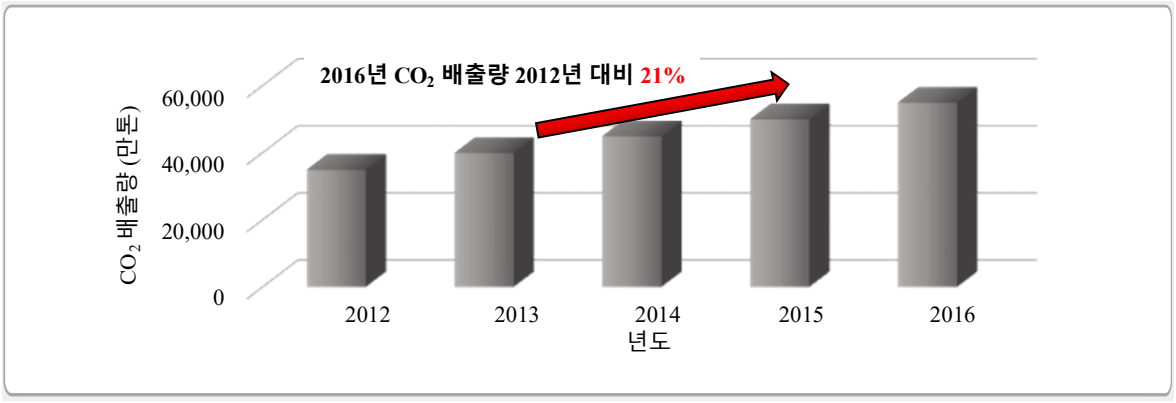


그림 1.6 년도별 이산화탄소 배출량

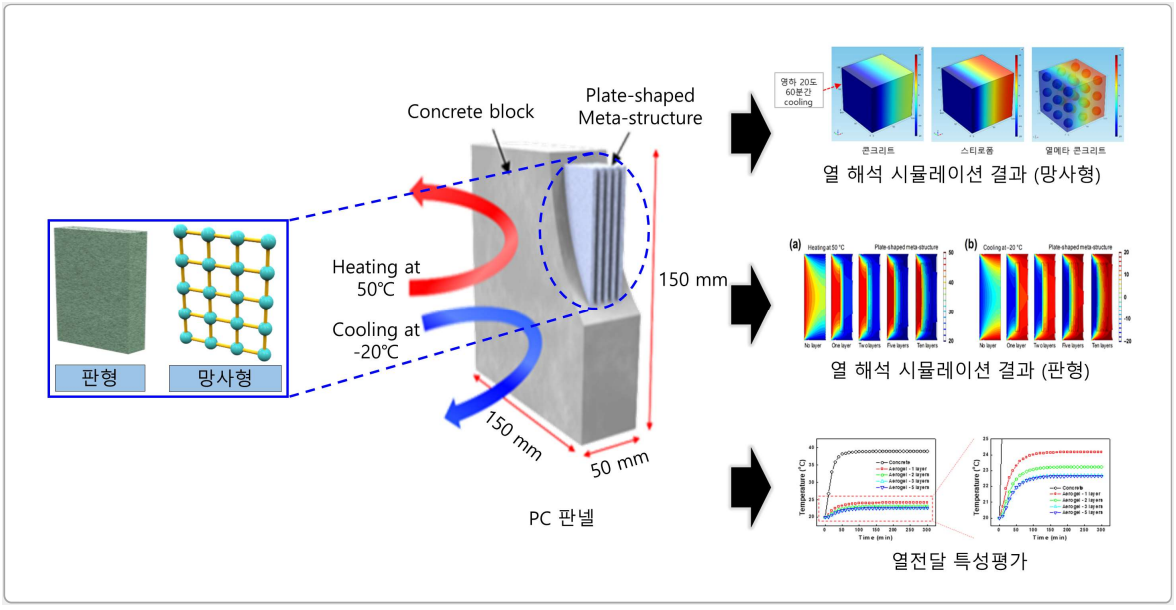


그림 1.7 열메타 구조를 삽입한 콘크리트 판넬의 단열성 향상 아이디어

(3.4) 사용성 및 풍하중에 대한 구조적 안전성 확보를 위한 단면 설계기술의 필요성

- 일반적으로 콘크리트를 기반으로 하는 PC 판넬은 건조수축이 동반될 수밖에 없으며, 그 수축량이 과다할 경우 이에 따른 균열이 발생할 수 있음.
- 또한 PC 판넬은 외장재로 사용될 경우에는 외부환경에 의해 발생된 외력에 대해서 충분한 저항성을 가지고 있어야 함. 특히 풍하중은 PC 판넬의 구조적 안전성과 직결되는 요인이므로 이를 반드시 확보하여야 함.
- 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 적용될 기포와 바텀애시 골재가 융합된 콘크리트의 건조수축 저항성 및 휨 강도가 보통콘크리트 보다 낮을 수 있기 때문에 이를 제어할 수 있는 기술이 필요함.
- 콘크리트를 기반한 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 건조수축제어와 풍하중에 대한 저항성을 향상시키기 위해서는 인장강도를 확보하여야 함. 콘크리트의 인장강도를 향상시키기 위해서 가장 일반적이고 경제적인 방법은 인장재를 배근하는 방법임. 특히 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 전체크기, 피복두께, 열메타의 간섭 등 설계적·시공적 측면을 고려하였을 때 가장 배근이 단순하면서도 인장향상효과가 우수한 용접철망 배근이 하나의 대안이 될 수 있음. 하지만, 용접철망의 단순배근은 열메타 소재와의 슬립으로 인해 인장향상효과가 미미할 수 있음. 따라서 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 용접철망과 열메타 소재와의 일체화를 고려할 수 있는 단면설계 기술이 요구됨.

1-3. 연구개발의 범위

1) 주관연구기관(경기대학교):

핵심 개발 목표	주요 연구활동	세부 연구내용
열메타 재질 및 구조배열의 최적화	■ 선행연구 조사/분석	• 열메타 구조의 최적 재료의 물리적 성능 및 원가 분석 • 열메타 관련된 선행논문 및 특허 분석 • 특허 출원을 위한 차별성 및 기술 확보
	■ 목표성능 및 주요 변수설정	• 열가소성 폴리머 및 금속소재 기반의 메타구조체 물질 스크리닝 • 고 비열용량/상변화 특성을 갖는 액체 또는 고체 충진 소재 스크리닝 • 열메타 및 실제 적용된 콘크리트의 재료들의 열적특성을 고려한 PC 판넬의 열전달 전산 시뮬레이션: 생산시스템 적용 사이즈인 가로와 세로의 길이가 150 mm이면서, 50 mm 두께의 판형 또는 망상형 열메타 구조체의 열전달/단열 평가 • 전산 시뮬레이션 기반의 열메타 형상 및 배치의 최적화 • 열메타구조물 지지체 최적화: 메타 구조체와 용접철망 결합방법 등을 최적화 하여 구조안정성 확보. • 열메타 구조체간 간격, 열단열 소재 종류 및 함량, 열메타 외피소재 등을 변화시켜 구조체 및 열단열 소재의 최적화된 열단열 특성을 확보함. • 열메타구조체 임베디드 콘크리트의 열전도율 평가
메타 구조의 생산 시스템 설계	■ 1차년도 연구결과 분석 및 보완방향 설정	• 1차년도 실험결과들에서 발생한 문제점들을 분석하고, 스크린테스트에서 통과된 조건들에 대한 최적화 작업 진행
	■ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 전산모사 최적화	• 열메타 재질 선정 및 스크리닝 • 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬을 적용시킨 열메타 콘크리트의 열전달/단열 시뮬레이션 • 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 기반의 열메타 구조체 배열 최적화 및 열전도율 평가
	■ 열메타 구조체 생산시스템 설계	• 열메타 콘크리트 생산시스템 설계 및 생산 최적화 • 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 기반의 열메타 배열/생산 최적화 • 열메타 구조의 제작 : 가로와 세로길이가 150 mm이면서, 50 mm 두께의 망상형 또는 판형구조의 열메타 구조체 • 열메타 재질 : 외피는 플라스틱, 내부는 열차단 소재
기포가 첨가된 바텀애시	■ 선행연구 조사/분석	• 내장재 및 외장재에 사용된 콘크리트 배합관련 선행논문 및 특허 분석 • 본 제안기술에 대한 특허 포트폴리오 구축 및 특허분석

골재기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 배합설계 및 성능 평가		• 특허 출원을 위한 차별성 및 기술 확보
	■ 목표성능 및 주요 변수설정	• 경량 콘크리트 특성(압축강도, 단위용적중량 및 열전도율)과 기포 콘크리트의 특성(소포, 공극률, 플로우, 압축강도 및 열전도율)을 고려한 기존 배합들의 분석 • 압축강도, 기건밀도 및 열전도율을 고려한 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 목표성능 설정
	■ 실내실험 및 특성평가 : 최적의 단위결합재량 및 기포 첨가량 선정에 중점	• 습식형 콘크리트 기반 실내 배합실험 • 주요 변수 : 물-결합재비, 결합재량 및 기포첨가량, 양생온도 이력 • 물리·역학적 특성분석 : 슬럼프, 소포량, 기포율, 밀도, 압축강도 발현, 응력-변형률 관계, 파괴계수 및 쪼갬인장강도, 열전도율 등 • 건조수축 거동 평가 : 자유건조수축율, 소성건조 및 구속건조수축율 평가
	■ 구조성능평가 : 휨 및 전단거동 평가	• 프리캐스트 경량콘크리트의 휨 및 전단거동 평가 • 주요 변수 : 전단경간비, 기포첨가량 및 철근비 • 측정 요소 : 파괴모드, 최대내력, 하중-처짐관계 및 연성
열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 단면상세 설계 및 구조성능 평가	■ 1차년도 연구결과 분석 및 보완방향 설정	• 1차년도 실험결과의 분석 및 문제점 분석: 실험결과에 대한 회귀분석 및 상호간의 영향성 예측, 문제점 발생에 따른 최적 해결 방안 모색
	■ 열메타 구조체 기반 PC 판넬의 단면상세 설계	• PC 판넬의 단면상세 설계 • 변수 : 용접철망과의 결합부에 대한 열메타 형상 및 용접철망 배근 위치 및 개수 • 주요 고려사항 : 초기균열, 최대하중 및 탄성계수
	■ 열메타 구조체 기반 PC 판넬의 구조성능 평가	• 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 구조성능평가 : 휨 및 전단거동 평가 • 주요 변수 : 열메타와 용접철망의 결합방법 및 용접철망 배치방법 • 분석 : 하중-변위관계 및 최대하중에 대한 KS 기준값과의 비교
	■ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬용 배합표 작성을 위한 예측 프로그램 작성	• 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬을 위한 콘크리트의 배합표 제시 프로그램 작성 • 주요 고려사항 : 역학적 성능, 열관류율, 경제성 등

2) 공동연구기관(아이에스동서):

핵심 개발 목표	주요 연구활동	세부 연구내용
개발된 배합에 대한 현장 목업(Mock-up) 실험과 단기 실용화 기반 구축	■ 선행연구 조사/분석	• PC판넬용 배합관련 선행연구 조사 및 데이터 수집·분석 : 국내외 선행연구 사례 조사 및 분석 (연구논문 및 특허기술 조사, 데이터베이스 구축)
	■ 목표성능 및 주요 변수설정	• 데이터베이스에서 구축된 결과를 기반으로 현장용 배합표 설정 • 주관기관에서 선정된 고단열·지속가능 배합에 대한 현장 목업(Mock-up)실험(공동연구기관의 현장장비를 활용한 고단열·지속가능 PC 판넬용 배합의 특성 평가) • 주요 변수 : 현장조건을 고려한 양생이력 • 고단열·지속가능 콘크리트 배합 재료들의 수급성 및 경제성 평가 : 콘크리트 구성재료 및 임베디드 메타소재에 대한 원가분석
제안 기술의 비즈니스 모델 제시	■ 선행연구 조사/분석	• PC 판넬에 대한 기존 국내·외 기술정리 • PC 판넬 및 유사 기술들의 성능과 원가분석
	■ 시작품 제작	• 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 시작품 제작
	■ 비즈니스 모델 제시	• 성과 기술의 경제성 평가 및 산업화 타당성 검토 • 제안 기술의 SWOT 분석 및 비즈니스 모델 제시
열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 생산 시스템 기반 구축	■ 열메타구조체 생산시스템 설계 및 생산설비 기반 구축	• 열메타구조체 특성 및 아이에스동서의 설비조건 등을 고려한 생산시스템 기반 구축: 양생조건 고려
	■ 실내 실험의 성과 분석에 기반한 산업화 방향 설정	• 제작, 운반 및 시공단계를 고려한 보완사항 피드백 • 현재 운영 중인 공장부지에 기술의 사업화를 위한 설비투자 타당성 검토

2. 연구수행내용 및 성과

2-1. 연구수행계획 및 달성사항

핵심성과	목표	달성(추가 달성사항)
열메타 구조체의 최적화 기술	▪ 열메타 형상 및 배치의 최적화 ▪ PC 판넬의 열 분석 시뮬레이션 ▪ 열메타 구조체 생산시스템 설계(시작품 제작)	▪ 열메타 형상 및 배치의 최적화 ▪ PC 판넬의 열 분석 시뮬레이션 ▪ 열메타 구조체 생산시스템 설계(시작품 제작)
기포와 바텀애시 골재기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 융합을 위한 최적의 배합기술	▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 최적의 배합표 제시 ▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 물리·역학적 특성 분석 및 모델 제시(슬럼프, 소포량, 밀도, 압축강도 발현, 응력-변형률 관계, 파괴계수, 쪼갬인장강도 및 열전도율) ▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 건조수축 거동 평가(자유건조수축, 소성건조수축 및 구속건조수축) ▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 휨 및 전단 거동 평가(파괴모드, 최대내력 및 하중-처짐관계)	▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 최적의 배합표 제시 ▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 물리·역학적 특성 분석 및 모델 제시(슬럼프, 소포량, 밀도, 압축강도 발현, 응력-변형률 관계, 파괴계수, 쪼갬인장강도 및 열전도율) ▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 건조수축 거동 평가(자유건조수축, 소성건조수축 및 구속건조수축) ▪ 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 휨 및 전단 거동 평가(파괴모드, 최대내력 및 하중-처짐관계) ▪ <u>기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 시공줄눈 유·무에 따른 전단마찰거동 평가 및 모델제시(파괴모드, 전단하중-상대 미끄러짐관계 및 최대 전단마찰 내력)</u> ▪ <u>EPS가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 최적의 배합표 제시</u> ▪ <u>EPS가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 물리·역학적 특성분석(밀도, 압축강도 발현, 응력-변형률 관계, 파괴계수, 쪼갬인장강도 및 열전도율)</u>
사용성과 구조적 안전성을 고려한 열메타 기반 PC 판넬 설계	▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 단면상세 제시(열메타 형상 및 용접철망 배근 위치 및 개수 최적화) ▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 휨 및 전단 거동 평가(파괴모드, 최대내력 및 하중-처짐관계) ▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 열전도율, 역학적 특성 및 경제성을 고려한 엑셀 프로그램 제작	▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 단면상세 제시(열메타 형상 및 용접철망 배근 위치 및 개수 최적화) ▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 휨 및 전단 거동 평가(파괴모드, 최대내력, 하중-처짐관계, <u>변위연성비, 균열모멘트, 최대내력 및 내력등급</u>) ▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 열전도율, 역학적 특성 및 경제성을 고려한 엑셀 프로그램 제작 ▪ <u>열메타 구조체(단열재)의 유한요소해석</u>

		을 이용한 쉘의 두께 및 크기의 최적화 ▪ 열메타 구조체의 라미네이트 부착 여부에 따른 콘크리트 지압성능 평가
열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 생산 시스템 기반 구축	▪ 고단열·지속가능 콘크리트 배합에 대한 현장목업 실험 및 역학적 특성 평가(압축강도 및 열전도율) ▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 비즈니스 모델 제시 (시작품 제작, 기존 기술과의 성능 및 경제성 비교) ▪ 열메타 구조체의 특성 및 설비 조건을 고려한 PC 판넬의 제작 가이드라인 제시	▪ 고단열·지속가능 콘크리트 배합에 대한 현장목업 실험 및 역학적 특성 평가(압축강도, 열전도율, 슬럼프, 밀도, 압축강도 발현율, 쪼갬 인장강도 및 파괴계수) ▪ 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 비즈니스 모델 제시(시작품 제작, 기존 기술과의 성능 비교, 경제성 비교, 시공성평가 및 특허맵 분석) ▪ 열메타 구조체의 특성 및 설비 조건을 고려한 PC 판넬의 제작 가이드라인 제시 ▪ 풍하중을 고려한 PC 판넬 간의 접합상세 제시 ▪ 단기 실용화 기반 구축(현장을 고려한 실무용 엑셀 프로그램 제작, 배합설계 작성 및 재료의 수급성 평가)

I 열메타 재질 및 구조배열의 최적화(경기대학교)

1. 고단열 경량콘크리트 PC 패널용 열메타 구조체 개발

1.1 열메타

- 메타 물질은 자연에 존재하지 않는 특성을 실현하기 위해 빛의 파장보다 훨씬 작은 크기의 금속 또는 유전체 물질로 설계된 메타 원자의 주기적 배열로 구성됨.
- 메타 물질은 기존의 자연 소재로는 불가능한 방식으로 빛과 소리에 상호 작용하도록 설계되며, 투명 망토, 고성능 렌즈, 효율적인 소형 안테나 및 초민감 센서와 같은 새로운 응용 분야에 적용 할 수 있음.
- 메타 물질은 빛뿐만 아니라 전자기파 및 음파와 같은 일반파의 전파를 차단할 수 있어 스텔스 기능을 구현할 수 있음. 메타 물질의 종류는 동작 파장과 그 기능에 따라 다양하게 정의 될 수 있으며, 크게 전자기파, 음파 및 지진 메타 물질로 나눌 수 있음.
- 최근에는 메타 물질의 적용 범위가 열 제어에 대한 연구로 확대되었음. 특히 열을 발생시키는 전자소자에 메타 물질을 적용할 경우, 회로 동작 시 발생한 열이 주변 회로로 전달되는 것을 방지함으로써 열로부터 회로를 보호 할 수 있음.
- 이러한 판형 메타 구조의 열 제어 특성을 높은 단열 특성이 필요한 건축물에 적용하려는 필요성이 요구되고 있음.
- 특히, 판형 메타 구조는 반복적인 패턴을 통하여 열에너지의 흐름을 간섭하여 감쇄 및 차단시키며, 밀폐된 공간을 통해 열전달을 억제 효과가 우수하며, 메타의 크기, 주기성 및 배열성에 따라 열차단 효율을 극대화 할 수 있음.
- 이에 따라 재료 및 배열이 최적화 된 판형 메타 구조는 콘크리트 내부에서의 열 차단을 통해 열전도율을 낮추는 데 효과적임.

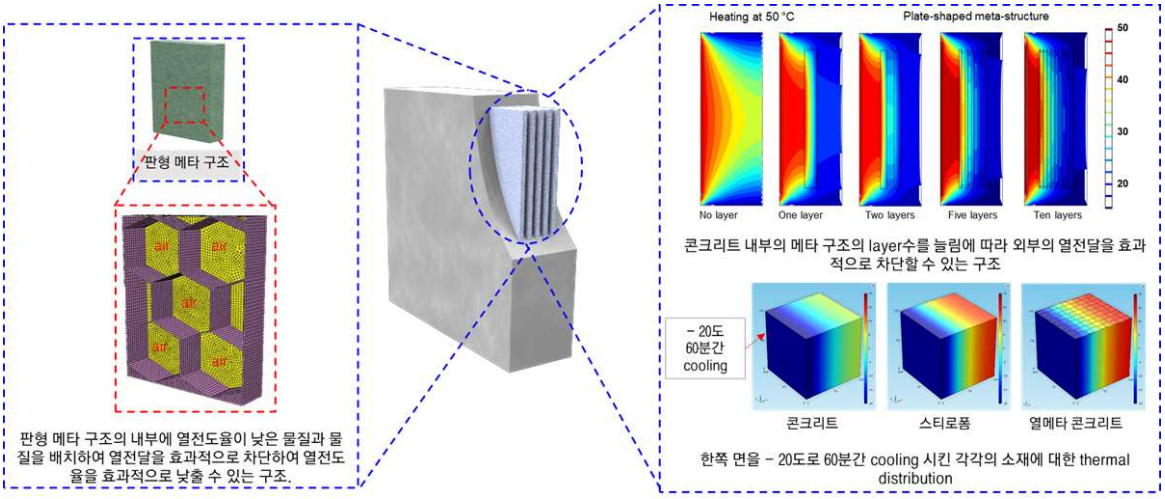


그림 1.1 판형 메타 구조의 열차단 매커니즘

1.2 기술 방향설정

- 산화물 코팅 금속 입자와 같은 복합 재료를 기반으로 하는 나노 스케일의 고밀도 회로에서 안정적인 전자 장치의 동작을 위한 열 확산 제어 기술은 매우 중요하게 생각되고 있음.
- 2006년에는 Miton 연구진이 메타 물질에서 열 확산에 대한 확산 방정식의 불변성을 발표하였음. 더불어, 2008년에는 열 망토와 관련된 논문이 보고되었음.
- 2012년부터는 열 플럭스 관점에서, 광자 물질 및 장치를 활용한 열 흐름 제어가 열 전기, 열 망토, 열 논리 게이트 및 열 다이오드를 포함하여 에너지 변환 및 현대 계산에 폭넓게 적용되어 감에 따라 메타 물질에 대한 연구가 점점 더 높은 관심을 가지고 있음.
- 전자 장치의 소형화 및 단열재를 포함한 콘크리트 벽의 두께를 줄이고자 하는 요구 속에서 더 작은 공간에서 더 높은 열 차폐 효과를 나타내는 새로운 메타 물질 기반 구조의 개발이 필요로 하고 있음.
- 건축물에 사용되는 콘크리트의 열 단열 효과를 높이기 위해, 판형 메타 구조를 단열재로 사용하여 콘크리트 블록에서의 열전달 제어 특성을 확인하였음.
- 유한차분법 기반의 Finite-difference time-domain (FDTD) 시뮬레이션을 통해 콘크리트 블록에 내장 된 판형 메타 구조에 따른 열 차단 효과를 비교하고자 하였음.
- 판형 메타 구조로 형성시킨 열 메타 구조 모델을 설계하고 가열 및 냉각 조건에서의 열전달 특성을 관찰하였음. 열 메타 물질을 기반으로 한 제안 된 박판형 메타 구조의 구조적 제어를 통하여, 콘크리트 블록 내에서 구조물의 열전달을 효과적으로 억제 할 수 있었고, 이를 통해 결과적으로 콘크리트 블록의 두께를 감소시킬 수 있음을 확인하였음.

1.3 판형 메타 구조의 열차단 평가

1.3.1 시뮬레이션 모델

- 고단열 소재인 스티로폼이 판 모양의 메타 구조로 삽입 된 콘크리트 블록에 대한 3차원 열전달 분석을 진행하기 위해 유한차분법 기반의 FDTD를 이용한 수치 시뮬레이션을 적용하였음. 열전도도 평가는 판형의 메타 구조에서 열 메타 소재를 스티로폼, 공기, 에어로겔 및 파라핀으로 다양화하며 시뮬레이션을 진행하였음. 3차원 열전달 분석에 사용한 이론적인 방정식은 다음과 같음.

$$Q + Q_{ted} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q \tag{1.1}$$

$$q = -k \nabla T \tag{1.2}$$

- 여기서 ρ는 밀도, Cp는 비열, T는 온도, k는 열전도도임. 계산에서 열전달은 열 메타 물질의 열전도도, 밀도 및 비열에 크게 의존함. 상용 절연체 재료로 사용되는 스티로폼의 경우, 콘크리트 블록과 비교하였을 때 열전도도와 밀도는 상대적으로 낮지만 비열은 높음. 정적 시뮬레이션에서 계산상 시간 경과는 무한대로 처리되므로 복합 재료의 열전도도가 계산에 중요한 요소로 사용됨. 그러나 시간의존 모델의 경우에는 재료의 밀도와 비열의 공간 분포가 중요한 역할을 함.

1.3.2 주요 물질의 변수

- 표 1.1과 같이 콘크리트, 스티로폼, 공기, 에어로겔 및 파라핀의 계산 변수를 산정하였음.

1.3.3 판형 메타구조 콘크리트 블록 제작

- 모든 소재들은 충분히 건조된 상태로 준비하였고, 용량 0.35 m^3의 믹서기로 1분 동안 시멘트와 함께 건식 혼합시켰음. 콘크리트 혼합물의 거친 골재 및 미세 골재로 최대 25 mm 크기의 불규칙한 자갈과 천연 모래를 사용하였음. 콘크리트의 목표 압축 강도 측정을 위해 물-시멘트비는 0.45로 맞추었음. 직경이 100 mm이고 높이가 200 mm로 제작한 제어 실린더 콘크리트 블록의 28일 경과 후 압축 강도와 건조 밀도는 각각 32 MPa와 2300 kg/m^3이었음.
- 콘크리트의 열전도도는 1.6 W/m · K로 확인되었음. 제작 된 콘크리트 블록의 크기는 150 × 150 mm^2이고, 콘크리트 블록에 삽입 된 판형 메타 구조의 크기는 120 × 120 mm^2이었음. 판형 메타 구조의 소재로 스티로폼 (styrofoam), 에어로겔 (aerogel) 및 공기가 사용되었음. IR 열 화상 카메라 (T-420, FLIR)를 사용하여 판 모양의 메타 구조가 적용된 콘크리트 블록의 온도 분포를 모니터링하여 열 적외선 (IR) 이미지를 캡처하였음.

1.4 연구 결과 및 분석

1.4.1 판형 메타 구조가 적용된 콘크리트 블록

- 기본 시뮬레이션 모델로 직사각형 평행 육면체 구조의 콘크리트 블록을 사용하였음. 열이 주입되는 x-y 평면의 크기는 150 × 150 mm^2이었고, 열전달이 발생하는 z 방향은 50 mm의 두께로 설정하였음.
- (그림 1.2(a)) 콘크리트 블록의 초기 온도는 20 ℃로 설정하였음. 시뮬레이션 조건을 실험 조건과 유사하게 만들기 위해 x-y 평면에서 콘크리트 블록의 측면을 50 ℃로 가열 또는 -20 ℃로 냉각하였고, 그 외 콘크리트 블록의 네 면은 20 ℃로 고정하였음.
- 그림 1.2(b)는 직사각형 평행 육면체 구조에 4개의 다른 판 모양의 메타 구조 (1, 2, 5, 10 층)가 삽입된 콘크리트 블록을 나타낸 것임.
- 각 판 모양의 메타 구조의 면적과 두께는 각각 120 × 120 mm^2와 10/5/2/1 mm (각각 1/2/5/10 층)이었음. 판 모양의 메타 구조는 스티로폼 소재로 이루어졌음. 판형 메타 구조층 사이의 간격은 각각 2층, 5층 및 10층에 대해 6, 3 및 2 mm이었음. 판 형태의 메타 구조의 틈새를 고려하지 않은 총 두께는 모든 조건에서 10 mm로 맞추었음.

1.4.2 판형 메타 구조의 열 흐름 시뮬레이션

- 판형 메타 구조의 수에 따른 열 흐름의 영향을 이해하기 위해 300분 동안 판형 메타 구조가 없는 콘크리트 블록과 네 가지 판형 메타 구조가 삽입된 콘크리트 블록, 총 5가지 조건에서의 온도변화를 시뮬레이션 진행하였음.

표 1.1 주요 물질의 특성

	Concrete	Styrofoam	Air	Aerogel	Paraffin
Density (kg/m^3)	2300	35	1.18 @ 20 ° C	25	777
Specific heat (J/(kg · K))	880	2300	1007	900	485
Thermal conductivity (W/(m · K))	1.8	0.035	0.024	0.03	0.35

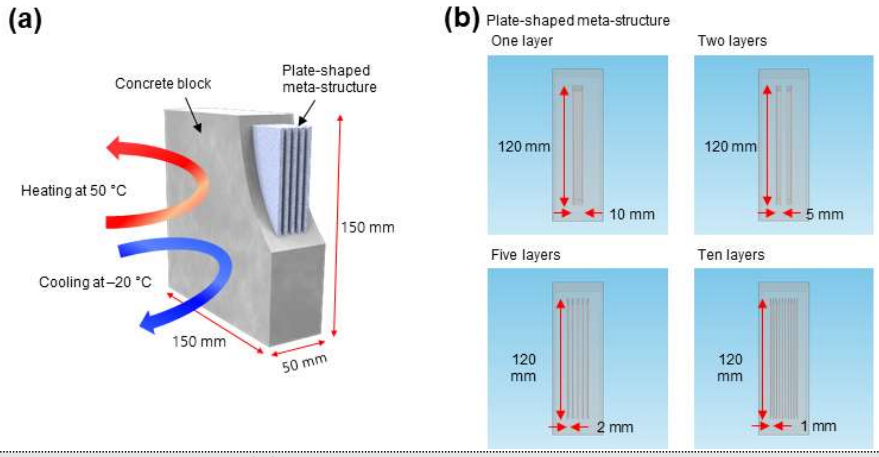


그림1.2 (a) 콘크리트 블록의 기본 시뮬레이션 모델
(b) 4개의 다른 판 모양의 메타 구조 (1, 2, 5 및 10층)

- 그림 1.3(a)에는 50 ℃의 가열 조건에서 5가지 판형 메타 구조에 따른 콘크리트 블록의 열 흐름 분포를 나타내었음. 그림과 같이 열은 주로 콘크리트 블록의 중앙을 따라 전달되었음. 콘크리트 블록에 판형 메타 구조를 매립 한 후에는 판형 메타 구조에 의해 열전달이 효과적으로 차단되고 반대편 평면으로 전달되는 열 흐름이 감소되었음.
- 판형 메타 구조의 층수가 증가함에 따라 콘크리트 블록의 반대편 평면으로 전파되는 열의 양이 감소한다는 것이 쉽게 관찰되었음. 반대편 평면의 정확한 온도 변화 결과를 비교하기 위해, 판 모양의 메타 구조가 없는 콘크리트 블록에 대해 0-300분간의 온도 변화를 시뮬레이션 하였음.
- 그림 1.3(c)는 판형 메타 구조의 조건별 50 ℃의 가열 시, 0-300 분 동안 콘크리트 블록의 반대편 평면에서의 온도 변화를 보여줌. 가열 조건에 대한 포화 온도는 아래 식으로 구할 수 있음.

$$T = 22.372 + 16.568 / [1 + \left(\frac{n}{0.11}\right)^{0.87}] \tag{1.3}$$

- 여기서 n은 절연체 층의 수임. 이 계산에 따르면, 포화 온도는 절연 층의 수가 증가함에 따라 감소함. 판 모양의 메타 구조가 없는 콘크리트 블록의 경우 반대편 평면의 온도는 가열 시작으로부터 100분 후에 38.9 ℃에서 포화 상태에 도달하였음.
- 판 모양의 메타 구조가 추가됨에 따라 포화에 필요한 시간이 증가하고 포화 온도가 1층의 경우 24.5 ℃에서 10층의 경우 22.67 ℃로 감소하게 됨.
- 그림 1.3(b)는 -20 ℃의 냉각 조건에서 5가지 판형 메타 구조에 따른 콘크리트 블록의 열 흐름 분포를 나타내었음. 열 흐름 현상은 가열 조건과 유사하였음.
- 그림 1.3(d)는 -20 ℃의 냉각 조건에서 0-300 분 동안 콘크리트 블록의 반대편 평면에서의 온도 변화를 보여줌. 초기 냉각 조건은 콘크리트 블록의 x-y 평면에서 한쪽은 -20 ℃로, 콘크리트 블록의 나머지 네 면은 20 ℃로 설정하였음. 냉각 조건에 대한 포화 온도는 다음과 같이 표현 할 수 있음.

$$T = 16.84 - 22.10 / [1 + \left(\frac{n}{0.11}\right)^{0.87}] \tag{1.4}$$

- 가열 및 냉각 조건에서의 열전달 차단 효과는 절연체 층의 수에 따라 향상되었음. 판형 메타 구조가

없는 콘크리트 블록의 경우 시간이 지남에 따라 온도가 초기 20 ℃에서 포화 후 -5.25 ℃로 상당히 낮아졌음.

- 포화 시간은 110분가량이었음. 단일 판형 메타 구조를 적용한 경우, 콘크리트 블록의 반대편 평면상의 온도는 0분에서 20 ℃이고 140분에서 14.02 ℃이었음. 2층과 5층의 경우 포화 온도는 각각 15.22 ℃와 15.99 ℃로 나타났음.
- 10층의 판형 메타 구조에서는 시간이 경과함에 따라 20 ℃에서 16.44 ℃로 온도 하락폭이 가장 작았음. 이 결과는 평판 형태의 메타 구조의 증가가 열전달을 억제하는 데 매우 효과적인 방법임을 나타냄.
- 다층 스택으로 배열 된 판 모양의 메타 구조는 열전도율이 낮아 열전달이 느려지고 콘크리트 블록에서의 열전달을 보다 효율적으로 억제 할 수 있음을 확인할 수 있었음.

1.4.3 메타 구조 콘크리트 블록의 두께에 따른 열 분포

- 콘크리트 블록의 두께 변화에 따른 열 차단 효과를 이해하기 위해, 각 판형 조건별 콘크리트 블록에서 삽입된 메타 구조체는 유지한 채 전체 콘크리트 블록의 두께를 50 mm에서 40 mm로 1 mm 간격으로 줄여나가면서 반대편 평면으로의 온도 전달 변화를 확인하였음.
- 그림 1.4은 콘크리트 블록의 두께에 따른 반대면 포화온도 추이를 보여주고 있음. 가열 모드의 경우, 그림 1.4(a)과 같이 4개의 조건별 판형 메타 구조가 적용 된 모든 경우에서 콘크리트 블록의 두께가 감소할수록 온도 차단 효과가 감소하고, 따라서 전파 된 포화온도가 상승하였음.
- 판형 메타 구조의 수가 감소함에 따라, 콘크리트 블록의 반대쪽으로 전파된 포화온도가 증가함을 알 수 있었음. 50 mm 두께의 콘크리트 블록에 단 하나의 판 모양의 메타 구조가 매립되었을 때, 콘크리트 블록 반대쪽의 온도는 24.51 ℃로 증가하였음. 반면, 2개의 판형 메타 구조가 사용되었을 때, 반대면이 24.50 ℃의 온도를 유지하기 위한 콘크리트 블록의 두께는 45 cm 이하로 감소 될 수 있었음.
- 판형 메타 구조를 한 층 사용할 때와 유사한 온도에 도달하기 위한 콘크리트 블록의 두께는 5개의 층이 사용될 때 41 mm로 감소 될 수 있고, 10개의 층이 사용될 때는 40 mm 이하까지 두께 감소가 가능하였음. 따라서 콘크리트 블럭에 10개의 판형 메타 구조를 매설 할 경우 열 차단이 보다 효율적으로 이루어져 동일한 열 차단 상황을 고려하였을 때, 콘크리트 블록의 두께를 줄임으로써 건물을 설계 시 내부 거실 면적 비율을 증가시킬 수 있다는 장점이 있음. 그림 1.4(b)는 콘크리트 블록의 두께에 따른 냉각 모드에서의 온도 변화를 나타내었음. 가열 모드와 유사하게, 콘크리트 블록의 두께가 감소함에 따라 포화 온도가 낮아져 단열 효과가 감소하는 경향을 보였음.
- 단일 판 모양의 메타 구조가 적용 된 50 mm 두께의 콘크리트 블록에서 한 면을 -20 ℃로 냉각시켰을 때, 반대쪽 표면의 온도는 14 ℃로 떨어졌음. 2개의 판 모양의 메타 구조를 사용할 때 콘크리트 블록의 두께는 판 모양의 메타 구조의 1층과 같은 14 ℃의 온도를 유지한다면 45 mm로 줄일 수 있음. 콘크리트 블록의 두께는 5층의 경우 42.5 mm로, 10층의 경우 40 mm로 줄어들 수 있었음.

1.4.4 메타 구조에 적용한 소재별 열전달 특성 변화

- 판형 메타 구조의 확장하기 위해 5층의 메타 구조에 네 가지 열 메타 소재로 스티로폼, 파라핀, 에어로겔 및 공기를 적용하여 비교하였음.
- 그림 1.5(a)와 1.5(b)는 50 ℃의 가열 조건에서 스티로폼, 파라핀, 에어로겔 및 공기 적용 시 콘크리트 블록 반대편 평면상의 온도 변화를 보여주고 있음.

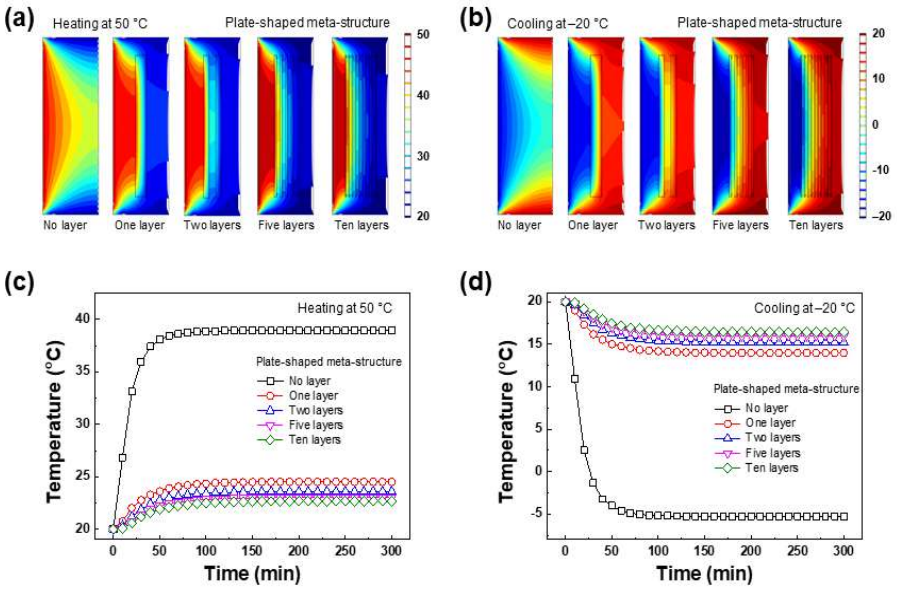


그림 1.3(a) 50 ℃의 가열 조건에서 층수별 판형 메타 구조 콘크리트 블록의 열 흐름 분포.(b) -20 ℃의 냉각 조건에서 층수별 판형 메타 구조 콘크리트 블록의 열 흐름 분포. (c) 50 ℃의 가열 조건에서 0-300 분에 걸쳐 콘크리트 블록 반대편 평면의 온도 추이. (d) -20 ° C의 냉각 조건에서 0-300 분에 걸쳐 콘크리트 블록 반대편 평면의 온도 추이.

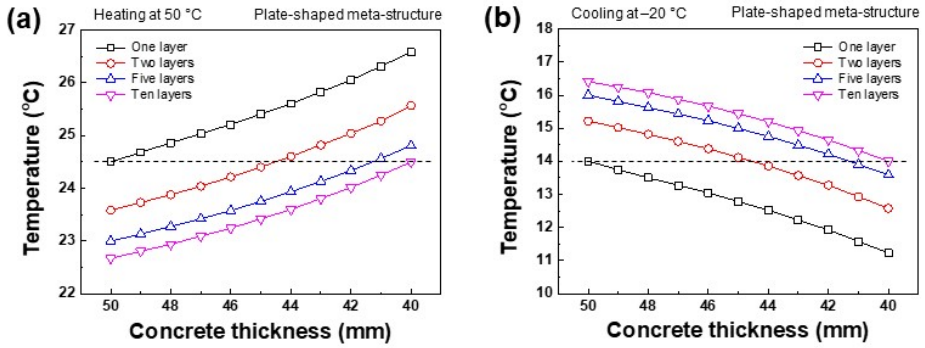


그림 1.4 콘크리트 블록의 두께를 변경에 따른 4개의 다른 층수별 메타 구조 (1, 2, 5 및 10 층)가 포함 된 콘크리트 블록의 포화온도. 콘크리트 블록 한 면에 적용한 설정 온도 값은 (a) 50 ℃와 (b) -20 ℃임.

- 첫 번째로 공기 및 에어로겔 기반 판형 메타 구조의 열 차단 효과가 스티로폼 및 파라핀 기반 판형 메타 구조보다 효율적으로 나타났음. 포화 온도는 에어로겔 및 공기 기반 판형 메타 구조에서 각각 22.65 ℃ 및 22.41 ℃이었음.
- 에어로겔 기반 판형 메타 구조의 포화온도는 콘크리트 블록의 기존 단열재인 스티로폼을 기반 판형 메타 구조와 비교하였을 때, 0.6 ℃ 더 낮게 유지되었음.
- 파라핀의 경우 열 흐름 차단 효과는 스티로폼의 경우보다 좋지 않은 특성을 보였음.
- 그림 1.5(c)와 1.5(d)는 -20 ℃의 냉각 조건에서 다양한 절연체 재료의 적용에 따른 반대편 평면상의 온도 변화를 나타내었음.
- 공기 및 에어로겔 기반 판형 메타 구조의 열 차단 효과가 스티로폼 기반 판형 메타 구조의 열 차단 효과보다 더 효율적임을 관찰 할 수 있었음.
- 에어로겔 기반의 판 모양의 메타 구조는 20 ℃에서 16.47 ℃로 온도 감소가 적게 나타났음. 공기 기반 판형 메타 구조의 경우 포화 온도는 16.96 ℃이며 스티로폼 기반 판형 메타 구조보다 약 1.0 ℃ 높았음.

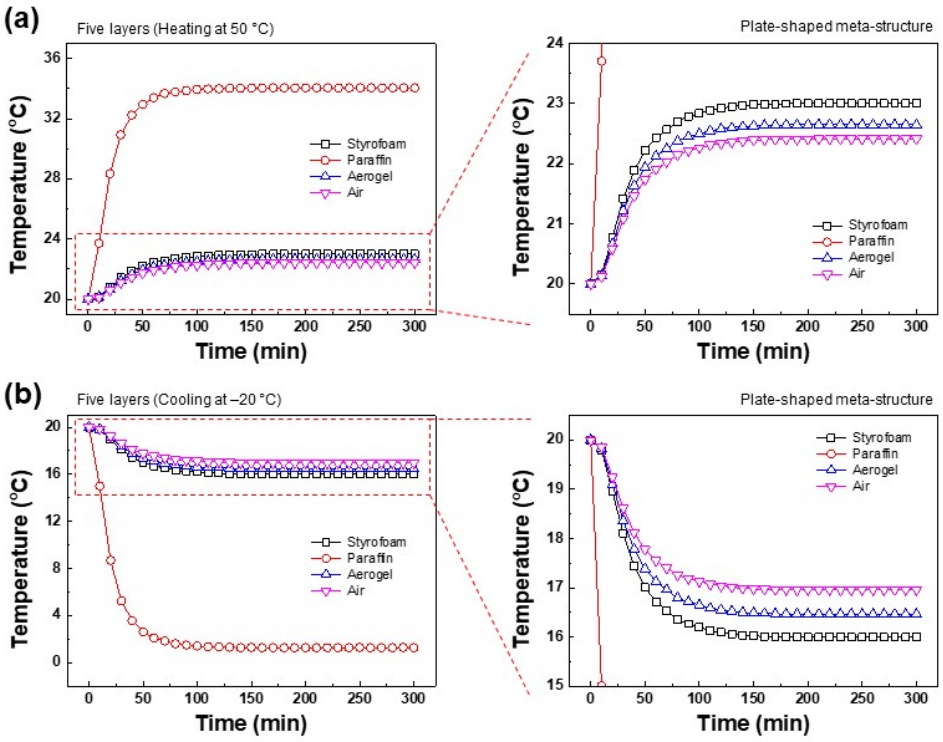


그림 1.5(a) 50 ℃ 가열 및 (b) −20 ℃ 냉각에서의 4가지 다른 소재 (스티로폼, 파라핀, 에어로겔 및 공기) 적용에 따른 판형 메타 구조에서의 온도 변화 추이

- 이러한 결과는 공기와 에어로겔 기반의 판형 메타 구조에서 공기와 에어로겔의 밀도와 열전도율 특성이 열전달을 억제하는데 있어 스티로폼을 기반으로 하는 판형 메타 구조보다 훨씬 더 효율적이라는 것을 보여줌.
- 연구 결과 열전달 특성은 메타 소재의 열전도도, 밀도 및 비열에 영향을 받았음. 또한, 열전달에 영향을 미치는 3가지 요인 중 열전도도가 가장 큰 영향을 미치고 밀도와 비열이 다음 순서로 나타났음.

1.4.5 소재별 메타 구조체의 실제 단열 특성 평가

- 그림 1.6a)는 판형 메타 구조의 적용 소재별 콘크리트 블록의 열 흐름에 따른 온도 변화 특성을 보여줌. 실험에 적용된 판형 메타 구조는 스티로폼 1층, 스티로폼 5층, 에어로겔 5층 및 공기 5층으로 구성하였음.
- 하나의 층을 갖는 메타 구조의 경우, 층의 총 두께는 10 mm이었음. 5개의 층을 갖는 메타 구조의 경우, 각각의 층은 2 mm두께이고, 총 두께는 10 mm이었으며, 층 간격은 2 mm로 유지시켰음.
- 콘크리트 블록의 한 면을 50 ℃로 가열하고 콘크리트 블록의 반대면의 온도 변화를 0-120분 동안 측정하였음. 평균 온도를 추출하기 위하여 콘크리트 블록 (70 × 70 mm^2) 내 9 포인트에서 온도를 측정하였음.
- 주위 온도는 22 ℃로 유지되었고 상대 습도는 70% RH로 유지되었음. 120분 후 콘크리트 블록의 온도는 38.1 ± 0.2 ℃ (메타 구조 미적용 콘크리트 블록), 26.7 ± 0.5 ℃ (스티로폼 1층), 25.9 ± 0.3 ℃ (스티로폼 5층), 25.5 ± 0.2 ℃ (에어로겔 5층), 23.9 ± 0.4 ℃ (공기 5층)로 관측되었음.
- 모든 샘플의 온도는 콘크리트 블록 내부에 존재하는 불순물, 균열 및 공기와 같은 이상적이지 않은 요인에 의해 열전달이 방해되었기 때문에 시뮬레이션 결과와 비교하여 2 ℃ 내에서 약간의 변동이 있었음. 그럼에도 불구하고, 이전의 시뮬레이션 결과와 유사하게, 열전달은 공기 5층, 에어로겔 5층,

스티로폼 5층, 스티로폼 1층 및 메타 구조 미적용의 순서로 낮게 나타났음.

- 콘크리트는 약 20 %가 기공으로 이루어진 다공성 구조로, 기공 크기는 20A ~ 1000 ㎛이었음. 수화 반응 및 시멘트와 물 사이의 건조 수축 중에 생성 된 거대 다공성 공극은 콘크리트에서 상호 연결됨.
- 일반적으로 다공성 구조의 열전달 특성은 기공 크기, 연결성 및 부피 비에 따라 달라짐.
- 특히, 미세한 기공이 있는 구조물에 열에너지를 전달하는 가스 분자의 평균 자유 경로는 거시적인 기공이 있는 구조물에 열에너지를 전달하는 가스 분자의 길이보다 짧아서 가스 확산이 적어 결과적으로 열전달 효율이 낮음.
- 그림 1.6에서 보듯, 큰 크기의 상호 연결된 기공이 있는 기존의 콘크리트는 높은 열전도도 때문에 가장 큰 온도 변화를 보여주는 반면, 미세 기공에 의한 열대류를 막을 수 있는 열전도도가 낮은 물질과 높은 비열을 가진 물질은 열전달을 보다 효과적으로 차단할 수 있음. 그림 1.6에서 볼 수 있듯이 스티로폼 (낮은 열전도도, 0.035 W/m · K)이 메타 층으로 사용 된 경우, 하나의 스티로폼 층이 적용된 콘크리트 블록의 열전달은 기존메타 층 미적용 콘크리트 블록 (열전도도 1.8W / m · K)보다 낮았음.
- 또한, 5개의 메타 층으로 주기적으로 배열 된 스티로폼 5층의 열전달 특성은 스티로폼 1층의 열전달보다 낮게 나타났음. 에어로겔 (열전도도 0.03 W/m · K)을 열전달 물질로 사용하면 90 %의 공기를 구성하는 에어로겔 내부의 미세 기공으로 인해 열전달이 보다 효과적으로 차단되었음. 공기로 채워진 열메타 구조는 공기의 낮은 밀도와 열전도도 (열전도도 0.024W/m · K)로 인해 열전달을 가장 효과적으로 차단할 수 있었음.
- 그림 1.6(b)는 판형 메타 구조 조건별 50 ℃ 조건 하에서 120분경과 후 IR 열화상 카메라를 사용하여 얻은 콘크리트 블록의 열 분포를 보여주는 열적외선 이미지임. 온도 범위는 최소 표시 청색 막대 (20 ℃)에서 최대 표시 빨간색 막대 (45 ℃)로 설정되었음.
- 그림에서 볼 수 있듯이 콘크리트 블록 (150 × 150 mm^2)에 삽입 된 판형 메타 구조 (120 × 120 mm^2)에 사용 된 메타의 층 수 및 소재에 따라 다른 온도 특성이 나타났음. 메타 구조 미적용 콘크리트 블록의 경우, IR 열화상 카메라를 사용하여 측정 된 온도는 38.5 ℃이었음.
- 이에 반해 판 모양의 메타 구조가 적용된 콘크리트 블록의 온도는 27.4 ℃ (스티로폼 1층), 26.6 ℃ (스티로폼 5층), 26.0 ℃ (에어로겔 5층) 및 23.4 ℃ (공기 5층)로 확인되었음.
- 그림 1.6(a)와 그림 1.6(b)에서 측정 된 온도가 다르게 나타남은 콘크리트 블록의 온도 측정에 사용된 방법이 다르게 적용되었기 때문임.
- 그림 1.6(a)는 직접 접촉식으로 측정되었고, 그림 1.6(b)는 비접촉식 방법으로 측정하였음. IR 이미지의 온도는 그림 1.6(b)의 각 이미지의 오른쪽에 표시된 온도 막대에서 20-45 ℃의 범위로 표시되었음.
- 온도 표시 줄의 빨간색은 고온을 나타내고 파란색은 저온을 나타내었음. 판형 메타 구조가 없는 콘크리트 블록은 고온에서 붉은 색으로 표시되는 반면, 판형 메타 구조를 가진 콘크리트 블록은 저온에서 파란색으로 표시되었음.
- 특히, 공기 5층이 적용된 콘크리트 블록은 가장 어두운 파란색으로 표현되며, 이는 가장 우수한 단열 효과를 가지고 있음을 확인하였음. 이 결과는 위에서 설명한 열전달 효과 시뮬레이션과 일치하는 결과임.
- 본 연구에서 제안 된 판형 메타 구조는 재료 및 배치 방법에 따라 열전달을 효과적으로 차단하고 열전달 억제 능력을 향상시킬 수 있었음. 이를 통해 결과적으로 동일한 단열 특성인 경우 기존의 절연 구조보다 얇은 콘크리트 두께를 만들 수 있었음.

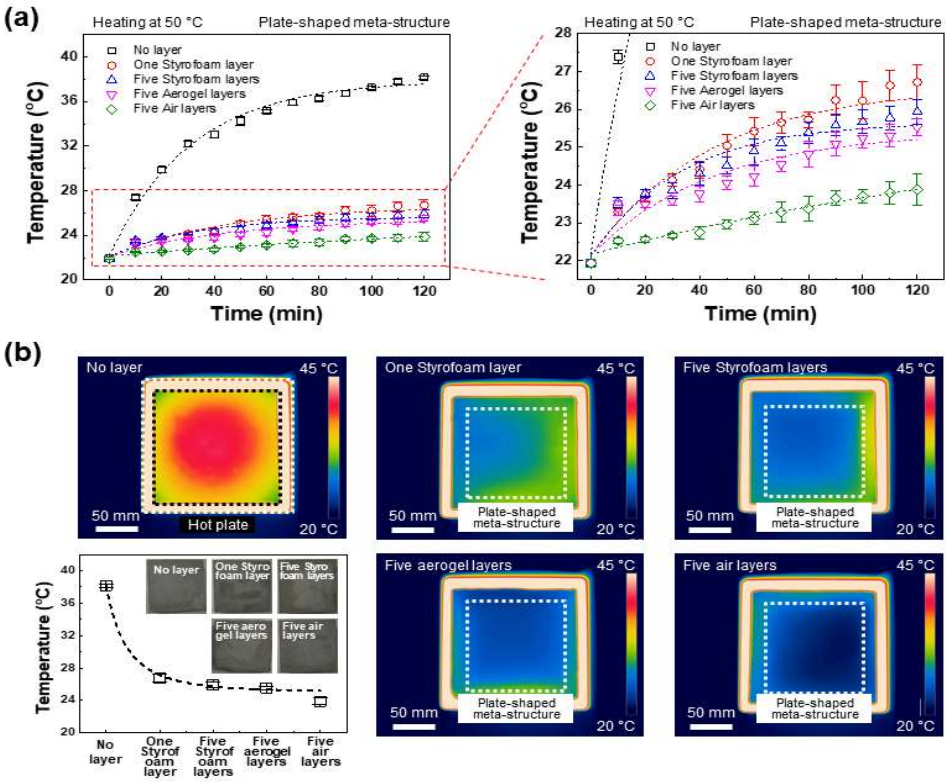


그림 1.6 50 ℃ 가열하는 조건 하에서 스티로폼 1층, 스티로폼 5층, 에어로겔 5층, 공기 5층의 총 4개의 다른 조건의 메타 구조가 내장 된 콘크리트 블록 반대편 평면상의 (a) 온도 변화 그래프 및 (b) 적외선 열화상 이미지.

1.5 요약

- 콘크리트 블록의 열전달을 제어하기 위한 판형 메타 구조 및 열 메타 소재별 열 확산 시뮬레이션을 진행하였음. 평판 형태의 메타 구조를 적용 시 콘크리트 블록에서의 열전달을 효과적으로 억제 할 수 있다는 것을 계산적으로 입증하였음. 동일한 전체 두께에 대해, 가열 및 냉각 조건 하에서 주기적인 판 모양의 메타 구조의 배열을 증가시킴으로써 열전달을 차단하는 효과는 향상되어 결과적으로 열전달을 느리게 만듦을 확인하였음. 열 차단 효과는 판형 메타 구조 10층을 콘크리트 블록에 적용 시 가장 효율적이며, 이는 콘크리트 블록의 전체 두께를 줄일 수 있어 건물 건축 시 거실 면적 비율이 증가시킬 수 있게 됨. 또한 열 메타 구조체의 소재를 스티로폼, 파라핀, 에어로겔 및 공기로 변화시켜 각 조건에 대한 열 차단 효과를 시뮬레이션 진행하였음. 공기 및 에어로겔 판형 메타 구조의 경우 스티로폼 및 파라핀을 기본으로 하는 메타 구조에 비해 열전달이 효과적으로 억제됨을 확인하였음. 본 연구에서 소개 된 판형 메타 구조에 대한 열 차단 효과는 좁은 공간에서 높은 단열을 필요로 하는 제품군에 적용될 수 있음. 특히 콘크리트 블록의 두께를 줄임으로써 집안의 공간을 넓히고 동일한 단열 효과를 나타낼 수 있는 장점이 있음.

2. 판형 메타 구조의 간격 조절을 통한 열 차단 평가

2.1 시뮬레이션 모델

- 앞선 결과를 통하여 판 모양의 메타 구조로 삽입 된 콘크리트 블록은 단열효과가 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었고, 메타 구조로 활용되는 소재에 따라 단열효과가 다르게 나타나는 것을 확인하였음.
- 판형 열메타 구조체에서 열적 흐름을 보다 크게 억제시키기 위해 판형 열메타 구조체의 간격 조절을 통해 단열효과가 개선된 고단열 구조체에 대한 시뮬레이션을 진행하였음.
- 설계된 고단열 구조체에 대한 시뮬레이션은 3차원 시간영역 유한차분기법 (Finite-difference time-domain method, FDTD)을 이용하여 수치해석을 진행하였음.
- 열전도도 평가 및 단열효율에 대한 평가는 판형 메타 구조체의 간격을 다양하게 조절하며 시뮬레이션을 진행하였음. 열전달 분석에 사용되는 Conduction heat flux 방정식은 $q = -k \nabla T$ 이며, Energy Equestion for Solid 방정식은 $Q + Q_{ted} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q$ 임.
- 이 두 방정식은 3차원 시뮬레이션 프로그램 내에서 열전달 및 단열효율에 대한 수치해석을 진행하였음. 여기서 ρ는 밀도, C_p는 비열, T는 온도, k는 열전도도임.
- 계산에서 열전달은 열 메타 물질의 열전도도, 밀도 및 비열에 크게 의존함. 상용 절연체 재료로 사용되는 스티로폼의 경우, 콘크리트 블록과 비교하였을 때 열전도도와 밀도는 상대적으로 낮지만 비열은 높음. 정적 시뮬레이션에서 계산상 시간 경과는 무한대로 처리되므로 복합 재료의 열전도도가 계산에 중요한 요소로 사용됨. 그러나 시간의존 모델의 경우에는 재료의 밀도와 비열의 공간 분포가 중요한 역할을 함.

2.2 주요 물질의 변수

- 표 2.1과 같이 콘크리트, 스티로폼, 공기의 계산 변수를 산정하였음.

2.3 연구결과 및 분석

2.3.1 판형 메타 구조가 적용된 콘크리트 블록

- 아래 기본 시뮬레이션 모델로 직사각형 육면체 구조의 콘크리트 블록을 사용하였음.
- 열원이 가해지는 x-y 평면의 크기는 150 × 150 mm^2이고, 열전달은 진행되는 z 방향은 60 mm의 두께로 설정하였음(그림 2.1(a)).
- 콘크리트 블록에 열원이 가해지기 전의 초기 온도는 20 ℃로 설정하였음.
- 모든 시뮬레이션 조건에서 x-y 평면에서 콘크리트 블록의 측면을 50 ℃로 가열하였고, 그 외 콘크리트 블록의 네 면은 20 ℃로 고정하였음.

표 2.1 주요 물질의 계산 변수

	Concrete	Air
Density (kg/m^3)	2300	1.18 @ 20 ° C
Specific heat (J/(kg · K))	880	1007
Thermal conductivity (W/(m · K))	1.8	0.024

- 직사각형 평행 육면체 콘크리트 구조 내부에는 2 mm 두께의 판형 모양의 메타 구조를 5층 삽입하였음(그림 2.1(b) 참조).
- 각 판 모양의 메타 구조의 면적은 120 × 120 mm^2임. 판 모양의 메타 구조로는 앞선 연구에서 단열효율이 가장 좋았던 공기 소재를 사용하였음.
- 판형 메타 구조의 간격에 따른 열전도도 및 단열효율을 확인하기 위하여 판형 메타 구조의 간격은 d로 설정하였음.

2.3.2 판형 메타 구조의 간격 변화에 따른 열 흐름 시뮬레이션

- 앞선 연구를 통하여 메타 구조가 포함되지 않은 콘크리트 블록의 경우 포화온도가 40 ℃에 육박하는 것을 확인할 수 있었음. 그림 2.2(a)는 2 mm 두께의 판형 열 메타 구조체의 간격을 조절한 것으로써 판형 열메타 구조체의 간격 d 는 0 mm 로부터 12 mm 까지 확장을 시켰음.
- 전체적인 열메타 구조체는 콘크리트 블록의 중심에 위치하도록 설정을 하였고, 총 8가지의 조건을 변경해가면서 시뮬레이션을 진행하였음.
- 그림 2.2(b)는 50 ℃의 가열 조건에서 판형 메타 구조의 간격에 따른 콘크리트 블록의 열 흐름 분포를 보여줌. 열메타 구조체의 두께가 10 mm 인 경우와 2 mm 5개 층의 간격이 0 mm 인 경우는 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었음. 5개 층의 열메타 구조체가 간격이 멀어짐에 따라 열전도도가 급격히 감소하고 열적 차단효율이 향상되는 것이 쉽게 관찰되었음.
- 반대편 평면의 정확한 온도 변화 결과를 비교하기 위해, 판형 모양 메타 구조의 간격변화에 따른 콘크리트 블록에 대해 0-300분간의 온도 변화를 시뮬레이션 하였음.
- 그림 2.2(c)는 판형 메타 구조의 간격에 대한 조건별 50 ℃의 가열 시, 0-300분 동안 콘크리트 블록의 반대편 평면에서의 온도 변화를 보여줌. 간격이 0 mm 인 경우, 포화온도는 25.8 ℃로 나타났음. 간격이 2 mm 에서부터 12 mm 까지 증가함에 따라 포화온도는 각각 21.86, 21.45, 21.25, 21.56, 21.72, 21.67 도로 나타났음(그림 2.2(d) 참조). 간격이 2~12 mm 인 경우 간격이 0 mm 일 때에 비

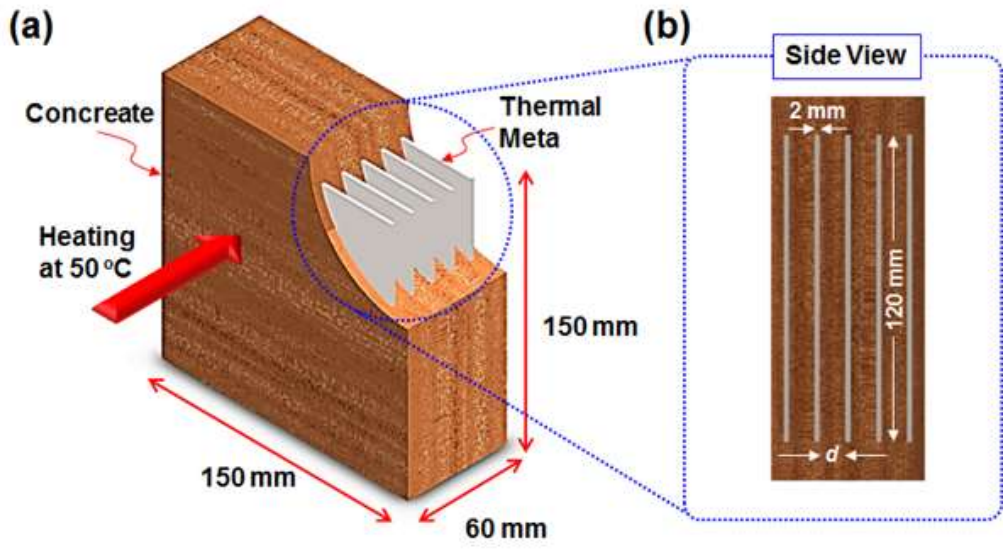


그림 2.1 (a) 콘크리트 블록의 기본 시뮬레이션 모델 인 직육면체 구조. x-y 평면에서 콘크리트 블록의 한 면은 50 ℃ 로 설정하였음. 그 외 콘크리트의 네 면은 20 ℃로 설정하였음. (b) 콘크리트 블록 내부에 5개 층의 판형 메타소재가 삽입된 단면도.

하여 포화온도가 3 ℃ 이상 급격하게 낮아진 것을 확인하였고, 특히 간격이 증가함에 따라 포화온도가 낮아지다가 간격이 6 mm를 지난 이후에는 다시 상승하는 것을 확인 할 수 있었음.

- 판형 열 메타 구조체의 간격이 6 mm인 경우, 반대쪽 면의 포화온도는 21.25 ℃로 나타났는데, 이는 앞선 연구에서 가장 단열효율이 좋았던 경우보다 1.5 ℃이상 낮은 온도임. 이러한 결과를 통하여 열 메타 구조체의 배열을 통해 열전도도 및 단열효율을 조절할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었음.

2.3.3 열전달 방향과 메타 구조체 배열의 방향성에 따른 열 분포

- 열원으로부터 콘크리트 블록에 전달이 되는 열전도 방향성을 효과적으로 억제시키기 위해 판형 메타 구조체 배열의 방향성에 대한 연구를 진행하였음.
- 그림 2.3(a)와 2.3(b)에서 열원은 콘크리트 블록의 왼쪽에 위치하게 되고, 그림 2.3(a)에서 판형 메타 구조체는 콘크리트 블록 오른쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조이고, 그림 2.3(b)에서는 판형 메타구조체가 콘크리트 블록 왼쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조임.
- 판형 메타 구조체의 간격은 그림 2의 조건과 동일함. 그림 2.3(c)은 콘크리트 블록 오른쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조에서의 시간에 따른 온도변화 및 간격에 따른 포화온도에 대한 결과임.
- 간격이 0 일 때 포화온도는 37.58 ℃로 매우 높으며, 간격이 2 mm인 경우 포화온도는 27.85 ℃로 급격히 낮아짐. 판형 메타소재의 간격이 4, 6, 8, 10, 12 mm일 때의 포화온도는 각각 24.52, 22.98, 21.85, 21.62, 21.67 ℃로 나타남.
- 콘크리트 블록 오른쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조에서 간격이 늘어남에 따라 포화온도가 낮아지는 경향을 나타내는 것을 확인하였음.
- 그림 2.3(d)은 콘크리트 블록 왼쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조에서의 시간에 따른 온도변화 및 간격에 따른 포화온도에 대한 결과임.

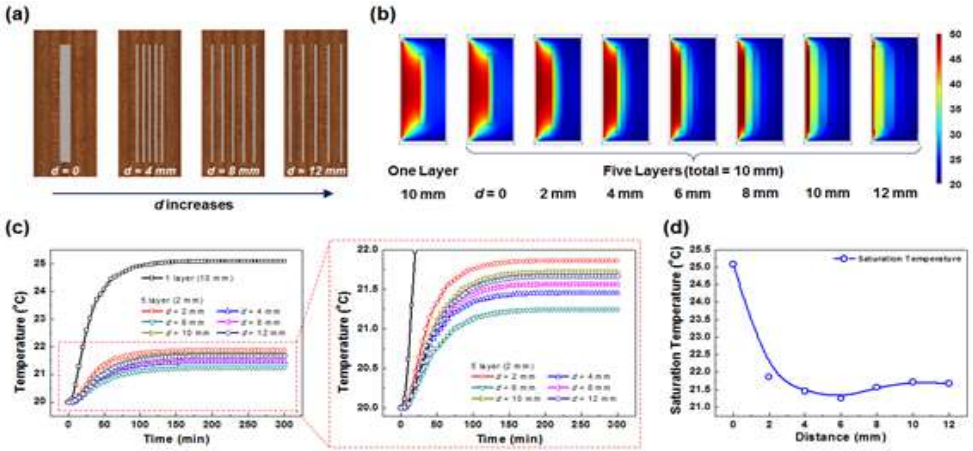


그림 2.2 (a) 50 ℃의 가열 조건에서 층 수별 판형 메타 구조 콘크리트 블록의 단면 구조도. (b) 50 ℃의 가열 조건에서 판형 메타소재의 간격별 콘크리트 블록의 열 흐름 분포. (c) 50 ℃의 가열 조건에서 0-300 분에 걸쳐 콘크리트 블록 반대편 평면의 온도 추이. (d) 판형 메타소재의 간격별 콘크리트 블록의 최종 포화온도.

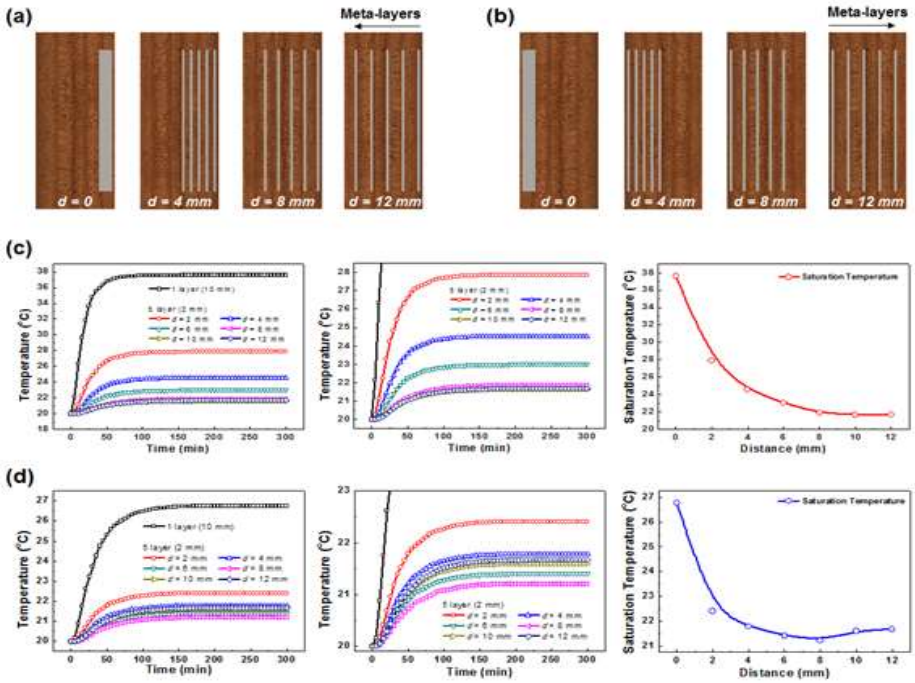


그림 2.3 (a) 판형 메타 구조체를 콘크리트 블록 오른쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조. (b) 판형 메타 구조체를 콘크리트 블록 왼쪽 내부 2 mm지점에 고정한 뒤 간격을 늘려가는 구조. (c) 판형 메타 구조체를 콘크리트 블록 오른쪽 내부 2 mm지점에 고정 및 50 ℃로 가열한 조건에서 0-300 분에 걸쳐 콘크리트 블록 반대편 평면의 온도 추이 및 간격에 따른 콘크리트 블록의 최종 포화온도. (d) 판형 메타 구조체를 콘크리트 블록 왼쪽 내부 2 mm지점에 고정 및 50 ℃로 가열한 조건에서 0-300분에 걸쳐 콘크리트 블록 반대편 평면의 온도 추이 및 간격에 따른 콘크리트 블록의 최종 포화온도.

- 간격이 0 mm 인 경우의 포화온도는 26.75 ℃이며, 이 값은 그림 2.3(c)에서의 간격 2 mm보다 낮은 값임. 간격이 2, 4, 6, 8, 10, 12 mm로 증가됨에 따라 포화온도는 각각 22.41, 21.78, 21.40, 21.21, 21.59, 21.67 ℃로 나타나며, 포화온도가 가장 낮은 구조는 판형 메타 구조체의 간격이 8 mm인 경우임.
- 이러한 결과는 앞서 그림 2.2에서 언급하였듯이 판형 열 메타 구조체의 배열을 통해 열전도도 및 단열효율을 조절할 수 있다는 결과를 나타냄.

2.3.4 초박 및 판형 메타 구조의 간격 변화에 따른 열 흐름 특성

- 판형 메타 구조체를 초박형으로 구형하였을 때의 열적 흐름에 대해 규명하기 위해 10층의 메타 구조체에서 구조체의 간격 변화에 따른 열전도도에 대해 비교하였음.
- 그림 2.4(a)와 2.4(b)는 각각 50 ℃의 가열 조건에서 10층의 메타 구조체의 간격 변화에 대한 모식도와 콘크리트 블록 내부에서의 열적 흐름에 대한 변화 결과임.
- 10층의 메타 구조체의 간격은 0, 2, 3, 4, 5 mm 로 설정을 하였음. 간격이 늘어남에 따라 빨강색 (45도 이상의 영역) 영역이 열원에 가까워지는 것을 확인할 수 있음.
- 보다 자세한 열원으로부터 열전달을 확인하기 위해 반대쪽 면에서의 시간에 따른 온도변화를 살펴보면 (그림 2.4(c)), 간격 0, 2, 3, 4, 5 mm일 때의 포화온도는 각각 25.06, 23.56, 23.23, 23.48, 23.84 ℃임.
- 간격이 0에서 3 mm로 증가되면서 최종 포화온도가 낮아지다가 간격이 4, 5 mm로 증가되면서 다시 높아지는 경향성을 나타냄. 특히 간격이 3 mm일 때의 포화온도 23.23 ℃는 간격이 0 일 때에 비하

여 1.8℃ 낮은 수준으로 간격의 영향이 크지 않은 것을 확인할 수 있고, 이 값은 5층 메타 구조체의 간격 변화에 따른 결과보다 단열효율이 오히려 나빠진 것을 확인한 결과임.

- 판형 메타 구조체의 층수 증가가 있었음에도 불구하고 단열효율이 개선되지 않은 것은 열 흐름 단면도를 통하여 보다 자세하게 확인할 수 있었음.
- 앞서 5층의 메타 구조체를 적용 하였을 때에는 각각의 메타 구조체를 지나면서 열 흐름도의 색깔의 변화가 뚜렷하게 나타났으나(그림 2.2(b) 참조), 10층의 메타 구조체를 적용 하였을 때에는 각 층을 지나면서 뚜렷한 색깔의 변화를 구분하기 힘든 점이 나타남.
- 이는 열을 억제하는데 간격도 중요하지만 단열 소재가 효율적으로 열전달을 억제하기 위해서는 일정량 이상의 두께를 갖아야 된다고 말할 수 있는 결과임.

2.4 요약

- 단열 효과를 향상시키기 위해 유한요소해석 시뮬레이션을 통하여 공기소재(허니콤 구조) 기반의 판형 메타 구조체의 간격 변화에 따른 열전달 특성 및 단열효과 특성에 대해서 파악하였음.
- 5층 메타 구조체 구조에서 간격의 변화에 따른 열전달 특성 및 단열 효율을 조절할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었음. 이를 통해 최적의 단열 효율을 구현할 수 있음을 확인하였음.
- 또한 콘크리트 내부로 전달되는 열원과 열적 메타 구조체의 위치에 따라 단열효율이 크게 변화되는 것을 확인할 수 있었음.
- 이러한 결과는 최적의 열적 메타 구조체 배열을 통해 열전도를 크게 억제시키고 단열효과를 증대시킬 수 있을 것으로 판단됨.
- 또한 10층 메타 구조체 구조에서 간격의 변화에 따른 열전달 특성 및 단열 효율 결과를 통해서 단순히 메타 구조체의 층수를 늘리는 것보다 적당한 두께의 메타 구조체를 적용시키는 것이 콘크리트 내부의 열전달 억제 및 단열 효율을 증대시킬 수 있다는 결과를 도출할 수 있었음.

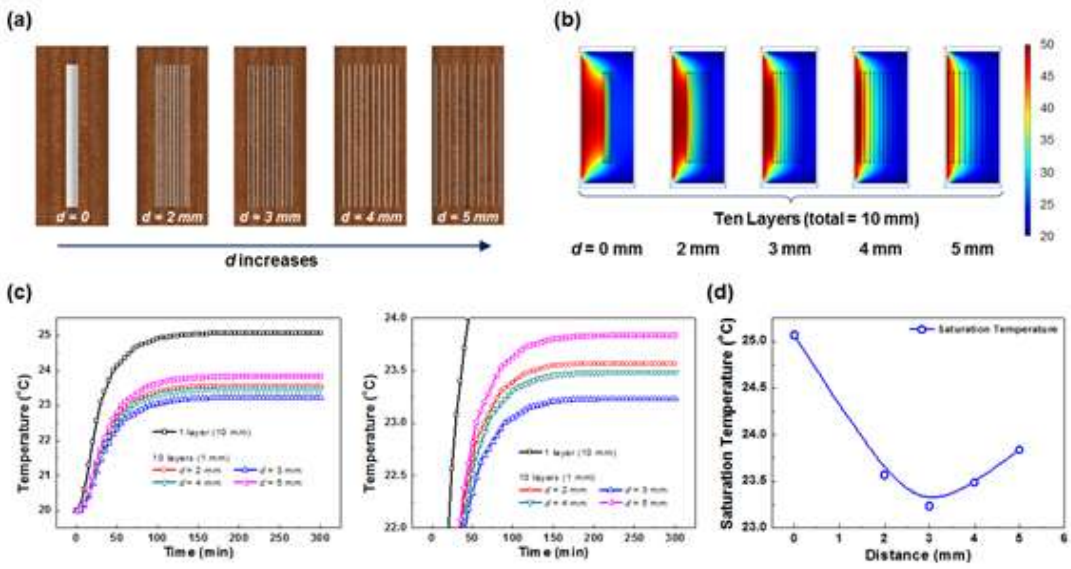


그림 2.4 (a) 10층 초박/판형 메타 구조체의 간격 변화에 대한 모식도. (b) 10층 초박/판형 메타 구조체의 간격 변화에 따른 열적 흐름 단면도. (c) 10층 초박/판형 메타 구조체의 시간 변화에 따른 온도의 변화. (d) 10층 초박/판형 메타 구조체의 간격에 따른 포화온도.

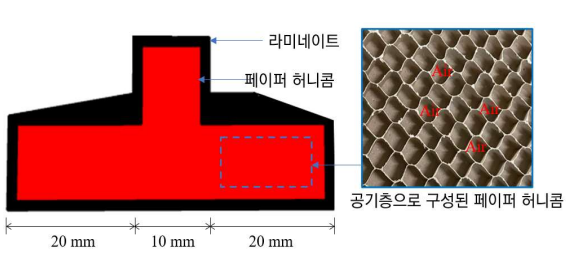
3. PC 판넬의 단면상세를 고려한 열교 제어용 열메타의 열전도율 평가

3.1 실험체 상세 및 실험 방법

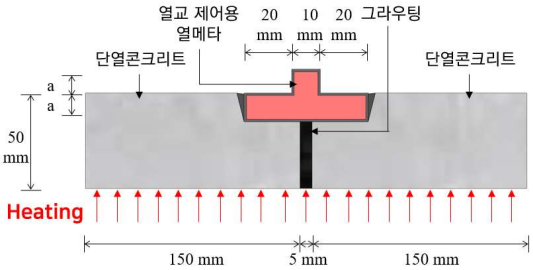
- 그림 3.1에는 실험체 상세 및 실험방법을 나타내었음,
- 실험체는 접합부로 가정하기 위하여 147.5 mm × 300 mm × 50(두께) mm로 제작 후 콘크리트의 상부에 열교 제어용 열메타 삽입 후 하부를 그라우팅 하였음.
- 실험체 변수로서 열교 제어용 메타의 두께(a)는 각각 0 mm 및 5 mm 및 10 mm에서 측정하였음.
- 실험은 보온재의 열전도율 측정(KS L 9016)기준 중 평판 열류계법에 따라 열전도율을 측정하였음.

3.2 실험결과 분석

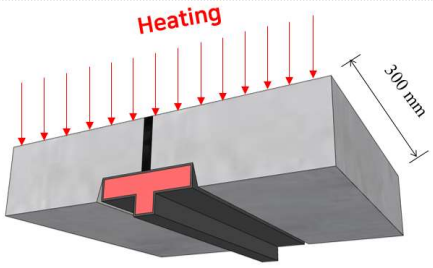
- 그림 3.2에는 열교 제어용 열메타의 두께에 따른 열전도율을 나타내었음.
- 열교 제어용 열메타의 두께가 각각 5 mm 및 10 mm인 실험체의 열전도율은 0.482 W/m·K 및 0.302 W/m·K 였으며 열교 제어용 열메타를 적용하지 않은 실험체 대비 각각 22% 및 51% 낮았음.
- 하지만, 실제 열교현상의 제어를 위해서는 가정된 접합부에서의 실험이 아닌 단면에서의 열메타 배치의 최적화 및 접합부에서 발생할 수 있는 열교현상을 제어하기 위한 PC 판넬간의 수직 및 수평 접합상세 개발 및 평가가 필요할 것으로 판단됨.



(a) 열교 제어용 열메타



(b) 실험체 살세



(c) 실험방법(가열 위치)

그림 3.1 실험체 상세 및 실험 방법

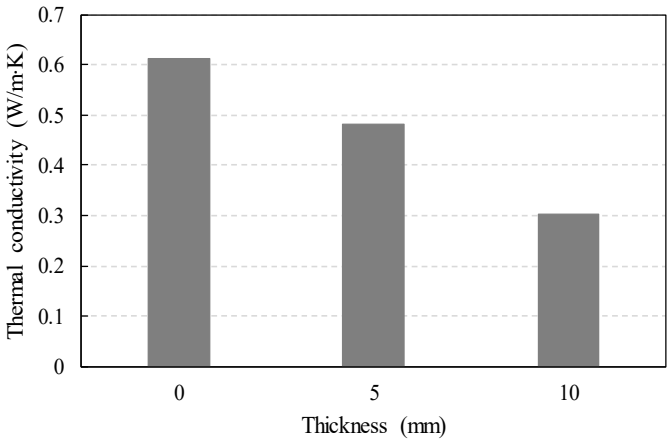


그림 3.2 열교 제어용 열메타의 두께 별 열전도율

4. 시작품 제작

- 열메타 구조체의 형상은 경제적인 측면 및 열해석 시뮬레이션 결과를 고려하여 공기층이 확보된 허니콤 구조로 결정하였음.
- 열메타 구조체의 형태는 결과에 따라 열교 제어를 위해 판 형태의 열메타 구조체를 부착하여 역 T 자형으로 구성하였음.
- 내부의 심재인 페이퍼 허니콤은 종이를 소재로 단면형상이 육각주의 유한 연속 구조체로서 셀과 코어로 구성되어 공기층을 확보할 수 있어 단열성과 흡음성이 우수한 구조의 제품임.
- 표면의 판재인 라미네이트는 내열 합성수지를 함침시킨 후 몇 겹의 층으로 구성되어 낮은 열전도율, 방수, 방염, 내열성 및 내화학성을 확보한 제품임.
- 그림 4.1에는 시작품 제작 순서를 나타내었음.

그림 4.1 시작품 제작 순서

5. 결 론

"열메타 재질 및 구조배열의 최적화" 연구에서는 최적의 열메타 구조체 설계와 열교 제어를 위한 접합상세를 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었음.

① 최적의 열메타 구조체의 설계

- 열메타 물질은 공기로 구성된 판형 메타 구조의 경우 스티로폼 및 파라핀을 기본으로 하는 메타 구조에 비해 열전달이 최소 15% 감소함을 확인하였음.
- 판 형태의 열메타 구조체는 2층으로 구성시 1층 일 때 대비 열전달이 13% 감소하였음. 이를 통해 다중의 층으로 구성 시 열전도율을 감소시킬 수 있음을 확인하였음.
- 판형 구조에서 포화 온도는 1층 일 때 대비 5층 일 때 최대 21% 감소하였음. 10층 일 때의 판형구조는 최대 7% 감소로 오히려 5층으로 구성하였을 때보다 단열효율이 감소하였음.
- 판형 구조일 때의 열메타 구조체는 단순히 구조체의 층수를 늘리는 것보다 적당한 두께의 메타 구조체를 적용시키는 것이 콘크리트 내부의 열전달 억제 및 단열 효율을 증대시킬 수 있었음.
- 결과적으로 최적의 열메타 구조체는 열메타 물질인 공기 또는 에어로겔을 기반으로 크기가 120 × 120 × 10 mm 이면서 두 겹으로 구성하는 것을 추천할 수 있음(콘크리트 블록의 크기가 150 × 150 × 50 mm일 때).

② PC 판넬 접합부 열교 제어용 메타구조의 열전도율 평가

- 열교 제어용 열메타의 두께가 각각 5 mm 및 10 mm인 실험체의 열전도율은 0.482 W/m·K 및 0.302 W/m·K 였으며 열교 제어용 열메타를 적용하지 않은 실험체 대비 각각 22% 및 51% 낮았다(콘크리트 두께가 50 mm 일 때).
- 결과적으로 열교 제어용 열메타 적용은 접합부의 열교 현상 제어에 효과적이라고 판단됨.

③ 열메타 구조체 시작품 제작

- 실험결과에 따라 제작된 시작품은 그림 5.1과 같음.

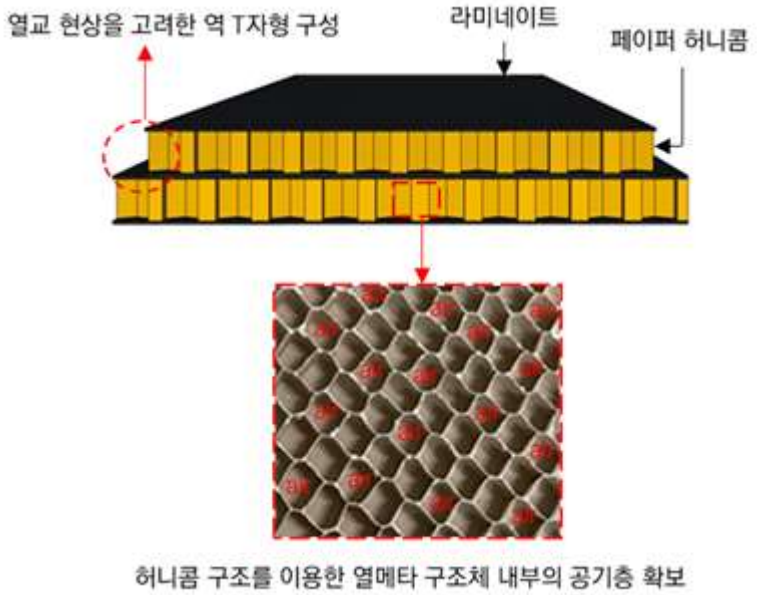


그림 5.1 열메타 구조체의 시작품

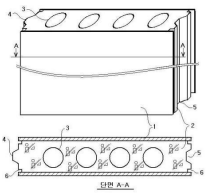
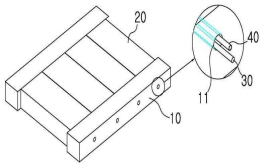
1. 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 목표 성능 설정

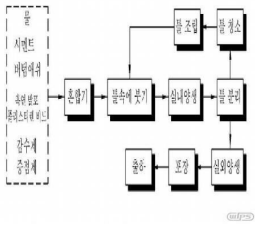
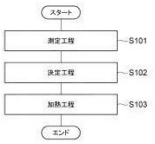
1.1 특허 기술동향 및 전망

1.1.1 국내 · 외 특허

- 국내의 기술 동향은 기포콘크리트 판넬의 특허가 적으나, 경량 콘크리트 판넬 및 발포스티렌 판넬 관련 특허의 양을 더 많았으며, 국외의 경우 반대의 경향을 보이고 있음.
- 현재 국내의 기술은 시공성 및 경제성을 고려하여 일반적으로 유기계 단열재의 사용을 선호하지만, 내화성능 확보 및 내구성 문제 등을 고려하면 무기계 단열재의 요구가 점차 증가하고 있음.
- 국내 · 외적으로 기존의 경량 기포콘크리트 판넬, 경량 콘크리트 판넬 및 발포스티렌 판넬의 성능이 개선된 특허가 출원되어 왔으며, 물리적 성능 개선 및 경제성 확보를 위한 특허가 주를 이룸.
- 국내 · 외적으로 경량 기포콘크리트 판넬, 경량 콘크리트 판넬 및 발포스티렌 판넬에 관한 특허는 지속적으로 출원되고 있으며 경량 기포콘크리트 판넬, 경량 콘크리트 판넬 및 발포스티렌 판넬을 이용한 특허 또한 지속적으로 출원되고 있음.
- 특히 국내 · 외적으로 경량골재 콘크리트, 기포 및 열메타 소재의 융합과 관련된 특허는 없음.

표 1.1 고단열 판넬 기술 특허 동향

구분	선행 기술명	특허권자	기술내용	기술 도면
국내	건물 벽체용 중공 경량 콘크리트 패널의 제조방법 및 그 방법으로 제조된 중공 경량 콘크리트 패널	(주)에이스 패널	· 건물의 내부를 구획하는 벽체로 사용되는 중공 경량 콘크리트 패널의 제조방법과 그 방법으로 제조된 건물 벽체용 중공 경량 콘크리트 패널에 관한 것	
국내	경량 콘크리트 패널	(주)케이원	· 콘크리트 블록 내부에 재활용 PET 재질의 병을 내설시킨 뒤, 상기 병 내부에 헬륨가스를 충진하고, 상기 콘크리트블록 내부에 모르타르를 충진함으로써 중량이 더욱 저하될 수 있는, 경량콘크리트 패널에 관한 것	

국내	단열 및 내화성능이 향상된 흑연발포폴리스티렌 비드를 사용한 경량콘크리트 패널 및 그 제조방법	(주)에이스 패널·(주)비아엔지니어링	저회와 시멘트 및 발포 폴리스티렌 비드를 혼합하는 혼합물 준비 단계와, 준비된 혼합물을 형틀에 주입하는 형틀 주입 단계와, 형틀에 주입된 혼합물을 양생하는 실내 양생 단계와, 실내 양생된 혼합물을 형틀에서 분리하는 형틀 분리 단계와, 형틀에서 분리되는 혼합물을 양생하는 실외 양생단계와, 혼합물과 분리된 형틀을 청소하여 다시 조립하는 형틀 청소 조립단계를 포함하여 이루어지고, 상기 혼합물 준비단계에서 발포 폴리스티렌 비드는 흑연이 일정량 함침 되는 것	
국내	준 불연성 및 단열성을 가지는 EPS 패널 및 그 제조 방법	(주)도담클래스	폴리스틸렌 수지를 포함하고, 압축성형되며, 폴리스틸렌 수지 100중량부에 대하여, 알칼리 실리케이트 25 내지 40중량부; 알루미늄 메타포스페이트 5 내지 15중량부; 가수분해시킨 에틸실리케이트 20 내지 25중량부; 실리카에어로겔 10 내지 15중량부; 러버 라텍스 10 내지 15중량부; 및 알루미늄 실리케이트, 펄라이트, 타르크, 카올린 및 수산화알루미늄 중 적어도 2개 이상을 포함하는 불연성 필러(Filler) 10 내지 20중량부; 를 포함하는 준 불연성 및 단열성을 가지는 EPS 패널 및 그 제조 방법에 관한 것.	
일본	금속 보강 경량 기포 콘크리트 패널 제조 방법	ASAHI KASEI HOMES CO	· 마이크로파를 조사해 다공질 재료를 건조시킬 경우에 소정 범위의 함수율의 금속 보강 다공질 패널에 관한 것	

1.1.2 상용화 제품

- 국내에서 사용되고 있는 판넬은 유기계 재료 및 무기계 재료로 나눌 수 있으며, 유기계 재료로 제작되는 EPS 판넬과 무기계 재료로 제작되는 ALC 판넬, 글라스울 판넬, 미네랄울 판넬 및 진공 단열재 판넬 등이 있음.
- ALC 판넬은 규산질 재료 및 시멘트 등의 무기계 재료와 발포제인 알루미늄을 혼입하여 제조되며, 양생과정에서 발포제에 의한 수소가스의 발생으로 미세한 기포가 생성되어 콘크리트가 제조되는 기술임. 생성된 미세한 기포는 ALC 체적의 70~80% 차지하며, 열전도율은 0.188 W/m · K 및 2.9 MPa 이상 수준의 압축강도 확보가 가능함.
- EPS 판넬의 열전도율은 0.034 W/m · K로 높은 단열성능 확보와 가격이 저렴한 장점이 있지만, 다른 판넬에 비해 화재에 취약함.
- 글라스울 판넬은 유리원료를 이용하여 제작되는 글라스울 판넬은 열전도율 0.028 W/m · K로 높은 단

열성능과 불에 타지 않는 불연 판넬로 내화성능을 요구하는 건축물에 적합함. 그러나, 글라스울 판넬은 유리가루 분진으로 인해 인체에 해롭고 낮은 강도로 인해 대형건물 적용에 다소 어려움이 있음.

- 미네랄울 판넬은 제조시 광무질 섬유을 이용함. 미네랄울 판넬은 글라스울 판넬과 같이 내화성능이 우수하고 풍화작용에 의한 열화현상이 없기 때문에 반영구적으로 사용가능함. 그러나 습기에 취약하여 판넬의 처짐 및 곰팡이 번식 등에 문제가 발생함.
- 진공 단열재 판넬의 내부 심재는 흄드 실리카를 주원료 제작함. 내부 심재 겉에는 특수재질로 감싸 내부를 진공상태로 만듬. 진공단열재 판넬은 단열 판넬 중 가장 낮은 열전도율 0.0018 W/m · K로 우수한 단열성능 확보가 가능함. 그러나 진공 단열재 판넬은 외부 충격, 열화 현상 등에 의한 외피 손상으로 급격한 단열성능의 저하가 발생함.

1.1.3 제품관련 설계기준

- KS F 2701 경량기포 콘크리트 블록(ALC 블록) 및 KS F 4914 경량기포 콘크리트 패널(ALC 패널) 기준은 밀도에 따라 0.5, 0.6 및 0.7품으로 구분하고 있음.
- 가장 단열성이 우수한 0.5품은 밀도 0.45~0.55 g/cm^3, 압축강도 2.9 MPa 이상 및 열 저항 값 0.0036d m^2 · K/W(d는 블록 및 패널의 두께) 이상으로 요구하고 있음.
- 현장 타설용 기포 콘크리트(KS F 4309)의 KS 기준은 밀도에 따라 콘크리트의 품을 구분하고 있음.
- 단열성이 가장 우수한 0.4 품은 밀도 0.3~0.4 g/cm^3, 압축강도 0.8 MPa 이상, 열전도율 0.13 W/m · K 이하를 요구하고 있음.
- 압출성형 경량 콘크리트 패널(KS F 4736)의 기준은 패널 사용 목적에 따라 일반용 및 차음용으로 구분하고 있음.
- 일반용 패널은 압축강도 10 MPa 이상, 휨강도 1.5 MPa 이상 및 열저항 값을 1.08 m^2 · K/W로 요구하고 있음.
- 국토교통부 에너지 절약 설계기준은 지역 위치, 외벽 창 등의 패널 사용 위치 및 외부환경에 따라(직접 노출 및 간접노출)에 따라 구분하고 있음.
- 특히 중부지방에서는 외기에 간접 노출일 때 0.15 W/m^2 · K로 높은 수준의 단열성을 요구하고 있음.

표 1.2 상용화 제품 특징

판넬 종류	업체명	주요 성능			
ALC	쌍용	구분	밀도(g/cm^3)	압축강도(MPa)	열전도율(W/m · K)
		0.5품	0.45~0.55	4.2 이상	0.11 이하
		0.6품	0.55~0.65	6.0 이상	0.13 이하
		0.7품	0.65~0.75	8.0 이상	0.15 이하
	성은	밀도(g/cm^3)	압축강도(MPa)	열전도율(W/m · K)	
		0.5	3.71	0.17	
	아사히	밀도(g/cm^3)	압축강도(MPa)	열전도율(W/m · K)	
		0.5	3.92	0.15	
진공 단열재	GET 상사	심재밀도(g/cm^3)	압축강도(MPa)	열전도율(W/m · K)	내구성(년)
		0.24~0.30	0.06~0.10	0.0018	5~15
EPS	태원 판넬	밀도(g/cm^3)	열전도율(W/m · K)	최고사용온도(℃)	가스 유해성
		0.016	0.034	70	CO, CO_2, HCN
글라스울		밀도(g/cm^3)	열전도율(W/m · K)	최고사용온도(℃)	가스 유해성
		0.065	0.028	350	-
미네랄울	(주) 패널테크	밀도(g/cm^3)	열전도율(W/m · K)	최고사용온도(℃)	
		0.071	0.037	600	

표 1.3 PC 판넬 설계기준

<table>
<tr><th>설계기준</th><th colspan="6">요구 성능</th></tr>
<tr><td rowspan="4">KS F 2701
경량기포
콘크리트
블록(ALC블록)</td><td>구분(품)</td><td colspan="2">밀도 (g/cm^3)</td><td colspan="2">압축강도(MPa)</td><td>열저항값(m^2 · K/W)</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td colspan="2">0.45~0.55</td><td colspan="2">2.9 이상</td><td>0.0053d 이상</td></tr>
<tr><td>0.6</td><td colspan="2">0.55~0.65</td><td colspan="2">4.9 이상</td><td>0.0042d 이상</td></tr>
<tr><td>0.7</td><td colspan="2">0.65~0.75</td><td colspan="2">6.9 이상</td><td>0.0036d 이상</td></tr>
<tr><td rowspan="4">KS F 4039
현장 타설용
기포 콘크리트</td><td>구분(품)</td><td>밀도
(g/cm^3)</td><td>플로우
(mm)</td><td>침하 깊이
(mm)</td><td>압축강도
(MPa)</td><td>열전도율
(W/m · K)</td></tr>
<tr><td>0.4</td><td>0.3~0.4</td><td rowspan="3">180 이상</td><td>15 이하</td><td>0.8 이상</td><td>0.13 이하</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td>0.4~0.5</td><td>10 이하</td><td>1.4 이상</td><td>0.16 이하</td></tr>
<tr><td>0.6</td><td>0.5~0.7</td><td>6 이하</td><td>2.0 이상</td><td>0.19 이하</td></tr>
<tr><td rowspan="4">KS F 4914
경량기포
콘크리트
패널(ALC패널)</td><td>구분(품)</td><td>밀도
(kg/m^3)</td><td>압축강도
(MPa)</td><td colspan="2">휨 균열 하중
(N)</td><td>열저항값(m^2 · K/W)</td></tr>
<tr><td>0.5</td><td>0.45~0.55</td><td>2.9 이상</td><td colspan="2" rowspan="3">$(P_n^1 - P^{2}_{p})b^3 l^4$ 이상</td><td>0.0053d5 이상</td></tr>
<tr><td>0.6</td><td>0.55~0.65</td><td>4.9 이상</td><td>0.0042d 이상</td></tr>
<tr><td>0.7</td><td>0.65~0.75</td><td>6.9 이상</td><td>0.0036d 이상</td></tr>
<tr><td rowspan="3">KS F 4736
압출성형 경량
콘크리트 패널</td><td>구분</td><td>밀도 (g/cm^3)</td><td>흡수율(%)</td><td>압축강도 (MPa)</td><td>휨강도
(MPa)</td><td>열저항값(m^2 · K/W)</td></tr>
<tr><td>일반용</td><td rowspan="2">1.8 이하</td><td>25 이하</td><td>10 이상</td><td rowspan="2">1.5 이상</td><td rowspan="2">1.08 이상</td></tr>
<tr><td>차음용</td><td>18 이하</td><td>18 이상</td></tr>
<tr><td rowspan="4">국토교통부
에너지 절약
설계기준</td><td rowspan="2">부위</td><td rowspan="2">구분</td><td colspan="4">평균열관류율 (W/m^2 · K)</td></tr>
<tr><td>중부1</td><td>중부2</td><td>남부</td><td>제주</td></tr>
<tr><td rowspan="2">외벽</td><td>외기에 직접면함</td><td>0.15 이하</td><td>0.17 이하</td><td>0.22 이하</td><td>0.25 이하</td></tr>
<tr><td>외기에 간접면함</td><td>0.21 이하</td><td>0.24 이하</td><td>0.31 이하</td><td>0.35 이하</td></tr>
</table>

Note] 1: 당사자 사이에 정한 단위 하중(N/m^2), 2 : 패널 자중에 의한 하중(N/m^2) = [절건비중 × 1,000 + 80]× 패널 두께, 3 : 패널의 제작 치수 너비(m), 4 : 지점간 거리(m), 5 : 패널의 치수 두께(mm)

1.2 기존 단열 콘크리트 분석

1.2.1 데이터베이스 구축

- 습식형 기포콘크리트 배합설계와 특성평가를 위한 기초자료로서 기존 문헌의 단열 콘크리트 실험 결과(이승한, 2002, 박상순 등, 1997, 김진만 등, 2006, 송수재 등, 2009, 이정구 등, 2007 등)를 데이터베이스화하였음.
- 구축된 데이터베이스는 579개의 실험 결과를 포함하고 있는데, 단열 콘크리트의 압축강도 범위는 0.11~6.38 MPa, 겉보기 밀도의 범위는 0.28~1.91 g/cm^3, 플로우의 범위는 130~395 mm 수준임.
- 데이터베이스에 대한 변수 분포는 물-결합재비(W/B), 압축강도(MPa), 기포 혼입률(%)이며 이를 각각 그림 1.1에 나타내었음.

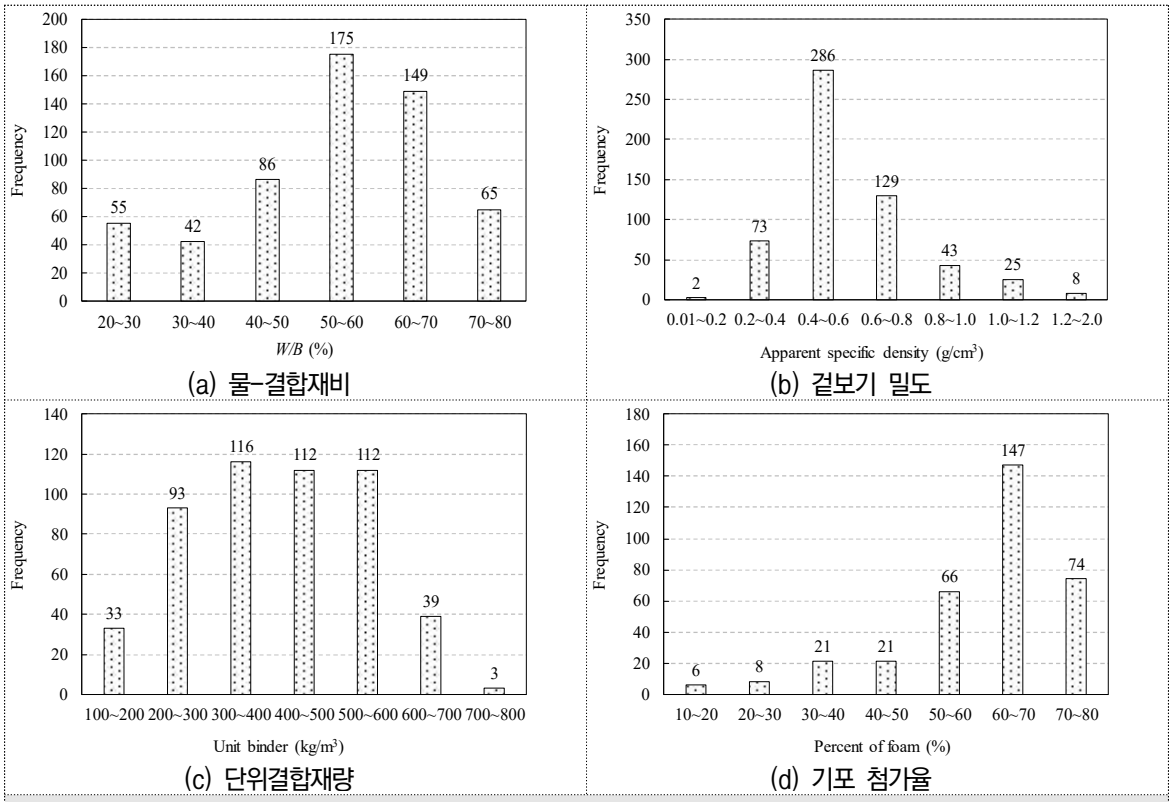


그림 1.1 단열 콘크리트 데이터베이스에서 각 변수의 분포

1.2.2 주요 변수 영향

- 그림 1.2에 단열 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 겉보기 밀도의 관계를 나타내었음. 재령 28일 압축강도는 겉보기 밀도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였음.
- 그림 1.3에는 단열 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 기포 혼입량의 관계를 나타내었음. 단열 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 기포 혼입량이 증가함에 따라 비선형적으로 감소함.
- 단열 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 W/B의 관계는 그림 1.4와 같음. 단열 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 W/B가 증가함에 따라 감소하지만, 그 경향은 대체로 미미한 수준임.
- 일반적으로 콘크리트의 압축강도 발현은 W/B에 큰 영향을 받지만, 단열 콘크리트의 경우 W/B보다는 겉보기 밀도와 단위 결합재량에 의해 큰 영향을 받음.
- 단열 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 단위결합재량의 관계를 그림 1.5에 나타내었음. 단열 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도는 단위결합재량이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함.
- 그림 1.6에는 단열 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 기포 혼입량의 관계를 나타내었음. 기포 혼입량이 증가함에 따라 단열 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도는 비선형적으로 감소하며, 그 유효 관계는 0.75 수준임.
- 결과적으로 단열 콘크리트의 체적에서 기포는 단순 공기층으로서 혼입량의 변화가 다른 요인들에 비해 높은 상관관계를 보임.
- 그림 1.7에 단열 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 물-결합재비의 관계를 나타내었음. 단열 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도는 물-결합재비가 증가함에 따라 감소하지만 그 영향은 크게 나타나지 않음.
- 결과적으로, 단열 콘크리트에서의 겉보기 밀도는 물-결합재비 보다는 단위 결합재량 및 기포 혼입량에 의해 큰 영향을 받음.

- 단열 콘크리트의 재령 28일 열전도율과 겉보기 밀도의 관계를 그림 1.8에 나타내었음. 단열 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도가 감소함에 따라 비선형적으로 감소하며, 그 유효관계는 0.83으로 비교적 큰 영향을 받음.
- 그림 1.9에는 단열 콘크리트의 재령 28일 열전도율과 압축강도의 관계를 나타내었음. 단열 콘크리트의 열전도율은 압축강도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함.

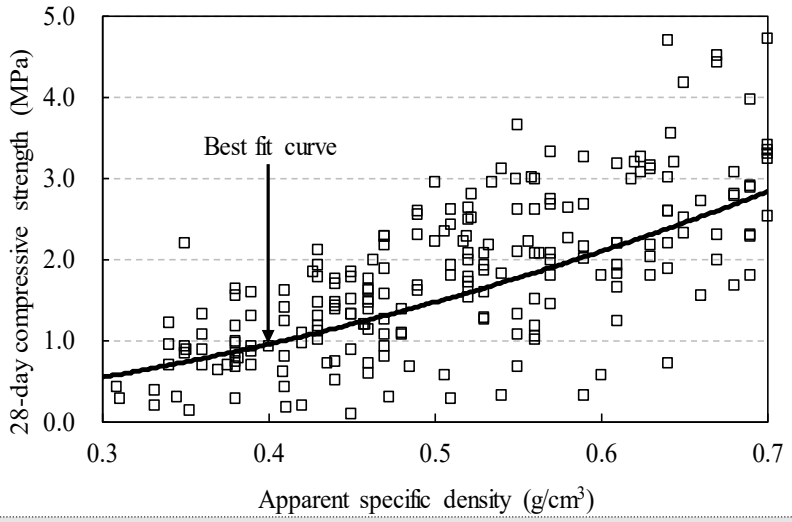


그림 1.2 단열 콘크리트의 겉보기 밀도와 압축강도의 관계

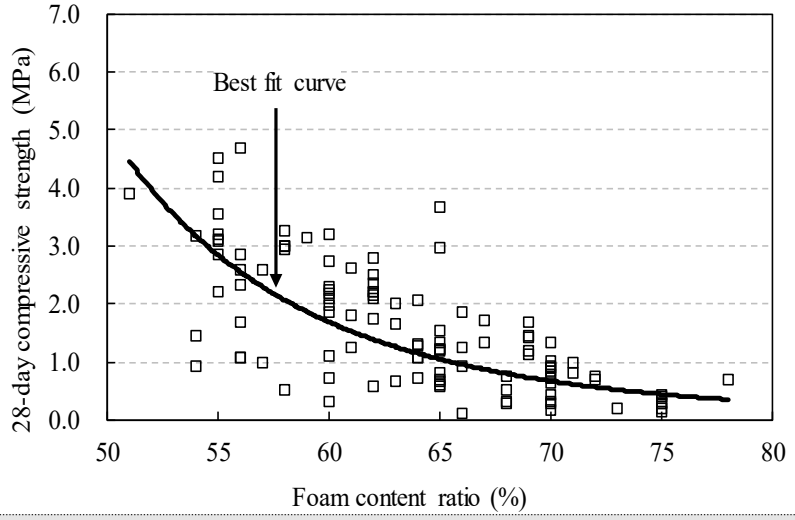


그림 1.3 단열 콘크리트의 압축강도와 기포 혼입율의 관계

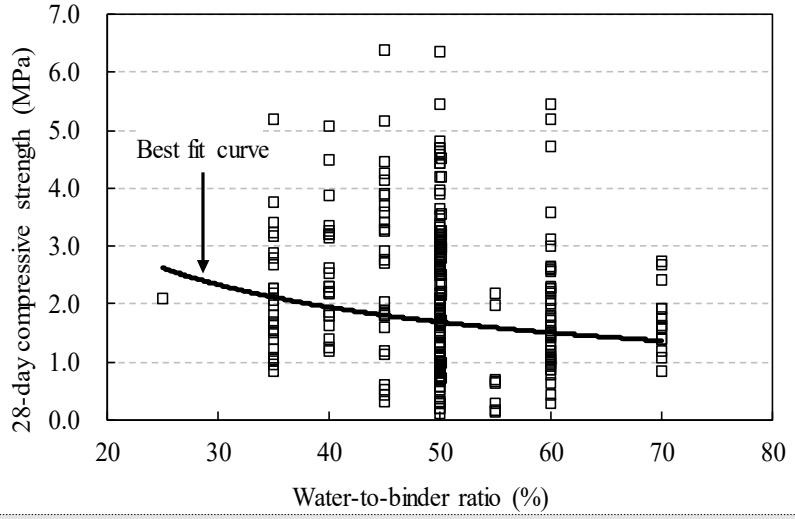


그림 1.4 단열 콘크리트의 압축강도와 물-결합재비의 관계

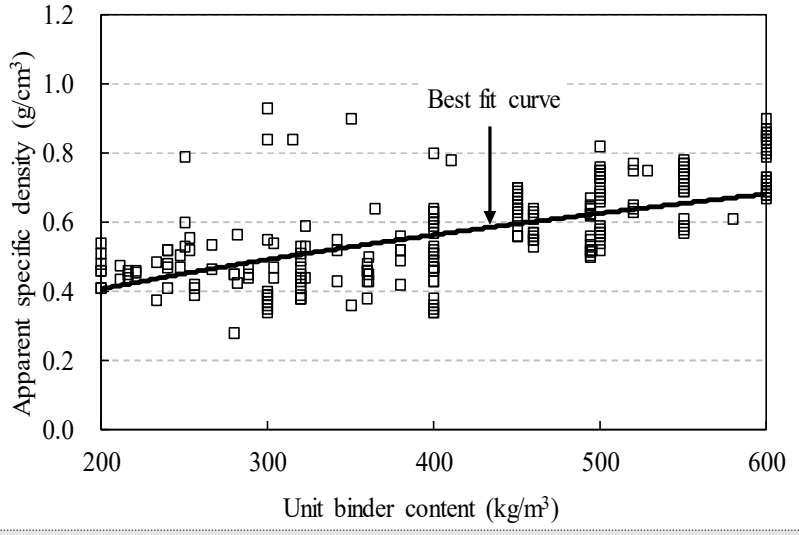


그림 1.5 단열 콘크리트의 단위결합재량과 겉보기 밀도의 관계

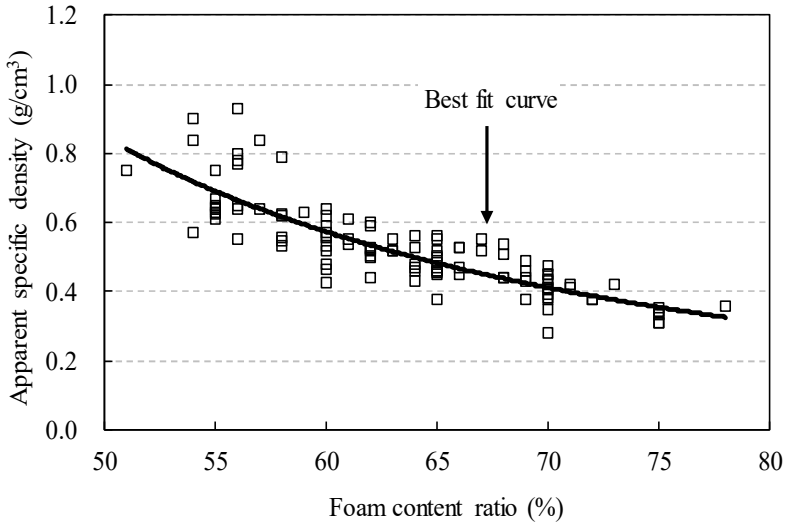


그림 1.6 단열 콘크리트의 기포 혼입량과 겉보기 밀도의 관계

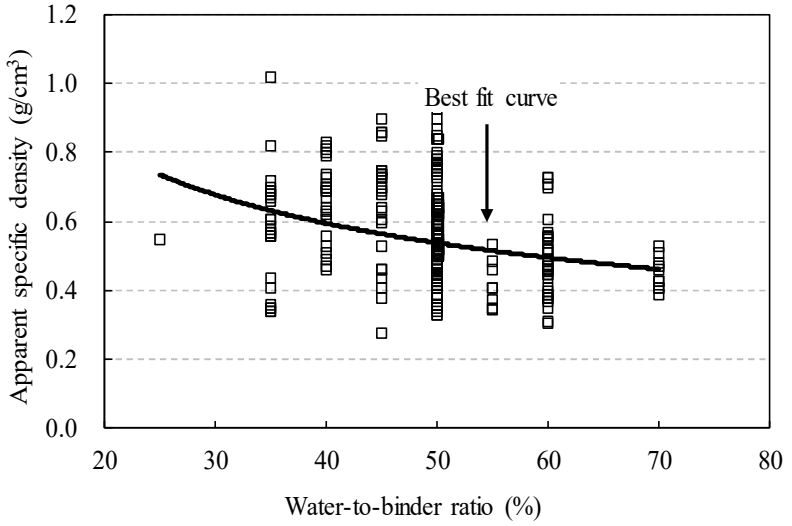


그림 1.7 단열 콘크리트의 물-결합재비와 겉보기 밀도의 관계

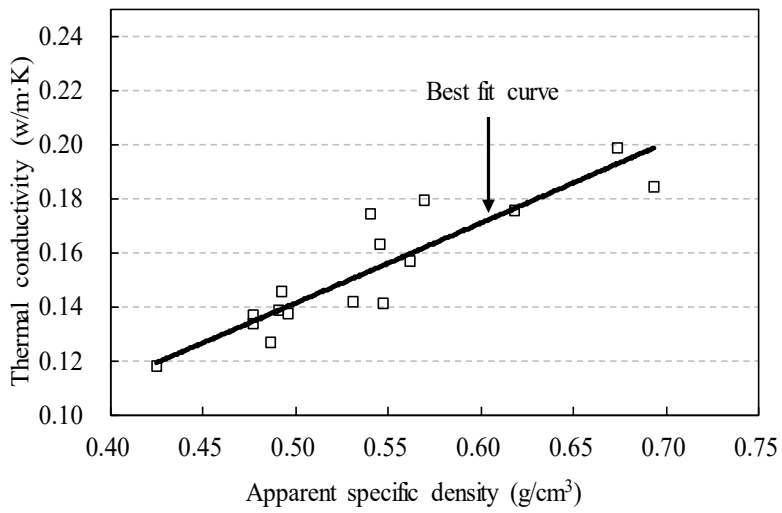


그림 1.8 단열 콘크리트의 열전도율과 겉보기 밀도의 관계

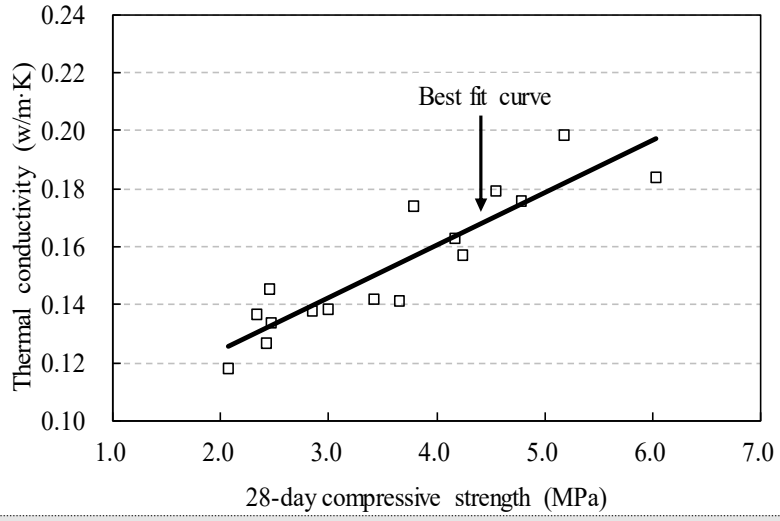


그림 1.9 단열 콘크리트의 열전도율과 압축강도의 관계

1.3 바텀애시 경량콘크리트의 분석

1.3.1 바텀애시 골재 KS 규준

- 국내 바텀애시 골재의 연도별 발생 및 재활용 현황은 표 1.4에 나타내었음.
- 2005년의 경우 바텀애시 골재의 발생량은 1,080천 톤에서 재활용량은 250천 톤으로 재활용률이 23%를 보였으며, 2015년의 경우 발생량은 2,030천 톤에서 재활용량은 786천 톤으로 재활용률은 39%로 나타남(표 1.4).
- 바텀애시 골재의 한정적인 재활용 수요의 증가로 인해 2015년 재활용률은 2005년 대비 16% 증가함.
- 2015년도의 바텀애시 골재의 발생량 및 재활용량은 2005년 대비 발생량과 재활용량은 각각 53% 및 47% 증가함.
- 바텀애시 골재의 입경은 일반적으로 1~40 mm, 비중은 2.0~2.5 수준이며 바텀애시 골재의 흡수율은 10% 이상으로 천연골재에 비해 약 5배 이상 높은 수준이며, 1 mm이하의 입경 부족은 KS F 2527(2016)에서 제시하고 있는 잔골재의 입도 분포를 만족을 어렵게 함.
- 이러한 특성들은 바텀애시 골재가 콘크리트용 골재로 적용 시 품질관리를 어렵게 하는 요인임.
- 석탄화력 발전소에 발생되는 산업 부산물인 바텀애시를 골재로서 활용도를 높이기 위하여 1993년

'석탄재 배출 사업자의 재활용 지침(환경부)' 의 제정 및 석탄재에 대한 한국 산업규격(KS)이 재정됨에 따라 콘크리트 혼화재로써 석탄회에 대한 재활용 이외에 건설 분야에 경량 골재로서의 활용을 위한 수요가 확대될 것으로 기대함.

- 바텀애시는 프리캐스트 콘크리트용 골재 및 구조용 경량골재로서 활용하기 위해서 각각 KS F 4570(2017)에 규정되어 있음.
- 프리캐스트 콘크리트용 바텀애시 골재의 요구사항, 물리적 성질 및 골재의 입도에 관한 규정은 각각 표 1.5, 표 1.6 및 표 1.7에 나타내었음.
- KS F 4570의 프리캐스트 콘크리트용 바텀애시 골재의 요구사항(2016)은 잔골재의 품질기준에 대해서 삼산화황을 0.8% 이하, 흡수율을 0.025% 이하, 그리고 강열감량을 5%와 10% 이하로 제한함(표 1.5).
- 바텀애시 골재는 절건 밀도와 흡수율 및 굵은 골재에 따라 1종, 2종 및 3종으로 구분하며, 절건 밀도와 흡수율은 각각 2.0, 1.7 및 1.5 g/m^3 이하와 10%, 13% 및 20% 이하로 함(표 1.6).
- 바텀애시 골재의 입도 분포는 25 mm이하, 13 mm이하 및 5 mm이하의 골재 치수에 따라 구분함(표 1.7).

표 1.4 년간 바텀애시 골재의 재활용율

구 분	발생량 (천 톤)			재활용량(천 톤)			재활용률 (%)		
	2005년	2009년	2015년	2005년	2009년	2015년	2005년	2009년	2015년
남동발전	290	340	704	60	110	225	21	32	32
중부발전	200	240	394	3	30	51	2	13	13
서부발전	120	140	327	20	30	69	17	21	21
남부발전	110	240	293	10	120	147	9	50	50
동서발전	360	550	590	160	300	295	44	55	50
합 계	1,080	1,510	2,380	250	590	786	23	39	39

표 1.5 프리캐스트 바텀애시 골재의 요구성능(KS F 4570)

구분	규정치 (%)			
	굵은 골재		잔골재	
	A	B	A	B
SO3(%)	0.8 미만		0.8 미만	
염분량(%)	0.03 이하		0.025 이하	
점토함유량(%)	0.25 이하		1.0 이하	
연한석편(%)	5 이하		-	
강열감량(%)	5 이하	10 이하	5 이하	10 이하

표 1.6 프리캐스트 바텀애시 골재의 물리적 특성(KS F 4570)

Items	굵은 골재			잔골재
	1종	2종	3종	
절건 밀도(g/m^3)	2.0 이상	1.7 이상	1.5 이상	1.5 이상
흡수율(%)	10 이하	13 이하	20 이하	10 이하
마모율(%)	45 이하			-

표 1.7 프리캐스트 바텀애시 골재의 입자 크기(KS F 4570)

골재 치수 (mm)	25	20	13	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
13~25	90~100	20~55	0~10	0~5	-	-	-	-	-	-
5~13	-	100	90~100	40~70	0~15	0~5	-	-	-	-
5 이하	-	-	-	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~15

1.3.2 바텀애시 골재의 특성

- 국내에서 발생되는 바텀애시 골재의 흡수율의 범위는 3.08~5.96%였으며 이는 KS 규준의 3.0% 이하를 만족하지 못함.
- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 배합 시 흡수율 관리를 위해 프리웨팅(pre-wetting)하여 골재의 함수율 관리가 필요함.
- 바텀애시에 점토 성분은 검출되지 않았으며, 안정성은 8.5~11.9 범위로 동해, 삼천포(SCH) 및 서천(SC) 화력발전소에서 발생되는 바텀애시 골재가 KS 기준인 10 이하를 초과함.
- 염화물 함유량은 태안 및 보령 화력발전소(BR)에서 생산되는 바텀애시가 KS 기준치 0.03을 초과하였으나, 그림 1.10에 나타난 바와 같이 선별기에 1회 이상 세척 시 모든 화력발전소에서 KS 기준인 0.04 이하를 만족하였음.
- 유연탄이 무연탄에 비해 흡수율이 대체적으로 낮았으며, 각형이었음.
- 바텀애시는 모래에 비해 경량이었으며, 조립률과 실적률은 유사함.

① 형상 및 입도

- 바텀애시 골재는 입경에 따라서 비중, 흡수량 및 골재의 강도가 상이하므로 입도의 균질성을 확보할 수 있도록 해야 하며, 바텀애시를 사용한 경량 콘크리트는 보통 콘크리트보다 일반적으로 워커빌리티가 좋지 않으므로 좋은 입도분포를 만족하여야함.
- 국내의 경우 “경량골재 입도의 표준은 표 1.8 및 표 1.9의 KS F 2534(2016)의 규정에 따르며, 굵은 골재의 최대 치수는 원칙적으로 20 mm로 한다” 라고 규정함.
- 차동원 등(1999)은 바텀애시 골재의 입경은 0.5~6 mm로서 모래 내지 잔자갈 범주에 속하며, 일반적으로 칼슘 함량이 많아질수록 입자가 작다고 보고하였음.
- 바텀애시 골재는 표면 및 내부에 다량의 공극이 형성되어 있으며, 내부의 공극은 독립적으로 형성되어 있지만, 표면에 가깝게 형성되어 있는 공극은 표면부의 공극과 연결되어 있음.
- 바텀애시 골재는 입경에 따라서 밀도의 차가 많으며, 일반적으로 입경이 작을수록 밀도가 커짐. 이러한 경향은 바텀애시 잔골재의 경우 특히 두드려지며, 동일한 입도를 질량 백분율로 표시한 경우와 용적 백분율로 표시한 경우, 조립률이 잔골재에 0.1~0.2 정도의 차이가 발생함.

② 색상

- 바텀애시 골재는 주로 회백색이 많으나 암갈색에 이르기까지 다양하며 철분 함량이 높은 바텀애시 골재는 담황색을 나타냄(그림 1.11).

- 미연 탄소 성분이 많은 바텀애시 골재는 암갈색을 보이나 포졸란 활성 반응에는 큰 차이는 없음.
- 미연소 함량이 높은 바텀애시 골재는 콘크리트의 압축강도 발현에 영향을 미칠 뿐만 아니라 AE제를 흡착하여 콘크리트의 유동성을 저하시킴.

③ 화학 및 광물조성

- 바텀애시 골재의 화학적 조성은 석탄의 종류, 질 및 석탄의 연소 특성에 따라 차이를 나타냄.
- 바텀애시 골재의 대표적인 성분으로는 SiO2가 대략적으로 30~40% 정도를 차지하며, CaO가 그다음을 차지하며 Al2O3 성분이 15%, MgO, SO3가 각각 2% 전·후를 차지하며, Ca, Mg, K, Na 등 양이온과 Fe, S 등의 원소 등이 다량 함유되어 있음. 바텀애시 골재 중의 가용성 SiO2는 시멘트 수화 시 생성되는 Ca(OH)2와 상온에서 반응하여 불용성의 안정된 규산칼슘(CaO · SiO2 · NH2O)을 생성시켜 콘크리트의 장기 강도를 증가시킴.
- 바텀애시 골재의 광물 결정형태는 석탄회의 효과적 활용에 필요한 반응성, 소결성 등에 관련된 자료를 제공하게 되며, 석탄에 함유되어 있는 석영과 알루미나 성분은 연소과정에서 고온의 열에 의해 몰라이트 또는 크리스토발라이트로 변퇴되어 결정상을 이루고 있음.
- 다른 결정상(Fe2O3)을 포함하게 되면, 바텀애시 골재에는 20~30%만이 결정상으로 존재하고 나머지 성분은 유리상으로 존재함.
- 고온 상태에서 화학적으로 변형되지 않는 석영을 제외 하고는 나머지 석탄 내 맥성광물 대부분은 연소 중에 대체로 분해됨.
- 바텀애시 골재 중 석영는 연소 중에 발생되는 다른 용융물과는 관련 없이 석탄 중에 함유하고 있는 점토 크기의 석영입자가 그대로 존재하고 있는 것으로 석영 함유량은 바텀애시 골재의 종류나 조성에 큰 영향을 받지 않으며 모든 바텀애시 골재에 존재함.
- 바텀애시 골재 입자가 냉각이 될 때 용융물로부터 직접 결정화되거나, 또는 생성된 유리질이 노(爐) 내의 고온부에서 결정화되어 만들어지는 몰라이트는 저칼슘 바텀애시의 주결정상이며 시멘트의 화학 반응과는 무관함.

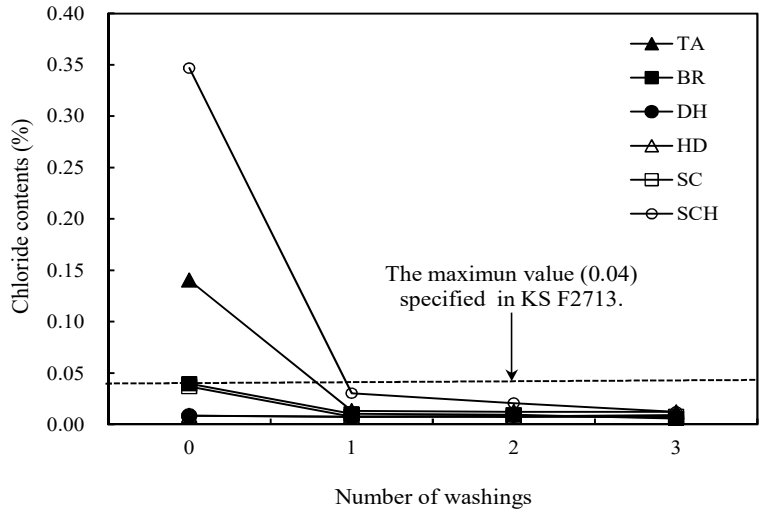


그림 1.10 골재 세척회수에 따른 염화물량

④ 입형 및 표면 구조

- 바텀애시 골재의 입형과 표면구조는 원료와 그 제조공정에 따라 매우 다르나 그 입형은 정육면체부터 둥근 형태의 모양을 가지며, 또 표면구조는 대단히 매끄러운 정도부터 울퉁불퉁한 정도까지 다소 불규칙적으로 거친 표면의 특성을 나타냄(그림 1.12).
- 바텀애시 골재의 내부는 다공성으로 메소 및 매크로 크기의 공극들의 비율이 일반적으로 천연모래에 비해 상당히 높음.
- 바텀애시 골재의 다양한 입형과 표면구조는 콘크리트 배합 시 워커빌리티, 잔골재율, 단위 시멘트량, 단위수량 등의 배합 요소에 영향을 미치므로 바텀애시 골재는 그 입형이 둥글고 구형에 가까운 것이 배합 및 강도에 유리함.
- 골재가 너무 둥글거나, 표면이 매끄러운 경우는 배합 시 골재이동에 대한 저항이 적으므로 골재 분리가 발생하여 블리딩이 발생할 우려가 있음.

표 1.8 국내에서 생산된 바텀애시 골재의 화학적 · 물리적 특성

항 목	골재 표준	태안 (TA)	동해 (DH)	하동 (HD)	보령 (BR)	삼천포 (SCH)	서천 (SC)	호남 (HN)	영동 (YD)	영흥 (YH)	당진 (DJ)
조립률	2.3~3.1	3.07	2.65	3.05	2.90	2.85	3.10	3.66	4.12	3.79	2.94
절건 밀도 (g/cm^3)	2.5이상	1.95 ~1.96	2.10 ~2.16	1.77 ~1.83	2.13 ~2.27	1.79 ~2.12	1.76 ~1.80	1.79 ~2.13	1.76 ~1.89	1.68 ~1.85	1.78 ~1.87
강열감량 (%)	-	7.34	2.28	0.34	8.8	10.8	11.03	-	-	-	-
SO3 (%)	-	0.8	1.8	0.4	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.7	0.6
염화물량 (%)	0.04	0.013	0.007	0.007	0.010	0.030	0.007	-	-	-	-
흡수율 (%)	3.0이하	3.08 ~3.17	6.66 ~7.11	4.29 ~4.50	2.96 ~3.05	3.71 ~3.88	5.13 ~5.42	3.21 ~4.26	4.69 ~5.02	5.65 ~5.96	3.25 ~3.65
점토함유량 (%)	1.0이하	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음	없음
0.08 mm (%)	3~5	3.2	4.2	1.9	6.3	3.5	0.73	2.5	4.06	2.58	1.84
안정성 (%)	10이하	8.5	11.9	9.6	5.5	10.6	11.2	-	-	-	-

표 1.9 경량골재의 표준입도 크기(KS F 2534)

체의 호칭 (mm) / 골재의 치수 mm)		각 체를 통과하는 질량 백분율(%)								
		25	20	13	10	5	2.5	1.2	0.3	0.15
잔골재	5~20	-	-	-	100	85~100	-	40~80	10~35	5~25
굵은 골재	25~5	95~100	-	25~60	-	0~10	-	-	-	-
	20~5	100	90~100	-	10~50	0~15	-	-	-	-
	15~5	-	100	90~100	40~80	0~25	0~10	-	-	-
	10~2	-	-	100	80~100	5~40	0~20	0~10	-	-
잔골재와 굵은 골재의 혼합물	13~0	-	-	95~100	-	50~80	-	5~50	-	2~15
	10~0	-	100	100	90~100	65~90	35~65	10~25	-	5~15

(a) 모래 (b) 태안화력 (c) 보령화력

(d) 삼천포화력 (e) 동해화력 f) 서천화력

그림 1.11 바텀애시 골재의 모양

외부형태		
내부형태		
(a) 굵은골재		(b) 잔골재

그림 1.12 바텀애시 골재의 내부 및 외부의 형상.

⑤ 비중 및 흡수율

- 바텀애시 골재는 내부구조가 다공성 공극을 가지므로 인해 보통골재에 비해 비중이 작음. 비중은 골재의 입경에 따라 차이가 있는데 골재의 입경이 클수록 작아지는 경향이 있음.
- 바텀애시 골재는 내부에 다수의 공극을 내포하고 있기 때문에 공극이 증대될수록 겉보기비중 값은 작아짐.
- 바텀애시 골재의 비중은 콘크리트의 중량에 직접 영향을 미치므로 적절한 경량 콘크리트를 배합을 하려면 바텀애시 골재의 비중을 적당한 값 이하이어야 하나, 비중이 지나치게 작으면 바텀애시 골재의 강도가 약할 뿐 아니라 콘크리트의 강도 및 내구성도 저하시키며 재료분리 및 블리딩 현상이 생겨 경량 콘크리트의 품질 저하의 원인임.

- 일반적인 바텀애시 골재의 흡수율은 보통 중량 골재에 비하여 일반적으로 5배 이상 높음. 이는 골재의 표면과 내부에 다공성 구조로 되어 있기 때문임.
- 바텀애시 골재의 실제 흡수율은 기공의 크기 및 규모만큼 흡수가 가능하나, 실제 흡수율은 기공에 비례하여 흡수되지 않음. 이러한 이유는 기공 중에 미세한 독립기포가 분포되어 있기 때문이며, 이에 반하여 연속기포의 양적 분포상태에 따라 흡수량이 변화되기 때문임.
- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트는 배합하는 과정에서 배합수의 일부가 골재 중에 흡수되어, 경량 콘크리트의 단위수량을 변화시켜 유동성을 변화시킴.
- 따라서 수분의 흡수에 의하여 슬럼프 값이 저하 되면, 잔골재율(S/a)을 증가시키거나 분말도가 높은 시멘트를 사용하여 유동성을 조절해야함.
- OPC와 기건 상태의 바텀애시 골재를 사용하여 배합하면 초기에 현저하게 골재의 수분 흡수가 발생함.
- 바텀애시 골재의 흡수율이 크면 경량 콘크리트의 배합 관리가 어려우므로, 일반적으로 충분히 프리웨팅(pre-wetting)하여 콘크리트의 배합에 있어서 단위수량의 변화가 생기는 것을 방지해야 함.
- 따라서 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 배합 설계 단계에서부터 골재의 함수량 관리에 유의해야 함.

⑥ 역학적 특성

- 바텀애시 골재를 비롯한 경량골재의 강도는 골재 내부 공극의 영향으로 보통 중량골재 보다 작은 것이 일반적임.
- 그러나 인공경량골재의 외부는 비교적 골재의 표면에 견고한 피막층을 형성하고 있어 다소 강도가 증가될 수 있음.
- 바텀애시 골재의 강도는 일반적으로 시멘트 페이스트의 강도에 비하여 상대적으로 적은 경우 콘크리트의 강도는 골재의 강도에 영향을 받으므로, 시멘트 페이스트의 강도, W/B, 골재의 강도 및 골재의 공극률, 골재의 사용량에 영향을 받음.
- 일반적으로 콘크리트의 파괴 형상은 그림 1.13에 나타낸 바와 같이 보통 콘크리트의 경우 골재 입자와 페이스트 사이의 계면에서 형성됨.
- 경량 콘크리트의 파괴 시 균열은 골재를 관통하여 거의 직선 형태로 균열이 진전되며, 경량 콘크리트의 균열진행 영역 폭은 일반적으로 보통 콘크리트보다 작을 수 있음.
- 이는 골재의 강도에 기인한 것으로 보통 콘크리트는 경량 콘크리트보다 상대적으로 높은 탄성계수와 골재의 맞물림 작용으로 파괴 시 균열의 형성은 골재를 만나면 강도가 큰 골재를 피해 골재와 시멘트 페이스트 계면을 따라 성장하지만, 경량 콘크리트는 경량골재의 낮은 강도로 인해 파괴 시 균열이 골재를 관통하기 때문임.
- 바텀애시 골재 콘크리트의 유동성은 일반적으로 바텀애시 골재가 다공성의 공극 구조의 가지고 있어 높은 흡수율로 인해 굳지 않은 콘크리트에서 시멘트 페이스트가 골재 표면에 흡착되어 유동성이 저하됨.
- 이로 인해 유동성을 확보하기 위한 고성능 감수제의 첨가량은 바텀애시 골재의 혼입률이 20% 이상에서 혼입률 증가에 따른 고성능 감수제의 첨가량도 급격하게 증가하는 경향을 나타내며 화력발전소별 차이는 없음.

- 그림 1.14에 나타낸 바와 같이 슬럼프의 경시변화는 혼입률이 증가하면서 슬럼프 감소율이 일반적으로 급격히 증가함.
- 또한 일반적으로 혼화제를 사용하여 소요 워커빌리티를 갖는 콘크리트의 제조가 가능하며 혼화제의 사용량은 유연탄이 무연탄 보다 많음.
- 그림 1.15에 나타낸 바와 같이 동해화력발전소(DH) 바텀애시 골재의 경우 혼화제 사용량이 보통 콘크리트와 유사 바텀애시 치환율에 따른 혼화재 사용량은 바텀애시 치환율이 30%까지는 혼화제 사용에 따른 변화는 크지 않음.

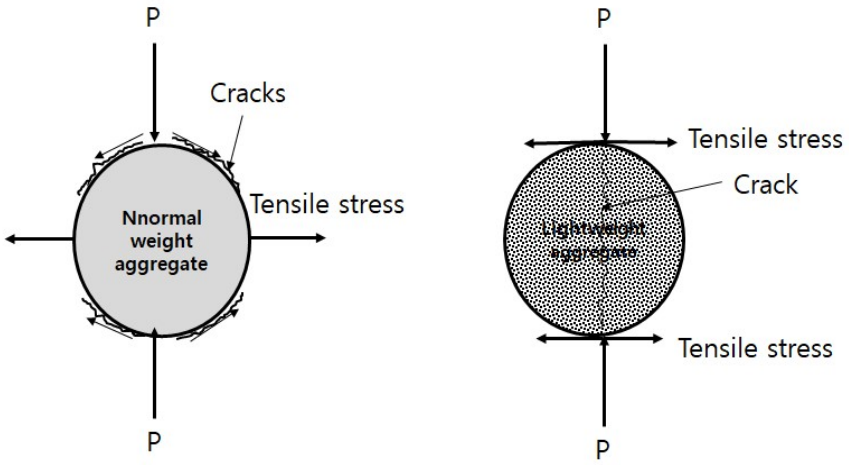


그림 1.13 골재의 파괴 메커니즘

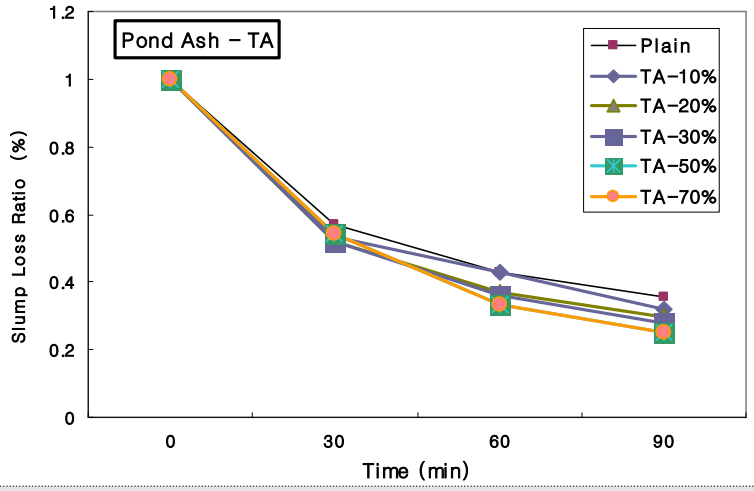


그림 1.14 시간에 따른 슬럼프 로스

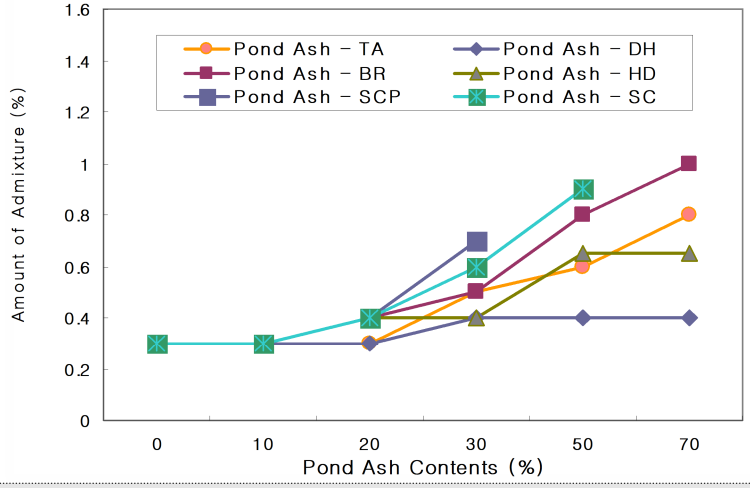


그림 1.15 바텀애시 치환율에 따른 혼화제 첨가량

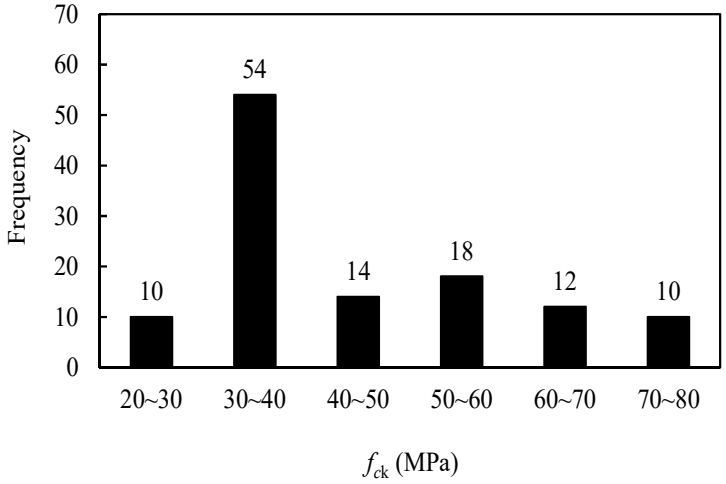
- 이는 입도가 작고 바텀애시 골재의 입형이 모날수록 사용량이 증대함.
- 바텀애시 골재를 콘크리트용 골재로 활용하는데 장애가 되고 있는 또 다른 이유는 다공질의 바텀애시 골재는 콘크리트의 슬럼프 유지가 어렵고 골재 자체의 강도가 낮아 콘크리트의 강도 발현에 좋지 않은 영향을 미치기 때문임.
- 바텀애시 잔골재를 천연모래의 치환율과 입도분포에 따라 콘크리트의 강도가 저하될 우려가 있어 적정 치환율 이상 바텀에시를 잔골재로 치환 시 주의가 요구됨.

1.4 바텀애시 골재 콘크리트의 연구동향

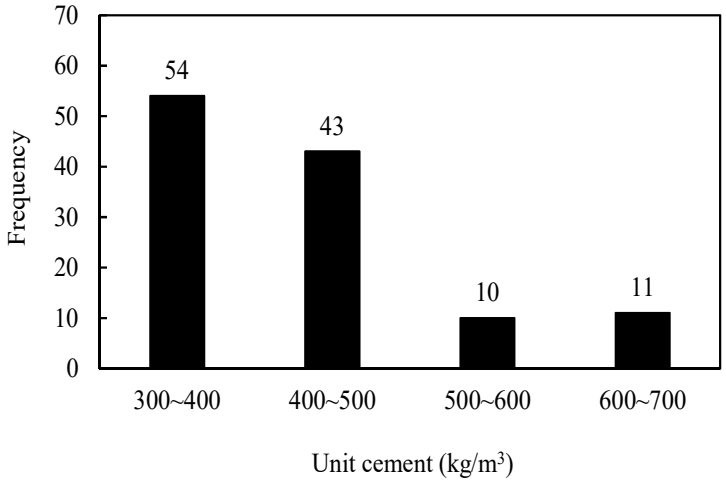
- 국내에서 발생되는 바텀애시 골재의 흡수율의 범위는 3.08~5.96%였으며 이는 KS 규준의 3.0% 이하를 만족하지 못함.
- 국내에서는 세계 각국의 인공 경량 골재 개발의 급속한 발전에도 불구하고 화강암 등의 천연 골재가 비교적 풍부하며 인공 경량 골재의 원료인 팽창 점토와 팽창 혈암 등의 부존자원이 부족한 실정 등의 여건으로 인해 인공 골재의 개발 및 실용화 기반이 미흡한 실정임.
- 화력발전소의 산업 부산물인 바텀애시 골재에 대해서도 다양한 연구가 진행되고 있으나 기초적인 물성연구에 집중되고 있음.
- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 유동성 및 강도 발현 등의 역학적 특성에 대한 연구는 GGBS 또는 FA 혼입 콘크리트에 비하면 매우 미흡한 상태임.
- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 주요 연구동향을 표 1.10에 요약하여 나타냄.
- 국내 · 외에서 발표된 논문(최세진 등, 2009; 박승호 등, 2016; 김상철, 2010; Kim and Lee, 2011; 김성수 등, 2014; 김황희와 박성기, 2017; 이종호 등, 2001; Park et al., 2009; Nikbin et al., 2016; 장영일 등, 2008; 양근혁, 2019)을 참고로 바텀애시 골재에 대한 118개의 배합을 분석하여 그림 1.16에 나타냄.
- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 압축강도는 바텀애시 골재의 치환량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타냄.
- 이에 따라 압축강도(f_{ck})는 20~70 MPa 범위에 있었으며, 이때 단위시멘트량은 300~607 kg/m^3 범위에 있었음.
- 단위시멘트량은 비슷한 f_{ck}를 갖는 일반 콘크리트에 비해 약 17~33% 높은 값이었음.
- 바텀애시 골재의 낮은 압축강도 및 높은 흡수율의 물성으로 인해 설계 f_{ck}를 충족하기 위해서는 보통 콘크리트에 비해 더 많은 단위시멘트량을 필요함.
- 바텀애시 골재 기반 경량골재 콘크리트는 주로 잔골재를 천연골재에 치환하는 비율에 대한 연구가 집중되고 있음.
- 특히 잔골재와 굵은 골재 모두 바텀애시 골재로 사용하는 전경량 콘크리트의 연구는 매우 부족함.
- 바텀애시 골재를 잔골재로 혼입한 경우 그 치환율은 10~100% 범위에 있었는데, 바텀애시 잔골재의 치환율은 천연 골재 대비 주로 80% 이상이었음.
- 바텀애시 골재를 잔골재로 치환한 콘크리트의 단위용적중량은 대부분 1,500~1,900 kg/m^3 범위에 있었는데, 이는 구조용 경량 콘크리트의 일반적 단위용적중량 범위와 비슷함.

표 1.10 바텀애시 경량골재의 기존연구결과의 요약

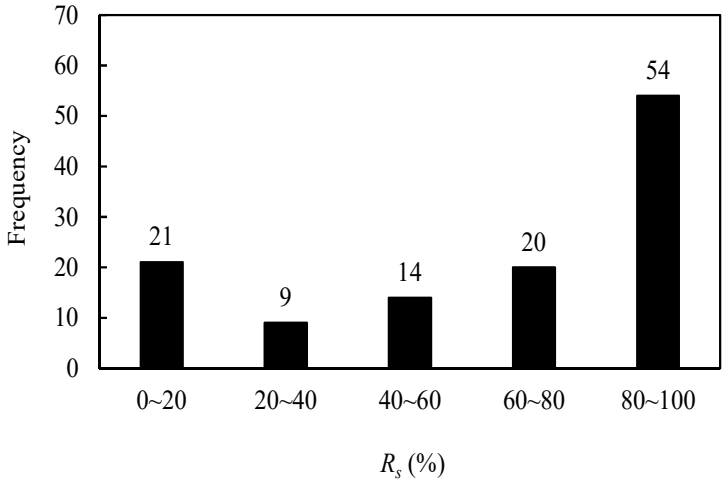
연구자	주요 변수	주요 연구내용
김상철 (2009)	• 물-시메트비 • 설계기준강도 • 바텀애시 치환율	• f_{ck}(24 MPa, 27 MPa), W/B(42%, 45%)를 변수로 하여 바텀애시를 60%까지 치환한 콘크리트의 유동성과 내구성을 평가하여 바텀애시의 활용 가능성을 평가함. • 미립분이 부족하여 천연골재와 혼합하여 사용하면 잔골재로 사용가능 있음. • 유동성 확보를 위해 단위수량과 감수제 사용량이 증가하지만 천연골재와 일정부분 혼합 시 강도와 내구성 확보가 가능함을 평가함.
김성수 등(2014)	• 바텀애시 치환율 • 목표슬럼프 (100±20 mm)	• 바텀애시 치환율에 따른 유동성과 압축강도와 관계를 평가함. • 바텀애시 치환율이 증가할수록 유동성확보를 위한 W/B증가 및 고성능 감수제의 참가량이 증가하였으며, 잔골재로 30%정도 치환한 경우 공기연행 확보와 강기 압축강도를 만족 함.
박승호 등(2016)	• 바텀애시 잔골재 치환율	• 바텀애시를 잔골재로 0~30% 치환하여 콘크리트의 내구성을 평가하여 바텀애시를 잔골재로 재활용 가능성을 평가함. • 염해저항성, 건조수축은 치환율의 증가에 따른 영향이 적었으나 탄산화 침투는 다소 증가하여 적절한 배합설계를 통해 바텀애시를 잔골재로 사용 가능함을 평가 함.
이종호 등(2001)	• 바텀애시 치환율	• 바텀애시를 잔골재로 50%까지 치환하여 공기량, 슬럼프, 응결시간과 압축강도 중성화 깊이 등의 내구성을 평가 함. • 바텀애시 치환율이 증가할수록 블리딩이 감소하며 응결시간은 비슷하였음. • 압축강도는 장기 재령에서 치환율 0%와 유사한 수준을 보였으며 중성화 깊이는 치환율이 증가할수록 상대적으로 증가하였음.
김황희와 박성기 (2017)	• 바텀애시 치환율	• W/B 45%, S/a가 60%로 고정하여 바텀애시를 잔골재로 30%까지 치환한 경우의 압축축강도와 휨 강도를 평가 • 바텀애시를 잔골재 10% 치환일 경우 역학적 특성이 우수하였음.
최세진 등(2008)	• W/B • 단위시멘트량 • 바텀애시 잔골재 치환율(0~50%)	• 바텀애시를 잔골재로 50%까지 치환한 콘크리트의 내구성 평가를 비교분석함으로서 바텀애시의 효율성 향상을 위한 기초자료를 제시함. • 바텀애시 대체율이 증가할수록 블리딩량이 다소 감소하였으며, 중성화 깊이 및 염화물 함유량은 증가하나 W/B가 감소함에 따라 감소함.
Nikbin et.al.(2016)	• 바텀애시 잔골재 치환율	• 바텀애시를 잔골재 및 굵은 골재로 사용한 기존 연구의 DB를 통해서 현재 설계규준(ACI, EC-2, JCI 및 AASHITO 등)과 실험결과의 비교분석. • 기존 실험결과를 토대로 하여 f_{ck}, E_c, f_{sp} 및 f_r의 역학적 특성에 대한 모델을 제시함.
Park et al.(2008)	• FA 혼입률 • 바텀애시 굵은 골재 치환율	• 바텀애시를 굵은 골재로 100%까지 치환한 다공성 콘크리트의 역학적 특성 및 유해성을 평가함. • 흡수율, 안전성 및 마모율 KS F 2526 및 ASTM C 33의 기준 보다 적었으며, 2회 세척 시 염화물 함유량 기준을 만족 함. • 압축강도는 굵은 골재 20% 치환 시 재령 91일에서 약 0.5% 감소됨.
Kim and Lee(2010)	• 바텀애시 치환율	• 바텀애시를 굵은 골재와 잔골재로 치환한 콘크리트의 플로우, 기건밀도, f_{ck}, E_c, 및 f_r 등의 역학적 특성을 분석함. • 슬럼프는 굵은 골재에 영향은 많이 받았으며 잔골재이 치환율이 증가할수록 감소함. • 바텀애시를 잔골재 및 굵은 골재로 치환한 경우 f_{ck} 보다는 휨 강도에 더 많은 영향을 미침.



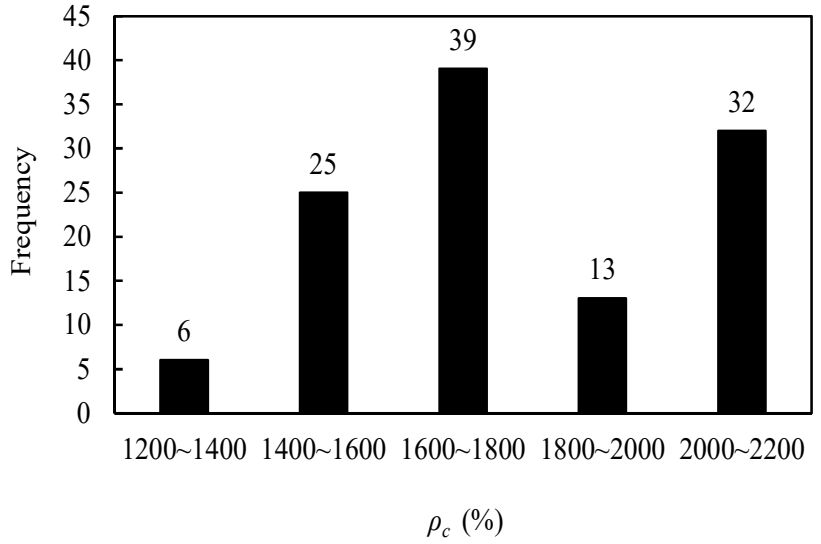
(a) 재령 28 일 압축강도



(b) 단위 시멘트량



(c) 천연모래 대비 바텀애시 골재의 치환율



(d) 단위용적중량

그림 1.16 기존 바텀애시 경량골재 연구의 주요변수의 분포

1.5 요구 성능 결정

- 경량콘크리트 판넬에 대해 KS 기준에서 요구하는 역학적 성능은 압축강도 10 MPa 및 휨강도 1.5 MPa 이상임.
- KS 기준에서 요구하는 역학적 특성을 만족하기 위해서는 콘크리트의 기건 밀도는 1,300 ~ 1,600 kg/m^3 범위에 있어야함.
- 콘크리트의 유동성은 시공성 및 시멘트 페이스트의 충진을 위해 슬럼프 150 mm 이상을 목표로 하였음.
- 국토교통부의 에너지 절약 설계 기준에서는 열관류율 0.21 W/m^2 · K 이하로 제시하고 있음.
- 위의 KS 기준 및 국토교통부의 설계 기준에 기반하여 바텀애시 경량 골재 콘크리트 및 PC 판넬의 역학적 성능을 다음과 같이 설정하였음(표 1.11).

표 1.11 목표성능

구분	목표성능	
기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 PC 경량 콘크리트	슬럼프 : 150 mm 이상 기건 밀도 : 1,300~1,600 kg/m^3	압축강도 : 10 MPa 이상 열전도율 : 0.37 W/m · K 이하
기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 PC 경량 콘크리트 판넬	기건 밀도 : 1,300 kg/m^3 이하 압축강도 : 10 MPa 이상	열관류율 : 0.21 W/m^2 · K 이하

2. 바텀애시 골재 기반 고단열·지속가능 경량 콘크리트의 실내 배합 실험

2.1 사용재료

2.1.1 주요 결합재

- 배합에 사용된 OPC, GGBS 및 FA의 물리적 특성 및 화학적 조성비는 표 2.1과 표 2.2에 요약하였음.
- 보통 포틀랜드 시멘트의 밀도와 비표면적은 각각 3.15 g/cm^3 및 3,260 cm^2/g임. 주요 화학조성 성분은 62.4%의 CaO와 21.7%의 SiO_2로서 전체 화학조성 비중 80% 이상을 차지하고 있음.
- 고로슬래그 미분말의 밀도 및 비표면적은 각각 2.94 g/cm^3, 4,355 cm^2/g임. 주요 화학조성 성분은 43.9%의 CaO와 33.5%의 SiO_2로서 전체 화학조성비중 70% 이상을 차지하고 있음.
- 플라이애시의 밀도와 비표면적은 각각 2.20 g/cm^3 및 4,170 cm^2/g임. 플라이애시의 주요 화학적 조성은 57.7%의 SiO_2와 21.1%의 Al_2O_3로서 전체 화학조성 비중 85%이상을 차지함.

2.1.2 바텀애시 경량골재

- 사용된 바텀애시 경량 골재의 물리적 특성을 표 2.3에 나타내었음.
- 사용된 잔골재는 KS F 2527의 입도분포를 만족시키기 위하여 2 mm 이하 및 2~4 mm의 재료를 각각 7:3 중량 비율로 혼합하여 사용하였음(그림 2.1).
- 바텀애시 경량 잔골재 및 굵은 골재의 최대 크기는 각각 4 mm, 13 mm이며, 조립률은 2.74 및 6.55임. 잔골재 및 굵은 골재의 흡수율은 각각 11.1% 및 15.3%이며, 기건 밀도는 각각 1.79 g/cm^3 및 1.18 g/cm^{3}임.
- 바텀애시 경량 골재의 표면 및 내부는 그림 2.2와 같이 공극이 많이 분포하여 밀도가 0.92~1.52 g/cm^{3}으로 일반 골재 밀도의 약 42~65%의 수준임.

표 2.1 OPC의 물리적 특성 및 화학적 조성비

물리적 특성					화학 조성비 (%)						
밀도 (g/cm^3)	비표면적 (cm^2/g)	안정성 (%)	응결시간 (min)		SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	LOI1
			초결	종결							
3.15	3,260	0.05	230	345	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8

Note] 1 is Loss on ignition

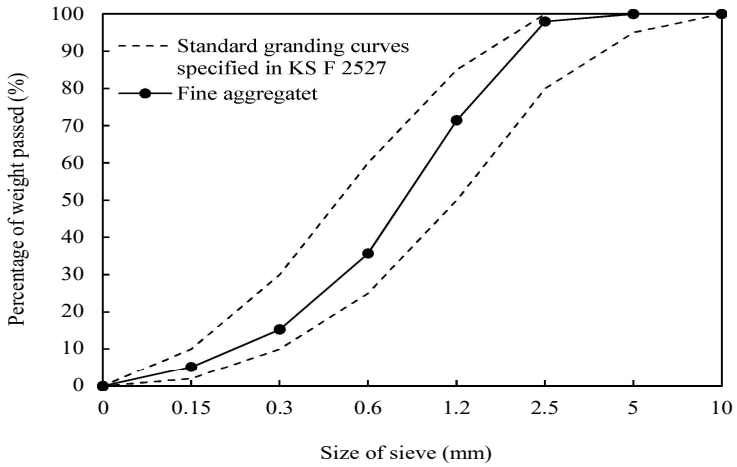
표 2.2 GGBS 및 FA의 물리적 특성 및 화학적 조성비

물리적 특성				화학 조성비 (%)						
재료	밀도 (g/cm^3)	비표면적 (cm^2/g)	함수율 (%)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	LOI1
GGBS	2.94	4,355	0.23	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5	3.9
FA	2.20	4,170	0.1	57.7	21.1	6.4	4.3	1.8	0.5	3.9

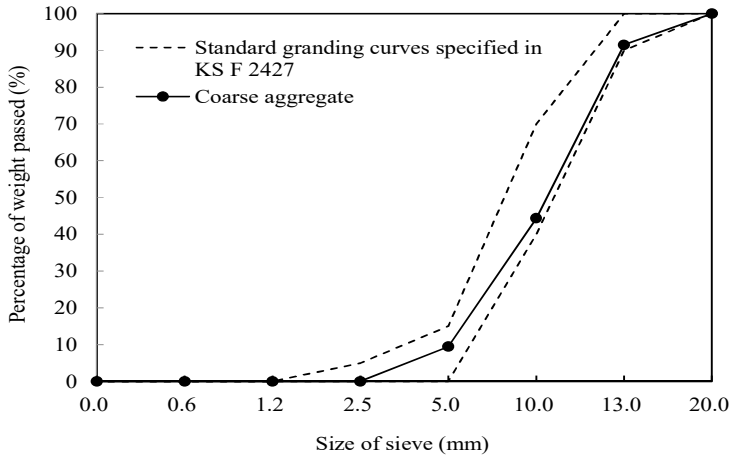
표 2.3 바텀애시 경량골재 물리적 특성

골재 종류	최대 치수 (mm)	밀도 (g/cm^3)	흡수율 (%)	조립률
잔골재	4	1.79	11.1	2.74
굵은 골재	13	1.18	15.3	6.55

- 바텀애시 경량 골재의 직경별 공극 분포 특성 결과는 그림 2.3 및 2.4와 같으며, 바텀애시 경량 골재는 일반 골재에 비해 다수의 공극이 분포함.
- 바텀애시 경량 골재의 내부 공극의 63%이상이 모세관 공극이었으며, 50 nm~50 μm 범위의 공극에 의해 지배됨. 5~13 mm, 2~4 mm 및 2 mm 이하의 바텀애시 골재의 전체 공극률 및 평균 공극직경은 각각 46.1%, 41.2% 및 30.4%와 60.2 nm, 82.6 nm 및 86.3 nm이었음. 이처럼 바텀애시 골재의 직경이 작을수록 전체 공극률은 작아지는 반면 평균 공극직경은 커짐.
- 따라서 바텀애시 골재는 크기가 작은 공극 비율이 증가 할수록 배합수를 흡수 및 배출하는 속도가 늦어지므로 콘크리트 배합 과정에서 골재의 함수량 관리를 위해 골재의 공극률 관리가 필요함.



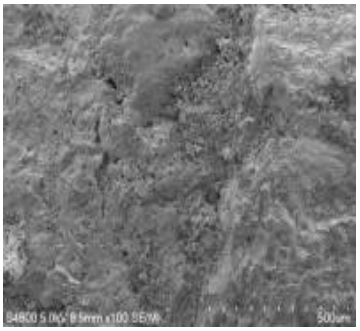
(a) 잔골재



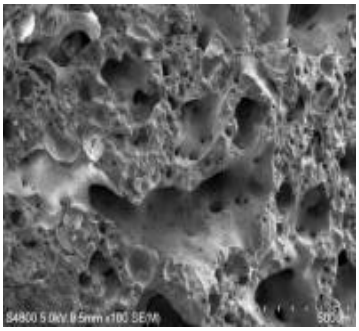
(b) 굵은골재

그림 2.1 바텀애시 경량골재 입도분포곡선

(a) 외관 모습



(b) 표면 SEM(× 750)



(c) 내부 SEM(× 750)

그림 2.2 바텀애시 경량골재 표면 외관 및 SEM

2.1.3 기포제

- 기포제는 밀도 1.06 g/cm^3 및 암갈색의 액상형태인 동물성을 사용하였음(그림 2.5).

2.1.4 스티로폼 알갱이(expanded polystyrene bead, 이하 EPS)

- 스티로폼 알갱이(EPS)는 밀도 0.033 g/cm^3 및 치수 2~5 mm의 구형의 재료를 사용하였음(그림 2.6).

2.1.5 폴리머 및 섬유

- 폴리머는 밀도와 평균 입자 크기가 각각 0.5 g/cm^{3}과 100 μm인 에칠렌 초산 비닐계 재유화형 분말을 사용하였음.
- 섬유는 밀도, 길이 및 직경이 각각 1.3 g/cm^3, 12~15 mm 및 15μm인 폴리비닐 알코올계 섬유를 사용하였음(그림 2.7).

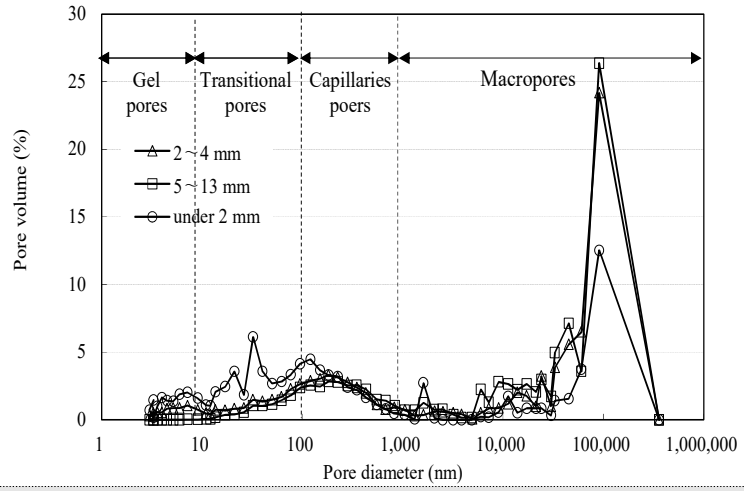


그림 2.3 바텀애시 경량골재 공극률

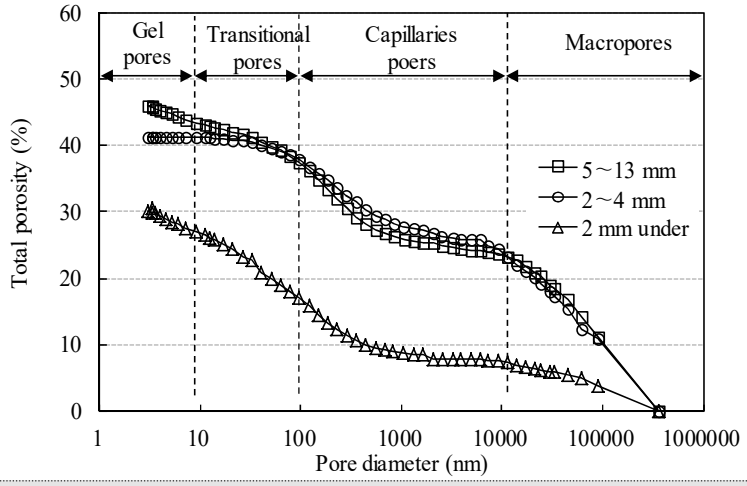


그림 2.4 경화된 페이스트의 누적 다공도

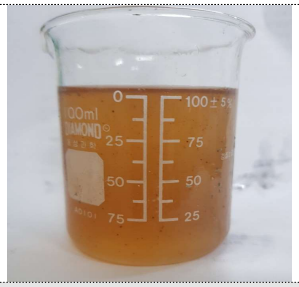


그림 2.5 기포제

그림 2.6 EPS

그림 2.7 섬유

2.2 배합계획

2.2.1 시리즈 1 (기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트)

① 배합상세

- 고단열 PC 판넬 적용을 위한 바텀애시 경량골재 콘크리트의 배합상세는 표 2.4에 나타내었음.
- 그룹 1~3의 주요변수는 기포 혼입률임. 그룹 1의 기포 혼입률은 0%, 10%, 25%, 30% 및 40%임. 그룹 2의 기포 혼입률은 0%, 5%, 10%, 15%, 30% 및 40%임. 그룹 3의 기포 혼입률은 0%, 5%, 10% 및 15%임.
- 그룹 4의 주요 변수는 기포 혼입률 및 단위결합재량임. 기포 혼입률은 0%, 10% 및 25%이고, 단위결합재량은 350, 400, 450, 500 및 550 kg/m^{3}임.
- 그룹 1~3의 양생조건은 콘크리트 실험체 배합 후 온도 20 ℃ 지속양생, 40 ℃ 및 60 ℃ 10시간 양생 후 항온 항습 환경(온도 20 ℃, 습도 60%)으로 양생 조건을 변경하였음(표 2.5).
- 그룹 4의 양생은 그룹 1~3의 조건과 함께 온도 40 ℃ 및 60 ℃ 지속 양생을 추가하였음.
- 그룹 1~4의 공통의 기본 조건은 결합재 비율(OPC 30%, GGBS 50% 및 플라이애시 20%) 및 바텀애시 경량 골재 100%(굵은 골재 및 잔골재)임. 그룹 1~3의 S/a는 47%이며, 단위결합재량은 450 kg/m^{3}임. 그룹 1, 2 및 3의 W/B는 각각 25%, 30% 및 40%임.
- 그룹 4의 S/a는 42%이며, W/B는 30%임. 5그룹의 W/B와 S/a는 각각 30% 및 42%이며, 단위결합재량은 450 kg/m^{3}임.
- 콘크리트 배합의 주요 제작 과정은 그림 2.8과 같음. 콘크리트의 배합은 바텀애시 골재와 결합재를 선투입하여 약 2분 동안 건비빔을 진행하였음. 건비빔 후 물을 넣어 습비빔하면서 감수제를 혼입하였음. 기포는 농도 2.5%의 농도로 물에 희석시킨 기포제를 압축공기로 생성하여 마지막으로 혼입하였음.
- 실험체명에서 첫 번째 숫자는 물-결합재비를, 두 번째 숫자는 기포 혼입률을, 세 번째 숫자는 단위결합재량을 의미함. 즉, 30-0-450은 W/B = 30%, R_a = 0%, B = 450 kg/m^3 인 실험체를 의미함.

② 측정요소

- 굳지 않은 콘크리트에서는 밀도, 슬럼프, 실기포율 및 침하깊이를 측정하였음. 굳지 않은 콘크리트 밀도는 KS F 4039에 따라 1,000 mL의 용기에 채취된 콘크리트를 표면 상부까지 채우고, 용기의 질량을 제외한 시료의 질량을 측정하였음.
- 슬럼프는 KS F 2402에 따라 높이 300 mm 슬럼프 콘을 이용하여 5 mm 단위로 측정하였음.
- 실 기포율은 이도헌 등이 제안한 간이 소포법을 이용하였음. 측정방법은 500 mL 메스실린더에 콘크리트의 시료 200 mL를 넣고 공업용 메틸 알코올 100 mL 넣어 슬러리중의 기포만 소포시켜 눈금을 읽어 체적을 측정하였음. 침하깊이는 KS F 4039에 따라 안지름 145 mm, 높이 300 mm인 투명 아크릴 용기에 콘크리트 시료를 상부까지 붓고, 시료를 채운 후 2시간 뒤에 1 mm 단위로 측정하였음.
- 굳은 콘크리트에서는 기건 밀도, 재령별 압축강도, 응력-변형률 관계, 파괴계수(f_r), 쪼갬 인장강도(f_{sp})를 측정하였음(그림 2.9).
- 기건 밀도 및 압축강도는 각각 KS F 2459, KS F 2405에 따라 ϕ 100 × 200 mm 실험체를 이용하였음. 기건 밀도 및 절건 밀도는 재령 28일에서, 압축강도는 재령 3일, 7일, 28일, 56일 및 91일에서 측정하였음.

표 2.4 바텀애시 경량골재 콘크리트 배합상세

Group	Specimens	W/B (%)	R_a (%)	B (kg/m^3)	Proportions (kg/m^3)						S.P (%)
					W	OPC	GGBS	FA	Coarse aggregate	Fine aggregate	
1	25-0-450	25	0	450	112.5	135	225	90	427	487	0.85
	25-10-450		10		112.5	135	225	90	372	433	0.30
	25-25-450		25		112.5	135	225	90	284	325	0.14
	25-30-450		30		112.5	135	225	90	245	286	0.05
	25-40-450		40		112.5	135	225	90	184	212	0.02
2	30-0-450	30	0		135	135	225	90	471	413	0.50
	30-5-450		5		135	135	225	90	376	435	0.50
	30-10-450		10		135	135	225	90	350	401	0.50
	30-15-450		15		135	135	225	90	318	365	0.50
	30-30-450		30		135	135	225	90	224	256	0.02
	30-40-450		40		135	135	225	90	162	186	0.01
3	40-0-450	40	0		180	135	225	90	384	439	-
	40-5-450		5		180	135	225	90	352	405	-
	40-10-450		10		180	135	225	90	322	368	-
	40-15-450		15		180	135	225	90	290	332	-
4	30-0-350	30	0	350	105	105	175	70	496	463	1.50
	30-10-350		10		105	105	175	70	428	399	1.50
	30-25-350		25		105	105	175	70	325	303	1.50
	30-0-400		0	400	120	120	200	80	474	442	1.50
	30-10-400		10		120	120	200	80	405	378	1.50
	30-25-400		25		120	120	200	80	303	282	1.50
	30-0-500		0	500	150	150	250	100	429	401	0.30
	30-10-500		10		150	150	250	100	360	336	0.03
	30-25-500		25		150	150	250	100	258	240	0.03
	30-0-550		0	550	165	165	275	110	407	379	0.12
	30-10-550		10		165	165	275	110	338	316	0.12
	30-25-550		25		165	165	275	110	236	220	0.01

(a) 골재 투입

(b) 결합재 및 골재 건비빔

(c) 습비빔

(d) 기포생성

(e) 기포혼입

(f) 배합완료

(g) 압축강도 실험체 타설

(h) 열전도율 실험체 타설

(i) 파괴계수 실험체 타설

그림 2.8 바텀애시 경량골재 콘크리트 실험과정

표 2.5 그룹별 양생 조건 및 측정요소

그룹	양생조건	측정요소
1	20℃ 지속	굳지 않은 콘크리트 : 밀도, 슬럼프, 실기포율 및 침하깊이 굳은 콘크리트 : 기건 밀도, 재령별 압축강도, 열전도율 및 자유건조수축
2	40℃(10 시간) → 20℃ 지속	
3	60℃(10 시간) → 20℃ 지속	
4	20℃ 지속 40℃(10 시간) → 20℃ 지속 40℃ 지속 60℃ 10 시간) → 20℃ 지속 60℃ 지속	굳지 않은 콘크리트 : 밀도, 슬럼프, 실기포율 및 침하깊이 굳은 콘크리트 : 기건 밀도 재령별 압축강도, 응력-변형률, 파괴계수, 쪼갬 인장강도, 열전도율 및 자유건조수축, 소성건조수축 및 구속건조수축(30-0-450, 30-10-450 및 30-20-450에서만)

(a) 압축강도

(b) 파괴계수

(c) 쪼갬인장강도

그림 2.9 굳은 콘크리트의 역학적 특성평가

- 응력-변형률 관계는 재령 28일에 측정하였는데, 탄성계수를 ACI 318에서 제시하고 있는 최대응력의 40% 지점의 기울기로 결정하였음. 파괴계수 및 쪼갬 인장강도는 각각 KS F 2408 및 2423에서 제시하고 있는 100 × 100 × 400 mm 및 ϕ 100 × 200 mm 원주형 실험체를 사용하여 재령 28일에서 500 kN용량의 만능 재료시험기를 이용하여 측정하였음.
- 콘크리트의 열전도율 측정은 ASTM C 518에 따라 평판 열류계 실험을 통해 300 × 300 × 50 mm의 실험체에 핫 플레이트(Hot plate, H/P)와 콜드 플레이트(Cold plate, C/P)를 직접 접촉한 뒤, 시료를 통해서 H/P에 열에너지가 C/P로 흘러가는 에너지양을 통해서 열전도율을 측정하였음.
- 콘크리트의 비탄성 변형은 자유, 구속 및 소성 건조수축으로 평가하였음.
- 자유 건조수축은 100 × 100 × 400 mm의 실험체를 이용하여 항온 항습 조건(온도 20±3℃ 및 상대습도 60±5%)에서 1일 양생 이후 탈형하였음. 건조수축 변형률은 탈형 직후부터 재령 180일까지 실험체 중앙에 매립된 전기저항 게이지를 이용하여 측정하였음.
- 구속 건조수축은 ASTM C 1581에 의해 제안된 측정방법에 따라 내부 강재링 외경 330 mm와 외부 강재링 외경 406 mm를 갖는 몰드를 이용하였음(그림 2.10).
- 실험체는 콘크리트가 타설된 후 24시간 동안 상부에 비닐을 덮어 습윤을 유지시켰음.
- 외부 강재링이 제거된 후 상부에 에폭시 레진을 도포한 후 강재 변형률과 첫 균열 시점은 내부 강재링 중심에서 안쪽 4방향으로 강재게이지를 부착하여 재령 28일까지 측정하였음.
- 또한, 육안으로 첫 균열이 판별된 후 PI-type 크랙 게이지를 부착하여 실험 종료 시까지 균열 폭을 측정함.
- 소성 건조수축 측정은 ASTM C 1579에 따라 그림 2.11과 같은 3개의 노치 바닥을 갖는 355 × 560 × 150 mm 몰드를 이용하여 타설된 직후부터 24시간 동안 소성수축에 의해 발생하는 균열 발생 여부를 확인하였음. 실험체는 소성수축을 유도하기 위해서 온도 35±3 ℃, 습도 30±3% 및 2 m/s 조건에서 양생하였음.

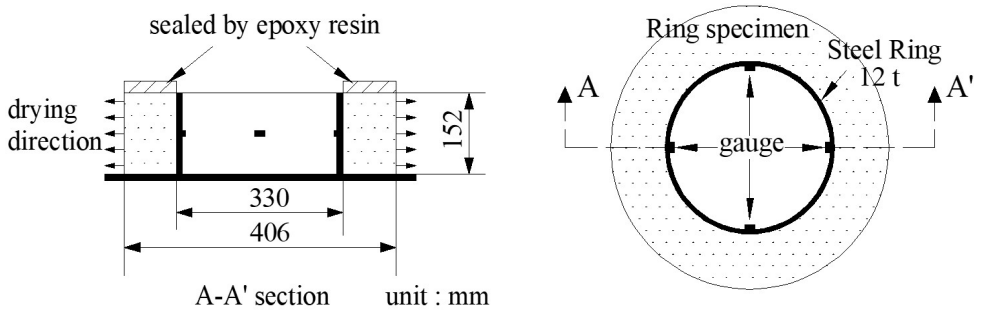


그림 2.10 구속 건조수축 실험체 상세

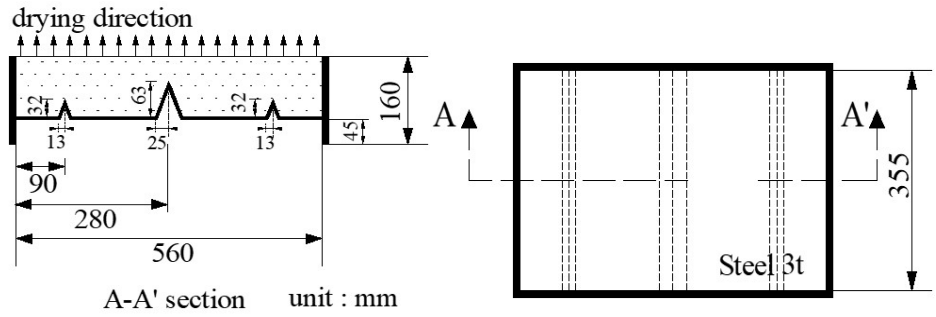


그림 2.11 소성 건조수축 실험체 상세

2.2.2 시리즈 2 (EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트)

① 배합상세

- 시리즈 2의 배합상세는 표 2.6에 나타내었음.
- 시리즈 2는 시리즈 1의 배합 시 발생했던 문제점인 기포 투입 후 혼합 시 골재와의 부딪힘으로 소포되는 기포량이 많아 품질관리가 어려움을 해결하기 위해서 EPS를 혼입하였음.
- EPS는 높은 흡수율에 따라 배합 시 배합수를 급격히 흡수로 인한 유동성 저하의 문제가 발생할 수 있음. 이에 따라 EPS는 배합 전 3일간 수중침지 후 콘크리트 배합에 투입하였음.
- 주요 변수는 EPS 혼입률 및 폴리머와 섬유의 혼입 여부와 양생 조건임. 폴리머와 섬유의 혼입 여부에 따라 2개의 그룹으로 나누었음.
- 그룹 1은 폴리머와 섬유를 혼입하지 않았으며, 그룹 2는 폴리머의 첨가율은 결합재 대비 7.5%로, 섬유 혼입률은 콘크리트의 용적대비 0.075%로 투입하였음.
- 그룹 1의 EPS 혼입률은 0%, 7.5%, 15% 및 25%로 변화하였으며, 그룹 2에서는 0%, 7.5% 및 15%로 변화하였음.
- 양생 조건은 콘크리트 실험체 배합 후 온도 20 ℃ 지속양생, 40 ℃(12시간) 및 60℃(10시간) 양생 후 항온 항습 환경(온도 20 ℃, 습도 60%)으로 양생 조건을 변경하였음.
- 결합재는 시리즈 1과 동일한 OPC, GGBS 및 플라이애시를 이용하였는데, 전체 결합재 대비 각 재료들의 첨가비율은 각각 30%, 50% 및 20% 이었음. 굵은골재 및 잔골재는 바텀애시 경량 골재만을 사용하였음. 이때 단위 결합재량은 450 kg/m^{3}로, W/B와 S/a는 각각 30% 및 42%로 고정하였음.
- 콘크리트 배합의 제작 과정은 그림 2.10에 나타내었으며, 그 과정은 다음과 같음; 1) 콘크리트 배합은 골재, 폴리머, 결합재 및 EPS를 선 투입하여 약 2분 동안 건비빔을 진행하였음 2) 건비빔 후 물을 넣어 습비빔하면서 섬유를 뭉치지 않게 나누어서 투입하였음 3) 이후 재료분리가 일어나지 않는 선에서 감수제를 마지막으로 투입하였음(그림 2.12).
- 실험체명에서 첫 번째 숫자는 단위 결합재량을, 두 번째 숫자는 EPS 혼입률을, 세 번째 문자는 그룹을 의미함. 예를 들어, 450-15-I은 B = 450 kg/m^3, E_a = 0%, 그룹 I인 실험체를 의미함.

표 2.6 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트 배합상세

Specimens	W/B (%)	S/a (%)	E_a (%)	B (kg/m^3)	Unit weight (kg/m^3)								S.P (%)
					W	OPC	GGBS	FA	Fine aggregate	Coarse aggregate	Polymer	PVA Fiber	
450-0-I	30	42	0	450	135	135	225	90	502.7	457.7	0	0	1.3
450-7.5-I			7.5		135	135	225	90	446.3	406.3	0	0	0.7
450-15-I			15		135	135	225	90	390	355	0	0	0.7
450-0-II			0		135	135	225	90	502.7	457.7	35	0.975	0.7
450-7.5-II			7.5		135	135	225	90	446.3	406.3	35	0.975	0.4
450-15-II			15		135	135	225	90	390	355	35	0.975	0.4

(a) 골재 및 결합재 투입 (b) EPS 투입 (c) 건비빔

(d) 습비빔 (e) 섬유 투입 (f) 배합 완료

(g) 슬럼프 및 밀도 측정 (h) 역학적 특성 실험체 타설 (i) 열전도율 특성 실험체 타설

그림 2.12 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트 배합

표 2.7 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 양생조건 및 측정요소

그룹	양생조건	측정요소
1	20℃ 지속 40℃(15 시간) → 20℃ 지속 60℃(10 시간) → 20℃ 지속	굳지 않은 콘크리트 : 밀도 및 슬럼프 굳은 콘크리트 : 기건 밀도, 절건 밀도, 재령별 압축강도 (450-25-I는 재령 28일 까지), 쪼갬인장 강도, 파괴계수, 자유건조수축 및 열전도율
2	20℃ 지속 40℃(15 시간) → 20℃ 지속 60℃(10 시간) → 20℃ 지속	굳지 않은 콘크리트 : 밀도, 슬럼프 굳은 콘크리트 : 기건 밀도, 절건 밀도, 재령별 압축강도, 쪼갬 인장강도, 파괴계수, 자유건조수축 및 열전도율

② 측정요소(표 2.7)

- 굳지 않은 콘크리트에서 밀도 및 슬럼프를 측정하였음. 굳지 않은 콘크리트에서 밀도의 실험값은 ASTM C 567(2014)에 의해 제시된 예측 값과 비교하였음.
- 굳은 콘크리트에서는 기건 밀도, 절건 밀도, 재령별 압축강도, 쪼갬 인장강도, 파괴계수, 자유건조수축 및 열전도율을 측정하였음. EPS 혼입률이 25%인 실험체는 기건 밀도, 절건 밀도, 재령별 압축강도 및 열전도율만 측정하였음.
- 각각 실험체들의 압축강도는 재령 3일, 7일, 28일, 56일 91일에서 측정하였음. EPS 혼입률이 25%인 실험체는 재령 3일, 7일, 28일에서 측정하였음.

2.3 실험결과 및 분석

2.3.1 시리즈 1 (기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트)

① 실기포율 및 초기 슬럼프

- 표 2.8에는 굳지 않은 콘크리트의 실험결과를 요약하여 나타내었음.
- 그림 2.13에는 그룹 1의 25-0-450(W/B = 25%, R_a = 0% 및 B = 450 kg/m^3)과 그룹 4의 30-0-350(W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 350 kg/m^3) 및 30-0-400(W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 400 kg/m^3) 실험체들의 감수제 첨가량에 따른 습비빔의 배합성을 나타내었음.
- 이들 실험체들은 다공성을 갖는 BS-LWA의 외부표면에 다량의 페이스트가 흡착되어 감수제 첨가량에 관계없이 유동성이 현저하게 부족하였음. 이는 외부 표면에 다수의 공극을 갖는 LWBSC (lightweight bottom ash concrete)에서 유동성을 확보하기 위해서는 일정량 이상의 단위결합재량이 필요함을 의미함.
- 유동성이 부족하여 충진이 충분히 이루어지지 않은 그룹 1의 25-0-450(W/B = 25%, R_a = 0% 및 B = 450 kg/m^3)과 그룹 4의 30-0-350(W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 350 kg/m^3) 및 30-0-400 (W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 400 kg/m^3) 실험체들을 분석에서 제외하였음.

표 2.8 굳지 않은 콘크리트 실험결과의 요약

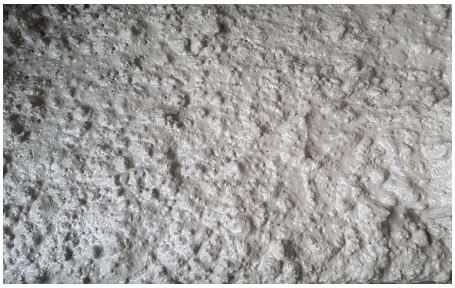
Group	Specimens	Actual foaming ratio (%)	Initial slump (mm)	Density (kg/m^3)	Depth of defoaming (mm)
1	25-10-450	12.5	210	1,582	0
	25-25-450	20	205	1,366	0
	25-30-450	27.5	245	1,253	0
	25-40-450	40	240	1,014	0
2	30-0-450	0	10	1,554	0
	30-5-450	5	15	1,428	0
	30-10-450	7.5	40	1,431	0
	30-15-450	12.5	70	1,335	0
	30-30-450	30	260	1,188	0
	30-40-450	40	270	968	0
3	40-0-450	0	0	1,507	0
	40-5-450	2.5	0	1,435	0
	40-10-450	5	140	1,361	2
	40-15-450	7.5	150	1,289	1
4	30-0-450	0	60	1,604	0
	30-10-450	10	180	1,521	1
	30-25-450	22.5	160	1,312	0
	30-0-500	0	150	1,658	0
	30-10-500	7.5	230	1,542	0
	30-25-500	20	250	1,341	0
	30-0-550	0	200	1,651	0
	30-10-550	7.5	210	1,578	0
	30-25-550	20	225	1,375	0

- 또한, 굳은 콘크리트의 탄성계수, 파괴계수 및 쪼갬 인장강도는 역학적 특성에 기반이 되는 재령 28일 압축강도의 함수로 무차원화하여 각 변수들의 영향을 분석하였음.
- 선기포 방식으로 제조하는 기포 콘크리트는 일반 콘크리트의 배합과 동일한 믹서방식을 사용하기 때문에 배합 시 기포의 손실이 동반될 수밖에 없음.
- 이러한 이유로 역학적 특성에 대한 기포의 영향을 정량적으로 평가하기 위해서는 실제 투입되는 기포량의 평가가 필요함.
- Lee at al.은 간이 소포법을 사용한 기포 콘크리트의 실기포율의 제어로 일정한 기포 콘크리트의 특성 관리가 가능함을 보였음.
- 따라서 계획된 기포 혼입량을 달성하기 위해서 각 배합에서는 간이 소포법을 이용하여 최대한도로 실기포율을 조절하였음.
- 하지만, 표 2.8에 나타낸 바와 같이 실제 실기포율은 계획된 기포 혼입률 대비 0.7~1.25 수준에 있었음. 실기포율과 계획된 기포 혼입률이 최대 30% 수준의 차이가 나는 이유는 기포 투입 후 혼합 시 골재와의 부딪힘으로 소포되는 기포량이 많아 실기포율의 제어가 어렵기 때문임.
- 초기 슬럼프는 그림 2.14에 나타낸 바와 같이 그룹 2에서 30-0-450(W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 450 kg/m^3), 30-5-450(W/B = 30%, R_a = 5% 및 B = 450 kg/m^3), 30-10-450(W/B = 30%, R_a = 10% 및 B = 450 kg/m^3) 및 30-15-450(W/B = 30%, R_a = 15% 및 B = 450 kg/m^3), 그룹 3에서 40-0-450(W/B = 40%, R_a = 0% 및 B = 450 kg/m^3), 40-5-450(W/B = 40%, R_a = 5% 및 B = 450 kg/m^3) 및 40-15-450(W/B = 30%, R_a = 15% 및 B = 450 kg/m^3), 그룹 4에서 30-0-450F(W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 450 kg/m^3)와 30-0-450R(W/B = 30%, R_a = 0% 및 B = 450 kg/m^3) 실험체들을 제외한 나머지 배합들에서 목표 슬럼프인 150 mm 만족하였음.
- 이때 감수제의 첨가량은 기포 혼입량이 증가함에 따라 감소하였음(그룹 1 및 4). 이는 기포 혼입량이 LWBSC의 슬럼프에 기여하기 때문임.
- 그룹 2는 기포 혼입률이 15% 까지는 감수제의 첨가량을 0.5%로 고정하였음.
- 그룹 2의 실험체들의 슬럼프는 기포 혼입률이 증가함에 따라 증가하였음.

(a) 그룹 1의 배합

(b) 그룹 1의 반죽상태

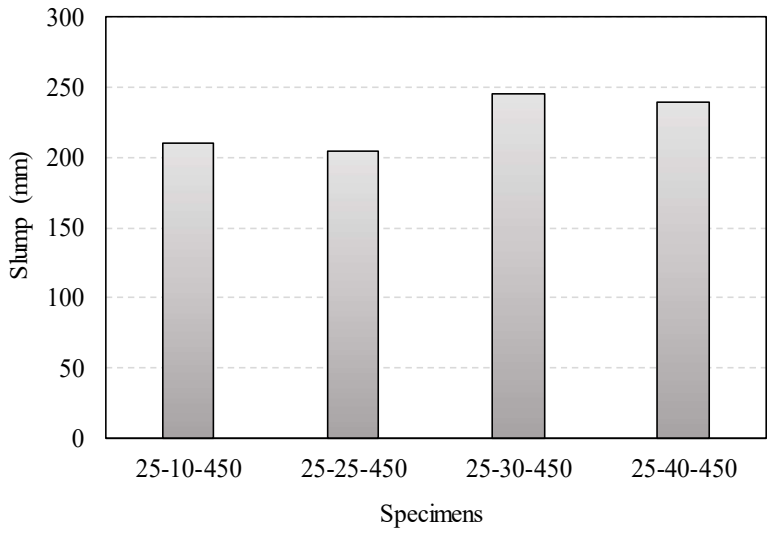
(c) 그룹 4의 배합



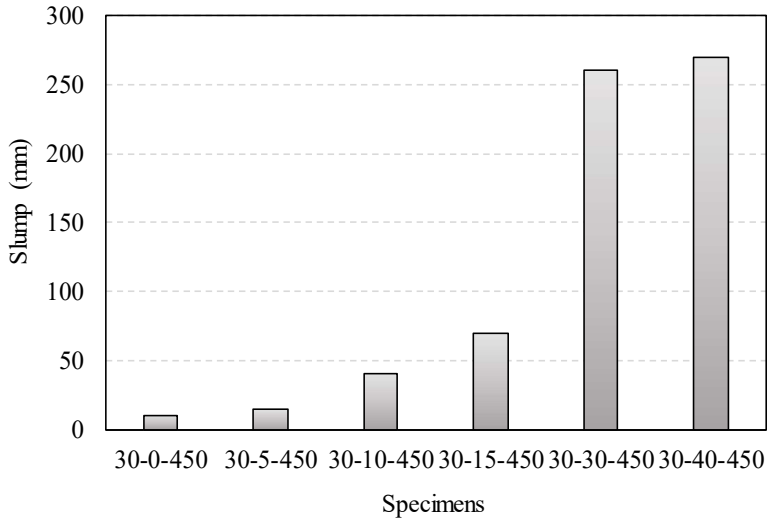
(d) 그룹 4의 반죽상태

그림 2.13 그룹 1과 4에서 습비빔의 배합성

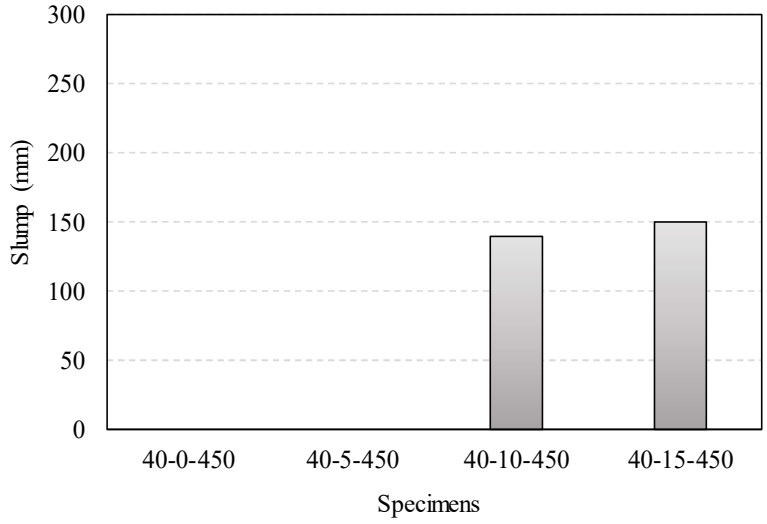
- 감수제가 0.02% 이하로 첨가된 기포 혼입률이 30%(30-30-450)와 40% 실험체(30-40-450)의 슬럼프는 각각 260 및 270 mm로 유동성이 매우 우수하였음.
- 그룹 1에서도 감수제가 0.05% 이하로 첨가된 기포 혼입률 30%(W/B = 25%, R_a = 30% 및 B = 450 kg/m^3)와 40% 실험체(W/B = 25%, R_a = 40% 및 B = 450 kg/m^3)의 슬럼프는 각각 245 및 240 mm로 유동성이 매우 우수하였음.
- 물-결합재비가 40%인 그룹 3은 감수제를 첨가하지 않았는데, 이로 인해 기포 혼입률이 0과 5%로 첨가된 실험체의 슬럼프는 0 mm 이었음.
- 기포 혼입률이 15% 이상으로 첨가된 실험체의 슬럼프는 목표치인 150 mm를 만족하였음.



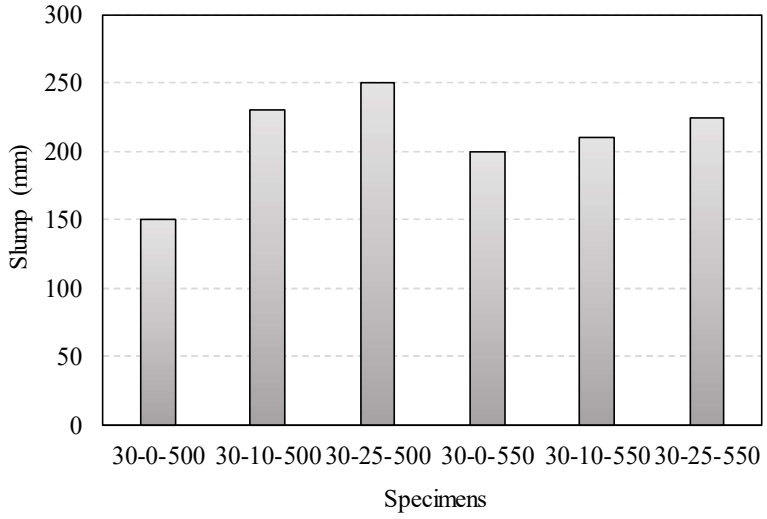
(a) 그룹 1



(b) 그룹 2



(c) 그룹 3



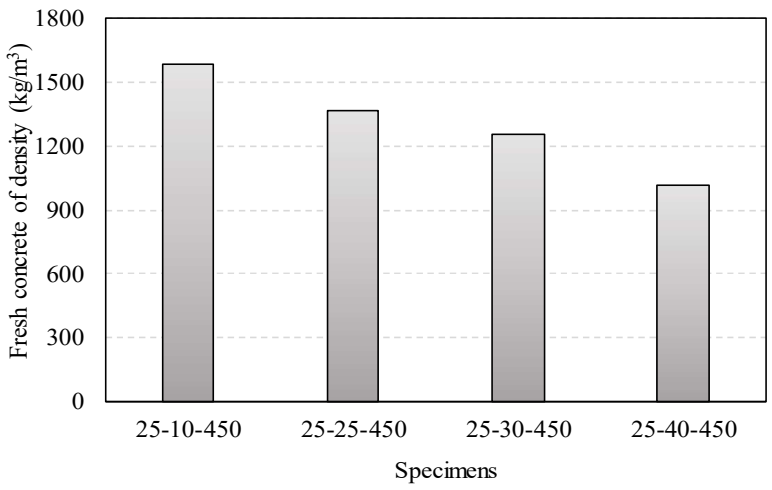
(d) 그룹 4

그림 2.14 슬럼프

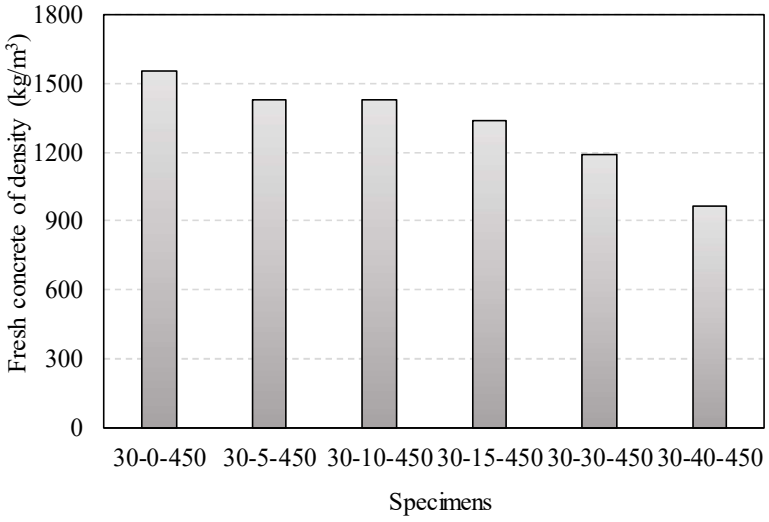
- 그룹 4에서 30-40-450F(W/B = 30%, R_a = 40% 및 B = 450 kg/m^3)의 배합은 감수제의 첨가량이 0.8% 이상에서 슬럼프가 급격히 증가하여 재료분리가 발생하였음.
- 이에 따라 30-40-450F(W/B = 30%, R_a = 40% 및 B = 450 kg/m^3)은 재배합을 통해 재료분리가 발생하지 않은 수준에서 감수제가 첨가하였는데, 이때 목표 슬럼프를 만족하지 못하였음.
- 특히 재현성 평가를 위해 수행된 그룹 5(B = 450 kg/m^3, R_a = 0~25%)인 실험체들의 슬럼프는 그룹 4의 실험 결과와 비슷한 수준에 있었음.
- 이는 산업체에서 보유하고 있는 재료들을 사용하더라도 비슷한 수준의 실기포율의 조정으로 슬럼프의 품질을 지속적으로 관리 할 수 있음을 의미함.
- 이로부터 LWBSC의 슬럼프는 기포 혼입률과 단위 결합재량에 의해 현저한 영향을 받음.
- 따라서 감수제를 사용하여 유동성을 확보하기 위해서는 단위 결합재량이 500 kg/m^3 이상이거나 단위 결합재량이 450 kg/m^3 이면서 10% 이상의 기포 첨가가 요구됨.

② 굳지 않은 콘크리트 밀도 및 침하깊이

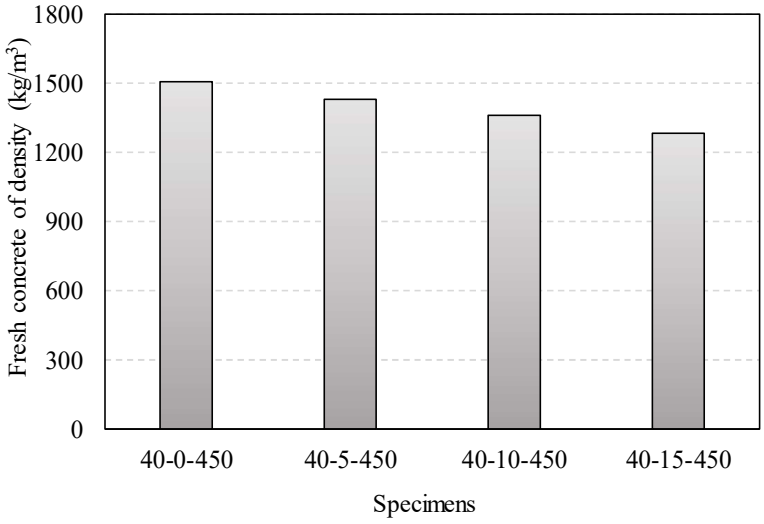
- 표 2.8에 나타낸 바와 같이 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 물-결합재비와 단위 결합재량 보다 기포 혼입률에 현저한 영향을 받았음.
- 기포 혼입률이 10%에서 40%로 증가할 때에 그룹 1과 그룹 2의 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 물-결합재비에 관계없이 평균 34% 감소하였음. 기포 혼입률이 0%에서 15%로 증가할 때에 그룹 2와 그룹 3의 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 평균 11% 감소하였음. 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 굳지 않은 콘크리트 밀도는 평균 20% 감소하였음.
- 그룹 1과 그룹 2에서 기포 혼입률이 10%인 실험체의 굳지 않은 콘크리트 밀도는 각각 1,582 kg/m^{3}와 1,428 kg/m^{3}이며, 기포 혼입률이 40%인 실험체들은 각각 1,014 kg/m^3 와 968 kg/m^{3}임(그림 2.15). 그룹 4에서 단위 결합재량이 450 kg/m^{3}인 실험체들의 굳지 않은 콘크리트 밀도는 1,604 ~ 1,312 kg/m^{3}에 있었으며, 단위 결합재량이 550 kg/m^{3}인 실험체들은 1,652 ~ 1,375 kg/m^{3}이었음.
- 단위 결합재량 450 kg/m^{3}인 과 550 kg/m^{3}의 차이는 평균적으로 3%로 단위 결합재량이 굳지 않은 콘크리트 밀도에 미치는 영향이 미미하였음(그림 2.15).
- 전반적으로 위의 실험 결과를 기반으로 콘크리트 밀도는 실제 1 m^{3}에 투입되는 각 구성 재료들의 양과 밀접한 관련이 있으며, 특히 기포 혼입률을 조정하여 굳지 않은 콘크리트 밀도의 수준을 제어할 수 있음.
- 그림 2.15(f)에는 굳지 않은 콘크리트 밀도와 단위 용적중량 배합표로부터 산정된 ACI 213의 예측 값을 비교하였음.
- 굳지 않은 콘크리트 밀도와 ACI 213의 예측 값은 선형 관계를 가지고 있는데, 실험값이 예측 값 보다 높았음. 굳지 않은 콘크리트 밀도 대비 ACI 213의 예측 값의 비는 1.00~1.15의 수준에 있었음.
- 이와 같이 저량 기포가 첨가된 LWBSC의 굳지 않은 콘크리트 밀도는 구성 재료들의 양에 기반한 ACI 213 기준으로부터 안전 측으로 예측할 수 있음.
- 한편, LWBSC의 침하 깊이는 물-결합재비, 단위결합재량 및 기포 혼입률에 관계없이 3 mm이하로 작았음. 이는 40% 이내의 기포 혼입이 굳지 않은 콘크리트에 비해 비중이 상대적으로 큰 BS-LWA의 침강을 방지할 수 있음을 의미함.



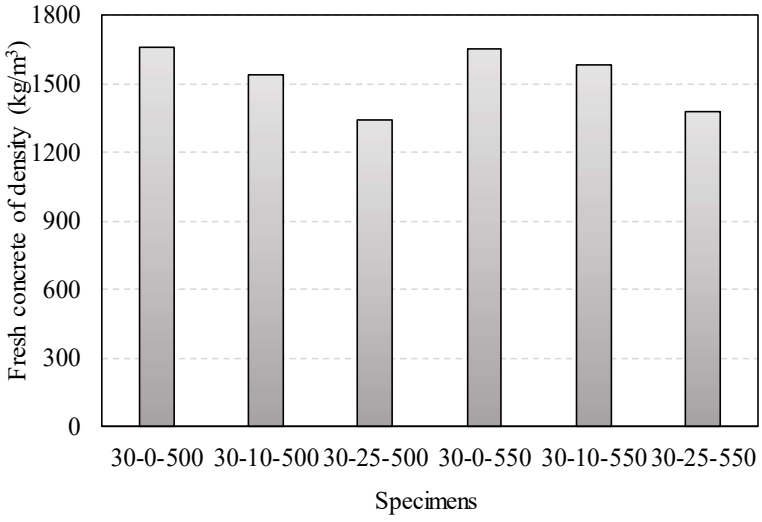
(a) 그룹 1



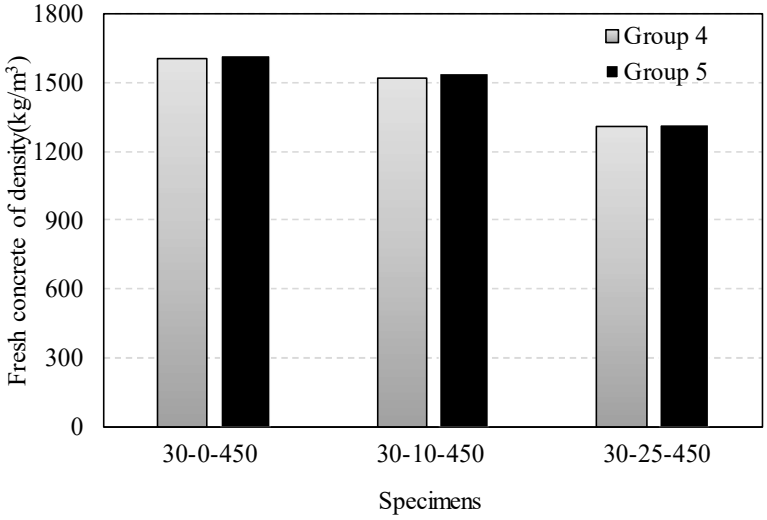
(b) 그룹 2



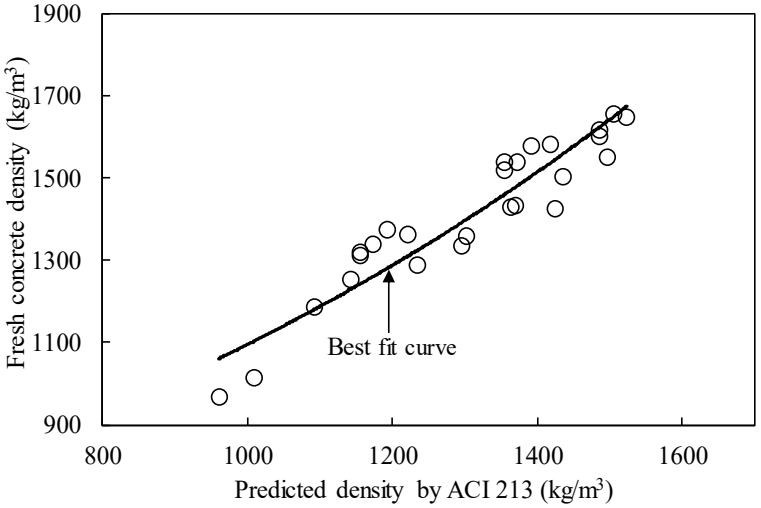
(c) 그룹 3



(d) 그룹 4



(e) 그룹 4 및 그룹 5



(f) 실험결과와 ACI 213의 예측 값과의 비교

그림 2.16 굳지 않은 콘크리트 밀도

2.3.2 시리즈 2 (EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트)

① 슬럼프 및 굳지 않은 콘크리트의 밀도

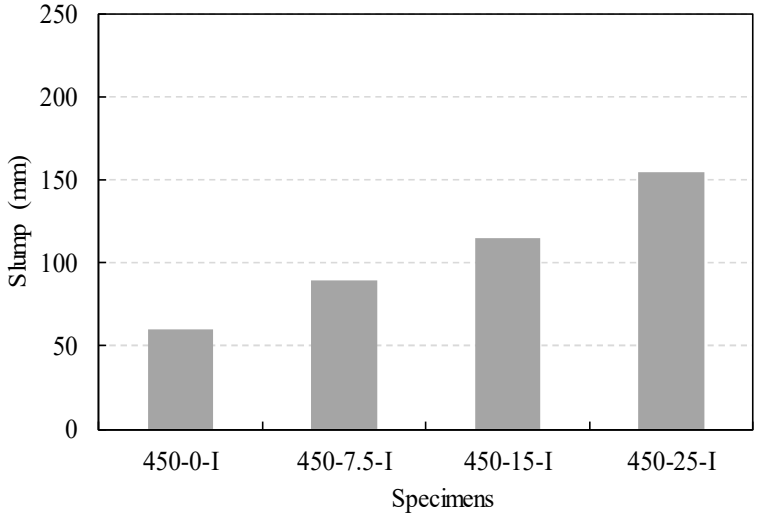
- 표 2.9에는 굳지 않은 콘크리트의 실험 결과를 나타내었음.
- 시리즈 1의 배합 결과를 기반하여 단위 결합재량을 450 kg/m^{3}으로 설정하였음.
- 그룹 1에서 EPS 혼입률이 25%인 실험체와 그룹 2의 모든 실험체의 초기 슬럼프는 목표 슬럼프인 150 mm를 만족하였음.
- 그룹 1에서 EPS 혼입률이 0~15%인 실험체들의 초기 슬럼프는 60~115 mm이었는데, 감수제의 첨가량은 EPS 혼입량이 증가함에 따라 감소하였음.
- 감수제가 0.4% 이하로 첨가된 450-15-II 실험체의 슬럼프는 210 mm로 유동성이 우수하였음.
- 결과적으로 EPS 혼입량의 증가와 폴리머의 첨가는 단열 콘크리트 배합의 유동성 개선에 기여하는

것으로 판단됨.

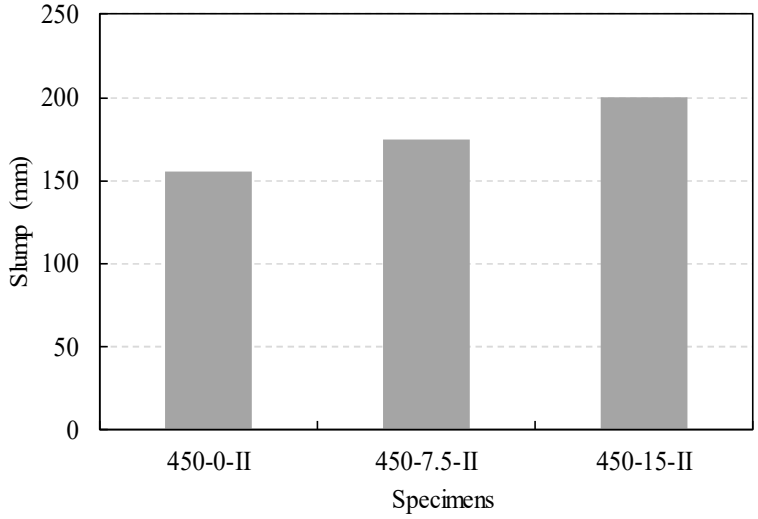
- 모든 실험체는 감수제의 첨가량이 1.5%를 초과할 때에 재료분리가 발생하였음.
- 그룹 1의 실험체들은 감수제의 첨가량이 1.5% 초과할 시 재료의 분리가 발생하였음.
- 이에 따라 재료분리가 일어나지 않는 수준에서 감수제를 첨가하였지만 450-25-I 실험체를 제외한 실험체들은 목표 슬럼프를 만족하지 못하였음.
- 그림 2.16(c)에는 그룹 1과 2를 비교하여 나타내었음. 그룹 2의 폴리머 및 섬유가 혼입된 실험체들의 초기 슬럼프는 평균 2배 높았음.
- 표 2.8에는 굳지 않은 콘크리트의 밀도를 나타내었음.
- EPS가 첨가된 바텀애시 경량 골재 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 EPS 혼입률이 증가함에 따라 현저하게 감소하였음. EPS 혼입률이 0%에서 15%로 증가할 때에 폴리머와 섬유의 첨가 여부에 관계없이 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 약 16% 감소하였음.
- 표 2.8에 나타낸 실험 결과를 기반으로 실험체들의 굳지 않은 콘크리트 밀도는 실제 1 m^3에 투입되는 재료들의 단위 중량과 관련이 있었음.
- 이는 EPS 혼입률의 변화로 바텀애시 경량 골재 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 밀도를 조정할 수 있음.
- 그림 2.17(c)에는 굳지 않은 콘크리트 밀도와 배합표로부터 산정된 ASTM C 567의 예측 값을 비교하였음.
- 굳지 않은 콘크리트 밀도와 ASTM C 567의 예측 값은 선형 관계를 가지고 있으며, 실험값이 예측값보다 높았음. 굳지 않은 콘크리트 밀도 대비 ASTM C 567의 예측 값의 비는 0.97~0.99의 수준에 있었음.
- 이와 같이 25% 이하의 수준으로 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 ASTM C 567 기준으로부터 안전 측으로 예측할 수 있음.

표 2.9 시리즈 2의 굳지 않은 콘크리트 실험결과 요약

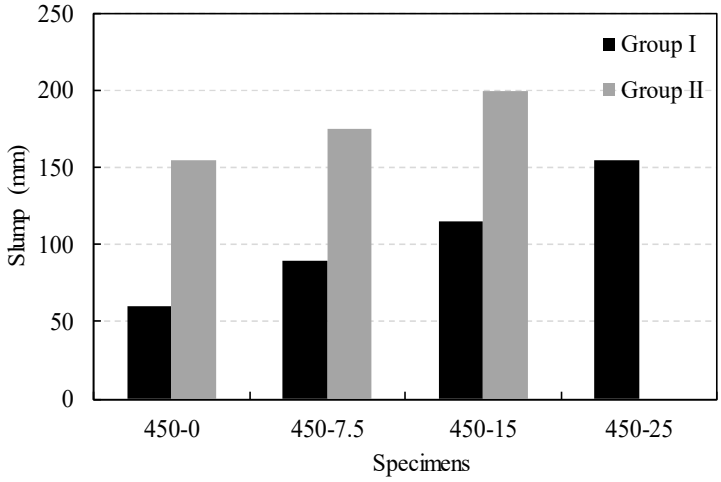
Specimens	Density of fresh concrete (kg/m^3)		Initial Slump (mm)
	ASTM C 567 (2014)	Experiment	
450-0-I	1,550	1,573	60
450-7.5-I	1,442	1,460	90
450-15-I	1,334	1,362	115
450-25-I	1,191	1,211	155
450-0-II	1,550	1,567	155
450-7.5-II	1,442	1,452	175
450-15-II	1,334	1,322	200



(a) 그룹 1

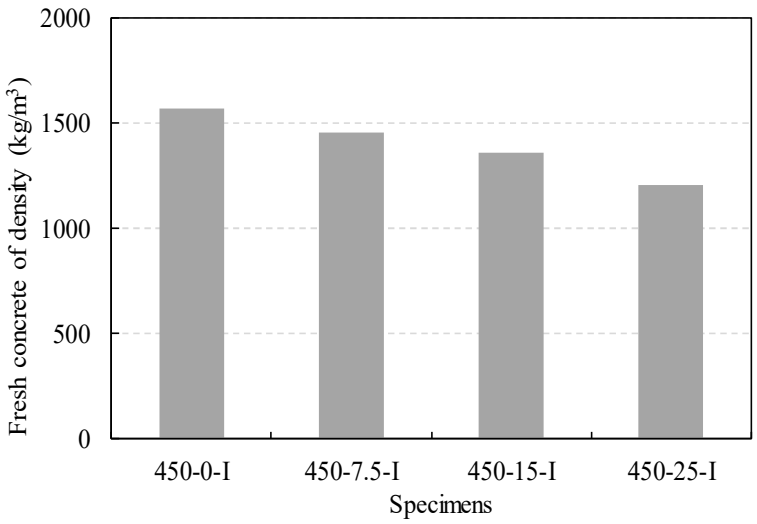


(b) 그룹 2

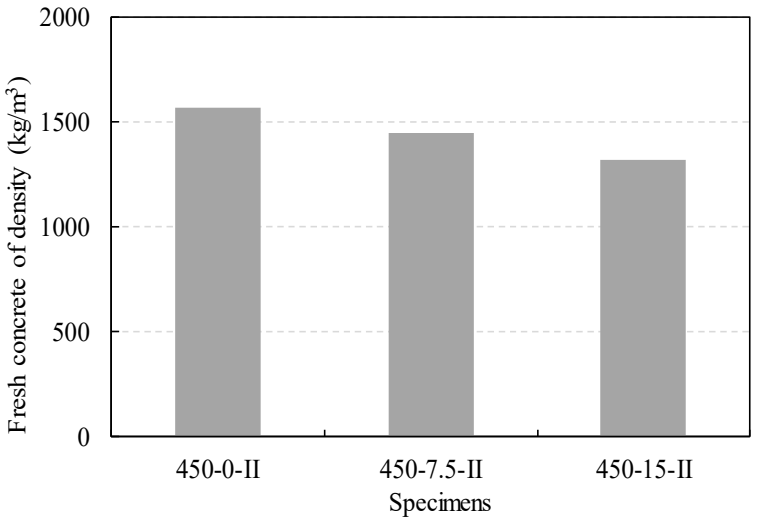


(c) 그룹 1 및 그룹 2의 비교

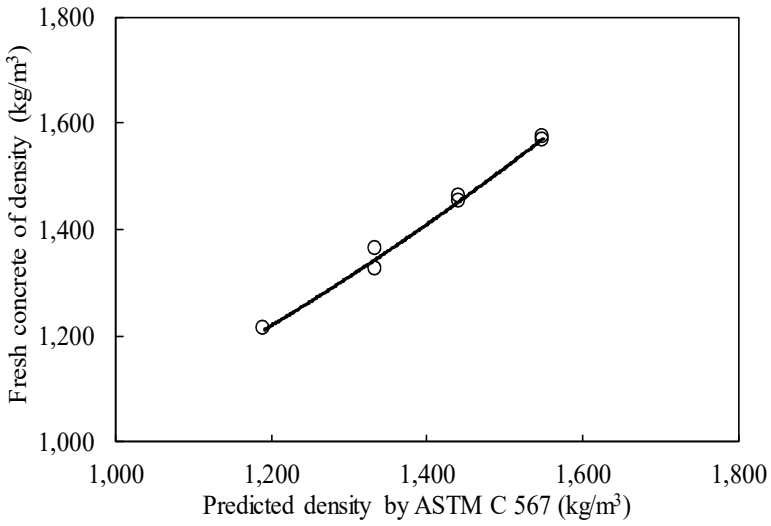
그림 2.16 슬럼프



(a) Group Ⅰ



(b) Group Ⅱ



(c) 실험결과와 ASTM C 567의 예측 값과의 비교

그림 2.17 굳지 않은 콘크리트의 밀도

3. 바텀애시 골재 기반 고단열·지속가능 경량 콘크리트의 물리적·역학적 및 열적 특성 평가

3.1 시리즈 I (기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트)

3.1.1 기건밀도

- 재령 28일 기건 밀도(ρ_c)도 굳지 않은 콘크리트 밀도의 경향과 비슷하였음(표 3.1).
- 기포 혼입률이 10%에서 40%로 증가할 때에 그룹 1과 그룹 2의 ρ_c는 물-결합재비에 관계없이 평균 32% 감소하였음.
- 기포 혼입률이 0%에서 15%로 증가할 때에 그룹 2와 그룹 3의 ρ_c는 평균 10% 감소하였음. 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 굳지 않은 콘크리트 밀도는 평균 17% 감소하였음.
- 그룹 1과 그룹 2에서 기포 혼입률이 10%인 실험체의 ρ_c는 각각 1,572 kg/m^{3}와 1,375 kg/m^{3}이며, 기포 혼입률이 40%인 실험체들은 각각 1,044 kg/m^3 와 951 kg/m^{3}임(그림 3.1).
- 그룹 4에서 단위 결합재량이 450 kg/m^{3}인 실험체들의 ρ_c는 1,524 ~ 1,287 kg/m^{3}에 있었으며, 단위 결합재량이 550 kg/m^{3}인 실험체들은 1,621~1,345 kg/m^{3}이었음. 단위 결합재량 450 kg/m^{3}와 550 kg/m^{3}의 차이는 평균적으로 6%로 단위 결합재량이 굳지 않은 콘크리트 밀도에 미치는 영향이 미미하였음(그림 3.1).
- 또한 재령 28일 기건 밀도(ρ_c)는 물-결합재비, 단위 결합량 및 기포 혼입률에 관계없이 양생온도에 미치는 영향은 미미하였음.
- 그룹 1과 2에서 기포 혼입률이 30%인 실험체의 ρ_c는 양생온도 20 ℃에서 각각 1,288 kg/m^{3}과 1,139 kg/m^{3}이었으며, 양생온도 60 ℃에서는 1,279 kg/m^3 및 1248 kg/m^{3}로 약 1% 이내의 차이를 보임.
- 이와 같은 경향은 그룹 3 및 4에서 비슷하였음.
- 그림 3.2(e)에 나타낸 바와 같이 굳지 않은 콘크리트 밀도와 마찬가지로 재령 28일 ρ_c는 ACI 213의 예측 값과 선형 관계를 보였는데, 실험 결과 대비 예측 값의 비가 0.95~1.07수준에 있었음.
- 이로부터 기포가 40% 이하로 첨가된 LWBSC의 ρ_c를 ACI 213의 기준으로부터 대부분 안전 측으로 예측할 수 있음.

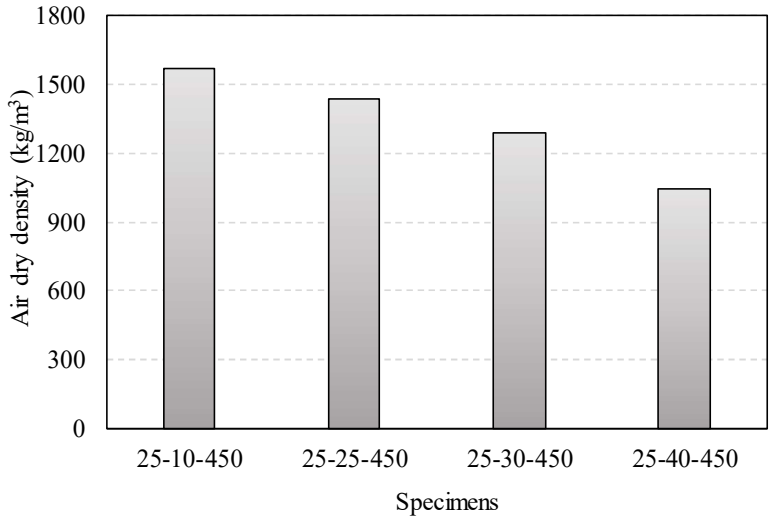
3.1.2 재령 28일 압축강도 및 재령별 압축강도

- 재령 28일 압축강도(f_{ck})는 단위 결합재량 보다 물-결합재 비, 기포 혼입률 및 양생 조건에 현저한 영향을 받았음(그림 3.3과 표 3.2).
- 그룹 1과 2에서 기포 혼입률이 10%에서 40%로 증가할 때에 f_{ck}는 각각 84% 및 89%로 감소하였는데, 이는 기포 혼입률 증가에 따른 f_{ck}의 감소 기울기가 물-결합재비에 영향을 받음을 의미함.
- 또한, 그룹 2과 3에서 기포 혼입률이 0%에서 15%로 증가할 때에 f_{ck}는 각각 67% 및 41%로 감소하였음.
- 반면, f_{ck}에 양생온도가 미치는 영향은 미미하였음. 온도 20 ℃와 40 ℃에서 양생된 기포 혼입률 15%인 콘크리트 실험체의 f_{ck}는 각각 5.5 MPa와 5.6 MPa이었는데, 온도 60 ℃로 양생된 실험체와 비슷하였음.
- 그룹 1과 2는 그룹 3의 경향과 비슷하였음. 하지만, 그룹 2에서의 기포 혼입률 증가에 따른 f_{ck}의 감소율은 그룹 3 보다 높았음.

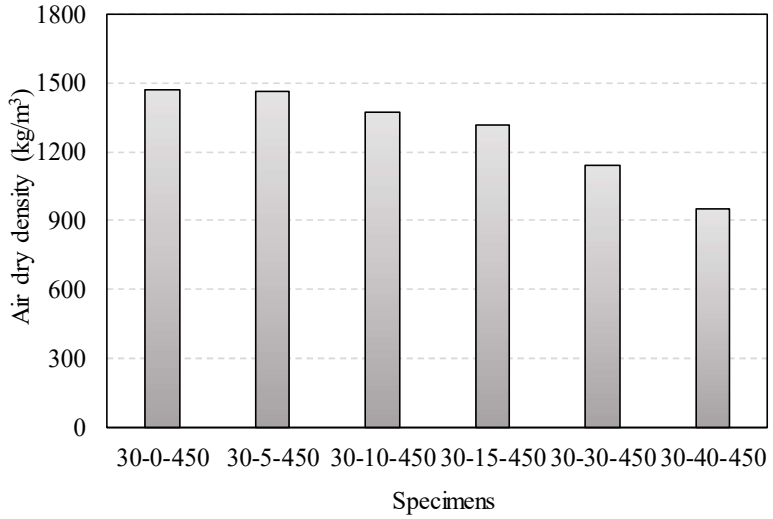
표 3.1 굳은 콘크리트 실험결과의 요약

Group	Specimens	ρ_c (kg/m^3)					E_c (MPa)	$\frac{E_c}{\sqrt{f_{ck}}}$	f_r (MPa)	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	f_{sp} (MPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	k_c (W/m · K)	Free drying shrinkage (μ)	Steel ring strain (μ)	Crack width (mm)
		20 ℃	40 ℃ (10h)	60 ℃ (10h)	40 ℃	60 ℃										
1	25-10-450	1,572	1,583	1,575									0.471	571		
	25-25-450	1,440	1,446	1,446									0.347	677		
	25-30-450	1,288	1,266	1,279									0.298	704		
	25-40-450	1,044	1,041	1,096									0.251	805		
2	30-0-450	1,473	1,488	1,497									0.483	583		
	30-5-450	1,465	1,435	1,462									0.479	690		
	30-10-450	1,375	1,361	1,384									0.433	690		
	30-15-450	1,319	1,335	1,328									0.406	879		
	30-30-450	1,139	1,136	1,148									0.286	922		
	30-40-450	951	948	953									0.244	1,054		
3	40-0-450	1,473	1,488	1,497									0.483			
	40-5-450	1,465	1,435	1,462									0.479			
	40-10-450	1,375	1,361	1,384									0.433			
	40-15-450	1,319	1,335	1,328									0.406			
4	30-0-450	1,524	1,531	1,536	1,536	1,533	15,116	3,112	3.18	0.655	2.02	0.416	0.455	582	53	1.75
	30-10-450	1,424	1,424	1,439	1,435	1,423	10,366	2,600	2.32	0.582	1.31	0.329	0.394	654	42	1.44
	30-25-450	1,287	1,285	1,301	1,301	1,282	6,068	2,081	1.52	0.21	0.68	0.233	0.341	769	40	1.33
	30-0-500	1,585	1,593	1,596	1,588	1,601	17,005	3,291	3.42	0.662	2.33	0.451	0.526	567		
	30-10-500	1,454	1,441	1,459	1,445	1,462	12,055	2,841	2.55	0.601	1.4	0.33	0.421	616		
	30-25-500	1,316	1,322	1,334	1,321	1,338	7,056	2,306	1.62	0.528	0.75	0.245	0.359	730		
	30-0-550	1,621	1,635	1,637	1,629	1,625	17,843	3,396	3.56	0.678	2.54	0.483	0.589	553		
	30-10-550	1,549	1,546	1,566	1,551	1,571	14,545	3,087	2.88	0.611	1.77	0.376	0.485	614		
	30-25-550	1,345	1,370	1,366	1,375	1,368	7,880	2,294	1.88	0.547	0.91	0.265	0.381	667		

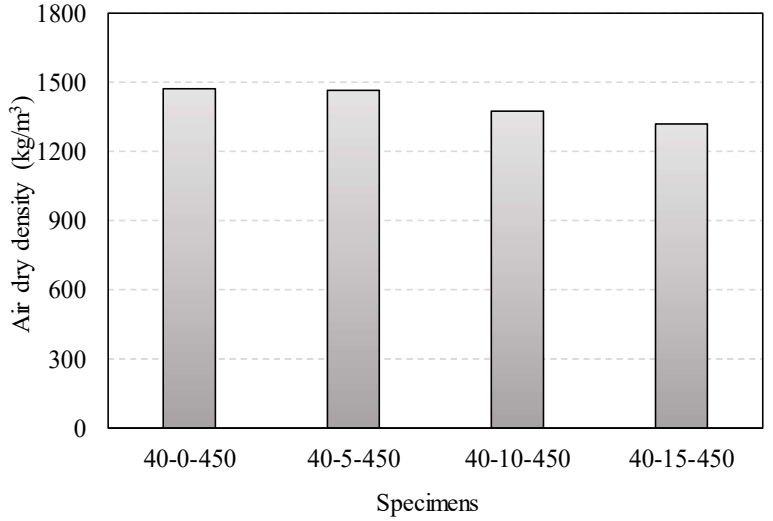
ρ_c is air dry density, E_c is elastic modulus, f_{ck} is compressive strength at age of 28 days, f_r is rupture of modulus, f_{sp} is splitting strength and k_c is thermal conductivity



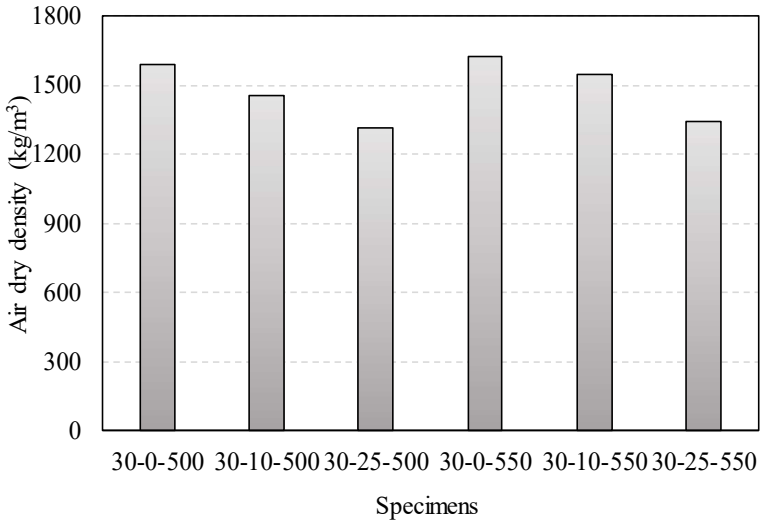
(a) 그룹 1



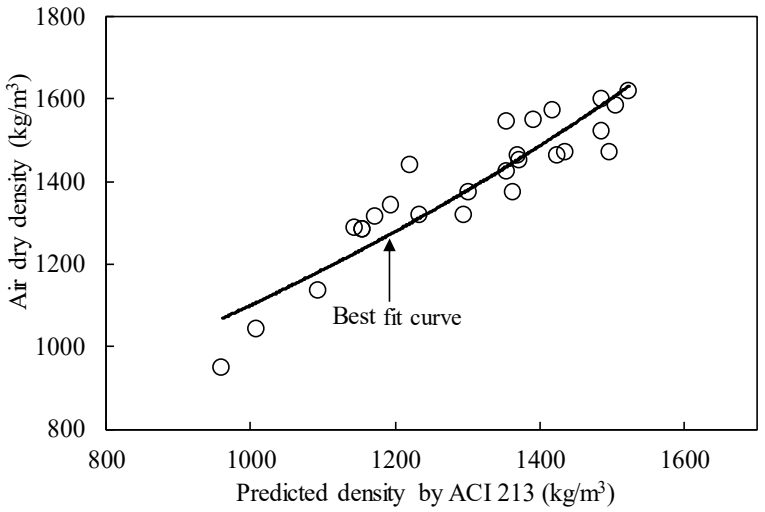
(b) 그룹 2



(c) 그룹 3

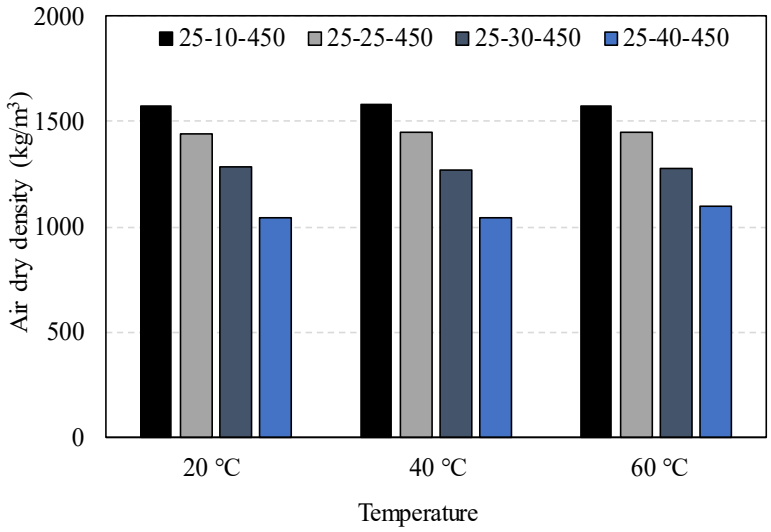


(d) 그룹 4

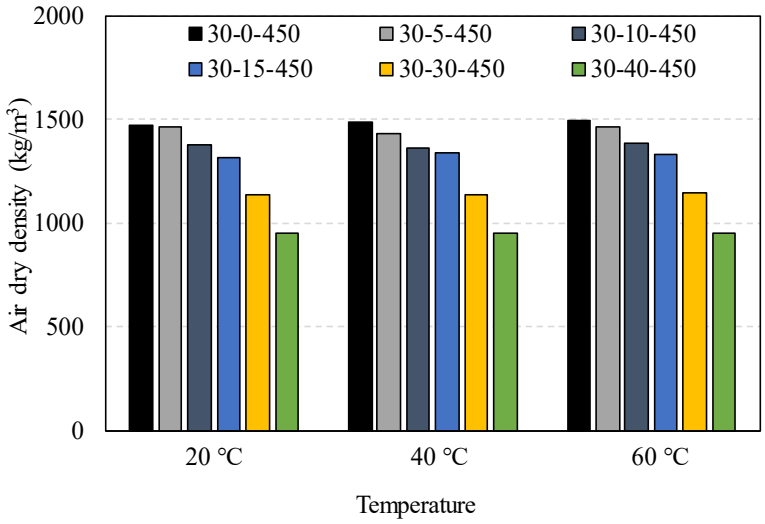


(e) 실험결과와 ACI 213의 예측값과의 비교

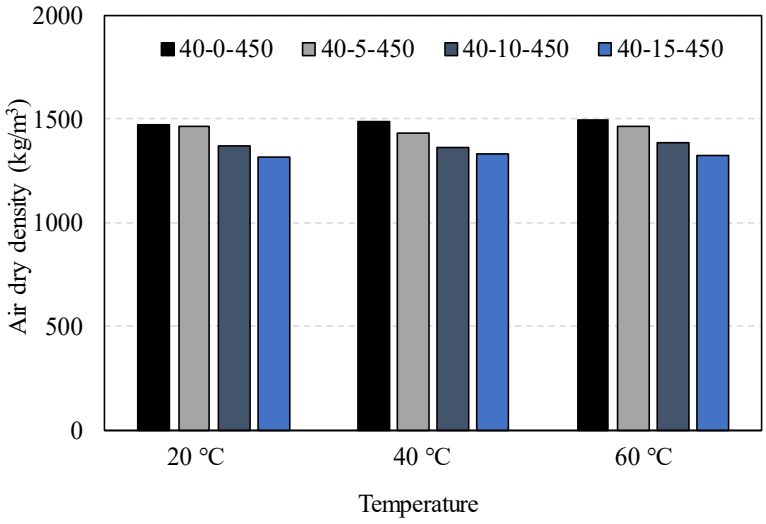
그림 3.1 기건 밀도



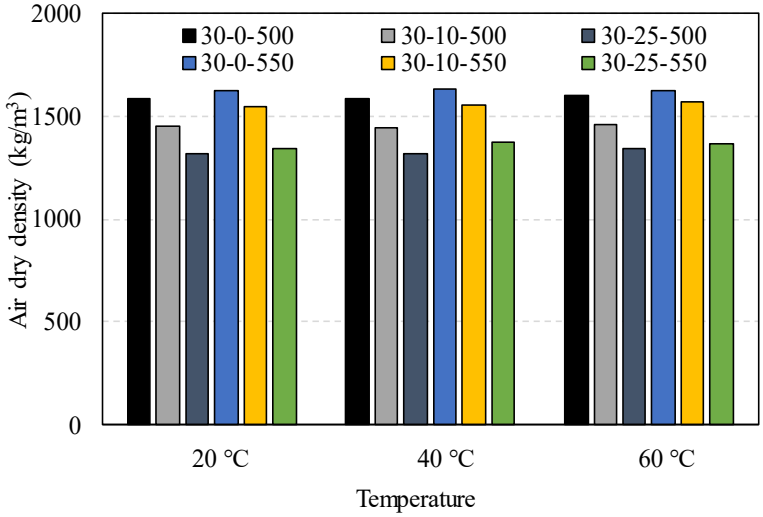
(a) 그룹 1



(b) 그룹 2



(c) 그룹 3

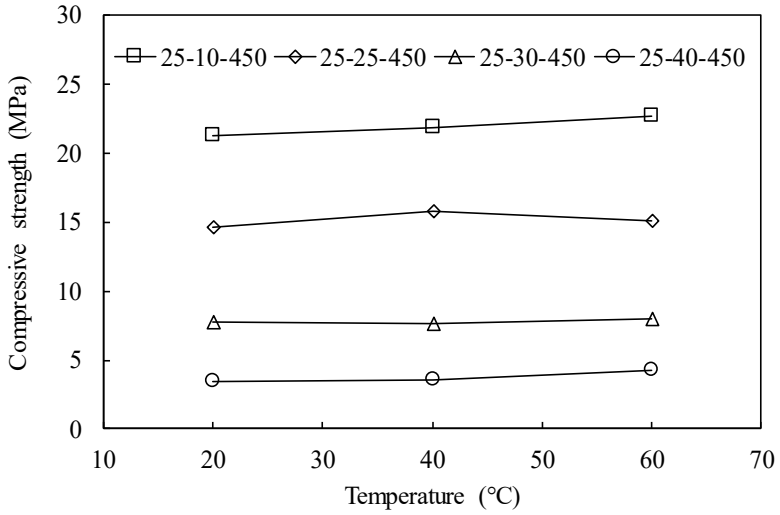


(d) 그룹 4

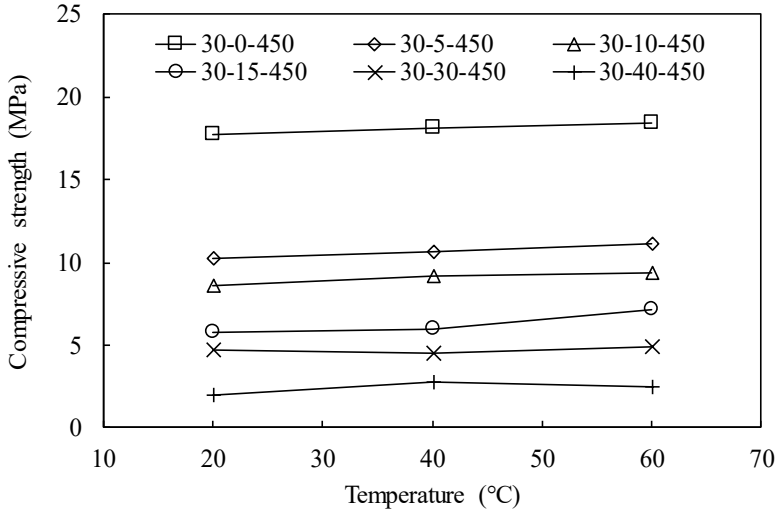
그림 3.2 양생온도에 따른 기건 밀도

표 3.2 재령별 압축강도

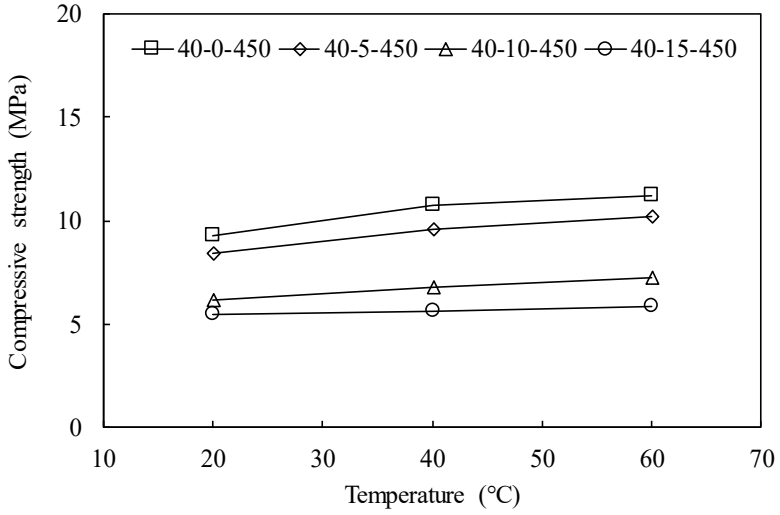
Group	Specimens	20 ℃					40 ℃ (10 hour) → 20 ℃					40 ℃					60 ℃ (10 hour) → 20 ℃					60 ℃				
		3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days	3 days	7 days	28 days	56 days	91 day	3 day	7 day	28 day	56 day	91 day
1	25-10-450	10.6	14.7	21.3	22.6	23.4	9.4	15.2	21.9	23.2	24.1						10.9	15.4	22.7	23.2	23.9					
	25-25-450	6.9	9.5	14.6	15.3	16.6	7.7	10.5	15.8	16.2	17.3						7.5	9.7	15.1	15.8	17.1					
	25-30-450	2.4	5	7.7	8.3	8.5	2.5	4.5	7.6	7.9	8.3						2.6	5.1	8	8.3	8.5					
	25-40-450	0.9	1.6	3.4	4	4.3	1.2	1.8	3.6	4.1	4.5						1.1	2.4	4.2	4.6	4.9					
2	30-0-450	11.1	14.6	17.7	18.3	18.9	11.6	15.2	18.1	18.6	19.1						12.4	16.2	18.4	19.2	19.6					
	30-5-450	6.1	8.3	10.2	10.8	10.9	6.6	8.6	10.6	11.1	11.4						7.4	9.6	11.1	11.5	11.8					
	30-10-450	4.9	6.8	8.6	9.1	9.4	5.5	7.5	9.2	9.5	9.7						5.9	7.7	9.4	9.5	9.8					
	30-15-450	3.1	4.4	5.8	5.9	6.1	3.2	4.5	6	6.2	6.3						4.2	5.9	7.1	7.4	7.6					
	30-30-450	1.6	2.1	4.7	5.2	5.5	1.7	2.4	4.5	5.1	5.3						1.7	3	4.9	5.3	5.9					
	30-40-450	0.8	1.1	2	2.5	2.8	0.7	1.3	2.8	3.5	3.9						0.9	1.3	2.5	3.3	4.2					
3	40-0-450	5.8	7.5	9.3	9.5	10.2	6.8	9.2	10.8	11.1	11.4						7.3	10.1	11.2	11.5	11.9					
	40-5-450	4.8	6.5	8.4	8.9	9.1	5.8	8.1	9.6	9.9	10.6						6.2	9	10.2	10.4	10.9					
	40-10-450	3.5	4.7	6.2	6.7	7.1	4	5.3	6.8	7.1	7.6						4.4	6.2	7.3	7.6	8					
	40-15-450	3	4	5.5	5.7	5.9	3.1	4.2	5.6	5.8	5.9						3.5	4.8	5.9	6.2	6.3					
4	30-0-450	10.4	20.4	23.6	24.2	24.4	10.7	20.9	23.8	24.6	25.1	12.1	21.3	23.9	24.7	25	12.8	21.3	23.5	24.3	24.7	12.7	22.2	24.1	24.9	25.5
	30-10-450	6.9	13.8	15.9	16.3	16.9	7.1	14.5	16.4	16.8	17.3	7.9	14.7	16.5	17.1	17.8	8.5	15.4	16.9	17.3	17.7	8.8	15.7	17.4	18	18.6
	30-25-450	1.4	6	8.5	8.7	8.8	1.7	5.8	7.9	8.4	8.8	2.1	6.2	8.2	8.8	9.1	2.4	6.2	7.9	8.6	8.7	2.8	6.2	7.9	8.5	9
	30-0-500	11.2	23.5	26.7	27.3	27.7	11.6	22.5	25.4	26.5	27.1	13.6	24.5	26.4	27.5	28.9	15	25.2	26.8	28.5	28.8	14.6	25.9	27.2	28.9	29.3
	30-10-500	7.8	15.8	18	19	19.7	7.9	15.5	17.6	18.4	19.2	9.1	16.5	17.6	18.7	19.4	9.7	16.8	17.8	19.1	19.6	10.6	16.9	18.2	19.6	20
	30-25-500	2.4	7.3	9.4	10	10.5	2.5	7.9	9.9	11	11.2	2.8	8.5	10.4	11.2	11.4	3.1	8.2	9.7	10.6	11.3	3.9	9.5	10.3	11.3	12.2
	30-0-550	12.4	24.3	27.6	28.3	28.9	13.1	25.2	27.3	28.1	29.2	14.9	25.9	27.6	28.8	29.7	15.4	26.7	27.6	28.6	29.5	14.3	27.3	27.9	28.9	29.9
	30-10-550	9.7	19.1	22.2	23.7	25.3	10.4	21.7	23.3	24.1	24.7	12.1	22.9	23.7	24.8	25.2	15.3	24.1	24.6	25.5	25.6	13.7	23.7	24.4	25	25.2
	30-25-550	2.8	10.1	11.8	12.2	12.7	3.4	12.5	12.9	13.1	13.4	3.6	12.5	13.1	13.3	13.8	3.9	11.5	12.9	13.1	13.3	4.4	12.1	13.2	13.6	13.9



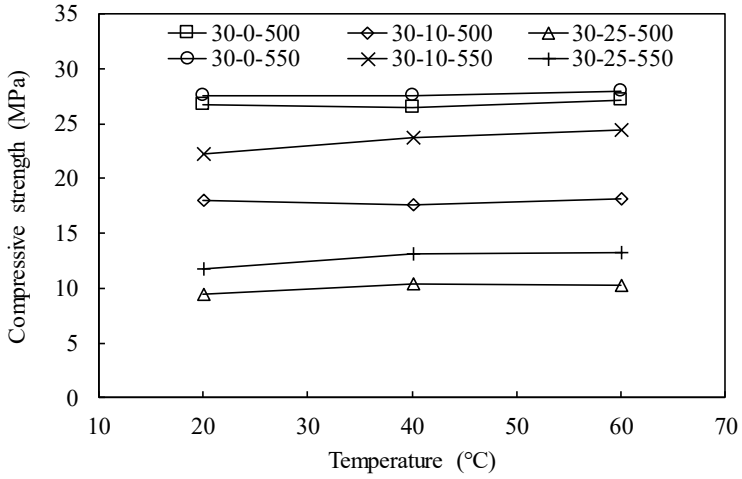
(a) 그룹 1



(b) 그룹 2



(c) 그룹 3



(d) 그룹 4

그림 3.3 재령 28일 압축강도

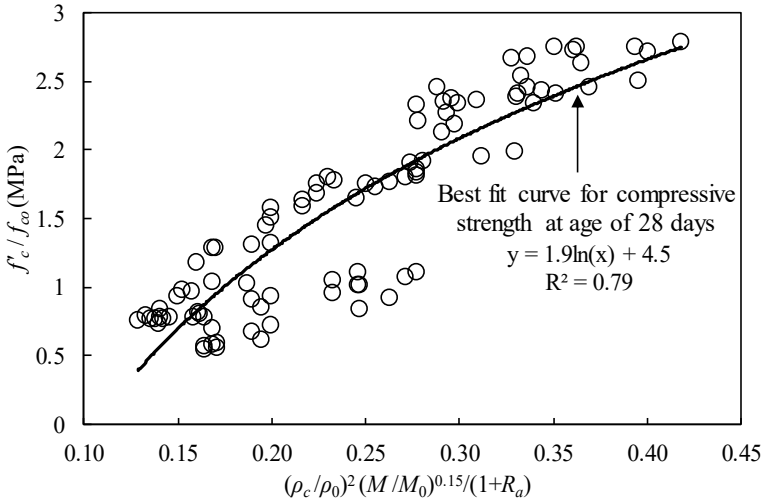


그림 3.4 재령 28일 압축강도 일반화

- 그룹 2와 3에서 기포 혼입률이 0%인 콘크리트 실험체의 f_{ck}는 17.7~18.8 MPa이었지만, 기포 혼입률이 15%인 실험체에서의 f_{ck}는 5.5~8.4 MPa으로 약 64% 감소하였음.
- 또한, 그룹 2에서 실험체의 f_{ck}는 양생온도가 20 ℃에서 60 ℃로 변화함에 따라 증가하였음.
- 재령 28일 압축강도(f_{ck})는 양생온도 20 ℃에서 60 ℃로 증가함에 따라 최대 18% 증가하였음.
- 반면, 양생시간은 양생온도에 비해 f_{ck}의 영향이 미미하였음. 재령 28일 압축강도(f_{ck})는 10시간 양생에서 지속 양생으로 변화할 때 평균적으로 약 6% 증가하였음.
- 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 f_{ck}는 평균 62% 감소하였음. 반면, 그 감소 기울기는 단위 결합재량이 증가함에 따라 다소 감소하였음.
- 그룹 4의 단위 결합재량이 450 kg/m^{3}과 550 kg/m^{3}인 실험체에서 기포 혼입률 증가에 따른 f_{ck}의 감소기울기는 각각 64%와 57%이었음.
- 또한, 기포 혼입률이 25%이면서 단위결합재량이 550 kg/m^{3}인 30-25-550(W/B = 30%, R_a = 25%, B = 550kg/m^3)는 양생온도가 2배 증가할 때의 f_{ck}가 11.8 MPa에서 12.9 MPa으로 약 10% 증가하였음. 이 f_{ck}의 증가 정도는 양생 지속 시간에 미치는 영향이 미미하였음.
- 위의 실험 결과로부터 기포가 40% 이하로 첨가된 LWBSC의 f_{ck}는 기포 콘크리트와 마찬가지로 ρ_c,

기포 혼입률(R_a) 및 양생 조건이 중요한 영향 인자임을 확인하였음.

- 실험 결과의 회귀 분석으로부터 f_{ck}는 다음과 같이 일반화할 수 있었음(그림 3.4).

$$\frac{f_{ck}}{f_{co}} = \left[1.9\ln\left\{\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^3\left(\frac{M}{M_0}\right)^{0.2}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)\right\}+4.5\right] \tag{3.1}$$

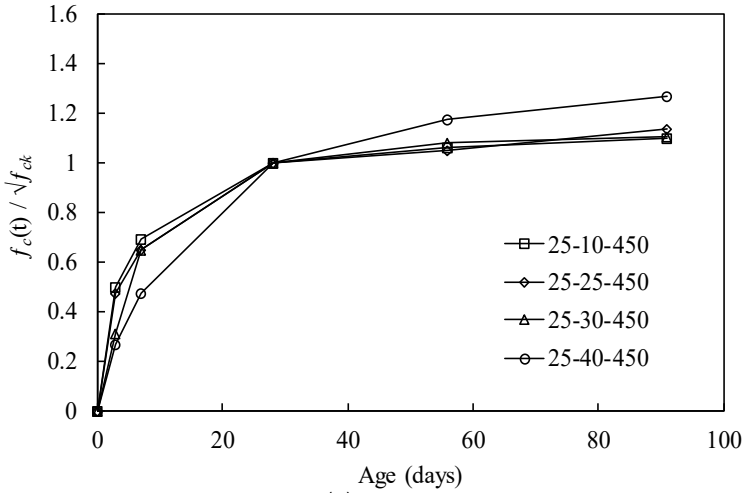
- 여기서, ρ_0(= 2,300 kg/m^3)는 기건 밀도에 대한 참고 값을, f_{co}(= 10 MPa)는 압축강도에 대한 참고 값을, M_0는 표준 양생 온도 (20 ℃)에서의 성숙도를, T 는 양생 온도를, M은 Saul에 의해 제시된 성숙도를 의미하는데, 다음과 같음.

$$M = \sum_{0}^{t}(T - T_0)\Delta_t \tag{3.2}$$

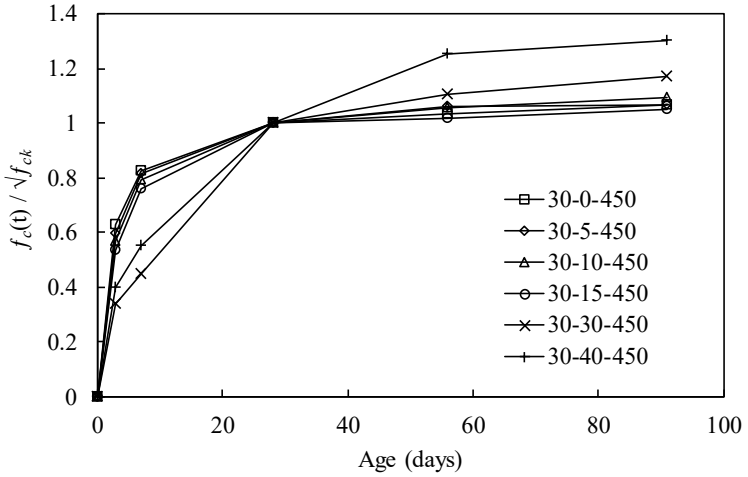
- 여기서, T_0는 온도에 대한 참고 값(= -10 ℃)을, t는 재령을, Δt는 증분 재령을 의미함.
- 그림 3.5에는 각각 재령별 압축강도와 재령별 압축강도 발현율($f_c(t)/f_{ck}$)을 나타내었는데, 여기서 $f_c(t)$는 재령 t에서 압축강도를 의미함.
- 그림 3.5에 나타낸 바와 같이 $f_c(t)/f_{ck}$는 장기 재령 보다 초기 재령에서 기포 혼입률과 양생온도에 의해 현저하게 영향을 받았음.
- 그룹 2 및 3의 $f_c(t)/f_{ck}$은 기포 혼입률이 증가함에 따라 감소하였음. 기포 혼입률이 15%인 실험체의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 0.53~0.63 및 0.76~0.85로 기포 혼입률이 0%인 실험체보다 평균 8% 감소하였음.
- 그룹 4에서 단위 결합재량이 450 kg/m^{3}이면서 기포 혼입률이 0%인 30-0-450F 실험체의 $f_c(t)/f_{ck}$는 재령 3일 및 7일에서 각각 0.44 및 0.86 이었지만, 동일 재령에서 기포 혼입률이 25%인 III-25 실험체는 0.16와 0.71로 63% 및 18% 낮았음.
- 기포 혼입율이 증가함에 따른 낮음의 정도는 양생 온도가 증가함에 따라 감소하였음.
- 그룹 2에서 온도 60 ℃로 양생된 실험체의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 0.59~0.67 및 0.83~0.88이었으며, 온도 20 ℃로 양생된 실험체 보다 평균 6% 증가하였음.
- 온도 60 ℃로 변온 및 등온으로 양생된 30-25-500 실험체(W/B = 30%, R_a = 25% 및 B = 500 kg/m^3)에서 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 온도 20 ℃로 양생된 실험체 비해 각각 1.28배와 1.07배 및 1.5배 및 1.17배 높았음.
- 재령 28일 이후의 장기 재령에서 실험체들의 $f_c(t)/f_{ck}$의 경향은 초기 재령과 비슷하였지만, 각 변수들에 미치는 영향의 정도는 초기 재령에 비해 현저히 낮았음.
- 장기 재령의 실험체들의 $f_c(t)/f_{ck}$는 양생 온도에 영향이 크게 미치지 않았음.
- 그룹 2 및 3에서 기포 혼입률이 15%인 실험체의 재령 56일 및 91일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 1.02~1.05 및 1.05~1.07이었으며, 기포 혼입률이 0%인 실험체에서도 유사한 강도 발현율을 보였음.
- 그룹 2 및 3에서 양생온도 60 ℃에서 양생된 실험체들의 재령 56일 및 91일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각

1.03~1.04 및 1.05~1.07로 온도 20℃로 양생된 실험체에서도 유사하였음.

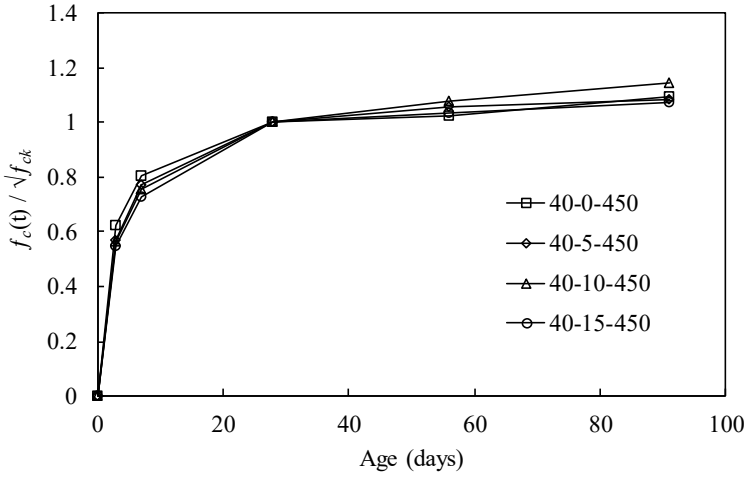
- 또한, 그룹 4에서 양생 온도 40 ℃에서 10시간 이후 양생한 이후 20 ℃로 양생 조건이 변화하는 30-10-450F(W/B = 30%, R_a = 10% 및 B = 450 kg/m^3)와 30-25-450F(W/B = 30%, R_a = 25% 및 B = 450 kg/m^3) 실험체들의 $f_c(t)/f_{ck}$는 재령 3일 및 7일에서 각각 0.43 및 0.88과 0.22 및 0.73 이며, 전재령 동안 양생 온도 40℃에서 유지된 실험체들과 비슷한 수준에 있었음.



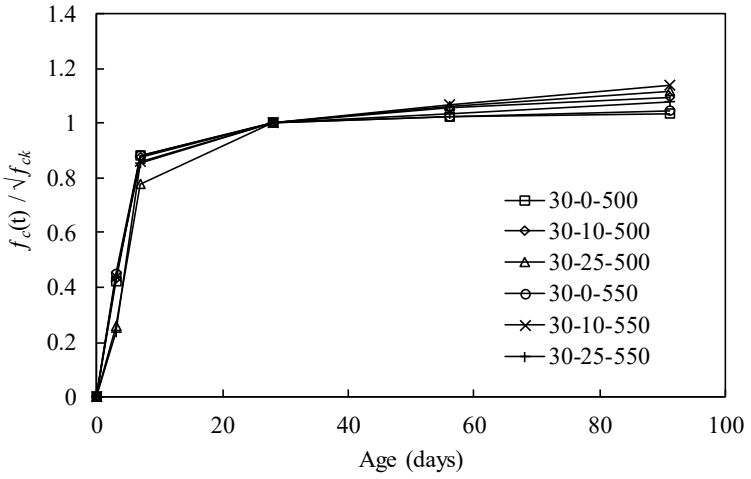
(a) 그룹 1



(b) 그룹 2



(c) 그룹 3



(d) 그룹 4

그림 3.5 재령별 압축강도 발현율

- 일반적으로 ACI 209R-92에서는 $f_c(t)/f_{ck}$을 예측하기 위해서 초기 및 장기 재령에서 발현 상수를 다음과 같이 적용하고 있음.

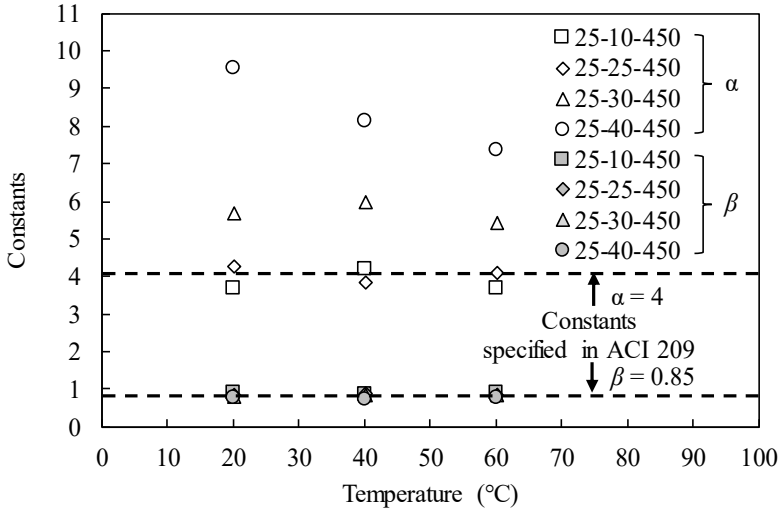
$$\frac{f_c(t)}{f_{ck}} = \frac{t}{\alpha + \beta t} \tag{3.3}$$

- 여기서, α와 β는 각각 초기 재령과 장기 재령을 나타내는 발현 상수임.
- ACI 209R-92에서는 시멘트 타입 1과 3으로 제조된 콘크리트의 발현상수 α와 β를 각각 4와 0.85(습윤 양생)로 제시하고 있음. 일반적으로 α의 감소 및 β의 증가는 재령 28일 압축강도 대비 초기 재령 및 장기 재령에서 강도 발현율이 높음을 의미함.
- 그림 3.6에는 실험 결과로부터 결정된 ACI 209R-92의 초기 및 장기 재령의 압축강도 발현 상수를 나타내었음.
- 발현 상수는 통계 기법인 회귀 분석으로부터 결정하였음. 초기 재령의 압축강도 발현상수 α는 기포 혼입률이 증가하거나 양생 온도가 낮을수록 증가하였는데, 그 증가의 폭은 단위결합재량이 증가함에 따라 감소하였음. 특히 기포 혼입률이 10% 이상인 실험체들의 α는 대부분 ACI 209R-92에서 제시된 값인 4 보다 높았음.
- 반면 장기재령의 압축강도 발현 상수인 β는 0.81~0.93으로 물-결합재비, 단위 결합재량, 기포 혼입률, 양생 온도 및 양생 지속 시간에 관계없이 일정한 수준에 있었음.
- 이로써 ACI 209R-92는 기포 혼입률 및 양생 온도에 따른 영향을 고려하고 있지 않기 때문에 기포가 25% 이상 첨가된 LWBSC의 초기 재령의 압축강도를 불안전 측으로 예측할 가능성이 있음.
- 따라서 이러한 경향을 보완하고 양생 조건을 고려하기 위해서 발현 상수에 성숙도(M)의 개념을 도입하였음. 회귀 분석으로 결정된 발현 상수를 다음과 같이 제시할 수 있었음(그림 3.7).

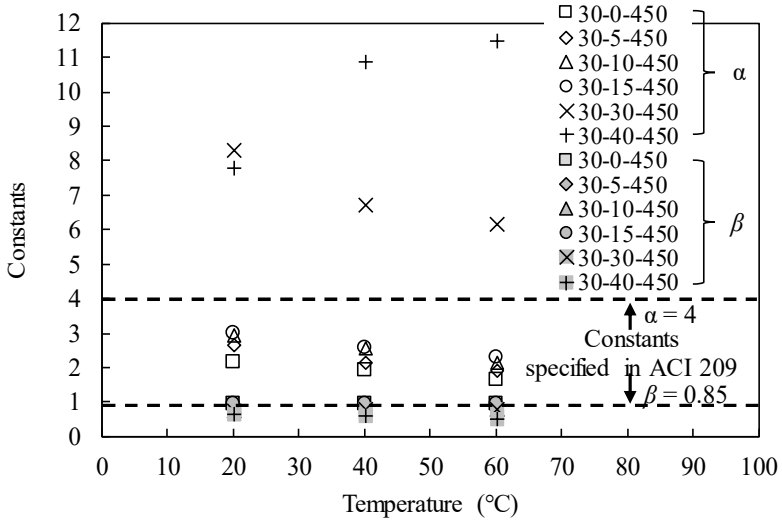
$$\alpha = 0.76\mathrm{EXP}\left[0.38\left(\frac{1+R_a}{(\rho_c/\rho_0)^2(M/M_0)^{0.25}}\right)\right] \tag{3.4a}$$

$$\beta = 0.97\mathrm{EXP}\left[-0.021\left(\frac{1+R_a}{(\rho_c/\rho_0)^2(M/M_0)^{0.2}}\right)\right] \tag{3.4b}$$

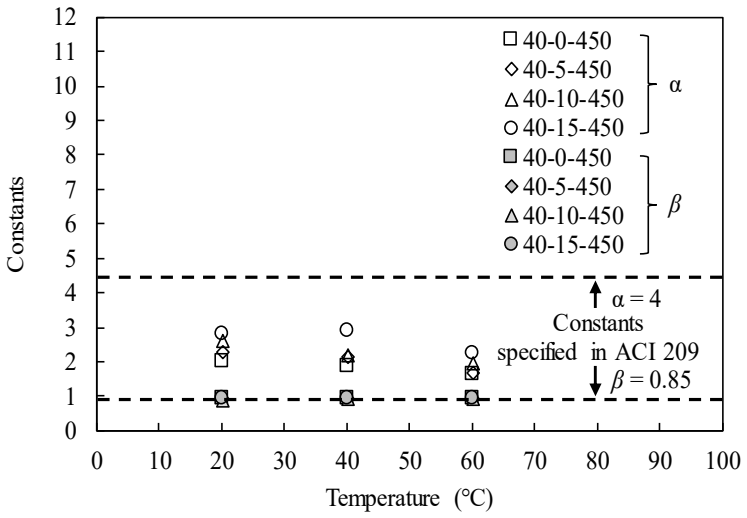
- 식 (3.4)에 나타낸 바와 같이 초기 재령의 발현 상수 α 및 β는 기포 혼입률, 양생 온도 및 양생 지속 시간의 영향을 고려하였음.
- 식 (3.4b)에 나타낸 바와 같이 장기 재령의 발현 상수 β의 제안모델에서 M/M_0의 지수승이 0.2로 α 보다 약 75% 낮음. 이는 장기 재령에서 압축강도 발현에 대한 성숙도의 낮은 영향을 반영한 것임.
- 결과적으로 식 (3.1)~(3.4)로부터, 기건 밀도, 양생 온도 및 양생 지속 시간에 따른 바텀애시 경량 골재 콘크리트의 재령별 압축강도를 예측할 수 있음.



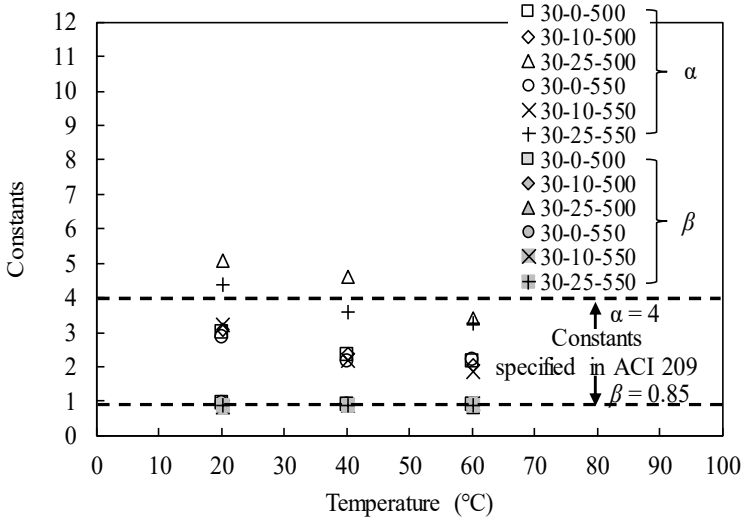
(a) 그룹 1



(b) 그룹 2

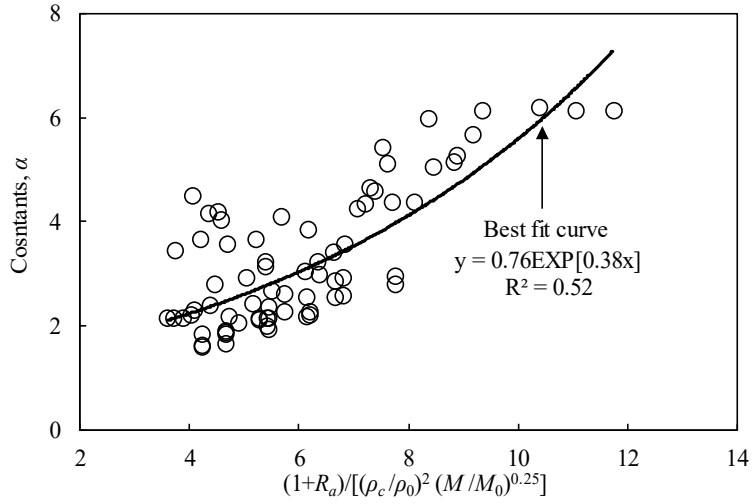


(c) 그룹 3

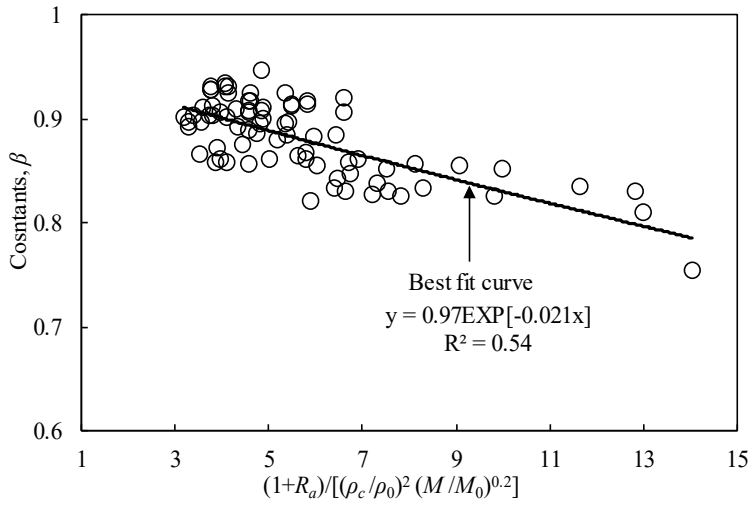


(d) 그룹 4

그림 3.6 실험결과에 기반한 발현상수



(a) α



(b) β

그림 3.7 발현상수에 대한 회귀분석

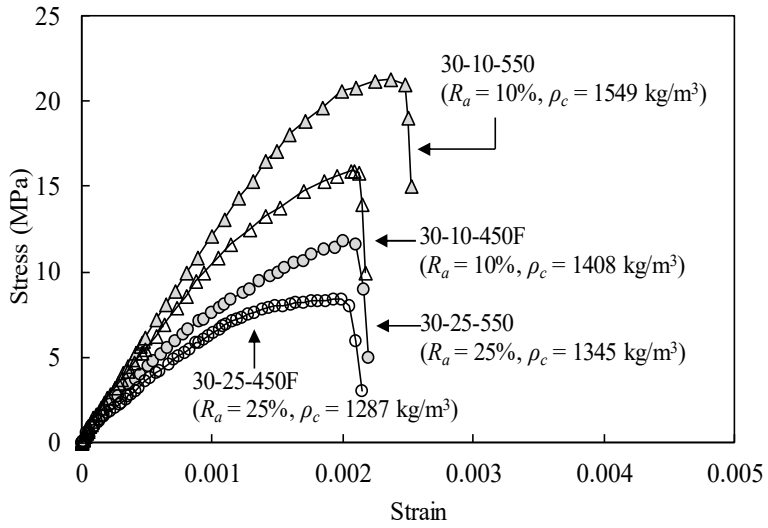


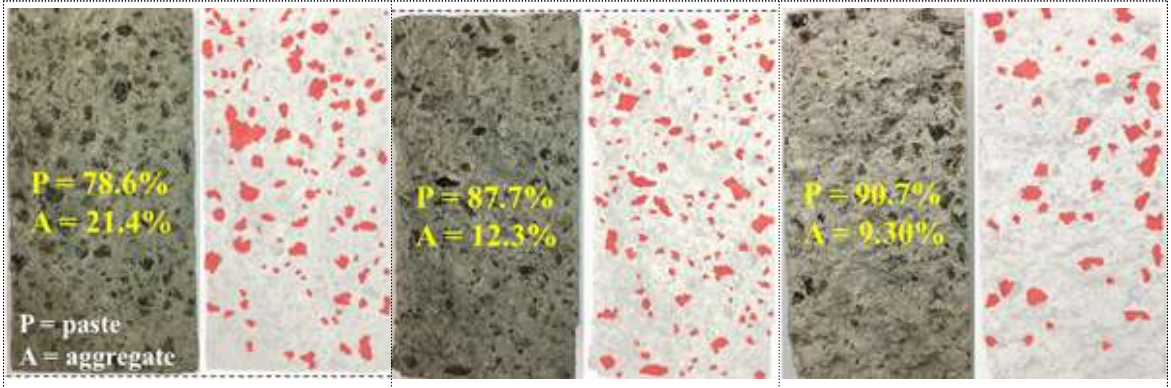
그림 3.8 전형적인 응력-변형률 관계(그룹 4)

3.1.3 응력-변형률 관계 및 탄성계수

- 그림 3.8은 전형적인 응력-변형률 관계를 나타내었음. 바텀애시 경량 골재 콘크리트(LWBSC)의 응력-변형률 관계에서 초기강성 및 최대 응력 시 변형률은 기포 혼입률이 증가함에 따라 감소하였음.
- 그 감소의 정도는 단위 결합재량에 미치는 영향이 미미하였음. 반면 압축강도가 감소하더라도 최대응력 이후 기울기는 기포 혼입률이 증가함에 따라 급격하였음. 이는 그림 3.9에 나타낸 바와 같이 기포 혼입량의 증가로 인한 다량의 공극의 형성으로 균열 저항을 위한 경량 골재와 페이스트 계면의 형성을 상대적으로 감소시키기 때문으로 판단됨.
- 압축강도로 무차원된 탄성계수 ($E_c/\sqrt{f_{ck}}$)는 기포 혼입률에 미치는 영향이 현저하였음. 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 $E_c/\sqrt{f_{ck}}$는 각각 60% 및 59% 감소하였는데, 이 감소 비율에 대한 단위결합재량의 영향은 미미하였음.

- 기건 밀도 1,440~2,560 kg/m^3 범위에서 ACI 318-14에 의한 E_c는 실험 결과를 모두 안전 측으로 예측하였음.
- 표 3.2에 나타낸 바와 같이 그 안전 측의 정도는 기포 혼입률이 증가함에 따라 감소하는데, 단위 결합재량이 450 kg/m^{3}이면서, 기포 혼입률이 25%인 30-25-450F 실험체에서 1.05에서 가장 낮았음. 이는 ACI 318-14 기준이 1,440 kg/m^3 이상의 밀도를 갖는 콘크리트 E_c의 실험 결과를 반영하고 있기 때문임.
- 이로부터 ACI 318-14 기준은 기포가 첨가되어 저밀도(1,400 kg/m^3 이하)를 갖는 LWBSC의 E_c를 불안전 측으로 예측할 가능성이 있음.
- 따라서 이를 보완하기 위해서 실험 결과의 회귀 분석으로부터 LWBSC의 E_c를 다음과 같이 제시될 수 있었음(그림 3.10).

$$E_c = 5,820\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)^{0.55}\right) \tag{3.5}$$



(a) 기포 혼입률 0% (b) 기포 혼입률 10% (c) 기포 혼입률 25%

그림 3.9 기포 혼입률에 따른 파괴단면의 형상

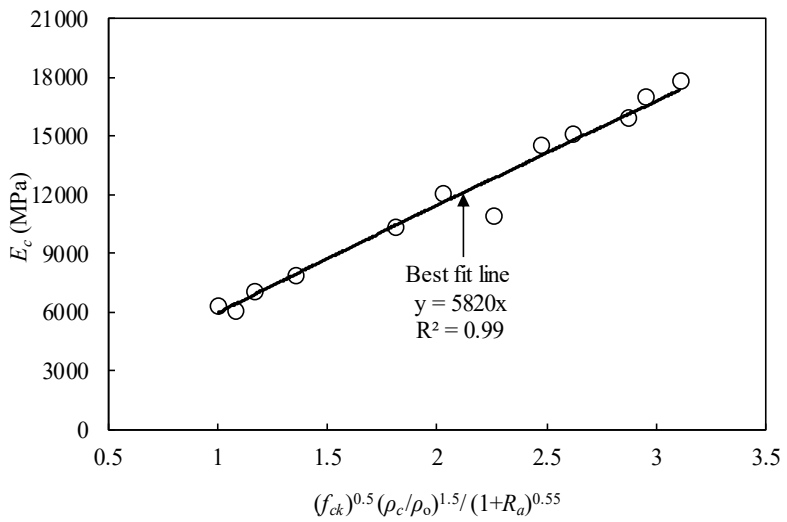


그림 3.10 탄성계수에 대한 회귀분석

3.1.4 파괴계수 및 쪼갬 인장강도

- 표 3.2에 나타낸 바와 같이 재령 28일 압축강도로 무차원된 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)와 쪼갬 인장강도($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 기포 혼입률이 증가함에 따라 작았음.
- 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$와 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 각각 20% 및 44%와 19% 및 45%로 감소하였는데, 이 감소 비율에 대한 단위 결합재량의 영향은 미미하였음.
- 단위 결합재량에 관계없이 기포 혼입률 0%인 실험체들의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$값은 ACI 318-14 기준에서 제시하는 0.63과 비슷하였음.
- 경량 골재 콘크리트에서 제시하고 있는 파괴계수에 대한 ACI 318-14 기준은 실험 결과를 모두 안전측으로 예측하였음.
- 그 안전 측의 정도는 기포 혼입률이 증가함에 따라 감소하였음.
- 이는 ACI 318-14 기준이 f_{ck}의 함수만을 포함하고 있어 기포 혼입량 증가에 따라 감소되는 f_r의 영향을 고려하지 못하기 때문임.
- 일반적으로 경량 골재 콘크리트의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$보다 약 1.85배 높음이 보고되고 있는데, 본 실험결과에서는 평균적으로 1.80배로 비슷하였음.
- 그 높음의 정도는 ρ_c의 관계없이 비슷하였음. 이로부터 f_r와 f_{sp}를 다음과 같이 제시할 수 있었음(그림 3.11).

$$f_r = 1.44\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)^{0.55}\right)^{0.8} \tag{3.6}$$

$$f_{sp} = 0.62\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)^{0.55}\right)^{1.2} \tag{3.7}$$

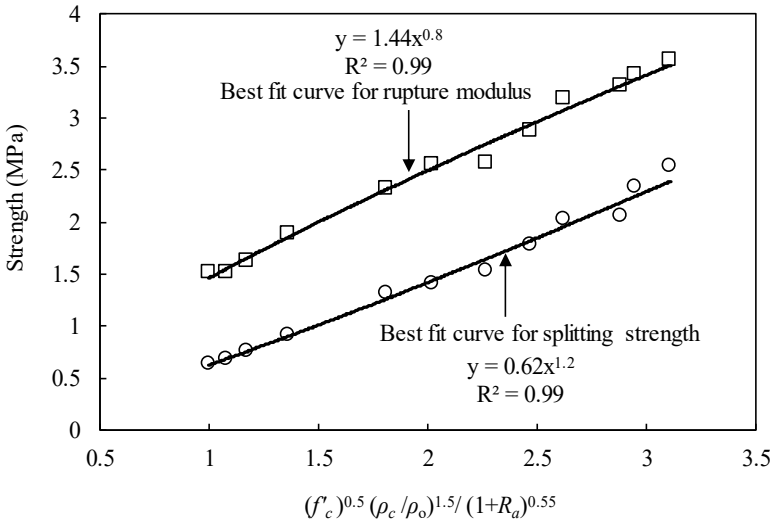


그림 3.11 파괴계수 및 쪼갬 인장강도 회귀분석

3.1.5 단열성능

- 바텀애시 경량골재 콘크리트(LWBSC)의 열전도율은 물-결합재비 및 단위결합재량의 감소보다는 기포 혼입률이 증가할 때에 현저하게 감소하였음.
- 그룹 1과 2에서 기포 혼입률이 10%에서 40%로 증가할 때에 열전도율은 각각 47% 및 44% 감소하였음. 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 열전도율은 모든 그룹에서 평균적으로 33% 감소하였음.
- 반면, 물-결합재비가 38% 감소할 때에 열전도율 감소의 비율은 8%로 기포 혼입률 증가에 의한 감소 비율보다 낮았음.
- 또한, 단위 결합재량이 18% 감소할 때에 열전도율 감소의 비율은 평균 18%로 기포 혼입률 증가에 의한 감소비율보다 45% 낮았음.
- 이와 같이 LWBSC의 열전도율은 물-결합재비 및 단위 결합재량 보다 기포 혼입률에 현저한 영향을 받음.
- 그룹 4에서 LWBSC의 열전도율은 기포 혼입률이 10%와 25%에서 각각 0.42~0.50 W/m · K와 0.36 ~ 0.39 W/m · K의 범위에 있었는데, 이는 경량 골재 콘크리트의 열전도율(1.2 W/m · K) 보다 각각 62% 및 69% 낮은 수치임.
- 일반적으로 콘크리트의 열전도율은 밀도의 함수로 평가됨. 하지만 혼입된 기포가 열전도율에 중요한 영향을 미치는 내부 공극을 증가시키므로, 기포가 첨가된 LWBSC의 열전도율은 이를 고려할 필요가 있음.
- 이에 따라 실험 결과의 회귀 분석으로부터 다음과 같이 제시될 수 있었음(그림 3.12).

$$k_c = 0.075\mathrm{EXP}\left[0.00125\left(\frac{\rho_c}{(1+R_a)^{0.3}}\right)\right] \tag{3.8}$$

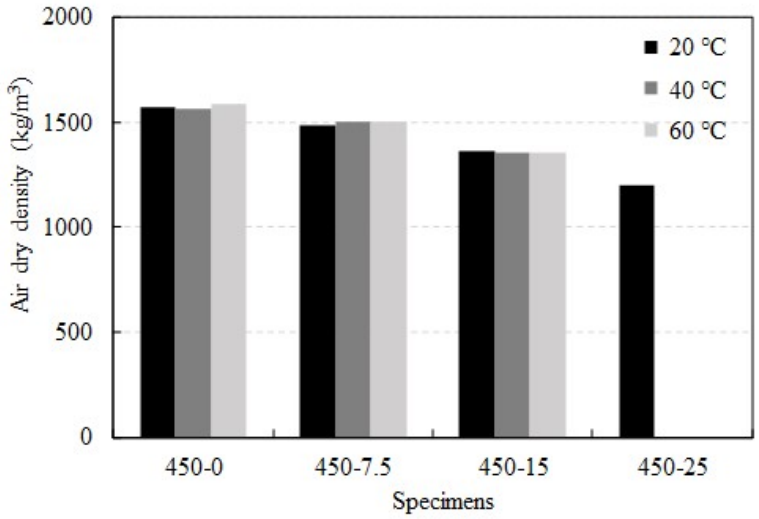
- 식 (3.8)로부터 LWBSC의 열전도율은 기건 밀도와 기포 혼입률의 함수를 이용하여 간편하게 예측할 수 있음. 식 (3.1) 및 (3.8)로부터 BS-LWA를 이용하여 열전도율과 역학적 특성을 고려한 콘크리트 PC 판넬 제조를 위해서는 단위 결합재량이 500 kg/m^{3}이상이면서 기포 혼입률이 10%~25%의 첨가가 요구됨.

3.2 시리즈 2 (EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트)

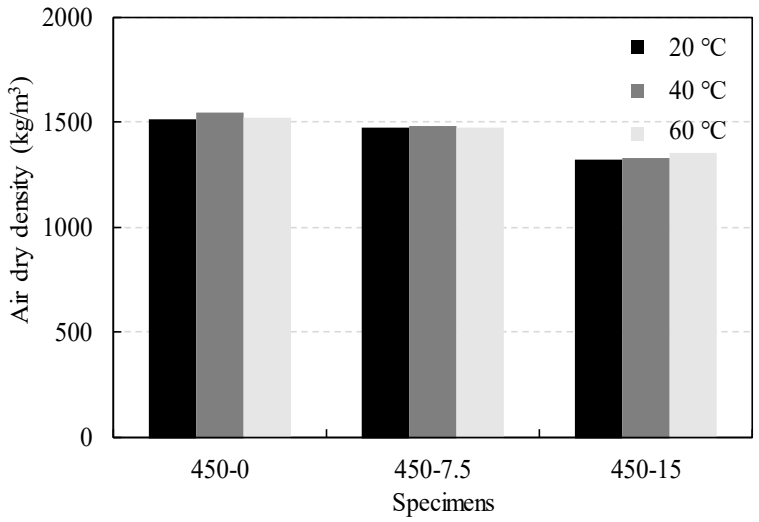
3.2.1 기건 및 절건 밀도

- 표 3.3에 나타낸 바와 같이 재령 28일 기건 밀도도 굳지 않은 콘크리트 밀도의 경향과 비슷하였음.
- EPS 혼입률이 0%에서 15%로 증가할 때에 콘크리트의 기건 밀도는 폴리머 및 섬유의 첨가 여부에 관계없이 평균 13% 감소하였음.
- 그룹 1과 그룹 2에서 EPS 혼입률이 0%인 실험체들의 콘크리트 기건 밀도는 각각 1,572 kg/m^{3}과 1,513 kg/m^{3}이며, EPS 혼입률이 7.5%인 실험체들은 각각 1,484kg/m^{3}과 1,498 kg/m^{3}임(그림 3.13).
- 그룹 1에서 EPS 혼입률이 25%인 실험체의 콘크리트 기건 밀도는 1,208 kg/m^{3}으로 가장 낮았음.
- 폴리머 및 섬유의 첨가여부에 관계없이 양생조건의 변화는 콘크리트 기건 밀도에 큰 영향을 미치지 않았음(그림 3.13).

- 그룹 1과 그룹 2에서 EPS 혼입률이 15%인 실험체의 콘크리트 기건 밀도는 양생온도 20 ℃에서 각각 1,359 kg/m^{3}과 1,325 kg/m^{3}이었으며, 양생 온도 60 ℃에서는 1,351 kg/m^{3}과 1,350 kg/m^{3}로 2% 이내의 차이를 보임.
- 그림 3.14(c)에 나타낸 바와 같이 굳지 않은 콘크리트 밀도와 같이 재령 28일에서의 콘크리트 기건 밀도는 ASTM C 567의 예측 값과 선형 관계를 보였으며, 실험 결과 대비 예측 값의 비는 0.96~1.03 수준에 있었음.
- 이로부터 굳지 않은 콘크리트와 마찬가지로 EPS가 25%이하로 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 기건 밀도는 EPS 혼입율에 큰 영향을 받았으며 ASTM C 567 기준으로부터 대부분 안전 측으로 예측할 수 있음.

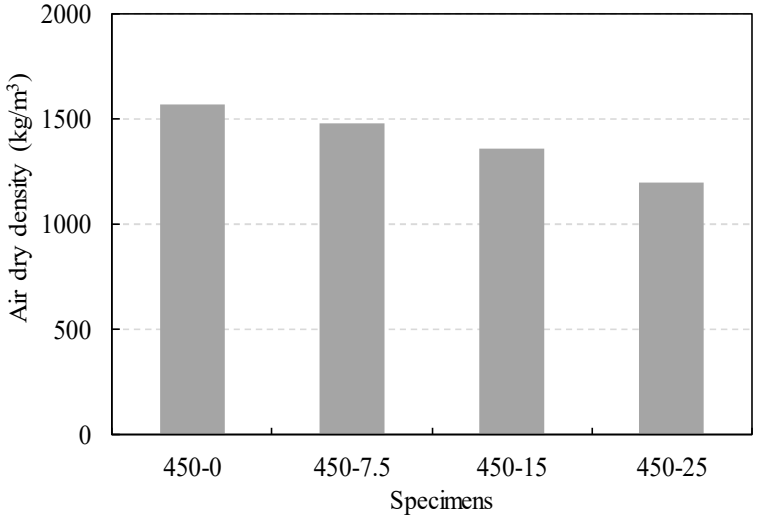


(a) 그룹 1

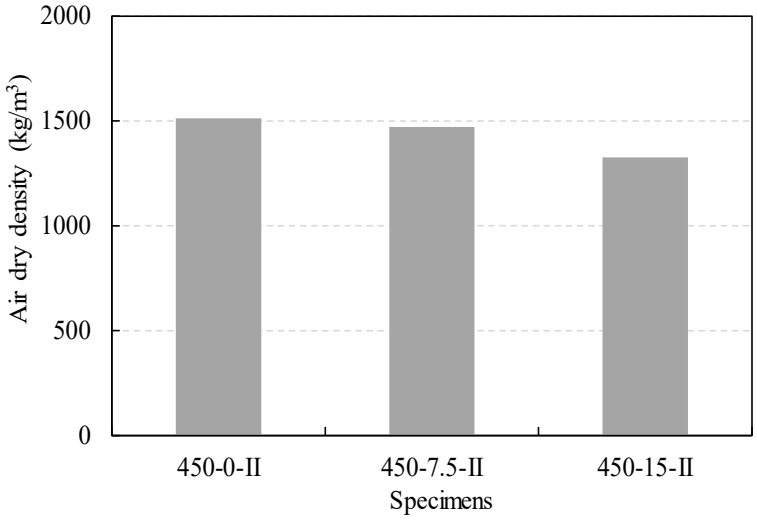


(b) 그룹 2

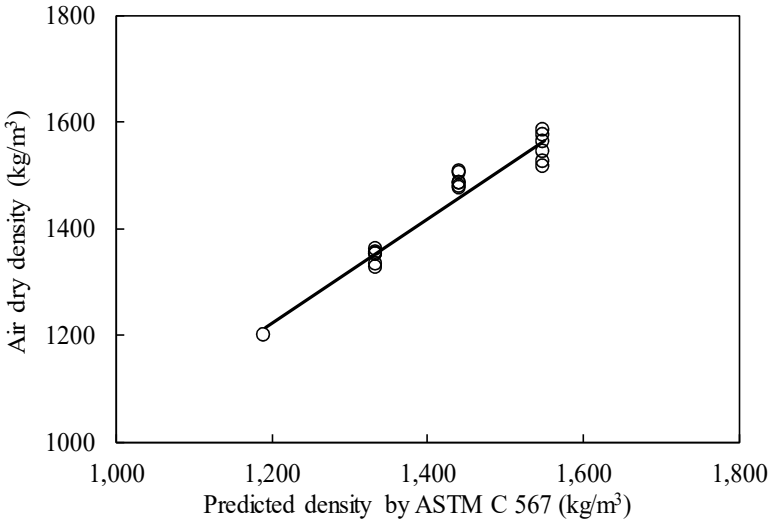
그림 3.13 양생온도에 따른 기건밀도



(a) 그룹 1



(b) 그룹 2

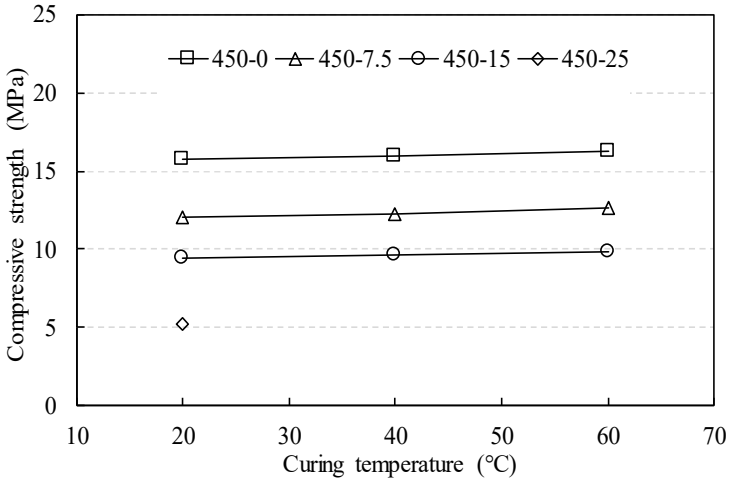


(c) 실험결과와 ASTM C 567의 예측 값과의 비교

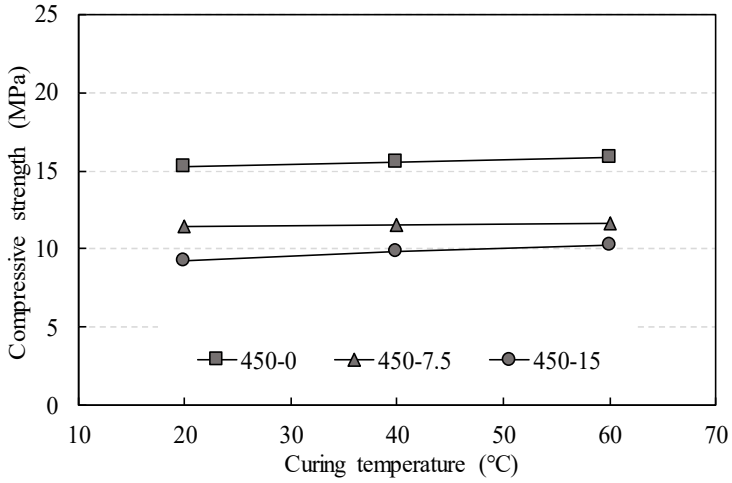
그림 3.14 기건 밀도

3.2.2 재령 28일 압축강도 및 재령별 압축강도

- 재령 28일 압축강도(f_{ck})는 EPS 혼입률, 폴리머와 섬유의 첨가여부 및 양생 온도에 현저한 영향을 받았음(표 3.3 및 그림 3.15).
- 그룹 1 및 그룹 2에서 EPS 혼입률이 0%에서 15%로 증가할 때 재령 28일 압축강도는 각각 41% 및 39% 감소하였음.
- 그룹 2에서 실험체들의 f_{ck}는 그룹 1의 실험체들 보다 평균 4% 낮았음.
- 그룹 1이면서 EPS 혼입률이 25%인 실험체의 f_{ck}는 5.2 MPa로 가장 낮은 수치이었음.
- 양생온도 40 ℃와 60 ℃에서 양생된 그룹 2이면서 EPS 혼입률이 7.5%인 실험체의 f_{ck}는 각각 12.2 MPa 및 12.6 MPa이었는데, 온도 20 ℃로 양생된 실험체 대비 각각 1.05배 및 1.03배 높았음.
- 양생온도 40 ℃와 60 ℃에서 양생된 그룹 2이면서 EPS 혼입률이 15%인 실험체의 f_{ck}는 각각 9.8 MPa 및 10.1 MPa이었는데, 온도 20 ℃로 양생된 실험체 대비 각각 1.07배 및 1.1배 높았음.
- 이와 같이 그룹 1에서 양생온도 증가에 따른 f_{ck}의 증가 경향은 그룹 2와 비슷하였음.
- 이로부터 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 f_{ck}는 폴리머와 섬유의 첨가 여부 보다는 EPS 혼입률과 양생 온도에 미치는 영향이 더 현저함을 확인하였음.



(a) 그룹 1



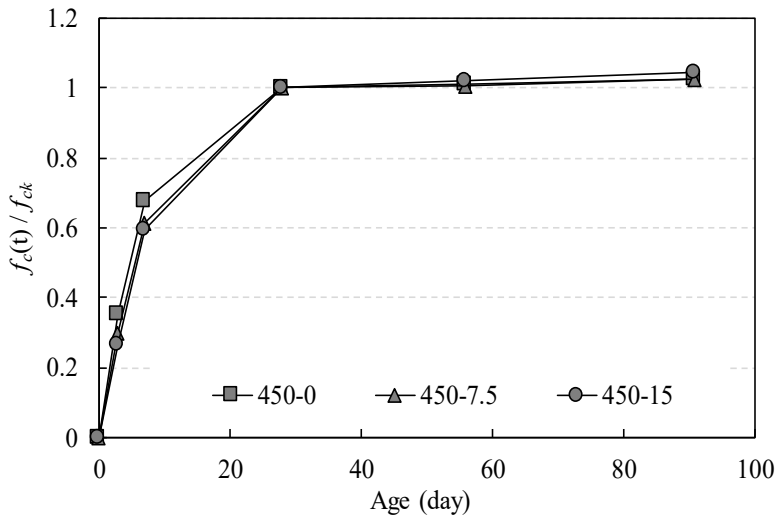
(b) 그룹 2

그림 3.15 재령 28일 압축강도

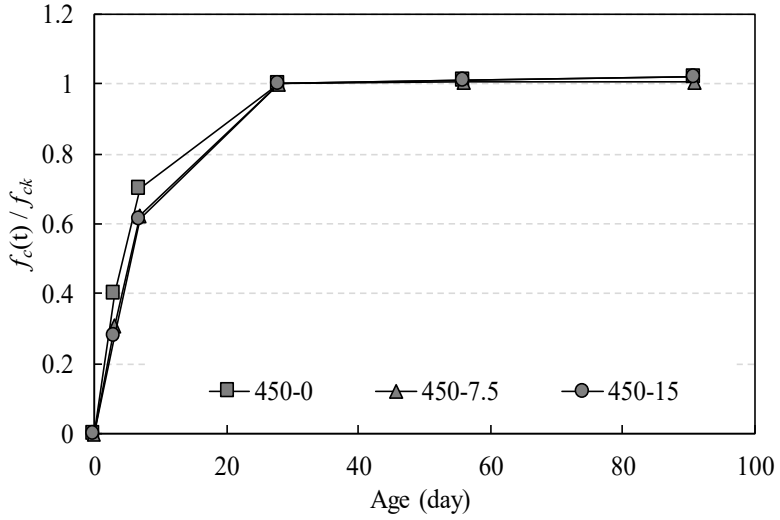
표 3.3 콘크리트 밀도 및 재령별 압축강도

Group	Specimens	Curing process (℃)	Oven dry density (kg/m^3)	Air dry density (kg/m^3)	Compressive strength (MPa)				
			28 days	28 days	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days
I	450-0-I	20	1,546	1,572	5.6	10.7	15.8	16.0	16.2
		40 (12 hours 30 min) → 20	1,538	1,562	6.4	11.2	16.0	16.2	16.3
		60 (8 hours 20 min) → 20	1,554	1,584	6.7	11.8	16.3	16.3	16.4
	450-7.5-I	20	1,453	1,484	3.6	7.4	12.0	12.1	12.3
		40 (12 hours 30 min) → 20	1,462	1,501	3.8	7.3	12.2	12.3	12.3
		60 (8 hours 20 min) → 20	1,476	1,504	3.9	8.1	12.6	12.7	12.9
	450-15-I	20	1,351	1,359	2.5	5.6	9.4	9.6	9.8
		40 (12 hours 30 min) → 20	1,344	1,352	2.7	5.9	9.6	9.7	9.8
		60 (8 hours 20 min) → 20	1,345	1,351	3.0	6.1	9.8	9.9	10.2
	450-25-I	20	1,194	1,208	2.2	3.8	5.2	-	-
II	450-0-II	20	1,497	1,513	5.6	9.5	15.2	15.4	15.7
		40 (12 hours 30 min) → 20	1,512	1,543	5.9	9.8	15.6	16.0	16.1
		60 (8 hours 20 min) → 20	1,503	1,525	6.3	10.1	15.9	16.2	16.2
	450-7.5-II	20	1,467	1,498	3.2	6.9	11.4	11.5	11.7
		40 (12 hours 30 min) → 20	1,466	1,482	3.3	7.2	11.5	11.5	11.6
		60 (8 hours 20 min) → 20	1,461	1,477	3.8	7.4	11.6	11.7	12.1
	450-15-II	20	1,301	1,325	2.5	5.3	9.2	9.4	9.6
		40 (12 hours 30 min) → 20	1,309	1,332	2.8	5.5	9.8	9.9	10.0
		60 (8 hours 20 min) → 20	1,332	1,350	3.0	5.8	10.1	10.1	10.4

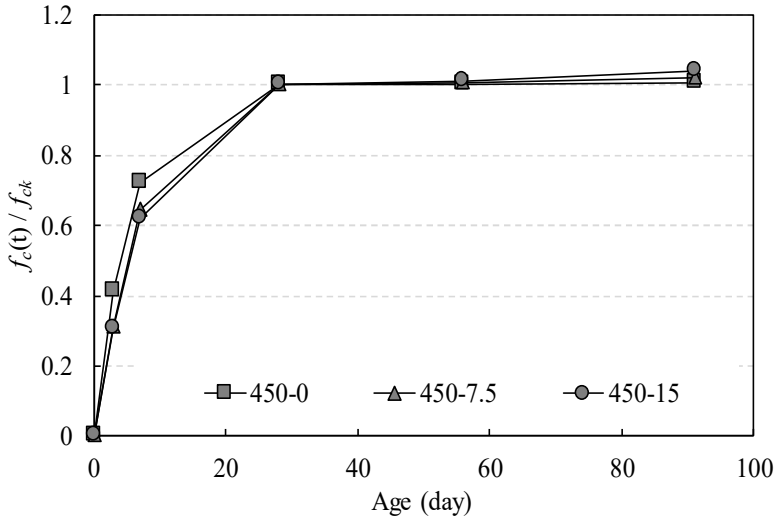
- 그림 3.16에는 실험체들의 재령별 압축강도 발현율($f_c(t)/f_{ck}$)을 나타내었음. 여기서 $f_c(t)$는 재령 t일 압축강도를 의미함.
- 그림 3.16에 나타낸 바와 같이 실험체들의 EPS 혼입률에 따른 $f_c(t)/f_{ck}$는 장기 재령보다 초기 재령에서 영향이 현저하였음.
- 실험체들의 $f_c(t)/f_{ck}$은 폴리머 및 섬유의 첨가 여부에 관계없이 EPS 혼입률이 증가함에 따라 감소하였음.
- 그룹 1이면서 EPS 혼입률이 15%인 실험체들의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 0.27~0.31 및 0.6~0.62로 EPS 혼입률이 0%인 실험체들 대비 각각 평균 26% 및 12% 감소하였음.
- 그룹1이면서 EPS 혼입률이 10%인 실험체들의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 0.3~0.31 및 0.62~0.64였음.
- 그룹 2의 $f_c(t)/f_{ck}$는 그룹 1과 비슷한 경향을 보였음.
- $f_c(t)/f_{ck}$에 대한 섬유 및 폴리머 혼입의 영향은 미미하였음.
- 시리즈 2의 실험체들의 양생 온도에 따른 $f_c(t)/f_{ck}$는 장기 재령보다 초기 재령에서 영향이 현저하였음.
- 그룹 2이면서 EPS 혼입률 7.5% 및 양생 온도 60 ℃인 실험체의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 0.33 및 0.64로 양생 온도 20 ℃인 실험체 대비 각각 14% 및 5% 증가하였음.
- 그룹 1이면서 EPS 혼입률 15% 및 양생 온도 60 ℃인 실험체의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 0.3 및 0.62로 EPS 혼입률 0%인 실험체 대비 각각 26% 및 14% 감소하였음.
- 그룹 2이면서 EPS 혼입률 0% 및 양생 온도 40 ℃인 실험체의 재령 3일 및 7일의 $f_c(t)/f_{ck}$는 0.38 및 0.63로 그룹 1인 실험체 대비 각각 5% 및 10% 감소하였음.
- 위 결과에 따라 초기재령에서의 $f_c(t)/f_{ck}$는 EPS 혼입율의 증가 및 폴리머 및 섬유의 혼입에 따라 양생 온도의 영향이 감소함을 확인하였음.
- 반면, 장기 재령에서 실험체들의 $f_c(t)/f_{ck}$는 폴리머 및 섬유 첨가 여부에 관계없이 양생온도의 영향이 미미하였음.
- 그룹 2이면서 EPS 혼입률이 15% 및 양생 온도 60 ℃인 실험체들의 재령 56일 및 91일 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 1.01 및 1.04였으며 양생 온도 20 ℃인 실험체들도 비슷한 경향을 보였음.
- EPS 혼입률에 관계없이 그룹 2 및 양생 온도 60 ℃인 실험체들의 재령 56일 및 91일 $f_c(t)/f_{ck}$는 각각 1~1.02 및 1.02~1.04였으며 양생 온도 20 ℃인 실험체들도 비슷한 경향을 보였음.
- 이는 EPS 혼입률 및 양생 온도가 장기 재령에서의 $f_c(t)/f_{ck}$에 미치는 영향이 미미하다는 것을 확인하였음.
- 그룹 1이면서 EPS혼입률 및 양생 온도에 관계없이 실험체들의 장기 재령에서의 $f_c(t)/f_{ck}$는 1.01~1.02 및 1.01~1.04로 그룹 2와 비슷한 경향을 보였음.
- 이에 따라 장기 재령에서의 $f_c(t)/f_{ck}$에 대한 폴리머 및 섬유의 영향이 미미하다는 것을 확인하였음.



(a) 20 ℃

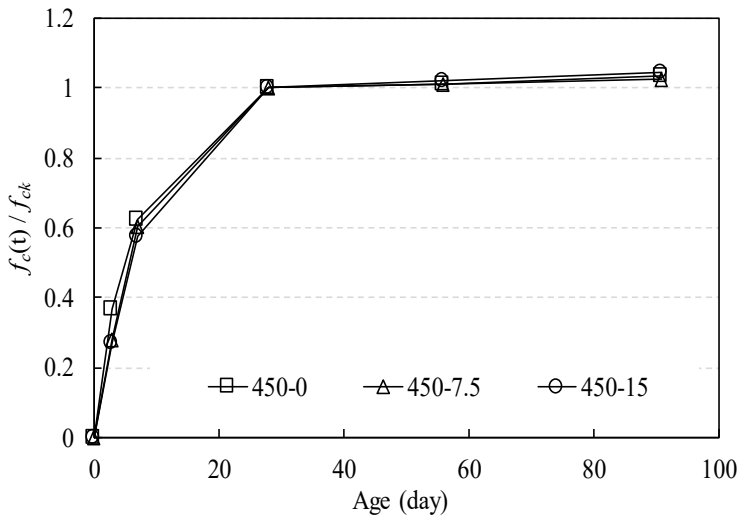


(b) 40 ℃

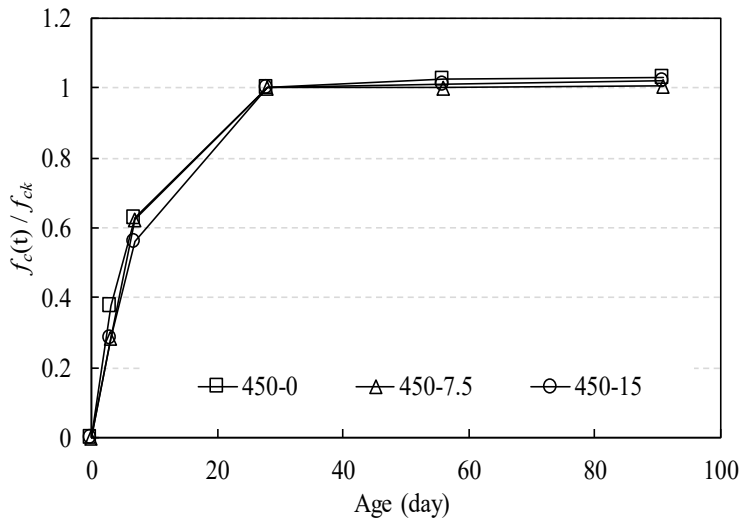


(c) 60 ℃

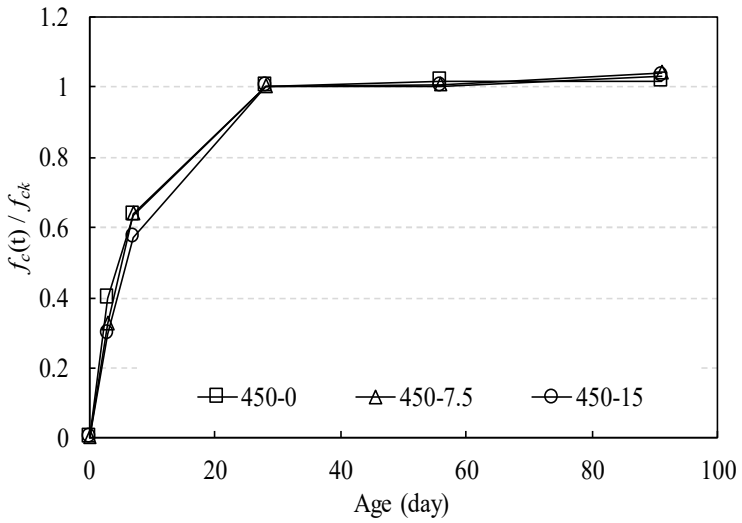
그림 3.16.1 그룹 1의 온도에 따른 재령별 압축강도 발현율



(a) 20 ℃



(b) 40 ℃



(c) 60 ℃

그림 3.16.2 그룹 2의 온도에 따른 재령별 압축강도 발현율

3.2.3 파괴계수 및 쪼갬 인장강도

- 표 3.4에 나타낸 바와 같이 재령 28일 압축강도로 무차원된 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)와 쪼갬 인장강도($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 EPS 혼입률이 증가함에 따라 감소하였음.
- 재령 28일 압축강도로 무차원된 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)와 쪼갬 인장강도($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 양생 온도의 영향을 고려하지 않았음.
- 그룹 1에서 EPS 혼입률이 0%에서 15% 증가할 때 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$와 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$는 각각 11%와 20% 감소하였음.
- 폴리머 및 섬유 첨가 여부에 관계없이 EPS 혼입률 0%인 실험체들의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 값은 ACI 318-14 기준에서 제시하고 있는 0.63과 비슷하였음.
- ACI 318-14 기준이 f_{ck}의 함수만을 포함하고 있어 EPS 혼입량 증가에 따라 감소되는 f_r의 영향을 정확히 고려하지 못하기 때문임.
- 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)와 쪼갬 인장강도($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 회귀분석을 통해 일반화하여 다음과 같이 제시할 수 있었음(그림 3.17).

$$f_r = 1.31\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+E_a}\right)^{0.55}\right)^{0.8} \tag{3.9}$$

$$f_{sp} = 0.85\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+E_a}\right)^{0.55}\right)^{1.2} \tag{3.10}$$

표 3.4 굳은 콘크리트 실험결과 요약

Group	Specimens	f_r (MPa)	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	f_{sp} (MPa)	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	k_c (W/m · K)	Free drying shrinkage (μ)
I	450-0-I	2.50	0.63	2.21	0.56	0.511	588
	450-7.5-I	2.11	0.59	1.66	0.47	0.408	624
	450-15-I	1.62	0.53	1.18	0.39	0.312	645
	450-25-I	1.07	0.47	0.69	0.30	0.221	741
II	450-0-II	2.38	0.61	2.01	0.52	0.460	572
	450-7.5-II	2.12	0.61	1.67	0.48	0.401	618
	450-15-II	1.71	0.54	1.22	0.39	0.298	623

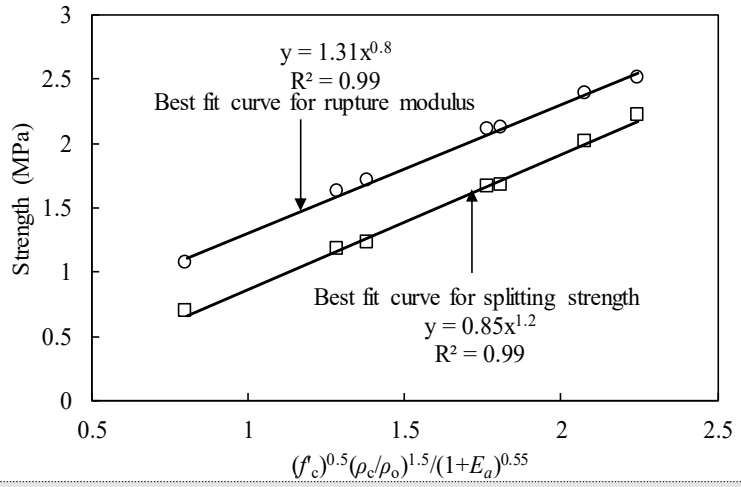


그림 3.17 파괴계수 및 쪼갬 인장강도에 대한 회귀분석

3.2.4 단열성능

- EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 열전도율은 양생 온도를 고려하지 않고 20 ℃에서만 측정하였음. 열전도율은 폴리머 및 섬유 첨가 여부에 관계없이 EPS 혼입률이 증가할 때에 현저하게 감소하였음.
- 그룹 1에서 EPS 혼입률이 0%인 실험체의 열전도율은 0.511 W/m · K였으며, EPS 혼입률이 7.5% 및 15%로 증가할 때 각각 20% 및 39% 감소하였음.
- 그룹 1에서 EPS 혼입률이 25%인 실험체의 열전도율은 0.221 W/m · K으로 가장 낮았음.
- 그룹 2에서 EPS 혼입률이 7.5% 및 15%인 실험체들의 열전도율은 각각 0.401 W/m · K 및 0.298 W/m · K였으며 그룹 1의 실험체 대비 각각 2% 및 5% 감소하였음.
- 폴리머 및 섬유 첨가 여부에 관계없이 EPS 혼입률이 7.5% 및 15%일 때 각각 0.401~0.408 W/m · K 및 0.298~0.312 W/m · K 범위에 있었음. 이는 일반적인 경량 골재 콘크리트의 열전도율(1.2 W/m · K) 보다 각각 최소 66% 및 74% 낮은 수치임.
- 일반적으로 콘크리트의 열전도율은 밀도와 반비례하여 증가하기 때문에 콘크리트의 열전도율은 밀도의 함수로 평가됨. 하지만 혼입된 EPS의 열전도율은 약 0.033 W/m · K 수준으로 콘크리트 열전도율을 크게 낮추므로 EPS 혼입률을 고려한 식이 제시되어야함. 이에 따라 실험 결과의 회귀 분석으로부터 다음과 같이 제시될 수 있었음(그림 3.18)

$$k_c = 0.026\mathrm{EXP}\left[0.0019\left(\frac{\rho_c}{(1+E_a)^{0.3}}\right)\right] \tag{3.11}$$

- 식 (3.11)로부터 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 열전도율은 기건 밀도와 EPS 혼입률의 함수를 이용하여 간편하게 예측할 수 있음. 열전도율과 역학적 특성을 고려한 고단열 · 지속가능 PC 판넬 제조를 위해서는 섬유 및 폴리머의 혼입과 관계없이 EPS 혼입률이 7.5~15%의 첨가가 요구됨.

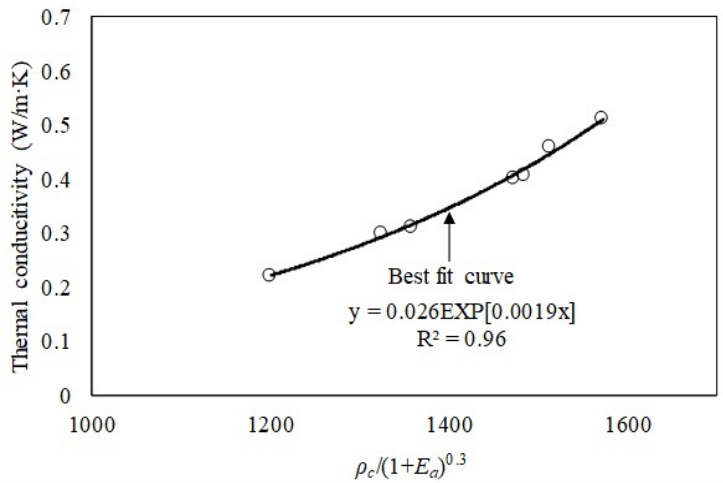


그림 3.18 열전도율에 대한 회귀분석

4. 바텀애시 골재 기반 고단열·지속가능 경량 콘크리트의 전단거동 평가

4.1 직접전단 실험

4.1.1 직접전단 실험체 상세

- 바텀애시 기반 경량콘크리트의 직접전단 실험체 상세는 표 4.1에 나타냄. 주요변수는 단위 용적중량, 작용 축응력 및 시공 줄눈의 유무임.
- 콘크리트 단위 용적중량(ρ_c)은 각각 1,300 kg/m^3, 1,400 kg/m^3 및 1,500 kg/m^{3}급으로 각각의 목표 압축강도는 5 MPa, 10 MPa 및 24 MPa임(표 4.2).
- 실험 당시 측정된 압축강도는 각각 8 MPa, 15 MPa 및 25 MPa 이었으며, 전단마찰면의 수직으로 작용하는 축응력은 측정된 콘크리트 압축강도의 0배, 0.15배 및 0.30배로 설정함. 시공 줄눈 유무에 따라 직접전단 실험체는 전단마찰 면을 일체형(Monolithic)과 분리형(Construction Joint)으로 구분하였음.
- 일체형 실험체는 시공 줄눈을 형성시키기 않기 위해 실험 구간을 한 번에 타설하였음. 분리형 실험체는 전단 마찰면을 기준으로 한쪽 면을 타설한 후 3일 이후 반대 면을 타설하여 시공 줄눈을 형성시켰으며, 분리형 실험체의 시공 줄눈 면은 별도의 면 처리없이 부드러운 면으로 제작하였음.
- 실험체 명에서 첫 번째 문자는 시공줄눈의 유무를, 두 번째 문자는 압축강도를, 세 번째 문자는 작용 압축응력을 나타냄. 모든 실험체는 실험구간에서의 전단 마찰 파괴를 유도하기 위해 실험체의 상하부 및 옆면을 탄소섬유로 보강하였음.

표 4.1 전단마찰거동 실험체 상세

Specimens	Condition	ρ_c (kg/m^3)	f_{ck} (MPa)	σ_x (MPa)
M5-0	Monolithic	1300	8	0
M5-0.15				0.15f_{ck} (1.2 MPa)
M5-0.30				0.30f_{ck} (2.4 MPa)
M10-0		1400	15	0
M10-0.15				0.15f_{ck} (1.2 MPa)
M10-0.30				0.30f_{ck} (2.4 MPa)
M24-0		1500	25	0
M24-0.15				0.15f_{ck} (2.25 MPa)
M24-0.30				0.30f_{ck} (4.5 MPa)
C5-0	Construction Joint	1300	8	0
C5-0.15				0.15f_{ck} (2.25 MPa)
C5-0.30				0.30f_{ck} (4.5 MPa)
C10-0		1400	15	0
C10-0.15				0.15f_{ck} (3.75 MPa)
C10-0.30				0.30f_{ck} (7.5 MPa)
C24-0		1500	25	0
C24-0.15				0.15f_{ck} (3.75 MPa)
C24-0.30				0.30f_{ck} (7.5 MPa)

※ ρ_c is unit weight of concrete, f_{ck} is compressive strength of concrete and σ_x is applied compressive stress.

표 4.2 실험체 콘크리트 배합

ρ_c	f_{cd} (MPa)	S/a (%)	W/B (%)	R_a (%)	Unit weight (kg/m^3)						S.P (%)
					W	OPC	GGBS	FA	C_A	F_A	
1300	24	42	30	0	135	135	225	90	452	421	0.7
1400	10			10	135	135	225	90	383	358	0.13
1500	5			25	135	135	225	90	281	262	0.02

※ f_{cd} is targeted compressive strength of concrete, S/a is sand percent of total aggregate by solid volume, W/B is water-to-binder ratio, R_a is Foam volume ratio, W is water, OPC is ordinary portland cement, GGBS is ground granulated blastfurnace slag, FA is fly ash, C_A is coarse aggregate, F_A is fine aggregate and S.P is highrange water-reducting agent-to-cement ratio by weight.

4.1.2 직접전단실험 가력상세

- 직접 전단 실험에서 하중은 전동식 유압 펌프를 통해 도입하였으며, 1,000 kN 용량의 로드셀을 이용하여 측정하였음(그림 4.1).
- 전단 마찰면에서의 상대 미끄러짐 변위는 25 mm 용량의 변위계(Linear variable differential transducers, LVDT)를 사용하여 측정하였음.
- 변위계는 예상 전단마찰 파괴면의 중앙부에 ㄴ자 고정 철물을 이용하여 고정시켰음.
- 전단 마찰면에의 수직으로 작용하는 압축력은 고장력 볼트의 토크를 통해 도입하였으며, 200 kN 용량의 로드셀 6개를 이용하여 측정하였음.
- 일체형 실험체의 전단 변형률은 3축 게이지(Strain Rosette)를 이용하여 측정하였으며, 분리형 실험체의 전단변형률은 시공 줄눈으로 인해 측정하지 않았음.

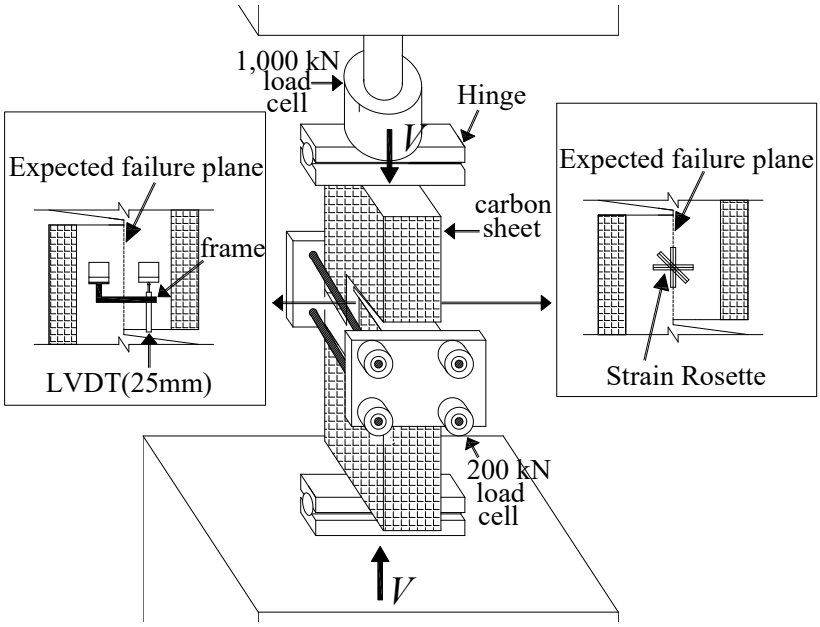


그림 4.1 직접전단 실험체 가력상세

4.2 직접전단 실험결과 분석

4.2.1 균열진전 및 파괴모드

- 모든 실험체는 전단 마찰면을 기준으로 두 개의 블록으로 나누었음. 일체형 및 분리형 실험체의 파괴모드는 콘크리트 압축강도 및 작용 축응력의 영향이 미미하였음.
- 일체형 실험체의 전단 마찰면은 골재의 관통으로 인해 전단마찰 파괴되었으며, 이는 바텀애시 경량골재의 골재 맞물림 작용의 영향이 작아질 수 있음을 의미함.
- 분리형 실험체의 전단 마찰면은 제작된 시공줄눈 면에서 전단마찰 파괴되었음(그림 4.2).
- 일체형 실험체의 균열은 전단 마찰면 끝에서 균열이 진전해 나아갔으며, 분리형 실험체의 균열은 제작된 시공줄눈으로 인해 관찰되지 않았음.

4.2.2 전단하중-상대 미끄러짐 관계

- 모든 실험체는 전단 마찰면을 기준으로 두 개의 블록으로 나누었다. 일체형 및 분리형 실험체의 파괴모드는 콘크리트 압축강도 및 작용 축응력의 영향이 미미하였음.
- 실험을 통해 측정된 전단 마찰면에서의 전단균열 발생 시 내력(V_{cr}), 최대 전단마찰내력에서의 상대 미끄러짐 양(S_0) 및 최대 전단 마찰 내력(V_n)은 표 4.3 및 그림 4.3에 나타내었음.

(a) 일체형

(b) 분리형

그림 4.2 전형적인 균열진전

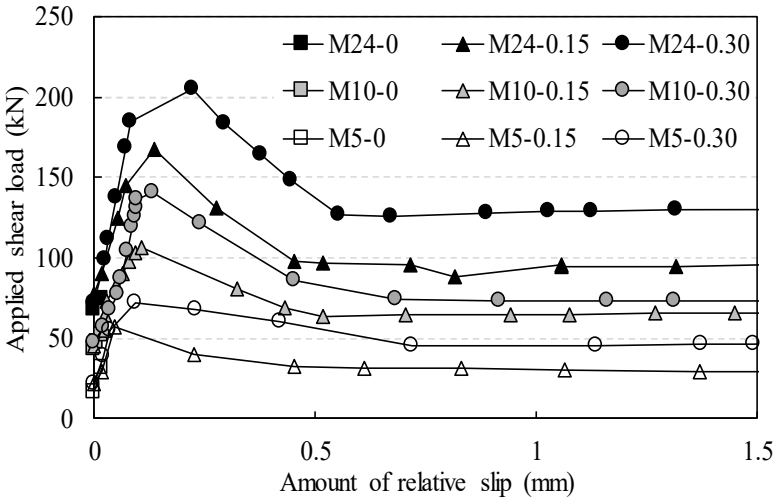
표 4.3 실험결과 요약

Specimens	f_{ck} (MPa)	V_{cr} (kN)	V_n (kN)	S_0 (mm)
M5-0	8	17.3	31.1	0.01
M5-0.15		21.8	57.8	0.04
M5-0.30		21.7	72.1	0.06
M10-0	15	43.3	52.4	0.02
M10-0.15		45.3	107.3	0.09
M10-0.30		47.8	143.6	0.15
M24-0	25	72.5	73.8	0.03
M24-0.15		76.9	167.7	0.14
M24-0.30		72.6	204.9	0.22
C5-0	8	11.8	11.8	-
C5-0.15		12.8	29.7	0.02
C5-0.30		18.9	52.2	0.04
C10-0	15	18.0	18.0	-
C10-0.15		22.5	54.4	0.05
C10-0.30		22.6	93.2	0.09
C24-0	25	22.0	22.0	-
C24-0.15		32.4	79.3	0.07
C24-0.30		28.5	147.9	0.14

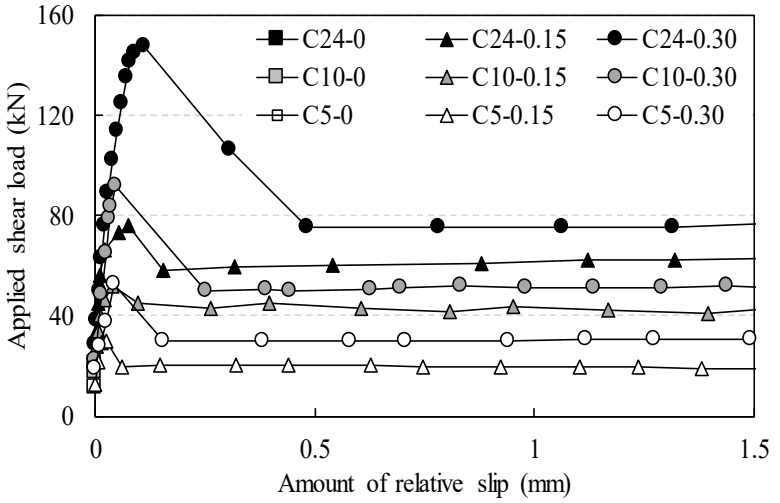
※ M is Monolithic, C is Construction Joint, V_{cr} is intial shear strength relative slip, V_n is ultimate shear friction strength and S_0 is relative slip amount at V_n

- 모든 실험체의 상대 미끄러짐은 초기 균열 발생까지 나타나지 않았음.
- 초기 균열 발생 이후 작용 압축응력을 도입하지 않은 실험체는 상대 미끄러짐의 발생과 함께 최대 내력에 도달하였음.
- 분리형에서 작용 압축응력이 없는 실험체의 S_0값은 최대 전단 마찰 내력의 도달과 동시에 분리되어 측정하지 못하였음.
- 초기 균열 발생 이후 작용 압축응력을 도입한 일체형 실험체는 포물선 형태로 하중이 증가하면서 최대전단마찰내력에 도달하였음.
- 이는 인해 최대 내력에 도달하는 시점에서 바텀애시 경량 골재의 골재 맞물림으로 인해 상대 미끄러짐이 많이 발생하였기 때문임.
- 반면 분리형 실험체는 골재 맞물림 작용이 없기 때문에 초기 균열 발생 이후 직선 형태로 하중이 증가함.
- 초기 균열 발생 이후 일체형 실험체의 하중 증가 기울기는 콘크리트의 강도가 높을수록 컸으며, 콘크리트 강도가 동일한 경우 비슷하였음.
- 분리형 실험체의 하중 증가 기울기는 콘크리트 강도의 영향이 미미하였음.
- 최대 전단마찰 내력 이후 작용 압축응력을 도입한 일체형 실험체는 하중이 급격하게 감소하였으며, 일정한 하중에서 미끄러짐 양이 증가하였음.
- 최대 전단마찰내력 이후 분리형 실험체는 일체형 실험체와 유사한 거동을 보였음.
- 실험체 M5-0의 S_0값은 0.01 mm이었으며, M5-0 실험체의 최대 전단 마찰 내력시에 해당하는 하중에서의 M5-0.15 및 M5-0.3 실험체의 S_0값은 모두 약 0.01 mm로 비슷한 수준에 있었음.
- M5 시리즈에서 작용 압축응력이 각각 $0.15f_{ck}$ 및 $0.3f_{ck}$의 S_0값은 각각 0.04 mm 및 0.06 mm로, 작용 압축응력이 커질수록 증가하는 경향을 보였음.

- 이는 작용 압축응력이 커질수록 최대 전단 마찰 내력의 증가에 따른 S_0값이 증가하였기 때문임.
- M10-0 및 M24-0 실험체의 S_0값은 각각 0.02 mm 및 0.03 mm로, M5-0 실험체에 비해 각각 2.0배 및 3.0배 증가하였음.
- M10-0.15 및 M10-0.3 실험체의 S_0값은 0.09 mm 및 0.15mm로 M5시리즈에 비해 각각 약 2.3배 및 2.5배 증가하였음.
- M24-0.15 및 M24-0.3 실험체의 S_0값은 각각 0.14 mm 및 0.22 mm로, M5시리즈에 비해 각각 약 3.5배 및 3.7배 증가하였음.
- 실험체 C5-0.15 및 C5-0.3의 S_0값은 0.02 mm 및 0.04 mm로 일체형 실험체에 비해 각각 약 0.5배 및 0.7배 낮은 수준이었으며, C10 및 C24 시리즈에서도 유사한 경향을 보였음.
- C5 시리즈에서 작용 압축응력이 각각 $0.15f_{ck}$ 및 $0.3f_{ck}$의 S_0값은 일체형 실험체와 유사하게 작용 압축응력이 커질수록 증가하는 경향을 보였음.



(a) 일체형



(b) 분리형

그림 4.3 하중-미끄러짐 관계

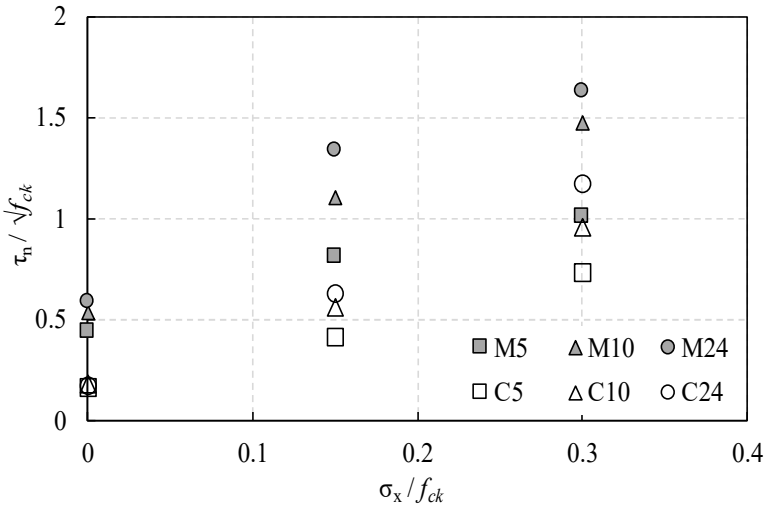


그림 4.4 상대슬립발생시 초기 전단마찰내력

4.2.3 최대 전단마찰내력

- 콘크리트 압축강도에 루트승으로 무차원한 전단마찰응력($\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$)은 작용 압축응력에 따라 나타내었음(그림 4.4).
- 작용 압축응력이 0, 0.15f_{ck} 및 0.3f_{ck}인 M5 시리즈의 $\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$값은 각각 0.44, 0.81 및 1.01 이었으며, M10 시리즈 및 M25 시리즈 또한 비슷한 경향을 보였음.
- 작용 압축응력이 0, 0.15f_{ck} 및 0.3f_{ck}인 C5 시리즈의 $\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$값은 각각 0.17, 0.42 및 0.73 이었으며, C10 시리즈 및 C25 시리즈 또한 비슷한 경향을 보였음.
- 모든 실험체는 작용압축응력이 증가함에 따라 $\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$값은 증가하였음.
- M5 시리즈에 비해서 C5 시리즈의 $\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$값은 각각 약 38%, 51% 및 27% 만큼 낮았음.
- 작용 축응력이 없는 분리형 실험체의 $\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$값은 평균 0.17이었으며, 일체형 실험체의 $\tau_n / \sqrt{f_{ck}}$값은 평균 0.52으로 약 2.97배 높았음. 이는 분리형 실험체는 시공줄눈에 따른 골재의 맞물림 작용이 없기 때문이라 판단되어짐.

4.3 전단마찰강도에 대한 예측모델

4.3.1 기본 방정식

- 전단 마찰 강도는 이전의 장에서 분석된 바와 같이 일체 타설 및 분리 타설과 같은 시공 줄눈의 여부가 그 강도에 미치는 영향이 현저함.
- 이에 따라 기존 연구자들은 일체타설 및 분리 타설된 콘크리트에서 다양한 모델을 경험적으로 제시하고 있음.
- 최근에는 콘크리트 소성론의 상계치 이론에 기반한 일체 타설된 콘크리트의 전단마찰 강도가 몇몇 연구자들에 의해서 수학적으로 제시되고 있음.
- 콘크리트 소성론은 실제의 압축응력-변형률 관계와 소성상태의 압축응력-변형률 관계의 면적이 동일

하다는 가정에 기반하고 있으며, 이를 위해 실제 콘크리트 압축 유효계수($\nu_c(=f_c^*/f_{ck})$)가 적용되고 있음.

- 이러한 가정으로부터 Yang et al.는 일체 타설된 콘크리트의 전단마찰 강도(τ_{fm})를 다음과 같이 제시하고 있음.

$$\tau_{fm} = \frac{1}{2}\nu_c f_{ck}\frac{1}{\cos\alpha}[l - m\sin\alpha] + N_x\tan\alpha \tag{4.1a}$$

$$\alpha = 2\tan^{-1}\left[\frac{(m/l)}{((m/l)^2 + x^2)^{1/2} + x}\right] \tag{4.1b}$$

$$l = 1 - 2\frac{f_t^*}{f_c^*}\frac{\sin\phi}{1-\sin\phi} \tag{4.1c}$$

$$m = 1 - 2\frac{f_t^*}{f_c^*}\frac{1}{1-\sin\phi} \tag{4.1d}$$

$$x = \frac{(l^2 - m^2)^{1/2}}{l} \tag{4.1e}$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{l - m\sin\alpha}{\cos\alpha}\left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\right)^{1/2}\right) \tag{4.1f}$$

- 여기서, α는 파괴면과 상대변위사이의 각도를, N_x는 작용축력을, ϕ는 콘크리트의 마찰각을, f_c^*는 콘크리트의 유효 압축강도를, f_t^*는 콘크리트의 유효 인장강도를 의미함.
- 또한 Yang et al.는 시공줄눈을 갖는 콘크리트에서 α와 콘크리트 마찰각(ϕ')이 동일하다는 가정으로부터 분리 타설된 콘크리트의 전단마찰 강도(τ_{fc})를 다음과 같이 제시하고 있음.

$$\tau_{fc} = c' A_c + N_x\tan\phi' \tag{4.2}$$

- 여기서, c'는 분리 타설된 콘크리트의 점착력을 의미함.

4.3.2 일체 타설된 콘크리트

- 일체 타설된 콘크리트는 식 4.1에 나타낸 바와 같이 α를 선정하여야 하는데, 이를 위해서는 ν_c, 유효 강도비(f_t^*/f_c^*)와 ϕ가 결정되어야 함.
- 압축 유효계수(ν_c)는 수정된 Coulomb 파괴기준에 기반하여 실제의 압축응력-변형률 모델과 소성상태의 압축응력-변형률 모델의 면적이 동일하다는 가정으로부터 결정할 수 있음.
- 실제의 압축응력-변형률 모델은 Lee et al.에 의해 제시된 다음의 모델을 이용하였음.

$$f_c = \frac{(\beta_1 + 1)\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o}}{\left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o}\right)^{\beta_1 + 1} + \beta_1} f_{ck} \tag{4.3a}$$

$$\beta_1 = 0.20\mathrm{EXP}\left[0.90\left(\frac{f_{ck}}{f_o}\right)^{0.5}\left(\frac{\rho_o}{\rho_c}\right)^{1.5}\right] \quad \text{for } \epsilon_c \le \epsilon_o \tag{4.3b}$$

$$\beta_1 = 0.05\mathrm{EXP}\left[2.33\left(\frac{f_{ck}}{f_o}\right)^{0.2}\left(\frac{\rho_o}{\rho_c}\right)^{1.5}\right] \quad \text{for } \epsilon_c > \epsilon_o \tag{4.3c}$$

$$\epsilon_0 = 1059\left(\frac{f_{ck}}{E_c}\right)^2 \tag{4.3d}$$

$$E_c = 3914\left[(f_{ck})^{0.6}\left(\frac{\rho_c}{\rho_o}\right)^{1.44}\right] \tag{4.3e}$$

- 여기서, ϵ_c는 임의의 응력(f_c)에서의 변형률을, ϵ_o는 최대 응력시점의 변형률을, β_1은 상승 및 하강기울기 계수를, E_c는 콘크리트의 탄성계수를, f_o와 ρ_o는 각각 콘크리트 압축강도(= 10 MPa) 및 단위용적중량(= 2,300 kg/m^3)의 참고 값을 의미함.
- 콘크리트를 완전한 소성재료로 가정한 압축응력-변형률의 모델은 Yang et al.에 의해 제시된 파괴시 변형률의 값으로 가정하여 결정하였음.
- 위의 두 모델로부터 결정된 압축유효계수(ν_c)는 모델 식으로서의 일반화를 위해서 변수연구를 수행하였음. 선정된 변수는 f_{ck}와 ρ_c이며, 이들의 범위는 Lee et al.와 Ji et al.의 실험결과를 기반으로 각각 1 ~ 30 MPa 및 900 ~ 1,600 kg/m^{3}으로 결정하였음.
- 변수연구로부터 일반화된 모델은 다음과 같음(그림 4.5).

$$\nu_c = 0.87\mathrm{EXP}\left[-0.07\left(\frac{f_{ck}}{f_o}\right)^{0.5}\left(\frac{\rho_o}{\rho_c}\right)^2\right] \tag{4.4}$$

- 유효 강도비(f_t^*/f_c^*)도 콘크리트를 완전 소성재료로의 가정으로 식 4.3과 fib 2010의 인장응력-변형률 모델로부터 산정하였음.
- 산정된 값들도 변수연구를 통하여 모델 식으로 일반화하였음(그림 4.6).
- 변수연구는 ν_c의 모델 제시에서 사용한 변수 및 범위와 동일하게 수행하였음.
- 변수연구로부터 일반화된 모델은 다음과 같음.

$$f_t^*/f_c^* = 0.051\mathrm{EXP}\left[-0.26\left(\frac{f_{ck}}{f_o}\right)^{0.8}\left(\frac{\rho_o}{\rho_c}\right)^{0.3}\right] \tag{4.5}$$

- 식 4.1(f)에서 ϕ은 식 4.5의 f_t^*/f_c^*로부터 결정될 수 있음.
- 식 4.5를 식 4.1(f) 대입 후 ϕ의 해는 수치해석 기법을 이용하여 산정하였음.
- 이와 같이 ϕ의 산정은 복잡한 절차를 수행해야 하므로 단순모델로의 제시가 필요함.

■ 따라서 ϕ는 주요함수인 f_t^*/f_c^*를 0.02 ~ 0.04로 변화시켜 얻어진 값들을 회귀 분석하여 단순식으로 다음과 같이 일반화하였음(그림 4.7).

$$\phi = 19.83\left(\frac{f_t^*}{f_c^*}\right)^{-0.22} \tag{4.6}$$

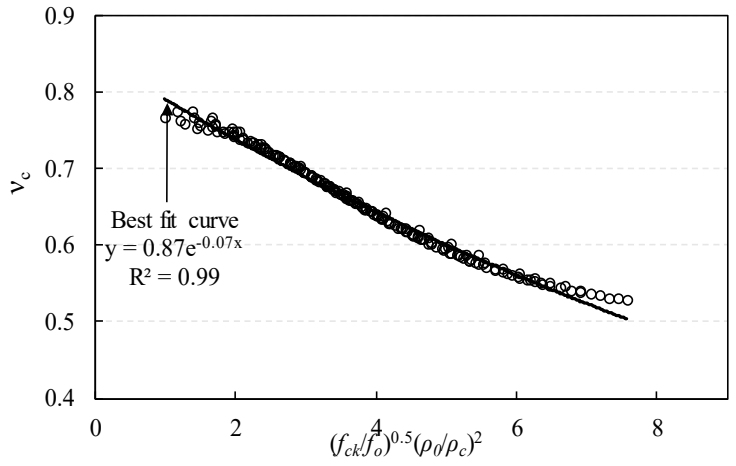


그림 4.5. ν_c에 대한 회귀분석

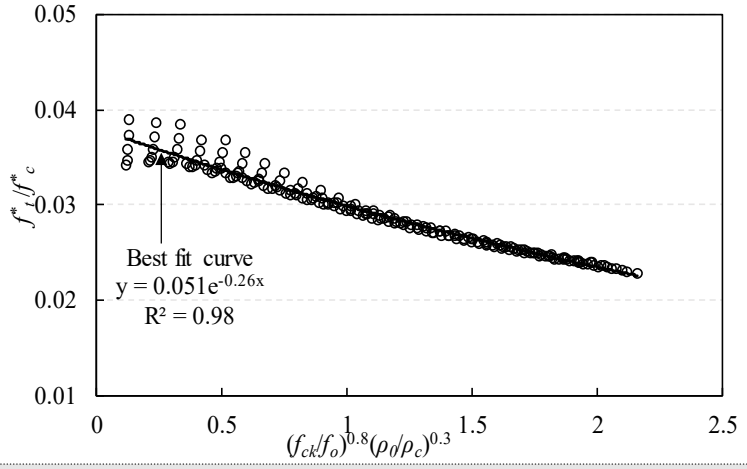


그림 4.6 f_t^*/f_c^*에 대한 회귀분석

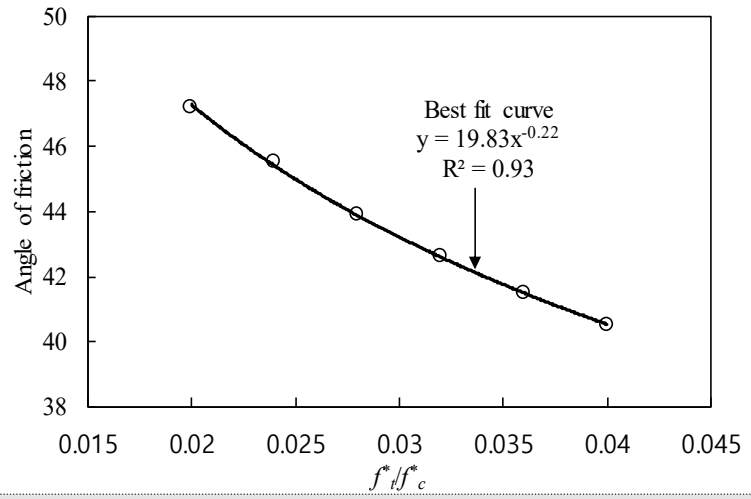


그림 4.7 f_t^*/f_c^* 와 ϕ의 관계

5. 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 PC 경량 콘크리트의 건조수축 평가

5.1 자유 건조수축

- 그림 5.1에는 재령에 따른 전형적인 LWBSC의 자유건조수축 변형률을 나타내었음. 그룹 1에서 물-결합재비가 25%이면서 기포 혼입률이 10%인 실험체 25-10-450의 LWBSC의 자유건조수축 변형률은 재령 40일 이전에 급격히 증가하였으며, 약 56일 이후에 수렴하기 시작하였음.
- 변형률이 급격히 증가하는 시점과 수렴하는 시점은 기포 혼입률이 증가할수록 느려졌음. 반면 이에 대한 단위결합재량의 영향은 미미하였음.
- 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 급격히 증가하는 시점은 49일에서 63일로, 수렴하는 시점은 72일에서 84일로 지연되었음.
- 반면 단위결합재량이 18% 감소할 때에 급격히 증가하는 시점은 49일에서 56일로, 수렴하는 시점은 72일에서 80일로 지연의 정도가 기포 혼입률 보다 작았음.
- 건조수축변형률은 기포 혼입률에 의해 현저한 영향을 받았음.
- 그룹 4에서 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 최대 건조수축 변형률은 평균 27% 증가하였는데, 이에 대한 단위결합재량의 영향은 미미하였음.
- 이는 건조수축의 변형량은 내부의 공극에 의해 현저한 영향을 받기 때문임.
- 그림 5.1에 나타낸 바와 같이 일반적으로 구속 건조수축은 변형률이 가속하는 구간만이 존재하지만, 자유 건조수축은 변형률이 가속하는 구간과 수렴하는 구간이 동시에 공존하는 포물선 형상을 가지고 있음. 이러한 건조수축의 포물선 형상을 구현하기 위해서 대부분의 모델들은 time function ($T_{sh}(t,t_0)$)과 극한건조수축 변형률 ($\epsilon_{sh\infty}$)의 함수로 구성된 다음의 기본 방정식을 이용하고 있음.

$$\epsilon_{sh}(t,t_0) = T_{sh}(t,t_0) \cdot \epsilon_{sh\infty} \tag{5.1}$$

- 여기서, $\epsilon_{sh}(t,t_0)$는 노출 재령 (t_0) 이후, 임의의 재령 (t)에서의 건조수축 변형률을 의미함.
- Time function $T_{sh}(t,t_0)$는 양생조건 및 실험체의 사이즈에 따라 현저하게 영향을 고려하면서 포물선의 형상을 갖도록 하는 다음의 방정식을 이용하였음.

$$T_{sh}(t,t_0) = \left[\frac{t-t_0}{\alpha_1(V/S_A)^2 + (t-t_0)}\right]^{\beta_1} \tag{5.2}$$

- 여기서, V/S_A는 외기에 접하는 면적을 나타내는 체적 대비 표면적의 비를, α_1와 β_1는 재령에 따른 건조수축 변형률의 기울기를 의미함.
- 자유 건조수축은 그림 5.1에 나타낸 바와 같이 어떤 시점을 기준으로 가속구간과 수렴하는 구간으로 구분됨. 이에 Lee et al.은 $\epsilon_{sh\infty}$의 함수가 재령에 독립적인 특성을 이용하여 임의의 점(t_1)을 고려할 수 있는 자유 건조수축($\epsilon_{fsh}(t,t_0)$)을 다음과 같이 제시하였음.

$$\epsilon_{fsh}(t,t_0) = \frac{T_{sh}(t,t_0)}{T_{sh}(t_1,t_0)}\epsilon_{fsh}(t_1,t_0) \tag{5.3}$$

- 일반적으로 변곡점을 의미하는 t_1은 보통 콘크리트에서 28일로 평가되고 있음. 반면, Lee et al.은 LWC에서 t_1는 내부 양생효과로 인해서 변형률 가속 구간이 늦어짐을 강조하였음.
- 그림 5.1에 나타낸 바와 같이 기포가 첨가된 바텀애시 경량골재 콘크리트도 t_1이 대략 50 ~ 60일로 평가되었음. 이를 기반으로 이 연구에서는 t_1을 56일로 가정하였음.
- 식 5.2와 5.3을 이용하여 실험결과를 기반으로 산정된 자유 건조수축의 α_1와 β_1를 식 (5.4) 및 (5.5)에 나타내었음. 자유 건조수축의 α_1와 β_1는 W/B와 등가공극률(P_{eq})이 증가할 때에 기울기 계수 α_1는 증가한 반면, β_1는 감소하였음. 이의 실험 결과로부터 회귀분석을 수행한 결과 기울기 계수 α_1와 β_1는 다음과 같이 제시될 수 있었음(그림 5.2).

$$\alpha_1 = 0.187\left[\left(P_{eq}/100\right)^{0.4}(W/B)\right]^{1.04} \tag{5.4}$$

$$\beta_1 = 0.332\left[\left(P_{eq}/100\right)^{0.4}(W/B)\right]^{-0.78} \tag{5.5}$$

- 식 (5.1), (5.2) 및 (5.3)에서 재령 56일에서의 건조수축 변형률($\epsilon_{fsh}(56,t_0)$)을 이용한 극한 건조수축 변형률은 다음과 같이 정리할 수 있음.

$$\epsilon_{sh\infty} = \frac{\epsilon_{fsh}(56,t_0)}{\left[\dfrac{56-t_0}{\alpha_1(V/S_A)^2+(56-t_0)}\right]^{\beta_1}} \tag{5.6}$$

- 여기서, $\epsilon_{fsh} = (56,t_0)$은 실험결과를 기반한 회귀 분석으로부터 다음과 같이 결정할 수 있었음(그림 5.3).

$$\epsilon_{fsh}(56,t_0) = 2280\left[(P_{eq}/100)(W/B)(W/W_0)^{0.5}\right]^{0.75} \tag{5.7}$$

- 여기서, W와 W_0는 각각 단위수량 및 단위수량의 참고 값(= 100 kg/m^3)을 의미함.

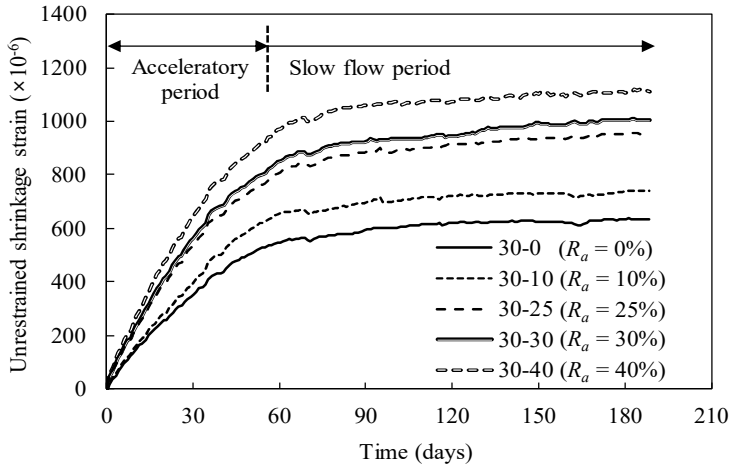
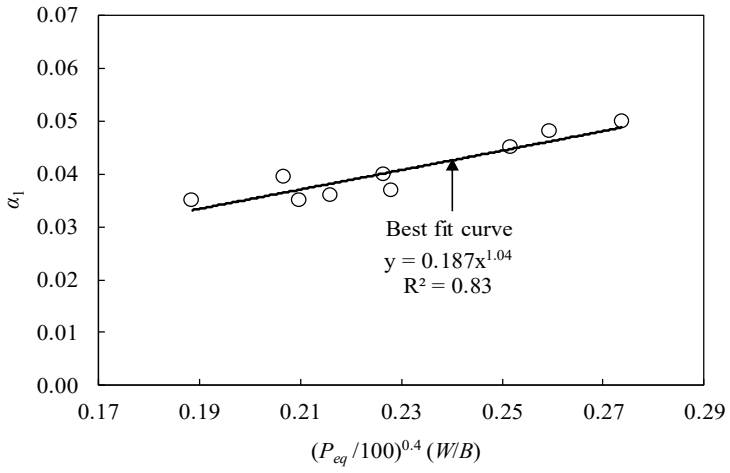
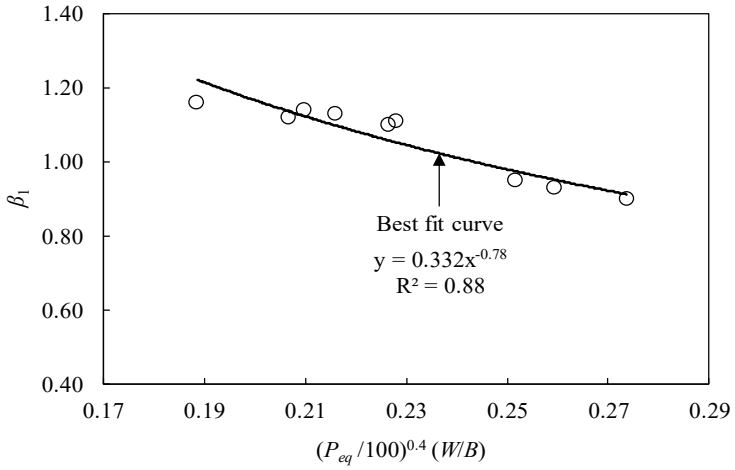


그림 5.1. 전형적인 자유건조수축의 거동



(a) α_1



(b) β_1

그림 5.2. Time function에서 기울기 계수 결정을 위한 회귀분석

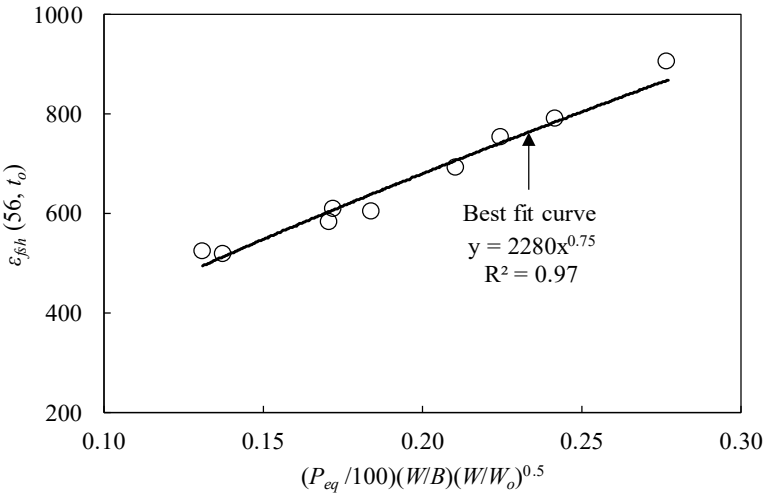


그림 5.3. $\epsilon_{fsh}(56, t_0)$ 결정을 위한 회귀분석

5.2 구속 건조수축

- 그림 5.4에는 시간경과에 따른 내부 강재링의 변형률을 나타내었음.
- 그래프에서 강재링의 변형률이 증가하다가 급격한 감소는 외부표면에 첫 균열이 발생하는 시점을 의미함.
- 기포가 첨가되지 않은 LWBSC는 첫 균열 발생 시점까지 급격히 증가하였으며, 강재의 최대 변형률이 53 μ이었음.
- 그 강재 변형률의 증가기울기는 기포 혼입률에 관계없이 모든 실험체에서 비슷하였음.
- 강재의 최대 변형률은 실험체 30-0-450(W/B = 30%, R_a = 0%, B = 450 kg/m^3)에서 53 μ로 가장 높았음.
- 이들 최대변형률의 실험 결과로부터 구속건조수축에 의한 인장응력은 기포 혼입률 0%, 10% 및 25%에서 각각 2.98 MPa, 2.36 MPa 및 2.25 MPa로 산출되었음.

- 인장응력은 Hossain and Weiss에 의해 제시된 다음의 계면압력의 식으로부터 계산하였음.

$$P_i = \frac{(r_{es}^2 - r_{is}^2)}{2r_{es}^2} E_{st}\epsilon_{st} \tag{5.8}$$

- 여기서, r_{es}와 r_{is}는 강재의 내부 및 외부반경을, E_{st}와 ε_{st}는 강재의 탄성계수 및 변형률을 의미함.
- 인장응력은 탄성이론으로부터 임의의 축방향의 인장응력으로부터 계면 압력과의 관계를 다음과 같이 산정할 수 있음.

$$\sigma_\theta = \frac{r_{ic}^2 P_i}{r_{ec}^2 - r_{ic}^2}\left(1 + \frac{r_{ec}^2}{r^2}\right) \tag{5.9}$$

- 여기서, r_{ic}와 r_{ec}는 콘크리트의 내부와 외부반경을 의미함.
- 산정된 인장응력은 f_{ck}로 무차원화였음.
- 무차원된 인장응력은 기포 혼입률이 25% 증가할 때에 24% 감소하였음.
- 특히 30-25-450(W/B = 30%, R_a = 25%, B = 450 kg/m^3) 실험체의 무차원된 인장응력은 0.81로 무차원된 쪼갬 인장강도의 기존실험결과 보다 약 3배 높았음.
- 따라서 구속된 환경에서 인장 응력에 의한 LWBSC의 균열발생을 제어하기 위해서는 10% 이하의 기포 혼입률의 첨가가 요구됨.
- 균열 폭은 재령이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였는데, 그 증가 기울기는 모든 실험체에서 비슷하였음.
- 모든 실험체는 균열이 외부몰드의 하부에서 상부로 관통되었는데, 이때의 최대 균열폭은 기포 혼입률에 의해 현저한 영향을 받았음(그림 5.5).
- 기포 혼입률이 0%에서 25%로 증가할 때에 최대 균열 폭은 0.055 mm에서 0.150 mm로 증가하였음.
- 바텀애시 경량골재 콘크리트의 최대 균열 폭은 0.150 mm로 ACI 224R-01에서 제시하고 있는 제빙

화학물질이 접하는 곳에 만족하고 있음(표 5.1).

- 표 5.2에는 ASTM C 1581에서 제시하고 있는 균열 잠재가능성 등급으로부터 균열저항성을 평가하였음. 균열잠재가능성 등급은 강재링의 평균응력증가율(S)와 순 균열시점(t_{cr})을 기준으로 산정할 수 있는데 각 게이지 위치의 응력증가율(q)의 평균값으로 다음의 식과 같음.

$$q = \frac{G|a_{avg}|}{2\sqrt{t_{cr}}} \tag{5.10}$$

- 여기서, G(= 72.2 GPa)는 실험체 셋팅에 의한 상수를, a_{avg}는 순변형률을 의미함. 모든 실험체의 첫 균열시점은 재령 2일 전에 발생하였는데, 평균응력 증가율은 기포 혼입률에 의해 현저하게 영향을 받았음.
- 기포 혼입률이 약 25% 증가할 때에 평균응력 증가율은 대략 13% 감소하였음(표 5.3).

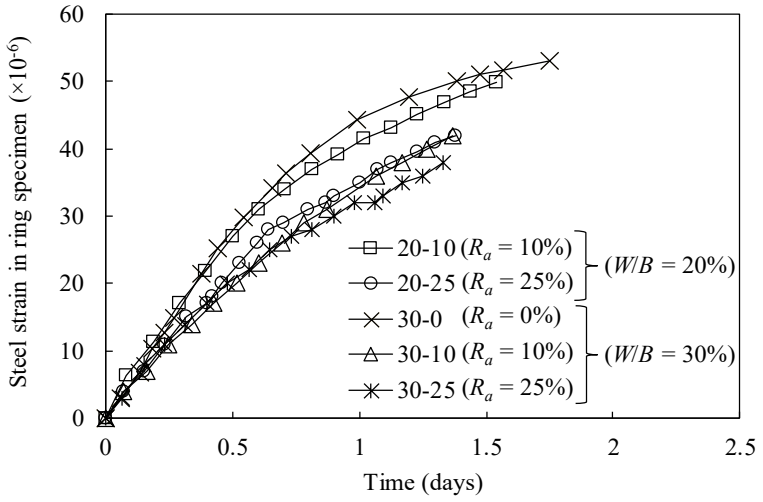


그림 5.4 내부 강재링의 변형률

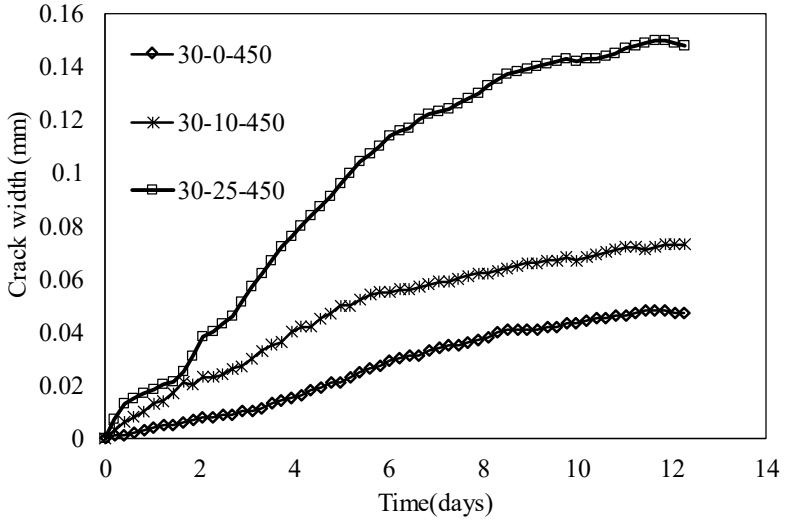


그림 5.5 시간 증가에 따른 균열폭

표 5.1 ACI 224R-01에 의한 철근콘크리트구조물의 허용균열폭 기준

노출환경조건	허용 균열폭 (mm)
건조한 기후 또는 보호마감재가 있는 경우	0.41
습한기후, 습윤공기 및 흙속	0.30
제빙 화학물질이 접하는 곳	0.18
해중, 건습이 반복되는 환경	0.15
물 저장구조물	0.10

표 5.2 ASTM C 1581에 의한 균열 잠재가능성 등급

순 균열시점 t_{cr}, (days)	평균 응력증가율 S, (MPa/day)	균열 가능성 여부
$0 < t_{cr} \leq 7$	$S \geq 0.34$	High
$7 < t_{cr} \leq 14$	$0.17 \leq S < 0.34$	Moderate-High
$14 < t_{cr} \leq 28$	$0.10 \leq S < 0.17$	Moderate-Low
$t_{cr} > 28$	$S < 0.10$	Low

표 5.3 구속건조수축 실험결과

실험체명	t_{cr} (days)	계면압력 (MPa/day)	S (MPa/day)	인장응력 (MPa)	균열 가능성 여부
30-0-450R	1.75	0.62	1.45	2.98	High
30-10-450R	1.44	0.49	1.26	2.30	High
30-25-450R	1.33	0.47	1.25	2.25	High

- 표 5.3에 나타낸 바와 같이 단위결합재량 및 기포 혼입률에 관계없이 LWBSC의 균열 잠재 가능성 등급은 'High'로 평가되었음. Attiogbe et al.는 구속된 환경에서 콘크리트의 균열저항능력을 확보하기 위해서 'Moderate-Low' 이상의 등급을 확보가 필요하다고 강조하였음.
- 따라서 LWBSC는 구속환경상태에서 인장응력에 의한 균열 발생 가능이 높으므로 이를 제어하기 위해서 섬유 및 균열 저감제 등의 혼화제의 첨가가 필요할 것으로 판단됨.

5.3 소성건조수축

- 그림 5.6에는 소성수축에 의한 표면의 상태를 나타내었음.
- 콘크리트는 소성에 의한 수축이 크면 바닥몰드의 중앙부에 위치한 노치를 따라서 상부 표면에 일직선으로 균열이 발생함.
- 하지만, 기포 혼입률이 25% 이하인 LWBSC는 소성수축에 의한 균열이 표면에서 발생하지 않았음.
- 이는 25% 수준까지의 기포의 첨가가 LWBSC의 소성수축에 미치는 영향이 미미함을 의미함.

(a) 30-0-450 (b) 30-10-450 (c) 30-25-450

그림 5.6 소성환경에서 실험체의 표면

6. 결론

"기포 또는 EPS가 첨가된 바텀애시 골재기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 배합설계 및 성능 평가" 연구에서는 최적의 배합상세 및 모델을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었음.

① 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트의 최적 배합상세

Type	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	R_a (%)	E_a (%)	S/a (%)	B (kg/m³)	Proportions (kg/m³)							
							W	OPC	GGBS	FA	Coarse aggregate	Fine aggregate	Polymer	PVA Fiber
기포	10	30	10	0	42	450	135	135	225	90	350	401	0	0
	5		25	0			135	135	225	90	262	282	0	0
EPS	15		0	7.5			135	135	225	90	446	406	35	0.975
	8		0	15			135	135	225	90	388	348	35	0.975

f_{ck}: compressive strength, W/B: water to binder ratio, R_a: foam volume ratio, E_a: EPS volume ratio, S/a: ratio of fine aggregate ot total aggregate by volume, B: source material binder, and S.P: super plasticizing agent

② 압축강도 발현 모델

- 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트

$$\frac{f_{ck}}{f_{co}} = \left[1.9\ln\left\{\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^3\left(\frac{M}{M_0}\right)^{0.2}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)\right\}+4.5\right] \tag{6.1a}$$

- EPS가 첨가된 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트

$$\frac{f_{ck}}{f_{co}} = \left[2.1\ln\left\{\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^3\left(\frac{M}{M_0}\right)^{0.23}\left(\frac{1}{1+E_a}\right)\right\}+4.5\right] \tag{6.1b}$$

$$M = \sum_0^t (T - T_0)\Delta_t \tag{6.1c}$$

여기서, f_{ck}는 측정된 재령 28일 압축강도를, f_{co}(= 10 MPa)는 압축강도에 대한 참고 값을, ρ_c는 측정된 기건 밀도를, ρ_0(= 2,300 kg/m³)는 기건 밀도에 대한 참고 값을, M_0는 표준 양생 온도 (20 ℃)에서의 성숙도를, R_a는 기포 혼입률을, E_a는 EPS 혼입률을, M은 Saul에 의해 제시된 성숙도를 T 는 양생 온도를, T_0는 온도에 대한 참고 값(= -10 ℃)을, t는 재령을, Δt는 증분 재령을 의미함.

③ 탄성계수

$$E_c = 5,820\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)^{0.55}\right) \tag{6.2}$$

④ 파괴계수 및 쪼갬인장강도 모델

- 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트

$$f_r = 1.44\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)^{0.55}\right)^{0.8} \tag{6.3a}$$

$$f_{sp} = 0.62\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)^{0.55}\right)^{1.2} \tag{6.3b}$$

여기서, f_r은 재령 28일 파괴계수를, f_{sp}는 재령 28일 쪼갬 인장강도를 의미함.

- EPS가 첨가된 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트

$$f_r = 1.31\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+E_a}\right)^{0.55}\right)^{0.8} \tag{6.4a}$$

$$f_{sp} = 0.85\left((f_{ck})^{0.5}\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^{1.5}\left(\frac{1}{1+E_a}\right)^{0.55}\right)^{1.2} \tag{6.4b}$$

⑤ 열전도율 모델

- 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트

$$k_c = 0.075\mathrm{EXP}\left[0.00125\left(\frac{\rho_c}{(1+R_a)^{0.3}}\right)\right] \tag{6.5a}$$

- EPS가 첨가된 바텀애시 골재기반 고단열 · 지속가능 경량 콘크리트

$$k_c = 0.026\mathrm{EXP}\left[0.0019\left(\frac{\rho_c}{(1+E_a)^{0.3}}\right)\right] \tag{6.5b}$$

여기서, k_c는 열전도율을 의미함.

⑥ 건조수축 모델

$$\epsilon_{sh\infty} = \frac{\epsilon_{fsh}(56,t_0)}{\left[\dfrac{56-t_0}{\alpha_1(V/S_A)^2+(56-t_0)}\right]^{\beta_1}} \tag{6.6a}$$

여기서, $\epsilon_{sh\infty}$는 극한 건조수축 변형률을, $\epsilon_{fsh}=(56,t_0)$는 재령 56일에서의 건조수축 변형률을, t_0는 노출재령을, V/S_A는 외기에 접하는 면적을 나타내는 체적 대비 표면적의 비를, α_1와 β_1는 재령에 따른 건조수축 변형률의 기울기를 의미하는데 실험 결과로부터 회귀분석을 수행한 결과 다음과 같이 제시될 수 있었음.

$$\epsilon_{fsh}(56,t_0) = 2280\left[(P_{eq}/100)(W/B)(W/W_0)^{0.5}\right]^{0.75} \quad (6.6b)$$

$$\alpha_1 = 0.187\left[(P_{eq}/100)^{0.4}(W/B)\right]^{1.04} \quad (6.6c)$$

$$\beta_1 = 0.332\left[(P_{eq}/100)^{0.4}(W/B)\right]^{-0.78} \quad (6.6d)$$

여기서 $\epsilon_{sh}(t,t_0)$는 노출 재령 (t_0) 이후, 임의의 재령 (t)에서의 건조수축 변형률을, $T_{sh}(t,t_0)$는 time function을, W는 단위수량을 W_0는 단위수량의 참고 값(= 100 kg/m^3)을, P_{eq}는 등가공극률을 W/B는 물-결합재비를 의미함.

⑦ 전단마찰거동 모델

- 일체 타설된 콘크리트

$$\tau_{fm} = \frac{1}{2}\nu_c f_{ck}\frac{1}{\cos\alpha}[l - m\sin\alpha] + N_x\tan\alpha \quad (6.7a)$$

$$\alpha = 2\tan^{-1}\left[\frac{(m/l)}{((m/l)^2 + x^2)^{1/2} + x}\right] \quad (6.7b)$$

$$l = 1 - 2\frac{f_t^*}{f_c^*}\frac{\sin\phi}{1-\sin\phi} \quad (6.7c)$$

$$m = 1 - 2\frac{f_t^*}{f_c^*}\frac{1}{1-\sin\phi} \quad (6.7d)$$

$$x = \frac{(l^2 - m^2)^{1/2}}{l} \quad (6.7e)$$

$$\phi = 19.83\left(\frac{f_t^*}{f_c^*}\right)^{-0.22} \quad (6.7f)$$

$$\nu_c = 0.87\mathrm{EXP}\left[-0.07\left(\frac{f_{ck}}{f_o}\right)^{0.5}\left(\frac{\rho_o}{\rho_c}\right)^2\right] \quad (6.7g)$$

$$f_t^*/f_c^* = 0.051\mathrm{EXP}\left[-0.26\left(\frac{f_{ck}}{f_o}\right)^{0.8}\left(\frac{\rho_o}{\rho_c}\right)^{0.3}\right] \quad (6.7h)$$

- 분리 타설된 콘크리트

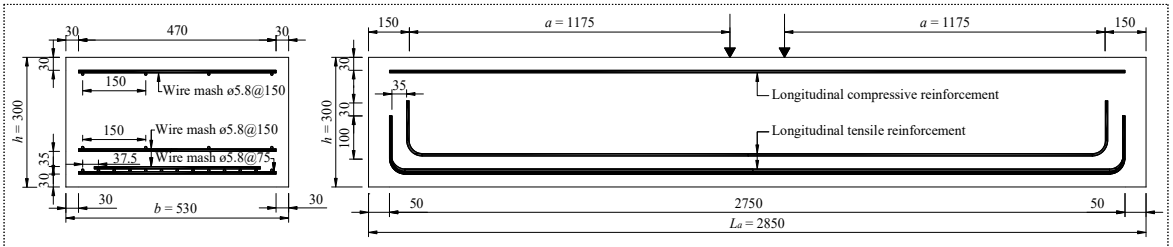
$$\tau_{fc} = c' A_c + N_x\tan\phi'$$

여기서, α는 파괴면과 상대변위사이의 각도를, N_x는 작용축력을, ϕ는 콘크리트의 마찰각을, f_c^*는 콘크리트의 유효 압축강도를, f_t^*는 콘크리트의 유효 인장강도를, f_t^*/f_c^*는 유효 강도비를, ν_c는 압축 유효계수를, c'는 분리 타설된 콘크리트의 점착력을, A_c는 전단마찰면의 면적을 의미함.

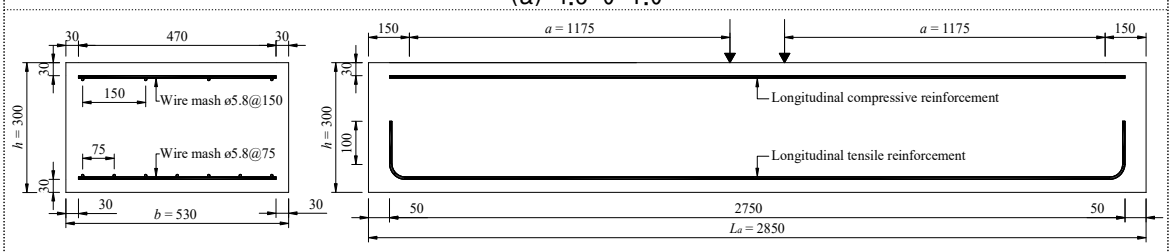
1. 바텀애시 골재 기반 고단열·지속가능경량 콘크리트 판넬의 휨 및 전단거동 평가

1.1 실험체 상세

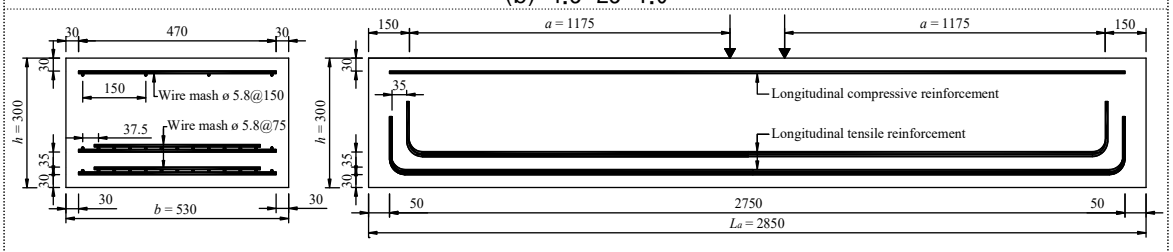
- 바텀애시 골재 기반 고단열·지속가능경량 콘크리트 판넬의 휨 및 전단거동을 평가하기 위해서 8개의 단순보의 실험체가 준비되었음.
- 휨 거동 평가에서의 주요변수는 기포 혼입률 및 주철근비임(그림 1.1).
- 기포 혼입률은 0%와 25%로 변화되었으며, 주철근비는 최소철근비의 1배 및 2배로 변화하였음. 이때의 전단 경간비는 4.5로 고정하였음.
- 전단 거동 평가에서의 주요변수는 기포 혼입률 및 전단경간비임. 기포 혼입률은 0%와 25%로 변화되었으며, 전단경간비는 0.5와 1.0으로 변화되었음.
- 실험체 명에서 첫 번째 숫자는 전단경간비를, 두 번째 숫자는 기포 혼입률을, 세 번째 수자는 최소철근비 대비 주철근비의 양을 의미함. 예를 들어 2.5-0-2.0은 전단경간비가 2.5, 기포 혼입률이 0% 및 최소철근비의 2배가 주철근비로 배근된 실험체를 의미함(표 1.1).
- 모든 실험체의 폭은 530 mm이며, 높이는 300 mm임. 또한 양 단순 지점까지의 총길이는 1050 mm임. 한쪽 단부 지점에서 상부 하중점인 전단경간의 길이는 전단 경간비의 변수에 따라 다른데, 0.5, 1.0 및 2.5에서 각각 135, 270 및 1,175 mm임.
- 주철근은 75 mm 또는 150 mm 간격으로 격자 형태를 갖는 5.8 mm의 용접 철망을 이용하여 배근하였음. 또한, 압축철근은 150 mm 간격으로 격자 형태를 갖는 5.8 mm의 용접 철망을 이용하여 배근하였음. 띠철근은 모든 실험체에서 배근되지 않았음.



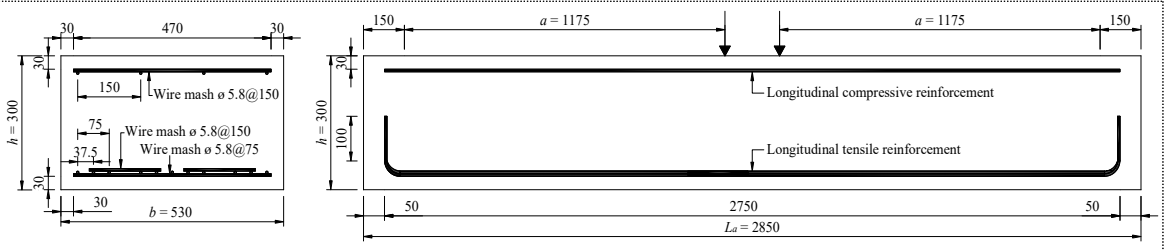
(a) 4.5-0-1.0



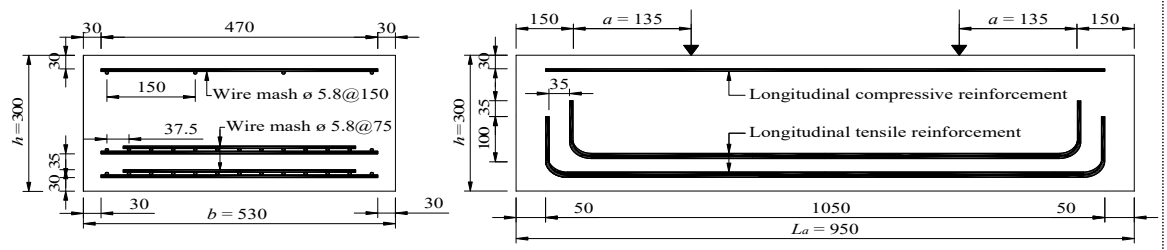
(b) 4.5-25-1.0



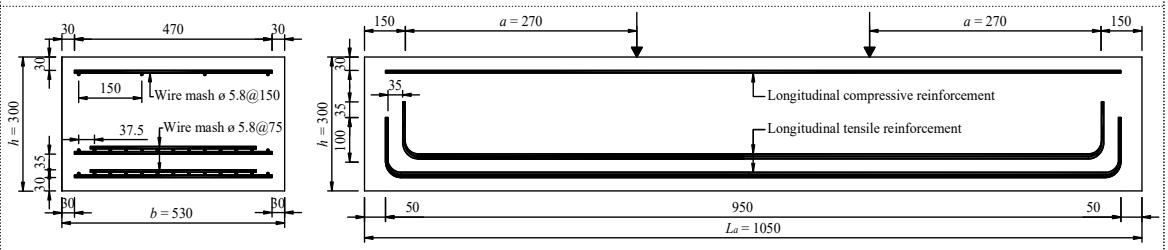
(c) 4.5-0-2.0



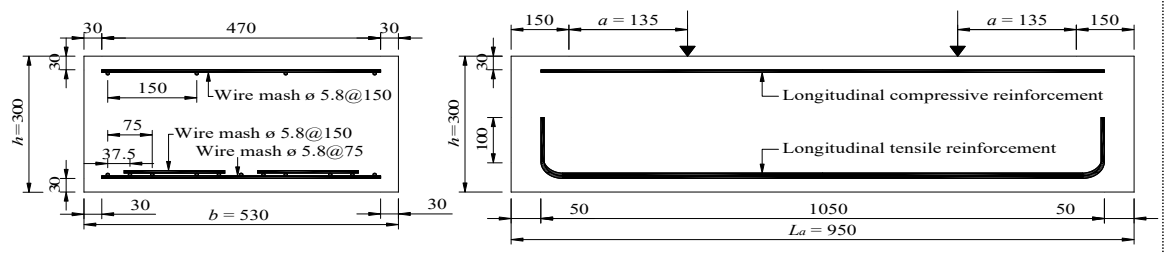
(d) 4.5-25-2.0



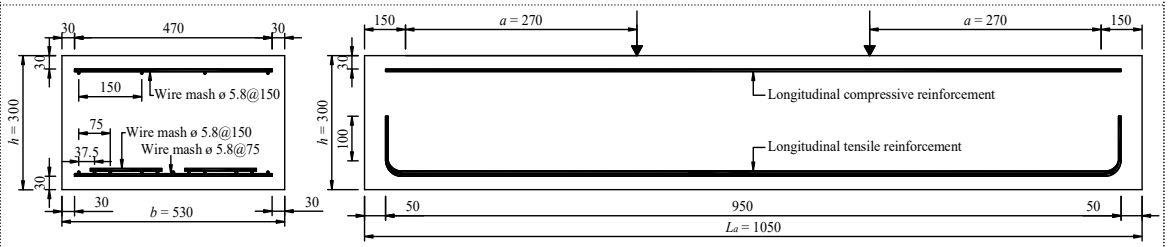
(e) 0.5-0-2.0



(f) 1.0-0-2.0



(g) 0.5-25-2.0



(h) 1.0-25-2.0

그림 1.1 단순보의 기하학적 크기 및 단면에서의 철근배근 상세

표 1.1 실험체 상세

Failure mode	Specimens	a/d	R_a (%)	f_{ck} (MPa)	A_s (mm2)	ρ_s (1)	$\rho_s/\rho_{s,\min}$
Flexure	4.5-0-1.0	4.5	0	29.5	449	0.0031	1.03
	4.5-25-1.0	4.5	25	15.0	185	0.0013	1.11
	4.5-0-2.0	4.5	0	29.5	687	0.0048	1.58
	4.5-25-2.0	4.5	25	15.0	290	0.0020	1.74
Shear	0.5-0-2.0	0.5	0	29.5	687	0.0048	1.58
	1.0-0-2.0	1.0	0	29.5	687	0.0048	1.58
	0.5-25-2.0	0.5	25	20.0	290	0.0020	1.74
	1.0-25-2.0	1.0	25	20.0	290	0.0020	1.74

1.2 재료

1.2.1 주요 결합재

- 배합에 사용된 OPC, GGBS 및 FA의 물리적 특성 및 화학적 조성비는 표 1.2와 표 1.3에 요약하였음.
- 보통 포틀랜드 시멘트의 밀도와 비표면적은 각각 3.15 g/cm^3 및 3,260 cm^2/g임. 주요 화학조성 성분은 62.4%의 CaO와 21.7%의 SiO2로서 전체 화학조성비중 80% 이상을 차지하고 있음.
- 고로슬래그 미분말의 밀도 및 비표면적은 각각 2.94 g/cm^3, 4,355 cm^2/g임. 주요 화학조성 성분은 43.9%의 CaO와 33.5%의 SiO2로서 전체 화학조성비중 70% 이상을 차지하고 있음.
- 플라이애시의 밀도와 비표면적은 각각 2.20 g/cm^3 및 4,170 cm^2/g임.
- 플라이애시의 주요 화학적 조성은 57.7%의 SiO_2와 21.1%의 $Al2O_3$로서 전체 화학조성비중 85%이상을 차지함.

1.2.2 바텀애시 경량 골재

- 사용된 바텀애시 경량 골재의 물리적 특성을 표 1.4에 나타내었음.
- 사용된 잔골재는 KS F 2527의 입도 분포를 만족시키기 위하여 2 mm 이하 및 2~4 mm의 재료를 각각 7:3 중량비율로 혼합하여 사용하였음.
- 바텀애시 경량 잔골재 및 굵은 골재의 최대 크기는 각각 4 mm, 13 mm이며, 조립률은 2.74 및 6.55임.
- 잔골재 및 굵은 골재의 흡수율은 각각 11.1% 및 15.3%이며, 기건 밀도는 각각 1.79 g/cm^3 및 1.18 g/cm^{3}임.
- 바텀애시 경량 골재의 표면 및 내부는 공극이 많이 분포하여 밀도가 0.92~1.52 g/cm^{3}으로 일반 골재 밀도의 약 42~65%의 수준임.

1.2.3 배합표 및 기포가 첨가된 바텀애시 골재 콘크리트

- 기포 혼입률에 따라 설정된 배합표는 실내배합실험의 결과를 기반으로 그룹 4로 설정하였음(표 1.5).
- 물-결합재 비는 30%이며, 단위결합재량은 400 kg/m^{3}로 설정하였음.
- 각 실험체의 압축강도는 보의 타설과 동시에 제작된 ϕ 100 × 200 mm 실린더용 몰드로부터 측정되

표 1.2 OPC의 물리적 특성 및 화학적 조성비

물리적 특성					화학 조성비 (%)						
밀도 (g/cm3)	비표면적 (cm2/g)	안정성 (%)	응결시간 (min)		SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	LOI
			초결	종결							
3.15	3,260	0.05	230	345	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8

표 1.3 GGBS 및 FA의 물리적 특성 및 화학적 조성비

물리적 특성				화학 조성비 (%)						
재료	밀도 (g/cm3)	비표면적 (cm2/g)	함수율 (%)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	LOI
GGBS	2.94	4,355	0.23	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5	3.9
FA	2.20	4,170	0.1	57.7	21.1	6.4	4.3	1.8	0.5	3.9

- 었음. 실린더용 몰드는 실험체의 양생조건과 동일하게 유지하였음.
- 구조실험 직전에 측정한 콘크리트 압축강도는 기포 혼입률 0%와 25%에서 각각 10 ~ 17 MPa 및 27 ~ 32 MPa 이었음.

1.3 실험체 가력 및 측정방법

- 모든 실험체는 2,000 kN 용량의 만능 실험기를 이용하여 중앙에서 상부 2점 가력하였음(그림 1.2).
- 지점은 한쪽 단에 힌지로 다른 한단은 롤러로 구성하였음.
- 도입된 하중은 상부 가력을 위한 만능실험기로부터 측정하였음.
- 중앙 단부의 처짐은 100 mm와 200 mm 용량의 변위계(Linear variable differential transducers, LVDT)를 이용하여 중앙과 가력지점에서 측정하였음.
- 주철근의 변형률은 최대모멘트 구간에 부착된 전기저항 변형률(Electrical resistance strain, ERS) 게이지를 이용하여 측정하였음.

표 1.4 바텀애시 경량골재 물리적 특성

골재 종류	최대 치수 (mm)	밀도 (g/cm^3)	흡수율 (%)	조립률
잔골재	4	1.79	11.1	2.74
굵은 골재	13	1.18	15.3	6.55

표 1.5 바텀애시 경량골재 콘크리트 배합상세

Group	Specimens	W/B (%)	R_a (%)	B (kg/m^3)	Proportions (kg/m^3)					
					W	OPC	GGBS	FA	Coarse aggregate	Fine aggregate
4	30-0-400	30	0	400	120	120	200	80	474	442
	30-25-400		25		120	120	200	80	303	282

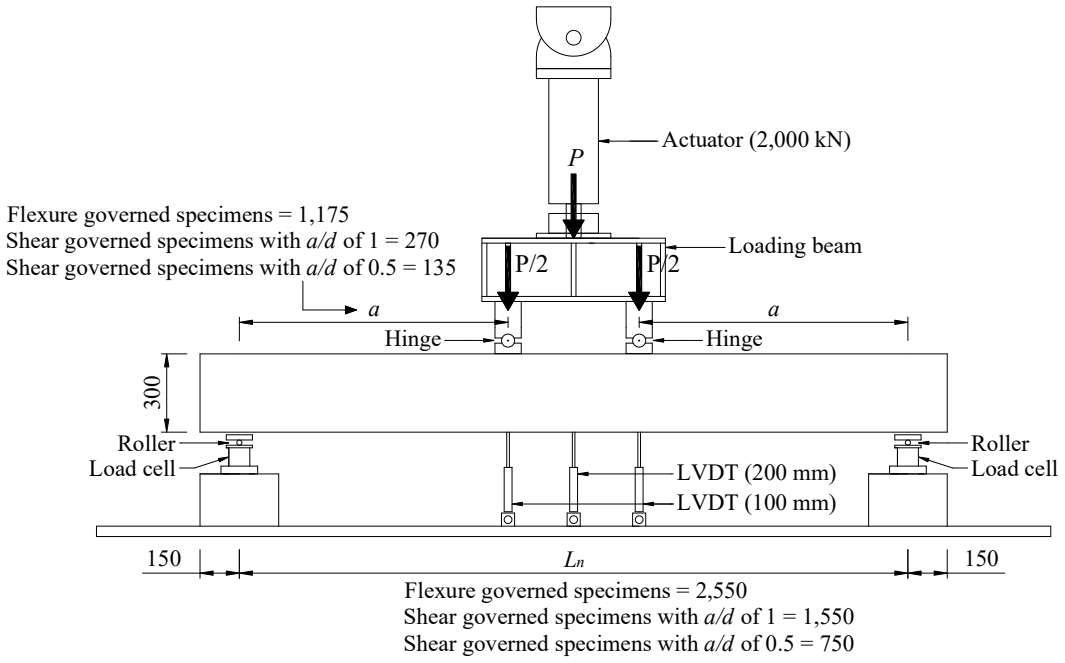


그림 1.2 실험체 셋팅상세

1.4 실험결과 및 분석

1.4.1 균열진전 및 파괴모드

- 그림 1.3에는 전형적인 실험체의 균열 진전을 나타내었음.
- 휨 거동 지배로 설계된 실험체들의 초기 휨 균열은 최대 모멘트 구간에서 발생하였으며, 하중의 증가와 함께 점차 상부 및 전단 경간으로 확장되었음. 또한 파괴모드는 각각 휨과 단전에 의해 지배되었음.
- 최소철근비의 2배로 배근된 실험체는 최소철근비로 배근된 실험체 보다 최대 휨 모멘트 구간에서 발생된 균열의 개수가 더 많았으며, 전단경간으로의 확장영역도 더 넓었고, 특히 최대내력에서의 최대 균열폭도 작았음. 이로서 최소철근비의 2배로 배근된 실험체가 최소철근비로 배근된 실험체 보다 균열분산 및 균열 폭 제어에 효과적임을 확인할 수 있었음.
- 길이방향으로 방향으로 진전된 균열의 개수는 주철근비가 클수록 많았으며, 최대내력 시점의 균열 폭은 작았음.
- 하부에서 진전된 균열은 압축 측 콘크리트로 진전되었는데, 그 진전 높이는 최소철근비로 배근된 실험체가 최소철근비의 2배로 배근된 실험체 보다 더 높았음.
- 최대내력 이후 각 균열의 폭은 급격히 증가하였으며, 이와 동시에 인장 측 용접철망의 파단이 발생하였는데, 이 용접철망의 파단은 최소철근비에 가깝게 배근된 실험체에서 더 빨랐음.
- 전단 거동 지배로 설계된 실험체들의 초기 휨 균열은 최대 모멘트 구간에서 발생하였지만 하중의 증가와 함께 가력 점과 단부지점 사이에 큰 폭의 경사 균열이 발생하였음.
- 경사 균열 면은 골재가 대부분 관통되어 파괴가 되었음.
- 위 결과에 따라 전단 지배로 설계된 실험체의 균열 진전에 대한 기포 혼입율의 영향이 미미함을 확인하였음.

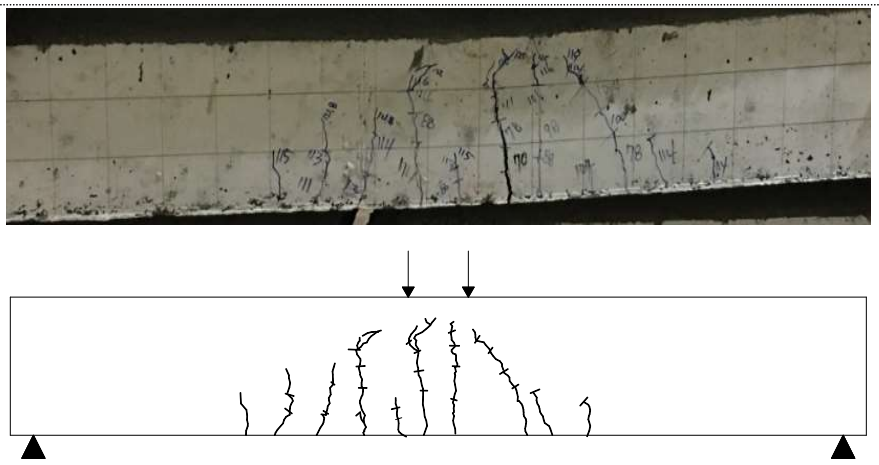
1.4.2 하중-처짐관계

- 그림 1.4에는 휨과 전단거동 지배된 실험체들의 전형적인 하중-처짐 관계를 나타내었음.
- 휨 거동으로 지배된 실험체들의 하중-처짐 관계에서 초기 휨 균열 발생 이전의 기울기는 기포 혼입률과 주철근비에 미치는 영향은 미미하였음.
- 반면 초기 휨 균열 발생시점 이후의 거동은 기포 혼입률과 주철근비에 미치는 영향이 현저하였음. 휨 균열내력(P_{cr})은 기포 혼입률이 감소할수록 주철근비가 증가할수록 현저하게 증가하였음. 또한 초기 휨 균열 발생 이후부터 주철근의 항복시점까지의 기울기도 기포 혼입율이 작거나 주철근비가 큰 실험체에서 더 높았음.
- 항복 이후 모든 실험체의 처짐은 기포 혼입률 및 주철근비에 관계없이 최대내력(P_n)에 도달 시점까지 급격하게 증가하였음. 최대내력(P_n)은 인장 측의 용접철망의 파단에 의해서 지배되었음.
- 최대내력(P_n)도 P_{cr}과 동일하게 기포 혼입률이 감소할수록 주철근비가 증가할수록 증가하였는데, 그 증가 비율이 P_y와 비슷하였음.
- 최대내력 이후의 거동은 콘크리트 압축강도 보다는 주철근비의 양에 의해 현저한 영향을 받았음. 최소철근비의 2배로 배근된 실험체들은 최대내력 이후 급격히 저하되는 반면, 최소철근비로 배근된 실험체들은 완만히 저하되었음.
- 전단으로 지배된 실험체들의 초기 휨 균열 발생 이전의 기울기도 전단경간비, 기포 혼입률과 주철근

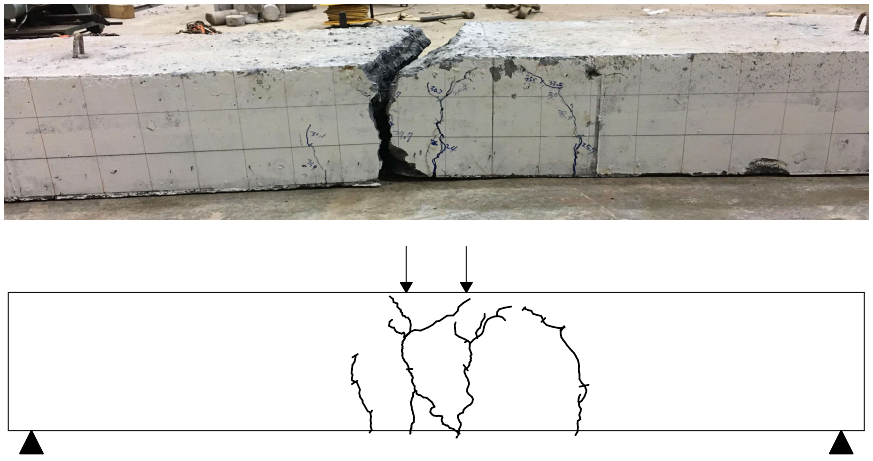
비에 미치는 영향은 미미하였음. 최대내력은 전단 경간비와 기포 혼입률에 의해 미치는 영향이 현저하였는데, 전단 경간비 및 기포 혼입률이 감소할수록 현저하게 증가하였음. 최대내력 이후의 거동은 모든 변수에 관계없이 급격히 내력이 감소하는 취성적인 거동을 보였음.

1.4.3 변위 연성비

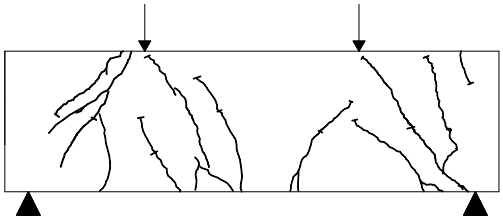
- 변위 연성비는 휨으로 지배된 실험체들만을 분석하였음.
- 보의 변위(μ_Δ)는 각각 부재파괴 시점의 변위(Δ_n)를 항복시점의 변위(Δ_y)로 나눈 값으로 평가하였음.
- 부재파괴는 인장존의 용접철망이 파단되는 시점을 최대하중으로 결정하였음. 항복시점은 주철근이 항복변형률에 도달할 때로 결정하였음.
- 실험체의 μ_Δ는 주철근비가 약 2배 증가할 때에 평균적으로 48% 감소하였음. 따라서 용접철망을 이용하여 배근된 기포가 첨가된 바텀애시 경량골재 콘크리트의 보도 용접철망 및 기포 혼입률을 조정하여 그 연성능력을 조정할 수 있음.



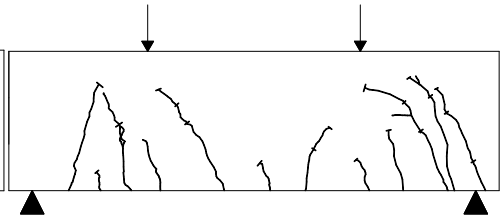
(a) 4.5-0-2.0



(b) 4.5-25-2.0

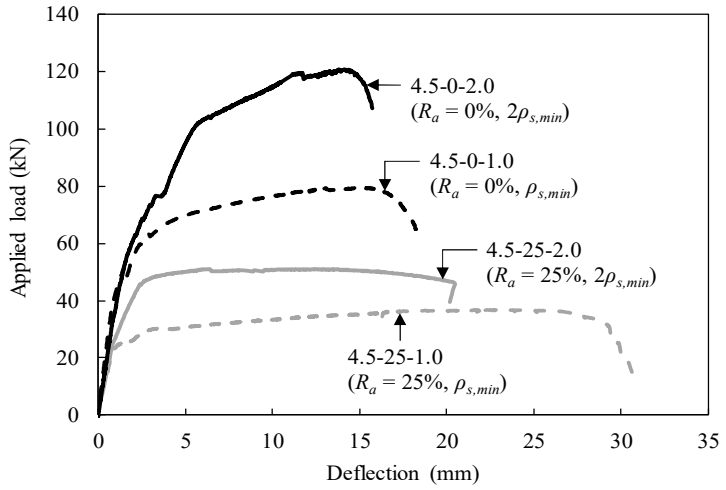


(c) 0.5-25-2.0

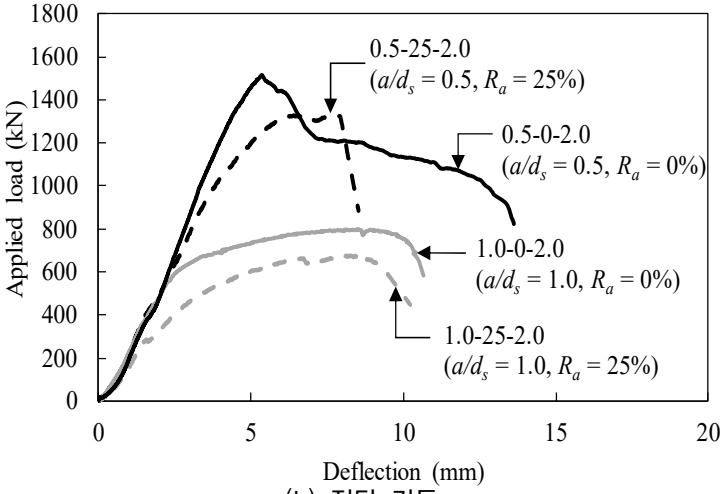


(d) 0.5-0-2.0

그림 1.3 전형적인 균열진전



(a) 휨 거동



(b) 전단 거동

그림 1.4. 하중-처짐관계

1.4.4 균열모멘트

- 표 1.6에는 실제 배근된 철근양 및 전단 경간비에 따른 실험결과와 KCI 2017의 예측값을 비교하여 나타내었음.
- KCI 2017에서 제시하고 있는 균열 모멘트(M_{cr})는 최소 주철근비로 배근된 실험체들보다 평균 높았음. 반면, 최소 주철근비의 1.57 및 1.74배로 배근된 실험체들의 M_{cr}보다 낮았음.
- 따라서 KCI 2017에서 제시하고 있는 M_{cr}은 최소 주철근비로 배근된 실험체들을 불안전 측으로 예측하였음.
- 위 결과에 따라 M_{cr}은 기포 및 바텀애시 경량 골재의 혼입에 의해 저하되는 인장특성을 반영할 필요가 있음.

1.4.5 최대내력

- KCI 2017의 최대내력 모멘트(M_n)는 다음과 같이 제시하고 있음.

$$M_n = A_s f_y\left(d_s - \frac{\alpha}{2}\right) - A_s^{'} f_y^{'}\left(d^{'} - \frac{\alpha}{2}\right) \tag{1.1}$$

$$\alpha = \beta_1 c_u = \frac{A_s f_y - A_s^{'} f_y^{'}}{0.85 f_{ck} b_w} \tag{1.2}$$

- 여기서, A_s 및 $A_s^{'}$은 각각 주철근 및 압축철근의 단면적을, $f_y^{'}$은 압축철근의 항복강도를, $d^{'}$는 압축철근의 깊이를, α는 등가응력블록 깊이를, β_1는 등가응력블록 계수를, c_u는 극한상태에서의 중립축 깊이를 의미함.
- 위 식에 따라 KCI 2017은 휨 지배로 설계된 실험체들의 M_n을 기포 혼입률과 주철근비에 관계없이 안전 측으로 예측하였음.
- 또한, KCI 2017의 콘크리트 분담내력(V_c)은 보의 실험결과에 기반하여 경험적으로 다음과 같이 제시하였음.

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\, b_w d_s \tag{1.3}$$

- 위 식에 따라 KCI 2017은 전단 지배로 설계된 실험체들의 V_c을 기포 혼입률과 주철근비에 관계없이 안전 측으로 예측하였음.
- 위 결과들은 KCI 2017을 이용하여 바텀애시 골재 기반 고단열·지속 가능 경량 콘크리트 판넬의 안전적인 휨 및 전단 설계가 가능함을 의미함.

표 1.6 실험결과

Specimens	Experimental results										Predictions by KCI 2017			Comparison		
	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_n (kN)	Δ_y (mm)	Δ_n (mm)	μ_Δ	M_{cr} (kN · m) (2)	M_n (kN · m) (3)	V_{cr} (kN)	V_n (kN) (1)	M_{cr} (kN · m) (4)	M_n (kN · m) (5)	V_c (kN) (6)	(2)/(4)	(3)/(5)	(1)/(6)
4.4-0-1.03 (4.5-0-1.0)	43	66.8	79.5	3.85	14.91	3.87	25.3	46.71			36.49	46.08		0.83	1.01	
4.4-0-1.57 (4.5-0-2.0)	57	102.9	120.5	5.96	13.76	2.31	33.5	70.82			36.49	69.55		1.10	1.02	
4.4-25-1.11 (4.5-25-1.0)	17	31.19	36.8	3.82	22.69	5.94	10.0	21.64			12.58	19.07		0.95	1.14	
4.4-25-1.74 (4.5-25-2.0)	21	47.98	51.0	3.42	12.52	3.66	12.3	29.94			12.58	29.62		1.18	1.01	
1.0-0-1.57 (1.0-0-2.0)	464		798.1				31.3		310	399.1			129.54			3.08
1.0-25-1.74 (1.0-25-2.0)	292		677.5				9.9		255	338.8			92.37			3.67

1.4.6 내력등급

- 표 1.7에는 KS F 4736에서 제시하고 있는 내력에 따른 경량 콘크리트 판넬의 등급을 나타내었음.
- KS F 4736은 탄성 상태에서 저항하는 내력에 따른 내하중 등급을 구분하고 있는데, 3.4 KPa 이상인 판넬을 1등급으로 평가하고 있음.
- KS F 4736에서 제시하고 있는 등급과 휨 지배로 설계된 실험체들의 M_{cr}과 비교 시 모두 내하중 1등급을 만족하였음.
- 위 결과에 따라 구조적 안전성을 충분히 확보한 것으로 확인하였음. 하지만, 기포 혼입률이 15%를 초과하거나 15 MPa 보다 낮은 f_{ck}를 갖는 실험체들은 추가적인 구조실험을 수행하여 내하중 등급을 재평가가 필요할 것으로 판단됨.

표 1.7 KS F 4736에 따른 내력등급

등급	1	2	3	4	5
Ranges of loads (KPa)	≥3.4	2.8~3.4	2.2~2.8	1.7~2.2	〈1.7

2. 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 심재의 지압성능 평가

2.1 유한요소해석

2.1.1 구조체 형상 및 변수

- 그림 2.1에는 유한요소해석을 위한 구조체 형상을 나타내었음.
- 구조체는 가로 및 세로의 길이가 모두 200 mm이며 양면에 두께 0.8 mm인 라미네이트와 두께 70 mm의 페이퍼 허니콤 보드지로 구성하였음.
- 변수는 페이퍼 허니콤 보드지 쉘의 두께 a(3~10 mm) 및 쉘의 크기 b(30~150 mm)임.(표 2.1).

2.1.2 해석방법

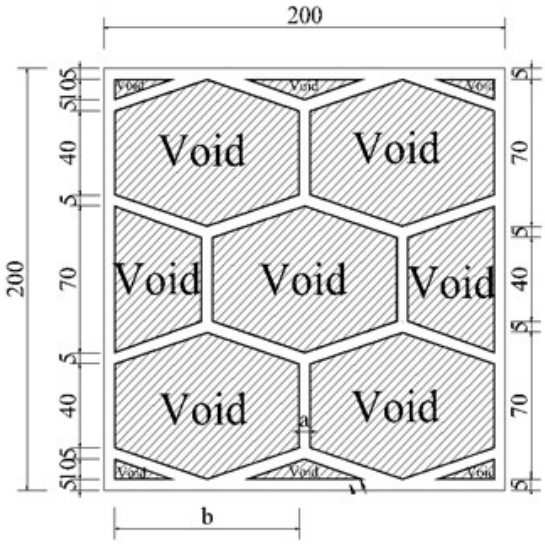
- 유한요소해석은 범용해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 구조체의 평형, 적합 그리고 구성방정식을 연립하여 비교적 정확한 해를 찾는 implicit(내연적)방법을 사용하였음.
- 구조체는 두 부재가 강력한 접착제에 의해 완전히 부착되어 일체 거동을 한다고 가정하였으며 두 부재를 서로 Mering 방법으로 연결하여 하나의 부재로 형성하였음.
- 구조해석은 지압을 가정한 하중을 적용하였으며 경계조건을 부여한 후 하중 제어법으로 구조체에 변수를 변화시켜가며 수치 해석하였음.
- 이 때 수치해석은 내연적 방법인 implicit해석을 수행하였으며 뉴턴-랩슨법을 사용하여 하중 크기 0.1부터 증분하며 수치 해를 찾아가도록 설정하였음.
- 작용 하중 P는 콘크리트 표준시방서 기준에 따라 최대 0.00319 MPa로 설정하였음.
- 최종적으로 측정 소요는 작용 하중에 대한 구조체의 수직 처짐과 응력임.

2.1.3 요소의 적용

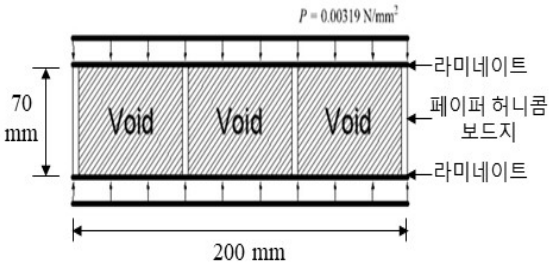
- 라미네이트 및 페이퍼 허니콤 보드지는 전체 구조체의 크기 대비 그 두께가 0.8 mm로 얇은 관계로 절점에서 6자유도를 가지는 쉘요소(Shell element) 사용하였으며 쉘요소 중에서도 굽힘을 보다 정밀하게 수치해석 가능한 4각형 8절점 요소인 S8R요소를 그림 2.2와 같이 적용하였음.

2.1.4 해석결과

- 구조체의 해석결과는 표 2.2에 나타내었음.
- 구조체들은 페이퍼 허니콤 보드지의 두께가 3 mm이면서 쉘의 크기가 70 mm 이상일 때 작용 하중이 도달하기 전에 좌굴에 의해 붕괴되었음. 또한, 두께 4.5 mm인 구조체들은 쉘의 크기가 110 mm 이상일 때 붕괴되었음.
- 두께가 6mm 이상인 구조체들은 쉘의 크기와 관계없이 모두 작용 하중 까지 붕괴되지 않았음. 또한, 두께에 관계없이 쉘의 크기가 50 mm 이하인 구조체들도 붕괴되지 않았음.
- 이에 따라 구조체는 페이퍼 허니콤 보드지 두께가 5 mm 이상이면서 쉘의 크기가 50 mm 이하 일 때 구조적 안전성을 확보한 것으로 판단할 수 있음.
- 하지만 이 연구에서는 페이퍼 허니콤 보드지와 라미네이트의 부착을 완전 부착으로 가정하여 해석하였기 때문에 실제 실험을 통해 접촉부에서의 파괴여부를 검토해야 할 것으로 판단됨.



(a) 평면



(b) 단면

그림 2.1 구조체 형상

표 2.1 간격 및 두께 매개변수

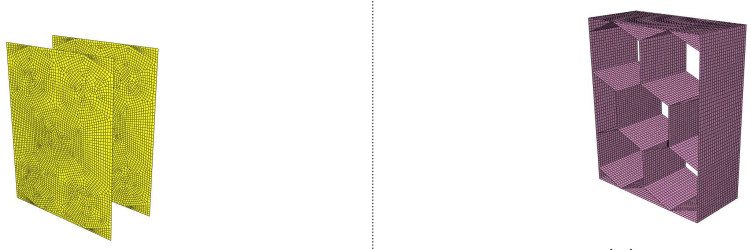
해석 case	샐의 크기 (mm)	코어 두께 (mm)	해석 case	샐의 크기 (mm)	코어 두께 (mm)
a30-b3_0	30	3.0	a110-b3_0	110	3.0
a30-b4_5	30	4.5	a110-b4_5	110	4.5
a30-b6_0	30	6.0	a110-b6_0	110	6.0
a30-b7_5	30	7.5	a110-b7_5	110	7.5
a30-b9_0	30	9.0	a110-b9_0	110	9.0
30-b10_0	30	10.0	a110-b10_0	110	10.0
a50-b3_0	50	3.0	a130-b3_0	130	3.0
a50-b4_5	50	4.5	a130-b4_5	130	4.5
a50-b6_0	50	6.0	a130-b6_0	130	6.0
a50-b7_5	50	7.5	a130-b7_5	130	7.5
a50-b9_0	50	9.0	a130-b9_0	130	9.0
a50-b10_0	50	10.0	a130-b10_0	130	10.0
a70-b3_0	70	3.0	a150-b3_0	150	3.0
a70-b4_5	70	4.5	a150-b4_5	150	4.5
a70-b6_0	70	6.0	a150-b6_0	150	6.0
a70-b7_5	70	7.5	a150-b7_5	150	7.5
a70-b9_0	70	9.0	a150-b9_0	150	9.0
a70-b10_0	70	10.0	a150-b10_0	150	10.0
a90-b3_0	90	3.0	a90-b7_5	90	7.5
a90-b4_5	90	4.5	a90-b9_0	90	9.0
a90-b6_0	90	6.0	a90-b10_0	90	10.0

표 2.2 열메타 구조체의 해석결과

Case	라미네이트 처짐 (mm)		라미네이트 응력 (MPa)		페이퍼 허니콤 보드지 외측 응력 (MPa)		HPL 내측 응력 (MPa)	
	좌측	우측	최소	최대	최소	최대	최소	최대
a30-b3.0	0.19	0.18	-1.66	1.68	-5.43E-03	1.57E-03	-9.09E-03	-1.19E-03
a30-b4.5	0.15	0.14	-1.31	1.32	-4.67E-03	1.24E-03	-7.06E-03	-6.80E-04
a30-b6.0	0.12	0.11	-0.97	0.98	-4.17E-03	9.90E-04	-5.81E-03	-3.86E-03
a30-b7.5	0.11	0.1	-0.97	0.98	-3.82E-03	8.10E-04	-4.95E-03	3.70E-04
a30-b9.0	0.09	0.09	-0.87	0.86	-3.55E-03	6.70E-04	-4.32E-03	3.30E-04
a30-b10.0	0.08	0.08	-0.82	0.83	-5.43E-03	1.57E-03	-3.99E-03	3.10E-04
a50-b3.0	0.34	0.36	-1.97	2.04	-7.38E-03	1.99E-03	-1.54E-02	1.62E-03
a50-b4.5	0.24	0.25	-1.74	1.8	-6.62E-03	1.49E-03	-1.11E-02	1.10E-03
a50-b6.0	0.2	0.21	-1.62	1.67	-6.45E-03	1.16E-03	-8.80E-03	9.10E-04
a50-b7.5	0.18	0.19	-1.53	1.58	-5.79E-03	9.60E-04	-7.31E-03	8.60E-04
a50-b9.0	0.16	0.17	-1.48	1.51	-5.50E-03	8.30E-04	-6.62E-03	8.80E-04
a50-b10.0	0.15	0.16	-1.54	1.55	-5.32E-03	7.30E-04	-5.71E-03	9.50E-04
a70-b3.0	1.07	1.16	-5.55	6.28	-1.97E-02	6.82E-03	-6.27E-02	2.53E-02
a70-b4.5	0.8	0.86	-5.03	5.86	-1.86E-02	5.66E-03	-3.32E-02	3.28E-03
a70-b6.0	0.67	0.75	-5.19	5.66	-1.78E-02	4.93E-03	-2.63E-02	3.20E-03
a70-b7.5	0.62	0.68	-5.23	5.42	-1.71E-02	4.32E-03	-2.18E-02	3.33E-03
a70-b9.0	0.57	0.63	-5.32	5.35	-1.64E-02	3.87E-03	-1.90E-02	4.15E-03
a70-b10.0	0.54	0.59	-5.37	5.35	-1.59E-02	3.62E-03	-1.79E-02	4.50E-03
a90-b3.0	1.91	1.96	-6.94	7.73	-1.93E-02	8.81E-03	-1.25E-01	6.91E-02
a90-b4.5	1.22	1.25	-5.95	7.24	-1.56E-02	5.04E-03	-3.83E-02	6.29E-03
a90-b6.0	1.06	1.1	-6.04	6.99	-1.51E-02	3.75E-03	-3.02E-02	4.55E-03
a90-b7.5	0.96	0.99	-6.13	6.79	-1.46E-02	3.44E-03	-2.52E-02	4.24E-03
a90-b9.0	0.89	0.92	-6.18	6.64	-1.41E-02	3.70E-03	-2.16E-02	4.11E-03
a90-b10.0	0.84	0.88	-6.2	6.54	-1.37E-02	3.66E-03	-1.98E-02	4.05E-03
a110-b3.0	2.66	2.77	-7.94	8.59	-2.38E-02	1.58E-02	-1.46E-01	1.45E-01
a110-b4.5	1.39	1.43	-6.75	7.99	-1.59E-02	6.24E-03	-5.08E-02	7.65E-03
a110-b6.0	1.22	1.26	-6.88	7.77	-1.52E-02	4.41E-03	-3.32E-02	5.39E-03
a110-b7.5	1.11	1.15	-6.98	7.57	-1.47E-02	4.83E-03	-2.77E-02	4.98E-03
a110-b9.0	1.03	1.07	-7.03	7.39	-1.41E-02	5.05E-03	-2.39E-02	4.83E-03
a110-b10.0	0.98	1.02	-7.05	7.29	-1.37E-02	4.98E-03	-2.19E-02	4.77E-03
a130-b3.0	3.14	3.2	-9.04	9.18	-3.18E-02	2.32E-02	-1.82E-01	1.12E-01
a130-b4.5	1.61	1.66	-7.57	8.65	-1.75E-02	7.82E-03	-9.17E-02	4.60E-02
a130-b6.0	1.35	1.39	-7.56	8.43	-1.48E-02	4.99E-03	-3.54E-02	5.81E-03
a130-b7.5	1.23	1.27	-7.67	8.22	-1.42E-02	4.85E-03	-2.95E-02	5.27E-03
a130-b9.0	1.14	1.18	-7.72	8.01	-1.36E-02	5.02E-03	-2.54E-02	5.18E-03
a130-b10.0	1.09	1.13	-7.73	7.82	-1.32E-02	4.95E-03	-2.35E-02	5.15E-03
a150-b3.0	5.63	5.63	-11.63	18.81	-5.40E-02	3.32E-02	-2.88E-01	2.56E-01
a150-b4.5	2.02	2.05	-8.46	9.35	-2.06E-02	1.30E-02	-1.11E-01	6.74E-02
a150-b6.0	1.45	1.48	-8.15	9	-1.44E-02	5.45E-03	-3.73E-02	6.15E-03
a150-b7.5	1.33	1.35	-8.24	8.76	-1.35E-02	5.56E-03	-3.11E-02	5.52E-03
a150-b9.0	1.23	1.26	-8.28	8.53	-1.30E-02	5.68E-03	-2.68E-02	4.83E-03
a150-b10.0	1.17	1.20	-8.29	8.36	-1.26E-02	5.57E-03	-2.19E-02	4.77E-03

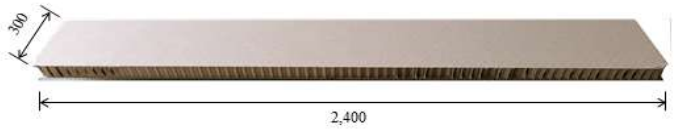
2.1.5 실험체 상세

- 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 심재의 지압성능을 평가하기 위해 3개의 실험체가 준비되었음(그림 2.3). 지압성능 평가에서 주요변수는 페이퍼 허니콤 코어를 중심으로 양면의 라미네이트 부착 여부로서 라미네이트를 부착하지 않는 컨트롤 실험체와 단면 및 양면을 각각 부착한 실험체를 제작하였음.
- 실험체의 폭은 모두 300 mm이었음. 페이퍼 허니콤 보드지의 두께는 70 mm임. 라미네이트의 두께는 1 mm로서 단면 및 양면에 부착된 실험체의 두께는 각각 71 mm 및 72 mm이었음. 또한 양 단순 지점까지의 총 길이는 2,200 mm임. 한쪽 단부 지점에서 상부 하중점인 전단경간의 길이는 465 mm이며 상부하중의 가력점은 5개로서 각 가력점간의 간격을 317.5 mm로 설정하였음.



(a) 라미네이트 (b) 페이퍼 허니콤 보드지

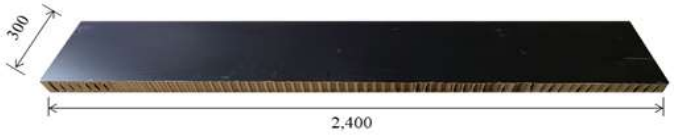
그림 2.2 구조체의 요소분할



입체

단면

(a) 라미네이트 미부착



입체

단면

(b) 단면 라미네이트 부착

입체

단면

(c) 양면 라미네이트 부착

그림 2.3 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 심재

2.2 재료

- 사용된 페이퍼 허니콤 보드지 및 라미네이트의 물리적 특성을 표 2.3에 나타내었음.
- 그림 7.4에 나타낸 바와 같이 페이퍼 허니콤 보드지는 종이를 소재로 한 내장 심재이며, 심재 내부에 벌집 모양의 구조체로 형성되어 있음. 이러한 구조체의 형성은 97%의 공기층을 구성할 수 있도록 하여 기존 단열재 대비 단열 성능 및 흡음성을 향상시킬 수 있음.
- 사용된 페이퍼 허니콤 보드지의 밀도 및 비열은 각각 0.18 g/cm^3 및 1.22 J/g · K 이며 열전도율은 0.1 W/m · K임.
- 라미네이트는 내열 합성수지를 고온 · 고압에서 함침시킨 겹층으로 구성된 소재로서 내충격성과 내마모성이 단열소재 대비 우수함. 사용된 라미네이트의 밀도 및 비열은 각각 0.9~1.0 g/cm^3 및 1.44 J/g · K 이며 열전도율은 0.3 W/m · K임.

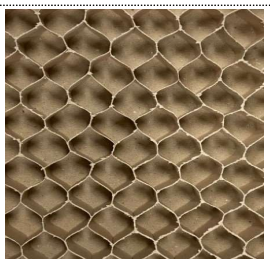
2.3 실험결과 및 분석

2.3.1 하중-처짐관계

- 그림 2.5에 나타낸 바와 같이 실험체들의 하중-처짐 관계에서 상승구간의 기울기는 라미네이트의 부착개수가 증가함에 따라 급격히 증가하였음. 반면, 최대 내력 이후의 하강구간의 기울기는 라미네이트의 부착개수가 증가함에 따라 더 취성적인 경향을 보였음.

표 2.3 페이퍼 허니콤 코어 및 라미네이트의 물리적 특성

종류	두께 (mm)	열전도율 (W/m · K)	비열 (J/g · K)	밀도 (g/cm^3)
페이퍼 허니콤 코어	70	0.1	1.22	0.18
라미네이트	1	0.3	1.44	0.9~1.0



(a) 페이퍼 허니콤 코어내부

(b) 페이퍼 허니콤 코어외부

그림 2.4 페이퍼 허니콤 코어

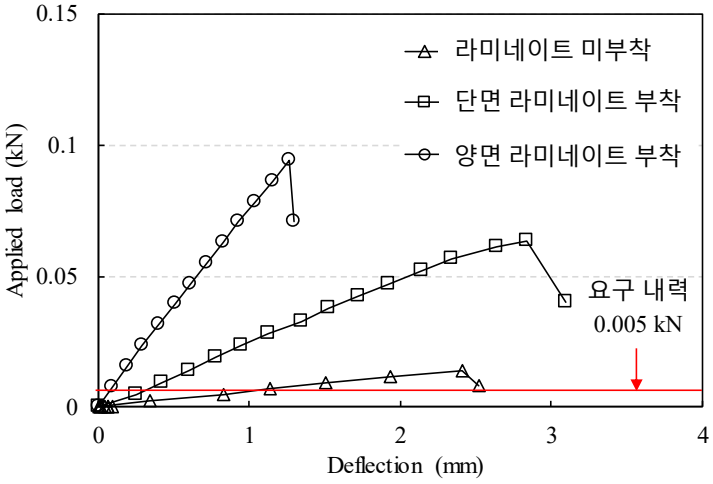


그림 2.5 하중-처짐 관계

2.3.2 최대 내력

- 그림 2.5에는 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 콘크리트 측압에 대한 예측 값도 나타내었음.
- 표 2.4에는 라미네이트 부착여부에 따른 열메타 심재의 지압력과 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 콘크리트 측압에 의해 환산된 소요 지압력과 비교하였음.
- 콘크리트 표준시방서의 콘크리트 측압(T)은 다음과 같이 제시하고 있음.

$$T = WH \tag{7.1}$$

- 여기서, W 및 H는 각각 굳지 않은 콘크리트의 단위 중량 및 콘크리트의 타설 높이를 의미함.
- 식 (7.1)에 의해 환산된 소요 지압력은 열메타 심재의 지압력 보다 현저하게 낮았음.
- 실험체들은 최대 내력 시까지 처짐이 급격히 발생하였지만, 최대내력 시점까지 상부하중 가력점에서의 지압에 의한 파괴는 발생하지 않았음.
- 최대 내력시의 파괴양상은 그림 2.6에 나타내었음.

표 2.4 실험결과

타입	요구 응력 (MPa) [1]	최대 응력 (MPa) [2]	[1]/[2]	최대 내력 (kN)	최내 내력시 처짐량 (mm)
라미네이트 미부착	0.00319	0.011	3.4	0.016	2.4
단면 라미네이트 부착		0.042	13.2	0.063	2.84
양면 라미네이트 부착		0.063	19.7	0.094	1.36

(a) 라미네이트 미부착

(b) 양면 라미네이트 부착

그림 2.6 파괴양상

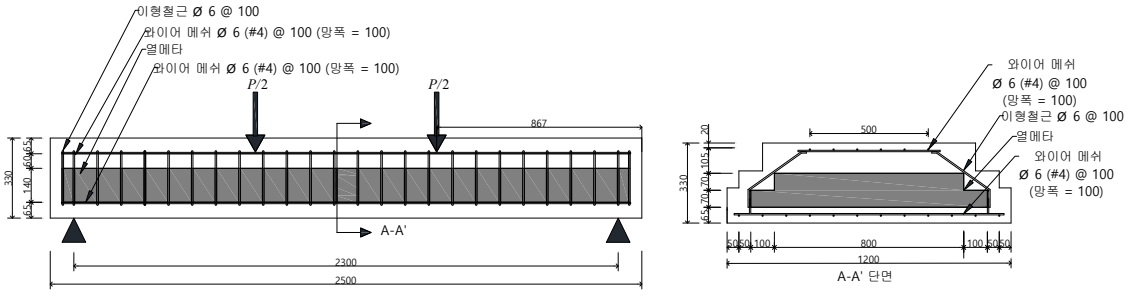
3. 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 휨 및 전단거동 평가

3.1 실험체 상세

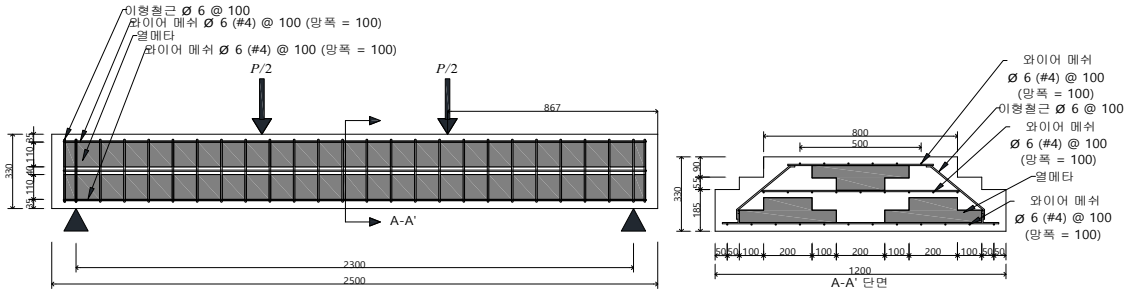
- 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 휨 및 전단거동 평가하기 위해서 7개의 단순보의 실험체가 준비되었음(그림 3.1 및 표 3.1).
- 휨 거동 평가에서의 주요변수는 전단경간비 및 전단철근의 배근량임.
- 전단경간비는 1.17과 2.56로 변화하였으며 전단철근의 배근량은 0, 0,25, 0.5 및 1.0으로 변화하였음.
- 전단 거동 평가에서의 주요변수는 열메타 심재의 형상 및 가로철근의 개수임.
- 열메타 심재의 형상은 온통형 및 T형으로 변화하였으며 가로 철근의 개수는 2개 및 3개로 변화하였음.
- 실험체 명에서 첫 번째 숫자는 용접 철망의 간격을, 두 번째 숫자는 전단경간비를, 세 번째 숫자는 전단철근의 배근양의 비를 의미함. 예를 들어 100-1.17-0.5는 용접철망의 간격이 100 mm, 전단경간비가 1.17 및 전단철근의 배근양의 0.5배 배근된 실험체를 의미함.
- 모든 실험체의 폭은 1,200 mm이며, 높이는 330 mm임. 또한 양 단순 지점까지의 총길이는 2,200 mm임.
- 한쪽 단부 지점에서 상부 하중점인 전단경간의 길이는 전단경간비에 따라 1.17 및 2.56에서 각각 350 및 767 mm임.
- 주철근 및 압축철근은 직경이 5.8 mm 이면서 100 mm 간격으로 격자 형태를 갖는 용접 철망을 이용하여 배근하였음.
- 또한, 전단철근은 직경 6 mm의 원형철근을 이용하였음.
- 띠철근은 모든 실험체에서 배근되지 않았음.

표 3.1 실험체 상세

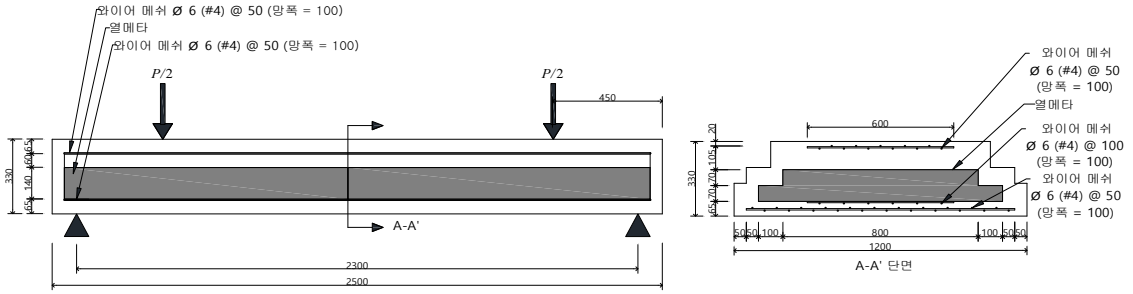
No.	Specimens	Target behavior	Main parameters				Longitudinal reinforcement			
			f_{ck} (MPa)	Type of mesh (mm)	Shape of thermal-meta	a/d	Arrangement	ρ_s (1)	$\rho_{s\cdot min}$ (ACI) (2)	(1)/(2)
1	100_온통형_2	Flexure	17.7	100×100	온통형	2.56	12-Ø5.8	0.0015	0.0036	0.43
2	15_100_T형_3		12.2	100×100	T형		12-Ø5.8	0.0014	0.0036	0.39
3	15_50_1.17_Av*0	Shear	12.1	50×0	온통형	1.17	28-Ø5.8	0.0036	0.0036	1.00
4	15_50_2.56_Av*0		17.7	50×0	온통형	2.56	28-Ø5.8	0.0036	0.0036	1.00
5	15_50_2.56__Av*0.25		11.3	50×340	온통형		28-Ø5.8	0.0036	0.0036	1.00
6	15_50_2.56__Av*0.5		12.2	50×170	온통형		28-Ø5.8	0.0036	0.0036	1.00
7	15_50_2.56__Av*1.0		12.8	50×85	온통형		28-Ø5.8	0.0036	0.0036	1.00



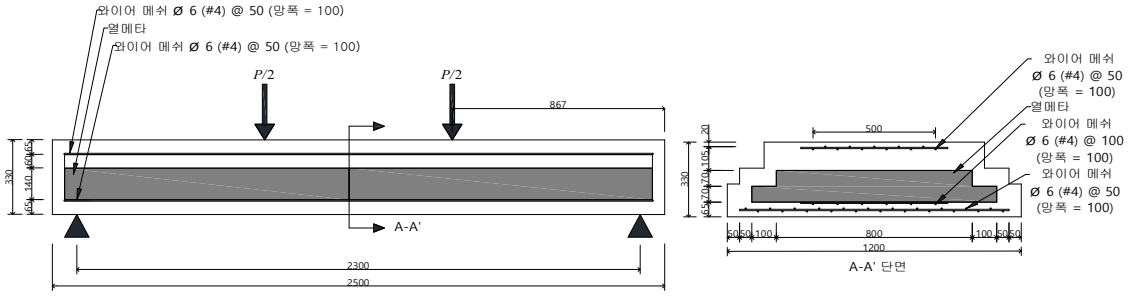
(a) 100_온통형_2



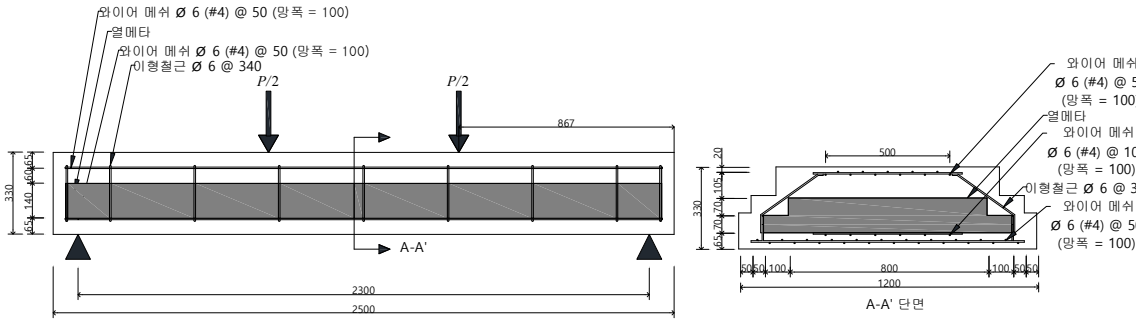
(b) 100_T형_3



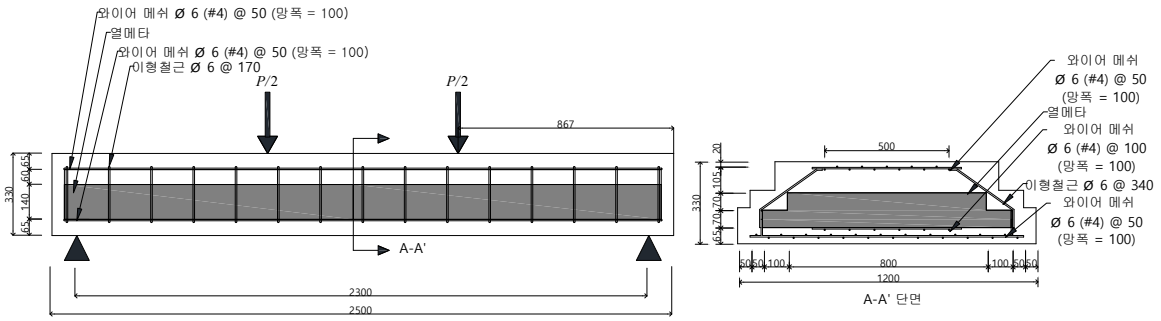
(c) 50_1.17_A_v*0



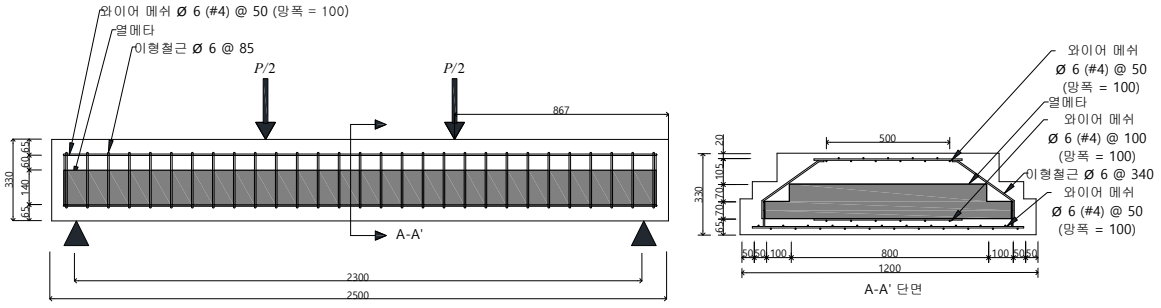
(d) 50_2.56_A_v*0



(e) 50_2.56_A_v*0.25



(e) _50_2.56_A_v*0.5



(f) 50_2.56_A_v*1.0

그림 3.1 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 휨 및 전단 실험체 상세

표 3.2 OPC의 물리적 특성 및 화학적 조성비

물리적 특성					화학 조성비 (%)						
밀도 (g/cm^3)	비표면적 (cm^2/g)	안정성 (%)	응결시간 (min)		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
			초결	종결							
3.15	3,260	0.05	230	345	21.7	5.3	3.1	62.4	1.6	1.7	0.8

표 3.3 GGBS 및 FA의 물리적 특성 및 화학적 조성비

물리적 특성				화학 조성비 (%)						
재료	밀도 (g/cm^3)	비표면적 (cm^2/g)	함수율 (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
GGBS	2.94	4,355	0.23	33.5	15.2	0.5	43.9	2.6	2.5	3.9
FA	2.20	4,170	0.1	57.7	21.1	6.4	4.3	1.8	0.5	3.9

3.2 재료

3.2.1 주요 결합재

- 배합에 사용된 OPC, GGBS 및 FA의 물리적 특성 및 화학적 조성비는 표 3.2와 표 3.3에 요약하였음.
- 보통 포틀랜드 시멘트의 밀도와 비표면적은 각각 3.15 g/cm^3 및 3,260 cm^2/g임. 주요 화학조성 성분은 62.4%의 CaO와 21.7%의 SiO_2로서 전체 화학조성비중 80% 이상을 차지하고 있음.
- 고로슬래그 미분말의 밀도 및 비표면적은 각각 2.94 g/cm^3, 4,355 cm^2/g임. 주요 화학조성 성분은 43.9%의 CaO와 33.5%의 SiO_2로서 전체 화학조성비중 70% 이상을 차지하고 있음.
- 플라이애시의 밀도와 비표면적은 각각 2.20 g/cm^3 및 4,170 cm^2/g임.
- 플라이애시의 주요 화학적 조성은 57.7%의 SiO_2와 21.1%의 Al2O3로서 전체 화학 조성비 중 85%이상을 차지함.

3.2.2 바텀애시 경량골재

- 사용된 바텀애시 경량 골재의 물리적 특성을 표 3.4에 나타내었음. 사용된 잔골재는 KS F 2527의 입도분포를 만족시키기 위하여 2 mm 이하 및 2~4 mm의 재료를 각각 7:3 중량 비율로 혼합하여 사용하였음.
- 바텀애시 경량 잔골재 및 굵은 골재의 최대 크기는 각각 4 mm, 13 mm이며, 조립률은 2.74 및 6.55임. 잔골재 및 굵은 골재의 흡수율은 각각 11.1% 및 15.3%이며, 기건 밀도는 각각 1.79 g/cm^3 및 1.18 g/cm^{3}임.
- 바텀애시 경량 골재의 표면 및 내부는 공극이 많이 분포하여 밀도가 0.92~1.52 g/cm^{3}으로 일반 골재 밀도의 약 42~65%의 수준임.

3.2.3 배합표 및 EPS와 바텀애시 골재 기반 고단열·지속 가능 경량콘크리트

- EPS 혼입률에 따라 설정된 배합표는 실내 배합 실험의 결과를 기반으로 시리즈 2의 EPS 혼입률 15%로 설정하였음(표 3.5).
- 물-결합재 비는 30%이며, 단위결합재량은 450 kg/m^{3}로 설정하였음. 각 실험체의 압축강도는 보의 타설과 동시에 제작된 ϕ 100 × 200 mm 실린더용 몰드로부터 측정되었음. 실린더용 몰드는 실험체의 양생조건과 동일하게 유지하였음.
- 구조실험 직전에 측정한 콘크리트 압축강도는 11.3 ~ 17.7 MPa 이었음.

3.2.4 열메타 심재

- 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 심재의 지압성능 평가에 따라 온통형 심재의 두께는 70 mm로 설정하였음.
- T형 심재는 분리된 심재의 영향을 평가하기 위하여 추가하였으며 두께는 55 mm로 설정하였음.
- PC 판넬 심재의 내부는 충진재 실험 결과에 따라 공기층으로 구성하였음. 공기층으로 구성된 심재의 열전도율은 0.5 W/m·K로 시중에서 사용되고 있는 단열재에 준하는 수준임. 또한, 심재는 단열 성능을 위한 두께를 확보하기 위하여 두 개를 부착하였음.

표 3.4 바텀애시 경량골재 물리적 특성

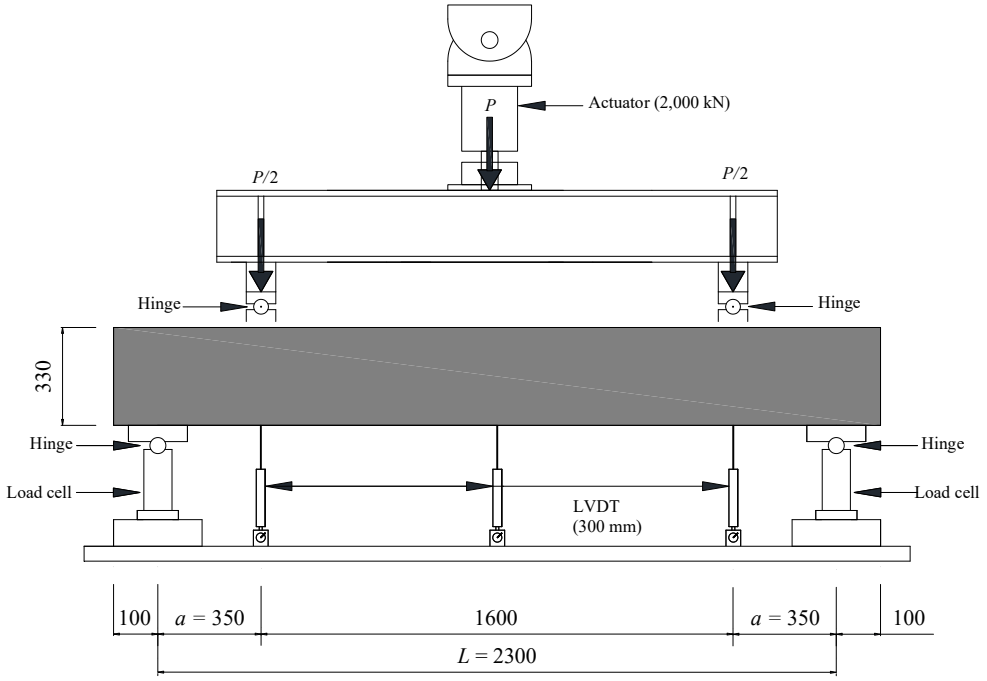
골재 종류	최대 치수 (mm)	밀도 (g/cm^3)	흡수율 (%)	조립률
잔골재	4	1.79	11.1	2.74
굵은 골재	13	1.18	15.3	6.55

표 3.5 바텀애시 골재기반 고단열·지속가능 경량 콘크리트 배합상세

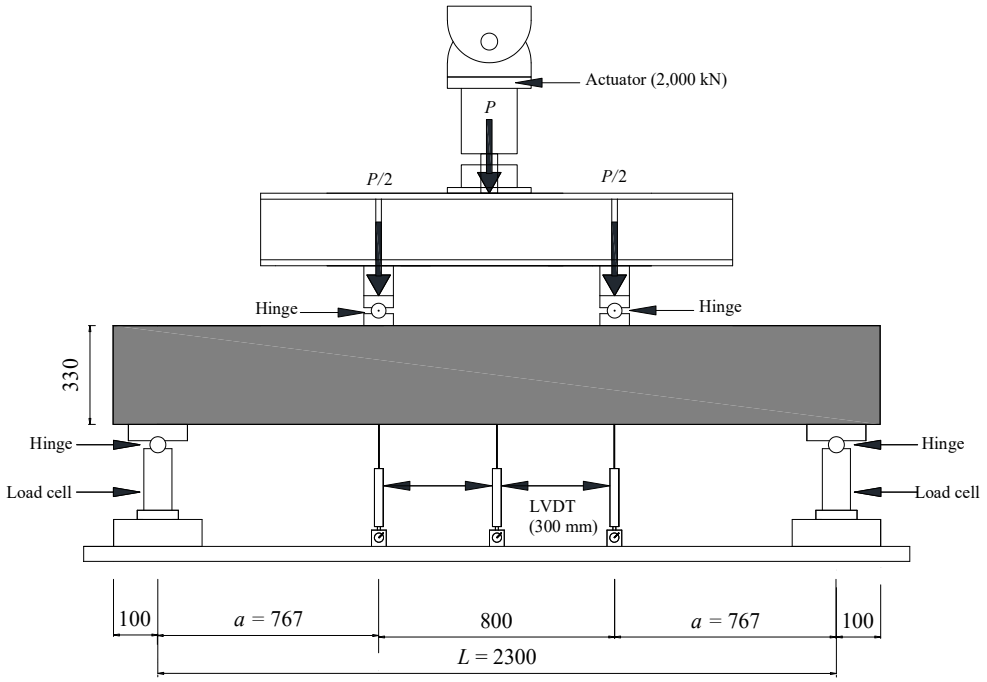
Specimens	W/B (%)	E_a (%)	B (kg/m3)	Proportions (kg/m3)							
				W	OPC	GGBS	FA	Coarse aggregate	Fine aggregate	Polymer	PVA Fiber
450-15-II	30	15	450	135	135	225	90	355	390	35	0.975

3.3 실험체 가력 및 측정방법

- 모든 실험체는 2,000 kN 용량의 만능 실험기를 이용하여 중앙에서 상부 2점 가력하였음(그림 3.2).
- 지점은 한쪽 단에 힌지로 다른 한단은 롤러로 구성하였음. 도입된 하중은 상부 가력을 위한 만능 실험기로부터 측정하였음. 중앙 단부의 처짐은 300 mm 용량의 변위계(Linear variable differential transducers, LVDT) 3개를 이용하여 중앙과 가력 지점에서 측정하였음.
- 주철근의 변형률은 최대모멘트 구간에 부착된 전기저항 변형률(Electrical resistance strain, ERS) 게이지를 이용하여 측정하였음.



(a) a/d= 1.17



(b) a/d= 2.56

그림 3.2 실험체 셋팅상세

3.4 실험결과 및 분석

3.4.1 균열진전 및 파괴모드

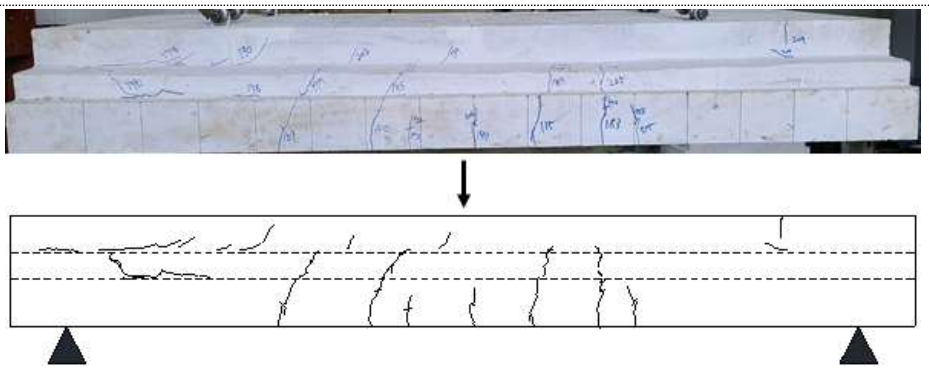
- 그림 3.3에는 전형적인 실험체의 균열 진전을 나타내었음.
- 휨 거동 지배로 설계된 실험체들의 초기 휨 균열은 최대 모멘트 구간에서 발생하였음. 이후 하중이 증가함에 따라 휨 균열들은 점차 상부의 압축 영역으로 진전되었으며 보 양단의 반력 지점 방향으로 휨 균열들이 추가로 발생하였음.
- 보 길이 방향으로 발생된 휨 균열의 개수는 T형의 심재로 삽입된 실험체에서 원통형의 심재로 삽입된 실험체들 보다 더 많았으며, 보 양단의 반력 지점 방향으로 진전된 균열 구간도 더 길었음.
- 이로서 인장 측의 콘크리트 영역의 면적이 많을수록 균열 분산에 효과적임을 알 수 있었음.
- 최대내력 이후 각 균열의의 폭은 육안으로 판단할 만큼 크게 전진되었으며, 이와 동시에 인장 측 용접 철망의 파단이 발생하였음.
- 전단 거동 지배로 설계된 실험체들의 초기 휨 균열도 최대모멘트 구간에서 발생하였지만, 이후 하중이 증가함에 따라 전단 경간에서 경사 균열이 발생하였음.
- 최대내력 시점에서는 큰 폭의 경사 균열이 반력점 및 가력점 근처에서 발생하였는데, 삽입된 심재 위치에서 길이 방향을 따라 수평 균열이 발생하였음.

3.4.2 하중-처짐관계

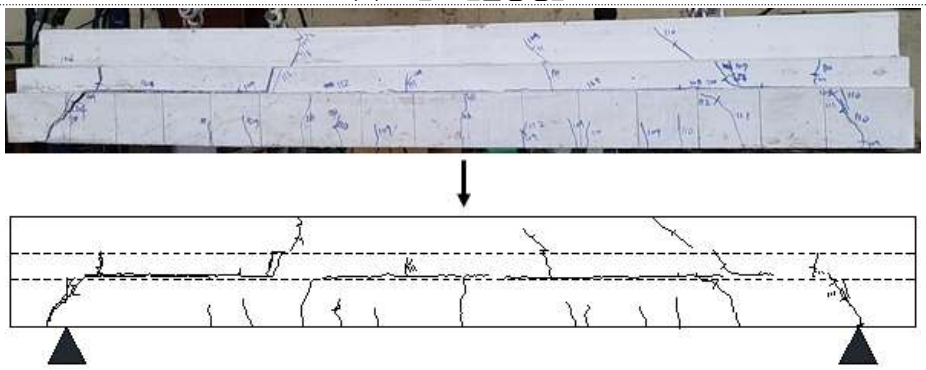
- 그림 3.4에는 휨 및 전단 실험체들의 전형적인 하중-처짐 관계를 나타내었음. 휨 거동으로 설계된 실험체들의 하중-처짐 관계에서 강성은 초기 휨 균열 발생 이후 항복 시점까지 완만하게 감소하였음.
- 항복시점 이후의 처짐은 최대내력 도달 시점까지 급격하게 증가하였는데, 최대내력 이전까지의 거동에 대한 내부에 삽입된 심재의 배치 형상에 미치는 영향은 미미하였음. 반면, 최대내력 이후의 거동은 심재가 인장 측에만 설치되는 원통형 보다 압축 측 및 인장 측에 설치되는 T형 타입에서 더 안정적이었음.
- 심재가 인장 측에만 설치되는 원통형을 갖는 실험체는 최대 내력의 도달과 동시에 최대 내력이 급격히 저하되었으며, 그 하중을 유지하면서 처짐이 증가하는 소성의 흐름을 보였음. 반면 T형 타입을 갖는 실험체에서는 최대 내력의 도달과 동시에 내력이 저하하는 경향은 없었으며, 실험 종료 시점까지 완만히 저하되었음.
- 전단으로 지배된 실험체들의 초기 강성은 전단경간비, 전단 철근 배근량에 관계없이 초기 균열 시점까지 비슷하였음.

3.4.4 변위 연성비

- 변위 연성비는 휨으로 지배된 실험체들만을 분석하였음.
- 실험체들의 변위 연성비(μ_Δ)는 최대 내력 시점의 변위(Δ_n)를 항복 시점의 변위(Δ_y)로 나눈 값으로 평가하였음. 항복시점은 주철근으로 배근된 용접철망의 변형률이 항복에 도달하였을 때로 결정하였음.
- 심재가 원통형인 실험체의 μ_Δ는 T형 타입의 실험체보다 작았음.
- 휨으로 설계된 실험체들은 최소 주철근비를 갖는 경량 콘크리트 보와 동등한 수준의 연성을 확보하는 것으로 판단됨.

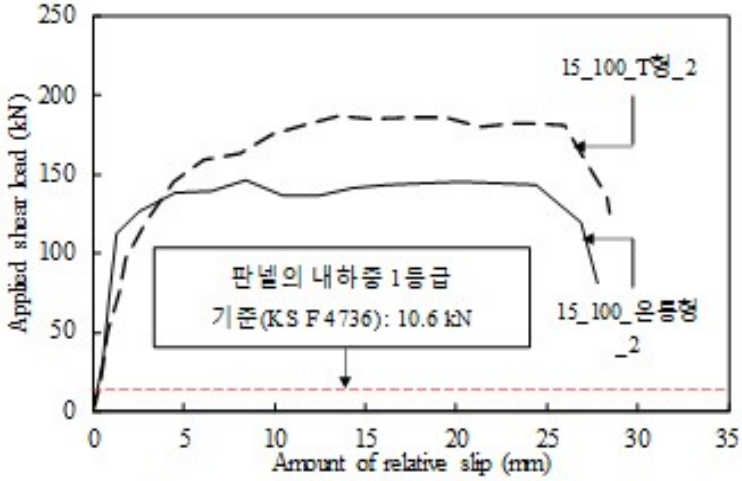


(a) 15_100_온통형_2

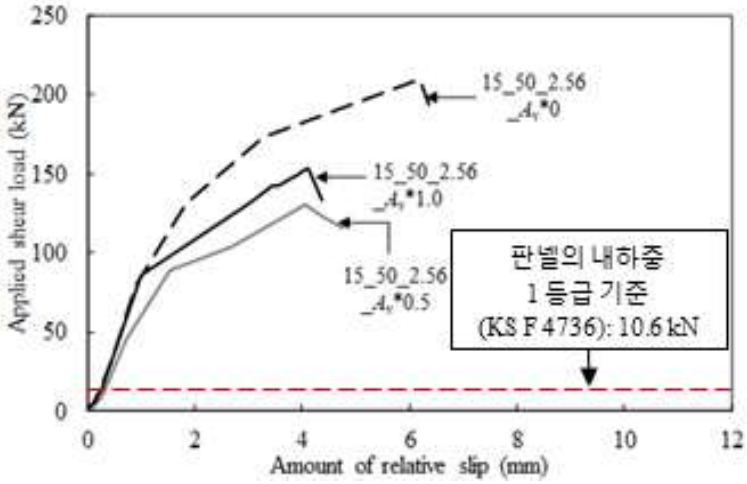


(b) 15_50_1.17_A_v*0.25

그림 3.3 전형적인 균열진전



(a) 휨 거동



(b) 전단 및 휨 · 전단 거동

그림 3.4 하중-변위관계

3.4.5 균열모멘트

- ACI 318-19에서 제시하고 있는 균열모멘트(M_{cr})로부터 환산된 $(P_{cr})_{ACI}$은 휨으로 지배된 실험체들보다 높았음.
- 이와 같이 ACI 318-19의 M_{cr}은 휨으로 지배된 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬을 불안전측으로 예측하므로 바텀애시 경량골재 및 스티로폼 알갱이 첨가에 의해 저하되는 인장특성을 반영할 필요가 있음.

3.4.6 최대 내력

- ACI 318-19의 최대 내력 모멘트(M_n)는 다음과 같이 제시하고 있음.

$$M_n = A_s f_y\left(d_s - \frac{\alpha}{2}\right) - A_s^{'} f_y^{'}\left(d^{'} - \frac{\alpha}{2}\right) \tag{3.1}$$

$$\alpha = \beta_1 c_u = \frac{A_s f_y - A_s^{'} f_y^{'}}{0.85 f_{ck} b_w} \tag{3.2}$$

- 여기서, A_s 및 $A_s^{'}$은 각각 주철근 및 압축 철근의 단면적을, $f_y^{'}$은 압축 철근의 항복강도를, $d^{'}$는 압축철근의 깊이를, α는 등가 응력 블록 깊이를, β_1는 등가 응력 블록 계수를, c_u는 극한 상태에서의 중립축 깊이를 의미함.
- 위 식에 따라 ACI 318-19은 휨 지배로 설계된 실험체들의 M_n을 기포 혼입률과 주철근비에 관계없이 안전 측으로 예측하였음.
- 이는 등가 응력 블록의 개념으로 도입하고 있는 ACI 318-19를 이용하여 BST-판넬의 안전적인 휨 설계가 가능함을 의미함.
- 또한, 휨-전단 또는 전단으로 지배된 실험체를 대부분 불안전측으로 예측하였음.
- 이와 같이 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬에서 ACI 318-19의 기준을 이용한 안전적인 전단력을 설계하기 위해서는 EPS 및 바텀애시 경량 골재에 의해 저하되는 콘크리트의 전단 특성을 낮게 예측할 필요가 있음.

3.4.7 내력등급

- KS F 4736은 탄성 상태에서 저항하는 내력에 따른 내하중 등급을 구분하고 있는데, 3.4 KPa 이상인 판넬을 1등급으로 평가하고 있음. KS F 4736에서 제시하고 있는 등급과 휨 지배로 설계된 실험체들의 M_{cr}과 비교 시 모두 내하중 1등급을 만족하였음.
- 위 결과에 따라 구조적 안전성을 충분히 확보한 것으로 확인하였음. 하지만, 휨으로 지배된 실험체들은 내하중 1등급을 만족시키기 위해서 주철근으로 배근된 용접철망 양을 증가시킨 후 내하중 등급 재평가가 필요할 것으로 판단됨.

4. 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 난연성능 및 가스 유해성 평가

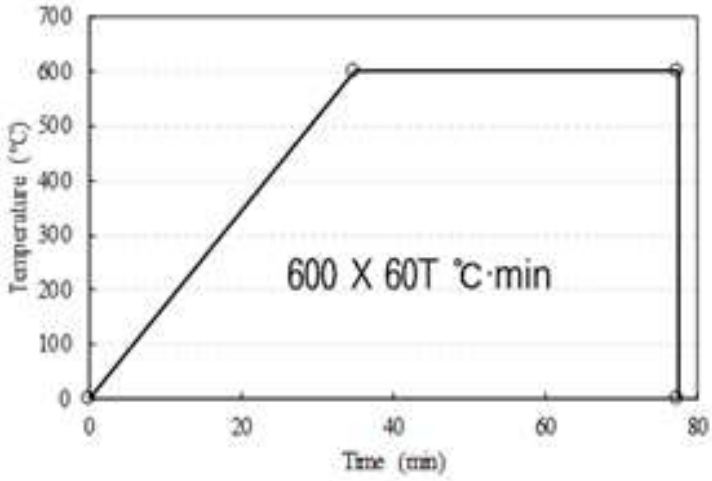
4.1 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 난연성능 평가

4.1.1 실험체 상세 및 실험방법

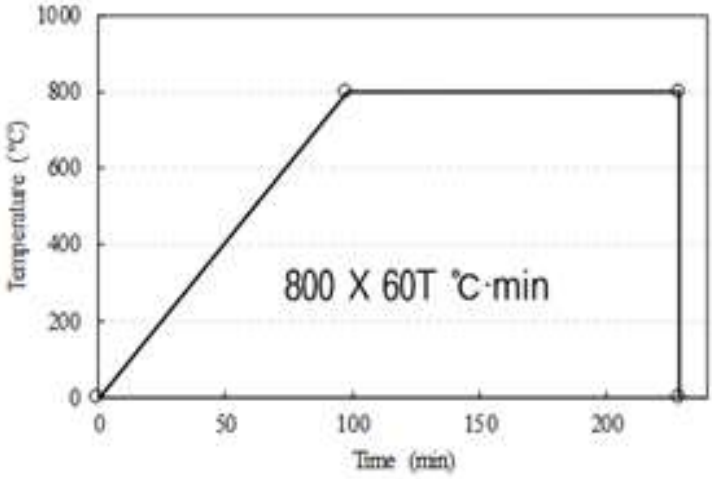
- 실험체는 ϕ 100 × 200 mm 몰드를 이용하여 제작하였으며 표 4.1에는 배합상세를 나타내었음.
- 실험체의 목표 28일 압축강도는 12 MPa 이며 이 때 기건 밀도 및 EPS 혼입률이 각각 1,3 g/cm^3 및 7.5%임.
- 실험은 재령 14일에서 소성로를 이용하여 온도(600 ℃ 및 800 ℃)와 시간(1시간, 2시간 및 3시간)을 변수로 건축재료의 불연성 시험(KS F ISO 1182)에서 제시하고 있는 질량감소율 30% 이하를 고려하여 평가하였음.
- 그림 4.1에는 600 ℃ 및 800 ℃에서의 전형적인 가열곡선을 나타내었으며, 온도 도달까지 소요되는 시간(T)를 고려하여 면적비로 계산하였음.

표 4.1 실험체의 배합상세

f_{cd} (MPa)	ρ_c (g/cm^3)	W/B (%)	S/a (%)	E_a (%)	Unit weight (kg/m^3)								S.P (%)
					W	OPC	GGBS	FA	Fine aggregate	Coarse aggregate	Polymer	PVA Fiber	
12	1,3	30	42	7.5	135	135	225	90	446.3	406.3	0	0	0.7



(a) 600℃



(b) 800℃

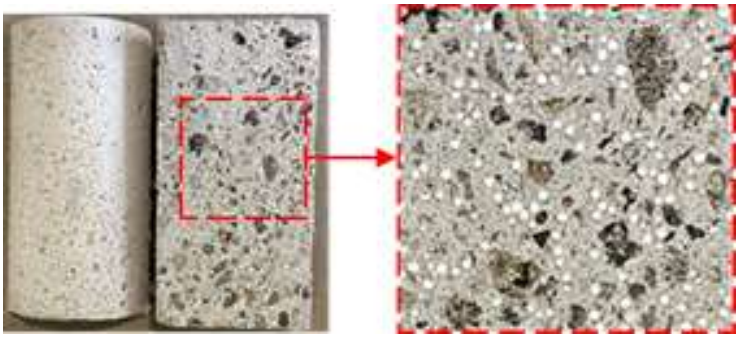
그림 4.1 가열 곡선

4.1.2 실험결과 분석

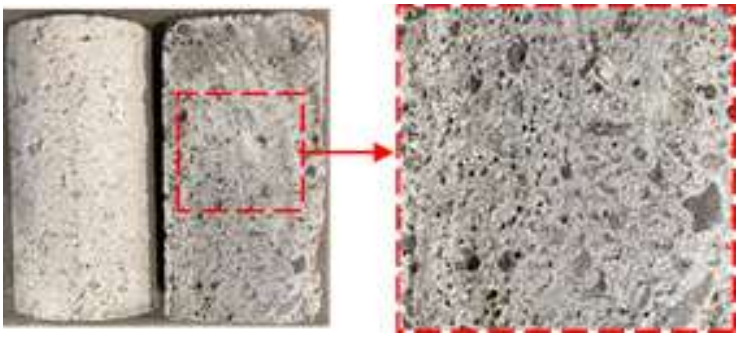
- 실험을 통해 측정된 압축강도 및 밀도는 표 4.2에 나타내었음.
- 실험체들의 기건 밀도 및 압축강도는 재령 14일에서 측정하였음.
- 실험체들의 기건 밀도는 양생 온도에 대한 영향이 현저하였으며, 이에 반해 양생 시간에 대한 영향은 적었음.
- 실험체들의 재령 14일 압축강도는 양생 온도 및 양생 시간에 대한 영향이 모두 현저하였음.
- 양생 온도 800 ℃에서 3시간 양생한 실험체의 기건 밀도 및 압축강도는 각각 1.08 g/cm^{3}으로 및 1.31 MPa로 온도가 20 ℃인 실험체 대비 각각 16.3% 및 81.4% 감소하였음.
- 양생 온도 600 ℃에서 각각 2시간 및 3시간 양생한 실험체의 기건 밀도는 각각 3.62 g/cm^3 및 2.96 g/cm^{3}으로 600 ℃에서 1시간 양생한 실험체의 기건 밀도 대비 각각 5% 및 23% 감소하였음.
- 양생 온도 800 ℃에서 1시간 양생한 실험체의 기건 밀도는 3.08 g/cm^{3}으로 양생 온도 600 ℃에서 1시간 양생한 실험체 대비 20% 감소하였음.
- 양생 온도 800 ℃에서 각각 2시간 및 3시간 양생한 실험체의 재령 14일 압축강도는 각각 15.88 MPa 및 16.28 MPa로 800 ℃에서 1시간 양생한 실험체의 압축강도 대비 각각 43% 및 57% 감소하였음.
- 양생 온도 800 ℃에서 1시간 양생한 실험체의 재령 14일 압축강도는 3.08 MPa로 양생 온도 600 ℃에서 1시간 양생한 실험체 대비 20% 감소하였음.
- 고온 양생에 따른 실험체의 기건 밀도 및 재령 14일 압축강도의 감소는 내부 EPS의 용융으로 인한 내부 공극 형성 때문이라고 판단됨.
- 그림 4.2에는 양생 온도에 따른 실험체의 전형적인 표면 및 내부 형상을 나타내었음.
- 600 ℃ 및 800 ℃에서 양생한 실험체들은 모두 내부 EPS가 용융하였음.
- 모든 실험체들은 양생 온도와 양생 시간에 관계없이 건축재료의 불연성 시험(KS F ISO 1182)에서 제시하고 있는 질량감소율 30% 이하를 만족하였음 (그림 4.3).

표 4.2 실험 결과

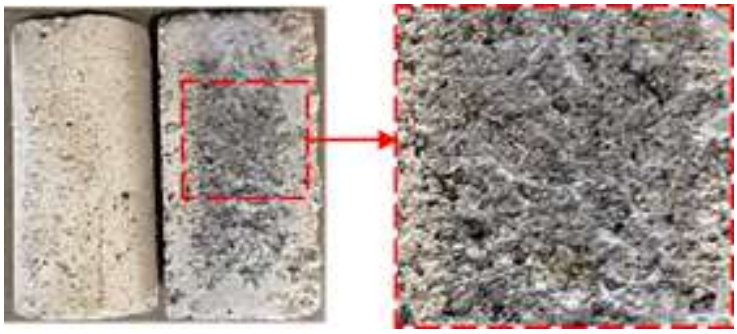
Curing process (℃)	Time (hours)	Air Density (g/cm^3)	Density reduction rate (%)	14-day compress strength of concrete (MPa)	Strength reduction rate (%)
20	-	1,3	-	7.04	-
600	1	1.12	13.8	3.83	45.6
	2	1.1	15.4	3.62	48.6
	3	1.11	14.6	2.96	57.9
800	1	1.11	14.6	3.08	56.2
	2	1.07	17.7	1.77	74.8
	3	1.06	18.5	1.31	81.3



(a) 표준 양생



(b) 600℃



(c) 800℃

그림 4.2 전형적인 표면 및 내부형상

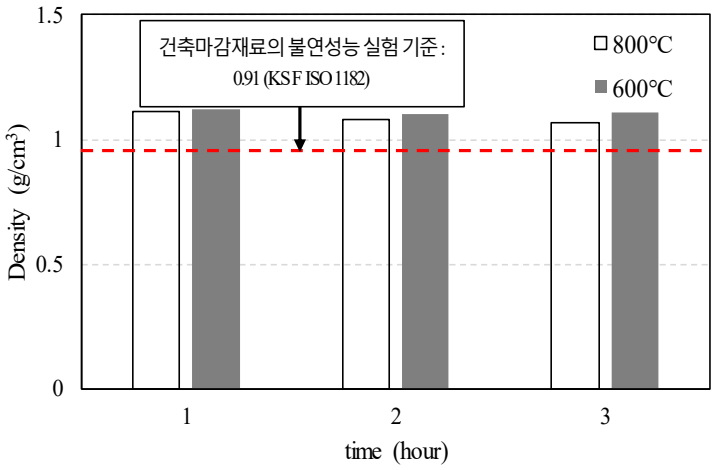


그림 4.3 기준과의 비교

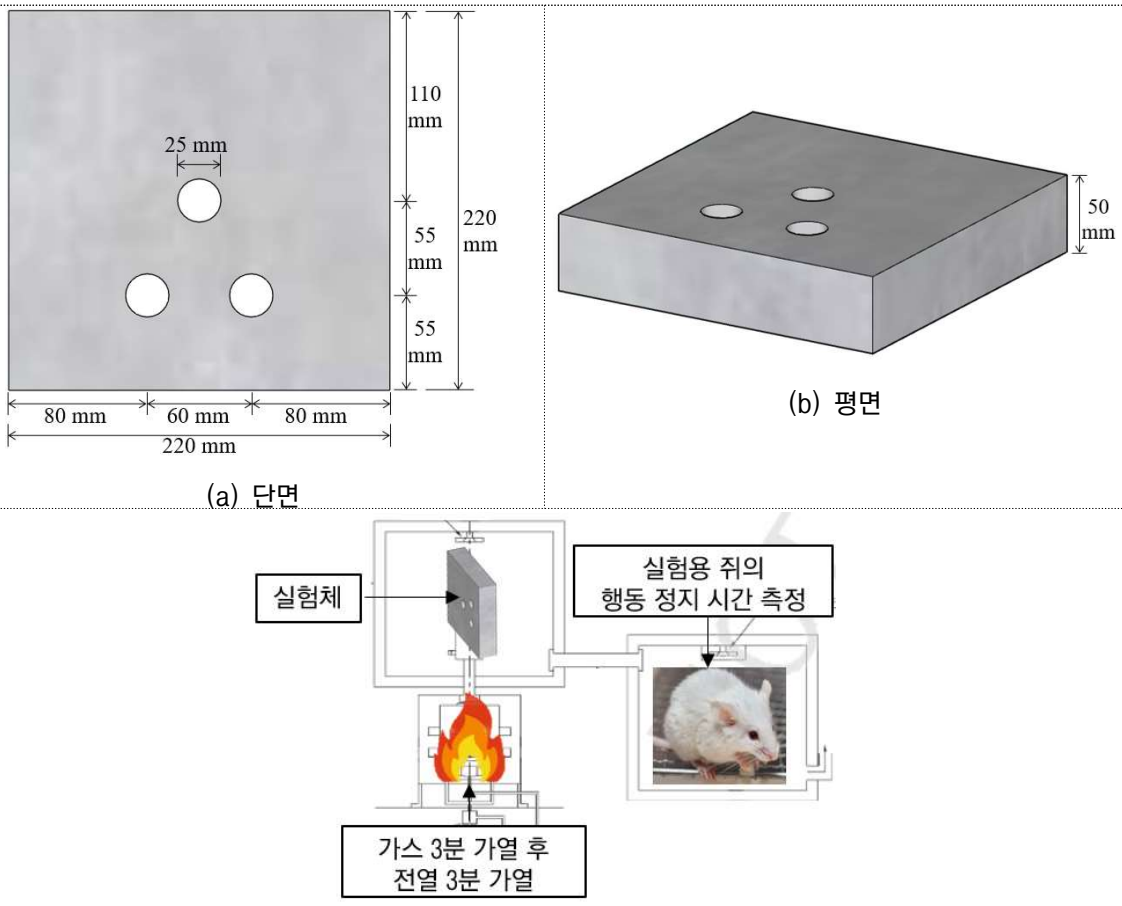
4.2 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 가스 유해성 평가

4.2.1 실험체 상세 및 실험 방법

- 실험체는 KS F 2271에서 제시하고 있는 기준에 따라 220 × 220 mm 몰드를 이용하여 제작하였음(그림 4.4).
- EPS는 연소시에 발생하는 유독 가스를 고려하여 배합 중 최대인 15%를 혼입하였음(표 4.3).
- 실험은 재령 14일에서 건축물 마감재료의 가스 유해성 평가(KS F 2271)에 따라 실험용 쥐의 평균 행동정지시간 9분 이상을 평가하였음(그림 4.4).
- 결과적으로, EPS 혼입률이 15%인 경량 콘크리트의 실험용 쥐의 평균 행동정지시간은 13분 41초로 KS F 2271의 기준을 만족하였음(표 4.4),
- 하지만, 판넬의 재활용성 및 EPS의 유해가스 배출의 가능성을 고려하여 기포의 혼입을 추천함.

표 4.3 실험체의 배합상세

f_{cd} (MPa)	ρ_c (g/cm^3)	W/B (%)	S/a (%)	E_a (%)	Unit weight (kg/m^3)								S.P (%)
					W	OPC	GGBS	FA	Fine aggregate	Coarse aggregate	Polymer	PVA Fiber	
7	1,2	30	42	15	135	135	225	90	348	388	35	0.975	0.7



(a) 단면

(b) 평면

(c) 실험 상세

그림 4.4 실험체 상세 및 실험 상세

표 4.4 실험결과

Testing method for gas toxicity of finish materials of buildings	Average behavior stop time in rats(min, s)				
	1	2	3	Average	KS F 2271
	13. 31	13. 55	13, 04	13, 30	less than 9 minutes

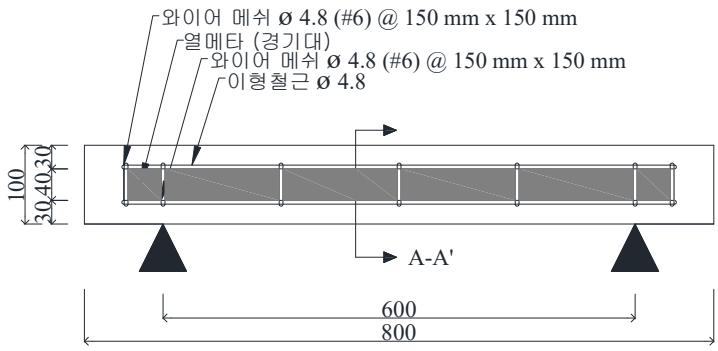
4.3 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 난연성능 평가

4.3.1 실험체 상세 및 실험 방법

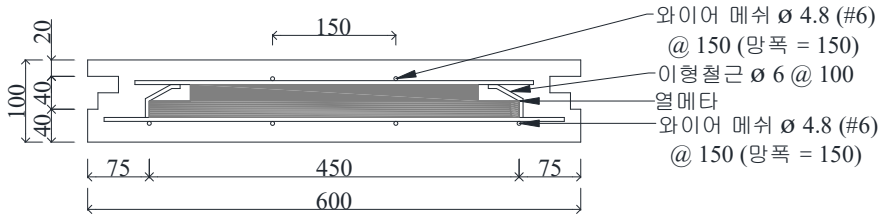
- 실험체의 두께는 열메타 기반 PC 판넬의 내부의 열메타 구조체와 외부의 단열 콘크리트를 비율로 축소하여 제작하였으며 제작된 PC 판넬의 열메타 구조체 및 단열 콘크리트의 두께는 각각 60 mm 및 40 mm임(그림 4.4).
- 단열 콘크리트는 EPS가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트와 동일한 배합표를 이용하여 배합하였음.
- 실험은 토치를 이용하여 15분간 가열하였으며 건축재료의 불연성 시험(KS F ISO 1182)에서 제시하고 있는 최고온도와 최종평형온도의 차이를 고려하여 평가하였음.
- 실험체의 온도는 가열 면과 비 가열 면에서 열전대를 이용하여 측정하였음.
- 가열에 따른 실험체의 외관 변화는 연소성능시험(KS F ISO 5660) 기준에 따라 방화상 유해한 균열, 구멍 및 용융 등을 평가하기 위해 5분 간격으로 관찰하였음.

4.2.2 실험결과 분석

- 실험을 통해 측정된 시간에 따른 온도변화 곡선은 그림 4.6에 나타내었음.
- 실험체의 가열 면에서의 최종평형온도는 310.3 ℃로 비 가열 면에서의 최종평형온도 대비 약 4.6 배 높았음.
- 실험체의 가열 면 및 비 가열면에서의 최고온도는 각각 329.1 ℃ 및 71.4 ℃로 최종평형온도 대비 각각 18.8 ℃ 4.5 ℃ 높았음.
- 실험체는 가열 면 및 비 가열 면에서 모두 건축재료의 불연성 시험(KS F ISO 1182)의 기준인 최고온도와 최종평형온도의 차이가 20℃ 이하를 만족하였다.
- 가열 시간에 따른 실험체의 외관 변화는 5분 간격으로 그림 4.7에 나타내었음.
- 실험체 가열에 따른 외관 변화는 그을림 외에 발생하지 않았으며, 연소성능시험(KS F ISO 5660) 기준에 만족할 수 있었음.

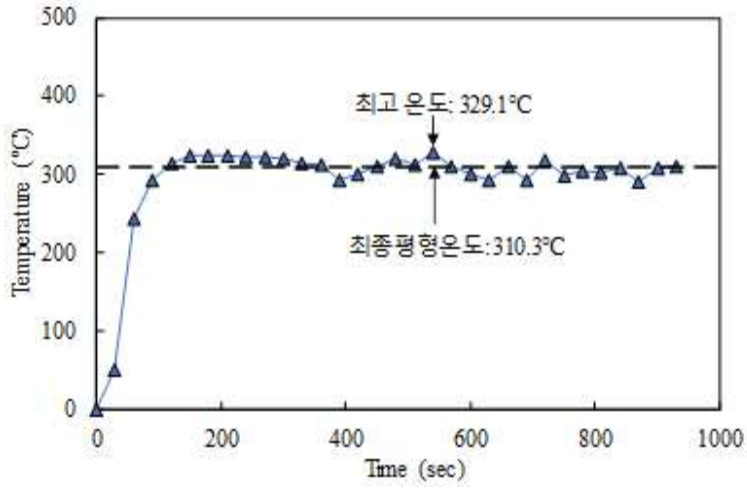


(a) 측면도

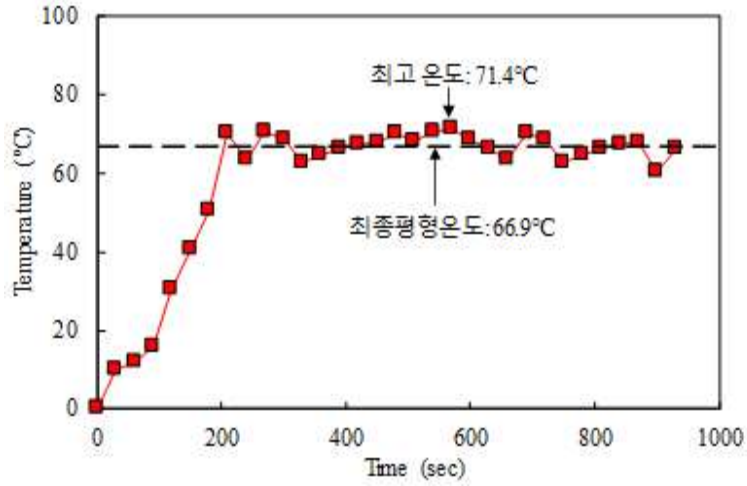


(b) 평면도

그림 4.5 실험체 상세



(a) 가열 면



(b) 비 가열 면

그림 4.6 가열에 따른 온도변화곡선

(a) 가열준비

(b) 가열 후 5분 경과

(c) 가열 후 10분 경과

(d) 가열 후 15분 경과

(e) 가열 종료

그림 4.7 가열에 따른 실험체의 외관변화

5. 결론

"열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬의 단면설계와 휨 및 전단성능 평가" 연구에서는 열메타 기반 PC 판넬 상세를 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었음.

① 최적의 열메타 구조체의 크기

- 콘크리트의 지압 및 단열성능을 고려한 최적의 열메타 구조체의 크기는 쉘의 두께(a) 4 mm 및 쉘의 폭(b) 50 mm 이었음(그림 6.1).

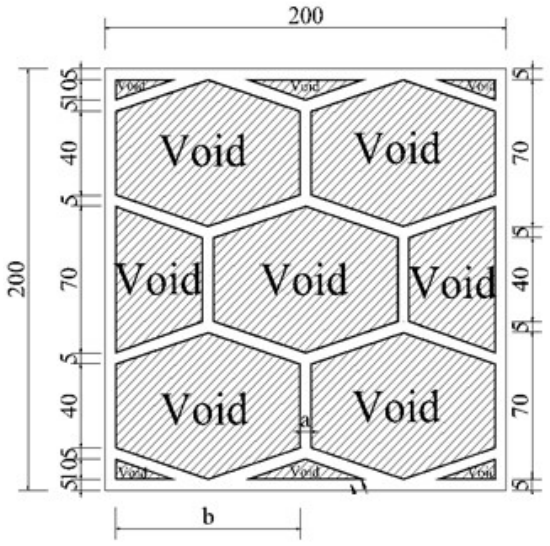


그림 6.1 구조체 형상(단위: mm)

② 최적의 단면상세

- 실험 결과에 따라 열관류율 0.15 W/m²·K를 고려한 최적의 단면 상세는 아래 그림 6.2와 같음.

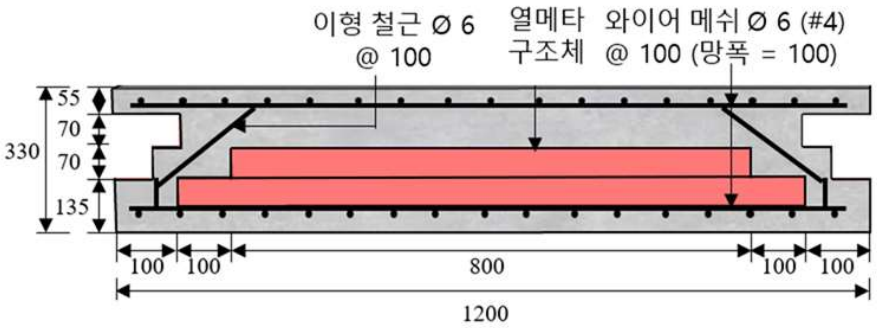


그림 6.2 최적의 단면상세(단위: mm)

③ 내력등급

- KS F 4736은 탄성 상태에서 저항하는 내력에 따른 내하중 등급을 구분하고 있는데, 3.4 KPa 이상인 판넬을 1등급으로 평가하고 있음. KS F 4736에서 제시하고 있는 등급과 휨 지배로 설계된 실험체들의 M_{cr}과 비교 시 모두 내하중 1등급을 만족하였음.

④ 난연성능

- EPS 기반 고단열·지속가능 콘크리트 및 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 건축재료의 불연성 시험(KS F ISO 1182) 및 연소성능시험(KS F ISO 5660) 기준을 만족할 수 있었음.

1. 열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 특허맵

1.1 기술 개발 배경

1.1.1 정책적 · 사회적 중요성 : 건축물 에너지 소비에 대한 정책적 · 사회적 요구 증가

- 국내 에너지 소비량 및 CO_2 배출량은 세계 8위 수준으로(2015년 기준), 2000년 대비 약40% 이상 증가.
- 국내 에너지 소비효율은 일본의 1/3 수준(그림 1.1)으로 전체 에너지의 35.7%가 건축물의 조명 및 냉 · 난방에 의해 소비되고 있으며, 특히 인구 과밀인 서울의 경우 총 에너지 사용량 중 58%가 건축물 운영에 의해 소비되고 있음(그림 1.2).
- 정부는 2030년까지 국가 탄소 감축 목표를 배출전망치(BAU) 대비 37%로 설정하였으며, 건설부분은 31%의 감축 목표를 제시함.
- 건축물 에너지 절감 정책에 따라 2018년부터 중부 지역의 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율 기준은 0.21 $W/m^2 \cdot K$ 이하로 적용되고 있는데, 이는 2010년(0.36 $W/m^2 \cdot K$) 대비 약 40% 낮아진 수준임(표 1.1).
- 유기 단열재 시공에 따른 화재 발생 예방 및 내화 규제 강화를 위해 2015년부터 6층 이상 건물에 불연, 준 불연 마감재 적용이 의무화됨.
- 유럽과 미국은 1990년대부터 강도 높은 건물 에너지 절약 정책을 추진하고 있고, 일본은 2010년 에너지 기본 계획을 시작으로 2030년까지 모든 신축 건물(공공 및 민간)에 대해 제로 에너지 빌딩을 달성하도록 제시하고 있음. 이에 따라 우리나라도 건축물 에너지 절감 정책의 강화와 더불어 단열 소재에 대한 새로운 기술의 개발이 요구될 전망임.

1.1.2 경제적 · 산업적 동향 및 중요성: 시장규모의 성장 및 에너지 절감 기술수요 증가

- 두께 250 mm인 외벽에서 열관류율 0.21 $W/m^2 \cdot K$를 달성하기 위해서는 가연재인 기존 유기단열재(EPS, 열전도율 = 0.043 $W/m^2 \cdot K$)의 경우 197 mm 이상의 시공이 필요하며, 이를 불연 재료인 콘크리트 무기 단열재(기존 경량기포콘크리트 및 ALC 블록, 열전도율=0.13 $W/m^2 \cdot K$) 로 대체하게 되면 단열재 두께는 597 mm 이상으로 증가함(그림 1.3).

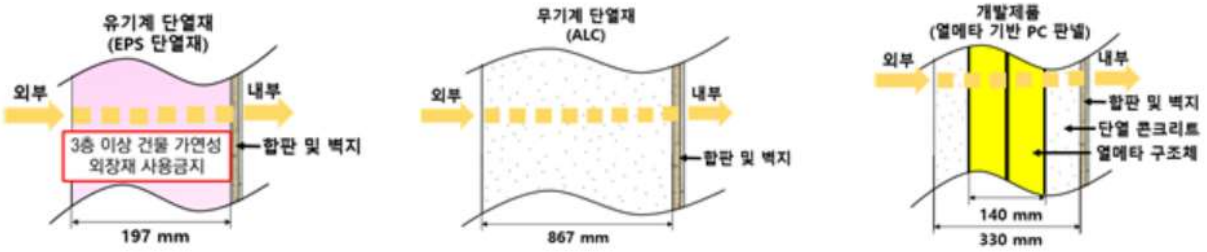
그림 1.1 국내 에너지 소비 효율성

그림 1.2 서울시 부문별 에너지 소비현황

- 벽체의 소요 열관류율에 대해 무기 단열재의 두께를 300 mm 이하로 낮추기 위해서는 단열재 열전도율은 0.07 W/m^2·K이하가 요구됨. 열전도율 0.07 W/m^2·K인 고단열 경량 기포 콘크리트는 건축물의 열손실을 약 30% 이상 줄일 수 있으며, 이는 건축물의 냉·난방을 위해 소비되는 전체 에너지를 약 20% 이상 감소시킬 수 있는 데, 이를 경제적 이익으로 환산한다면 약 6,200억원 이상의 효과임.
- 전세계적 건축물 에너지 절감 정책을 고려하면 향후 건설 분야 소재에서 가장 뜨거운 이슈 중 하나는 단열재임. 차세대 국가 신성장동력 산업의 하나인 단열재 시장은 유기 단열재가 갖는 단점을 해결하면서 단열성능을 향상시킬 수 있는 새로운 기술을 요구하고 있음.

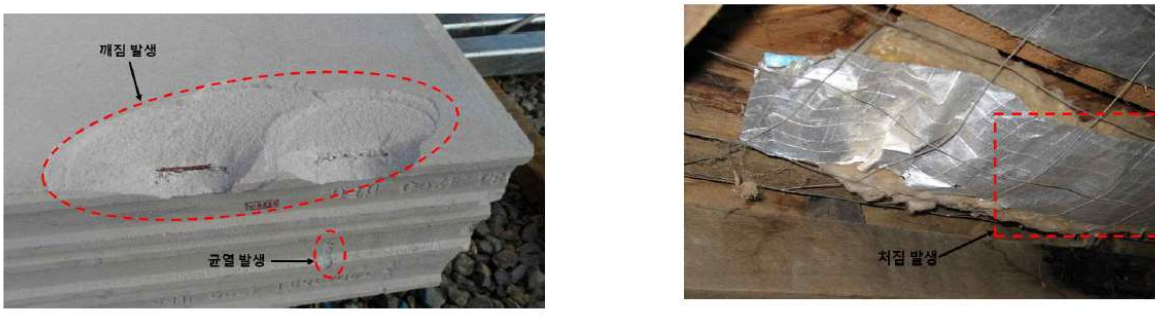
1.1.3 원천기술에 대한 경쟁력 제고의 시급성

- 건축물의 단열을 위해 가장 많이 사용되고 있는 발포 플라스틱계 유기재인 EPS의 경우 열전도율은 0.043 W/m^2·K수준으로 우수한 열전도율을 갖는 반면, 난연 성능은 최대 2급(준 불연등급)으로 화재에 취약함. 글라스 울 등의 무기 단열재는 열전도율은 0.04 W/m^2·K 수준으로 우수하지만, 상당히 고가(250,000원/m^3)일 뿐만 아니라 고흡수성으로 수분의 흡수에 의한 장기적 단열성능의 저하로 인해 건축물 단열재 적용으로는 한계가 있음.
- 일반적으로 사용되고 있는 무기계 단열 재료인 경량기포콘크리트(ALC 포함)의 경우 압축강도 및 사용성을 고려하였을 때 약 0.13 W/m^2·K 이하의 열전도율을 얻기 어려울 뿐만 아니라, 모서리 파괴, 균열발생 및 방습성 저하 등의 사용성 문제가 있음(그림 1.4).
- 프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC) 패널은 공장 생산제품으로 대량 생산 및 건설비용을 저감할 수 있지만, 콘크리트의 높은 단위용적중량으로 단열성 확보에 한계가 있음.
- 따라서 언급한 패널들의 장기적인 환경에서 내화성, 내구성, 단열성능과 높은 단위용적중량의 문제점을 해결할 수 있는 경량성, 내구성 및 단열성을 갖춘 콘크리트 패널의 개발이 필요함.



(a) EPS 단열재 (b) 기포콘크리트 (c) 제안기술

그림 1.3 열관류율 0.15 W/m^2·K를 만족시키는 단열재의 최소요구 두께



(a) ALC 패널 깨짐 및 균열 발생 (b) 습기 흡수에 따른 처짐 발생

그림 1.4 무기단열재 사용의 문제점

표 1.1 친환경 주택의 단열성능 기준

항목		평균 열관류율($W/m^2 \cdot K$)			
		중부1	중부2	남부	제주
창 (발코니 내측 창호 포함)	외기 직접	0.90 이하		1.00 이하	1.50 이하
	외기 간접	1.20 이하	1.50 이하	1.70 이하	
거실의 외벽	외기 직접	0.15 이하	0.17 이하	0.22 이하	0.25 이하
	외기 간접	0.21 이하	0.24 이하	0.31 이하	0.35 이하
최상층에 있는 거실의 반자 또는 지붕	외기 직접	0.15 이하		0.18 이하	0.25 이하
	외기 간접	0.21 이하		0.26 이하	0.35 이하
최하층에 있는 거실의 바닥	외기 직접	0.15 이하	0.17 이하	0.22 이하	0.29 이하
	외기 간접	0.21 이하	0.24 이하	0.31 이하	0.41 이하
바닥 난방인 층간 바닥		0.81 이하			

1.2 개발기술의 특징

1.2.1 ETM (Eco thermal-meta) PC 판넬 개발의 필요성(배합설계 측면)

- 콘크리트의 단열성능은 기건 밀도에 매우 중요한 영향을 주는 요인이므로 패널에서 소요 단열성을 확보하기 위해서는 1,000~1,300 kg/m^3의 낮은 수준의 기건 밀도가 요구되고, 콘크리트 패널은 습식형인 콘크리트로 제조되므로 배합 및 제품상의 품질관리를 위해서 공장의 PC 공정이 요구됨.
- 콘크리트 PC 패널에서 배합상의 품질관리를 위한 공장의 PC공정은 가능하지만, 소요 단열성능을 확
- 보하면서 기건 밀도의 감소는 높은 단위용적중량을 갖는 콘크리트의 재료 특성측면에서 현실적으로 불가능함.
- 콘크리트 수준에서 기건 밀도를 감소시킬 수 있는 유일한 방법은 투입되는 재료들의 중량을 감소시키는 방법임. 이를 위해 천연 골재 보다 비중이 상대적으로 낮은 점토질계 또는 산업부산물계의 경량골재 계열이 주로 사용되고 있음. 특히 바텀애시 경량 골재의 비중은 0.93~1.52로 경량 골재 중에서 가장 가볍지만, 이를 이용한 콘크리트의 기건 밀도는 1,400~1,800 kg/m^3의 범위의 수준으로 콘크리트 패널에서 단열성 확보를 위해 필요한 기건 밀도보다 높은 수준에 있음.
- 이에 따라 콘크리트 수준의 단열성능을 더욱 향상시키기 위해서 기건 밀도를 저감시키는 방법은 저량의 기포를 첨가하는 것이 추천될 수 있음. 콘크리트 체적 대비 40% 수준으로 첨가되는 기포는 경량골재 콘크리트의 기건 밀도를 약 250~500 kg/m^3 저감시킬 수 있으므로 콘크리트 패널에서 단열성 확보를 위해 최소로 필요로 하는 기건 밀도의 범위를 만족 시킬 수 있음.
- 기포 콘크리트는 단열성 확보를 위해 70~80%의 기포로 이루어져 있어 일반 콘크리트보다 높은 흡수율과 압축강도 및 균열저항성이 낮음. 이에 따라 시공 시 균열 및 파괴가 발생할 수 있음.
- 국내의 시멘트 생산량은 2012년에 46,800만 톤에서 2016년에 56,700만 톤으로 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 시멘트 1 톤 생산 시 이산화탄소(CO_2) 발생량은 약 0.9 톤임을 감안할 때 건설 산업에서 발생되는 CO2 배출량도 지속적으로 증가하고 있음(그림 1.5).
- 건설 산업에서도 국제적 정서흐름에 부합하게 탄소 배출량 및 환경 부하 에너지를 절감시키기 위해서 다양한 측면에서 기술개발이 진행되고 있음. 특히 산업 부산물을 이용한 시멘트의 사용량의 저감

은 이산화탄소 배출량을 직접적으로 감소시킬 수 있는 재료적 측면의 지속가능형 기술로 인정받고 있음.

- 따라서 고단열·경량 지속가능 콘크리트 PC 패널의 경제적이면서 실용적인 배합설계 개발을 위해서는 시멘트 사용량을 줄이면서 바텀애시 경량골재 및 저량의 기포의 융합 기술은 좋은 대안이 될 수 있음.

1.2.2 열메타 기술 융합의 필요성

- 일반적으로 이용한 경량골재 콘크리트를 이용한 PC 판넬의 열관류율은 두께 200 mm와 300 mm에서 각각 2.215와 1.665 $W/m^2 \cdot K$으로 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율 기준 보다 약 90% 낮음.
- 정부의 중부지방의 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율을 만족하기 위해서는 PC 판넬의 두께가 약 3,000 mm가 요구됨. 따라서 건설 산업의 콘크리트의 기술로만으로는 PC 판넬 단열성의 확보에 한계가 있음.
- 열메타는 열전도성이 낮은 소재를 망상형 또는 판형으로 배치하여 열전달을 효율적으로 차단할 수 있는 구조를 가지고 있음. 콘크리트 내부에서 열전달 억제 역할을 하는 열메타 구조는 그 형상 및 배열에 따라 그 효율성이 다름.
- 이를 이용한 콘크리트 내부에 설치되는 열메타는 화재 피해를 저감시킬 수 있으며, 기본적으로 내화 인증을 받을 수 있음.
- 따라서 콘크리트 단열의 한계를 극복하고 열전도성을 낮추면서 시공성 및 내구성 확보 등을 고려하면 콘크리트와 열메타 소재의 융합은 좋은 대안이 될 수 있음(그림 1.6).

1.2.3 PC 판넬 접합 설계 기술의 필요성

- PC 판넬은 풍하중과 중력하중에 대한 안전한 구조적 접합설계가 필요함. 접합설계 시 휨, 전단 및 지압을 고려하여야 함.
- 특히 PC 판넬은 상호 또는 구조체와의 결합 시 열교현상을 고려한 접합상세가 적용되지 않을 경우 단열성능이 오히려 저하될 수 있으므로 이를 고려한 접합 상세 개발이 필요함.
- 또한, 이들의 접합설계 기술은 PC 판넬의 현장 시공성과 경제성에 직결되므로 현장조건을 반드시 고려하여야 함.

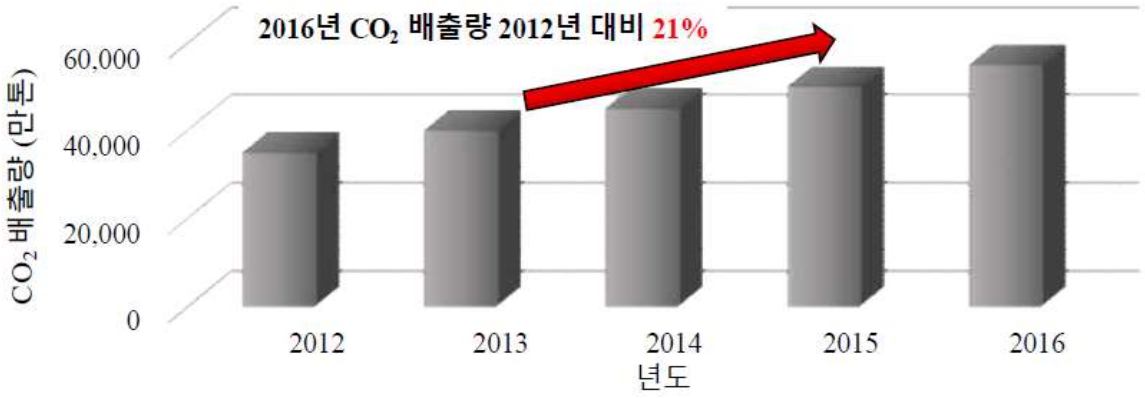


그림 1.5 연도별 이산화탄소 배출량

1.2.4 건조수축 제어 및 풍하중에 대한 구조적 안전성 확보의 필요성

- 일반적으로 콘크리트를 기반으로 하는 PC 판넬은 건조수축이 동반될 수밖에 없으며, 수축량이 과다할 경우 이에 따른 균열이 발생할 수 있음.
- 또한 PC 판넬은 외장재로 사용될 경우에는 외부환경에 의해 발생된 외력에 대해서 충분한 저항성을 가지고 있어야 함. 특히 풍하중은 PC 판넬의 구조적 안전성과 직결되는 요인이므로 이를 반드시 확보하여야 함.
- ETM PC 판넬은 적용될 기포와 바텀애시 경량 골재가 융합된 콘크리트의 건조수축 저항성 및 휨 강도가 보통 콘크리트 보다 낮을 수 있기 때문에 이를 제어할 수 있는 기술이 필요함.
- 콘크리트를 기반한 ETM PC 판넬은 건조수축 제어와 풍하중에 대한 저항성을 향상시키기 위해서는 인장강도를 확보하여야 함.
- 콘크리트의 인장강도를 향상시키기 위해서 가장 일반적이고 경제적인 방법은 인장재를 배근하는 방법임. 특히 ETM PC 판넬은 전체크기, 피복두께, 열메타의 간섭 등 설계적 · 시공적 측면을 고려하였을 때 가장 배근이 단순하면서도 인장향상효과가 우수한 용접철망 배근이 하나의 대안이 될 수 있음.

1.3 특허 동향 분석

1.3.1 분석 목적

- 본 보고서는 열메타 구조를 활용한 고단열 · 친환경 PC 판넬과 관련된 국내 및 해외 선행 특허를 조사하고 특허 정보를 수집하여 선행 특허 현황을 파악함으로써, 선행 특허 기술을 고려한 향후 본 대상 기술의 바람직한 R&D 방향을 고찰하고, 본 대상 기술의 실시에 있어 선행 특허에 대한 저촉 가능성과 회피 방안을 검토함.
- 아울러, 본 개발기술인 열메타 구조를 활용한 고단열 · 친환경 PC 판넬에 대해 원천 특허 발굴 가능성에 대해 검토함.

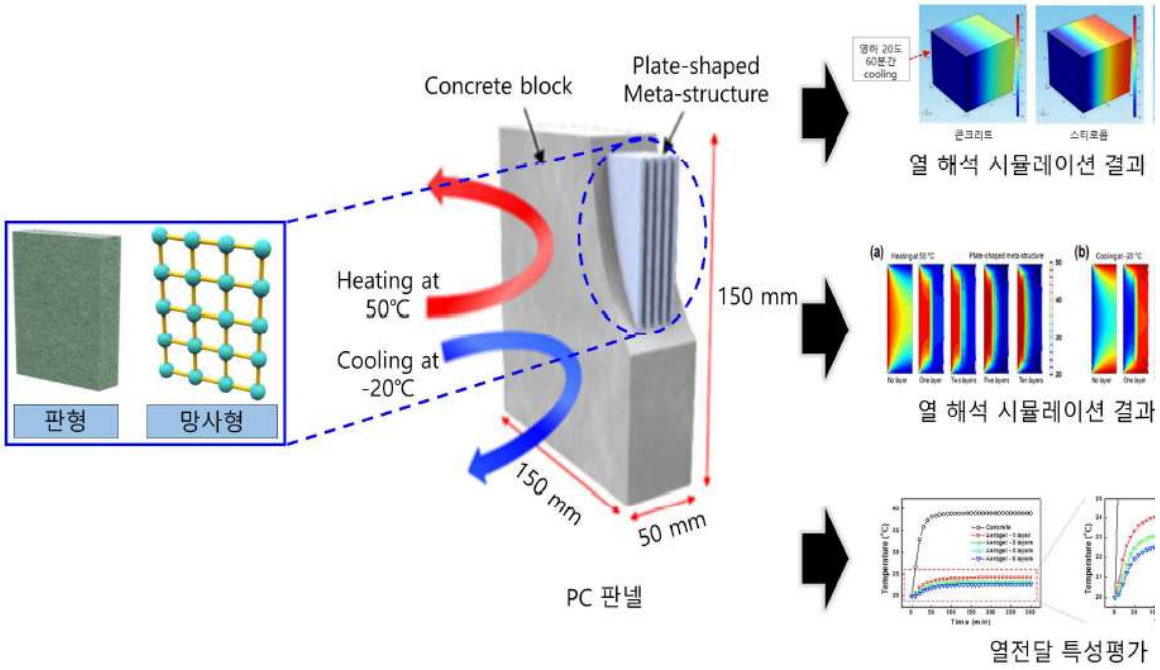


그림 1.6 열메타 구조를 삽입한 콘크리트 판넬의 단열성 향상 아이디어

1.3.2 분석 범위

- 본 보고서에서는 분석 목적에 따라 기본적으로 국내 및 해외에서 출원된 선행 특허 범위 내에서 조사, 분석하였고, 해외 출원의 경우 미국, 일본 및 유럽의 선행 특허에 대하여 조사, 분석함(표 1.2).

1.3.3 분석 기준

- 상기 분석 범위 내에서 열메타 구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬 기술 관련 검색식 및 IPC 분류를 선정하여 검색범위 내에서 한국, 미국, 일본 및 유럽(이상 4개국)에 대한 선행 특허 검색 결과, 한국 821건, 미국 543건, 일본 942건 및 유럽 133건(총 2,439건)의 선행 특허를 분석대상으로 선정함(표 1.3).
- 위와 같은 선정기준에 따라 선정된 분석대상 특허 리스트를 별첨함.

1.4 정량 분석

1.4.1 전체 특허 동향

- 그림 1.7은 2,439건의 분석대상 특허출원에 대한 연도별 출원 건수를 나타냄.
- 대상기술은 90년대 말부터 출원 건수가 급격히 증가하여 2000년대 후반까지 이어졌으나, 2010년대 들어 급격한 감소세를 나타냄.
- 2010년대 감소세는 경쟁 과정에서 탈락 현상으로 보이며, 2010년대 중반 이후로 출원 건수가 다시 증가하는 양상을 나타내어 이 분야기술이 회복기에 있음을 암시하며, 중단기적으로는 지속적인 증가세를 나타낼 것으로 전망됨.
- 참고로, 2019년 이후에 출원된 특허 중 일부는 아직 공개되지 않아 출원 통계에 반영되지 않음.

1.4.2 국가별 특허 동향

- 그림 1.8은 한국, 미국, 일본 및 유럽 각 국가별 특허출원 건수를 나타냄.
- 전체적으로 일본, 한국, 미국 순으로 출원 건수를 보이고 있으며, 2000년대 초반까지는 일본이 주도하였으나, 2000년대 중반 이후 세계금융위기 여파로 지속적인 감소세를 보임.
- 2000년대 중반 이후로 한국의 출원 건수가 우위를 보였고, 최근 들어서는 한국, 일본, 미국에서 비슷한 양상으로 출원이 진행되는 것으로 나타나, 주요 국가에서는 최근까지도 PC 패널 분야 기술에 대한 관심이 지속되는 것을 알 수 있음.
- 이와 같은 현황에 비추어 볼 때, 향후 본 개발기술과 관련된 특허출원은 한국, 미국, 일본에서 모두 지속적으로 이루어질 것으로 예상됨.
- 특허 건수와 출원인 수 변화의 상관관계를 통해 기술 성장 단계를 파악할 수 있음(그림 1.9).
- 본 개발기술에 대한 전체 출원을 특허 출원일을 기준으로 1구간(1990~1994년), 2구간(1995년~1999년), 3구간(2000년~2004년), 4구간(2005년~2009년), 5구간(2010년~2014년) 및 6구간(2015년~2020년)의 6개의 구간으로 나누어 각 구간별 특허 출원인 수 및 출원 건수에 대한 상관관계를 통해 기술 성장 단계를 살펴봄.
- 본 개발기술 관련 분야의 발전 동향을 살펴보면, 1구간은 본 개발기술 관련 분야의 특허출원이 처음

으로 이루어진 시기로서 해당 구간은 태동기에 있다고 볼 수 있고, 2구간은 출원인 수와 출원 건수가 점차 증가하는 성장기로 볼 수 있음.

- 3구간 및 4구간은 출원인 수 및 출원 건수가 모두 급격하게 증가 후 다시 정체 또는 감소하는 시기로서 성숙기로 볼 수 있음.
- 5구간은 출원인 수 및 출원 건수가 모두 급격히 감소하는 쇠퇴기로 볼 수 있고, 최근 6구간에서 다시 출원인 수 및 출원 건수가 모두 증가하는 것은 다양한 신기술들의 출현으로 회복기에 접어든 시기로 볼 수 있음(그림 1.10).

표 1.2 분석 범위

구분	특허종류	분석기간	활용 DB
한국	공개, 공고, 등록	최근 30년 (1990.06~)	KEYWERT
미국	공개, 등록	최근 30년 (1990.06~)	KEYWERT
일본	공개, 공표, 공고, 등록	최근 30년 (1990.06~)	KEYWERT
유럽	공개, 등록	최근 30년 (1990.06~)	KEYWERT

표 1.3 검색식

구분	대표 검색식	검색수
한국	KEY:((프리캐스트 precast pre A/1 cast) A/2 (판넬* 패널* panel)) AND MIPC:(E*)	821
미국		543
일본		942
유럽		133

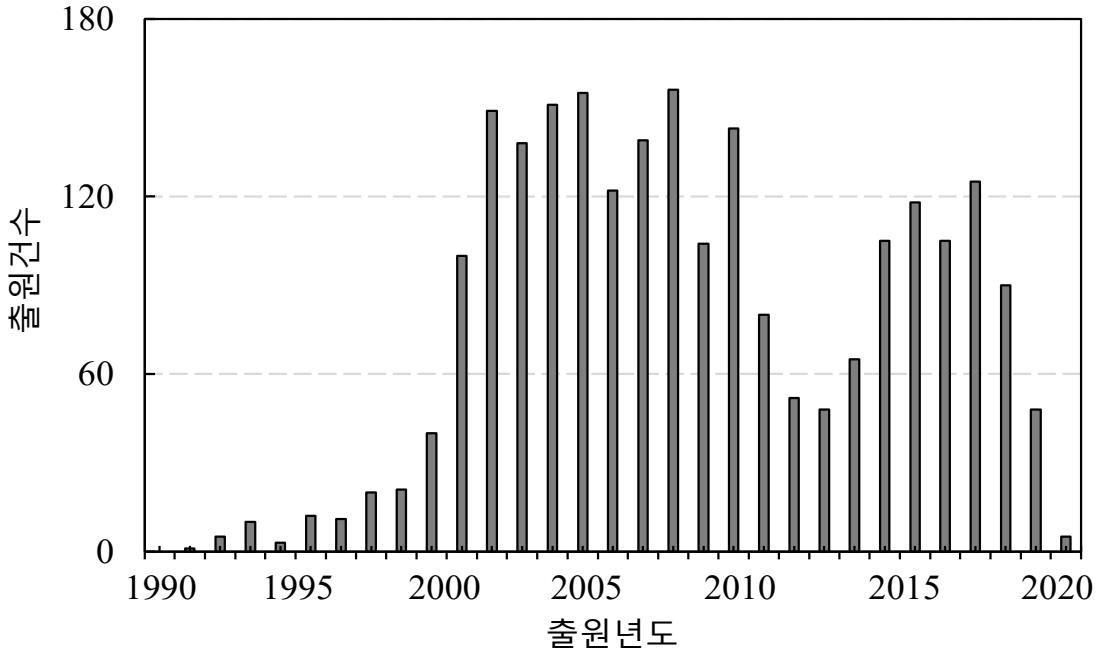


그림 1.7 연도별 특허출원 현황

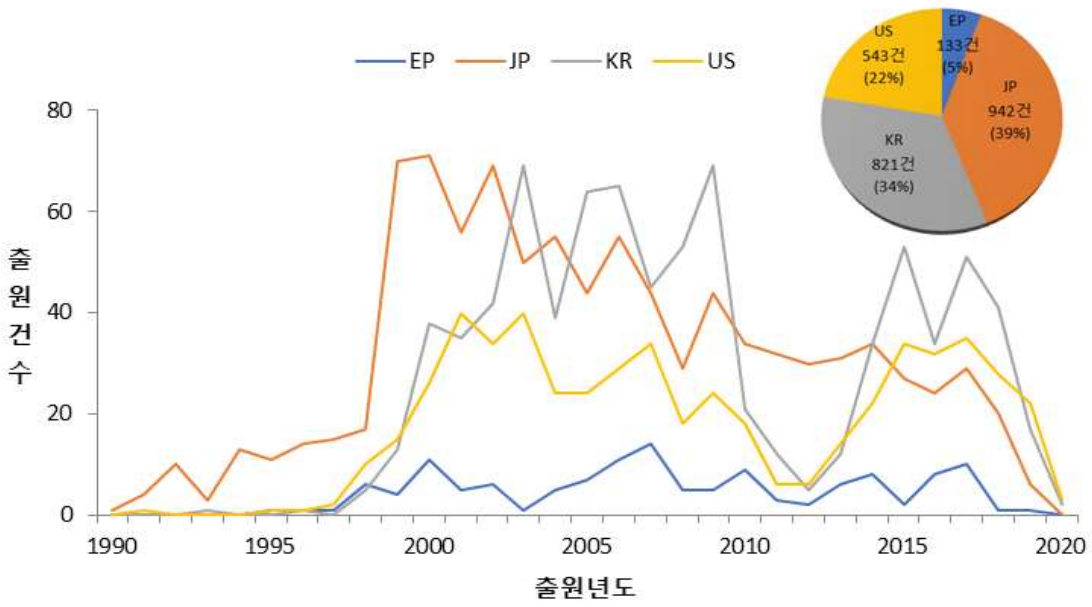


그림 1.8 국가별 특허출원 현황

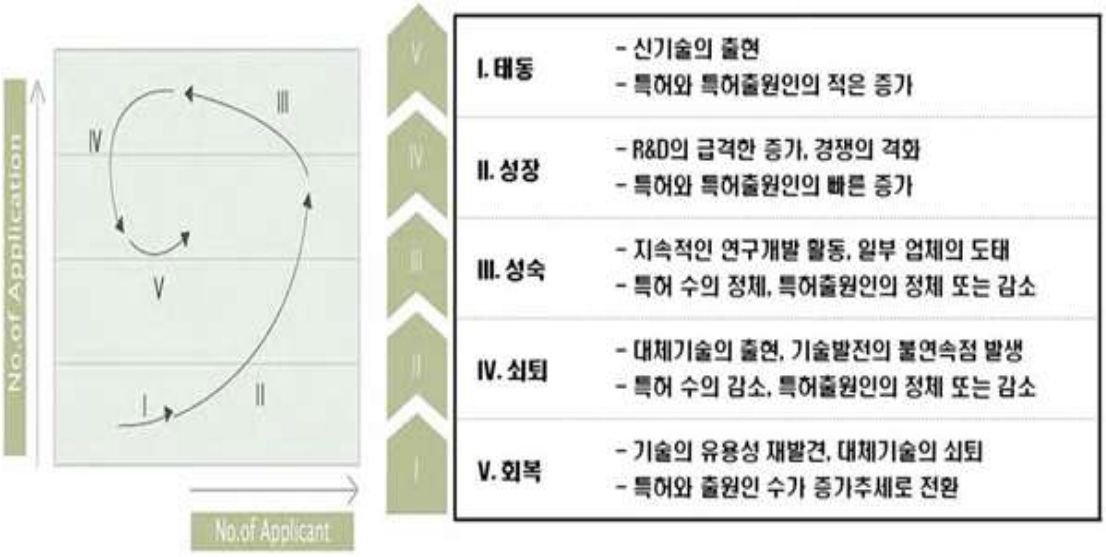


그림 1.9 기술 성장 단계

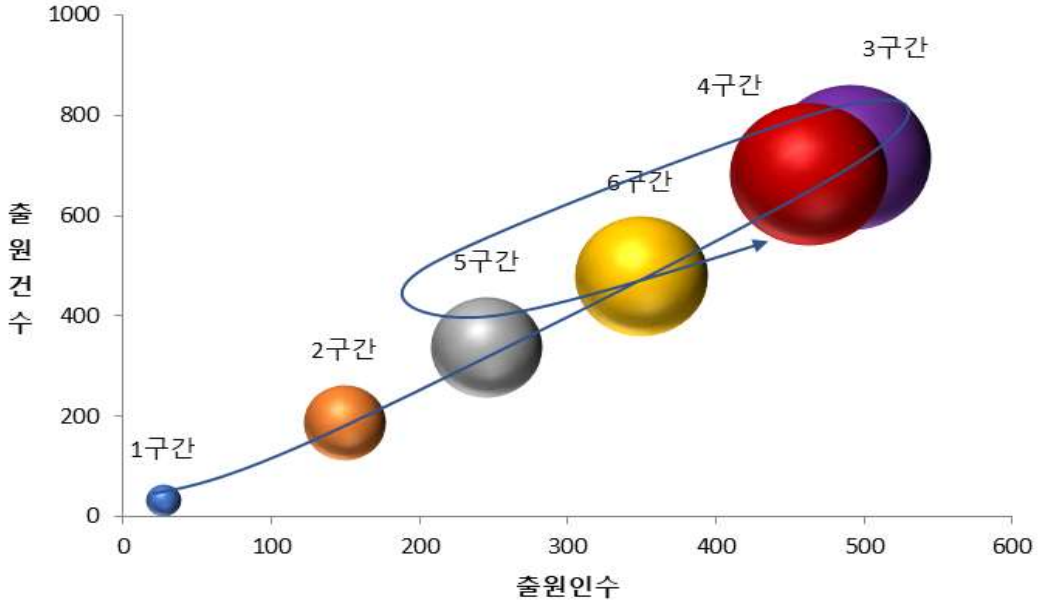


그림 1.10 본 개발기술 관련 분야의 발전 동향

1.5 출원인별 특허 동향

1.5.1 상위 출원인별 특허 출원 현황

- 그림 1.11은 누적 10건 이상의 상위 출원인에 대한 특허출원 현황을 나타냄.
- 본 개발기술 관련 분야의 선행특허를 출원인 유형별로 살펴보면, 전반적으로 기업체에서 활발한 출원을 하고 있는 것으로 나타남.
- 선행특허 중 출원 수를 기준으로 선택된 상위 출원인 중 한국 국적의 출원인은 하위를 점하고 있으며, 한국 국적의 출원인으로는 주식회사 동국대학교 산학협력단, 한국철도기술연구원이 가장 많은 출원 건수(각각 11건)를 나타내고 있음.
- 상위 출원인 중 최상위 5위권의 출원인을 살펴보면, SUMITOMO KINZOKU KOZAN SIPOREX KK(52건), ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD(31건), ASAHI KASEI HOMES CO(26건), CLION CO LTD(21건) 및 ASAHI KASEI CO(20건)로서 모두 일본 기업체로 나타나, 본 대상기술 분야에서는 일본 기업체가 특허출원을 선도한 것을 알 수 있음.

1.5.2 국가별 출원인 현황

- 그림 1.12~1.15는 국가별 출원인 국적 현황을 나타내고 표 1.4는 국가별 상위 출원인 현황을 나타냄.
- 한국 및 일본은 자국 출원에 집중하고 있고, 따라서, 한국 국적의 출원인은 자국 출원은 물론이고 적극적인 해외 출원을 통한 해외 시장 진입을 위한 교두보 마련이 요구됨.
- 추측컨대, 아시아 국가의 상위 출원인들은 해당 국가의 국적을 가지고 있는 것으로부터, 타 국가의 출원인들의 시장 진입이 어려운 실정이 반영된 것으로 볼 수 있음.
- 이에 대하여, 미국의 경우 미국과 캐나다 국적의 출원인이 주도하였고, 유럽의 경우에는 미주, 유럽 국가가 출원을 주도한 것으로 나타남.
- 각 국가별 상위 출원인 유형을 살펴보면, 한국은 연구소, 대학, 기업체 등 다양한 형태의 출원인이 주도하였고, 일본, 미국 및 유럽의 경우에는 기업체가 출원을 주도한 것으로 나타남.

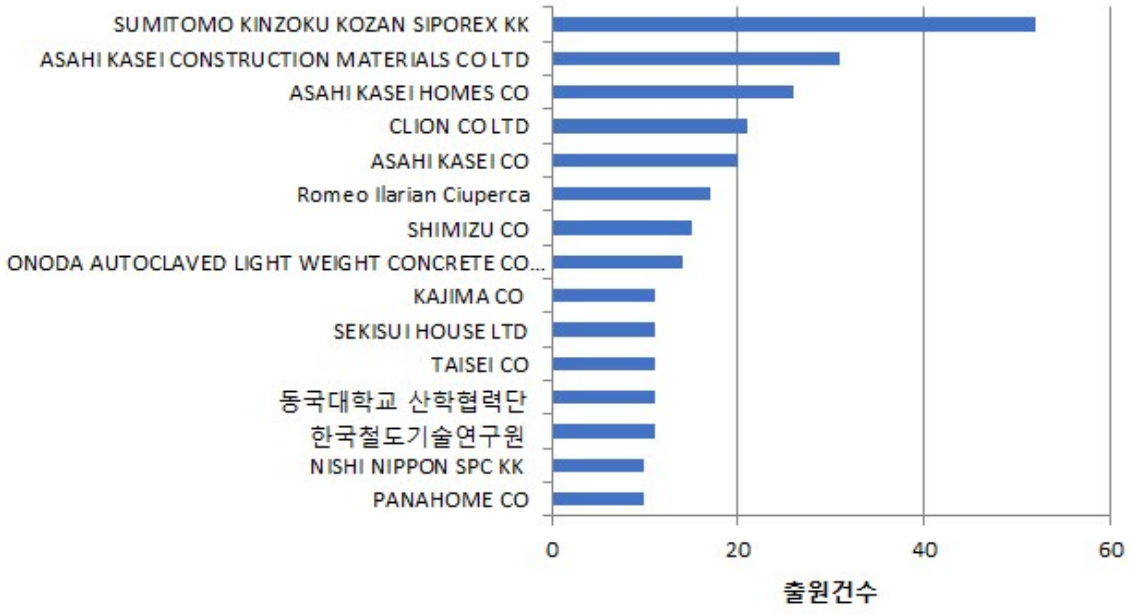


그림 1.11 상위 출원인별 특허출원 현황

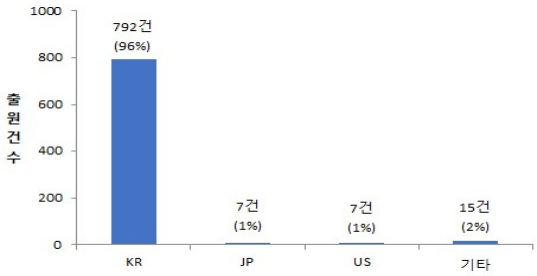


그림 1.12 출원인 국적별 출원 현황(한국)

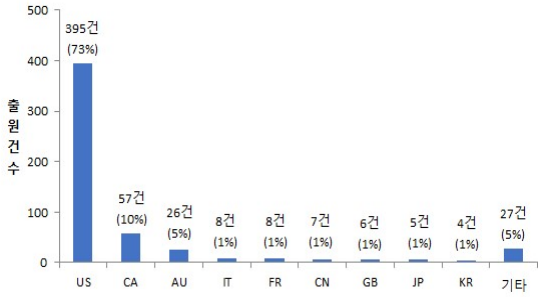


그림 1.13 출원인 국적별 출원 현황(미국)

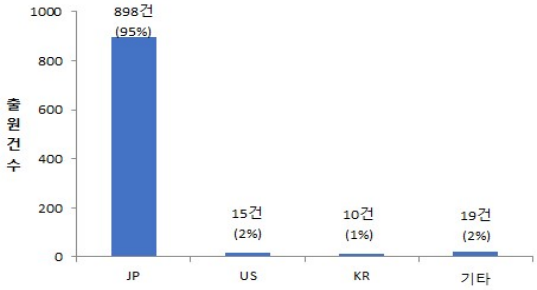


그림 1.14 출원인 국적별 출원 현황(일본)

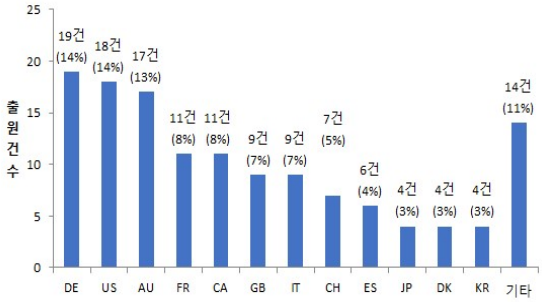


그림 1.15 출원인 국적별 출원 현황(유럽)

표 1.4.1 국가별 상위 출원인 현황

순위	KR	건수	US	건수
1	한국철도기술연구원	11	Romeo Ilarian Ciuperca	17
2	동국대학교 산학협력단	11	Meadow Burke, LLC	7
3	(주)에스앤씨산업	9	SWA Holding Company, Inc.	7
4	한국유지관리 주식회사	8	Dayton Superior Corporation	6
5	재단법인 포항산업과학연구원	8	Oldcastle Precast, Inc.	6
6	(주)엠프로	8	Joel Foderberg	5
7	이소라	7	Thuan Bui	5
8	한국건설기술연구원	7	Western Forms, Inc.	5
9	재단법인 한국재난연구원	6	LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION OLDCASTLE CANADA, INC	5
10	대림산업 주식회사	6	The Spancrete Group, Inc.	4

1.6 핵심 특허분석

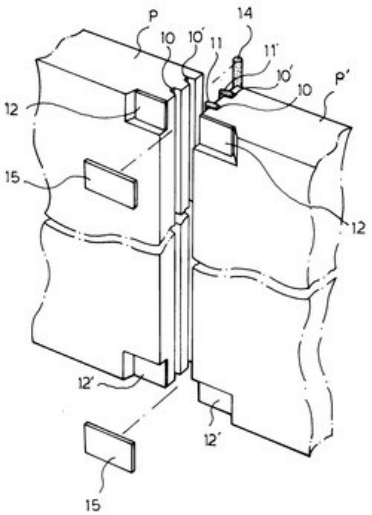
- 앞서 특허동향분석을 통해 검토한 유효특허들 중에서 높은 영향력 및 시장성을 나타낸 특허문헌을 핵심특허로 선정하여 이하 보다 상세히 설명함.
- 즉, 본 개발기술 관련 분야의 주요 흐름을 이루는 선행특허들 중 핵심적 특허들을 상세히 분석함으로써, 시사점을 도출하고 향후 연구 연구방향에 대한 대략적인 방향을 도출함.

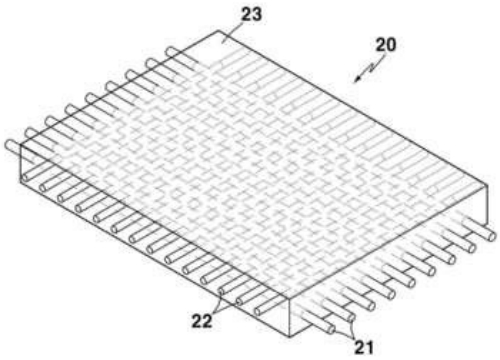
표 1.4.2 국가별 상위 출원인 현황

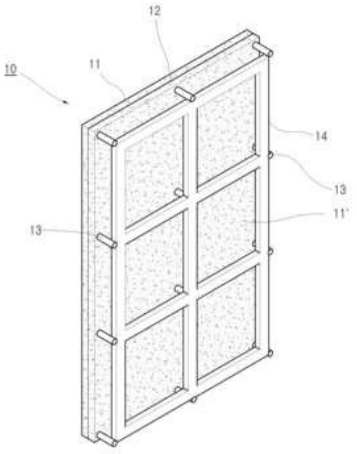
순위	JP	건수	EP	건수
1	SUMITOMO KINZOKU KOZAN SIPOREX KK	52	Spurrell, Shaun Anthony	3
2	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	31	Hibe A/S	3
3	ASAHI KASEI HOMES CO	26	Fabcon, Inc.	3
4	CLION CO LTD	21	Zambelli,Sergio	3
5	ASAHI KASEI CO	18	Woodstock Percussion Pty.Ltd.	2
6	SHIMIZU CO	14	Soletanche Freyssinet	2
7	ONODA AUTOCLAVED LIGHT WEIGHT CONCRETE CO LTD	14	SkidmoreOwings&MerrillLLP	2
8	TAISEI CO	11	Arteon, Marcel	2
9	SEKISUI HOUSE LTD	11	SRB Construction Technologies Pty Ltd.	2
10	KAJIMACO	11	BRENTMUIR DEVELOPMENTS (1993) LIMITED	2

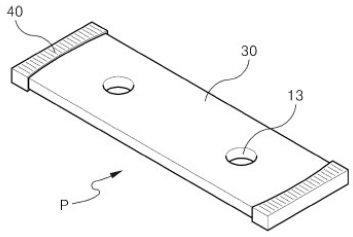
표 1.4.3 핵심특허 리스트

연번	출원인	발명의 명칭	법적상태
688	(주)연우건축구조기술사사무소 (주)한성	프리캐스트 콘크리트 패널의 구조 및 그 체결방법	등록
1006	(주)핸스	프리캐스트 콘크리트 패널 및 시공방법과 그 구조	등록
1360	주식회사 한국테크월	건물 외벽용 경량 프리캐스트 콘크리트 패널의 제조방법 및그 패널	등록
1553	주식회사 엠텍 | (주)매일 | 매일종합건설(주) | 매일엔지니어링(주)	콘크리트구조물 보강용 섬유-강판 복합패널과 이의 제조방법 및 이를 이용한 콘크리트구조물 보강공법	등록

출원정보	2003-0016365 (2003.03.17)	특허평가등급(KEYWERT)	A
패밀리	-		
출원인	(주)연우건축구조기술사사무소 | (주)한성		
명칭	프리캐스트 콘크리트 패널의 구조 및 그 체결방법		
해결과제	프리캐스트 패널을 효과적으로 사용하기 위하여 패널의 구조를 간단하게 하여 선행공정의 작업 효율을 향상시키고 현장 결합 시에도 무수축 몰탈의 시공공정을 제거하여 각 패널의 체결 시 우레탄(고무) 패킹 외에 외부 실링재를 추가로 삽입시키고 나사 결합시킴으로 작업이 완료되게 하여 작업공수를 절감시키고 공기를 단축시키며 또한 패킹 외의 추가적인 외부 실링재에 의해 외측 벽으로부터 진행되는 누수를 완벽하게 차단시킬 수 있는 프리캐스트 패널과 그 체결 방법을 제공하고자 함.		
과제해결 수단	벽체패널, 지붕패널, 슬라브패널 등과 같은 프리캐스트 패널(P)(P')의 양측으로 누수 차단 홈(10)(10')을 가공하고 패널(P)(P')의 일 측은 패킹(11)(11')을 삽입시켜 형성하고, 패널(P)(P')의 내측 상하부에는 단차를 주어 플레이트를 일체화 성형시켜 구성하는 프리캐스트 콘크리트 패널의 구조에 있어서, 상기 플레이트는 나사 봉이 형성된 나사봉 플레이트(13)(13')로서, 상기 나사봉 플레이트(13)(13')를 패널(P)(P')과 일체화 성형시킨 것을 특징으로 하는 프리캐스트 콘크리트 패널의 구조.		
대표도면			
권리범위 분석	[핵심 구성 및 효과] 종래 일반적인 철근과 콘크리트 타설에 의한 시공법과 프리캐스트 패널을 활용하면서도 체결구조의 미비점과 무수축 몰탈을 타설하여 시공하는 방법에 비하여 선행공정의 작업효율을 향상시켜 인건비와 공사비용을 절감시킬 수 있고 현장작업시의 무수축 몰탈의 시공공정을 제거하여 공기를 단축시킬 수 있고 외부 실링재를 추가적으로 사용하여 누수 및 습기의 유입을 방지하는 방수효과 등이 우수 [권리범위 판단] 콘크리트 패널의 구조에서 나사봉 플레이트(13)(13')를 패널(P)(P')과 일체화 성형시킨 구성을 구비할 경우 본 발명의 권리범위에 포함될 수 있음.		

출원정보	2005-0053370 (2005.06.21)	특허평가등급(KEYWERT)	A
패밀리	-		
출원인	(주)핸스건설		
명칭	프리캐스트 콘크리트 패널 및 시공방법과 그 구조		
해결과제	콘크리트 본체 상부로 노출되는 래티스바가 없어 프리캐스트 콘크리트 패널 상부에 슬래브를 시공하기 위한 철근의 배근이 용이하고 콘크리트 본체의 외측으로 노출된 주철근이나 배력철근을 접합하여 종이나 횡으로 인접된 프리캐스트 콘크리트 패널을 연결함으로써 연결부와 그 상부의 슬래브에 균열이 일어나지 않고, 돌출된 철근이 없어 증기양생으로 인한 철근의 녹 발생을 없애는 프리캐스트 콘크리트 패널 및 시공방법과 그 구조를 제공하고자 함.		
과제해결 수단	프리캐스트 방식으로 제작되고 상면은 굴곡되어 요철면의 형상을 갖는 본체와; 상기 콘크리트 본체의 내부에 소정의 간격을 두고 매립 배근되어 콘크리트 본체 밖까지 연장되도록 형성되는 주철근과; 상기 콘크리트 본체의 내부에 소정의 간격을 두고 상기 주철근과 교차되게 매립 배근되어 콘크리트 본체 밖까지 연장되도록 형성되는 배력철근과; 상기 콘크리트 본체의 상면에는 ㄷ자로 절곡되어 배근되며 일부가 상부로 돌출되게 형성되는 전단 철근과; 상기 콘크리트 본체에는 암나사산이 형성되어 매립되는 다수개의 매립너트; 및 교량 상부 거더와 거더 사이 또는 크로스빔과 크로스빔 사이의 치수에 적합한 규격인 6cm~14cm 두께로 이루어져 일체적으로 형성되는 것을 특징으로 하는 프리캐스트 콘크리트 패널.		
대표도면			
권리범위 분석	[핵심 구성 및 효과] 콘크리트 본체 상부로 노출되는 래티스바가 없어 프리캐스트 콘크리트 패널 상부에 슬래브를 시공하기 위한 철근의 가공 및 배근이 용이하고 증기양생으로 인한 철근의 녹이 발생하지 않으며, 콘크리트 본체의 외측으로 노출된 주철근이나 배력철근을 접합하여 종이나 횡으로 인접된 프리캐스트 콘크리트 패널을 연결함으로써 연결부와 그 상부의 슬래브에 균열이 일어나지 않음. [권리범위 판단] 콘크리트 본체 밖까지 연장되도록 형성되는 주철근과 콘크리트 본체 밖까지 연장되도록 형성되는 배력 철근, 일부가 상부로 돌출되게 형성되는 전단 철근, 매립너트를 구비하고, 거더와 거더 사이 또는 크로스빔과 크로스빔 사이의 치수에 적합한 규격인 일정 두께로 형성된 경우에 한해 본 발명의 권리범위에 포함될 수 있음.		

출원정보	2007-0130583 (2007.12.14)	특허평가등급(KEYWERT)	A
패밀리	-		
출원인	주식회사 한국테크월		
명칭	건물 외벽용 경량 프리캐스트 콘크리트 패널의 제조방법 및 그 패널		
해결과제	건물의 하중을 감소시켜 건물 구조체의 경량화를 이루는 것은 물론 공사비 및 공사기간을 대폭 단축할 수 있는 경량 프리캐스트 콘크리트 패널을 개발하고자 함.		
과제해결 수단	건물 외벽용 콘크리트 패널의 제조방법에 있어서, 거푸집(1)에 20 ~ 30 ㎜ 두께의 1차 타설 콘크리트 층(11)을 타설하는 단계, 1차 타설 콘크리트 층(11)의 상측에 매쉬(12)를 덮는 단계, 패널(10)의 전체 두께가 150 ~ 300 ㎜가 될 수 있도록 프레임(14)이 1차 타설 콘크리트층(11)과 이격되도록 프레임(14)의 한쪽에 다수 부착된 고정봉(13)의 절곡된 끝단을 1차 타설 콘크리트층(11)에 삽입하는 단계, 매쉬(12) 위에 20 ~ 30 ㎜ 두께의 2차 타설 콘크리트층(11')을 다시 타설하여 양생시키는 단계로서 제조됨을 특징으로 하는 건물 외벽용 경량 프리캐스트 콘크리트 패널의 제조방법.		
대표도면			
권리범위 분석	[핵심 구성 및 효과] 종래의 패널(10)과 같이 철근(3)이 사용되지 않고 콘크리트의 사용이 종래와 대비하였을 때 1/3 ~ 1/4 정도로 감소되기 때문에 중량이 가볍고, 금속재 또는 섬유재 매쉬(12)와 철강 프레임(14)으로 강도를 확보하여 견고하며 제조 공정이 단순함. [권리범위 판단] 경량 프리캐스트 콘크리트 패널패널(10)의 전체 두께가 목표범위에 들 수 있도록 프레임(14)이 1차 타설 콘크리트 층(11)과 이격되도록 프레임(14)의 한쪽에 다수 부착된 고정봉(13)의 절곡된 끝단을 1차 타설 콘크리트 층(11)에 삽입하는 공정을 채용할 경우 본 발명의 권리범위에 포함될 수 있음.		

출원정보	2009-0068846 (2009.07.28)	특허평가등급(KEYWERT)	A
패밀리	-		
출원인	주식회사 엠텍 | (주)매일 | 매일종합건설(주) | 매일엔지니어링(주)		
명칭	콘크리트구조물 보강용 섬유-강판 복합 패널과 이의 제조방법 및 이를 이용한 콘크리트구조물 보강공법		
해결과제	콘크리트구조물 보강에 사용되는 섬유-강판 복합 패널의 강판의 내부식성을 증가시키고, 수지접착제의 접착성능을 강화하여 부식인자의 침투를 방지함과 동시에 섬유-강판 복합 패널의 강판이 노출되는 단부 및 천공홀 천공부위 및 앵커 정착용 너트의 부식을 원천적으로 방지하도록 한 콘크리트구조물 보강용 섬유-강판 복합 패널을 제공하고자 함.		
과제해결 수단	전체적으로 사각판상체의 강판으로 이루어지고, 그 내부에 일정한 간격을 유지함과 동시에 소정의 직경(Φ20~22mm)으로 천공되는 천공홀(12)이 형성되며, 강판의 표면에 아연도금 조성물이 코팅된 전기아연도금강판(10)과, 상기 전기아연도금강판(10)의 표면과 이면에 접착됨과 동시에 수지접착제 조성물에 의해 함침되는 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 중의 어느 하나로 구성되거나 또는 둘 이상의 합성으로 구성되며, 소정의 직경(Φ14mm)으로 천공되는 천공홀(13)이 형성된 보강섬유(20)로 이루어지는 패널(30)과; 상기 패널(30)의 양단부가 일정폭만큼 삽입되며, 전체적으로 직육면체 형상으로 이루어지고, 내측으로 일정깊이로 요입되는 삽입 홈(42)이 형성된 마감 캡(40)으로 구성됨을 특징으로 하는 콘크리트구조물 보강용 섬유-강판 복합패널.		
대표도면			
권리범위 분석	[핵심 구성 및 효과] 콘크리트구조물 보강에 사용되는 섬유-강판 복합 패널의 강판의 내부식성을 증가시키고, 수지접착제의 접착성능을 강화하여 부식인자의 침투를 방지함과 동시에 강판이 노출되는 절단부에는 별도의 마감캡을 씌우고, 기타 복합 패널의 앵커 천공부위 및 앵커 정착용 너트의 부식에는 에폭시수지로 충전함으로써, 복합 패널의 강판이 외부로 노출되는 것을 방지하여 하수나 해수로부터의 강판의 부식을 제조단계에서부터 시공단계에 이르기까지 원천적으로 방지. [권리범위 판단] - 전기아연도금강판, 수지접착제 조성물에 의해 함침되는 보강섬유로 이루어진 패널 및 마감캡을 모두 구비할 경우 본 발명의 권리범위에 포함될 수 있음.		

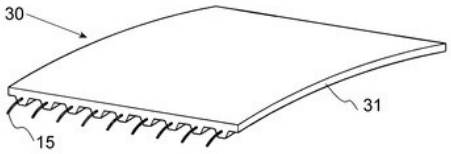
1.7 선행특허 저촉 가능성 및 회피 방안

- 본 개발기술의 연구 개발을 통해 향후 최종 산출되는 개발품의 생산, 판매 등 실시에 있어 최소한의 안정적인 실시를 위해서는 등록된 특허기술과 저촉되지 않아야 하며, 만일 본 개발기술의 연구 방향과 유사한 기술을 보유한 특허가 있다면 이를 회피할 수 있는 수단을 강구해야 함.
- 표 1.5에는 현재 권리를 유지하고 있는 특허 중 본 개발기술에 속한 구체적인 분야인 PC 판넬과 관련된 선행특허를 나열함.
- 저촉 가능성 판단 시 등록특허뿐 아니라 공개된 특허 중에서도 등록될 경우 문제될 수 있으므로, 연구 개발을 거쳐 향후 실제 실시하게 될 개발품에 대해서는 공개특허에 대해서도 비교 검토가 필요함.
- 본 개발기술의 개발품이 향후 선행특허에 저촉되지 않기 위해서는 상기 나열된 등록된 특허들(거절, 취하, 소멸된 특허 제외)에 대해 기본적으로 선행특허에 사용된 필수 구성들을 사용하지 않는 것이 바람직함.
- 그러나 향후 연구 개발 내용에 따라서는 선행특허에 사용된 필수 구성들 중 1개 이상을 사용할 수도 있는데, 이 경우에는 ① 선행특허에 사용된 필수 구성이 복수 개일 경우 그 나머지 필수 구성들 중 적어도 하나의 구성을 사용하지 않거나, ② 선행특허에 사용된 필수 구성들 모두를 사용할 수도 있을 경우 적어도 하나의 구성을 생략하거나 치환함으로써 선행특허에 대한 저촉을 회피할 수 있음.
- 이하, 표 6에 제시된 선행특허들에 대한 저촉 가능성 및 회피 방법에 관하여 예시적으로 살펴봄.
- 이상, 본 개발 기술의 선행특허에 대한 저촉 가능성 및 회피 방안에 대해 각 주요 선행특허별로 특허청구 범위에 기재된 구성을 중심으로 비교 검토함.
- 현재 등록 유지중인 기존 PC 판넬 관련 기술은 대부분 콘크리트 소재 자체의 성능 개선보다는 각종 보강재의 구조적 결합을 통해 수행되고 있음.
- 따라서 본 개발 기술이 예정하고 있는 열메타 PC 패널에 대응되어 직접적인 구성 비교가 가능한 특허는 전무한 것으로 보여 본 개발 기술은 선행특허에 대한 저촉 문제로부터 자유로울 것으로 사료됨.
- 따라서, 본 개발 기술의 선행특허들에 대한 침해의 문제가 발생할 가능성은 매우 낮아, 향후 기술 개발 후 안정적인 실시에 특별한 문제는 없을 것으로 판단됨.

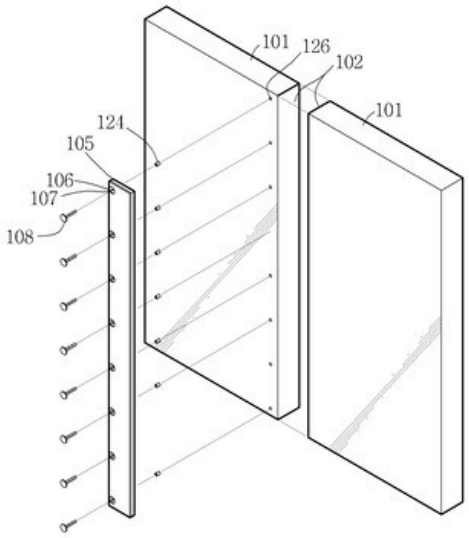
표 1.5 저촉 가능성 분석대상 선행특허 목록

연번	국가	출원번호	출원인	발명의 명칭
490	KR	2001-0071239	김준성	콘크리트 구조물 보강용 패널
1224	KR	2006-0129023	장혁수	콘크리트 패널과 콘크리트 패널용 방수기구 및 콘크리트 패널의 조인트 방수방법
1360	KR	2007-0130583	주식회사 한국테크월	건물 외벽용 경량 프리캐스트 콘크리트 패널의 제조방법 및그 패널
2167	KR	2016-0170084	김용술	경량콘크리트 패널
2221	KR	2017-0054920	주식회사 네오시티	프리캐스트 경량 콘크리트 패널

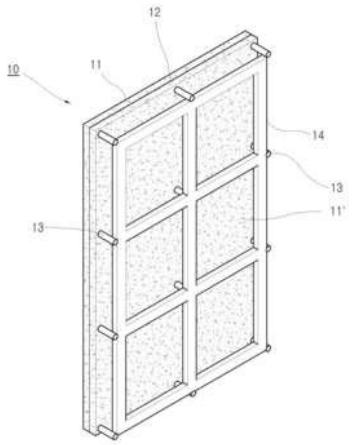
연번	490	명칭	콘크리트 구조물 보강용 패널

대표 청구항	보강 대상 구조물의 하부에 부착되어 구조물의 내력을 증가시키는 콘크리트 구조물 보강용 패널에 있어서, 미리 당겨져 프리스트레스가 가해진 인장재; 및 하부 측에 상기 인장재가 매립 설치되며, 상기 매립된 인장재의 수축력에 의하여 전체적으로 중앙부가 원호 형으로 솟아오른 장방형 프리플렉스 패널; 을 포함하는 것을 특징으로 하는 콘크리트 구조물 보강용 패널.	대표 도면	
		검토	- 선행특허는 프리스트레스를 가한 인장재에 의해 전체적으로 원호 형상으로 가운데가 볼록하게 된 콘크리트 구조물 보강용 패널 및 그 제작 방법을 제공함. - 따라서 프리스트레스를 가한 인장재를 적용을 예정하지 않는 한 선행특허에 대한 저촉 문제 없음.

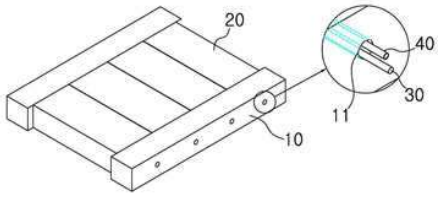
연번	1224	명칭	콘크리트 패널과 콘크리트 패널용 방수기구 및 콘크리트패널의 조인트 방수방법

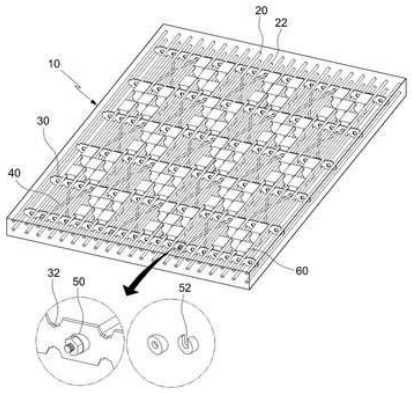
대표 청구항	세그먼트로 된 서로 다른 콘크리트 패널이 접합되는 접합면으로부터 인접한 내, 외측면 중 적어도 어느 하나에서 접합면의 길이방향으로 연장 형성되는 단턱과; 앵커볼트가 체결되는 슬리브가 삽입될수 있도록 단턱에서 접합면을 향하여 일정 깊이로 형성된 슬리브 삽입 홈을 포함하는 것을 특징으로 하는 수팽창 지수재 고정용 콘크리트 패널.	대표 도면	
		검토	- 선행특허는 콘크리트 패널의 접합시공이 완료된 상태에서 접합면으로 물이 침투하려 할 때, 물이 수팽창 지수재와 반응하게 되어 수팽창 지수재의 용적이 팽창함에 따라 고정 홈에 수팽창 지수재가 더욱 밀착됨으로써, 누수를 방지할 수 있는 기술임. - 선행특허는 패널의 접합시공이 완료 후 접합에 관련된 기술로서, 콘크리트 패널 재료 자체로 저촉 문제는 없으나, 향후 접합 시공에 있어서는 본 특허를 참조할 필요 있음.

연번	1360	명칭	건물 외벽용 경량 프리캐스트 콘크리트 패널의 제조방법 및 그 패널

대표 청구항	건물 외벽용 콘크리트 패널의 제조방법에 있어서, 거푸집(1)에 20 ~ 30 ㎜ 두께의 1차 타설 콘크리트층(11)을 타설하는 단계, 1차 타설 콘크리트 층(11)의 상측에 매쉬(12)를 덮는 단계, 패널(10)의 전체 두께가 150 ~ 300 ㎜가 될 수 있도록 프레임(14)이 1차 타설 콘크리트 층(11)과 이격되도록 프레임(14)의 한쪽에 다수 부착된 고정봉(13)의 절곡된 끝단을 1차 타설 콘크리트 층(11)에 삽입하는 단계, 매쉬(12) 위에 20 ~ 30 ㎜ 두께의 2차 타설 콘크리트 층(11')을 다시 타설하여 양생시키는 단계로서 제조됨을 특징으로 하는 건물 외벽용 경량 프리캐스트 콘크리트 패널의 제조방법.	대표 도면	
		검토	- 선행특허는 종래의 패널(10)과 같이 철근(3)이 사용되지 않고 콘크리트의 사용이 종래와 대비하였을 때 1/3 ~ 1/4 정도로 감소되기 때문에 중량이 가볍고, 금속재 또는 섬유재 매쉬(12)와 철강 프레임(14)으로 강도를 확보하여 견고하며 제조공정을 단순화시킴. - 패널 재료 자체로 저촉 문제는 없으나, 패널(10)의 전체 두께가 목표범위에 들 수 있도록 프레임(14)이 1차 타설 콘크리트 층(11)과 이격되도록 프레임(14)의 한쪽에 다수 부착된 고정봉(13)의 절곡된 끝단을 1차 타설 콘크리트 층(11)에 삽입하는 공정을 채용하지 않도록 설계할 필요 있음.

연번	2167	명칭	경량콘크리트 패널

대표 청구항	1쌍의 횡보(10); 및 상기 횡보(10)에 연결되는 다수 개의 콘크리트블록(20);을 포함하는 경량콘크리트 패널에 있어서, 상기 횡보(10)는, 상기 콘크리트블록(20)에 대응되는 위치에 복수 개의 파이프(11)가 상기 콘크리트블록(20)의 길이방향과 동일한 방향으로 내설되고, 상기 파이프(11)를 통해 상기 콘크리트블록(20) 내부에 몰탈이 충진되며, 상기 콘크리트블록(20)은, 보정철재 몸체(21); 상기 보정철재 몸체(21)의 내부에 보정철재 몸체(21)의 높이방향으로 가로지리는 복수의 격벽(22); 및 상기 격벽(22)에 의해 다수 공간이 형성된 콘크리트블록(20) 내부에 다수 개 배열되는 경량소재(23);를 포함하되, 상기 콘크리트블록(20)의 보정철재 몸체(21)의 양단 내측에는 3개의 인장향상용 파이프(26)가 배열되고, 상기 인장향상용 파이프(26)를 따라 인장향상용 와이어로프(27)가 나선형으로 연결되어 삽입되며, 상기 보정철재 몸체(21)의 내부가 몰탈로 충진되는 것을 특징으로 하는, 경량콘크리트 패널.	대표 도면	
		검토	- 선행특허는 재활용 소재를 활용함으로써 소재의 지속적인 재활용을 도모함과 함께 환경보호를 실천할 수 있으며, 콘크리트 패널이 사용되는데 있어서 경량화된 콘크리트 패널을 사용하여 작업이 용이하도록 함과 동시에 콘크리트 패널의 강도유지를 확보하도록 하는 기술임. - 선행특허는 재활용 소재를 활용한 경량콘크리트 패널에 관한 것으로, 패널 재료 자체로 저촉 문제없고, 재활용 소재의 활용을 예정하지 않는 한 저촉 문제없음.

연번	2221	명칭	프리캐스트 경량 콘크리트 패널	
대표 청구항	콘크리트부재와; 상기 콘크리트부재의 내부 상측에 종 방향으로 상호 이격 배치되는 상부철근들과; 상기 콘크리트부재의 내부 하측에 종 방향으로 상호 이격 배치되는 하부철근들과; 상기 상부철근들과 하부철근들의 사이에 횡 방향으로 상호 이격 배치되는 플레이트들과; 상기 플레이트들 상호간을 결합하는 보조철근들;을 포함하고, 상기 플레이트들의 상측과 하측에는 상기 상부철근과 하부철근이 삽입되는 요 홈들이 형성되며, 상기 보조철근들은 상기 플레이트들의 중앙부를 × 자 형상으로 상호 결합함으로써 구조적 강성을 증대시키고 비틀림을 방지하며, 상기 요 홈들은 내측에 보조 요 홈을 형성함으로써, 과도한 하중 하에서 상기 상부철근들 또는 상기 하부철근들의 굴절이 방지되는 것을 특징으로 하는 프리캐스트 경량 콘크리트 패널.		대표 도면	
			검토	- 선행특허는 콘크리트 부재의 구조적 강성을 증대시키고 비틀림을 방지하는 효과 구현을 위한 상부철근, 하부철근, 플레이트 및 보조철근의 배치 구조에 권리범위가 미침. - 따라서 콘크리트 부재의 구조적 강성을 증대를 위한 보조수단의 적용을 예정하지 않는 한 선행특허에 대한 저촉 문제 없음.

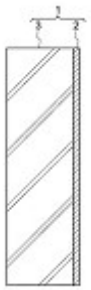
1.8 본 개발기술의 차별성 및 특허 권리화 방안

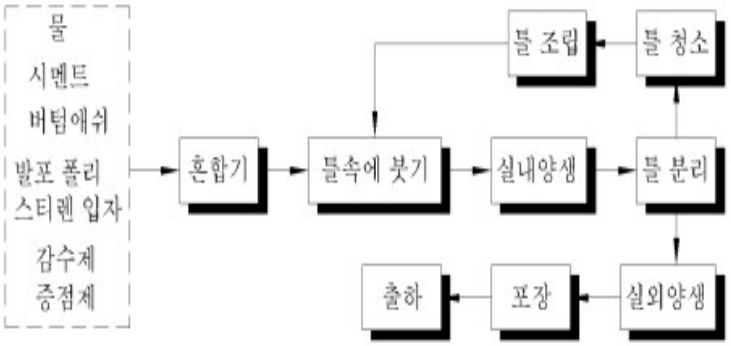
1.8.1 개발기술의 특허 권리 확보 가능성 검토

- 본 개발 기술에서 선행특허에 대한 회피 가능한 열 메타 PC 패널 기술을 개발한다고 하여 본 대상 기술에서 개발된 관련 기술이 특허성을 인정받아 독자적인 특허 획득이 가능하지는 않음. 즉, 선행특허에 대한 저촉 가능성과는 별개로 독자적인 특허 획득이 가능한지는 등록 특허는 물론 모든 공개된 선행특허(소멸된 등록 특허도 포함)에 대비하여 기술적 차별성 여부에 따름. 따라서, 본 개발 기술의 특허 획득 가능성 판단을 위해서는 적어도 분석 대상 특허를 모두 대상으로 하여 비교 검토해야 함.
- 본 개발기술에 대한 구체적인 기술내용은 Ⅰ 항목에서 상술하였으며, 와이어로프 등을 이용한 보강 기술을 제1기술, 제2기술, 제3기술 및 제4기술로 한정함.
- 전술한 바와 같이, 상기 본 개발 기술 관련 분야를 기술 분류 A~D로 구분한 바 있으며, 그 중 본 개발기술이 속한 분야인 와이어로프 등을 이용한 보강 기술(C) 분야에서 대표적인 선행특허를 선별하여 기술적 특징들을 비교 검토함(표 1.6, 1.7.1 및 1.7.2).
- 본 개발 기술의 특허 가능성에 대하여 본 개발 기술이 달성하고자 하는 목적과 유사하거나 유사한 구성을 가진 선행특허를 선별하고, 선별된 특허 명세서에 기재된 내용을 본 개발 기술과 비교 검토하여 판단함.
- 이상 살펴본 바와 같이, 본 개발 기술의 요소 기술인 ⅰ) 열전도율이 낮은 열 메타 재질의 선정 및 구조 배열과 내화에 대한 최적화 기술, ⅱ) 기포와 바텀애시 골재 기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 융합을 위한 배합설계 기술, ⅲ) 열 메타 기반 고단열·지속 가능 PC 패널의 접합 모듈화 기술, ⅳ) 사용성 및 구조적 안전성 확보를 위한 단면 상세 설계기술에 대해서는 선행특허에서 구체적으로 언급하고 있지 않음.
- 따라서, 본 개발 기술인 열 관류율 0.15 $W/m^2 \cdot K$의 성능을 확보한 지속 가능 열 메타 PC 패널 기술의 요소기술 모두 특허 등록가능성이 높을 것으로 사료됨.

표 1.6 본 개발기술과 관련된 주요 선행특허

연번	국가	출원번호	출원인	발명의 명칭
8	JP	1992-064270	ASAHI KASEI CO	내열 단열 복합 패널
48	JP	1996-003755	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	경량 기포 콘크리트 패널
942	KR	2005-0006737	(주)에이스 패널	저회를 이용한 경량 콘크리트 패널의 제조방법
2010	JP	2015-131258	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	경량 기포 콘크리트 패널

No	발명의 명칭		
8	경량 기포 콘크리트 패널		
▫ 서지사항			
국가코드	JP	문헌종류 코드	A
출원번호	2015-131258 (2015.06.30)	공개/등록번호	JP 2016-027238 A (2016.02.18)
출원인	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	패밀리 문헌번호	JP 2016027238 A
▫ 특허요지			
요약	(과제) 두께나 밀도를 크게 하지 않고 내화 성능을 향상시킬 수 있다 경량 기포 콘크리트 패널을 제공한다. (해결수단) 경량 기포 콘크리트 3의 표면에, 복사열을 흡수 또는 반사하는 복사열 흡수 반사 성분이, 경량 기포 콘크리트 3의 단위면적당 0.3 kg/m^{2}이상 또한 8.0 kg/m^{2}이하의 양 함유되어있다. (선택도) 도 1.		
대표청구항	[청구항1] 경량 기포 콘크리트의 표면에, 복사열을 흡수 또는 반사하는 복사열 흡수 반사 성분이, 상기 경량 기포 콘크리트의 단위면적당 0.3 kg/m^{2}이상 또한 8.0 kg/m^{2}이하의 양 함유되어 있는 것을 특징으로 하는, 경량 기포 콘크리트 패널.		
도면			

No	발명의 명칭		
48	저회를 이용한 경량 콘크리트 패널의 제조방법		
▫ 서지사항			
국가코드	KR	문헌종류 코드	A
출원번호	2005-0006737 (2005.01.25)	공개/등록번호	KR 2006-0086005 A (2006.07.31)
출원인	(주)에이스 패널	패밀리 문헌번호	KR 20060086005 A
▫ 특허요지			
요약	본 발명은 건물의 내부 칸막이로 사용하고자 저회를 이용한 경량 콘크리트 패널 및 그 제조방법에 관한 것으로, 경량콘크리트 패널에 저회를 활용함으로써 산업부산물을 재활용하여 환경을 보전하는 것과 함께 경량골재와 모래를 대체하여 저회의 대형 수요처를 확보할 수 있게 하는 데 목적이 있다. 이를 위해 저회와 시멘트 및 발포 폴리스티렌 비드를 혼합하는 혼합물 준비 단계와, 준비된 혼합물을 형틀에 주입하는 형틀 주입 단계와, 형틀에 주입된 혼합물을 양생하는 실내 양생 단계와, 실내 양생된 혼합물을 형틀에서 분리하는 형틀 분리 단계와, 형틀에서 분리되는 혼합물을 양생하는 실외 양생단계와, 혼합물과 분리된 형틀을 청소하여 다시 조립하는 형틀 청소 조립단계를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 저회를 이용한 경량 콘크리트 패널의 제조방법을 제공한다.		
대표청구항	[청구항1] 저회와 시멘트 및 발포 폴리스티렌 비드를 혼합하는 혼합물 준비 단계와, 준비된 혼합물을 형틀에 주입하는 형틀 주입 단계와, 형틀에 주입된 혼합물을 양생하는 실내 양생 단계와, 실내 양생된 혼합물을 형틀에서 분리하는 형틀 분리 단계와, 형틀에서 분리되는 혼합물을 양생하는 실외 양생 단계와, 혼합물과 분리된 형틀을 청소하여 다시 조립하는 형틀 청소 조립단계를 포함하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 저회를 이용한 경량 콘크리트 패널의 제조방법.		
도면			

No	발명의 명칭		
942	경량 기포 콘크리트 패널		
▫ 서지사항			
국가코드	JP	문헌종류 코드	B2
출원번호	1996-003755 (1996.01.12)	공개/등록번호	JP 3645022 B2 (2005.02.10)
출원인	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	패밀리 문헌번호	JP H09189093 A, JP 3645022 B2
▫ 특허요지			
요약	(57)【요약】 【과제】 양호한 패널 절단성을 가져, 한편, 높은 패널 강도를 가지는 얇은 옷감의 경량 기포 콘크리트 패널을 제공한다. 【해결 수단】 보강재에 라스망 등의 철망이 매몰 된 얇은 옷감의 경량 기포 콘크리트에 있어, 패널 표면에서 해경량 기포 콘크리트의 보강재 2까지의 범위에, 압압에 의해 형성되는 고비중부에서 되는 것 보강 리브 1이, 복수 개소에 형성되고 있는 것을 특징으로 하는 경량 기포 콘크리트 패널.		
대표청구항	[청구항1] 보강용의 철망이 매설된 얇은 옷감의 경량 기포 콘크리트 패널에 있어서, 표면에 평행하는 도랑 모양부를 복수 형성 해 요철 모양으로 해, 한편, 그 표면으로부터 패널 내부의 보강 철망까지의 범위에 고비중부의 보강 리브가 형성되고 있는 것을 특징으로 하는 경량 기포 콘크리트 패널.		
도면			

No	발명의 명칭		
2010	내열 단열 복합 패널		
▫ 서지사항			
국가코드	JP	문헌종류 코드	B2
출원번호	1992-064270 (1992.03.19)	공개/등록번호	JP 3089084 B2 (2000.07.14)
출원인	ASAHI KASEI CO	패밀리 문헌번호	JP H05261850 A, JP 3089084 B2
▫ 특허요지			
요약	(57)【요약】 【구성】 경량 기포 콘크리트의 표면에 거푸집을 설치해, 페놀 수지 발포체 원료를 흘려 넣어, 발포 경화시키는 것에 의해서 얻을 수 있는 내열성, 단열성을 가지는 복합 패널. 【효과】 간단한 방법에 따라 접착성, 투습성, 단열성, 내열성, 내구성이 뛰어난, 내열, 단열 복합 패널을 제공할 수 있다.		
대표청구항	[청구항1] 오토클레이브 양생 한 경량 기포 콘크리트 패널 표면에, 페놀 수지 발포체 원료를 흘려 넣어, 경량 기포 콘크리트 패널과 페놀 수지 발포체가 접착제 없이 일체 성형에 따라 접합되고 있는 것을 특징으로 하는 복합 패널.		
도면	도면없음		

표 1.7.1 선행기술 및 본 개발기술 간의 비교·분석 내용 - 1

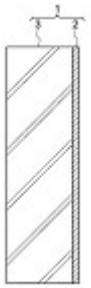
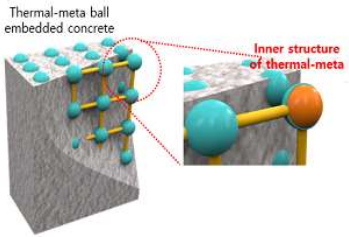
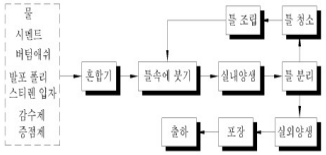
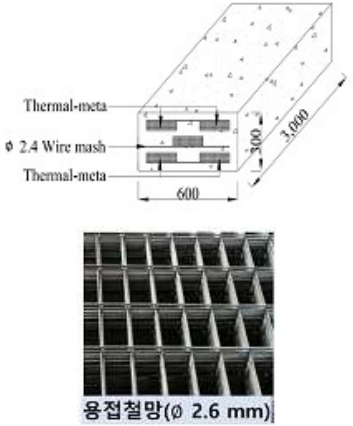
연번	선행기술명	출원인/특허권자	기술내용	선행기술 도면	개발기술 도면	선행기술과의 차별성
8	경량 기포 콘크리트 패널 (JP2015-131258)	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	- 두께나 밀도를 크게 하지 않고 내화 성능을 향상 - 경량 기포 콘크리트의 표면에, 복사열을 흡수 또는 반사하는 복사열 흡수 반사 성분이, 상기 경량 기포 콘크리트의 단위면적당 0.3 kg/m^{2}이상 또한 8.0 kg/m^{2}이하의 양 함유되어 있는 것을 특징으로 하는, 경량 기포 콘크리트 패널.			- 선행기술에서도 경량 기포 콘크리트 패널의 내화 성능 향상을 위한 기술적 수단을 채용하고 있으나, 표면에 복사열을 흡수 또는 반사하는 복사열 흡수 반사 성분을 함유시키는 방식임. - 이에 대하여 본 개발기술은 열메타 소재가 피복 두께를 확보하면서 무기질계인 콘크리트의 내부에 설치되어 내화성능을 확보할 수 있는 점에서 차별성이 있음.
48	저회를 이용한 경량 콘크리트 패널의 제조방법 (KR2005-0006737)	(주)에이스 패널	- 경량콘크리트 패널에 저회를 활용함으로써 산업부산물을 재활용하여 환경을 보전하는 것과 함께 경량 골재와 모래를 대체함. - 저회와 시멘트 및 발포 폴리스티렌 비드를 혼합, 형틀에 주입 및 양생하는 단계를 포함.			- 선행기술에서 경량 콘크리트 패널에 산업부산물인 저회를 활용하는 점은 유사하나, 유기계 소재와의 혼합 기술임. - 이에 대하여 본 개발 기술은 무기계 소재 개발기술로 기포와 바텀애시 경량 골재 콘크리트의 융합을 위한 최적 배합기술을 제시하고 있는 점에서 차별성이 있음.

표 1.7.2 선행기술 및 본 개발기술 간의 비교·분석 내용 - 2

연번	선행기술명	출원인/ 특허권자	기술내용	선행기술 도면	개발기술 도면	신청기술과의 차별성
942	경량 기포 콘크리트 패널 (JP1996-003755)	ASAHI KASEI CONSTRUCTION MATERIALS CO LTD	- 양호한 패널 절단성을 가져, 한편, 높은 패널 강도를 가지는 얇은 두께의 경량 기포 콘크리트 패널을 제공. - 보강용의 철망이 매설된 얇은 두께의 경량 기포 콘크리트 패널에 있어서, 표면에 평행하는 도랑 모양부를 복수 형성 해 요철 모양으로 해, 한편, 그 표면으로부터 패널 내부의 보강 철망까지의 범위에 고비중부의 보강 리브가 형성되고 있는 것을 특징으로 하는 경량 기포 콘크리트 패널.			- 선행 기술은 패널 절단성과 높은 패널 강도를 위해 철망이 매설된 얇은 두께의 경량 기포 콘크리트 패널 표면에 평행하는 도랑 모양부를 형성함. - 이에 대하여 본 개발기술은 구조적 안전성 확보를 위한 용접철망 배근기술로, 건조수축 균열 및 풍하중에 대한 저항성을 고려한 용접철망 배근기술에 관한 점에서 차별성이 있음.
2010	내열 단열 복합 패널 (JP1992-064270)	ASAHI KASEI CO	- 간단한 방법으로 접착성, 투습성, 단열성, 내열성, 내구성이 뛰어난, 내열, 단열 복합 패널을 제공. - 오토클레이브 양생 한 경량 기포 콘크리트 패널 표면에, 페놀 수지 발포체 원료를 흘려 넣어, 경량 기포 콘크리트 패널과 페놀 수지 발포체가 접착제 없이 일체 성형에 따라 접합되고 있는 것을 특징으로 하는 복합 패널.	-	-	- 선행기술은 유기계 접착제를 활용한 접합 기술에 관한 것임. - 이에 대하여 본 개발기술에 따른 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 상호 또는 구조체와의 결합 시 열교현상을 고려한 접합상세가 적용되는 점에서 차별성이 있음.

1.8.2 해외 특허 권리 확보 가능성 검토

- 산업재산권은 각국의 산업정책과 밀접한 관련을 가지는 것이므로 각국에서는 자국이 인정한 산업재산권만을 보호하고 있다. 따라서 산업재산권법은 해당국의 영역 내에서만 적용되고, 산업재산권은 해당국의 법령에 의하여 성립하고 효력을 가지는 것이 원칙임.
- 주요 국가(일본, 미국, 유럽) 중 대표적으로 미국의 특허 요건을 살펴보면, 미국 특허법상 특허를 받기 위해서는 먼저 특허의 대상에 해당하는 발명(35 U.S.C. §101)이어야 하고, 신규성 및 비자명성(35 U.S.C. §102, §103) 등을 만족하여야 함. 비단 위와 같은 규정은 미국에 한하지 않으며, 일본이나 유럽 특허도 마찬가지로 세부 규정상의 표현만이 상이할 뿐, 특허 받을 수 있는 대상에 해당할 것, 신규성 및 진보성을 구비할 것 등과 같은 실체적인 특허 요건을 동일하게 포함하고 있음.
- 해외 국가 각국 별로, 특허성 구비 여부 판단 시 인용기술 대비 본 대상기술의 기술적 차별 정도의 다소에만 차이가 있을 뿐, 본 대상기술의 신규성 및 진보성 구비 여부 판단의 기준이 되는 인용기술은 해당국의 영역 내•외를 불문하고 공지된 것으로서, 위의 항목에서 살펴본 공개된 선행특허가 이에 해당됨.
- 따라서, 위의 항목에서 검토해 본 특허 권리 확보 가능성 결과를 해외 특허 권리 확보 가능성 여부 판단에 적용할 수 있으므로, 본 개발기술을 주요 국가를 포함한 다수의 해외 국가에서도 마찬가지로 독자적으로 권리화함에 있어서, 특별한 문제는 없을 것으로 판단됨.

1.9 결여

- 이상으로 본 개발기술과 관련된 선행특허를 검색하고, 검색 결과를 이용하여 정량 분석을 수행함. 그리고, 본 대상기술을 실시함에 있어 선행 특허와의 저촉 가능성과 본 대상기술에 대한 특허 권리화 방안에 대해 검토함.
- 본 개발기술 관련 분야는 거시적 관점에서 2010년대 초반 쇠퇴기를 거쳐 최근다시 출원인 수 및 출원 건수가 모두 증가하는 회복기에 접어든 기술로 파악되며, 향후 관련 기술의 특허출원은 경쟁력 있는 기술 그룹 주도하에 지속적으로 증가할 것으로 예상됨. 한편, 개별국에서의 출원은 자국 출원인에 의한 것이 대부분이며 해외출원에 의한 패밀리 확보가 광범위하게 이루어지지 못하고 있다는 것이 본 개발기술과 관련된 기술 분야 특허동향의 특징이라고 할 수 있음. 따라서, 본 개발기술과 관련된 기술적 사상이 구체화된 이후에 국내출원을 비롯하여 주요 해외국(미국, 일본, 중국, 유럽 등)에서의 권리화를 추진하여 관련 분야에서 선도적인 위치를 점하는 것이 바람직할 것으로 사료됨.
- 본 개발기술은 건축물 에너지 소비에 대한 정책적·사회적 요구 증가라는 기술 개발 필요성을 감안할 때 매우 중요한 위치에 있는 기술임. 따라서, 본 개발기술이 선행하여 등록된 특허와 동일한 구성을 포함한다면 특허침해 문제가 발생할 수 있고, 침해 문제와는 별개로 향후 독자적인 특허 권리화를 추진하여 특허등록을 받더라도 자칫 실효적인 권리행사가 어렵게 되는 상황이 발생할 수 있음.
- 이에 따라, 본 개발기술에 대한 실시가 선행특허에 저촉될 우려가 있는지 판단해 보았으나, 유념해야 할 선행특허를 고려하더라도 본 개발기술의 실시에 큰 장애가 될 것으로 보이지 않아, 향후 기술 개발 후 안정적인 실시에 특별한 문제는 없을 것으로 판단됨.
- 아울러, 본 개발기술에 대한 독자적 특허 권리화에 대하여 검토해 보았으며, 국내는 물론 해외 특허기술을 모두 고려하더라도, 본 개발기술의 특징인 주요 요소기술에 대한 유사 선행특허는 검색되지 않음. 따라서, 본 개발기술의 연구 개발 과정에서 도출되는 복수의 기술 각각에 대해 개별적으로 권

리 확보 가능하다고 판단되므로, 이를 통해 시장에서 우위를 점할 수 있을 것으로 기대됨.

- 또한, 해외 시장으로의 기술이전 내지 사업 확장을 고려하여 해외 특허 권리 확보 가능성을 검토해 보건대, 미국, 일본, 유럽과 같은 해외 주요 국가의 특허 요건은 한국의 특허 요건과 유사하므로, 본 보고서에서 검토한 독자적 특허획득 방안의 결과에 따를 경우, 주요 국가를 포함한 다수의 해외 국가에서도 독자적으로 권리화가 가능하다고 판단되며, 이를 통해 해당 국가의 사장에서도 우위를 점할 수 있을 것으로 예상됨.

2. 열메타 기반 프리캐스트 콘크리트 판넬의 연구편익 및 기술가치 분석

2.1 개요

2.1.1 분석 목적

- 본 분석에서는 수행중인 국토교통기술촉진연구사업의 “열메타 구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬 구조 개발” 연구과제로부터 도출된 결과물의 경제성을 검토하여 연구 개발 사업 추진의 타당성을 평가하는 데 목적이 있음.

2.2 분석대상 연구사업의 개요

2.2.1 연구사업명

- 국토교통기술촉진연구사업
- 개발 과제명 : 열 메타 구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬 구조 개발
- 제품명 : ETM PC 판넬

2.2.2 연구기간

- 2019. 04. 15. ~ 2020. 12. 31. (총 21개월)
- 해당 연구 2차년도 진행중

2.2.3 연구개발의 목표

- 본 연구의 최종목표는 열 차단에 효과적인 열메타 기술의 융합을 통한 건축물 내·외장재용 PC 판넬의 원천기술 개발임. 특히 제안기술의 지속가능성 및 경량화를 위하여 선기포, 바텀애시 골재 및 하이볼륨 혼화재 기술을 적용함.

2.2.4 세부 목표

① 단열성을 고려한 열메타 재질 및 구조배열의 최적화 기술

- 본 제안 기술의 핵심은 경량골재 콘크리트 PC 판넬의 상세에서 열해석 기법을 통하여 열전도율이 낮은 열메타의 재질의 선정과 배열 방법의 최적화임.
- 열전도율이 낮은 재료들을 선정하고 선정된 재료들의 망상형 및 판형 등의 배열방법과 두께에 따른 열전달 특성의 평가가 중요함.
- 배열방법에 따른 열전달 특성은 PC 판넬에서 열메타와 콘크리트의 복합적인 상호 열전달 특성이 고려된 상태에서 평가가 이루어져야 함. 특히 콘크리트 속의 열 메타는 화재노출에 피해를 최소화할 수 있음.

② 기포와 바텀애시 골재기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 융합을 위한 최적 배합기술

- 본 제안 기술의 핵심은 바텀애시 골재와 기포를 이용하여 고단열·지속가능 PC 판넬용 콘크리트 배합의 최적화임.

- 고단열 · 지속가능 PC 판넬용 콘크리트는 소요성능인 압축강도 및 휨 강도 뿐만 아니라 경량과 단열성의 확보를 위한 기포 혼입량과 단위결합재량의 최적 첨가율 설정이 필요함. 특히 양생조건 및 공장 생산을 고려한 실용적 배합표 제시는 기술의 산업화 측면에서 매우 중요함.

③ 단열성을 고려한 접합상세의 최적화 기술

- 본 제안 기술의 핵심은 열교현상을 고려한 고단열 · 지속가능 PC 판넬 제품들의 상호 결합방법에 대한 모듈화임.
- 고단열 · 지속가능 PC 판넬은 상호 또는 구조체와의 결합시 열교현상을 고려한 접합상세가 적용되지 않을 경우 단열성능이 오히려 저하될 수 있으므로 이를 고려한 접합상세 개발이 필요함.

④ 사용성 및 구조적 안전성 확보를 위한 단면상세 설계기술

- 본 제안 기술의 핵심은 건조수축 균열과 풍하중에 대한 저항성을 확보하기 위한 열메타 소재와 용접철망의 일체화 방법임.
- 용접철망 배근기술 개발임. 콘크리트를 기반으로 하는 고단열 · 지속가능 PC 판넬은 건조수축 제어와 풍하중에 대한 저항성을 반드시 확보하여야 함.
- 이에 고단열 · 지속가능 PC 판넬은 적용될 기포와 바텀애시 골재가 융합된 콘크리트이므로 건조수축 저항성 및 휨 강도가 보통콘크리트 보다 낮을 수 있음. 따라서 이를 제어하기 위한 열메타 소재와 용접철망에 대한 단면상세 설계기술 개발이 필수적임.

2.3 분석 방법론

2.3.1 개요

- 국가 연구개발사업을 추진할 경우, 연구개발부문 예비타당성조사 수행 세부지침(2018. 4.)에 준하는 예비타당성 분석 방법을 준용하였음.
- 연구개발부문 예비타당성조사의 경제적 타당성 분석 방법은 아래의 플로우차트와 같이 추진됨(그림 2.1).

2.3.2 비용 추정

- 비용 추정은 현재의 지식수준과 가용한 자료를 바탕으로 미래의 비용을 추정하는 작업으로, 일반적으로 과거자료의 수집 및 분석, 계량 모델/도구의 적용과 비용 예측을 위한 데이터베이스 작성을 기초로 함.
- 일반적으로 알려진 추정의 종류는 Life Cycle Cost Estimate(LCCE), Independent Cost Estimate(ICE), Budget Estimate, Rough Order of Magnitude(ROM), Estimate at Completion(EAC), Independent Cost Assessment(ICA), Analysis of Alternatives(AoA), Economic Analysis(EA) 등이 있음.
- LCCE는 다양한 비용 추정방법의 기초적인 개념으로 연구 개발부터 제품화 및 상품화, 그리고 운영 및 지원까지, 즉, 제품의 처음부터 마지막까지 총비용을 추정하는 방법임.

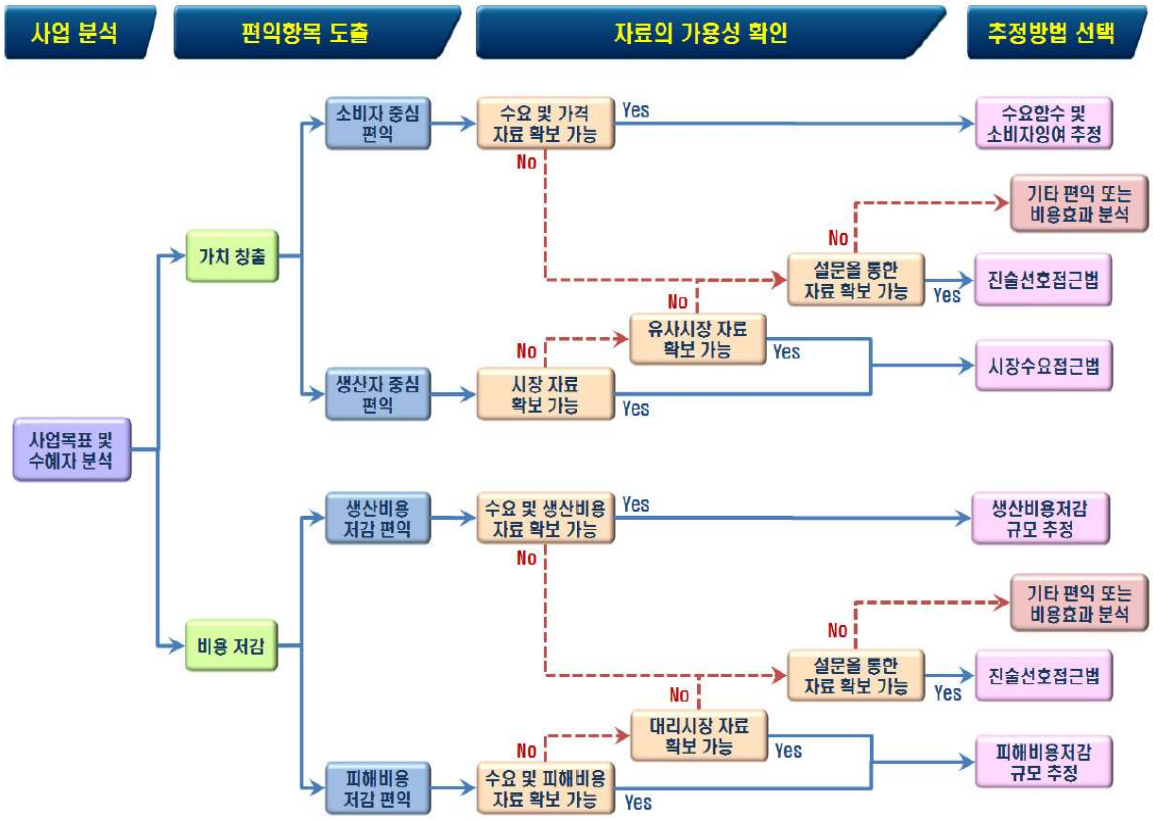


그림 2.1 연구개발부문 예비타당성조사의 경제적 타당성 분석 방법

- ICE는 일반적으로 잠재예산의 부족을 확인하기 위하여 사용하며, 비용에 따른 위험을 확인하는 데 용이함.
- Budget Estimate는 수명 주기의 특정 연도에 필요한 비용을 추정하는 방법으로 실제 계획수준의 신뢰할 수 있는 비용을 추정하기 위하여 활용됨.
- ROM은 비용 추정의 대상에 대하여 알려진 몇 가지 특정 정보를 이용하여 비용을 추정하는 방법임.
- EAC는 이미 진행 중인 프로그램이나 사업에 대한 경우이며, ICA는 근본적 가정과 추정의 유효성에 대한 평가를 위하여 적용되는 경우가 많음.
- AoA와 EA는 대안의 비용과 이익을 평가하는 방법으로 대안의 장점과 단점을 보여줌.

2.3.3 편익 추정

① 개요

- 예비타당성 분석에서 편익 추정의 단위는 개별 사업이며, 예비타당성 분석은 사업의 시행 여부 판단을 위해 사업을 시행할 경우에 발생하는 편익을 사업이 추진되지 않는 경우와 비교하는 것이므로, 사업 전후(before and after)가 아닌 시행 유무(with or without) 비교를 통하여 사회후생(social welfare)의 차이를 분석해야 함.
- 예비타당성 분석은 비용과 편익을 고려하여 보다 큰 규모의 편익을 얻을 수 있는 방안을 선택한다는 후생경제학에 이론적 기반을 두고 있음. 즉, 예비타당성 분석에서 순편익의 발생이란 사업으로 인한 경제적 후생 개선이 사업으로 인한 손실을 보상하고도 남을 경우를 의미하며, 편익은 여러 유형으로 분류될 수 있음(표 2.1).

② 분류

- 첫 번째 분류는 실질적인(real) 편익과 금전적인(pecuniary) 편익의 구분이며, 비용편익 분석에서는 실질적인 편익만이 고려됨.
- 실질적인 편익은 공공사업에 의해 발생한 진정한 편익으로, 국민생산 또는 사회후생의 증가를 통해 국민들이 실제로 받는 혜택을 의미함.
- 금전적 편익은 공공사업에 의해 빚어진 화폐적 가격의 변화 때문에 발생한 편익이며, 돈으로 측정될 수 있다는 의미가 아니라 순전히 화폐적 현상에 의한 효과라는 의미로 '실질적' 인 것과 구별되는 개념임.
- 예비타당성 분석의 편익 추정 부분에서는 실질적인 편익만을 고려하며, 금전적 편익을 계산에 포함시키면 이중계산 또는 과대계산의 과오를 범하게 될 가능성이 있음.
- 두 번째 분류는 편익이 내부적(internal)으로 발생하느냐 또는 외부적(external)으로 발생하느냐에 따른 구분으로, 어느 쪽이건 실질적인 편익이라면 편익 추정 범위에 포함됨.
- 마지막으로 공공투자사업의 일차적인 목적과 관련된 직접적 편익과 2차적인 목적, 즉 부산물의 성격을 가지고 있는 간접적 편익으로 구분됨.
- 다만 실질적 편익은 직접적일 수 있고 간접적일 수도 있기 때문에 다양한 관점을 고려할 필요가 있음.

③ 요약

- 농업사업 및 공업사업처럼 최종산출물의 형태가 확실하고 이것이 소비자들에게 최종소비재로서 사용될 경우 이것의 시장가치 중 부가가치가 사업편익이 됨.
- 교통사업이나 공익사업처럼 산출물이 최종소비재의 성격보다는 중간재 (intermediary goods)의 성격을 강하게 가질 경우 이 산출물에 의해 발생한 비용절감효과(cost-saving effects)가 사업의 편익이 될 수 있음.
- 사회정책사업처럼 산출물이 질적 개념일 경우에는 비용효과분석을 이용하여 편익 측정 문제를 해결할 수 있음.

2.3.4 국가연구개발사업 편익 추정의 개념

- 연구개발사업의 편익이란 연구개발사업의 수행으로 인해 발생할 것으로 기대되는 정(+)의 결과물을 의미함.
- 일반적으로 연구개발사업의 수행으로 인해 기대되는 편익은 경제적 편익과 과학기술적 편익으로 구분할 수 있음.
- 경제적 편익은 사업의 결과물 중 금액 단위로 쉽게 도출하거나 전환될 수 있는 효과이며, 과학기술적 편익은 해당 연구개발사업을 통해 새롭게 발견되는 기술이나 지식 성과를 의미함.
- 또한 이들 편익은 해당 연구 개발 사업으로부터 직접 파생되는지, 다른 중간단계를 거쳐 편익이 산출되는지에 따라 직접적 편익과 간접적 편익으로 다시 구분할 수 있음.
- 연구개발사업으로 인한 편익은 직접적 경제적 편익, 간접적 경제적 편익, 직접적 과학기술적 편익, 간접적 과학기술적 편익으로 크게 구분할 수 있음.
- 실질적으로 연구개발사업의 편익을 추정한 선행 연구사례를 살펴보면, 연구개발 수행을 통한 수혜의

범위를 파급의 관점에서 지식파급, 시장파급, 네트워크파급으로 구분하여 설명하고 있음(표 2.2).

- 지식파급은 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우로서, 발생방법은 역설계, 발간, 특허 공개, 연구자 이동 등의 방식으로 발생함.
- 시장파급은 시장 기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것으로서, 추가 기능의 구비, 가격의 인하, 저렴한 제품 및 서비스 제공 등의 형태로 발생함.
- 네트워크파급은 신기술이 연관된 기술들의 집합적 기능을 제고함으로써 가치를 갖게 되는 경우에 해당되는데, 단일 기술이 다수 기술들의 조합을 통해 향상된 기능이 제공될 경우에 발생함.
- 세 가지 파급 중에서 시장파급은 시장정보를 통해 계측이 가능하고 화폐단위로서 표현할 수 있으며 비용편익 분석을 통해 결과를 얻을 수 있고, 지식파급은 계측이 일부 가능하지만 화폐단위로 표현하기 어렵고 네트워크 파급은 계측이 불가능하다는 특징이 있음.
- 편익 추정에서 중요한 기준은 객관적인 계량화의 용이성이므로 시장파급은 비용편익 분석, 지식파급은 비용효과 분석으로 경제성 분석에 반영하는 것을 원칙으로 함.
- 또한, 경제성 분석에는 사업기간 중의 비용과 편익이 아닌 실질적인 사업 수행에 소요되는 총비용과 사업 수행을 통하여 발생하는 순편익을 반영함.
- 다만, 연구개발사업 이후 편익 발생과 관련된 추가 비용 추정을 위한 객관적인 자료가 없을 때에는 효과에 대한 해당 연구개발사업의 기여 부분만을 편익 추정에 고려할 수 있음.

2.3.5 편익 항목의 식별 및 반영

- 연구개발사업을 통해 발생할 수 있는 경제적 편익은 직접적 경제적 편익, 간접적 경제적 편익, 산업연관 유발효과로 구분할 수 있음.
- 직접적 경제적 편익은 연구개발의 산출물이 시장에서 거래되어 발생하는 경제적 편익만을 지칭하며, 간접적 경제적 편익은 시장의 거래에서 발생하는 것이 아닌 산출물의 보유 또는 적용으로 인한 경제적 편익을 의미함.
- 이러한 관점에서는 사업의 직접적 목표와 연관성이 낮은 부차적인 비용저감 효과나 수입대체 효과는 간접적 경제적 편익으로 간주됨.
- 산업연관 유발효과는 연구개발사업의 진행, 연구개발사업의 산출물의 생산 및 거래 등을 통해 국가경제적 관점에서 간접적으로 유발되는 파급효과이며, 생산유발효과, 고용 및 취업 유발효과, 부가가치 유발효과 등이 있음.
- 연구개발부문 예비타당성 조사에서는 직접적 경제적 편익만을 해당 사업의 편익항목으로 반영하며, 간접적 경제적 편익과 산업연관 유발효과는 편익항목으로 포함하지 않음.
- 연구개발사업의 결과가 직접 시장에서 거래되거나, 지식파급 형태의 연구개발 산출물을 직접적인 생산요소로 채용하는 새로운 제품이나 서비스가 시장에서 거래되는 경우에는 해당 가치 또는 그 기여분을 비용편익 분석에 반영할 수 있으나, 네트워크파급으로 분류되는 각종 유발효과는 비용편익 분석 시에 편익으로 반영하지 않음.
- 이상의 사항을 반영하여 연구개발부문 예비타당성 조사의 편익에 반영되는 항목과 반영되지 않는 항목을 요약하면 표 2.2으로 정리됨.
- 이를 기준으로 하여 비용편익 분석 시 편익에 반영하나, 전술한 바와 같이 연구개발사업의 편익 추정에는 여전히 어려움이 존재하여 연구진의 재량에 의한 가정이 도입되기도 하며, 합리적 가정에 의한

편익 추정은 효과적인 의사결정에 기여할 수 있으나, 무리한 가정에 의한 추정은 합리적인 타당성 분석에 기여하지 않음.

표 2.1 연구개발활동 파급 분류와 예비타당성조사 반영 여부

구분	정의 및 특성	예비타당성조사 반영 여부
지식파급 (knowledge spillovers)	지식의 창출자와 사용자가 다른 경우 발생 역설계, 발간, 특허공개, 연구자 이동 등을 통해 발생 일부 계측 가능 화폐환산 불가	사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 효과 분석에 반영
시장파급 (Market spillovers)	시장 기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것 추가기능의 구비, 가격의 인하, 저렴한 제품 및 서비스 제공 등으로 발생 계측 가능 화폐환산 가능	사업목표와 직접적으로 연결되고 객관적 산출이 가능할 경우 경제적 타당성의 편익 분석에 반영
네트워크 파급 (Network spillovers)	관련기술들의 집적을 통해 기능 향상을 가능케 함 각각 기술들의 개발 주체가 분산되어 있어서 개별 주체별로 투자를 망설임 계측 불가화폐환산 불가	경제적 타당성에서 미반영 정책적 타당성의 특수평가항목에서 반영 가능

표 2.2 연구개발부문 예비타당성조사의 편익 반영/미반영 구분

구분	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 반영	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 미반영
정(+)의 가치증가	가치창출 · 증대 신기술 적용을 통한 생산량 증가 신기술 개발로 인한 가치창출 기술거래 기술이전에 의한 로열티 수입	과학기술 지식(논문, 특허 등) 과학기술자의 교육훈련 지역개발효과 지역산업구조 개편 생산 유발효과 부가가치 유발효과 고용 유발효과 수입 유발효과 수출 유발효과 소득 분배효과 취업 유발효과
부(-)의 가치감소	생산비용저감 생산투입 자원 및 시간의 저감 연구기간, 출장횟수 등의 연구수행 비용저감 물류비용저감 피해비용저감 재난 · 재해 · 사고로 인한 피해 감소 질병비용저감 환경비용저감	

2.3.6 수익접근법

- 수익접근법은 기술요소법 기반의 가치산정 방법으로 대상기술의 경제적 수명기간 동안 기술사업화로 인하여 발생될 미래 경제적 이익을 적정 할인율을 적용하여 현재가치로 환산하는 방법임.
- 기술의 경제적 수명, 현금흐름, 할인율, 기술기여도 등의 추정이 필요함.
- 수익접근법은 예상매출액, 예상 영업이익, 투자규모, 감가상각비, 운전자본 및 현금흐름의 추정 재무정보에 근거하여야 함.
- 따라서 수익접근법은 대상기술의 사업화로 인해 발생하는 매출액의 추정으로부터 시작되어야 함.

2.3.7 시장접근법

① 편익

- 시장접근법은 시장가치 창출을 목적으로 하는 많은 연구개발사업의 예비타당성조사 경제성 분석 과정에서 대표적으로 활용된 바 있음.
- 시장접근법에서는 해당 연구개발사업의 시행에 의한 미래 시장규모의 증가분에, 해당 연구개발사업의 기여로 창출된 직접적 편익을 한정시키기 위한 다양한 변수를 고려하여 편익을 산정하게 되며, 이와 같은 시장접근법의 개념을 수식화하면 다음과 같이 표현할 수 있음.

편익 = 미래 시장규모 × 사업기여율(기준선 분석) × R&D 기여율 × R&D 사업화 성공률 × 부가가치율 (2.1)

- 편익 추정과 관련하여 앞서 설명한 필수 사항들인 편익 발생 시점 및 편익기간, 환율, 할인율 등 다양한 변수가 편익 산정 결과에 영향을 미칠 수 있음.
- 이러한 요소들은 각각 예비타당성조사 연구진이 충분한 근거와 자료를 통하여 도출해야 함.

② 미래 시장규모

- 미래 시장규모란 해당 연구개발의 결과물과 직접적으로 관련된 국내 산업의 미래총생산액(또는 매출액)을 의미하며, 일반적으로 미래 국내 수요 중 국산품이 차지하는 규모와 해외에 수출되는 규모를 모두 포함함.
- 미래 시장규모를 예측하기 위해 활용되는 자료는 세계 시장과 국내 시장을 모두 고려하여 최대한 정교하게 분석되어야 함.

③ 사업기여율

- 연구개발사업의 편익을 추정하기 위해서는 미래 시장규모의 예측뿐만 아니라, 전체 시장 규모 중에서 어느 부분까지를 해당 사업에 의한 기여분으로 고려해야 하는지가 중요한 문제임.
- 연구개발부문 예비타당성조사의 경제성 분석 과정에서는 동 사업을 시행하지 않더라도 과거에 존재했던, 그리고 기존 연구개발투자 추이에 의해 유지 또는 창출되는 시장의 매출액은 편익 산정에서 제외하거나 사업기여율이라는 변수를 고려하여 보정하고 있음.
- 사업기여율은 기존의 R&D 스톡에 의한 시장규모 창출분을 제외한다는 개념과 달리, 미래 시점 기준

의 연구개발활동 중 동 사업이 차지하는 비중만을 적용한다는 개념임.

- 실제로 연구개발사업의 경제성 분석을 수행하는 과정에서 해당 산업분야의 협회나 관련 시장보고서를 통해 미래 편익 발생 시점의 전체 연구개발투자규모에 대한 자료를 구할 수 있는 경우에는 이를 활용할 수 있음.
- 또한 해당 산업에서 유사한 성격의 정부 투자나 민간 투자 규모에 대한 자료가 이용 가능한 경우에도 이를 최대한 활용하는 것이 바람직함.
- 반면, 이러한 상세 자료의 활용이 어려운 경우에는 기본적으로 한국과학기술기획평가원에서 매년 발간하는 연구개발활동조사 보고서에 제시된 정부와 민간의 연구개발투자 비율에, 해당 사업의 정부투자액 및 민간매칭금액을 적용하여 추산할 수도 있음.

④ R&D 기여율

- R&D 기여율은 연구개발성과의 상업화를 통해 부가가치가 창출되었을 때 전체 부가가치 가운데 연구개발에 의한 기여분이 어느 정도인지를 나타내는 지표이며, 해당 사업의 경제적 가치를 정확히 추정하기 위해 이를 활용하게 됨.
- 그러나 R&D 기여율을 정량적인 근거를 토대로 세부 기술 분야별로 산정하는 것이 어렵기 때문에, 거시적 관점의 R&D 기여율이 일반적으로 활용됨.
- 이와 관련하여 기존 연구개발부문 예비타당성조사에서는 신태영(2004)에서 제시된 연구개발투자의 경제성장에 대한 기여도(28.1%) 결과 값을 일반적으로 활용함.

⑤ R&D 사업화 성공률

- 국가연구개발사업을 통한 기술개발 결과가 시장에서의 편익창출로 이어지기 위해서는 기술의 실증 및 상용화의 과정을 거치게 되는데, 이러한 과정에서 존재하는 불확실성을 반영하기 위해 R&D 사업화 성공률이라는 변수를 고려함.
- 단순 산술평균, 산업규모를 고려한 평균, 사업비 규모에 따른 가중 평균, 해당 과제 비중에 따른 가중 평균 등의 다양한 방법을 활용할 수 있음.

⑥ 부가가치율

- 부가가치율은 매출액 중에서 실제 새롭게 창출된 경제적 편익이 차지하는 비율을 의미하며, 일반적으로 유사 업계 또는 기업의 일정 기간 부가가치액을 동일기간의 매출액으로 나눈 비율로 정의됨.
- 하지만 부가가치율에 대한 개념과 부가가치율의 값은 출처에 따라 상이한데, 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제1판) 에 따르면 부가가치율에 대한 출처는 한국은행에서 가장 최근에 발간한 산업연관표를 적용할 것으로 명시하고 있음.

부가가치 = 총투입(총산출) - 중간투입 = 피용자보수 + 영업잉여 + 고정자본소모 + 순생산세 (2.2)

- 위와 같은 개념으로 도출한 부가가치를 기반으로 부가가치율은 총투입액 중 부가가치액이 차지하는 비율이며 다음의 식으로 나타낼 수 있음.

부가가치율(%) = 부가가치액 / 총투입액 × 100 = 100 - 중간투입률(%) (2.3)

- 연구개발부문 예비타당성조사 시 편익 추정에 활용하는 부가가치율은 조사 착수 시점의 최신 한국은행 산업연관표의 투입산출표 중 기본부문 기초가격평가표를 적용해야 함.

2.3.8 비용접근법

- 앞서 국가연구개발사업의 편익으로 고려되는 가치창출 편익과는 다른 개념으로 비용 감소로 인한 편익이 존재함.
- 비용저감의 개념으로는 생산비용저감과 피해비용저감 등의 사례가 있을 수 있으며, 개념은 연구개발사업의 특성에 따라 다르게 나타남.
- 산비용 저감편익 : 기존의 생산 공정이나 생산 활동의 일부를 개선 개량하는 기술 개발을 목적으로 하는 연구개발사업의 경우, 직접적 경제적 편익은 새로운 기술의 적용으로 인한 생산비용 저감액으로 계산됨.

비용저감액 = (기존 기술에 의한 단위당 현재 생산비용 - 신기술에 의한 단위당 미래 생산비용 추정치) × 국내 생산 규모 = (기존 기술에 의한 단위당 현재 생산비용 × 신기술에 의한 비용저감율) × 국내 생산 규모 (2.4)

- 피해비용저감 편익 : 피해비용저감 편익은 국가연구개발사업을 통하여 기존의 재난·재해·사고 등으로 인해 발생하는 피해비용을 저감하는 경우 고려할 수 있는 편익항목임.

2.4 분석 방향

2.4.1 분석 시기의 특수성

- 한국산업기술평가관리원의 「기획단계 R&D과제 경제성 분석 방법론 및 사례」 연구에 따르면, R&D 전주기 프로세스를 기획단계, 수행단계 및 사업화단계로 구분하고 있음(그림 2.2).
- 따라서, 각 단계에 따라 경제성 분석의 방법론이 특화되어 있어야 하지만, 현재는 일괄적인 방법론을 사용하고 있다는 것을 문제점으로 제시하고 있음.
- R&D 예비타당성조사에 제시된 방법론은 R&D 수행 종료시점에서 사업화를 앞두고 있는 기술에 대한 경제성 분석에 초점이 맞추어져 있음.
- 분석대상인 “열메타 구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬 구조 개발” 과제는 총 2년의 연구기간 중 2차년도 연구가 진행중이므로 일반적인 방법론을 그대로 적용하기 어려움.
- 따라서, 일반적인 R&D 예비타당성조사 표준지침의 내용을 준용하되 필요한 부분에서 R&D 단계에 적합하도록 변형하여 적용함.

2.4.2 분석 기본방향

- 분석의 기본방향은 그림 2.3에 나타내었음.
- R&D 과제의 경제성을 평가하는 방법은 다양하게 존재하는데, 본 분석에서는 비용-편익 분석을 통한 순현재가치법(Net Present Value) 및 비용편익비율법(Benefit-Cost Ratio)을 이용하여 경제성을 평가함.
- 비용과 편익을 산출하는 데 있어서 무형자산에 대한 가치를 평가하는 방법은 비용접근법, 시장접근법 및 수익접근법으로 구분할 수 있는데, 본 분석의 경우 수익접근법을 기본으로 진행하되, 과제의 특수성에 맞게 비용접근법, 시장접근법을 보완하여 적용함.
- R&D 과제의 경제성 분석에서 "비용"은 연구에 소요된 연구비를 현재가치로 환산하여 사용함.

2.4.3 분석 자료 등

- 본 경제성 분석에 인용된 자료는 국가 또는 공공기관에서 발표한 통계자료를 바탕으로 실시함.
- 본 연구 사업의 성과물(논문, 특허 등) 또는 비용(연구비)은 주관연구기관 또는 참여기관에서 제공된 자료를 사용함.
- 본 분석에서는 본 과제가 당초 계획대로 진행되어 사업이 성공된다는 가정 하에 분석을 수행함.

그림 2.2 경제성 분석 시기의 특수성 반영

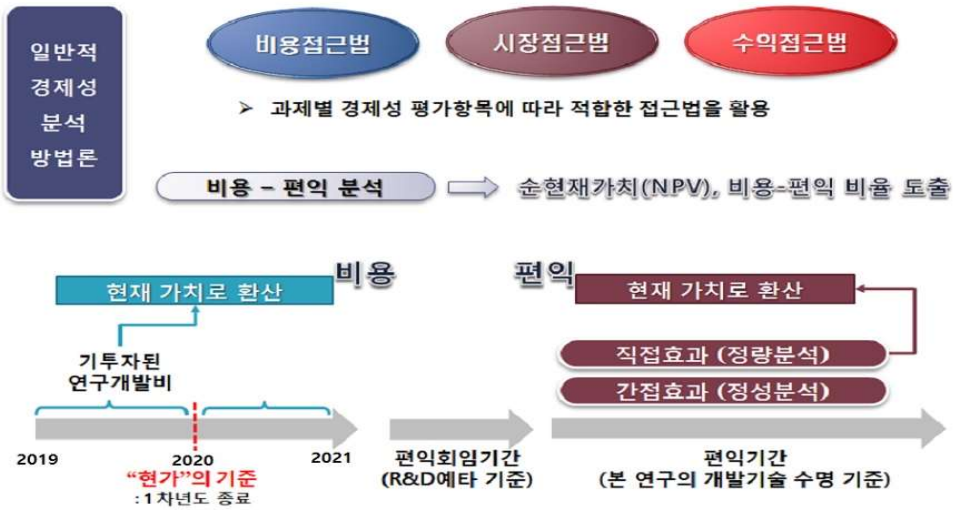


그림 2.3 경제성 분석 기본 방향

2.5 경제성 분석

2.5.1 연구비 적정성

① 연구비 구성 비율

- 연구개발비의 분류체계에 의해 연구비를 분류하면 표 2.3과 같음.
- 연구개발에는 인건비, 재료비, 기술정보활동비, 연구활동비가 포함됨.
- 연구장비 및 재료비에는 기기·장비 및 연구시설비에 관한 비용, 시작품·시험설비 제작경비가 포함되고 연구관리에는 간접비를 반영함.
- 이와 같은 분석을 통해 동 사업은 연구개발 59.55%, 연구시설, 장비구입 및 재료비 28.13%, 연구관리 12.32%의 비율로 연구비 투입.
- 동사업의 총 연구비 중 인건비 비중은 36.60%로 국가 전체 R&D과제의 인건비 비중 약 42%에 비교해 낮은 수준임(표 2.4).
- 연구수당은 「국가연구개발사업 연구비 관리 표준매뉴얼」(미래창조과학부, 2017)에 의하면 인건비(인건비로 계상된 현물·미지급인건비 및 학생인건비 포함)의 20% 범위 내에서 계상하여야 하므로 동 사업의 연구수당 6.42%는 범위 내에 들어있음.
- 연구시설·장비구입 및 유지비에 대해 「연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 제2-1판」(한국과학기술기획평가원, 2016)에서는 표 2.5과 같이 제시하고 있음
- 2018년 한국연구재단에서 발표한 「국가연구개발사업 연구비관리 매뉴얼」에서는 연구장비 및 재료비는 『기기·장비와 부수기자재 구입비, 연구시설의 설치·구입·임차·사용에 관한 경비와 운영비 등 부대경비, 시약 및 재료 구입비, 전산처리·관리비, S/W구입(범용성 S/W 제외), 시제품·시작품·시험설비 제작경비』라고 규정함.
- 동 사업의 연구장비 및 재료비(1차년도)는 아래 표 2.6와 같이 대부분 재료비에 투입된 것으로 과제의 목적에 맞게 계상되고 투입된 것으로 분석됨.

② 유사과제 대비 규모

- 사업 목표, 연구내용 및 방법, 기대효과 등을 고려한 키워드를 토대로 국가과학기술지식서비스(NTIS)에서 최근 5개년도(2015~2019년) 기수행 과제를 검색한 결과 PC 판넬, 경량콘크리트, 기포콘크리트 등 개발 관련 6건의 유사과제 도출.
- 유사과제 연평균 연구비가 과제의 특성에 따라 1~3억원으로 다소 편차가 있는 것으로 조사됨(표 2.7).
- 본 과제의 연평균 연구비는 유사과제 평균인 1.73억원 대비 상대적으로 큰 규모의 연구비를 보이고 있음.

2.5.2 비용 산정

- 본 경제성 분석에서 비용은 투입된 연구비로 규정하였으며, 총 2년 동안 6.2억원의 연구비가 투입됨.
- 동 사업의 연구개발비를 2020년 기준으로 KDI가 예비타당성조사에서 일반지침으로 제시한 사회적 할인율(4.5%, 2017년 하향조정)을 적용하여 현재가치로 환산하면 6.48억원임(표 2.8).

표 2.3 연구비 구성 비율

비목	연구비(천원)			구성비
	현금	현물	합계	
직접비	327,600	216,000	543,600	87.68%
지급인건비	75,706	151,200	226,906	36.60%
연구장비 및 재료비	109,624	64,800	174,424	28.13%
연구활동비	72,480	-	72,480	11.69%
연구과제추진비	30,000	-	30,000	4.84%
연구수당	39,790	-	39,790	6.42%
간접비	76,400	-	76,400	12.32%
간접경비	76,400	-	76,400	12.32%
합계	404,000	216,000	620,000	100.00%

표 2.4 국가 전체 R&D과제 인건비 추세

연 도	인 건 비(억원)	구 성 비(%)
2011	196,498	39.4
2012	225,595	40.7
2013	247,283	41.7
2014	266,988	41.9
2015	280,268	42.5
2016	292,339	42.1
2017	334,116	42.4
2018	363,172	42.4

표 2.5 복합R&D사업을 위한 비용분석 내역

성 격	분 류
연구시설 · 장비구축 및 구입비	용지보상비 건축공사비 장비구축 · 구입비 시설부대경비 예비비 운영유지비

표 2.6 1차년도 연구시설·장비 및 재료비

구 분	내 역	단 가	회수 (수량,건)	금 액		비고
				현금	현물	
연구장비 재료비	시작품 제작	1,000	1	1,000	-	
	시멘트	10	35	350	-	
	굵은골재 및 잔골재	100	1	100	-	
	혼화재(고로슬래그, 플라이애시)	400	1	400	-	
	기포제	500	1	500	-	
	박리제 및 감수제	100	3	300	-	
	몰드	200	7	1,400	-	
	게이지	245	12	2,940	-	
	실험잡자재(장갑, 실험복, 마스크 등)	518	2	1,036	-	
	운반비	200	2	400	-	
	폐기물 처리비	1,600	1	1,600	-	
	Plastic plate	500	10	5,000	-	
	Metal plate	500	10	5,000	-	
	Polymer 류 (PU, PVA, PS 등)	50	10	500	-	
	무/유기류 소재 (Paraffin oil, PCM, aerogel 등)	100	5	500	-	
	Toluene (100 mL)	100	15	1,500	-	
	Acetone (4 L)	50	20	1,000	-	
	IPA (4 L)	50	20	1,000	-	
	Ethanol (1 L)	20	11	220	-	
	NH4OH (1 L)	100	10	1,000	-	
	n-hexane (1 L)	50	23	1,150	-	
	Quartz tube (5 inch)	300	10	3,000	-	
	공정가스(Ar, N2, O2 등)	300	10	3,000	-	
	클린룸 소모품	3,500	1	3,500	-	
	장비 소모성 부품	2,000	2	4,000	-	
총 액				40,396	0	

표 2.7 PC 판넬, 경량콘크리트, 기포콘크리트 등 개발 관련 유사 과제 평균 연구비 비교

과제명	과제기간	연평균 연구비(억원)
노후 철근콘크리트 보-기둥 구조 건물을 위한 PC 내진보강 공법개발	14~17(3년)	1.01
폐난연스티로폼 잉고트를 골재로한 경량콘크리트 패널 개발	17~18(1년)	1.59
폐플라스틱 이용한 경량 콘크리트 소재 개발	15~16(1년)	1.01
경량골재 콘크리트의 구조적 특성규명 및 설계가이드라인 제시	17~22(5년)	2.50
폐발포폴리스티렌과 친환경 기포제를 혼합한 경량기포콘크리트 개발	17~18(1년)	1.20
나노캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트 고단열 소재 개발	17~18(2년)	3.09
평균		1.73

표 2.8 본 과제의 연구개발비

년 도	정부 출연금 (천원)	기업부담금 (천원)	합계 (천원)	현가(NPV) (천원)
1차년도	164,000	111,000	275,000	287,375
2차년도	206,000	139,000	345,000	360,525
합 계	370,000	250,000	620,000	647,900

2.5.3 편익 분석

① 분석 조건

- 사회적 할인율 : KDI가 예비타당성조사에서 일반지침으로 제시한 사회적 할인율(4.5%, 2017년 하향조정)을 적용함.
- 편익 회임기간 : 일반적으로 연구개발활동으로 인한 경제적 효과가 발생하기 위해서는 기술개발의 사업화 등의 과정을 거쳐야하기 때문에 상당한 시간이 소요되며, 연구개발부문 예비타당성조사에서는 이 편익 회임기간 동안에는 경제적 편익이 발생하지 않는 것으로 간주함.
- 연구개발부문 예비타당성조사의 경제성 분석 시 편익 회임기간의 적용은 연구개발사업의 결과가 경제적인 효과를 나타나기까지의 기간을 고려하여 편익을 산출하는 것으로서 현실을 반영하는 것임.
- 연구개발사업 종료시점의 TRL 단계(기초/응용/개발)에 따라 편익 발생시점도 달라지므로 편익 회임기간도 이에 따라 다르게 적용하는 것이 적합함.
- 이는 모든 연구개발사업이 제품화 단계인 TRL 8단계에서 종료되는 것은 아니므로, 연구개발이 종료된 TRL 단계부터 8단계까지의 추가 연구개발기간을 포함한 편익 회임기간까지 고려하는 것이 필요함.
- 연구개발부문 예비타당성조사에서의 편익 회임기간은 사업 주관부처가 사업계획서에서 제시하는 경우에는 이를 준용하는 것을 기본으로 하되, 사업별 특성에 맞게 종료시점의 TRL 단계에 따라 적용해야 함.
- 본 개발기술에 대하여 현재 연구 2차년도 단계로서, 개발기술의 최종목표는 열 차단에 효과적인 열메타와 저량의 기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량 콘크리트의 융합을 통한 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 제품의 개발로서 본 제안 기술의 최종 기술달성 성숙도 TRL 4 단계임. 순차적인 요소기술의 개발을 위해서 1차년도 및 2차년도에 각각 TRL 2와 TRL 4를 목표로 제안 기술의 실험실 검증을 통한 학술적 연구에 중점을 두었음.
- 따라서 본 개발기술에 대하여 2차년도 종료 후 기술성숙도를 TRL 4로 예상하고 있음(표 2.9).
- 본 개발기술은 연구 종료 이후, 실제 환경에서의 성능 검증, 상용제품 시험평가를 마치고, 2023년말까지 시제품 출시를 예상하고 있음. 이에 2024년부터 제품 판매에 따른 시장 진입이 가능하고, 이후부터 5년까지 시장점유율을 단계적으로 1%에서 5% 수준까지 증가시킬 계획임.
- 따라서, 본 분석에서는 2024년부터 편익이 발생하는 것으로 추정함.
- 편익기간은 해당 기술의 연구개발 결과물이 실제로 시장에서 편익발생에 기여하는 기간을 의미하는데, 연구개발부문 예비타당성조사의 경제적 타당성 분석에서는 기술수명기간을 도입하여 편익기간을 산정하는 것이 권장되고 있음.

- 기술수명기간(technology cycle time, TCT)은 특허의 서지정보를 이용해 정량적으로 산출되는 지표 중 하나로서, 인용된 특허들의 발행연도와 인용한 특허의 발행연도의 차이 값들의 중간값(median age), 즉 인용-피인용 특허 시차의 중앙값으로 정의됨. 이는 인용특허수명과 유사하게 특허 인용 분석을 통한 기술변화 관련 측정지표이며, 미국 CHI(Computer Horizon Inc.) Research에서 제시하고 있는 지표임.
- 본 과제기술은 국제특허분류(IPC) 체계상 E04C(건축 분야의 '구조요소, 건축재료')로 분류될 수 있으며, 이에 해당하는 TCT 지표는 12년임.
- 따라서, 본 분석에서는 보수적으로 본 과제기술의 기술수명기간인 12년을 편익 기간으로 추정함(표 2.10).

② 분석 방향

- 열메타 구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬 구조 개발에 따른 편익을 정량화하기 위해 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 권장하는 편익산출 모형을 활용하되, 본 과제기술의 개발 목적(기존 경량콘크리트 등 무기계 재료의 열전도율 한계 극복)을 고려하여, 비용저감 편익 중 생산비용저감(동일 성능 구현 시 생산비용 기준) 편익을 추정함.
- 기존 재료 대비 본 과제기술의 열전도 특성에 따른 내화 성능 향상으로 인한 피해 비용 저감도 고려될 수 있으나, 화재로 인한 피해 발생의 시기적 불확실성, 피해 발생 시 피해액 산정 및 기존 재료 대비 피해 저감액 산정 기준 설정의 곤란성 등을 감안할 때 현 시점에서 피해 비용 저감액 산정이 현실적으로 불가능하여, 본 분석에서는 보수적으로 피해비용저감 편익은 제외하고 생산비용저감 편익만을 추정하기로 함.

표 2.9 연구성과물의 기술성숙도 설정근거

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	□	TRL 1 이론적 연구단계
	TRL 2	□	■ (1차년)	TRL 2 기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	□	□	TRL 3 실험적 증명 단계
	TRL 4	□	■ (2차년)	TRL 4 실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	□	TRL 5 유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	□	TRL 6 유사환경 기술시범 단계
실용화 단계	TRL 7	□	□	TRL 7 실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	□	TRL 8 시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	□	TRL 9 현장적용/사업화 단계

표 2.10 본 과제기술의 기술수명기간

IPC 코드	IPC 내용	TCT			
		평균	Q1	중앙	Q3
E04C	구조요소; 건축재료	12.71	6	12	18

편익 = PC 판넬 시장규모 × 개발기술 적용 비율 × 개발기술에 의한 비용저감률 × 기술개발 진행률 × R&D 기여율 × R&D 사업화 성공률 (2.1)

③ 기술개발 진행률

- 본 과제기술은 총 2개 년도 연구기간 중 2차년도 1/2이 종료된 상태이므로 기술개발 진행률을 75%로 산정함.

④ R&D 사업화 성공률

- 사업화 성공률은 산업분야와 연구개발사업의 특성에 따라 크게 달라질 수 있으므로 가급적 해당 기술분야의 성과분석 데이터를 바탕으로 하는 것이 최선이나, 해당 연구개발과제가 둘 이상의 기술분야를 포함하고 있거나, 해당분야의 성과분석 데이터가 없는 경우, 최대한 연관분야의 데이터를 바탕으로 합리적 추정을 하여야 함.
- 본 분석에서는 기존 정부부처와 출연연구기관들이 제시한 자료들을 바탕으로 본 사업의 사업화 성공률을 추정하였음. 다만, 확보할 수 있는 자료의 한계로 인해, 정부 R&D 평균치를 적용할 수 밖에 없었음. 이때 평균치는 KISTEP 자료의 평균치와 미래부, 산업부 등의 부처에서 제시한 정부 연구개발투자 사업화 비율 전체 평균치가 있는데, 이 중 가장 많은 데이터 통계를 근거로 제시한 KISTEP의 최근 5개년 평균치(44.7%)를 본 분석에 적용하였음(표 2.11).

⑤ 개발기술 적용 비율

- 본 개발기술의 적용 영역을 단열재 분야로 포괄할 때, 본 개발기술의 적용 비율은 기존 기술(유기계 단열재, 글래스울 등의 무기계 단열재)이 주도한 단열재 기술 시장에서 향후 본 개발기술인 열메타구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬의 대체 비율을 추정하여 적용함.
- 본 개발기술 제품의 경우 2024년 1% 정도의 시장점유를 시작으로 단계적으로 5년 후에는 5% 정도의 시장점유율을 목표로 하고 있음.
- 개발기술의 열전도율 한계 극복이라는 차별된 성능까지 고려하면 4년 이후 안정화 단계에 접어들면서 적어도 평균 5~10%의 시장점유율은 충분히 가능할 것으로 예상할 수 있으므로, 개발기술의 평균 적용 비율을 5%로 추정함(표 2.12).

표 2.11 최근 R&D 사업화 성공률 (KISTEP, 2014~2018)

구분	과제 수	사업화 성공 과제 수	사업화성공률
2014	53,493	21,205	39.6%
2015	54,433	20,088	36.9%
2016	54,827	28,025	51.1%
2017	61,280	32,994	53.8%
2018	63,697	26171	41.1%
계	287,730	128,483	44.7%

⑥ 시장규모

- 시장규모 추정의 일반적 문제점은 다음과 같음.
- 일반적으로, 산업의 거시 영역별로 세계적인 시장조사기관들의 자료를 추적하면 근미래 (2021~2023년 전후)까지의 시장규모 전망치를 얻을 수 있는데, 본 사업의 경우 시장조사 데이터를 확보하는 데 있어 다음과 같은 문제를 안고 있음.
- 첫째, 과제가 추구하는 산업의 영역이 특정분야에 치우친 세부적인 영역이고, 일대일로 적용할만한 국내외 시장조사자료가 마땅치 않음.
- 둘째, 본 사업의 연구 개발기간 종료 후, 실제 편익이 발생하는 기간(2024년~)은 현 시점으로부터 약 4년 이후이므로, 그 시기에 직접 적용할 수 있는 시장조사 데이터는 전무함. 따라서, 2020년 전후까지 예측된 시장데이터를 기반으로 2024~2035년까지의 시장규모를 예측해야 하는데, 이를 합리적으로 수행할만한 분석기법은 이론적 및 실질적으로 존재하지 않음.
- 셋째, 본 사업에서 바라보고 있는 시장은 현재 다른 종류의 제품 내지 공법으로 형성되어 있는 시장으로, 시장의 창출이 함께 진행되어야 하는 관계로 시장규모를 예측할 수 있는 분석기법이 실질적으로 존재하지 않음.

⑦ 시장규모 추정 방법

- 대상산업 영역 추정 : 해당 과제를 통해 개발코자 하는 제품의 영역(target segment)이 시장기관의 데이터를 직접 적용하기에는 다소 협소한 영역인 관계로, 최선의 논리적 추론을 통해 해당 영역의 시장규모를 추정함.
- 장기 예측 : 2020년 기준으로 예측되는 시장 데이터를 바탕으로, CAGR을 적용해 2024~2035년까지의 시장규모를 예측함. 예타 지침에서 예시된 선형회귀분석, CAGR, 지수평활법(ETS) 등의 분석기법들이 있으며, CAGR의 경우 시장을 다소 낙관적으로 예측하는 경향이 있으나, 본 분석에서는 중장기적으로 노후 하수관로 비율이 증가 추세인 점을 고려하여 CAGR을 적용해 예측함.

⑧ 시장규모 추정

- 열메타 구조를 활용한 고단열·친환경 PC 판넬이 적용되는 시장으로 단열재 시장이 이를 포괄할 수 있으므로 단열재 시장규모에 따라 추정하기로 하며, 시장조사 전문기관인 Smithers Apex의 최근 보고서를 인용하기로 함.
- Smithers Apex(2013)의 보고서에 의하면 단열재의 세계 시장 규모는 2015년 926억 달러에서 연평균 성장률(CAGR) 3.6%로 2020년엔 1,104억 달러에 이를 것으로 예측됨.
- 2015년 지역별 시장점유율은 아시아가 281억 달러(30.3%)로 가장 높고, 그 다음이 북미 71억 달러(18.5%), 서구 169억 달러(18.2%), 동구150억 달러(16.2%) 순으로 추정됨. 또 2015~2020년 동안 시장 성장률은 아시아(5.7%)와 중동·아프리카(4.4%)가 세계 평균 이상의 성장률을 나타낼 것으로 전망됨. 단열 재료별로는 암면, 글라스울 등의 무기계 단열재가 전체 단열재 수요의 약 60%를 차지하고 있음.
- 국내 단열재 시장에서는 그 동안 저렴한 단가 때문에 유기단열재에 대한 선호도가 높았으나, 기존 유기단열재가 화재 시 유독가스 발생량이 높다는 점과 정부의 '저탄소 녹색성장' 정책 추진으로 고기능성 유기단열재 및 불연성 무기단열재에 대한 사회적 요구가 높아지기 시작함.

- 국내의 단열재 시장 규모는 2015년 5,432억 원으로 추정되며, 연평균 5.7%로 성장해 2020년엔 7,167억 원에 이를 전망임. 무기계와 유기계 단열재의 구성 비율은 35:65로 무기계 비율이 선진국 평균 수준인 66%에 훨씬 미치지 못하고 있는 실정임(표 2.13).
- 세계 프리캐스트 공법 시장은 예측기간 중 6.10%의 연평균 성장률(CAGR)로 성장을 지속할 것으로 예측되며, 이를 토대로 시장규모를 추정하면 다음과 같음(표 2.14).

⑨ 비용저감율

- 개발기술에 의한 비용저감률 산정을 위해 기존의 유기계 단열재 및 무기계 단열재에 관한 모든 선행 재료 대비 개발기술의 비용저감율 검토가 필요하나, 모든 선행 재료에 대한 원가계산 등이 현실적으로 불가하므로, 파악된 자료 한도에서 기존 재료 대비 개발기술의 비용저감율을 개발기술에 의한 비용저감율로 결정함.
- 현재까지 국내에서 단열재 시장을 지배하고 재료는 단연 EPS 단열재로서, 개발기술의 EPS 단열재 대비 비용저감율을 적용하기로 하며, EPS 단열재와 개발기술에 따른 제품의 제반 특성을 비교하여 하기 표 2.15에 제시함.
- 개발기술 제품의 경우 제조 단가가 13,500 원/m^2 으로 기존 EPS 단열재(9,000 원/m^2) 대비 다소 높은 편이나, 기대수명에 있어 40년으로 기존 EPS 단열재(최대 10년)에 비해 4배 이상 차이가 있음.
- 이러한 제품의 기대수명을 고려하여 기존 EPS 단열재의 경우 아무리 적어도 10년 후 1회 재시공에 따른 비용을 추가 반영하는 것이 합리적이므로, 이를 현가로 환산하면 총 14,795 원/m^2 으로 계산됨.
- 따라서 개발기술의 비용저감율을 8.8%로 추정함.

표 2.12 개발기술 공법 적용 목표 시장점유율

구분	2024년	2025~2027년	2028~2035년
개발기술 공법 적용 목표 시장점유율	1%	2~4%	5%

표 2.13 국내 단열재 시장 전망(억원)

구분	2015년	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	CAGR(%)
무기단열재	1,901	2,010	2,124	2,245	2,373	2,508	5.7
유기단열제	3,531	3,732	3,945	4,170	4,407	4,659	5.7
합계	5,432	5,742	6,069	6,415	6,780	7,167	5.7

표 2.14 단열재 시장규모 추정(억원)

구분	'24년	'25년	'26년	'27년	'28년	'29년	'30년	'31년	'32년	'33년	'34년	'35년	계
시장규모	9,082	9,636	10,224	10,847	11,509	12,211	12,956	13,746	14,585	15,475	16,419	17,420	154,110
현재가치규모(@'20)	7616	7732	7851	7971	8093	8217	8343	8471	8600	8732	8866	9,001	99,492

표 2.15 개발기술의 기존 제품(EPS 단열재) 대비 차별성

차별성/경쟁요소	EPS 단열재	개발 제품(제안기술)
소재	유기소재 기반	무기소재 기반
제조 방법	건식 제조	습식 제조
제조 단계	장시간의 증기가열 시간을 필요로 함 (130 시간 이상)	증기가열 및 고압의 환경을 필요치 않음 (EPS 대비 1/3이상으로 단순화)
내화 성능	- (12층 이상의 일반 및 주거 시설물의 부재로서 사용 불가능)	2시간 이상 확보가능 (12층 이상의 일반 및 주거 시설물의 부재로서 활용 가능)
가격 경쟁력	9,000 원/m^2	13,500 원/m^2 (소규모 제조 단가 기준)
제작 소요시간	약 7일 소요 (EPS 발포 소요시간 포함)	약 3일 소요 (기건 양생 기간 포함)
내구성	자외선 노출시 변색 및 열 노출에 취약함	고 내구성
기대수명	10년(습기 및 자외선에 노출 시 5년 이하로 감소)	40년
환경성능	EPS 생산에 따른 유해 오염물질 배출 가능성 높음	산업부산물의 재활용 효과에 따른 친환경성 증대

⑩ 편익 산정

- 개발 공법 적용 가능 시장규모, 개발 공법 적용 비율, 비용저감률, R&D 사업화 성공률 등을 고려한 편익 산정 결과는 표 2.16과 같고, '24년 ~ ' 35년의 향후 12년간 약 41.2억원의 편익이 예상됨.

2.5.4 분석 결과

① 비용

- 2년간 개발 공법의 총 연구비는 6.2억원으로 조사되었으며, 이중 정부 출연금은 3.7억원, 기업 부담금은 2.5억원으로 구분됨.
- 총 연구비 6.2억원을 현재가치화하면 6.48억원으로 조정됨(표 2.17).

② 편익

- 개발 공법의 편익은 생산비용저감 편익만을 추정함.
- 편익을 종합하면 총 편익은 41.2억원으로 분석됨(표 2.18).

③ B/C ratio

- 이상의 경제성 분석 결과, 개발 공법의 B/C는 6.36로 산출되어, 경제적 타당성이 매우 높은 것으로 나타남.
- 한편, 정량적으로 제시할 수 없는 정성적 경제효과로는 내화 안정성, 지속가능성, 구조적 안전성 등을 들 수 있음.

표 2.16 편익 산정

구분	값	비고
개발 공법 적용 가능 시장규모	99,492억원	- 12년간('24~' 35년) 시장규모 예측결과 참조 - 현재가치 환산 금액
개발 공법 적용 비율	5%	- 목표 시장점유율 고려한 최소 예상 비율 적용
비용저감률	8.8%	- 기존 재료 대비 저감 기준
R&D 기여율	28.1%	- 거시적 관점에서 제시된 연구개발투자의 경제성장에 대한 기여도 적용
R&D 사업화 성공률	44.7%	- KISTEP의 최근 5개년 평균치
기술개발 진행률	75%	- 2개 년도 연구기간 중 2차년도 1/2 완료
편익	41.2억원	

표 2.17 개발기술 비용 종합

구 분	정부출연금	민간부담금	합 계	합 계 현 가
금 액 (억원)	3.7	2.5	6.2	6.48

표 2.18 개발기술 편익 종합

편익 항목	생산비용저감	합계
편익 현가 (억원)	41.2	41.2

2.6 개발기술 관련 정책 분석

2.6.1 국내 건축물의 냉·난방에 의한 에너지 소비 현황

- 국내 에너지 소비량 및 CO_2 배출량은 세계 8위 수준으로(2015년 기준), 2000년 대비 약 40% 이상 증가하였음.
- 국내 건축물의 냉·난방을 위해 소비되는 에너지는 전체 에너지 소비의 58.7%이며, 공동주택의 냉·난방을 위해 소비되는 유류는 연간 17.5 ℓ/m^2에 달함.
- 국내 에너지 소비효율은 일본의 1/3 수준으로 전체 에너지의 35.7%가 건축물의 조명 및 냉·난방에 의해 소비되고 있으며, 특히 인구 과밀인 서울의 경우 총 에너지 사용량 중 58%가 건축물 운영에 의해 소비되고 있음.

2.6.2 건축물의 에너지 절감정책 강화

- 정부는 2030년까지 국가 탄소감축목표를 배출전망치(BAU) 대비 37%로 설정하였으며, 건설부분은 31%의 감축목표를 제시함
- 국토부는 에너지 기준 강화를 위해 2017년부터 신축 건축물의 냉·난방 에너지에 대해 90% 감축(2009년 대비)의 목표를 설정하였음.
- 제로에너지 빌딩 국가 로드맵에 따라 2017년부터 제로에너지 건축물 인증제가 시행되며 2020년 공공

부문, 2025년 민간부분까지 인증제도가 확대될 예정임.

- 건축물 에너지 소비 비율이 높은 서울시의 경우 건축물 에너지소비 총량제 실시를 통해 2030년까지 건축물 에너지 소비량의 20%를 절감할 목표임.

2.6.3 건축물 열관류율 및 내화 법규 강화

- 건축물 에너지 절감 정책에 따라 2018년부터 중부지역의 건축물 외벽에서 제한하는 열관류율 기준은 0.15 $W/m^2 \cdot K$ 이하로 적용되고 있는데, 이는 2010년(0.36 $W/m^2 \cdot K$) 대비 약 40% 낮아진 수준임(표 1 참조).
- 유기 단열재 시공에 따른 화재 발생예방 및 내화규제 강화를 위해 2015년부터 6층 이상 건물에 불연, 준 불연 마감재 적용이 의무화됨.

2.6.4 건축물 에너지 절감에 대한 국제 정책 현황

- 유럽과 미국은 1990년대부터 강도 높은 건물 에너지 절약정책을 추진하고 있으며, 유럽의 경우 EU의 FPBD 정책에 따라 모든 회원국은 건물에너지 성능 증명서를 의무적으로 제출해야 함.
- 독일의 패시브하우스, 프랑스의 에피네르기 등의 저에너지 빌딩 관련 인증기관을 설립하고 인증제도를 기반으로 건물의 에너지를 최대 85%까지 감축시키도록 독려함.
- 영국은 2016년부터 모든 신규주택에 대해 이산화탄소 배출을 완전히 제로화할 것을 규정하였음.
- 일본은 2010년 에너지 기본계획을 시작으로 2030년까지 모든 신축건물(공공 및 민간)에 대해 제로에너지 빌딩을 달성하도록 제시하였음.
- 미국은 이그제큐티브 오더에 따라 2020년까지 미국전역의 주거건물, 2030년까지 모든 연방정부건물, 2050년까지 모든 상업용 건물에 대해 제로에너지 빌딩의 목표를 설정하였음.
- 이와 같이 선진국들은 건축물에서 소비되는 에너지 절감에 대한 정책적 규제를 지속적으로 강화하고 있으며, 이에 따라 우리나라도 건축물 에너지 절감정책의 강화와 더불어 단열소재에 대한 새로운 기술의 개발이 요구될 전망임.

2.6.5 내 건물에너지 절약 정책 현황

① 건축물 에너지절약 설계 기준

- 모든 건축물의 창, 바닥, 벽 단열을 일정 수준 이상으로 요구하고 에너지절약형 설비를 사용할 것을 규정하는 기준으로, 연면적 500 m^2 이상의 모든 건물은 설계 시 "에너지절약계획서"를 제출하여 에너지 성능 평가 후 건축 허가를 받을 수 있음.
- 에너지절약계획서에는 단열재의 종류와 두께, 열전도율, 보일러 및 냉동기의 설비 효율, 전기설비 등을 기재하여야 함.

② 건축물 에너지 소비 총량제

- 건축물의 단위면적당 에너지 소비량이 일정기준 이하가 되도록 관리하는 제도로서, 연면적 합계가 3,000 m^2이상의 업무시설(공공기관은 500 m^2이상)의 공동주택에 건축허가 시 건축물에너지소요량평가서를 제출하도록 함.

- ISO 13790 등 국제규격에 의한 난방, 냉방, 급탕, 조명, 환기 등에 필요한 단위면적당 1차 에너지 소비량을 평가함.

③ 건축물 에너지효율등급 인증제도

- 건축물 운영에 필요한 난방, 냉방, 급탕 등 에너지 소비량을 평가하여 10개의 등급으로 평가하는 제도이다. 주거용 건물 및 주거용 이외의 용도 건축물도 대상이 됨.
- 건축물 에너지 소요량에 대한 객관적인 정보를 제공하고 에너지 절약기술에 대한 자발적 투자를 유도하여, 경제적 이익과 에너지 효율을 제고하는 데 목적이 있음.
- 소비자는 건축물 에너지 정보를 제공받고 비용을 절감할 수 있으며, 주택사업자는 효율등급을 마케팅 전략으로 활용할 수 있음.

④ 녹색건축물 조성 지원

- 녹색건축물 조성 지원은 표 2.19에 나타내었음.
- 건축녹색건축물은 에너지의 이용 효율과 신재생에너지의 사용 비율이 높고 온실가스 배출과 환경에 미치는 영향이 최소화되고(「저탄소 녹색성장 기본법」 제54조), 쾌적하면서 건강한 거주환경을 제공하는 건축물을 의미함.
- 녹색건축물 조성 사업은 탄소 배출 저감 목표에 맞춰 건축물의 에너지 효율 향상을 유도함. 이 사업은 건축물의 에너지효율 1등급 의무화 대상을 확대하고, 냉·난방 에너지 절감을 위한 고효율설비의 의무화, 녹색건축의 특정 등급 이상 등을 요구함.
- 20세대 이상의 공동주택을 건설하는 경우 다음의 기술을 이용하여 주택의 총에너지 사용량 또는 총 이산화탄소 배출량을 절감할 수 있는 에너지절약형 건물을 건설하도록 권고함.
- 저에너지 건물 조성기술 : 고단열·고기능 외피구조, 기밀설계, 일조확보, 친환경자재 사용 등을 통해 건물의 에너지 및 환경부하를 절감하는 기술
- 고효율 설비기술 : 고효율열원설비, 최적 제어설비, 고효율환기설비 등을 이용하여 건물에서 사용하는 에너지량을 절감하는 기술
- 신·재생에너지 이용기술 : 태양열, 태양광, 지열, 풍력, 바이오매스 등의 신·재생에너지를 이용하여 건물에서 필요한 에너지를 생산·이용하는 기술
- 외부환경 조성기술 : 자연지반의 보존, 생태면적율의 확보, 미기후의 활용, 빗물의 순환 등 건물외부의 생태적 순환기능의 확보를 통해 건물의 에너지부하를 절감하는 기술
- 에너지절감 정보기술 : 건물에너지 정보화 기술, LED 조명, 자동제어장치 및 지능형전력망 연계기술 등을 이용하여 건물의 에너지를 절감하는 기술

⑤ 신재생에너지 보급 주택 지원

- 태양광, 태양열, 지열, 소형풍력, 연료전지 등의 신·재생에너지원을 주택에 설치할 경우 설치비의 일부를 지원하는 제도. 주택, 마을단위, 임대주택을 대상으로 지원하고 한국에너지공단 그린홈이 운영함.
- 이 사업은 신재생에너지의 상용화된 설비를 대량 보급하여 시장을 확대하고, 기업의 중장기 투자를 유도하고자 한다.

- 개발된 신재생에너지의 기술은 상용화를 목표로 시범보급 설치비를 최대 80% 지원함.

⑥ 친환경주택 성능평가

- 기후변화에 대응하고 저탄소 녹색성장을 달성하기 위해 에너지절약형 친환경주택(그린홈)의 건설기준을 적용하는 제도.
- 공동주택 30세대 이상일 경우 사업승인 신청 시, 친환경 주택 성능평가서와 증빙자료를 지자체장에게 제출하고, 한국에너지공단 등 에너지관련 전문기관의 검토에 따라 사업승인 여부를 결정한다. 벽체, 창호, 바닥 등에 의한 난방부하 절감량, 태양열 시스템에 의한 급탕부하 절감량, 열원 설비에 의한 난방·급탕에너지 절감량, 신재생에너지에 의한 전력부하 절감량을 평가함.

2.7 사업화 전략

2.7.1 열메타와 콘크리트 기술을 융합한 고단열 PC 판넬

- 표 2.20~2.21 및 그림 2.4에는 개발기술의 우수성을 나타내었음.
- 기존 콘크리트의 단열성능의 한계를 극복하기 위해 열메타 구조, 기포 및 경량골재 콘크리트의 융합을 통한 무기계 고단열 PC 판넬.
- 기존 유·무기계 단열재와는 다른 신개념의 세라믹 단열소재 융합기술.
- 기존 나노 캡슐 에어로겔을 활용한 기포 콘크리트 고단열 소재 개발의 배합 및 첨가기술의 문제점을 개선하기 위한 새로운 재료들의 혼합과 시스템적 측면(열메타 및 용접철망 배치)의 단열성능 향상.
- 본 연구에서 제안하는 열전도율이 낮은 열메타 소재와 이의 구조 배치는 콘크리트의 단열성능의 한계를 극복할 수 있음.
- 일반 기포콘크리트에서 배합 시 발생하는 강도 및 모서리 경도 약화문제를 기포를 저량 첨가하면서 바텀애시 골재를 기반한 콘크리트의 배합을 적용하여 강도를 높게 그리고 열전도율은 낮게 가능함.

표 2.19 녹색건축물 조성지원 관련 기타 제도 및 사업

관련 기타 제도 및 사업	내 용
녹색건축 인증제	- 설계, 시공, 유지, 관리 등 건축의 전 과정에 걸쳐 에너지 절약과 환경오염 저감에 기여한 건축물에 친환경 건축을 인증하는 제도 - 토지 이용, 에너지 및 환경오염 기여, 재료 및 자원, 물순환 관리, 생태 환경 등을 종합하여 네 개 등급으로 평가함.
그린리모델링 사업	- 녹색건축물 확대를 목표로 기존 건축물 에너지 성능개선을 위한 리모델링 지원 사업 - 공공건축물을 대상으로 에너지 성능개선 기술 및 시공비를 지원하고, 시공품질을 검증함. - 에너지성능 개선을 목표로 하는 민간의 리모델링 사업에 대해 공사비의 이자를 5년 간 지원함.
제로에너지빌딩 인증제	- 제로에너지빌딩: 고단열·고기밀을 통해 에너지 성능을 극대화하고, 신재생에너지를 활용하여 외부로부터 유입되는 에너지가 최소화되는 건축물 - 건축물 에너지효율등급 1++ 이상, 에너지자립율* 20% 이상, 건축물에너지관리시시스템 또는 원격검침전자식 계량기 설치 등을 만족하는 건축물에 인증 부여

2.7.2 내화 및 내구성 측면에서의 유지관리 지속성

- 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬은 무기계 불연재로 내화에 우수하며, 물리적 성능이 우수하여 체적감소에 의한 성능저하 발생 가능성이 낮음.
- 경량골재를 기반하면서 40% 이하의 기포가 첨가되므로 기본적인 특성인 압축강도가 높아 장기간 동안 자연적인 환경에서 내구성이 우수함.

2.7.3 고성능의 새로운 단열소재

- 기존 콘크리트의 경우 압축강도를 고려하였을 때 열전도율을 1.2 $W/m^2 \cdot K$ 이하로 저감시키기 어려워 단열성능 향상에 대한 한계가 있음. 본 제안기술은 이를 극복하기 위해 열메타의 재질 및 구조체의 배치기술과 지속가능 콘크리트 기술과 융합하여 기존 콘크리트 대비 열전도율을 70% 수준까지 저감시킬 수 있는 PC 판넬 제작 기술임.
- 기존 유기계 단열재의 경우 가연재로 내화에 취약하여 화재발생시 화재 확산의 주요 원인이 되며, 연소 시 유해가스의 방출로 많은 인명과 재산피해를 발생 시키는 반면 본 제안기술의 경우 시멘트계 무기계 단열재료로 난연등급을 확보할 수 있음.
- 바텀애시 골재를 기반하면서 기포의 첨가량을 최소화를 통한 압축강도의 향상은 장기적인 환경에서 내구성(동결융해 저항성) 저하를 방지할 수 있음.

2.7.4 주요 국내 산업체의 건축용 단열재 개발기술

- 국내의 대표적인 단열재 생산 기업으로는 KCC, LG하우시스가 있는데, 현재 모든 기업들이 단열재 신기술을 개발하고 생산 설비 증설에 대한 투자비용을 늘리고 있는 추세임.
- 벽산은 최근 기존 단열재 대비 열손실이 12%가량 줄어드는 효과가 있는 시멘트 압출성형 패널에 아이소핑크를 접목시킨 모듈형 단열패널 기술을 개발하였음.
- KCC는 기존 미네랄울의 밀도를 낮추면서도 제품 고유의 불연 성능은 유지하기 위해 미네랄울의 밀도를 기존 140 kg/m^2에서 100 kg/m^2로 낮춘 외단열 미네랄울을 개발 중에 있음.
- LG하우시스는 현재 열경화성 수지를 발포시켜 만든 준불연 PF(페놀폼) 단열재 생산 설비를 증설 중에 있음.
- ALC 블록의 경우 ㈜성은이 시장을 선도하고 있지만 ALC의 낮은 모서리경도, 균열발생 및 수분침투에 의한 단열성 저하나 곰팡이 발생 등의 문제들이 여전히 발생하고 있는 상황임.
- 국내의 대표적인 단열재 생산 기업들은 건축물의 내화기준 및 단열성능 강화에 따라 고성능 단열재 개발에 대한 투자비용을 높이고 있지만, 기존의 유기계(발포 플라스틱계) 및 무기계(미네랄 울) 단열재의 성능을 향상시키는 수준에 불과하며, 유기계 단열재의 내화 성능한계나 무기계 단열재의 흡수성에 따른 성능저하 등의 근본적인 문제의 해결을 위한 방안은 부족한 실정임.

2.7.5 활용 방안

① 기술수요처

- 제안 기술은 건축물의 에너지 효율성을 높일 수 있는 건축재료이며, 기술의 수요처는 건축물의 내·외벽 단열재 분야임(표 7.2).

- 에너지 효율성이 우수한 패시브 하우스나 돔하우스에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이러한 구조물들은 외기에 직접적인 노출이 불가피하므로 고단열성을 갖는 본 제안기술의 적용이 가능할 것으로 판단됨.
- 또한 제안기술의 높은 단열성 및 무기계 세라믹 구조는 내화 충전물 및 내화구조체에 적용이 가능함.
- 특히 단열재에 의한 화재 확산, 유해가스 방출에 의한 인명피해 발생이 문제됨에 따라 건축물 내화성능에 대한 법규가 강화되어 무기계의 판넬 제품에 대한 수요처는 증가하고 있는 추세임.

표 2.20 종래기술 대비 제안 기술의 차별성 및 우수성

기존 단열 재료	제안기술 개요	차별성 및 우수성
· 유기 단열재 : 단열성능은 우수하나 내화성능이 낮음 · 무기 단열재 : 내화성능은 우수하나 단열성 확보에 한계가 있음. 특히 역학적 특성이 낮아 장기적인 환경에서 내구성 저하의 원인이 됨. 또한 적용처가 제한적이고 높은 재료단가로 경제성 낮음. · 나노에어로겔 : 기포콘크리트의 단열성 향상에 한계가 있음. 배합시 품질관리의 어려움. 단순 첨가 및 배합기술에 국한됨. 	· 단열성 확보를 위해 열전도율이 낮은 열메타 구조체의 적용 · 시멘트 기반의 무기계 세라믹 단열재료 · 첨가기술에서 열메타 최적화 및 용접철망의 배근기술로의 전환 · 바텀애시 골재를 기반하면서 기포가 저량 첨가되어 역학적 특성이 우수함. 이에 따라 장기적인 환경에서 내구성이 우수함.	① 기술의 안전성: 시멘트 기반 무기계 재료로 내화에 대한 안정성 확보 ② 기술의 지속성: 열메타 소재기술과 콘크리트 기술을 융합하여 서로의 단점을 보완함으로서 지속가능성 및 단열성 확보 ③ 기술의 적용성: 구조적 안전성을 확보한 프리캐스트 적용기술 ④ 기술의 전환: 단순 첨가기술에서 새로운 재료들의 최적 배치기술로의 전환 ⇩ · 열메타 소재 기술융합을 통해 내화성 및 내구성이 향상된 콘크리트 기반 단열소재 · 열메타 개념을 도입한 무기계 재료의 단열성능 효율성 극대화

그림 2.4 열메타 구조체를 활용한 PC 판넬의 장점

② 적용성 확대를 위한 연구확장 방안

- 아이디어의 검증이 성공적으로 완료되면, 추가 연구를 통하여 현장적용 및 사업모델을 구축하여 실용화로 연결될 수 있음.
- 공인인증기관의 인증을 통해 제안기술의 현장 적용 시 품질에 대한 신뢰성을 확보할 수 있음.
- 기존 내·외장재의 문제를 해결하면서 열메타 소재를 기반한 지속가능 PC 판넬 제품 개발로 연구가 확장될 수 있음.

③ 실용화·제품화 방안

- 연구초기 단계에서부터 제품성능 및 가격경쟁력의 차별화를 고려하여 본 기술의 시장점유율 확대를 위한 사업화 전략을 구축하는 기틀 마련.
- 시장진입 리스크 분석 및 기존기술 대비 경쟁우위를 확보할 수 있는 아이디어의 지속적 고민.
- 국제 지적재산권 확보 및 국제 건설박람회 참여를 통하여 해외시장 진출을 위한 인프라 구축.

④ 원천기술 확보

- 국내 및 국제 지적재산권 확보(국내 고유브랜드 창출)
- 에너지제로빌딩 및 에너지 고효율 빌딩(패시브하우스 등) 등에 이용될 수 있는 국토부 녹색인증 추진을 위한 인프라 구축.

⑤ 신산업 창출

- 제안기술은 무기계 고단열의 특성으로 기존 유기계 단열재의 상당부분 대체가 가능할 것으로 판단됨. 따라서 기존 유기계 단열재가 주로 적용되는 단열 패널 및 산업용 단열재(선박의 보냉재 및 냉장고용 보냉재) 등의 대체를 위한 신산업 창출 가능.

2.7.5 기대효과

① 기술적 중요성

- 열메타 소재, 기포 및 바텀애시 골재의 융합 연구를 통한 건축물 에너지 절감에 대한 원천기술 확보 및 국제기술 선도.
- 에너지 절감에 대한 사회적 문제에 대응하면서 건축물의 에너지 사용 효율성을 향상시켜 사회적 비용을 절감할 수 있는 국가 공공복지 기술.
- 기존 무기계 판넬의 단열성능 한계를 극복한 고성능의 무기단열재 기술의 선도.
- 기존 유기계 판넬의 문제점을 해결하고 내화에 대한 성능을 확보하여 재난 상황에 대응할 수 있는 안정성 확보 기술의 선도.
- 건설 신재료·신기술 등 국가 건설기술 브랜드 창출에 기여.

② 기술의 시장성 및 경제적 기대효과

- 국내 단열재 시장은 정부의 저탄소 녹색성장을 위한 에너지 절감 정책에 따라 단열재 시장은 2030년 약 1.3조원 규모로 성장할 것으로 평가되고 있음.

- 제안 기술은 기존 무기계 판넬 보다 단열효과가 우수하여 건축물의 열 손실을 약 30% 이상 줄일 수 있으므로 냉·난방을 위한 건축물의 에너지 절감을 통해 약 수천억원 이상의 경제적 효과를 가짐.
- 기존 건축용 단열재 시장의 5%를 본 제안 기술로 대체 시 약 350억 수준의 시장 점유가 가능하며, 내화법규의 강화에 따른 무기단열재의 적용이 확산됨에 따라 그 규모는 더욱 증가할 것으로 기대됨.
- 정부의 단열성능 강화방침에 따라 무기단열재인 그라스 울의 경우 두께를 2017년 255 mm 에서 2025년 380 mm까지 강화할 계획임. 이에 따라 동일한 면적에서도 2025년까지 무기단열재 시장은 연간 약 9.5%의 성장할 것으로 전망됨.

③ 사회적 파급효과

- 건축물에 의한 환경부하 절감 및 에너지의 효율적 사용 요구에 적극적으로 대응하여 사회적 비용절감 효과 및 건축물의 냉·난방 에너지 사용 절감에 따른 비용절감 기대.
- 단열성능 향상에 따라 건축물 냉·난방에 소비되는 에너지의 20% 이상 절감할 수 있을 것으로 기대됨.
- 첨단융합 건설기술 및 무기단열재의 성능향상 기술에 대한 전문 인력 양성효과.

2.7.6 사업화 계획

- 본 제안기술의 토대가 되는 연구는 기초원천 연구로서 최종 목표는 TRL 4단계임. TRL 4단계의 성공 종료후 추가연구(2024년 종료 예상)는 TRL 9~10단계를 목표로 하고 있으며, 이 때의 사업화 계획은 표 2.22 및 2.23에 나타내었음.

2.7.7 사업화 전략

① 형태 및 규모

- 상용화 형태 : 열메타 기반 고단열·지속가능 PC 판넬 제조
- 수요처 : 건설사, 한국토지주택공사 (LH), 서울주택도시공사 (SH), 민간주택업자
- 예상 단가 : 고기능성 자재로 고부가가치 제품 60,000원/m^2

② 상용화 능력 및 자원 보유

- 아이에스동서(주)는 건설, 요업, 콘크리트 등의 사업을 영위하는 기업으로 추후 상용화 단계에서 자체공사를 Target project 선정 가능하며, 시공실적을 바탕으로 수요처 확보가 용이함.
- 또한 기술연구소의 기술개발과 각 공장의 품질관리팀의 엄격한 품질관리를 통해 추가 성능개선 및 경제성 확보가 가능함.
- 30여년이 넘게 건자재 사업을 영위하고 있는 기업으로 콘크리트 제조기술을 보유하고 있으며, PC판넬 개발에 따른 상용화에 제작공장(국내 10곳)과 거래처 및 영업능력을 이용할 수 있는 강점을 갖고 있음(그림 2.5).
- "자기충전 콘크리트", "고로슬래그 적용 PHC PILE 배합기술 개발", 등의 다수의 배합연구를 수행한 10여명의 석학들과 각 공장마다 수년 이상의 품질관리경력을 갖고 있는 2~5명의 인력이 항상 배치되어 있어 풍부한 인적자원을 확보하고 있음.

표 2.21 본 개발기술의 수요처 분석 결과

용도	기술의 우위성	기존 제품 대체
공동주택 바닥구조 / 돔 하우스 벽체 등	· 습식형으로서 고온고압 기술 대비 시공의 간편성	· 기존 일반 기포콘크리트 대체
프리캐스트 벽체 단열 패널 / 샌드위치 패널의 내장재	· 불연성, 내후성 및 안전성	· EPS 및 그라스 울 등의 유기 단열재
가변형 벽체용 블록	· 고성능(기존 제품 대비 고강도 및 고단열)	· 기존 일반 ALC 단열 패널 등

표 2.22 생산 계획

구분		(2024년) 개발 종료 후 3년	(2025년) 개발 종료 후 4년	(2026년) 개발 종료 후 5년
국내	시장점유율(%)	1	2	5
	판매량(단위:m^2)	30,000	60,000	150,000
	판매단가(원)	60,000	60,000	60,000
	국내매출액(백만원)	1,800	3,600	9,000
해외	시장점유율(%)	-	-	-
	판매량	-	-	-
	판매단가($)	-	-	-
	해외매출액(백만$)	-	-	-
당사 생산능력(단위m^2)		60,000	80,000	100,000

표 2.23 투자 계획

항목(천 원)		(2024년) 개발 종료 후 3년	(2025년) 개발 종료 후 4년	(2026년) 개발 종료 후 5년
매출원가				
판매관리비				
자본적 지출	토지			
	건물/구축물	1,000	1,000	1,500
	기계장치등	1,000	1,500	2,500
자본적지출 합계		2,000	2,500	4,000

(a) 요업공장 (b) 콘크리트공장

그림 2.5 아이에스동서(주)의 국내 공장

③ 상용화, 판로확보 및 마케팅 계획

- 지속적인 산·학 협력관계를 통해 양산 제품의 문제점을 보완.
- 상용화를 위해 재료 수급 및 제작공장 시설투자를 계획하고 있음.
- 관련기술의 국내·외 지적재산권 확보.
- 자체공사 및 기존 영업망을 활용한 적극적인 홍보.

2.7.7 사업화를 위한 비즈니스 모델 수립

① 사업화 모형수립(BM) 배경

- 건축물의 에너지 효율성 향상에 대한 정책 및 법규들의 강화로 지속가능성이 높은 재료를 바탕으로 한 콘크리트 단열재에 대한 수요자들의 니즈가 변하고 있으며, 고객들의 새로운 요구에 대응할 수 있는 제품개발 및 상용화 전략이 필요함.
- 기존 유기재 또는 무기재 PC 판넬이 갖는 단점을 보완하고 고단열 및 불연 특성 등의 성능향상을 통한 고부가가치 제품 개발을 통한 차별화.

② 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인

- 열메타 소재 및 기포를 이용한 고단열성 확보와 바텀애시 골재를 활용한 경량 콘크리트를 이용한 불연성능 및 우수한 역학적 특성의 확보로 시장점유율 확대를 위한 차별화 전략마련.

③ 기술의 포지셔닝 분석

- 그림 2.6에는 기술의 포지셔닝 분석을 나타내었음.
- 제안 기술의 경쟁우위는 열메타 소재와 콘크리트 기술을 융합하는 차별성과 단기실용화를 위한 PC 판넬 제조기술의 확장을 통한 경쟁력 강화임.
- 차별성 측면에서는 열메타 소재를 단순히 첨가하는 수준이 아닌, 각 재료들의 열적 특성을 고려한 재료 선정 및 최적 배치의 기술임.

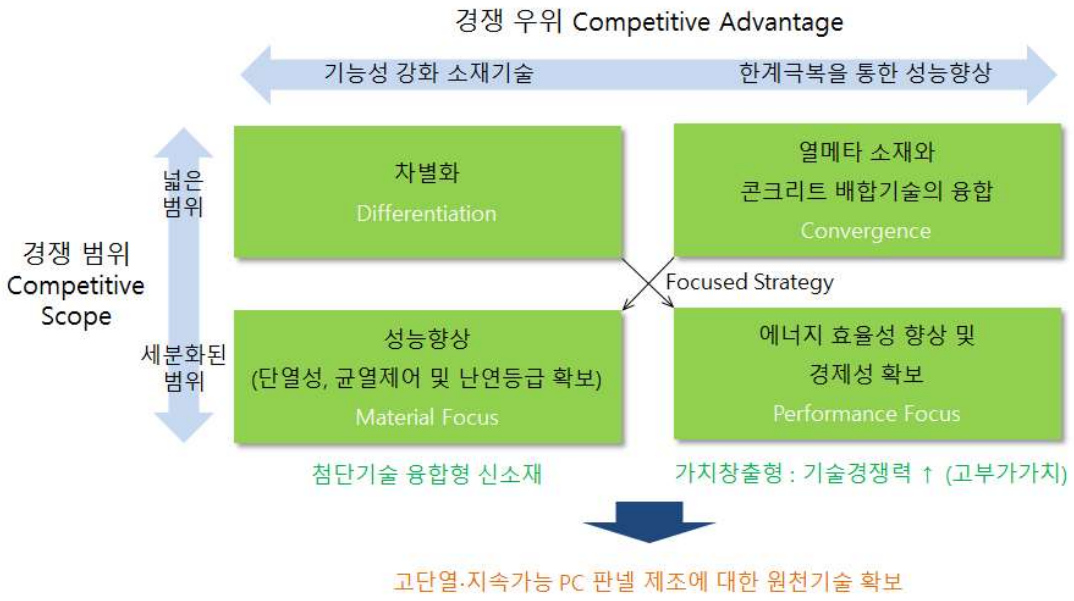


그림 2.6 기술의 포지셔닝 분석

- 혁신성 측면에서는 열메타 소재, 기포 및 경량골재 콘크리트를 융합한 새로운 개념의 판넬 제품임.
- 대량생산 시스템을 갖추어 경제성을 확보한다면 단열재 또는 판넬 시장에 쉽게 접근할 수 있으며, 수출의 기대효과도 큼.
- 표 2.24에는 개발기술의 SWOT 분석을 나타내었음.

2.7.8 목표시장 구조

① 경쟁 기업 현황

- 유기 및 무기계 PC 판넬제품은 KCC, 선경, 삼익, 신라교역, 기린산업, 풍림산업, 쌍용양회, 벽산 등 8개사의 경합구조였으나, 외환위기 이후 ㈜성은과 ㈜SYC만 현재 제품을 생산하고 있음.

② 시장 진입 장벽

- PC 판넬제품의 시장은 공장 신축에 500억원 이상으로 시장진입이 어려운 특수한 시장구조를 갖고 있으나, 아이에스동서(주)의 제작기반 시설을 활용을 통한 시장을 유연성 있게 진입할 예정임.

2.7.9 수익 확보 전략

① 주요 고객군

- 건설사, 한국토지주택공사 (LH), 서울주택도시공사 (SH), 민간주택업자.

② 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

- 건축물 에너지 효율성 향상 및 기존 무기계 PC 판넬과의 차별화 제품으로서 브랜드화.

표 2.24 SWOT 분석

강점(Strength)	약점(Weakness)
· 기술의 원천성과 독창성 확보, 국내 · 외적으로 실용화된 유사기술 없음. 이에 따라 국내 · 외 지적재산권을 확보하고 있음. · 기술의 안전성, 내구성, 고성능 등의 특장점 보유. · 지속가능 콘크리트 기술과 융합하여 기존 콘크리트 대비 열전도율을 70% 수준까지 저감. · 시멘트계 무기계 단열재료로 난연등급을 확보. · 바텀애시 골재 기반, 기포 첨가량 최소화를 통한 압축강도의 향상으로 장기적인 환경에서 내구성(동결융해 저항성) 향상.	· 현재 연구 단계로서 시장진입에 대한 기술자 인식개선 및 해외수출 개척 등이 다소 어려움. · 중소기업으로서 기술의 시장성 확대를 위한 적용성 확대 및 관련연구 수행에 대한 자본 확보가 다소 어려움.
기회(Opportunity)	**위협(Threat)**
· 정부의 '저탄소 녹색성장' 정책 추진으로 고기능성 유기단열재 및 불연성 무기단열재에 대한 사회적 요구 증대. · 해외 주요국가 대비 무기단열재 비중이 낮음. · 국내 · 외적으로 유사 기술 경쟁상대가 없어 해외수출의 모색이 가능함. · 특히, 국내 · 외적으로 경량골재 콘크리트, 기포 및 열메타 소재의 융합과 관련된 기술은 전무함.	· 국내 · 외적으로 유사기술 및 경쟁상대가 없어 특별한 위협요인은 없음.

- 경향하우징페어 및 MBC 건축자재 박람회 출품을 통한 기술홍보.
- 기존 판매 대리점을 이용한 제품 홍보.

2.8 개발 공법 관련 보유특허의 기술가치평가

2.8.1 평가 대상

- 본 기술가치평가의 대상은 경기대학교 산학협력단에서 보유하고 있는 본 개발기술에 관련된 한국특허출원 제10-2017-0158794호(제1발명, 발명의 명칭 : 열메타 구조를 이용한 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬), 한국특허출원 제10-2019-0135855호 및 베트남특허출원(20년 6월 출원예정)(이상 제2발명, 발명의 명칭 : 열메타 임베디드 고단열 판넬)의 지식재산권과 관련된 기술임.

2.8.2 평가 목적

- 본 기술가치평가는 상기 특허에 대한 기술을 평가하고, 국내외 업체에서 본 기술을 사용한 제품을 사업화 할 경우의 사업가치 및 기술가치를 산출함으로써, 본 경제성 분석 결과와 함께 참고자료로 활용하는 것을 목적으로 함.
- 본 기술가치평가의 목적은 평가 요청인이 제시한 기술자료, 추정 재무제표, 기타 관련자료에 근거하여 기술의 사업화와 기술이전을 위한 평가대상 기술의 객관적 가치를 제시하는 것임.
- 상기 추정 재무재표의 신뢰성 등은 검증되지 아니하였으므로 상기 기술의 가치에 대한 법적 구속력 있는 견해나 근거의 제시를 목적으로 하는 것은 아님.

2.8.3 제 1발명

① 목적

- 본 발명은 EPS 수준의 단열성을 갖는 프리캐스트 콘크리트 판넬을 개발하여, 단열성 확보를 위한 EPS 추가 시공이 요구되지 않아, 화재 위험 감소 및 원가 절감이 가능한 고단열 프리캐스트 콘크리트 판넬을 제공하고자 함(그림 2.7).

② 구성(대표청구항)

- 건축용 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬에 있어서, 상기 판넬은 내부에 열전달을 억제하기 위한 열메타 구조가 포함된 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬.

③ 효과

- 본 발명은 열메타(thermal-meta) 구조를 콘크리트 판넬 내부에 삽입함으로써, EPS 수준의 높은 단열성을 갖는 프리캐스트 콘크리트 판넬을 개발하여, 단열성 확보를 위한 EPS 추가 공정이 필요 없고, 이에 따라 화재 위험 감소 및 원가 절감이 가능한 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬을 제공할 수 있음.

2.8.3 제 2발명

① 목적

- 본 발명은 EPS 수준의 단열성을 갖는 열메타 임베디드 고단열 판넬을 개발하여, 단열성이 우수하여 EPS 추가 공정이 필요 없어 화재 위험 감소 및 원가 절감이 가능한 단열 성능이 우수한 열메타 임베디드 고단열 판넬을 제공하고자 함(그림 2.8).

② 구성(대표청구항)

- 열메타 임베디드 고단열 판넬로서, 상기 판넬은 내부에 열전달을 억제하기 위한 열메타 구조가 포함되고, 상기 고단열 판넬은 산업부산물 시멘트계 재료를 포함하는 것을 특징으로 하는 열메타 임베디드 고단열 판넬.

③ 효과

- 본 발명은 열메타(thermal-meta) 구조체를 콘크리트 판넬 내부에 삽입하고, 상기 열메타 구조체를 이루는 유닛의 내부를 단열 특성을 갖는 나노구조체로 채우고, 열메타 구조 및 배치의 최적화를 통해 단열성을 향상시킴으로써 단열성 확보를 위한 EPS 추가 공정이 필요 없고, 이에 따라 화재 위험 감소 및 원가 절감이 가능한 열메타 임베디드 고단열 판넬을 제공할 수 있음.

2.8.4 대상 특허의 유사성

- 대상특허의 심사 과정에서 가장 유사한 선행기술로서 일본공개특허 특개2001-140373호(명칭 : 외단열 벽재, 이하 '선행기술 1') 및 일본공개특허 특개평07-252881호(명칭 : 내력벽, 내력벽의 제작 방법, 철근바구니체, 매입 블록, 축열마루 및 유체 구조, 이하 '선행기술 2')가 제시되었음.

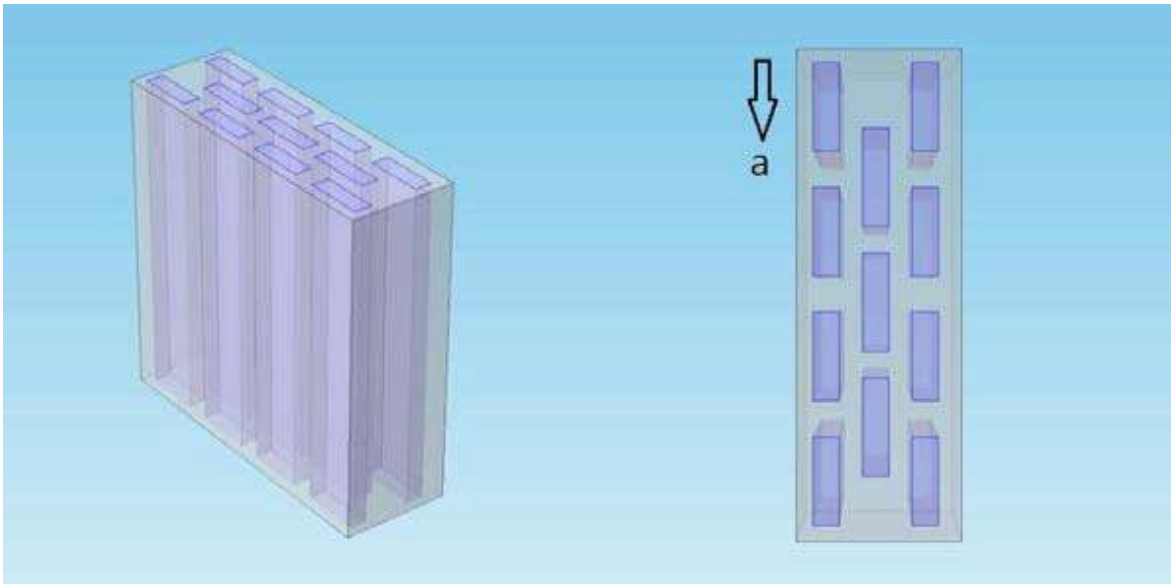


그림 2.7 대상특허(제1발명)의 도면

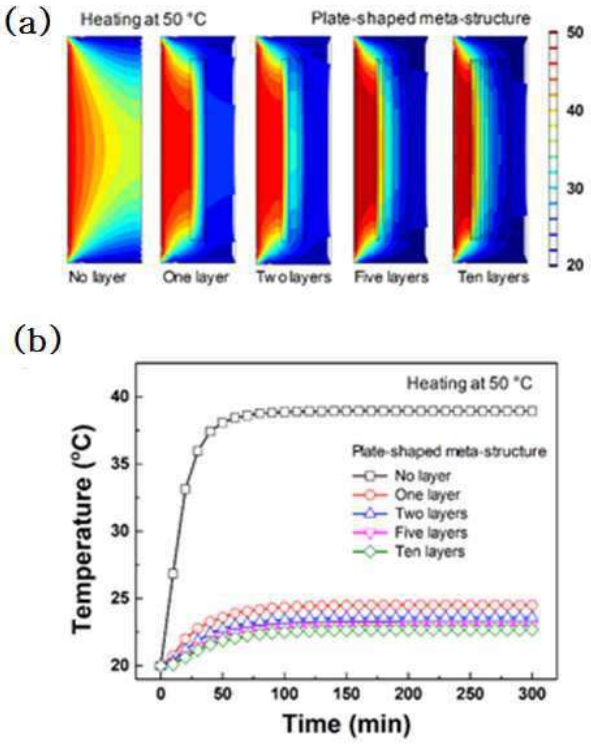


그림 2.8 대상특허(제2발명)의 도면

2.8.5 대상특허의 차별성

- 선행기술 1에 중공골재를 포함하는 콘크리트 패널에 대하여 기재되어 있고, 선행기술 2에 유리병이 내부에 지그재그로 엇갈려 배열된 콘크리트 내력벽이 기재되어 있어, 대상특허의 진보성을 인정하지 않은 취지임.
- 그러나, 대상특허는 플라스틱 또는 강재로 제작된 직육면체 유닛으로 구성된 열메타 구조를 사용함으로써 압축강도가 저하되지 않으면서도 단열성이 EPS 수준으로 향상되는 콘크리트 판넬을 제공하고 있음.
- 구체적으로 대상특허는 모서리의 길이가 3~500 mm인 직육면체 유닛이 1 이상의 평면에 일정간격으로 반복 배치되어, 단열성을 EPS 수준으로 향상시키고 있으며, 이를 실험으로 명확하게 입증하고 있음.
- 그림 2.9를 참조하면 원통형 유닛이 내입된 판넬의 경우(c) 일반 콘크리트 판넬에 비하여 온도 변화량이 적은 것을 알 수 있으나, 스티로폼이 내입된 판넬에 미치지 못하는 것을 알 수 있음. 그러나 직육면체형 유닛이 내입된 경우(d)에는 스티로폼의 열변화 그래프와 거의 유사한 것을 알 수 있고, 이를 통해 콘크리트 판넬에 내입되는 구조의 형상에 의하여 콘크리트 판넬을 통한 열전도를 억제할 수 있으며, 직육면체 형상의 경우 단열재로 사용되는 스티로폼에 근접한 열차단 효율을 나타낼 수 있음이 확인됨.
- 또한, 대상특허는 직육면체 유닛의 재질을 플라스틱 또는 강재로 한정함으로써 열전도 억제 효율을 향상시키고, 압축강도를 유지할 수 있음.
- 이에 대하여, 선행기술 1은 명세서 [0008]에서 “공기를 밀봉한 중공골재로서, 유리, 합성수지, 세라믹, 슬래그 기타 다양한 재료로 구성되는 내부에 공기를 밀봉한 구형체, 원통형체, 불규칙 형상체 등이 사용된다.” 라고 기재하고 있으나, 대상특허의 특징인 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조의 단열성 향상에 대하여는 전혀 기재하고 있지 않음.

- 또한, 선행기술 2의 경우 명세서 [0031]에서 “내측의 빈병 45와 외측의 빈병 45는 수평 방향에는 밀착해 지그재그 배열되고 수직 방향에는 상하의 끝을 교대로 하는 형식으로 배열된다” 라고 기재하고 있어 대상특허의 열메타 구조와 유사한 구조에 대하여 기재하고 있으나, 명세서 [0020] 에서 “유리용기 14를 포함한 층 13은 콘크리트만의 경우와 비교하면 압축강도가 떨어지지만” 라고 기재하고 있어 유리용기를 열메타 구조로 사용하는 경우에는 단열성은 높일 수 있으나, 압축강도가 저하되는 것을 알 수 있고, 대상특허의 특징인 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조의 단열성 향상에 대하여는 전혀 기재하고 있지 않음.
- 이에 대하여, 대상특허는 명세서 [0015]에서 “콘크리트 내부에 특정 구조물을 특정 배열로 삽입할 경우 열전도율을 EPS 수준으로 감소시키고, 압축강도 등의 기계적 물성을 유지할 수 있는 것을 발명하고 본 발명에 이르게 되었다.” 라고 기재하고 있어 압축강도가 저하되지 않는 콘크리트 판넬을 제공하고 있고, 유닛을 직육면체 형상으로 한정함으로써 단열성을 극대화시킴.
- 이는, 선행기술 2는 플라스틱 또는 강재로 제작된 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조가 삽입되어 단열 성능을 극대화시키고 압축강도는 유지하는 대상특허의 기술적 특징에 대하여 전혀 인지하지 못한 것에서 연유됨.
- 이와 같이, 대상특허는 플라스틱 또는 강재로 제작된 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조를 사용함으로써 압축강도가 저하되지 않으면서도 단열성이 극대화되는 콘크리트 판넬을 제공하고 있으나, 선행기술 1은 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조의 단열성의 극대화에 대하여 전혀 기재하고 있지 않아, 선행기술 2의 지그재그 구조를 선행기술 1에 조합하는 것은 용이하지 않으며, 설사 선행기술 2의 지그재그 구조를 선행기술 1에 조합하더라도, 선행기술 1 및 선행기술 2에는 플라스틱 또는 강재로 제작된 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조에 대하여는 구체적으로 기재하고 있지 않으므로, 선행기술 1 및 선행기술 2를 조합하여 대상특허의 플라스틱 또는 강재로 제작된 직육면체 형상의 유닛으로 구성된 열메타 구조가 삽입되어 압축강도가 저하되지 않고 단열성이 극대화된 콘크리트 판넬을 도출하는 것은 통상의 기술자에게 용이하지 않음.

- 따라서, 대상특허에 따른 열메타 구조를 이용한 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬 특허기술은 열메타 구조 관련 핵심 기술요소를 포함하여 포괄적인 권리범위를 확보할 것으로 평가됨.

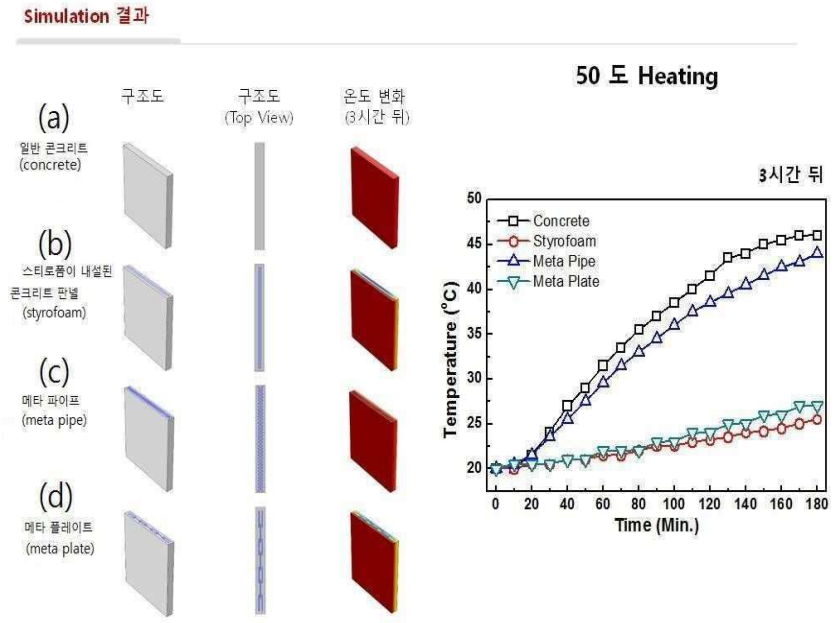


그림 2.9 대상특허의 시뮬레이션 결과

2.8.6 평가 시나리오 및 프로세스

- 본 평가는 소득접근법에 기반을 두고 한국산업기술진흥원(구 한국기술거래소)에서 시행한 '기술평가 시스템 구축사업' 에 의한 가치평가 핵심지표를 사용하여 가치를 평가함. 사업의 주체는 아이에스동서 주식회사로 선정함.
- 아이에스동서 주식회사의 주생산 품목은 요업 및 콘크리트 제품, 주택건설임.
- 아이에스동서 주식회사의 매출액은 2017년 기준 1,057,093백만원으로 창업이래 지속적으로 증가추세에 있음. 동사는 부채비율이 140.3%이며, 매출액 대비 연구개발비 비율이 5.8%로서 연구개발 기반한 사업화 아이템을 보유하는 데 노력을 집중하고 있음.
- 본 평가는 PC 판넬 내지 단열재 시장을 목표시장으로 하여 평가대상 기술이 사업에서 창출 가능한 연도별 현금흐름을 구하고, 이를 적정 할인율로 할인하여 평가 시점에서의 사업가치를 구한 다음, 기술가치평가 핵심지표인 기술기여도를 산출하고, 산출된 사업가치에 기술기여도를 곱하여 최종적으로 기술의 가치를 산정함.

2.8.7 현금흐름 추정

① 기술수명

- 분 분석에서 기술수명은 앞서 경제성 분석의 편익 기간 산정 시 사용한 기술수명기간과 동일하게 12년(2024~2035년)으로 책정함.

② 재무정보

- 앞서 경제성 분석에서 살펴본 바와 같이, 국내의 단열재 시장 규모는 2020년 7,167억 원으로 추정됨.
- 세계 프리캐스트 공법 시장은 예측기간 중 6.10%의 연평균 성장률(CAGR)로 성장을 지속할 것으로 예측됨.
- 경제성 분석에서 추정한 시장규모에 본 대상기술의 평균 시장점유율 5%를 매출액으로 추정함.
- 매출원가 비율, 판관비 비율, 영업이익 비율은 한국은행 경제통계시스템의 해당 산업군(F)의 중소기업의 표준 재무정보(2017년 기준)를 근거로 적용함.
- 위 표준 재무정보에 따라 매출원가 비율, 판관비 비율 및 영업이익 비율은 각각 85.45%, 11.15% 및 4.40%를 각각 적용함. 법인세 비율은 0.73%를 적용하였고, 감가상각비는 0.31%를 적용함. 운전자본은 9.85%를 적용함.

③ 할인율

- 할인율 결정에는 가중평균자본비용(WACC)을 적용함.
- WACC를 구하기 위해 자기자본비용의 경우 무위험자산수익률(Rf)은 최근 만기 5년이상 국고채 수익률인 1.86%로 하였고, 베타(β)는 본 해당 관련 건설업종의 코스닥 상장사 6개 회사의 최근 평균 베타값 0.89로 설정하였으며, 시장위험프리미엄(MRP)은 8%로 정하여 다음과 같이 계산함.

$$\text{자기자본비용}(Ke) = Rf + \beta \times MRP = 1.86\% + 0.89 \times 8\% = 8.98\% \quad (2.5)$$

- 산업통상자원부 가이드(2017년) 종합건설업(F41) 부문에 근거해, 타인자본비용(Kd)을 9.52%, 자기자본비율을 0.77 및 타인자본비율을 0.23으로 적용하고, 한계법인세율 20%를 적용하여 가중평균자본비용을 다음과 같이 제시하고 있음.

WACC = (자기자본비용 × 자기자본비율) + (타인자본비용 × 타인자본비율 × (1 − 한계법인세율))
= (8.98% × 0.77) + (9.52% × 0.23 × (1−20%)) = 8.67% (2.6)

- 따라서, 최종 할인율은 가중평균자본비용인 8.67%가 됨.
- 이 할인율을 적용하여 현금흐름을 할인한 후 연도별 현가를 합산하여, 기술가치를 4,249백만원으로 평가함.

2.8.8 기술기여도 산정

- 기술기여도의 산정은 기술의 효용성을 평가한 후 긍정적인 결과가 나올 경우 기술의 경쟁력을 평가하여 개별기술 강도를 구하는 것으로 함(표 2.25).
- 100점 만점(+4점부터 −2점까지의 평점으로 7등급으로 평가)에서 각각 67.5점 및 62.5점의 평가를 받은 1단계 '기술의 효용성' 평가의 경우 기술 상용화 타당성이 입증되어 2단계 기술의 경쟁력 평가를 진행함. 본 평가의 출원특허에 대한 2단계 평가는 법적인 보호강도와 상업적 우위성으로 나누어서 평가하였고, 평가 결과 개별 기술강도는 각각 56.5% 및 52.5%로 평가됨. 여기에 평가 대상특허에 대해 기여도(제1발명 50%, 제2발명 50%)를 부여하여 기술강도 54.5%로 적용함.
- 최종적인 기술기여도는 2단계에서 구한 기술강도에 산업기술요소 비율을 곱하여 산정됨. 또한 산업기술요소는 한국과학기술정보연구원에서 제공하는 산업기술요소 지수(2017년 기준)로서, F41 '종합건설업' 의 47.9%를 적용하여, 최종 기술기여도는 다음과 같이 산정됨.

기술기여도(%) = 산업기술요소 지수(%) × 기술강도(%) = 47.9% × 51.3% = 26.1% (2.7)

2.8.9 기술가치평가 결과

- 본 평가 대상기술의 가치를 수익접근법에 의한 미래 현금흐름을 가중평균자본비용으로 할인한 현재가치를 산출한 결과, 사업가치는 16,278백만 원으로 산출됨. 또한 사업가치에서 기술이 차지하는 기술의 기여도를 산출한 결과 26.1%로 나타남.
- 따라서, 평가대상 기술의 기술가치는 사업가치 16,278백만원에 기술기여도 26.1%를 곱한 4,249백만원으로 평가됨(표 2.26).

표 2.25 기술기여도 산정표

대항목	중항목	소항목	평점 (제1 발명)	평점 (제2 발명)	가중치	최종점수 (제1 발명)	최종점수 (제2 발명)
기술의 효용성	기술의 우수성	기술내용의 합리성과 신규성	2	2	2.5	5	5
		기술수명과 대체기술 출현 가능성	3	2		7.5	5
		권리화의 타당성	3	2		7.5	5
		기술의 전략성	3	3		7.5	7.5
	기술의 활용성	기술수요와 시장의 잠재성	3	3	5	15	15
		기술의 파급성	2	2		10	10
		현재시장 및 잠재시장 규모	3	2		15	15
	평점소계					67.5	62.5
기술의 경쟁력	법적인 보호강도	법적 대응력	2	2	2.5	5	5
		권리범위와 특허유지의 타당성	2	2		5	5
		권리의 안전성	3	2		7.5	5
		권리의 이전 가능성	3	3		7.5	7.5
	상업적 우위성	기술의 생산성	2	2	1.5	3	3
		기능적 우위성	3	3		4.5	4.5
		기술의 적응력	3	3		4.5	4.5
		가격/원가 우위성	2	2		3	3
		이익구조상 우위성	3	2		4.5	3
		상용화 용이성(1)	1	1		1.5	1.5
		상용화 용이성(2)	1	1		1.5	1.5
		상용화 용이성(3)	2	2		3	3
		유사성	2	2		3	3
		표준화 적합성과 판로의 개척성	2	2		3	3
	평점소계					56.5	52.5
기술강도						54.5%	
산업기술요소지수						47.9%	
기술기여도(개별기술강도×산업기술요소지수)						26.1%	

표 2.26 기술가치 평가표

구분 (백만원)	1년차	2년차	3년차	4년차	5년차	6년차	7년차	8년차	9년차	10년차	11년차	12년차
매출액	45,410	48,180	51,120	54,235	57,545	61,055	64,780	68,730	72,925	77,375	82,095	87,100
매출원가	38,803	41,170	43,682	46,344	49,172	52,171	55,355	58,730	62,314	66,117	70,150	74,427
판관비	5,063	5,372	5,700	6,047	6,416	6,808	7,223	7,663	8,131	8,627	9,154	9,712
영업이익	1,998	2,120	2,249	2,386	2,532	2,686	2,850	3,024	3,209	3,405	3,612	3,832
법인세	331	352	373	396	420	446	473	502	532	565	599	636
세후영업이익	1,667	1,768	1,876	1,990	2,112	2,241	2,377	2,522	2,676	2,840	3,013	3,197
감가상각비	141	149	158	168	178	189	201	213	226	240	254	270
운전자본증감	4,473	−273	−290	−307	−326	−346	−367	−389	−413	−438	−465	−493
여유현금흐름	−2,666	2,190	2,324	2,465	2,616	2,776	2,945	3,125	3,316	3,518	3,732	3,960
현재가치	−2,223	1,669	1,617	1,567	1518	1,471	1,426	1,381	1,339	1,297	1,257	3,960
현재가치의 합	16,278											
사업가치	16,278											
기술기여도	26.1%											
기술가치	4,249											

3. 결론

"특허맵 및 경제성 분석을 통한 생산시스템 기반구축" 에서는 지적재산권을 확보하였음.

① 논문리스트

구분	논문명	학술지명	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
SCIE	Feasibility test and evaluation models to develop sustainable insulation concrete using foam and bottom ash aggregates	Construction and Building Materials	양근혁	225	620	632	2019.11
	Unrestrained and restrained shrinkage behavior of sustainable lightweight concrete using air foam and bottom ash aggregates	Journal of Materials in Civil Engineering	양근혁	32(10)	1028	1032	2020.07
	Distance effect of heat flux based on thermal metamaterials	Journal of the Korean Physical Society	임태경	75(12)	1028	1032	2019.12
	Tunable metamaterial absorber using ferromagnetic resonance	Journal of the Korean Physical Society	임태경	77(11)	1012	1015	2020.11
	Metamaterial's acceptable level of wrecked meta-pattern	Journal of the Korean Physical Society	임태경	77(11)	1016	1020	2020.11
비SCI	바텀애시 골재와 기포를 활용한 저탄소 · 고단열 경량콘크리트 개발 기초 연구	한국콘크리트학회	양근혁	31(3)	221	228	2019.06
	바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량콘크리트의 역학적 특성 평가	한국콘크리트학회	양근혁	31(4)	375	384	2019.08
	바텀애시 골재 콘크리트의 환경영향 평가	한국콘크리트학회	양근혁	31(5)	485	492	2019.10
	바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량 콘크리트의 역학적 특성에 대한 재현성 평가	건설순환자원학회	양근혁	7(3)	202	209	2019.09
	바텀애시 골재와 기포를 융합한 경량 콘크리트의 압축 응력-변형률 모델	건설순환자원학회	양근혁	7(3)	216	223	2019.09
	기포와 바텀애시 골재를 이용한 경량 콘크리트 시공줄눈의 전단마찰 거동 평가	대한건축학회	양근혁	36(9)	139	144	2020.09
	바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량 콘크리트 ET-판넬의 휨 및 전단거동 평가	한국콘크리트학회	양근혁	-	-	-	게재 예정

② 특허 리스트

구분	발명자 성명	발명의 명칭	출원일자	출원번호	출원인 명칭	비고
특허출원(국내)	양근혁, 주상현	열메타 임베디드 고단열 판넬	2019.10.29	10-2019-0135855	경기대학교 산학협력단	-
특허출원(베트남)	양근혁, 주상현, 박영식	THERMAL-META EMBEDDED HIGH INSULATION PANEL	2020.07.06	1-2020-04480	경기대학교 산학협력단, IS동서	-
특허출원(국내)	양근혁, 문주현	열교현상 제어에 효과적인 외단열 시스템 기술	2020.10.07	10-2020-0129310	경기대학교 산학협력단	-
특허등록(국내)	양근혁, 주상현	열메타 임베디드 고단열 판넬	2019.10.29	10-2019-0135855	경기대학교 산학협력단	우선 심사권 진행중 (2021년 2월 중 등록예정)

③ 기술가치

- 수익접근법에 의해 산정된 본 연구의 기술의 가치는 전체 사업가치에서 26.1%를 차지하며 그 금액이 43억원으로 평가되었음.

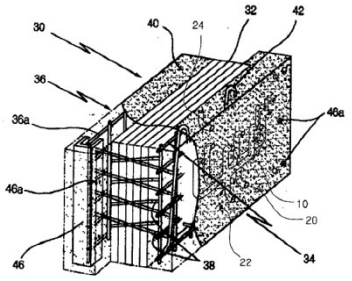
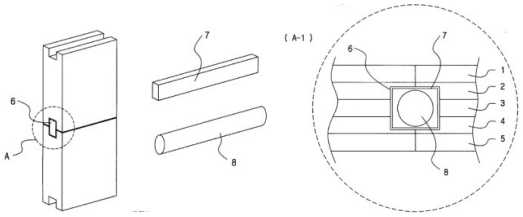
1. 시장조사를 위한 PC 판넬에 대한 기존 상용화 기술 및 설계기준의 분석

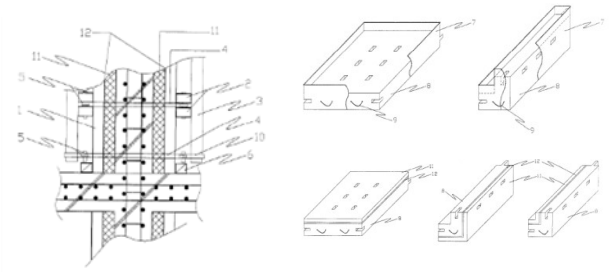
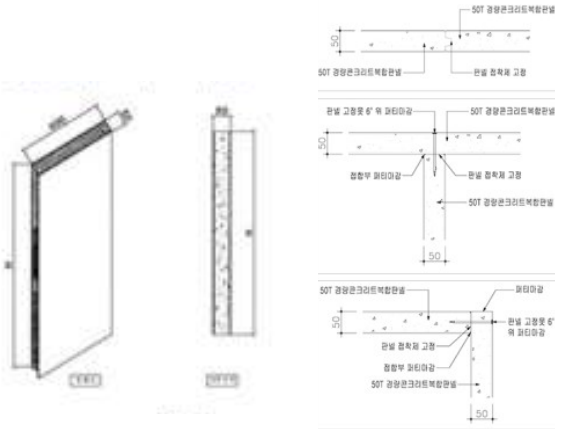
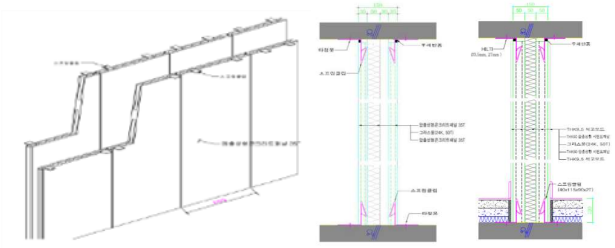
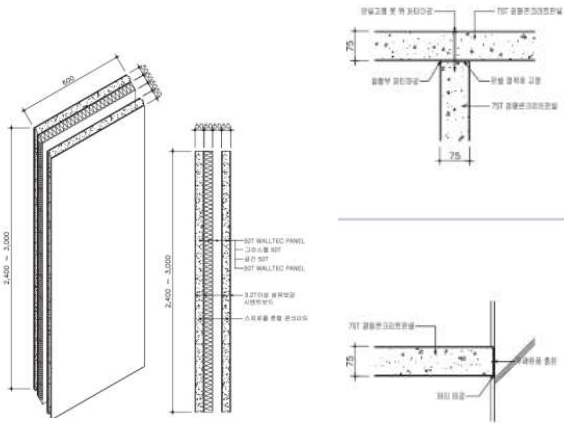
1.1 기술의 동향

1.1.1 기존 PC 판넬

- 기존 PC 판넬의 기술 및 제품 동향은 표 1.1에 제시하였음. 국내·외적으로 단열성능을 갖춘 PC(Precast concrete) 판넬은 형태, 재료, 접합방식등을 개선하기 위하여 많은 연구와 개발이 수행됨.
- 그러나 대부분의 단열성능을 갖춘 패널은 EPS(Expanded poly styrene)계열의 유기계 단열재를 사용하거나, 경량기포콘크리트를 사용하고 있어 낮은 강도로 인해 운반시 균열 및 파괴가 발생할 수 있음.
- 그러나 현장에서 실제로 사용되는 PC 판넬은 경제성 등의 이유로 대부분 내단열 방식의 EPS(Expanded poly styrene)계열의 유기계 단열재를 사용하며, 그 접합은 열교현상의 방지나, 내진설계를 반영하지 않은 것이 대부분임.
- 특히 기존 PC 판넬에서 사용되고 있는 접합은 고정 못을 통한 접합이 대부분인데, 이는 판넬에 작용하는 하중에 견디기보다는 단순히 판넬 자체만을 지지할 수 있는 경우가 대부분임.
- 이러한 고정 못을 이용한 단순 접합은 지진하중과 같은 횡하중의 작용 시, 충분한 강도를 발휘할 수 없어 판넬의 전도, 부재의 탈락 등을 발생시킬 수 있음.

표 1.1 기존의 고단열 PC 판넬

분류	특허권자	제 목	내 용
특허	박동환	건축용 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬	입체 골조가 매설 되도록 바깥면에 콘크리트 몰탈이 미장된 판넬을 조립식 건축물의 벽으로 사용함. 판넬 간 접합은 C-형강을 이용하여 체결됨. 
특허	황선환	콘크리트 판넬	건물의 골조에 해당되는 강철빔이나 기둥 및 동일 조립식 판넬에 조립됨. 판넬의 내부에 보강용 강선을 설치하였으며, 경량 콘크리트 몰탈을 형성함. 판넬 간 접합은 판넬의 사이에 강관을 삽입하고 그 사이에 몰탈을 주입하여 일체화시킴. 

특허	조병구	프리캐스트 콘크리트 특수판넬	콘크리트 특수판넬을 제작하여 판넬의 한쪽 면에 단열재를 부착하고 현장에서 마감벽체를 조립하여 완성됨. 양쪽면을 타이로 고정하고 내부로 몰탈을 주입하여 일체화시킴. 
제품	㈜에이스패널	내화 경량 콘크리트 패널	섬유 보강 시멘트 보드 + 발포폴리스틸렌 경량 콘크리트 + 섬유 보강 시멘트 보드로 구성되어있음. 구조체와의 접합은 구조 고정못을 이용하여 퍼티마감으로 이루어짐. 
제품	㈜코엠이엔지	압출성형 콘크리트 패널	오토클레이브를 통해 스팀양생 시킨 경량 콘크리트를 사용함. 구조부재와의 접합은 고정못에 접합된 스프링 클립을 이용함. 
제품	㈜신영월텍	발포 폴리스티렌 경량 콘크리트 복합 패널	CRC 보드(Compressed Cellulose Reinforced Cement Board) + 발포 폴리스티렌 경량 콘크리트 혼합물 + CRC 보드로 구성됨. 접합부는 판넬고정 못으로 지지되며 퍼티로 마감됨. 

1.2 PC 판넬의 설계기준

1.2.1 일반사항

- 건축물의 내·외벽 단열재, 간막이 벽 등으로 사용되는 PC 판넬은 비내력벽으로써, 건물에 작용하는 외력에 대해 구조적으로 거동하지 않는 비구조요소임. 그러나 이러한 PC 판넬 및 그 접합부는 수직 및 수평 방향으로 다양한 하중을 받으며 이에 저항할 수 있어야 함(그림 1.1).
- 비구조요소인 PC 판넬에 작용하는 하중은 자중에 의한 수직하중이 있음. 또한 외벽으로 사용되는 PC 판넬은 바람에 의한 풍하중을 받으며, 이는 부재에 면외방향 휨을 발생시킴.
- 지진의 발생 시 PC 판넬은 자중과 같은 중력하중에 대하여 발생하는 지진력이 질량 중심에 작용하며, 이러한 하중에 저항하지 못할 시, PC 판넬은 전도, 파손 등이 발생할 수 있음.
- 건축물에서 구조부재는 내진설계를 통해 지진하중에 대한 내력과 변위를 확보하며, 강진에 대해서도 구조물의 붕괴는 방지하여 인명의 안전을 확보함.
- 그러나 구조시스템의 손상이 경미하더라도 천장틀, 커튼월, 마감재, 기계, 전기요소와 같은 비구조요소의 파괴는 건축물의 기능을 손실할 수 있게 할 뿐만 아니라 인명피해를 유발할 수 있음. 또한 지진 발생 시 병원, 소방서 등이 비구조요소의 손상으로 인해 그 기능을 수행하지 못하면, 지진으로 인한 직접적인 피해가 아닌 간접피해가 발생할 수 있음.
- ASCE 41-13는 지진하중에 대한 비구조요소의 성능목표를 제시하는데, L-C, N-B 및 N-A로 구분하고 있음. L-C는 Life safety로써 낙하위험, 비구조재의 파괴 등 다수 피해는 발생하지만 인명의 안전을 보장함.
- L-B는 Position retention으로써 비구조요소의 크랙, 손상 등이 발생하며 그 기능을 수행하는 것에 있어 문제가 있지만, 위치를 유지함.
- L-A는 비구조재의 피해가 거의 없으며, 그 기능을 수행할 수 있어야 함. 이처럼 지진하중 발생 시, 비구조요소의 평가 기준과 성능목표를 제시하고 있음.
- 비구조요소의 지진거동 유형을 분류하여 각 거동에 대한 내용 및 예방·보강 방법을 제시하고 있음(그림 1.2). 이처럼 해외에서는 지진 발생 시, 비구조요소의 내진설계 가이드라인을 제시하고 있음. FEMA E-74는 비구조요소의 지진 피해유형을 LS, PL, 및 FL로 제시하고 있음(표 1.2).

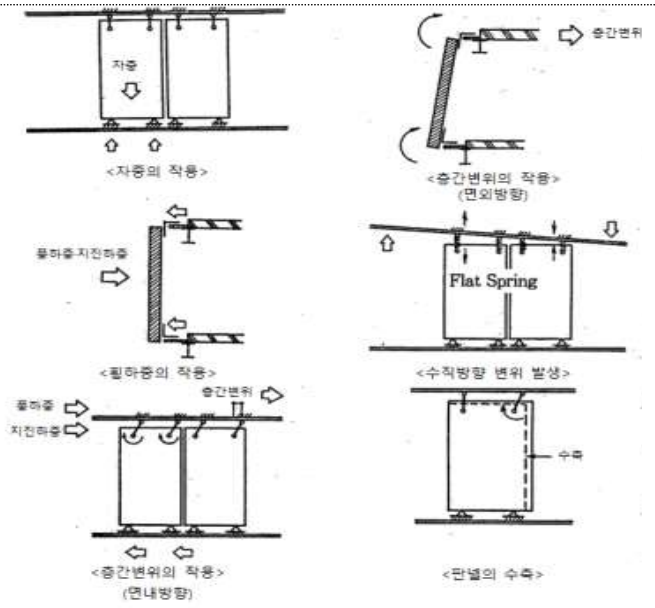


그림 1.1 PC 판넬에 작용하는 외력 및 구조부재의 변위

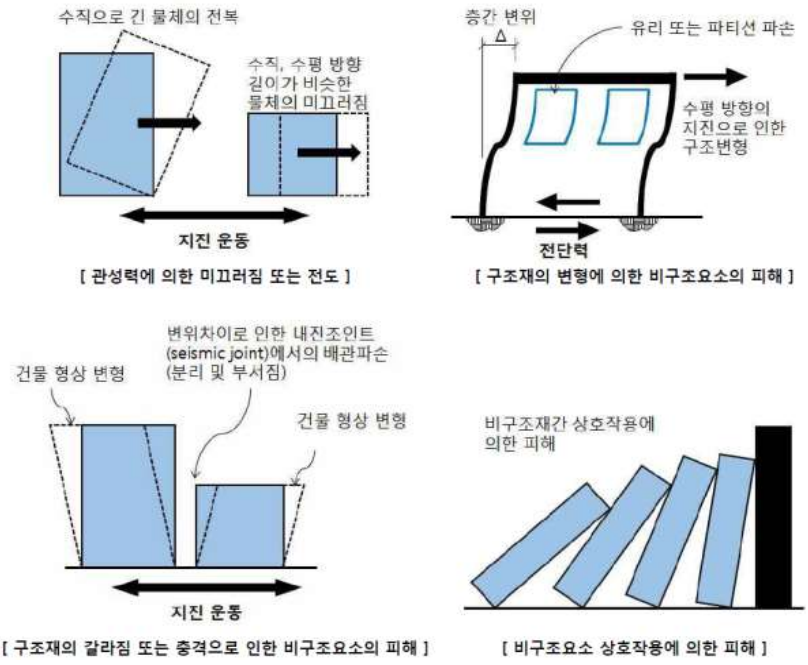


그림 1.2 비구조요소의 지진거동 유형 분류(FEMA E-74)

- 국내에서는 KBC 2009 이후 비구조요소의 내진설계기준이 추가되었음. 그러나 건축법 관련 상위법령에서 비구조요소의 내진설계는 의무화하지 않으므로, 실제로 대부분의 비구조요소는 내진설계되고 있지 않음. 그러나 2016년 경주, 2017년 포항 지진이 발생하였을 때 구조요소보다는 비구조요소의 피해가 상당하였으며, 이후로 구조물뿐만 아니라 비구조요소의 내진설계에 대한 관심이 높아지며, 그 중요성이 증대되고 있음.

1.2.2 비구조요소의 내진설계

- KBC 2016에서는 지진 발생 시, 비구조요소의 전도 및 탈락으로 인하여 건물 내·외부에서 인명에 피해를 줄 수 있는 비구조요소는 반드시 내진설계에 의해 안전성을 보장하여야 함을 명시하고 있음.
- 이는 지진 발생 후 화재 등의 2차 피해를 유발할 수 있는 설비 등의 비구조요소에 대한 내진설계도 포함하고 있음.
- 구조물에 영구히 설치되는 건축, 기계 및 전기설비 등의 비구조요소는 제시된 조항에 따라 결정된 등가정적하중과 변위에 견디도록 설계되어야 함을 명시하고 있음.
- 지진에 의한 등가정적하중 F_p는 아래 식에 의하여 산정됨.
- F_p는 비구조요소에 작용하는 가동중량과 함께 고려하되 축방향 및 축 직교 방향에 대하여 각각 독립적으로 적용하도록 함.
- 비구조 외벽에 작용하는 풍하중이 F_p를 초과하는 경우, 풍하중에 대하여 설계하여야함.

$$F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS} W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)}(1+2\frac{z}{h}) \tag{1.1}$$

$$0.3 S_{DS} I_p W_p \le F_p < 1.6 S_{DS} I_p W_p \tag{1.2}$$

- 여기서, a_p는 1.0~2.5 사이의 값을 갖는 증폭계수(표 1.3)를, F_p는 비구조요소 질량 중심에 작용하는 설계지진력을, I_p는 비구조요소의 중요도계수로서 1.0 또는 1.5, h는 구조물의 밑면으로부터 지붕층까지의 평균높이를, R_p는 비구조요소의 반응수정계수로서 1.0~3.5 사이의 값(표 1.3)을, S_{DS}는 단주기에서의 설계스펙트럼가속도를, W_p는 비구조요소의 가동중량을, z는 구조물의 밑면으로부터 비구조요소가 부착된 높이임.
- 표 3.3에서 PC 판넬은 1-b(내부 비구조 벽체 및 칸막이벽-기타 벽체 및 칸막이벽)와 4(외측 비구조 벽체 부재 및 접합부)로 구분될 수 있으며, 부재 설계 시 a_p와 R_p는 각각 1.0과 2.5를 사용하고 접합부의 설계 시는 각각 1.25와 1.0을 사용하는 것이 적절함.
- PC 판넬은 정착을 통해 구조부재에 지지되는 것이 일반적임. 이에 따라 KBC 2016에서는 비구조요소의 정착에 대하여 아래 항목들과 같은 가이드라인을 제시하였음.
- 비구조요소 연결부에 작용하는 하중은 F_p로 결정함. 다만 비구조요소가 팽창성 정착물이나 화학성 정착물 또는 현장타설 정착물에 의하여 얕게 정`착될 경우에 R_p는 1.5를 사용함.
- 콘크리트나 조적조에 묻히는 정착물은 다음 중 가장 작은 값의 힘을 전달하도록 설계됨. 연결부의 설계강도, 연결부의 $F_p \times R_p$에 해당하는 힘의 1.3배 및 비구조요소가 연결된 부위에 전달되는 힘의 최대값. 비구조요소가 연결된 부위에 전달되는 힘의 최대값임.

1.2.3 지진 변위 검토

- 비구조요소가 수용해야할 지진에 의한 상대변위(D_p)는 동일한 구조물 또는 구조시스템상의 수직 위치가 x와 y인 2연결점에 대하여 D_p는 다음과 같이 계산하며 식(2.4)를 초과할 필요는 없음.

$$D_p = \delta_{xA} - \delta_{yA} \tag{1.3}$$

$$D_p = (X - Y)\frac{\Delta_{a_A}}{h_{sx}} \tag{1.4}$$

- 또한 독립된 2개의 구조물 또는 구조시스템상의 수직 위치가 각각 x와 y인 2연결점에 대하여 D_p는 아래식과 같이 계산하며, 식(2.6)를 초과할 필요는 없음.

$$D_p = |\delta_{xA}| + |\delta_{yB}| \tag{1.5}$$

$$D_p = \frac{X\Delta_{aA}}{h_{sx}} + \frac{Y\Delta_{aB}}{h_{sx}} \tag{1.6}$$

- 여기서, D_p는 비구조요소가 수용해야 할 지진에 의한 상대변위를, h_{sx}는 허용층간변위를 정의하기 위하여 사용된 층고를, δ_{xA}, δ_{yA}, δ_{yB}는 탄성해석에 의하여 제안된 값에 변위증폭계수(C_d)를 곱하여 구한 구조물 A 또는 B 상의 수직위치 x또는 y에서의 변위를, X는 구조물 밑면으로부터 상부 부착지점 x까지의 높이를, Y는 구조물 밑면으로부터 하부 부착지점 y까지의 높이를, Δ_{aA}, Δ_{aB}는 구조물의 허용층간변위임.

표 1.2 비구조요소의 지진피해 유형(비구조요소)

분류	정의	피해 유형	주요대상 건축물 및 사례
Life Safety (LS)	비구조재의 지진 피해에 의해 인명피해가 예상되는가?	· 중량물(중량 외장재, 조명기구 등)의 낙하에 의한 인명피해 발생 · 비구조요소의 낙하에 의한 피난(Exit) 방해 · Fire protection pipe 등의 피해에 의한 화재 발생	· 주택, 학교, 공연장 등 다중 이용시설
Property Loss (PL)	재산피해가 예상되는가?	· 천장 등의 낙하물에 의한 재산 피해 발생 · Water pipe / Sprinkler 파괴에 의한 배관 피해 및 수피해 · 빌딩의 사용물(가구, 장비, 컴퓨터 등)의 피해	· 고가의 산업설비(반도체 공장 등)의 피해 · 도서관, 미술관 등
Functional Loss (FL)	기능 미수행이 예상되는가?	· 지진발생 이후 건물의 기능 수행 · 구조/비구조 요소의 피해가 미미한 경우에도 즉시 기능수행이 어려운 경우 발생	· 소방서, 병원 등 즉시 기능수행 건축물

표 1.3 건축비구조요소 설계계수

건축비구조요소 또는 부재	증폭계수, a_p	반응수정계수, R_p
1. 내부 비구조 벽체 및 칸막이벽		
a. 비보강 조적벽	1.0	1.25
b. 기타 벽체 및 칸막이벽	1.0	2.5
2. 캔틸레버 부재(횡지지되어 있지 않거나 질량중심 아래에서 골조에 지지된 경우)		
a. 파라펫 및 내부 캔틸레버 비구조 벽체	2.5	2.5
b. 굴뚝 및 골조구조에 지지된 수직 배기구	2.5	2.5
3. 캔틸레버 부재(횡지지되거나 질량중심 위에서 골조구조에 지지된 경우		
a. 파라펫	1.0	2.5
b. 굴뚝 및 배기구	1.0	2.5
c. 외측 비구조벽체	1.0	2.5
4. 외측 비구조벽체 부재 및 접합부		
a. 벽체 부재	1.0	2.5
b. 벽판 접합부의 몸체	1.0	2.5
c. 접합시스템의 조임구	1.25	1.0
5. 표면 마감재		
a. 변형이 제한된 부재 및 부착물	1.0	2.5
b. 변형성능이 낮은 부재 및 부착물	1.0	1.25
6. 옥탑 (건물골조가 연장된 골조의 경우 제외_	2.5	3.5

7. 천장	1.0	1.25
8. 캐비닛		
a. 저장용 캐비닛 및 실험장비	1.0	2.5
9. 액세스 플로어 (이중바닥)		
a. 특수 액세스 플로어	1.0	2.5
b. 그 외	1.0	1.25
10. 부가물 및 장식물	2.5	2.5
11. 표지판 및 광고판	2.5	2.5
12. 1~11 이외의 기타 강성의 비구조요소		
a. 대변형이 가능한 부재 및 부착물	1.0	3.5
b. 변형이 제한된 부재 및 부착물	1.0	2.5
b. 변형성능이 낮은 부재 및 부착물	1.0	1.25
13. 1~11 이외의 기타 연성의 비구조요소		
a. 대변형이 가능한 부재 및 부착물	1.0	3.5
b. 변형이 제한된 부재 및 부착물	2.5	2.5
b. 변형성능이 낮은 부재 및 부착물	2.5	1.25

※ 상세한 동적해석에 의하여 입증된 경우에는 더 낮은 a_p를 사용할 수 있으나, 1 이상의 값이어야 함. 감소된 a_p는 1과 2.5 사이의 값을 갖는데, 1은 강하게 접합된 장비의 경우에, 2.5는 유연하게 접합된 장비의 경우에 사용됨.

1.2.4 PC 판넬의 내풍설계

- 바람에 의한 건축물의 파괴는 대부분 강풍이 불 때 발생함. 여기서 제시하는 풍하중은 강풍에 의한 파괴를 방지하기 위한 목적임. 건물 내부에서 칸막이 벽으로 사용되는 경우 내풍설계는 의미 없지만, PC 판넬의 주 적용처는 비내력 외벽으로써 풍하중에 의해 영향을 받으며, 이를 주골조에 전달하는 외장재로 구분할 수 있음.
- 풍하중은 주골조설계용 수평풍하중 · 지붕풍하중과 외장재설계용 풍하중으로 구분되며, 각각의 설계풍압에 유효수압면적을 곱하여 산정됨. PC 판넬은 외장재로 구분되며 내풍설계 시, 외장재설계용 풍하중을 적용함.
- 외장재의 내풍설계 절차는 그림 1.3에 나타내었음. 외장재는 주골조에 비하여 고유진동수가 매우 크기 때문에 동적인 응답 또한 고주파수 영역에서 발생함. 이러한 순간적인 응답특성을 반영하기 위하여 풍압을 산정할 때의 외압계수는 평가시간이 긴 평균풍압에 근거하지 않고 평가시간이 매우 짧은 피크외압계수를 사용함.
- 지상 높이 z에서의 외장재설계용 풍하중 W_C는 다음 식으로 산정됨.

$$W_C = p_C A_C \tag{1.7}$$

- 여기서, p_C는 외장재설계용 설계풍압을(단, 500 N/m2보다 작아서는 안 됨), A_C는 외장재 등의 유효수압면적임.
- 식(1.7)에서 기준 높이가 20 m 이상인 건축물의 외장재 설계용 설계풍압(p_C)은 정압 · 부압에 따라 구분하여 산정함.
- 정압인 외벽

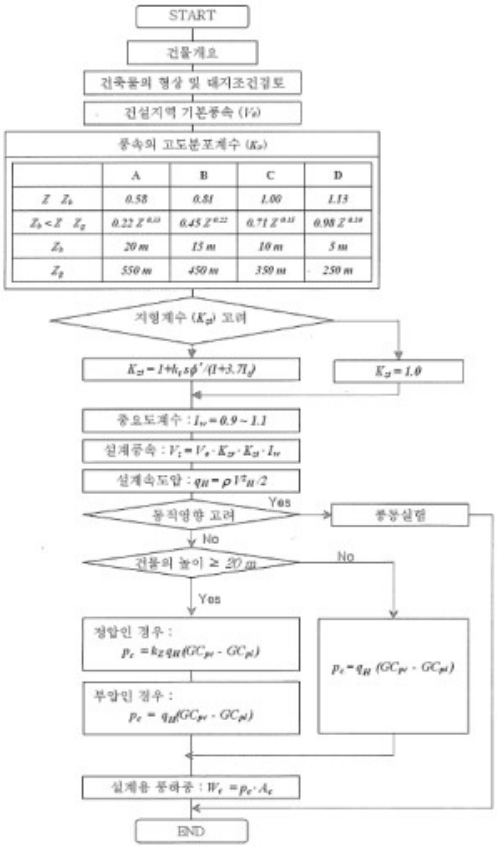


그림 1.3 외장재설계용 풍하중 산정 프로세스

$$p_C = k_z q_H (GC_{pe} - GC_{pi}) \tag{1.8}$$

- 부압인 외벽 및 지붕면

$$p_C = q_H (GC_{pe} - GC_{pi}) \tag{1.9}$$

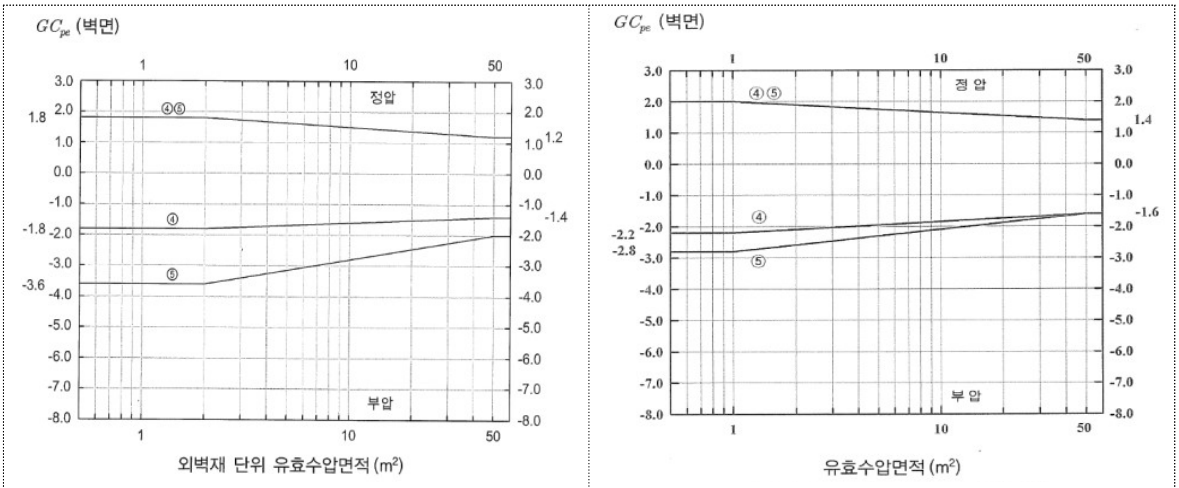
- 여기서, k_z는 높이방향 압력분포계수를, q_H는 기준높이 H에 대한 설계속도압을, GC_{pe}는 외장재설계용 피크외압계수를, GC_{pi}는 외장재설계용 피크내압계수임.
- 기준 높이가 20 m 미만인 건축물은 식(1.10)에 따라 산정함.

$$p_C = q_H (GC_{pe} - GC_{pi}) \tag{1.10}$$

- 설계속도압(q_H)은 건축물의 지역에 따른 기본풍속, 풍속고도분포계수, 지형계수 및 중요도계수에 따라 결정되며, 이는 건축물의 주골조와 동일하게 적용됨.
- 따라서 외장재의 내풍설계에서 설계속도압은 주골조의 값을 동일하게 적용하며, 높이 조건에 따른 피크외압(내압)계수만 다르게 적용함.
- 외장재설계용 풍압계수는 피크외압계수, 피크내압계수, 피크순압력계수가 있음.
- 먼저 피크외장계수는 건축물의 각부분에 있어서 전풍향 가운데 정 및 부의 최대피크외압계수를 말함.
- 벽면에서 정(+)의 피크외압계수는 그 부분이 풍상면에 위치할 때 발생하고, 부(-)의 피크외압계수는 그 면이 측벽이나 풍하면일 때 발생함. 외부벽면의 외압계수는 정압과 부압을 모두 고려하여 산정되

며, 그림 1.4에서 제시한 위치 및 유효수압면적에 의해 결정됨.

- 일반적으로 건축물의 외벽 및 창호에는 무수한 틈새가 있음. 외압과 내압의 차이가 있을 경우에는 이들 틈새를 통하여 공기의 유출입이 발생하며, 실내압의 증감이 발생함.
- 이에 따라 KBC2016에서는 풍동실험에 의한 가스트영향계수를 함께 고려한 피크내압계수를 제시하였으며, 표 3.4에 따름.
- PC 판넬의 내풍설계를 위한 내풍설계 예시를 그림 1.5에 나타내었음.
- 앞서 제시한 풍하중 산정 절차에 근거하여 풍하중을 산정함. 산정된 풍하중은 PC 판넬의 면외방향으로 작용하게 되고 이에 대해 부재의 두께, 배근 및 형상과 같은 부재를 설계할 수 있음.
- 결정된 부재의 특성은 모델링 등을 통해 적용되어 지점에 작용하는 반력을 산정할 수 있게 됨. 이 반력을 기반으로 풍하중에 대한 접합부 설계가 수행됨.

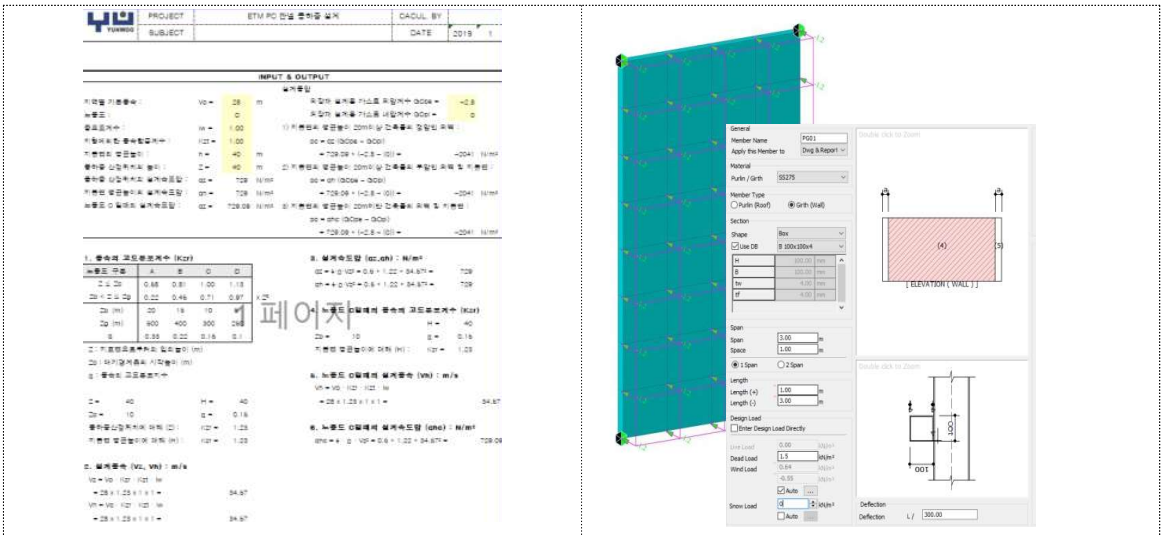


(a) 기준높이 20 m 이상인 경우 (b) 기준높이 20 m 미만인 경우

그림 1.4 외장재설계용 피크외압계수 산정

표 1.4 외장재설계용 피크내압계수

밀폐의 분류		GC_{pi}
밀폐형 건축물		0.00 또는 -0.52
부분개방형 건축물	탁월한 개구부가 없는 경우	+0.83 또는 -0.83
	탁월한 개구부가 있는 경우	+1.40 또는 -1.40
개방형 건축물		0



(a) 풍하중 산정 (b) 부재 및 접합부 설계

그림 1.5 PC 패널의 내중 설계 예시

2. 풍하중을 고려한 패널 간의 접합 상세

2.1 타설전

- 타설전 양 측면은 거푸집을 돌출시켜 열교 제어를 위한 열메타 구조의 삽입과 접합을 위한 홈을 마련함(그림 2.1).

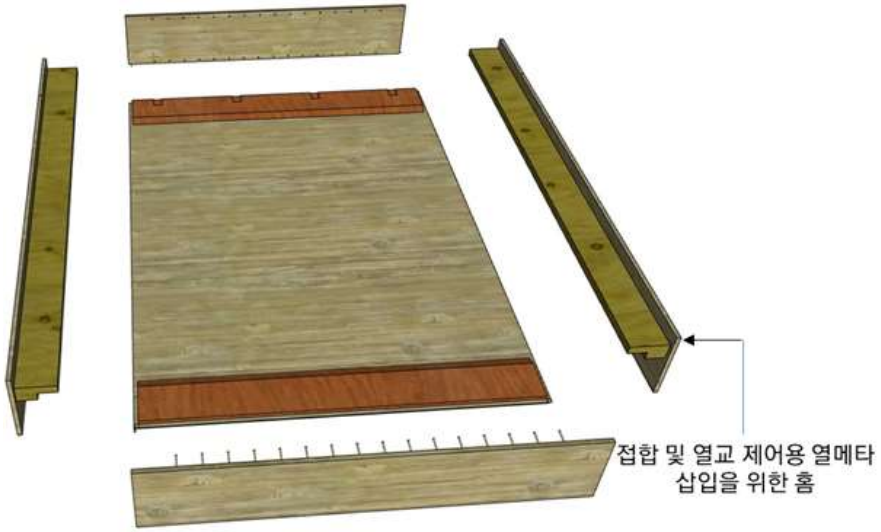


그림 2.1 거푸집 상세

2.2 타설후

2.2.2 접합

- 판넬 간의 접합은 PC 판넬 사이에 열교 제어용 열메타를 삽입한 후 그라우팅하여 마무리함(그림 2.2).

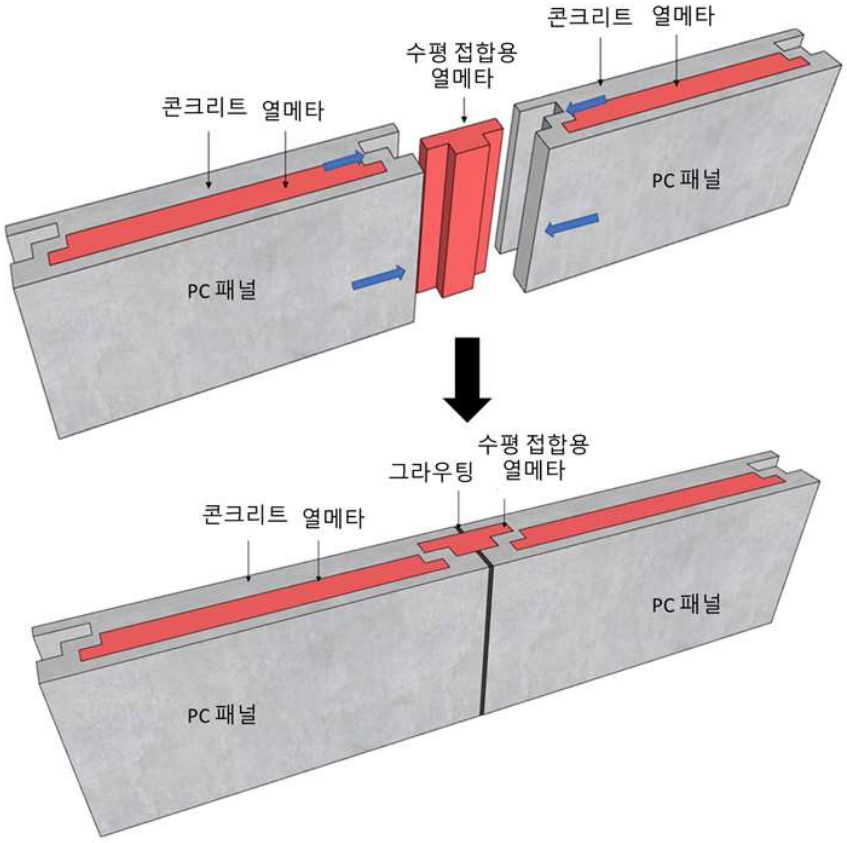


그림 2.2 PC 패널 간의 접합

3. 생산라인을 이용한 고단열 경량콘크리트 패널용 현장 배합

3.1 사용 재료

- 주요 결합재는 콘크리트 현장에서 실제 사용하는 재료들을 사용하였음. 각 재료들의 첨가량은 실내실험에서 결정된 그룹 4의 배합표를 기준으로 하였음.
- 주요 결합재는 30%의 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC), 50%의 GGBS 및 20%의 FA로 구성된 시멘트계 재료를 사용하였음. 사용된 결합재들의 화학조성비는 표 3.1과 같음.
- 혼화재인 GGBS와 FA의 SiO_2 및 CaO의 구성 비율은 각각 33.5% 및 57.7%와 43.9% 및 4.3%임.
- 고로슬래그 미분말(GGBS)과 FA의 비중은 2.94 g/cm^3 및 2.20 g/cm^{3}이며, 비표면적은 각각 4,355 g/cm^3 및 4,770 g/cm^{3}임.
- 잔골재와 굵은 골재의 최대치수는 실내실험에서 사용된 재료와 동일하였음.
- 기포제는 소포율이 낮은 동물성 기포제를 사용하였음. 감수제는 현장 조건을 고려하여 가장 일반적으로 사용되는 고체함유 및 밀도가 각각 39.8%와 1.49 g/cm^{3}인 폴리카르본산계(polycarboxylic acid)를 사용하였음.

3.2 실험 상세

- 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 역학적 특성은 실내실험에서 수행되었던 배합조건과 동일한 조건에서 반복 실험하여 재현성을 평가하였음.
- 재현성 평가 대상 컨트롤 실험체의 변수는 실내실험에 의해 수행되었던 배합에서 결정하였음.
- 이때 단위결합재량 및 물-결합재비(W/B)가 각각 450 kg/m^3 및 25 ~ 30%이면서, 기포 혼입율(R_a)이 0%, 10% 및 25%이었음.
- 실험체의 배합상세는 표 3.2에 나타내었음. 배합은 W/B에 따라 두 그룹으로 구분하였음. 각 그룹의 주요변수는 R_a이며, 모든 그룹에서 0%, 10% 및 25%로 변화시켰음.
- 모든 배합의 잔골재율(S/a)은 42%임. 실험체명에서 첫 번째 문자는 그룹명이며, 두 번째 숫자는 R_a를 의미함.

표 3.1 주요결합재의 화학조성비

Source materials	Chemical composition (%)						
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	SO_2	MgO	Fe_2O_3	LOI
OPC	21.8	5.3	66.2	1.8	1.6	2.8	0.5
GGBS	35.1	13.1	42.4	2.3	2.3	0.8	4.0
FA	58.8	22.3	4.1	0.8	2.6	7.6	3.8

표 3.2 배합상세

Group	Specimen	W/B (%)	S/a (%)	R_a (%)	B (kg/m^3)	Unit weight(kg/m^3)						S.P (%)
						W	OPC	GGBS	FA	FBA	CBA	
I	I-0	20	42	0	450	113	135	225	90	436	467	1.7
	I-10			10		101	122	203	81	392	420	0.4
	I-25			25		84	101	169	68	327	350	0.3
II	II-0	30		0		135	135	225	90	421	452	0.7
	II-10			10		122	122	203	81	379	406	0.13
	II-25			25		101	101	169	68	316	339	0.02

- 바텀애시 골재는 배합시 배합수를 흡수하기 때문에 배합전 3일 동안 프리웨팅(Pre-wetting) 진행 후 표면건조상태로 만들어 흡수율의 영향을 최소화하였음.
- 배합은 바텀애시 골재와 결합재를 투입하여 2분 간 건비빔하였음. 건비빔 후 물을 넣어 습비빔하면서 감수제를 첨가하였음.
- 이때 재료분리가 발생하지 않는 범위 내에서 감수제 첨가량을 조절하여 슬럼프를 측정하였음.
- 기포는 2.5%의 농도로 물에 희석시킨 기포제를 압축공기로 생성하여 마지막에 혼입하였음.

3.3 실험 방법

- 굳지 않은 콘크리트에서는 실 기포율, 굳지 않은 콘크리트의 밀도, 초기 슬럼프 및 침하 깊이를 측정하였음.
- 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 KS F 4039에 따라 1,000 mL의 용기를 이용하여 타설 후 2시간 후에 측정하였고, 실 기포율은 간이 소포법으로 측정하였음.
- 굳은 콘크리트에서 기건 밀도 및 압축강도는 ϕ100 × 200 mm의 공시체를 이용하였으며, 기건 밀도는 재령 3일, 28일 및 91일에서, 압축강도는 재령 3, 7, 28, 56 및 91일에서 측정하였음.
- 쪼갬 인장강도는 ϕ100 × 200 mm의 공시체를 이용하여 재령 28일에서 측정하였으며, 파괴계수는 100 × 100 × 400 mm 몰드를 이용하여 재령 28일에서 3등분점 휨 시험을 통해 측정하였음.
- 콘크리트의 양생온도 20 ℃와 습도 60% 조건에서 양생하였음.

3.4 재현성 평가

3.4.1 실 기포율 및 굳지 않은 콘크리트의 밀도

- 실 기포율 및 굳지 않은 콘크리트의 밀도를 표 3.3에 나타내었음. 실 기포율의 실험결과는 2.0~22.5 %였으며, 목표 기포율 대비 실 기포율의 비는 0.73~0.94범위였음.
- 실내실험에서의 실 기포율은 2.1~22.5%였으며, 목표 기포율 대비 실 기포율의 비는 0.70~1.00범위였음. 이 범위는 실내실험의 결과와 비슷하게 나타났음. 이는 실내실험의 결과와 동일하게 기포 투입 후 혼합 시 바텀애시 골재와 부딪힘으로 인해 소포되는 기포량이 많아 실 기포율의 제어가 어렵기 때문임.
- 또한 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내 실험결과의 비는 평균 및 표준편차가 각각 1.02 및 0.09으로 상호 비슷한 수준에 있었음.
- 굳지 않은 콘크리트의 밀도는 1,320~1,635 kg/m^3 수준에 있었으며, R_a가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 18% 감소하였으며 그룹 I 과 그룹 II의 실험체에서 비슷한 수준에 있었음.
- 또한 실내실험의 결과는 1,312~1,640 kg/m^3 범위이었으며, 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내 실험의 결과 비의 평균 및 표준편차가 각각 0.99 및 0.10으로 굳지 않은 밀도는 실내실험의 결과와 비슷하였음.

3.4.2 초기 슬럼프 및 소포 깊이

- 그룹 I 의 R_a가 0%인 실험체에서는 감수제를 1.7%까지 첨가하여도 슬럼프 값을 측정할 수 없을 정도로 유동성이 낮았음. 이는 R_a가 0%이면서 단위결합재량이 450 kg/m^{3}인 실험체에서 바텀애시 골재의 다공성으로 인해 배합시 시멘트 페이스트가 골재표면에 흡착되어 슬럼프를 감소시키기 때문임.

- 초기 슬럼프는 50~210 mm이었으며, 실내실험의 결과는 60~200 mm로 그룹 Ⅰ과 그룹Ⅱ의 R_a가 0%인 실험체를 제외하고는 목표 슬럼프인 150 mm 이상을 만족하였음.
- 또한 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내실험 결과의 비는 0.83~1.05의 범위에 있었으며, 그 평균 및 표준편차는 각각 0.96 및 0.10이었음. 이와 같이 초기 슬럼프는 실내실험 결과와 비슷하였음.
- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 소포 깊이는 W/B와 R_a에 관계없이 침하가 발생하지 않았음. 이는 25% 이내의 기포 혼입이 굳지 않은 콘크리트에 비해 비중이 상대적으로 큰 바텀애시 골재의 침하를 방지 할 수 있음을 의미함.

3.4.3 기건밀도 및 재령 28일 압축강도

- 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 재령 별 기건 밀도(ρ_c)는 1,394~1,605 kg/m^3 수준에 있었으며, R_a가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 11% 감소하였음.
- 또한 실내실험 결과는 1,299~1,572 kg/m^3 범위였으며, 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내실험 결과의 비는 평균 및 표준편차가 재령 3일, 28일 및 91일에서 각각 1.04, 1.05 및 1.05 와 0.03, 0.02 및 0.02로 실험결과는 비슷한 수준이었음(표 3.4).
- 재령 28일 압축강도(f_{ck})는 R_a에 현저한 영향을 받았는데, 이는 기존연구의 경향과 유사하였음.

표 3.3 굳지 않은 콘크리트 실험결과의 요약

Group	Specimens	R_a (%)	Mock-up				실내실험				Comparisons		
			Actual foaming ratio (%) (1)	Initial slump (mm) (2)	Slurry density (kg/m^3) (3)	Depth of defoaming (mm)	Actual foaming ratio (%) (4)	Initial slump (mm) (5)	Slurry density (kg/m^3) (6)	Depth of defoaming (mm)	$\frac{(1)}{(4)}$	$\frac{(2)}{(5)}$	$\frac{(3)}{(6)}$
Ⅰ	Ⅰ-0	0	2.0	0	1,635	0	2.1	0	1,640	0	0.95	-	1.00
	Ⅰ-10	10	8.9	210	1,582	0	7.5	200	1,589	0	1.19	1.05	1.00
	Ⅰ-25	25	18.4	205	1,366	0	17.5	195	1,415	0	1.05	1.05	0.97
Ⅱ	Ⅱ-0	0	2.5	50	1,620	0	2.5	60	1,604	3	1.00	0.83	1.01
	Ⅱ-10	10	9.4	150	1,541	0	10.0	170	1,561	1	0.94	0.88	0.99
	Ⅱ-25	25	22.5	165	1,320	0	22.5	165	1,312	0	1.00	1.00	1.01
r_{mea}											1.02	0.96	0.99
r_{std}											0.09	0.10	0.02

※ r_{mea} and r_{std} are the mean and standard deviation, respectively, of the ratios between the present tests and Ji et al.' s tests.

표 3.4 굳은 콘크리트의 실험결과의 요약

Group	Specimens	Measured air-dried density, ρ_c(kg/m^3)						28-day compressive strength, f_{ck} (MPa)		Comparison			
		Mock-up (1)			실내실험 (2)			Mock-up (3)	실내실험 (4)	$\frac{(1)}{(2)}$			$\frac{(3)}{(4)}$
		3 days	28 days	91 days	3 days	28 days	91 days			3 day	28 day	91 day	
Ⅰ	Ⅰ-0	1,588	1,592	1,605	1,572	1,550	1,545	23.8	22.3	1.01	1.03	1.04	1.07
	Ⅰ-10	1,551	1,572	1,549	1,481	1,498	1,481	20.3	19.3	1.05	1.05	1.05	1.05
	Ⅰ-25	1,427	1,440	1,455	1,400	1,395	1,388	10.9	10.5	1.02	1.03	1.05	1.04
Ⅱ	Ⅱ-0	1,589	1,599	1,591	1,514	1,524	1,537	24.6	23.6	1.05	1.05	1.04	1.04
	Ⅱ-10	1,530	1,549	1,548	1,417	1,454	1,449	17.1	15.9	1.08	1.07	1.07	1.08
	Ⅱ-25	1,399	1,394	1,417	1,323	1,299	1,308	8.8	8.5	1.06	1.07	1.08	1.04
r_{mea}										1.04	1.05	1.05	1.05
r_{std}										0.03	0.02	0.02	0.02

- 실 기포율(R_a)이 0%에서 25%로 증가할 때 f_{ck}는 그룹 Ⅰ과 그룹 Ⅱ의 실험체에서 각각 평균 55% 및 63%로 감소하였음.
- 재령 28일 압축강도(f_{ck})에 대한 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내실험 결과의 비는 평균 및 표준편차가 각각 1.05과 0.02로 f_{ck}의 변화는 미미하였음.
- 이처럼 실험결과의 f_{ck}가 비슷한 수준에 있는 이유는 R_a에 따른 기건 밀도(ρ_c)가 전반적으로 실내실험 결과와 큰 차이가 없기 때문임.

3.4.4 압축강도 발현율

- 그림 3.1에는 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 압축강도 발현율($f_{c(t)}/f_{ck}$)에 대한 재현성 평가 실험결과를 나타내었는데, 여기서 $f_{c(t)}$는 임의의 재령(t)에서 압축강도를 의미함.
- 그룹 Ⅱ의 $f_{c(t)}/f_{ck}$는 재령 3일 및 7일에서 각각 0.20~0.48 및 0.66~0.91이며, 재령 91일에서 1.04~1.06이었음. 또한 실내실험 결과는 재령 3일 및 7일에서 각각 0.16~0.44 및 0.71~0.93이며, 재령 91일에서 1.03~1.06으로 R_a에 관계없이 초기 재령에서 급격한 발현율을 보였으나, 장기 재령에서는 비교적 완만한 형태를 나타내었음.
- 이처럼 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 이전 실내실험 결과의 비는 R_a가 0% 및 10%인 실험체의 재령 7일의 초기 재령에서 각각 0.95 및 0.98과 재령 91일에서 1.01 및 1.00이었음.
- 또한 R_a가 25%인 실험체에서는 재령 7일 및 91일에서 각각 0.93 및 1.01로 $f_{c(t)}/f_{ck}$는 상호 비슷한 실험결과를 보였음.

3.4.5 쪼갬 인장강도

- 재령 28일 압축강도의 제곱근($\sqrt{f_{ck}}$)으로 무차원된 쪼갬 인장강도($f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$)는 0.29~0.37 범위였으며, R_a가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 17% 감소하였음.
- 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내실험 결과 비는 0.77~1.11 범위였으며, 그 평균 및 표준 편차는 각각 0.94 및 0.16으로 실내실험 결과와 전반적으로 잘 일치하였음.
- 하지만, R_a가 증가함에 따라 실험 결과값이 재현성평가 대상인 실내실험 결과 보다 높아지는 경향을 보였다(표 4.5).
- 표 4.5에는 $f_{sp}/\sqrt{f_{ck}}$의 실험결과와 CEB-FIP의 예측값과 비교하였음. 이때 f_{sp}의 예측값은 CEB-FIP에서 압축강도가 50 MPa 이하인 경량 콘크리트에서 규정하고 있는 $0.3(f_{ck})^{2/3}(0.4+0.6\rho_c/\rho_0)$을 적용하였음. 실험값($(f_{sp}/\sqrt{f_{ck}})_{\mathrm{Exp.}}$) 대비 예측값 비($(f_{sp}/\sqrt{f_{ck}})_{\mathrm{Pre.}}$)의 평균 및 표준편차는 0.81 및 0.07이었음.

3.4.6 파괴계수

- 재령 28일 압축강도의 제곱근($\sqrt{f_{ck}}$)으로 무차원된 파괴계수($f_r/\sqrt{f_{ck}}$)는 0.47~0.68 범위이었으며, R_a가 0%에서 25%로 증가할 때 각 그룹의 실험체에서 평균 24% 감소하였음. 실내실험 결과의 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$는 0.51~0.65 범위이었음.
- 이때의 실험결과 대비 재현성 평가 대상인 실내실험 결과의 비는 평균 및 표준 편차가 1.00 및 0.06으로 재현성 평가 대상 실험결과와 잘 일치하였음.
- 하지만 R_a가 증가함에 따라 실험 결과값이 재현성평가 대상인 실내실험 결과 보다 낮아지는 경향을

보였음(표 3.7).

- 표 3.5에는 $f_r/\sqrt{f_{ck}}$ 의 실험결과를 ACI 318-14의 예측 값과 비교하였음. 이때 f_r의 예측값은 ACI 318-14 설계기준에서 제시하고 있는 $0.62\lambda_1\sqrt{f_{ck}}$를 이용하였는데, 여기서 λ_1은 0.75로 전경량 경량콘크리트의 보정계수임.
- 실험값 대비 ACI 318-14 예측값 비의 평균 및 표준편차는 1.23 및 0.16로 실험값이 ACI 318-14의 예측값 보다 높았음.
- 이는 ACI 318-14 기준은 f_{ck}와 경량 콘크리트의 보정계수 λ_1의 함수만으로 평가하고 있어 R_a에 대한 영향을 반영하지 못했기 때문임.

3.4.7 열전도율

- 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 열전도율은 R_a에 현저한 영향을 받았음.
- 모든 그룹의 실험체에서 R_a가 0%에서 25%로 증가함에 따라 평균 30% 감소하였으며, 이때 ρ_c는 약 18% 감소하였음(표 3.6).

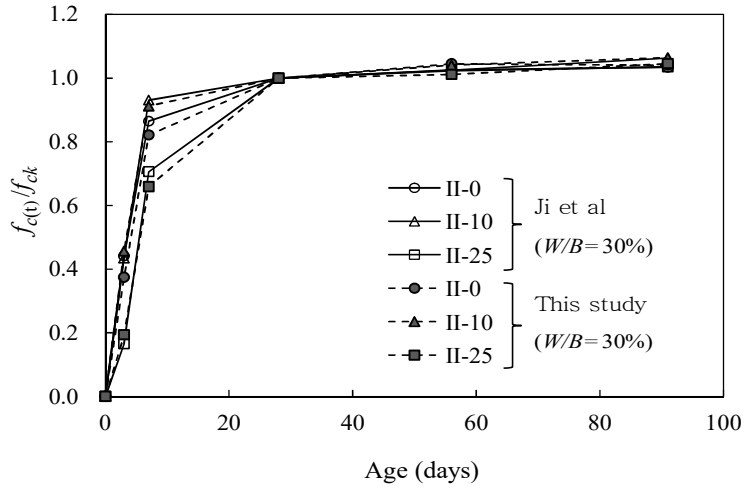


그림 3.1 전형적인 압축강도 발현율

표 3.5 재현성 평가 대상인 실내실험 결과와 현장 실험결과의 비교

Group	Spec-imens	f_{ck} (MPa)	Measured value				Predictions		Comparisons			
			This study (1)		Ji et al. (2)		$\left(\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Pre.}$ (3)	$\left(\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Pre.}$ (4)	$\frac{(1)}{(2)}$		$\frac{(1)}{(3)}$	$\frac{(1)}{(4)}$
			$\left(\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Exp.}$	$\left(\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}\right)_{Exp.}$	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	CEB-FIP	ACI	$\frac{f_{sp}}{\sqrt{f_{ck}}}$	$\frac{f_r}{\sqrt{f_{ck}}}$	CEB-FIP	ACI
I	I-0	25.4	0.37	0.62	0.48	0.57	0.43	0.46	0.77	1.09	0.86	1.35
	I-10	21.3	0.31	0.54	0.31	0.54	0.41	0.46	1.00	1.00	0.76	1.17
	I-25	14.6	0.29	0.47	0.27	0.51	0.38	0.46	1.07	0.92	0.76	1.02
II	II-0	24.6	0.34	0.68	0.47	0.65	0.43	0.46	0.72	1.05	0.79	1.48
	II-10	19.9	0.31	0.57	0.33	0.58	0.40	0.46	0.94	0.98	0.78	1.24
	II-25	7.4	0.30	0.52	0.27	0.52	0.32	0.46	1.11	0.98	0.94	1.13
Mean of the ratios between the present tests and Ji et al. 's tests or predictions by code equations									0.94	1.00	0.81	1.23
Standard deviation of the ratios between the present tests and Ji et al. 's tests or predictions by code equations									0.16	0.06	0.07	0.16

※ f_{ck} is 28-day compressive strength, f_{sp} is splitting tensile strength, and f_r is modulus of rupture.

- 그룹 Ⅰ및 Ⅱ에서 기포가 첨가된 바텀애시 골재 기반 경량 콘크리트의 열전도율은 R_a가 10%와 25%에서 각각 0.42~0.45 W/m · k와 0.34~0.37 W/m · k의 범위에 있었는데, 이는 기건 밀도가 1,500 kg/m^3 이상인 경량골재 콘크리트의 일반적인 열전도율 0.50 W/m · K 보다 각각 평균 13% 및 23% 낮은 수치임.
- 일반적으로 경량골재 콘크리트의 열전도율은 ρ_c에 밀접한 영향을 받기 때문에 열전도율(k_c)에 대한 ACI 122R 설계기준은 다음과 같음.

$$k_c = A_1 EXP[0.00125\rho_c] \tag{4.1}$$

- 여기서, A_1은 건조상태에 관련된 상수로서 절건 및 기건에서 각각 0.0072 및 0.0865임.
- 이 실험결과에서는 절건상태에서 열전도율을 측정하였으므로, 예측모델과 실험결과와의 비교시 A_1을 0.0072로 적용하였음.
- 표 3.6에 나타낸 바와 같이 실험값 대비 예측 값의 비($(k_c)_{\mathrm{Exp.}}/(k_c)_{\mathrm{Pre.}}$)는 R_a가 증가함에 따라 감소하였으며, 그 평균 및 표준편차는 0.89 및 0.05로 ACI 122R의 예측 값은 실험값을 다소 불안전측으로 예측하였음. 이는 열전도율을 ρ_c의 함수만으로 평가하고 있어 기포 혼입(R_a)에 따른 영향을 고려하지 않았기 때문임.

표 3.6 열전도율 결과와 ACI 122R의 예측값과의 비교

Group	Specimens	ρ_c (kg/m^3)	Measured value $(k_c)_{\mathrm{Exp.}}$ (W/m · K)	Predictions $(k_c)_{\mathrm{Pre.}}$ (W/m · K)	$\frac{(k_c)_{\mathrm{Exp.}}}{(k_c)_{\mathrm{Pre.}}}$
			This study (1)	ACI 122R (2)	(1)/(2)
Ⅰ	Ⅰ-0	1,592	0.50	0.53	0.95
	Ⅰ-10	1,543	0.45	0.50	0.91
	Ⅰ-25	1,470	0.37	0.45	0.82
Ⅱ	Ⅱ-0	1,594	0.48	0.53	0.91
	Ⅱ-10	1,528	0.42	0.49	0.86
	Ⅱ-25	1,315	0.34	0.37	0.91
Mean of the ratios between experiments and predictions					089
Standard deviation of the ratios between experiments and predictions					0.05

※ ρ_c is air-dried density and k_c is thermal conductivity.

4. 단기 실용화 기반 구축

4.1 평가용 엑셀 프로그램 및 배합설계 작성

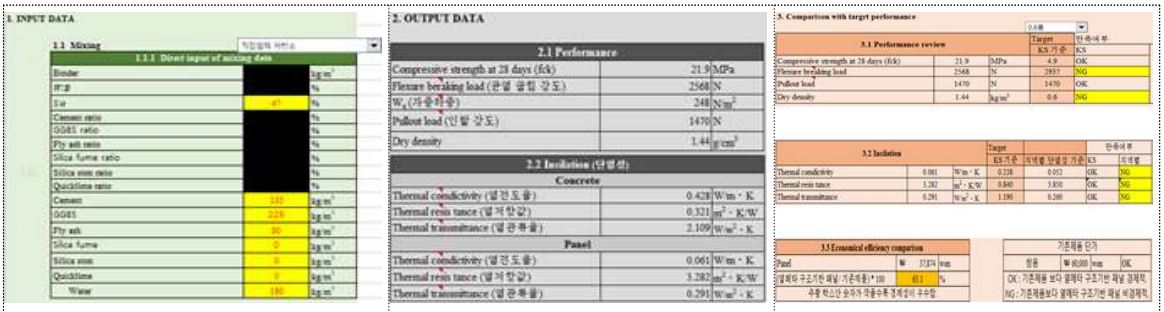
4.1.1 고려된 주요 변수

- 판넬 설계용 프로그램 작성을 위한 입력 데이터와 이에 따른 출력 데이터는 표 4.1에 요약하였음.
- 열메타 PC 판넬 설계용 프로그램은 주요 입력 데이터로서 배합설계, 사용 재료 등이 있음.
- 사용자의 목표성능은 콘크리트의 단열성, 단가 및 판넬의 역학적 특성, 단열성 및 단가 등을 위한 입력 데이터의 정보가 필요함(그림4.1).
- 배합설계는 기포 콘크리트 및 저탄소 콘크리트 제안 모델을 사용하였음.
- 콘크리트 배합을 위한 결합재는 OPC, GGBS 및 FA 등을 사용하였고, 이들의 밀도, 비표면적 및 단가 등의 정보를 기재하였음.

- 기포 혼입을 위해 사용된 기포제는 동물성, 식물성 및 독립 기포용으로 총 3가지 종류임. 이와 함께 판넬의 주요 재료인 열메타의 종류, 단열성 및 단가 등의 데이터가 필요함.
- 출력 데이터는 입력 데이터의 정보를 기반으로 기포 콘크리트 및 저탄소 콘크리트의 압축강도, 열전도율 등의 역학적 특성, 콘크리트의 최적의 두께 및 단가를 산정할 수 있음. 이와 함께 판넬을 구성하는 열메타의 두께, 배열 층수, 및 단가 등의 정보를 산정하였음. 더불어, 열메타 PC 판넬의 압축강도, 휨하중, 단열성 등의 역학적 특성과 판넬의 최적의 두께 및 단가를 산정할 수 있음.
- 이와 함께 KS F 4736(압출성형 경량 콘크리트 패널) 및 KS F 4914(경량기포 콘크리트 패널)에서 제시하고 있는 판넬의 요구 성능의 만족 여부와 함께 국토 교통부 에너지 설계기준의 단열성 만족 여부를 제시할 수 있음. 또한, 열메타 PC 판넬의 경제성은 기존 상용화 제품인 쌍용 ALC 판넬과 비교하였음.

4.1.2 적용된 설계모델

- 판넬 설계를 위한 Yang and Jung이 제안한 저탄소 콘크리트 배합설계 모델을 적용하였음. 저탄소 콘크리트 배합설계 프로세스는 다음 표 4.2와 같음.
- 저탄소 콘크리트 배합설계는 입력 데이터 설정, 결합재 설계, 물-결합재비 결정, 잔고재율 산정, 절대용적 배합방법 검토의 총 5가지 과정이 있음.
- 설계된 저탄소 콘크리트 배합설계 프로세스에 따라 배합설계 프로그램을 제작하였음(그림 4.2).



(a) 입력데이터 (b) 출력데이터 (c) 기준 비교 및 경제성 검토

그림 4.1 판넬 엑셀 프로그램

표 4.1 열메타 PC 판넬 설계용 프로그램

입력 데이터		출력 데이터
배합설계 : 기포콘크리트 및 저탄소 콘크리트 (압축강도, 결합재비율 및 잔골재율) 사용재료 : 결합재, 골재, 기포제, 열메타, 단열재 및 용접철망 각 구성재료들의 종류, 밀도 및 비표면적 (결합재, 골재, 단열재 및 열메타) 각 구성재료들의 열전도율 (콘크리트, 단열재 및 열메타) 용접 철망 : 두께 및 치수 구성재료들의 단가 (결합재, 골재, 단열재, 열메타, 용접철망)	➡	콘크리트 : 기건 밀도, 압축강도 및 열전도율 열메타 : 열관류율 열메타 PC 판넬 : 압축강도, 휨하중, 인발강도, 열전도율, 열관류율 구성재료들의 단가 : 콘크리트, 열메타 및 PC 판넬 PC 판넬의 경제성 : 상용화 제품과 비교 설계기준과의 비교 : KS 및 에너지설계(국토부)

- 입력단계에서는 사용자가 사용하는 콘크리트 구성재료들의 물리적 특성 및 목표 성능(슬럼프, 콘크리트 압축강도 및 공기량)을 입력함. 콘크리트 구성재료들의 물리적 특성으로는 시멘트계 재료들의 비중 및 골재의 비중, 직경 및 흡수율 등이 있음.
- 결합재 설계에서는 목표 압축강도 및 휨 강도를 만족하기 위한 결합재양을 선정하기 위해서는 사용되는 결합재 종류와 치환율을 결정함.
- 물-결합재비 결정에서는 결정된 결합재 양에 대해 목표 압축강도를 만족시키기 위한 W/B는 다음과 같이 산정함.

$$W/B = 1.22\left(\frac{f_0}{f_{ck}}\right)[(1-(R_G^3+R_F^2-R_S^2)](\upsilon_A)^{-0.1} \tag{4.1}$$

- 여기서, f_{ck}는 재령 28일 압축강도를, f_0(=10 MPa)는 콘크리트 압축강도에 대한 참고값을, R_G는 고로슬래그 치환율, R_F는 플라이애시 치환율을, R_S는 실리카 흄 치환율을, υ_A는 목표공기량을 의미함. 잔골재율(S/a)은 목표 슬럼프를 만족시키기 위해서 0.25~0.55의 범위에 있도록 함.
- 절대용적 배합방법 검토 단계에서는 이전 단계에서 결정된 콘크리트 구성재료(시멘트계 재료, 골재, 물 등)의 용적의 합이 1 m^3에 부합하는지 검토하였음.
- 결합재 설계에서는 역학적 특성을 고려한 결합재의 선정과 함께 결합재 치환율을 결정함.

표 4.2 저탄소 콘크리트 설계 모델 과정

단계	절차
1. 입력데이터	콘크리트의 물리적 특성(밀도, 흡수율 등) 및 목표성능을 입력
	▼
2. 결합재 설계	목표 역학적 특성을 만족하기 위한 결합재 및 결합재 치환율 결정
	▼
3. 물-결합재비 결정	결정된 결합재 양에 대한 목표 압축강도를 만족시키기 위한 W/B 산정
	▼
4. 잔골재율 산정	잔골재율은 0.25~0.55이하의 범위
	▼
5. 절대용적 배합방법 검토	이전단계에서 결정된 콘크리트 구성재료의 용적의 합이 1 m^3를 만족하는지 검토하며, 미 만족시 2번항 결합재 설계에서 결합재 치환율의 재조정

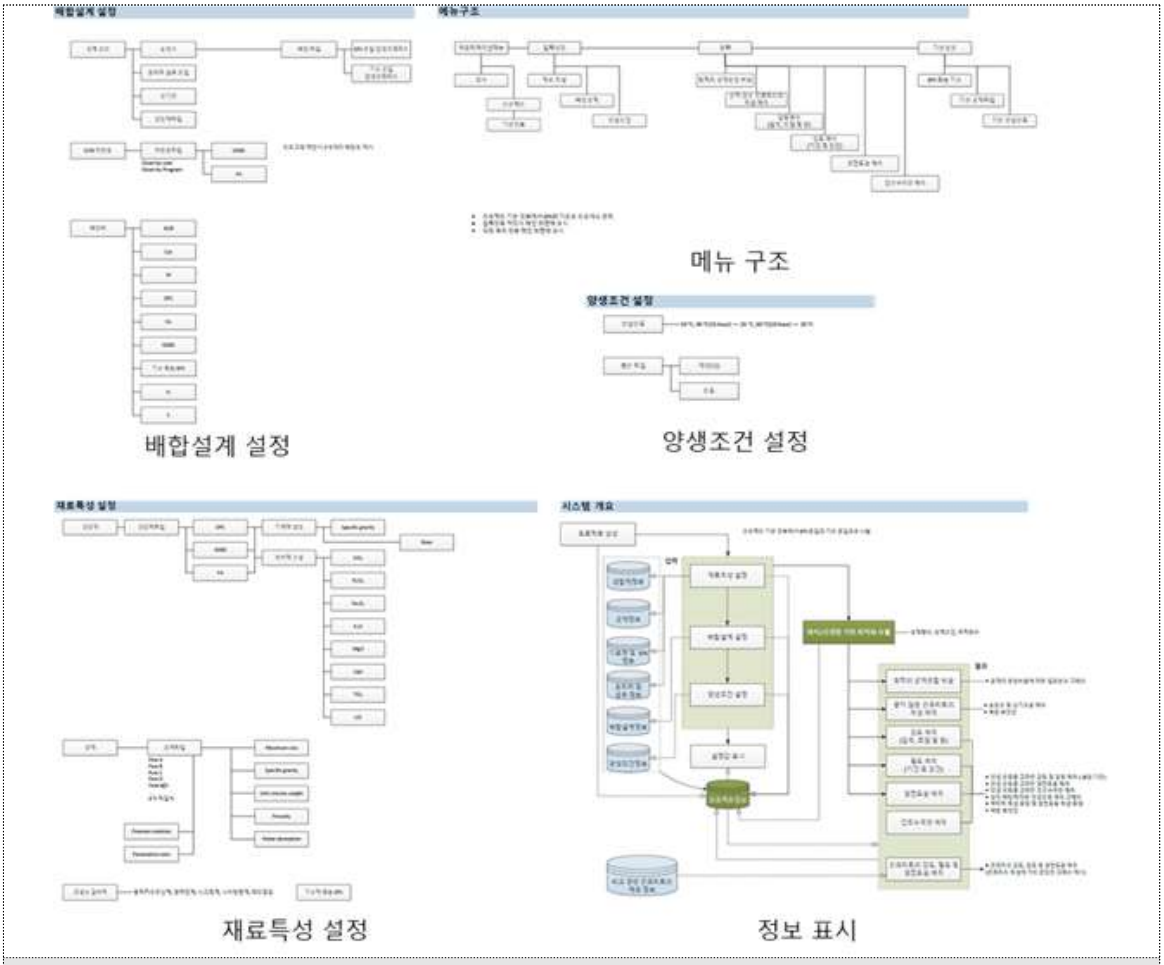


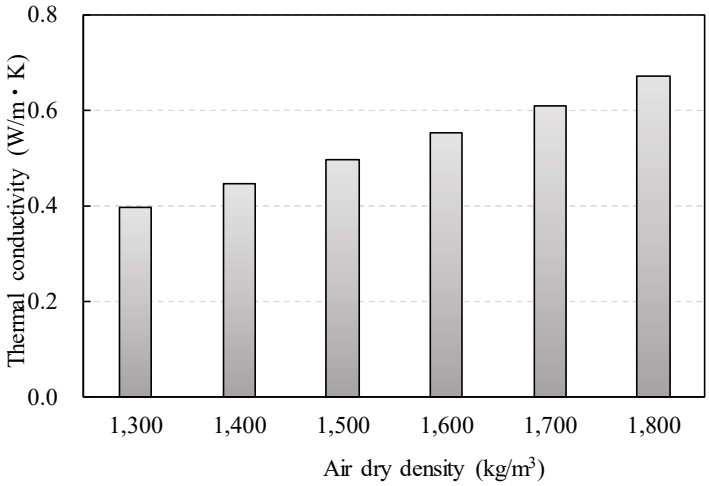
그림 4.2 저탄소 콘크리트 배합설계 프로그램

4.1.3 변수연구

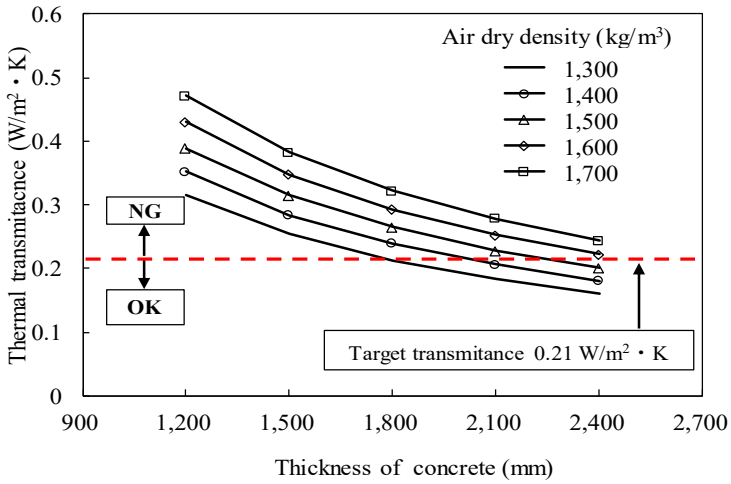
- 경량골재 콘크리트의 기건 밀도는 1,400~1,800 kg/m^{3}임. 기포 콘크리트의 밀도는 약 400~800 kg/m^{3}의 범위에 있음.
- 이에 따라 패널 설계 프로그램에서 콘크리트의 기건 밀도는 바텀애시 경량골재 콘크리트와 기포의 융합기술로서 KS F 4736(압출 성형 경량 콘크리트)의 내장재 압축강도 기준 10 MPa 이상을 만족하기 위해 기건 밀도를 1,300~1,800 kg/m^{3}로 설정하였음.
- 기건 밀도에 따른 열전도율은 그림 4.3(a)와 같음. 콘크리트의 기건 밀도가 1,300 kg/m^{3}일 때 열전도율은 0.397 W/m · K로서 기건 밀도 1,800 kg/m^{3}보다 단열성이 41% 우수하였음.
- 경량골재 콘크리트의 두께에 따른 열전도율 및 열관류율은 그림 4.3(b)와 같으며 기건 밀도 1,300 kg/m^{3}에서 콘크리트 두께가 1,200~2,400 mm일 때의 열관류율은 0.161~0.315 W/m^2 · K 범위에 있음.
- 즉 국토교통부 에너지 절약 설계 기준에서 제시하고 있는 열관류율 0.15 W/m^2 · K의 만족을 위해서는 콘크리트의 설계 두께는 최소 1,850 mm가 요구됨.
- 하지만 이는 전용 면적의 감소 및 사용성 등의 문제를 고려할 때 현실적으로 불가능한 수준임.
- 이에 따라 목표 열관류율을 만족하면서 PC 판넬의 두께를 감소할 수 있는 방법으로는 열전도율이 0.02~0.03 W/m · K의 범위를 갖는 열메타의 적용을 대안으로 제시할 수 있음.
- 열메타 적용에 따른 콘크리트의 단열 성능 변화는 그림 4.4와 같음.
- 열메타는 레이어 층수 및 두께에 따라 판넬의 단열성능이 변화하는데 그림 4.4에 나타낸 바와 같이

경량골재 콘크리트에 비해 효율적인 열전도율 감소의 효과를 보임.

- 하지만, 열메타를 한 개의 레이어로 구성시 열관류율은 0.318~0.958 W/m^2 · K의 범위에 있음.

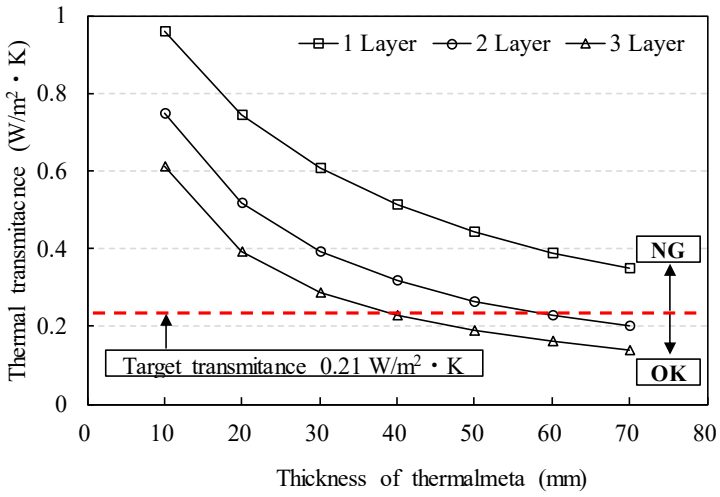


(a) 콘크리트의 기건 밀도에 따른 열전도율

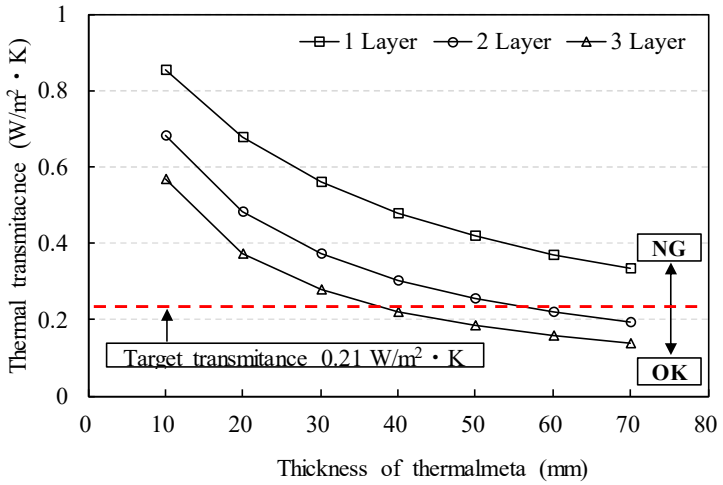


(b) 콘크리트 두께에 따른 열관류율

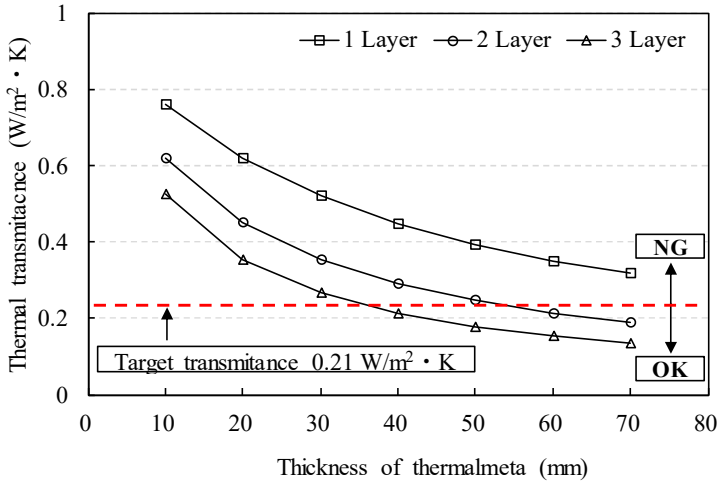
그림 4.3 콘크리트 기건 밀도 및 두께에 따른 열적 특성



(a) 판넬 두께 200 mm



(b) 판넬 두께 250 mm



(c) 판넬 두께 300 mm

그림 4.4 열메타 두께에 따른 PC 판넬의 단열성능

- 열메타를 두 개의 레이어로 구성시 열관류율은 열메타 두께 70 mm에서 판넬의 두께에 관계없이 목표 열관류율 0.21 W/m^2 · K를 만족하였음.
- 이들의 열관류율은 두께 200 mm, 250 mm 및 300 mm에서 각각 0.20 W/m^2 · K, 0.19 W/m^2 · K 및 0.172 W/m^2 · K로 산정됨.
- 열메타를 세 개의 레이어로 구성시 판넬의 열관류율은 0.135~0.614 W/m^2 · K의 범위로서 열메타를 한 개의 레이어로 구성된 판넬의 열관류율 보다 단열성이 약 2배 우수하였음.
- 열메타를 세 개의 레이어로 구성시 열관류율은 판넬의 두께에 관계없이 열메타 두께 50 mm에서 0.21 W/m^2 · K 이하임.
- 판넬의 열관류율은 50 mm 두께를 갖는 열메타를 세 개의 레이어로 구성시 전체 판넬두께 200 mm, 250 mm 및 300 mm에서 각각 0.190 W/m^2 · K, 0.185 W/m^2 · K 및 0.180 W/m^2 · K로서 목표 열관류율을 만족함.
- 열메타 기반 PC 판넬은 두께가 330 mm 이면서 열메타를 두께 70 mm로 두 개의 레이어로 구성시 실험결과 외기에 직접 면할 때의 기준인 열관류율 0.15 W/m^2 · K도 만족할 수 있었음.
- 앞서 언급한 콘크리트의 기건 밀도 1,300~1,800 kg/m^3 범위에서 가장 단열성이 우수한 기건 밀도 1,300 kg/m^{3}과 최적의 판넬 두께인 300 mm을 고정하여 판넬 길이 따른 휨 하중을 산정하였음(그림 4.5).
- 휨 하중 산정은 열메타 밀도를 제외한 콘크리트 밀도만을 이용하였음.

- KS F 4914(경량기포 콘크리트 패널)에 따르면 0.6품의 기포 콘크리트 제품의 요구 휨 성능으로서 2,800 N 이상을 제시하고 있음.
- 본 연구에서 제시하고 있는 PC 판넬은 제작 크기(길이)에 따라서 휨 성능이 변화하는데, 길이를 4,000 mm로 할 경우의 허용 하중은 2,446 N으로 KS F 4914에서 요구 휨 성능을 만족할 수 없음.
- 판넬 길이 3,000 mm PC 판넬의 휨 하중은 3,053 N으로 길이 4,000 mm보다 25% 향상됨. 더불어 판넬 길이 3,000 mm의 PC 판넬은 KS F 4914에서 요구하는 휨 하중을 만족함.
- 따라서 PC 판넬의 길이는 KS F 4914의 휨 하중 기준을 만족시키기 위해서 3,000 mm 이하가 요구됨.

4.2 판넬의 단면상세 안

- 최종 결정된 판넬의 단면상세는 그림 4.6과 같음.
- 판넬의 치수는 변수연구에서 재료적·구조적 성능에서 분석 결과를 기반으로 단열성, 휨 하중 및 콘크리트 피복두께를 고려하였음.

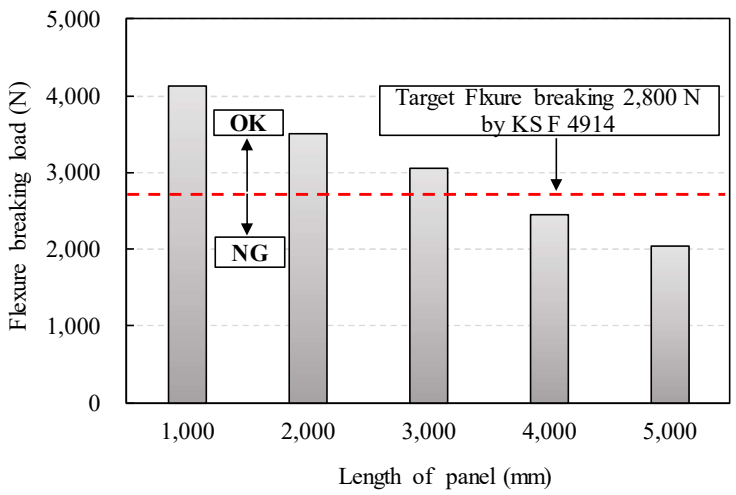


그림 4.5 길이에 따른 PC 판넬의 휨 하중

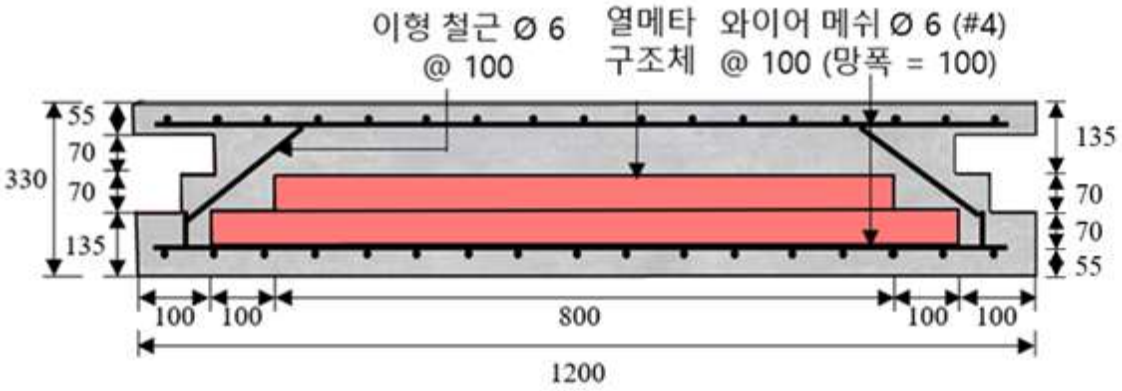


그림 4.6 열관류율 0.15 W/m²·K를 확보한 PC 판넬의 단면상세(단위: mm)

- PC 판넬의 치수는 열관류율을 고려하여 330 × 1,200 × 2,500 mm로 결정하였음.
- 단열재인 열메타의 치수 및 레이어수는 단열성과 함께 휨 하중의 만족 범위 내에서 결정하였음. 열메타의 치수는 70 × 1,000 × 2,200 mm 및 70 × 800 × 2,200 mm(두께 × 너비 × 길이)이며, 레이어수는 2임.
- 기포 또는 EPS가 첨가된 콘크리트는 역학적 성능, 단열성 및 피복두께를 고려하여 두께를 190 mm로, 기건밀도를 1,300 kg/m^{3}로, 압축강도를 10 MPa로 결정하였음.
- 휨 및 균열 저항성능을 향상시키기 위해서 용접철망 배근을 결정하였음.
- 용접철망은 열메타와 콘크리트의 부착성능을 향상시키는 것이 주요 목적임. 이 재료의 치수 및 망폭은 100 × 2,400 mm이며, 직경은 5.8 mm임.

4.3 재료들의 수급성

- 결합재로서 사용되는 OPC, 플라이애시 및 고로슬래그 미분말은 혼화재는 이미 IS동서에서 원활히 수급하고 있는 재료로서 현재 수급중인 재료의 도착도는 다음과 같음(표 4.3)
- 골재로서 사용되는 바텀애시 경량골재는 국내에서 영흥화력발전소에만 생산되지만, 지속적인 협의를 통한 현재 IS동서의 PC제작 공장까지의 거리를 감안한 도착가는 다음과 같음(표 4.4).
- 골재의 단가는 100 m^{3}를 기준으로 하였으므로, 이 이상의 물량에 대해서는 향후 영흥화력 발전소와의 협의를 통하여 단가를 더 낮출 수 있을 것으로 판단됨.
- 열메타는 시중에서 판매하는 상용화된 제품이 아니므로 제작여건에 따라서 단가가 다양하게 책정될 수 있으며, 소량 구매를 기준으로 kg당 8,000~9,000원으로 가정될 수 있음(표 4.5).
- 하지만 대량 생산이 가능한 시점에서의 구매는 열메타의 단가를 저감시킬 수 있음.

표 4.3 결합재의 수급단가

No.	결합재 종류	업체명	단위	출고가(원)	도착가(원)
1	OPC		m^3	94,000	100,000
2	플라이애시		m^3	38,000	39,000
3	고로슬래그		m^3	37,500	38,500

표 4.4 골재의 수급단가

No.	결합재 종류	골재치수 (mm)	업체명	단위	도착가(원)
1	바텀애시 경량골재	5~25	영흥화력 발전소	m^3	110,000
		2~4	영흥화력 발전소	m^3	110,000
		0~2	영흥화력 발전소	m^3	110,000

표 4.5 열메타의 수급단가

No.	결합재 종류	구성성분	단위 (kg)	단가(원)
1	열메타	페이퍼 허니콤	28	187,000
		라미네이트	25	82,500

4.4 경제성

4.4.1 콘크리트 재료 단가 비교

- 위에서 결정된 단가를 기준으로 PC 판넬의 단가를 계산하고 기존 제품과의 비교를 통하여 경제성을 분석하였음.
- 기존제품(쌍용 ALC 판넬)과 기포와 바텀애시 기반 경량 콘크리트 PC 판넬의 단가를 비교하였음(그림 4.7).
- 기포와 바텀애시 기반 경량 콘크리트 PC 판넬은 두께에 관계없이 기존 제품(쌍용 ALC 판넬)과 단가가 비슷하였음.
- 판넬의 두께 200 mm일 때, 기포와 바텀애시 기반 경량 콘크리트 PC 판넬의 단가는 27,600원으로 쌍용 ALC 패널(단가 28,000원)과 비슷하였음.
- 판넬 두께 250 mm 및 300 mm에서 기존 제품의 단가는 각각 33,000원 및 45,000원임. 기포와 바텀애시 기반 경량 콘크리트 PC 판넬의 단가는 각각 32,800원 및 45,700원으로 비슷하였음.
- 하지만 위의 비교는 소량 구매시의 단가를 기준한 것이므로 대량생산 시 열메타의 단가를 낮출 수 있음. 결과적으로 기포와 바텀애시 기반 경량 콘크리트 PC 판넬은 상용화 제품 보다 저렴한 제작이 가능할 것으로 판단됨.

4.4.2 소요 열관류율 고려한 열메타 PC 판넬 경제성 평가

- 위에서 결정된 단가와 소요 열관류율 기준으로 PC 판넬의 단가를 계산하고 기존 제품과의 비교를 통하여 경제성을 분석하였음(표 4.6).
- 소요 열관류율 0.15 W/m^{2}K를 만족시키기 위해서는 열메타 두께 70 mm이면서 두 개의 레이어일 때 판넬 두께는 330 mm가 요구됨. 반면 기존 열반사 단열재는 판넬 348 mm가 요구됨. 이로서 열메타 기반 PC 판넬은 기존 제품 보다 두께를 약 5% 감소시킬 수 있음. 결과적으로 열메타 기반 PC 판넬의 단가는 61,210원/m^{3}으로 기존 제품 보다 약 14%의 경제성을 확보하고 있음.

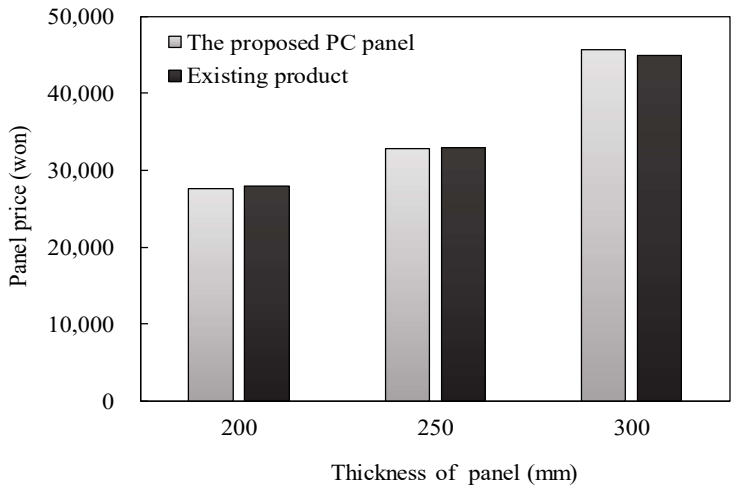
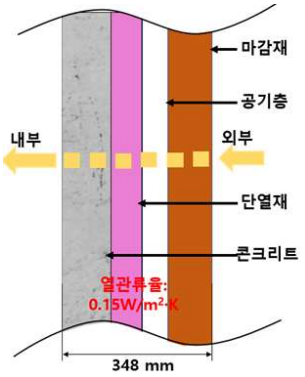
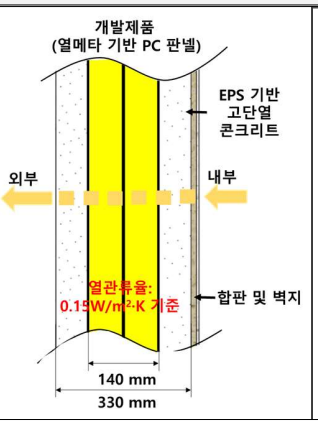


그림 4.7 PC 판넬의 기존 상용화 제품과 비교

표 4.6 소요 열관류율을 고려한 기존 제품과 열메타 기반 PC 판넬과의 단가 비교(1 m^2 기준)

기존 제품(열반사 단열재)		개발 제품(열메타 기반 PC 판넬)	
	· 두께 348 mm 필요(열관류율 0.15 W/㎡·K 기준)		· 두께 330 mm 필요(열관류율 0.15 W/㎡·K 기준)
재료비(348 mm 두께 기준) 70,221 원/m^2		재료비(330 mm 두께 기준) 61,210 원/m^2	

5. 열관류율 0.15 W/m^2 · K의 성능을 확보한 지속가능 열메타 PC판넬 제작(안)

5.1 적용 범위

- 이 제작(안)은 국토교통기술촉진연구사업의 열관류율 0.15W/m^2 · K의 성능을 확보한 지속가능 열메타 PC판넬 제작 기술 개발에 의해 개발된 열메타 구조를 활용한 PC패널의 제작에 관한 일반적인 표준을 규정하는데 있음.
- 열메타 PC패널은 배합 설계표에 따라 제작하여야 하고 특수 환경에 설치되는 경우에는 별도로 설계하여야 함.
- 원칙적으로 건축실내 내벽을 적용 대상으로 함. 노출 환경이 양호하지 못한 경우에는 예상 환경을 대비하여 충분한 보강을 하여 양호한 패널의 상태를 유지하여야 함.

5.2 일반사항

- 열메타 PC패널 제작에 소요되는 재료는 강도, 내구성, 수밀성 등을 가지는 균질한 품질의 제품이어야 함.
- 제조공정이 일관되게 관리되어 있는 공장에서 연속적으로 제조되는 열메타 PC패널은 소요의 품질 및 성능을 갖도록 사용할 재료, 배합, 비비기, 성형 및 양생 등에 주의하여야 함.
- 열메타 PC패널의 취급, 운반, 조립 및 접합 등에 있어서는 품질과 성능이 손상되지 않도록 시공하여야 함.

5.2.1 용어의 정의

① 급열양생(heat curing)

- 급열양생은 히터 매트, 젯트 히터, 스토브 등에 의한 온풍이나 램프 등을 사용하여 양생기간 중 콘크리트를 가열하는 양생 방법으로서 외기온이 매우 낮아 콘크리트의 강도 발현에 지장을 주거나 또는 콘크리트 표면과 내부의 온도차를 줄여 콘크리트 표면에 발생될 수 있는 균열을 방지하기 위해 사용되는 양생 방법임.
- 특히, 이 방법을 적용할 우려가 있으므로 가열 대책에 세심한 주의를 요함.

② 결합재(binder)

- 결합재는 물과 반응하여 콘크리트 강도발현에 기여하는 물질을 생성하는 것의 총칭이며, 시멘트, 고로슬래그미분말, 플라이애쉬 등을 함유하는 것을 의미함.
- 결합재는 넓은 의미로는 골재 등과 결합하는 재료를 나타내는 것으로서 예를 들면, 아스팔트콘크리트에서는 아스팔트를 나타냄. 동일한 의미로서 시멘트콘크리트에서는 시멘트 페이스트가 결합재가 되지만, 좁은 의미로서는 시멘트 페이스트 부분의 경화에 기여하는 분체를 가리킴.
- 이 (안)에서는 후자를 결합재라고 정의하여 시멘트 외에 고로슬래그미분말, 플라이애쉬, 실리카퓸, 팽창재 등 시멘트와 유사한 결합 효과를 가지는 분체 재료도 포함하여 이들을 총칭하는 용어로서 사용함.

③ 규석분말(quartz glass)

- SiO_2를 단성분으로 하는 유리. 저팽창, 고도의 자외선 투과율, 내수성, 높은 전기저항 등의 특징이 있음.

- 규사, 수정, 사염화규소 등을 원료로 하여 용융, 기상합성 등으로 제조 됨. 원료·제법 모두 기상합성으로 제조되는 고순도의 것이 얻어짐. 이화학용, 조명용, 도가니, 광통신용(Ge, B 등을 혼합) 등 용도가 광범위함.

④ 생석회(quicklime)

- 생석회는 석회석($CaCO_3$)을 고온(1,000~1,200℃)에서 연소시켜 제조한 산화칼슘(CaO)임. 흡습성이 강하고 수화할 때 발열하고 부피가 늘어나므로 저장하거나 사용할 때 주의하여야 함. 산성토양의 중화와 토양 개량에 사용되기도 하지만, 산성토양개량제로 사용하기에는 고가임.
- 산화칼슘으로 Ca 원자와 O 원자가 결합한 CaO임. 산화칼슘은 $CaCO_3$를 공기가 차단된 상태에서 825℃ 이상으로 장시간 가열하여 CO_2를 잃게 하여 만듬. 생석회는 백색의 결정으로 녹는점은 2,570℃이며, 공기 중에 방치하면 수분과 CO_2를 흡수하여 수산화칼슘과 탄산칼슘으로 분해됨. 생석회는 수분과 접촉해서 열을 내며 강알칼리성의 수산화칼슘으로 변하는데, 이러한 점 때문에 소독제로 사용되고 있음. 물과 반응하였을 때 100℃에 가까운 열을 내며, 미생물과 바이러스 등을 사멸시킴.
- 생석회는 매우 다양한 용도로 쓰이는데 석회비료산성토양 개량제, 석회 플라스터 혼합시멘트 등의 토목건축 재료, 표백제의 원료, 카바이드 석회질소 및 이것에서 유도되는 아세틸렌계 멜라민계 제품의 기본원료, 소다 공업 등에서의 산성폐가스 포집제 등에 사용됨.
- 고성능 AE감수제에는 고성능 감수제에 서방제를 첨가한 것과 입체 방벽 작용을 가지는 수용성 고분자를 첨가한 2가지 종류가 있음. 전자는 폴리카르본산 축합물 등의 고성능 감수제에 서방제를 첨가한 것임.
- 서방제란 과립형의 분산제로서 물에 녹지 않지만, 알칼리 용액에 서서히 녹아 점차로 분산 효과를 증진시켜 슬럼프 손실을 보상함. 후자는 폴리카르본산염계나 아미노카르본산염계의 수용성 고분자임. 이들은 시멘트 입자 표면에 흡착하여 입자 우위에 입체적인 흡착층을 형성하고 정전기적으로 시멘트 입자를 분산시켜 페이스트의 유동성을 증가시킴.
- 고성능AE감수제의 품질은KS F 2560 「콘크리트용 화학 혼화제」에 규정되어 있음.

⑤ 공장제품(factory product)

- 공장제품은 관리된 공장에서 계속적으로 제조되는 프리캐스트 콘크리트 제품임.
- 공장제품의 특징으로서는 ①재료, 배합, 제조설비, 시공 등의 관리가 양호하며, ②숙련된 작업원에 의하여 제조될 수 있으며, ③제조, 다루기 등의 작업을 기계화하기 쉽고, ④에너지 절약이 가능하며, ⑤작업하기 쉬운 장소에서 콘크리트 타설을 할 수 있고, ⑥기후에 좌우되는 일이 적으며, ⑦KS 규격에 따라 표준화되어 있고, ⑧실물 실험을 하는 일이 용이하며, ⑨단면이 매우 얇은 것도 있음.
- 공장제품에는 흄관, 콘크리트말뚝, 콘크리트블록, 철도침목, 세그먼트, 암거, 프리스트레스 합성바닥판 등이 있으며, 이들은 미리 공장에서 계속적으로 대량 생산되어 용도에 따라 사용되고 있음.
- 공장에서 제조되는 콘크리트 부재의 호칭으로는 공장제품, 프리캐스트제품, 콘크리트제품, 시멘트제품 등의 용어가 사용되고 있음.

⑥ 내구성(durability)

- 내구성은 시간의 경과에 따른 구조물의 성능 저하에 대한 저항성임.
- 콘크리트의 내구성에 나쁜 영향을 미치는 외적 작용에는 동결융해작용, 화학약품이나, 화학물질의 작

용, 마모작용 등이 있음.

- 품질이 나쁜 재료를 사용하면 콘크리트 자체의 장기 안정성에 문제를 일으킴. 철근콘크리트나 프리스트레스트콘크리트 부재에서는 콘크리트가 중성화되거나, 콘크리트에 염화물이 어느 정도 축적되면 내부의 강재가 부식되어 결국 내구성을 해치게 됨.

⑦ 내동해성(freeze thaw resistance), 동결융해저항성

- 내동해성은 동결융해의 되풀이 작용에 대한 저항성임.
- 물을 함유한 콘크리트나 골재 알이 동결하면, 이들 내부에는 자유수가 동결하여 팽창압이 발생함.
- 동해는 이 팽창압에 의해 조직이 느슨해지거나 또는 파괴가 일어나는 현상이며, 동해에 의한 손상의 정도는 동결융해의 되풀이 회수와 더불어 누가하여 커짐. 콘크리트 중의 AE공기는 콘크리트가 동결할 때 팽창압을 완화시키는 역할을 함.

1) 물-결합재비(water-binder ratio, water cementitious material ratio)

- 물-결합재비는 굳지 않은 콘크리트 또는 굳지 않은 모르타르에 포함되어 있는 시멘트풀 속의 물과 결합재와의 질량비임(기호 :W/B).
- 물-결합재비란 W/ (C +F)를 말함.
- 여기서, W는 물의 질량, C는 시멘트의 질량, F는 플라이애쉬 또는 기타의 혼화재의 질량을 나타냄. 플라이애쉬시멘트, 고로시멘트 등을 사용할 경우에는 (C+F)는 혼합시멘트의 총량임.

2) 물-시멘트비(water cement ratio)

- 물- 시멘트비는 굳지 않은 콘크리트 또는 굳지 않은 모르타르에 포함되어 있는 시멘트풀 속의 물과 시멘트의 질량비임.

3) 배합(mixing)

- 배합은 콘크리트 또는 모르타르를 만들 때 소요되는 각 재료의 비율이나 사용량임.
- 각 재료라 함은 시멘트, 물, 잔골재, 굵은골재, 혼화재료 등을 말한 것임.

4) 블리딩(bleeding)

- 블리딩은 굳지 않은 콘크리트, 굳지 않은 모르타르, 굳지 않은 시멘트풀에서 고체 재료의 침강 또는 분리에 의해 혼합수의 일부가 유리되어 상승하는 현상임.
- 블리딩 현상은 일종의 재료분리이며, 블리딩이 많으면 콘크리트상면은 다공질이 되며, 또 철근의 하부 혹은 굵은골재의 하면에 공극이 만들어져 약점이 됨.
- 블리딩을 적게 하기 위해서는 골재의 입도가 적당하여야 하며, 특히 0.15~0.3mm 부근의 세립 부분의 영향이 큼. 또 감수제, AE제, 포조란 등이 사용은 보수효과가 있어 블리딩을 적게 함

5) 성형(molding)

- 성형은 콘크리트를 거푸집에 채워 넣고 다져서 공장제품의 모양을 만드는 것임.
- 공장제품에서는 일반적으로 몰드에 콘크리트를 채워 넣고 다지는 작업을 성형이라고 하며, 몰드를 떼어내는 것을 탈형(脫型)이라고 함.

6) 습윤양생(moist curing)

- 습윤양생은 콘크리트를 타설한 후 일정기간을 습윤상태로 유지시키는 양생임.
- 시멘트의 수화에 필요한 물을 콘크리트로부터 발산되지 않도록 할 뿐만 아니라, 필요한 양만큼 확보하기 위한 작업을 말함건조수축에 의한 초기균열을 방지하는데도 효과가 있음.

7) 증기양생(steam curing)

- 증기양생은 높은 온도의 수증기 속에서 실시하는 촉진양생임.
- 증기양생은 보통 35℃ 이상의 온도로 실시된다. 보온의 목적으로 35℃ 미만의 온도로 유지하여 실시하는 양생은 여기에서 말하는 증기양생에 포함하지 않음.

8) 촉진양생(accelerated curing)

- 촉진양생은 콘크리트의 경화나 강도발현을 촉진하기 위해 실시하는 양생임.
- 콘크리트의 경화를 촉진하기 위해 실시하는 양생방법으로서는 증기양생, 오토클레이브양생, 온수양생, 전기양생, 적외선양생, 고주파양생, 마이크로파 발열양생 등이 있지만, 일반적으로 증기양생이 널리 사용되고 있음.

9) 표준양생(standard curing)

- 20±3℃로 유지하면서 수중 또는 습도 100%에 가까운 습윤상태에서 실시하는 양생.

10) 혼화재(admixture, mineral admixture)

- 혼화재는 혼화재료 중 사용량이 비교적 많아서 그 자체의 부피가 콘크리트 등의 비비기 용적에 계산되는 것임.
- 혼화재로서는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 팽창재가 주된 것임.

11) 혼화재료(admixture)

- 환화재료는 시멘트, 골재, 물 이외의 재료로서 콘크리트 등에 특별한 성질을 주기 위해 타설하기 전에 필요에 따라 더 넣는 재료임.
- 혼화재료로서는 여러 가지 종류의 것이 시판되고 있으며, 그의 종류, 성상 사용목적 등이 다양함. 이 시방서에서는 이들 혼화재료를 사용량에 따라 혼화재와 혼화제로 구분하였음.

12) 혼화제(chemical admixture, chemical agent)

- 혼화제는 혼화재료 중 사용량이 비교적 적어서 그 자체의 부피가 콘크리트 등의 비비기 용적에 계산되지 않는 것임.
- 혼화제로서는 AE제, 감수제, AE감수제, 유동화제, 고성능감수제, 고성능AE감수제, 지연제, 경화촉진제, 철근방청제, 발포제 등이 있음.

13) 바텀애시(Bottom Ash)

- 바텀애시는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 노벽, 과열기, 재열기 등에 부착되어 있다가 보일러 하부의 호퍼(hopper)에 떨어져 수집된 것이고, 전체 석탄회 발생량 중 약 10 % 정도를 차지함.

- 바텀애시를 분쇄하여 재료 특성을 개선함으로써 시멘트 대체 재료로 사용하였으며 성능개선 전후 바텀애시와 플라이애시를 혼입한 시험체에 대하여 물리 · 내구성능을 비교 · 검토하여 활용성을 평가하였음. 바텀애시를 분쇄하여 성능을 개선한 바텀애시에 대한 포졸란 반응 및 물리 · 내구특성을 검토한 결과 바텀애시의 비표면적이 약 3,000 cm^2/g 이상으로 분쇄된 경우 플라이애시 사용한 경우와 유사한 성능을 발현하는 것을 확인함으로써 분쇄하여 성능 개선한 바텀애시가 시멘트 대체 재료로 사용하는 것이 가능함을 확인한 사례가 있음.

5.2.2 각종 관련 시방 및 규격

가) 관련 시방서

- 콘크리트표준시방서
- 토목공사표준일반시방서
- 고속도로공사 전문시방서
- 건축공사표준시방서

나) 참조 규격

- KS A 5101 표준체
- KS D 3504 철근 콘크리트용 봉강
- KS F 2401 굳지 않은 콘크리트의 시료 채취 방법
- KS F 2402 포틀랜드 시멘트의 콘크리트의 슬럼프 시험 방법
- KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법
- KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법
- KS F 2408 콘크리트의 휨 강도 시험 방법
- KS F 2409 굳지 않은 콘크리트의 단위 용적 질량 및 공기량 시험 방법(질량방법)
- KS F 2421 굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험 방법(공기실 압력 방법)
- KS F 2423 콘크리트의 쪼갬 인장 강도 시험 방법
- KS F 2427 굳지 않은 콘크리트의 반죽질기 시험 방법(비비 방법)
- KS F 2428 진동식 반죽질기 측정기에 의한 콘크리트의 유동성 시험 방법
- KS F 2449 굳지 않은 콘크리트의 용적에 의한 공기량 시험 방법
- KS F 2455 믹서로 비빈 콘크리트 중의 모르타르와 굵은골재량의 변화율(차) 시험 방법
- KS F 2452 굳지 않은 콘크리트의 반죽질기의 시험 방법(다짐도 방법)
- KS F 2501 골재의 시료 채취 방법
- KS F 2502 굵은골재 및 잔골재의 체가름 시험 방법
- KS F 2503 굵은골재의 질량 및 흡수율 시험 방법
- KS F 2504 잔골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법
- KS F 2505 골재의 단위 용적 질량 및 공극률 시험 방법
- KS F 2507 골재의 안정성 시험 방법
- KS F 2508 로스앤젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험 방법
- KS F 2509 잔골재의 표면수 측정 방법
- KS F 2510 콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기 불순물 시험 방법

- KS F 2511 골재에 포함된 잔 입자(0.008mm 체를 통과하는) 시험 방법
- KS F 2512 골재 중에 함유되는 점토 덩어리량의 시험 방법
- KS F 2513 골재에 포함된 경량편 시험 방법
- KS F 2514 모르타르의 압축 강도에 의한 잔골재 시험 방법
- KS F 2515 골재의 염화물 함유량 시험 방법
- KS F 2516 긁기 경도에 의한 굵은골재의 연석량 시험 방법
- KS F 2526 콘크리트용 골재
- KS F 2527 콘크리트용 부순 골재
- KS F 2543 콘크리트용 동 슬래그 골재
- KS F 2544 콘크리트용 고로 슬래그 골재
- KS F 2545 골재의 알카리 잠재 반은 시험 방법(화학적 방법)
- KS F 2546 시멘트와 골재의 배합에 따른 알카리 잠재 반응 시험 방법(모르타르봉 시험 방법)
- KS F 2550 골재의 함수율 및 표면 수율 시험 방법
- KS F 2560 콘크리트용 화학 혼화제
- KS F 2561 철근 콘크리트용 방청제
- KS F 2562 콘크리트용 팽창재
- KS F 2563 콘크리트용 고로 슬래그 미분말
- KS F 2573 콘크리트용 순환 골재
- KS F 2583 콘크리트용 연슬래그 골재
- KS F 2713 콘크리트 및 콘크리트 재료의 염화물분석 시험 방법
- KS F 2714 모르타르 및 콘크리트의 산가용성 염화물 시험 방법
- KS F 2715 모르타르 및 콘크리트의 수용성 염화물 시험 방법
- KS F 2790 콘크리트용 페로니켈 슬래그 잔골재
- KS F 2825 골재의 알카리 실리카 반응성 신속 시험 방법(콘크리트 생산 공정 관리용)
- KS F 4009 레디믹스트 콘크리트
- KS F 4571 콘크리트용 전기로 산화슬래그 골재
- KS F 8008 가경식 믹서
- KS F 8009 강제 혼합 믹서
- KS F 5201 포틀랜드 시멘트
- KS F 5210 고로 슬래그 시멘트
- KS F 5411 플라이애쉬 시멘트
- KS F 5401 포틀랜드 포졸란 시멘트
- KS L 5405 플라이 애쉬
- KCI-AD101 콘크리트용 유동화제 품질규준

5.3 제출물

5.3.1 제품 자료

- 열메타 PC패널 제작 지침서

- 배합설계표 및 투입순서 등의 기술 자료
- 열메타 PC패널 시장관련 경제성조사 자료
- 압축강도 공인시험성적서
- 열전도율 공인시험성적서

5.3.2 품질보증

- 제조업체는 열메타 PC패널 제작(안)의 요건을 만족시키고 KS 또는 동등 이상의 규정에 따라 제조할 수 있는 자로서 건설재료시험기사 자격을 가진 기술자 혹은 이와 동등 이상의 지식 경험이 있는 품질관리 기술자가 상주하여야 하며, 감독자가 승인한 업체이어야 함.
- 제조업체 또는 현장의 품질관리 기술자는 각 열메타 PC패널마다 배합 설계표 및 양생상태를 사진촬영하여 해당 패널의 현장 도착 시에 감독자에게 제출하여야 함.
- 수급인은 필요시 구조체에 대하여 공장생산과정 등의 품질확인을 하여야 하며 현장반입 전에 품질확인 내용을 감독자에게 보고 하여야 함.

5.4 제조

5.4.1 재료

①콘크리트

가) 시멘트

- 포틀랜드시멘트는 KS L 5201, 고로슬래그시멘트는 KS L5210, 플라이애쉬시멘트는 KS L 5211, 포틀랜드포졸란시멘트는 KS L 5401에 적합하여야 함.
- 이외의 시멘트에 대해서는 그 품질을 확인하고 그 사용방법을 충분히 검토하여야 함.
- 조강형 시멘트 등 공장제품에 맞춰서 제작된 특수한 시멘트는 KS에 규정된 시멘트와 달리 독특한 품질을 가지고 있으므로, 충분한 시험을 실시한 후에 사용하지 않으면 안 됨. 또한, 알루미나시멘트와 포틀랜드시멘트를 혼합하면 급결성이 되는 것과 같이 2종 이상의 시멘트를 혼합하는 것은 경우에 따라서는 예측할 수 없는 결과를 초래하므로 열메타 PC패널의 품질에 나쁜 영향이 없다는 것을 확인한 후 혼합 사용해야 함.

나) 혼화재료

- 혼화재료는 물, 시멘트, 골재 이외의 물질로서 열메타 PC패널의 품질에 악영향을 끼치지 않는 범위 내에서 강도증진, 제품의 표면 및 기타 품질을 좋게 하기 위한 재료를 선정하여야 함.
- 열메타 PC패널에 사용하는 혼화재료는 구조체의 특유한 배합, 다짐, 촉진양생 등에 적합한 사용 방법, 제품의 품질에 대한 영향, 사용 효과 등을 충분히 확인한 다음 적절히 사용하여야 함.
- 분말 상의 혼화재료는 방수, 방풍에 의한 경화를 방지 할 수 있는 용기에 넣어 보관하며, 각 포장마다 종류, 제조자명, 중량, 생산일자 등이 명기되어 있는 제품을 사용함.

다) 물

- 물은 기름, 산, 유기불순물, 혼탁물 등 콘크리트나 강재의 품질에 나쁜 영향을 주는 물질의 유해량을 함유해서는 안 됨.

- 혼합수는 KS F 4009 부속서2의 기준에 적합한 것을 표준으로 함.
- KS F 4009 부속서2 “레디믹스트콘크리트의 혼합에 사용되는 물”에 대한 규정으로 혼합수는 상수돗물, 상수돗물 이외의 물 및 회수수로 구분됨.

② 거푸집 조립

- 거푸집은 견고한 구조로서 형상 및 치수가 정확하며, 조립 및 해체가 용이한 구조여야 함.
- 거푸집 내면 및 이음부에 열메타 PC패널에 심각한 영향을 줄 수 있는 이물질 등은 모두 제거하여야 함.
- 분무기를 사용하여 거푸집 내면에 탈형유를 균일하게 도포하여 타설된 콘크리트가 양생 후 거푸집 내면에 부착되는 것을 방지하여야 하며, 너무 많은 양을 도포하여 탈형유가 바닥에 흐르지 않도록 하여야 함.
- 매입물 삽입 후 볼트 등으로 항시 정확하게 조립하여 틈새가 없어야 하며, 조립 전후, 매회 치수를 체크하여 이상이 없어야 함.

③ 콘크리트 배합 설계

- 열메타 PC패널 제작에서 사용하는 콘크리트의 배합은 성형 및 양생방법을 고려하여 구조체가 소요의 강도, 내구성, 수밀성 등을 갖도록 정해야 함.
- 굳지 않은 콘크리트의 반죽질기는 열메타 PC패널의 형상, 치수, 성형방법 등을 고려하여 정해야 함.
- 슬럼프가 20mm 이상인 콘크리트에 대하여는 슬럼프시험을 원칙으로 하며, 슬럼프 20mm 미만인 콘크리트에 대하여는 제조방법에 적합한 시험방법에 의함.

5.5 콘크리트 혼합

5.5.1 콘크리트 계량

- 시멘트, 혼화재료, 골재, 물은 정확하게 계량하여 믹서에 투입시킴.
- 각 재료의 계량방법 및 계량설비는 콘크리트 제조 조건에 적합하고, 각 재료를 소정의 계량오차 내에서 계량할 수 있어야 함.
- 각 재료의 계량설비는 사용 개시 전 및 사용 중에 정기적으로 점검, 조정해야 함.
- 골재의 표면수량시험은 KS F 2509에 따르며 골재가 건조되어 있을 때, 유효흡수율의 값은 골재를 적절한 시간 흡수시켜서 구함.
- 재료는 시방배합을 현장배합으로 고친 다음 현장 배합에 의해 계량함.
- 계량오차는 1회 계량분에 대하여 표 5.1의 값 이하여야 함.

5.5.2 콘크리트 비비기

- 콘크리트는 믹서기에서 정확하게 비빈 후 사용함.
- 비비기 시간은 시험에 의하여 정하되 비비기 시간은 믹서 안에 재료를 투입한 후 가경식 믹서일 경우에는 1분 30초 이상, 강제 혼합식 믹서일 경우에는 1분 이상을 표준으로 함.

표 5.1 콘크리트용 재료의 계량허용오차

재료	물	시멘트	혼화재	화학혼화제
허용오차(%)	1	1	2	3

- 재료를 믹서에 투입하는 순서는 믹서의 형식, 비비기 시간, 골재의 종류 및 입도, 단위수량, 단위시멘트량, 혼화재료의 종류 등에 따라 다르므로, KS F 2455에 의한 시험, 강도시험, 블리딩시험 등의 결과 또는 실적을 참조해서 정함.
- 비비기는 미리 정해 둔 비비기 시간의 3배 이상 계속해서는 안 됨.
- 비비기를 시작하기 전에 미리 믹서 내부를 모르타르로 부착시켜야 함.
- 믹서 안에 콘크리트를 다 꺼낸 후에 다음 재료를 넣음.
- 믹서는 사용 전후 충분히 청소해야 함.
- 비벼놓아 굳기 시작한 콘크리트는 되비벼서 사용하지 않는 것을 원칙으로 함.

5.5.3 성형

- 성형은 콘크리트를 거푸집에 채워 넣은 후 소요 품질의 공장제품이 얻어지도록 적절한 기계 다지기에 의해 실시하여야 함.
- 콘크리트 타설 작업을 할 때에는 철근 및 매설물의 배치나 거푸집이 변형 및 손상되지 않도록 주의해야 함.
- 콘크리트는 그 표면이 한 구획 내에서는 거의 수평이 되도록 치는 것을 원칙으로 함. 기계 다지기 후 공장제품의 표면은 평평하게 마무리하여야 함.
- 버키드, 호퍼 등을 이용하여 콘크리트를 타설할 경우, 배출구로부터 치기 면까지의 높이는 1.5m 이하를 원칙으로 함.
- 콘크리트 타설 시 타설 높이는 다짐능력을 고려하여 결정해야 하고, 봉다짐기 또는 거푸집 진동기를 사용하여 콘크리트의 수밀성을 좋게 해야 함. 콘크리트의 타설 직후 충분히 다져서 콘크리트가 철근 및 매설물 등의 주위와 거푸집의 구석구석까지 잘 채워서 밀실한 콘크리트가 되도록 해야 함.
- 봉다짐기를 사용할 때에는 봉을 아래층의 콘크리트 속에 10cm 정도 찔러 넣어야 함. 내부진동기의 찔러 넣는 간격 및 한 장소에서의 진동시간 등은 콘크리트를 충분히 잘 다질 수 있도록 정해야 함. 또한 진동기는 콘크리트로부터 천천히 빼내어 구멍이 남지 않도록 함.
- 재진동을 할 경우에는 콘크리트에 나쁜 영향이 생기지 않도록 초결이 일어나기 전에 실시해야 함.

5.5.4 양생

- 공장제품의 양생방법 및 그 기간은 공장제품의 제조방법, 다루기방법 등을 고려하여 소요의 품질이 얻어지도록 정해야 함.
- 촉진양생을 하는 경우에는 콘크리트에 균열, 박리, 변형 등을 일으키거나, 장기강도, 내구성 등에 해로운 영향을 주어서는 안 됨.

5.5.5 증기양생

- 콘크리트 타설 후 증기양생 장소에 거푸집을 고정시키고 거푸집 주위의 콘크리트 잔여물을 깨끗이 정리한 후 양생 덮개를 씌워서 증기양생을 실시함(표 5.2).
- 사용수는 수입검사에 합격된 사용수로 발생한 증기를 사용하여야 함.
- 증기양생 원칙 : 최고온도 65℃ 이하로 5~6시간 증기를 투입하여 양생시킴.

표 5.2 증기양생작업 방법

작업순서	작 업 방 법	비고
1	증기양생설비의 점검 및 청소	
2	증기 배관 밸브의 이상 유무 확인	
3	보일러 가동 유무 및 증기압 확인	
4	온도계 작동상태 확인	
5	성형이 끝난 제품은 대기에서 2~5시간의 전양생 실시	전양생 시간은 배합 등에 따라 상이
6	양생 덮개를 거푸집 바닥까지 완전히 감싼 후 균등하게 온도 상승	
7	매시간 상승 및 하강 온도는 20℃ 이하이며, 최고 온도는 65℃	전체 양생 시간은 8시간 이상

5.5.6 오토클레이브양생

- 더 경화하기 위한 고온고압용 양생을 위해 1차 증기 양생이 끝난 열메타 PC패널를 준비함(표 5.3).
- 오토클레이브 양생기내에 1차 증기 양생이 끝난 열메타 PC패널배합을 배치함.
- 고온고압용 증기보일러를 준비한 후 2차 양생을 진행시킴.
- 전양생 3.5시간, 승온 및 등온 5시간, 하강 5시간으로 일반 증기양생과 동일한 조건으로 진행하여도 상관없음.
- 열손실을 최대한 줄이기 위하여 오토클레이브 양생기 입구를 닫아 줌.

5.5.7 탈형

- 탈형은 콘크리트가 경화하여 공장제품의 다루기에 지장이 없는 강도에 도달한 후에 실시하여야 함.
- 탈형 시 수평 균형을 유지하면서 충격을 피하여 조심스럽게 탈형하며, 탈형 전후 거푸집의 손상 및 변형이 생기지 않도록 주의함.
- 탈형 시 콘크리트와 거푸집 간 원활한 분리를 위해 거푸집 표면에 탈형유를 도포함. 탈형유는 공장제품에 유해한 영향을 끼쳐서는 안 되며, 거푸집 내면에 부식을 일으켜서도 안 됨.
- 동절기 탈형 시 콘크리트와 외기 온도의 차가 크므로 수축을 고려하여 급격히 냉기에 접하지 않도록 함.

5.5.8 다루기 및 저장

- 공장제품을 다룰 때에는 안전에 유의하고, 진동이나 충격 등의 공장제품에 해로운 영향을 주지 않도록 하여야 함.
- 공장제품을 적치장에 저장할 경우에는 자중이나 적재에 의한 이상 응력이나 소성변형이 발생하지 않도록 하여야 함.

표 5.3 오토클레이브 양생작업 방법

작업순서	작 업 방 법	비고
1	오토클레이브설비의 점검 및 청소	
2	오토클레이브양생장비의 이상 유무 확인	
3	오토클레이브장치 가동 유무 확인	
4	성형이 끝난 제품은 대기에서 2~5시간의 전양생 실시	증기양생과 동일
5	입구를 덮어서 열손실을 최대한 막이준다	
6	증기양생과 동일한 조건으로 승온 유지 하강의 온도를 맞춰줌	

5.6 제품 검사 및 품질 관리

5.6.1 검사

- 콘크리트 충전 상태, 미장마감상태 등 제품의 표면 상태를 조사함.
- 접합철물 등의 매입상태(중심지점)을 조사함(표 5.4).
- 겉모양 : 제품 양생 후 적재장 이송 전 생산 전량을 검사로트로 함.
- 치수 : 1일 생산량을 대표할 수 있도록 랜덤 샘플링 함.
- 압축강도 : 동일 혼압량을 대표할 수 있도록 시료 채취는 콘크리트 투입공정에서 함.

5.6.2 표시

- 열메타 PC패널 제품박스에는 제조사명과 그 약호, 제조년월일 규격을 명기하여야 함.
- 표시단위는 매 제품마다 표시함.
- 표시내용, 크기 및 방법은 도면에 따름.

5.6.3 품질관리

- 콘크리트의 배합은 소요의 강도, 내구성 및 작업에 알맞은 워커빌리티를 가지는 범위 내에서 단위수량을 될 수 있는 데로 적게 되도록 해야 함.
- 제품은 매 타설시 필요시에 따라 슬럼프 테스트 KS F 2402를 진행하고 공시체를 제작하여 제품과 같은 조건으로 양생한 후 탈형, 각 3개의 공시체로서 KS F 2405 규정에 의하여 강도 시험하여 그 결과를 비치하여야 함.

5.6.4 출하(운송)

- 부재의 운반, 및 야적은 제작자, 운반책임자, 현장 조립자 및 시공자가 전반적인 부재 운반계획을 작성하여 부재와 재료의 공급에 차질이 생기는 일이 없도록 조절함.
- 제조년월일로 부터 출하일까지의 부재의 재령에 부재의 콘크리트 압축강도가 출하일 소요강도 이상이 되는지를 확인함.
- 출하되는 부재에 대하여 균열, 파손, 변형 등이 없는지 육안으로 확인하여 공장출하검사를 실시함.
- 출하담당자는 제품 상차 시에 운송 중 차량사고 또는 제품이 파손될 경우를 대비하여 받침목을 적정한 위치에 고였는지 완전하게 되어 있는지 여부를 확인한 후 출발시킴.
- 운반 시에는 균열이나 파손 등이 생기지 않도록 받침목은 상하 동일 선상에 배치하여, 부재에 수직하중 외의 휨 응력이나 전단응력이 생기지 않도록 유의 하고 운반 중의 사고방지를 위한 최대한의 조치를 함.

5.6.5 기타

- 모든 작업원은 항시 안전에 유의하며 작업표준상의 모순점이나, 개선점을 착안하여 작업을 수행하여야 함.
- 각 작업자는 인명 및 설비기계에 대한 사고 발생 시 신속하게 응급처치를 하고 관리자에게 신속하게 보고하고 그 결과를 보고 받아 이행함.
- 모든 일에 앞서 안전을 최우선으로 하고 최고의 제품을 제작하기 위해 최선을 다하여 작업을 수행하여야 함.

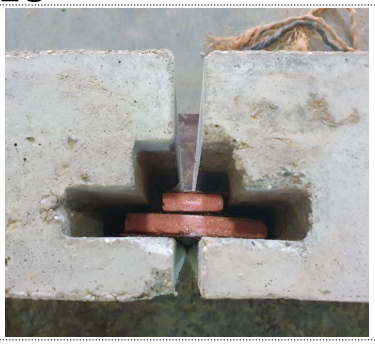
표 5.4 제품 검사

순서	검사항목	검사방식	비고
1	겉 모 양	전수검사	-
2	치 수	표본 체크	-
3	압축강도		-

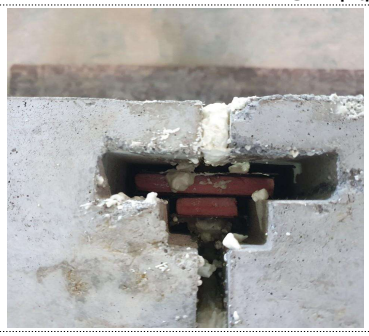
5.7 제작예시(시작품)

- 제작예시(시작품) 및 판넬 간의 접합상세를 그림 5.1에 나타내었음.

① 벽체 개별 제작 및 탈형



② 벽체 기립 및 열메타 패널 배치



③ 연결부 우레탄폼 처리

④ 연결부 무수축 몰탈시공

⑤ 우레탄폼 제거 후 연결부 마감작업

⑥ 열메타 PC패널 시작품 제작완료

그림 5.1 제작예시(시작품) 및 PC 판넬 간의 접합상세

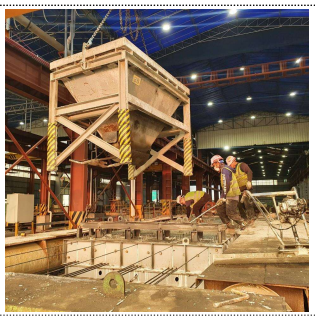
5.8 생산라인검토

- 아이에스동서(주) 이천공장에서는 총 3개의 공장동이 있으며 각 공장동마다 생산하는 제품의 종류 정해져 있음.
- 제 1공장동은 토목 PC제품으로 PC세그먼트, PC침목, PC바이블록 등을 생산하고 있음.
- 제 2공장동은 건축 PC제품으로 PC거더, PC기둥, PC벽체 등을 생산하고 있음.
- 제 3공장동은 건축 PC제품으로 PC슬라브 전용생산하고 있음.
- 따라서, 본 과제를 통하여 아이에스동서에서는 본 기술개발제품을 제 2공장동 6Bay라인으로 설정하고 그곳에서 생산 및 양생을 통해 제2공장동 좌측 부지에 적재하는 생산계획을 수립했으며 이를 향하 단열 내벽시장용 제품을 생산코자 함.
- 추후, 아이에스동서(주)에서는 본 기술의 판매실적에 따라 청양공장, 창녕공장 등으로 확대 적용하여 생산하는 계획도 가지고 있음.
- 생산 공정 및 생산 공정도면은 각각 그림 5.2 및 그림 5.3과 같음.

① 몰드배치

② 철근망 제작

③ 배쳐플랜트 배합



④ 철근망 투입후 타설

⑤ 타설면 정리

⑥ 1차 양생

⑦ 2차 양생을 위한 운반

⑧ 스팀증기양생

⑨ 자체 성능평가 실시

⑩ 출하전 면처리작업

그림 5.2 생산 공정

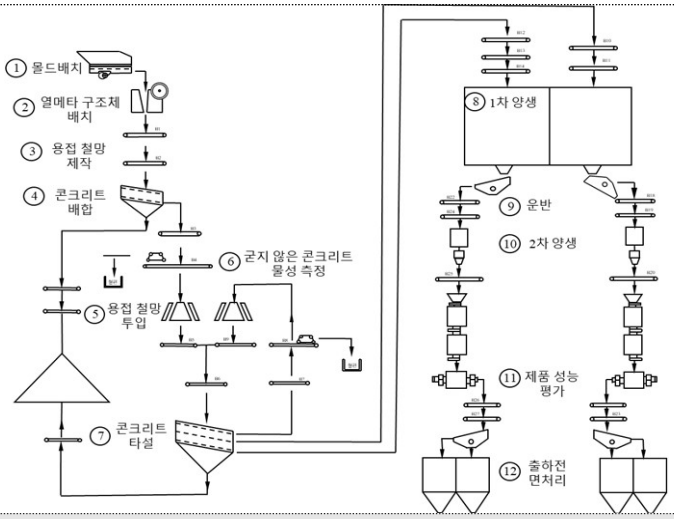


그림 5.3 생산 공정 도면

5.9 시공성 및 경제성 평가

- 시공성 및 경제성 평가는 크기 1,000 × 3,000 mm^2을 기준으로 기존 기술(열관류율: 0.27 $W/m^2 \cdot K$)과 개발 기술(열관류율: 0.15 $W/m^2 \cdot K$)을 비교 평가하였음(표 5.5 ~ 5.12).

표 5.5 열메타 기반 PC 판넬과 기존 기술의 시공성 평가(○:3점, △:2점, ×:1점)

구분	기존 기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	개발 기술 (열메타 기반 PC 판넬)
현장작업	×	○
	벽체타설 및 양생, 스티로폼 설치, 고정철물, 고정와이어 및 치장벽돌 시공등으로 공정이 매우 복잡함.	열메타 기반 PC 판넬은 공장에서 제작되며 현장에서는 건식공법을 통한 조립으로 인한 현장공정의 최소화할 수 있음.
양생시간	×	△
	습식공법으로서 벽체 및 치장벽돌 공정에서 양생이 필요함.	조립은 대부분 건식공법으로 이루어지며, 판넬간의 수평접합에서 충진 모르타르가 일부 사용됨.
작업의 난이도	×	○
	다양한 공정으로 공정간의 선후관계의 형성으로 작업의 난이도가 높음.	현장 조립은 유닛화된 연결철물들의 사용으로 작업의 난이도가 다소 낮은 편임.
합계	3	8

표 5.6 열메타 기반 PC 판넬과 기존 기술의 시공 편의성 비교

점검항목	기존 기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	개발 기술 (열메타 기반 PC 판넬)
외장재와 건축물과의 연결상세	• 한층의 치장벽돌의 품질 및 수평이 숙련공에 의해 현저한 영향을 받음. • 외장재와 건축물과의 연결은 고정철물, 삼각철물 및 와이어의 설치가 대략 500 ~ 600 mm 간격으로 이루어지므로 공정이 다소 복잡함.	• 유닛화된 열메타 기반 PC 판넬과 연결철물을 이용한 건식조립으로 시공이 간편함. • 한 유닛의 크기는 1,200 × 3,000 mm로서 빠른 시간내에 한층의 외벽의 시공이 가능함.
	시공의 난이도 : 중(다소 어려움)	시공의 난이도 : 하(쉬움)
단열재의 삽입방법	• 치장벽돌의 시공에서 사용된 고정철물, 삼각철물 및 와이어의 등으로 단열재 설치시 간섭이 많아 꼼꼼한 배치가 어려움.	• 단열재는 PC 판넬내에 삽입되어 있으므로 별도의 설치가 필요 없음. • 단열재가 삽입된 PC 판넬의 공장제작으로 기존기술 대비 공정시간의 약 1/2 수준임.

표 5.7 기존 기술(벽체+스티로폼+치장벽돌)의 전형적인 공사기간

보강공정	1,000×3,000 mm^2 단위면적의 공정(일)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
철근배근	■							
거푸집 설치	■							
콘크리트 타설	■							
콘크리트 양생	■	■	■					
고정철물 설치				■				
치장벽돌 쌓기				■				
삼각철물 및 와이어 설치				■				
치장벽돌 쌓기				■				
삼각철물 및 와이어 설치				■				
단열재 삽입					■			
양생					■	■	■	■

표 5.8 열메타 기반 PC 판넬의 전형적인 공사기간

보강공정	1,000×3,000 mm^2(1개소 단위공정 (일))							
	1	2	3	4	5	6	7	8
기초 강재판 설치	■							
열메타 PC 판넬 세우기 및 고정	■							
열메타 PC 판넬의 수평접합	■							
수평접합부 몰탈시공	■	■						
열메타 PC 판넬의 수직접합			■					
수직접합부의 볼트접합			■					

표 5.9 열메타 기반 PC 판넬과 기존 기술의 시공 절차

기존 기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	개발 기술 (열메타 기반 PC 판넬)	표준품셈 기준 항목	비고
수직 및 수평철근의 가공	용접철망 가공 및 열메타 구조체 제작	건축 현장 및 공장가공 및 조립	PC 판넬의 공장제작화 : 외장재 설치의 현장공정의 최소화로 시공시간 감소
거푸집 제작 및 조립	거푸집 제작 및 조립	건축 목재거푸집	
콘크리트 타설	단열 콘크리트 타설	건축 콘크리트 펌프차 타설	
치장쌓기 및 줄눈설치	-	건축 조적공사	
-	PC 패널 설치	건축 철근콘크리트 공사	

표 5.10 1,000×3,000 mm^2의 단위영역에서 재료비의 비교

구분	기존 기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	개발 기술 (열메타 기반 PC 판넬)
이형철근량(kg)	20.8	-
용접철망+이형철근량(kg)	-	27.6
거푸집량(m^2)	6	6.5
콘크리트량(m^3)	0.6	0.3
단열재(m^2)	3	2.5
원가(원)	266,953	176,437

표 5.11 1,000×3,000 mm^2의 단위영역에서 총공사비의 비교

구분	기존 기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	개발 기술 (열메타 기반 PC 판넬)
재료비 (원)	266,953	176,437
노무비 (원)	651,439	585,945
경비 (원)	4,463	45,775
합계 (원)	922,856	808,156
절감률 (%)	12.4%	

표 5.12 경제성 평가를 위한 시공절차별 품

시공절차 세부항목[1]	소요 인력, 장비, 자재		단위	소요량	출처[2]
	품명	규격			
① 철근 현장가공, 보통, TON	이형철근	13 mm	kg	20.8	• 건축 6-2-2 철근공장가공 • 2020년 10월 물가지 가격 • 2020년 하반기 시중노임
	철근공		인	0.23	
	보통인부		인	0.03	
	공장관리비		%	인력품의 60	
	기계손료		%	인력품의 2	
① 철근 가공, 단순, TON	용접철망	6 mm	kg	18.41	• 건축 6-2-2 철근공장가공 • 2020년 10월 물가지 가격 • 2020년 하반기 시중노임
	철근공		인	0.18	
	보통인부		인	0.03	
	공장관리비		%	인력품의 60	
	기계손료		%	인력품의 2	
② 철근조립, 보통, TON	결속선	20*0.9	kg	6.5	• 건축 6-2-1 철근현장조립 • 2020년 10월 물가지 가격 • 2020년 하반기 시중노임
	철근공		인	1.84	
	보통인부		인	0.75	
③ 거푸집 제작 및 조립, M^2	판재	24*300*3600	m^3	0.0140	• 건축, 6-3-1 합판 거푸집 (3회 사용시) • 2020년 10월 물가지 가격 • 2020년 하반기 시중노임
	각재	30*30*3600	m^3	0.0177	
	철선	20*0.9*200.4	kg	0.1351	
	못	N75	kg	0.1165	
	박리제		ℓ	0.0885	
	형틀목공		인	0.1754	
	보통인부		인	0.1393	
④ 콘크리트타설, M^3	레미콘	25mm, 24*15	m^3	별산	• 건축, 6-1-4 콘크리트펌프차 타설 • 2020 하반기 시중노임 • 시간당작업효율 : 31.9
	콘크리트공		인	0.049	
	보통인부		인	0.024	
	펌프카	32M	hr	0.0313	
	다짐기	45D	hr	0.0313	
⑤ 치장쌓기 및 줄눈설치	점토벽돌	190*90*57	매	77.25	• 건축, 조적공사(치장쌓기 및 줄눈 설치) • 2020 하반기 시중노임
	모르타르(1:3)	쌓기	m^3	0.019	
	모르타르(1:1)	치장줄눈	m^3	0.003	
	공구손료 및 경장비		%	인건품의 2	
	조적공		인	0.16	
	보통인부		인	0.06	
	줄눈공		인	0.05	
⑥ 프리캐스트 콘크리트 패널 설치	크레인	80톤		0.114	• 건축, 철근콘크리트 공사(프리캐스트 콘크리트 패널 설치) • 2020 하반기 시중노임
	지게차	5톤		0.114	
	발전기	50kW		0.114	
	보통인부		인	0.067	
	특별인부		인	0.014	
	비계공		인	0.029	

6. 결론

"특허맵 및 경제성 분석을 통한 생산 시스템 기반 구축" 에서는 다음과 같은 성과를 도출하였음.

① 설계기준인 KBC 2016을 고려한 실무용 PC 판넬의 내풍 설계 모델 제시

- 외장 설계용 풍하중

$$W_C = p_C A_C \tag{6.1}$$

여기서, W_C는 지상 높이 z에서의 외장설계용 풍하중을, A_C는 외장재 등의 유효수압면적을, p_C는 외장재설계용 설계풍압을(단, 500 N/m^{2}보다 작아서는 안 됨) 의미하는데 다음과 같이 제시될 수 있었음.

$$p_C = k_z q_H (GC_{pe} - GC_{pi}) \tag{6.2}$$

여기서, p_C는 건축물의 외장재 설계용 설계풍압을, k_z는 높이방향 압력분포계수를, GC_{pe}는 외장재설계용 피크외압계수를, GC_{pi}는 외장재설계용 피크내압계수를, q_H는 기준 높이가 20 mm 이상일 때 기준높이 H에 대한 설계속도압을 의미하며, 기준 높이가 20 mm 미만일 때 q_H는 건축물의 지역에 따른 기본풍속, 풍속고도분포계수, 지형계수 및 중요도계수에 따라 결정됨.

② 내진 및 풍하중을 고려한 접합부 연결상세 제시.

- 설계기준을 고려하여 PC 판넬 간의 접합 상세를 제시하였음. PC 판넬 간의 접합 상세는 그림 6.1과 같음.

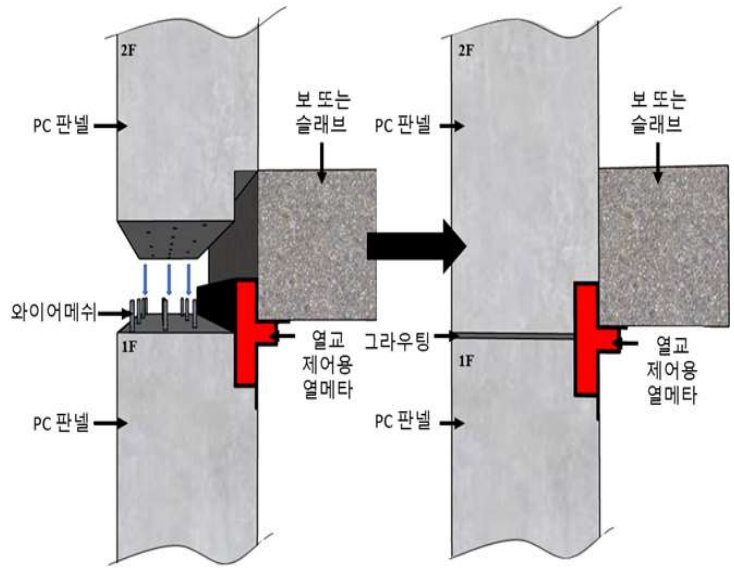


그림 6.1 PC 판넬 간의 접합부 연결상세

③ 시공성 및 경제성평가

- 시공성 및 경제성 평가는 크기 1,000 × 3,000 mm^2을 기준으로 기존 기술과 비교 평가하였음(표 6.1 및 6.2).

표 6.1 열메타 기반 PC 판넬과 기존 기술의 시공성 평가(○:3점, △:2점, ×:1점)

구분	기존기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	열메타 기반 PC 판넬
현장작업	×	○
	벽체타설 및 양생, 스티로폼 설치, 고정철물, 고정와이어 및 치장벽돌 시공등으로 공정이 매우 복잡함.	열메타 기반 PC 판넬은 공장에서 제작되며 현장에서는 건식공법을 통한 조립으로 인한 현장공정의 최소화할 수 있음.
양생시간	×	△
	습식공법으로서 벽체 및 치장벽돌 공정에서 양생이 필요함.	조립은 대부분 건식공법으로 이루어지며, 판넬간의 수평접합에서 충진 모르타르가 일부 사용됨.
작업의 난이도	×	○
	다양한 공정으로 공정간의 선후관계의 형성으로 작업의 난이도가 높음.	현장 조립은 유닛화된 연결철물들의 사용으로 작업의 난이도가 다소 낮은 편임.
합계	3	8

표 6.2 열메타 기반 PC 판넬과 기존 기술의 총공사비 비교

구분	기존기술 (벽체+스티로폼+치장벽돌)	열메타 기반 PC 판넬
재료비 (원)	266,953	176,437
노무비 (원)	651,439	585,945
경비 (원)	4,463	45,775
합계 (원)	922,856	808,156
절감률 (%)	12.4%	

④ 실무용 배합설계 프로그램 제작

- 연구 결과에 따라 콘크리트 배합설계 프로그램과 판넬 설계를 위한 액셀 프로그램을 제작하였음(그림 6.2 및 그림 6.3).

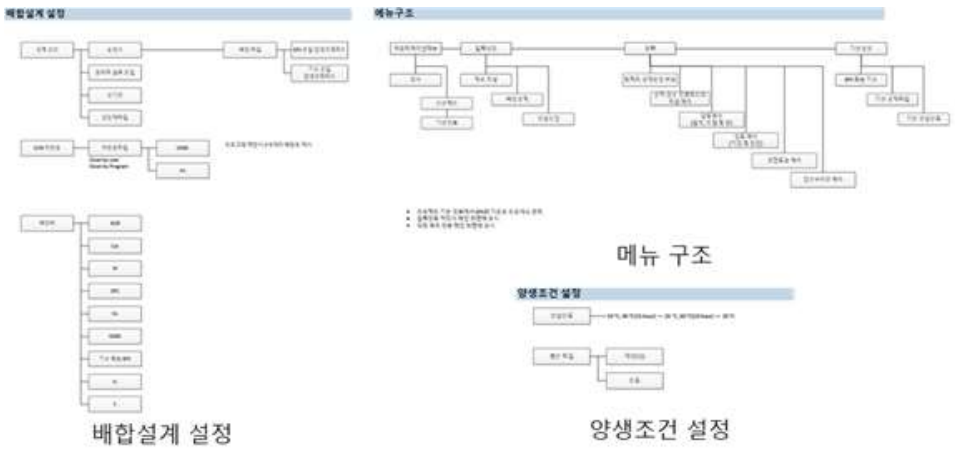
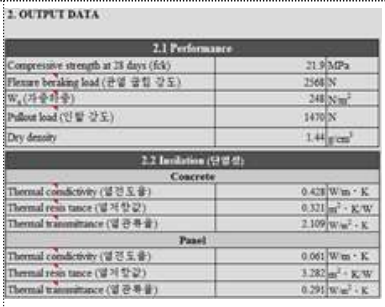
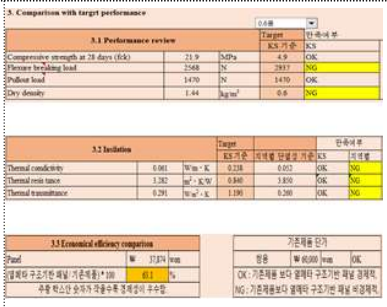


그림 6.2 단열 콘크리트 배합설계 프로그램

(a) 입력데이터



(b) 출력데이터



(c) 기준 비교 및 경제성 검토

그림 6.3 판넬 엑셀 프로그램

⑤ 제작예시(시작품)

- 제작예시(시작품) 및 판넬 간의 수직 접합상세는 그림 6.4에 나타내었음.

① 벽체 개별 제작 및 탈형

② 벽체 기립

④ 연결부 우레탄폼 처리

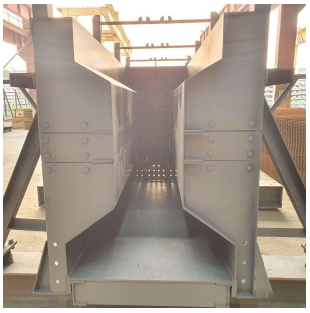
⑤ 연결부 마감작업

⑥ 열메타 PC 패널 시작품

그림 6.4 제작예시(시작품)

⑥ 생산 공정 제시

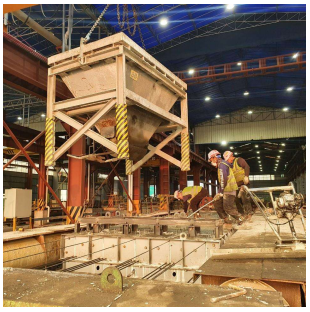
- 판넬 제작을 위한 생산 공정은 그림 6.5에 공정도면은 그림 6.6에 나타내었음.



① 몰드배치

② 철근망 제작

③ 배쳐플랜트 배합



④ 철근망 투입후 타설

⑤ 타설면 정리

⑥ 1차 양생

⑦ 2차 양생을 위한 운반

⑧ 스팀증기양생

⑨ 자체 성능평가 실시

그림 6.5 생산 공정

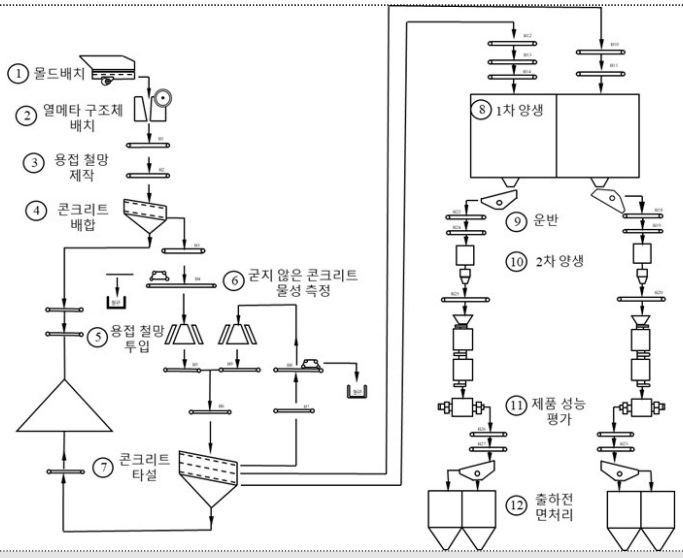


그림 6.6 생산 공정 도면

1. 열메타 기반 콘크리트 PC 판넬의 설계 가이드라인

1.1 일반사항

- 프리캐스트 콘크리트 (precast concrete, PC) 판넬과 관련된 설계기준, 전문시방서 및 시험규격 관련 표준명은 〈표 1.1〉에 나타내었음.
- 이 연구에서 개발된 열메타 기반 PC 판넬은 PC 판넬에 관련된 시방기준인 KS F 4736, KS F 2459, KS L 9016의 기준과 콘크리트 표준시방서를 따름.
- 시방기준에서 제시되지 않은 내용들에 대해서는 실험적·해석적 그리고 이론적 연구를 기반으로 특기 설계 가이드라인을 이장에서 제시하였음.
- 이 설계 가이드라인은 열메타 기반 PC판넬의 단면설계, 단열물질을 포함하는 열메타 구조체 제작, 단열 콘크리트 배합 및 타설, 그리고 열메타 기반 PC판넬의 시공에서 특별히 적용되어야 할 총칙, 재료, 품질시험기준 및 단면 설계방법 등을 포함하고 있음. 또한, 열메타 기반 PC 판넬의 열관류율 제어를 위한 시공방법도 나타내고 있음.
- 제시된 설계 가이드라인 및 시방서는 본문과 해설로 구성하였음. 해설에서는 설계지침 및 시방서 제시의 근거와 권장사항을 구체적으로 설명하였음.
- 이 설계가이드라인 및 시방서에 제시되지 않은 내용에 대해서는 기본적으로 KBC 2016의 건축구조기준과 콘크리트 표준시방서를 따름.

표 1.1 PC 판넬과 관련된 설계기준, 전문시방서 및 품질시험기준

기준 및 시방서	기준 및 표준명	관리기관
시방기준	건축공사 표준시방서	대한건축학회
시방기준	콘크리트 표준시방서	한국콘크리트학회
시방기준	주택건설 전문시방서	대한주택공사
시방기준	가설공사 표준시방서	한국가설협회
설계기준	ACI 318-19	American Concrete Institute
설계기준	ACI 213-07	American Concrete Institute
설계기준	ACI 209R-92	American Concrete Institute
설계기준	ACI 318-19	American Concrete Institute
규격	KS F 4914 경량 기포 콘크리트 패널(ALC 패널)	한국산업규격(KS)
규격	KS F 4736 압출 성형 경량콘크리트 패널	한국산업규격(KS)
규격	KS L 9016 콘크리트의 열전도율	한국산업규격(KS)
규격	KS F 2459 기포 콘크리트의 겉보기 밀도, 함수율, 흡수율 및 압축 강도 시험방법	한국산업규격(KS)
규격	KS F 5651 콘크리트의 휨 강도 시험방법	한국산업규격(KS)

제1장 설계일반

가이드라인

1.1 목적

이 설계 가이드라인은 프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC) 판넬 제작을 위해 필요한 단열 콘크리트 및 열메타 구조 그리고 판넬의 단면설계 및 시공방법에 대한 기술적 사항을 기술함으로써 개발된 지속가능 열메타 기반 PC 판넬의 안전한 적용성의 확보를 그 목적으로 한다.

1.2 적용범위

(1) 이 가이드라인은 단열 콘크리트 제조를 위한 재료선정 및 배합방법, 단열물질의 재료선정 및 구성방법, PC 판넬의 휨 및 전단 설계방법 그리고 PC 판넬의 제조공정 및 현장에서의 시공방법에 필요한 모든 사항을 제시한 것이다.

(2) 이 가이드라인에서 제시하지 않은 내용은 KBC 2016, KS F 4914, KS F 4736 및 콘크리트 표준시방서를 적용하는 것을 원칙으로 한다.

(3) 이 가이드라인에서 사용되는 용어 및 기호 중에서 별도로 정의되지 않은 것들은 콘크리트 시방서에서 제시하는 용어 및 기호의 정의를 따른다.

해 설

1.2 적용범위

(1) 이 가이드라인에서는 지속가능 열메타 기반 PC 판넬을 제작하기 위한 재료적, 설계적 그리고 시공적 측면에서 필요한 모든 사항에 대하여 제시하고 있다. 또한 이 가이드라인에서 제시하지 않는 사항은 기본적으로 콘크리트 표준시방서와 KBC 2016을 따르며, 이 시방서 및 설계코드에서도 제시되지 않은 사항에 대해서는 적용 가능한 이론, 실험결과 및 경험 등에 의해 책임구조기술자가 판단하여 설계할 수 있다.

이 가이드라인은 제시된 지속가능 열메타 기반 PC 판넬의 열전도율 실험, 휨 및 전단 성능실험과 열관류의 열전달 해석에 근거하여 제시되었으므로 사용되는 단열 콘크리트 및 단열물질의 재질과 PC 판넬의 단면상세가 변경될 경우에 적절한 실험적·해석적 검증을 수행하여야 한다.

제2장 단열 콘크리트 제조

가이드라인

2.1 일반사항

2.1.1 적용범위

단열 콘크리트 제조에 관련된 재료선정과 그리고 배합설계 및 방법은 이장의 가이드라인을 따라야 한다.

2.1.2 기 호

R_a = 기포 혼입률

E_a = 스티로폼 알갱이 혼입률

ρ_c = 콘크리트의 기건 밀도

E_c = 콘크리트의 탄성계수

f_r = 콘크리트의 재령 28일 휨강도

f_{sp} = 콘크리트의 재령 28일 쪼갬인장가도

f_{ck} = 콘크리트의 재령 28일 설계압축강도

$f_c(t)$ = 콘크리트 재령 t일에서의 압축강도

k_c = 콘크리트의 열전도율

μ = 콘크리트의 건조수축량

Δt = 콘크리트의 증분재령

T = 양생온도

T_0 = 양생온도(= -10 ℃)

ρ_0 = 콘크리트 기건 밀도(= 2,300 kg/m)

f_{co} = 콘크리트 압축강도(= 10 MPa)

M_0 = 표준양생온도 (20 ℃)에서의 성숙도

M = Saul에 의해 제시된 성숙도

2.2 재 료

2.2.1 주요 결합재

(1) 결합재는 보통포틀랜드시멘트(OPC), 고로슬래그(GGBS) 및 플라이애시(FA)를 사용한다. OPC는 KS L 5201 기준에 명시된 보통(1종) 기준에 따른다. GGBS 및 FA는 KS F 2563과 KS L 5211의 기준에 적합한 재료를 사용한다.

(2) GGBS의 주요 화학조성 성분은 CaO와 SiO_2이어야 하며, 이들의 성분들이 전체 화학조성 대비 75% 이상을 차지하여야 한다. 또한, KS F 2563 에서 제시하고 있는 1종에 적합한 GGBS를 사용하여야 한다.

해 설

2.1 일반사항

2.1.1 적용범위

이 장은 단열 콘크리트에서 열전도율을 낮추기 위해서 투입되는 재료들의 선정 및 특성, 그리고 이들을 이용한 배합설계 및 방법에 관련된 규격과 주요성능(역학적 특성 및 열전도율)에 관한 주요사항만을 규정한 것이다. 콘크리트에서 일반적으로 사용되는 재료인 보통포틀랜드시멘트(OPC)에 대한 사항은 명시하지 않았다.

2.1.2 기 호

2.2 재 료

2.2.1 주요 결합재

(2) 단열콘크리트 제조시 OPC에 일부 혼화재로 첨가되는 GGBS는 CaO와 SiO_2의 함유량에 의해서 콘크리트의 주요 역학적 특성에 중요한 영향을 미치는 요소이다.

(3) FA의 주요 화학조성 성분은 SiO_2와 Al_2O_3이어야 하며, 이들의 성분들이 전체 화학조성 대비 80% 이상을 차지하여야 한다. 또한, KS L 5211 에서 제시하고 있는 F 등급에 적합한 FA를 사용하여야 한다.

2.2.2 경량 골재

(1) 경량 골재의 물리적 특성은 다음의 항목을 만족하여야 한다.

최대치수 (mm)	밀도 (g/cm^3)	흡수율 (%)	조립률
5	1.5 ~ 1.8	10 ~ 12	2.5 ~ 3.0
13	1.2 ~ 1.5	14 ~ 16	6 ~ 7

(2) 경량 골재의 입도 분포는 KS F 2527에서 제시하고 있는 표준입도 분포곡선을 만족하여야 한다.

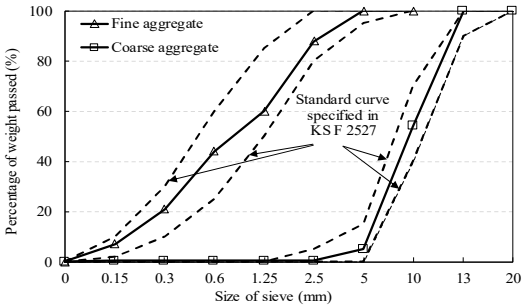
(3) 경량골재의 내부는 다수의 공극으로 이루어져야 하며, 공극률은 다음을 만족하여야 한다.

최대치수 (mm)	공극률 (%)	평균공극률 (%)
4	45 ~ 30	40 이상
13	40 ~ 30	35 이상

(3) 단열콘크리트 제조시 OPC에 일부 혼화재로 첨가되는 FA는 SiO_2와 Al_2O_3의 함유량에 의해서 콘크리트의 주요 역학적 특성에 중요한 영향을 미치는 요소이다.

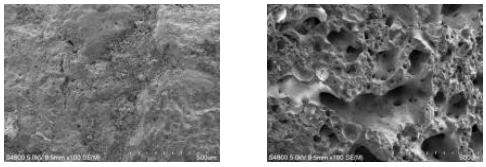
2.2.2 경량 골재

(2) 골재의 입도 분포는 굳지 않은 단열콘크리트의 유동성과 굳은 단열콘크리트의 역학적 특성에 중요한 영향을 미친다. 따라서 사용된 경량골재는 KS F 2527에서 제시하고 있는 표준 입도분포 곡선을 만족하여야 한다. 일반적으로 경량골재는 입도별로 제조되기 때문에 표준 입도분포 곡선을 만족시키기 위한 입도분포 조정이 필요하다.



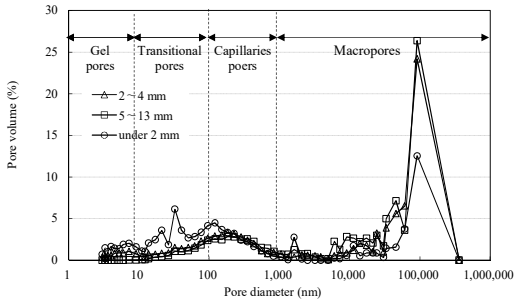
해설 그림 2.1 표준 입도분포곡선

(3) 경량골재에서 형성된 내부의 공극구조는 콘크리트의 열전도율을 감소시키는데 중요한 역할을 하므로 이에 대한 품질을 확보하기 위해 경량골재의 공극률에 대한 제한값을 규정한다. 정확한 측정을 위해서 경량골재의 내부구조와 공극률은 주사전자현미경(SEM)과 기공특성분석장치(MIP)의 장비로 측정하여야 한다(해설 그림 2.2 및 2.3).



(a) 표면(× 750) (b) 내부(× 750)

해설 그림 2.2 SEM 이미지



해설 그림 2.3 공극분포의 측정(MIP)

2.2.3 기포제

(1) 기포제는 암갈색의 동물성을 사용하여야 하며 다음의 사항을 만족하여야 한다.

밀도 (g/cm^3)	고체 함유량 (%)	pH	점도 (CPS)
1 ~ 1.1	30 ~ 40	5 ~ 8	20 ~ 50

2.2.4 스티로폼 알갱이(EPS)

(1) 스티로폼 알갱이(EPS)는 다음을 만족하여야 한다.

입경크기 (mm)	밀도 (g/cm^3)	열전도율 (W/m·K)	흡수율 (%)
2 ~ 5	0.033 이하	0.03 이하	0.3 이하

2.3 배합설계

2.3.1 목표 성능

(1) 단열콘크리트의 성능은 다음을 만족하여야 한다.

슬럼프 (mm)	기건밀도 (g/cm^3)	압축강도 (MPa)	열전도율 (W/m·K)
150 이상	1.3 ~ 1.6	10 ~ 15	0.37 이하

2.3.2 양생온도를 고려한 압축강도

(1) 단열콘크리트의 재령 28일 압축강도는 다음의 식에 의해 예측할 수 있다.

$$\frac{f_{ck}}{f_{co}} = \left[1.9\ln\left\{\left(\frac{\rho_c}{\rho_0}\right)^3\left(\frac{M}{M_0}\right)^{0.2}\left(\frac{1}{1+R_a}\right)\right\}+4.5\right] \quad (2.1)$$

여기서, ρ_0(= 2,300 kg/m^3)는 기건밀도에 대한 참고값을, f_{co}(= 10 MPa)는 압축강도에 대한 참고값을, M_0는 표준양생온도 (20 ℃)에서의 성숙도를, T 는 양생온도를, M은 Saul에 의해 제시된 성숙도를 의미하는데, 다음과 같다.

$$M = \sum_{0}^{t}(T - T_0)\Delta_t \quad (2.2)$$

여기서, T_0는 온도에 대한 참고값(= -10 ℃)을, t는 재령을, Δt는 증분재령을 의미함.

2.2.3 기포제

(1) 기포의 소포는 개개의 기포간의 이격거리가 감소하여 기포막의 병합 및 중첩되거나 기포간의 응집력이 증가하면 발생한다. 따라서 기포간의 이격거리를 멀어지게 하거나 기포간의 응집력을 감소시키는데 효과적인 기포제의 사용이 필요하다. 특히 기포의 응집력은 결합재와의 계면에서의 상호작용에 의해서 중요한 영향을 받기 때문에 사용된 결합재에 맞는 적절한 기포제의 선정이 필요하다. 2.2.1 주요결합재에서 사용하고 있는 OPC, GGBS 및 FA를 사용하는 단열콘크리트에서는 고체 함유량이 35.8%인 암갈색의 동물성 기포제의 사용을 권장한다.

2.2.4 스티로폼 알갱이(EPS)

(1) 스티로폼 알갱이(EPS)는 최대 15%까지 혼입이 가능하며 건축마감재의 가스유해성 실험(KS F 2271)의 기준을 만족할 수 있으나 콘크리트의 재활용 및 EPS의 유독가스의 배출 가능성을 고려할 때 기포의 사용을 권장한다.

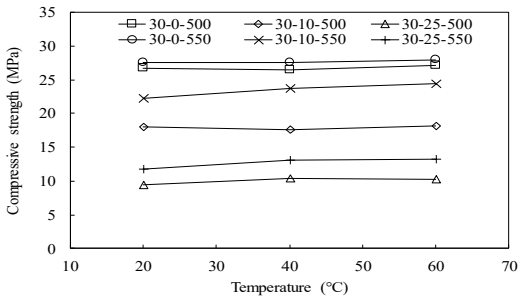
2.3 배합설계

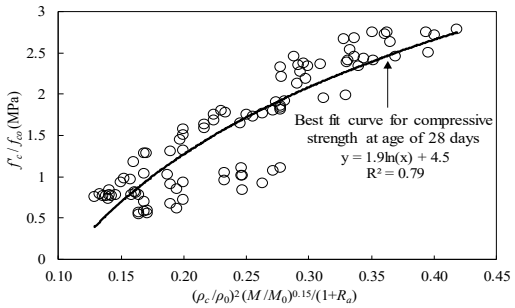
2.3.1 목표 성능

(1) 단열콘크리트의 목표성능은 굳지 않은 콘크리트에서의 유동성과 굳은 콘크리트에서의 역학적 특성을 종합적으로 고려하여야 한다. 특히 일정수준 이상의 콘크리트의 압축강도를 유지하면서 낮은 기건 밀도는 3장에서 기술된 내부에 설치될 열메타 구조와의 융합을 위한 최소한의 압축강도와 낮은 열전달을 위해서 필수적이다.

2.3.2 양생온도를 고려한 압축강도

(1) 단열콘크리트는 기포 또는 EPS에 따른 혼입량과 성숙도 개념의 양생온도(20 ~ 60℃)를 고려하여 재령 28일 압축강도를 결정할 수 있다(해설 그림 2.3). 식 (2.1)로부터 2.3.1 목표성능에서 제시된 압축강도에 적합한 기포 또는 EPS의 혼입량뿐만 아니라 양생온도 및 시간을 결정할 수 있다.





해설 그림 2.3 재령 28일 압축강도 일반화

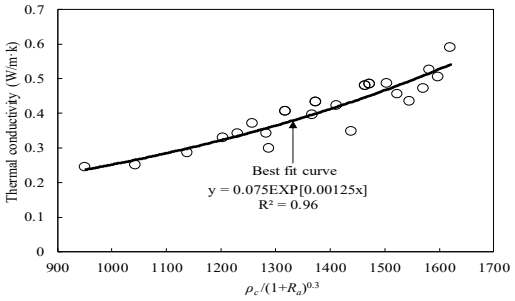
2.3.3 열전도율

(1) 단열콘크리트의 열전도율(k_c)은 다음의 식에 의해 예측할 수 있다.

$$k_c = 0.075\mathrm{EXP}\left[0.00125\left(\frac{\rho_c}{(1+R_a)^{0.3}}\right)\right] \quad (2.3)$$

2.3.3 열전도율

(1) 단열콘크리트는 기포 또는 EPS에 따른 혼입량과 단위용적중량을 고려하여 열전도율을 결정할 수 있다(해설 그림 2.4). 식 (2.3)으로부터 2.3.1 목표성능에서 제시된 열관류율에 적합한 콘크리트 단위용적중량을 결정할 수 있다.



해설 그림 2.4 열전도율의 일반화

2.3.4 배합표

(1) 2.3.1, 2.3.2 및 2.3.3에서 결정된 배합상세로부터 단열콘크리트의 배합표는 다음과 같이 제시할 수 있다.

물결합재비 (%)	기포 혼입율 (%)	단위 결합재량 (kg/m³)	결합재비 (%)		
			OPC	GGBS	FA
30	25	550	30	50	20
30	10	450			
25	25	450			

(2) 단열콘크리트의 배합표는 저탄소 콘크리트 배합설계모델을 이용할 수 있다. 이 설계절차에서 결정된 결합재양에 대해 목표 압축강도를 만족시키기 위한 물-결합재비(W/B)는 다음의 식에 의해 예측할 수 있다.

$$W/B = 1.22\left(\frac{10}{f_{ck}}\right)\left[\left(1-\left(R_G^3+R_F^2\right)\right)\right](R_a)^{-0.1} \quad (2.4)$$

2.3.4 배합표

(1) 단열콘크리트의 배합표는 재령 28일 압축강도, 기건밀도 및 열전도율을 고려하여 결정한다. 여기서 제시된 배합표를 사용하지 않을 경우에는 2.3.1에서 제시된 목표성능을 만족할 수 있는 배합표를 사용하여도 무방하다. 단, 이때에는 사용된 배합표에 의해 제조된 콘크리트의 성능(재령 28일 압축강도, 기건밀도 및 열전도율)을 반드시 제공하여야 한다.

(2) 저탄소 콘크리트 배합설계의 절차는 다음과 같다(해설 그림 2.5); 1) 입력데이터에서는 콘크리트의 밀도 및 흡수율과 목표성능을 입력한다; 2) 목표 역학적 특성을 만족하기 위한 결합재 및 결합재 치환율을 결정한다; 3) 결정된 결합재 양에 대한 목표 압축강도를 만족시키기 위한 W/B를 산정한다; 4) 잔골재율을 산정한다; 5) 이전단계에서 결정된 콘크리트 구성재료의 용적의 합이 1 m³를 만족하는지 검토하며, 미 만족시 2)번항 결합재 설계에서 결합재 치환율을 재조정한다.

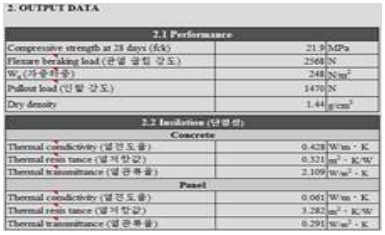
1. INPUT DATA

1.1 Mixing

1.1.1 Direct input of mixing data

Binder		kg/m³
W/B		%
S/a	47	%
Cement ratio		%
GGBS ratio		%
Fly ash ratio		%
Silica fume ratio		%
Silica sand ratio		%
Quicklime ratio		%
Cement	330	kg/m³
GGBS	225	kg/m³
Fly ash	90	kg/m³
Silica fume	0	kg/m³
Silica sand	0	kg/m³
Quicklime	0	kg/m³
Water	180	kg/m³

(a) 입력데이터



2. OUTPUT DATA

2.1 Performance		
Compressive strength at 28 days (fck)	21.9	MPa
Flexure breaking load (균열 강도)	2568	N
W_A (자중하중)	248	N/m²
Pullout load (인발 강도)	1470	N
Dry density	1.44	g/cm³
2.2 Insulation (단열성)		
Concrete		
Thermal conductivity (열전도율)	0.428	W/m · K
Thermal resistance (열저항값)	0.321	m² · K/W
Thermal transmittance (열관류율)	2.109	W/m² · K
Panel		
Thermal conductivity (열전도율)	0.061	W/m · K
Thermal resistance (열저항값)	3.282	m² · K/W
Thermal transmittance (열관류율)	0.291	W/m² · K

(b) 출력데이터

해설 그림 2.5 단열 콘크리트 배합설계

2.4 배합방법

2.4.1 재료 관리

(1) 2.2.2의 경량골재는 배합시 높은 흡수율로 인한 재료분리를 방지하기 위해서 배합전 24시간 동안 프리웨팅(pre-wetting)한 후 표면건조상태로 만들어 흡수율의 영향을 최소화하여야 한다.

(2) 기포는 2.5%의 농도로 물에 희석시킨 기포제를 0.6 MPa 압력의 압축공기로 생성한다.

2.4 배합방법

2.4.1 재료 관리

(1) 경량골재는 일반적으로 높은 흡수율로 인해서 배합시 배합수를 흡수하여 슬럼프를 저하시킨다(해설 그림 2.6). 또한 경량골재는 내부에 다공극 구조로 가벼운 중량으로 인해 배합시 부립하는 원인이 된다(해설 그림 2.7). 따라서 이러한 원인에 의한 재료분리를 방지하기 위해서 24시간동안의 프리웨팅을 원칙으로 한다.

해설 그림 2.6 높은 흡수율로 인한 슬럼프 저하

해설 그림 2.7 가벼운 중량에 의한 부립현상

(2) 공기 압축기,펌프 기포 압출기로 구성된 기포 생성기로부터 제조하여야 하며(해설 그림 2.8), 적정수준의 희석농도와 공기압이 요구된다.

2.4.2 배합순서 및 시간

(1) 기포가 첨가되는 단열콘크리트의 배합순서는 다음을 반드시 준수하여야 한다.

[기포가 첨가되는 단열콘크리트 배합순서]

(2) EPS가 첨가되는 단열콘크리트의 배합순서는 다음을 반드시 준수하여야 한다.

[EPS가 첨가되는 단열콘크리트 배합순서]

2.5 양생

(1) 단열 콘크리트의 양생은 초기에 600 ℃·hr를 원칙으로 하며, 양생온도가 40 및 60 ℃일 때에 양생시간을 각각 15시간 및 10시간으로 설정한다.

해설 그림 2.8 기포 생성기

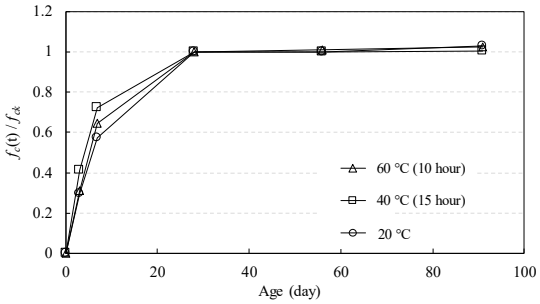
2.4.2 배합순서 및 시간

(1) 기포는 배합내에서 응집력을 유지하기 위해 결합재, 골재 및 물이 투입되어 일정수준이상의 유동성이 확보된 상태에서 마지막에 투입한다.

(2) EPS는 밀도가 매우 낮기 때문에 습비빔 이전에 반드시 투입하여야 한다. 결합재, 골재, 및 물이 투입된 이후에 투입되면, EPS의 낮을 밀도로 인한 부립되는 현상으로 재료분리의 원인이 된다.

2.5 양생

(1) 단열 콘크리트의 압축강도 발현은 양생온도 및 기간이 증가함에 따라 증가하였지만, 600 ℃·hr를 이상의 양생조건에서 압축강도 발현의 증가율이 미미하였다(해설 그림 2.9). 따라서 에너지효율측면에서 단열 콘크리트의 양생은 600 ℃·hr로 설정한다.



해설 그림 2.9 압축강도 발현

(2) 단열 콘크리트는 초기에 600 ℃·hr의 양생이후, 기건 양생한다.

2.6 성능검증

2.6.1 기포 혼입량

(1) 기포가 첨가되는 단열콘크리트의 기포혼입량은 간이 소포법을 이용하여 측정하여야 한다.

2.6.2 굳지 않은 단열콘크리트

(1) 슬럼프의 측정은 KS F 2420의 기준을 따른다.

(2) 기포가 첨가되는 단열콘크리트의 침하깊이는 KS F 4039의 기준을 따른다. 또한 밀도는 KS F 4039의 기준을 따른다.

2.6.3 굳은 콘크리트

(1) 재령 28일 압축강도 및 응력-변형률 관계는 KS F 2405의 기준을 따른다. 기건밀도는 KS F 2459의 기준을 따른다.

(2) 단열 콘크리트의 탄성계수는 2.5.3 (1)에서 측정된 응력-변형률 관계에서 ACI 318-19 기준에서 제시하고 있는 최대응력의 40% 지점의 기울기로 결정한다.

(3) 단열 콘크리트의 열전도율은 ASTM C 518에서 제시하고 있는 평판열류계 실험을 통하여 측정한다.

2.6 성능검증

2.6.1 기포 혼입량

(1) 기포 혼입량은 실기포율로 측정하며, 그 측정 방법은 다음과 같다; 1) 500 mL 메스실린더에 단열 콘크리트의 시료 200 mL를 넣는다; 2) 이에 공업용 메틸 알코올 100 mL를 넣어 슬러리중의 기포만 소포시켜 눈금을 읽어 체적을 측정한다.

2.5.2 굳지 않은 단열콘크리트

제3장 열메타 구조체 설계

가이드라인

3.1 일반사항

3.1.1 적용범위

열메타 구조체 설계를 위한 단열물질의 재료선정 및 구성방법은 이 장의 가이드라인을 따른다.

3.1.2 기 호

T = 콘크리트 측압

W = 굳지 않은 콘크리트의 단위 중량

H = 콘크리트의 타설높이

3.2 단열물질

3.2.1 열전도율

(1) 단열물질은 ASTM C 518에서 제시하고 있는 평판열류계 실험을 통하여 측정된 열전도율이 0.15 W/m·K 이하이면서, 열메타 구조체내에 채워질 수 있는 소재이어야 한다.

해 설

3.1 일반사항

3.1.1 적용범위

이 장은 단열콘크리트 내에 삽입되는 열메타 구조를 구성하기 위한 단열물질들의 선정 및 특성, 그리고 이들의 유지를 위한 구조체에 관련된 규격과 주요성능(열전달특성)에 관한 주요사항을 규정한 것이다.

3.1.2 기 호

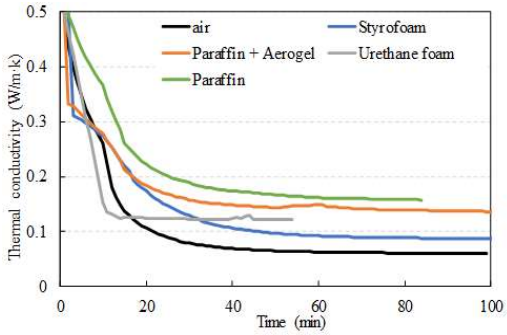
3.2 단열물질

3.2.1 열전도율

(1) PC 판넬 내에 투입되는 단열물질은 열메타 구조체내에 채워질 수 있는 소재로서, 우레탄, EPS, 에어로겔 및 파라핀을 다음과 같이 추천한다(해설 표 3.1). 아래 표에서 제시된 열전도율은 물질 자체의 열전도이며, 열메타 구조체에 삽입된 상태에서 측정된 열전도율이 0.15 W/m·K 이하이어야 한다(해설 그림 3.1). 따라서 열메타 구조체에 삽입된 상태에서 측정된 열전도율이 0.15 W/m·K 이하이면서, 열메타 구조체내에 채워질 수 있는 소재이면 PC판넬의 단열물질로서의 적용이 가능하다.

해설 표 3.1 단열물질

종류	밀도 (g/cm^3)	비열 (J/kg·K)	열전도율 (W/m·K)
우레탄	0.25	1,500	0.022
EPS	0.035	2,300	0.035
에어로겔	0.025	900	0.03
공기	0.00118	1,700	0.024



해설 그림 3.1 열메타 구조체 내에 삽입된 상태에서의 열전도율

3.3 열메타 구조체

3.3.1 재질

(1) 열메타 구조체는 내부에 투입되는 단열물질을 잘 보유하면서 단열 콘크리트에 의한 측압을 잘 견디는 구조이어야 한다. 단열물질이 액체류일 때에는 흘러나오거나 열메타 구조체에 흡수되지 않도록 기밀성 및 방수성을 보유하여야 한다. 또한, 제조시 단열 콘크리트의 측압에 의한 변형이 없도록 중간에 측압지지용이 가능한 구조이어야 한다.

(2) 열메타 구조체는 측압 및 지압에 견딜 수 있도록 3.19 kN/m^3 이상의 등분포 하중을 견딜 수 있어야 한다.

3.3 열메타 구조체

3.3.1 재질

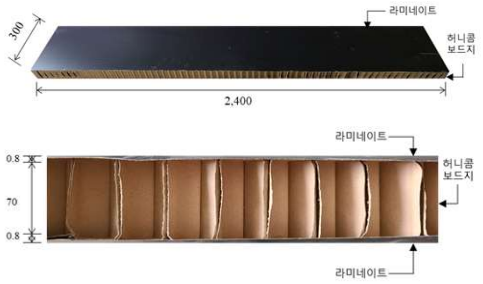
(1) 단열물질이 액체류일 때에 열메타 구조체는 기밀성 및 방수성을 유지하여야 하며, 특히 단열 콘크리트에 의한 측압을 견디는 구조를 위해서 재질을 라미네이트와 허니콤 보드지로 추천한다. 라미네이트는 고온고압에서 압축시킨 판재로서 내마모성 및 내충격성, 내화학성이 우수하다. 허니콤 보드지는 내부 구조가 육각주의 유한 연속 구조체로서 셀과 코어로 구성되어 굽힘 강도가 우수하다. 라미네이트 및 허니콤 보드지의 특성은 다음과 같다(해설 표 3.2).

해설 표 3.2 라미네이트 및 허니콤 보드지

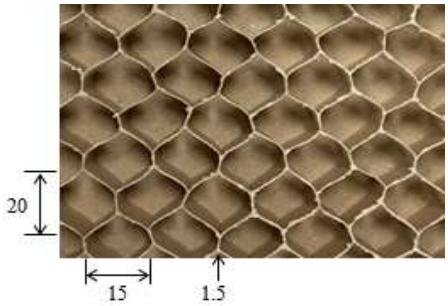
종류	밀도 (g/cm^3)	압축강도 (MPa)	열전도율 (W/m·K)
라미네이트	0.90	20	0.30
허니콤보드	0.18	0.47	0.04

단, 위의 재질과 같이 기밀성, 방수성 그리고 측압을 견딜 수 있는 구조이면 열메타 구조체로서의 사용이 가능하다.

(2) 단열 콘크리트의 측압은 PC 판넬 두께가 50 ~ 250 mm 범위에서 3.19 kN/m^3 이상의 등분포 하중에 안전성을 확보하여야 하며, 외력에 의한 지압을 견딜 수 있는 구조이어야 한다. 이들 외력을 견딜 수 있는 구조는 라미네이트와 허니콤 보드지를 이용한 다음의 상세를 추천한다(해설 그림 3.2). 허니콤 보드지의 셀(살 두께)과 코어는 측압 및 지압에 대한 안전성 확보를 위해 1.5 mm와 15 mm가 추천된다(해설 그림 3.3).



해설 그림 3.2 라미네이트와 허니콤 보드지를 이용한 열메타 구조체



해설 그림 3.3 허니콤 보드지의 상세

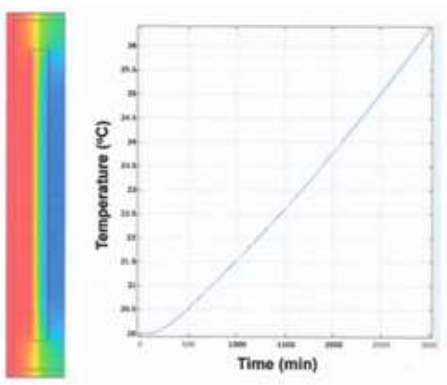
3.3.2 구조체 형상

(1) 열메타 구조체는 PC 판넬의 한 유닛의 내부에 판형상으로 다음과 같이 배치한다. 형상은 다음과 같이 중간에 단절이 되지 않은 연속형 일자 또는 T 자이어야 한다.

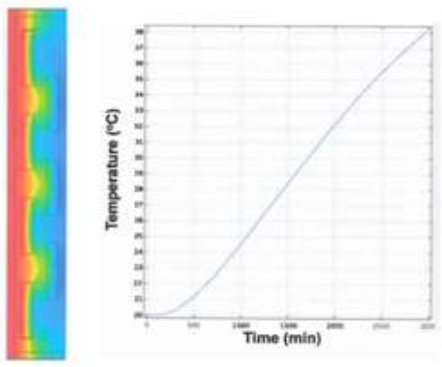
(2) 일자형과 T형의 열메타 구조체는 열메타 기반 PC 판넬의 두께가 330 mm일때에 다음의 상세로 제작하여야 한다.

3.3.2 구조체 형상

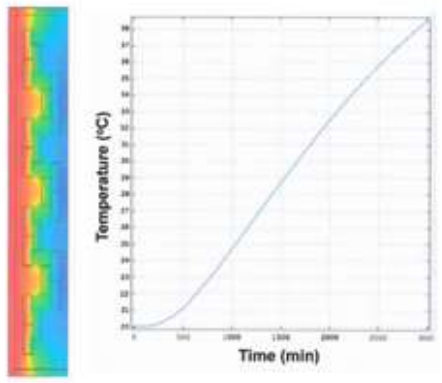
(1) 열메타 구조체의 열전달은 구조체의 형상 및 두께에 따라서 중요한 영향을 받는다. 이 열전달은 연속되지 않은 분절상태 보다 연속된 일자 및 T자에서, 그리고 두께가 두꺼운 열메타 구조체에서 열전달 효율이 더 낮다(해설 그림 3.4). 따라서 열메타 구조체의 형상은 중간에 단절이 되지 않은 연속형 일자 또는 T자이어야 한다.



(a) 연속 일자형

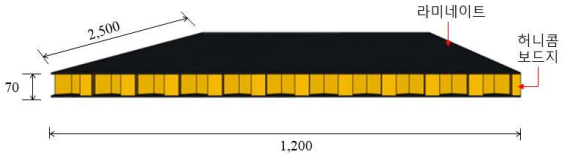


(b) 분절 일자형

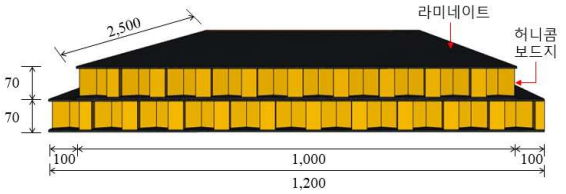


(c) 분절 T자형

해설 그림 3.4 열전달 해석



[일자형 열메타 구조체]



[T자형 열메타 구조체]

제4장 열메타 기반 프리캐스트 콘크리트 판넬의 단면 설계

가이드라인

4.1 일반사항

4.1.1 적용범위

열메타 기반 프리캐스트 콘크리트(PC) 판넬의 단면 설계를 위한 용접철망의 주철근량 및 전단철근량의 결정은 이 장의 가이드라인을 따른다.

4.1.2 기 호

R_a = 기포 혼입률
E_a = 스티로폼 알갱이 혼입률
ρ_c = 콘크리트의 기건 밀도
E_c = 콘크리트의 탄성계수
f_r = 콘크리트의 파괴계수
f_{ck} = 콘크리트의 28일 설계압축강도
M_{cr} = 균열모멘트
I_g = 콘크리트의 단면 2차모멘트
V_s = 전단철근의 공칭전단강도
A_v = 전단철근의 전체 단면적
$A_{v,\min}$ = 최소 전단철근량
V_c = 콘크리트단면의 공칭전단강도
b_w = 보의 폭
M_n = 공칭 휨모멘트
A_s = 인장철근의 단면적
f_y = 철근의 설계기준항복강도
f_{yt} = 횡방향 철근의 설계기준항복강도

4.2 균열 하중

(1) 열메타 기반 PC 판넬의 균열 하중은 KS F 4736에서 제시하고 있는 다음의 등급에 따라 설계한다.

등급	1	2	3
하중범위 (kPa)	3.4 이상	2.8 ~ 3.4	2.2 ~ 2.8

(2) 균열모멘트(M_{cr})는 KBC 2016에서 제시하고 있는 다음의 식에 의해 산정할 수 있다.

해 설

4.1 일반사항

4.1.1 적용범위

이 장에서는 휨 및 전단에 의한 열메타 기반 프리캐스트 콘크리트(PC) 판넬의 단면설계에 대한 주요사항을 정리하였다. PC 판넬은 사용하중에서의 균열에 대한 안전성과 풍하중에 대해 충분한 휨 및 연성을 확보하여야 한다. 따라서 사용성하중하에서는 KS F 4736에서 제시하고 있는 내력등급을, 극한내력에서는 소요 내력 및 연성을 만족하기 위해서 PC 판넬에서 주철근량 및 전단철근량의 결정이 필요하다. 이장에서 정의되지 않은 사항들은 KBC 2016을 따른다.

4.1.2 기 호

4.2 균열 하중

(1) KS F 4736에서는 PC 판넬의 내하중 등급을 제시하고 있다. 열메타 기반 PC 판넬의 상세를 고려하여 1등급에서 제시된 하중을 등분포 하중에 의한 모멘트로 환산하면 8.8 kN·m로 평가될 수 있다. 따라서 이렇게 환산된 값은 등급에 따른 사용하중하에서 균열모멘트의 하한치로 가정할 수 있다.

(2) 균열모멘트(M_{cr})는 주철근에 의해서 향상되는 내력을 무시한다. 또한 Eq. (4.1)에서 파괴계수

$$M_{cr} = \left(\frac{f_r I_g}{y_t} \right) \quad (4.1)$$

위의 식에서 파괴계수(f_r)은 다음의 식으로 산정한다.

$$f_r = 1.44 \left[(f_{ck})^{0.5} \left(\frac{\rho_c}{2300} \right)^{1.5} \left(\frac{1}{1+R_a} \right)^{0.55} \right]^{0.8} \quad (4.2)$$

4.3 주철근

(1) 주철근량은 4.2.(1)에서 선정된 등급에 따라 계산된 M_{cr}의 1.2배를 만족하는 양으로 한다.

(2) 주철근으로 사용되는 보강재는 이형철근 또는 용접철망으로 제한한다. 또한, 주철근의 항복강도는 500 MPa 이하로 제한한다.

(3) 주철근은 겹침이음을 하지 않는다.

4.4 전단철근

(1) 전단철근량은 KBC 2016에서 제시하고 있는 다음의 식에 의해 산정할 수 있다.

$$A_{v,\min} = 0.0625 \sqrt{f_{ck}} \frac{b_w s}{f_{yt}} \quad (4.3)$$

(2) 전단철근으로 사용되는 보강재는 이형철근 또는 용접철망으로 제한한다. 또한, 주철근의 항복강도는 500 MPa 이하로 제한한다.

(3) 열메타 기반 PC 판넬에 설치되는 전단철근은 내부 구조상 경사부분이 존재하며, 설치의 용이성을 위해 전단철근의 겹침이음 및 용접이음을 허용한다. 단, 전단철근은 폐쇄형 배근을 원칙으로 한다.

4.5 최대내력 모멘트

(1) 최대내력 모멘트(M_n)는 KBC 2016에서 제시하고 있는 다음의 식에 의해 산정할 수 있다.

$$M_n = A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) - A_s^{'} f_y^{'} \left(d^{'} - \frac{a}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$a = \beta_1 c_u = \frac{A_s f_y - A_s^{'} f_y^{'}}{0.85 f_{ck} b_w} \quad (4.5)$$

(f_r)는 단열콘크리트의 실험값을 사용할 수 있다.

4.3 주철근

(1) KBC 2016에서는 휨 부재의 취성적 거동을 방지하기 위해서 공칭모멘트가 1.2M_{cr} 보다 크게 설계되도록 하며, 이로부터 주철근의 최소량을 간접적으로 제시하고 있다.

(2) 용접철망은 일반적으로 냉간압연으로 제조되므로 재료자체의 소성흐름이 열간압연으로 제조되는 이형철근 보다 짧다. 특히 이 소성흐름은 항복강도가 증가할수록 짧아지므로 판넬의 연성적 거동을 위해 사용된 보강재의 항복강도를 500 MPa 이하로 제한한다.

4.4 전단철근

(2) KBC 2016에서는 전단설계에서 과도한 전단철근에 의한 내력 분담력의 과대 평가를 감소시키고자 전단철근의 항복강도를 500 MPa 이하로 제한하고 있다.

4.5 최대내력 모멘트

(1) KBC 2016에서는 등가응력블록의 개념을 도입하여 휨 설계에서 공칭모멘트의 예측모델을 제시하고 있다. 설계의 용이성을 위해서 압축철근량이 인장철근량의 10% 이하일 경우에는 Eq. (4.4)에서 제시된 압축철근량을 무시하여도 된다. 특히 공칭모멘트 산정시 열메타 구조체에 의한 빈공간은 계산에서 반드시 제외하여야 한다.

4.6 전단내력

(1) 콘크리트의 전단분담력은 KBC 2016에서 제시하고 있는 다음의 식에 의해 산정할 수 있다.

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\,b_w d_s \tag{4.6}$$

(2) 전단철근에 의한 전담분담력은 BC 2016에서 제시하고 있는 다음의 식에 의해 산정할 수 있다.

$$V_s = \frac{A_v f_{vy} d_s}{s_v} \tag{4.7}$$

(3) 4.6.(1)과 4.6.(2)로 산정된 최대전단내력 ($V_n = V_c + V_s$)은 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$V_n \le \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\,b_w d_s + \frac{A_v f_{vy} d_s}{s_v} \tag{4.8}$$

4.7 설계 개념

(1) 열메타 기반 PC 판넬는 연성확보를 위해서 휨지배형 설계를 원칙으로 한다. PC 판넬의 휨 유도를 위해서는 다음의 식을 만족하여야 한다.

$$V_{fl}(= M_n/a) \le 2V_n(= V_c + V_s) \tag{4.9}$$

4.8 단면 상세

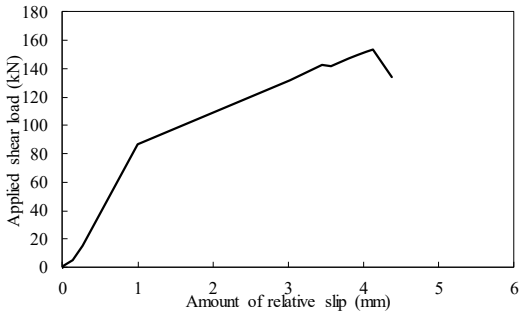
(1) 4.2에서 4.7에 의해서 결정된 열메타 기반 PC 판넬의 최종 단면상세는 다음과 같이 제시할 수 있다.

4.6 전단내력

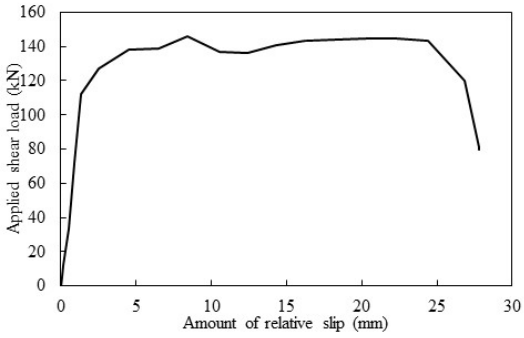
(3) KBC 2016에서는 과도한 전단철근의 배근을 방지하기 위해서 전단내력의 값을 제한하고 있다.

4.7 설계 개념

(1) 열메타 기반 PC 판넬의 연성적 거동을 위해서는 전단파괴 보다 휨 파괴가 선행되어야 한다. 또한 V_{fl}/V_n의 비율은 PC 판넬의 연성거동을 유도하는데 중요한 요소이다. 열메타 기반 PC 판넬의 효과적인 연성적 거동을 위해서는 V_{fl}/V_n가 2.0 이상이 요구된다(해설 그림 4.1).

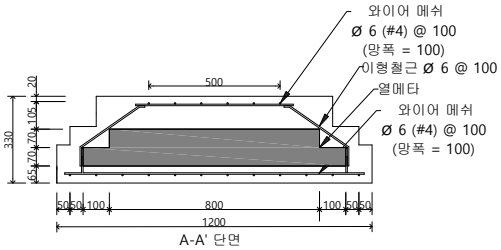


(a) V_{fl}/V_n = 1.0

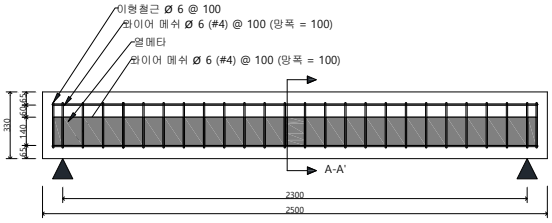


(b) V_{fl}/V_n = 2.0

해설 그림 4.1 V_{fl}/V_n에 따른 하중-처짐관계



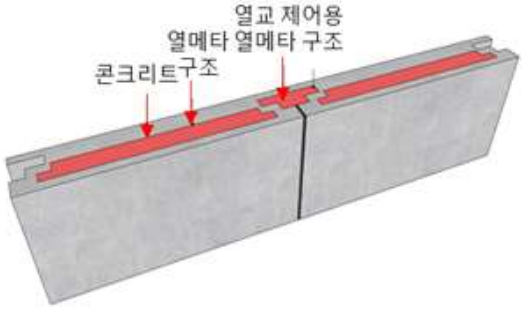
[단면]



[측면]

(2) 열메타 기반 PC 판넬의 단면에서 판넬간의 상호 접합을 위한 역 T형 공간을 형성한다.

(2) 판넬간의 상호 접합을 위한 역 T형의 공간은 열메타 구조체를 삽입하여 접합에서의 열교현상을 최소화하기 위함이다(해설 그림 4.2).



해설 그림 4.2 판넬간의 상호 접합상세

(3) 그 외 설계내용은 KBC 2016을 따른다.

제5장 열메타 기반 프리캐스트 판넬의 제조 및 시공방법

가이드라인

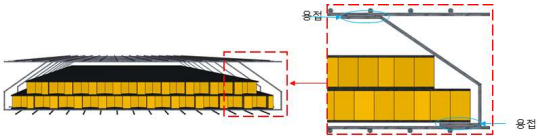
5.1 일반사항

5.1.1 적용범위
열메타 기반 PC 판넬의 제조 및 시공방법은 이 장의 가이드라인을 따른다.

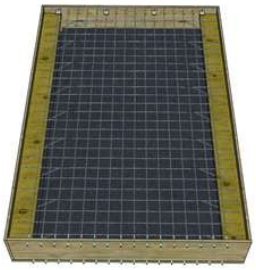
5.2 열메타 기반 PC 판넬의 제조

5.2.1 제조 순서
(1) 열메타 기반 PC 판넬의 제조순서는 다음과 같음; 1) 열메타 구조체 제작; 2) 열메타 구조체와 전단철근의 연결; 3) 거푸집 설치; 4) 단열 콘크리트 배합 및 타설; 5) 탈형 및 양생

[열메타 구조체 제작]

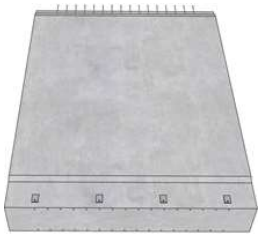


[열메타 구조체와 전단철근의 연결]



[거푸집 설치]

[단열 콘크리트 배합 및 타설]



[탈형 및 양생]

해 설

5.1 일반사항

5.1.1 적용범위
이 장에서는 열메타 기반 PC 판넬의 공장에서의 제조공정과 현장에서의 설치시의 시공방법에 관한 주요사항을 중점적으로 정리하였다. 이장에서 제시되지 않은 사항들은 KS 기준 및 콘크리트 표준시방서를 따른다.

5.2 열메타 기반 PC 판넬의 제조

5.2.1 제조 순서

5.2.2 단열 콘크리트

(1) 단열 콘크리트의 배합설계 및 배합은 2장 단열 콘크리트 제조에 규정된 사항을 따른다.

(2) 단열 콘크리트는 배합의 용이성을 위해서 1.5 m^3의 다음의 샤프트식 믹서기를 사용한다.

[샤프트 믹서기]

5.2.2 단열 콘크리트

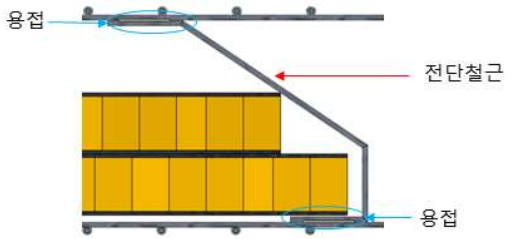
5.2.3 열메타 구조체

(1) 열메타 구조체의 형상 및 상세는 3장 열메타 구조체 설계에 규정된 사항을 따른다.

(2) 열메타 구조체는 내부에 설치시 고정을 위해서 4.4.(3)의 전단철근의 상세를 따른다.

5.2.3 열메타 구조체

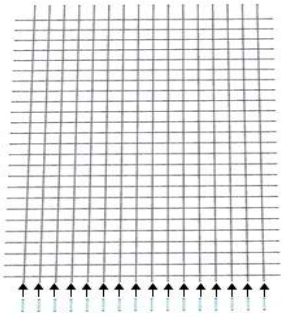
(2) 열메타 구조체는 내부에 설치시 타설에 의한 부력으로 인해 상승할 수 있으므로 이를 방지하기 위해서 폐쇄형의 보조 전단 철근을 다음과 같이 설치한다(해설 그림 5.1).



해설 그림 5.1 보조전단 철근의 설치

5.2.4 용접 철근

(1) 주철근으로 배근되는 용접철근은 4.3.(2)를 따르며, 열메타 PC 판넬의 수직방향 접합을 위한 스플라이스 튜브를 다음과 같이 설치한다.



[용접철망 주철근의 스플라이스 튜브 설치]

5.2.4 용접 철근

5.2.5 거푸집

(1) 철재, 목재 및 기타 재료로서 설계도서의 허용오차 범위를 유지하고, 단열 콘크리트 중량을 지지할 수 있는 충분한 강성을 갖는 재료로 한다.

(2) 거푸집은 내부가 깨끗하고 이물질이 없으며, 녹과 굳은 콘크리트가 없어야 한다.

5.2.6 양생

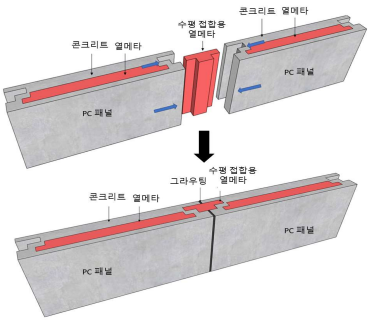
(1) 열메타 기반 PC 판넬의 양생은 2.5 단열콘크리트 양생의 조건을 따른다.

(2) 5.2.6.(1)의 사항을 따를 수 없을 때에는 2.3.1에서 제시하고 있는 단열 콘크리트의 목표성능에 준할 수 있는 양생환경을 조성한다.

5.3 열메타 기반 PC 판넬의 접합

5.3.1 열메타 기반 PC 판넬의 접합

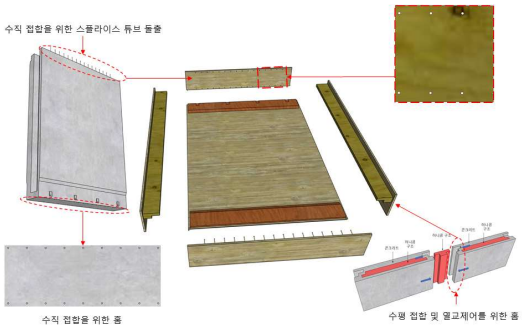
(1) 열메타 기반 PC 판넬간의 접합은 접합사이에서 발생할 수 있는 열교현상을 최소화하기 위해서 열교차단 및 접합용 T형 열메타를 설치하여야 한다. 설치시 열메타 기반 PC 판넬들의 사이에 열교차단 및 접합용 T형 열메타를 삽입하고, 접합부를 실링처리한 후 그라우팅을 주입한다.



[접합용 T형 열메타의 설치]

5.2.5 거푸집

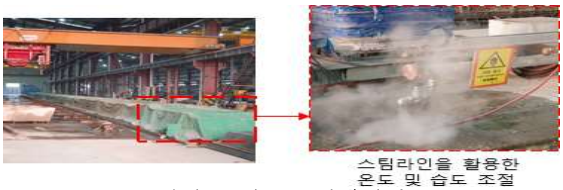
(1) 열메타 기반 PC 판넬은 수평방향으로 접합하기 위해서 역 T형의 요철로 인해 제조 생산성이 저하될 수 있으므로 미리 제작된 유닛화된 거푸집의 사용을 권장한다(해설 그림 5.2).



해설 그림 5.2 유닛화된 거푸집의 설치

5.2.6 양생

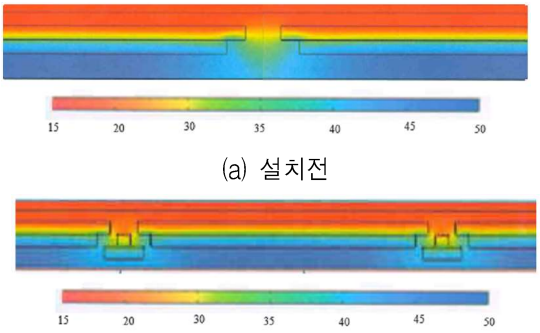
(1) PC 판넬의 양생은 온도와 습도를 제어할 수 있는 환경을 조성하여야 한다(해설 그림 5.3).



해설 그림 5.3 양생환경

5.3 열메타 기반 PC 판넬의 시공

(1) 열메타 기반 PC 판넬 간의 접합은 접합부에서 열교현상이 발생할 수 밖에 없다(해설 그림 5.4). 따라서 이를 제어하기 위해서 접합용 T형 열메타를 설치하여야 한다. 설치 이후 열의 전달이 현저하게 감소함을 확인하였다.



(a) 설치전

(b) 설치후

해설 그림 5.4 열메타 PC 판넬 접합 간의 열 흐름

5.3.2 그라우팅

(1) 열메타 기반 PC 판넬들의 수평접합에서 사용되는 그라우팅은 다음을 만족하는 제품을 이용한다.

플로우 (mm)	응결시간 (h)		압축강도 (MPa)			팽창률 (%)
	초결	종결	1일	7일	28일	
300 이상	2	8	20	50	70	0.3 이하

5.4 시스템 기반 구축

5.4.1 배합설계

(1) 열메타 기반 PC 판넬용 단열 콘크리트의 배합설계는 제2장 단열콘크리트 제조에서 구축된 절차를 사용한다.

5.4.1 생산 라인

(1) 제작을 위한 생산 라인은 다음과 같음; 1) 몰드 배치; 2) 철근망 제작; 3) 배쳐 플랜트 배합; 4) 철근망 투입 후 타설; 5) 타설면 정리 6)1차 양생; 7) 2차 양생을 위한 운반; 8) 스팀증기양생; 9) 자체 성능 평가 실시; 10) 출하전 면처리 작업

[몰드배치]

[철근망 제작]

[플랜트 배합]

[콘크리트 타설]

[타설면 정리]

[1차 양생]

[2차 양생 준비]

[2차 양생]

[성능평가 실시]

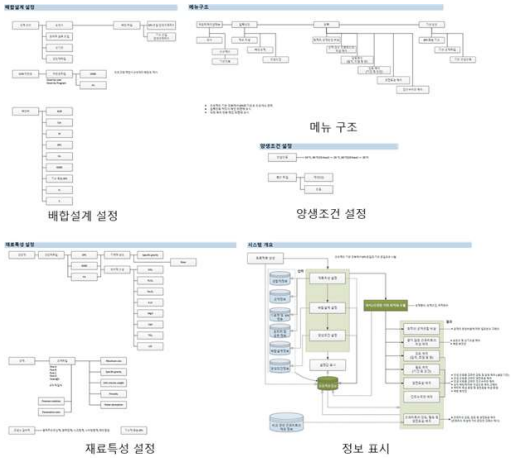
5.3.2 그라우팅

(1) 접합부는 작은 공간이므로 주입을 위해서 유동성이 우수한 그라우팅이 요구된다. 또한, 그라우팅 주입이후 양생기간은 시공성을 저하시키는 원인이 되므로 이를 제어하기 위해서 빠른 응결과 1일에 높은 압축강도발현이 요구된다.

5.4 시스템 기반 구축

5.4.1 배합설계

(1) 열메타 기반 PC 판넬용 단열 콘크리트의 배합설계는 다음의 설계 절차를 이용할 수 있다(그림 해설 5.5).



해설 그림 5.5 PC 판넬용 단열 콘크리트 배합 절차

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

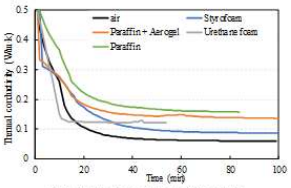
3-1 목표 및 목표 달성여부

<table>
<tr><td>핵심성과 1</td><td colspan="3">열메타 구조체의 최적화 기술</td></tr>
<tr><td>목적</td><td colspan="3">

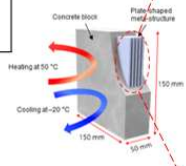
- 열메타 소재 스크리닝
- 열메타 형상 및 배치의 최적화
- PC 판넬의 열전달 전산 시뮬레이션

[재료들의 성능을 고려한 변수설정]

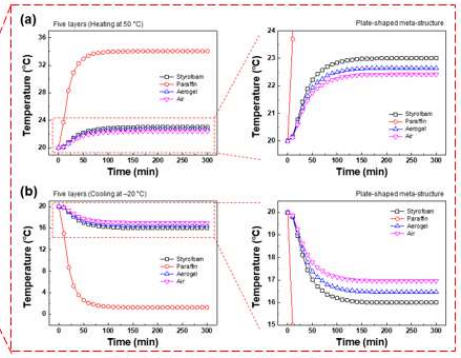
	Styrofoam	Air	Aerogel	Paraffin
Density (kg/m³)	35	1.18 @ 20 ˚C	25	777
Specific heat (J/(kg · K))	2300	1007	900	485
Thermal conductivity (W/(m · K))	0.035	0.024	0.03	0.35



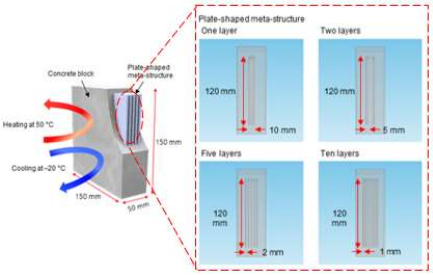
[변수에 따른 열전도율 평가]



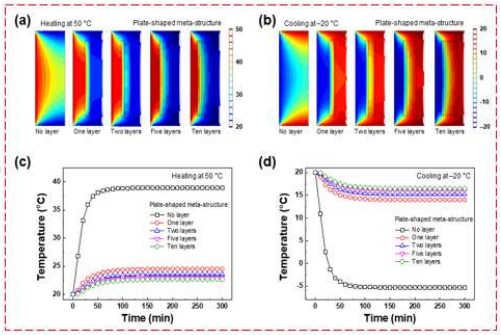
[시뮬레이션 모델]



[열전달 시뮬레이션 결과]

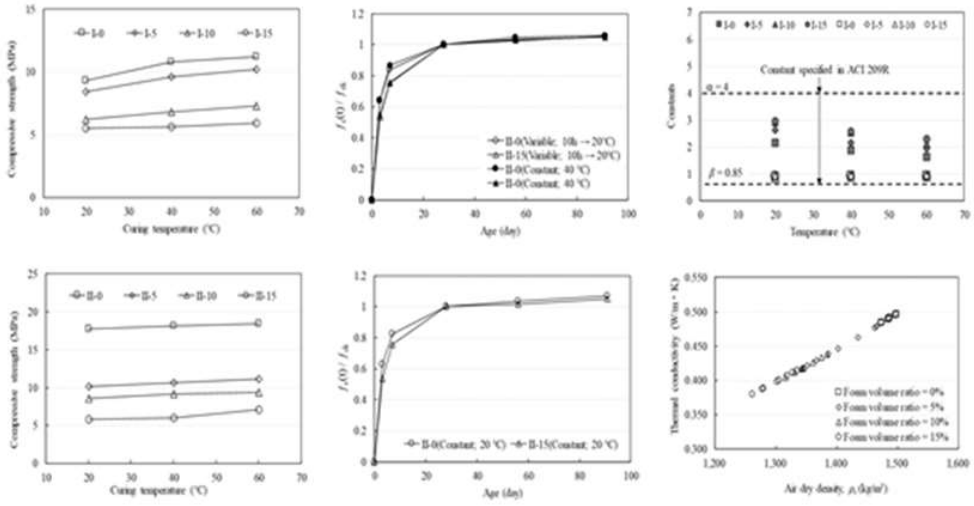


[시뮬레이션 모델]



[열전달 시뮬레이션 결과]

</td></tr>
<tr><td rowspan="2">성능목표 및 달성현황</td><td>성능</td><td>당초 목표 개발기술 수준</td><td>달성 수준</td></tr>
<tr><td>열메타 소재 선정 (공기, 에어로겔, 파라핀 등)
온도차 10도 이상 (기존 콘크리트 대비, 50도 가열)</td><td>120 × 120 × 10 mm³ 크기의 스티로폼 1층 삽입시 온도 26.7도
(콘크리트 블록 150 × 150 × 50 mm³, 50도 가열)</td><td>120 × 120 × 2 mm³ 크기의 에어로겔 5층 삽입시 온도 23.9도
(콘크리트 블록 150 × 150 × 50 mm³, 50도 가열)</td></tr>
<tr><td rowspan="7">성과달성에 따른 정량적 성과</td><td></td><td>당초 목표</td><td>달성 수준</td></tr>
<tr><td>특허 출원/등록</td><td>0건</td><td>0건</td></tr>
<tr><td>논문</td><td>SCI(E): 2건</td><td>SCI(E): 3건</td></tr>
<tr><td>저작</td><td>0건</td><td>0건</td></tr>
<tr><td>S/W</td><td>0건</td><td>0건</td></tr>
<tr><td>신기술</td><td>0건</td><td>0건</td></tr>
<tr><td>시작품</td><td>1건</td><td>1건</td></tr>
</table>

핵심성과 2	기포와 바텀애시 골재기반 프리캐스트 경량 콘크리트의 융합을 위한 최적의 배합기술
목적	▪ 선기포와 바텀애시 골재를 활용한 구조용 경량 콘크리트 제조 가능성 평가 ▪ 개발된 콘크리트의 밀도, 압축강도 및 열저항성 상관관계 평가 ▪ 개발된 콘크리트의 프리캐스트 제조 기술 제시; 최적의 양생이력 평가 [기포 혼입] [EPS 혼입] 지속가능 고단열 콘크리트의 배합과정  기포가 첨가된 바텀애시 골재기반 경량콘크리트의 역학적 특성평가

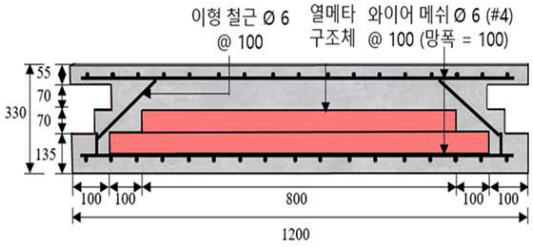
성능목표 및 달성현황	질적 성과지표	목표치	달성치
	소요 압축강도 확보(MPa)	20 이상	26.3
	소요 휨강도 확보(MPa)	1.5 이상	2.8
	소요 밀도 확보(g/cm^3)	1.4 이하	1.2
	열전도율 확보(W/m · k)	0.37이하	0.325
	건조수축량의 제한(μ)	1,000 이하	659

성과달성에 따른 정량적 성과		당초 목표	달성 수준
	특허 출원/등록	출원: 1건	출원: 1건
	논문	SCI(E): 1건, 비SCI: 2건	SCI(E): 2건 비SCI: 6건(이중 1건 게재 예정)
	저작	0건	0건
	S/W	0건	0건
	신기술	0건	0건

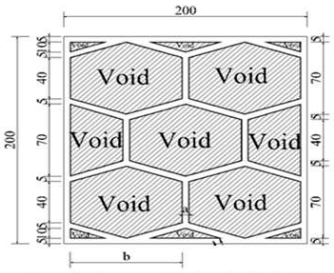
핵심성과 3	사용성과 구조적 안전성을 고려한 열메타 기반 PC 판넬 설계

목적

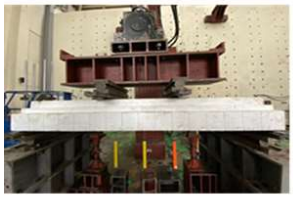
- 열메타 구조를 고려한 PC 판넬의 단면상세 개발
- 지속가능 열메타 기반 PC 판넬의 구조성능(휨 및 전단성능) 평가
- 지속가능 열메타 기반 PC 판넬의 시작품 제작



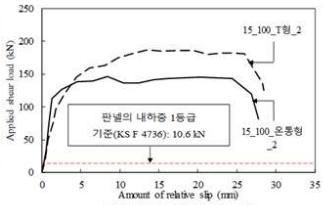
[PC 판넬의 최적의 단면상세]



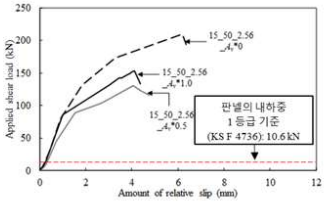
[열메타 구조체의 단면상세]



[셋팅상세]



[휨 거동 지배형실험체]



[전단거동 지배형실험체]

[하중-변위관계]

[PC 판넬 제작]

성능목표 및 달성현황

질적 성과지표	목표치	달성치
소요 휨강도 확보(MPa)	2.0 이상	5.24
소요 밀도 확보(g/cm^3)	1.4 이하	1.2
열전도율 확보(W/m · K)	0.11 이하	0.05

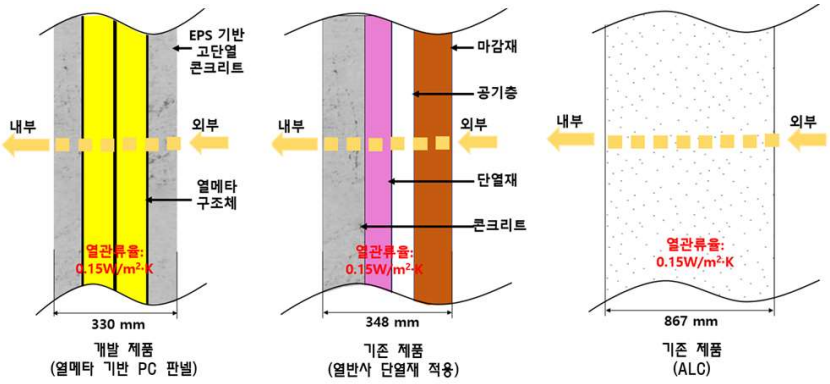
성과달성에 따른 정량적 성과

	당초 목표	달성 수준
특허 출원/등록	출원: 2건, 등록: 1건	출원: 2건, 등록 1건(우선심사권 진행중)
논문	0건	비SCI: 1건
저작	0건	0건
S/W	0건	0건
신기술	0건	0건

핵심성과 4	열메타 기반 고단열 · 지속가능 PC 판넬의 생산시스템 기반 구축

목적

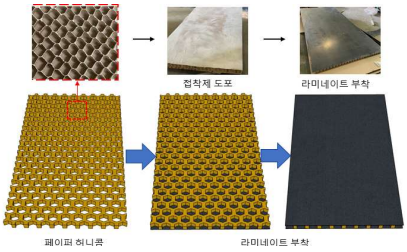
- 제안기술의 비즈니스 모델 제시
- 지속가능 열메타 기반 PC 판넬에 사용된 재료들의 수급성 및 경제성 평가



[1 m² 기준]

구분	기존 기술 (벽체 + 열반사 단열재 + 치장벽돌)	기존 기술 (ALC)	개발 기술 (열메타 기반 PC 판넬)	개발기술의 경제성
사이즈 (mm²)	1,000 X 1,000			노무비와 재료비를 더한 총액 기준 기존 기술 대비 최대 15.3% 저감
두께 (mm)	348	867	330	
사용 연한 (연)	20	40	40	
노무비 (원)	65,570	63,065	53,673	
재료비 (원)	70,221	58,336	61,210	
합계 (원)	135,791	121,401	114,883	

PC 판넬과 기존 기술과의 경제성 비교



열메타 구조체의 시작품 제작

생산시스템 구축 및 시작품 제작

성능목표 및 달성현황

질적 성과지표	목표치	달성치
열메타 기반 고단열지속가능 PC 판넬 제조 가이드라인	1건	1건
생산 시스템 기반 구축	1건	1건

성과달성에 따른 정량적 성과

	당초 목표	달성 수준
특허 출원/등록	0건	0건
논문	비SCI : 1건	비SCI : 1건
저작	0건	0건
S/W	0건	0건
신기술	0건	0건
시작품	1건	1건

3-2. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 과제 특허 출원 성과중 열메타 임베디드 고단열 판넬에 대해서 특허 등록을 우선 심사로 진행중이며 2021년 2월에 등록 결정이 될 것으로 예상됨. 이에 따라 그림 1.1과 같이 특허사무소의 의견서를 첨부하였음.

의 견 서

권 리 구 분	특 허
출 원 인	경기대학교 산학협력단
출 원 번 호 (출 원 일)	제10-2019-0135855호(2019.10.29.)
발 명 의 명 칭	열메타 임베디드 고단열 판넬

본소에서 진행중인 상기 특허출원에 대하여 아래와 같이 의견드립니다.

이 건은 2020.04.06.자로 우선심사결정되어 2020.07.24.자로 1차 의견제출통지를 받아 2020.08.07.자로 의견서 및 보정서를 제출하였고, 2020.10.27.자로 2차 의견제출통지를 받아 2020.11.10.자로 의견서 및 보정서를 제출하여 현재 재심사 중에 있어 심사 일정이 다소 지연되고 있습니다.

당해 심사관은 유닛의 내부에 채워지는 단열 특성을 갖는 구조체는 고 비열용량/상변화 특성을 갖는 에어로겔이라는 점에서 선행기술과 차이가 있음을 인정하면서도, 실리카 에어로겔은 다공성으로 단열성이 뛰어난 점이 다른 선행기술에 기재되어 있음을 지적하고 있으며, 이에 대해 2차 의견 대응에서는 에어로겔을 "콘크리트" 패널의 내부 유닛을 충진하는 데 사용할 수 있음에 대해서는 선행기술에서 어떠한 교시나 시사도 없으며, 따라서 결합발명의 진보성 판단 법리를 간과함을 주장하였으므로, 재심사 결과 무난히 등록결정(2021년 2월 예상)될 것으로 사료됩니다.

이상 상기 특허출원에 대한 의견을 드리오니 참고하시기 바랍니다.

2021년 01월 06일

신라특허법률사무소

대표변리사 박 상 훈

그림 1.1 의견서

3-3. 관련분야 기여도

- 최근 에너지 절약 설계기준강화 및 내화기준강화에 따라서 판넬들이 계발되고 있지만 대부분 유기계 단열재에 기반하고 있으며 무기계 단열재의 경우 단가가 비싸며 유기계 재료에 비해 단열성능이 떨어짐.
- 본 연구에서 개발된 열메타 구조체는 건축물 냉·난방 에너지 사용 절감에 크게 기여할 수 있는 단열재 기술을 제공할 수 있음.
- 본 연구에서 개발된 PC 판넬은 열메타 구조체에 기반하고 있어 설계기준을 만족할 수 있을 뿐만 아니라 기존 유기계 단열재 기반의 PC 판넬 수준의 성능을 확보하였음.
- 또한, 국제적 독창성을 갖는 열메타 기반 고단열 콘크리트 제조 및 이를 이용한 PC 판넬 생산의 기술력 확보하였음.

- .계속되는 기준강화에 따라 에너지 효율성이 우수한 패시브 하우스나 돔하우스에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이러한 구조물들은 높은 단열성능을 요구하고 있어 판넬 및 외벽에 본 과제기술이 적극 활용가능할 것으로 판단됨.
- 과제기술의 높은 단열성 및 경량성은 프리캐스트 제품의 대체재로서 활용이 가능함.
- 본 연구에서 개발된 열메타 구조체는 단열재로서 적용되어 2차 제품으로서도 적용이 가능할 것으로 판단됨.
- 활용성을 높이기 위한 방안으로서 향후 연구 종료 후에는 국토부 녹색 인증을 추진할 계획에 있음.
- 특히 기술의 완성도 및 실용화를 위해 공동연구기관인 아이에스동서의 지속적 투자계획이 있으며, 이를 바탕으로 PC 부재로서의 활용성을 고려한 접합부 설계로 확장될 계획임.
- 이에 따라, 기술의 실용화 차원에서 이 연구결과의 활용가능성이 높다고 평가된다면 추후 에너지 제로빌딩 및 에너지 고효율 빌딩 대응기술 개발연구 및 사업화 연구과제로 연구기간과 지원이 확장될 수 있기를 기대함.

1. Kim, D. W., Chung, K. S., Kim, Y. I., and Kim, S. M. (2013) A Comparative Study on Heating Energy Consumption for Apartment Based on the Annually Strengthened Criteria ofInsulation. Journal of the Korea Energy Engineering 22(2),83-89. (In Korean)
2. Kim, Y. L. and Song, Y. C. (2012) Eco-Friendly Concrete withCarbon Emission Reduction. Korea Society of Architectural Hybrid System, July. http://www.auric.or.kr/dordocs/preview_rdoc.aspreturnVal=CMAG&dn=178288 Accessed 30 July 2018
3. Kim, Y. Y., Song, H., Lee, J. K., and Chu, Y. S. (2007) Improvementof Fundamental Properties in ALC Added Admixtures and Silica Powder Size. Journal of the Korea Architectural Institute 23(8), 107-114. (In Korean)
4. Lee, D. H., Jun, M. H., and Ko, J. S. (2001) Physical Propertiesand Quality Control of Foamed Concrete with Fly Ash forCast-in-Site. Journal of the Korea Concrete Institute 13(1),69-76. (In Korean)
5. Lee, H. K., Gong, H. M., Baek, S. M., Kim, W. S., and Kwak, Y. K. (2017) An Experimental Study on the Size Effect of Reinforced Concrete Members with Stirrups using Recycled Coarse Aggregates. Journal of the Korea Society of Waste Management Institute 34(2), 188-198. (In Korean)
6. Saul, A. G. A. (1951) Principles Underlying the Steam Curing ofConcrete at Atmospheric Pressure. Magazine of Concrete Research 2(6), 127-140.
7. Seo, D. H., Kim, W. H., Kim, J. H., and Lee, Y. J. (2017) AnExperimental Study of Sprinkler system for Sandwich Panel Wall Protection. Journal of the Korea Fire Science and Engineering Institute 31(5), 37-43. (In Korean)
8. Seo, S. K., Chu, Y. S., Song, H., Lee, J. K., and Im, D. H. (2011)A Study on the Characteristics of ALC Material with Melamine Resin. Journal of the Korea Ceramic Society48(6), 595-599. (In Korean)
9. Shim, S. U., Yang, K. H., Lee, K. H., and Yun, I. G. (2014)Evaluation of Flow and Engineering Properties of High-Volume Supplementary Cementitious Materials LightweightFoam-Soil Concrete. Journal of the Korea Recycled Construction Resources Institute 2(3), 247-254. (In Korean)
10. Shin, J. K. and Han, M. C. (2012) Physical Properties andDurability of Light Weight Concrete by Grading and Shape Artificial Lightweight Aggregates. Journal of the Korea Architectural Institute 28(10), 105-112. (In Korean)
11. Sun, J. S. (2016) Engineering properties of lightweight concretewith dry bottom ash as aggregate. Ph.D. Thesis. Kongju National University. (In Korean)
12. Yang, K. H. and Jung, Y. B. (2015) Mixture-Proportioning Model for Low-CO2 Concrete Considering the Type and Addition Level of Supplementary Cementitious Materials. Journal of the Korea Concrete Institute 27(4), 427-434. (In Korean)
13. Choi, S. J., Jung, Y., Oh, B. J., and Kim, M. H. (2003) An Experimental Study on Engineering Properties of Concrete according to W/C and Replacement Ratio of Bottom Ash. Journal of the Korea Concrete Institute 15(6), 840-847. (In Korean)
14. Kim, J. M., Jung, J. Y., Hwang, E. H., and Shin, S. C. (2012) Properties of Foamed Concrete According to Types and Concentrations of Foam Agent, Journal of the Korea Concrete Institute 24(1), 64-70. (In Korean)
15. Yang, K. H. (2015) Foamed Concrete with a New Mixture Proportioning Method Comparable to the Quality of Conventional ALC Block. Journal of the Korea Institute of Building Construction 15(1), 1-7. (In Korean)
16. Kim, S. C., and An, S. K. (2009) Mix Design and Characteristics of Compressive Strengths for Foam Concrete Associated with the Application of Bottom Ash. Journal of the Korea Concrete Institute 21(3), 283-290. (In Korean)
17. Lee, D. H., Jun, M. H., and Ko, J. S. (2001) Physical Properties and Quality Control of Foamed Concrete with Fly Ash for Cast-in-Site. Journal of the Korea Concrete Institute 13(1), 66-67. (In Korean)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

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

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