

나노캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트 고단열 소재 개발 최종보고서

2019 . 02 . 12 .

주관연구기관 / 경기대학교

공동연구기관 / 아이에스동서

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C132 555-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.30. -2018.12.31.	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천분야			
연구과제명	대과제명	나노캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트 고단열 소재 개발			
	세부과제명	나노캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트 고단열 소재 개발			
연구책임자	양 근 혁	해당단계 참여 연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: - 명	해당단계 연구개발비	정부:370,000천원 기업:214,000천원 정부 외: 천원 계:617,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: - 명	총 연구개발비	정부:370,000천원 기업:214,000천원 정부 외: 천원 계:617,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	경기대학교 산학협력단(건축공학과)			참여기업명	아이에스동서(주)
국제공동연구	상대국명:해당없음			상대국 연구기관명:해당없음	
위탁연구	연구기관명:해당없음			연구책임자:해당없음	

요약

본 연구에서 제안되는 기술은 표면기능화된 나노캡슐과 기포콘크리트의 융합을 통해 기존 기포콘크리트의 단열성 및 방수성을 향상시키는 고단열 소재 제조 기술이다. 이 연구의 최종목표는 사업화보다는 아이디어 검증의 학술적·실험적 연구에 중점을 두었다. 주요 핵심 기술로서는 나노캡슐 에어로겔의 표면기능화를 통한 친수성-소수성 전이 제어기술, 고성능 경량기포 콘크리트 제조 기술 및 성능 모델링과 나노캡슐 에어로겔 적용 기포 콘크리트의 강도 향상 및 단기실용화를 위한 ALC 기술의 확장 가능성 평가에 있다.

정량적 성과를 포함한 목표성과의 달성수준은 아래의 요약에 나타낸바와 같이 최초 목표 이상을 달성하였다. 이 연구의 최종 목표 TRL은 4단계로서 해당 연구를 통하여 에어로겔 혼입 기포콘크리트 및 ALC 기술의 실용성이 판단된다면 과제 종료 후 실용성을 확보하는 성능과 함께 시중에 유통되고 있는 상용 제품 이상의 성능으로 확대할 계획(TRL 7)이다.

성과 달성 현황

- 학술적 성과 : 목표-국내·외 논문게재 : 9편(SCIE 3편 포함)
달성-국내·외 논문게재: 9.5편(SCIE 3.5편 포함)
학술발표 : 9건
- 지식재산권 : 목표- 4건
달성- 해외(PCT 2건 포함) 8.25건 출원, 0.5건 등록
- 실용적 성과: 설계 가이드라인 2건 / 시제품(실내실험 규모) 2건

보고서 면수

132 page

제출문

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

"나노캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트 고단열 소재 개발"(연구개발 기간 : 2017.06.30.
~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 02. 12.

주관연구기관명 : 경기대학교 산학협력단 (이 준 성) (인)
공동연구기관명 : 아이에스동서 (주) (권 민 석) (인)



주관연구기관책임자: 양 근 혁
공동연구기관책임자: 박 영 식

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	나노기술과 콘크리트 기술의 학제간 융합연구로서 각 세부목표별 주요 연구내용을 요약하면 다음과 같다. 1) 캡슐 에어로겔의 표면기능화를 통한 친수성-소수성 전이 제어기술 확립. · 기포 콘크리트에 적용 시 에어로겔의 소수성에 의한 부유 및 분산성 저하를 억제. · 콘크리트와의 융합력 향상 및 단열성 확보를 위해 나노공극을 갖는 에어로겔의 친수성-소수성 가역반응을 유도. · 습윤특성을 갖는 나노캡슐 에어로겔 소재 선별 및 크기와 농도결정. 2) 나노캡슐 에어로겔을 활용한 고성능 경량기포콘크리트 제조기술 확립. · 고단열 기포콘크리트의 에어로겔 혼입량, 결합재 종류, 공극률, 기포율 및 물-결합재 비 등 기포콘크리트의 특성 평가 및 모델링. · 나노캡슐 에어로겔 적용에 따른 부유 방지 및 분산성능 향상을 배합방법 제시. · 고단열 기포콘크리트의 소요성능을 만족하는 최적 배합설계 절차 제시 및 설계 가이드라인 제시. 3) 제안기술의 강도향상 및 단기실용화를 위한 ALC(autoclaved lightweight concrete) 기술의 확장. · ALC 기술로의 확장을 위한 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트 의 압축강도 발현, 밀도 및 열전도율 특성 평가: 주요변수는 결합재 종류, 나노캡슐 에어로겔 양, 양생온도 및 양생 압력의 범위 등. · 나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC 실내 배합비 도출 및 설계 가이드라인 제시.				
연구개발성과	· 학술적 성과 : 국내 · 외 논문게재: 10.5편 (SCIE 3.5편 포함) 학술 발표 : 9건 · 지식재산권 : 해외 포함(PCT 2건) 7.25건 출원, 0.5건 등록 · 실용적 성과: 설계 가이드라인 2건 / 시작품(실내실험 규모) 2건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	1) 활용계획(기술수요처) · 건축물의 내 · 외벽 단열재 분야(EPS 및 ALC 블록의 대체). · 다양한 형태의 패시브하우스 및 돔하우스나 건축물 내부 리모델링 분야에 적용이 가능함. 2) 기대효과 · NT와 융합한 차세대 건설 단열재료 기술의 경쟁력 제고 및 국내 원천기술 확보. · 건축물 냉 · 난방에 소비되는 에너지의 20% 이상 절감. · EPS 시장 5% 대체시 연간 약 200억 사업화 가능. · ALC블록 시장 10% 대체시 연간 100억 사업화 가능.				
핵심어 (5개 이내)	에어로겔	나노캡슐	기포콘크리트	고단열	오토클레이브

< SUMMARY >

Purpose & Contents	As an interdisciplinary convergence research of nano and concrete technologies, the primary contents can be summarized as follows: 1) Establishment of hydrophilicity–hydrophobic control technology of capsule aerogels · Control of flotage and dispersibility of nano–capsule aerogels within fresh concrete. · Inducement of reversible reaction between hydrophilicity–hydrophobic properties of aerogels with nano–pore. · Determination of size and concentration of nano–aerogel with wetting property. 2) Establishment of mixture proportioning procedure for high–performance aerated concrete including nano–capsule aerogels. · Mixture parameters: aerogel content, binder type, porosity, foam content, and water–to–binder ratio. · Proposals of optimum mixture proportioning procedure and design guidelines for the new insulation materials. 3) Extension to ALC(autoclaved lightweight concrete) technology for the enhancement of strength and a short–term commercialization. · Evaluation on the properties of aerated concrete subjected to high–temperature and high–pressure. · Test parameters: binder type, aerogel content, and temperature and pressure ranges.				
Results	· Academic outcome: 10.5 papers(including 3.5 papers published in SCIE Journal) · Intellectual property rights: 5.25 domestic patents and 0.5 registration, 2 international patents · Practical outcome: 2 design guidelines and 2 prototype sample				
Expected Contribution	1) Application plan(technology users) · Alternative to the conventional EPS and ALC blocks for building insulation materials. · Passive house, dome house, and remodelled buildings. 2) Expected contribution · Development of new and original technology for building insulation materials. · 20% reduction of energies consumed for air conditioning and heating of buildings. · Business competitiveness of annual 20 billions for 5% replacement of EPS market. · Business competitiveness of annual 10 billions for 10% replacement of ALC block market.				
Keywords	aerogels	nano–capsule	aerated concrete	high–insulation	ALC

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 연구 수행 내용 및 성과	6
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	127
4. 연구개발성과의 활용 계획	129
붙임. 참고 문헌	130

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 본 과제기술은 기존 경량 기포 콘크리트의 단열성능의 한계를 극복하고 ALC 기술로의 확장을 위해 표면 기능화된 나노캡슐 에어로겔을 적용한 고단열·고성능 경량기포콘크리트 배합설계의 정립에 관한 것임.

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 CO₂ 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 t / m^2 에 달함.
- 국내 에너지 소비효율은 일본의 1/3 수준(그림 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 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 민간부문까지 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 2016년부터 공동주택 외벽의 열관류율 기준은 $0.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 이하로 적용되고 있는데, 이는 2010년($0.36 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) 대비 약 40% 낮아진 수준임.
- 유기 단열재 시공에 따른 화재 발생예방 및 내화규제 강화를 위해 2015년부터 6층 이상 건물에 불연, 준불연 마감재 적용이 의무화됨.

(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.

에너지 효율 일본의 1/3 수준



그림. 1 국내 에너지 소비 효율성



그림. 2 서울시 부문별 에너지 소비현황

- 영국의 경우 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 전망이다.

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

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

- 두께 250 mm인 외벽에서 열관류율 $0.21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 를 달성하기 위해서는 가연재인 기존 유기 단열재(EPS, 열전도율 = $0.043 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)의 경우 197 mm 이상의 시공이 필요하며, 이를 불연재료인 콘크리트 무기단열재(기존 경량기포콘크리트 및 ALC 블록, 열전도율= $0.13 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)로 대체하게 되면 단열재 두께는 597 mm 이상으로 증가함(그림 3).
- 벽체의 소요 열관류율에 대해 무기 단열재의 두께를 300 mm 이하로 낮추기 위해서는 단열재 열전도율은 $0.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이하가 요구됨.
- 최근 건축물의 리모델링 및 패시브하우스에 대한 수요가 증가함에 따라 경량기포콘크리트 블록 시장은 성장하고 있지만, 기존 경량 기포콘크리트의 열전도율은 건축물의 벽두께를 증가시켜 내부 공간의 활용성 및 시공성과 경제성을 상당히 저하시킴.
- 열전도율 $0.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 인 고단열 경량기포콘크리트는 건축물의 열손실을 약 30% 이상 줄일 수 있으며, 이는 건축물의 냉난방을 위해 소비되는 전체 에너지를 약 20% 이상 감소시킬 수 있는데, 이를 경제적 이익으로 환산한다면 약 6,200 억원 이상의 효과임.

(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 10,000억원의 규모로 성장할 전망이다.
- 국내 단열재 시장은 유기단열재가 70%(EPS 포함), 무기단열재가 30% 정도를 차지하고 있는데, 유기단열재는 화재 및 인체 유해성이나 자외선에 의한 품질저하 등의 문제로 인해 적용성에 대한 제한이 증가하고 있음. 특히 6층 이상 건축물에 대해 준불연 인증 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 취약

- 건축물의 단열을 위해 가장 많이 사용되고 있는 발포 플라스틱계 유기재인 EPS의 경우 열전도율은 $0.043 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 수준으로 우수한 열절도율을 갖는 반면, 난연성능은 최대 2급(준불연등급)으로 화재에 취약함.
- 건축물 단열을 위한 EPS 사용은 화재발생 시 대형화재로 발전(그림 4)하며, 이는 많은 인명과 재산피해로 연계됨(의정부 아파트 화재, 대구 서문시장 화재 등)

(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 $0.13 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이하의 열전도율을 얻기 어려울 뿐만 아니라, 모서리파괴, 균열발생 및 방습성 저하 등의 사용성 문제가 있음.
- 글라스 울 등의 무기단열재는 열전도율은 $0.04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 수준으로 우수하지만, 상당히 고가($250,000 \text{ 원/m}^3$)일 뿐만 아니라 고흡수성으로 수분의 흡수에 의한 장기적 단열성능의 저하로 인해 건축물 단열재 적용으로는 한계가 있음.
- 다공성 콘크리트의 경우 공극의 크기가 작고 독립기포 분포가 세밀할수록 단열성능이 우수하지만 기포콘크리트에서 나노 크기의 미세 공극 유도는 한계가 있음.
- 결과적으로 가연성의 EPS 및 글라스 울 등의 무기단열재를 대체할 수 있는 좋은 재료중의 하나는 단열성능이 현저히 향상된 기포콘크리트가 추천될 수 있음.
- 기포콘크리트의 단열성능 개선 및 사용성 문제 해결을 위한 해결책 중의 하나는 나노크기의 공극으로 단열성능이 매우 우수한 에어로 겔 등의 신소재 기술융합이 제안될 수 있음.

(3) 친·소수성 변화의 나노캡슐 에어로겔 융합을 통한 기포콘크리트 단열재 발전성

- 소수성 에어로겔은 습식배합인 콘크리트배합 시 재료분리 및 성능저하를 발생시킬 수 있는 반면, 친수성 에어로겔의 경우 초기 높은 흡수율에 따른 단위수량 증가, 에어로겔 내부 수분 및 페이스트 침투에 따른 단열성능 저하 등의 문제점을 발생시킬 수 있음.
- 유럽에서는 17개 산업체가 참여하는 'H-house' 프로젝트를 통하여 2015년도부터 에어로겔 혼입 기포콘크리트에 대한 연구를 수행하고 있지만 아직 개념정립 단계임.
- 에어로겔을 활용한 기포 콘크리트의 배합품질 확보 및 단열성능 향상을 위해서는 표면기능화된 나노캡슐 에어로겔의 제어가 반드시 필요함.

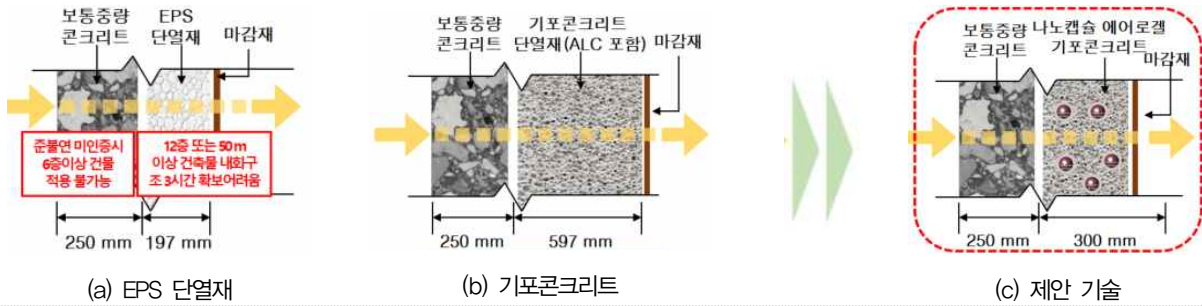


그림. 3 열관류율 0.21 W/m² · K를 만족하기 위한 단열재 종류에 따른 두께 변화



(a) 외벽 단열재로 인한 화재 확산



(b) 가연성 단열재에 의한 화재 확산(대구)

그림. 4 유기단열재에 의한 화재확산 사고사례

- 나노 에어로겔의 표면처리 기술 및 이를 활용한 최적의 기포콘크리트 배합기술은 고단열 기포콘크리트의 핵심 원천기술임. 이 아이디어의 검증 및 실용화를 위한 인프라 구축은 무기 단열재 시장에서의 경쟁력 제고 및 수출효과 등을 기대할 수 있음.

3. 연구개발 범위

※주관연구기관(경기대학교):

핵심 개발 목표	주요 연구활동	세부 연구내용
나노캡슐 에어로겔의 표면기능화 부여(콘크리트와의 결합 특성 향상)	■ 목표성능 및 주요 변수 설정	• 에어로겔의 표면처리 소재 및 방식에 대한 분석 • 에어로겔의 크기에 따른 콘크리트와의 배합조건 분석 • 표면처리된 에어로겔의 측정 방법 확립 • 나노캡슐 에어로겔의 친수성-소수성 제어 목표 설정
	■ 나노캡슐 에어로겔 소재 제작 최적화	• 기초 실험결과를 기반으로 성능 보안을 위한 나노캡슐 에어로겔 제작 • 에어로겔과 콘크리트와의 배합조건 최적화 • 나노캡슐 에어로겔의 친-소수성 전이 특성 최적화
	■ 나노캡슐 에어로겔의 콘크리트 배합 조건 최적화	• 에어로겔에 나노캡슐 부착 방식 연구 및 콘크리트와의 결합 기술 개발: 에어로겔에 나노캡슐 기능성 부여를 통한 친수성 에어로겔과 콘크리트의 결합 특성 향상(나노소재 분산조건 최적화) • 나노캡슐 에어로겔 특성 확보: 효과적인 단열성능, 방수성능 및 곰팡이 억제 기능성을 확보
기포율, 물-결합재비 및 혼화재 사용에 따른	■ 목표성능 및 주요 변수 설정	• 기초 실험결과와 분석 및 문제점 분석: 기초 실험결과에 대한 회귀분석 및 상호간의 영향성 예측, 문제점 발생에 따른 최적 해결 방안 모색

나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 물리·역학적 특성분석	■ 실내실험 및 특성 평가(2): 기포율 및 물-결합재비와 에어로겔 혼입량의 관계 중점.	• 기초 실험결과에 기반한 성능 보완 실내 배합실험 • 주요 변수: 물-결합재비, 기포율 등과 에어로겔 혼입량에 대한 상호간 구성비율 • 물리·역학적 특성평가 및 분석: 압축강도, 절건 밀도 및 열전도율의 분석결과를 집중적으로 수행-에어로겔 혼입에대한 영향성 분석 • 건조수축 거동 평가: 초기 및 장기 건조수축율 평가
	■ 나노캡슐 에어로겔 혼입 경량기포콘크리트 최적 배합설계 가이드라인 제시	• 에어로겔 혼입 기포 콘크리트의 성능예측 모델 제시 : 결합재, 압축강도, 절건밀도, 열전도율 및 기포율 대한 각 특성들간의 상관성 • 소요성능에 대한 나노에어로겔 혼입 기포 콘크리트의 배합설계 절차 제시

※공동연구기관(아이에스동서):

핵심 개발 목표	주요 연구활동	세부 연구내용
나노캡슐 에어로겔 ALC의 최적 양생기법 제시 및 단기 실용화 기반 구축	■ 목표성능 및 주요 변수 설정	• 실험재료 물성평가 기반 나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC 전용 결합재 선정 및 최적의 에어로겔 혼입 양 결정 : 실험변수별 압축강도 발현 및 열전도율 등 특성 분석
	■ 실내 실험(결합재 종류 및 양생방법 중점)	• ALC의 결합재 종류 및 구성 비율에 대한 역학적 특성 평가: 시멘트 및 생석회양, 발포제의 구성비율 • 고온고압하의 ALC 기술 확장을 위한 나노캡슐 에어로겔 첨가 영향 평가: 에어로겔 적용에 따른 압축강도, 절건밀도, 열전도율 및 체적변화 • 양생방법에 따른 압축강도 발현 및 방수성 특성 평가 • 미세구조 및 수화생성물 평가: 결합재 및 에어로겔 혼입량에 따른 공극구조 및 수화생성물 분석
	■ 실내 실험(에어로겔 혼입량 및 양생방법에 따른 강도특성 및 열전도율 중점)	• 양생 방법에 따른 강도발현 및 열전도율 평가 • 주요변수 : 양생 온도 및 양생 압력 • 나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC 블록 적용성 평가 : 에어로겔 혼입량 및 결합재 비율 • 양생 방법에 방수성능 변화 평가 • 미세구조 및 수화생성물 평가 : 양생조건에 따른 나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC의 미세구조 및 수화생성물 분석
	■ 실내 실험의 성과 분석에 기반한 산업화 방향 설정	• 성과 기술의 경제성 평가 및 산업화 타당성 검토 • 현재 운영 중인 공장부지에 기술의 사업화를 위한 설비투자 타당성 검토 • 미래 기술산업화 요구에 부응하는 제품의 성능화 및 다변화 정립

제2장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구 수행 내용

I

나노캡슐 에어로겔의 표면기능화 부여(콘크리트와의 결합 특성 향상)

1) 에어로겔의 나노캡슐 소재 선정관련 성능실험

(1) 목적

- 소수성 에어로겔을 친수성으로 표면개질하기 위해서는 열처리 등을 통한 자체 친수성을 가진 에어로겔 소재를 제조하거나, 친수성-소수성 기능을 동시에 포함하는 계면활성제 같은 소재가 소수성 에어로겔의 표면과 물리결합 할 수 있는 소재를 선택하여야 함. 소수성인 알킬의 길이 제어에 따른 나노캡슐 소재 두께 제어 및 분자량 및 농도 제어를 통해 적절한 흡윤성을 갖는 나노캡슐 에어로겔 소재를 선정함.

(2) 연구 수행 방법

- 열처리 등을 통한 친수성 실리카 에어로겔 또는 알루미늄 에어로겔을 선택함.
- 알킬 길이제어: 친수-소수성 기능을 모두 포함하고 있는 양쪽성 소재 중에서 알코올(알킬-수산화기), 계면활성제 (알킬-이온염), 친수성 폴리머 (알킬 주사슬-친수성 기능기)으로 구성되어 소재를 선정함. 특히, 친수성 폴리머의 경우 분자량을 다양하게 하여 알킬 주사슬의 길이를 제어함.
- 농도 및 분자량 제어: 에어로겔 질량 대비 나노캡슐 소재의 농도로 제어함.
- 친수성-소수성 결합을 강화시킬 수 있는 그 외 소재 점검: 탄산수, 물유리.

(3) 연구결과

□ 실리카 에어로겔의 미세 가공 확인

- 실리카 에어로겔의 미세가공 평가를 위하여 nitrogen adsorption/desorption isotherms와 pore-size distribution을 진행하였음. BET 측정 결과, surface area는 $643.24 \text{ m}^2/\text{g}$, total pore volume은 $2.634 \text{ cm}^3/\text{g}$, mean pore diameter는 16.379 nm 로 나타남. 에어로겔 내부에 분포한 미세 가공 크기측정에는 BET (BELSORP-mini II, MicrotracBEL Corp)를 사용함(그림 5)).

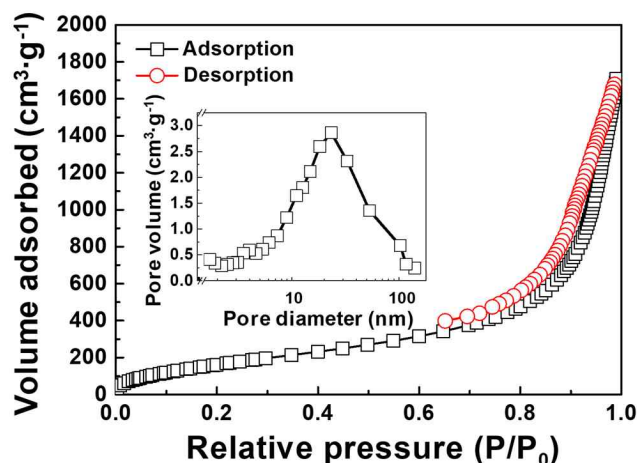


그림 5. 실리카 에어로겔의 BET 측정 결과

□ 친수성 에어로겔로 표면치환

■ 열처리한 실리카 에어로겔, 알루미늄 에어로겔을 사용함.

- 실리카 에어로겔의 경우 300도부터 600도까지 열처리를 한 결과 600도 이상에서 에어로겔 표면의 소수성 알킬이 분해되어 친수성 수산화기만 남아 친수성을 띄게 됨을 확인. 알루미늄 에어로겔의 경우 150 메쉬의 (89 um 이하) 크기를 가진 입자에 5.8 nm의 기공이 있는 에어로겔을 사용함.
- 친수성인 실리카 에어로겔과 알루미늄 에어로겔을 사용할 경우 강도가 모두 증가하고 첨가량이 증가함에 따라 강도도 증가하지만 무게도 같이 증가함. 에어로겔의 기공 내부까지 친수성 표면으로 치환되어 물의 침투가 쉽게 되고 따라서 에어로겔의 기공효과가 사라짐(표 3)).
- 친수성 에어로겔의 양이 증가할수록 무게와 강도 함께 증가하는 경향이 있음.

□ 나노캡슐 에어로겔 코팅 소재 선정

■ 알코올 (Alcohol)

- 짧은 알킬길이를 가진 에탄올 (C_2H_6O)과 데칸올 ($C_{10}H_{22}O$)을 사용하여 두께가 얇은 나노캡슐을 형성함.
- 알킬의 길이가 짧고 분자량이 작아 에어로겔의 표면에 침투되는 양이 많음. 오랜 시간을 두면 에어로겔이 겔화가 되어 에어로겔의 미세기포양을 감소시킴. 길이가 짧은 에탄올에서 더 높은 강도가 발현됨. 에어로겔 대비 1:1, 1:2, 1:3 비율로 에탄올을 첨가했을 때 대부분 강도가 증가하지만 에탄올이 너무 과량으로 들어갔을 경우 오히려 강도를 저하시킴(표 4)).
- 물과 에탄올 비율별로 에어로겔과의 혼합 정도 확인. 혼합 직후는 물:에탄올=6.5:3.5 비율까지 균일하게 모두 혼합되지만, 시간이 더 오래 혼합할수록 8.5:1.5 비율까지도 일부 혼합되는 양상을 보임. 30분 이상 오래 혼합하면 5.3:4.5 비율 이하에서 보이는 것처럼 에어로겔 습윤젤 형태가 되어 침전됨(그림 6)).

표 3. 친수성 에어로겔에 따른 강도

시멘트		에어로겔		물	첨가물		결과		
부피(ml)	질량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	강도(MPa)	기타
72	227.024	—	—	93	—	—	230	29.7	Ref.
		친수성 실리카 에어로겔	6.108	93	—	—	200	22.3	
			18.324		—	—	219	38.3	
			친수성 알루미나 에어로겔		3.054	—	—	232	42.7

표 4. 알코올의 농도 및 알킬 길이에 따른 강도

시멘트		에어로겔		물	첨가물		결과		
부피(ml)	질량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	강도(MPa)	기타
72	227.024	-	-	93	-	-	230	29.7	Ref.
		소수성 에어로겔	6.108	93	-	-	170	17.9	소수성 에어로겔 시멘트
				93.5	에탄올	6.108	196	36.9	에어로겔:에탄올 =1:1
				91.6	에탄올	12.216	198	31.8	에어로겔:에탄올 =1:2
				89.6	에탄올	18.324	181	22.3	에어로겔:에탄올 =1:3
				93	데칸올	6.108	198	24.1	에어로겔:데칸올 =1:1

■ 계면활성제 (Surfactant)

- 중간 알킬길이를 가지는 도데실황산나트륨 (Sodium dodecyl sulfate, $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$, 음이온 계면활성제), 도데실벤젠술포산나트륨 (Sodium dodecyl benzene sulfonate, $\text{C}_{18}\text{H}_{29}\text{NaO}_3\text{S}$, 음이온 계면활성제), ALKANOL (비이온 계면활성제), 일반 세제(음이온, 양이온, 비이온 계면활성제의 혼합물), 동물성 기포제 (동물성각질로 분해된 천연고분자 물질, 독립기포)를 사용하여 중간 두께의 나노캡슐을 형성함(그림 7)).
- 계면활성제의 종류에 따른 물에 대한 분산도는 ALKANOL의 경우에만 일부 분산되고, 나머지 도데실황산나트륨, 도데실벤젠술포산나트륨, 동물성 기포제는 분산이 잘 일어남(그림 8)).
- 강도 발현이 가장 높은 것은 도데실황산나트륨이었으며 과량의 계면활성제가 첨가될 경우 강도는 감소(표 5)).
- 기포콘크리트 제조 시 사용되는 기포제인 동물성 기포제와 다른 종류의 기포가 혼합되었을 경우, 알킬의 길이 및 이온염 부분의 종류가 달라 독립기포를 형성하고 있는 기포의 안정도를 저하시킴. 따라서, 기포 콘크리트용 계면활성제로는 기포콘크리트에 사용되는 기포제와 동일한 동물성 기포제를 선택함.

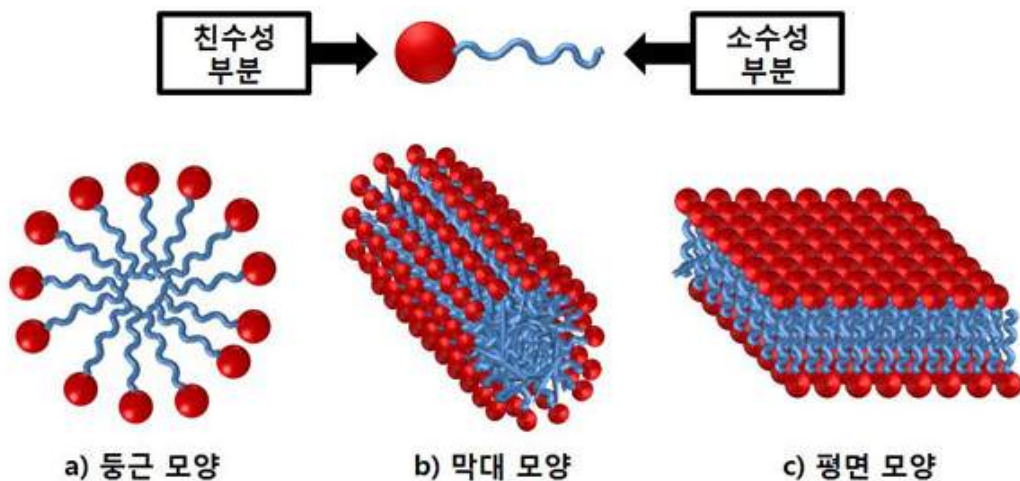


그림 6. 계면활성제의 구성성분 및 농도에 따른 미셀(micelle) 구조



그림 7. 물과 에탄올 비율에 따른 에어로겔의 혼합 변화

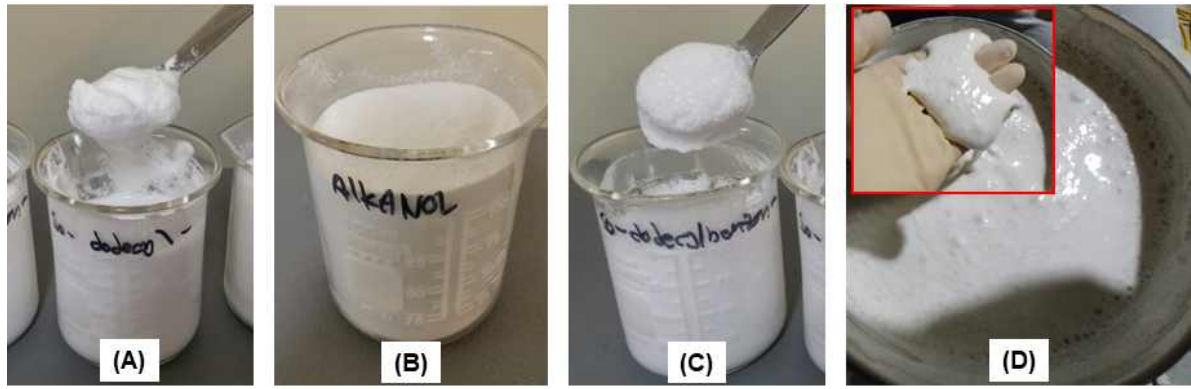


그림 8. 계면활성제 소재에 따른 나노캡슐 에어로겔의 제형 이미지 (A) 도데실황산나트륨, (B) ALKANOL, (C) 도데실벤젠술폰산나트륨, (D) 동물성 기포제

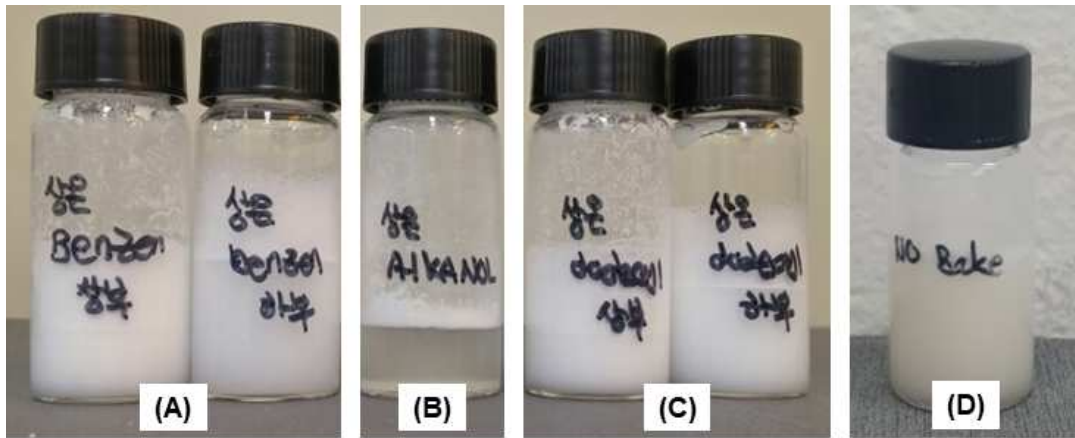


그림 9. 나노캡슐 에어로겔의 물에 대한 분산도 (A) 도데실벤젠술폰산나트륨, (B) ALKANOL, (C) 도데실황산나트륨, (D) 동물성 기포제

표 5. 계면활성제 종류 및 농도에 따른 강도

시멘트		에어로겔		물	첨가물		결과		
부피(ml)	질량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	강도(MPa)	기타
72	227.024	-	-	93	-	-	230	29.7	Ref.
		소수성 에어로 겔	6.108	93	-	-	170	17.9	소수성 에어로겔 시멘트
				93	도데실 황산나트륨	0.5	173	23.1	
				93.5	도데실 황산나트륨	1	175	26.3	
				93	도데실 황산나트륨	2	198	18.3	
				91.6	도데실벤젠 술폰산나트 륨	1	175	25.8	
				89.6	ALKANOL	1	180	19.4	
				93	일반 세제	1	167	20.9	
				93	동물성 기포제	1	156	15.6	

■ 친수성 폴리머 종류

- 가장 대표적인 친수성 폴리머인 폴리비닐알콜 (Poly(vinyl alcohol), PVA)과 폴리비닐피롤리돈 (Polyvinylpyrrolidone, PVP)을 사용하여 가장 두꺼운 나노캡슐을 형성함.
- 각각의 친수성 폴리머의 경우 분자량에 따라 알킬 주사술의 길이가 증가하고, 동시에 친수성 기능기도 함께 증가함. 알킬 주사술이 소수성의 에어로겔을 감싸고 친수성 기능이 외부로 돌출된 형태의 구조로 나노캡슐을 형성함. 분자량이 큰 폴리머 구조상 에어로겔의 미세가공 안으로 침투하지 않고 표면처리만 가능 할 것으로 판단함.
- 일반적으로 분자량이 클수록 에어로겔의 가공에 침투하지 않은채 나노캡슐화되기 때문에 경량 시멘트 제조가 가능함. 분자량에 따라 적정량의 첨가물 농도가 달라짐. 분자량이 클수록 첨가량이 증가함. 최고 강도는 폴리비닐피롤리덴 (PVP) 분자량 130만에서 발현되었지만, 분자량이 높을수록 물에 대한 용해도가 낮아서 코팅 용액을 만들기 어려움(표 6)).

■ 그 외 소재 및 복합소재

- 친수-소수성 결합을 강화시킬 수 있는 탄산수, 물유리 및 복합 소재 선택(표 7)).
- 탄산수의 탄산이 포틀랜드 시멘트의 초기 포졸란 결합을 촉진시켜 초기 강도를 높여 친수-소수성 결합을 강화시키고자 함. 배합수로 물을 넣는 것보다는 약간 증가하였지만 큰 증가는 보이지 않았고 에탄올과 복합적으로 첨가했을 경우 오히려 강도를 저하시킴.

표 6. 친수성 폴리머 종류 및 분자량, 농도 제어에 따른 강도

시멘트		에어로겔		물	첨가물		결과		
부피(ml)	질량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	강도(MPa)	기타
72	227.024	-	-	93	-	-	230	29.7	Ref.
		소수성 에어로 겔	6.108	93	-	-	170	17.9	소수성 에어로겔 시멘트
					PVA, MW=~15만	0.5	170	22.0	
						1.	175	22.7	
						1.5	168	25.9	
					PVA, MW=~9만	1	180	21.8	
					PVA, MW=~5만	0.2	180	22.4	
						0.3	182	24.9	
						1	184	20.7	
						2	168	16.6	
						3	182	16.7	
					PVP, MW=~130 만	0.5	172	20.6	
						1	166	19.0	
						1.5	172	29.6	
					PVP, MW=~5.5 만	0.2	181	20.46	
						0.3	179	21.035	
						1	181	22.06	
						2	180	19.52	
						3	188	23.7	
					PVP, MW=~1만	1	170	17.96	
						2	182	25.415	
						3	181	22.235	

- 물유리의 경우 에어로겔의 전구체로 사용되는 물질로 에어로겔과 친화력이 있고 친수성이라 시멘트와 결합력이 강할 것으로 추측. 건조시 방수 기능이 발현된다고 조사됨. 실험결과 물유리를 섞은 경우 시멘트의 건조가 매우 느려져 에어로겔과 시멘트의 혼합을 오히려 방해하여 강도 저하됨.

2) 에어로겔의 크기 및 배합조건에 따른 콘크리트와의 배합조건 실험

(1) 목적

- 에어로겔과 시멘트의 혼합 시, 에어로겔의 입자 크기와 강도와의 상관관계를 연구함.
- 에어로겔과 시멘트의 배합조건을 조절하여 강도와의 상관관계를 연구함.

(2) 연구 수행 방법

- 5, 20, 200 μ m 크기의 에어로겔을 시멘트 부피 대비 100%이상 혼합 및 압축강도 분석.
- 나노캡슐 에어로겔 소재 중에 강도발현이 높은 에탄올 소재를 첨가하여 입자 크기에 따른 강도 차이가 있는지 확인.
- 에탄올의 첨가량만큼 배합수에서 제거했을 경우와 비교.

(3) 연구결과

- 나노캡슐 에어로겔 소재 중에 에탄올 등과 혼합하여 중간크기인 20 μ m 에어로겔을 사용한 실험 조건들과 결과 비교. 첨가제를 혼합하지 않았을 경우 입자 크기가 클수록 강도가 커짐. 200 μ m를 첨가한 부분에서는 강도가 예상보다 많이 커져서 재확인 필요 <표 8>
- 가장 강도발현이 높은 소재였던 에탄올과 함께 혼합하였을 경우, 오히려 입자크기가 가장 작은 5 μ m 크기의 에어로겔이 가장 강도가 높고 입자가 커질수록 강도가 감소하는 경향을 보임.

표 7. 친수-소수성 결합을 강화시킬 수 있는 소재 및 복합소재

시멘트		에어로겔		물	첨가물		결과		
부피(ml)	질량(g)	종류	종량(g)	종량(g)	종류	종량(g)	종량(g)	강도(MPa)	기타
72	227.024	-	-	93	-	-	230	29.7	Ref.
		소수성 에어로 겔	6.108	93	-	-	170	17.9	소수성 에어로겔 시멘트
				-	탄산수	96	176	20	
				-	탄산수	92.3	182	22.9	에탄올만 넣은것보다 강도 저하됨
					에탄올	12.216			
				107.5	물유리	12.216	164	7.7	에어로겔:물유 리=1:2
				96.5	물유리	12.216	222	15.6	에탄올만 넣은것보다 강도 저하됨
					에탄올	12.216			
				106.1	물유리	116.0	170	2.7	시멘트:물유리 =2:1

- 5 μm 크기의 에어로겔을 FE-SEM으로 측정한 결과, 입자사이즈는 평균 5-6 μm 로 확인됨. 에어로겔 입자 크기 측정은 FE-SEM (S-4800, HITACHI)를 사용함(그림 10)).
- 에탄올의 첨가량만큼 배합수를 감소시켰을 때가 시멘트/물 비가 감소하면서 강도가 약간 증가함.

3) 최적의 에어로겔의 표면처리 방식에 대한 연구

(1) 목적

- 친수성이며 무거운 시멘트와 소수성의 가벼운 에어로겔의 혼합 시, 표면에너지 및 밀도 차이로 인해 에어로겔이 시멘트와 섞이지 않고 공기 중으로 소실되는 어려움이 존재함. 따라서 에어로겔과 시멘트의 선 혼합 및 선 물리적 결합이 이루어져야 함.

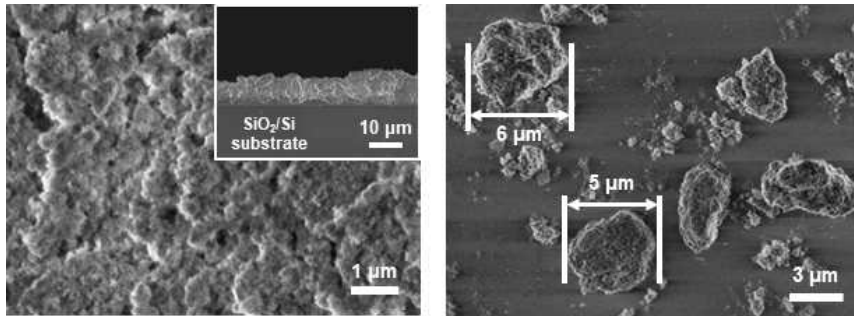


그림 10. FE-SEM 측정을 통한 에어로겔 크기 확인 결과

표 8. 에어로겔의 크기 및 배합조건 따른 강도 비교

시멘트		에어로겔		물	첨가물		결과		
부피(ml)	질량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	종류	중량(g)	중량(g)	강도(MPa)	기타
72	227.024	-	-	93	-	-	230	29.7	Ref.
		소수성 에어로겔	6.108	93	-	-	170	17.9	소수성 에어로겔 시멘트 (20 μm)
					-	-	154	16.2	5 μm 에어로겔
					-	-	189	31.4	200 μm 에어로겔
					에탄올	6.108	216	35.3	5 μm 에어로겔
							224	31.5	20 μm 에어로겔
	220.5	소수성 에어로겔	6.108	93	에탄올	6.108	226	31.0	200 μm 에어로겔
70	227.024	소수성 에어로겔	4.20	90.8	에탄올	8.40	184	37.0	5 μm 에어로겔, 에탄올양만큼 배합수 제거
				86.6		12.6	182	27.0	5 μm 에어로겔, 에탄올양만큼 배합수 제거
				82.4		16.8	181	20.7	5 μm 에어로겔, 에탄올양만큼 배합수 제거

(2) 연구 수행 방법

- 에어로겔을 나노캡슐 소재와 선 혼합 또는 물리적 결합을 시키는 방법으로 졸-겔 혼합방식, 열처리된 파우더 혼합방식, 스프레이 건조 혼합방식, 나노캡슐이 코팅 된 에어로겔의 에멀전 혼합방식 등을 검토 후 혼합방식 확립.

(3) 연구결과

□ 졸-겔 혼합방식

- 에탄올처럼 분자량이 작은 물질의 경우 소수성의 에어로겔의 기공에 침투하면서 졸-겔 상태의 에어로겔이 형성됨. 이를 과량의 에탄올은 제거한 후 고체상태만 시멘트와 혼합. 에어로겔 안에 침투한 에탄올양 자체가 너무 과량이라서 강도가 현저하게 감소됨.

□ 열처리된 파우더 혼합방식

- 에탄올, 계면활성제, 친수성 폴리머 용액과 혼합한 에어로겔을 건조 후 파우더 형태로 시멘트와 혼합. 액체상태에서는 친수성이지만 건조하면서 나노캡슐 소재가 수축하고 소수성 에어로겔이 표면에 노출되면서 친수-소수성 표면이 공존하는 에어로겔 나노캡슐 형태가 됨. 소수성 에어로겔 보다는 혼합이 잘 되지만 완벽하게 친수성을 만들지는 못함. 너무 양이 많아지면 에어로겔에 묻지않고 건조된 나노캡슐 소재가 많아서 표면처리된 에어로겔만 분리해 내기 어려움.

□ 스프레이 건조 혼합방식

- 계면활성제 용액 또는 친수성 폴리머 소재를 가열된 소수성 에어로겔 위에 스프레이 후 건조하여 얇은 나노캡슐막을 형성 하고자 함. 에어로겔이 너무 가벼워서 스프레이되는 용액에 의해 공기 중으로 소실되는 양이 너무 많아서 코팅하기 어려움.

□ 나노캡슐이 코팅 된 에어로겔의 에멀전 혼합방식

- 최소한의 배합수로 최소한의 나노캡슐 소재를 사용하여 에멀전 형태로 제조함. 이때 격렬한 혼합 (vigorous mixing)을 해야 나노캡슐이 용해되어있는 용액이 밀도가 낮아서 위층으로 층분리되어있는 에어로겔과 혼합할 수 있음. 초기 혼합시 공기중으로 분산되는 에어로겔의 소실을 막기위해 closed 상태에서 혼합을 진행하며 수분 후 충분히 에어로겔에 나노캡슐 소재가 묻으면 에멀전 형태로 고르게 분산시킴(〈그림 11〉).

4) 표면처리된 나노캡슐 에어로겔의 친수성-소수성 측정방법 확립

(1) 목적 및 연구 수행 방법

- 친수성으로 표면처리가 된 나노캡슐 에어로겔 최적 상태의 분석
- FT-IR로 소수성 에어로겔 표면에 물리적 결합되어 있는 기포제 성분을 분석함.
- 에멀전 형태의 나노캡슐 에어로겔을 물에 분산시켜 물에 대한 혼합 여부로 친수성을 확인.

(2) 연구결과

- FT-IR 분석결과 동물성 기포제 성분의 알킬 부분인 $1639, 1557, 1407\text{ cm}^{-1}$ 의 peak이 나노캡슐 에어로겔의 FT-IR spectrum에서도 같은 위치에서 보이며, 소수성 에어로겔의 알킬 peak인 1351 cm^{-1} 에서 보이던 peak이 나노캡슐 에어로겔에서는 존재하지 않는 것이 확인됨. 따라서 소수성 에어로겔의 알킬이 동물성 기포제의 소수성 부분과 물리적 결합 하면서 나노캡슐이 형성됐음을 FT-IR 분석 결과의 알킬 peak 변화로 확인할 수 있음(그림 12).
- 기포제 <그림 13(A)>와 소수성 에어로겔 <그림 13(B)>을 물과 함께 섞으면 에멀전 형태의 나노캡슐 에어로겔 <그림 13(C)>이 형성 됨. 제조된 나노캡슐 에어로겔은 오랜 시간 두어도 에멀전 형태의 변화가 생기지 않고 층분리가 되지 않는 것을 확인함. <그림 13(D)>에서 보는 것처럼 물에 분산시켰을 때도 제조한 시간에 관계없이 고르게 분산됨을 확인함.



그림 11. 기포제 양에 따른 나노캡슐 에어로겔의 혼합형태

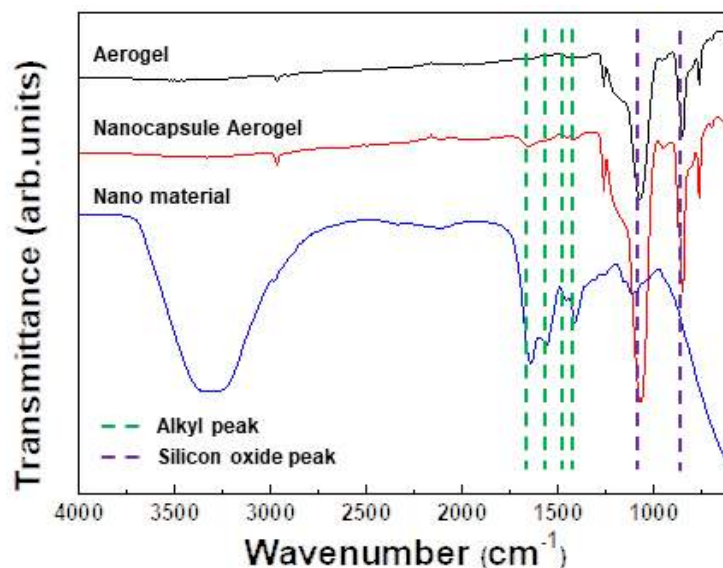


그림 12. 나노캡슐 에어로겔 (Nanocapsule Aerogel)의 FT-IR graph



그림 13. 나노캡슐 에어로겔의 소재 및 에멀전 형태, 물에 분산상태의 이미지

5) 소수성 나노캡슐 에어로겔의 친수성으로 특성 전이 실험

(1) 목적

- 나노캡슐 에어로겔은 소수성 특성을 가지고 있어 콘크리트에 배합 시 첨가되는 물로 인해 섞이지 못하고 분리됨. 이에 콘크리트와의 배합 용이성을 위해 친수성의 나노캡슐 에어로겔이 필요함.

(2) 연구배경

- 합성된 나노캡슐 에어로겔은 많은 기공을 포함하고 있으며 표면에 부착 된 화학기에 의하여 소수성 특성을 가짐. 이에 열처리를 통해 소수성을 발현시키는 화학기를 제거하여 나노캡슐 에어로겔을 친수성으로 변화시키고자 함.

(3) 실험 계획

- 나노캡슐 에어로겔을 CVD 챔버를 이용하여 상압에서 고온으로 한 시간동안 열처리 진행.
- 열처리 조건: 400°C, 500°C, 600°C, 대기압, 한 시간 유지.
- 접촉각 측정을 위해 나노캡슐 에어로겔을 기판에 부착시킨 후 분석 진행.

(4) 실험 결과 및 분석

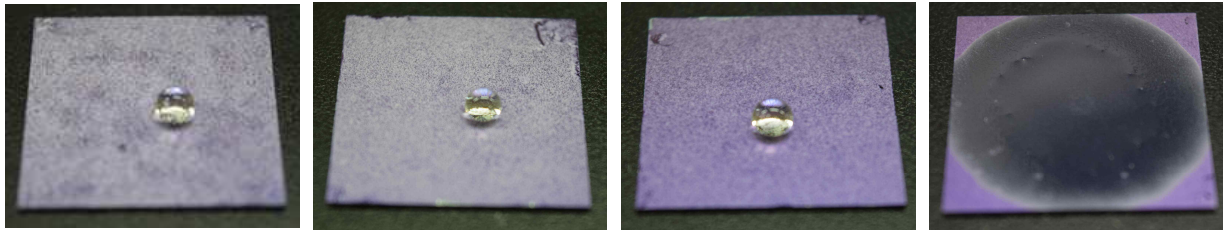
□ 접촉각 특성

- 400°C, 500°C의 열처리 후에는 초기의 접촉각 ($\sim 152^\circ$)이 유지됨(그림 14).
- 600°C 열처리 후 소수성을 잃고 친수성의 특성을 보임. 접촉각 측정 결과 0° (그림 15).

□ 결론

- 500°C 열처리까지는 나노캡슐 에어로겔의 소수성 특성 유지하여 접촉각 변화 없음

- 600℃ 열처리 후 소수성 나노캡슐 에어로겔이 친수성으로 변화함.
- 이에 콘크리트로의 적용을 위해선 600℃ 이상 열처리를 통해 친수성으로 특성을 변화시킨 나노캡슐 에어로겔을 이용해야 함.



(A) Pristine

(B) 400℃

(C) 500℃

(D) 600℃

그림 14. 열처리 후 나노캡슐 에어로겔의 소수성-친수성 이미지

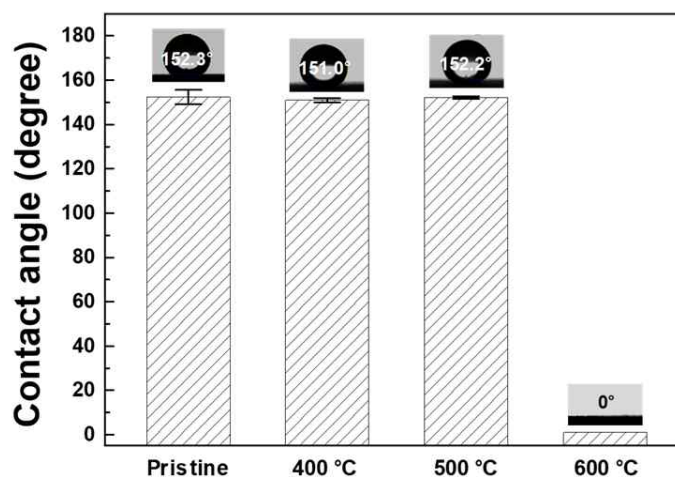


그림 15. 열처리에 따른 접촉각 특성 변화

6) 기포콘크리트 제작 후, 시중 판매되는 고단열 소재 용액 코팅

(1) 목적

- 단열 성능이 가장 좋은 배합설계의 기포콘크리트 타설 후, 압축강도는 그대로 유지하면서 단열 성능을 강화 시킬 수 있는 고단열 소재를 기포콘크리트의 기공에 침투시켜 코팅함으로써 추가적인 단열 성능을 향상시키고자 함.

(2) 연구배경

- 기포콘크리트는 시멘트 슬러리 속에 미리 생성된 기포를 혼합시켜 제조한 콘크리트로서 동일한 체적의 보통 콘크리트보다 많은 기공을 포함하고 있어 가볍고 단열 성능을 높게 만든 콘크리트임. 본 연구에서는 기포콘크리트에 포함된 수많은 기공에 고단열의 용액을 침투시킨 후 건조시키는 후처리 과정을 추가하여 본 연구의 최적 배합된 기포콘크리트의 압축강도는 유지하면서 단열 성능을 $0.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이하로 달성하고자 함.

(3) 연구결과

□ 실험 조건 1

- 기포콘크리트: 압축강도 ~ 0.4 MPa, 열전도율 $0.101 \sim 0.119$ W/m · K의 성능을 가지는 기포콘크리트를 사용함.
- 단열코팅 소재: 시중에 판매되는 단열용액 2종류.
- 단열코팅 농도: 시판 용액을 1/3 농도로 물로 희석하여 사용함.
- 단열코팅 방법: 희석용액하에서 약 30분씩 sonication하여 코팅함.
- 코팅 횟수: 1회

□ 실험결과 및 분석

- 압축강도: 코팅 용액 종류에 관계없이 압축강도 수치 유사함(표 9)).
- 열전도도: 2가지 용액에서 모두 열전도율 최고 $\sim 28\%$ 최저 $\sim 21\%$ 감소함. 용액 1과 용액 2의 단열 효과가 비슷함(표 10)).

□ 실험 조건 2

- 기포콘크리트: 압축강도 0.7 MPa, 열전도율 0.110 W/mK의 성능을 가지는 기포콘크리트를 사용함.
- 단열코팅 소재: 시중에 판매되는 단열 용액 2종류 및 시판 물유리 (3호)를 사용함.
- 단열코팅 농도: 희석하지 않고 원액을 그대로 사용함.
- 단열코팅 방법: 약 30분씩 sonication 또는 용액을 부어서 코팅함.
- 코팅 횟수: 1회

표 9. 압축강도 측정 (코팅 10일차)

	Before coating	After coating
용매 1 (열차단 수지)	0.38	0.36
용매 2 (유리단열코팅액)	0.42	0.42

표 10. 단열 측정 (코팅 10일차, 39일차)

	Before coating	After coating (건조 10일 후)	After coating (건조 39일 후)
용매 1 (열차단 수지)	0.119	0.090	0.086
	0.126	0.096	0.105
용매 2 (유리단열코팅액)	0.101	0.084	0.080
	0.118	0.095	0.089

□ 실험결과 및 분석(〈표 11〉 및 〈그림 16〉)

- 열차단 수지 (용액 1): 압축강도 (코팅전과 유사하게 유지), 열전도율 ($\sim 30\%$ 감소, 최소값 $0.077 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), 고분자 수지라서 코팅표면이 잘 건조되지 않아 미관상 좋지 못함.
- 유리단열코팅액 (용액 2): 압축강도 (코팅전과 유사하게 유지), 열전도율 ($\sim 25\%$ 감소, 최소값 $0.082 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), 코팅표면이 잘 건조되어 미관상 변화가 크지 않음.
- 물유리 (용액 3): 압축강도 (코팅전보다 약간 증가), 열전도율 ($\sim 30\%$ 감소, 최소값 $0.078 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), 유리질의 형상이 표면에 코팅되어 약간의 광택이 부여됨.

(4) 결론

- 시중에 판매되는 열차단 수지 (용액 1)의 경우 단열 효과는 좋았지만 판매가격이 비싸고, 고분자 수지라서 코팅표면이 잘 건조되지 않아 미관상 좋지 못함.
- 시중에 판매되는 유리단열코팅액 (용액 2)의 경우 단열 효과는 용액 1보다 좋지 않았지만 코팅표면이 잘 건조되어 미관상 변화가 크지 않고, 가격이 비쌈.
- 시중에 판매되는 물유리 (용액 3)의 경우 가격이 싸고, 단열 효과가 좋음. 단, 물유리가 건조되면서 유리질의 형상이 표면에 코팅되어 약간의 광택이 부여됨.
- 물유리를 희석하여 미관을 좋게하고, 코팅 횟수를 늘려 코팅효과를 보강하고자 함.
- 기포콘크리트에 단열 코팅용액의 후처리 공정으로 단열 향상 효과 확인.

표 11. 강도 및 단열 측정 (원액코팅)

	코팅 방법	Before coating 압축강도 (MPa)	After coating 압축강도 (MPa)	Before coating 열전도율	After coating 열전도율
용액 1 (열차단 수지)	sonication	0.7	0.54	0.110	0.078
	용액붓기		0.80		0.077
용액 2 (유리단열코팅액)	sonication	0.7	0.58	0.110	0.082
	용액붓기		0.61		0.082
용액 3 (물유리)	sonication	0.7	0.89	0.110	0.078



(A)



(B)

그림 16. 단열코팅 용액에 따른 기포콘크리트 형상 확인. (A)용액 1 코팅 표면. (B) 용액 3 코팅 표면.

7) 기포콘크리트 제작 후, 합성한 고단열 소재 용액 코팅

(1) 목적

- 단열 성능이 가장 좋은 배합설계의 기포콘크리트 타설 후, 압축강도는 그대로 유지하면서 단열 및 방수 성능을 강화 시킬 수 있는 고단열 소재를 기포콘크리트의 기공에 침투시켜 코팅함으로써 추가적인 단열 및 방수 성능을 향상시키고자 함.

(2) 연구배경

- 기포콘크리트는 시멘트 슬러리 속에 미리 생성된 기포를 혼합시켜 제조한 콘크리트로서 동일한 체적의 보통 콘크리트보다 많은 기공을 포함하고 있어 가볍고 단열 성능을 높게 만든 콘크리트임. 기포콘크리트에 단열 코팅용액의 후처리 공정으로 단열 향상 효과를 확인하여, 본 연구에서는 단열 특성을 지닌 코팅용액을 합성하고, 기포콘크리트에 코팅함. 추가로 단열 특성을 지닌 코팅용액에 방수 성능을 부여하여, 단열 성능 및 방수 성능을 동시에 부여하고자 함.

(3) 연구결과

□ 방수 성능 부여

- 방수 성능 시멘트 제조 방법: 시멘트 배합시, 강염기의 시멘트에 의해 소량 첨가된 methyltrimethoxysilane (MTMS)가 촉매반응하여 공기중에 노출된 시멘트 표면에 방수 성능을 부여함. (방수코팅 농도: 시멘트 대비 10, 5, 2.5, 0.5, 0.1%의 MTMS 첨가, 시멘트/물과 동시 혼합)
- 시멘트 혼합시, 균일하게 혼합되나 빨리 굳는 경향이 있음.
- 수화반응된 강염기의 시멘트에 의해 MTMS가 반응하면서 미세 기공이 생성되며, 첨가한 MTMS 농도에 관계없이 부피가 팽창되어 표면에 crack이 많이 존재하게 됨. 압축강도가 44% 감소함.
- 표면에 미세 기공이 추가로 생성되면서 열전도도가 ~63%가 감소함(표 12)).
- 건조된 시멘트를 절단하면 표면에서 10 mm 이내는 매우 소수성을 띄며, 안쪽은 초기에는 물이 스며들었으나 공기중에 하루 정도 노출시키면 안쪽까지 다시 방수 특성이 부여됨. 겉부터 건조가 되어 소수성이 발현되면서 안쪽의 건조가 늦어서 방수 특성이 늦게 발현된 것으로 판단(그림 17)).
- 기포콘크리트에 혼합시 안쪽까지 잘 건조되면 방수 성능을 보일 것으로 판단.

표 12. 방수 성능 부여 시멘트 (MTMS)의 강도 및 단열 측정

	MTMS 농도 (%) (시멘트 대비)	압축강도 (MPa)	단열 (W/mK)
시멘트 (Ref.)	0	48.6	0.611
MTMS	5	27.4	0.231

□ 단열 소재 합성 및 특성평가

- 에어로겔 전구체 합성: Tetraethyl orthosilicate (TEOS)와 소수성 특성 부여 특성을 지닌 MTMS를 1:1 비율로 혼합하여 졸-겔 합성으로 에어로겔 전구체를 합성함.
- 기존 기포콘크리트 표면에 스프레이 코팅하여 방수 성능 및 단열 효과 확인.
- 기포콘크리트 표면에만 방수 코팅 됨. 에어로겔 전구체의 졸-겔 입자가 커서 기포콘크리트 내부의 미세 기공으로의 용액 침투가 적음(〈표 13〉).

□ 방수능력이 추가된 합성 단열소재 코팅 기포콘크리트 제조

- 기포콘크리트: 최적배합의 기포콘크리트를 사용함. (2종류 배합 사용)
- 단열코팅 소재: 희석된 물유리 (방수 성능은 없으나, 가격이 싸고, 압축강도 및 단열 성능이 우수), MTMS 용액 (강염기의 NaOH 수용액을 촉매로 사용), 에어로겔 전구체 (TEOS+MTMS)
- 단열코팅 방법: 용액 붓기 (첫번째 배합), 스프레이 방식 (두번째 배합) 사용.
- 코팅 횟수: ‘코팅+건조’ 을 1 cycle로 1, 2, 3회 코팅.
- 압축강도 및 열전도율 측정결과
 - 용액 붓기 코팅 결과: 코팅 횟수를 늘려 코팅효과를 보강하고자 하였으나, 코팅 횟수에 큰 변화를 보이지 않음. 용액 1 (MTMS)과 용액 2 (에어로겔 전구체)의 경우 둘다 표면 방수 특성을 보였으며, 단열 성능은 용액 2 (에어로겔 전구체)의 경우가 전반적으로 균일하고 낮은 열전도율을 보였음. 용액 3 (물유리 66% 희석 용액)의 경우, 가장 낮은 단열 수치를 보이긴 했으나, 균일도가 용액 2보다 떨어지며, 압축강도는 다른 용액 코팅보다 높음(〈표 14〉).
 - 스프레이 코팅 결과: 스프레이 코팅으로 코팅의 편의성을 추가하고 횟수를 늘려 코팅효과를 보강하고자 하였음. 코팅 횟수에 큰 변화를 보이지 않음. 스프레이 코팅도 용액 1 (MTMS)과 용액 2 (에어로겔 전구체)의 경우 둘다 표면 방수 특성을 보였으며, 용액 3 (물유리 66% 희석용액)의 경우, 가장 높은 압축강도를 보임. 열전도도는 측정결과 스프레이 코팅으로도 열전도율이 낮아지긴 했으나, 용액붓기로 제작한 시험체보다 열전도율이 높아 코팅 효율이 떨어지는 것으로 판단됨. (〈표 15〉).



그림 17. MTMS 혼입 콘크리트 실험 사진

표 13. ALC에 에어로겔 전구체 코팅 열전도율 측정 결과 (코팅 26일차)

	코팅 방법	열전도율 (W/mK)	비고
ALC	Ref	0.223	
용매 (에어로겔 전구체)	스프레이 1회	0.152	에어로겔 전구체도 단열 효과가 좋음 (방수효과 추가됨)

표 14. 용액 붓기 코팅 기포콘크리트의 압축강도 및 열전도율 측정 결과 (코팅 10일차)

	코팅 방법	Before coating 무게 (g)	열전도율 (W/mK)	압축강도 (MPa)
기포콘크리트	Ref.	1485	0.150	—
용액 1 (MTMS 용액)	용액 붓기 1회	1427	0.094	0.53
	용액 붓기 2회	1493	0.092	—
	용액 붓기 3회	1478	0.092	0.29
용액 2 (에어로겔 전구체)	용액 붓기 1회	1510	0.088	0.56
	용액 붓기 2회	1489	0.087	0.32
	용액 붓기 3회	1537	0.087	0.37
용액 3 (물유리 66% 희석)	용액 붓기 1회	1452	0.086	0.81/0.4 (차이 큼)
	용액 붓기 2회	1526	0.093	0.64/0.72 (차이 큼)
	용액 붓기 3회	1439	0.096	0.59/0.77 (차이 큼)

표 15. 스프레이 코팅 기포콘크리트의 압축강도 측정 결과 (코팅 18일차)

	코팅 방법	Before coating 무게 (g)	열전도율 (W/mK)	압축강도 (MPa)
기포콘크리트	Ref.	1518	0.150	—
용액 1 (MTMS 용액)	스프레이 1회	1437	0.099	0.40
	스프레이 2회	1526	0.095	0.47
	스프레이 3회	1468	—	0.58/0.29 (차이 큼)
용액 2 (에어로겔 전구체)	스프레이 1회	1527	0.098	0.37
	스프레이 2회	1491	0.098	0.37
	스프레이 3회	1423	0.095	0.36/0.5 (차이 큼)
용액 3 (물유리 66% 희석)	스프레이 1회	1405	0.107	0.56
	스프레이 2회	1469	0.104	0.45
	스프레이 3회	1384	0.105	0.60

□ 결론

- 합성한 단일 소재 용액 (MTMS, 에어로겔 전구체)의 성능이 시판 단일 용액들의 성능보다 유사하거나 우수한 것을 확인. 전체적으로 코팅 후 미관상 큰 변화가 없음.
- 특히, 용액 1 (MTMS 용액) 및 용액 2 (에어로겔 전구체 용액)의 경우 단일 특성뿐만 아니라 방수 성능이 발현되는 것을 확인.
- 코팅 횟수를 늘려 코팅효과를 보강하고자 하였으나, 코팅 횟수 증가에 큰 효과가 없음.
- 2가지의 코팅 방법이 둘다 열전도율을 감소시켰으나, 용액 붓기가 스프레이 코팅보다 코팅 효과가 좋음. 목표치를 만족하지 못하여 추가적인 코팅방법이 요구됨.
- 물유리를 이용한 코팅이 압축강도 (0.89 MPa)가 ~27% 증가되고, 열전도도 (0.078 W/mK)가 ~29% 감소한 결과로 가장 낮은 높은 성능을 보였음.
- 그림 18은 나노 에어로겔이 임베디드 된 기포 콘크리트의 적외선 분광 분석 결과임. 적외선 분광 분석은 절단된 기포 콘크리트 단면에서 선정된 9지점에서 샘플링하여 실시. 분석 결과 코팅된 기포 콘크리트 시험체에서 나노 에어로겔의 성분에 해당하는 Si-C 결합 및 Si-O-Si 결합 피크가 검출됨. 또한, 872 cm^{-1} 의 파수(wavenumber)에서는 Si-C 결합의

피크가 관찰되었으며, 960 cm^{-1} 의 파수에서는 Si-O-Si 결합의 피크가 나타남. 더불어 $1400\sim 1800\text{ cm}^{-1}$ 의 파수에서는 기포콘크리트 내부에 존재하는 기포제 및 단열 소재 용액의 알킬에 해당하는 C-H와 Si-CH₃의 피크가 나타남. 결과적으로 나노 에어로겔 용액이 기포 콘크리트로 임베디드 됨을 확인하였음.

나노캡슐 에어로겔 혼입 콘크리트

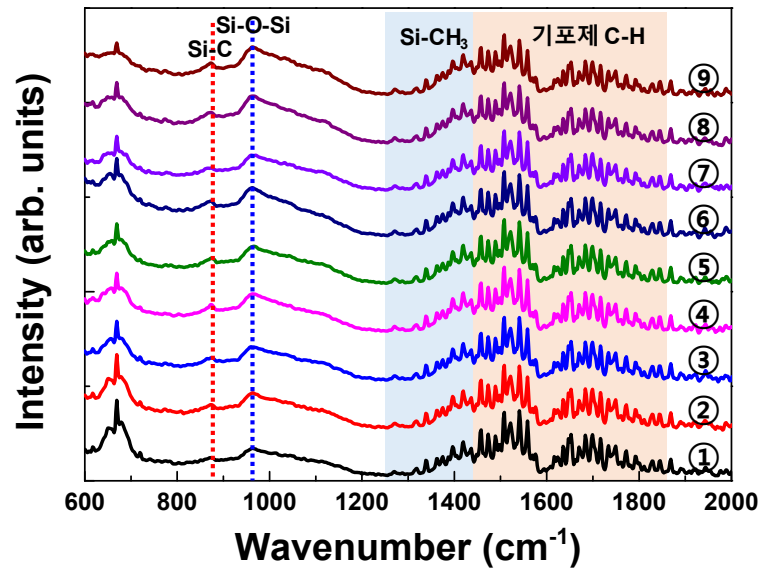


그림 18. 나노 에어로겔이 임베디드된 기포 콘크리트 내부의 FT-IR 분석 결과

1) 기포 콘크리트 관련 선행연구 분석, DB 구축 및 기포 콘크리트 특성에 영향을 미치는 요인 분석

(1) 목적

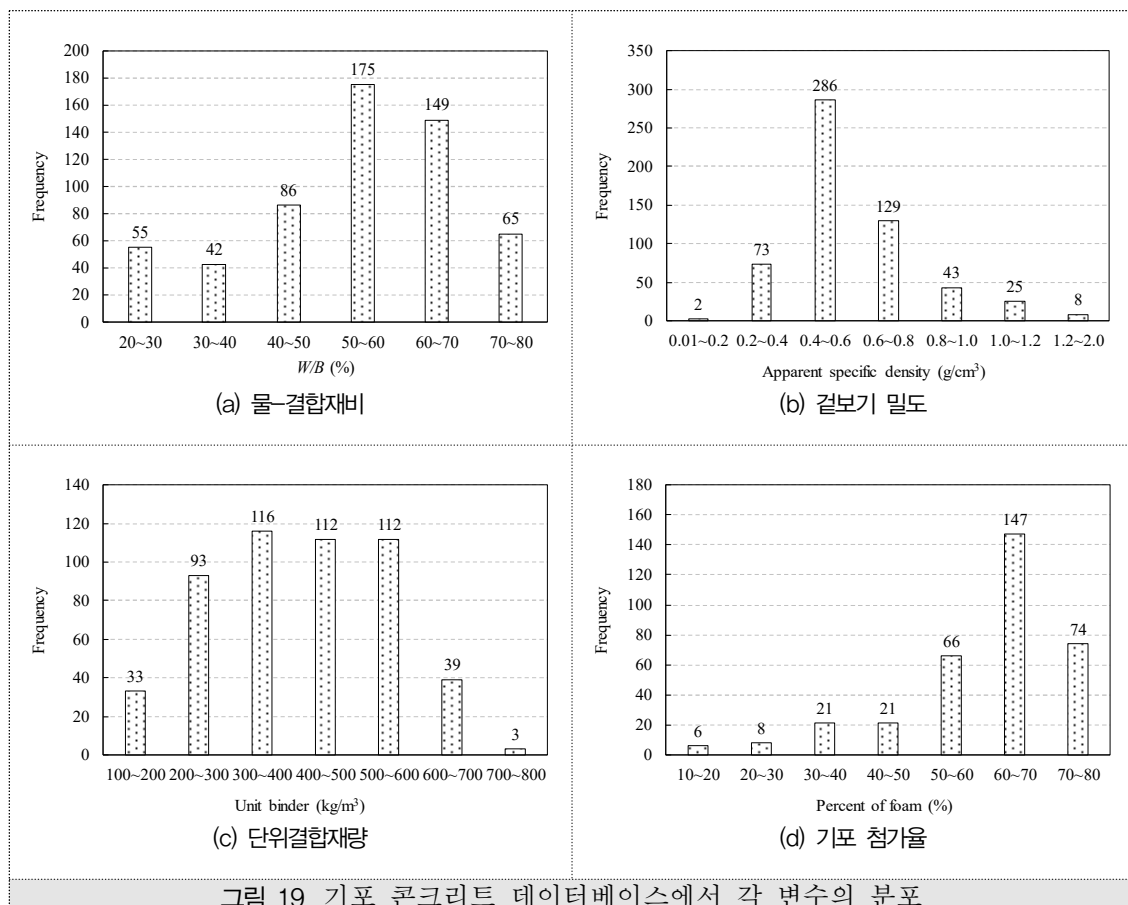
- 본 연구의 목표 달성(압축강도 0.6 MPa 이상, 겉보기 밀도 0.5 g/cm³ 이하, 열전도율 0.1 W/m·K 이하)을 위한 기포 콘크리트 배합설계와 특성평가의 기초 자료의 수집.

(2) 데이터 베이스

- 습식형 기포콘크리트 배합설계와 특성평가를 위한 기초자료로서 기존 문헌의 기포콘크리트 실험결과(이승한, 2002, 박상순 등, 1997, 김진만 등, 2006, 송수재 등, 2009, 이정구 등, 2007 등)를 데이터베이스화 하였음.
- 구축된 데이터베이스는 579개의 실험결과를 포함하고 있는데, 기포콘크리트의 압축강도 범위는 0.11~6.38 MPa, 겉보기 밀도의 범위는 0.28~1.91 g/cm³, 플로우의 범위는 130~395 mm 수준임.
- 데이터베이스에 대한 변수 분포는 물-결합재비(W/B), 압축강도(MPa), 기포 혼입량(%)이며 이를 각각 <그림 19>에 나타내었음.

□ 압축강도에 영향을 미치는 요인

- 겉보기 밀도



- 〈그림 20〉에 기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 겉보기 밀도의 관계를 나타내었음.
- 재령 28일 압축강도는 겉보기 밀도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하였음.
- 본 연구에서 목표로 하고 있는 1차년도 달성치(기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도 0.6 MPa 이상) 만족을 위해서는 겉보기 밀도 0.25 g/cm^3 이상이 요구됨.

■ 기포 혼입량

- 〈그림 21〉에는 기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 기포 혼입량의 관계를 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 기포 혼입량이 증가함에 따라 비선형적으로 감소함.
- 1차년도 달성치(기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도 0.6 MPa 이상) 만족을 위해서는 추세선을 기준으로 기포 혼입량 74% 이하가 추천될 수 있음.

■ 물-결합재비(W/B)

- 기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도와 W/B 의 관계는 〈그림 22〉와 같음.
- 기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 W/B 가 증가함에 따라 감소하지만, 그 경향은 대체로 미미한 수준임.
- 일반적으로 콘크리트의 압축강도 발현은 W/B 에 큰 영향을 받지만, 기포 콘크리트의 경우 W/B 보다는 겉보기 밀도와 단위 결합재량에 의해 큰 영향을 받음.

□ 겉보기 밀도에 영향을 미치는 요인

■ 단위결합재량

- 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 단위결합재량의 관계를 〈그림 23〉에 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도는 단위결합재량이 증가함에 따라 비선형적으로 증가함.
- 본 연구의 1차년도 목표 달성치인 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도 0.5 g/cm^3 이하를 만족하기 위해서는 추세선을 기준으로 단위결합재량 350 kg/m^3 수준이 요구됨.

■ 기포 혼입량

- 〈그림 24〉에는 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 기포 혼입량의 관계를 나타내었음.
- 기포 혼입량이 증가함에 따라 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도는 비선형적으로 감소하며, 그 유효 관계는 0.75 수준임.
- 결과적으로 기포 콘크리트의 체적에서 기포는 단순 공기층으로서 혼입량의 변화가 다른 요인들에 비해 높은 상관관계를 보임.
- 목표 달성치인 겉보기 밀도 0.5 g/cm^3 이하를 만족하기 위해서는 추세선을 기준으로 기포 혼입량 63% 이상이 제시 될 수 있음.

■ 물-결합재비(W/B)

- 〈그림 25〉에 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 물-결합재비의 관계를 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도는 물-결합재비가 증가함에 따라 감소하지만 그 영향은 크게 나타나지 않음.
- 결과적으로, 기포 콘크리트에서의 겉보기 밀도는 물-결합재비 보다는 단위 결합재량 및 기포 혼입량에 의해 큰 영향을 받음.

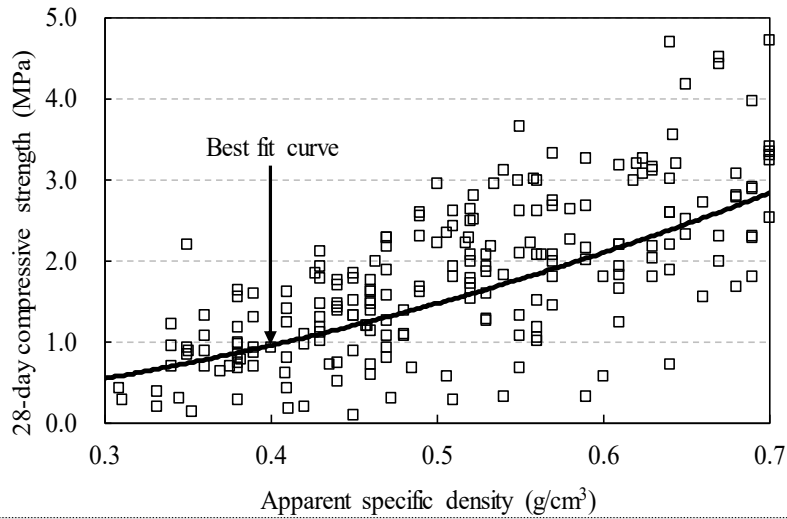


그림 20. 기포 콘크리트의 겉보기 밀도와 압축강도의 관계

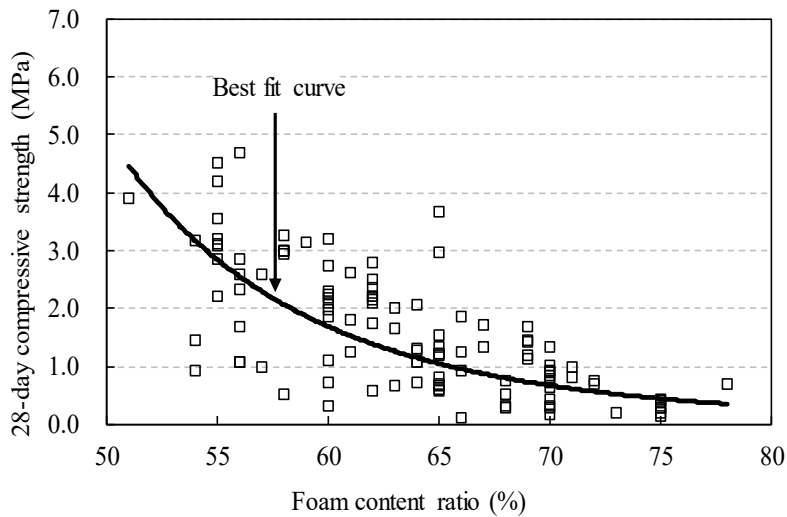


그림 21. 기포 콘크리트의 압축강도와 기포 혼입율의 관계

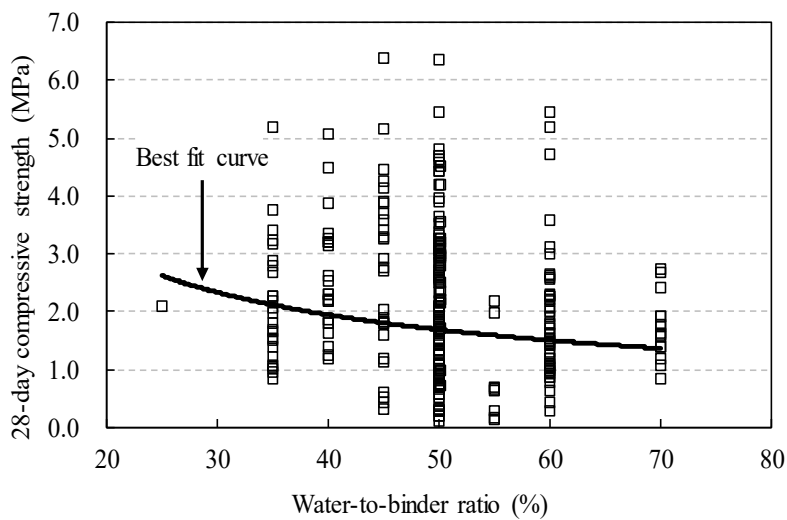


그림 22. 기포 콘크리트의 압축강도와 물-결합재비의 관계

□ 열전도율에 영향을 미치는 요인

■ 겉보기 밀도

- 기포 콘크리트의 재령 28일 열전도율과 겉보기 밀도의 관계를 <그림 26>에 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도가 감소함에 따라 비선형적으로 감소하며, 그 유효관계는 0.83으로 비교적 큰 영향을 받음.

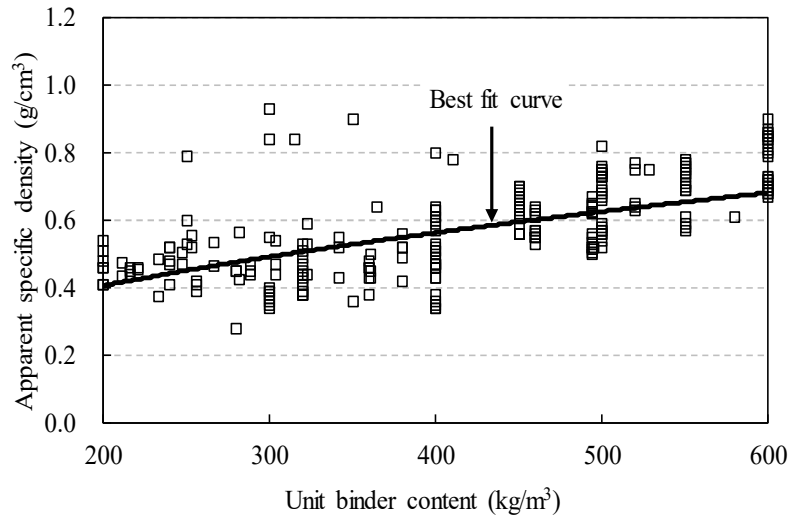


그림 23. 기포 콘크리트의 단위결합재량과 겉보기 밀도의 관계

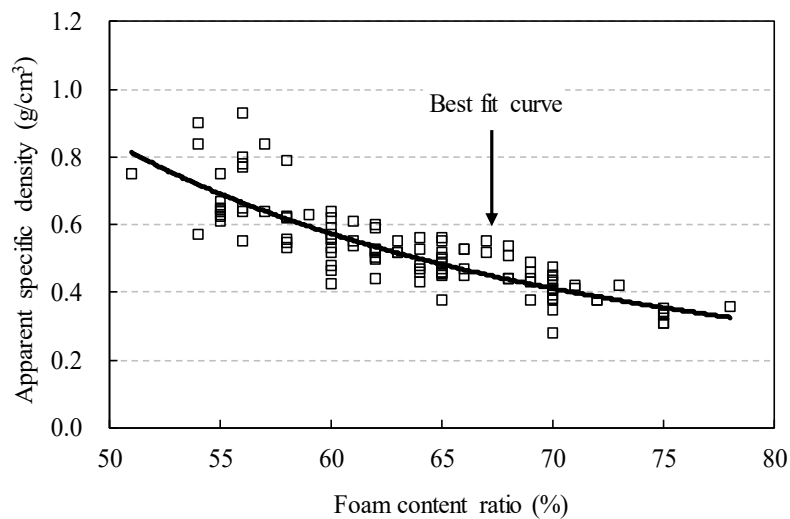


그림 24. 기포 콘크리트의 기포 혼입량과 겉보기 밀도의 관계

- 1차년도 목표 달성치인 열전도율 $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 만족을 위한 기포 콘크리트의 겉보기 밀도는 0.35 g/cm^3 이하 수준이 요구됨.

■ 압축강도

- 〈그림 27〉에는 기포콘크리트의 재령 28일 열전도율과 압축강도의 관계를 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 열전도율은 압축강도가 증가함에 따라 선형적으로 증가함.
- 열전도율 $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 의 목표 달성을 위해서는 기포 콘크리트의 압축강도가 0.8 MPa 수준이 요구됨.

2) 에어로겔 첨가율 변화 및 계면활성제 종류 변화에 따른 시멘트 페이스트의 특성 평가

(1) 일반사항

- 기포 콘크리트의 열전도율 및 내수성 확보를 위한 나노 공극의 에어로겔 혼합 시멘트 페이스트의 역학적 특성을 평가함.
- 표면 소수특성을 친수성으로 전환하였을 때 시멘트와의 배합시 강도발현 및 열전도율에 미치는 영향을 평가하기 위함.
- 주요 배합변수로 에어로겔 첨가율을 0%, 25%, 50%, 75% 90% 및 100%로 하였으며, 이들 변수

에 따라 에어로겔을 첨가한 시멘트 페이스트의 배합 직후 혼합 상태 및 재령별 압축강도를 측정하였음.

- 더불어 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도, 공극분포 및 열전도율을 평가하였음.

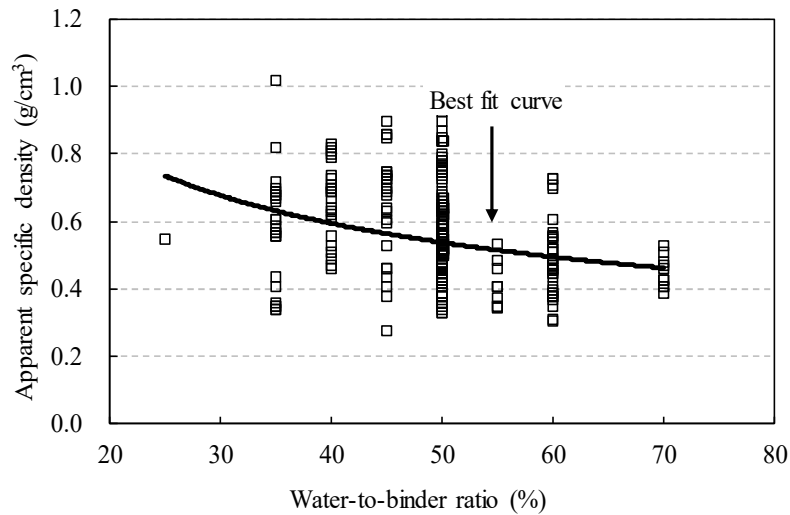


그림 25. 기포 콘크리트의 물-결합재비와 겉보기 밀도의 관계

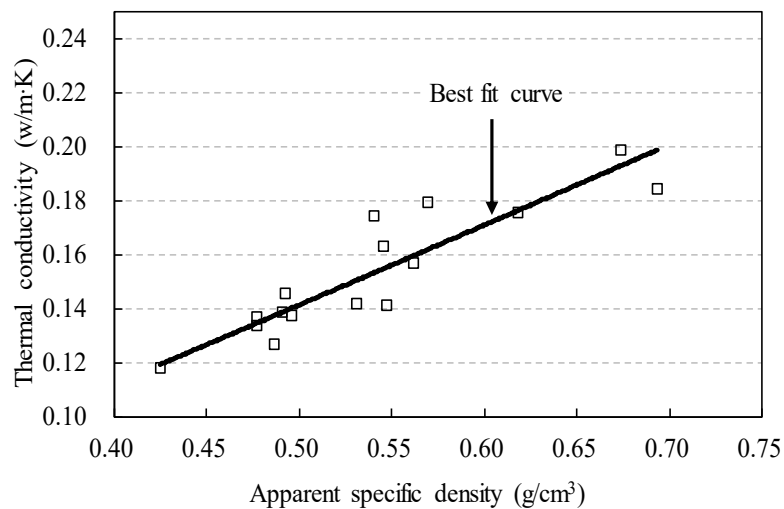


그림 26. 기포 콘크리트의 열전도율과 겉보기 밀도의 관계

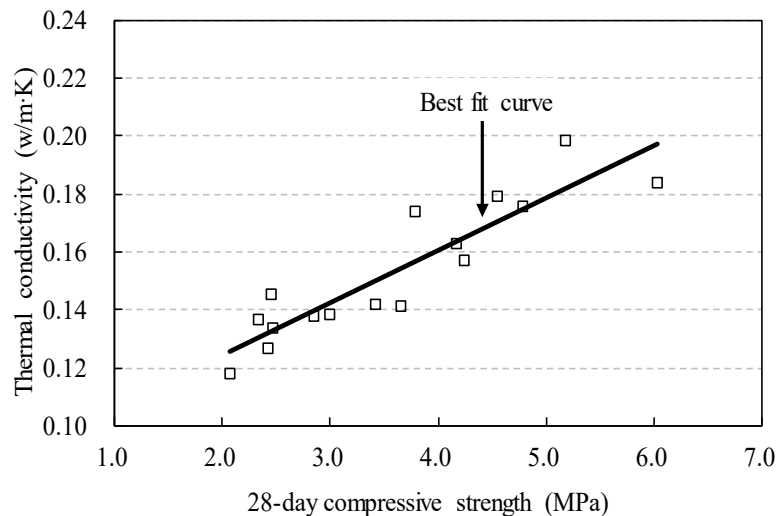


그림 27. 기포 콘크리트의 열전도율과 압축강도의 관계

(2) 실험계획

□ 사용재료

■ 시멘트

- 본 연구에 사용된 시멘트의 화학적 조성은 <표 16>과 같음.
- 밀도 및 분말도가 각각 3.14 g/cm^3 및 $4,497 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 재료를 사용하였음.

■ 에어로겔

- 이 연구에 사용된 에어로겔의 물리적 특성을 <표 17>에 나타내었음.
- 에어로겔의 밀도 및 비표면적은 0.1 g/cm^3 및 $800 \text{ m}^2/\text{g}$ 이며, 열전도율은 $0.022 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 매우 낮은 밀도와 높은 비표면적 및 단열성능을 가짐.
- 에어로겔의 표면 형상은 <그림 28>과 같이 불규칙한 다방면체의 형상을 이루고 있으며 입자 크기는 $20 \mu\text{m}$ 이하임.

■ 에어로졸

- 에어로졸의 나노공극 에어로겔과 다르게 재료 자체가 표면친수성을 갖는 재료로서, 밀도 및 비표면적은 0.05 g/cm^3 및 $200 \text{ m}^2/\text{g}$ 임.
- 에어로졸의 표면 형상은 <그림 29>과 같으며, 입경은 $0.2 \mu\text{m}$ 수준임.
- 본 연구에서는 에어로졸 혼합 시멘트 페이스트 배합실험을 실시하였으며, 에어로겔 혼합 시멘트 페이스트와의 역학적 특성 비교 분석을 위해 사용되었음.

■ 에어로겔 친수성 부여를 위한 계면활성제

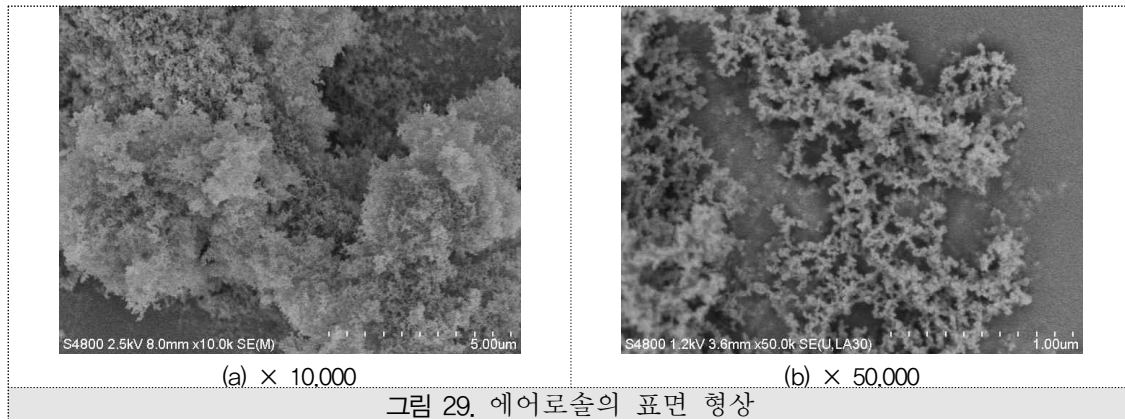
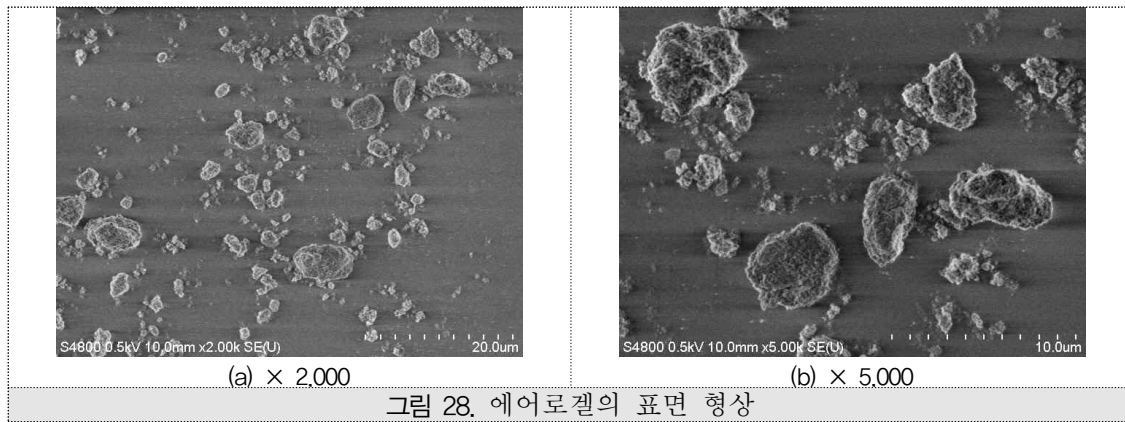
- 에어로겔의 친수성 부여를 위해 사용된 계면 활성제는 식물성 기포제, 에탄올, 및 탄산수 총 3가지 재료임.
- 식물성 기포제는 pH 7.0 및 비중 1.05 g/cm^3 인 재료를 사용하였음.
- 에탄올은 무색의 가연성 화합물로 알코올의 한 종류로서 농도 98% 인 에탄올 수용액을 사용하였음.
- 탄산수는 이산화탄소가 수용액상에 용해·이온화된 물로서 pH 4.6 및 탄산이온 함량 400 mg/L 인 재료를 사용하였음.

표 16. 시멘트의 화학적 조성 (질량 %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₃	LOI
22.13	5.49	3.59	61.98	2.51	1.09	2.14	0.91

표 17. 에어로겔의 물리적 특성

Density (g/cm ³)	Specific surface area (m ² /g)	Thermal conductivity (W/m · K)	Pore size (nm)	Void percentage (%)
0.1	800	0.022	$\phi \leq 20$	90



□ 실험상세

- 에어로겔을 첨가한 시멘트 페이스트의 역학적 특성을 평가하기 위한 배합상세는 <표 18>과 같음.
- 시멘트 페이스트의 역학적 특성을 평가하기 위한 실험은 에어로겔의 표면 친수성 부여를 위해 사용된 계면활성제의 종류에 따라 3가지로 변화하였음.
- 그룹 1의 경우 계면활성제로서 식물성 기포제를 이용하였으며, 배합시 물 중량의 5%를 치환하여 사용하였음.
- 계면활성제로서 식물성 기포제를 활용한 경우에는 시멘트 페이스트 배합 전 식물성 기포제와 에어로겔을 선교반하여 사용하였음.
- 그룹 2의 경우에는 계면활성제로서 에탄올을 이용하였으며 에어로겔 부피대비 배합수의 일정량을 치환하여 사용하였음.
- 계면활성제로서 에탄올을 활용한 경우는 식물성 기포제의 경우와 마찬가지로 시멘트 페이스트 배합 전 에어로겔과 선교반하여 사용하였음.
- 그룹 3의 경우에는 주요재료로서 표면 친수성의 에어로졸을 이용하였으며, 배합수를 탄산수로서 대체하여 배합을 실시하였음.
- 식물성 기포제 및 에탄올을 사용한 경우와 마찬가지로 배합 전 에어로졸과 탄산수를 선 교반하여 사용하였음.
- 계면활성제의 종류 변화에 관계없이 기본조건으로서 에어로겔 및 에어로졸을 시멘트 부피대비 0, 25, 50, 75, 90% 및 100% 첨가하였으며, 물-시멘트비(water to cement ratio, W/C)는 40%로 고정하였음.

표 18. 에어로겔 첨가율 및 계면활성제 종류 변화에 따른 시멘트 페이스트의 배합상세

Group	W/B (%)	Surfactant type	Addition of aerogels relative to cement volume (%)	Unit weight (kg/m ³)					
				Water	Cement	Carbonated water	Aerogel	Aerosol	Surfactant
1	40	Vegetable foaming agent	0	557.5	1393.8	—	0	—	0
			0	542.4	1356.0	—	0	—	27.1
			25	549.7	1224.3	—	6.8	—	24.5
			50	446.3	1115.8	—	12.4	—	22.3
			75	410.0	1025.1	—	17.1	—	20.5
			90	390.9	977.4	—	19.5	—	19.5
			100	379.2	947.9	—	21.1	—	19.0
2		Ethanol	25	1229.3	6.8	—	414.6	—	77.1
			50	1099.5	12.2	—	301.9	—	137.9
			75	994.5	16.6	—	210.7	—	187.1
			100	907.8	20.2	—	135.4	—	227.7
3		Carbonated water	25	—	1255.0	502.0	—	5.0	—
			50	—	1141.3	456.5	—	9.1	—
			75	—	1046.5	418.6	—	12.5	—
			100	—	966.3	386.5	—	15.3	—

□ 측정항목

■ 배합방법

- 모르타르 시험의 경우 KS L 5109 수경성 시멘트 페이스트 및 모르타르의 기계적 혼합방법에 준하여 시험체를 제작하였으며, 주요 제작과정은 아래와 같음.
 - ① 시멘트 및 에어로겔을 배합용기에 넣고 3분간 건비빔을 실시.
 - ② 건비빔을 실시한 재료에 배합수를 혼입하여 3분간 습비빔을 실시.
 - ③ 혼합이 끝난 페이스트를 50 × 50 × 50 mm 몰드에 타설.
 - ④ 20℃ 상대습도 60%의 항온항습 환경에서 양생 실시.

■ 압축강도

- 50 mm × 50 mm × 50 mm 형태의 큐브형 시험체를 이용하였음
- 200 kN 용량의 압축강도기를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

■ 겉보기 밀도

- 겉보기 비중은 KS F 2459에 따라 28일 동안 양생을 실시한 시험체를 105±5℃의 환경에서 건조 시킨 후 실온에서 냉각 후의 질량을 측정하여 평가하였음.

■ 공극분포

- 에어로겔 혼합 시멘트 페이스트의 공극분포 특성을 평가하기 위해 재령 28일에서의 페이스트 시료를 채취하였음.
- 시료는 10 mm × 10 mm × 10 mm의 입방형으로 절단하였으며, MIP(mercury intrusion porosimetry)를 이용하여 공극분포 특성을 분석하였음.

■ 열전도율

- KS F 4039에 따라 300 × 300 × 50 mm의 시험체를 제작하였으며, 28일간 항온항습환경(습도 60±5%,

-
- 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 양생을 실시 한 후 $105 \pm 2^\circ\text{C}$ 항량이 될 때까지 건조하였음.
- 이후 열전도를 측정 장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도를 측정을 실시하였음.
 - 기준온도를 20°C 로 하여 양면에 15°C 의 온도차를 부여하였음.

(3) 실험결과

□ Group 1(식물성 기포제 사용)

■ 배합특성

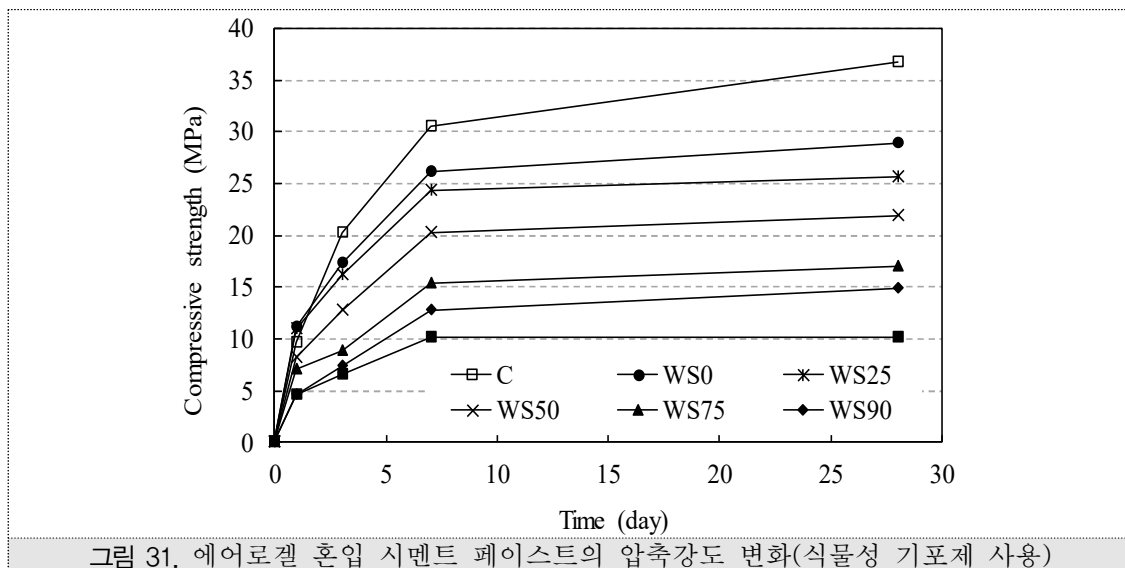
- 에어로겔의 계면활성제로서 식물성 기포제를 활용한 시멘트 페이스트의 배합직후 혼합 상태는 <그림 30>와 같음.
- 에어로겔 첨가율 변화에 따른 시멘트 페이스트의 혼합 상태는 WS90 시험체를 제외한 모든 시험체에서 에어로겔 첨가율 변화에 관계없이 균일하게 혼합되는 것으로 나타났음.
- WS90 시험체의 경우 배합직후 시멘트 페이스트 표면에 에어로겔 분말이 떠 있는 재료분리 현상을 보였으며, 시멘트 페이스트 표면에 에어로겔과 시멘트 페이스트가 균일하게 섞이지 못하고 줄눈을 형성하고 있는 것으로 나타남.
- 이러한 현상은 소수성을 갖는 에어로겔의 친수성 부여를 위해 사용된 계면활성제와의 교반이 충분히 이루어지지 못해 발생된 것으로 판단됨.

■ 압축강도

- 식물성 기포제를 계면활성제로서 활용한 경우의 시멘트 페이스트의 압축강도 측정 결과는 <그림 31>과 같음.
- 측정결과 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령에 관계없이 에어로겔 첨가량이 0%에서 100%로 변화함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음.
- 에어로겔 및 계면활성제가 첨가되지 않은 C 시험체의 경우 재령 28일 압축강도는 36.8 MPa로 가장 높게 나타났음.
- 또한 WS25 시험체의 재령 28일 압축강도는 25.6 MPa로 에어로겔을 첨가한 시험체중 가장 높게 나타났음.
- 반면 WS100 시험체의 재령 28일 압축강도는 10.2 MPa로 C 시험체의 약 28% 수준으로 낮았음.
- 더불어 재령 7일 이후 모든 시험체의 강도 증가 기울기는 에어로겔 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음.
- 특히 WS100 시험체의 재령 7일 이후 재령 28일까지의 압축강도 증가율은 약 2% 수준으로 가장 낮았음.
- 시멘트 페이스트의 압축강도는 에어로겔 뿐만 아니라 식물성기포제에 의한 영향도 받는 것으로 나타났는데, WS0 시험체의 재령 28일 압축강도는 28.9 MPa로 C 시험체 대비 약 22% 감소함을 보였음.
- 즉, 이는 배합도중 계면활제로 인해 생성된 기포의 영향으로 시험체 내부에 다수의 공극이 형성되어 압축강도가 감소됨을 의미함.

■ 겉보기 밀도

- 식물성 기포제를 계면활성제로서 활용한 경우 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 재령 28일 겉보기 밀도는 <그림 32>와 같음.
- 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도는 에어로겔의 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음.
- C 시험체의 재령 28일 겉보기 밀도는 1.44 g/cm^3 으로 가장 높게 나타났음.
- WS100 시험체의 경우 재령 28일 겉보기 밀도는 1.17 g/cm^3 으로 C 시험체의 약 80% 수준으로 가장 낮았음.
- 또한 에어로겔 첨가율이 0%에서 100%로 변화할 때 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도 감소율은 18%로 비교적 작게 나타났음.



■ 열전도율

- 에어로겔 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 열전도율 측정 결과를 <그림 33>에 나타내었음.
- 측정결과 시멘트 페이스트의 열전도율은 에어로겔 및 식물성기포제가 첨가되지 않은 C 시험체가 $0.595 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 가장 높았으며, 계면활성제 사용에 따른 열전도율 감소영향이 에어로겔 첨가율 25%~90%인 경우에 비해 크게 나타났음.
- 하지만 에어로겔을 100% 첨가한 WS100 시험체의 열전도율의 측정결과 C 시험체 및 WS0 시험체의 열전도비율에 비해 43% 및 27% 낮게 나타나 에어로겔 혼합에 따른 열전도율 감소효과가 비교적 크게 나타났음.
- WS90 시험체의 열전도율은 $0.42 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 WS75 시험체에 비해 증가하는 결과를 나타내었는데, 이는 배합특성의 결과와 같이 에어로겔의 표면개질이 부분적으로 이루어지고 친수성이 부여되지 못한 소수성 에어로겔이 배합과정에서 시멘트 페이스트와 균일하게 혼합되지 못해 발생한 것으로 판단됨.

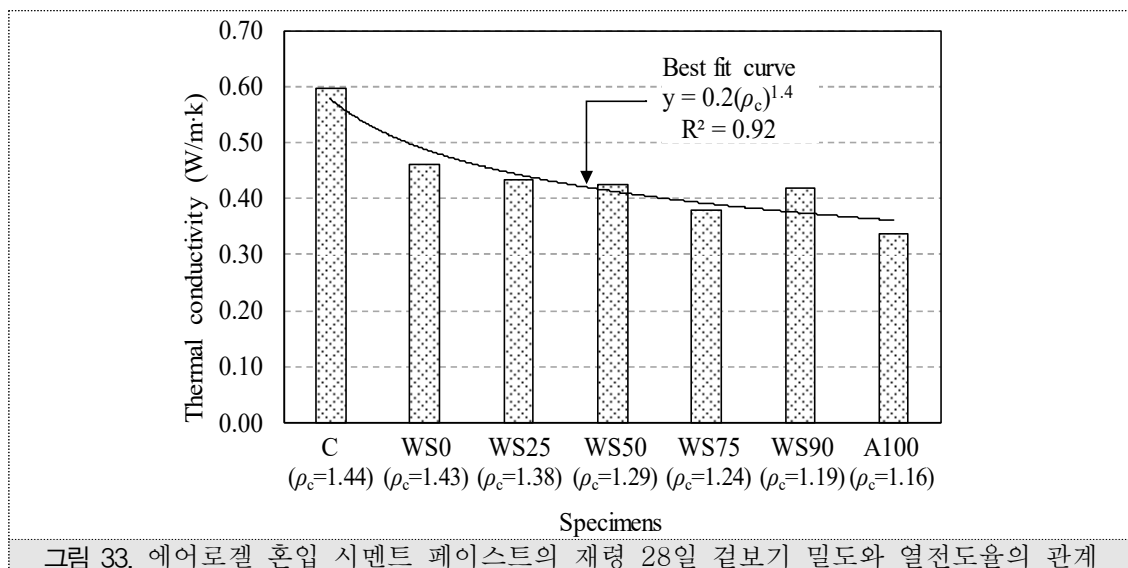
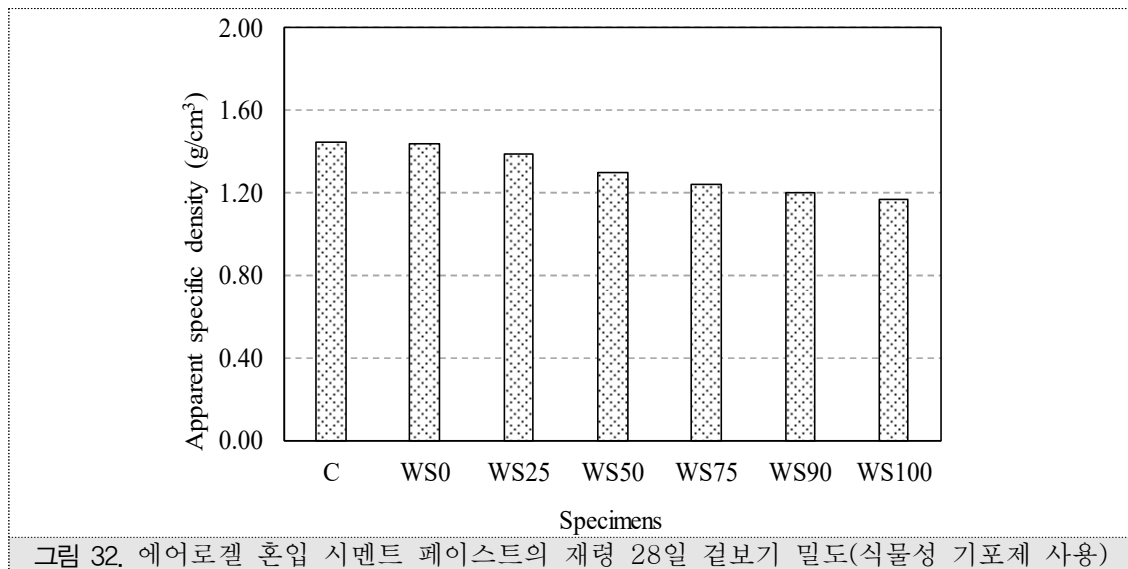
- 일반적으로 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도와 밀접한 관계를 나타냄. 본 실험결과 측정된 시멘트 페이스트의 열전도율과 겉보기 밀도와의 관계는 비선형 회귀 분석을 통해 식 (1)과 같이 제시 할 수 있음.

$$T_c = 0.2(\rho_c)^{1.4} \quad (1)$$

- 여기서 T_c 는 시멘트 페이스트의 열전도율이며, ρ_c 는 겉보기 밀도이다. 시멘트 페이스트의 열전도율은 겉보기 밀도에 비례하여 비선형적으로 감소하였음.

■ 공극률

- 에어로겔 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 공극분포 특성 분석 결과는 <그림 34>과 같다. 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 전체 공극률은 50 nm~50 μ m 범위의 거대 모세관 공극(Macro capillary pores)에 의해 지배되었음.
- 특히, WS25 시험체를 제외한 대부분의 시험체는 C 시험체의 거대 모세관 공극 비율에 비해 크게 나타났는데, 이는 20 μ m 수준의 입자 크기를 갖는 에어로겔이 시멘트 매트릭스 계면에 분포함에 따라 발생된 결과로 판단됨.
- 기공(Artificial air pore) 또한 에어로겔의 첨가량이 0%에서 100%로 변화함에 따라 증가하였는데, 이는 에어로겔 첨가량의 증가와 함께 계면활성제로 인해 형성된 기포 자체 수분량 감소로 기포막이 불안정한 상태가 되어 주변의 기포와 병합되거나 소포되어 공극이 커진 것으로 판단됨.



- 더불어, 시멘트 페이스트의 전체 공극률의 증가는 열전도율과 매우 유사한 관계를 나타내었음.
- 결과적으로, 에어로겔 첨가율의 증가는 시멘트 페이스트의 공극률 증가와 함께 열전도율 감소의 효과를 나타내었음.

□ Group 2(에탄올 사용)

■ 압축강도

- 에탄올을 계면활성제로서 활용한 경우의 시멘트 페이스트의 압축강도 측정 결과는 <그림 35>과 같음.
- 측정결과 시멘트 페이스트의 압축강도는 재령에 관계없이 에어로겔 첨가량이 0%에서 100%로 변화함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음.
- WE25 시험체의 재령 28일 압축강도는 31.3 MPa로 에어로겔을 첨가한 시험체중 가장 높게 나타났으며, 에어로겔 및 계면활성제를 첨가하지 않은 C 시험의 84% 수준으로 나타남.
- 반면 WS100 시험체의 재령 28일 압축강도는 2.46 MPa로 가장 낮았으며, C 시험체의 약 5% 수준으로 강도 발현이 미미하였음.
- 더불어 재령 7일 이후 모든 시험체의 강도 증가 기울기는 식물성 기포제를 사용한 경우와 마찬가지로 에어로겔 첨가량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음.
- 특히 WS100 시험체의 재령 7일 이후 재령 28일까지의 압축강도 증가율은 약 10% 수준으로 가장 낮았음.

■ 겉보기 밀도

- 에탄올을 계면활성제로서 활용한 경우 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 재령 28일 겉보기 밀도는 <그림 36>와 같음.
- 에탄올 및 에어로겔을 혼입한 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도는 에어로겔 첨가량 변화에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았음.

Specimens	C	WS0	WS25	WS50	WS75	WS90	WS100
Artificial air pores ($50 \mu m \leq \Phi$)	2.90	2.33	4.24	3.70	3.04	5.21	10.17
Macro capillaries ($50 nm \leq \Phi < 50 \mu m$)	17.02	20.48	14.87	27.61	29.93	28.13	25.69
Micro capillaries ($10 nm \leq \Phi < 50 nm$)	6.03	8.28	9.57	6.19	6.55	6.55	5.64
Gel pores ($\Phi < 10 nm$)	5.62	4.21	6.51	3.69	3.81	3.51	2.86
Porosity in volume(%)	31.57	35.30	35.20	41.19	43.33	43.39	44.35

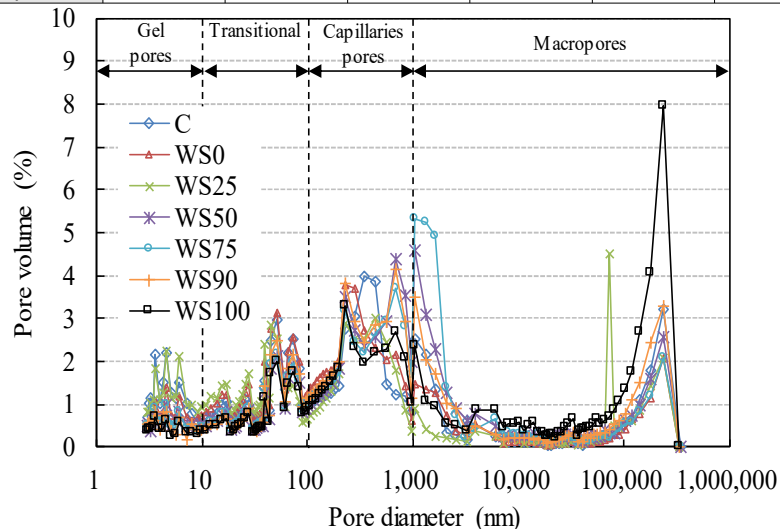


그림 34. 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 공극분포 특성

- 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도는 에어로겔의 첨가량이 25%일 때 1.60 g/cm^3 으로 가장 높게 나타났음.
- WE75 시험체의 경우 재령 28일 겉보기 밀도는 1.41 g/cm^3 으로 가장 낮았으며, WE25 시험체의 약 88% 수준으로 나타났음.
- 결과적으로 에탄올을 에어로겔의 계면활성제로서 활용한 경우 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도는 에어로겔의 첨가율이 75% 이상일 때 감소되는 결과를 나타내었음.

□ Group 3(탄산수 및 에어로졸 사용)

■ 압축강도

- 에어로졸 및 탄산수를 혼합한 시멘트 페이스트의 압축강도 측정 결과는 <그림 37>과 같음.
- 에어로졸이 혼합된 시멘트 페이스트의 압축강도는 에어로졸의 첨가량이 0%에서 100%로 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- CAS100 시험체의 재령 28일 압축강도는 57.3 MPa로 가장 높게 나타났으며, C 시험체 대비 약 52% 높았음.
- 에어로졸을 25% 치환한 시험체의 경우에도 재령 28일 압축강도는 47.1 MPa로, C 시험체 대비 약 28% 높게 나타났음
- 표면 친수성 재료인 에어로졸의 주성분은 SiO_2 로서(99.8% 이상) 80% 이상의 SiO_2 로 이루어진 실리카폼과 유사한 화학조성을 가짐. 또한 에어로졸의 입자크기는 $0.2 \mu\text{m}$ 수준으로, 평균 $0.1 \mu\text{m}$ 수준의 입자 크기를 갖는 실리카폼과 매우 유사한 입자를 가짐.

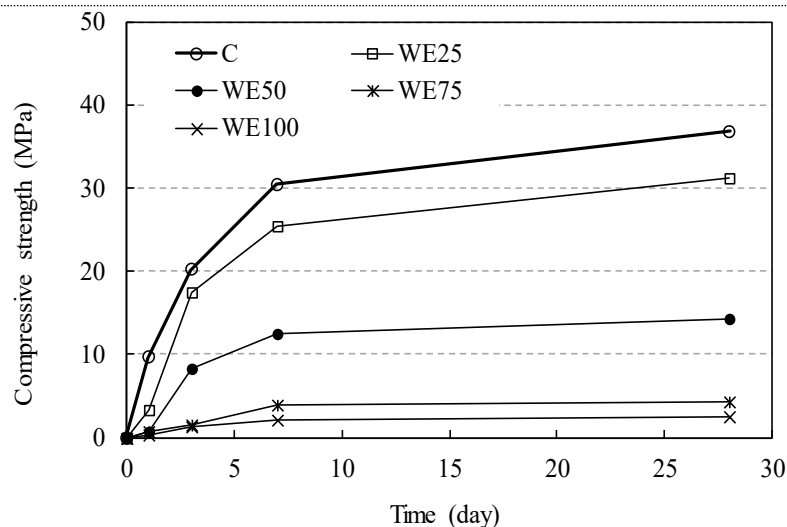


그림 35. 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 압축강도 변화(에탄올 사용)

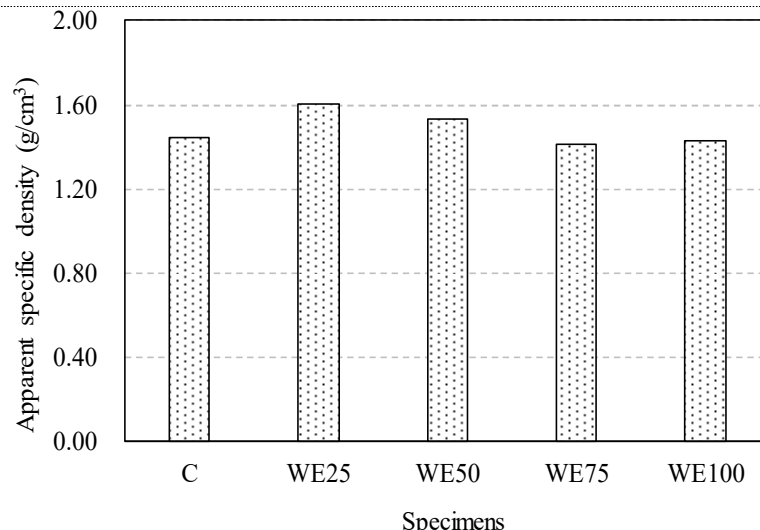


그림 36. 에어로겔 혼입 시멘트 페이스트의 재령 28일 겉보기 밀도(에탄올 사용)

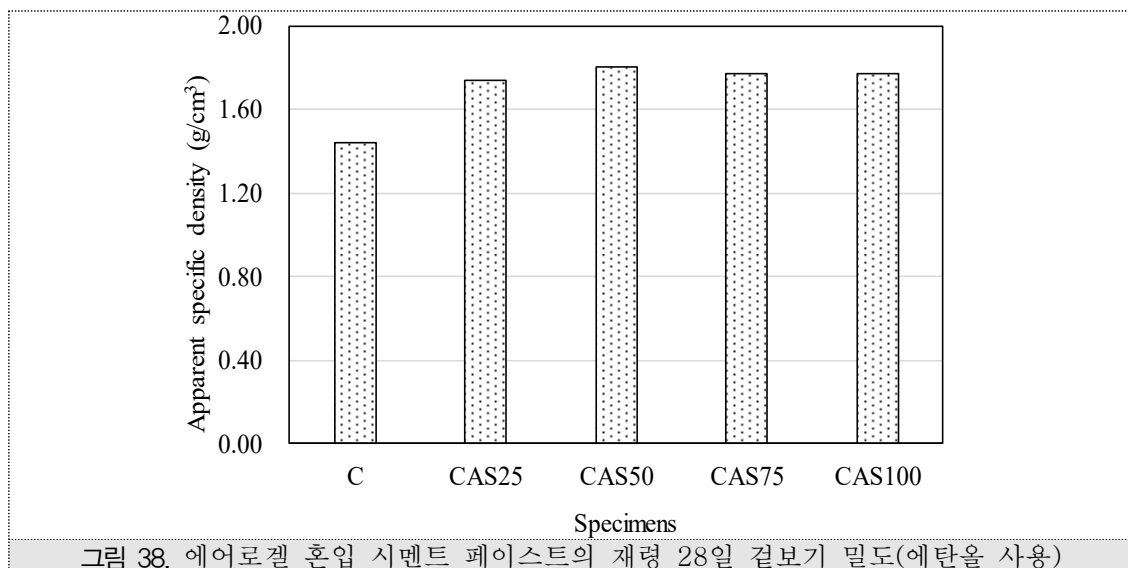
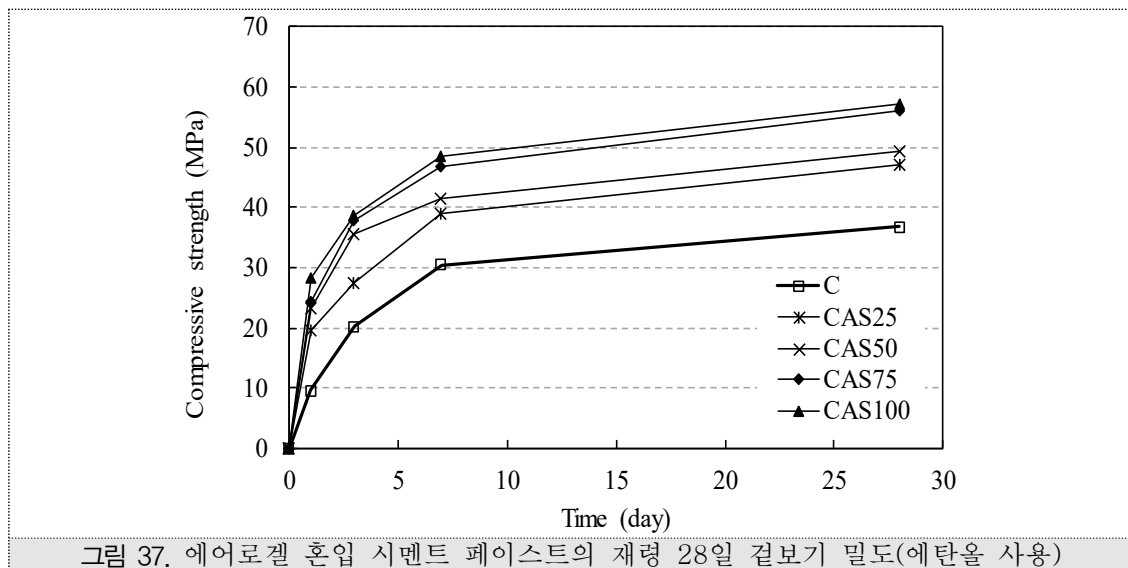
- 결과적으로 이러한 특성은 실리카푼과 유사한 마이크로 필러 효과 및 포졸란 반응에 의해 시멘트 페이스트의 미세 공극이 많아지고 거대 공극이 감소하여 콘크리트 강도 증진에 기여한 것으로 판단됨.

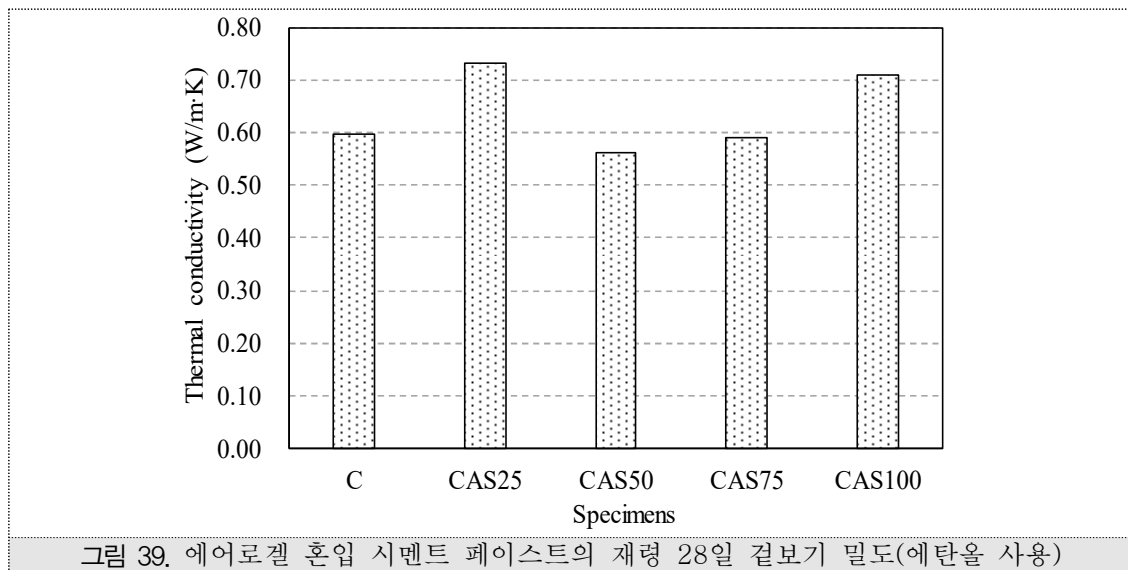
■ 겉보기 밀도

- 에어로졸 및 탄산수를 혼합한 시멘트 페이스트의 재령 28일 겉보기 밀도 측정결과를 <그림 38>에 나타내었음.
- 시멘트 페이스트의 재령 28일 겉보기 밀도는 에어로졸의 첨가량이 0%에서 50%로 변화함에 따라 증가하였으며, 에어로졸 첨가량이 75%에서 100%로 변화할 때 1.77 g/cm^3 으로 큰 변화를 보이지 않았음.
- CAS50 시험체의 재령 28일 겉보기 밀도는 1.80 g/cm^3 으로 가장 높았으며, C 시험체에 비해 약 22% 높은 수준이었음.
- 결과적으로 에어로졸의 첨가량 증가는 시멘트 페이스트의 겉보기 밀도 증가에 영향을 미쳤으며, 이는 시멘트 페이스트의 단위 부피당 존재하는 미세공극을 에어로졸이 채움으로서 발생된 것으로 판단됨.

■ 열전도율

- 에어로졸 첨가량 변화에 따른 시멘트 페이스트의 열전도율 측정 결과를 <그림 39>에 나타내었음.
- 측정결과 시멘트 페이스트의 열전도율은 에어로졸의 혼입 및 탄산수의 첨가에 큰 영향을 받지 않았음.
- 에어로졸을 50% 첨가한 시멘트 페이스트의 열전도율이 $0.59 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ 로 가장 낮았지만, $0.60 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ 인 C 시험체와 큰 차이를 보이지 않았음.





- 오히려 CAS25 및 CAS100 시험체의 경우에는 열전도율이 0.73 W/m·k 및 0.71 W/m·k로 C 시험체 대비 각각 22% 및 19% 높은 결과를 나타내었음.
- 결과적으로 에어로젤 및 탄산수의 첨가는 마이크로 필러 효과 및 포졸란 반응에 의해 시멘트 페이스트의 강도 증진에 영향을 미쳤으나, 열전도율의 감소에는 큰 영향을 미치지 않았음.

3) 단위시멘트량, 기포 첨가율 및 에어로겔 치환율 변화에 따른 에어로겔 혼합 습식형 기포 콘크리트의 특성평가

(1) 일반사항

- 나노 공극의 에어로겔 혼합 기포 콘크리트의 역학적 특성을 평가함.
- 표면 소수특성을 친수성으로 전환하였을 때 기포 콘크리트와의 배합 시 강도발현 및 열전도율에 미치는 영향을 평가하기 위함.
- 주요 배합변수로 단위시멘트량을 200 kg/m³, 250 kg/m³ 및 300 kg/m³으로 변화하였으며, 에어로겔 첨가율을 0%, 25%, 50% 및 75%로 변화하였음.
- 이뿐만 아니라 폴리머 및 산화알루미늄 겔 파우더의 활용에 따른 기포 콘크리트의 성능개선을 평가하기 위한 배합실험을 실시하였음.
- 이들 변수에 따라 에어로겔을 첨가한 기포 콘크리트의 배합 직후 혼합 상태, 플로우 및 슬러리 밀도를 평가하였음.
- 더불어 기포 콘크리트의 침하깊이, 재령별 압축강도, 겉보기 밀도 및 열전도율을 평가하였음.

(2) 실험계획

□ 사용재료

■ 시멘트

- 밀도 및 분말도가 각각 3.14 g/cm³ 및 4,497 cm²/g인 재료를 사용하였음.

■ 백시멘트

- 본 연구에 사용된 백색 보틀랜드 시멘트의 화학적 조성은 <표 2.4>와 같음.
- 밀도 및 분말도가 각각 1.97 g/cm³ 및 3,400 cm²/g인 재료를 사용하였음.

■ 초속경 시멘트

- 본 연구에 사용된 초속경 시멘트의 화학적 조성은 <표 19>에 나타내었음.
- 밀도 및 분말도가 각각 2.85 g/cm³ 및 5,989 cm²/g 인 재료를 사용하였음.

■ 에어로겔

- 에어로겔은 시멘트 페이스트 배합실험의 경우와 마찬가지로 밀도 및 비표면적은 0.1 g/cm³ 및 800 m²/g이며, 입자 크기는 20 μm 이하인 재료를 사용하였음.

■ 계면활성제

- 기포 콘크리트에 혼합되는 에탄올은 무색의 가연성 화합물로 알코올의 한 종류로서 농도 98% 인 에탄올 수용액을 사용하였음.

■ 기포제

- 기포생성 및 계면활성제로서 사용된 기포제는 동물성 기포제로서 암갈색의 액상 형태이며, 밀도는 1.06 g/cm³임.

■ 산화알루미늄(Al₂O₃) 겔 파우더

- 본 연구에 사용된 산화 알루미늄 겔 파우더는 순도 99% 이상의 재료로서, 밀도 및 입경은 각각 3.95 g/cm³ 및 5.6 μm인 재료를 사용하였음.

■ 폴리머

- 폴리머는 pH 6.0~8.0의 특성을 갖는 에틸렌 초산 비닐(ethylene vinyl acetate, EVA)계를 사용하였으며, 밀도 및 평균 입자 크기는 각각 0.5 g/cm³ 및 100 μm임.

□ 실험상세

- 에어로겔을 첨가한 기포 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위한 배합상세는 <표 20>, <표 21> 및 <표 22>와 같음.
- 그룹 1에서는 기포 콘크리트의 역학적 특성을 평가하기 위한 실험은 단위시멘트량 및 에어로겔 치환율, 결합재 종류 변화에 따라 총 11개의 배합실험을 실시하였음<표 21>.
- 기포 콘크리트의 단위시멘트량은 200 kg/m³, 250 kg/m³, 300 kg/m³으로 변화하였으며, 에어로겔의 치환율은 기포 첨가량 대비 25%, 50% 및 75%로 변화하였음.
- 에어로겔의 표면 친수성 부여를 위한 계면활성제로서는 에탄올을 이용하였으며, 에어로겔 질량대비 15%를 치환하여 배합 전 선교반하여 사용하였음.

표 19. 백시멘트 및 초속경시멘트의 화학적 조성 (질량 %)

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI
White portland cement	20.60	4.52	0.36	68.69	1.26	3.94	1.70
Ultra rapid hardening cement	10.2	18.8	1.3	50.8	1.4	15.5	2.0

- 시멘트의 종류를 백시멘트로 한 경우에는 기포 콘크리트의 소포 현상 저감의 효과를 가늠하기 위하여 2개 군의 실험을 진행하였으며, 단위시멘트량을 200 kg/m³ 및 250 kg/m³으로 변화하였음.
- 단위시멘트량 및 에어로겔 치환율 변화에 관계없이 기본조건으로서 물-시멘트비(water to cement ratio, W/C)는 30%로 고정하였음.
- 그룹 2에서는 기포 콘크리트의 단위시멘트량 및 기포 첨가율 변화에 따른 압축강도 및 열전도율을 평가하였음.
- 단위시멘트량은 400 kg/m³에서 650 kg/m³까지 배합마다 50 kg/m³씩 증가시켰으며, 이에 따른 기포 첨가율도 71.1~58.0%로 변화하였음(표 21).
- 그룹 3에서는 계면활성제로서 동물성 기포제를 활용하였으며, 에어로겔 치환율을 25% 및 50%로 변화하였음(표 22).
- 단위 결합재량은 250 kg/m³으로 고정하였으며, 물-시멘트비는 30%로 하였음.
- 또한 그룹 3 실험에서는 기포콘크리트의 휨강도 개선을 위한 폴리머 활용 및 강도 개선 및 열전도율 확보를 위한 산화알루미늄 겔 파우더 활용 가능성을 평가하기 위한 배합실험을 실시하였음.
- 산화알루미늄 겔 파우더의 경우 단위 결합재량의 30%를 치환하여 사용하였으며, 폴리머 혼입 기포 콘크리트 배합의 경우 폴리머 및 초속경 시멘트를 단위 결합재량의 10%를 치환하여 사용하였음.

표 20. 단위결합재량 및 에어로겔 치환율 변화 따른 기포 콘크리트의 배합상세(Group 1)

Specimen	W/B (%)	Binder type	Unit cement (kg/m ³)	Foamed ratio (%)	Replacement ratio of aerogel by foamed volume (%)	Admixture (%)	Slurry density (g/cm ³)
O200	30	Ordinary portland cement	200	80.6	—	0.4	0.33
O250			250	77.7	—		0.39
O300			300	74.9	—		0.46
O250A25			250	58.3	25		0.39
O250A50			250	38.9	50		0.38
O250A75			250	19.4	75		0.37
O300A25			300	56.2	25		0.45
O300A50			300	37.5	50		0.44
O300A75			300	18.7	75		0.43
W200		White portland cement	200	77.1	—		0.33
W250			250	73.4	—		0.38

표 21. 단위시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포 콘크리트의 배합상세(Group 2)

Specimen	W/B (%)	Unit cement (kg/m ³)	Foamed ratio (%)	Admixture (%)
400-71	25	400	71.1	0.4
450-68		450	68.4	
500-65		500	65.8	
550-63		550	63.2	
600-60		600	60.6	
650-58		650	58.0	

표 22. 동물성기포제를 계면활성제로서 활용한 기포 콘크리트의 배합상세(Group 3)

Specimen	W/B (%)	Unit binder (kg/m ³)	Foamed ratio (%)	Replacement ratio of aerogel by foamed volume (%)	Mixing ratio of binder (%)				Admixture (%)	Slurry density (g/cm ³)
					Cement	Al ₂ O ₃ gel	Polymer	UHRC		
AG25	30	250	56.6	25	100	—	—	—	1	0.33
AG50			37.7	50	100	—	—	—	0.5	0.39
AO80			72.3	—	70	30	—	—	1	0.45
FC10			76.3	—	80	—	10	10	0.5	0.39

□ 측정항목

■ 플로우

- 플로우 측정과정을 <그림 40>에 나타내었음.
- 플로우는 KS F 4039에 제시하고 있는 350 × 350 mm 유리판 위에 안지름 80 mm 높이 80 mm인 아크릴 원통을 세운 후 채워진 기포 슬러리를 상부까지 붓고 남은 윗부분을 수평하게 제거한 후 원통을 살며시 들어올려 1분 후에 시료가 퍼진 4방향에 대해 등간격으로 측정하여 평균값을 사용함.

■ 실기포율

- 기포콘크리트의 실기포율 측정과정을 <그림 41>에 나타내었음.
- 본 실험에서 이용된 실기포율 측정방법은 간이 소포법을 이용하였음.
- 500 mL 메스실린더에 기포콘크리트의 시료를 200 mL 넣고 공업용 메틸알코올을 100 mL 넣어 슬러리중의 기포만 소포시켜 눈금을 읽어 체적을 측정하였음.

$$F_a(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_3} \times 100 \quad (2)$$

- 여기서, W_1 과 W_2 는 각각 소포전과 소포 후 체적(ml)이며, W_3 는 시료량(=200 ml)임.

■ 슬러리 밀도

- 슬러리 밀도의 측정과정을 <그림 42>에 나타내었음.
- 슬러리 밀도의 측정은 별도로 제작된 1 L의 용기에 채워진 기포 슬러리를 표면 상부까지 채우고 용기의 질량을 뺀 시료의 질량을 측정함.
- KS F 4039에 제시하고 있는 1g 단위인 저울을 사용하여 측정함.

■ 침하깊이

- 기포 콘크리트의 침하깊이는 KS F 4039에서 제시하고 있는 안지름 145 mm, 높이 300 mm인 투명 아크릴 용기를 이용하였음.
- 용기에 기포 콘크리트 시료를 타설한 뒤 2시간 후의 침하깊이를 1 mm 단위로 측정하였음.
- 기포 콘크리트 시료를 타설한 용기는 진동에 의한 침하를 방지하기 위하여 측정시까지 정치시켰음.

■ 압축강도

- 압축강도의 측정과정을 <그림 43>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 압축강도는 KS F 2459에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 타설 후 재령 3일, 7일 및 28일에 500 kN 용량의 만능재료시험기로 압축강도를 측정함.

■ 겉보기 비중

- 겉보기 비중의 측정과정을 <그림 44>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 겉보기 비중은 KS F 2459에 따라 28일 수중양생을 마친 공시체를 건조로 안에서($105 \pm 5^\circ\text{C}$)의 온도로 일정 질량이 될 때까지 건조시킨 후, 실온이 될 때까지 냉각하였을 때의 비중을 측정함.

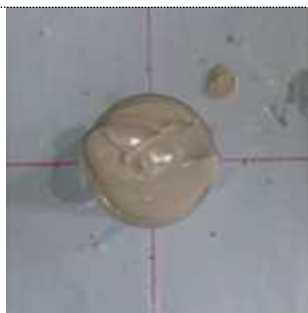
■ 열전도율

- KS F 4039에 따라 $300 \times 300 \times 50$ mm의 시험체를 제작하였으며, 28일간 항온항습환경(습도 $60 \pm 5\%$, 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$)에서 양생을 실시 한 후 $105 \pm 2^\circ\text{C}$ 항량이 될 때까지 건조하였음.
- 이후 열전도율 측정 장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도율 측정을 실시하였음.
- 기준온도를 20°C 로 하여 양면에 15°C 의 온도차를 부여하였음.

□ Group 1

■ 플로우

- Group 1 실험의 경우 에어로겔을 혼합하지 않은 1, 2, 3번 시험체(단위 결합재량 변화) 및 10, 11번(백시멘트 사용) 배합에서만 플로우를 측정하였음.
- 에탄올을 계면활성제로 하여 교반한 에어로겔을 투입한 4~9번 시험체의 경우 <그림 45>에 나타낸 바와 같이 과도한 기포의 발생 및 소포 현상이 매우 심하게 발생되어 타설 및 플로우 등의 측정을 실시하지 않음.
- 이는 휘발성질의 에탄올 사용에 따른 기포공의 부피 증가 및 소포 현상의 과다로 발생된 것으로 판단됨.
- Group 1에서 단위시멘트량 변화에 따른 기포 콘크리트의 플로우 측정 모습 및 결과는 <그림 46> 및 <그림 47>와 같음.
- O200 및 O250 시험체의 플로우는 195 mm로 동일한 수준이었으며, O300 시험체의 플로우는 165 mm로 가장 낮게 나타났음.
- 결과적으로 단위시멘트량이 250에서 300으로 변화함에 따라 플로우는 약 15% 수준 감소하였음.
- 백시멘트를 사용한 기포 콘크리트를 사용한 경우 플로우는 W200 시험체의 경우 일반 시멘트를 사용한 O200 시험체와 유사한 수준이었음.



(a) 플로우콘 채움



(b) 플로우콘 제거



(c) 1분후 플로우 측정

그림 40. 플로우 측정 과정



(a) 시료투입



(b) 알코올 투입



(c) 기포 소포



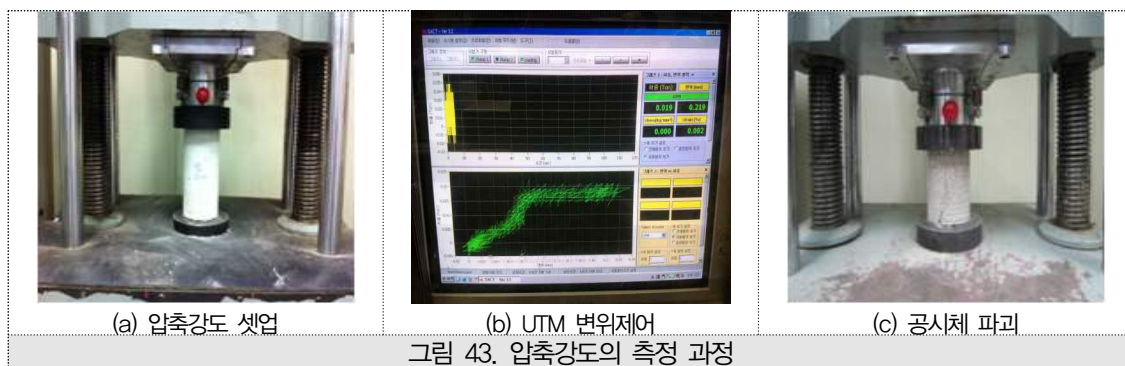
(d) 소포량 측정

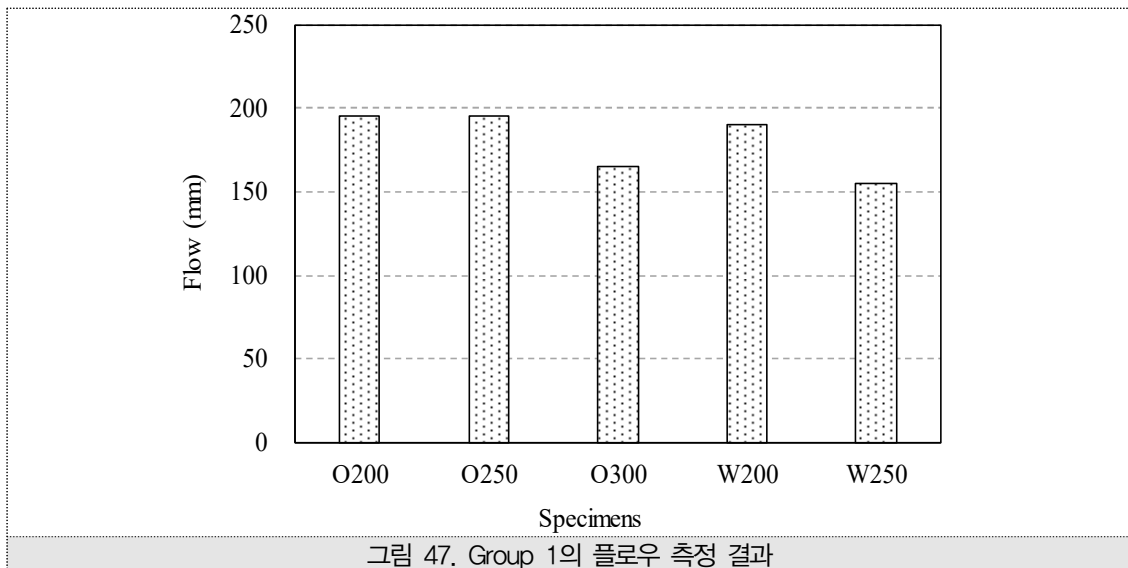
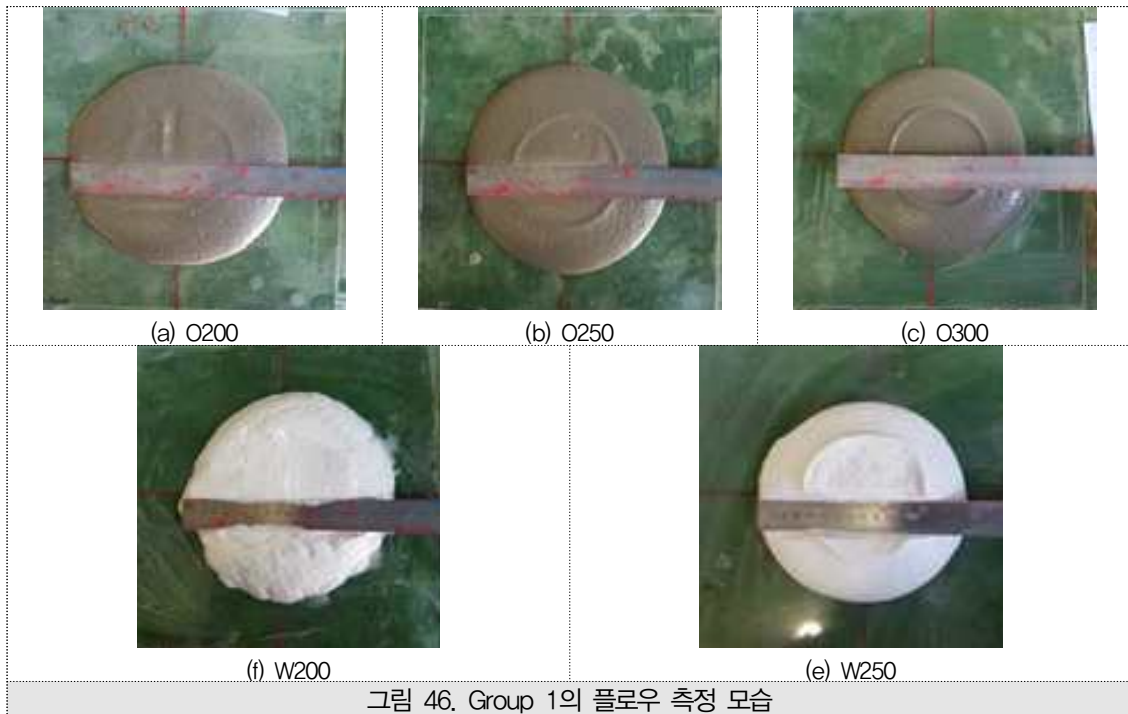
그림 41. 실기포율 측정 과정

- 반면 W250 시험체의 경우 플로우 값은 155 mm로 O250 시험체의 플로우 대비 약 5% 감소하는 경향을 나타내었음.
- 결과적으로, 백시멘트를 결합재로서 사용한 기포 콘크리트의 플로우는 일반 시멘트를 결합재로서 사용한 기포 콘크리트에 비해 플로우 값이 미미하게 감소하는 결과를 나타내었음.

■ 슬러리 밀도

- Group 1 실험에서의 슬러리 밀도 측정 결과는 <그림 48>와 같음.
- 측정결과 기포 콘크리트의 슬러리 밀도는 시멘트 종류에 관계없이 단위시멘트량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.

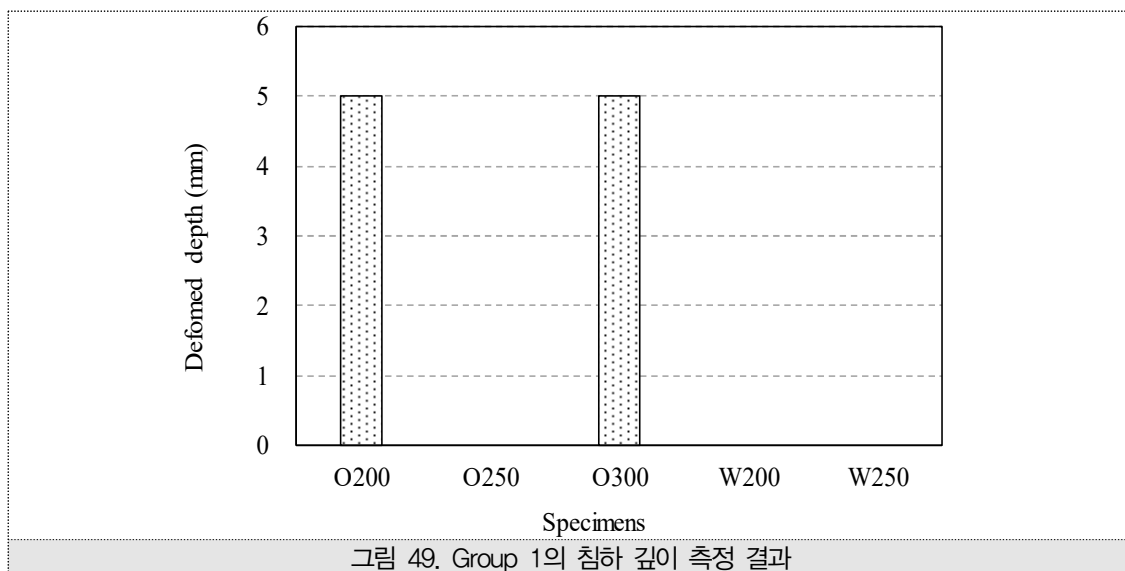
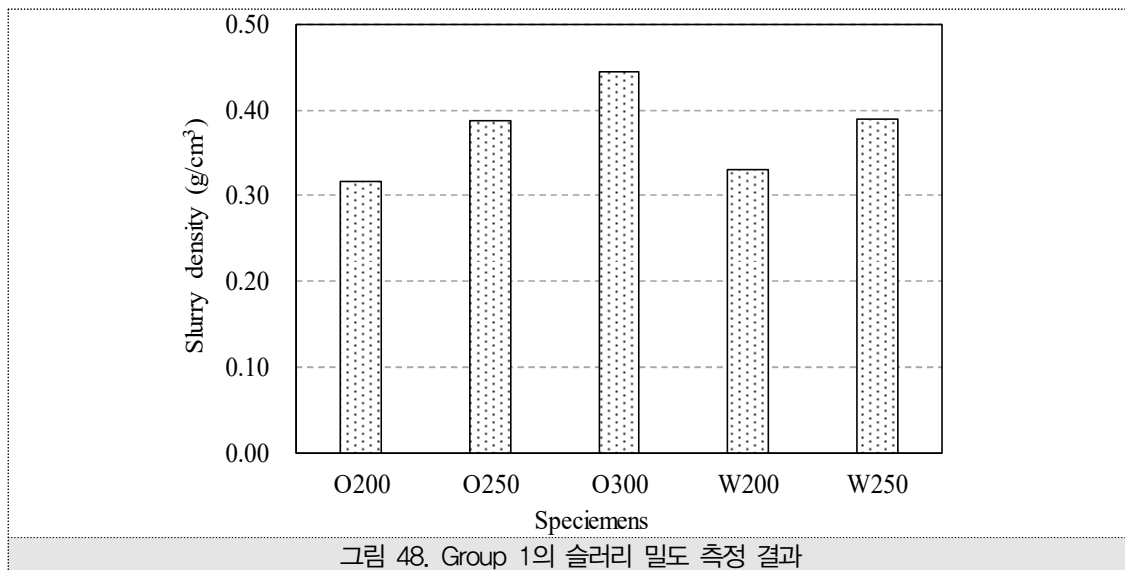




- 시멘트 종류에 관계없이 단위시멘트량이 200 kg/m^3 인 경우 O200 및 W200 시험체의 슬러리 밀도는 0.32 g/cm^3 및 0.33 g/cm^3 으로 유사한 수준이었음.
- 단위 시멘트량이 250 kg/m^3 인 경우 또한 O250 및 W250 시험체의 슬러리 밀도는 동일하게 0.39 g/cm^3 로 나타났음.

■ 침하깊이

- Group 1 실험에서 기포 콘크리트의 침하깊이를 측정한 결과를 <그림 49>에 나타내었음.
- 측정결과 일반 시멘트를 결합재로서 사용한 O200 및 O300 시험체만이 각각 5 mm의 침하가 발생되었으며, 백시멘트를 결합재로서 활용한 기포 콘크리트에서는 침하가 발생하지 않았음. 하지만 백시멘트를 결합재로서 활용한 기포 콘크리트의 경우 KS F 4039에서 제시하고 있는 침하깊이 측정을 위한 정치 시간(2시간) 이후의 소포 및 침하현상이 매우 크게 나타났음(그림 50 (a)).
- 시험체 이후에도 백시멘트를 사용한 기포 콘크리트는 다수의 거대 공극 형성 및 재료 분리 등의 현상으로 시험체의 양생 상태가 불량하였음(그림 50 (b)).
- 이로 인해 백시멘트를 사용한 기포 콘크리트의 경우 굳은 기포 콘크리트의 역학적 특성 측정항목(압축강도, 겉보기 밀도 및 열전도율)의 측정에서 제외되었음.



■ 압축강도

- Group 1 실험에서 기포콘크리트의 압축강도 측정 결과는 <그림 51>와 같음.
- 기포 콘크리트의 압축강도는 단위 결합재량이 200 kg/m³에서 300 kg/m³으로 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- 단위시멘트량이 200 kg/m³인 시험체의 재령 28일 압축강도는 0.33 MPa로 가장 낮게 나타났음.
- 단위시멘트량이 300 인 시험체의 재령 28일 압축강도는 0.74 MPa로 가장 높았으며, O200 시험체에 비해 약 1.2배 높았음.

■ 겉보기 밀도

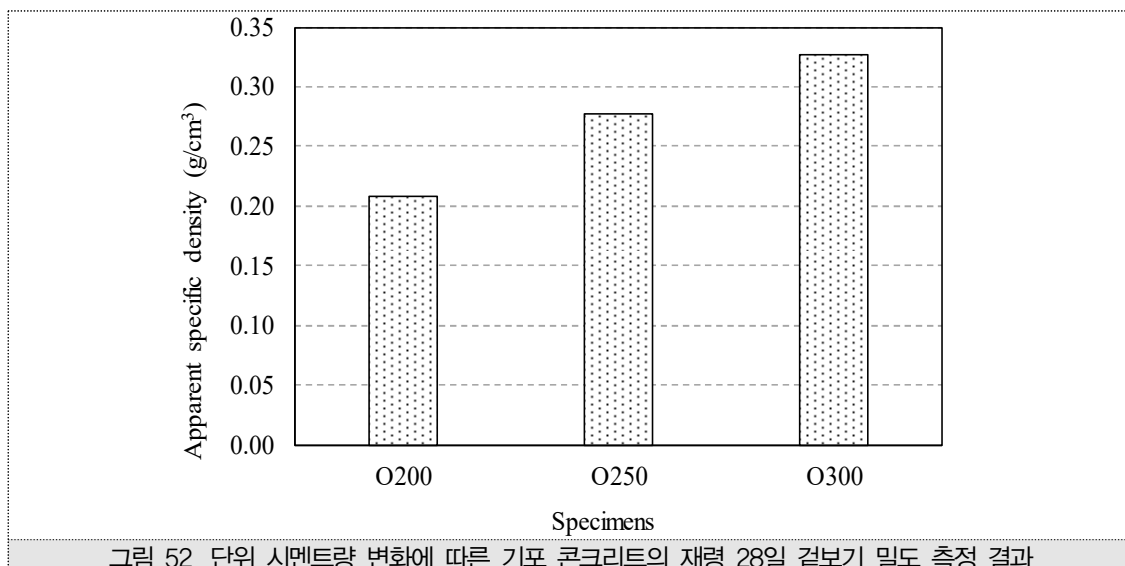
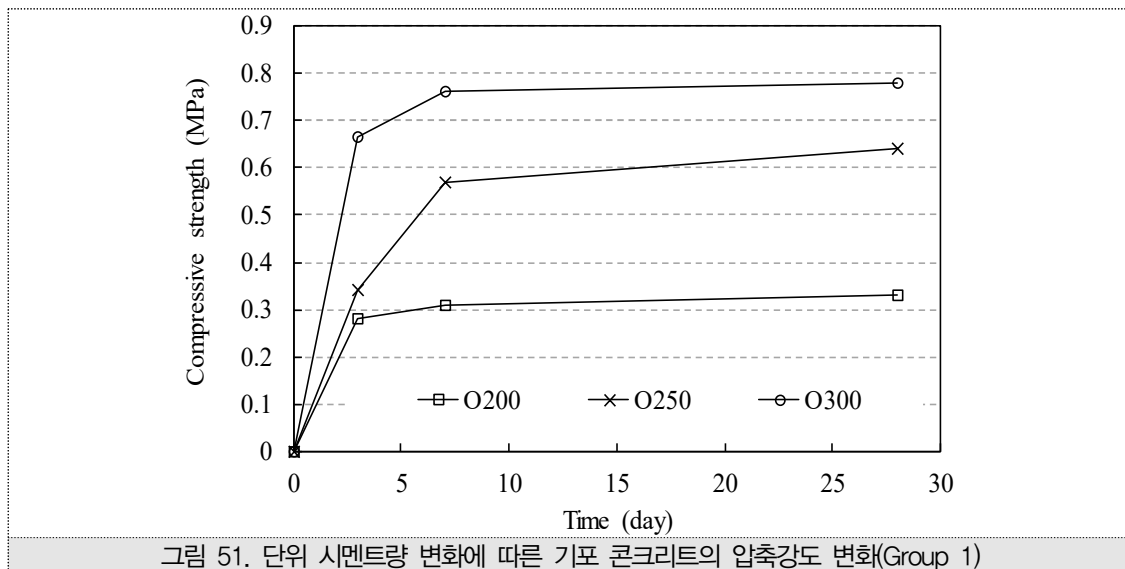
- 기포콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도 측정 결과를 <그림 52>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 겉보기 밀도는 압축강도 측정의 결과와 마찬가지로 단위시멘트량이 200 kg/m³에서 300 kg/m³으로 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- O200 시험체의 재령 28일 겉보기 밀도는 0.23 g/cm³으로 가장 낮았으며, O300 시험체의 재령 28일 겉보기 밀도는 0.33 g/cm³으로 O200 시험체 대비 약 56% 높게 나타났음.
- O250 시험체의 겉보기 밀도는 0.27 g/cm³ 으로 나타났음.

■ 열전도율

- Group 1 실험에서 기포 콘크리트의 열전도율과 겉보기 밀도와의 관계를 <그림 53>에 나타내었음.
- 일반적으로 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도와 밀접한 관계를 나타냄.
- 본 실험의 결과 기포 콘크리트의 열전도율은 단위시멘트량 증가 및 겉보기 밀도 증가에 따른 증가의 결과를 나타내었음.
- 본 실험결과 측정된 기포 콘크리트의 열전도율과 겉보기 밀도와의 관계는 비선형 회귀 분석을 통해 식 (3) 와 같이 제시 할 수 있음.

$$T_c = 0.29(\rho_c)^{0.8} \quad (3)$$

- 여기서 T_c 는 기포 콘크리트의 열전도율이며, ρ_c 는 겉보기 밀도임.



□ Group 2

■ 플로우

- Group 2에서 단위시멘트량 및 기포 첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 플로우 측정결과를 <그림 54>에 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 플로우는 단위시멘트량 및 기포 첨가율 변화에 큰 영향을 받지 않았음.
- 단위시멘트량이 650 kg/m^3 및 기포 첨가율이 58%인 시험의 플로우가 260 mm로 가장 높았으나, 이를 제외한 모든 시험체의 플로우가 235 mm~250 mm 수준으로 큰 차이를 보이지 않았음.
- 이와 함께 모든 시험체의 플로우는 KS F 4039(현장타설용 기포콘크리트)의 품질 요구사항인 플로우 180 mm 이상 수준을 만족하였음.

■ 침하깊이

- Group 2에서 단위시멘트량 및 기포 첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 침하깊이 측정결과를 <그림 55>에 나타내었음.
- 400-71 시험체의 경우 침하깊이는 3 mm로 가장 크게 나타났으며, 500-65 및 550-63 시험체가 각각 2 mm 및 1 mm의 침하깊이를 보였음.
- 반면에, 450-68, 600-60 및 650-58 시험체는 침하깊이를 보이지 않았음.
- 결과적으로 단위 시멘트량 및 기포 첨가율 변화에 관계없이 모든 시험체는 KS F 4039(현장타설용 기포콘크리트)의 0.6품의 품질규격인 침하깊이 6 mm 이하를 만족하였음.

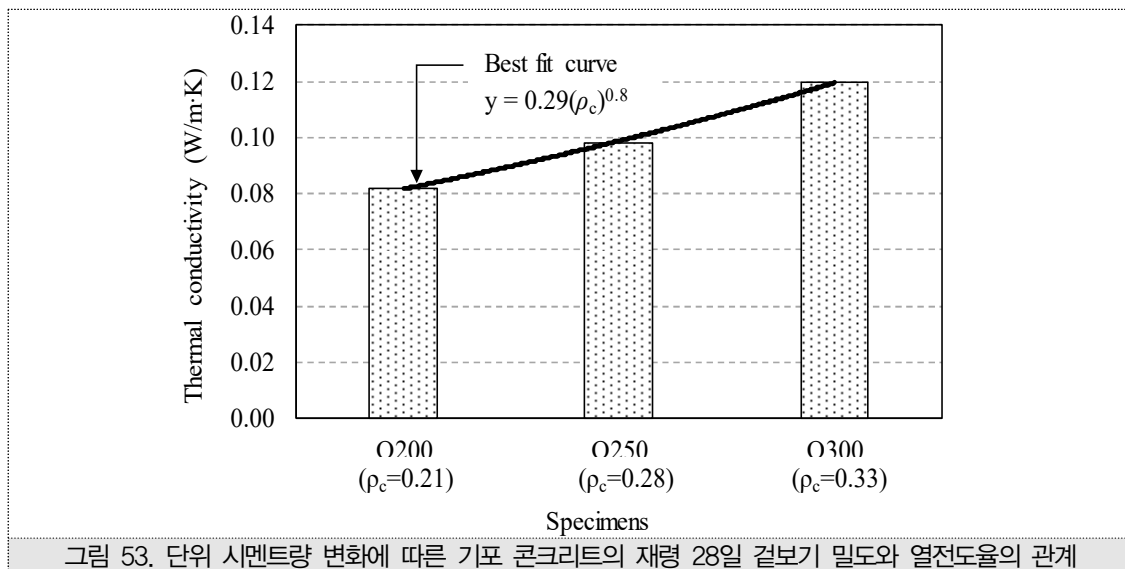


그림 53. 단위 시멘트량 변화에 따른 기포 콘크리트의 재령 28일 겉보기 밀도와 열전도율의 관계

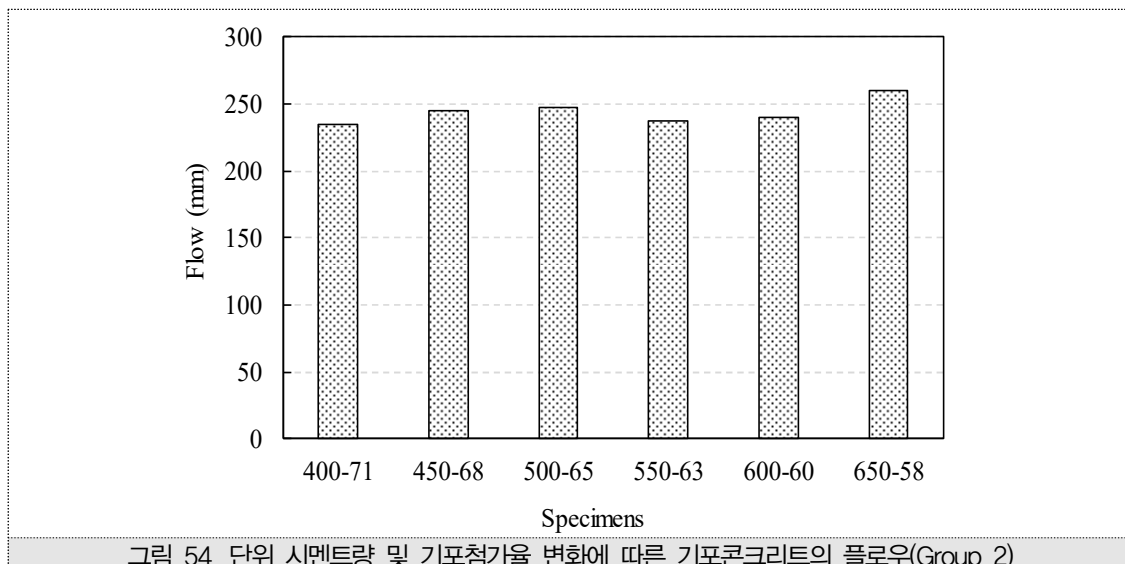


그림 54. 단위 시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 플로우(Group 2)

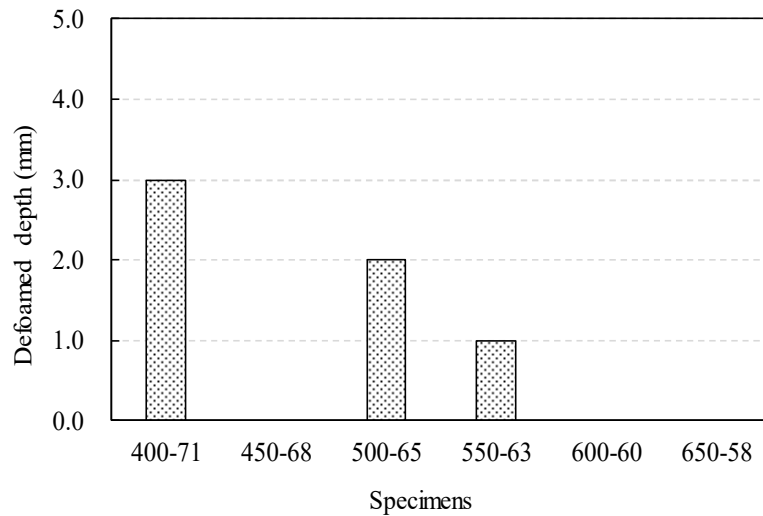


그림 55. 단위 시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 침하깊이(Group 2)

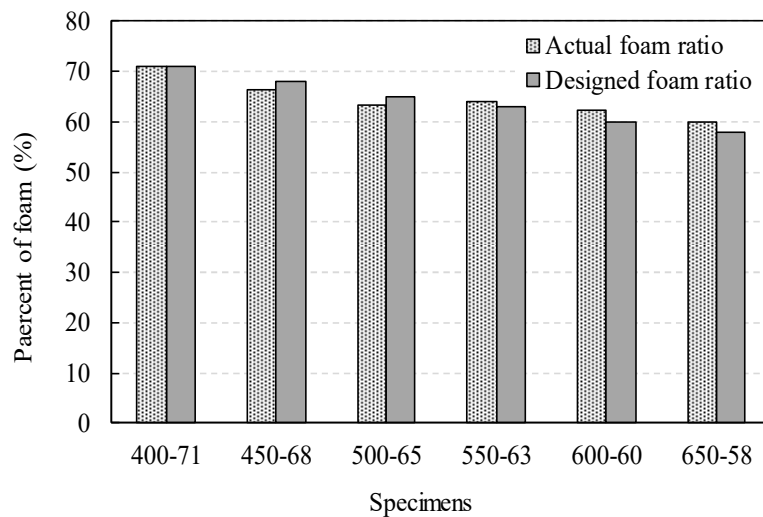


그림 56. 단위 시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 실기포율(Group 2)

■ 실기포율

- Group 2 배합실허의 실기포율 측정 결과를 <그림 56>에 나타내었음.
- 실험결과 기포 콘크리트의 실기포율은 각각 71.0, 66.3, 63.3, 64.0, 62.4 및 60.0% 로 나타났으며 계획 기포 혼입율과의 오차는 각각 0.1, 3.1, 3.8, 1.3, 3.0 및 3.5%으로 나타났음.
- 단위 시멘트량이 증가함에 따라 기포 혼입율은 점점 감소하였으며, 실 기포율은 계획기포율과 비슷한 수준에 있었음.

■ 겉보기 밀도

- Group 2에서 단위 시멘트량 및 기포 첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 겉보기 밀도 측정결과를 <그림 57>에 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 겉보기 밀도는 단위시멘트량이 증가함에 따라, 기포 첨가율이 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- 단위 시멘트량이 400 kg/m³ 및 기포 첨가율이 71%인 시험체의 겉보기 밀도는 0.43 g/cm³로 가장 낮았음.
- 반면 단위 시멘트량이 650 kg/m³ 및 기포 첨가율이 58%인 시험체의 겉보기 밀도는 0.69 g/cm³으로 400-71 시험체에 비해 약 60% 높았음.
- 더불어 겉보기 밀도가 0.5 g/cm³ 이하의 값을 보인 400-71 및 450-68 시험체는 KS F 4039의 품질규격인 0.5품을 만족하였으며, 이외의 시험체는 0.5~0.7 g/cm³의 겉보기 밀도를 나타내어 KS F 4039의 0.6품의 품질규격을 만족하였음.

■ 압축강도

- Group 2의 재령별 압축강도 측정 결과를 <그림 58>에 나타내었음.
- 기포 콘크리트의 재령별 압축강도 발현은 단위 시멘트량이 증가함에 따라, 기포 첨가율이 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- 단위 시멘트량이 650 kg/m^3 및 기포 첨가율이 58%인 시험체의 재령 7일 및 28일 압축강도는 각각 5.5 MPa 및 6 MPa로 가장 높았음.
- 단위 시멘트량이 400 kg/m^3 및 기포 첨가율이 71%인 시험체의 재령별 압축강도는 모든 시험체 중에서 가장 낮았는데, 재령 28일 압축강도는 2.1 MPa로 650-58 시험체에 비해 약 70% 낮았음.
- 하지만 모든 시험체의 재령 28일 압축강도는 모두 2.0 MPa 이상으로 KS F 4039의 0.6품의 품질 규격을 만족하였음.

■ 열전도율

- Group 2의 열전도율 측정 결과를 <그림 59>에 나타내었음.
- 650-58 시험체를 제외한 기포 콘크리트의 열전도율은 단위시멘트량이 증가함에 따라, 실기포율이 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- 이는 단위시멘트량 증가 및 실기포율 감소에 따른 기포콘크리트의 겉보기 밀도의 증가 영향으로 비추어 볼 수 있으며, 가장 낮은 겉보기 밀도를 보였던 400-71 시험체가 열전도율의 측정 결과에서도 $0.118 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 가장 낮은 값을 보였음.
- 결과적으로 기포 첨가율의 증가 및 단위 시멘트량의 감소는 기포 콘크리트의 겉보기 밀도 감소 및 낮은 열전도율 확보 측면에서 중요한 요소라 할 수 있음.

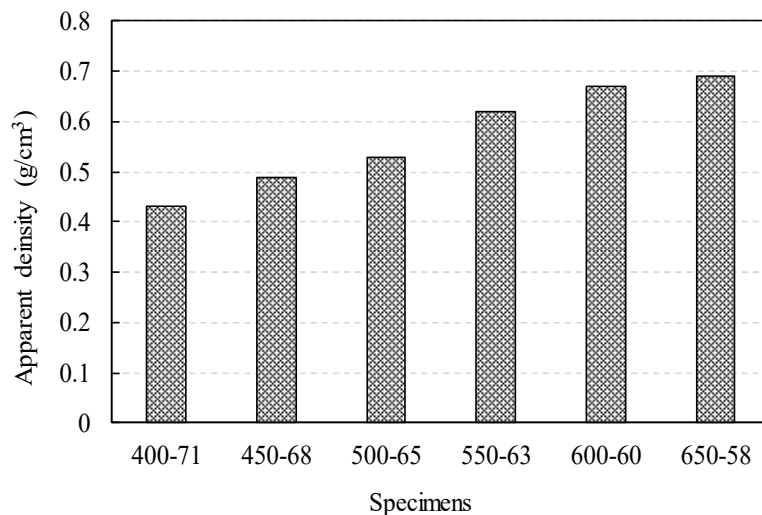


그림 57. 단위 시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 겉보기 밀도(Group 2)

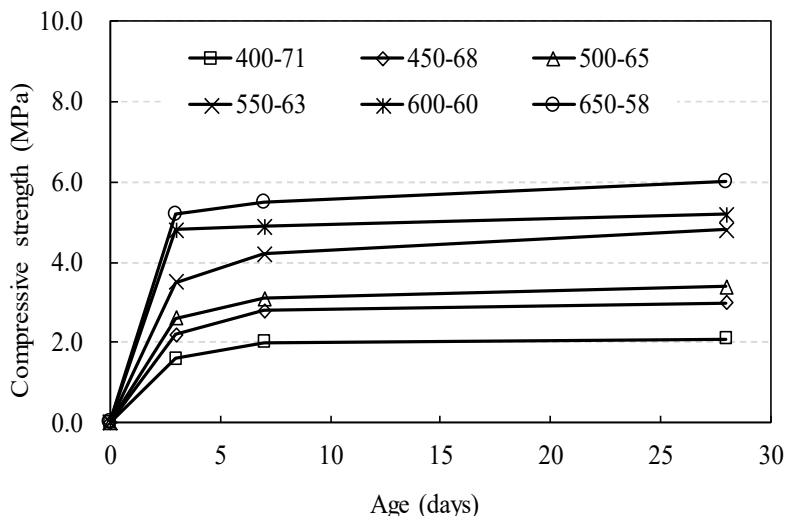


그림 58. 단위 시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 압축강도 발현(Group 2)

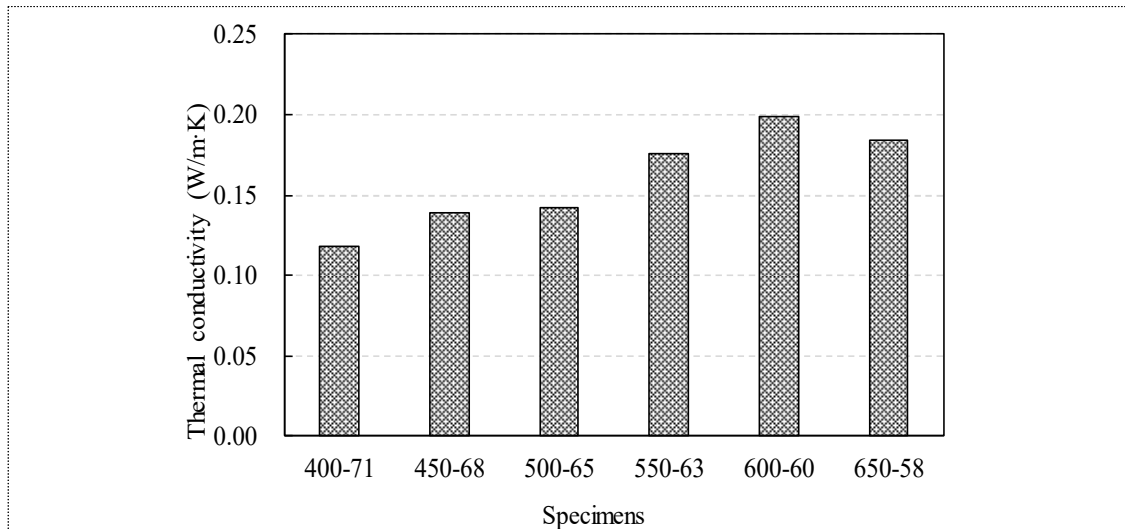


그림 59. 단위 시멘트량 및 기포첨가율 변화에 따른 기포콘크리트의 열전도율(Group 2)

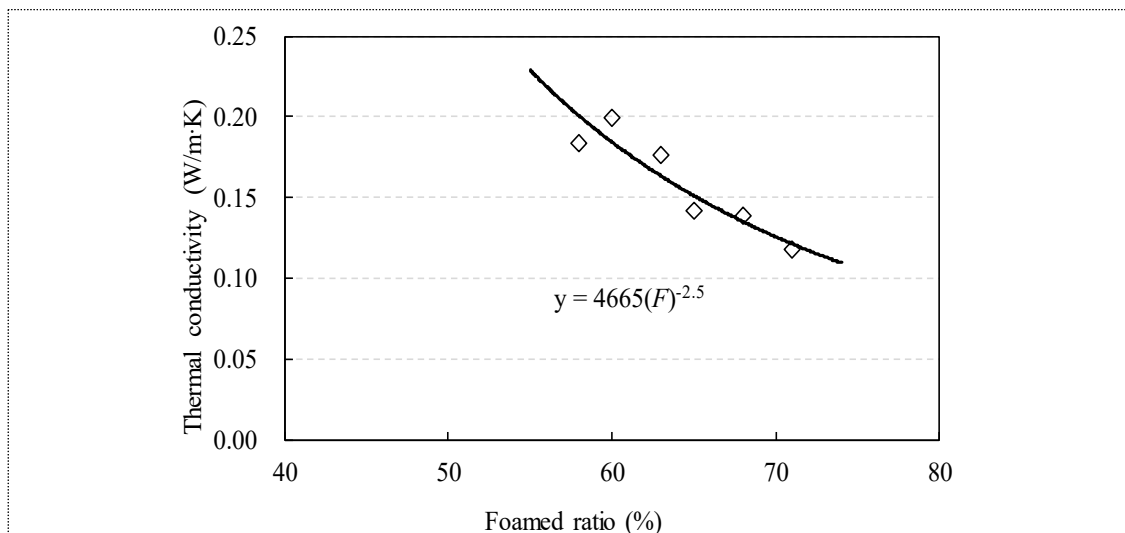


그림 60. 기포첨가율과 열전도율의 관계(Group 2)

- Group 2 실험에서 기포 콘크리트의 기포 첨가율과 열전도율의 관계를 <그림 60>에 나타내었음.
- 본 실험의 결과 기포 콘크리트의 열전도율은 단위시멘트량 증가와 함께 기포 첨가율에 감소함에 따라 증가하는 결과를 보였음.
- 본 실험결과 측정된 기포 콘크리트의 기포첨가율과 열전도율의 관계는 비선형 회귀 분석을 통해 식 (3)와 같이 제시 할 수 있음.

$$T_c = 4665(F)^{-2.5} \quad (3)$$

- 여기서 T_c 는 기포 콘크리트의 열전도율이며, F 는 기포 첨가율(%) 임.

□ Group 3

■ 플로우

- Group 3 실험에서 폴리머 및 산화알루미늄 겔을 결합재의 30% 및 10% 치환하여 활용한 경우는 <그림 61>과 같이 다량의 거대 공극 발생 및 침하 현상의 과다로 플로우, 압축강도 등 역학적 특성 평가 항목에서 제외하였음.
- 반면, 동물성 기포제로서 에어로겔의 친수성 개질을 실시한 경우 Group 1의 실험결과와 같이(<그림 41> 참조) 거대 공극 발생 및 소포 현상이 발생하지 않았음(<그림 62>).
- 기포 콘크리트의 플로우는 에어로겔 치환율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음.
- AG25 시험체의 플로우는 2250 mm로, 205 mm의 플로우 값을 나타낸 A50 시험체에 비해 약 11% 낮게 나타났다.

■ 슬러리 밀도

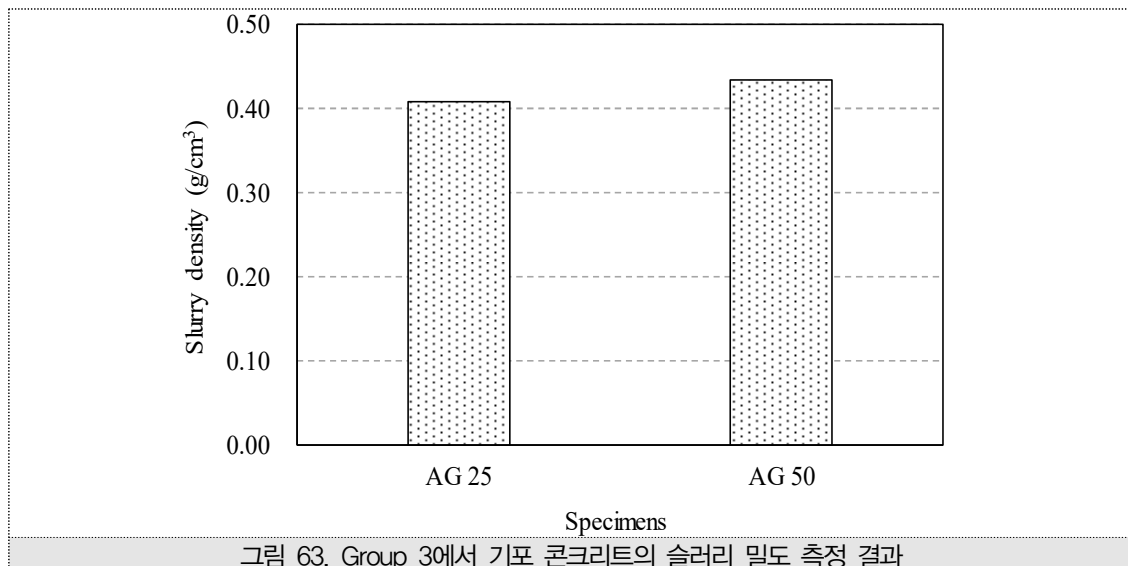
- Group 3 실험에서의 슬러리 밀도 측정 결과를 <그림 63>에 나타내었음.
- 측정결과 기포 콘크리트의 슬러리 밀도는 에어로겔 치환율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었지만 그 차이는 매우 미미한 수준이었음.
- AG25 및 AG50 시험체의 슬러리 밀도는 0.41 g/cm^3 및 0.44 g/cm^3 로 유사한 수준이었음.

■ 침하 깊이

- 동물성 기포제와의 교반을 통해 친수성이 부여된 에어로겔을 25% 및 50% 치환한 콘크리트 배합에서는 <그림 64>의 결과와 같이 타설 후 시험체의 침하 현상이 발생되지 않았음.

■ 압축 강도

- Group 2 실험에서 에어로겔 혼입 기포콘크리트의 재령 7일까지의 압축강도 측정 결과는 <그림 65>와 같음.
- 재령 7일에서 기포 콘크리트의 압축강도는 에어로겔의 치환율이 25%에서 50%로 변화함에 따라 감소함.
- AG25 및 A50 시험체의 재령 7일 압축강도는 각각 0.26 MPa 및 0.19 MPa 이었음.





(a) 에어로겔 25% 혼입



(b) 에어로겔 50% 혼입

그림 64. 에어로겔의 계면활성제로서 동물성 기포제를 활용한 경우의 기포콘크리트 침하 깊이

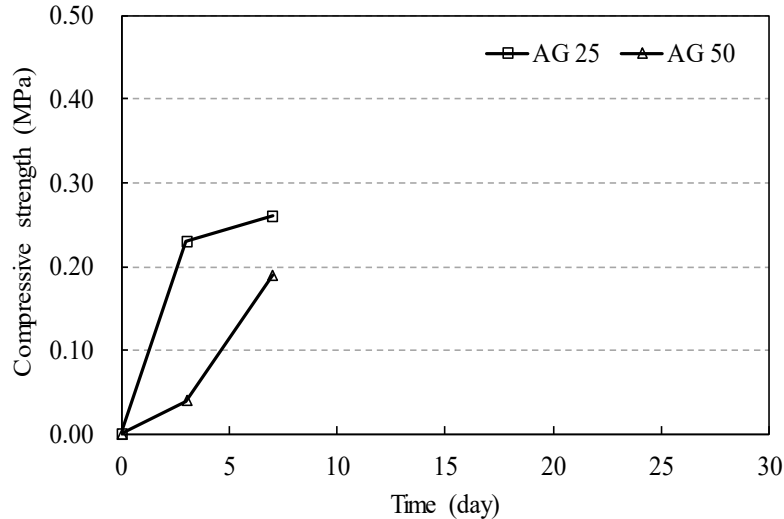


그림 65. 2에서 기포 콘크리트의 재령별 압축강도 변화

- 결과적으로 동일한 단위시멘트량인 경우 에어로겔을 첨가하지 않은 일반 기포콘크리트(0.57 MPa)에 비해 에어로겔 혼입 기포 콘크리트의 압축강도는 약 2배 이상 감소하는 결과를 나타내었음.

4) 기포 콘크리트 자체의 성능개선을 위한 혼화재 활용 가능성 평가

(1) 일반사항

- 기포 콘크리트 자체의 강도발현 성능 확보를 위한 혼화재 혼입의 영향을 평가함.
- 주요 배합변수로 GGBS 및 메타카올린(metakaoline, MK)의 혼입율과 양생환경을 변화하였음.
- GGBS 및 MK는 시멘트 보다 높은 분말도를 가지는 특성으로 습식형 기포 콘크리트에서 결합재로 일정량 치환하여 사용할 경우 높은 충전효과에 기인하여 기포간 응집력을 낮추고 병합을 방지하는 효과를 기대할 수 있음.
- 하지만 혼화재의 혼입의 초기 재령에서의 낮은 강도발현의 문제점을 보일수 있는데, 이는 초기 양생온도를 상승시킴으로서 개선이 가능함.
- 이에 따라 본 실험에서는 혼화재 혼입 기포콘크리트의 고온 양생 온도와 고온 양생 유지시간을 변화하였으며, 이에 따른 기포콘크리트의 재령별 압축강도와 겉보기 밀도 등의 특성을 평가하였다.
- 더불어 공극형상 및 열전도율 등의 특성을 평가하였음.

□ 사용재료

■ 시멘트

- 본 연구에 사용된 시멘트의 화학적 조성은 <표 17>과 같음.

- 밀도 및 분말도가 각각 3.14 g/cm^3 및 $4,497 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 재료를 사용하였음.

■ 고로슬래그(GGBS)

- 이 연구에 사용된 GGBS의 화학적 조성 및 물리적 특성을 <표 23>에 나타내었음.
- GGBS의 밀도는 2.89 g/cm^3 이며, 비표면적은 $4,355 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 재료를 사용하였음.

■ 메타카올린(MK)

- MK의 화학적 조성 및 물리적 특성은 <표 23>과 같다.
- MK의 밀도는 2.2 g/cm^3 이며, 비표면적은 $10,424 \text{ cm}^2/\text{g}$ 임.

□ 실험상세

- 기포 콘크리트의 자체 성능 개선을 위한 혼화재 치환 배합실험은 사용된 혼화재의 종류, 분말도 및 양생 환경 변화에 따라 3가지로 구분하였다.
- 그룹 1의 경우 기포 콘크리트의 결합재로서 GGBS를 활용한 배합실험으로, GGBS의 치환율을 40%로 고정하였음(<표 24>).
- 이와 함께 기포 콘크리트 배합 후 고온양생을 실시하기 전 기포의 안정화를 위한 정치시간 0시간, 12시간, 24시간 및 36시간으로 변화하였음.
- 양생온도 및 양생 지속 시간은 각각 20°C , 40°C , 60°C 및 10시간 15시간으로 변화하였음. 고온 환경에서 양생이 완료된 시험체는 다시 20°C 의 항온항습 환경으로 이동시켜 지속적인 양생을 실시 하였음.
- 그룹 2의 경우에는 $4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 수준의 GGBS를 결합재로서 이용하였음.
- 그룹 2의 주요 변수는 $W/B=30\%$, 40% , 50% 및 단위결합재량= $210, 220, 230, 240, 250 \text{ kg/m}^3$ 으로 하였음(<표 25>).
- 그룹 2에서 시험체명은 W/B -단위결합재량-GGBS치환율을 기준으로 명명하였음. 예를 들어 $30-250-40$ 인 경우 $W/B=30\%$, 단위결합재량= 250 kg/m^3 및 GGBS 치환율= 40% 인 배합임.
- 그룹 3에서는 OPC와 함께 기포콘크리트 제작을 위한 결합재로서 MK를 이용하였으며, 그 치환율을 $10\% \sim 50\%$ 로 변화하였음(<표 26>).

표 23. GGBS 및 MK의 특성

Materials	Density (g/cm^3)	Specific surface area (cm^2/g)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI
GGBS	2.94	4,355	20.60	4.52	0.36	68.69	1.26	3.94	1.70
Metakaoline	2.20	10,424	53.0	44.0	0.25	0.4	-	-	2.35

표 24. 양생환경 변화에 따른 GGBS 혼입 기포콘크리트 특성평가 배합 상세(Group 1)

No.	W/B (%)	Unit Binder (kg/m ³)	Binder mixing ratio (%)		Admixture (%)	Curing condition		
			OPC	GGBS		Latency time (hr)	Temperature (°C)	Curing time (hr)
1	30	250	100	0	0.4	0, 12, 24, 36	20, 40, 60	10, 15
2			60	40				

표 25. W/B, 단위결합재량 및 GGBS 치환율 변화에 따른 기포콘크리트 특성평가의 배합상세(Group 2)

Specimens	W/B (%)	Unit binder (kg/m ³)	Binder mixing ratio (%)	
			OPC	GGBS
30-250-30	30	250	70	30
30-250-40		250	60	40
30-250-50		250	50	50
30-240-40		240	60	40
30-230-40		230		
30-220-40		220		
30-210-40		210		
25-250-40	25	250		
20-250-40	20	250		

표 26. MK 치환율 변화에 따른 기포콘크리트 특성평가의 배합상세(Group 3)

Specimens	W/B (%)	Unit binder (kg/m ³)	Binder mixing ratio (%)	
			OPC	MK
OPC	30	250	100	—
MK10			90	10
MK20			80	20
MK30			70	30
MK40			60	40

□ 측정항목

■ 플로우

- 플로우 측정과정을 <그림 37>에 나타내었음.
- 플로우는 KS F 4039에 제시하고 있는 350 × 350 mm 유리판 위에 안지름 80 mm 높이 80 mm인 아크릴 원통을 세운 후 채워진 기포 슬러리를 상부까지 붓고 남은 윗부분을 수평하게 제거한 후 원통을 살며시 들어올려 1분 후에 시료가 퍼진 4방향에 대해 등간격으로 측정하여 평균값을 사용함.

■ 슬러리 밀도

- 슬러리 밀도의 측정과정을 <그림 39>에 나타내었음.
- 슬러리 밀도의 측정은 별도로 제작된 1 L의 용기에 채워진 기포 슬러리를 표면 상부까지 채우고 용기의 질량을 뺀 시료의 질량을 측정함.
- KS F 4039에 제시하고 있는 1g 단위인 저울을 사용하여 측정함.

■ 압축강도

- 압축강도의 측정과정을 <그림 40>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 압축강도는 KS F 2459에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 타설 후 재령 3일, 7일 및 28일에 500 kN 용량의 만능재료시험기로 압축강도를 측정함.

■ 겉보기 밀도

- 겉보기 밀도의 측정과정을 <그림 41>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 겉보기 비중은 KS F 2459에 따라 28일 수중양생을 마친 공시체를 건조로 안에서($105 \pm 5^\circ\text{C}$)의 온도로 일정 질량이 될 때까지 건조시킨 후, 실온이 될 때까지 냉각

■ 열전도율

- KS F 4039에 따라 $300 \times 300 \times 50$ mm의 시험체를 제작하였으며, 28일간 항온항습환경(습도 $60 \pm 5\%$, 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$)에서 양생을 실시 한 후 $105 \pm 2^\circ\text{C}$ 항량이 될 때까지 건조하였음.
- 이후 열전도율 측정 장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도율 측정을 실시하였음.
- 기준온도를 20°C 로 하여 양면에 15°C 의 온도차를 부여하였음.

■ 건조수축

- 건조수축 변형률의 측정은 배합별로 제작된 $100 \times 100 \times 400$ mm 시험체에 매립된 전기저항 게이지와 데이터 로거(TDS 303)를 사용하여 재령 91일 동안 계측하였음.
- 건조수축 변형률의 측정은 91일의 재령기간 동안 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 및 습도 $60 \pm 5\%$ 의 환경에서 실시하였음.

□ Group 1

■ 주요 실험결과

- Group 1에서 고온양생환경 변화에 따른 기포콘크리트의 겉보기 밀도와 압축강도 측정 결과의 요약을 <표 27>에 나타내었음.
- 이들 실험결과에서 주요한 실험결과인 24시간 전치, 40°C , 60°C 및 10시간, 15시간의 양생환경 변화를 갖는 변수에 대한 분석 결과는 다음과 같음.

■ 공극형상

- 경화된 기포 콘크리트의 공극형상 및 분포는 <그림 66>과 같음.
- OPC 100% 시험체는 6 mm 이상 크기의 공극이 다수 형성되었음. 반면, OPC 60%와 GGBS 40% 결합재를 이용한 2-24-20-0, 2-24-40-10, 2-24-40-15 및 2-24-60-10 시험체는 0.5~3 mm 크기의 공극이 고르게 형성되었음.
- 시멘트에 비해 높은 분말도를 갖는 GGBS 혼입은 기포 콘크리트에서 기포간 응집력을 감소시킬 수 있음. 이에 따라 GGBS를 40% 혼입한 시험체에 비해 상대적으로 기포간 응집력이 큰 OPC 100% 배합에서는 기포간 병합에 의해 열린공극이 형성될 수 있으며, 이는 비교적 큰 크기의 공극 형성에 영향을 미친 것으로 판단됨.
- 시험체 2-24-60-15의 경우에는 0.5~3 mm 크기의 공극 외에 5 mm 이상 수준의 공극도 다수 관찰되었는데, 기포 콘크리트를 60°C 에서 15시간 이상 양생할 경우 오히려 내부 수증기압의 증가로 기포간 병합이 쉽게 발생할 수 있다고 판단됨.

■ 압축강도 발현율

- GGBS 혼입 기포 콘크리트의 재령 7일과 28일 압축강도를 <그림 67>에 나타내었음.
- 그림에서 세로축은 OPC 60%와 GGBS 40% 결합재를 이용한 표준양생 한 1-0-20-0 시험체의 압축강도로 무차원한 값임.
- 시험체 2-24-20-0의 압축강도 대비 재령 28일 동안 상온에서 양생한 OPC 100% 배합은 재령 7일에서 약 1.43 배 높았으나 재령 28일에서는 동일한 수준을 보였음.
- OPC 60% 및 GGBS 40% 결합재를 이용한 배합의 압축강도는 시험체 2-24-60-15를 제외한 모든 양생조건에서 시험체 2-24-20-0의 압축강도보다 높았음. 특히 시험체 60-10과 40-15의 압축강도가 높았는데, 시험체 20-0의 압축강도 대비 시험체 60-10 시험체의 압축강도는 재령 7일과 28일에서 각각 1.88배 및 1.30배 높았으며, 시험체 40-15는 각각 1.86배와 1.30배 높았음.

표 27. 양생환경 변화에 따른 GGBS 혼입 기포콘크리트 특성평가 배합 상세(Group 1)

Specimens	7 days		28 days		Thermal conductivity (W/m · K)
	Compressive strength (MPa)	Specific apparent density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)	Specific apparent density (g/cm ³)	
1-12-40-10	0.25	0.33	0.20	0.30	—
1-12-40-15	0.29	0.33	—	—	—
1-12-60-10	0.37	0.35	0.33	0.32	—
1-12-60-15	0.22	0.35	0.33	0.30	—
1-24-40-10	0.37	0.35	0.26	0.31	—
1-24-40-15	0.41	0.34	0.26	0.30	—
1-24-60-10	0.44	0.34	0.39	0.30	—
1-24-60-15	0.44	0.34	0.53	0.32	—
1-0-20-0	0.26	0.33	0.31	0.31	0.098
2-12-40-10	0.51	0.34	0.42	0.31	—
2-12-40-15	0.51	0.36	0.38	0.31	—
2-12-60-10	0.55	0.35	0.54	0.32	—
2-12-60-15	0.68	0.34	0.78	0.32	—
2-24-40-10	0.70	0.35	0.41	0.32	0.110
2-24-40-15	0.71	0.37	0.59	0.38	0.105
2-24-60-10	1.01	0.36	0.86	0.32	0.106
2-24-60-15	0.93	0.37	0.60	0.35	0.122
2-0-20-0	0.53	0.37	0.30	0.32	0.110

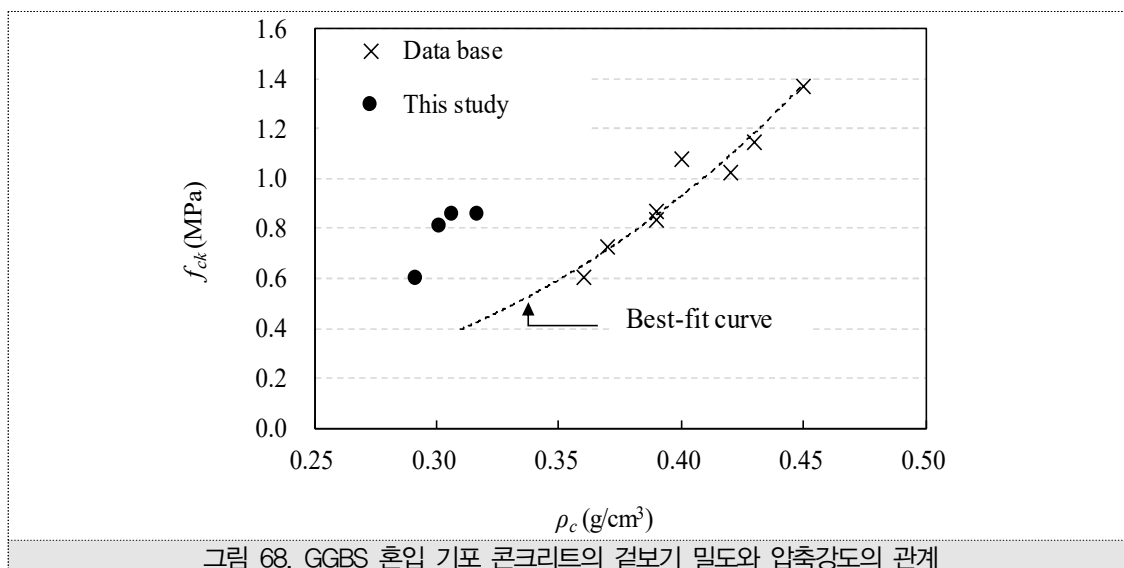
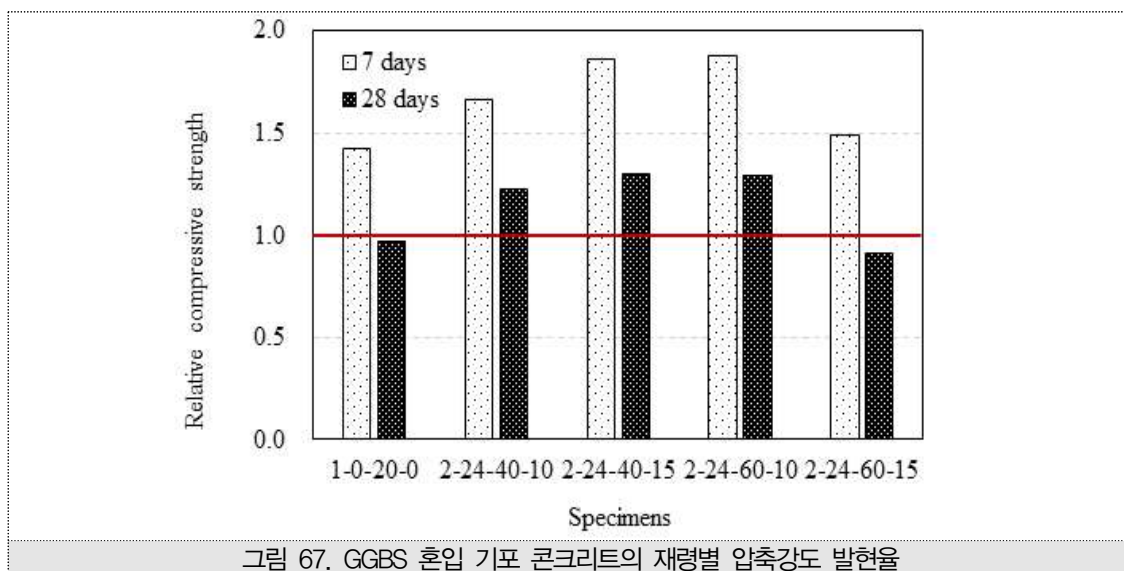
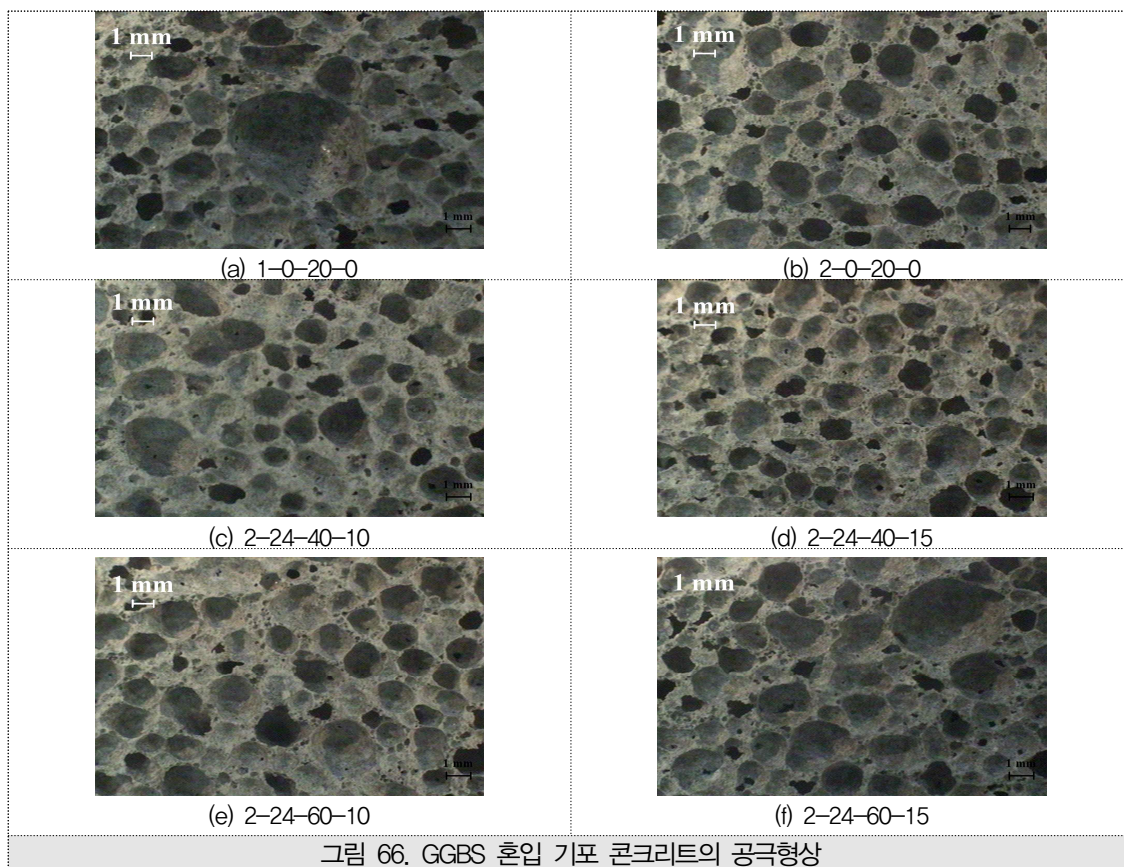
- 결과적으로 기포간 병합으로 인한 압축강도 저하를 방지하기 위해서는 양생온도 60°C에서 그 지속시간을 10시간 이하로 제한할 필요가 있음.

■ 겉보기 밀도

- 고로슬래그 혼입 기포 콘크리트의 겉보기 밀도는 양생온도 및 고온양생 유지시간에 큰 영향을 받지 않았음.
- 시험체 1-0-20-0, 2-24-40-10, 2-24-40-15 및 2-24-60-10에서 측정된 겉보기 밀도는 0.30~0.32 g/cm³ 수준으로서 KS F 4039의 0.4품(0.30 g/cm³ 이상 0.40 g/cm³ 미만)을 만족하였음.
- 반면 OPC 100% 배합 및 시험체 60-15의 겉보기 밀도는 0.29 g/cm³로 다른 시험체에 비해 다소 낮았음.
- 〈그림 68〉에는 GGBS 혼입 기포 콘크리트의 압축강도와 겉보기 밀도와의 관계를 나타내었음. 비교를 위해 상온에서 양생된 OPC 60%와 GGBS 40% 결합재를 이용한 기포 콘크리트 실험결과를 함께 나타내었음.
- 일반적으로 기포 콘크리트의 압축강도는 겉보기 밀도가 감소함에 따라 감소함.
- 이 연구에서는 열전도율 0.1 W/m · K 수준의 기포 콘크리트 생산을 목표로 하였기 때문에 단위 결합재량을 250 kg/m³ 사용하였음. 그에 따라 기포 콘크리트의 겉보기 밀도는 약 0.3 g/cm³ 수준으로 매우 낮으며 28 일 압축강도도 1 MPa 이하로 낮음.
- 하지만 상온양생을 실시한 GGBS 혼입 기포 콘크리트의 압축강도와 겉보기 밀도 관계와 비교하면 이 연구의 배합들은 동일 겉보기 밀도에서 비교적 높은 압축강도 발현 특성을 보였음.

■ 열전도율

- 모든 시험체의 열전도율은 GGBS 혼입 및 양생조건에 관계없이 KS F 4039의 0.4품 조건(0.130 W/m · K 이하)을 만족하였음.
- 시험체 2-24-20-0, 2-24-40-10 및 2-24-40-15의 열전도율은 각각 0.110 W/m · K, 0.105 W/m · K 및 0.106 W/m · K로 비슷한 수준이었으며, 시험체 2-24-60-10는 가장 높은 열전도율 값(0.122 W/m · K)을 보였음.
- 〈그림 69〉에는 기포 콘크리트의 열전도율에 대한 겉보기 밀도의 영향을 나타내었음.



- 이 연구의 시험체들은 상온에서 양생된 기존 실험결과들의 추세선과 동일한 선상에 있었음.
- 즉, 고온 양생된 GGBS 혼입 기포 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도의 감소와 함께 감소하는데 그 감소 경향은 상온 양생의 경우와 비슷하였음.
- 기포 콘크리트의 열전달 저항성능에 대한 GGBS 혼입 및 고온양생의 영향은 미미하다고 판단됨.

□ Group 2

■ 겉보기 밀도와 압축강도

- Group 2에서 GGBS 치환율, 단위결합재량, W/B 변화에 따른 기포콘크리트의 겉보기 밀도와 압축강도 측정 결과의 요약을 <표 28>에 나타내었음.
- 측정결과 GGBS 치환율의 변화는 기포콘크리트의 겉보기 밀도 변화에 큰 영향을 미치지 않았음. GGBS 치환율이 30% 및 40%인 경우 기포 콘크리트의 겉보기 밀도는 0.33 g/cm^3 으로 동일한 수준이었으며, GGBS를 50% 혼입한 시험체도 0.32 g/cm^3 으로 큰 차이를 보이지 않았음.
- 반면 압축강도의 경우에는 GGBS를 40% 혼입한 시험체가 재령 28일에서 0.66 MPa 로 가장 높았음.
- 단위결합재량 변화에 따른 기포 콘크리트의 겉보기 밀도 및 압축강도는 240 kg/m^3 에서 210 kg/m^3 으로 변화함에 따라 감소하는 경향을 보였음.
- W/B 를 변화한 배합의 경우에는 W/B 가 30%에서 20%로 감소함에 따라 겉보기 밀도와 압축강도가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 단위수량 감소에 따른 기포 콘크리트 슬러의 유동성 부족 및 균질한 혼합의 불량으로 발생된 것으로 판단됨.

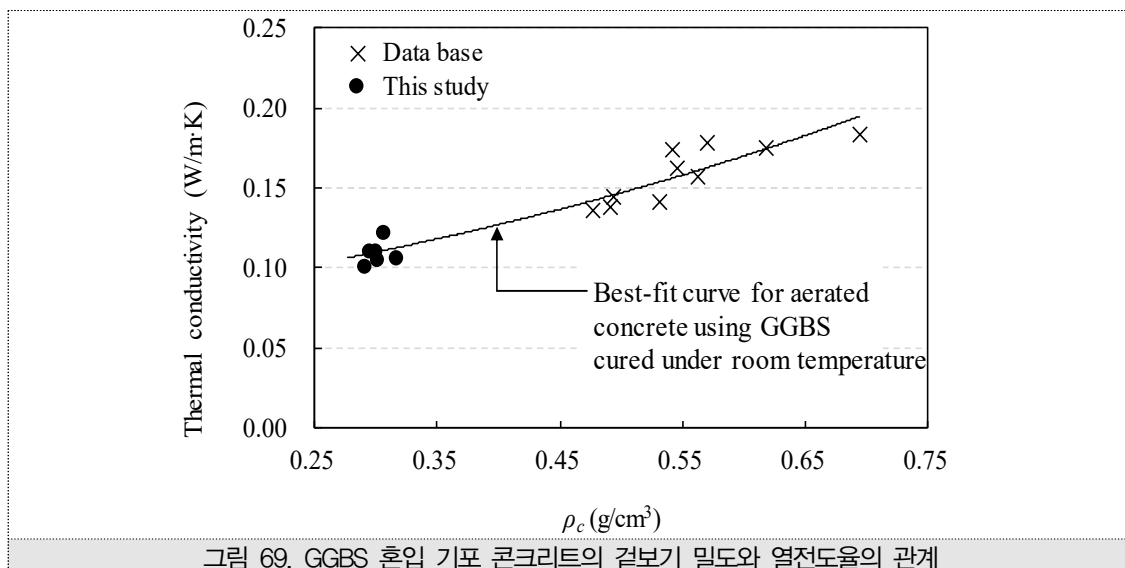


그림 69. GGBS 혼입 기포 콘크리트의 겉보기 밀도와 열전도율의 관계

표 28. 양생환경 변화에 따른 GGBS 혼입 기포콘크리트 특성평가 배합 상세(Group 2)

Specimens	7 days		28 days	
	Compressive strength (MPa)	Specific apparent density (g/cm^3)	Compressive strength (MPa)	Specific apparent density (g/cm^3)
30-250-30	0.36	0.33	0.37	0.33
30-250-40	0.66	0.34	0.66	0.33
30-250-50	0.50	0.31	0.51	0.31
30-240-40	0.63	0.33	0.75	0.32
30-230-40	0.64	0.35	0.74	0.35
30-220-40	0.38	0.29	0.45	0.29
30-210-40	0.30	0.28	0.41	0.28
25-250-40	0.58	0.32	0.66	0.32
20-250-40	0.20	0.30	0.20	0.30

□ Group 3

■ 플로우

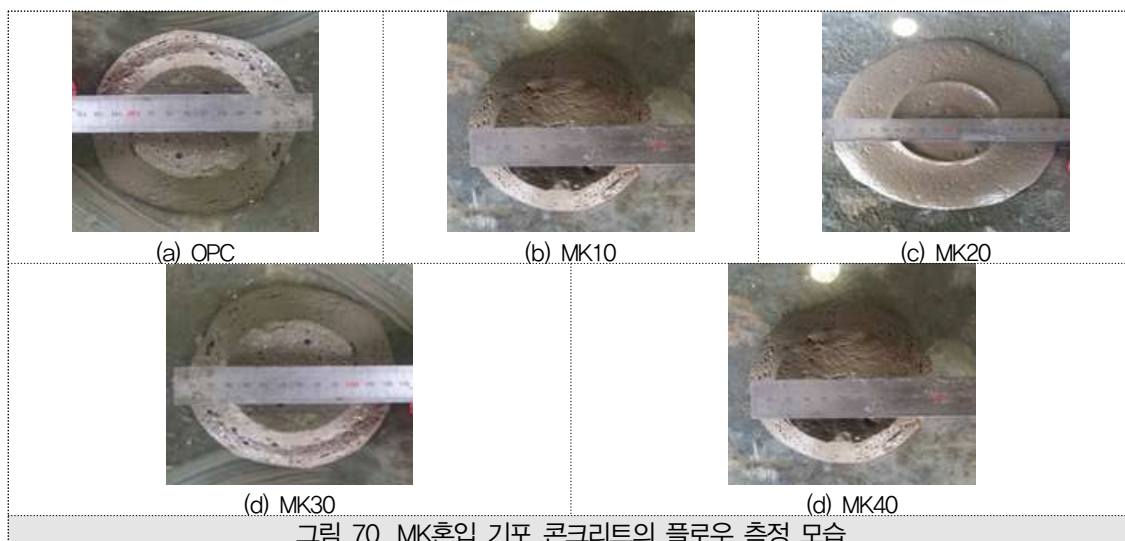
- MK 혼입을 변화에 따른 기포콘크리트의 플로우 측정 모습 및 결과를 각각 <그림 70> 및 <그림 71>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 플로우는 MK 혼입율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음. MK10 시험체의 경우가 195 mm로 가장 높게 나타났으며, MK30 시험체가 125 mm로 가장 낮게 나타났음.
- 이러한 경향은 MK이 시멘트 보다 비표면적이 크고, 콘크리트 내부를 밀실하게 만든 공극 충전 효과에 기인하여 점성이 증가한 것으로 판단됨.
- MK40 인 시험체는 10 % 시험체의 약 70 % 수준인 플로우 135 mm로 측정되었음. 또한 MK20 및 MK30 인 경우 OPC 대비 각각 19%, 32%로 감소하였음.
- 결과적으로 MK 혼입량이 증가함에 따라 기포콘크리트의 플로우는 감소하였으며, MK10에서 MK20로 변화할 때 그 증가율은 20% 이상으로 나타났음.

■ 겉보기 밀도

- MK 혼입한 기포콘크리트의 겉보기 밀도 측정 결과는 <그림 72>에 나타내었음.
- 측정결과 MK40 배합을 제외한 모든 시험체는 현장 타설용 기포콘크리트의 KS 규격인 0.4품의 품질 규격 (0.3 g/cm^3 이상 0.4 g/cm^3 미만)을 만족하였음.
- MK10 시험체의 겉보기 밀도는 0.34 g/cm^3 로 가장 높았으며, MK40 시험체의 경우의 겉보기 밀도는 0.29 g/cm^3 로 가장 낮게 나타났음.
- MK20 시험체의 겉보기 밀도는 0.32 g/cm^3 로 MK30 시험체 겉보기 밀도 0.30 g/cm^3 보다 7% 높게 나타났음.
- 결과적으로 MK 혼입량이 증가함에 따라 기포콘크리트의 겉보기 밀도는 감소하였지만, 그 영향은 MK 혼입량 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않았음.

■ 압축강도

- MK 혼입을 변화에 따른 기포 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 <그림 73>에 나타내었음.
- 기포콘크리트의 재령 7일 압축강도는 MK 혼입율이 증가함에 따라 MK10인 경우를 제외하고 감소하는 경향을 나타내었음.
- MK10인 혼입 시험체의 경우 재령 7일 압축강도는 0.76 MPa로 가장 높았으며, MK40 시험체의 경우에는 0.34 MPa로 MK10 시험체 대비 약 55%로 가장 낮았음.
- MK20 및 MK30 시험체의 재령 7일 압축강도는 0.47 MPa 및 0.40 MPa로 강도 감소는 미미하였음.
- MK10 시험체의 경우만 현장 타설용 기포콘크리트의 KS 규격인 0.5품의 품질 수준(0.8 MPa 이상)을 만족하였음.



- MK40 시험체의 재령 28일 압축강도는 0.29MPa로, MK10 시험체 대비 약 74%로 낮았음.
- MK10% 이상 혼입율이 증가함에 따라 압축강도가 감소한 이유는 시멘트 수화생성물인 칼슘하이드록사이드 (Calcium hydroxide, CH) 와 만나 반응을 하면 C-S-H 수화물을 생성하며 콘크리트 강도발현에 기여하는 포졸란 반응이 충분히 발생되지 않은 영향으로 판단됨.

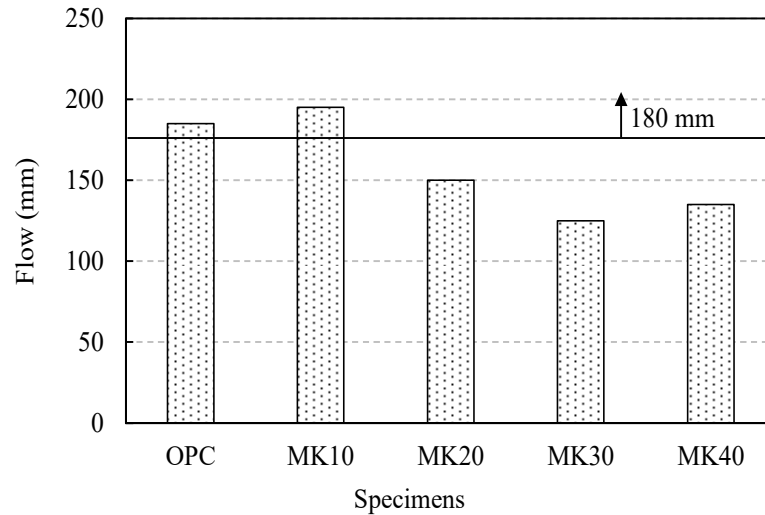


그림 71. MK 혼입 기포 콘크리트의 플로우 측정 결과

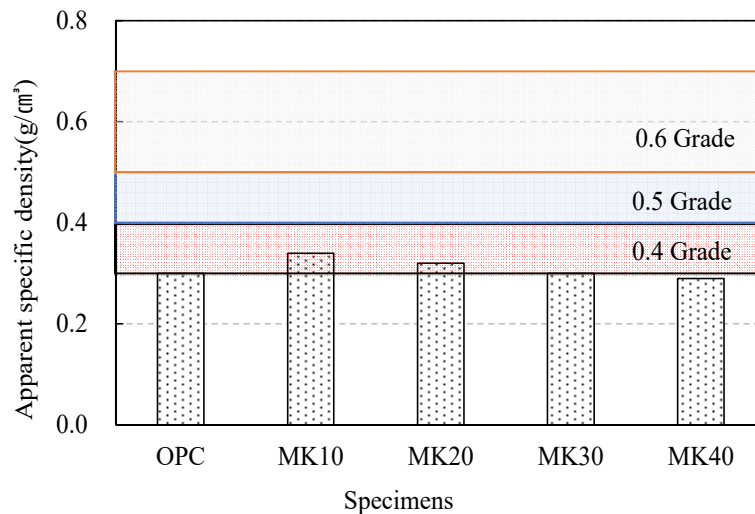


그림 72. MK 혼입 기포 콘크리트의 겉보기밀도 측정 결과

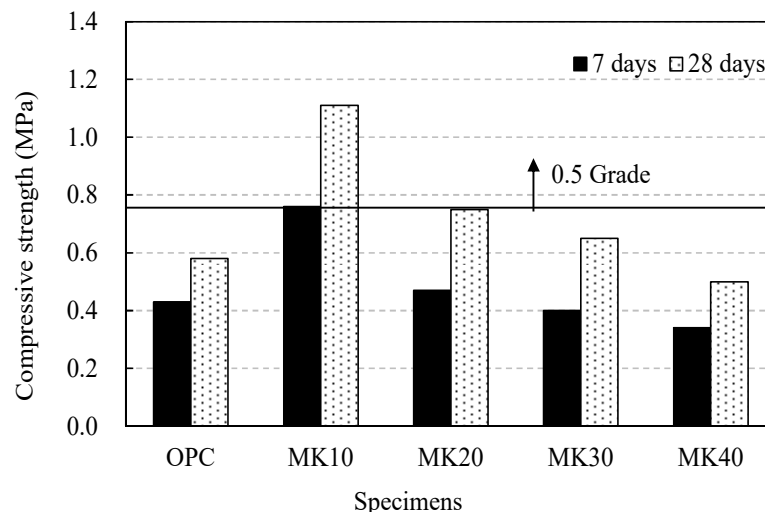


그림 73. MK 혼입 기포콘크리트의 압축강도 측정 결과

■ 열전도율

- 메타카올린 혼입율 변화에 따른 기포콘크리트의 열전도율 측정 결과는 <그림 74>과 같음.
- 측정결과 모든 시험체의 열전도율은 MK 혼입률에 상관없이 현장 타설용 기포콘크리트의 KS 규격인 0.4품의 품질 규격(0.13 이하)을 만족하였음.
- 시험체 OPC, MK20, MK 30 및 MK40의 열전도율은 각각 0.098 W/m·K, 0.094 W/m·K, 0.087W/m·K 및 0.094 W/m·K로 비슷한 수준이었으며, 시험체 MK10은 가장 높은 열전도율은 0.112 W/m·K를 보였음.

■ 건조수축 변형률

- 메타카올린 혼입 기포 콘크리트의 건조수축 변형률 측정 결과를 <그림 75>에 나타내었음.
- 평가 결과 기포콘크리트의 건조수축 변형률은 메타카올린의 혼입율이 0%에서 30%로 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 메타카올린 혼입율 40%의 경우에는 OPC 시험체에 비해 건조수축 변형률이 더 작게 나타났음.
- 일반적으로 일반 시멘트 콘크리트의 건조수축 발생은 시멘트 수화물 내에 존재하는 수분(겔 공극수) 및 자유수의 손실로 인한 체적감소의 영향으로, 상대습도, 온도 등의 환경인자 및 물-시멘트비 및 혼화재 사용등의 설계인자에 따라 변화함.
- 일반 시멘트 콘크리트의 건조수축은 물-결합재비가 낮을수록 감소하게 되는데, 이는 시멘트 경화체의 수화 후 존재하는 자유수의 감소 및 내부 공극의 치밀성 등에 영향을 받음.

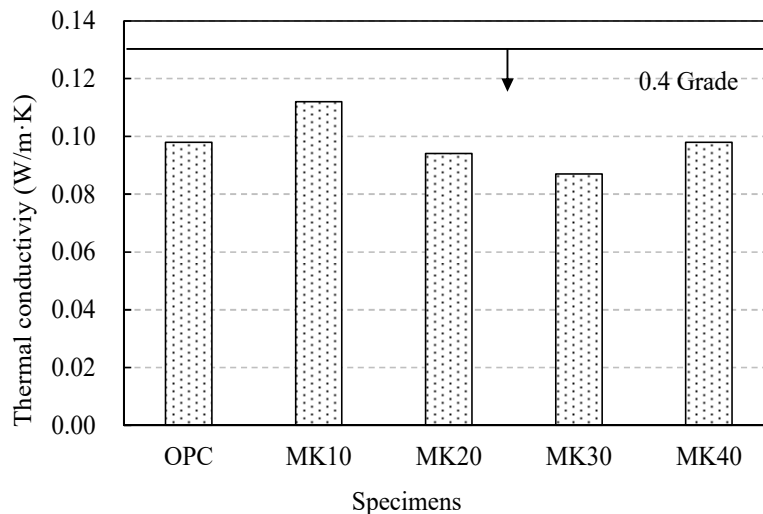


그림 74. MK 혼입 기포콘크리트의 열전도율 측정 결과

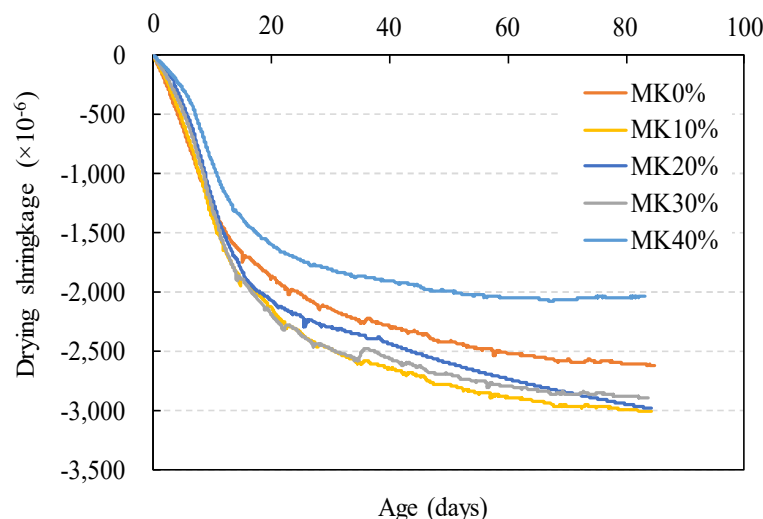


그림 75. MK 혼입 기포콘크리트의 건조수축 변형률 측정결과

- 더불어 기포 콘크리트의 경우 쇄석 등의 골재를 사용하는 콘크리트와 비교하여, 골재를 혼합하지 않으며 경화체 내에 존재하는 다량의 기공으로 인해 건조수축 변형률은 더욱 증가할 수 있음.
- 하지만 비표면적이 OPC에 비해 약 3배 이상 높은 메타카올린의 혼입은 40% 수준에서 일반 기포콘크리트에 비해 내부의 공극을 밀실하게 하는 안정적 역할을 하였기 때문에 더 낮은 건조수축 변형률을 보인 것으로 판단됨.

5) 나노캡슐 에어로겔 임베디드 습식형 기포콘크리트의 성능평가

(1) 일반사항

- 이 연구에서는 본 제안기술의 최종 목표인 나노캡슐 에어로겔 소재를 활용한 습식형 기포 콘크리트의 성능 개선의 일환으로서 주요 핵심 연구 내용인 나노캡슐 에어로겔의 표면기능화 부여(콘크리트와의 결합 특성 향상) 결과 선정된 나노 에어로겔 전구체 용액을 기포 콘크리트에 임베디드 하였음.
- 나노캡슐 에어로겔을 임베디드 하기 위한 기포 콘크리트는 ‘기포 콘크리트 자체의 성능 개선을 위한 혼화재 활용 가능성 평가’ 결과 압축강도, 절건 밀도 및 열전달저항성능 확보에 있어 가장 우수한 결과를 보인 MK10%(결합재로서 메타카올린 10% 치환)을 선정하였음.
- 제작된 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트는 열전도율, 압축강도, 절건밀도 및 공극형상의 성능평가를 실시하였으며, 적외선 분광분석을 통한 나노 에어로겔의 임베디드 여부와 흡수율 및 수분접촉각 평가를 통해 방수 성능을 확인하였음.

(2) 실험계획

□ 사용재료 및 실험상세

■ 나노캡슐 에어로겔 전구체 용액

- 에어로겔 전구체 용액은 실리카계 에어로겔 전구체인 MTMS(methyltrimethoxysilane, 95%) 및 TEOS(tetraethyl orthosilicate, 99.0%)를 사용하였음.
- 용매로서는 물과 에탄올(absolute ethanol, 99.9%)을 이용하였으며, 수산화나트륨(NaOH, 97%)를 촉매로 활용함.

■ 습식형 기포 콘크리트

- 나노캡슐 에어로겔을 임베디드 하기 위한 기포 콘크리트는 결합재로서 메타카올린은 10% 치환한 배합을 사용하였음(표 29)).
- W/B 및 기포 첨가율은 각각 30% 및 70%로 하였음.
- 혼화재 치환에 따른 기포 콘크리트의 초기강도 발현성능의 저하를 고려하여 타설 후 재령 10시간까지 40°C의 환경에서 고온양생을 실시하였으며, 고온 양생이 완료된 이후에는 항온항습(온도 20±2°C, 상대습도 60±5%)의 환경에서 재령 28일까지 양생을 실시하였음.

■ 나노 에어로겔 합성

- MTMS 단독 및 TEOS와 MTMS의 혼합 형태로 졸겔(sol-gel)법을 기반으로 합성한 나노 에어로겔 용액을 제조하였음.
- MTMS 및 TEOS 및 MTMS의 혼합물인 나노 에어로겔 용액은 공기 중에서 비교적 안정한 메톡시(-OCH₃) 또는 에톡시(-OC₂H₅)의 기능기를 갖음.

- MTMS를 단독 혼합한 나노 에어로겔 용액(용액 1)은 0.1 M NaOH 수용액과 MTMS를 10:1의 중량비로 혼합한 후, 2시간 동안 정치하여 안정화하였음.
- TEOS와 MTMS를 혼합한 나노 에어로겔 용액(용액 2)은 absolute ethanol(99.9%)과 0.1 M NaOH 수용액을 4:1의 중량비로 혼합한 후 TEOS 및 MTMS를 각각 용매 중량의 3.2% 및 2.1%로 첨가하였음.
- 이후에는 MTMS 기반 나노 에어로겔 용액 제조와 마찬가지로 2시간 동안 정치하여 안정화하였음.

■ 나노 에어로겔 임베디드

- 나노 에어로겔의 임베디드는 각각 합성된 2종류의 용액(MTMS, TEOS+MTMS)에 재령 28일까지 양생이 완료된 기포 콘크리트를 침지하여 코팅을 진행함.
- MTMS 및 TEOS+MTMS 혼합물은 NaOH 염기 촉매하에서 졸겔 합성의 과정에서 알코올 부산물과 실론산(Si-O-Si)의 상호 반응을 통해 에어로겔 입자를 형성함.
- 이때, MTMS에 존재하는 소수성의 methyl기가 에어로겔 입자 표면에 위치하게 되면서 에어로겔 입자에 소수성을 발현시킴.
- 이 입자가 균일하게 분산된 현탁액 상태의 용액을 기포콘크리트 시험체에 침투시키면, 용매의 건조과정에서 에어로겔 입자들이 분포하므로써 기포콘크리트에 임베디드 됨.
- 기포 콘크리트의 침지과정에서 밀폐형 용기의 압력 변화를 통해 기포 콘크리트로의 에어로겔 침투 효율성을 향상시킴.
- 나노 에어로겔 용액에 침지된 기포 콘크리트 시험체를 이동형 글로브 박스에 투입한 후 5-10 torr의 음압을 가하였으며, 이를 통해 기포 콘크리트의 미세공극까지 나노 에어로겔 용액이 침투 될 수 있도록 하였음.
- 임베디드가 완료된 기포 콘크리트 시험체는 상온의 환경에서 24시간 동안 건조하였으며, 이후 같은 방법으로 3회 반복하여 기포 콘크리트에 나노 에어로겔을 임베디드 하였음.

□ 측정항목

■ 플로우 및 침하깊이

- 플로우는 KS F 4039에 제시하고 있는 350 × 350 mm 유리판 위에 안지름 80 mm 높이 80 mm인 아크릴 원통을 세운 후 채취된 기포 슬러리를 상부까지 붓고 남은 윗부분을 수평하게 제거한 후 원통을 살며시 들어올려 1분 후에 시료가 퍼진 4방향에 대해 등간격으로 측정하여 평균값을 사용함.
- 기포 콘크리트의 침하깊이는 KS F 4039에서 제시하고 있는 안지름 145 mm, 높이 300 mm인 투명 아크릴 용기를 이용하였음.
- 용기에 기포 콘크리트 시료를 타설한 뒤 2시간 후의 침하깊이를 1 mm 단위로 측정하였음.

표 29. 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 배합상세 및 주요실험결과

Specimens	Binder mixing ratio (%)		Foamed ratio (%)	Results of fresh concrete		Results of hardened concrete			
	Cement	MK		Flow (mm)	Defoamed depth (mm)	Apparent specific density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)	Thermal conductivity (W/m · K)	Water contact angle (degree, °)
Non-embedded	90	10	70	195	0	0.36	0.81	0.105	0
MTMS						0.37	0.82	0.091	115.3
MTMS+TEOS						0.39	1.02	0.070	120.8

■ 압축강도

- 기포콘크리트의 압축강도는 KS F 2459에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm 몰드를 사용하여 타설 후 재령 3일, 7일 및 28일에 500 kN 용량의 만능재료시험기로 압축강도를 측정함.

■ 겉보기 밀도

- 기포콘크리트의 겉보기 비중은 KS F 2459에 따라 28일 수중양생을 마친 공시체를 건조로 안에서(105 ± 5)°C의 온도로 일정 질량이 될 때까지 건조시킨 후, 실온이 될 때까지 냉각

■ 열전도율

- KS F 4039에 따라 $300 \times 300 \times 50$ mm의 시험체를 제작하였으며, 28일간 항온항습환경(습도 $60 \pm 5\%$, 온도 20 ± 1 °C)에서 양생을 실시 한 후 105 ± 2 °C 항량이 될 때까지 건조하였음.
- 이후 열전도율 측정 장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도율 측정을 실시하였음.
- 기준온도를 20°C로 하여 양면에 15°C의 온도차를 부여하였음.

■ 공극형상

- 기포 콘크리트의 공극형상은 재령 28일까지 양생이 완료된 시험체를 절단한 후 표면을 100배율의 광학현미경을 이용하여 분석하였음.

■ 나노캡슐 에어로겔의 임베디드 여부 및 방수성능

- 기포 콘크리트 내부 및 표면에서 나노 에어로겔의 임베디드 여부를 확인하기 위하여 분광분석(fourier transform infrared, FT-IR)분석을 실시하였음.
- 기포 콘크리트의 방수성능은 KS F 2459dp 따라 흡수율을 평가하였으며, 수분 분무 후 접촉각 측정기를 이용하여 물방울(water droplet) 접촉각을 평가하였음.

(3) 실험결과

☐ 플로우 및 침하깊이

- 기포 콘크리트의 플로우 및 침하깊이에 대한 실험 결과를 <표 29>에 요약하였음.
- 결합재로서 MK를 10% 혼합한 기포 콘크리트의 플로우는 195 mm로 KS F 4039에서 제시하고 있는 현장 타설용 기포 콘크리트의 요구 유동성(플로우 180 mm 이상)을 만족하였으며, 소포로 인한 침하는 발생하지 않았음.

☐ 압축강도 및 겉보기 밀도

- 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 재령 28일 압축강도 및 겉보기 밀도의 측정 결과는 <표 29>의 요약과 같음.
- 나노 에어로겔을 임베디드 하지 않은 일반 기포 콘크리트의 압축강도는 0.81 MPa이었으며, MTMS 및 MTMS+TEOS가 임베디드 된 기포 콘크리트의 압축강도는 각각 0.82 MPa 및 1.02 MPa로 일반 기포 콘크리트 시험체에 비해 높게 나타났음.
- 반면, 에어로겔의 임베디드는 기포 콘크리트의 겉보기 밀도 변화에서도 큰 영향을 미치지 않았음.
- MTMS 및 MTMS+TEOS가 임베디드 된 시험체의 겉보기 밀도는 각각 0.36 g/cm^3 및 0.37 g/cm^3 으로, 0.39 g/cm^3 의 겉보기 밀도를 갖는 일반 콘크리트에 비해 약 3~6% 증가하였으나 그 증가 크기는 무시할 만한 수준이었음.

- 결과적으로 기포 콘크리트의 열전달 저항성능 향상 및 방수성능 부여의 목적으로서 나노 에어로겔을 임베디드 한 경우에는 기포 콘크리트의 압축강도 및 겉보기 밀도 변화에 영향을 미치지 않은 것으로 판단됨.

□ 열전도율

- 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 겉보기 밀도와 열전도율의 결과를 <그림 76>에 나타냄.
- 비교를 위해 나노 에어로겔이 임베디드 되지 않은 기포 콘크리트의 실험결과를 함께 나타내었음.
- 일반적으로 기포 콘크리트의 열전도율은 겉보기 밀도와 함께 감소함.
- 기포 콘크리트의 압축강도의 발현성능 및 사용성을 고려한 겉보기 밀도의 감소 한계는 0.3 g/cm^3 수준이며, $0.11 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이하의 열전도율을 확보하는 데에는 어려움이 따름.
- 본 실험에서도 <표 29>와 같이 0.36 g/cm^3 의 겉보기 밀도를 갖는 기포 콘크리트의 열전도율은 $0.105 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 나타났음.
- 하지만 유사한 수준의 겉보기 밀도를 갖는 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트 시험체는 일반 시험체에 비해 우수한 단열 성능을 보였음.
- 이 연구에서 MTMS 및 TEOS+MTMS 임베디드 기포 콘크리트의 열전도율은 각각 $0.091 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 및 $0.070 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 으로 일반 기포 콘크리트 시험체에 비해 약 13% 및 33% 낮았음.
- 더불어 나노 에어로겔을 임베디드 하지 않은 기존 실험결과들의 추세선에 비해 낮게 위치하였음.
- 즉, 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 열전도율은 동일한 밀도를 갖는 기포 콘크리트 시험체에 비해 더욱 낮음을 의미함.
- 결과적으로 나노 에어로겔의 임베디드는 기포 콘크리트의 열전달 저항성능 향상에 매우 긍정적인 영향을 미쳤음.

□ 공극형상

- 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 공극분포 분석 결과를 <그림 77>에 나타내었음.
- 나노 에어로겔 임베디드의 여부에 관계없이 모든 시험체에서는 1~3 mm 크기의 공극이 고르게 형성됨을 확인 할 수 있었음.
- 더불어 MTMS 및 TEOS+MTMS가 임베디드 된 기포 콘크리트에서는 일반 콘크리트와 달리 공극 계면에서 흡착·고정되어 분포하고 있는 백색 응집물 형태의 나노 에어로겔을 확인할 수 있었음.
- 결과적으로 현미경 분석을 통한 기포 콘크리트 공극형상 분석에서는 기포 콘크리트 공극 표면에 분산 흡착 된 나노 에어로겔을 확인할 수 있었음.

□ 적외선 분광 분석

- <그림 78> 및 <그림 79>은 MTMS 및 TEOS+MTMS 기반의 나노 에어로겔이 임베디드 된 기포 콘크리트의 적외선 분광 분석 결과임.
- 적외선 분광 분석은 <그림 78 (a)>와 같이 절단된 기포 콘크리트 단면에서 선정된 9지점에서 샘플링하여 실시하였음.
- 분석 결과 MTMS 및 TEOS+MTMS 기반으로 제조된 용액에 침지 된 기포 콘크리트 시험체에서 나노 에어로겔의 성분이 검출되었음(<그림 79>).
- MTMS, TEOS+MTMS의 임베디드 결과로 872 cm^{-1} 의 파수에서는 Si-C 결합의 피크가 관찰되었음

며, 960 cm^{-1} 의 파수에서는 Si-O-Si 결합의 피크가 나타났음.

- 반면, 나노 에어로겔을 임베디드 하지 않은 일반 기포 콘크리트 시험체에서는 Si-C 결합 및 Si-O-Si 결합의 피크가 나타나지 않았음.
- 더불어 $1400\sim 1800\text{ cm}^{-1}$ 의 파수에서는 기포콘크리트 내부에 존재하는 기포제 및 MTMS의 알킬에 해당하는 C-H와 Si-CH₃의 피크가 나타났음.
- 결과적으로 MTMS 및 TEOS+MTMS 기반의 나노 에어로겔 용액이 기포 콘크리트에 임베디드 됨을 확인 할 수 있었음.

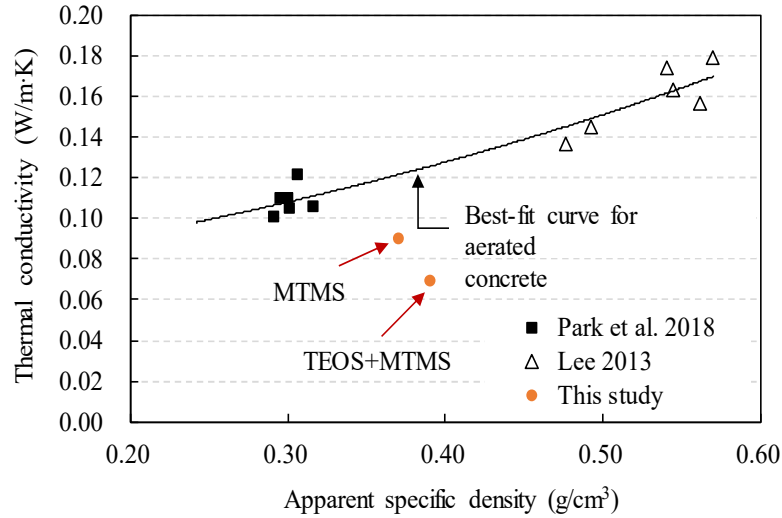
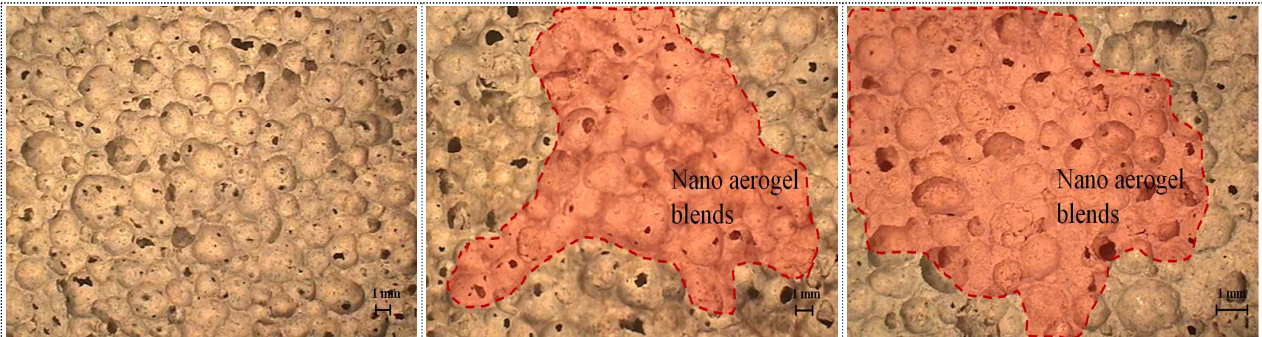


그림 76. 나노 에어로겔 기포 콘크리트의 겉보기 밀도와 열전도율 결과

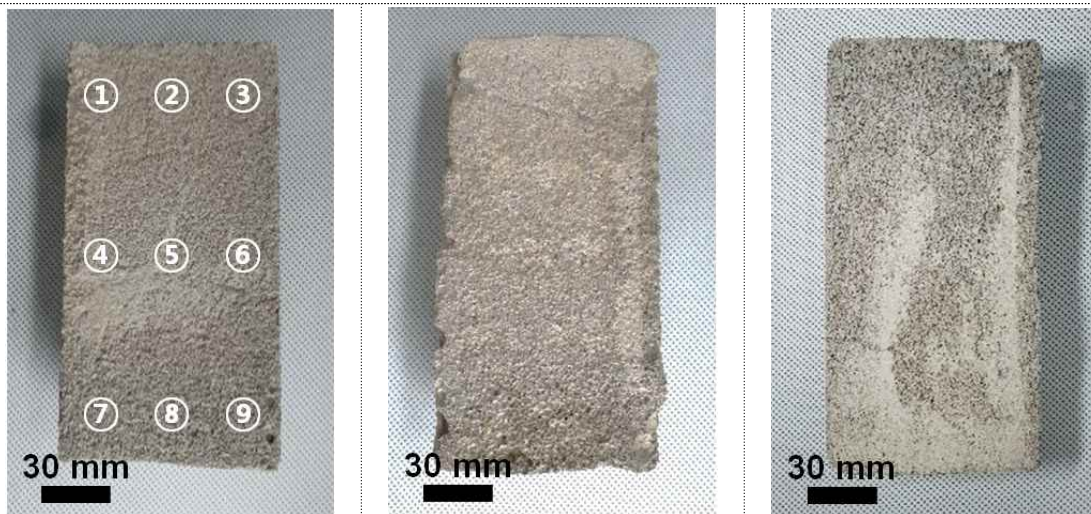


(a) Non-embedded

(b) MTMS

(c) TEOS+MTMS

그림 77. 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 공극 형상



(a) Non-embedded

(b) MTMS

(c) TEOS+MTMS

그림 78. 조건별 기포콘크리트의 절단된 단면

□ 방수특성

- 〈그림 80〉은 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 흡수율평가 결과임.
- 에어로겔이 임베디드 되지 않은 일반 기포콘크리트의 흡수율은 시험체를 수중에 침지 후 6시간에서 107%로 크게 증가하였으며, 이후 재령 7일에서는 118%의 흡수율을 보였음.
- 반면 에어로겔을 임베디드한 TEOS+MTMS 시험체의 경우 침지 6시간에서 일반 기포콘크리트 시험체에 비해 약 30% 낮은 흡수율을 보였음.
- 이후 TEOS+MTMS 시험체의 흡수율은 재령이 증가함에 따라 지속적으로 증가하였지만, 그 증가크기는 점차 감소하는 경향을 보였음.
- 수중 침지 재령 7일에서의 흡수율은 일반 기포콘크리트의 0.68배 수준인 81%로 가장 낮은 흡수율을 보였다. MTMS 시험체의 재령 7일 흡수율은 TEOS+MTMS 시험체에 비해 약 5% 낮은 86%이었음.
- 〈그림 81〉에는 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 소수성 평가 결과 수분이 분무 된 시험체 표면의 확대 이미지를 나타내었음.
- MTMS와 TEOS+MTMS 기반 나노 에어로겔이 임베디드 된 기포 콘크리트 시험체는 표면의 수분이 내부로 침투 되지 않고 물방울(water droplet)이 형성되었으며, 알킬에 의해 소수 특성이 발현되었음을 확인 할 수 있었음.
- 반면, 일반 기포 콘크리트는 콘크리트 표면의 수분이 내부까지 흡수되는 친수성을 보였음.
- 이에 따라 〈그림 82〉와 같이 MTMS 및 TEOS+MTMS가 임베디드 된 기포 콘크리트의 경우 시험체 표면에서 수분의 접촉각이 각각 115.3° 및 120.8° 로 높은 방수성능을 보였음.
- 일반 기포 콘크리트의 경우에는 시험체 표면의 수분이 모두 내부로 흡수되어 0° 의 접촉각을 나타내었음.

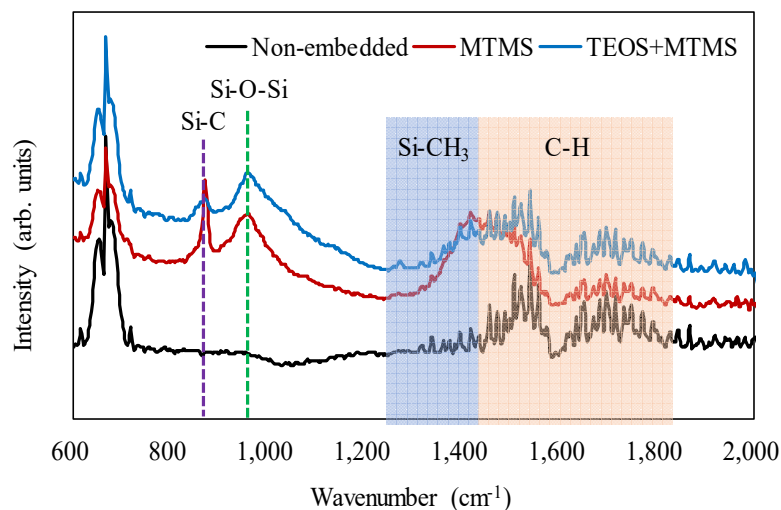


그림 79. 나노 에어로겔이 임베디드된 기포 콘크리트 내부의 FT-IR 분석 결과

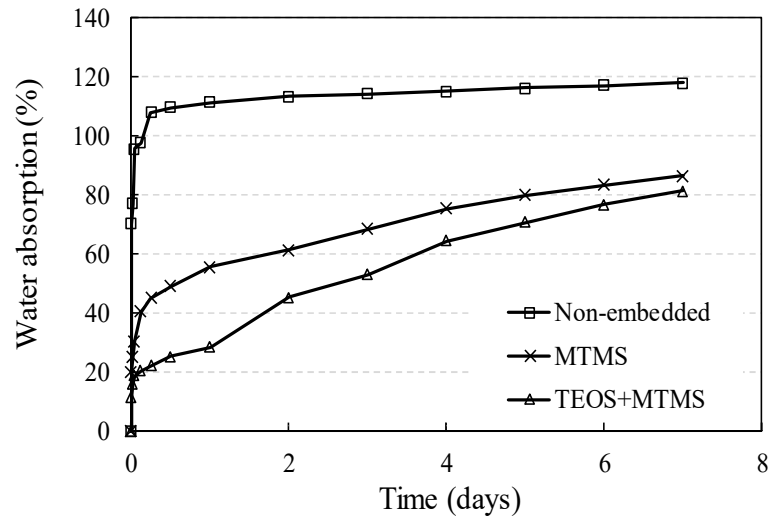


그림 80. 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 흡수율 측정결과

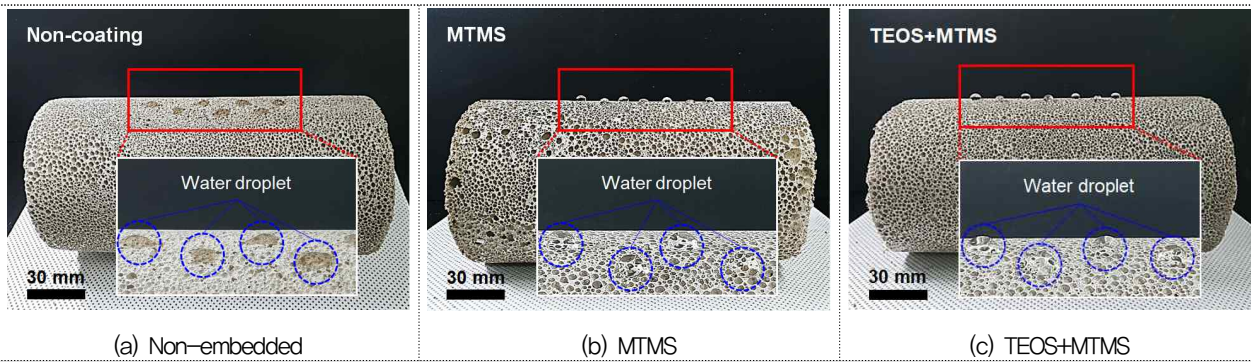


그림 81. 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 소수성 평가

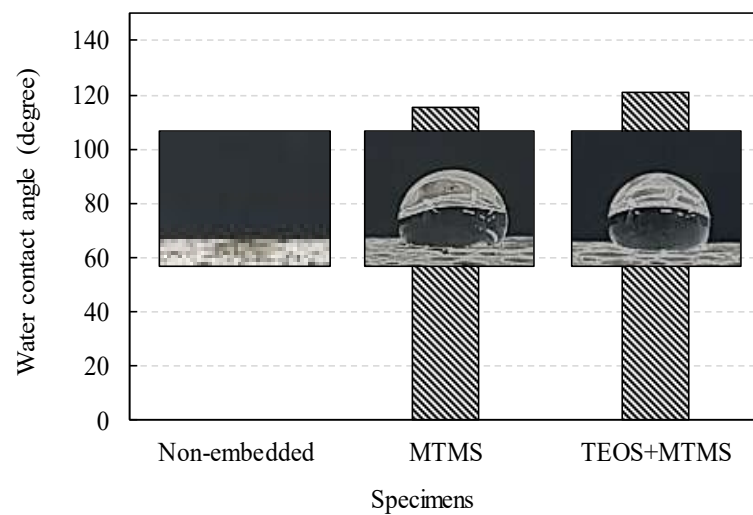


그림 82. 나노 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 물에 대한 접촉각 측정 결과

6) 결론

- 기포 콘크리트 관련 선행연구 분석, DB 구축 및 기포 콘크리트 특성에 영향을 미치는 요인 분석
 - 기포 콘크리트의 재령 28일 절건 밀도는 단위결합재량이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하며, 물-결합재비 변화에 의한 영향을 크게 나타나지 않음.
 - 결과적으로, 기포 콘크리트에서의 겉보기 밀도는 물-결합재비 보다는 단위 결합재량 및 기포 혼입량에 의해 큰 영향을 받음.
 - 더불어 기포 콘크리트의 열전도율은 절건 밀도가 감소함에 따라 비선형적으로 감소하며, 그 유효관계는 0.83으로 비교적 큰 영향을 받음.
 - 즉, 본 연구에서 목표로 하는 기포 콘크리트의 성능(열전도율=0.07 W/m·K 이하)의 목표 달성을 위해서는 기포 콘크리트의 전건밀도가 0.4 g/cm³의 수준일 때 1 MPa 수준의 압축강도가 확보될 필요가 있음.

- 단위시멘트량 및 에어로겔 치환율 변화에 따른 에어로겔 혼합 습식형 기포 콘크리트의 특성평가
 - 단위시멘트량 및 에어로겔 치환율 변화에 따른 기포 콘크리트의 특성 평가 결과 소수성을 갖는 에어로겔의 특성으로 인해 배합시 고르게 분산되지 않는 문제점을 보였음.
 - 이러한 영향으로 에어로겔을 혼합하지 않은 기포 콘크리트 시험체에 비해 에어로겔을 혼합한 기포 콘크리트의 압축강도는 50% 이상 저하되는 문제점을 나타내었음.
 - 이로 인해 본 연구에서는 기포 콘크리트의 배합시 나노캡슐 에어로겔을 투입하는 방법이 아닌, 기포 콘크리트 배합시험체에 나노 캡슐 에어로겔을 침지의 방식으로 임베디드 하는 방법을 제시하였음.

- 기포 콘크리트 자체의 성능개선을 위한 혼화재 활용 가능성 평가
 - GGBS를 주요 결합재로서 활용한 기포 콘크리트 시험체들은 고온의 양생환경(40℃ 및 60℃)에서 양생을 실시한 경우 절건 밀도와 열전도율의 관계를 볼 때 상온에서 양생된 기존 실험결과들의 추세선과 동일한 선상에 있었음.
 - 즉, 고온 양생된 GGBS 혼입 기포 콘크리트의 열전도율은 절건 밀도의 감소와 함께 감소하는데 그 감소 경향은 상온 양생의 경우와 비슷하였으며, 이 결과 기포 콘크리트의 열전달 저항성능에 대한 GGBS 혼입 및 고온양생의 영향은 미미하다고 판단됨.
 - 반면 메타카올린을 혼합한 기포 콘크리트의 경우에는 KS 규격인 0.5품의 품질 수준(0.8 MPa 이상)을 만족하였음.
 - 더불어, 메타카올린의 치환율이 20%, 30% 및 40%인 경우의 열전도율은 각각 0.098 W/m·K, 0.094 W/m·K, 0.087W/m·K 및 0.094 W/m·K로서, 동등 수준의 절건 밀도(0.3~0.4 g/cm³)를 갖는 일반 기포 콘크리트에 비해 높은 단열성능을 보였음.
 - 이와 함께 비표면적이 OPC에 비해 약 3배 이상 높은 메타카올린의 혼입은 그 혼입량이 40% 수준에서는 일반 기포콘크리트에 비해 내부의 공극을 밀실하게 하는 안정적 역할로 인해 더 낮은 건조 수축 변형률을 보였음.

□ 에어로겔 임베디드 습식형 기포콘크리트의 성능 평가

- 에어로겔 임베디드 습식형 기포콘크리트의 배합 실험 결과 최적의 배합상세, 에어로겔 임베디드 소재 및 주요 성능은 아래와 같이 제시 될 수 있었음.
- 나노캡슐 에어로겔의 임베디드는 동일 수준의 절건밀도(0.4 g/cm^3)를 갖는 일반 기포콘크리트 시편체의 열전도율($0.11 \text{ W/m} \cdot \text{K}$)에 비해 약 30% 우수한 단열성능을 효과를 보였음($0.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$).
- 개발된 소재의 압축강도, 절건밀도 및 열전도율은 각각 1.02 MPa , 0.39 g/cm^3 및 $0.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 본 연구의 최종 성과 목표(압축강도= 1.0 MPa 이상, 절건밀도= 0.4 g/cm^3 이하 및 열전도율= $0.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 이상)를 모두 만족하였음.

Unit binder contents (kg/m^3)	W/B (%)	Foam ratio (%)	Binder mixing ratio (%)		Admixture (binder $\times$ wt, %)	Nano-aerogel Type
			Cement	MK		
250	30	70	90	10	1.0	MTMS+TEOS
Flow (mm)	Defoamed depth (mm)		Compressive strength at 28 days (MPa)	Dry density (g/cm^3)	Thermal conductivity ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	
195	0		1.02	0.39	0.07	

1) 건물 외벽 패널용 경량기포콘크리트(AAC)의 CaO/SiO_2 혼합비에 따른 강도 특성 평가(Kim Young Ho., 2011)

(1) 목적

- 공장 제조생산과 동일하게 C/S몰비와 W/S비에 따른 오토클레이브드 양생시간을 적용하는데 기초 자료로 사용하는 것

(2) 연구배경

- 건축물 관련 CO_2 배출량이 OECD 국가 중 1위를 차지한 바 있으며, 누적 배출량은 세계 23위로 448백만톤을 차지하고 있다. 따라서 상업용이나 주거용 건물의 에너지 절약을 통한 CO_2 배출 절감이 절실히 요구되는 바이다. 특히 건물을 구성하는 여러 요소 중 외기 차단과 공간을 형성을 목적으로 한 ‘건물의 외피(skin facade inbuilding)’는 가장 에너지 손실매체로 재료의 친환경화와 고성능화가 필요한 배경.

(3) 실험 계획

- CaO/SiO_2 몰비는 0.3, 0.5, 0.7, 0.9로 변화시켜 시멘트 함량을 고정시키고 C/S의 몰비는 생석회와 규석간의 혼합비를 변화시켜 제어함.
- 발포제는 알루미늄 분말을 혼합분말 대비 0.08% 사용하였으며, 혼합수량은 혼합분말 (Raw Mix) 대비 70%로 고정하였다. 수열합성시 최고온도 및 유지시간은 S사의 제조공정에서 적용되는 180°C 에서 7시간으로 고정함.

(4) 실험 결과 및 분석

☐ 조기 압축강도

- C/S 비가 증가함에 따라 CaO 함량은 증가하였으며, SiO_2 함량은 감소하는 일반적 경향을 나타내었음(〈그림 83〉).
- C/S비가 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 C/S몰비 0.7 이상에서는 더 이상의 강도증진이 이루어지지 않았으며, 오히려 약간의 강도 감소가 동반되었음.

☐ 최고온도 유지시간

- C최고 온도가 상승됨에 따라 압축강도 값이 상승하는 특성을 나타내었으나, 180°C 이상에서는 큰 변화를 관찰할 수 없었음(〈그림 84〉).
- 140°C 에서는 7시간 조건에서 1.5MPa 수준의 낮은 강도값을 발현하였으며, 이는 토버모라이트 결정의 생성이 불량하기 때문으로 판단됨.

☐ 내산성

- 황산 5% 및 10% 수용액에 침지된 CAC 보수재의 중량감소 및 압축강도 감소율을 측정하였음.
- CAC의 함량이 증가할수록 황산 부식에 대한 저항성은 증가하였음(〈표 30〉).
- 황산 수용액 침지 28일 이후 CAC의 함량이 40% 이상인 배합에서는 중량이 감소하지 않았으며, 압축강도 감소 역시 나타나지 않았음.

□ 결론

- C/S비가 증가함에 따라 압축강도는 증가하는 경향임. 그러나 C/S몰비 0.7 이상에서는 더 이상의 강도증진이 이루어지지 않았으며, 오히려 약간의 강도 감소가 동반되었음.
- 혼합수 함량의 변화에 따라 숙성 후 부피는 팽창하였으며, 이는 혼합수량의 증가와 더불어 발포의 용이성에 기인한다고 사료됨. 그러나 혼합수량이 적은 30% 조건에서는 슬러리의 점도 (2,800cP)가 높아, 수소가스가 발생하여도 가스 압력이 슬러리의 점도를 극복하지 못하는 특징이 발현되었음.

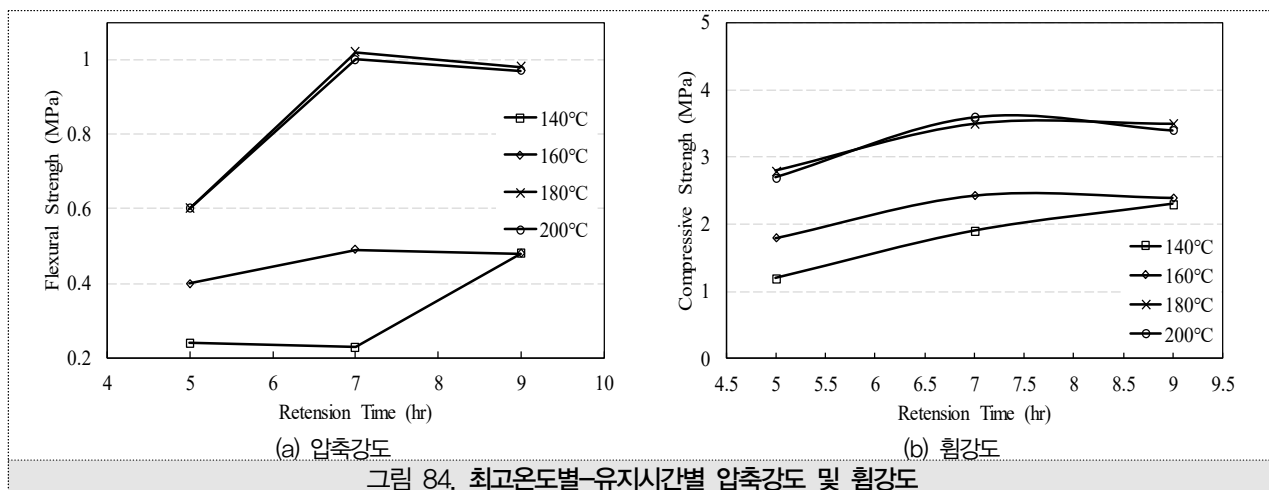
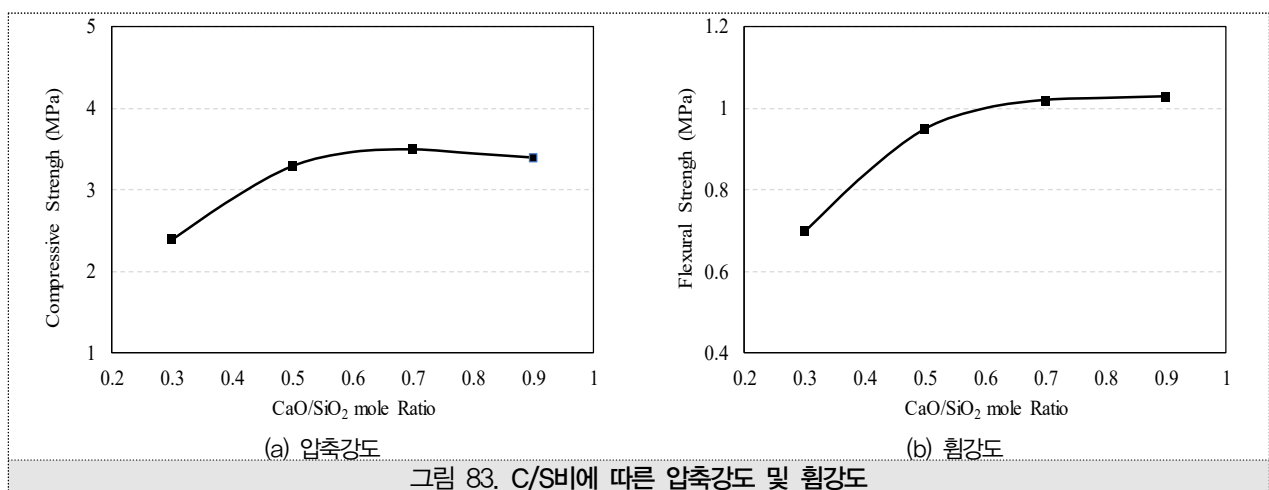


표 30. CAC 보수재의 내산성 실험결과

내산성 시험			CAC 함유량				
			0%	20%	40%	50%	60%
H ₂ SO ₄	5%	Weight loss	94	101	100	104	105
		Strength loss	92	97	110	113	110
	10%	Weight loss	56	95	105	102	102
		Strength loss	18	90	100	110	110

- 고품성분 대비 함수량의 변동에 따른 압축강도는 W/S비가 50%인 경우 가장 높은 값을 나타내었지만, 슬러리의 점도가 2,300cP로 높으며, 숙성 후 부피도 W/S 비 70% 보다 적은 것으로 나타났음. 따라서 비중 0.56를 고려하고 생산공정에서의 작업성, 팽창에 의한 AAC 수율 등을 고려할 경우 W/S 비는 70% 수준이 적합할 것으로 판단됨.

2) 규석 분말 및 석고 혼입에 따른 경량기포콘크리트의 강도특성 개선(Hoon S., 2012)

(1) 목적

- 기존의 ALC 배합에 메타카올린, 실리카퐁 등의 혼화재와 규석분말 및 석고의 혼입을 조절을 통해 물리적 특성 개선

(2) 연구배경

- ALC는 경량, 단열, 흡음 및 차음효과가 우수하지만 기포를 형성하고 있는 공극으로 인해 강도가 취약하고 취성적인 파괴성향이 있어 균열발생이 용이한 단점개선 필요

(3) 실험 계획

- SiO₂ 함량비가 다른 규석 분말과 석고를 활용하여 개선의 여부를 확인함.
- 원료로 사용되는 시멘트를 일정부분 대체하고 혼합재인 메타카올린이나 실리카퐁의 적용성에 대해 확인함.

□ 밀도변화

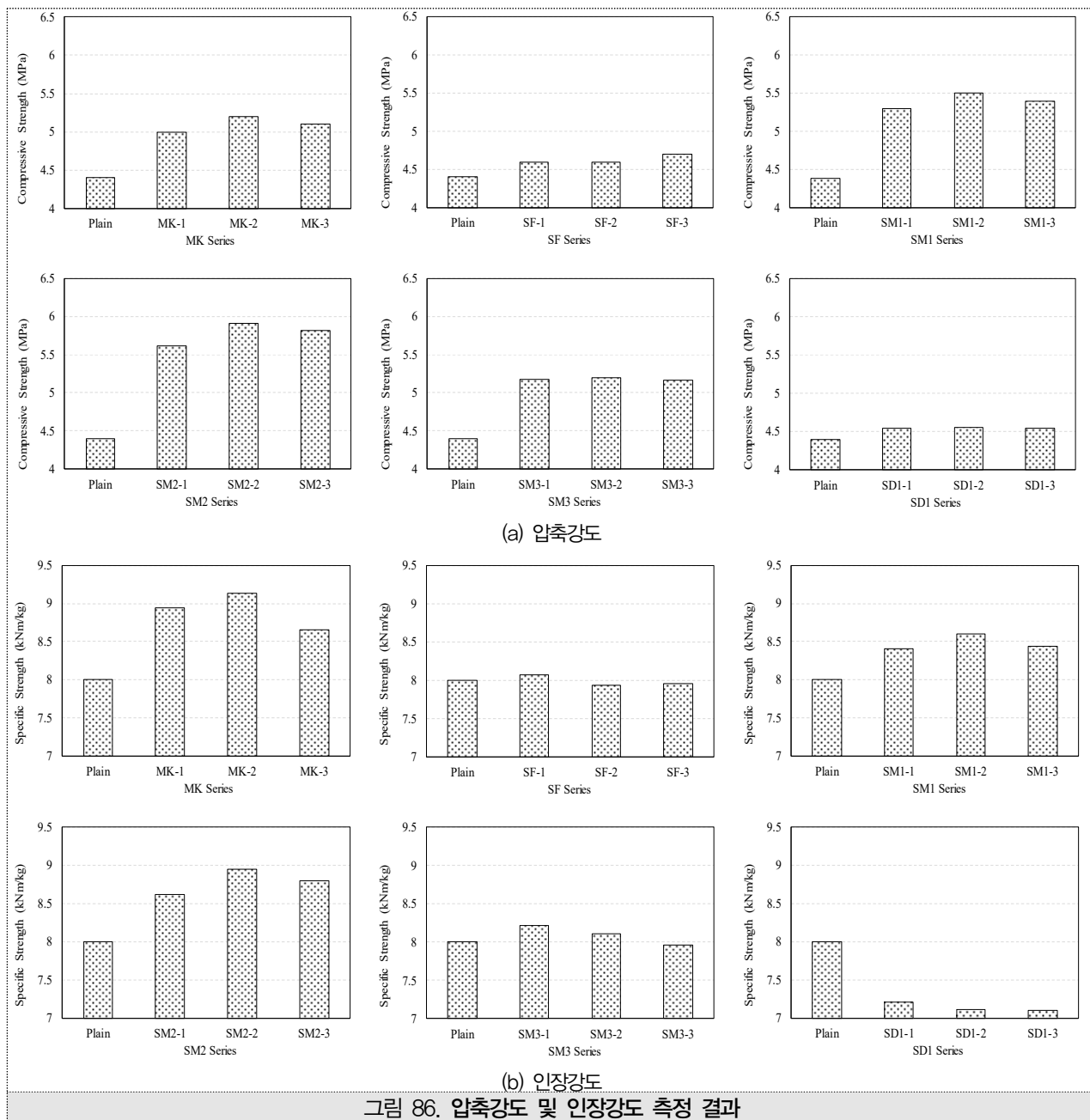
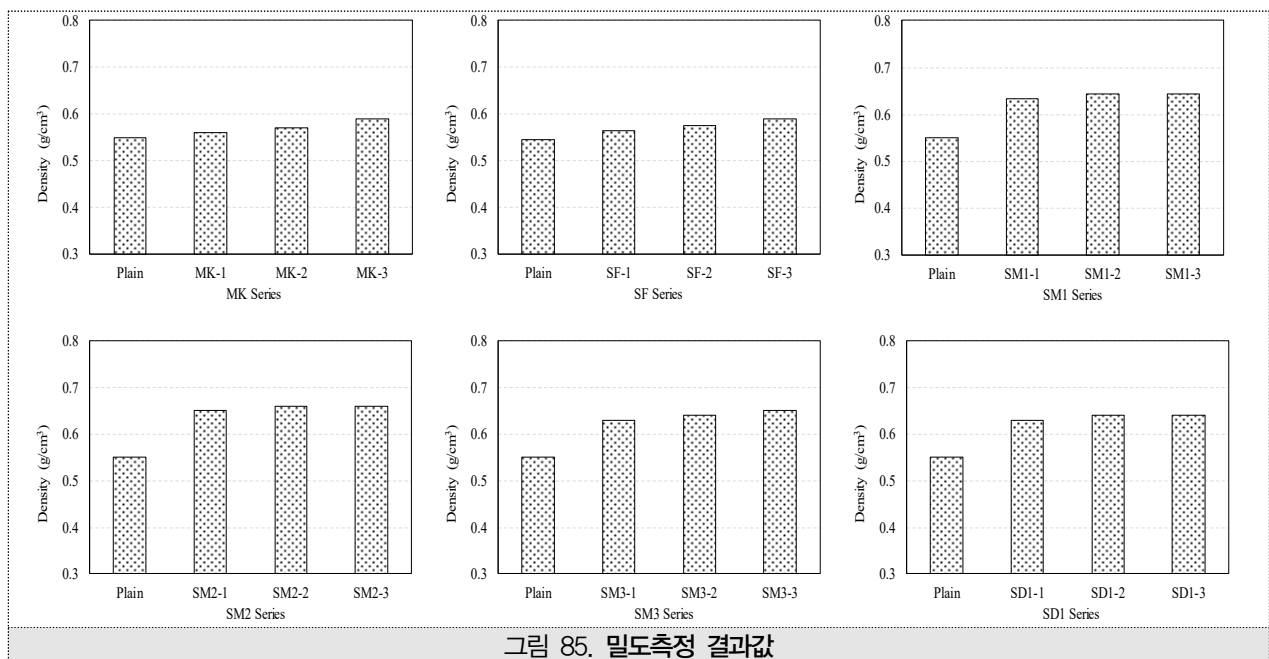
- 메타카올린과 실리 키폐 등 의 혼화재료를 혼입한 시험체의 경우 혼입율의 증가에 따라 밀도도 단계적으로 증가하는 경향을 나타냄(그림 85)).
- 석고의 혼입이 증가할수록 밀도도 증가하는 경향을 나타냄.

□ 압축강도 및 인장강도(그림 86))

- 메타카올린 및 실리카퐁을 혼입한 시험체는 Plain 시험체에 비해 약 10% 정도 압축강도가 증가하여 개선에 효과를 보임.
- 메타카올린을 혼입한 경우가 실리카퐁을 혼입한 경우보다 증가 경향이 크게 나타남.
- 석고 혼입에 따른 강도변화는 SO₃ 함량이 5%일 때가 가장 높았으며 4%인 경우에 비해 강도가 4% 증가하였고 6%인 경우에 비해 강도가 2%이상 증가하는 결과를 보임.

□ 미세구조 분석 결과

- 밀실한 토버모라이트의 결정상을 확인할 수 있음. 또한 토버모라이트는 메타카올린이나 실리카퐁 등의 혼화재나 규석 분말의 입도 차와 상관없이 동일하게 관찰됨. 또한 메타카올린이나 실리카퐁 등을 혼입한 시험체는 키텔의 결정상을 확인할 수 있음(그림 87)).
- 혼화재, 규석 분말 및 석고 혼입에 따라 결정이 양호한 토버모라이트상과 C-S-H상(ettringite)의 발생(CSH(I)이나 CSH(II)상)과 C-S-H gel상이 나타나고 있음을 확인하였음.



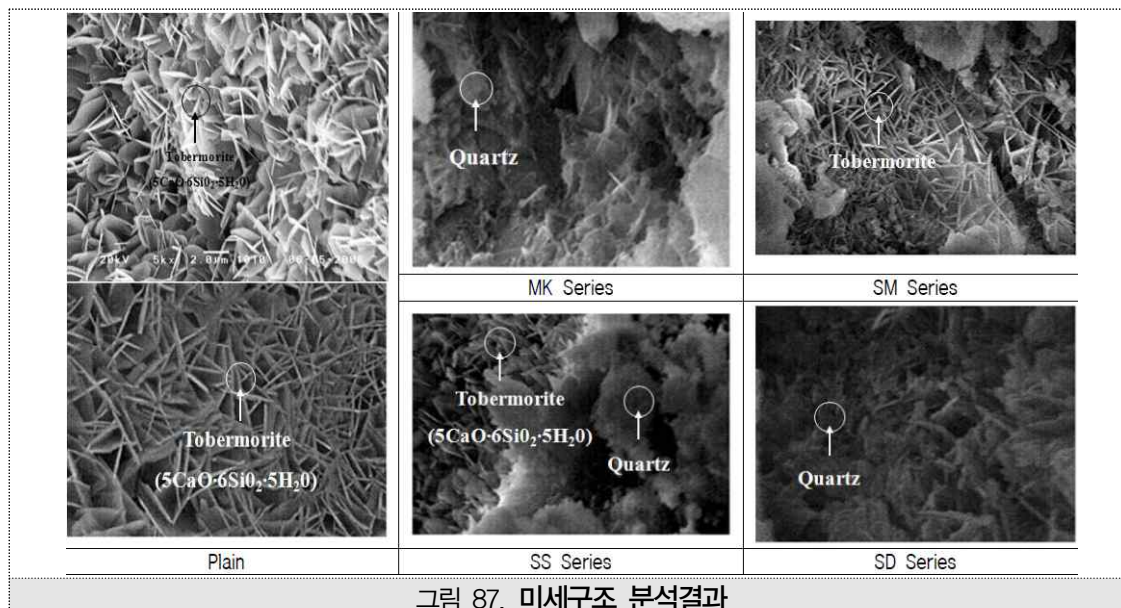


그림 87. 미세구조 분석결과

3) 문헌조사 및 자료수집으로 구축된 DB를 사용한 ALC 분석 및 검토 진행

□ 일반적인 ALC 압축강도 및 열전도율(〈그림 87〉)

- 0.5품 - 3MPa, 0.188W/mk 이하
- 0.6품 - 5MPa, 0.238W/mk 이하
- 0.7품 - 7MPa, 0.277W/mk 이하

□ 일반적인 ALC 제품적용 용도(〈그림 88〉)

- 블록 - 일반, 발수, 단열, 개구부블럭
- 패널 - 일반, 디자인, 커튼월 등

□ 일반적인 ALC 제품특징(〈그림 89〉)

- 불연내화성능, 3층이하 내력벽사용가
- 낮은 열전도율, 결로적음, 차음구조

(단위: W/m ² ·k)				
지역 구분	외기에 직접 면하는 경우		외기에 간접 면하는 경우	
	거실의 외벽	지붕 또는 반자	거실의 외벽	지붕 또는 반자
중부지역	0.260 이하	0.150 이하	0.360 이하	0.220 이하
남부지역	0.320 이하	0.180 이하	0.450 이하	0.260 이하
제주도	0.430 이하	0.250 이하	0.620 이하	0.350 이하

• 중부지역 : 서울특별시, 인천광역시, 경기도, 강원도(강릉시, 동해시, 속초시, 삼척시, 고성군, 양양군, 제외), 충청북도(영동군 제외), 충청남도(천안시), 경상북도(청송군)
 • 남부지역 : 부산광역시, 대구광역시, 대전광역시, 울산광역시, 강원도(강릉시, 동해시, 속초시, 삼척시, 고성군, 양양군), 충청북도(영동군), 충청남도(천안시 제외), 전라북도, 전라남도, 경상북도(청송군 제외), 경상남도, 세종특별자치시

그림 87. 건축물 에너지 절약 설계 기준(건설교통부 고시)

4) ALC 실내실험 시스템 구축

(1) ALC용 소형 오토클레이브 장비구축

- ALC생산을 위해 오토클레이브 양생은 필수적이거나 아이에스동서 공장내의 PHC용 오토클레이브 장비를 배합시마다 가동하기에는 비용이 많이 발생하는 어려움이 연구계획단계에 예상이되어 소형 오토클레이브 장비를 구축하기로 계획함.
- 소형 오토클레이브는 구매를 신청하여 제작이 진행되어 지고 있으며, 장비 비치에 대한 건은 주관 기관인 경기대학교에서 비치 및 운영을 진행하기로 협의하였음.

(2) 장비제원

- 내부크기 : $\Phi 297*500\text{mm}$
- 외부크기 : $1000*700*1500\text{mm}(W*D*H)$
- 사용압력 : $10\text{kg}/\text{cm}^2$
- 최고압력 : $12\text{kg}/\text{cm}^2$

일반/고강도 블록	발수블록	쌍용ALC-I	인방(제 Intex)
		 단열성능 강화제품	 개구부 천, 하부

그림 88. ALC의 제품적용 용도별 분류

 내화성	 투습성	 경량성	 친환경성
 내구성	 가공성	 차음성	 단열성

그림 89. ALC의 대표적인 특성

(3) 장비 예시 사진(〈그림 87〉)



그림 90. Autoclave 기기

5) ALC 실내배합 실험

(1) 일반사항

- ALC의 배합 및 양생에 대한 조건은 각 공장에서 경험적으로 관리되고 있지만 사용재료의 변화에 대한 최적 배합관리 등의 연구 활용 자료는 매우 미흡함.
- 이와 같은 유용한 기초자료의 부족은 ALC 연구개발에 많은 어려움의 원인이 됨.
- ALC의 성능향상을 위한 다양한 자료의 구축을 위해 CaO-SiO₂ 몰비(CaO to SiO₂ molar ratio, C/S), 물-결합재비(water to binder ratio, W/B) 및 발포제(AI) 첨가율 등의 배합조건을 변화시켜 발포율과 압축강도 발현 경향을 평가하였음.
- 연구자마다 다양하게 제시하고 있는 ALC의 배합비에 따라 발포율 평가를 우선적으로 실시하였음. 적정범위의 발포율(160~180%)을 갖는 배합에서 실내실험 규모와 실제 현장 규모의 오토클레이브에서 수열합성을 실시한 후 압축강도 및 열저항값 등을 평가하였음.
- 측정된 ALC의 특성은 KS F 2701(경량 기포 콘크리트 블럭)의 품질규격과 비교하였음.

(2) 실험계획

□ 사용재료

- ALC의 발포 및 역학적 특성 평가 실험을 위한 사용재료의 물리적 및 화학적 특성은 〈표 31〉에 나타내었음.
- ALC 제작을 위한 결합재로서는 1종 포틀랜드시멘트, 생석회 및 규석분말이, 발포제로서는 AI 분말이 사용되었음.
- OPC 및 생석회의 밀도는 각각 3.15 g/cm³ 및 3.30 g/cm³이며, 분말도는 각각 3,260 cm²/g 및 3,920 cm²/g임.
- AI 분말은 밀도 0.12 g/cm³의 재료가 사용되었음.

- 규석분말은 원료 수급지역에 따라 A형과 B형으로 구분하였는데, 이들의 밀도는 각각 2.16 g/cm^3 및 2.69 g/cm^3 임.
- 규석 분말 재료의 화학적 조성은 모두 SiO_2 가 96% 이상 수준으로 원료수급 지역에 의해 차이를 보이지 않았음.
- 사용된 규석 분말 재료의 XRD 패턴과 미세구조 분석 결과를 <그림 91> 및 <그림 92>에 나타내었음. A형 재료의 경우에는 SiO_2 가 고온의 환경에서 결정화된 트리디마이트(tridymite) 상을 보였으며, B형의 경우 판상형의 석영(Quartz)의 형태를 이루었음.

□ 실험상세

- ALC의 배합 및 특성 평가를 위한 실험계획은 최적의 발포율을 갖는 배합비의 선정에 대해 3 시리즈로 구분하였으며, 해당 배합에서의 역학적 특성 평가의 단계로 총 3 시리즈로 분류하였음.
- 시리즈 1 및 2에서는 A형 규석분말을 이용하였으며, 시리즈 3에서는 B형의 규석분말을 사용하였음.
- 시리즈 1에서는 ALC의 최적 배합비 선정을 위한 주요 실험 변수로 C/S 를 0.7로 고정하고, 시멘트의 혼입율을 25%, 30%, 35% 및 40%로 변화시켰음.
- 시멘트 혼입율 변화에 따라 화학적 조성을 일정하게 조정하기 위하여 규석분말 및 생석회의 혼합비율이 변화하였음(<표 32>).

표 31. ALC 발포율 및 압축강도 평가 실험을 위한 재료의 물리·화학적 특성

Materials	Physical properties		Chemical composition (% by mass)								
	Density (g/cm^3)	Specific surface area (cm^2/g)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Cement	3.15	3,260	22.13	5.49	3.59	61.98	2.51	2.14	1.09	—	0.91
Lime	3.30	3,920	1.25	0.26	0.22	85.54	2.64	—	—	—	—
Quartzite A	2.69	3,210	98.41	0.16	0.06	0.04	—	0.92	0.01	0.34	—
Quartzite B	2.16	2,340	96.68	1.60	0.42	0.16	0.04	—	0.88	0.03	—

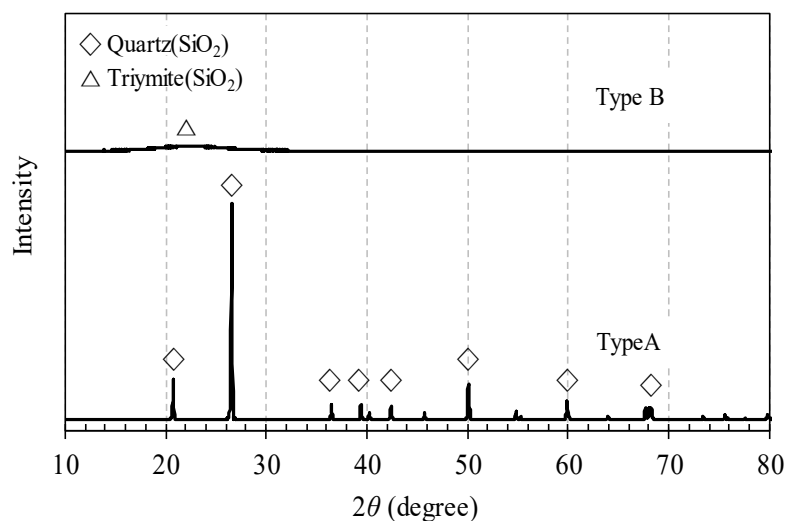
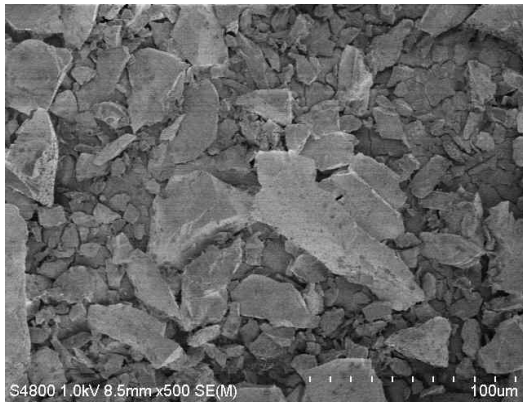
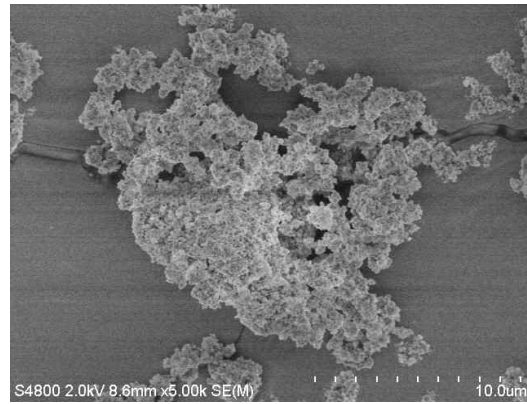


그림 91. 규석분말 종류에 따른 XRD 분석결과



(a) Type A



(b) Type B

그림 92. 규석분말 종류에 따른 XRD 분석결과

- W/B 는 모든 결합재가 배합수와 균질하게 혼합 된 슬러리 형태가 되도록 100%로 하였는데, 이때 AI 분말의 첨가율은 전체 결합재 질량의 0.08%로 고정하였음.
- 시리즈 2에서는 시리즈 1의 결과를 참고로 <표 31>에 타나낸 바와 같이 C/S 및 시멘트 치환율을 각각 0.7 및 30%로 고정하고, W/B 를 60%, 80% 및 100%로 변화하였으며, 발포를 위한 AI 분말의 첨가율은 0.08%, 0.12%, 0.16%, 0.20% 및 0.24%로 변화하였음.
- 시리즈 3에서는 시멘트의 혼합비율을 30%로 고정하였음.
- B형의 규석분말을 사용한 시리즈 3의 예비실험에서는 A형의 규석분말을 사용한 시리즈 1 및 2에 비해 비교적 낮은 W/B 에서도 모든 결합재가 물과 균질하게 혼합되었음.
- 이를 고려하여 시리즈 3에서 W/B 는 45% 및 50%로 변화하였음. 시리즈 3의 C/S 는 0.5, 0.7 및 0.9, 그리고 AI 분말의 첨가율을 0.04%, 0.08%, 0.12%로 변화하였음.

□ 배합 및 측정

■ 배합

- ALC의 배합은 시멘트, 생석회 및 규석 분말을 배합용기에 투입 한 후 핸드믹서를 이용하여 1분 동안 건비빔을 실시하였다. 그 후, AI 분말을 투입한 배합수를 혼합하여 1분간 습비빔을 실시하였음.
- 배합이 완료된 ALC 슬러리는 발포율을 평가하기 위해서 일정 부피의 용기에 투입한 후 온도 50℃ 및 상대 습도 50%인 환경에서 전치하여 5시간 동안 숙성 시켰으며, 이후 변화한 부피를 측정하였음.

■ 발포율

- 발포율 평가의 경우 수산화칼슘과 발포제인 AI 분말이 반응하여 발생하는 수소가스의 발생정도 및 슬러리의 점도에 기인한 부피팽창수준의 만족 여부를 검토하였음.
- ALC의 발포는 AI의 첨가율, ALC 슬러리의 성분조성뿐만 아니라 혼합수량에 따른 점도 변화에 영향을 받음. 특히, 수소가스 발생압력에 따른 ALC의 부피 팽창은 비교적 높은 슬러리 점도를 갖는 배합에서는 다소 어려운 특징을 가짐.
- 본 연구에서는 ALC의 슬러리 점도 및 경화 후 공극분포 등의 특성을 고려하여 부피팽창의 적절 수준을 160~180%로 하여 ALC 슬러리의 숙성과정에서 시험체의 발포 수준이 적정범위를 만족하는지 평가하였음.
- 발포율 평가 이후 선정된 시험체를 실내실험 규모 및 실제 현장 규모의 오토클레이브(180℃ 및 10 기압) 용기에서 고온·고압 양생(수열합성)을 실시하였음.

■ 압축강도 및 절건 밀도

- ALC의 압축강도는 KS F 2701에 따라 100×100×100 mm로 시험체를 절단한 후 500 kN 용량의 만능재료시험기로 압축강도를 측정하였으며, 절건 밀도는 건조로 안에서(105±5)℃의 온도로 일정 질량이 될 때까지 건조시킨 후, 실온이 될 때까지 냉각하여 무게를 측정하였음.

■ 열전도율

- KS F 4039에 따라 300 × 300 × 50 mm의 시험체를 제작하였으며, 105±2℃ 항량이 될 때까지 건조하였음.
- 이후 열전도율 측정 장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도율 측정을 실시하였음.
- 기준온도를 20℃로 하여 양면에 15℃의 온도차를 부여하였음.

■ 미세구조 및 수화생성물 분석

- ALC의 미세구조 및 수화생성물 분석은 제작이 완료된 시험체의 시료를 채취하여 전자주사현미경(scanning electron microscopy, SEM) 및 X선 회절분석기(x-ray diffraction, XRD)를 이용하여 분석하였음.

표 32. ALC 발포율 및 압축강도 평가를 위한 배합 상세

Series	C/S	W/B (%)	Slurry component ratio (%)			Aluminium power (%)
			Cement	Quartzite	Lime	
1	0.7	100	25	51.7	23.3	0.08
			30	50.5	19.5	0.08
			35	49.2	15.8	0.08
			40	48	12	0.08
2		60	30	50.5	19.5	0.08
						0.12
						0.16
						0.20
						0.24
		80				0.08
						0.12
						0.16
						0.20
						0.24
		100				0.08
						0.12
0.16						
0.20						
0.24						
3	0.5	45	30	58.3	11.7	0.04
						0.08
	0.7			50.5	19.5	0.04
						0.08
						0.12
	0.9			44.3	25.7	0.04
		0.08				
	0.5	58.3		11.7	0.12	
					0.04	
					0.08	
	0.7	50.5		19.5	0.12	
					0.04	
					0.08	
	0.9	44.3		25.7	0.12	
					0.04	
0.08						

(3) 실험결과

□ 발포율

- A형의 규석을 ALC의 구성 재료로 사용한 시리즈 1의 발포율 평가 결과는 <그림 93>과 같음.
- ALC의 발포율은 시멘트의 혼합비율이 25%에서 40%로 변화함에 따라 감소하는 경향을 나타내었음. 하지만 그 감소크기는 무시할만한 수준이었음.
- 시리즈 1 배합의 발포율은 105~108% 수준으로 시멘트 혼합을 변화에 따른 발포정도의 차이는 미미하였음. 더불어 시리즈 1에서 ALC의 발포율은 본 연구에서의 목표 수준인 160~180% 범위를 만족하지 못하였음.
- 시리즈 1과 마찬가지로 A형의 규석을 사용한 시리즈 2의 발포율 평가 결과를 <그림 94>에 나타내었음.
- 시리즈 2에서는 AI 분말의 첨가율이 0.16%인 배합을 제외하고 W/B가 80%인 배합에서 높은 발포율을 보였음.
- 특히, AI 분말의 첨가율이 0.12% 및 W/B가 80%인 배합에서의 발포율은 113%로 가장 높게 나타났다.
- 반면 B형의 규석을 사용한 시리즈 3 배합의 발포율은 시리즈 1 및 2 배합에 비해 높은 값을 보였음(<그림 95>).
- 시리즈 3 배합들의 발포율은 C/S가 0.5에서 0.9로 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음. 이와 함께 AI 분말의 첨가율의 증가 또한 발포율 향상에 영향을 미쳤지만 그 정도는 C/S 변화에 따른 발포율 변화에 비해 미미하였음.
- W/B가 45%인 배합들의 발포율은 C/S 및 AI 분말 첨가율이 각각 0.9 및 0.04%에서 203%로 가장 높았으며, C/S 및 AI 분말 첨가율이 각각 0.5 및 0.12%인 경우 발포율은 133%로 가장 낮았음.
- 한편, W/B의 증가는 C/S 및 AI 분말의 첨가율에 관계없이 발포율을 감소시켰는데, AI 분말의 첨가율이 0.12% 일 때 그 감소크기는 8% 수준으로 큰 차이를 보이지 않았지만, AI 분말의 첨가율이 0.04% 일 때는 최대 21% 수준으로 비교적 크게 감소하였음 .
- 일반적으로 다량의 혼합수는 생석회 및 시멘트 등과의 수화반응으로 수산화칼슘(Ca(OH)_2)의 형성에 긍정적인 영향을 미침. 더불어 이는 발포제인 Si와 반응하여 수소(H_2)를 발생시키고, 이는 ALC의 부피증가에 영향을 미침.
- 하지만 본 실험결과 W/B의 증가는 오히려 슬러리 발포율 증가에 긍정적인 효과를 미치지 않았음. 이는 W/B의 증가가 슬러리의 점도를 감소시켰으며, 슬러리 내부에 존재하며 부피 팽창을 유도하는 H_2 가스의 배출로 인한 영향으로 판단됨.
- 결과적으로 시리즈 3에서는 소요 발포율인 160%~180% 수준을 만족하는 배합을 선정할 수 있었는데 이들의 배합의 상세는 <표 33>과 같음.
- A형의 규석분말을 주요재료로 사용한 시리즈 1 및 2 배합에 비해 B형의 규석분말을 사용한 경우의 발포율이 더 우수하였음.
- 이는 B형의 규석분말이 A형의 재료에 비해 활성도가 높은 트리디마이트의 상을 갖기 때문으로 판단됨.

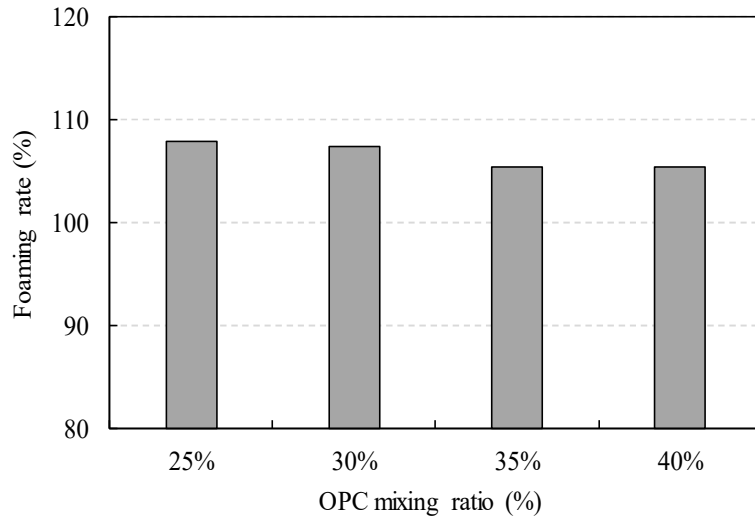


그림 93. 시리즈1 배합실험의 발포율 측정결과

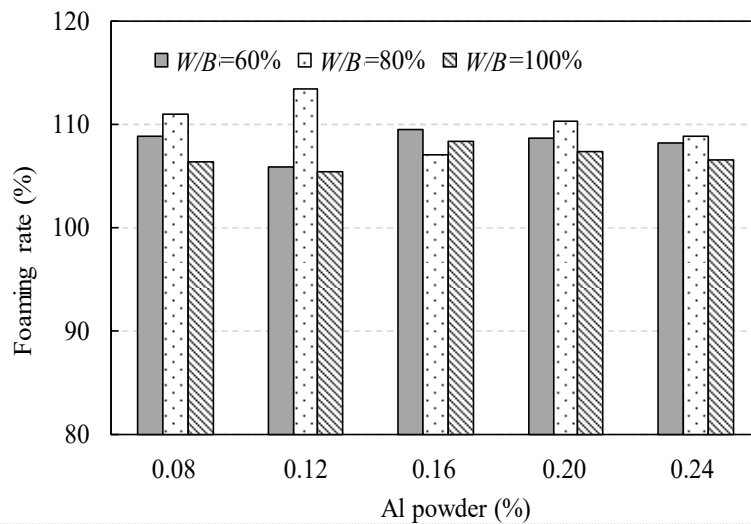


그림 94. 시리즈2 배합실험의 발포율 측정결과

□ 압축강도

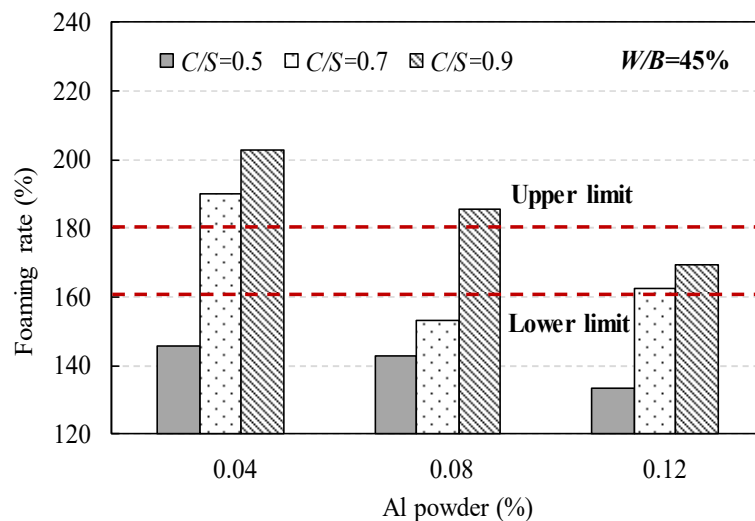
- 발포율 평가 결과 선정된 4개 배합에서 고온·고압 양생을 실시한 이후의 압축강도 측정 결과는 <표 33>에 나타내었음.
- 여기서, 시험체명은 각 배합에서의 C/S, W/B 및 Al 분말 첨가율을 기준으로 나타내었음.
- 예를 들어 0.9-45-0.08의 시험체는 C/S 비, W/B 및 Al 분말 첨가율이 각각 0.9, 45% 및 0.08% 인 배합을 의미함.
- ALC의 압축강도는 발포율의 증가와 함께 감소하였음(<그림 96>).
- 압축강도 측정결과 0.5-50-0.12 배합이 가장 높은 값인 1.12 MPa를 보였으며, 0.9-45-0.12 배합의 압축강도는 0.45 MPa로 가장 낮았음. 모든 ALC의 압축강도는 KS F 2701에서 제시하고 있는 0.5품의 품질규격(2.9 MPa 이상)을 만족하지 못하였음.
- 소형 실내 실험의 고온·고압 양생 공정에서 생산된 ALC의 압축강도는 기대보다 상당히 낮았음.
- 소형 실내 실험에서 생산된 ALC의 압축강도와 실제 고온·고압 양생 제품의 공정을 따라 대형 오토클레이브로 수열합성 한 ALC의 압축강도 차이를 시범적으로 확인할 필요가 있었음.
- 이를 위하여 0.9-45-0.08 및 0.9-45-0.12 배합을 이용하여 현장에서 대형 오토클레이브로 수열합성을 수행하였음(<표 34>).
- 대형 오토클레이브로 수열합성한 이들 배합의 압축강도는 각각 4.29 MPa와 3.03 MPa로서 소형

실내 실험의 경우에 비해 각각 5.4배와 6.73배 높았으며, 특히 KS F 2701에서 제시하고 있는 0.5 품의 규격보다도 상당히 큰 값을 보였음.

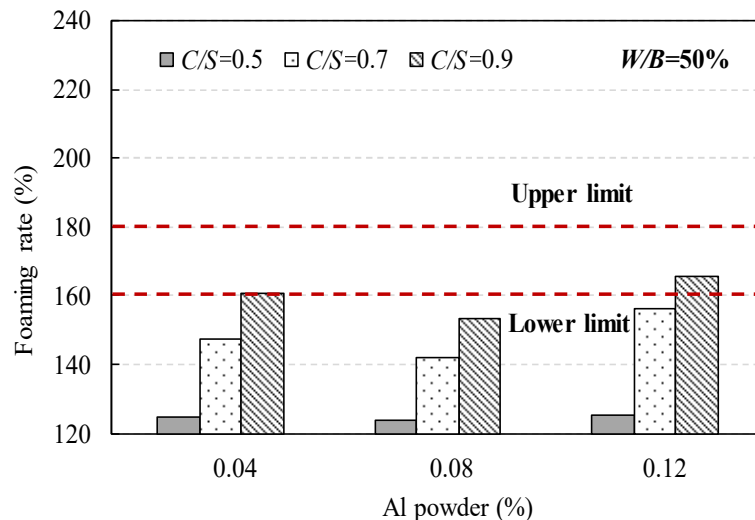
- 수열합성 과정에서 온도 상승 시간 및 유지 온도 등을 동일한 조건으로 한다고 해도 이는 장비 규모에 따라 상이할 수 있음.
- 즉, 소형 오토클레이브에서 ALC에 미치는 온도와 압력의 작용이 대형 장비에 비해 상대적으로 클 수 있으며, 그 영향이 ALC의 강도발현에 영향을 미치는 수화물의 생성 등에 있어 부정적인 영향을 미칠 수 있음.
- 결과적으로 소형 오토클레이브 장비를 이용한 실내실험은 ALC의 성능향상을 위한 최적 슬러리 성분 조성에 대한 평가에 중점을 두고 이로부터 도출된 배합은 압축강도 평가 등의 현장적용으로 확대될 필요가 있다고 사료됨.

□ 절건 밀도

- ALC의 절건 밀도는 <표 33>에 나타난 바와 같이 0.9-45-0.08 및 0.9-45-0.12 시험체가 각각 0.88 g/cm^3 및 0.81 g/cm^3 으로 다른 시험체에 비해 높은 수준이었는데, 이 값은, KS F 2701의 0.7품의 요구조건보다 높은 값임.



(a) W/B = 45%



(b) W/B = 50%

그림 95 시리즈3 배합실험의 발포율 측정결과

표 33. 발포율 평가 결과 선정된 배합 및 역학적 특성평가 결과 요약(소형 오토클레이브 실내배합)

Specimens	C/S	W/B (%)	Slurry component ratio (%)			AI power (%)	Test results			
			Cement	Quartzite	Lime		Foaming rate (%)	Compressive strength (MPa)	Oven-dry density (g/cm ³)	Thermal resistance (m ² · K/W)
0.9-45-0.08	0.9	45	30	44.3	25.7	0.08	163	0.8	0.88	0.0042d*
0.9-45-0.12	0.9			44.3	25.7	0.12	169	0.45	0.81	0.0044d
0.5-50-0.12	0.5	50		58.3	11.7	0.12	160	1.12	0.71	0.0061d
0.9-50-0.12	0.9			44.3	25.7	0.12	165	0.51	0.57	0.0065d

* d = Thickness of specimen to measure the thermal resistance

표 34. 발포율 평가 결과 선정된 배합 및 역학적 특성평가 결과 요약(대형 오토클레이브 현장배합)

Specimens	C/S	W/B (%)	Slurry component ratio (%)			AI power (%)	Test results		
			Cement	Quartzite	Lime		Compressive strength (MPa)	Oven-dry density (g/cm ³)	Thermal resistance (m ² · K/W)
0.9-45-0.08	0.9	45	30	44.3	25.7	0.08	4.29	0.92	0.0043d
0.9-45-0.12	0.9			44.3	25.7	0.12	3.03	0.78	0.0061d
0.5-50-0.12	0.5	50		58.3	11.7	0.12	—	—	—
0.9-50-0.12	0.9			44.3	25.7	0.12	—	—	—

* d = Thickness of specimen to measure the thermal resistance

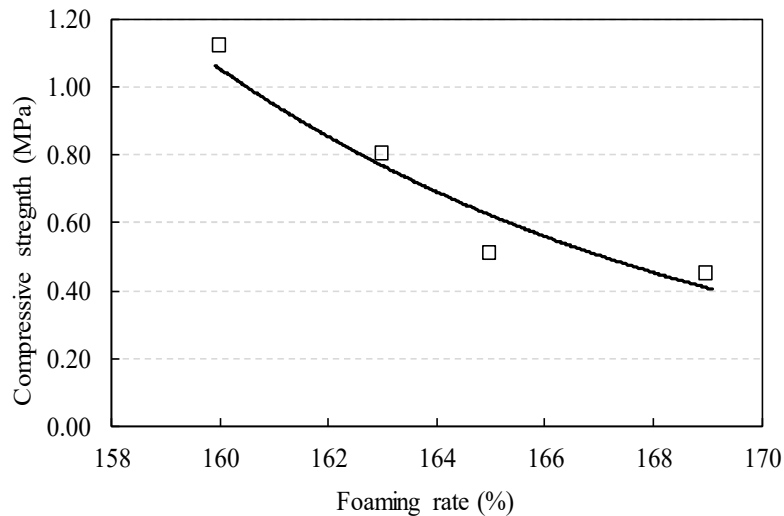


그림 96. ALC의 발포율과 압축강도의 관계

- 반면 0.5-50-0.12 및 0.9-50-0.12 시험체의 절건 밀도는 각각 0.71 g/cm³ 및 0.57 g/cm³으로 0.7품(0.65 이상 0.75 미만) 및 0.6품(0.55 이상 0.65 미만) 품질 규격을 만족하였음.
- 더불어, ALC의 절건 밀도는 압축강도 측정 결과와는 달리 발포율 변화에 의해 중요한 영향을 받지 않았음.
- ALC의 절건 밀도와 압축강도의 관계를 <그림 97>에 나타내었음. 일반적으로 기포 콘크리트의 압축 강도는 절건 밀도의 감소와 함께 감소함.
- 실내 소형 장비를 이용한 ALC의 압축강도는 절건 밀도에 큰 영향이 없었는데, 0.5-50-0.12 배합은 0.9-45-0.08 및 0.9-45-0.12 배합에 비해 낮은 밀도에도 불구하고 높은 압축강도를 보였음.
- 그리고 0.9-50-0.12 시험체의 절건 밀도는 0.57 g/cm³으로 0.9-45-0.12 배합에 비해 현저히 낮음에도 불구하고 높은 압축강도를 보였음.
- 대형 오토클레이브로 수열합성 한 0.9-45-0.08 및 0.9-45-0.12 배합은 실내 양생조건과 비교하

여 비슷한 수준의 절건 밀도에서 각각 5.4배와 6.73배 높은 압축강도를 보였음. 이들 관계를 고려하면 0.5-50-0.12 및 0.9-50-0.12 배합들도 대형 오토클레이브로 수열합성 조건에서 실내 소형 장비 조건에 비해 비슷한 절건밀도에서 높은 압축강도 발현특성을 기대할 수 있다고 판단됨.

□ 공극형상

- 모든 ALC 배합의 공극은 50 μm 이상의 기공(Artificial air pore)에 의해 지배되었음(그림 98).
- 더불어 ALC에서 공극 형성의 크기는 C/S 에 관계없이 W/B 가 45%에서 50% 변화함에 따라 증가하는 경향을 나타내었음.
- W/B 가 45%인 배합에서는 1~3 mm 크기의 공극이 다수 밀집되어 형성된 반면, W/B 가 50%인 배합에서는 2~5 mm 수준의 공극이 다수 형성되었음.
- 발포율 측정결과에서 논의한 바와 같이 W/B 의 증가로 슬러리 점도가 감소된 배합에서는 H_2 가스의 배출이 용이해지며, ALC 발포에 미치는 영향이 적어짐.
- 더불어 슬러리 점도의 감소는 기포 계면을 파괴시킴과 동시에 기포간 병합을 유도함으로서 비교적 큰 크기의 열린 공극이 다수 형성될 수 있음).
- 이에 따라 $W/B=50\%$ 인 배합이 $W/B=45\%$ 배합에 비해 비교적 큰 크기의 공극이 다수 형성된 것으로 판단되며, 이와 함께 0.5-50-0.12 및 0.9-50-0.12인 시험체의 공극 형상을 비교해 보았을 때 C/S 의 변화는 공극 크기에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났음.

□ 열저항값

- 일반적으로 콘크리트의 열저항값은 밀도가 감소함에 따라 비선형적으로 증가함.
- ALC의 열저항값과 밀도 관계도 일반적인 경향과 비슷하였음(그림 99).
- W/B 가 50%인 0.5-50-0.12 및 0.9-50-0.12 시험체의 열저항값은 각각 $0.0065d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 및 $0.0061d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 로 KS F 2701에서 제시하고 있는 0.5품($0.0053d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 이상)의 품질규격을 만족하였는데, 여기서 d 는 두께임.
- 반면 W/B 가 45%인 0.9-45-0.08 및 0.9-45-0.12 배합의 경우에는 열저항값이 각각 $0.0042d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 및 $0.0044d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 로 KS F 2701의 0.6품($0.0042d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 이상)의 성능을 만족하였음.

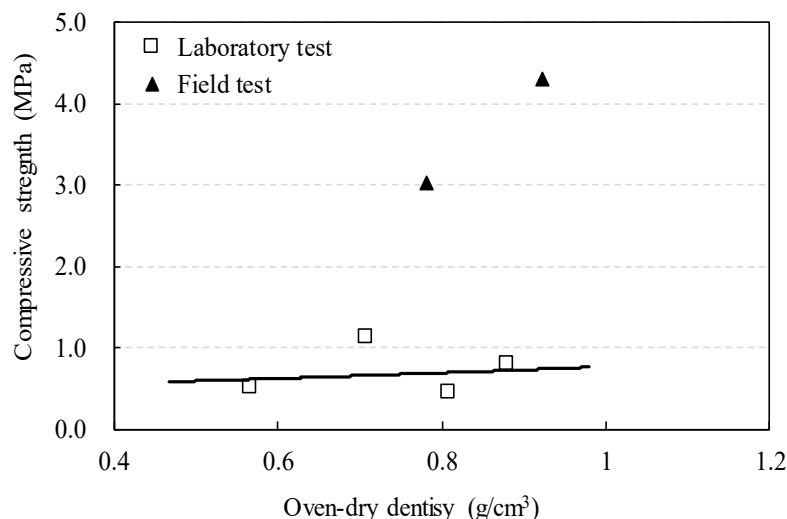
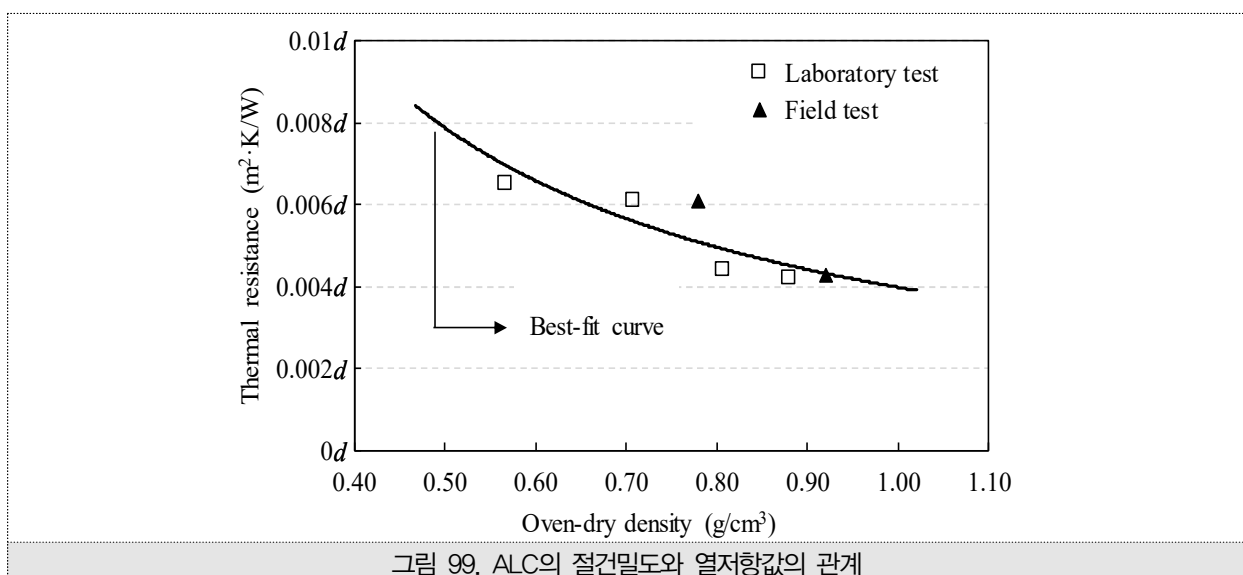
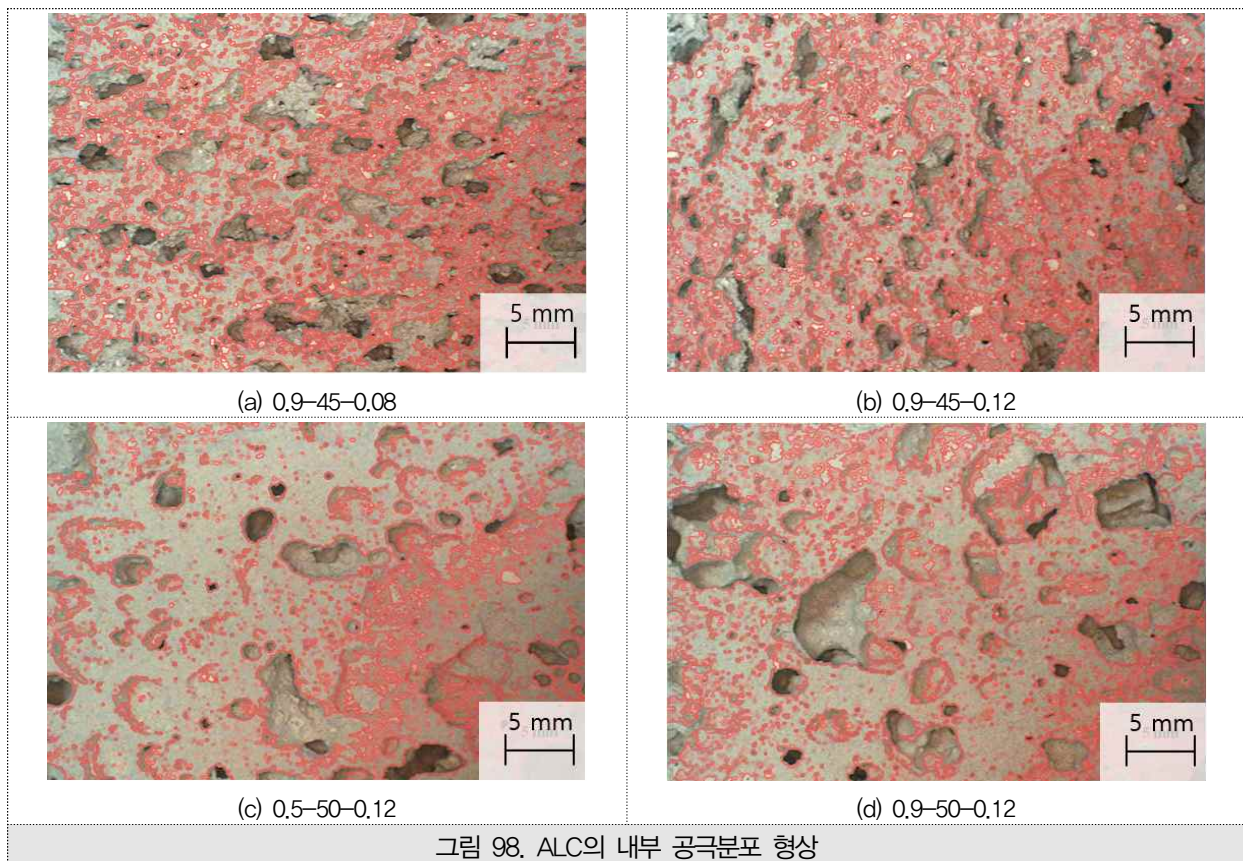


그림 97. ALC의 절건밀도와 압축강도의 관계

- 대형 오토클레이브에서 수열합성 되어 제작된 0.9-45-0.08 및 0.9- 45-0.12 배합의 밀도 변화에 따른 열저항값의 측정 결과는 각각 $0.0043d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 및 $0.0061d \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 로 실내실험 규모의 오토클레이브에서 제작 된 ALC 배합의 결과와 비슷한 수준이었음.
- 이는 ALC의 열저항 성능은 수열합성 환경 변화에 따른 강도발현 수준의 차이보다는 밀도와 밀접한 관계가 있음을 의미함.

□ 수화생성물 및 미세구조

- ALC 배합의 XRD(X-ray diffraction) 분석결과 칼슘실리케이트 수화물(Calcium silicate hydrates) 이 고온·고압 하의 양생과정에서 구조적으로 안정한 판상형의 결정을 이루는 토버모라이트(Tobermorite)의 피크가 $29 \sim 30^\circ$, $36 \sim 37^\circ$ 및 $39 \sim 40^\circ$ (2 theta) 부근에서 관찰되었음(〈그림 100〉).



- 더불어 21° , $26\sim 27^\circ$ 및 50° (2 theta) 부근에서 석영(Quartz)과 $29\sim 30^\circ$ (2 theta) 부근의 칼사이트(Calcite)의 피크도 확인 할 수 있었음.
- 미세구조 분석에서도 모든 시험체에서 고온·고압 환경에서 안정한 결정을 이룬 토버모라이트의 형상을 확인할 수 있었음.
- ALC의 강도발현에 영향을 미치는 수화생성물인 토버모라이트는 수열합성 과정에서 양생 온도 및 시간이 증가함에 따라 육각판상형의 결정 형태가 명확해지며 점차 안정된 구조로 변화함.
- 압축강도 측정결과와 강도발현이 가장 높게 나타난 0.5-50-0.12 시험체의 경우 육각판상형의 토버모라이트 결정상이 비교적 명확하게 확인되었음(그림 101)).
- 반면, 0.9-45-0.08 및 0.9-45-0.12 시험체의 경우에는 토버모라이트의 결정형상이 육각 판상형 보다는 침상형의 형태로서 매우 불규칙적으로 결합된 형태를 보였음.
- 또한 압축강도 발현이 낮은 0.9-50-0.12 배합에서는 침상형과 판상형이 혼합된 토버모라이트 결정상을 확인할 수 있었음.

6) ALC 현장배합

(1) 일반사항

- ALC 콘크리트의 열전도율 및 압축강도 확보를 위한 ALC 배합의 역학적 특성을 평가함.
- ALC배합에서 석회의 비율과 시멘트의 비율, 알루미늄 파우더의 비율에 변화를 줄 때 배합시 강도 발현 및 열전도율에 미치는 영향을 평가하기 위함.
- 주요 배합변수로 석회 첨가율을 0%, 9%, 18.7%로 하였으며, 시멘트 첨가율은 56.7%, 44.7%, 35%로 하였으며, 알루미늄 파우더의 경우 0.12 ~ 1.00% 까지 다양한 변수에 따라 배합율을 달리 한 ALC배합 직후 혼합 상태 및 재령별 압축강도를 측정하였음.

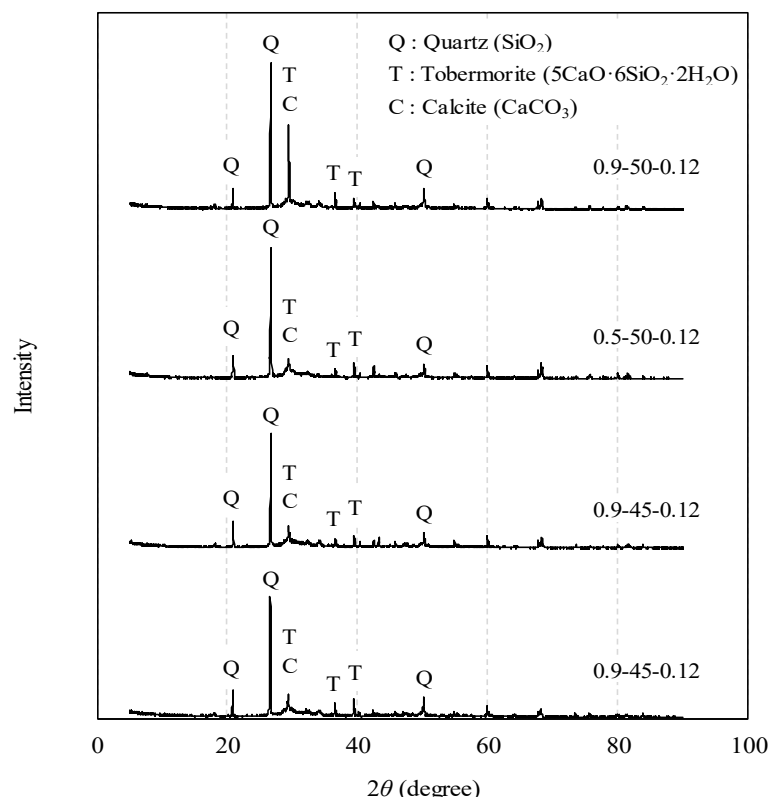
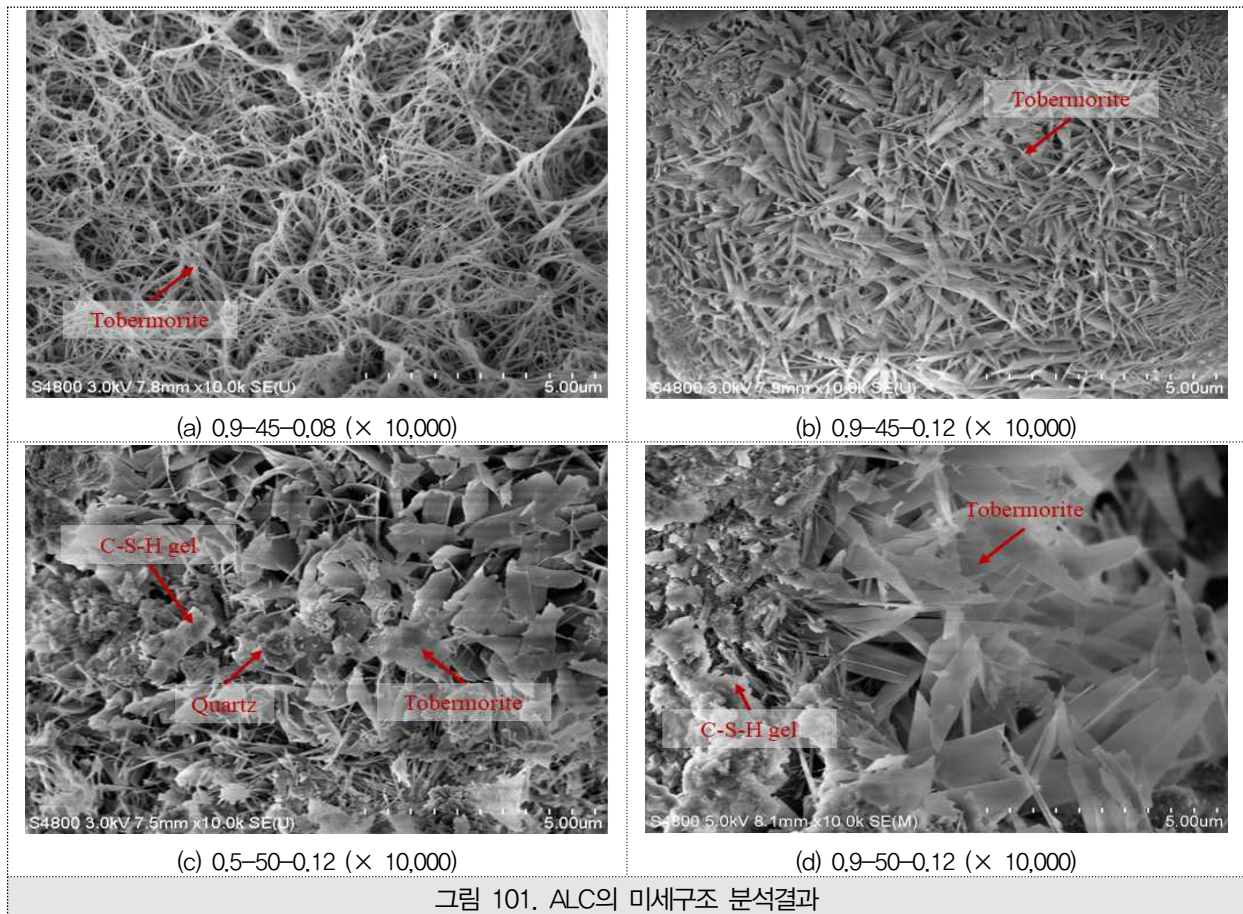


그림 100. ALC의 XRD 분석결과



(2) 실험계획

☐ 사용재료

■ 시멘트

– 밀도 및 분말도가 각각 3.14 g/cm^3 및 $4,497 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 재료를 사용하였음.

☐ 실험상세

- 1종 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였고 이를 활용한 ALC 배합에서 생석회를 제외한 배합과 첨가한 배합도 변수에 포함하였음.

☐ 측정항목

■ 압축강도

– 압축 강도는 표준 건조 상태의 공시체를 사용함. 시험은 발포 방향에 대하여 직각 방향으로부터 가압되는 위치에 하고, 공시체가 파괴되었을 때의 하중을 공시체의 가압 면적으로 나눔. 또한 하중은 충격을 주지 않도록 등분포 되어야 함. 하중을 가하는 속도는 매초 0.098 N/mm^2 를 표준으로 하고, 하중 측정은 98N까지 측정할 수 있는 계기를 사용함. 본 압축강도 실험체는 KS F 2701: 'Autoclaved lightweight aerated concrete block'에 따라 다음과 같이 제작하였음.

(a) 절건 비중 및 압축강도의 공시체는 한 변이 100 mm인 정육면체로 한다. 다만 부재의 두께가 100mm 미만인 경우는 부재의 두께를 한 변으로 하는 육면체로 함. 또한 각 변의 치수차는 어느 경우에도 1mm 이하로 함.

(b) 공시체의 채취 위치는 원칙적으로 발포 방향에서 높이의 중앙 부분으로 함.

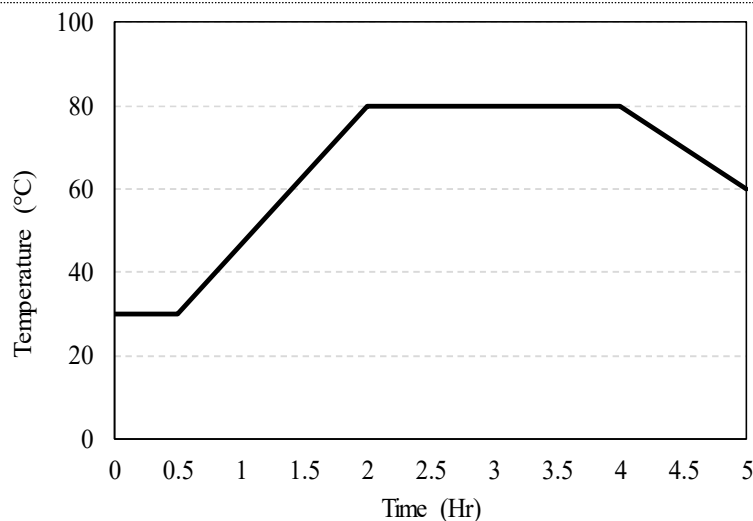
■ 열전도율

- 시험방법은 KS F 2277에 따라 평균 온도 (30 ± 3) °C, 열류 방향을 위쪽으로 향하게 하여 표면 온도를 측정하는 경우의 열저항을 구함. 공시체는 900mm X 450mm 이상의 크기인 시험편 2매를 잘라 내어 통풍이 잘되는 실내에 방치하여 절건 비중으로부터 산정한 함수율이 2% ~ 6%로 될 때까지 건조한 후, 이음매 부분을 서로 맞물리게 하고 틈새가 없도록 밀어 붙힌 다음, 표면의 이음 부분을 접착 테이프로 고정함. 본 열전도율 실험체는 KS F 2701: 'Autoclaved lightweight aerated concrete block'에 따라 다음과 같이 제작하였음.

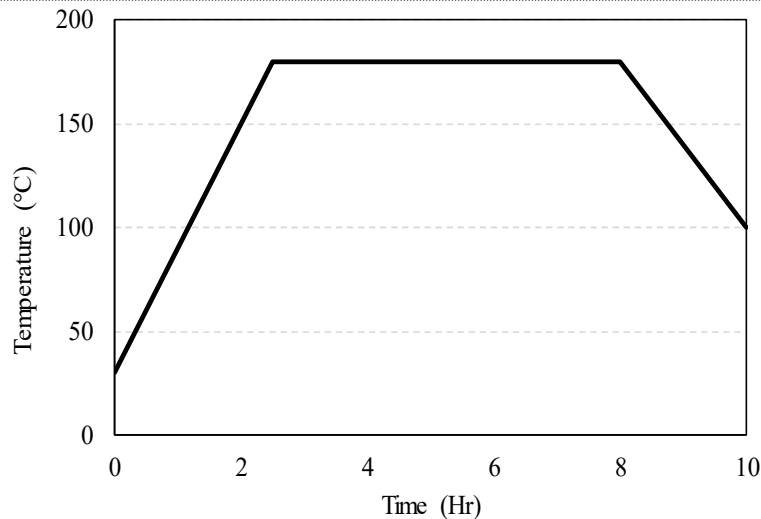
(3) 공시체 제작

□ 상세규격 및 진행순서(〈그림 102〉 및 〈그림 103〉)

- 본 실험에 대한 AAC 배합은 재료의 비율을 각기 다르게 하여 진행하였음. 공시체는 배합별로 각각 압축강도 실험용 공시체 9개와 열전도율 실험용 공시체 2개씩 제작하였음.
- 변수는 총 5개의 변수로 진행되어 총 압축강도 공시체 45개와 열전도율 공시체 10개를 제작하였음. 압축강도 공시체는 100mm X 400mm X 100mm 규격의 빔몰드를 사용하여 배합을 진행하고 타설 이후에 탈형 및 절단하여 빔 몰드 하나당 공시체가 3개씩 확보되도록 공시체 채취를 진행하였음.



(a) 1차 양생



(b) 2차 양생

그림 102. 고압증기양생(Autoclaved) 이력

- 배합의 진행 순서는 시멘트와 알루미늄 분말을 먼저 믹서기에 투입하여 약 60초간의 건비빔을 실시하고 추가적으로 물을 제외한 다른 재료들을 다 투입하였음.
- 그 이후에 건비빔을 추가로 60초 더 실시한 후 물을 투입하여 3분간의 충분히 혼합하여 슬러리를 생성하였음.
- 비빔이 완료된 배합은 믹싱기에서 배출된 후에 몰드에 타설 되고 1차양생으로 증기양생을 약 4시간 가량 실시함.
- 증기양생을 마친 공시체들은 고온 고압 장치인 Autoclave 에 들어가서 고온고압 증기양생을 추가로 거치게 됨. 이때 AAC의 토버모라이트라는 광물질이 생성 됨.
- 본 실험은 오토클레이브 고온고압 증기양생을 PHC파일용 오토클레이브 기계에 PHC Pile과 같이 넣어서 고온고압 증기양생을 실시하였음.
- 본 회사에서 보유한 오토클레이브의 양생이력은 최고 10기압 180℃ 에서 고온고압으로 8시간 양생을 실시함.
- 본 배합은 AAC의 양질의 발포율을 확보하기 위하여 결합재로서 규석분말, 석회석 및 시멘트를 활용하였으며, 규석분말의 SiO₂함유량은 95.6%이며, 석회석 CaO의 함유량은 82.7% 임.
- 발포제로는 알루미늄 분말을 사용하였다. C/S 몰비 (CaO/SiO₂ molar ratio)는 0.7과 0.77두가지로 진행했으며 알루미늄 분말의 첨가율에 변화를 주어 비중 및 강도의 변화추이를 지켜보고자 하였음. 시멘트의 양과 물의 양이 변동에 영향을 주지 않도록 시멘트의 양에 맞추어 물을 조절하여 물-바인더 비 (W/B ratio) 는 45%로 고정하였음.
- 압축강도는 1일강도를 측정한 상태이며 이후의 데이터는 재령일을 다 채우지 못한 배합들로 인해 결과에 반영하지 못하였음.

(4) 실험 결과

- 재료의 비율에 따른 AAC배합에서 특히 알루미늄 분말의 비율을 조정한 결과값을 <그림 104> 및 <그림 105>에 그래프로 나타내었다. 비중은 배합 3과 배합 5가 알루미늄 분말이 약 두 배 정도 차이가 나는데 비중은 약 75% 수준으로만 저하된 것을 확인할 수 있음.
- 반면에 배합 5와 배합 8에서도 알루미늄 분말의 비율이 두 배 차이가 나고 그에 따른 슬러리의 체적 증가량도 늘어났지만 비중은 88% 수준으로 약 12%만 줄어든 것을 볼 수 있음. 압축강도의 결과 값에서는 배합이 진행될수록 알루미늄의 분말 비율이 증가하고 이에 맞추어 강도 또한 비례적으로 줄어드는 경향을 확인 할 수 있었음.

7) 나노캡슐 에어로겔 임베디드 ALC 제작

(1) 일반사항

- 본 절에서는 습식형 나노캡슐 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트의 경우와 마찬가지로 ALC의 열전달 저항 성능 향상의 목적으로서 나노캡슐 에어로겔 전구체 용액을 ALC 시험체에 임베디드 하여 그 특성을 평가하고자 함.
- ALC의 배합은 앞 절의 실내실험 및 현장실험을 통해 선정된 2개의 최적 배합을 기반으로 제작된 시험체를 이용하였으며, 습식형 기포 콘크리트의 열전달저항성능 향상을 위해 사용된 나노 캡슐 에어로겔 전구체 용액을 이용하였음.



(1) 배합재료 계량



(2) 배합재료 투입



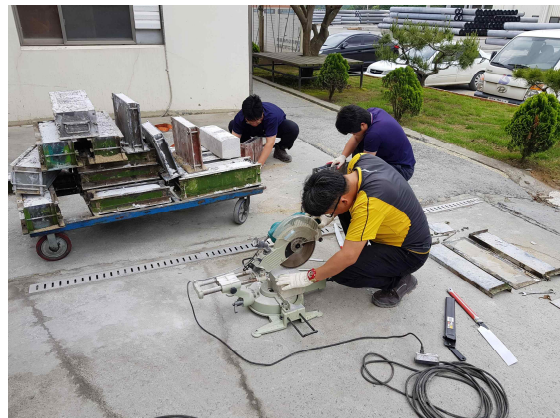
(3) 배합재료 믹싱



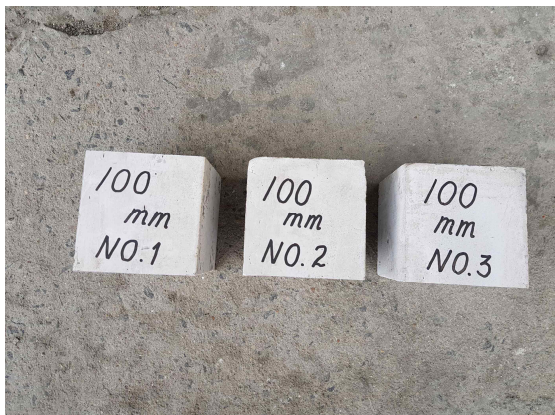
(4) 1차 증기양생



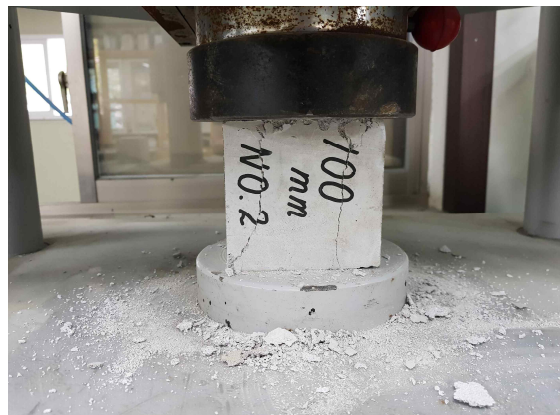
(5) 2차 오토클레이브 양생



(6) 탈형 및 절단



(7) 압축공시체 제작사진



(8) 압축공시체 압축강도 실험강도

그림 103. ALC배합 및 압축공시체 제작

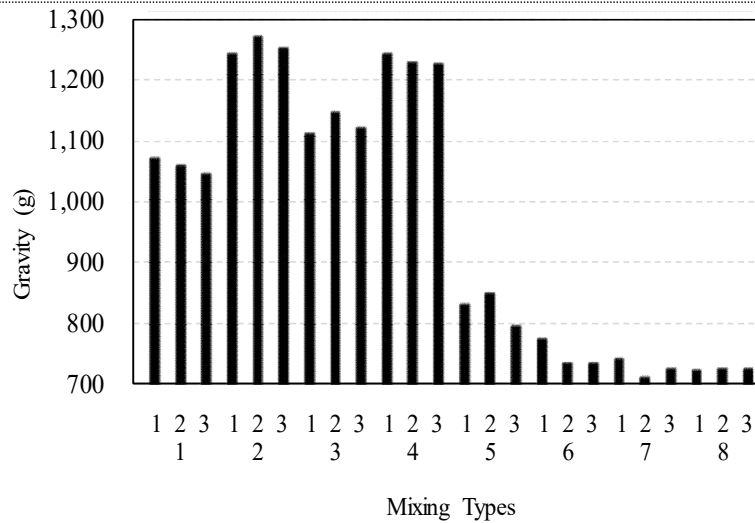


그림 104. 압축공시체 비중측정 결과

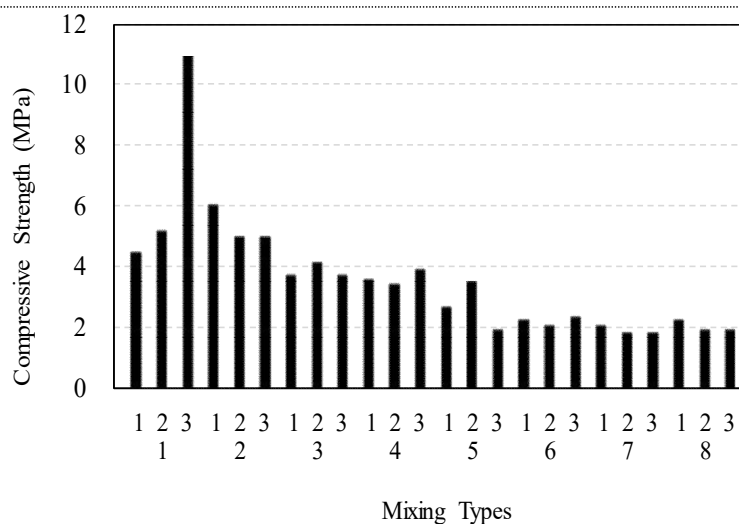


그림 105. 압축공시체 압축강도측정 결과

(2) 실험계획

□ 사용재료

■ 나노캡슐 에어로겔 전구제 용액

- 에어로겔 전구제 용액은 실리카계 에어로겔 전구체인 MTMS(methyltrimethoxysilane, 95%) 및 TEOS(tetraethyl orthosilicate, 99.0%)를 사용하였음.
- 용매로서는 물과 에탄올(absolute ethanol, 99.9%)을 이용하였으며, 수산화나트륨(NaOH, 97%)를 촉매로 활용함.

■ 나노캡슐 에어로겔을 임베디드 하기 위한 ALC 시험체

- ALC는 실내실험 및 현장배합 실험을 통해 압축강도 및 열저항값을 고려하여 선정된 배합을 이용하였으며, 그 배합 상세는 <표 35>에 나타내었음.

□ 실험상세

■ 나노캡슐 에어로겔 임베디드

- 나노 에어로겔의 임베디드는 습식형 기포콘크리트의 경우와 마찬가지로 각각 합성된 2종류의 용액(MTMS, TEOS+MTMS)에 ALC를 침지하여 코팅을 진행함.

- ALC의 침지과정에서 밀폐형 용기의 압력 변화를 통해 ALC의 에어로겔 침투 효율성을 향상시킴.
- 나노 에어로겔 용액에 침지된 ALC 시험체를 이동형 글로브 박스에 투입한 후 5-10 torr의 음압을 가하였으며, 이를 통해 ALC의 미세공극까지 나노 에어로겔 용액이 침투 될 수 있도록 하였음. 임베디드가 완료된 ALC 시험체는 상온의 환경에서 24시간 동안 건조함. 이후 같은 방법으로 3회 반복하였음.

□ 측정항목

■ 압축강도

- 100 mm × 100 mm × 100 mm 형태의 입방형 시험체를 이용하였음.
- 50 kN 용량의 압축강도기를 사용하여 압축강도를 측정하였음.

■ 열저항값

- KS F 4039에 따라 300 × 300 × 50 mm의 시험체를 제작하였으며, 28일간 항온항습환경(습도 60±5%, 온도 20±1℃)에서 양생을 실시 한 후 105±2℃ 항량이 될 때까지 건조하였음.
- 이후 열전도를 측정 장비를 이용하여 KS L 9016에 따라 열전도를 측정을 실시하였음.
- 기준온도를 20℃로 하여 양면에 15℃의 온도차를 부여하였음.
- 측정된 열전도를 값은 KS F 2701의 ALC 블록 품질규격과의 비교 및 두께를 고려한 열저항값으로 환산하였음.

(3) 실험결과

□ 압축강도

- 나노캡슐 에어로겔이 임베디드된 ALC의 압축강도 측정결과와 요약을 <표 36>에 나타내었음.
- 측정결과 ALC의 압축강도는 C/S가 0.7인 경우 10.6 MPa 및 C/S가 8.0인 경우 8.0 MPa로 모두 KS 2701에서 제시하고 있는 ALC 0.7품(압축강도 6.9 MPa 이상)의 규격을 상회하였음.

□ 열저항값

- 나노캡슐
- 열저항값은 0.0073d m² · K/W로 0.4품의 0.0053d m² · K/W에 비해 약 37% 높게 나뉘었음.
- 결과적으로 나노 캡슐 에어로겔 임베디드 ALC의 품질은 당초 목표였던 값을 모두 만족하였음.

표 35. 나노캡슐 에어로겔 임베디드 ALC의 특성평가를 위한 배합상세

실험체명	C/S	W/B	Mixing ratio (%)			Al powder (%)
			Quartzite	Lime	Cement	
ALC-1	0.7	45	43.7	0	56.7	0.12
ALC-2	0.9	50	44.3	25.7	30	0.12

표 36. 나노캡슐 에어로겔 임베디드 ALC의 특성평가 결과

실험체명	Compressive strength (MPa)	Thermal conductivity (W/m · K)	Thermal resistance (m ² · K/W)
ALC-1	10.6	0.163	0.0061d
ALC-2	8.0	0.137	0.0073d

8) 결론

☐ 알루미늄 분말의 첨가율이 콘크리트 압축강도에 영향을 미치는 요인 분석

- 알루미늄 분말이 0.12%와 1.00%까지 변화를 준 결과, 최고 비중은 1270g이고 최저 비중은 721g이며 이는 56.78%까지 감소하는 모습을 보였으며, 알루미늄 비율의 증가 또는 감소에 비례하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 최고 강도는 5.9MPa 이고, 최저 강도는 1.9MPa 이며 이는 압축강도가 32.20%의 수준까지 감소하는 추세임.
- 알루미늄 분말의 비율이 증가함에 따라 체적 증가율이 높아지고 부풀은 체적만큼의 빈 공간으로 인해 강도의 저하가 발생되었으며, 이는 한국의 AAC 기준에 표기되어 있는 0.5품의 3MPa 기준에 만족할 수 있는 배합의 기초자료로 활용이 가능할 것으로 판단됨.

☐ 알루미늄 분말의 첨가율이 0.7% 이상의 경우 콘크리트 압축강도에 영향을 미치는 요인 분석

- 배합 6번, 7번, 8번의 경우는 알루미늄 분말의 비율이 0.7 이상이 배합들이다. 이 배합들은 비중의 감소가 뚜렷하게 나타나지 않고, 이와 동시에 강도의 변화도 뚜렷하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다. AAC의 특성을 좀 더 확보하기 위해서는 낮은 비중과 적절한 기준의 강도를 확보하기 위한 목적을 따라, AAC의 기준에 맞출 수 있도록 추가적인 배합실험이 필요할 것으로 판단됨.

☐ 시멘트 첨가율이 콘크리트 압축강도에 영향을 미치는 요인 분석

- 배합 1번과 배합 2번의 경우는 생석회의 유무차이도 있지만 시멘트 함유량의 차이 또한 가지고 있으며, 알루미늄 분말의 첨가율이 되려 낮아지는 경우이다. 보통 알루미늄 분말의 첨가율이 낮아지면 발포반응이 그만큼 덜 진행됨에 따라 압축강도의 관점에서는 유리한 변수이나 시멘트 함유율이 낮아짐에 따라 압축강도의 결과가 대폭 떨어짐을 확인함.
- 배합 2번과 배합 3번의 경우는 시멘트 첨가율이 동일한 배합으로 알루미늄 분말의 첨가율만 달라진 배합이다. 이 실험들의 압축강도 결과로는 알루미늄 분말의 첨가율이 높아진 배합 3번은 압축강도가 약 26% 정도 감소하는 경향을 보였다. 따라서 배합 1번과 배합 2번의 강도 저하는 알루미늄 분말 첨가율 감소의 영향보다 시멘트 첨가율 감소의 영향이 더 우세하게 작용한 것으로 판단됨.

☐ ALC 실내 및 현장 배합 실험

- ALC의 발포율은 C/S 가 0.5에서 0.9로 변화함에 따라 증가하였으며, AI 분말의 첨가율의 증가 또한 ALC의 발포수준 향상에 영향을 미쳤지만 그 영향은 C/S 변화에 비해 미미하였음.
- 2) ALC 슬러리의 발포에는 SiO_2 가 고온의 환경에서 결정화된 트리디마이트 상을 갖는 규석이 판상형의 조직을 갖는 규석보다 유리하였음.
- ALC 슬러리의 소요 발포율(160~180%) 만족을 위해서는 W/B 가 45~50% 범위에서 조절될 필요가 있으며, 해당 범위에서 ALC의 공극 크기는 W/B 가 45%에서 50%로 변화할 때 증가하는 경향을 보였음.
- 침상형의 토버모라이트 결정상보다는 육각판상형의 토버모라이트 결정상의 형성이 뚜렷한 ALC 배합에서 높은 압축강도가 측정되었음.

☐ ALC 현장배합 실험

- 소형 실내 실험의 고온·고압 양생 공정에서 생산된 ALC의 압축강도는 기대보다 상당히 낮았음. 소형 실내 실험에서 생산된 ALC의 압축강도와 실제 고온·고압 양생 제품의 공정을 따라 대형 오토클레이브로 수열합성 한 ALC의 압축강도 차이를 시범적으로 확인할 필요가 있었음.
- 대형 오토클레이브로 수열합성 한 배합의 압축강도는 대부분이 2.9 MPa 이상으로서 KS F 2701에서 제시하고 있는 0.4품의 규격보다도 상당히 큰 값을 보였다.
- 수열합성 과정에서 온도 상승 시간 및 유지 온도 등을 동일한 조건으로 한다고 해도 이는 장비 규모에 따라 상이할 수 있음.
- 즉, 소형 오토클레이브에서 ALC에 미치는 온도와 압력의 작용이 대형 장비에 비해 상대적으로 클 수 있으며, 그 영향이 ALC의 강도발현에 영향을 미치는 수화물의 생성 등에 있어 부정적인 영향을 미칠 수 있음.
- 결과적으로 소형 오토클레이브 장비를 이용한 실내실험은 ALC의 성능향상을 위한 최적 슬러리 성분 조성에 대한 평가에 중점을 두고 이로부터 도출된 배합은 압축강도 평가 등의 현장적용으로 확대 하였음.

□ 에어로겔 임베디드 ALC 배합 실험

- 에어로겔 임베디드 ALC 배합 실험의 결과 ALC의 성능 향상을 위한 최적의 배합상세, 제조 환경 및 에어로겔 임베디드 소재는 아래와 같이 제시 될 수 있었음.
- 더불어 개발된 소재의 압축강도 및 열저항값은 각각 8.0 MPa 및 $0.0073d\ m^2 \cdot K/W$ 로 본 연구의 최종 성과 목표를 (압축강도=2.9 MPa 이상 및 열저항값= $0.0066d\ m^2 \cdot K/W$ 이상)을 모두 만족하였음.

C/S	W/B	Al powder (%)	Mixing ratio (%)			Nano-aerogel
			Quartzite	Lime	Cement	
0.9	50	0.12	44.3	25.7	30	MTMS+TEOS
Autoclaved condition		Compressive strength (MPa)	Thermal conductivity (W/m · K)		Thermal resistance ($m^2 \cdot K/W$)	
180 °C, 10 air pressure		8.0	0.137		0.0073d	

(1) 목적

- 본 연구의 최종 성과물인 나노캡슐 에어로겔 임베디드 기포콘크리트 및 ALC는 무기계 단열재료로서 기존 제품과의 차별성(우수한 단열성능, 방수성능 및 내화성능)을 지님. 해당 성능의 검증 방안으로서 일반 콘크리트 및 유기계 단열재료인 EPS와의 성능비교를 통해, 그 우수성과 사용 가능성을 평가하고자 함.

(2) 시뮬레이션 상세

- 열전달 시뮬레이션은 COMSOL Multiphysics 프로그램을 활용하여 시간에 따른 열전달에 따른 온도 분포 측정을 실시하였으며, 아래의 <그림 106 (a)>와 같이 가로와 세로의 길이가 150 mm 이고, 두께가 50 mm 인 콘크리트 블록을 설정하였음.
- 시뮬레이션 상의 초기 온도는 섭씨 20도로 설정하고, 열전달은 <그림 106 (b)> 와 같이 블록의 한쪽 면에 섭씨 50도로 열을 가하면서 <그림 106 (c)> 와 같이 반대쪽 면에서 시간에 따른 온도의 변화를 측정함.
- 열 전달 시뮬레이션에서 사용하는 주요 물리적인 특성은 밀도, 열전도율, 비열 (등압에서의 열 용량) 값으로써 콘크리트 소재 및 기타 콘크리트 소재의 주요 특성에 대한 값은 아래의 <표 37>과 같음.
- 콘크리트 소재와 대체 콘크리트들의 특성에 대해서 살펴보면, 습식형 기포 콘크리트들은 기존 콘크리트에 비하여 밀도가 1/6 정도 낮고, 열전도율은 1/10 이상으로 낮은 값을 갖고 있으며, 비열 값은 매우 큰 값을 갖는 것으로 나타남.
- 시뮬레이션 상에서 열 차폐 소재로 적용하려고 하는 스티로폼 소재와 에어로겔 소재의 물리적인 특성에 대한 값은 아래의 <표 39>와 같음.
- 스티로폼 소재의 경우 기존에 많은 활용을 하고 있는 대표적인 단열재 소재로서 낮은 밀도, 낮은 열전도율을 가지고 있는 것을 주요 특징으로 하며, 시뮬레이션에서 적용하고자 하는 또 다른 열 차폐 소재인 에어로겔 소재의 경우 스티로폼에 비하여 더 낮은 밀도와 열전도율을 가지고 있음.

(3) 시뮬레이션 결과

☐ 스티로폼(EPS)이 적용된 콘크리트 블록



그림 106. 시뮬레이션 방법

표 38. 기포콘크리트 및 ALC 소재의 열전달 특성

Specimens	Type	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/m · K)	Specific heat (J/Kg · °C)
—	Noraml concrete	2.3	1.8	880
기포 콘크리트-1	OPC100% Unit binder 250 kg/m ³	0.35	0.121	17,700
기포 콘크리트-2	OPC60%+GGBS40% Unit binder 250 kg/m ³	0.32	0.106	20,200
기포 콘크리트-3	OPC90%+MK10% Unit binder 280 kg/m ³	0.33	0.066	32,000
ALC-1	C/S=0.7	1.09	0.288	7,400
ALC-2	C/S=0.9	1.00	0.282	7,600

표 39. 단열 소재의 열전달 특성

Type	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (W/m · K)	Specific heat (J/Kg · °C)
EPS	0.035	0.035	2300
Aerogel	0.025	0.030	900

- 〈그림 107〉는 콘크리트 블록 및 스티로폼이 적용된 콘크리트 블록에서 한쪽 면을 50도로 가열한 뒤 300 분 후의 열 분포도에 대한 단면도임.
- 콘크리트 블록의 경우, 열이 블록의 중앙을 통해서 전달이 되는데, 이는 블록의 옆면은 초기온도인 20도로 설정이 되어 있기 때문이며, 300 분이 지난 시점에는 반대쪽 면에 35도 이상의 열이 전달 된 것을 나타냄.
- 스티로폼이 한 개의 층이라도 삽입되는 경우부터 열전달 효율이 급격히 떨어지는 것을 확인 할 수 있으며, 특히 스티로폼의 총 두께는 층의 개수와 관계없이 10 mm 로 똑같음에도 불구하고, 층의 개수가 많아질수록 반대쪽 면이 진한 파랑 색으로 변화되는 결과를 얻을 수 있었고, 이러한 결과는 층의 개수가 많아지면서 열 차단 효율이 급격히 향상되는 것을 나타내는 결과임.
- 보다 자세한 결과를 확인하기 위하여 〈그림 108〉을 통해서 시간의 변화에 따른 온도의 변화를 살펴보면, 콘크리트의 경우 반대쪽 면에서의 온도가 열전달 100분이 지나는 시점에서 38.9도에서 온도가 포화상태가 되는 것을 확인할 수 있음.
- 스티로폼 소재가 삽입된 콘크리트 블록에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면, 대부분의 경우 150 분이 지나면서 온도가 포화상태가 되는 것을 확인할 수 있고, 300 분의 반대쪽 면에서의 온도는 스티로폼 소재가 1층인 경우에는 24.5도, 2층인 경우 23.6도, 3층인 경우 23.04도이며, 5층인 경우에는 23.00도로 나타남(〈표 40〉).
- 스티로폼의 총 두께가 동일하게 10 mm 인 조건이나, 스티로폼 층의 개수가 증가함에 따라서 300 분 후의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있으나, 층의 개수가 3개에서 5개로 증가하는 경우에는 낮아지는 온도가 미비한 정도로 파악되었음. 이러한 결과를 기반으로 기존에 사용되는 열 차단재인 스티로폼을 한 개 층이 아닌 다층으로 삽입하는 경우 열 차단 효율이 더 향상될 것으로 예상됨.

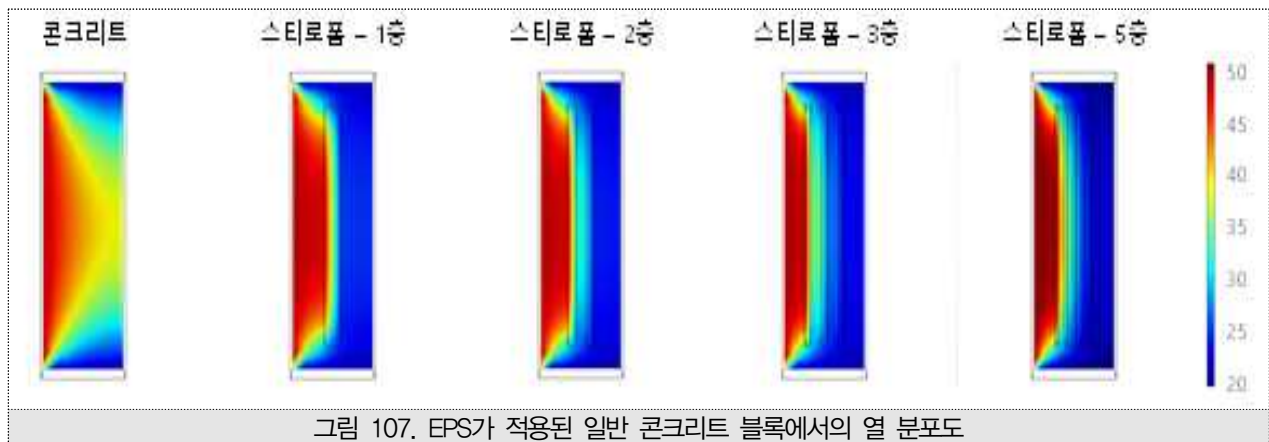


그림 107. EPS가 적용된 일반 콘크리트 블록에서의 열 분포도

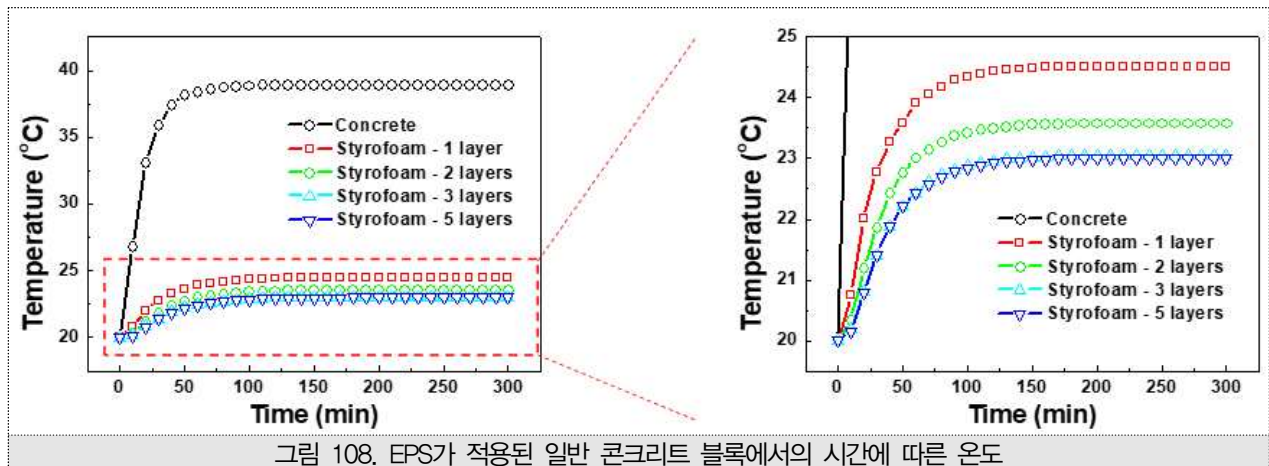


그림 108. EPS가 적용된 일반 콘크리트 블록에서의 시간에 따른 온도

표 40. 스티로폼이 적용된 일반 콘크리트에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	스티로폼 1층	스티로폼 2층	스티로폼 3층	스티로폼 5층
최종온도 (°C)	38.89	24.50	23.60	23.04	23.00

□ 에어로겔이 적용된 콘크리트 블록

- 〈그림 109〉은 콘크리트 블록에 에어로겔을 층의 개수에 변화를 주면서 적용한 시뮬레이션 모델로써 에어로겔이 삽입되면서 열 전달 효율이 크게 떨어지는 것을 확인 할 수 있음.
- 에어로겔의 총 두께는 모두 동일하지만 에어로겔 층의 개수가 많아질수록 반대쪽 면이 진한 파랑색으로 변화되는 결과를 얻을 수 있었고, 이러한 결과는 층의 개수가 많아지면서 열전달 효율이 급격히 낮아지는 것을 나타내는 결과임.
- 에어로겔 소재가 삽입된 콘크리트 블록에서의 열전달에 따른 시간에 따른 온도변화 그래프를 살펴보면(〈그림 110〉), 300분 후의 반대쪽 면에서의 온도는 에어로겔 소재가 1층인 경우 24.15도, 2층인 경우 23.23도, 3층인 경우 22.70도이며, 5층인 경우에는 22.65도로 나타나며, 에어로겔 소재 층의 개수가 증가함에 따른 포화온도에 대한 〈표 41〉과 같음.
- 에어로겔 층의 개수가 증가함에 따라서 300분 후의 최종온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있고, 층의 개수가 3개에서 5개로 증가하는 경우 0.05도 정도 낮아지는 것으로 나타남.

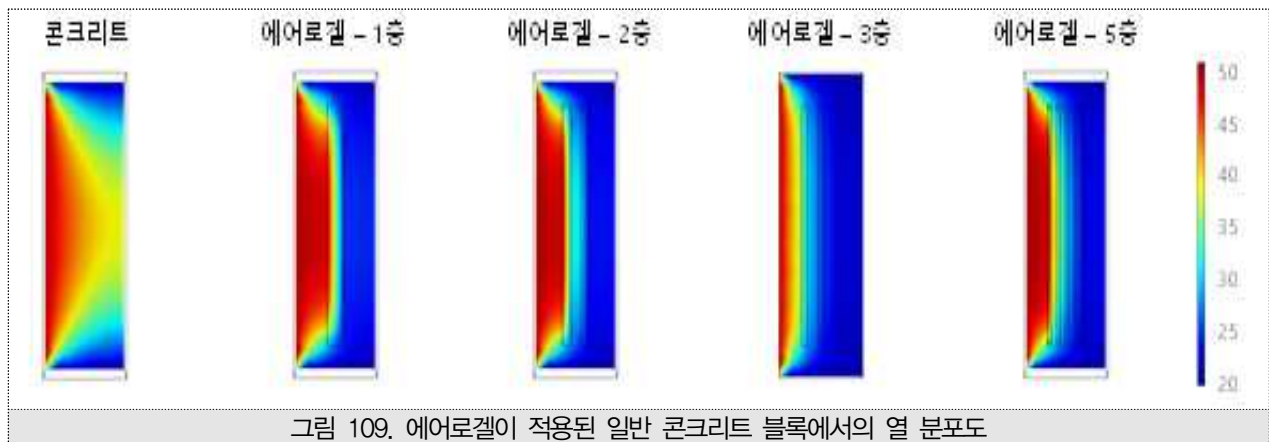


그림 109. 에어로겔이 적용된 일반 콘크리트 블록에서의 열 분포도

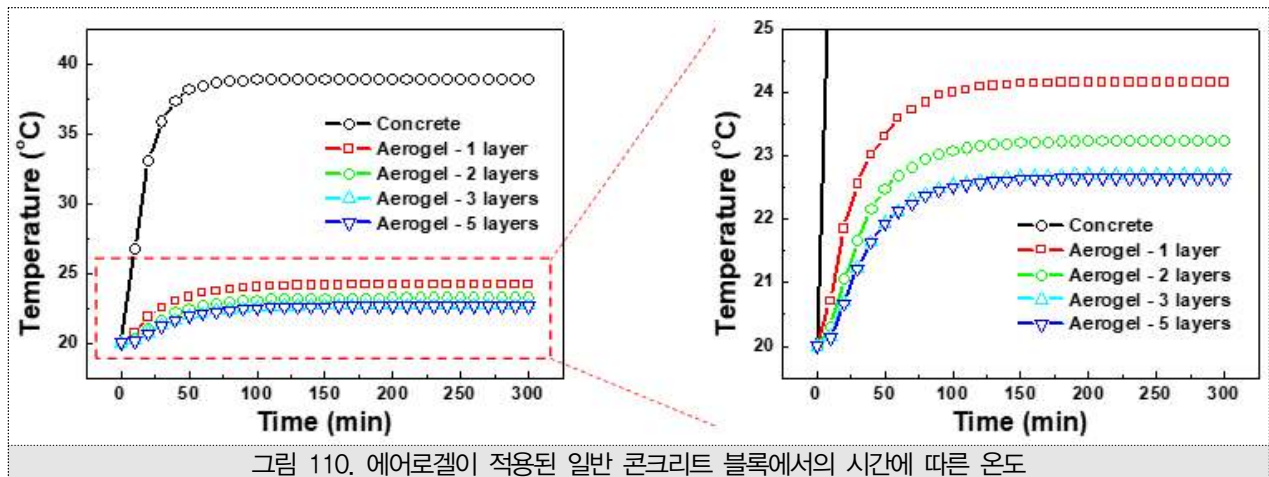


그림 110. 에어로겔이 적용된 일반 콘크리트 블록에서의 시간에 따른 온도

표 41. 에어로겔이 적용된 일반 콘크리트에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	에어로겔 1층	에어로겔 2층	에어로겔 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	24.15	23.23	22.70	22.65

□ 스티로폼(EPS)이 적용된 습식형 기포 콘크리트-1 블록(OPC100% Unit binder 250 kg/m³)

- 〈그림 111〉을 통하여 습식형 기포 콘크리트-1 블록의 경우 자체적으로도 열 차단 효율이 매우 좋은 것을 확인 할 수 있으며, 스티로폼 소재가 삽입된 경우에도 열 차단 효율이 좋은 것을 확인 할 수 있고, 모든 경우에서 블록의 중간 부분에서 대부분의 열 차단이 발생하는 것을 확인할 수 있음.
- 〈그림 112〉은 시간에 따른 기포 콘크리트-1 블록 및 스티로폼 소재가 삽입된 기포 콘크리트-1 블록에서의 시간에 따른 온도 변화 그래프임.
- 모든 경우에서 온도가 포화되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 300 분 후의 최종온도는 기포 콘크리트-1 블록은 23.54도, 스티로폼 소재가 1층인 경우에는 23.18도, 2층인 경우 22.85도, 3층인 경우 22.64도, 5층인 경우에는 22.67도로 나타난다. 스티로폼 층이 추가가 되면서 최종온도가 대략 23.54도에서 22.64도 까지 내려가지만 그 정도가 미비하고(표 42)), 시간에 따른 온도 그래프에서 포화가 되지 않는 점들을 고려하였을 때, 습식형 기포 콘크리트-1 소재의 비열 값이 매우 크기 때문으로 판단됨.
- 특히 층의 개수가 3개에서 5개로 증가하는 경우에는 오히려 온도가 0.03도 높아지는 특성이 나타남.

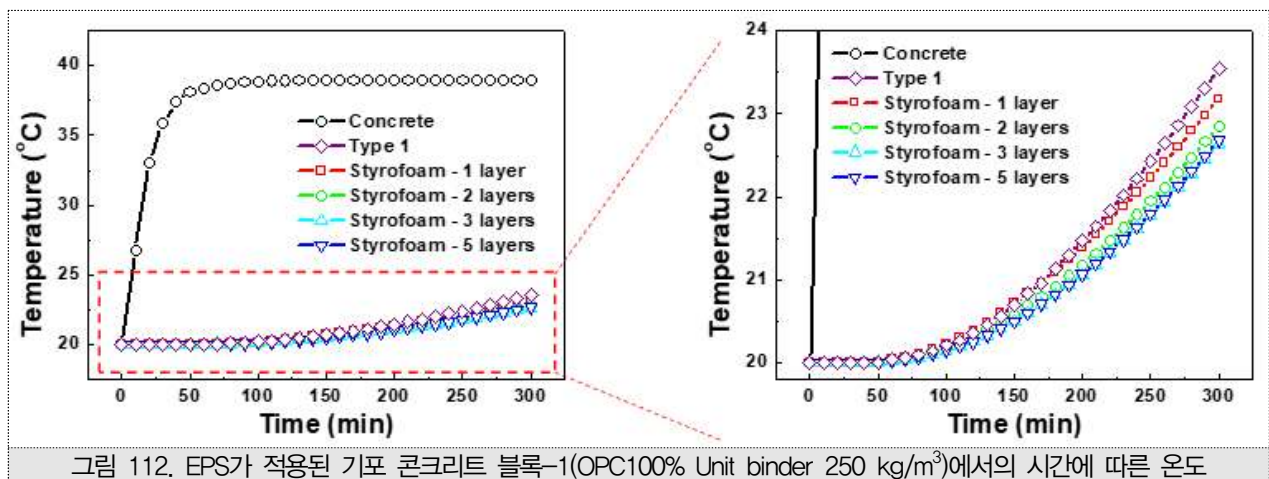
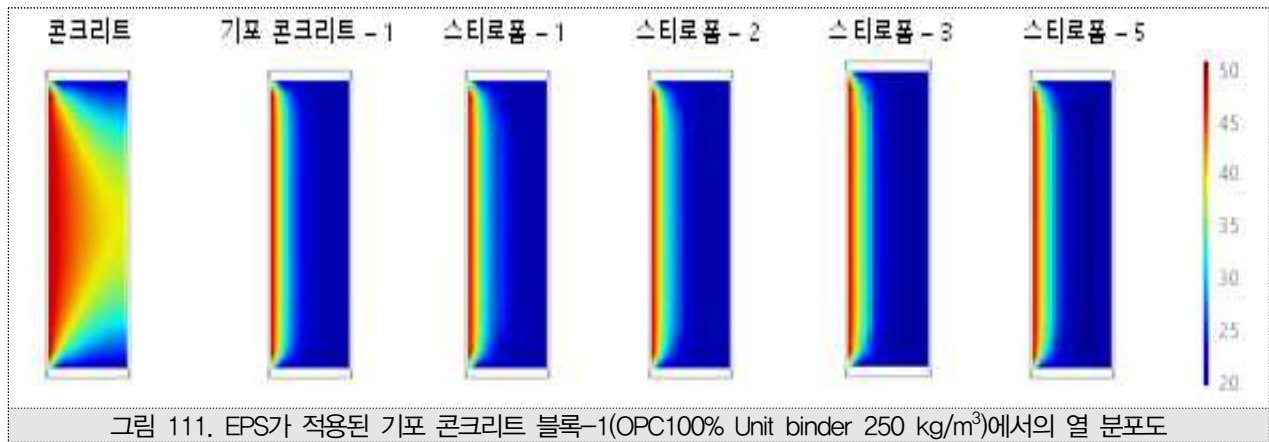


표 42. EPS가 적용된 기포 콘크리트 블록-1(OPC100% Unit binder 250 kg/m³)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	기포 콘크리트-1	스티로폼 1층	스티로폼 2층	스티로폼 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	23.54	23.18	22.85	22.64	22.67

□ 에어로겔이 적용된 습식형 기포 콘크리트-1 블록(OPC100% Unit binder 250 kg/m³)

- 앞서 언급하였듯이 습식형 기포 콘크리트-1 블록의 경우 기본적으로 열 차단 효율이 좋은 것으로 나타나며, 에어로겔 층이 삽입된 경우도 열 차단 효율이 좋게 유지 되는 것을 확인 할 수 있음.
- 에어로겔 층의 개수와 상관없이 기포 콘크리트-1 블록의 중간 부분에서 대부분의 열이 차단되는 것을 확인 할 수 있음(그림 113).
- 기포 콘크리트-1 블록 및 에어로겔 소재가 삽입된 기포 콘크리트-1 블록에서의 시간에 따른 온도 변화 그래프를 살펴보면(그림 114), 300분 후의 반대쪽 면에서의 최종온도는 기포 콘크리트-1 블록은 23.54도, 에어로겔 소재가 1층인 경우에는 22.91도, 2층인 경우 22.53도, 3층인 경우 22.30도이며, 5층인 경우에는 22.34 도로 나타나며, 에어로겔 소재 층의 개수가 증가함에 따른 300분 후의 최종온도에 대한 <표 43>과 같음.
- 에어로겔 층의 개수가 증가함에 따라서 300 분 후의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있으나, 층의 개수가 3개에서 5개로 증가하는 경우 오히려 0.04 도 높아지는 것으로 나타남.

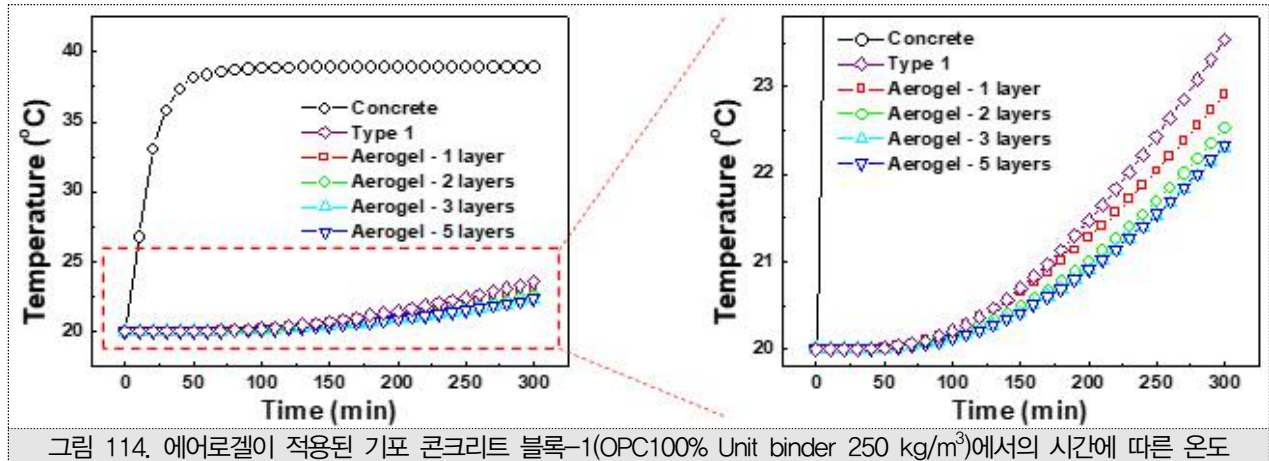
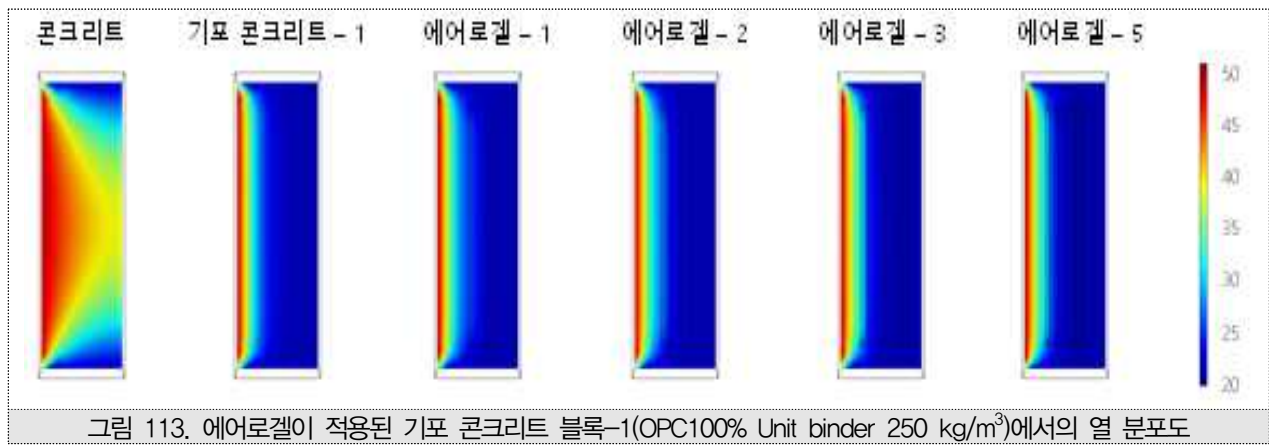


표 43. 에어로겔이 적용된 기포 콘크리트 블록-1(OPC100% Unit binder 250 kg/m³)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	기포 콘크리트-1	에어로겔 1층	에어로겔 2층	에어로겔 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	23.54	22.91	22.53	22.30	22.34

- EPS(스티로폼)이 적용된 습식형 기포 콘크리트-2 블록(OPC60%+GGBS40% Unit binder 250 kg/m³)
 - 〈그림 115〉을 통하여 기포 콘크리트-2 블록의 경우도 블록 자체적인 열 차단 효율이 매우 좋은 것으로 나타나며, 스티로폼 소재가 삽입되어도 열 차단 효율이 유지되는 것을 확인 할 수 있음.
 - 〈그림 116〉은 스티로폼이 적용된 기포 콘크리트-2 블록에서의 시간에 따른 온도변화에 대한 그래프로써 스티로폼 소재가 삽입된 기포 콘크리트-2 블록에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면, 300 분의 반대쪽 면에서의 온도는 기포 콘크리트-2 블록은 22.43 도, 스티로폼 소재가 1층 삽입된 경우에는 22.44 도, 2층인 경우 22.16 도, 3층인 경우 22.01도, 5층인 경우에는 22.03 도로 나타남.
 - 모든 경우에서 온도가 포화되지 않는 것으로 나타나는데, 기포 콘크리트-2 블록의 비열 값이 크기 때문에 예상된다.스티로폼 층이 추가가 되면서 최종온도가 대략 22.43 도에서 22.01도 까지 내려가는 것을 확인할 수 있으나, 기포 콘크리트-2 자체적으로 열 차단 효율이 매우 좋은 것으로 나타남(표 44).

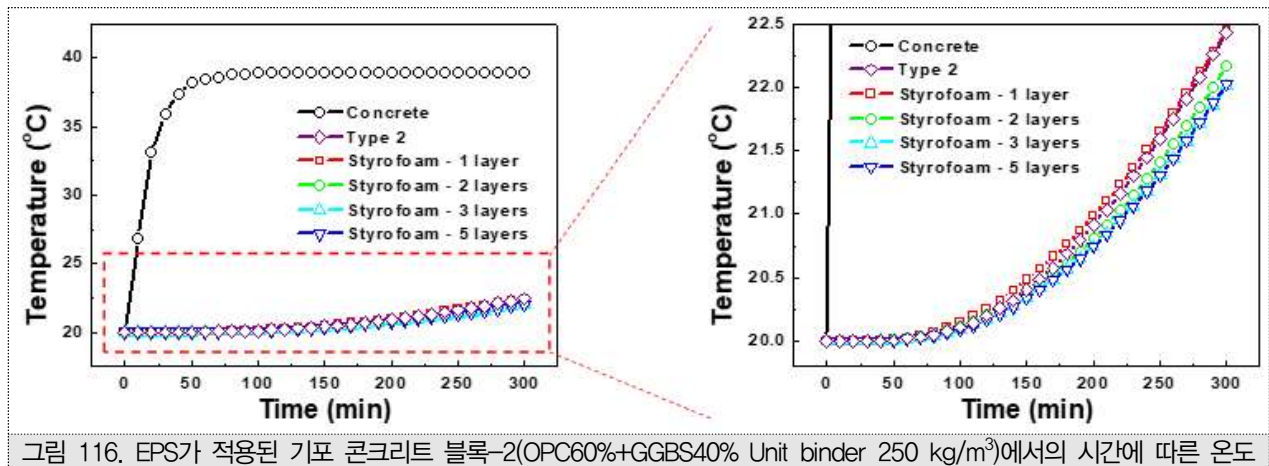
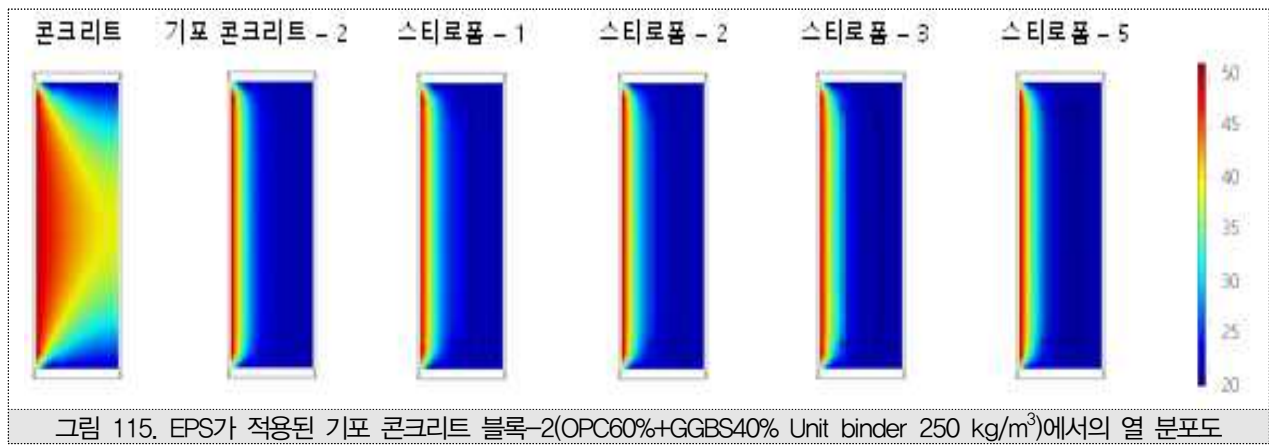


표 44. EPS가 적용된 기포 콘크리트 블록-2(OPC60%+GGBS40% Unit binder 250 kg/m³)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	기포 콘크리트-2	스티로폼 1층	스티로폼 2층	스티로폼 3층	스티로폼 5층
최종온도 (°C)	38.89	22.43	22.44	22.16	22.01	22.03

□ 에어로겔이 적용된 습식형 기포 콘크리트-2 블록(OPC60%+GGBS40% Unit binder 250 kg/m³)

- 앞서 언급한 바와 같이 기포 콘크리트-2 블록의 경우 자체적으로 열 차단 효율이 좋은 것으로 나타나며, 에어로겔 층이 삽입된 경우에는 열 차단 효율이 유지되는 것을 확인 할 수 있으며, 에어로겔 층의 개수와 상관없이 기포 콘크리트-2 블록의 중간 부분 이전에서 대부분의 열이 차단되는 것을 확인 할 수 있음(그림 117)).
- <그림 118>을 통하여 기포 콘크리트-2 블록과 에어로겔 소재가 삽입된 기포 콘크리트-2 블록들에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면, 300 분 후의 반대쪽 면에서의 온도는 기포 콘크리트-2 블록은 22.43 도, 에어로겔 소재가 1층인 경우에는 22.23 도, 2층인 경우 21.92 도, 3층인 경우 21.75 도이며, 5층인 경우에는 21.76 도로 나타나며, 이 값은 기포 콘크리트-1 에 비하여 열 차단 효율이 0.6~1.1 도 낮은 결과임.
- 에어로겔 층의 개수가 증가함에 따라서 300 분 후의 온도가 낮아지는 것을 확인할 수 있으나, 기포 콘크리트-2 대비 0.7 도 정도 낮은 값으로 그 정도가 미비하다고 판단되며, 층의 개수가 3개에서 5개로 증가하는 경우 오히려 0.01 도 높아지는 것으로 나타남(표 45)).

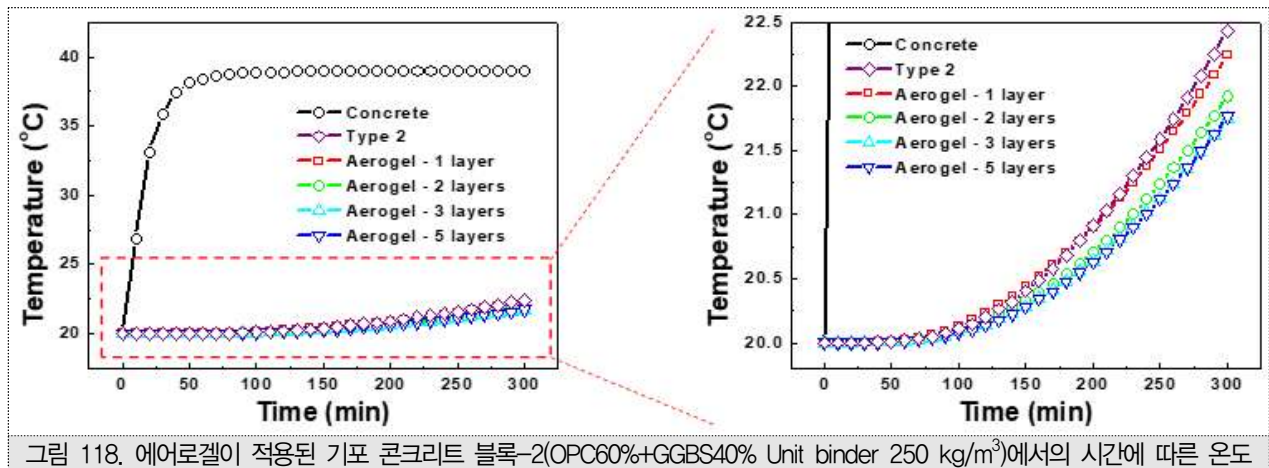
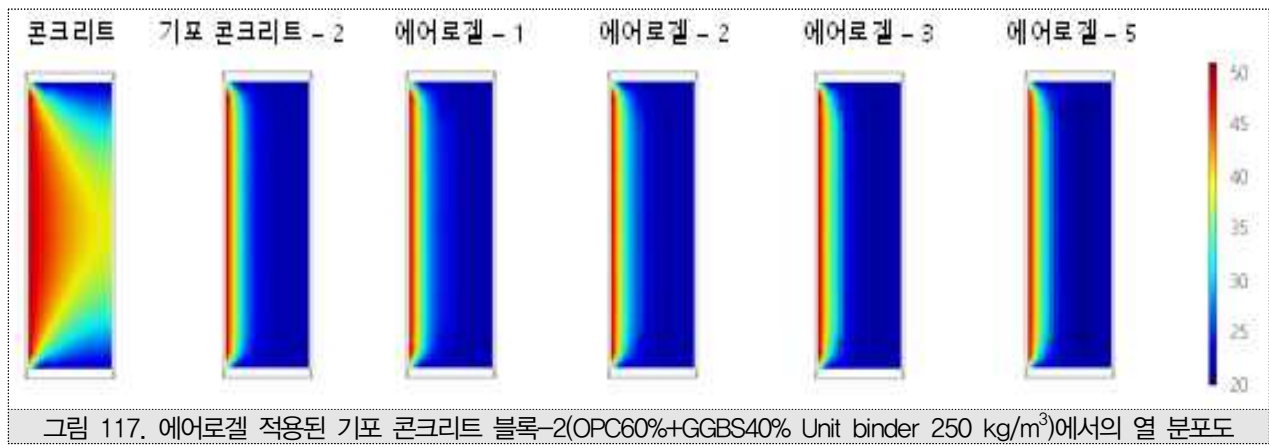


표 45. 에어로겔이 적용된 기포 콘크리트 블록-2(OPC60%+GGBS40% Unit binder 250 kg/m³)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	기포 콘크리트-2	에어로겔 1층	에어로겔 2층	에어로겔 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	22.43	22.23	21.92	21.75	21.76

□ EPS(스티로폼)가 적용된 습식형 기포 콘크리트-3 블록(OPC90%+MK10% Unit binder 280 kg/m³)

- 기포 콘크리트-3 블록의 경우 비열 값이 32,000으로 습식형 기포 콘크리트 중에서 가장 큰 값을 가지고 있으므로 자체적으로 열전달 효율이 매우 낮은 것으로 판단되고, 이러한 특성으로 인하여 열 차단 효율이 좋게 나타남(그림 119)).
- 스티로폼 소재가 삽입되었어도 열 차단 효율이 유사하게 나타나는데, 보다 명확한 분석을 위하여 <그림 120>에서 시간에 따른 온도의 변화를 살펴보았음.
- 기포 콘크리트-3 블록 및 스티로폼 소재가 삽입된 기포 콘크리트-3 블록에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면, 300 분의 반대쪽 면에서의 온도는 기포 콘크리트-3 블록은 20.08도, 스티로폼 소재가 1층 삽입된 경우에는 20.19도, 2층인 경우 20.15도, 3층인 경우 20.13도, 5층인 경우에는 20.14도로 나타남.
- 습식형 기포 콘크리트-3 소재가 스티로폼 소재보다 열 차단 효율이 좋은 것으로 판단되며, 비열 값이 매우 크고, 300분이 지나도 온도가 포화되지 않는 점을 고려할 때, 12시간 이상 지났을 때의 온도변화를 추가적으로 확인 할 필요가 있다고 판단되는 상황임(표 46)).

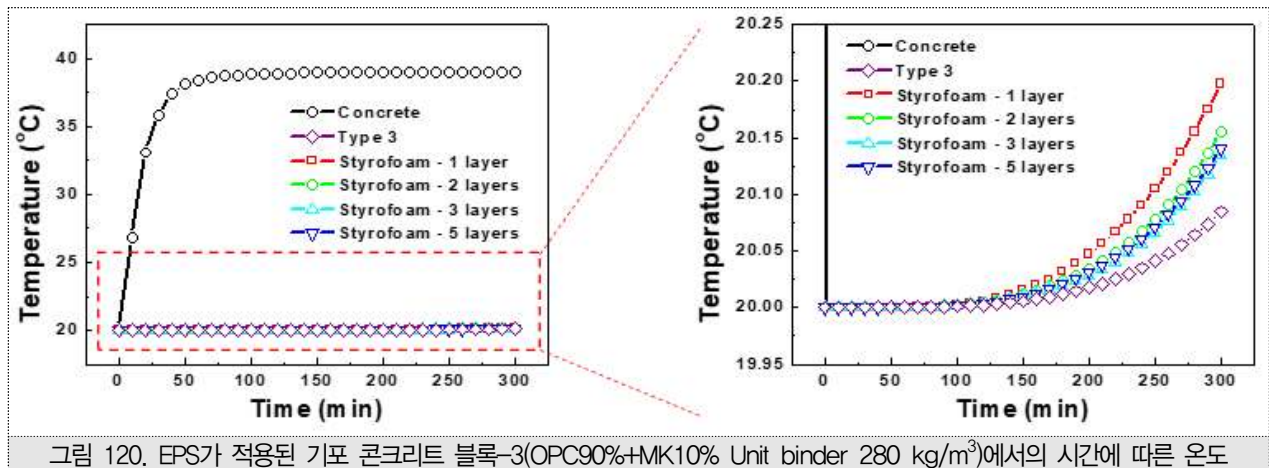
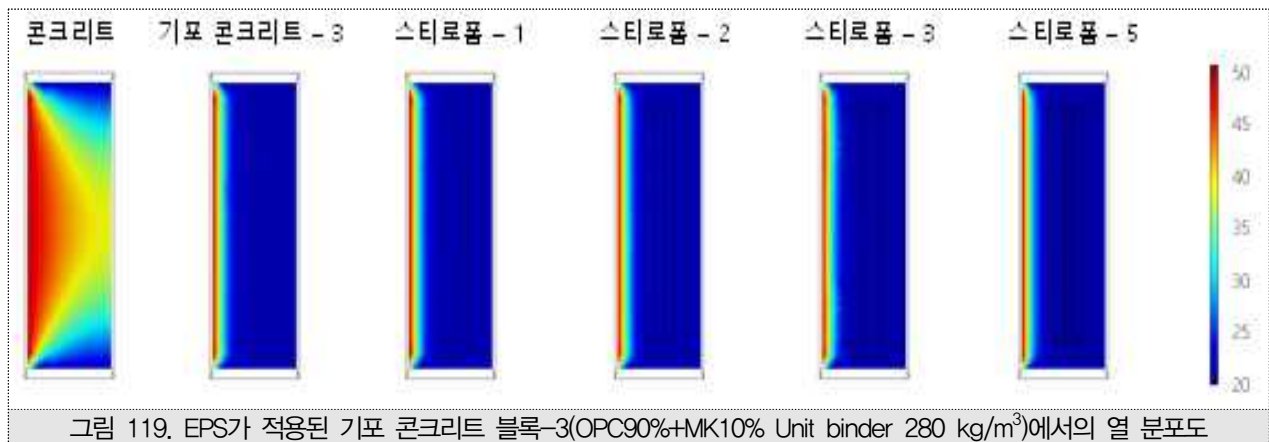


표 46. EPS가 적용된 기포 콘크리트 블록-3(OPC90%+MK10% Unit binder 280 kg/m³)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	기포 콘크리트-3	스티로폼 1층	스티로폼 2층	스티로폼 3층	스티로폼 5층
최종온도 (°C)	38.89	20.08	20.19	20.15	20.13	20.14

□ 에어로겔 적용된 습식형 기포 콘크리트-3 블록(OPC90%+MK10% Unit binder 280 kg/m³)

- 앞에서 거론한 바와 같이 기포 콘크리트-3 블록의 경우 자체적인 열전달을 억제하는 능력이 가장 좋은 것으로 나타나므로 에어로겔이 삽입된 경우에도 열 차단 효율이 크게 개선되지 않는 것으로 나타나며, 에어로겔 층의 개수와 상관없이 대부분 기포 콘크리트-3 블록의 앞부분에서 대부분의 열이 차단되는 것을 확인 할 수 있음(그림 121)).
- 기포 콘크리트-3 블록과 에어로겔 소재가 삽입된 기포 콘크리트-3 블록들에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면 (그림 122), 300 분 후의 반대쪽 면에서의 최종온도는 기포 콘크리트-3 블록은 20.08도, 에어로겔 소재가 1층인 경우에는 20.18도, 2층인 경우 20.13도, 3층인 경우 20.11도이며, 5층인 경우에는 20.11도로 나타나며, 에어로겔 소재 층의 개수가 증가함에 따른 300 분 후의 최종온도에 대한 결과는 <표 47>과 같음.
- 기포 콘크리트-3 자체적으로 열 차단 효율이 가장 뛰어난 것으로 판단되며, 오히려 에어로겔을 삽입한 경우들이 최종온도가 0.03 도 이상 더 높은 상황으로 나타남.

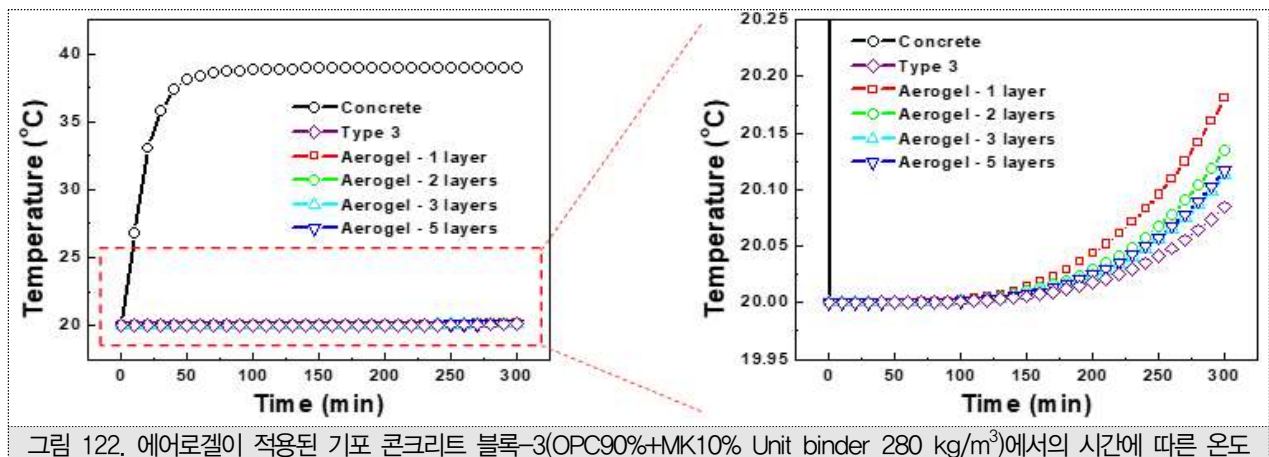
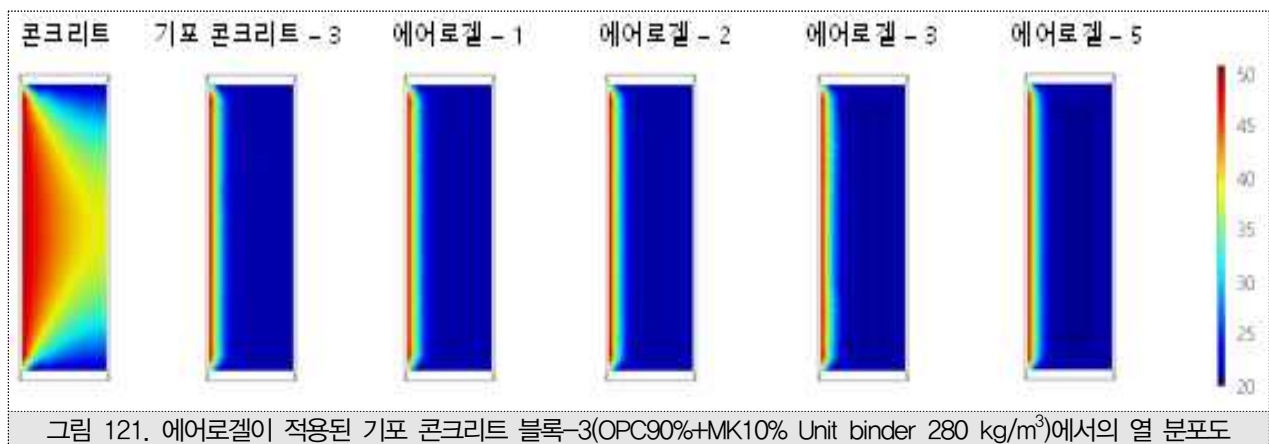


표 47. 에어로겔이 적용된 기포 콘크리트 블록-3(OPC90%+MK10% Unit binder 280 kg/m³)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	기포 콘크리트-3	에어로겔 1층	에어로겔 2층	에어로겔 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	20.08	20.18	20.13	20.11	20.11

□ EPS(스티로폼)가 적용된 ALC-1($C/S=0.7$)

- 〈그림 123〉은 ALC-1 소재에 스티로폼을 적용한 경우에서의 2차원 열 분포도이다. ALC-1 블록의 경우 콘크리트에 비하여 다소 낮은 밀도, 낮은 열전도율 및 큰 비열 값을 가지고 있으므로 자체적으로 열을 차단하는 효과가 있는 것으로 나타나며, 스티로폼 소재를 ALC-1 블록에 삽입한 경우에는 열 차단 효과가 보다 상승되는 것을 확인할 수 있음.
- ALC-1 블록 및 스티로폼 소재가 삽입된 ALC-1 블록에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면 (〈그림 124〉), 모든 경우에서 온도가 포화되지 않는 것으로 나타나며, 300 분의 반대쪽 면에서의 온도는 ALC-1 블록은 29.00 도, 스티로폼 소재가 1층 삽입된 경우에는 24.56 도, 2층인 경우 23.92 도, 3층인 경우 23.48 도, 5층인 경우에는 23.56 도로 나타나며, 〈표 48〉을 통해서 확인할 수 있음.
- ALC-1 소재가 비열 값이 다소 크기 때문에 열 전달이 늦은 소재로 판단되는데, 시뮬레이션 상의 시간을 길게 해보면, 최종온도가 포화되는 구간이 나타날 것으로 판단되며, 포화되는 구간까지 온도가 꾸준히 상승할 것으로 예상되며, ALC-1 블록에 스티로폼 소재를 삽입한 모든 경우에서 300분 후의 온도가 ALC-1 블록에 비하여 5 도 가량 낮게 나타나는 것을 확인하였음.

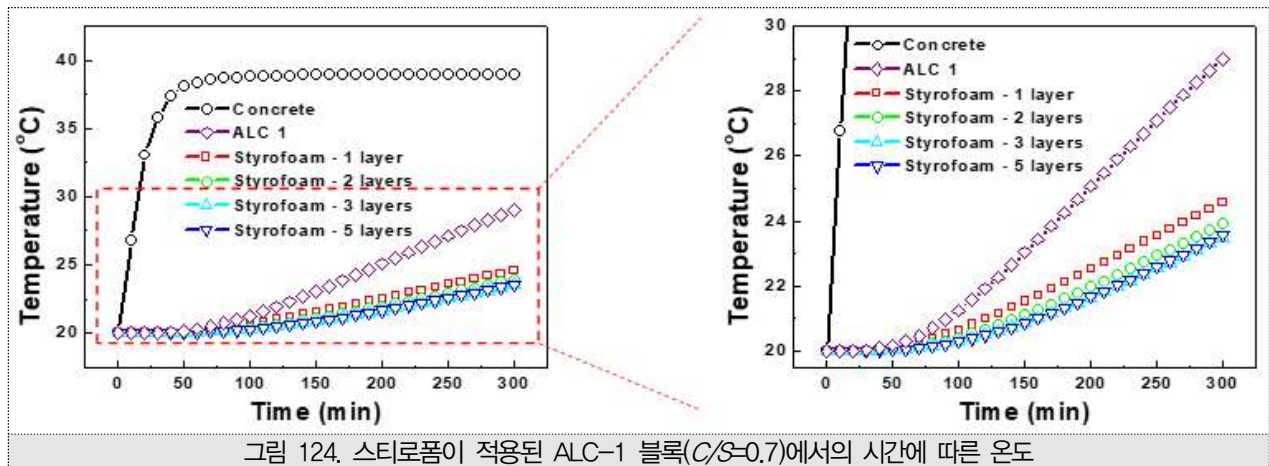
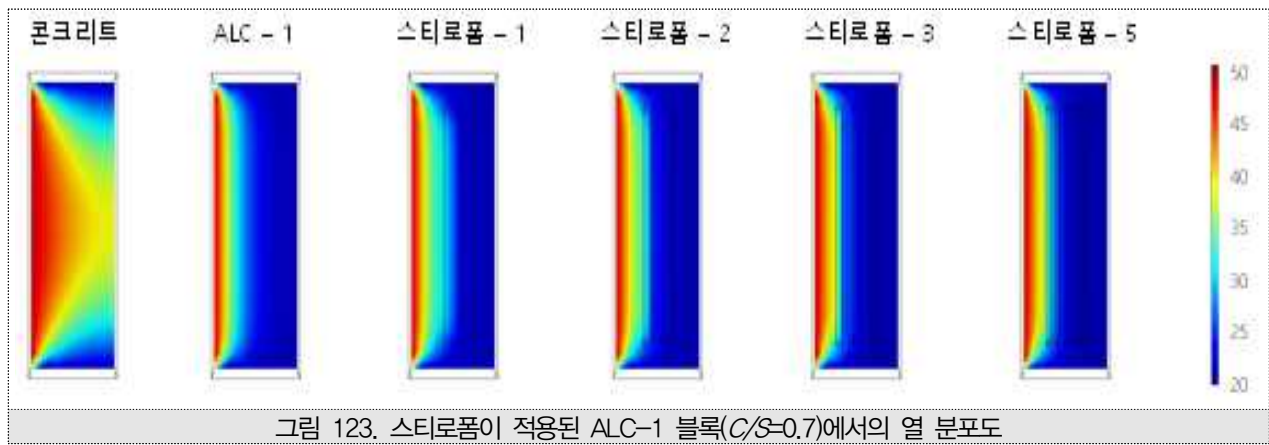


표 48. 스티로폼이 적용된 ALC-1 블록($C/S=0.7$)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	ALC-1	스티로폼 1층	스티로폼 2층	스티로폼 3층	스티로폼 5층
최종온도 (°C)	38.89	29.00	24.56	23.92	23.48	23.56

□ 에어로겔이 적용된 ALC-1($C/S=0.7$)

- 그림24는 에어로겔을 삽입시킨 ALC-1 블록의 열 분포도에 대한 것으로써 ALC-1 블록의 경우 콘크리트에 비하여 열 차단 효율이 다소 좋은 것으로 나타나며(그림 125)), 에어로겔을 삽입한 경우 열 차단 효율이 다소 향상되는 것으로 나타나고, 대부분의 경우에서 ALC-1 블록의 중간 부근에서 열이 차단되는 것을 확인 할 수 있음(그림 126)).
- 에어로겔을 삽입한 경우에는 최대 6도 가량 낮은 온도로 나타나며, 모든 결과에서 최종온도가 포화되지 않는 것으로 나타나는데, 이는 ALC-1 소재가 다소 큰 비열 값을 가지고 있기 때문으로 판단되며, 시뮬레이션 시간을 길게 하면 포화상태 될 때까지 온도가 꾸준히 상승할 것으로 예상됨(표 49)).

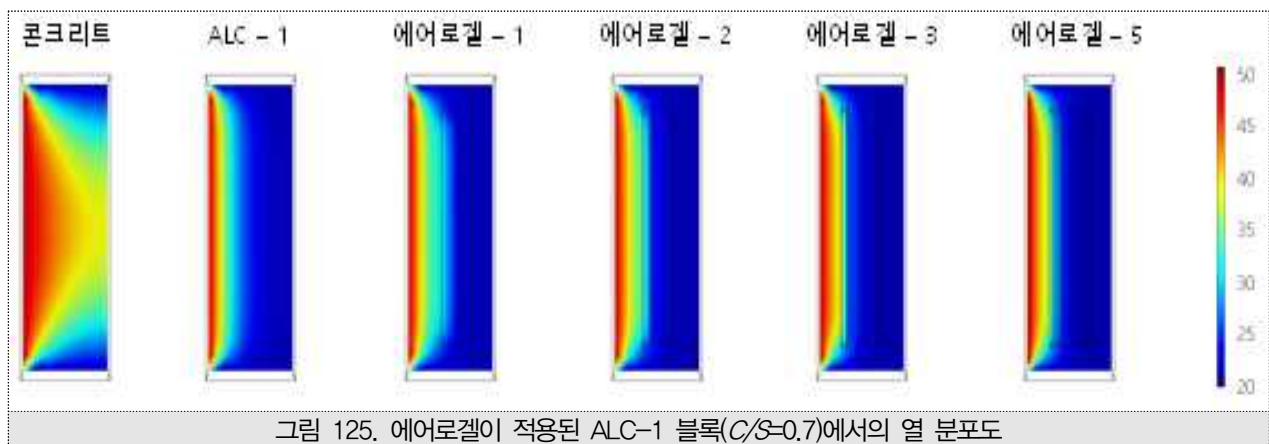


그림 125. 에어로겔이 적용된 ALC-1 블록($C/S=0.7$)에서의 열 분포도

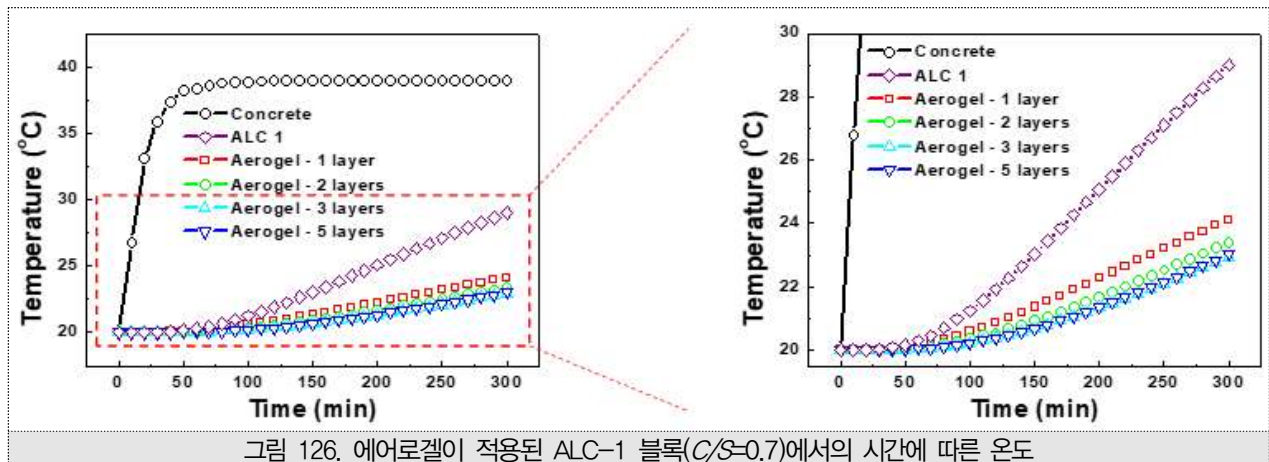


그림 126. 에어로겔이 적용된 ALC-1 블록($C/S=0.7$)에서의 시간에 따른 온도

표 49. 에어로겔이 적용된 ALC-1 블록($C/S=0.7$)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	ALC-1	에어로겔 1층	에어로겔 2층	에어로겔 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	29.00	24.11	23.41	22.92	23.01

□ 스티로폼이 적용된 ALC-2($C/S=0.9$)

- 〈그림 127〉는 스티로폼이 적용된 ALC-2 블록에 대한 2차원 열 분포도임.
- ALC-2 블록은 콘크리트에 비하여 다소 큰 비열 값을 가지고 있으므로 자체적으로 열을 차단하는 효과가 있는 것으로 나타나며, 스티로폼 소재를 ALC-2 블록에 삽입한 경우에는 열 차단 효과가 보다 상승되는 것을 확인할 수 있음.
- ALC-2 블록 및 스티로폼 소재가 삽입된 ALC-2 블록에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면, 모든 경우에서 온도가 포화되지 않는 것으로 나타나며, 300 분의 반대쪽 면에서의 온도는 ALC-2 블록은 29.40 도, 스티로폼 소재가 1층 삽입된 경우에는 24.84 도, 2층인 경우 24.22 도, 3층인 경우 23.79 도, 5층인 경우에는 23.87 도로 나타남(〈그림 128〉).
- ALC-2 소재도 ALC-1 소재와 같이 비열 값이 다소 큰 편이기 때문에 열 전달이 느린 것으로 판단되는데, 시뮬레이션 상의 시간을 길게 해보면, 온도가 포화되는 구간까지 꾸준히 상승할 것으로 예상되며, ALC-2 블록에 스티로폼 소재를 삽입한 모든 경우에서 300분 후의 온도가 ALC-2 블록에 비하여 4 도 가량 낮게 나타나는 것을 확인하였음(표 50)).

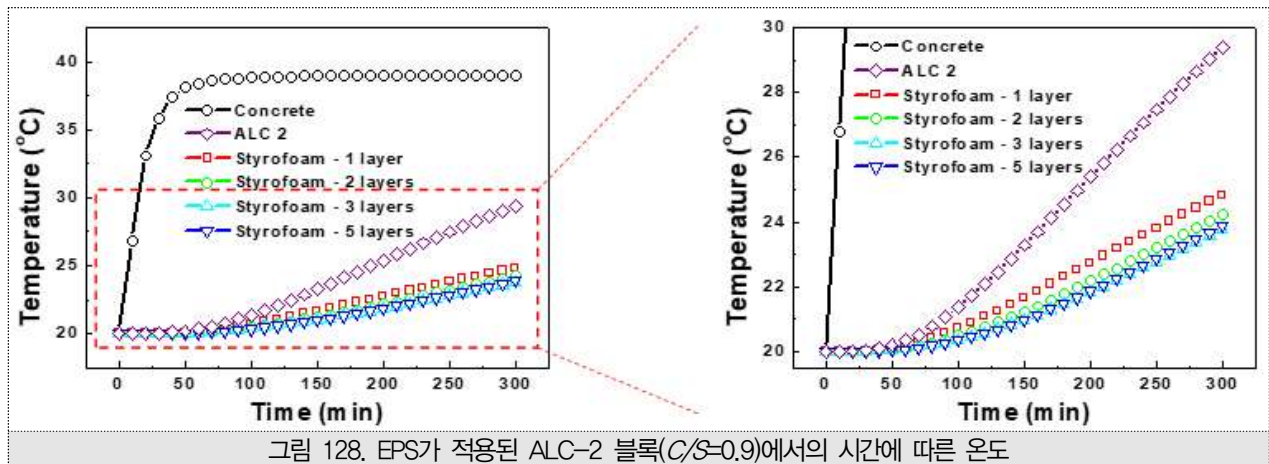
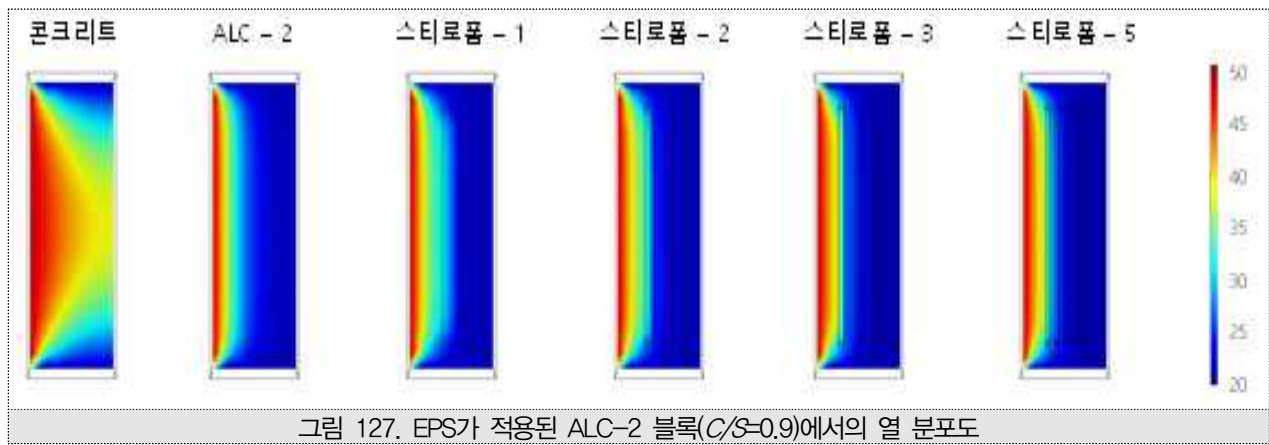


표 50. EPS가 적용된 ALC-2 블록($C/S=0.9$)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	ALC-2	스티로폼 1층	스티로폼 2층	스티로폼 3층	스티로폼 5층
최종온도 (°C)	38.89	29.40	24.84	24.22	23.79	23.87

□ 에어로겔이 적용된 ALC-2($C/S=0.9$)

- 〈그림 129〉을 살펴보면, ALC-2 블록의 경우 자체적으로 열 전달을 억제하는 능력이 좋은 것으로 나타나고, 에어로겔이 삽입된 경우에는 열 차단 효율이 다소 향상되는 것으로 확인하였음.
- 대부분의 경우에서 ALC-2 블록의 중간부분에서 열이 차단되는 것을 확인 할 수 있다.
- ALC-2 블록과 에어로겔 소재가 삽입된 ALC-2 블록들에서의 시간에 따른 온도 변화를 살펴보면, 300 분 후의 반대쪽 면에서의 온도는 ALC-2 블록은 29.40 도, 에어로겔 소재가 1층인 경우에는 24.37 도, 2층인 경우 23.69 도, 3층인 경우 23.22 도이며, 5층인 경우에는 23.29 도로 나타남 (〈그림 130〉).
- ALC-2 블록에 에어로겔을 삽입한 경우 대략 5도 이상의 온도가 낮아지는 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있으나, 모든 경우에서 최종온도가 포화되지 않는 것으로 보아 시간을 길게 설정한 뒤 시뮬레이션을 추가로 진행할 필요가 있다고 판단됨(〈표 51〉).

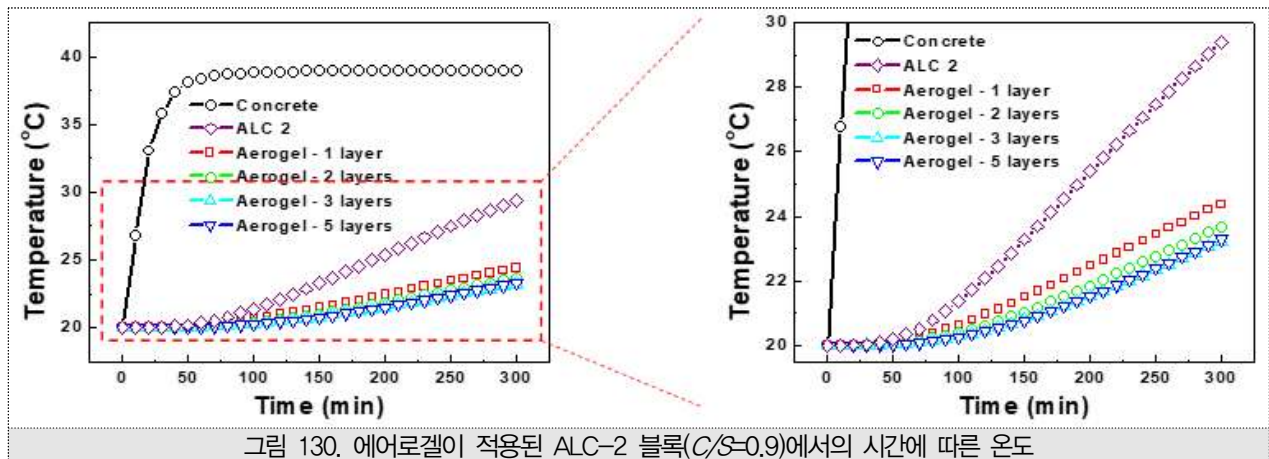
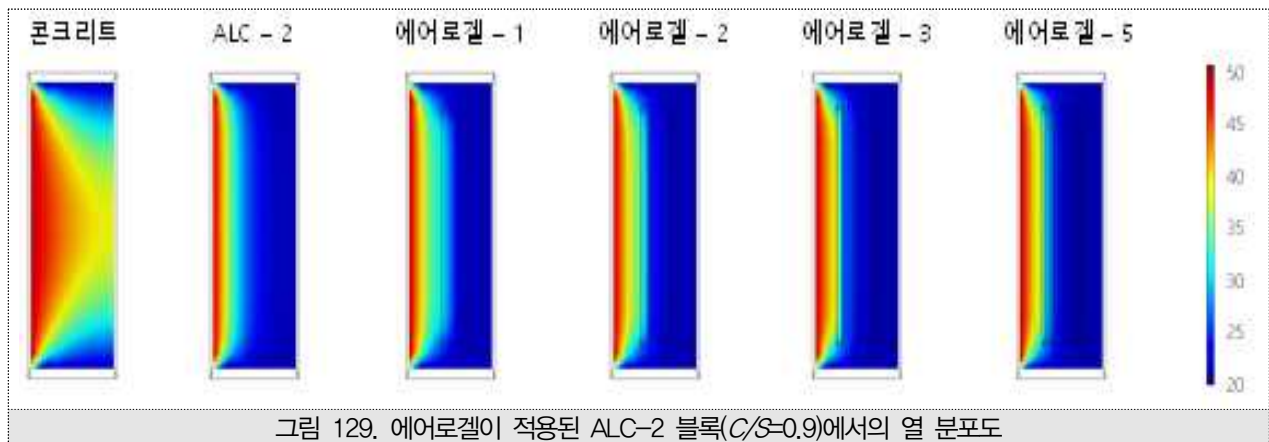


표 49. 에어로겔이 적용된 ALC-2 블록($C/S=0.9$)에서 300분 후의 온도변화

	콘크리트	ALC-2	에어로겔 1층	에어로겔 2층	에어로겔 3층	에어로겔 5층
최종온도 (°C)	38.89	29.40	24.37	23.69	23.22	23.29

(4) 결론

- 콘크리트 블록의 경우, 열 차폐 소재인 스티로폼과 에어로겔을 삽입하는 경우 열 차단 효율이 매우 크게 향상되는 것을 확인할 수 있음.
- 습식형 기포 콘크리트들의 경우에는 콘크리트에 비하여 매우 낮은 밀도, 매우 낮은 열전도율 및 매우 높은 비열 값을 가지고 있으므로 습식형 기포 콘크리트 자체적으로 매우 좋은 열 차단 효율을 가지고 있는 것으로 나타남.
- 오히려 열 차폐 소재인 스티로폼과 에어로겔을 삽입하면서 열 차단효율이 안 좋아지는 상황도 발생하는 것을 확인하였음. 다만, 시뮬레이션 상에서 최종온도가 포화되지 않는 특성을 나타내고 있는데, 이는 콘크리트 대비 매우 큰 비열 값을 가지고 있기 때문으로 판단되는데, 비열 값이 클수록 열을 보유하고 있는 시간이 길어지므로 열 전달을 방해하게 되고 이러한 특성이 열을 차단하는 효과로 나타나는 것으로 유추됨. 시간을 길게 설정한 뒤 시뮬레이션을 돌려보게 된다면, 최종온도가 포화될 때까지 온도가 꾸준히 상승할 것으로 예상됨.
- ALC 블록의 경우에는 콘크리트에 비하여 다소 낮은 밀도, 다소 낮은 열전도율 및 다소 큰 비열 값을 특성을 가지고 있는데, 이러한 효과로 인하여 자체적으로도 콘크리트에 대비하여 열 차단 효율이 좋은 것으로 나타나며, 열 차폐 소재인 스티로폼 및 에어로겔을 삽입한 경우 열 차단 효율이 더 향상되는 것을 확인할 수 있었음.

1) 개발 기술의 개요

- 본 개발 기술은 고단열 및 소수성의 나노 에어로겔 소재를 기포콘크리트의 다공성 구조에 균일하게 임베디드 시킴으로써 열전달 저항성능의 향상과 함께 방수 특성을 부여하기 위한 기초 기술임.
- 입자형태의 에어로겔을 기포콘크리트에 표면 코팅하게 되면 외부충격으로 인해 코팅이 벗겨지거나 깨지면 단열 및 방수 특성을 상실하게 됨.
- 반면 에어로겔을 기포콘크리트 내부 및 외부 전체에 임베디드(embedded)시키면 다양한 환경에 의해 표면이 손상되어 기포콘크리트의 내부가 노출되더라도 단열 특성을 그대로 유지할 수 있다는 장점이 있음.
- 에어로겔 전구체 소재를 이용하여 나노 에어로겔 용액을 합성하고, 이를 기포콘크리트 소재와 혼합하여 제작된 나노 에어로겔 임베디드 기포콘크리트의 열전도율, 압축강도, 절건밀도 및 공극형상을 평가하고, 적외선 분광분석을 통한 나노 에어로겔의 임베디드 여부와 흡수율 및 수분접촉각 평가를 통해 방수 성능을 확인함.

(1) 기존 단열재 특성 및 문제점

- EPS : 발포 폴리스티렌으로 연화점이 낮고 연소 시 유해가스 발생으로 내화소재로 적합하지 않음. 최근 내화성능을 향상시켜, 준불연 등급까지 개발되고 있으나, 재료 특성상 그 이상의 내화성능 향상은 어려움. 또한, 발포에 사용되는 펜테인, 뷰테인 가스 등은 스모그 등을 발생시키는 주요 원인으로 사용제한이 강화되고 있는 실정임.
- 미네랄 울 : 수분조절능력이 낮아 곰팡이 발생의 주요 원인이 됨. 대부분 건축물 지하실냄새의 원인이 되고 있으며, 방습성을 갖는 자재의 추가시공이 필요함. 또한, 재료 단가가 250,000 원/m³로 고가임.
- 글라스 울 : 수분흡수율이 높아 단열성을 저하시킴. 기계적 성능이 낮아 벽면에 시공이 어려우며, 장기 사용 시 압축침하로 인한 유효두께가 감소하여 결국 단열성이 낮아짐.
- ALC 블록 : 낮은 물성에 의한 모서리 파손 및 취성구조 못의 사용이 제한됨. 고온 고압에 의한 균열 발생이 쉬우며, 연곡공극에 의한 낮은 습기저항성으로 수분의 흡수에 의한 단열성능 저하 및 곰팡이 발생, 벽지 탈리 및 결로 등의 원인이 됨.

(2) 개발 기술의 차별성 및 우수성 (〈표 50〉)

- 나노와 콘크리트 기술을 융합한 신 단열소재
 - 기존 기포콘크리트 성능의 한계를 극복하기 위해 나노캡슐 에어로겔과 기포콘크리트의 융합을 통한 무기계 고단열 소재.
 - 기존 유·무기계 단열재와는 다른 신개념의 세라믹 단열소재 융합기술.
- 내화 및 내구성 측면에서의 유지관리 지속성
 - 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트는 무기계 불연재료 내화에 우수하며, 물리적 성능이 우수하여 체적감소에 의한 성능저하 발생 가능성이 낮음.

- 독립기포로 구성되어 흡습성이 낮아 수분흡수에 의한 단열성능 저하나 동해, 결로, 곰팡이 발생 등의 문제를 발생시킬 가능성 낮음.

□ 습식 및 프리캐스트 등의 다양한 적용성 및 경제성(〈표 51 및 표 52〉)

- 기존 습식형 기포콘크리트의 제조방식과 동일한 방식으로 제조가 가능하여 현장타설을 통해 슬래브나 벽의 채움재 등으로 현장적용이 가능함. 또한, 고온 고압의 ALC 블록이나 패널 형태의 프리캐스트(2차제품) 형태로 제조가 가능하며, 제조 형상 및 크기에 별다른 제한을 받지 않음.
- 현재 ALC 블록 시장을 주도하고 있는 (주)성온과 쌍용 ALC는 같은 제품군에서 단가를 동일하게 제시하고 있음. 특히, 600×400×100 mm 제품군에 대해서는 현장 도착가 기준으로 14,500 원/m²으로 제시하고 있음(〈표 52〉).
- 개발 기술은 습식 제조방법을 기반으로 하여 제조 단순화 및 제작 소요시간 단축이 가능하며, 기존 제품대비 경제성 및 실용성 우위에 대해서는 산업체와의 지속적인 연구 및 협의를 통하여 발전시킬 필요 있음.

표 50. 종래기술 대비 개발 기술의 차별성 및 우수성

기존 단열 재료	개발 기술 개요	차별성 및 우수성
• 유기 단열재 : 단열성능은 우수하나 내화성능이 낮음. • 무기 단열재 : 내화성능 및 단열성능은 우수하나 흡수성 저하에 따른 성능의 저하. 물리적 특성이 낮아 적용처가 제한됨. 높은 재료단가로 경제성 낮음. • 기포콘크리트 : 강도 및 단열성능 향상의 한계 및 수분저항성 낮음. 	• 시멘트 기반의 무기계 세라믹 단열재료 • 단열성 확보를 위해 나노캡슐을 포함하는 나노캡슐 에어로겔 적용 • 독립기포의 형성 유도를 통해 단열성, 방수성 및 내구성 확보 • 고성능 ALC 적용을 통한 단기적 실용화 추진	① 기술의 안전성 : 시멘트 기반 무기계 재료로 내화에 대한 안전성 확보 ② 기술의 지속성 : 나노기술과 콘크리트 기술을 융합하여 서로의 단점을 보완함으로써 방수성, 내구성 및 경제성 확보 ③ 기술의 적용성 : 습식 및 고온고압형 배합방식을 통해 현장 타설 뿐만 아니라 다양한 조건의 프리캐스트 제품화 가능  • 나노 기술융합을 통해 내화성 및 내구성이 향상된 콘크리트 기반 단열소재 • 습식 및 고온고압형 제조방식을 통한 실용성 및 경제성 향상



(3) 개발 기술의 혁신성

□ 나노캡슐 에어로겔과 콘크리트와의 결합(그림 131))

- 본 개발 기술에서 제안하는 친수성-소수성 전이가 가능한 나노캡슐 에어로겔을 사용하여 기존 소수성 에어로겔 사용 시 콘크리트와의 배합에 어려운 문제점을 해결할 수 있음.
- 일반 기포콘크리트에서 발생하는 물 흡수에 따른 곰팡이 발생, 콘크리트의 강도 약화 문제점을 해결할 수 있음.

□ 고성능의 새로운 단열소재

- 기존 기포콘크리트의 경우 압축강도를 고려하였을 때 열전도율을 0.13 W/m·K 이하로 저감시키기 어려워 단열성능 향상에 대한 한계가 있음. 본 개발 기술은 이를 극복하기 위해 나노캡슐 에어로겔을 기포콘크리트에 적용하여 기존 기포콘크리트 대비 열전도율을 1/2 수준까지 저감시킬 수 있는 고기능성 단열소재 개발 기술임.
- 기존 유기계 단열재의 경우 가연재로 내화에 취약하여 화재발생 시 화재 확산의 주요 원인이 되며, 연소 시 유해가스의 방출로 많은 인명과 재산피해를 발생시키는 반면, 본 개발 기술의 경우 시멘트계 무기계 단열재료로 화재에 대한 안전성이 매우 높음.
- 발수성 부여로 수분저항성이 높아 수분흡수에 의한 단열성 및 내구성(동해 저항성) 저하를 방지할 수 있으며, 수분흡수에 의한 2차 피해(곰팡이 발생 및 벽지탈리 등)를 방지할 수 있음.

표 52. 개발 기술의 다양한 적용성

요소기술	내용
나노기공 에어로겔	· 초소수성을 갖는 나노기공 에어로겔의 표면 친수성 부여 코팅 처리 기술 · 기포콘크리트 경화 후 투입된 나노기공 에어로겔의 소수성 복원 기술 · 에어로겔의 소수성 복원에 의한 다량 공극 형성 및 단열·방수 성능 증대
나노 에어로겔 임베디드 기포콘크리트 제조기술	· 나노기공 에어로겔을 혼합 시 재료분리 방지 및 소요성능(비중 0.4 이하, 압축강도 1 MPa 이상, 흡수성 20% 이하 및 열전도율 0.07 W/m·K)을 만족하는 기포콘크리트 배합 기술 · 나노기공 에어로겔의 최적 혼입 시기 및 혼입량의 제시
나노 에어로겔 임베디드 기포콘크리트 기술의 확장	· 우수한 내화 성능을 갖는 GFRP 보강근, 섬유 및 아연도금 강판을 이용한 보강 활용 가능 (휨 균열제어, 내구성 향상 및 시공성과 경제성 증대) · 제작 소요 기간 및 단계의 최소화 (불필요한 인건비 및 부대비용 지출 감소)

표 53. ALC 블록의 가격조사

구분	용도	규격	가격
(주)성은, 쌍용ALC (현장 도착도 기준)	일반블록	600×400×100 mm	14,500 원/m ²
	벽체용 패널	600×4000×100 mm	32,000 원/m ²
나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트 (개발 기술)	일반블록, 벽체용 패널 등 다양한 용도로 활용가능	현장 조건에 따라 타설 또는 프리캐스트 제품화 가능	15,500 원/m ² (소규모 제조단가 기준)

□ 기술의 적용성 확대

- 기존 무기계 단열재(미네랄 울 및 글라스 울) 기계적 성능이 낮아 외단열 공법에는 사용이 어려운 반면, 본 개발 기술은 패널 형태로 제작이 가능하여 건축물의 외벽에 시공이 가능함.
- 또한, 습식형 기포콘크리트와 동일한 방식으로 제조가 가능하여 현재 바닥의 단열을 위해 사용되고 있는 방통기포콘크리트 대체가 가능하며, 패널 및 블록 등의 다양한 형상으로 제조가 가능하여, 건물 내부 간막이 벽 등에 적용이 용이함.
- 특히, 고온고압의 ALC 기법으로 개발 기술을 확장하여 기존 ALC 블록의 단점을 개선한 고품질·고부가가치의 나노캡슐 에어로겔 ALC 블록의 단기적 실용화 가능. 이는 개발 기술의 습식형 제조 방식에 비해 KS F 2701를 만족시킴으로써 실용화의 기간을 단축시킬 수 있음.

□ 시공의 단순성

- 기존의 EPS, 글라스 울, 미네랄 울 등은 제조과정이 복잡하며, 다양한 형상으로 제조가 어려워 적용 환경에 따라 다른 시공법을 적용해야 함.
- 반면, 본 개발 기술의 경우 습식형 제조방식으로 기존 기포콘크리트의 제조압식과 동일한 제조방식으로 현장타설이 가능하며, ALC 블록 또는 증기양생의 프리캐스트 제품으로 확장이 되어도 기존 제조 설비 이외에 별도의 설비가 필요하지 않음.

(3) 기존(경쟁) 기술·제품과의 비교 우위성(〈표 54〉 및 〈표 55〉)

표 54. 기존 제품(EPS 단열재)와의 차별성

차별성	EPS 단열재	개발 기술
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 1/3 이상으로 단순화)

표 55. 기존 제품(EPS 단열재) 대비 경쟁력

경쟁요소	EPS 단열재	개발 기술
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/㎡	15,000 원/㎡ (소규모 제조 단가 기준) 나노기공 에어로겔 제작 : 10,000 원/㎡ 기포콘크리트 현장 타설 : 5,000 원/㎡
제작 소요시간	약 7일 소요 (EPS 발포 소요시간 포함)	약 3일 소요 (기건 양생 기간 포함)
내구성	자외선 노출 시 변색 및 열 노출에 취약함	고 내구성
기대수명	10년(습기 및 자외선에 노출 시 5년 이하로 감소)	40년
환경 성능	EPS 생산에 따른 유해 오염물질 배출 가능성 높음	산업부산물의 재활용 효과에 따른 친환경성 증대

2) 경제적 타당성 분석

(1) 분석 일반 지침

- 본 분석에서는 한국과학기술기획평가원(KISTEP)의 [국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침 (2018)]에 의거, R&D 과제의 경제적타당성 분석을 수행함.

□ 비용추정

- 비용 추정은 현재의 지식수준과 가용한 자료를 바탕으로 미래의 비용을 추정하는 작업으로, 일반적으로 과거자료의 수집 및 분석, 계량 모델/tool의 적용 및 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.
- 기초 R&D에서 상용제품개발에 이르는 전주기 R&D의 경우 Life Cycle Cost Estimate가 가장 바람직하며, 여기에는 상용제품 개발을 위한 기업의 응용연구개발 비용까지 포괄하여 산출하는 작업이 필요함.
- 그러나, 대부분의 국가 R&D 과제는 현실적인 비용추정의 어려움으로 인해 연구기관이 제시한 Budget을 기초로 한 Budget Estimate 방식을 주로 적용되고 있음.
- 연구개발부문 예비타당성조사의 비용 추정은 총비용을 기준으로 하며, 총비용은 총사업비에서 제시하지 않은 숨은 비용(hidden cost)을 추가적으로 고려한 비용임.
- 총비용은 사업기간 동안의 연구개발비용, 연구기반 구축 및 사업기반 구축비용과 함께 연구개발시설의 편익기간 동안 소요되는 운영비(경상운영비 및 인건비), 장비 재투자비 및 운영유지비, 인력양성 비용 등이 포함됨.
- 이와 같이 총비용은 해당 국가연구개발사업의 총사업비 이외에도 국가연구개발사업의 성공적인 목표 달성을 위해서 필요한 비용을 모두 포함한 개념임.

□ 편익추정

- [예비타당성조사 수행 세부지침(2018)] 에 따르면 편익은 실질적인(real) 편익과 금전적인(pecuniary) 편익 중 실질적인 편익만이 고려됨(표 56)).
- 실질적인 편익은 공공사업에 의해 발생한 진정한 편익으로, 국민생산 또는 사회후생의 증가를 통해 국민들이 실제로 받는 혜택을 의미함.
- 반면, 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.
- 통상 연구개발의 편익을 파급효과의 관점에서 시장파급, 지식파급, 네트워크 파급 등 세 가지 파급 효과로 구분함.
- 지식파급(과학기술적 편익)은 지식의 창출자와 사용자가 다른 경우로서, 발생방법은 역설계, 발간, 특허공개, 연구자 이동 등의 방식으로 발생함. 이러한 기술적 지식이나 성과와 같은 연구개발의 결

과물이 시장가치를 통하여 객관적 화폐환산이 가능할 경우 편익의 범위에 포함시킬 수는 있으나 일반적으로 적용할 수 있는 항목을 설정하기 어렵기 때문에, 연구개발사업의 성과지표로 빈번히 적용되는 논문이나 특허는 그 가치를 화폐 단위로 변환하지 않고 비용효과 분석에서 반영함.

- 시장파급은 시장 기능에 의해 여타 주체들에게 제품이나 공정상의 편익을 전달해주는 것으로서, 추가기능의 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.
- 예비타당성조사의 편익 반영에서 중요한 기준은 객관적인 계량화의 용이성이므로 시장파급은 비용 편익 분석, 지식파급은 비용효과 분석으로 경제적 타당성 평가에 반영하는 것을 원칙으로 함. 네트워크파급은 경제적 타당성 평가에 반영하지 않음.

(2) 본 분석에 적용된 분석 방법론

- 본 분석에서는 예타지침(KISTEP, 2018)에서 제시한 아래 공식을 적용, 편익을 산출하고, 각 연도별 비용 및 편익을 현재가치로 환산해 비용편익(B/C Ratio)을 계산하였음.

편익 = 미래시장규모 × 사업화기여율 × R&D 사업화성공률 × R&D 기여율 × 부가가치율

- 본 분석에서 비용, 편익 산출을 위해 사용된 주요 지표는 <표 57>과 같음.

표 56. 연구개발부문 예비타당성조사의 편익 반영/미반영 구분표

구분	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 반영	예비타당성조사 비용편익 분석 시 편익 미반영
정(+)의 가치 증가	• 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 가치 감소	• 생산비용저감 – 생산투입 자원 및 시간의 저감 – 연구기간, 출장횟수 등의 연구수행 비용저감 • 물류비용저감 • 피해비용저감 – 재난 · 재해 · 사고로 인한 피해 감소 • 질병비용저감 • 환경비용저감	

* 출처 : 예비타당성조사 수행 세부지침(2018)

표 57. 비용, 편익 산출 지표

구분	지 표	내 용
편익	편익회임기간	● 5년 적용
	편익기간	● 7년 적용
	시장규모	● 세계시장: 글로벌 시장조사기관 예측치 적용 ● 국내시장: 국내외 시장조사기관 및 산업 통계 등을 바탕으로 추정
	사업기여율	● NTIS 분석을 통한 국가연구개발비 대비 당사업 연구개발비 비중을 산정해 적용
	R&D사업화성공률	● 해당 분야의 국가R&D 평균 사업화성공률 적용
	R&D기여율	● 35.4%
	부가가치율	● 한국은행 산업연관표 적용
비용	투자계획	● 연구기관의 비용투자계획 적용
사회적할인율		● 4.5%

□ 편익회임기간

- 편익회임기간의 적용은 연구개발사업의 결과가 경제적 효과를 나타내기까지의 기간을 고려해 편익을 산출하기 위한 것으로, 연구개발을 통한 시제품 개발 후 표준화/인증, 양산준비 등 실제 제품출시까지 걸리는 시간을 의미함. 편익회임기간은 연구개발 종료 시점의 TRL단계(기초/응용/개발)에 따라 편익발생시점도 달라지므로 이에 따라 달리 산정하는 것이 타당하며, 사업별 특성에 따라 추가 연구개발이 필요한 경우 별도의 투자비용을 추가 산정하는 것이 바람직함.
- 본 개발 기술의 경우 최종목표는 건축물에서 단열을 목적으로 사용되는 유기계 단열재인 EPS를 대체하기 위하여 친·소수성 표면기능화된 나노캡슐 에어로겔을 활용한 고성능 단열 기포코크리트 소재개발로서, 본 개발 기술의 최종 기술달성 성숙도 TRL 4 단계인 점, 한국개발연구원에서는 사업 주관부처가 사업계획서에 편익 회임기간을 제시하는 경우에는 이를 준용하되, 별도의 언급이 없을 경우에 기초연구는 5년, 개발·응용 연구는 3년을 기본으로 사업특성을 고려하여 반영하고 있는 점을 감안하여, 편익회임기간을 5년으로 적용함.

□ 편익기간

- 편익기간은 해당 기술의 연구개발 결과물이 실제로 시장에서 편익발생에 기여하는 기간을 의미하는데, 예타분석에서는 해당분야 특허의 기술수명을 측정해 사용할 것이 권장되고 있음.
- 통상 해당 기술분야에 출원된 특허를 추출해 인용특허와 피인용특허 간의 인용주기를 계산해 분야별 특허수명시간을 산출하는데, 대부분의 국가 R&D 사업에는 평균 7~10년의 수명주기가 적용됨. 본 분석에서는 7년을 가정함.

□ 사업기여율

- 연구개발사업의 편익 추정을 위해서는 미래시장규모 뿐만 아니라 전체 시장규모 중에서 어느 부분까지를 해당 사업에 의한 기여분으로 고려해야 하는지가 중요한 문제임.

- 미래 시장규모나 매출액의 증가분을 기준으로 추정되는 연구개발사업의 편익은 해당 사업 외에도 타 또는 유사 연구개발 사업 및 기업, 연구기관의 연구개발 활동에 의해 창출되는 편익이 포함되어 있다고 볼 수 있으므로, 이 중 해당 연구개발 사업에 의해 창출되는 편익을 분리해 추정해야 함.
- 본 분석에서는 예타지침에 예시된 방법을 따라, 해당산업에서의 정부 및 민간 연구개발 투자규모 대비 해당 연구개발사업의 투자 비율을 토대로 사업기여율을 추정하였음.
 - NTIS 분석(〈표 58〉)을 통해 해당 세부영역에 투자된 과거 5년간의 정부의 연구개발비를 추출하고, 동일한 규모의 연구개발투자가 본 사업의 과제기간 중에도 정부와 민간에서 진행된다고 가정해서, 본 사업의 연구개발 비중을 산출함(〈표 59〉).
 - 표 9에는 기포콘크리트 과제 사업기여율을 나타내었음.
 - 계산 공식은 다음과 같음.
 - 사업기여율 = 본 과제 비용 / (국가 총 R&D 투자비* + 본 과제 비용) × 100
 - * 국가 총 R&D 투자비 = ('15~' 18 총투자비) / 5년 × (본 과제기간)

표 58. 유관 국가 연구개발 과제 (NTIS Database)

년도	사업명	과제명	주관부처	총연구비 (백만원)	정부투자비 (백만원)
2016	이공학학술연구기관구축	다양한 형상을 가진 이방성 공극이 무기계 기포 콘크리트의 특성에 미치는 영향에 대한 연구	교육부	34	34
2017	산학연협력기술개발	폐발포폴리스티렌과 친환경 기포제를 혼합한 경량기포콘크리트 개발	중소벤처기업부	120	90
2015	국토교통기술촉진연구	비중이 0.30이하인 자체 식물생장환경을 갖는 바이오 테라콘(Terra-con) 인공토양 골재개발	국토교통부	400	300
2015 ~ 2018	교통물류연구(R&D)	친환경 저비용 에코 콘크리트 도로포장 기술	국토교통부	6,734	4,829
2016	산학연협력기술개발	CA계 속경성 바인더를 사용한 시트 부착형 경량 칸막이재 개발	중소기업청	99.5	50.5
2016	산학연협력기술개발	순환자원을 활용한 친환경 ALC 제조 기술개발	중소기업청	105	79
2018	중소기업기술혁신개발(R&D)	NUI 기반의 Virtual Key Matrix 전자락을 탑재한 90P 내화등급의 프리미엄 금고개발	중소벤처기업부	159	103
2018	산학연협력기술개발(R&D)	무기계 단열재를 사용한 내화용 경량 시멘트 압출 복합패널 개발	중소벤처기업부	106	79
2016 ~ 2018	개인기초연구(과기정통부)(R&D)	빛 투과콘크리트의 경량화 및 역학특성 개선	과학기술정보통신부	365	365

표 59. 기포콘크리트 과제 사업기여율

과제	비용 (억원)	'15~' 18 총투자비(억원)		사업기여율	NTIS 과제검색 DB (Keyword)
		정부	국가전체		
기포콘크리트	6.2	59.3	81.2	16%	기포콘크리트

□ R&D 사업화성공률

- 국가연구개발사업을 통한 기술개발 결과가 시장에서의 편익창출로 연결되기 위해서는 기술의 실증 및 상용화 과정에서의 각종 어려움과 시장의 변수들을 극복해야 하는데, 이에 대한 정량적 추정을 위해 R&D 사업화성공률이라는 변수를 고려해야 함.
- 사업화성공률은 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 사업화성공률을 추정하였음(〈표 60〉). 다만, 확보할 수 있는 자료의 한계로 인해, 정부 R&D 평균치를 적용할 수 밖에 없었음. 이때 적용한 평균치는 KISTEP 자료의 평균치들과 미래부, 산업부 등의 부처에서 제시한 정부 연구개발투자 사업화비율 전체 평균치가 있는데, 이 중 보수적인 KISTEP의 값(24%)을 본 연구에 적용하였음.
 - － KISTEP, 2009, 국가연구개발사업 효과분석시스템 개발
 - － 미래부, 2014년도 국가연구개발사업 성과분석
 - ： 2014년 총 53,493 과제 중 21,205 과제가 사업화에 성공 (성공률 40%)
 - － KEIT, 2012, 산업기술혁신사업 성과활용현황조사 결과보고서
 - ： 2007~2011 산업부 지원과제 3,033건의 사업화성공률 40.1%

□ R&D 기여율

- R&D 기여율은 연구개발성과의 상업화를 통해 부가가치가 창출되었을 때 전체 부가가치 가운데 연구개발에 의한 기여분이 어느 정도인지를 나타내는 지표로서, 일반적으로 전문가 및 사업수행주체의 인식에 기초한 주관적 조사를 통해 그 값을 추정하거나 거시적 관점에서 산출된 값을 대표적으로 활용할 수 있는데, 통상 전문 연구자들이 제시한 거시적 관점의 산출치를 적용하고 있음.
- 본 분석에서는 예타지침에서 권고한 대로, 2013년 국가과학기술심의회에서 심의된 〈제3차 과학기술기본계획〉에서 최근 데이터를 적용해 구한 수치(35.4%)를 R&D 기여율로 적용하였음.

표 60. 과거 R&D 사업화 성공률 (KISTEP, 2009)

산업분류	과제수	사업화성공	사업화성공률
의약품	87	20	23.0%
바이오	73	21	28.8%
의료기기	177	45	25.4%
의료정보	27	5	18.5%
식품	57	17	29.8%
화장품	22	4	18.2%
평균			24.0%

□ 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.
- 본 분석에서는 예타지침의 권고대로 한국은행 산업연관표의 투입산출표 중 기본부문 기초가격평가표의 〈기초무기화학물질〉 부가가치율 58.9%를 적용함.

□ 사회적할인율

- KDI가 예비타당성조사에서 일반지침으로 제시한 사회적 할인율(4.5%, 2017년 하향조정)을 적용함.

□ 비용

- 본 분석에서 비용은 투입된 연구비로 규정하였으며, 총 2년 동안 6.2억원(2017년 2.5억원, 2018년 3.7억원)의 연구비가 투입됨.

(3) 시장규모 및 목표시장

□ 시장규모 및 목표시장 추정

- 2015년 국내 단열재 시장은 약 6,700억원 규모였으며, 저탄소 녹색성장을 위한 에너지 절감 정책에 따라 단열재 시장은 2030년 약 10,000억원 규모로 성장할 것으로 평가되고 있음.
- 개발 기술은 기존 습식형 기포콘크리트 대비 단열효과가 우수하여 건축물의 열 손실을 약 30% 이상 줄일 있으므로 냉·난방을 위한 건축물의 에너지 절감을 통해 약 6000억원 이상의 경제적 효과를 가짐.
- 일반적으로 사용되는 무기단열재인 미네랄 울의 단가는 28 만원/m³ 으로 고가임. 본 개발 기술인 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 제조 단가는 약 15 만원/m³ 으로 예상되며, 미네랄울을 본 개발 기술로 대체 시 약 30 %의 비용을 절감할 수 있음.
- 기존 건축용 유기단열재의 시장은 3,860억 규모로 유기단열재의 5%를 본 개발 기술로 대체 시 약 193억 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% 성장할 것으로 전망됨.
- ALC 블록은 현재 국내 약 2,000억 규모의 시장을 형성하고 있으며, 개발 기술로 전체시장의 10% 대체 시 약 100억원의 경제적 이익을 발생시킴.
- 일반적으로 혁신제품의 경우 시장데이터가 충분히 존재하지 않는 경우가 대부분으로, 유사한 성공 사례를 분석함으로써 시장에서 합리적으로 추론 가능한 수준에서의 매출편익(단, 기술개발 및 사업화가 성공적으로 이루어진다는 가정 하에)을 도출함. 배스모형, 로지스틱스 모형 등이 시장 미성숙 단계인 기술혁신형 제품의 미래예측에 적합하다고 알려져 있으나, 이들 모형을 적용하기 위해서는 초기 시장 데이터의 신뢰도가 매우 중요하며 신뢰도가 떨어지는 초기 데이터를 사용할 경우 이 예측기법은 오차가 증폭될 가능성이 있어 타 기법에 비해 더 나은 결과를 보장하지 못함. 본 사업의 경우, 신뢰할만한 시장 데이터가 존재하지 않아 이러한 분석법을 적용하지 못하고, 부득이 기존제품

의 시장을 잠식해 들어가는 시나리오를 선택해 분석하였음.

(4) 비용편익 분석 결과

□ B/C Ratio: 5.33 (경제적 타당성 있음)

- 비용편익 분석결과 5.33으로서 경제적 타당성이 있다고 평가됨(〈표 61〉 및 〈표 62〉).

3) 사업화 전략

□ 기술 수요처 및 관련시장의 규모

- 개발 기술은 건축물의 에너지 효율성을 높일 수 있는 고성능(고단열, 고방수, 저밀도) 건축재료이며, 기술의 수요처는 건축물의 내·외벽 단열재 분야임(〈그림 132〉).
- 에너지 효율성이 우수한 패시브 하우스나 돔하우스에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이러한 구조물 들은 외기에 직접적인 노출이 불가피함에 따라 고단열 및 발수·방습 성능을 갖는 본 개발 기술의 적용이 가능할 것으로 판단됨(〈그림 132 (b)〉).
- 개발 기술의 우수한 단열효과와 습식형 제조방식은 현장 타설이 가능하게하며, 건축물 바닥의 단열 및 차음을 위하여 적용이 가능함(〈그림 132 (c)〉).
- 개발 기술은 경량성이 우수하여 ALC 블록 등의 2차 제품화를 통해 건축물 리모델링 시 내부 간막 이벽 등에 적극 활용이 가능함.

표 61. 건축용 유기단열재 및 ALC 블록 목표시장 (단위: 억원)

구분	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
유기단열재 시장	6,654	7,286	7,978	8,736	9,566	10,475	11,470
목표시장 (5%)	333	364	399	437	478	524	573
ALC 블록 시장	3,448	3,775	4,134	4,526	4,956	5,427	5,943
목표시장 (10%)	345	378	413	453	496	543	594
목표시장 합계	677	742	812	889	974	1,066	1,168

표 62. 비용편익 분석 결과

구분	2019	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
목표시장		677	742	812	889	974	1,066	1,168
사업기여율		16%						
R&D기여율		35.4%						
R&D사업화성공률		24%						
부가가치율		58.9%						
편익		5.4	5.9	6.5	7.1	7.8	8.5	9.4
편익 NPV(@2019)	35.2	4.3	4.6	4.8	5.0	5.2	5.5	5.8
비용 NPV(@2019)	6.6							
B/C Ratio	5.33							

- 또한, 개발 기술의 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 내 화성능에 대한 법규가 강화되어 무기계 단열재에 대한 수요처는 증가하고 있는 추세임.
- 2015년 국내 단열재 시장은 약 6,700억 원 규모였으며, 세계 단열재 시장은 400억 달러 수준의 규모로 형성되어 있음.
- 건축용 단열재는 국내 단열재 시장의 72%를 차지하고 있으며, 무기단열재의 경우 전체 단열재시장의 40% 이하로 형성되어 있음.
- 건축물의 내화법규가 강화됨에 따라 건축용 무기단열재 시장은 향후 지속적인 성장세를 나타낼 것으로 예상됨. 결과적으로 본 개발 기술의 수요처를 분석하면 <표 63>과 같이 제시될 수 있음.

□ 현장 적용성을 위한 연구확장 방안

- 아이디어의 검증이 성공적으로 완료되면, 추가 연구를 통하여 현장적용 및 사업모델을 구축하여 실용화로 연결될 수 있음.
- 공인인증기관의 인증을 통해 개발 기술의 현장 적용 시 품질에 대한 신뢰성을 확보.
- 기존 ALC 블록의 문제를 해결하면서 나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC 블록 제품 개발로 연구가 확장될 수 있음.

□ 기술의 포지셔닝 분석 (<그림 133>)

- 개발 기술의 경쟁우위는 나노캡슐 에어로겔 활용 소재의 차별성과 기포콘크리트에서의 성능향상 및 단기실용화를 위한 ALC기술의 확장을 통한 경쟁력 강화임.
- 차별성 측면에서는 상업적으로 이용가능 한 에어로겔의 단순 이용이 아닌 친·소수성의 나노캡슐 에어로겔의 표면기능화 기술임.



표 63. 본 개발 기술의 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, 고단열, 고내수성 등)	· 기존 일반 ALC 블록 및 단열 패널 등

- 혁신성 측면에서는 표면기능화된 나노캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트 단열의 신소재이며, ALC 블록 제품으로 확장이 가능함.
- 대량생산 시스템(ALC 블록 제품 등의 확장)을 갖추어 경제성을 확보한다면 단열재 시장에 쉽게 접근할 수 있으며, 수출의 기대효과도 큼.

□ 실용화 · 제품화 방안

- 연구초기 단계에서부터 제품성능 및 가격경쟁력의 차별화를 고려하여 본 개발 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.

□ 미래원천기술 확보 : 국토교통부 녹색인증 및 건설신기술 추진

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

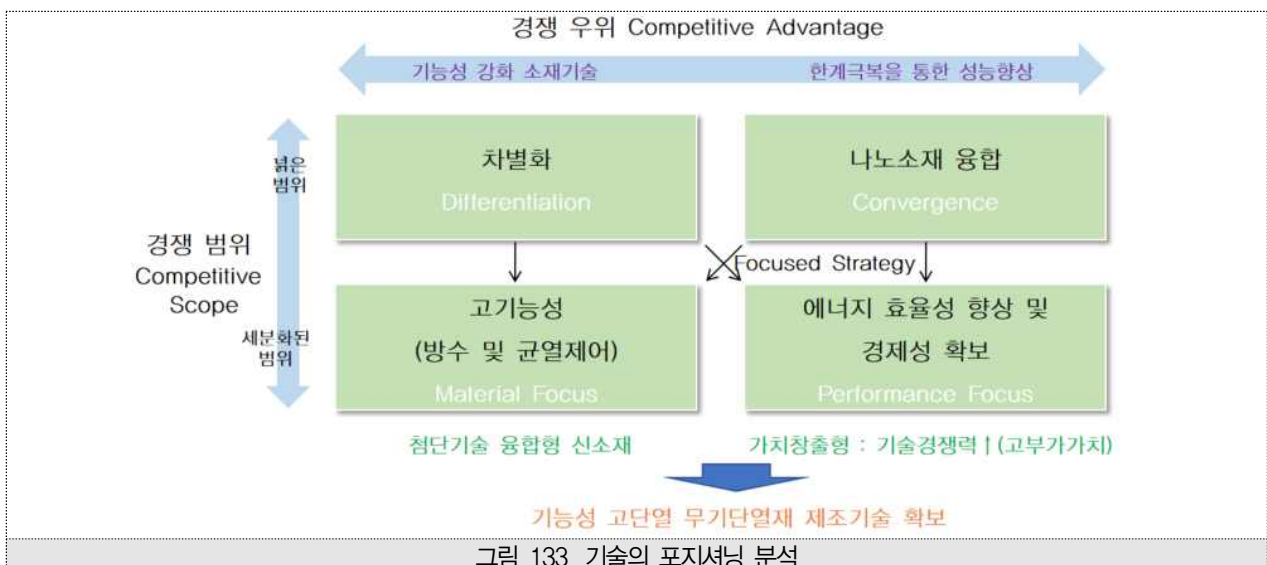
□ 신산업 창출

- 개발 기술은 고단열, 고방수, 불연 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.
- 기존 ALC 블록의 단점을 극복하면서 새로운 고부가가치의 ALC 블록 산업 창출.

□ 비즈니스 모델 수립

▪ 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 경량기포콘크리트 및 ALC 블록이 갖는 단점을 보완하고 고단열, 고방수, 불연 특성 등의 성능향상을 통한 고부가가치 제품 개발을 통한 차별화.

■ BM 목표 및 핵심 경쟁 요인

- 에어로겔을 활용한 고단열, 고방수, 불연성능 등의 특성 확보와 콘크리트 기포 내 에어로겔 형성에 따른 강도 증진 및 곰팡이 서식방지 등의 고성능, 고부가가치 제품 개발을 통한 본 개발 기술의 시장점유율 확대를 위한 차별화 전략마련.

■ 목표 시장 구조

- 경쟁 기업 현황 : 1990년대 국내 도입된 ALC는 KCC, 선경, 삼익, 신라교역, 기린산업, 풍림산업, 쌍용양회, 벽산 등 8개사의 경합구조였으나, 외환위기 이후 (주)성은과 (주)SYC만 현재 제품을 생산하고 있음(그림 134)).
- 시장 진입 장벽 : ALC 시장은 연 1000억원 규모인 반면 공장 신축에 500억원 이상이 소요되 시장진입이 어려운 특수한 시장구조를 갖고 있으나, 참여기관의 제작기반 시설을 활용을 통한 시장 진입.

■ 수익 확보 전략

- 주요 고객군 : 건설사, 한국토지주택공사 (LH), 서울주택도시공사 (SH), 민간주택업자
- 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안
 - : 고단열, 고방수, 불연성, 등의 고성능화
 - : 건축물 에너지 효율성 향상 및 기존 ALC와의 차별화 제품으로서 브랜드화
 - : 경향하우징페어 및 MBC 건축자재 박람회 출품을 통한 기술홍보
 - : 기존 판매 대리점을 이용한 제품 홍보



4) 후속 연구 전략

□ 제품의 대량생산 및 균일 품질 확보

- 참여기업인 IS동서는 기존 기업 자체내의 부설연구소와 함께 오토클레이브 설비가 갖추어진 콘크리트 2차 제품 생산공장을 운영 중에 있음.
- 이에 별도의 추가적인 고가의 설비 구축(500억원 수준의 고온·고압 기포콘크리트 제작 및 자동화 설비)이 필요치 않으며, 습식형 기포 콘크리트의 경우 기포군 생성장치 및 오토클레이브 기포 콘크리트의 경우 슬러리의 숙성을 위한 별도의 양생실(습도 60%, 온도 40℃)의 구축만 이루어진다면 문제없이 대량생산라인을 구축할 수 있음.
- 이와 더불어 주관연구기관(경기대학교)과 참여기업(IS동서)간의 긴밀한 협업체계 및 기업 자체 부설 연구소의 제품 전담팀의 구성을 통해 개발된 제품의 지속적인 품질개선 및 생산라인의 체계화를 바탕으로 균일 품질의 제품을 생산 할 수 있을 것으로 판단됨.

□ 제품의 내구성능 확보

- 본 연구에서 개발된 에어로겔 임베디드 기포 콘크리트는 대체하고자 하는 주적용 대상이 내화충전재 및 단열재로 건축 자재로서 활용되기 위해서는 방수성능 및 내구성뿐만 아니라 내화성능 등의 안전성을 검증할 필요가 있음.
- 특히, 준난연재료인 EPS의 대체를 위해서는 불연등급의 난연성 확보가 반드시 필요하며 내화 실험 등의 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단됨.
- 결과적으로 이는 제품의 고품질화 및 기존 제품과의 차별성을 부각시키는 데에 매우 중요한 요소가 될 것으로 판단됨.
- 이에 주관연구기관(경기대학교)와 참여기업(S동서는)은 개발 제품의 사업화측면 및 시장성을 고려하여 내화 인증 등의 추가 연구수행을 기반으로 한 품질 개선과 제품 홍보 등을 계획하고 있음.

2. 연구성과

1) 기술적 성과

- 나노 캡슐 에어로겔을 활용한 기포콘크리트의 단열효과 및 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 기포콘크리트의 단열성능 한계를 극복한 고성능의 무기단열재 기술의 선도
- 기존 유기단열재의 문제점을 해결하고 내화에 대한 성능을 확보하여 재난 상황에 대응할 수 있는 안전성 확보 기술의 선도
- 나노기술과 콘크리트 기술의 융합에 의한 전문인력 양성 및 연구 인프라 확대.
- 국내·외 유사기술이 없는 원천기술로서 건설 신재료·신기술 등 국가 건설기술 브랜드 창출에 기여.
- ALC 기술의 확장을 통해 기존 ALC의 문제점(수분흡수에 따른 단열성능저하 및 2차 피해) 개선(고품질화) 및 성능 향상 실현.

2) 사회·경제적 파급 효과

- 2015년 국내 단열재 시장은 약 6,700억원 규모였으며, 저탄소 녹색성장을 위한 에너지 절감 정책에 따라 단열재 시장은 2030년 약 10,000억원 규모로 성장할 것으로 평가되고 있음.
- 과제 기술은 기존 습식형 기포콘크리트 대비 단열효과가 우수하여 건축물의 열 손실을 약 30% 이상 줄일 있으므로 냉·난방을 위한 건축물의 에너지 절감을 통해 약 6000억원 이상의 경제적 효과를 가짐.
- 일반적으로 사용되는 무기단열재인 미네랄 울의 단가는 28 만원/m³ 으로 고가임. 본 제안기술인 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 제조 단가는 약 15 만원/m³ 으로 예상되며, 미네랄울을 본 제안 기술로 대체 시 약 30%의 비용을 절감할 수 있음.
- 기존 건축용 유기단열재의 시장은 3,860억 규모로 유기단열재의 5%를 본 제안 기술로 대체 시 약 193억 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.

- ALC 블록은 현재 국내 약 2,000억 규모의 시장을 형성하고 있으며, 과제기술로 전체시장의 10% 대체 시 약 200억원의 경제적 이익을 발생시킴.

3) 대표 연구성과 목록

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Detection of chemicals in water using an oxide nanowire transistor covered with an aerogel microsphere thin film as a liquid-vapor separation filter	경기대학교	주저자	Journal of the Korean Physical Society	IF 0.467	2018.01.07	중복 사사 (총 4개)	SCI
2	논문	Contact angle analysis for the prediction of defect states of graphene grafted with functional groups	경기대학교	주저자	Advanced Materials Interface	IF 4.279	2018.06.07	중복 사사 (총 4개)	SCI
3	논문	Chemically-reactive polyurethane-carbon nanotube fiber with aerogel-microsphere-thin-film selective filter	경기대학교	주저자	Advanced Materials Interface	IF 4.279	Online published 2018.08.26	단독 사사 (총 1개)	SCI
4	논문	Thermally nonreactive and chemically reactive metal-oxide-nanowire transistor covered with aerogel-microsphere-thin-film-based selective filter	경기대학교	주저자	Materials Research Express	IF 1.151	2018.09.05	단독 사사 (총 1개)	SCI
6	논문	Heat Flux Effect of Thermal metamaterials	경기대학교	주저자	AIP Advanced	IF 1.568	2018.10.	단독 사사 (총 1개)	SCI

7	논문	소수성 에어로겔을 혼입한 단열 기포콘크리트 기초연구	경기대학교	주저자	한국건축시공학회논문집	IF 0.48	2017.07.16	단독 사사 (총 1개)	비SCI
8	논문	친수성 표면개질의 에어로겔을 혼입한 시멘트 페이스트의 압축강도 발현 및 열전도율 평가	경기대학교	주저자	한국건축시공학회논문집	IF 0.48	2018.01.30	단독 사사 (총 1개)	비SCI
9	논문	흙드 실리카 첨가에 따른 시멘트 페이스트의 강도발현 및 열전도 특성에 대한 기초연구	경기대학교	주저자	한국건축시공학회논문집	IF 0.48	2018.10.15	단독 사사 (총 1개)	비SCI
10	논문	슬래그 혼입 기포콘크리트의 성능향상을 위한 양생조건의 평가	경기대학교	주저자	한국건축시공학회논문집	IF 0.48	2018.12.13	단독 사사 (총 1개)	비SCI
11	논문	오토클레이브 기포콘크리트의 발포율 및 압축강도를 고려한 최적 배합조건 평가	경기대학교	주저자	한국콘크리트학회논문집	IF 0.58	2019.03 (게재 예정)	단독 사사 (총 1개)	SCOPUS
12	논문	바텀애시 골재와 기포를 활용한 저탄소·고단열 경량콘크리트 개발 기초 연구	경기대학교	주저자	한국콘크리트학회논문집	IF 0.58	2019.03 (게재 예정)	단독 사사 (총 1개)	SCOPUS
13	특허	친수성 나노 에어로겔 파우더를 사용한 고단열 경량기포 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 경량 기포 콘크리트 제조방법	경기대학교 산학협력단	등록인	대한민국	-	20170922	중복 사사 (총 2개)	-
14	특허	미세먼지 포집장치	경기대학교 산학협력단	출원인	대한민국	-	20170905	중복 사사 (총 4개)	-
15	특허	방수형 기포콘크리트 블록의 습식 제조 방법	경기대학교 산학협력단; 아이에스 동서	출원인	대한민국	-	20170908	단독 사사 (총 1개)	-

16	특허	열메타 구조를 이용한 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬	경기대학교 산학협력단; 아이에스 동서	출원인	대한민국	-	20171124	중복 사사 (총 2개)	-
17	특허	바텀애시 골재와 기포를 이용한 저탄소 단열 콘크리트	경기대학교 산학협력단; 아이에스 동서	출원인	대한민국	-	20180717	단독 사사 (총 1개)	-
18	특허	변압기용 가스 검출 장치 및 이를 포함하는 변압기	경기대학교 산학협력단	출원인	대한민국	-	20180511	중복 사사 (총 4개)	-
19	특허	양성자 빔 조사에 의한 산화 환원 사이클을 갖는 수소 생성 방법 및 이를 이용한 수소 생성 장치	경기대학교 산학협력단	출원인	대한민국	-	20180531	중복 사사 (총 2개)	-
20	특허	제논광 또는 마이크로웨이브 조사에 의한 산화환원 사이클을 갖는 수소 생성방법 및 이를 이용한 수소 생성 장치	경기대학교 산학협력단	출원인	대한민국	-	20180601	중복 사사 (총 2개)	-
21	특허	카테터 및 이를 포함하는 인공 호흡기	경기대학교 산학협력단	출원인	대한민국	-	20180626	중복 사사 (총 4개)	-
22	특허	에어로겔 임베디드 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 에어로겔 임베디드 콘크리트 제조 방법	경기대학교 산학협력단	출원인	대한민국	-	20181221	단독 사사 (총 1개)	-
23	특허	방수형 기포콘크리트 블록의 습식 제조 방법	경기대학교 산학협력단; 아이에스 동서	출원인	PCT	-	20180627	단독 사사 (총 1개)	-
24	특허	열메타 구조를 이용한 단열 프리캐스트 콘크리트 판넬	경기대학교 산학협력단; 아이에스 동서	출원인	PCT	-	20181114	단독 사사 (총 1개)	-

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

핵심성과 1	표면기능화를 통한 나노캡슐 에어로겔 기술		
목적	· 에어로겔에 나노캡슐 기능성 부여 · 표면기능화된 나노캡슐 에어로겔의 친수성-소수성 전이특성 확보 · 콘크리트에 임베디드된 나노캡슐 에어로겔의 단열 및 방수 특성 확보		
성능목표 및 달성현황	성능	당초 목표 개발기술 수준	달성 수준
	나노캡슐 에어로겔의 습윤성 (wettability)	친수성: CA 40도 이하 소수성: CA 150도 이상 (친수성-소수성 전이 가능)	친수성: CA 0도 (표면흡수) 소수성: CA 150도
	나노캡슐 에어로겔 및 콘크리트 배합후 습윤성 (wettability)	친수성: CA 50도 이하, 소수성: CA 110도 이상	친수성: CA 0도 (표면흡수) 소수성: CA 110도
성과달성에 따른 정량적 성과		당초 목표	달성 수준
	특허 출원/등록	출원 : 1건, 등록 : 0건	출원 : 1.75건
	논문	SCI(E) : 3건	SCI(E) : 3.5건
	저작	0건	
	S/W	0건	
	신기술	0건	
	기타	0건	기술 홍보 : 1건(뉴스기사)

핵심성과 2	나노캡슐 에어로겔 혼입 고단열 기포콘크리트 최적배합설계		
목적	· 결합재 특성에 따른 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 물리·역학적 특성분석 · 공극량, 단위수량 및 혼화제 적용에 따른 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 물리·역학적 특성분석 · 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 최적 배합설계 방안 제시 · 기존 유무기계 단열소재와의 성능비교를 통한 우수성 제안		
성능목표 및 달성현황	성능	당초 목표 개발기술 수준	달성 수준
	기포콘크리트의 압축강도 확보	1 MPa 이상	1.02 MPa
	기포콘크리트의 절건 밀도 확보	0.4 g/cm ³ 이하	0.39 g/cm ³
	기포콘크리트의 열전도율 50% 저감	0.07 W/m·K 이하	0.07 W/m·K
성과달성에 따른 정량적 성과		당초 목표	달성 수준
	특허 출원/등록	출원 : 3건, 등록 : 0건	출원 : 4.5건, 등록: 0.5건
	논문	SCI(E) : 0건, 학술지 : 4건	학술지 : 4건
	저작	0건	
	S/W	0건	
	신기술	0건	
	기타	0건	

핵심성과 3	나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC의 성능향상 및 평가기술		
목적	· 결합재 특성 및 양생환경에 따른 나노캡슐 에어로겔 기포콘크리트의 강도 특성 및 열적 특성평가 · 나노캡슐 에어로겔 혼입 ALC의 성능향상을 위한 최적 양생환경 및 배합재료 기초물성 및 특성평가		
성능목표 및 달성현황	성능	당초 목표 개발기술 수준	달성 수준
	ALC의 압축강도 확보	2.9 MPa 이상	8.0 MPa (과제 종료시 성적서 첨부)
	기존 ALC의 열저항값 125% 수준	0.0066d m ² · K/W 이상	0.0073d m ² · K/W
성과달성에 따른 정량적 성과		당초 목표	달성 수준
	특허 출원/등록	출원 : 1건, 등록 : 0	출원 : 1건
	논문	SCI(E) : 0건, 학술지 : 2건	학술지 : 2 건
	저작	0건	
	S/W	0건	
	신기술	0건	
	기타	0건	

2. 관련 분야 기여도

- 최근 국내에서 고단열 ALC 블록인 에어셀이 개발되었지만 낮은 압축강도로 인해 그 적용성과 실용성이 떨어짐.
- 에어로겔 혼입 습식형 기포콘크리트 및 ALC 블록에 대한 국내·외 연구가 조사 안되는 상태에서 본 핵심성과 기술은 기존 일반 습식형 기포콘크리트 및 ALC 블록의 성능 대비 이상을 목표로 설정하였음.
- 이 연구의 최종 목표 TRL은 4로서 이 연구를 통하여 에어로겔 혼입 기포 콘크리트 및 ALC 기술의 실용성이 판단된다면 과제 종료 후 실용성을 확보하는 성능과 함께 에어셀 이상의 성능으로 확대 할 계획임(TRL 7).

제4장. 연구개발성과의 활용계획

- 에너지 효율성이 우수한 패시브 하우스나 돔하우스에 대한 수요가 증가하고 있으며, 이러한 구조물들은 외기에 직접적인 노출이 불가피함에 따라 고단열 및 발수·방습 성능을 갖는 본 과제기술의 적용이 가능할 것으로 판단됨.
 - 과제기술의 우수한 단열효과와 습식형 제조방식은 현장 타설이 가능하게 하며, 건축물 바닥의 단열 및 차음을 위하여 적용이 가능함.
 - 과제기술은 경량성이 우수하여 ALC 블록 등의 2차 제품화를 통해 건축물 리모델링 시 내부 간막이벽 등에 적극 활용이 가능함.
 - 과제기술의 높은 단열성 및 무기계 세라믹 구조는 내화 충전물 및 내화 구조체에 적용이 가능함.
 - 특히 단열재에 의한 화재 확산, 유해가스 방출에 의한 인명피해 발생이 문제됨에 따라 건축물 내화성능에 대한 법규가 강화되어 무기계 단열재에 대한 수요처는 증가하고 있는 추세임.
 - 2015년 국내 단열재 시장은 약 6,700억 원 규모였으며, 세계 단열재 시장은 400억 달러 수준의 규모로 형성되어 있음.
 - 건축용 단열재는 국내 단열재 시장의 72%를 차지하고 있으며, 무기단열재의 경우 전체 단열재시장의 40% 이하로 형성되어 있음.
 - 건축물의 내화법규가 강화됨에 따라 건축용 무기단열재 시장은 향후 지속적인 성장세를 나타낼 것으로 예상됨.
-

붙임. 참고 문헌

1. Jeon HG, Ji SW, Seo CH. A Study on the Characteristics of Concrete Using AE Water Reducing Agents of Early-strength Type. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2006;22(8):85-92.
2. Lee, JW, Lee JW, Lee JS, Lee KJ. Study on the Development of Accelerator for Early Strength of Concrete Using Industrial By-Product. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute. 2013;21:1-10.
3. Park GY, Kim GY, Choe GC. Evaluation of Early Compressive Strength of Concrete Using Early Strength Improvement Type Cement and Early Strength Activator. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2014;14(4):322-328.
4. Min TB, Cho IS, Lee HS. Experimental Study on the Early Strength Development Mechanism of Cement Paste Using Hardening Accelerator and High-Early-Strength Cement. Journal of the Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection. 2014;18(1):84-92.
5. Min TB, Cho IS, Lee HS. Fundamental Study on the Development of Precast Concrete without Steam Curing. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2012;28(12):61-68.
6. Kim GY, Kim YR, Park JH. Investigation of Early-Age Concrete Strength Development Using Hardening Accelerator. Journal of the Korea Concrete Institute. 2016;28(3): 309-316.
7. Kim TW. Influence of Silica Fume on Strength Properties of Alkali-Activated Slag Mortar. Journal of the Korea Concrete Institute. 2013;25(3):305-312.
8. Lee ST, Lee SH. Mechanical Properties and Durability of Cement Concrete Incorporating Silica Fume. Journal of the Korean Ceramic Society. 2010 ;47(5):412-418.
9. He J, Li X, Su D, Ji H, Wang X. Ultra-low Thermal Conductivity and High Strength of Aerogels/Fibrous Ceramic Composites. Journal of the European Ceramic Society. 2016;36:1487-1493.
10. Feng J, Mo W, Ma S, Wang Y, Yang J, Su X, Wang G, Lin M. Thermal Shrinkage Inhibition of Fumed Silica Based Thermal Insulating Composite. Applied Thermal Engineering. 2017;113:749-755.
11. Kim SS, Lee JB. The Durability of Silica Fume Concrete. Magazine of the Korean Recycled Construction Resources Institute. 2013;8(4):10-15.
12. Korea concrete Institute, KCI Concrete Design Code, Korea concrete Institute, 2012.
13. Chen YL, Chang, JE, Lai YC, Chou MM. A Compressive Study on the Production of Autocalved Aerated Concrete: Effect of Silica-lime-cement Composition and Autocalving Conditions. Construction and Building Materials. 2017;153:622-629.
14. Chu YS, Jung UJ, Song H, Lee JK, Kim YG, Kang DG. Physical Properties of ALC with Various Fineness of Quartzite. Journal of the Korean Ceramic Society.

-
- 2010;47(5):407–411.
15. Chu YS, Seo SK, Im DY, Song H, Lee JK Lee SH. A Study for Physical Properties of ALC using Different Quartzite. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute. 2011;16: 89–94.
 16. Jung MY. Manufacturing Technology of the Autoclaved Lightweight Concrete with the Ground Granulated Blast Furnace Slag. Review of Architecture and Building Science. 2012;56(8):41–47.
 17. Kim JM, Jung JY, Hwang EH, Shin SC. Properties of Foamed Concrete According to Types and Concentrations of Foam Agent. Journal of the Korea Concrete Institute. 2012;24(1):61–70.
 18. Kim JM, Kwak EG, Cho SH, Kang C. (2009) Decision of Optimized Mix Design for Lightweight Foamed Concrete Using Bottom Ash by Statistical Procedure. Journal of the Korea Concrete Institute. 2009;21(1):3–11.
 19. Kim, Y. H. Strength Characteristics according to the mixed CaO/SiO_2 Ratio to Autoclaved Aerated Concrete(AAC) used on the Exterior Panel in Buildings, Journal of the Korean Digital Architecture Interior Association. 2011;11(3):35–42.
 20. Kim YH, Song H. An Experimental Study on the Strength Characteristic Improvement of the Autoclaved Lightweight Concrete(ALC) containing Quicklime and Silica Fume. Journal of the Korean Digital Architecture Interior Association. 2011;11(4):21–27.
 21. Kim YY, Song H, Chu YS, Lee JK. (2006) Fundamental Properties of Autoclaved Lightweight Concrete using Admixtures. Proceedings of the Architectural Institute; 2006 Oct 26; Daegu, Korea. Seoul (korea) : Korea Institute of Architectural; 2006. p. 513–6.
 22. Lee KH.. CDevelopment of Mixture Proportioning Model for Low–density Hight–strength Foamed Concrete. Master’ s thesis: Kyonggi University.; 2013.
 23. Neville AM. Properties of Concrete. 5rd ed. USA, Prentice Hall; 2011. 846 p.
 24. Kim DW, An SH, Cho H, Jeong JW, Lee BH, Doh NL, Kang KI. Development of conceptual model of construction factory for automated construction. Building and Environment. 2009;44(3):1634–42.
 25. Hutchinson AM, Ali AE, Abdel–Razek RH. Estimating the Acceptability of New Formwork Systems Using Neural Networks. Journal of Construction Engineering and Management. 2005;131(1):33–41.
 26. Kim DW, An SH, Cho H, Jeong JW, Lee BH, Doh NL, Kang KI. Development of conceptual model of construction factory for automated construction. Building and Environment. 2009;44(3):1634–42.
 27. Arena P, Caponetto R, Fortuna L, Xibilia MG. Genetic algorithm to select optimal neural network topology. In: Circuits and Systems. Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuit and Systems; 1992 Aug 9–12; Washington, DC , USA. p. 1381–3.
 28. Ashworth A. Cost studies of buildings. 3rd ed. UK, Harlow:Addison Wesley Longman Ltd; 1999. 444 p.
-

-
29. Wilson AJ. Experiments in probabilistic cost modelling. In: Brandon PS, editor. Building Cost Techniques; New Direction. London: E&FN Spon; 1982. p. 169–80.
 30. Reder AD. Cost model for reinforced concrete beam and slab structures in building [dissertation]. Fort Collins: Colorado State University; 2005. 150 p.
 31. Ryu HG, Son BS. Problems and Suggestions for Improvement Derived from an Analysis of the Urban & Residence Environment Improvement Project. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2010;10(3):39–47.
 32. Kim JM, Jung JY, Hwang EH, Shin SC. Properties of foamed concrete according to types and concentrations of foam agent. Journal of the Korea Concrete Institute, 2012;24(1):61–70.
-