19SCIP-B103734-05

자기치유형친환경콘크리트기술개발 최종보고서 2020 국토교통부 국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반과제(○) / 공개(○), 비공개( ) 발간등록번호( )
2015 건설기술연구사업 최종보고서

R&D / 19SCIP-B103734-05

자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발 최종보고서(2세부)

2020. 4. 21

협동연구기관 / 전남대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한양대학교 에리카산학협력단
위탁연구기관 / 조선대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발’(연구개발 기간 : 2015.09.14. ~ 2020.02.13.) 과제의 최종 보고서를 제출합니다.

2020. 04. 21.

협동연구기관명 : 전남대학교 산학협력단 (송진규)
공동연구기관명 : 한양양대학교 에리카산학협력단 (좌용호)
위탁연구기관명 : 조선대학교 산학혐력단 (유진철)

협동연구기관책임자 : 송진규
공동연구기관책임자 : 이한승
위탁연구기관책임자 : 김형기

참여기관명 : ㈜에이치비티 (김경환)
㈜에이엠지그룹건축사사무소 (정명철)
㈜엠에스건설기술 (김건우)
㈜유탑 (박재형)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라
최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>19SCIP-B103734-05</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td colspan="2">2019. 01. 01-2020. 02. 13</td><td>단계구분</td><td>(5차년도)/(5차년도)</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="6">건설기술연구사업</td></tr>
<tr><td>주관연구과제명</td><td colspan="6">자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발</td></tr>
<tr><td>협동연구과제명</td><td colspan="6">반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">송진규</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 36명
내부: 36명
외부: 명</td><td>해당단계 연구비</td><td colspan="2">정부: 790,000 천원
민간: 264,000 천원
계: 1,054,000 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 129명
내부: 129명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td colspan="2">정부: 2,350,000 천원
민간: 751,400 천원
계: 3,101,400 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관</td><td colspan="3">연구기관명 :
전남대학교 산학협력단
한양대학교 에리카산학협력단</td><td colspan="3">참여기업명 :
㈜에이치비티
㈜에이엠지그룹건축사사무소
㈜엠에스건설기술
㈜유탑</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:
조선대학교 산학협력단</td><td colspan="3">연구책임자:
김형기</td></tr>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허		보고서 원문	연구시설・장비	기술요약정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
		출원	특허						생명정보	생물자원	정보	실물
등록・기탁번호	34	10	3	3	-	-	2	-	-	-	-	-

보고서 면수 82

<table>
<tr><td>연구개발목표</td><td colspan="5">• 본 연구개발과제는 콘크리트 구조물의 장수명화 및 유지관리 최소화가 가능한 자기치유 선도 기술 개발을 최종목표로 함.
• 이를 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같음.
– 내구성 향상 친환경 콘크리트 기술 개발</td></tr>
<tr><td>연구개발내용</td><td colspan="5">[2세부] 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
❍ 중합반응 제어형 내열화 콘크리트 기술 개발
❍ 유해이온 반응제어 자기치유 기술 개발</td></tr>
<tr><td>연구개발성과
(핵심성과)</td><td colspan="5">[2세부] 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
❍ 중합반응 제어형 내열화 콘크리트 기술 개발
– 시멘트 콘크리트의 반응 메커니즘 및 모델링 기술
– 고유동/고강도 무시멘트 콘크리트 제조 기술
– 표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술
– 수축저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술
❍ 유해이온 반응제어 자기치유 기술 개발
– Cl^- 이온 고정 원천소재
– CO_2 고정 원천소재
– SO_4^{2-} 이온 고정 원천소재</td></tr>
<tr><td>활용계획 및
기대효과</td><td colspan="5">[활용 계획]
• 원전, 터널, 지하구조물 등 유지보수가 어려운 사회기반 시설물에 활용
• 다양한 구조물에 활용 가능한 기능성 건설 소재의 생산성 향상과 적용기술 개발에 활용 가능
• 복합 열화로 지속적인 손상이 발생하는 도로 포장 콘크리트에 활용
• 친환경 프리캐스트 제품 또는 레미콘, 높은 내열화 성능이 요구되는 구조물에 반응제어형 자기치유 콘크리트 활용
[기대효과]
• 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고 수준 기술 확보를 위한 초석 마련
• 자기치유형 기술을 접목함으로써 기존 친환경 콘크리트의 성능한계를 극복하고 건설 현장에서의 실용화 가능성 증대
• 자기치유형 친환경 콘크리트 개발을 통하여 구조물의 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, $LCCO_2$ 30% 감소
• 균열 자기치유 기술 적용으로 성능저하가 발생하지 않으므로 지속가능한 콘크리트 구조물 건설 가능</td></tr>
<tr><td>중심어
(5개 이내)</td><td>반응제어</td><td>자기치유</td><td>친환경</td><td>중합반응</td><td>유해이온</td></tr>
</table>

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 국내외 기술개발 현황 ····· 11

3. 연구수행내용 및 성과 ····· 23

3-1. 연구수행 내용 ····· 23

3-2. 연구 성과 ····· 54

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 62

4-1. 목표 달성도 ····· 62

4-2. 관련 분야 기여도 ····· 67

5. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 71

6. 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 75

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 78

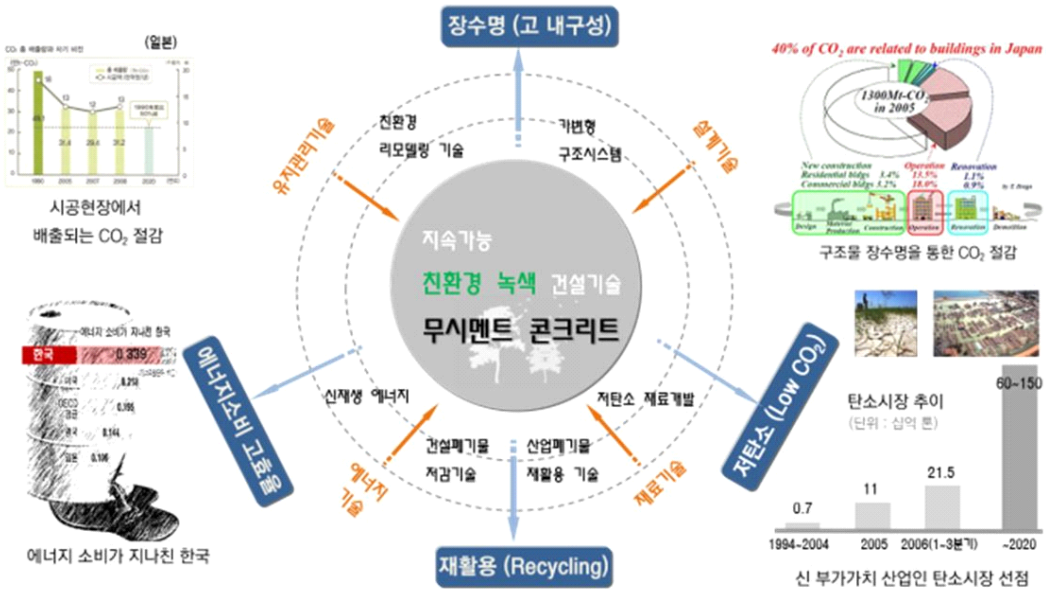
8. 국가과학기술종합시스템에 등록한 연구시설·장비현황 ····· 78

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 ····· 79

붙임. 참고 문헌 ····· 81

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 최종 목표



○ 친환경 건설재료 기술경쟁력 강화

- 무시멘트 결합재의 반응제어 기술을 통해 기존 무시멘트의 성능한계를 극복, 향후 건설 현장에서의 실용화를 위한 토대를 구축하고자 함.
- 무시멘트의 성능개선, 건설재료의 이산화탄소 배출량 감소를 통해 최종적으로 생애주기비용(LCC) 30% 감축을 목표로 함.

○ 지속가능 구조재료 연구 인프라 구축

- 미래시장 선점 및 세계 선도를 위한 기술 개발을 위하여 기반 구축을 목표로, 관련 첨단 건설재료 분야 전문 연구인력 양성, 특화된 교육프로그램, 특정 장비구축 등 연구 인프라 구축
- 또한 산학연 중심의 실용화 컨소시움을 통하여 건설재료 분야의 실사용자의 니즈와 이에 부합하는 연구개발 및 적용을 통해 제품 및 기술의 실용화를 위한 효율적인 컨소시움 운영이 꼭 필요하며, 이를 통하여 관련 분야 산업의 활성화를 도모하고자 함.

○ 2030 국가 온실가스 로드맵 수정안(2018) 대응

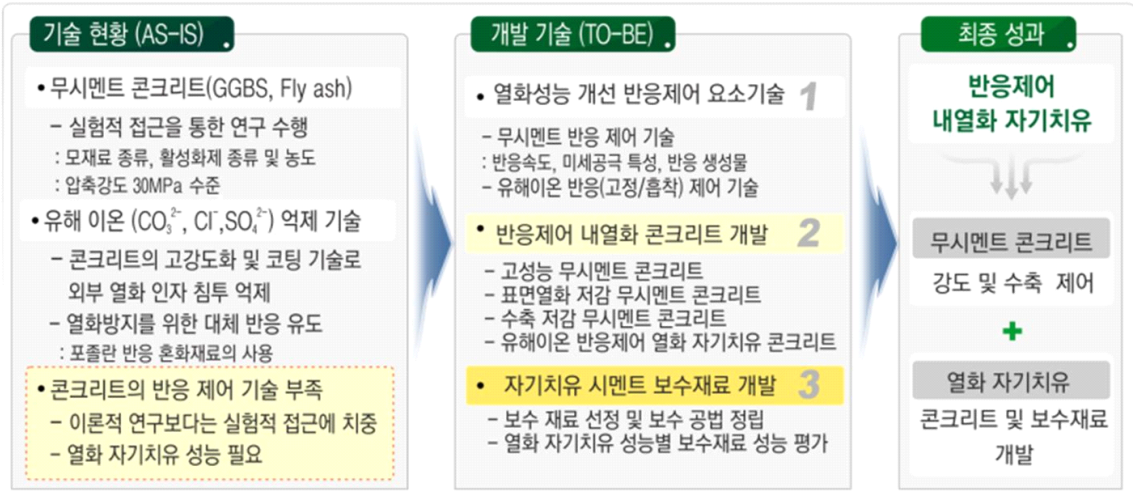
- 우리나라는 2030년까지 국가 전체 온실가스 배출량을 2030년 배출전망치(BAU)의 37%까지 감축시키는 것을 목표로 설정함.
- 기존 발표된 '기후변화대응 기본계획 및 로드맵'('16.12)을 수정하여 '2030 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위한 기본로드맵 수정안'('18.07)을 최종 확정함.
- 이로 인해 국내 감축량은 기존 2억1,880만톤에서 2억9,860만톤으로 7,890만톤(36.5%)늘어 났으며, 배출량이 많은 철강, 시멘트, 건설업계는 로드맵에 제시된 감축 목표량을 맞추기 위해서는 생산량 자체를 줄여야 하는 부담을 안고 있음.
- 산업부산물의 고부가가치화 및 온실가스 감축을 위해 무시멘트 콘크리트의 실용화가 필요함.

나. 연구개발의 개요

○ 본 연구개발 과제는 '자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발 과제'의 세부과제로써 '친환경 콘크리트 기술개발'에 중점을 두고 무시멘트 콘크리트의 실용화를 목적으로 연구를 진행함.

○ 기존 무시멘트 콘크리트 기술의 유동성, 내구성 및 재현성 문제를 극복하기 위해 무시멘트의 반응제어 및 콘크리트 유해이온 억제(차단) 기술을 개발하고자 함.

○ 이를 통해 최종성과는 무시멘트의 성능을 개선하고 콘크리트 및 보수재료 개발을 통해 무시멘트 콘크리트의 실용화/제품화를 도모하고자 함.



○ 본 연구개발과제인 "반응제어형 자기치유 콘크리트 기술개발"은 중합반응 제어와 유해이온의 반응제어 기술을 통해 고내구성 내열화 무시멘트 콘크리트 개발을 최종목표로 하였으며, 이를 달성하기 위한 핵심 세부목표는 다음과 같음.



다. 연구개발의 필요성

(1) 연구개발과제의 추진배경 및 목적

① 연구개발과제의 추진배경

- 급격히 변화하는 건설재료 시장에서 **<u>미래형 건설 청정소재에 대한 국내 요소기술 및 확보 전략이 미흡</u>**한 상태임.

  : 로우테크(Low-tech) 이미지 탈피 해외시장 견인을 위한 첨단기술(Bio/Nano/Eco Tech.)을 접목한 새로운 개념의 건설재료 기술전략 필요

  : 급변하는 콘크리트 재료 시장은 '80~90'년대 고성능 개념에서 '00~10'년대 지속가능 및 친환경 콘크리트로 패러다임의 변화 후 새로운 개념의 콘크리트에 대한 개발요구 증대

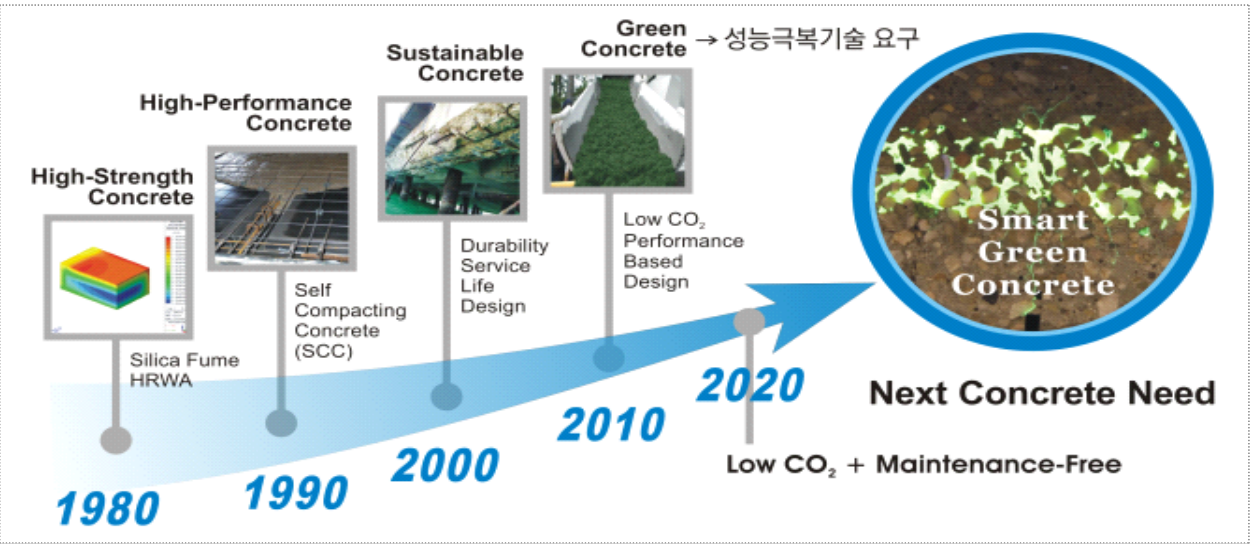


그림 1.1 시대별 콘크리트 기술 발전 변천사

② 연구개발과제의 추진목적

『자기치유형 친환경 콘크리트 개발』기술은 세계 최고 수준의 첨단 하이테크 기술을 접목한 자기치유 성능을 이용하여 지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공/유지관리 비용 최소화를 위한 콘크리트 개발 기술

- 첨단 하이테크 기술 : 바이오(Bio), 나노(Nano), 폴리머(Smart-Polymer) 등의 새로운 소재의 기능을 활용하여 콘크리트에 친환경성과 자기치유 성능을 부여하는 기술
- 자기치유형 친환경 콘크리트 : 외부의 인위적 행위 없이 스스로 균열 및 열화를 치유하여 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, 생애주기 이산화탄소 배출량($LCCO_2$) 30% 감소를 달성할 수 있는 지속가능 콘크리트



그림 1.2 연구개발 추진 목적

(2) 연구개발의 중요성

① 기술개발의 필요성

- 시멘트·콘크리트 산업의 지속적인 온실가스 감축을 위한 국제적 니즈에 대응 필요

※ 시멘트 산업은 우리나라 전체 온실가스 배출량의 7%와 에너지 소비량의 4%를 차지 (‘콘크리트와 환경’, 한국콘크리트학회, 2010)

: 시멘트 사용량 감소를 통한 ‘친환경 콘크리트 개발’에 대한 연구가 다수 수행되었지만, 친환경 콘크리트의 성능한계로 인해 건설시장에서 외면당하는 상황으로, 친환경 콘크리트의 성능한계를 극복할 수 있는 새로운 기술개발 필요

※ 친환경 콘크리트의 성능한계 : 조기강도 확보 미흡, 체적변화, 탄산화 등의 내구성 확보 미흡

- 무시멘트 콘크리트의 실용화에 가장 적합한 기술

: 본 과제에서 진행하는 분체형 무시멘트 결합재 기술은 시멘트와 같이 지대포장 및 장기보관이 가능하며, 레미콘 배합 시 기존 설비(사일로 등)를 그대로 활용할 수 있음.

※ 기존 무시멘트 기술은 반응성 확보를 위해 고농도 액상형 자극제(강알칼리 용액)를 사용하였으나, 이는 콘크리트 배합설계의 어려움과 급결 및 미세균열 등 다양한 문제가 발생함.

: 분체형 무시멘트 결합재는 콘크리트 설계기준 정립 및 배합모델 개발 시 시멘트 콘크리트 기준의 참고 및 응용이 이하며, 큰 수정 없이 변수 값 제정만으로 기존 콘크리트 배합설계 프로세스를 그대로 이용할 수 있음.

- 친환경 건설재료 분야 기술선점

: 전세계적으로 고로슬래그 기반 무시멘트 결합재의 성능발현 및 열화원인 분석은 입증되었으나 아직까지 무시멘트 결합재의 반응메커니즘이 완벽하게 정립되지 않았음.

: 기존 연구의 틀을 벗어나 반응메커니즘 분석 및 이를 활용한 고로슬래그 개질과 결합재 혼합 시스템 개발 등의 반응제어 기술은 무시멘트 기술의 세계최고 수준 및 표준이 될 수 있

으며, 현장 적용 및 실용화에 가장 적합한 시멘트 대체 기술로써 무시멘트 분야 기술의 세계 선도를 위해 이에 대한 연구가 필요함.

② 정부지원의 필요성

- CO_2 배출이 향후 비용상승 요인으로 작용하는 환경에서 콘크리트 산업은 조기에 탄소시장에 진출하는 것이 바람직함. 배출권시장 관련 다양한 파생상품에 주목하고 異업종간 제휴를 통해 시멘트 및 천연골재 대체를 통하여 탄소시장을 수익 창출의 기회로 삼을 전략마련이 필요함. 신기술 도입을 통한 배출량 감축효과는 당해 연도에 그치지 않고 상당기간 지속될 뿐만 아니라 새로운 이익창출의 중요한 기회로 작용하기 때문에 무시멘트 기술에 대한 선점이 국제적으로 매우 중요함.

- 본 과제는 자기치유 및 친환경 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고수준 기술 확보를 위한 초석 마련을 위한 개발과제임.

: 세계시장 선도형 성장과 미래선도 창의형 연구개발에 부합함.

: 자기치유 및 친환경 콘크리트 기술은 건설 패러다임을 바꾸는 획기적인 기술로, 유럽을 중심으로 대규모 연합 프로젝트 등을 통해 기술도약을 꾀하고 있는 실정임.

※ 따라서 원천기술 확보를 통한 세계적 기술선점을 위해서는 자기치유 기술에 대한 집중적이고 효율적인 연구개발 지원이 필요함.

- 지원시기 등이 늦어질수록 선진국과의 기술격차 증대로 국내 기술은 추격 위치에서 벗어나기 힘들어지며, 향후 관련기술의 해외 의존도 증대가 불가피함.

: 정부 주도의 집중적인 연구지원이 확보되지 않을 경우, 핵심기술에 대한 집중적인 투자가 부족하여 세계적인 기술 경쟁에서 한걸음 후퇴하는 결과를 초래할 것으로 보임.

- 정부차원의 집중적인 연구개발 투자로 다른 분야 또는 기술보다 단기간에 세계적인 원천기술(World Best Technology) 확보가 가능한 분야로 건설 산업의 새로운 성장 동력원이 될 수 있음.

: 해당기술 분야는 바이오, 나노, IT 기술과의 융복합 기술로 다른 산업(신소재, 항공재료, 선박재료, 해양환경, 도시환경 등)과의 연계를 통한 사회적, 경제적 파급효과가 매우 커 창조경제에 크게 기여할 것으로 예상됨.

: 해당 분야는 연구개발 뿐만 아니라 관련 교육프로그램과 연계한 전문가 인력양성, 장비·시설 등의 기반 인프라 구축이 병행되어야 하기 때문에 정부 지원이 필수적임.

(3) 타산업 연계 및 국제협력

① 타산업과의 연계 및 협력

- 본 연구개발은 건설재료 분야를 기반으로 화학, 바이오 등의 기술을 융복합하여 첨단 자기치유형 친환경 콘크리트 기술을 개발하고자 하며, 이를 통해 세계시장 선도가 가능할 것으로 판단됨.

(4) 연구개발 단계

- 본 연구개발의 기술 수준 TRL2 ~ TRL6 으로 아래와 같음

[2-1] 중합 반응 제어형 내열화 콘크리트 기술 개발	TRL 3 ~ TRL 6
[2-2] 유해이온 반응 제어 자기치유 콘크리트 기술 개발	TRL 2 ~ TRL 5

- 본 연구개발과제의 연차별 개발내용은 아래와 같으며, 실용화 계획은 고내구성 친환경 콘크리트, 고유동/고강도 무시멘트 콘크리트, PC용 수축저감 무시멘트 콘크리트 및 시멘트계 보수재 실용화 기술을 핵심성과로 계획하고 있음.



라. 연구개발의 세부내용 및 범위

(1) 1차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(전남대학교 산학협력단) : [2-1] 중합반응 제어형 내열화 콘크리트 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
2세부 -협동- 전남대	무시멘트 반응 메커니즘 분석	• 모재료 특성(유리화도, aging 기간)에 따른 반응특성 평가 • 활성화제의 특성(액상/분말)에 따른 반응 특성 평가 ※ 반응특성 : 수화열, 수축률, 압축강도

(2) 2차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(전남대학교 산학협력단) : [2-1] 무시멘트 반응특성 규명

- 공동연구기관(한양대학교 에리카산학협력단) : [2-2] 열화억제 메커니즘 규명 및 유해이온 반응 원천소재군 설정

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
2세부 -협동- 전남대	무시멘트의 반응 메커니즘 분석	• 무시멘트 수화도 측정 기술 정립 및 수화도 측정 - 유리화도(optical & rietveld) - 수화도(고정수량 직접 측정) • 무시멘트의 초기 수화 반응열 측정 • 내부 수화물/중합체 반응량 평가(정성/정량 분석, 화학정량식) • 무시멘트의 강도발현, 탄산화, 수축 등 성능인자의 민감도 분석
	무시멘트의 수축 특성 평가	• 무시멘트의 반응생성물과 화학 수축간 관계 분석 • 공극특성 및 공극연결도와 수축관계 분석
	무시멘트의 수축 메커니즘 정립	• 무시멘트의 수축 메커니즘 정립 • 무시멘트의 수축 예측식 제안
2세부 -공동- 한양대	콘크리트 구조물 열화 메커니즘 규명 및 열화억제 기술 정립	• 염해, 탄산화, 황산염 침식 모델 정립 • 콘크리트 구조물 열화억제 기술 분석 • 열화 환경에 따른 내구성 DB 구축 및 분석
	유해이온 반응제어 원천 소재군 설정 (Cl^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-})	• 유해이온별 화학적 반응제어 메커니즘 정립 • 타 분야 유해이온 반응제어 소재군 탐색
	유해이온 반응제어 원천소재 반응제어량 정량 분석	• 전위차 적정법을 이용한 수용액 내 잔존 Cl^- 이온 고정량 분석 • HCl 적정법을 이용한 수용액 내 잔존 CO_3^{2-} 이온 농도변화 분석 • 이온크로마토그래피(IC) 방법을 이용한 수용액 내 잔존 SO_4^{2-} 농도 분석

(3) 3차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(전남대학교 산학협력단) : [2-1] 무시멘트 목표 성능/반응 제어 기술 개발

- 공동연구기관(한양대학교 에리카산학협력단) : [2-2] 유해이온 반응제어 물질 선정 및 대량 제조기법 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
2세부 -협동- 전남대	무시멘트 반응 모델링 기술개발	• 무시멘트의 성능인자별 반응 모델링 • 강도발현/탄산화/수축 영향인자 분석 • 변수 분석 및 반응모델 민감도 분석
	무시멘트 초기 반응속도 및 반응유지 시간 제어 기술개발	• 활성화제의 이온화 속도 평가 – 모재료-활성화제 비, 물-결합재비 (ICP 분석) • 활성화제의 이온화 속도와 모재료의 유리질 용해 속도 관계 정립 • 활성화제 조합에 의한 금속이온 종류/농도 제어 – 활성화제 조합 (ICP 분석) • 배합수의 금속이온 종류/농도와 모재료의 유리질 용해 시간 관계 정립
	모재료 개질을 통한 탄산화 저항성능 향상	• 활성화제 종류에 대한 탄산화 특성 평가 – 탄산화 속도, 탄산화 후 강도/공극률 변화 – 탄산화 후 2차 생성물 특성 평가 • 탄산화 메커니즘 정립 • 모재료 구성비에 따른 탄산화 저항성 평가 • 내 탄산화형 모재료 구성비 선정 • 무시멘트에 최적화된 메카노케미컬 합성 공법 개발
	무시멘트의 건조수축 제어 기술개발	• 건조수축에 유리한 공극 구조 제어 기술 – 결합재의 입도크기 조절 • 건조수축에 유리한 반응생성물 생성 제어 기술 – 활성화제 종류 및 조합, 이온량 조절
2세부 -공동- 한양대	유해이온 반응제어 물질 선정 및 성능 기술 개발	• 콘크리트 환경(pH 10~13) 최적 반응제어 물질 선정 • 반응제어 물질 합성법 및 제조 방법에 따른 최적 성능 도출
	선정 유해이온 반응제어 원천소재의 대량제조기법개발	• 반응제어 물질 대량 생산 시스템 개발 • 대량 생산 시 반응제어 물질 품질 분석 – XRF, XRD, SEM-EDS, 용해도 등 • 합성 제조 방법, 제조 단가 및 경제성 분석
	선정물질 적용 시멘트 페이스트 / 모르타르 레벨 유해이온 억제 성능 정량평가	• 선정물질 적용 시멘트 페이스트 / 모르타르의 유해이온 고정, 흡수, 반응량 정량 분석(TG-DTA, XRF 등) • 선정물질 적용 시멘트 페이스트 / 모르타르 내구성능 평가

(4) 4차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(전남대학교 산학협력단) : [2-1] 무시멘트 목표 성능/반응 최적화 기술 개발
- 공동연구기관(한양대학교 에리카산학협력단) : [2-2] 유해이온 반응제어 콘크리트 배합설계 및 성능 평가

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
2세부 -협동- 전남대	무시멘트 실용화 기술개발	• 고유동/고강도 SCC 콘크리트 배합비 개발 – 압축강도 40 MPa 이상, 슬럼프 플로우 650 mm 이상
	무시멘트 콘크리트 자기치유 기술 적용성 평가	• 무시멘트 콘크리트의 자기치유 성능 평가 – 자극제 배합비에 따른 자기치유 성능 비교 및 평가
	내탄산화형 혼화재 개발	• 탄산화 및 탈수 등 표면열화 요인 분석 – 표면열화에 의한 물리적/내구적 성능 변화 평가 • 내탄산화형 혼화재(비수경성 CO_2 반응형) 선정/개발 • 표면열화 저감을 위한 무시멘트 PC 배합비 개발 – 무시멘트 고온 양생방법 개발 (정치시간, 승온속도, 양생시간 등)
	무시멘트의 자기수축 제어 기술	• 반응속도에 따른 자기수축 특성 – 반응생성물의 시간 의존적 상변화 특성 평가 • 반응속도제어를 통한 자기수축 제어 기술 – 활성화제 종류 및 조합, 혼화재 최적 배합 도출 – 모재료의 특성에 따른 자기수축 제어 기술
2세부 -공동- 한양대	유해이온 반응제어 소재 혼입 시멘트 복합체 배합 및 물성 평가	• 선정물질 적용 콘크리트의 배합설계 – 선정물질 적용 콘크리트의 최적 배합 선정 • 선정물질 적용 콘크리트의 물성평가 – 슬럼프 플로우, 압축강도 등
	유해이온 반응제어 소재 혼입 콘크리트의 유해이온 억제성능 평가(촉진시험 및 폭로시험)	• 선정물질 적용 콘크리트의 유해이온 고정, 흡수, 반응량 정량분석 – TG-DTA, XRD, XRF 등 • 선정물질 적용 콘크리트의 내구성능 평가 – NT Build 492, KS F 2584 등 • 콘크리트 내 철근의 전기 화학적 안정성 평가

(5) 5차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(전남대학교 산학협력단) : [2-1] 반응제어 무시멘트 콘크리트 제조 기술 개발
- 공동연구기관(한양대학교 에리카산학협력단) : [2-2] 유해이온 반응제어 보수재 및 보수 시스템 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
2세부 -협동- 전남대	고유동/고강도 콘크리트 제조기술 개발	• 고유동/고강도 무시멘트 콘크리트의 내구성 평가 – 탄산화 저항성, 동결융해 저항성, 화학 저항성 • 배합설계 모델 개발 – 경제성 및 탄소저감 평가
	표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조기술 개발	• 모재료 개질 및 내탄산화형 혼화재에 의한 표면열화 저감형 콘크리트 배합 기술 개발 • 표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트의 물리/내구적 성능 평가 • 무시멘트 PC 제품 개발 – 원심력 다짐용 배합비 개발 (흄관, 파일 등 2차제품 배합비) – 탈형강도 30 MPa 이상 PC제품 개발
	수축 저감형 무시멘트 콘크리트 제조기술 개발	• 기술 실용화를 고려한 수축 저감형 결합재 개발 – 자기/건조 수축 결합재 및 혼화재 배합 최적화 • 수축저감형 무시멘트 콘크리트의 물리/내구적 성능 평가
2세부 -공동- 한양대	반응제어 소재의 대량 제조 기술 개발	• Rotary kiln을 이용한 반응제어 소재의 대량 제조 (Pilot-scale) • 제조된 반응제어 소재의 조성률 분석
	유해이온 반응제어 물질 혼입 시멘트계 보수재 개발	• 유해이온 반응제어 물질 혼입 보수재의 배합 및 성능 평가 • 개발된 보수재의 요구 성능 평가 – 압축강도, 휨강도, 부착강도, 건조수축 등
	개발된 보수재료를 활용한 보수 시스템 개발	• 반응제어 소재가 혼입된 보수재료의 사용 매뉴얼 및 보수 시스템 구축 • 개발된 보수재료를 이용한 보수 시스템의 경제성 및 VE 평가

2. 국내외 기술개발 현황

가. 기술개발 동향

(1) 친환경 콘크리트 기술

- 시멘트 대체를 위한 연구들은 2000년대의 시작과 함께 급격히 증가하고 있으며, 호주, 미국, 한국 및 스페인을 중심으로 논문들이 발표되고 있음.

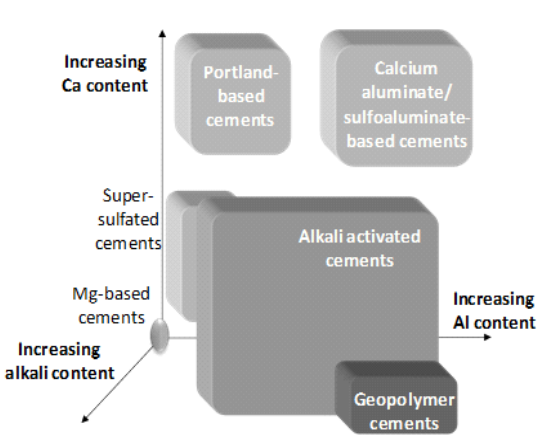
  : 시멘트 사용량 감소를 통한 친환경 콘크리트의 연구는 크게 비시멘트 콘크리트(HVSCM)와 무시멘트 콘크리트로 구분됨.

- 시멘트 대체를 위한 알칼리 이온의 사용은 1930년 Kuhl이 고로슬래그 경화기구를 제시한 이후 1979년 Davidovits(프랑스)가 카올린나이트, 석회석 및 돌로마이트 혼합광물들의 중합반응(Polymerization)에 의한 제올라이트 구조인 지오폴리머의 제시와 함께 점차 주목을 받기 시작하였음.

- 국내에서도 다양한 알칼리 활성화제에 따른 물리적 특성에 대한 성능을 확인하는 연구를 진행하였고, 이후 “탄소저감형 콘크리트 구조재료 개발”과제를 통해 현장 적용이 가능한 알칼리 활성 슬래그 콘크리트 배합 기술을 개발함.

  : 알칼리 활성화제 종류에 따른 알칼리 활성 슬래그 콘크리트의 강도 및 내구성능에 관한 연구를 통해 전남대에서 고강도 알칼리 활성 슬래그 콘크리트 기술을 개발함.

  : 강알칼리 계열의 활성화제(Na_2SiO_3, NaOH 등)를 사용한 알칼리활성 슬래그 콘크리트의 초기 작업성을 개선하기 위해 성균관대에서 알칼리활성 슬래그용 화학혼화제를 개발함.



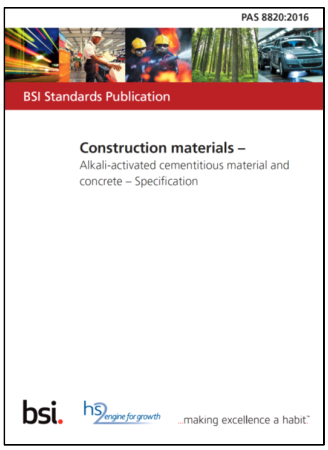


그림 2.1 Traditional and non-traditional cements, and published specification on alklai activated cementitious materials in UK (J.L. Provis & J.S.J. van Deventer (eds.), State of the Art Report of RILEM TC 224-AAM, 2014)

(2) 무시멘트 콘크리트 기술

- 무시멘트 콘크리트 기술은 거의 대부분 알칼리 용액에 의한 규산-칼슘-알루미나계 무기물질의 반응을 기본으로 하며 이들은 알칼리활성물질(Alkali activated materials, AAMs)이라고 함. 크게 슬래그와 같이 자경성 수화물 생성 전구체(precursor) 자체가 수화물을 형성하도록

유도하는 방법과, 플라이애시와 같이 자경성 수화물은 생성하지 못하지만 알칼리 용해에 의한 중축합(Polymerization)으로 인해 경화에 협력하는 방법으로 나눠짐. 경우에 따라 후자를 Geopolymer라고 함.

: 전세계적으로 수많은 연구기관이 연구해 왔으나 대표적으로 영국 University of Sheffield의 John L. Provis 교수 연구진에서 이에 대한 이론적 기반을 마련하였음. 현재 호주 및 인도 등의 국가에서 일부 실용화된 AAMs 제품이 출시되고 있으며, 실용화를 확대하기 위해 꾸준히 연구중임.

- 무시멘트 콘크리트 기술은 기존 OPC와 비교하여 친환경성 이외에도 명확한 장점과 단점이 있는데, OPC 대비 장점을 특화시키는 방향으로 이론적, 실용적 연구가 진행되고 있음.

: 무시멘트 콘크리트는 1) 저발열성, 2) 월등한 내황산염 및 내알칼리골재반응성, 3) 우수한 염소침투 저항성, 4) 낮은 pH 용출량 등의 장점을 활용하여 내황산계 지반개선재료, 방수성 그라우트재료, 기초보강재 및 P.C 흄관 재료 등의 활용이 가능하므로 이에 대한 실용적 연구가 진행중임.

: 한편 무시멘트 콘크리트의 단점인 1) 낮은 내탄산화 및 내동결융해저항성, 2) 약한 마모저항성, 3) 큰 수축량 등을 극복하기 위한 연구가 동시에 진행되고 있음.

- 무시멘트 콘크리트의 원천기술에 대한 연구는 주로 1) Atomic chemistry (내부 화학조성에 따른 실제 생성 수화물 자체에 대한 연구, 열역학적 모델링 포함), 2) Robustness (화학적 구성비 및 양생 조건 등에 따른 성능의 발현 및 안정성 연구), 3) Application and specification (실용화를 위한 시방서 및 규정 제정, 실용화 분야 확대) 등으로 나누어짐.

: 국내의 경우 건설기술연구원, KCL 및 여러 대학 등의 기관에서 이와 관련된 기술에 대한 수 많은 연구를 해 왔으나, 화학적 반응과 이론적 안정성에 대한 연구가 아니라 대부분 1차적 실용화에 대한 연구였기 때문에, 이론적 기반이 없어 연구결과의 확대가 어려웠음. 하지만, 최근 5년간 국내 일부 기관에서 이에 대한 이론적 연구를 시작함.

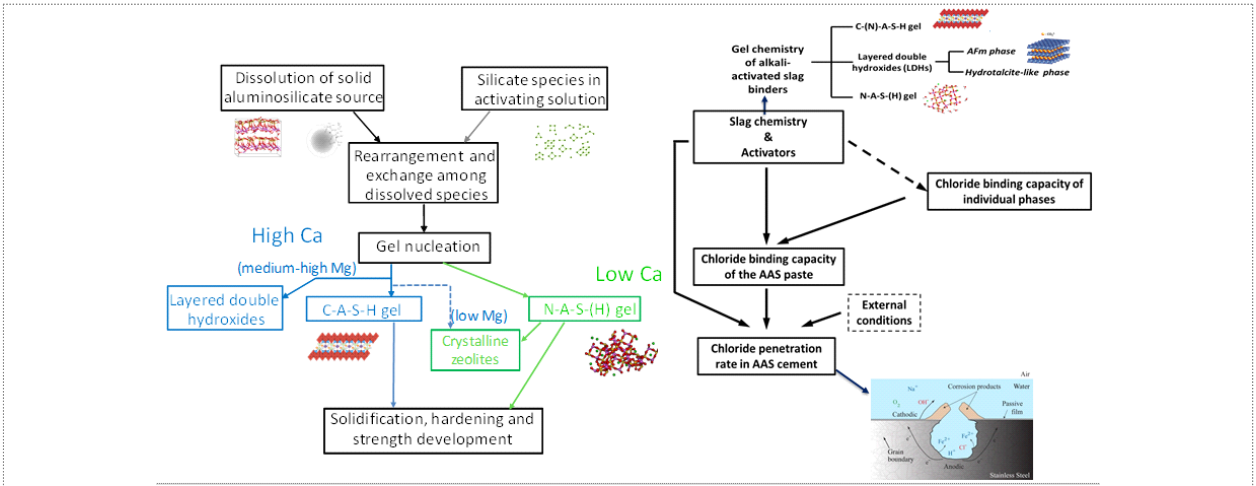


그림 2.2 Theoretical approaches on reaction and durability of AAMs (J.L. Provis & S.A. Bernal, Annual Review of Materials Research, 2014, 44: 299-327)

나. 기술동향 분석

(1) 연구논문 동향

① 소재별 논문 동향

- 시멘트 대체를 위한 연구는 크게 알칼리 활성 재료, 그리고 지오폴리머에 대한 연구로 크게 나눌 수 있는데 현재 2020년까지 발표된 논문의 수는 두 종류 각각 모두 5,000 편 이상으로 검색되며 이들이 일부 중복됨을 고려할 때 총 발표논문 수는 약 7,000~8,000 건으로 파악됨.

  : 연차별로 정리한 결과 매년 발표되는 논문 수는 꾸준히 증가하고 있는 점을 감안할 때, 이후 본 기술이 전세계적으로 충분히 연구될 가치가 있는 분야임이 확인됨.

- 검색된 위의 두 가지 키워드의 논문 수 동향은 매우 다른 특성을 나타내는데, 먼저 알칼리 활성재료의 경우, 전체 논문의 약 35 % 이상이 2013년 이전에 발표된 반면, 지오폴리머의 경우 약 3% 만이 2013년 이전에 발표된 것임.

  : 알칼리 활성재료의 경우 과거 러시아 및 벨기에 등 공산국가에서 1940년대부터 건설용 구조재료로 사용되었었고, 건설분야 이외에도 환경분야에서 흡착용 필터 등의 기초소재에 대한 연구가 진행되었으며, 본격적인 알칼리 활성재료 연구가 1990년 초중반부터 진행되어 왔기 때문임.

  : 반면, 지오폴리의 경우 접근기술의 난이도가 높았기 때문에, 2012년 이전에는 연구논문이 거의 발표되지 않다가 이후 점차 논문 발표 수가 증가하여 2019년 이후에는 알칼리 활성재료보다 50% 많은 수의 논문이 매년 발표되고 있음.

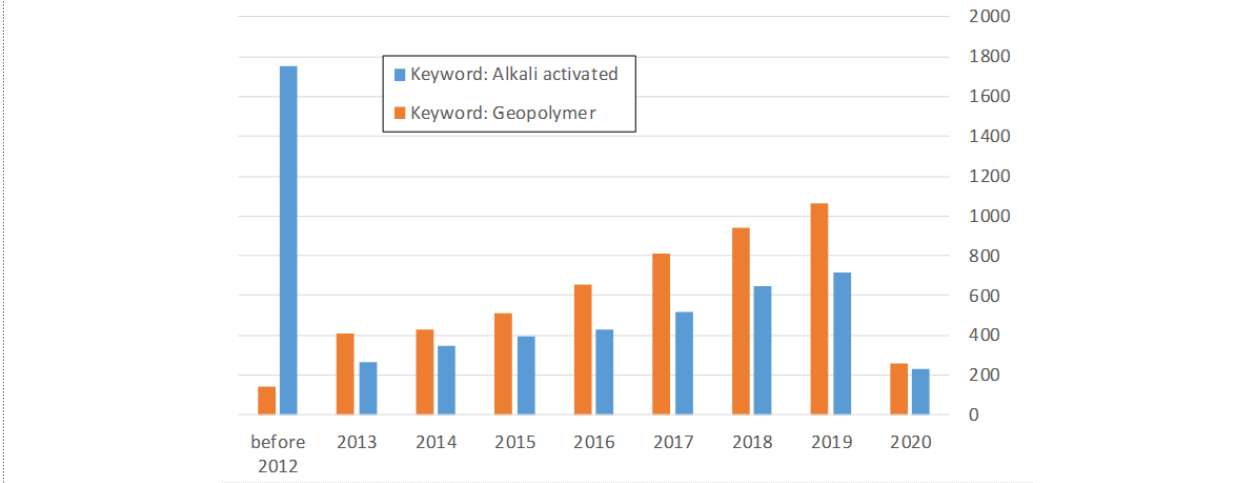
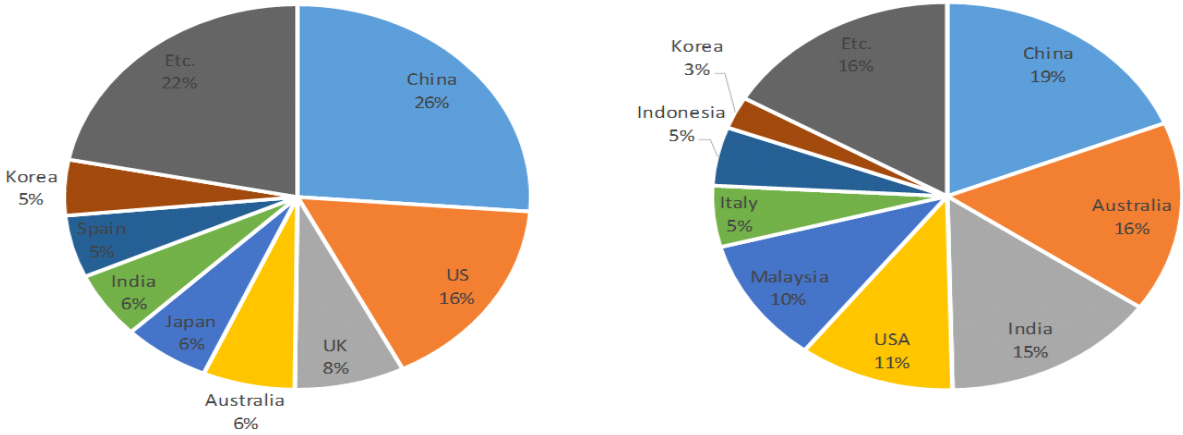


그림 2.3 무시멘트 관련 년도별 논문 수(출처: Scopus)

- 무시멘트 관련 논문은 중국, 호주, 미국, 스페인 등을 중심으로 논문들이 발표되고 있으며, 우리나라의 무시멘트 콘크리트에 대한 국제 논문집 발표수는 세계적으로 약 3~5%로 10위권 내외임. 또한 시멘트 대체를 위해 사용하는 무시멘트의 원재료(source material)는 주로 고로슬래그와 플라이애쉬로서 산업부산물들의 활용이 높음.

: 현재까지 대부분의 논문들이 수화반응 자체 또는 반응에 의한 성능 발현에 대한 것이므로, 현재 활용성에 대한 연구결과는 전세계적으로 초기 수준임을 확인함.



(a) alkali-activated (b) geopolymer

그림 2.4 국가별 무시멘트 논문 발표 비율 (출처: Scopus)

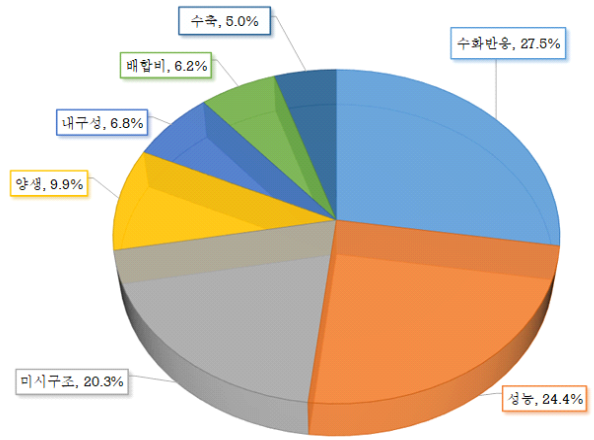


그림 2.5 무시멘트 논문의 대표적 주제 분석 (출처: Scopus)

② 기술수준 분석결과

- 위 분석 논문 중 최근 2년간 출판된 논문들의 내용을 분석한 결과, 시멘트 대체를 위한 결합재의 국내 연구는 세계 최고수준의 약 80% 수준으로 평가됨.

  : 대부분의 논문들이 수화반응 고 그로인한 성능 발현에 대한 것이지만, 이 분야 세계최고 기관들 중 영국과 EU 국가들의 연구의 경우, 아직 국내에서는 활발하게 연구되지 않은 1) 수화반응 모델링, 2) 다양한 최신기법을 사용한 수화물 및 성능 분석, 3) 기술의 상용화를 위한 시방서 관련 연구, 4) 무시멘트 결합재의 새로운 활용분야 개척에 대한 연구결과들을 발표함.

- 본 연구과제를 연구를 통해 1) 모델링 기술 중 일부를 국산화 및 개선하였으며, 2) 관련 콘크리트 배합설계기법에 대해 제시하였을 뿐 아니라, 3) 일부 조건에서 실용화 실적을 확보하였음.

표 2.1 우리나라와 선진국과의 기술수준 분석 요약

주요 성능지표	국내기술수준	세계최고수준 (보유국/보유기업)	기술격차 (국내/ 세계최고)
시멘트 대체 결합재 배합 특성	• 특허 및 기술 보유 • 소요 강도에 따른 결합재 배합기술 • 주로 고로슬래그 기반 • 수화생성물 평가 • 수화기구 평가 미흡	□ 호주 및 영국, 미국 • 특허 및 고유 기술 보유 • 주로 플라이애쉬 기반 • 수화기구 평가 중점 • 무기화학분야에서 선도	연구 전: 60% 연구 후: 80%
무시멘트 콘크리트 배합 및 특성	• 특허 및 기술 보유 • 탄소저감 기반 콘크리트 배합 기술 연구 진행 중 • 콘크리트 역학적 특성 연구 • 레미콘 배합기술 미흡	□ 미국 및 중국의 다수 기관 • 특허 및 기술 보유 • 고로슬래그 기반 콘크리트 • 배합설계 개념 제시 • 콘크리트 역학적특성 연구 및 레미콘 타설 성공(인도)	연구 전: 60% 연구 후: 80%
시멘트 대체 콘크리트 제품 실용화 연구	• 특허 및 기술 보유 • 블록 등 제품 실용화 사례 기술 보유 • 구조체 적용 실적 미흡	□ 미국, 호주, 인도 • 모르타르 제품 개발 및 상품화 • 도로 및 오일탱크에 시범 적용	연구 전: 60% 연구 후: 80%
무시멘트 콘크리트 규격 및 설계기준	• 단일배합당 배합설계기준만 존재 • 관련 규격 및 설계기준 부재	□ 영국 • British Standards Institute Publicly Available Specification (PAS) 8820 :2016 Alkali-activated cementitious materials, and concretes made from them (Bagged cement, ready-mix concrete, precast elements) 발표	연구 전: 10% 연구 후: 20%

(2) 지적재산권

- 본 기술은 산업부산물인 고로슬래그를 활용하여 시멘트를 100% 대체할 수 있는 알카리 활성 슬래그 결합재 및 콘크리트 배합 및 설계기술에 관한 것이며, 본 기술과 관련된 특허동향과 선행기술 분석을 위해서 고로슬래그를 이용한 결합재, 시멘트, 콘크리트 2차제품 등과 관련된 기술을 중점으로 조사하였고, 특허데이터베이스인 WIPS 및 KIPRIS 등을 활용하여 한국, 일본, 미국, 유럽 등의 국가를 대상으로 특허조사를 실시함.
- 본 분석에 적용된 검색 키워드는 Alkali activated 및 Geopolymer이며 검색된 특허에 대해서 전수검사를 통해 중복특허 또는 상용화 대상기술과 연관성이 낮은 특허 등 noise 특허를 제거하여 분석에 필요한 유효특허를 추출하여 분석을 수행함.

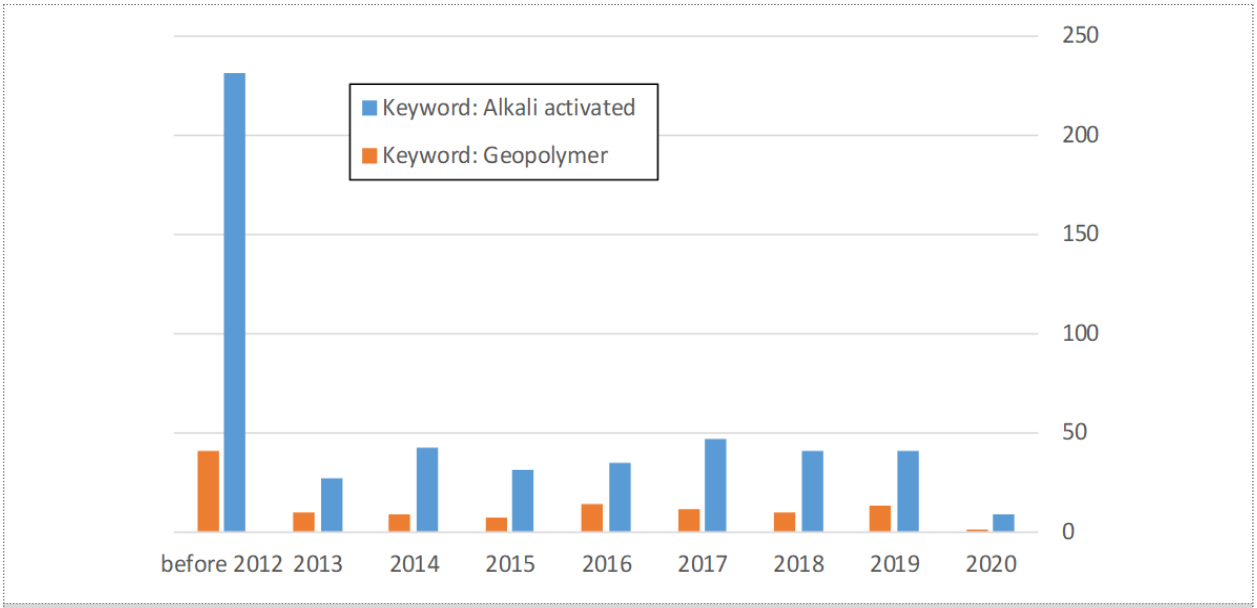


그림 2.6 무시멘트 관련 연도별 국내 특허 출원 수 (Alkali activated 504 건 및 Geopolymer 116건) (출처: KIPRIS)

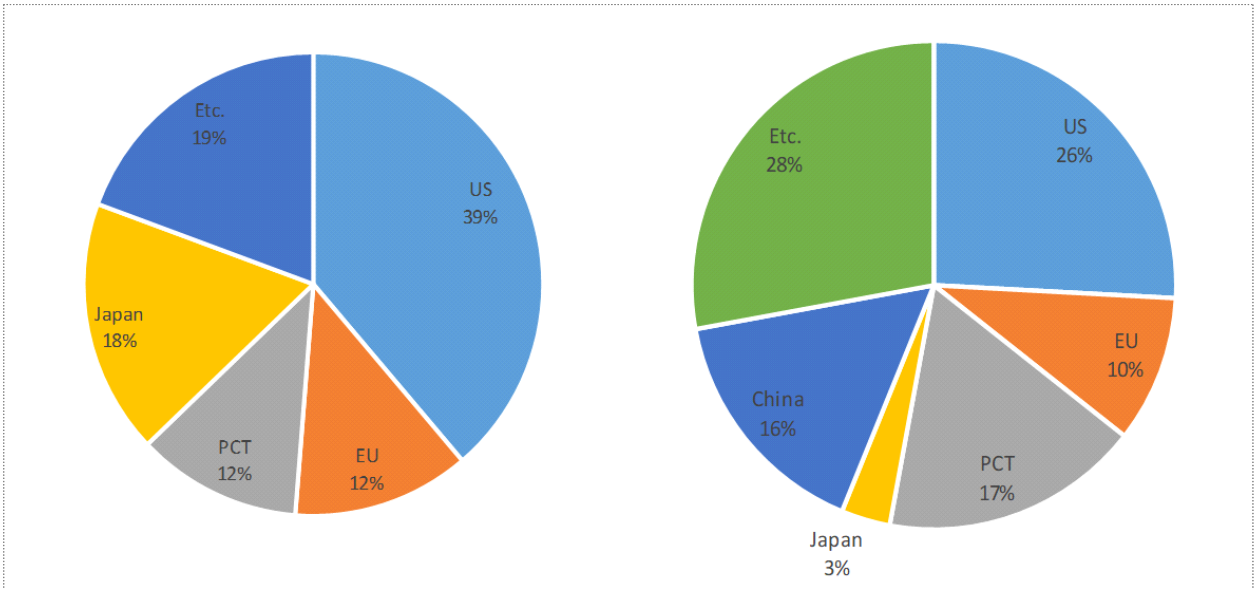


그림 2.7 국가별 무시멘트 논문 발표 수: (좌) alkali-activated (총 867,252건), (b) geopolymer (총 2,942건) (출처: KIPRIS)

- 상용화 대상기술과 관련하여 IPC 분류 기준으로 세부 분야별 특허동향을 살펴보면, IPC 코드 C04B(시멘트; 콘크리트; 인조석; 세라믹스; 내화물, 약 80%), C09K(그 밖에 분류되지 않는 응용되는 물질, 약 8%), E01C(도로, 경기장 또는 그와 유사한 것의 건설 또는 그 표면의 시공; 건설 및 보수용 기계 또는 보조 공구(눈이나 얼음을 굳게 하기도 하고, 정지(整地)하여 도로나 유사 표면을 형성하는 것, 약 4%), E02D(기초(基礎); 굴착(掘鑿); 축제(築堤)(특히 수공(水工)에 적합한 것, 약 3%) 등의 순으로 나타남.
- 무시멘트 세부 기술분야 중 20건 이상의 출원된 C04B, C09K, E01C, E02D 기술분야의 국가별 특허출원 동향을 살펴보면, 4개국 모두 무시멘트 조성물과 관련된 C04B 분야의 특허출원이 가장 활발한 것으로 분석되며, 중국과 EU, 미국의 특허가 가장 많은 것으로 확인됨.

- 상용화 대상기술과 관련된 무시멘트 기술 분야에 10건 이상의 특허를 출원하고 있는 주요 출원인은 대부분 일본 기업으로 조사되었으며, 일본의 DENKI KAGAKU KOGYO사가 가장 활발하게 지식재산권 확보 활동을 하고 있는 것으로 나타났고, 우리나라의 경우 전남대학교에서 무시멘트 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 이루어지는 것으로 나타남.
- 국가별 주요출원인 동향을 살펴보면, 한국의 경우 전남대학교, 일본은 DENKI KAGAKU KOGYO사, 미국은 Halliburton Energy Services사, 유럽은 DENKI KAGAKU KOGYO사가 주요출원인으로 나타났으며, 이중 일본의 DENKI KAGAKU KOGYO사는 자국뿐만 아니라 해외에서도 특허출원을 하고 있으므로, 특허출원 시 이들 기업의 특허를 면밀히 검토할 필요 있음.

표 2.2 무시멘트 기술 분야의 대표 주요출원인

순위	한국특허		일본특허		미국특허		유럽특허	
	출원인	건수	출원인	건수	출원인	건수	출원인	건수
1	전남대학교	17	DENKI KAGAKU KOGYO	19	Halliburton Energy Services	10	DENKI KAGAKU KOGYO	2
2	한국건설기술연구원	9	TAIHEIYO CEMENT	19	Roman Cement	5	Shinagawa Refractories	2
3	포스코	6	MITSUBISHI MATERIALS	17	ISG Resources	4	International Mineral Technology	2
4	이주형	6	JFE STEEL	15	E. Khashoggi Industries	4	Holderbank Financiere Glarus	2
5	최희용	5	UBE INDUSTRIES	15	CeraTech	4	PELT & HOOYKAAS	2
6	한국지질자원연구원	4	SUMITOMO METAL MINING	10	Kirkpatrick; William D.	3	Chichibu Onoda Cement	1
7	포항종합제철	4	KYOKADO ENG	10	Douglas Comrie	3	North American Refractories	1
8	쌍용양회공업	4	TAKENAKA KOMUTEN	6	Ceramatec	3	Mineral Resources Technologies	1
9	한일시멘트	3	SUMITOMO OSAKA CEMENT	6	DENKI KAGAKU KOGYO	2	Halliburton Energy Services	1
10	한국세라믹기술원	3	NIPPON STEEL CORP	6	Shinagawa Refractories	2	ENCI Nederland	1

- 한편 전세계적으로 10건 이상의 특허를 출원한 주요 출원인에 대한 세부기술별 출원동향을 살펴보면, 주요 출원인 대부분 C04B 분야에 특허활동을 집중하고 있는 것으로 나타남. 최다 출원인으로 1위를 기록한 일본의 DENKI KAGAKU의 경우 C04B 분야에 특허출원을 집중하고 있고 이외에 C01F, G21F 분야에도 특허를 출원하고 있으며, 2위를 기록한 한국의 전남대학교 역시 C04B 분야에 18건의 특허를 출원하여 동 분야의 연구개발에 집중되고 있는 것으로 분석됨.
- 무시멘트 분야의 기술발전 단계를 살펴보기 위해, 특허 인용 문헌 수 또는 특허 패밀리 수가 많은 특허를 추출하고, 이들 특허를 연도별로 나열하여 시계열 분석을 수행함.
- 1990년대에도 시멘트 분야에 친환경 조성물을 응용하는 기술이 개발되었으나 주요 원료로 시멘트가 이용된 것으로 분석되나, 2000년대 중후반에 들어서면서 시멘트를 전혀 사용하지 않는 무시멘트 또는 그린시멘트 기술이 한국을 중심으로 개발되었고, 2010년 전후에 관련 기업에서 특허출원이 진행된 점을 감안하면 2010년 전후에 무시멘트 제품이 시장에 출시된 것으로 파악됨. 무시멘트 분야의 연도별 전체 특허동향을 살펴보면, 거시적인 관점에서 연도구간별로 특허출원 건수의 증감이 반복되나, 1990년 초반 이후 완만한 증가세에 있다가 2009년을 최고점을 기록하여 최근 들어 특허활동이 활발히 진행되고 있는 것으로 나타남.
- 이러한 증가세는 웰빙 열풍에 따른 친환경 건축자재에 대한 관심 및 수요가 증가한데 기인한 것으로 해석되며, 특히 한국의 경우 정부에서 그린홈 사업의 추진에 따란 시멘트를 사용하지 않는 친환경 기술에 대한 니즈가 반영된 것으로 분석됨.

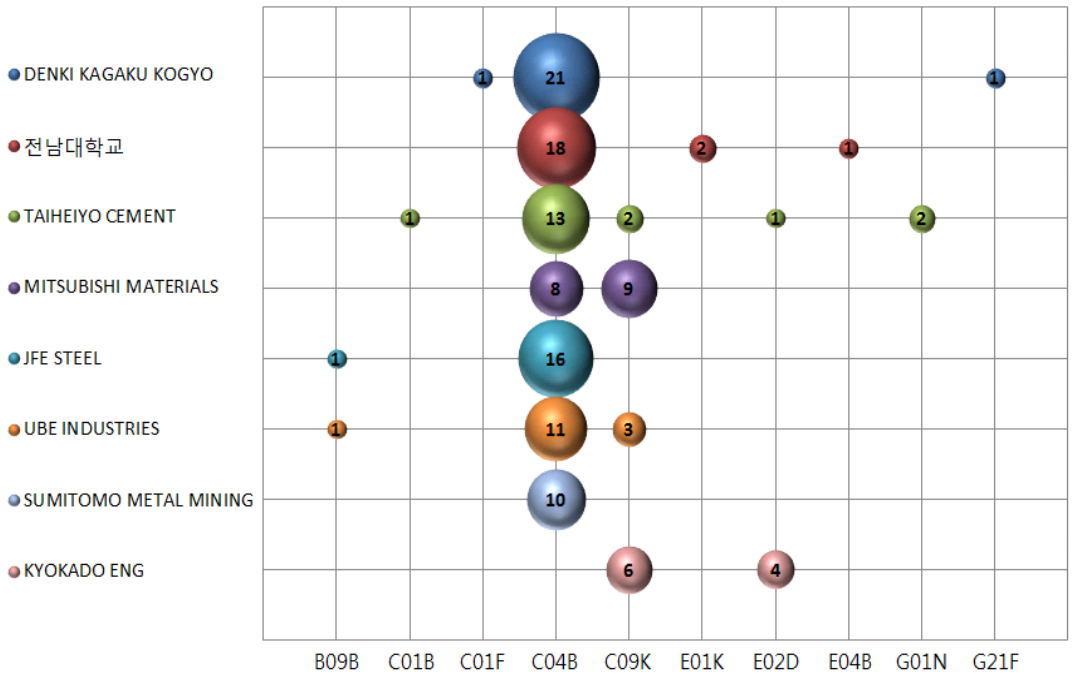


그림 2.8 무시멘트 관련 세부 기술분야별 주요출원인 (출처: KIPRIS)

다. 시장 및 산업 현황

(1) 국내 시장 동향

- 현실적인 측면에서 친환경 무시멘트 결합재를 국내에서 사용할 수 있는 부분은 1) 내황산 및 고내구성 콘크리트 2차 제품, 2) 특수목적용 그라우트 (친환경성 차수용 혹은 원전 구조 뒷채움 등)임.

  : 이는 위 적용처가 시방서 및 구조기준이 없이도 충분히 사용이 가능하기 때문으로, 만약 관련 시방서 및 구조기준 등이 마련될 경우 추후 충분히 구조용 재료로 적용이 가능하며, 시장 확대를 위해서 반드시 시방서 및 기타 규정 제정이 필요함.

- 콘크리트 2차 제품은 제조방법에 따라 원심다짐, 진동다짐, PC제품, 즉시 탈형 제품 및 건축용 제품으로 구분되는데, PHC 말뚝을 제외하고는 대부분 압축강도 40 MPa 이하의 수준이며, 슬럼프는 70~80 mm 이하를 요구하고 있으며, 콘크리트 2차 제품은 그 종류가 매우 다양하므로 전체 공장제품으로 사용되는 콘크리트 양을 직접적으로 추산하기는 어렵지만 현재 우리나라 전체 시멘트 생산량 중에서 공장제품의 제조에 소비되는 비중은 15~20 % 정도로 추산되며 앞으로 이 비율은 계속 증가 될 전망임.

- 최근 건설구조물의 품질이 사회적 문제가 됨에 따라, 콘크리트 공장제품에 대하여 고강도화 및 고품질화 등 변화가 일어나고 있으며, 이에 따라 기술적으로 새롭고 다양한 제조, 성형, 양생 방법들이 적용되고 있음. 또한, 하천 정비사업, 도로 정비사업, 도시녹화와 환경개선을 위한 지속적인 시책 전환에 대응하는 콘크리트 제품의 개발과 그 시장 확대가 지속적으로 증가하고 있음. 특히, 녹색인증 및 저탄소인증에 대한 정책적 지원 및 사회적 요구의 증가와 함께 소위 저탄소 친환경 콘크리트 제품 개발을 위한 다각적인 투자와 노력이 이루어지고 있으며, 이에 따른 시장규모도 점차 증가할 것으로 전망됨.

- 상용화 대상기술이 기술사업화를 목표로 하는 지하저류조 및 농어촌 차수벽 시장과 관련된 자료는 파악되지 않으나 국내의 빗물이용시설 및 대형빗물저류시설 현황 분석을 통해 본 기술의 시장 규모 및 전망을 예측할 수 있음.

  : 국내에 빗물이용시설은 2000년 이후부터 본격적으로 보급 확대되기 시작하여 2008년도 기준 체육시설 10개소, 공공청사 14개소, 공장 및 상가 77개소, 아파트 72개소, 학교시설 39개소 등 총 212개소가 전국에 설치됨. 대상시설별 시설규모를 살펴보면 공장 및 상가의 저류조 용량이 21,439 ㎥으로 가장 많고, 아파트 19,534 ㎥, 체육시설 5,427 ㎥, 학교시설 4,632 ㎥, 공공청사 3,013 ㎥ 순으로, 총 저류용량은 54,044 ㎥로 연간 652천 톤의 빗물을 이용함.

- 상기 조사 결과를 바탕으로 환경부는 2020년까지 목표량 산정을 위해 2008년 기준으로 과거 년도 5년의 빗물이용시 설용량의 변화추이를 분석하여 각 대상시설별 목표량을 산정하였음.

  : 2020년까지 빗물이용시설의 저류조 용량은 총 459,894 ㎥로 현재 저류조 용량 54,045 ㎥ 대비 8.5배 증가하는 것으로 추정됨(보급률은 2008년 현재 0.1%에서 0.8%로 증가).

  : 공장 및 상가의 빗물이용시설 용량은 184,541 ㎥, 아파트 174,517 ㎥, 체육시설 43,879 ㎥, 학교시설 39,532 ㎥, 공공청사 17,603 ㎥로 공장 및 상가와 아파트의 구성비율이 전체의 78%를 차지하는 것으로 나타남.

  : 7개 특·광역시에 대한 환경부의 대형빗물저류시설 설치계획(안)에 따르면 개소당 50만 톤

규모의 저류시설 24개가 설치될 예정으로, 총 저류용량은 12,000,000 ㎥로, 2020년 대형빗물 저류시설의 잠재적 이용가능 빗물량 96,595천 ㎥/년 중 75%에 해당하는 72,446천 ㎥/년을 목표량으로 산정함.

: 목표년도 2020년의 이용가능한 총 빗물량은 77,999천 ㎥/년으로 2008년 기준 653천 ㎥/년 대비 약 119배 증가 예상됨.

- 한편 국내에서는 수도법과 서울특별시 빗물저수조 설치 지침에 의해 지하(빗물)저류조를 설치하는 건축물이 지속적으로 증가하고 있어 시장규모는 매년 그 규모가 증가할 것으로 예상됨.

표 2.3 무시멘트 결합재 관련 제품 국내시장 점유 가능성 (2016~2020 기준)

주요 제품	관련 업체 (점유율)	출하량 (t 당 가격)	향후 5년간 시장예측	기존 시멘트 대체 가능성 및 대체 소요기간	5년후 무시멘트 예상 수요량
구조용 콘크리트 (레미콘)	주요 대기업 (15~19%)	20~30 백만 m^3	출하량 감소 예상 (6~15% 수준)	2~3 %[e] (최단 5년)	-
	기타 업체 (81~85%)	100~120 백만 m^3	출하량 감소 예상 (20~25% 수준)	미만 1 % (최단 5년)	
	전체	120~150 백만 m^3	출하량 감소 예상 (7~20% 수준)[a]	0.5-1.0 %[d] (최단 5년)	0.6~1.2 백만 m^3
시멘트 및 시멘트 모르타르 (특수 시멘트 포함)	주요 대기업 (80~85%)	25,000 천t~ 28,000 천t	생산량 감소(4~8% 수준) + 출하량 감소 (2~2.5%) + 이익 일부 감소[b] =영업이익 일부 감소 및 출하량 감소	1~3 % (최단 2년)	-
	기타 업체 (15~20%)	5,000 천t ~ 8,000 천t	유사 (제품가격 하락 후 인상 유지)	1~3 %[e] (최단 5년)	
	전체	30,000 천t ~33,000 천t	출하량 감소	1~3 %[d] (최단 5년)	300~400 천t 내외
전체 매출 예상	시멘트 만을 고려해 계산[c]				2~3천억원

[a] 주책인허가율 감소, 건축 착공면적 감소, 유연탄가격 변동폭 거대

[b] 7대 시멘트사의 지역자원시설세 부과 (세금 약 500억원/연 예상), 온실가스 배출권 구매비용, 질소산화물 배출 부과금, 화물자동차 안전운임제도= 약 1,000억원 수준

[c] 시멘트 가격: 기준가격 75천원/t, 판매가격 60-69천원/t (2019 자료), 무시멘트 결합재 가격은 시멘트 가격과 동등 이상(현실적 계산)

[d] OPC기반 High-volume slag/fly ash의 품질안정성 확보를 위해 자극재를 혼입한 혼합 시멘트 사용을 고려

[e] 낙관적 전망 기준: 특수 시멘트 콘크리트 및 그라우트에 일부 적용

(2) 국외 시장 동향

- 국내 시멘트 시장규모는 약 3조 5천억 원이며, 콘크리트 관련 제품군의 시장은 약 1조 9천억, 레미콘 시장은 약 7조7천억 원임.

  : 친환경 건설재료 시장은 연평균 30% 이상의 성장 예상이 예상되며, 일부 기관에 따라 시멘트 대체재료 시장은 약 25~30% 점유가 전망됨.

  : 국내외 정부 및 민간기업들은 저탄소 무시멘트 콘크리트 및 산업부산물들의 콘크리트 재활용에 대한 기술개발과 이에 따른 수익창출 모델을 경쟁적으로 추구하고 있음.

- 콘크리트 및 시멘트 기술에 대해 매우 보수적인 국내에서와 달리, 해외의 경우 선진국과 개발도상국 모두에서 무시멘트를 적용할 수 있는 다양한 호재가 존재함.

  : 최근 EN(유럽기준)에서 알칼리활성 시멘트계 물질에 대한 규정이 발표되었으며, 이는 최근 대표적인 건설기준이 ISO화 하는 경향을 볼 때 전세계적으로 사용할 수 있는 규정으로 발전할 수 있음.

  : 국내에 비해 상대적으로 Test-bed에 대한 투자가 활발한 중국, 인도, 유럽 여러 국가에서 활발하게 무시멘트 결합재를 현장에 투입하고 있음. 사례가 충분히 확보될 경우 관련 시장이 형성될 가능성이 높음.

  : 4계절이 뚜렷하여 재료의 품질확보에 어려움을 많이 겪고 있는 우리나라 사정과 달리, 상대적으로 온도변화가 적은 한랭지 및 (아)열대지역 국가의 경우 무시멘트 결합재의 적용이 용이함(현재 인도와 호주에서는 관련 제품이 생산 판매되고 있음).

- 무시멘트 관련 기술은 크게 CaO의 함량이 많은 고로슬래그 기반의 알칼리 활성 슬래그 결합재 기술과 SiO2의 함량이 많은 플라이애시, 메타카올린 기반의 지오폴리머 기술로 분류됨.

- 2001년 미국에서는 'Vision 2030: A Vision for the U. S. Concrete Industry'에서 친환경 콘크리트를 만들기 위한 계획을 발표하면서 본격적인 연구를 시작하였고, 호주에서는 2001년부터 'Low-Calcium Fly-Ash Based Geopolymer Concrete' 프로젝트를 시작으로 무시멘트 콘크리트 개발, 제조, 활용기술 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있음.

- 활성화 무기결합재를 활용한 우수한 물리적·화학적 특성으로 많은 분야에서 응용·활용되고 있으며 관련된 제품을 생산·판매하는 회사로는 Geopolymere, Renotechoy, Siloxoo PTY.LTD 등 다수의 업체가 있음.

  : 우리나라보다 무시멘트 기술의 적용이 용이한 동남아 지경의 건설화학자재 시장 분석결과 관련 콘크리트 혼화재 시장이 연간 600-700 백만 USD 수준인 점을 감안할 때, 이 중 약 5% 정도(약 12 백만 USD, 현재 가치 약 140억 원 수준)으로 관련 시장이 작다고 할 수 있음. 그러나 시장 성장속도가 월등한 점을 고려할 때 장기적으로는 국내 시장 규모를 크게 뛰어넘을 것으로 판단됨.

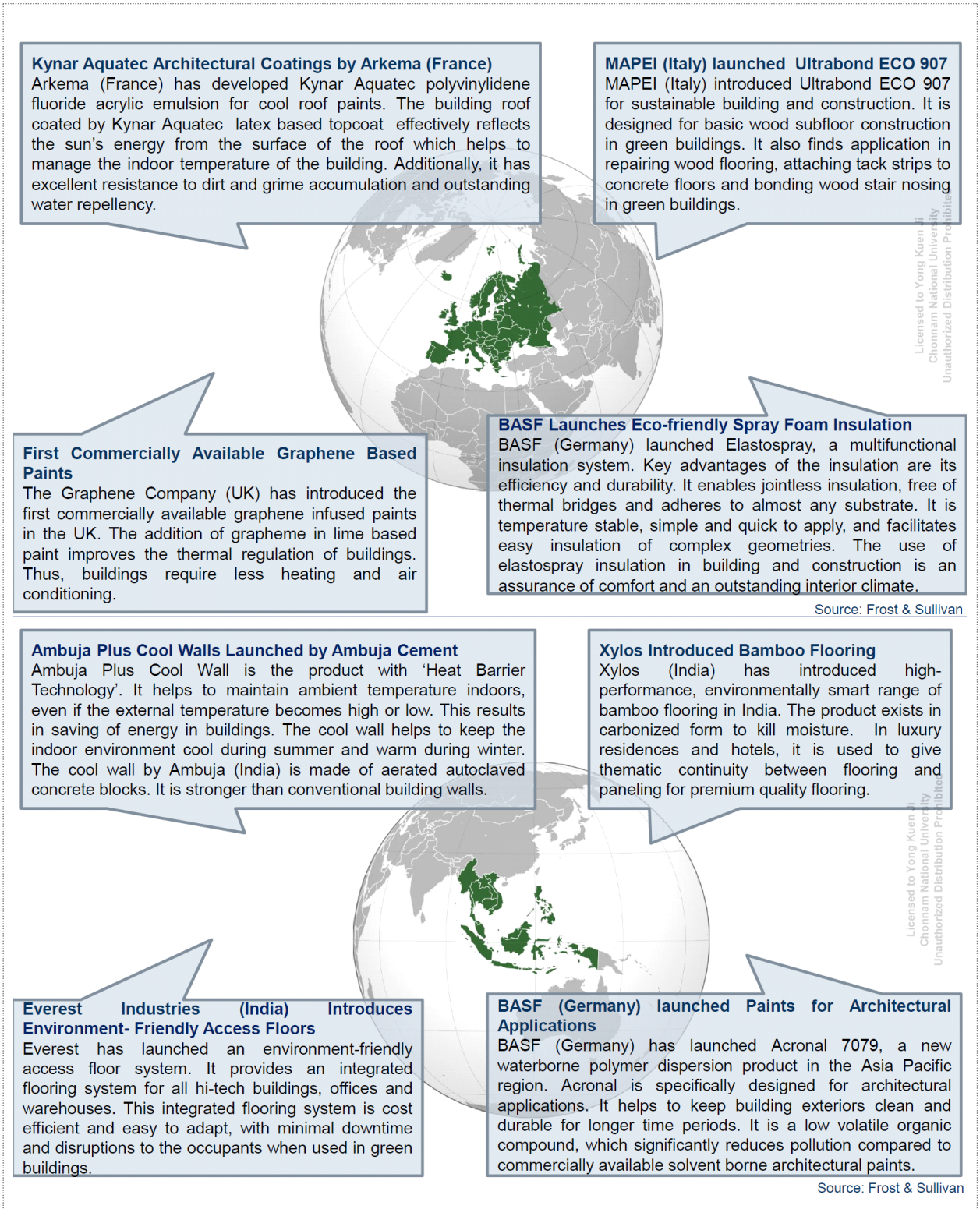


그림 2.9 녹색건축물 관련 정책동향 분석 (출처: Frost & Sullivan 'Sustainability Trends Impacting Building and Construction Industry, 2019')

3. 연구수행 내용 및 성과

3-1. 연구수행 내용

가. 중합반응제어형 내열화 콘크리트 기술 개발

(1) 무시멘트의 반응 메커니즘 및 모델링 기술

- 무시멘트는 보통포틀랜드시멘트(OPC)에 비해 내구성능이 낮고, 재현성 등 품질확보의 문제가 있는데, 본 연구에서는 이런 무시멘트의 문제점과 성능한계를 극복하기 위한 기초연구로써 무시멘트의 반응메커니즘의 정립과 모델링 기술을 확보하고자 함.

(가) 무시멘트 반응 특성 분석

① 대표 결합재 및 양생조건 선정

- 실용화를 고려하여 1 package가 가능한 분말형 활성화제만 사용하기로 하였으며, 분말형 활성화제는 그 종류와 배합 및 혼입량에 따라 무시멘트 결합재의 물리적 특성이 다양하게 변하기 때문에 본 연구를 진행함에 앞서 대표 결합재의 선정이 필요함.
- 대표 결합재 선정은 다음과 같은 원칙으로 진행하였으며, 주활성화제와 보조활성화제 조합의 약 100여개의 배합실험을 실시함.

: 주활성화제(단독사용으로 slag 경화 가능) : NaOH, Na_2SiO_3, $Ca(OH)_2$

: 보조활성화제(단독사용으로 slag 경화 불가능) : Na_2CO_3, Na_2SO_4, Na_2SiF_6

- 배합실험을 통해 선정된 대표 결합재는 총 3가지 결합재 배합으로 다음과 같음.

: G1배합 : Slag 82~83% + NaOH 3% + Na_2CO_3 4~5%

: G2배합 : Slag 90% + Na_2SiO_3

: G3배합 : Slag 87% + $Ca(OH)_2$ 7% + Na_2SO_4 3% + Na_2SiF_6 3%

- 무시멘트 결합재는 OPC와 달리 양생조건에 민감하며, 이는 재현성에 영향을 미치기 때문에 무시멘트 결합재 실험을 위한 양생조건을 평가하였는데, 대기, 수중, 밀봉 양생 중 밀봉(밀폐)이 무시멘트의 강도 발현에 가장 적합한 양생 방법으로 평가됨.

② 수화생성물 분석

- 대표결합재들은 물리적 특성(강도발현 속도 등)이 서로 다르게 나타나는데, 반응 특성을 분석하기 위한 기초적인 단계로 각 대표결합재들의 반응생성물을 분석하였음(표 3.1.1).

표 3.1.1 Rietveld 법에 의한 수화생성물 정성/정량 분석 결과

구분	Composition (%)			
	Calcite	Hydrotalcite	Ettringite	Hillebrandite
G1-28	80 (1.0)	22 (0.4)	-	-
G2-28	100	-	-	-
G3-28	48 (0.7)	-	46 (1.4)	6 (1.4)

(나) 무시멘트 반응 모델링 기술 개발

① 무시멘트의 성능인자 분석

- 무시멘트의 반응 모델링을 위해 조정인자(변수)에 대한 성능인자의 분석이 필요한데, 무시멘트의 성능인자는 대표결합재들의 압축강도(강도발현율), setting time, 수화열, 탄산화저항성, 수축 등이며, 모든 배합은 밀폐양생을 실시함.
- 각 계열별 대표결합재인 G1, G2, G3 배합에서 활성화제는 주활성화제와 보조활성화제의 비율은 통일하고, 모재료인 슬래그 미분말과 활성화제의 비율을 조정한 배합비를 적용하였는데, 슬래그 대비 활성화제 비율을 ± 3% 조정한 결합재 배합비 등 총 9개 배합에 대한 성능인자 특성 분석 시험을 실시함.

② 무시멘트의 반응 모델링

- 무시멘트 결합재는 OPC에 비해 수화반응 이외에 중합반응도 고려해야 하는데, 중합반응은 기본적으로 탈수반응(Dehydration)이므로 기존의 수화반응 측정법(고정수량 측정법)으로는 평가가 어렵기 때문에, 수화도와 반응도를 동시에 사용하여 반응 모델링을 수행함.

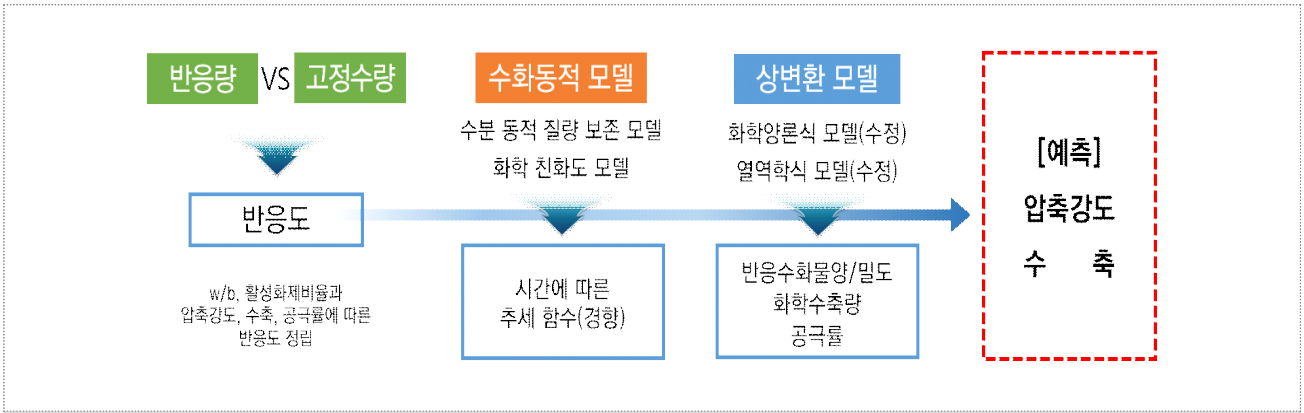
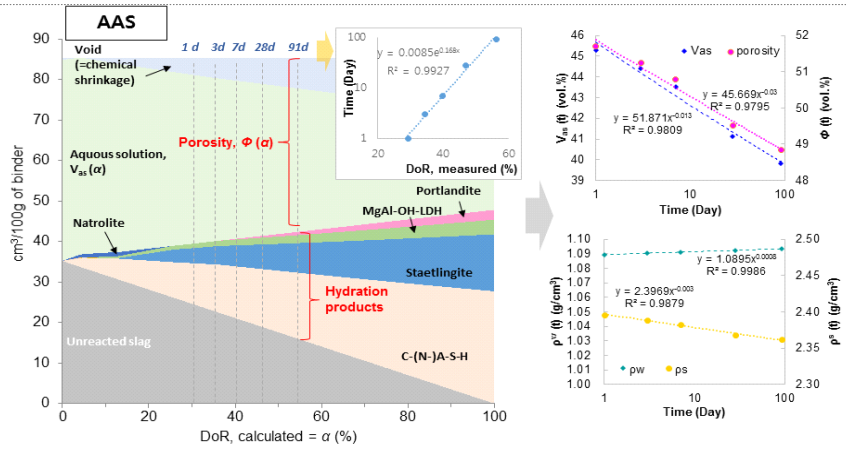


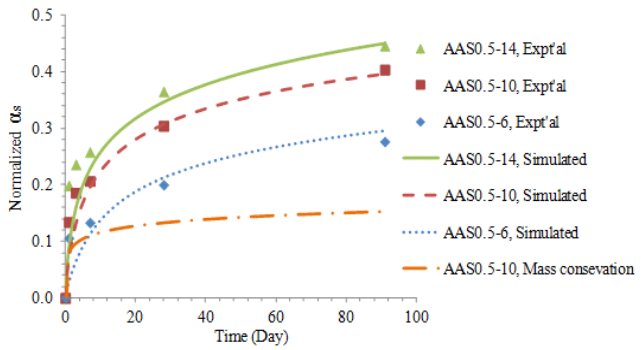
그림 3.1.1 무시멘트 반응 모델링의 절차

- 무시멘트의 수화도를 평가하기 위해서는 무시멘트 매트릭스 내 고정수량의 측정이 원칙이지만, '결합수 + 수화물 층간수'의 구분이 어렵기 때문에 상온(20-50℃) 진공건조(Vacuum drying)를 이용한 증발수량 측정 후 고정수량 역산 적용하였으며, 그 결과 W/B가 높을수록, 알칼리 자극제량이 많을수록 수화도가 높음.
- 반응도를 평가하기 위해 수화발열량(ASTM C170)을 통해 극초기 수화도를 측정하고, SEM BSE 화상분석 & 선택적 용출 시험을 통해 미수화 슬래그량 정량을 분석하였으며, 핵자기공명(NMR) 분석을 통해 Si 체인 변화량 정량화를 통한 반응도 측정한 결과 알칼리 자극제량이 많을수록 높아지는 반면 W/B에 크게 영향을 받지 않음.
- 시간에 따라 반응물들이 100% 반응했을 때까지의 조성비의 변화를 모델링하기 위해 상변환 모델을 적용하였으며, 이때 사용된 상변환 모델은 화학양론식과 열역학적(thermodynamic) 상변환 모델임. 또한 내부 수화물의 결합 형태를 분석하기 위해 슬래그 중 미반응 결정상(Melilite계 akermandite, gehlenite)을 측정하고 열중량 분석과 NMR의 deconvolution을 수행함.

- 무시멘트 결합재를 위한 Multi-physics hydration kinetic model은 입자 간에 수분이 혼입된 상태의 고-액-기체상 관계의 응용을 자기건조조건을 고려하여 식을 변경함.
- 유도된 이론식 계산을 위해 가장 요구되는 파라메터는 1) 포화도 Sw (공극률과 증발수량으로 계산), 2) 각 수화상태에서 내부수화물 및 증기의 밀도(ρs, ρgw)이며, 수화도는 유한차분식(Finite difference equation)의 형태로 계산되기 때문에 실험값을 직접 넣는 것보다 시간에 따른 경향을 추세함수로 계산하여 사용함.
- 해석결과 이론식과 실험값은 일반적으로 유사한 추세를 보임, 이 때 사용된 일부의 Fitting parameter를 통해 OPC와 AAS 간의 물리-화학적 차이를 확인하였으며, 계산된 강도와 실험으로 얻어진 강도결과 수화도-강도수축과 모델 간의 정합도는 R2 0.95 이상임.



(a)



(b)

그림 3.1.2 수분 상변화 모델을 활용한 수화속도 모델의 파라메터 결정 (a) 및 수화속도 모델-실험결과 비교 (b)

- 수분 상변화 및 수화도 모델에 관한 연구내용을 정리하여 논문을 게재함(SCI-44).


Cement and Concrete Composites 91 (2018) 67–75

Contents lists available at ScienceDirect

Cement and Concrete Composites

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp

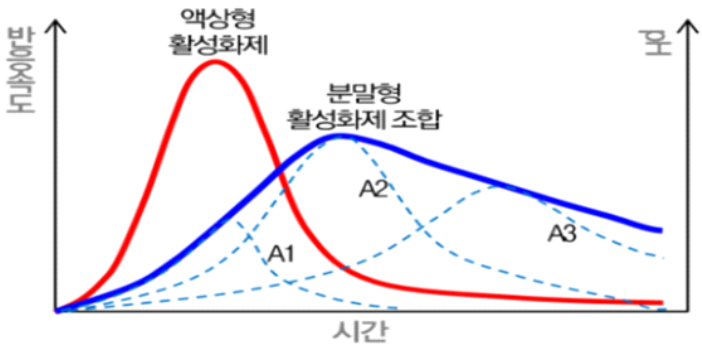
Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing

H.K. Kim[a], H.K. Lee[b,*]

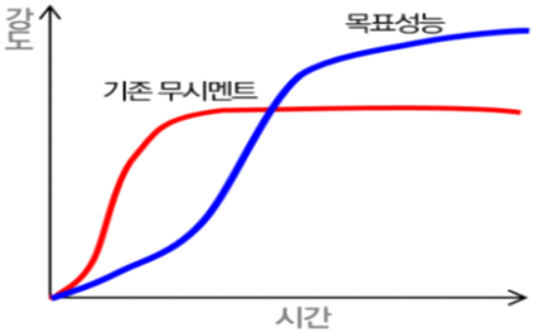
(2) 고유동/고강도 무시멘트 콘크리트 배합 기술

(가) 기술의 개요

- 기존 무시멘트 결합재는 액상의 고농도 강알칼리 자극제를 사용하기 때문에 배합 시 발열과 급결 등의 문제가 발생하는데, 이런 급결은 성형이나 다짐 불량을 유발하고, 발열은 매트릭스 내부의 미세균열을 유발하여 내구성에 영향을 미침.
- 물유리 및 NaOH 수용액을 자극제로 사용한 기존 무시멘트 결합재와 달리 분말형 활성화제인 알칼리염은 OH^-, SO_3^{2-}, CO_2^{2-} 이온과 결합된 Na, Ca염(분말형 자극제)의 조합으로 슬래그 파우더를 자극시키면 다양한 성능과 특성을 갖게 함.
- 분말상의 자극제인 K, Na, Ca염은 결합방식에 따라 물에 대한 용해도(이온화도)가 각각 다르며, 수용액 상 이온들의 농도에 따라서도 이온화 정도와 반응속도가 달라지는데, 이를 이용하여 반응속도를 제어하고, 반응유지시간을 조절하여 성능을 높이고자 함.



(a) 시간에 따른 반응 속도



(b) 시간에 따른 강도발현 특성

그림 3.1.3 초기반응 속도 및 반응 유지시간 제어 개념

(나) 고유동 저발열용 무시멘트 결합재 개발

① 경쟁적 이온용출을 이용한 반응속도 제어

- 알칼리 활성화제로 사용된 분말형 알칼리염의 이온화 속도 및 경쟁적 이온화에 의한 음이온의 농도를 제어하여 강도발현 속도를 평가하고자 3가지 자극제($Ca(OH)_2$, Na_2SO_4, Na_2SiF_6)를 사용하는 G3를 선정하여 연구를 수행함.
- 무시멘트의 반응속도 제어를 좀 더 정확하게 이해하기 G3 결합재에 KCO_3 염을 자극제로 추가 하여 K^+, CO_3^{2-} 이온의 작용 여부 판단한 결과 음이온의 유리질 분해(강도발현) 속도는 OH^- > SiF_6^{2-} > SO_3^{2-} >> CO_3^{2-} 순이며, 자극제 이온화속도는 K염 > Na염 >> Ca염 순임.
- 각 배합별 투입된 자극제의 음이온의 전체 몰비 중 SiF_6^{2-}와 CO_3^{2-} 이온의 몰비 합은 초기 압축강도 발현 속도에 영향을 미치는데, SiF_6^{2-}와 CO_3^{2-} 이온 몰비 합의 제곱은 초기강도발현 속도와 반비례 관계에 있으며, 28~56일 중장기 강도는 일정 수준까지는 몰비합의 세제곱에 비례하게 커지다가, 적정 수준이상 투입될 경우 28~56일 압축강도가 현저히 낮아짐.
- 자극제의 음이온 전체 몰비에 대한 SiF_6^{2-}와 CO_3^{2-} 이온 몰비 합의 적정 수준은 4%~8%까지

이며, 초기강도발현 속도와 28일 압축강도를 고려하면, 6%~7%가 적정배합임.

- 대표 결합재들의 반응속도와 반응유지 기간에 대한 평가를 위해 단열온도상승에 의한 수화열을 측정한 결과, NaOH를 자극제로 사용한 G1이 가장 높고, 그 다음으로 Na_2SiO_3인 G2, 그리고 물에 대한 용해도가 낮은 $Ca(OH)_2$를 자극제로 사용한 G3가 가장 낮게 측정됨.

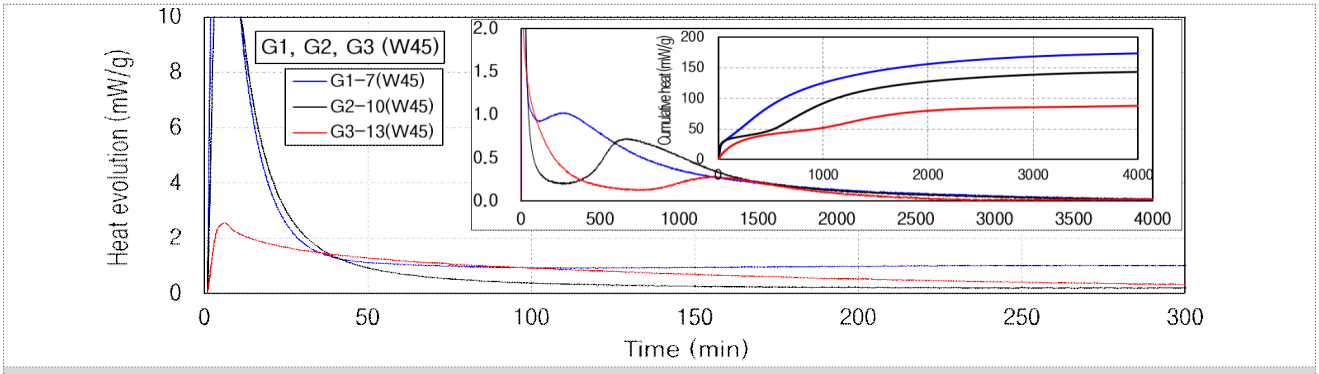


그림 3.1.4 대표 결합재들의 단열온도 상승 수화열 시험 결과(W/B 0.45)

- 반응 초기 피크는 용해열로써 알칼리활성화제가 물에 녹아 이온화 될 때 발생하는 열로 반응속도와 관계가 깊고, 배합 후 수십분 후에 발생하는 피크는 수화반응 시 발생하는 피크로 이 피크의 면적은 전체 반응 기간과 관계가 깊음.
- 수화열 평가를 통해 G1은 반응초기 격렬한 반응을 보이다가 수 시간 내로 반응이 멈추었지만, G2는 그보다 반응속도는 느리며, 반응기간은 G1보다 길게 나타났으며, G3는 초기 반응속도는 매우 더디지만, 장기간 반응이 유지 되는 것으로 나타남(장기강도 확보).
- 위의 결과를 통해 G3 결합재에 KCO_3를 첨가한 결합재의 매우 낮은 수화열의 특성을 이용해 무시멘트 저발열 매스콘크리트 배합비에 대한 특허(특허-27)를 출원함.

② 고유동 무시멘트용 혼화제 적용성 평가

- 고유동 무시멘트를 제작하기 위해서는 고성능 감수제 적용이 필수지만, 고성능 감수제는 모두 OPC에 최적화 되어 있어 감수효과가 미미하기 때문에 시중에 판매되는 다양한 감수제들을 대표 결합재에 적용하여 고유동이 가능한 결합재와 감수제 조합을 찾는 것이 필요함.
- 감수제 적용성 평가를 위한 고성능감수제는 모두 14종으로 리그닌계 2종, 나프탈렌계 4종, 폴리카르복실계 8종 등 3가지 계열의 14종의 제품에 대해서 미니슬럼프 실험을 수행한 결과 G3와 폴리카르본산계 감수제의 조합이 가장 적합한 것으로 나타남.

표 3.1.2 감수제적용성 평가 (mini slump flow 증가율)

결합재	pH	감수제 적용을 통한 Mini slump flow 증가율※		
		리그닌계	나프탈렌계	폴리카르본산계
G1	13.4	70%	40%	0%
G2	13.1	80%	110%	90%
G3	12.4	90%	170%	320%
OPC	12.8	75%	150%	275%

※ 각 감수제 계열별로 가장 성능이 우수한 1종만 선택함.

(다) 고유동/고강도 콘크리트 배합비 개발

① 무시멘트 자기다짐 콘크리트(SCC) 배합비 개발

- G3 결합재에 폴리카르본산계 감수제를 적용하여 고강도/고유동 콘크리트를 배합하기 위해 SCC 배합을 사용하였으며, 시험방법은 일본토목학회(JSCE)의 자기다짐콘크리트 물성 시험 및 기준을 적용하였고, 시험 항목은 유동성, 재료분리저항성, 간극의 통과성임.
- 콘크리트 배합은 단위결합재량 400, 500, 600 kg/㎥ 이며, W/B는 32~46%로 총 9개 배합시험을 실시하였으며, 압축강도 시험 결과 G3 결합재의 특성상 모든 배합에서 양생 초기부터 7일까지 압축강도는 7~15 MPa로 매우 낮게 나타났지만, 이후 28일까지 매우 빠르게 강도가 발현되어 40~60 MPa 수준의 강도를 나타냄.

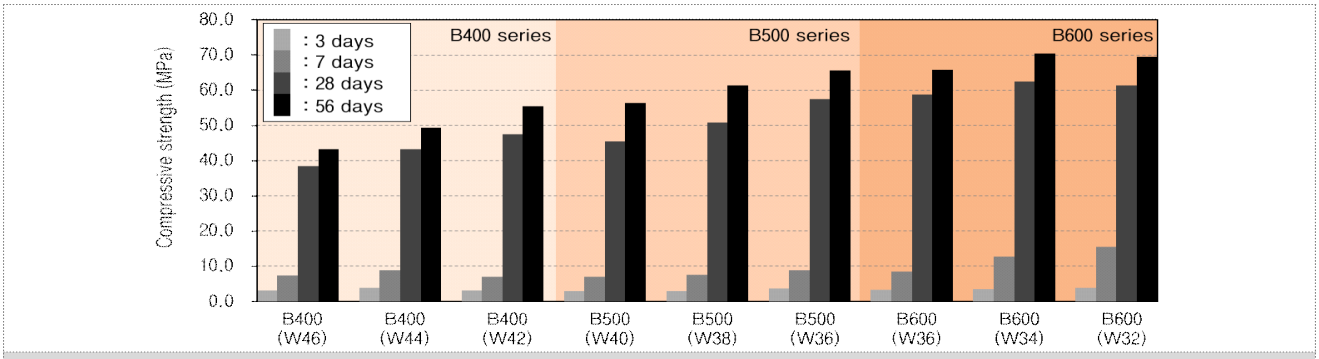


그림 3.1.5 압축강도시험 결과

- 유동성 시험 결과는 slump flow는 대부분 600~650 mm 수준이고, T_{500} 시간도 3~20초 이내이며, U-box 충진 높이도 모두 320 mm 이상으로 기준에 부합되었지만, 높은 점성으로 V-깔대기 통과시간은 기준인 20초 이내보다 더 많은 시간이 걸림.

(라) 고유동 무시멘트 결합재 실용화 연구

① 무수축 그라우트재 개발

- 고유동 실험을 통해 G3 결합재인 $Ca(OH)_2$와 Na_2SO_4, Na_2SiF_6 자극제의 조합이 무시멘트 그라우트 재료의 결합재로써 적합함을 확인하였으며, 지반 그라우트재는 물-결합재비가 매우 높기 때문에 결합수 일부를 제외한 나머지는 공극수로써 건조되면서 경화된 그라우트재는 수축하게 되므로 수축량을 줄여야 함.
- 실험 및 분석 결과, CSA 팽창제 5~15% 치환하면, 치환률에 비례하여 강도 손실이 발생하였고, 수축은 줄어들었는데, 압축강도 손실률과 수축률을 고려하면 CSA 팽창제 10% 치환이 가장 적합함.

② 2액형 급결 그라우트재 개발(호모겔)

- 지하수가 흐르는 지반의 그라우트는 수분내로 응고하여 지하수에 의해 유실되지 않아야 하므로 호모겔 형성이 필요하며, 이를 위해 1.5 shot (A, B액)용 배합비 개발이 필요함.
- 페이스트(A액) 배합비는 w/b 1.5 수준이며, 희석액(B액)은 물유리(3호)와 물의 부피비 1:1임.



그림 3.1.6 무시멘트 그라우트 겔화

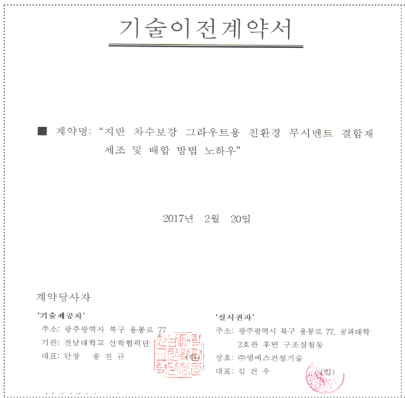
표 3.1.3 그라우트용 결합재 배합비

구분	배합비(G1~L2는 활성화제 비율)	겔타임 (min)	압축강도 (MPa)		
			3	7	28
OPC	OPC 100%	3	1.5	2.1	3.4
G1	NaOH 3% + Na_2CO_3 4%	–	–	–	1.4
G2	Na_2SiO_3 10%	–	–	–	1.1
G3	$Ca(OH)_2$ 7% + Na_2SO_4 3% + Na_2SiF_6 3%	32	–	–	2.1
L1	$Ca(OH)_2$ 7% + Na_2SO_4 3% + 소석고 5%	6	1.5	2.1	3.3
L2	CaO(사소생석회) 10% + Na_2SO_4 3%	4	1.8	2.4	4.5

- OPC는 혼합 후 3분 후에 겔이 형성되었고, L1은 약 6분 후 겔화가 진행되었으며, $Ca(OH)_2$ 대신 사소생석회를 10% 혼입한 L2는 겔타임이 OPC와 비슷한 4분을 나타냄.
- 압축강도는 L1, L2 결합재가 OPC와 비슷한 수준을 보이므로 L2 결합재 배합비가 적정함.

③ 무시멘트 그라우트 시험시공

- 전남 무안군 청계면 관동제 일대 제방 차수그라우팅 시공
- 커텐공 8공, 시험공 1공, 차수성능 4공 (시공전 후 2공씩)
- 투수시험 결과 : 1.50×10^{-3} cm/sec (시공전) → 4.29×10^{-5} cm/sec (시공후)
- 투수계수 결과 차수효과 확인함.



기술이전계약서

■ 계약명: "지반 차수보강 그라우트용 친환경 무시멘트 결합재 제조 및 배합 방법 노하우"

2017년 2월 20일

계약당사자

'기술제공자'
주소: 광주광역시 북구 용봉로 77
기관: 전남대학교 산학협력단
대표: 단장 송 진 규

'실시권자'
주소: 광주광역시 북구 용봉로 77, 공과대학 2호관 후반 구조실험동
상호: 라엘에스건설기술
대표: 김 건 우

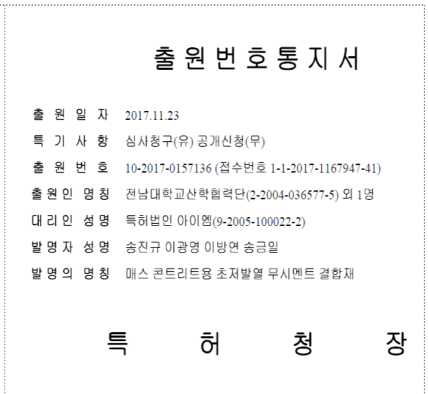
지반그라우트기술이전



〈자재반입〉 〈찬공작업〉 〈재료배합〉

〈그라우트재 주입〉 〈투수시험〉 〈시공완료〉 〈시험체 코어 채취〉

그라우트 시험시공



출원번호통지서

출 원 일 자 2017.11.23
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무)
출 원 번 호 10-2017-0157136 (접수번호 1-1-2017-1167947-41)
출원인 명칭 전남대학교산학협력단(2-2004-036577-5) 외 1명
대리인 성명 특허법인 아이엠(9-2005-100022-2)
발명자 성명 송진규 이광명 이방연 송금일
발명의 명칭 매스 콘트리트용 초저발열 무시멘트 결합재

특 허 청 장

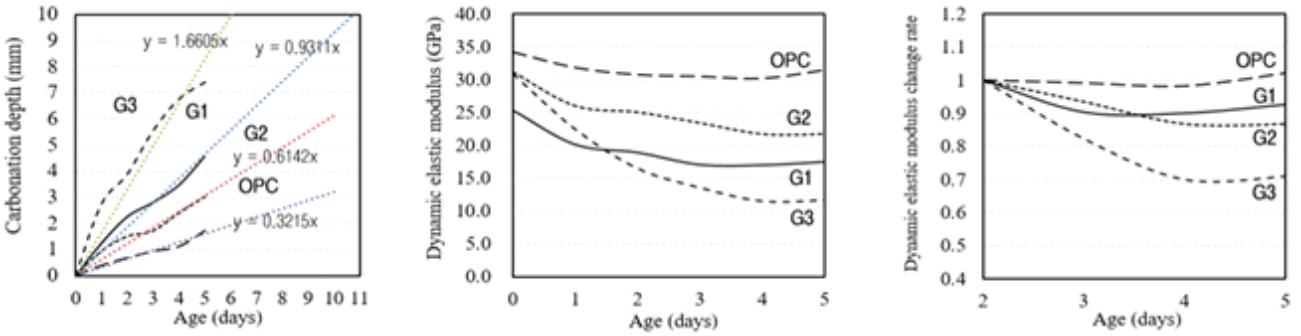
저발열 매스콘크리트 특허출원

(3) 표면열화 저감형 고내구성 무시멘트 콘크리트 배합 기술

(가) 내탄산화형 무시멘트 배합비 개발

① 탄산화 속도 및 강도특성 평가

- 대표 결합재들의 탄산화 특성을 명확하게 판단하기 위해 페이스트(W/B 0.4)를 제작하여 5% CO_2 기체에 폭기시키면서 매일 탄산화속도를 위한 탄산화 깊이와 탄산화 후 강도저감율 평가를 위해 동탄성계수를 측정함.
- G3는 동일강도의 G2보다 탄산화 속도는 약 2.6배 빠르며, 탄산화 후 강도 손실이 크고, 탄산화 속도는 G2는 OPC의 약 두 배, G1은 OPC의 약 세 배, G3는 다섯 배가 넘음.
- 동탄성계수의 변화율(저감율)은 G3 > G2 > G1 > OPC 순이며, G1과 OPC는 동탄성계수가 다시 회복되는 양상을 보임.

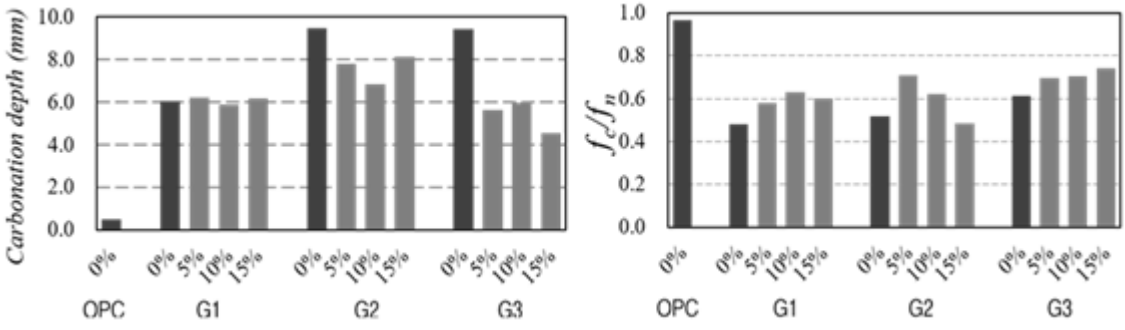


(a) 탄산화 깊이 (b) 동탄성 계수 측정 값 (c) 동탄성계수 변화율

그림 3.1.7 탄산화 깊이 및 동탄성 계수 결과

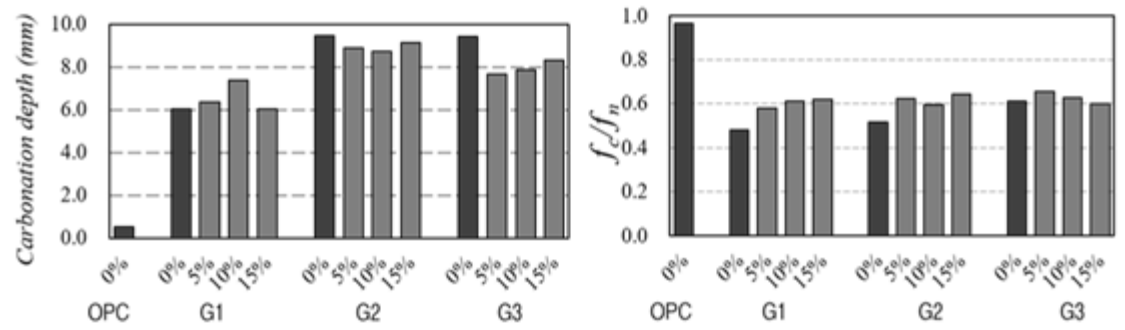
② 내탄산화형 혼화재를 이용한 탄산화 저항성 개선

- 물과 강알칼리에 반응하지 않고 CO_2에만 반응하는 물질로써, 배합 후 양생시 매트릭스 내부에 흡착되어 있다가 CO_2에 노출되면, CO_2를 고정할 수 있는 물질을 내탄산화 혼화재로 사용.
- CO_2 고정형 비수경성 물질로 $Mg(OH)_2$와 CFBC 애시를 사용하였으며, 무시멘트 모르타르의 각 배합당 각각 $Mg(OH)_2$와 CFBC를 0, 5, 10, 15% 질량비로 결합재를 치환함.
- $Mg(OH)_2$ 혼입 결과, 탄산화 깊이는 G2 > G3 > G1 순이며, G1은 $Mg(OH)_2$를 혼입해도 탄산화 저항성이 개선되지 않지만, G3는 혼입함에 따라 탄산화 속도가 50% 가량 낮아짐.
- 탄산화 후 압축강도 저하는 $Mg(OH)_2$를 혼입할 경우 모든 배합에서 개선되며, G1, G2에는 $Mg(OH)_2$ 혼입률이 각각 10%, 5%가 가장 효율적, G3는 혼입률 5~15% 모두 비슷한 성능으로 나타남.
- CFBC 혼입 결과, CFBC를 첨가함에 따라 탄산화 속도는 다소 낮아지지만 그 효과는 미미하고, 탄산화 전후 압축강도 손실량은 CFBC 애시를 첨가한 모든 배합에서 손실량이 줄어듦.
- 원재료 특성상 CFBC 애시는 다양한 조성의 구성비를 갖기 때문에 조성 구성비에 따른 탄산화 특성을 평가하여, 무시멘트에 적합한 조성의 CFBC 애시를 특정할 필요가 있음.



(a) 탄산화 깊이 (b) 탄산화 전 후 압축강도 변화

그림 3.1.8 $Mg(OH)_2$를 혼입한 무시멘트 모르타르의 탄산화 깊이 및 탄산화 후 강도손실

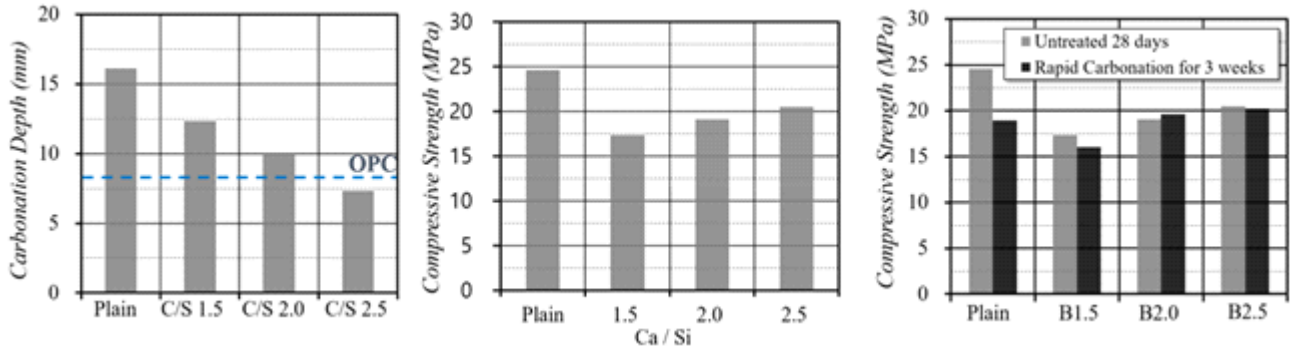


(a) 탄산화 깊이 (b) 탄산화 전 후 압축강도 변화

그림 3.1.9 CFBC 애쉬를 혼입한 무시멘트 모르타르의 탄산화 깊이 및 탄산화 후 강도손실

③ 모재료 개질(메카노-케미컬 합성)을 이용한 탄산화 저항성 개선

- 기존 문헌 분석 결과 염기도(Ca/Si)가 낮은 CSH는 CO_2에 의해 Si 체인이 쉽게 분리되면서, 탄산화에 취약하고 탄산화 후 강도 저감 유발하는데, 무시멘트의 CSH 수화물은 OPC의 CSH보다 염기도가 더 낮게 측정됨.
- 인위적으로 고로슬래그의 염기도(Ca/Si)를 높여 주어 염기도가 높은 CSH 생성을 유도할 필요가 있지만, 고로슬래그는 용융상태에서 급랭된 유리질로서 CaO와 SiO_2가 합성된 유리질 상태로 염기도를 높이기 위해 단순히 CaO의 혼입은 불합리하기 때문에 물리적 충격에너지로 화학적 합성이 가능한 Mechano-chemical 합성 방법을 적용함(고로수쇄슬래그를 파우더 형태로 만들기 위해 밀(mill)가공 공정에 적용 가능).
- 고로슬래그 원석에 조성별 계산에 의해 염기도 1.5~3.0을 만족시키기 위한 적정량의 CaO를 첨가한 후 볼밀을 통해 물리적 충격에 의한 화학적 결합 유도함(메카노-케미컬 합성).
- 염기도가 조정된 모재료에 G2 배합을 통해 압축강도와 탄산화 속도 및 탄산화 후 압축강도 변화율을 측정한 결과 압축강도는 염기도가 높을수록 낮게 측정되었는데, 이는 볼밀에 의해 첨가된 CaO와 슬래그간의 화학적 합성이 완전하지 못한 것으로 판단됨.
- 염기도가 높을수록 촉진탄산화 속도가 낮아지는 경향을 보이고, 탄산화 후 압축강도 손실량이 현저히 줄어들며, 염기도 2.0 이상부터는 탄산화에 의한 강도 손실이 거의 없음.



(a) 탄산화 깊이 (b) 압축강도 (c) 탄산화 전후 압축강도

그림 3.1.10 모재료 개질된 모르타르의 압축강도/촉진탄산화 깊이 결과

- 모재료 개질된 C/S 1.5, 2.0, 2.5의 수화생성물의 EDS 분석 결과 C/S는 각각 0.8, 1.0, 1.2임.

(나) 고내구성 무시멘트 PC 배합비 개발

① 고온양생용 무시멘트 결합재 개발

- 현 시점에서 AAS 콘크리트의 실용화를 위해 구조부재로 사용하기보다 콘크리트 2차 제품 적용이 현실적이기 때문에 고온양생용 분말형 무시멘트 결합재 개발이 필요함.
- Na_2SiO_3를 주활성화제로 사용하고 Na_2SO_4, Na_2SiF_6를 보조활성화제로 하는 결합재를 이용하여 고온양생 시험을 실시한바 Na_2SiO_3 10% + Na_2SO_4 2~3% + Na_2SiF_6 2~3% 배합이 최적 배합비로 나타났으며, 이 배합비를 무시멘트용 고온양생 결합재로 특허출원함.

표 3.1.4 결합재 배합비 및 압축강도 결과

구분	결합재					양생 조건	압축강도(MPa)		
	고로슬래그	Na_2SiO_3	Na_2SO_4	Na_2SiF_6	플라이애시		1일	3일	7일
5_R	84%	10%	3%	3%	-	상온	0.7	8.7	22.4
5_S	84%	10%	3%	3%	-	고온	35.5	41.4	43.6
6_R	85%	10%	3%	2%	-	상온	0.6	13.5	25.4
6_S	85%	10%	3%	2%	-	고온	46.0	47.9	51.0
7_R	74%	10%	3%	3%	10%	상온	0.8	5.9	20.9
7_S	74%	10%	3%	3%	10%	고온	47.3	54.4	52.4

1) 상온(R) : 20±2 ℃ 밀봉양생
2) 고온(S) : 20±2 ℃ 4h → 65±2 ℃ 10h → 20±2 ℃ 10h

② 고온양생용 무시멘트 콘크리트 배합비 개발

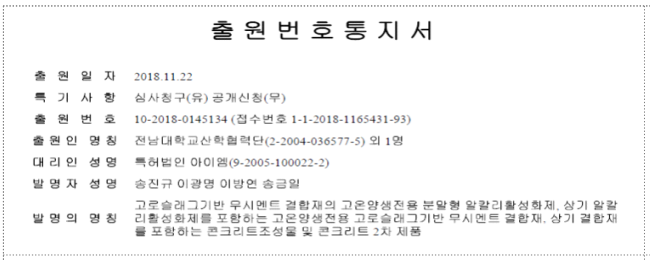
- 고온양생용 결합재를 이용하여 PC 콘크리트 제조를 위해 PC제품 중 가장 높은 강도를 요구하는 PHC 파일 배합비를 타겟으로 원심력 성형가공을 위한 배합을 개발하고자 함.
- 원심력 성형은 낮은 물-결합재 비와 높은 골재율의 특성상 유동화제의 첨가 비율이 높기 때문에 적절한 배합비 및 유동화제 첨가량 산출 필요하며, 원심력 성형 후 중공부 형성 및 골재 불분리, 상·하면 채움 등 외관상 확인 필요함.

- 사전 배합실험(22 ℓ)을 통한 재료량 및 배합비를 산정함.

표 3.1.5 원심력 성형용 무시멘트 콘크리트 배합표

Gmax (mm)	slump (mm)	W/B (%)	Air (%)	S/A (%)	단위량 (kg/㎥)					
					물	결합재	혼화재	잔골재	굵은골재	혼화제
25	30	28.2	-	36	155.0	540.0	-	625.4	1116.0	8.80

- 압축강도 결과 탈형강도(1일)는 57.4 MPa, 28일 압축강도는 72.4 MPa 확인.
- 이와 관련하여 특허출원(특허-49) 및 SCI-E 논문을 게재(SCI-71)하였음.



출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2018.11.22
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무)
출 원 번 호 10-2018-0145134 (접수번호 1-1-2018-1165431-93)
출원인 명칭 전남대학교산학협력단(2-2004-036577-5) 외 1명
대 리 인 성 명 특허법인 아이엠(9-2005-100022-2)
발 명 자 성 명 송진규 이광명 이방연 송금일
발 명 의 명 칭 고로슬래그기반 무시멘트 결합재의 고온양생전용 분말형 알칼리활성화제, 상기 알칼리활성화제를 포함하는 고온양생전용 고로슬래그기반 무시멘트 결합재, 상기 결합재를 포함하는 콘크리트조성물 및 콘크리트 2차 제품

내탄산화형 콘크리트 내구성능 관련 논문 게재



materials

MDPI

Article

Effect of Carbonation on Abrasion Resistance of Alkali-Activated Slag with Various Activators

Hyeong-Ki Kim [1], Keum-Il Song [2], Jin-Kyu Song [2] and Jeong Gook Jang [3,*]

고온양생용 무시멘트 콘크리트 결합재 특허 출원

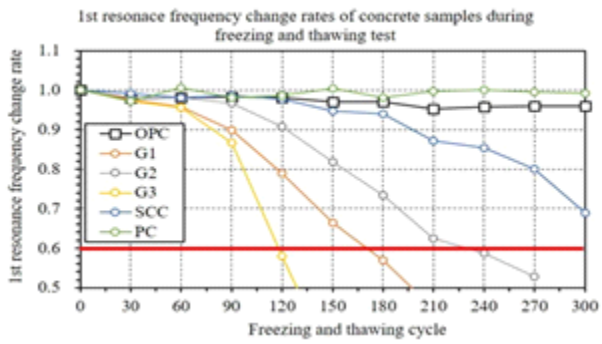
(다) 내탄산화형 무시멘트 콘크리트의 내구성능 평가

① 동결융해 저항성능 평가

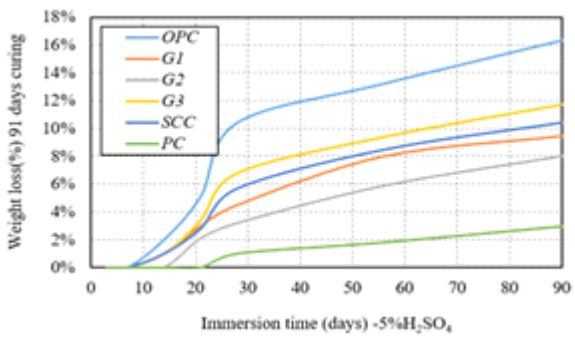
- 동결융해 시험 결과 G1, G2, G3 결합재를 이용한 콘크리트는 300 싸이클을 넘기지 못하고 동탄성계수가 60% 이하로 낮아졌지만, 고온양생을 실시한 무시멘트 PC 는 OPC와 같이 동결융해 300 싸이클 후에도 동탄성계수의 저감이 거의 나타나지 않음.

② 화학성능 평가(황산침지 결과)

- 황산침지 91일 시험 결과 OPC는 중량감소가 약 16% 까지 발생하였으나, 무시멘트는 약 8~12% 수준으로 나타났으며, 고온양생을 실시한 PC는 3%로 황산의 침투에 의한 내구성능이 가장 우수한 것으로 나타남.



(a) 동결융해 후 1차 공명진동수 변화율 결과



(b) 황산침지 후 중량감소율 결과

그림 3.1.11 동결융해 후 1차공명진동수 변화율 및 황산침지 후 중량감소율 결과

(4) 수축 저감형 무시멘트 콘크리트 배합 기술

(가) 무시멘트의 수축 특성 평가

① 무시멘트의 반응생성물과 화학수축 간 관계 분석

- OPC의 화학수축은 일반적으로 10일 이후 수렴하는 특성을 나타내지만, 시간을 로그 스케일로 나타내면 선형성을 보이지만, 무시멘트는 50일까지도 수렴하지 않고 시간에 따라 선형적으로 증가함(수화 뿐 아니라 상온에서의 중합이 꾸준히 발생하기 때문으로 판단됨.).
- OPC의 공극구성은 W/C에 따라 약간의 차이는 있으나, 대부분의 공극이 10~100 nm 수준임에 반해, AAS는 10 nm 이하이며, 시간이 지남에 따라 AAS의 주 분포 공극의 크기가 약 40% 감소함(OPC는 10% 내외).

(나) 무시멘트의 수축 메커니즘 정립

① 무시멘트의 수축 메커니즘 모델

- AAS의 초기 화학수축은 시멘트와 유사하거나 낮은 수준이지만, 최종적으로 AAS의 자기수축은 매우 큰 편임.
- CH(Portlandite) AAS는 Bridge형 수화물이 생성되지 않기 때문에 수축 발생량이 크며, Bridge형 수화물인 Ettringite 및 Monosulfate 생성을 위해 대량의 석고(이수석고)를 첨가하면, 수축은 제거할 수 있으나 강도 저하 등이 발생함.
- 슬래그에는 명확한 결정성 C_3A가 없으므로, 수화 지연이 발생하지 않아 급결하고 무수석고에 의한 Ettringite 및 Monosulfate 생성 유도는 수축 전체 감소 효과가 미미함.
- 수화도를 고려한 무시멘트의 수축 메커니즘 모델을 제안함.

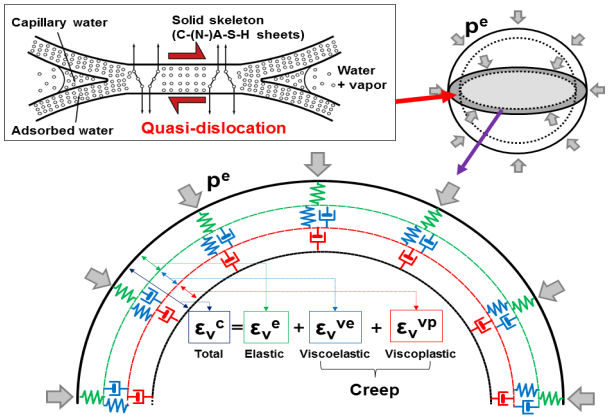


그림 3.1.12 모세관압에 의한 수축을 묘사하기 위한 3축 크리프 모델

- (i) 입자크기변환 모델: 반응에 의해 슬래그 입자의 유효크기 감소를 고려한 fitting model

: 다음과 같은 내용을 가정 ① 결합재는 구(Sphere)형 ② 수화/중합반응에 의해 입자 크기는 감소, ③ 반응량은 입자의 부피 감소분과 비례, ④ 반응도(수화/중합)와 수화도는 비례

: 한계점 : Demec gauge로 측정된 결과로써 수축량이 0인 곳을 정확히 제시하지 못하며, 수

화도와 반응도에 대한 정확한 정량분석 증거가 부족

- (ii) 모세관 흡수율 고려 모델: 탄성수축 및 크리프수축 모델링을 고려한 수축변화 확인

: 모세관 수분이동에 따른 응력발생을 이론적으로 고려한 Wyrzykowski and Lura(2011)의 모델을 OPC에서 무시멘트 결합재에로 적용(단, OPC와 달리 creep 모델을 차용)

: 수화반응 모델을 기존의 실험식이 아닌 이론적 수식으로 변경하여 적용(차별성 확보)

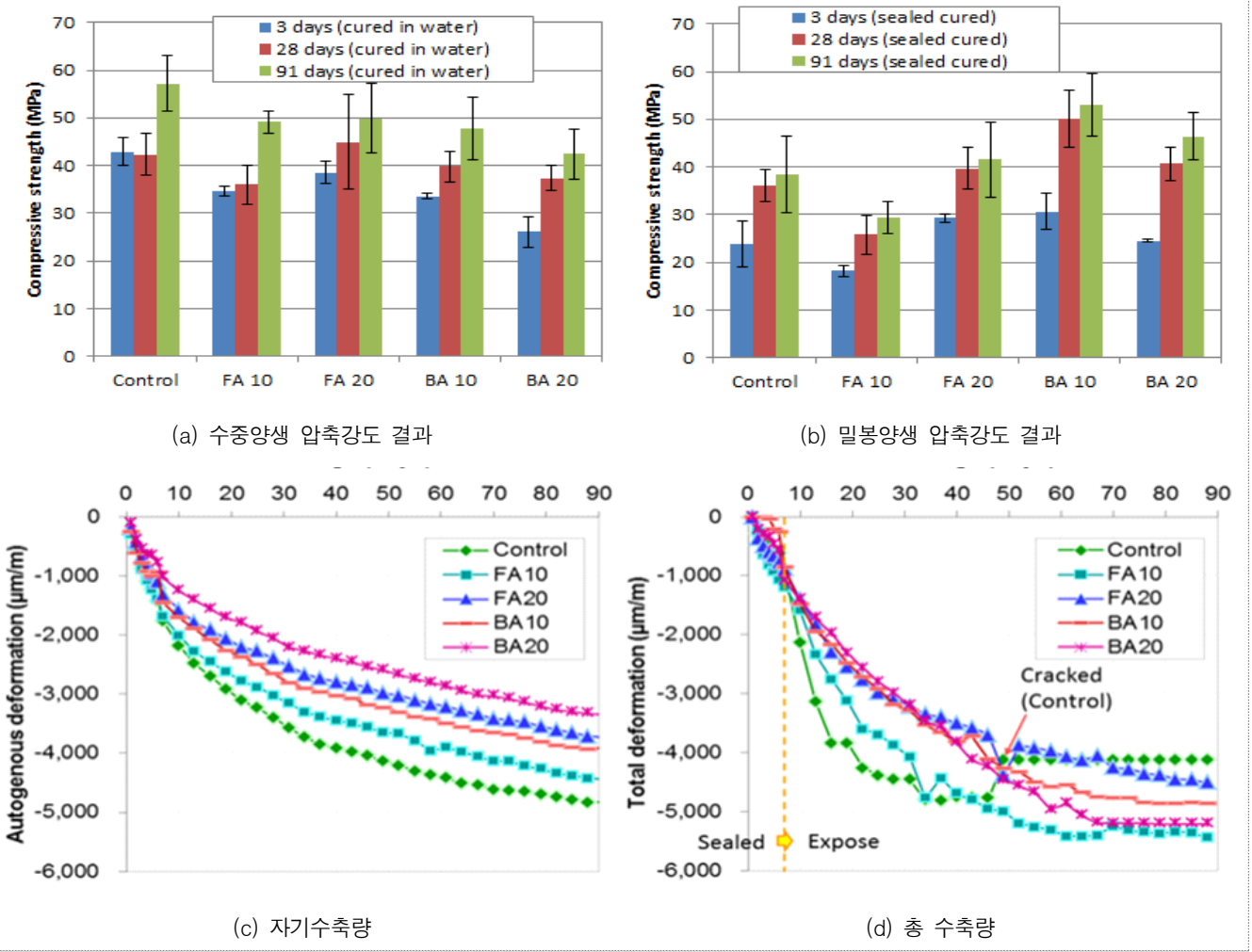
(다) 무시멘트의 수축 제어기술 개발

표 3.1.6 수축저감 기술 장단점 분석 및 결론 도출

구분	팽창/수축저감계 분체	내부양생	등가강도 기반 수축최소화
원리	- 수축저감형 수화물 생성, or 수분 내 표면장력을 줄여 수축압을 감소	- 배합 시 추가 수분 저장처(Water reservoir)를 추가하여 양생 시 내부 수분량 감소를 보충	- 수축량이 적은 포졸란계 재료를 수축이 큰 수경성 재료와 치환 동일 강도를 유지하면서도 수축을 줄임
장점	배합 용이	주변환경에 영향 적음	배합 용이
한계	- 양생조건에 따른 수축저감량 편차 발생 - 이상 사용 시 과다 팽창	- 인공경량골재: 국내 실용화 곤란(수입산) - 초흡수성폴리머(SAP): 타 성능 감소 유발, 높은 가격	- 소극적 수축저감: 수축저감 효율이 낮음 - 양생조건에 따라 수축저감량 차이 발생
수축저감방안	CFBC보일러 애쉬 사용	저가형 부산물 경량골재 사용	반응성 골재 사용

① 유효공극의 크기 확대를 통한 수축저감기법 개발

- Laplace 법칙에 따라 유효공극의 크기 확대하여 모세관압을 줄여 수축유발력을 감소시킴.
- 유효공극의 크기를 확대하기 위해 수화물의 형상변경이 필요한데, 이를 위해 순환유동층(CFBC) 보일러 애시 투입함.
- CFBC 보일러 애시는 무수석고($CaSO_4$)와 f-CaO로 구성된 부산물로, 무수석고에 의한 황산염 기반 수축저항성 수화물 생성 유도, 극초기 황산 농도 증가에 의한 칼슘-알루미네이트/칼슘-알루미노실리케이트 유리질의 수화지연현상을 f-CaO로 극복함(복합자극).
- 시험결과 수중양생시편은 CFBC 애시 사용량 증가에 의해 일부 강도 감소를 확인(SO_4 양의 영향)하였고, 건조시편은 CFBC 애시 사용량 증가에 따라 강도가 일부 개선됨(CFBC 애시 사용시 양생조건에 의한 강도 민감도 문제를 해결할 가능성이 있음).
- CFBC 애시 사용 시 무시멘트 모르타르의 자기수축량은 최대 40% 감소하였고, 동시에 28일 총수축량(건조+자기) 약 45% 감소가 가능한 것으로 나타남(CFBC 애시에 의해 유효공극량이 증가 됨을 확인).



(a) 수중양생 압축강도 결과

(b) 밀봉양생 압축강도 결과

(c) 자기수축량

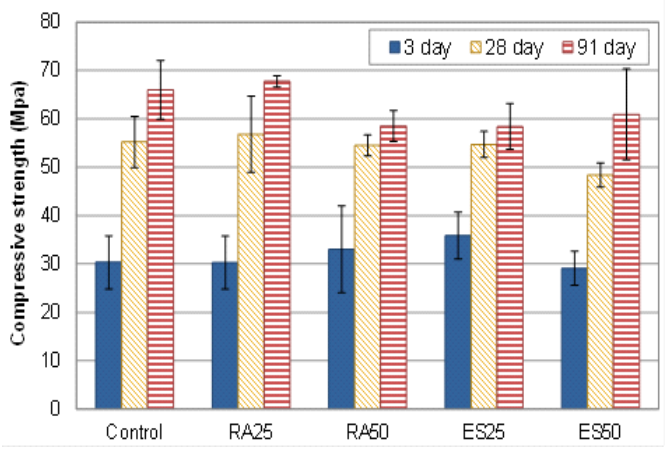
(d) 총 수축량

그림 3.1.13 무시멘트 모르타르 강도 및 수축에 대한 CFBC fly ash와 bottom ash의 영향

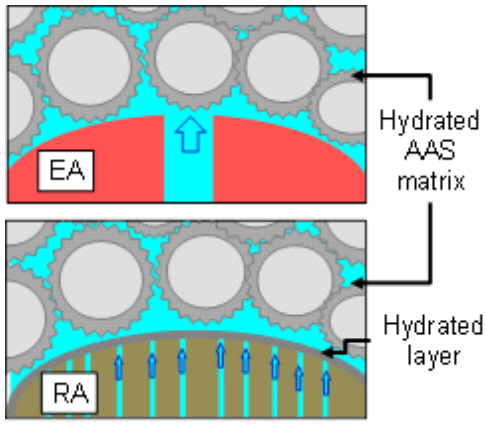
② 부산물 골재의 내부양생 효과를 활용한 수축저감

- 부산물 골재의 내부양생 메커니즘은 배합 내 흡수율이 높은 부산물 골재인 순환골재를 혼입해 내부양생 효과를 유도하고, 경우에 따라 순환골재 표면의 미수화 시멘트의 강알칼리 특성으로 인한 수화자극을 기대함.
- 부산물 골재를 활용한 수축저감 시험은 무시멘트 대표결합재 중 반응물이 단순한 G2 결합재를 이용하였고(2종 슬래그 및 분말형 규산나트륨), 내부양생용 재료로써 순환골재와 비교군으로 인공경량골재 팽창혈암을 사용하여, W/B 0.4, 자극재/슬래그비 0.1, 모래/슬래그비 1.2, 재생골재와 슬래그를 슬래그에 중량대비 10%, 20%씩 치환하여 재령에 따른 압축강도와 수축량을 평가함.
- 자기수축 측정용 시험체는 밀봉양생을, 총 수축량 측정용 시험체는 대기 노출을 실시하였으며, 수화도-고정수량 측정을 위해 내부수화물은 XRD 측정을, 공극량 변화는 MIP 측정을, 내부형상은 SEM 측정 등을 실시함.
- 순환골재 혼입 시 인공경량골재 적용과 유사하게 3, 28일 강도 변화가 없었으며, 91일 결과는 강도 감소가 일부 발견되었음.

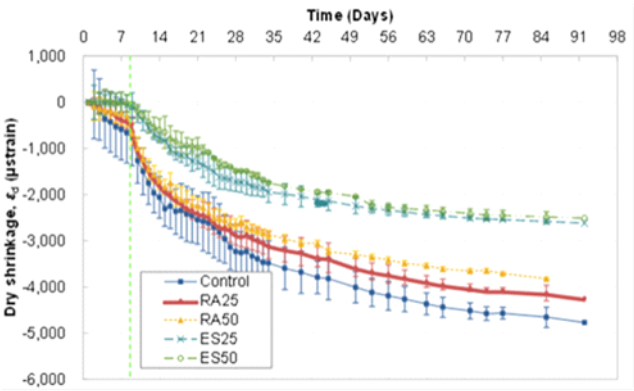
- 28일 총 수축(건조+자기)량은 1,480 $\mu\varepsilon$ 이내 확보(ES50 배합)하였으며, 이에 대한 내용을 기반으로 논문을 게재함(SCI-70, SCI-33).



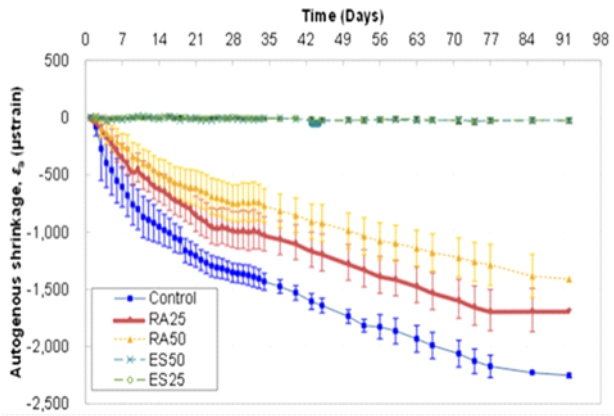
(a) 부산물 활용 내부양생에 의한 압축강도 변화



(b) 부산물 골재 내부양생 개념

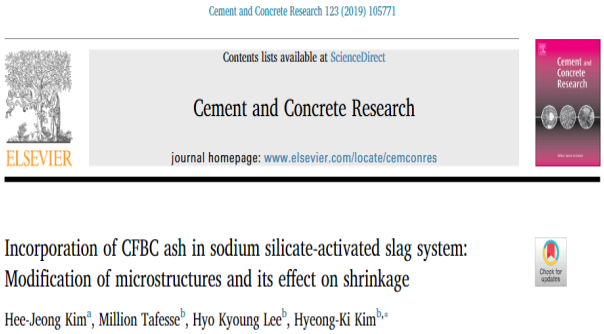


(c) 내부양생에 의한 건조수축 감소



(d) 내부양생에 의한 자기수축 감소

그림 3.1.14 순환골재 혼입 무시멘트의 강도, 수축변화율 및 수축효율 상관관계 개념도


Cement and Concrete Research 123 (2019) 105771

Contents lists available at ScienceDirect

Cement and Concrete Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconres

Incorporation of CFBC ash in sodium silicate-activated slag system: Modification of microstructures and its effect on shrinkage

Hee-Jeong Kim[a], Million Tafesse[b], Hyo Kyoung Lee[b], Hyeong-Ki Kim[b,*]

유효공극의 크기 확대를 통한 수축저감기법 개발 관련 논문게재


Construction and Building Materials 159 (2018) 286–296

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Use of recycled aggregates as internal curing agent for alkali-activated slag system

Nam Kon Lee[a], Selamu Yihune Abate[b], Hyeong-Ki Kim[b,*]

[a] Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, 1 Engineering Drive 2, 117576, Singapore
[b] School of Architecture, Chosun University, 309 Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 61452, South Korea

부산물 골재의 내부양생 효과를 활용한 수축저감 관련 논문 게재

나. 유해이온 반응제어 자기치유 기술 개발

(1) 염소이온(Cl^-) 반응제어 물질을 활용한 시멘트계 재료의 Cl^- 고정성능 향상 기술

(가) Cl^- 반응제어 소재의 선정

① 시멘트계 재료의 Cl^- 고정성능 향상 기술에 관한 개요

- 염해 방지를 위한 기존의 대다수 열화 억제기술은 Cl^-의 침투를 물리적 관점에서만 억제하고자 함. 그러나 콘크리트 균열의 발생은 필연적이기 때문에, Cl^-를 선택적으로 고정 가능한 물질을 활용한 시멘트계 재료의 Cl^- 고정성능 향상 기술은 시멘트계 재료의 Cl^- 이온 침투 저항성을 개선할 수 있음.
- 본 시멘트계 재료의 Cl^- 고정성능 향상 기술 개발에서는 Cl^- 선택적 고정에 기여하는 칼슘알루미네이트 클링커의 제조(PCT 국제 특허출원) 및 활용 기술 개발, 이온교환수지의 활용 기술 개발(특허 등록 및 PCT 국제 특허출원)에 관한 연구를 수행함(특허-36, SCI-39).



PCT/KR2019/016611

특 허 협 력 조 약
(PATENT COOPERATION TREATY)

PCT

국제출원번호 및 국제출원일 통지서
(PCT 규칙 20.2(c))

발송일 2019년 12월 05일 (05.12.2019)

출원인 또는 대리인의 서류참조기호 HP180207PCT

중요통지사항

국제출원번호 PCT/KR2019/016611

국제출원일 2019년 11월 28일 (28.11.2019)

우선일 2018년 11월 28일 (28.11.2018)

출원인 한양대학교 에리카산학협력단 등

발명의 명칭 칼슘 알루미네이트 무기물 및 그 제조방법, 그리고 이를 포함하는 시멘트 조성물

materials

MDPI

Article

Chloride Ion Adsorption Capacity of Anion Exchange Resin in Cement Mortar

Yunsu Lee, Hanseung Lee, Dohyun Jung, Zhengxin Chen and Seungmin Lim *

Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Ansan 15588, Korea; 23yslee@gmail.com (Y.L.); ercleehs@hanyang.ac.kr (H.L.); cirel31@gmail.com (D.J.); czxgfyx@foxmail.com (Z.C.)
* Correspondence: smlim09@gmail.com; Tel.: +82-31-400-5181

특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number 제 10-2048127 호

출원번호 Application Number 제 10-2017-0165744 호

출원일 Filing Date 2017년 12월 05일

등록일 Registration Date 2019년 11월 18일

발명의 명칭 Title of the Invention
이온 교환 수지를 포함하는 알칼리 활성 결합재 구조물, 및 그 제조 방법

② 반응제어 소재의 Cl^- 고정성능 평가 및 Cl^- 반응제어 소재 선정

- Calcium dialuminate($CaO{\cdot}2Al_2O_3$, CA_2), 이온 교환 수지(Ion exchange resin), $AgNO_3$ 희석액, dimethylethanolamine(DMEA)가 Cl^- 반응제어 소재의 후보군으로 선정됨. 시중에 판매되지 않는 CA_2는 고온 전기로에서 직접 제조되어 연구에 활용됨.
- Cl^- 반응제어 소재 후보군은 NaCl 수용액(증류수 또는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 환경이 모사된 포화 $Ca(OH)_2$ 수용액 조건)에서 Cl^- 고정능력이 평가됨. 수용액 내 실험결과를 기준으로 반응제어 소재 CA_2와 이온 교환 수지가 각각 OPC의 10% 치환되었다고 가정 시, Cl^- 고정능력은 OPC 대조군 대비 약 47%(CA_2)와 97%(이온 교환 수지) 향상되어 우수한 Cl^- 고정성능을 보여줌($AgNO_3$ 희석액과 DMEA는 Cl^- 고정성능이 거의 없었음).
- CA_2와 이온 교환 수지가 시멘트계 재료의 Cl^- 고정성능 향상을 위한 반응제어 소재로 선정됨.

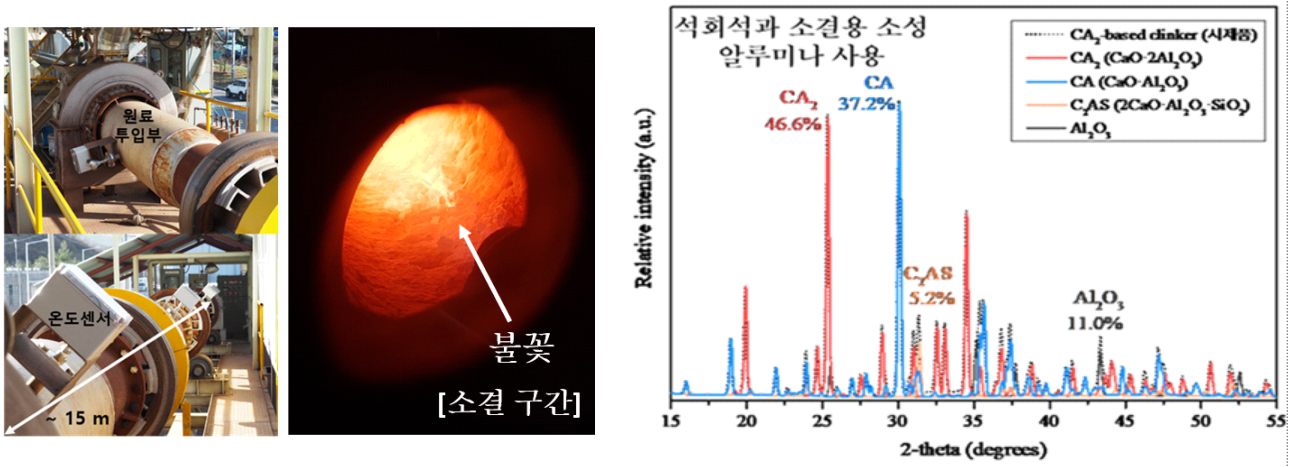
(나) Rotary kiln을 이용한 CA_2 기반 클링커의 대량 제조기술 개발

① 화학 시약을 이용한 고순도의 CA_2 기반 클링커 제조

- Ca 제공 물질로 CaO, $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$ 시약이, Al 제공 물질로 Al_2O_3 시약이 사용됨.
- 1,550℃의 고온 전기로에서 약 74% 이상의 CA_2 순도를 안정적으로 합성할 수 있었으나, 90% 이상의 CA_2 순도를 확보하는 과정은 재현성이 낮고 생산 효율 및 경제성이 낮았음 (9,100~9,700 원/kg). CA_2의 대량 제조기술 개발을 위해서 석회석, 보크사이트, 소결용 소성 알루미나를 이용한 CA_2 기반 클링커 제조 연구가 진행됨.

② 자연광물을 이용한 고순도 CA_2 기반 클링커의 대량제조 기술 개발

- Ca 제공 물질로 석회석(약 13~17 원/kg) 분말이, Al 제공 물질로 보크사이트(약 220~495 원/kg) 또는 소결용 소성 알루미나(약 800~900 원/kg) 분말이 사용됨.
- CA_2 기반 클링커의 원료는 석회석 (37.5 wt.%)과 소결용 소성 알루미나 (62.5 wt.%)가 혼합된 분말이었고, 약 1350~1400도의 소결온도에서 CA_2 기반 클링커가 제조되었음(소결온도에서 약 30분 소요).
- 석회석과 보크사이트를 이용한 CA_2 기반 클링커 제조과정에서는 보크사이트의 높은 SiO_2 함량(약 15 wt.%)으로 인하여 Gehlenite($2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$, C_2AS) 생성률이 높았고, CA_2의 순도를 높이는 데 한계가 있었음. 이는 소결용 소성 알루미나(약 99 wt.%의 Al_2O_3)를 사용함으로써 해결할 수 있었음. 그림 3.2.1은 CA_2 기반 클링커 제조에 이용된 Rotary kiln과 제조된 CA_2 기반 클링커의 X-ray diffraction 패턴을 보여줌.



(a) Rotary kiln　　(b) CA_2 기반 클링커의 X-ray diffraction 패턴

그림 3.2.1 CA_2 기반 클링커의 제조과정 및 제조된 CA_2 기반 클링커의 X-ray diffraction 측정 결과

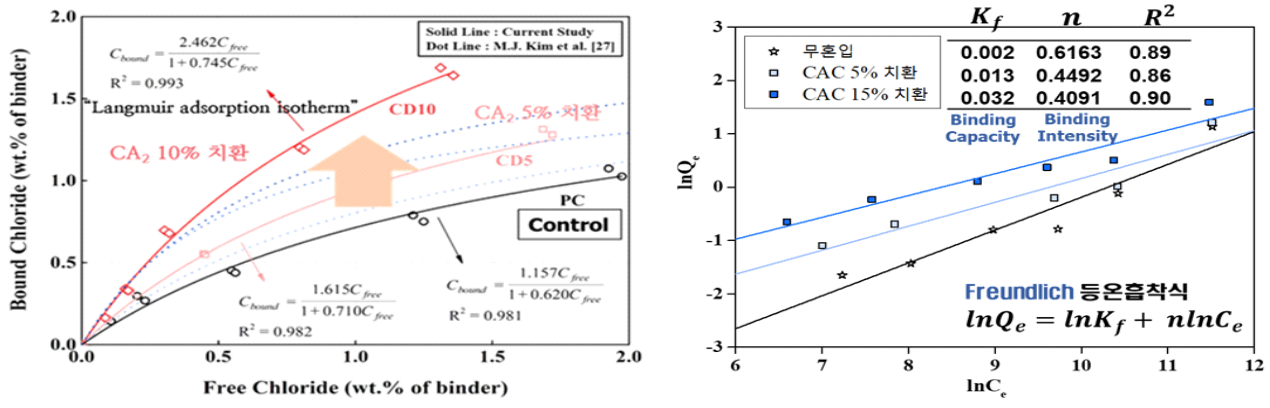
- 석회석과 소결용 소성 알루미나 분말의 단가를 바탕으로 계산된 CA_2 기반 클링커의 단가는 약 604~681 원/kg임 (CA_2 기반 클링커 1 kg 제조에 석회석 분말 0.449 kg, 소성용 소결 알루미나 분말 0.748 kg이 필요함). 시중에 판매되는 고 알루미나 시멘트(CA_2 함유)의 단가는 약 1,400~1,600 원/kg으로, 본 연구에서 제조된 CA_2 기반 클링커는 실용화 가능성을 충분히 보여줌.

- 시중에 판매되는 고 알루미나 시멘트는 약 56%의 CA($CaO \cdot Al_2O_3$)와 43%의 CA_2로 CA_2/CA 질량비가 약 0.77이나, 본 연구개발에서 제조된 CA_2 기반 클링커는 CA_2/CA 질량비가 약 1.32로 CA_2의 순도가 향상됨.
- 보크사이트는 생산 지역별로 화학조성의 편차가 큰 단점을 가지고 있고 Al_2O_3 외의 다른 원소도 함유하는 경우가 많으므로, 석회석과 소결용 소성 알루미나를 이용한 CA_2 기반 클링커의 대량 제조기술을 개발함.

(다) Cl^- 반응제어 물질이 적용된 시멘트계 재료의 Cl^- 고정성능 향상 기술

① CA_2 혼입 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능 평가

- 약 90% 순도의 CA_2 또는 고 알루미나 시멘트(CAC, CA_2 43 wt.% 함유)가 5%, 15% 치환된 포틀랜드 시멘트 기반 결합재의 Cl^- 고정량이 평가됨.
- 고순도의 CA_2가 혼입된 결합재의 Cl^- 고정능력 평가에는 내재염화물 방법이 이용됨. CAC가 치환된 결합재는 28일간 밀봉양생 되었고, 1.18~2.36 mm 크기의 실험체가 Cl^- 고정량 평가에 사용됨. 각 실험체는 0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 1, 3 M의 NaCl 수용액에서 약 2개월 동안 침지되었고, 10의 Liquid/solid ratio 조건에서 실험이 진행됨.
- 고정 염화물량(Bound choride)은 초기 Cl^- 농도(Total chloride)에서 전위차 적정기를 통해 측정된 평형상태 후의 Cl^- 이온 농도를 감하여 산정됨(결합재의 질량 당 고정량 계산).
- 약 90% 순도의 CA_2 또는 CAC가 치환된 포틀랜드 시멘트 기반 결합재의 Cl^- 고정성능은, NaCl 수용액의 농도에 따른 결합재의 Cl^- 고정량을 측정한 후, Langmuir 또는 Freundlich 등온흡착식을 회귀분석에 이용하여 평가됨. 그림 3.2.2는 고순도의 CA_2 또는 CAC가 포틀랜드 시멘트의 일부 치환된 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능 평가 결과임.



(a) CA_2 치환 결합재 (b) CAC 치환 결합재

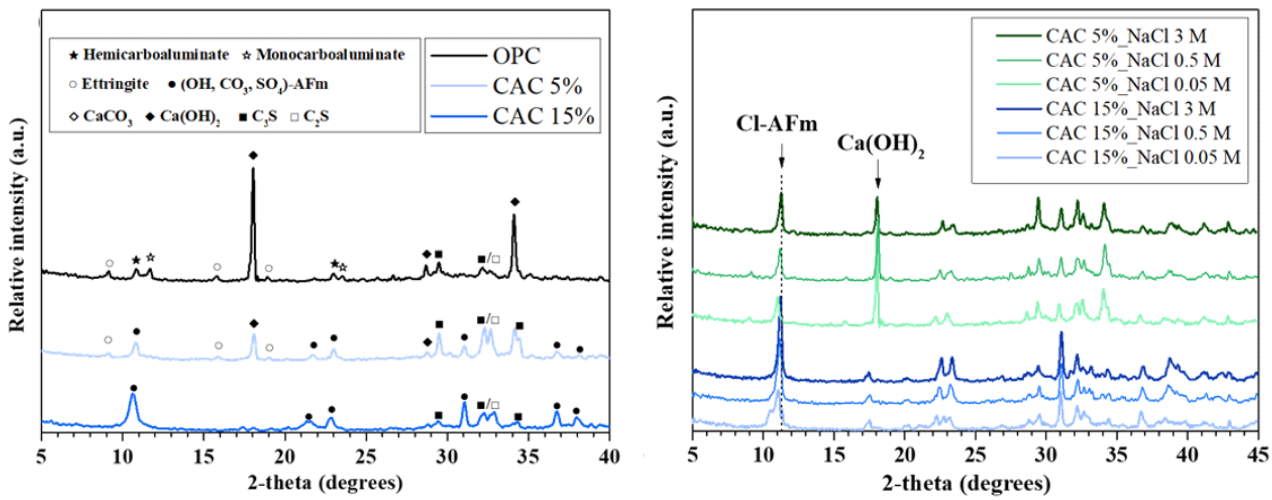
그림 3.2.2 CA_2 혼입 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능

- 표 3.2.1 에서처럼, CA_2가 OPC의 5%, 10% 치환된 결합재의 Cl^-의 농도에 따른 고정량은 각각 104~124%, 109~155% 향상되었고, CAC가 OPC의 5%, 15% 치환된 결합재의 Cl^-의 농도에 따른 고정량은 각각 108~210%, 158~333% 향상됨.

표 3.2.1 고순도의 CA_2 또는 고 알루미나 시멘트가 치환된 결합재의 고정성능 산정

구분	OPC	CA_2 5% 치환	CA_2 10% 치환	CAC 5% 치환	CAC 15% 치환
Cl^- 고정성능 (%)	100	104-124	109-155	108-210	158-333

- 그림 3.2.3은 Cl^-와 반응 전후의 CAC, CAC가 치환된 결합재에서는 층상 이중 수산화물 (Layered double hydroxide) 구조의 alumino-ferrite monosubstituent(AFm) 물질의 생성이 높게 나타남을 확인할 수 있었음. 이 AFm 물질은 Cl^-를 층상구조 내부에 고정하여 Cl-AFm으로 전환되며, 초기 AFm의 생성량은 시멘트 결합재의 Cl^- 고정에 주요한 영향을 줌.



(a) 재령 28일의 CAC 치환 결합재 (밀봉 양생)　　(b) NaCl 수용액에 침지된 후의 CAC 결합재

그림 3.2.3 NaCl 수용액 속 침지 전후의 CAC 치환 결합재의 X-ray diffraction 패턴

- CAC가 15% 치환된 모르타르의 경우, OPC와 유사한 공극분포를 가지나, OPC에 비해 158~333% 향상된 Cl^- 고정성능을 보여주었기 때문에 모르타르의 침투 표면에서의 우수한 Cl^- 침투 지연효과를 보여주었음. 이와 관련한 연구에서는, NT Build 492 시험 방법에 의한 Cl^- 확산계수 산정결과에서와 165 g/L의 NaCl 수용액 조건에서의 장기적 자연침지 결과에서도 Cl^- 확산계수 산정결과에서 CAC가 15% 치환된 결합재의 확산계수가 작게 나타남.

② 이온 교환 수지 혼입 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능 평가

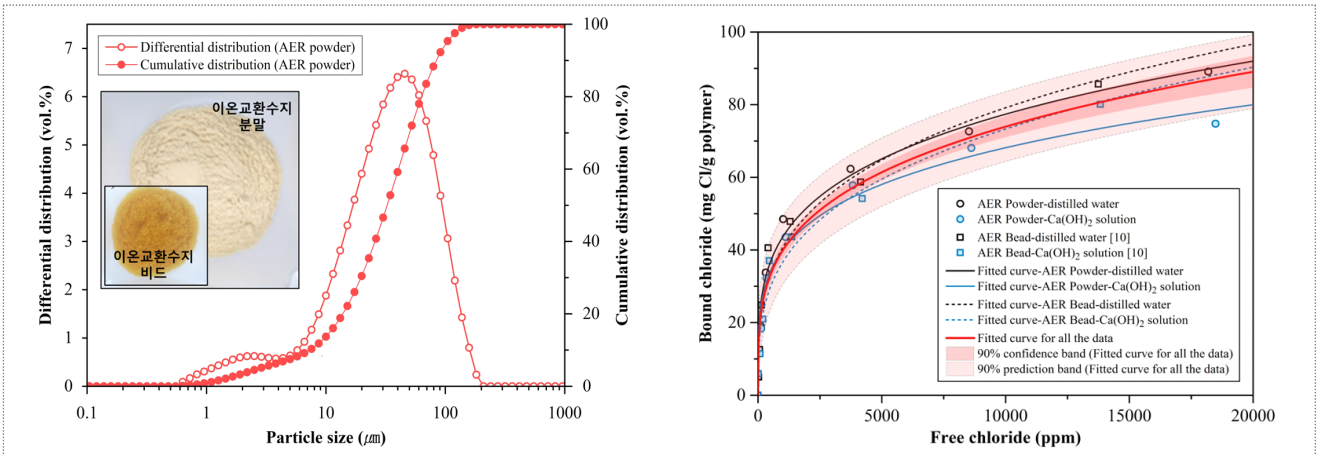
- 음이온 교환 수지가 치환된 포틀랜드 시멘트 기반 결합재의 Cl^- 고정성능은 electron probe microanalysis(EPMA)를 이용하여 평가됨. 표 3.2.2는 이온 교환 수지 혼입 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능 평가에 사용된 모르타르의 배합비를 나타냄.

- 시판되는 비드 형태의 음이온 교환 수지는 시멘트 조성물보다 다공성이 큰 물질이기 때문에, 이에 대한 해결을 위해서 분말화된 음이온 교환 수지도 연구에 활용됨. 음이온 교환 수지는 각각 300, 400, 500 rpm 조건에서 5분 또는 10분간 ball mill (FRITSCH 사)로 분말화되어 입도 분포에 대해 평가되었고, 400 rpm에서 5분간 분쇄된 음이온 교환 수지가 연구에 활용됨. 그림 3.2.4(a)는 분쇄된 음이온 교환 수지의 입도 분포 결과를 보여줌.

표 3.2.2 이온 교환 수지 혼입 시멘트 모르타르의 배합비

실험체명	물-결합재비	물 (kg/m³)	시멘트 (kg/m³)	잔골재 (kg/m³)	이온교환수지 (kg/m³)
OPC	0.5	248	496	1487	-
B			496	1442	22 (비드)
P1			466	1487	11 (분말)
P2			436	1487	22 (분말)

- 그림 3.2.4(b)는 증류수 또는 포화 수산화칼슘 조건의 NaCl 수용액에서 음이온 교환 수지 분말과 비드의 Cl^- 이온 고정능력에 관한 결과를 보여줌. 음이온 교환 수지는 분쇄된 후에도 Cl^- 고정성능이 저하되지 않았음.



(a) 분말화된 음이온 교환 수지의 입도 분포 결과 (b) 음이온 교환 수지 분말 및 비드의 Cl^- 고정성능 평가결과

그림 3.2.4 음이온 교환 수지 분말 및 비드의 Cl^- 고정성능 평가결과

- 그림 3.2.5는 음이온 교환 수지가 치환된 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능 평가결과임. 음이온 교환 수지의 Cl^- 고정량은 시멘트 결합재보다 약 3.25~3.94배 높은 것으로 확인됨.

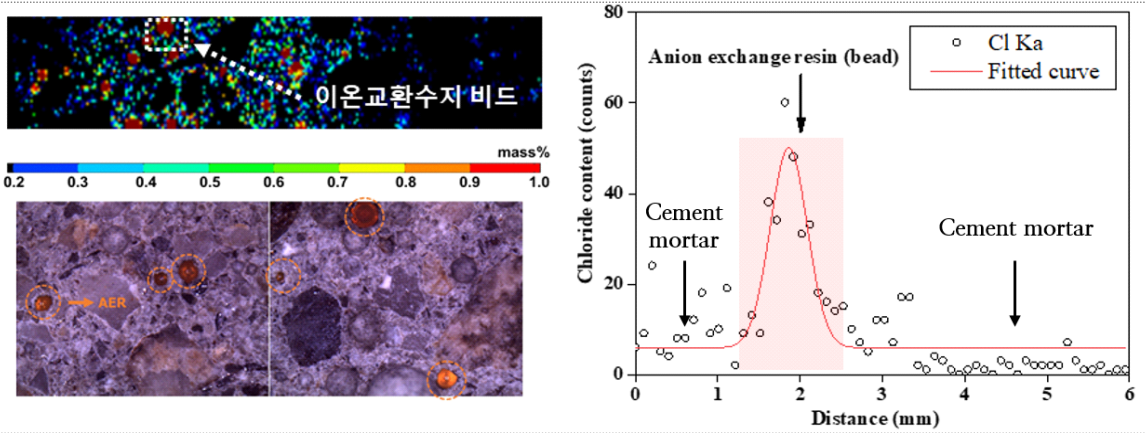


그림 3.2.5 음이온 교환 수지 비드가 혼입된 시멘트 모르타르의 Cl^- 고정성능 평가: EPMA 결과

- 음이온 교환 수지 분말은 포화 $Ca(OH)_2$ 환경에서 비드 형태보다 더 빠른 Cl^- 고정성능을 보

여주고, 시멘트 결합재에 치환 시 비드 형태보다 압축강도 저하가 작았음. Cl^- 고정성능의 저하가 없는 음이온 교환 수지 분말의 제조기술을 통해 시멘트 결합재의 Cl^- 고정성능이 개선될 수 있음.

- 그림 3.2.6은 Cl^- 함유량의 최댓값과 최솟값을 각각 1.00과 0.20 mass%로 설정하여 염소이온 농도에 따른 색 구분을 통해 나타낸 EPMA 결과임. 음이온 교환 수지는 그림 3.2.6에서처럼 시멘트 결합재 보다 높은 Cl^- 고정능력을 보여주기 때문에, 내부로 침투하는 Cl-를 고정하여 결합재 내부의 Cl^-를 분산하여 농도 구배를 낮출 수 있었음.

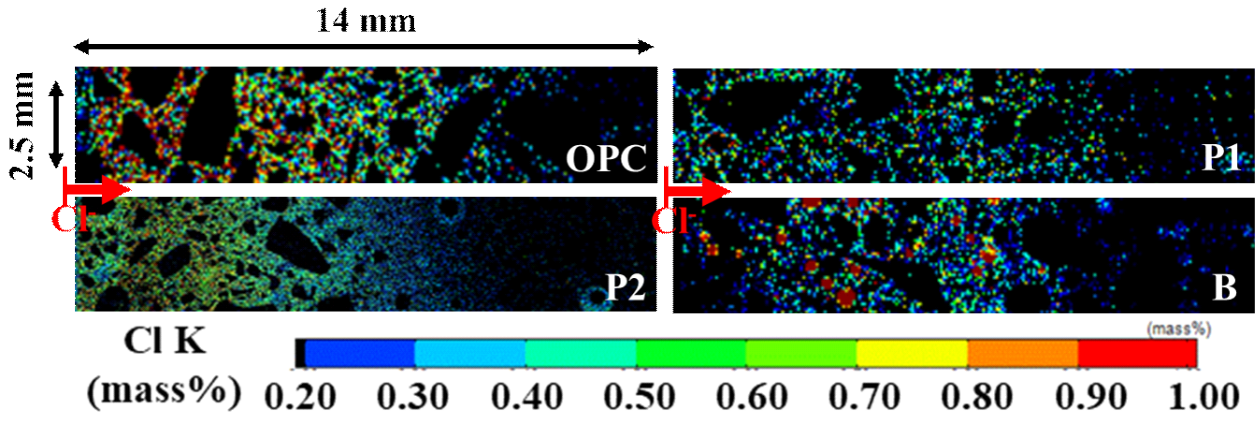


그림 3.2.6 음이온 교환 수지 비드 및 분말이 혼입된 시멘트 모르타르의 Cl^- 고정성능 평가: EPMA 결과

- 특히, 음이온 교환 수지의 기능을 응용한 알칼리활성 결합재 제조기술(특허등록 10-20498127)은 황산 및 해수 침식에 대한 내성이 강한 무기폴리머 결합재에 응용 가능하며, 다양한 열화환경에 활용 가능성이 큰 기술임.

(라) Cl^- 반응제어 물질이 적용된 시멘트계 보수재료 개발

① CA_2 기반 클링커와 음이온 교환 수지 분말이 치환된 OPC 보수재료의 Cl^- 고정성능 개선

- Rotary kiln에서 제조된 CA_2 기반 클링커와 음이온 교환수지 분말이 치환된 OPC의 보수재료의 Cl^- 고정성능은 EPMA 방법을 이용해 평가됨.
- Cl^- 반응제어형 모르타르의 평가에는 CA_2 기반 클링커(A)와 음이온 교환 수지 분말(I)이 OPC의 일부 치환된(A10,I5, #:치환률(wt.%, 소수점 이하 생략)) 하이브리드 보수용 모르타르 실험체가 활용됨.
- 음이온 교환 수지 분말이 치환된 보수용 모르타르는, 범용성을 위해서, SO_4^{2-} 반응제어형 모르타르의 배합(I5)과 동일하게 기존의 시판되는 보수용 모르타르 결합재의 1.5 wt.%가 음이온 교환 수지 분말로 치환된 배합이 이용됨.
- 그림 3.2.7의 실험체는 모두 165 g/L의 NaCl 수용액에서 35일간 침지된 것임. 그림 3.2.4는 CA_2 기반 클링커와 음이온 교환 수지 분말이 치환된 결합재(각각 A10, I5)가 대조군(OPC)보다 Cl^- 고정능력이 높은 것을 보여줌.

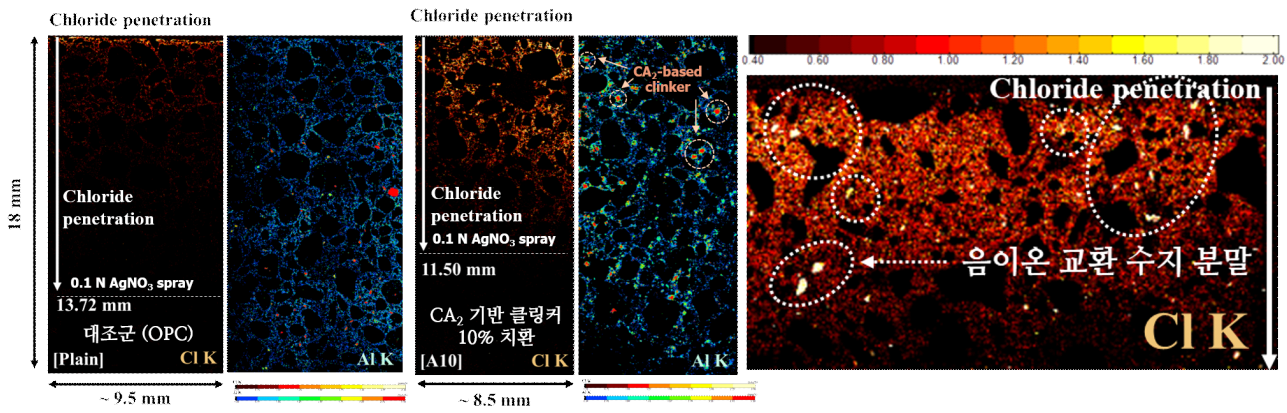
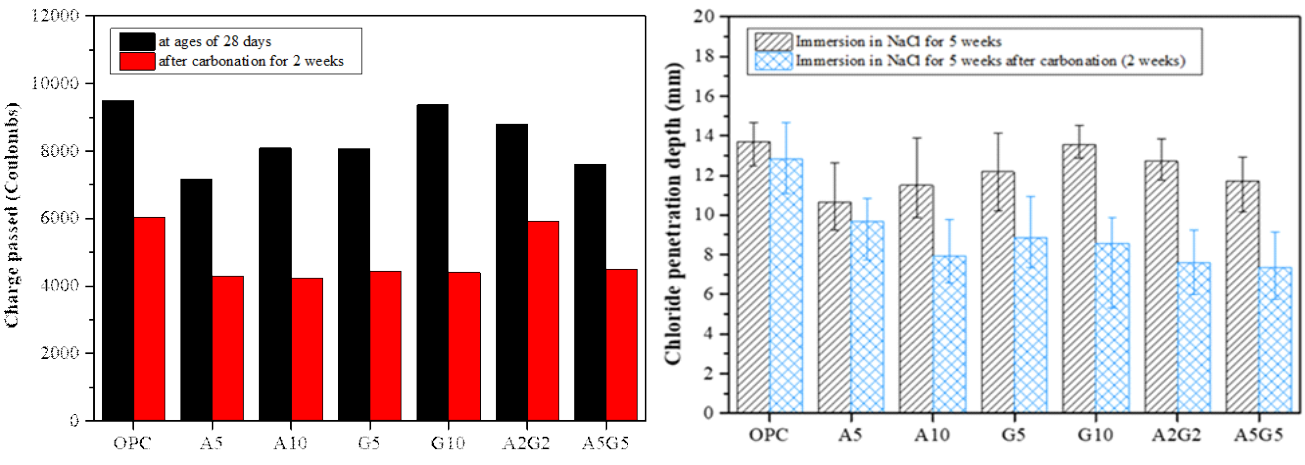


그림 3.2.7 EPMA 방법을 이용한 CA_2 기반 클링커와 음이온 교환수지 분말이 치환된 OPC 기반 보수재료의 Cl^- 고정량 평가결과

- 그림 3.2.7에서 $AgNO_3$ 분무법을 이용한 Cl^- 침투 깊이 측정결과는 A10보다 OPC가 깊었음. 이는 A10의 표면부에서 OPC보다 고정된 Cl^-의 양이 많았기 때문으로, OPC보다 A10이 Cl^- 고정능력이 우수함을 보여줌. 특히, 음이온 교환 수지 분말은 주변의 시멘트 결합재보다 Cl^- 고정능력이 월등히 높은 것을 보여줌.

② CA_2 기반 클링커가 치환된 OPC 기반 보수재료 Cl^- 침투 저항성 평가

- 그림 3.2.8을 보면, CA_2 기반 클링커(A)만 각각 5%, 10% 치환된 A5와 A10은 OPC보다 재령 28일의 Rapid chloride permeability test(RCPT) 결과, Cl^- 침투 저항성에서 모두 우수하였음. A가 시멘트계 재료와 혼입하여 사용될 시, 층상 이중 수산화물의 비율 증가로 시멘트 결합재의 염소이온 및 탄산이온 고정성능이 향상됨. 이하의 CO_3^{2} 반응제어 소재 γ-C_2S 기반 클링커(G)와 하이브리드 재료로써 복합 열화에 대처가 가능한 유해이온 반응제어 소재임.



(a) RCPT 결과 (b) Cl^- 침투깊이 측정 결과

그림 3.2.8 CA_2 기반 클링커가 치환된 OPC 기반 보수재료의 RCPT 실험결과

(2) 탄산이온(CO_3^{2-}) 반응제어 물질 활용 시멘트계 재료의 CO_2 고정성능 향상 기술

(가) CO_3^{2-} 반응제어 소재 선정

① 시멘트계 재료의 CO_2 고정성능 향상 기술에 관한 개요

- 최근 CO_2 저감 대책은 국제적 논점이며, 이는 기존 포틀랜드 시멘트 대체재의 개발로 이어지고 있음. 그러나 CO_2 저감 뿐만 아니라 탄산화 저항성 향상을 통해 내구성을 유지하는 것은 필수적임. CO_3^{2-}를 선택적으로 고정 가능한 물질은 시멘트계 재료 안에서 CO_2 고정을 통해 CO_2의 저감 뿐만 아니라 탄산화 저항성을 개선할 수 있음.
- 본 시멘트계 재료의 CO_2 고정성능 향상 기술 개발에서는 CO_3^{2-} 선택적 고정에 기여하는 칼슘 실리케이트 클링커의 제조 및 활용 기술 개발에 관한 연구를 수행하였으며, SCI-E 논문을 게재함(SCI-67).



Hindawi
Advances in Materials Science and Engineering
Volume 2019, Article ID 9856734, 10 pages
https://doi.org/10.1155/2019/9856734

Hindawi

Research Article

Improvement in Carbonation Resistance of Portland Cement Mortar Incorporating γ-Dicalcium Silicate

Zhengxin Chen,[1] Yunsu Lee,[1] Hyeongkyu Cho,[2] Hanseung Lee,[3] and Seungmin Lim[3]

② CO_2 고정성능이 높은 반응제어 소재 선정 및 CO_3^{2-} 반응제어 소재 선정

- MgO, $Mg(OH)_2$, γ-C_2S(γ-$2CaO{\cdot}SiO_2$), DMEA가 CO_3^{2-} 반응제어 소재의 후보군으로 선정됨. γ-C_2S는 고온 전기로에서 직접 제조되어 연구에 활용됨.
- CO_3^{2-} 반응제어 소재 후보군의 탄산화 반응을 포화 $Ca(OH)_2$ 수용액에서 수행함. 탄산화 반응은 CO_2 주입 항온항습기를 이용해 진행함. CO_3^{2-} 반응제어 소재 1 g의 CO_2 고정성능은 초기 CaO 질량 대비 반응된 CaO 질량 비율 계산하여 산정함. 반응제어 소재 MgO, γ-C_2S, DMEA의 CO_2 고정성능은 각각 75%, 76%, 60%로 산정됨.
- $Mg(OH)_2$와 γ-C_2S가 시멘트계 재료의 CO_2 고정성능 향상을 위한 반응제어 소재로 선정됨. $Mg(OH)_2$는 경제성이 낮아 실용화가 어려울 것으로 판단되었고, γ-C_2S만 CO_3^{2-} 반응제어 물질로써 연구개발에 사용됨.

(나) Rotary kiln을 이용한 γ-C_2S 기반 클링커의 대량 제조기술 개발

① 화학 시약을 이용한 고순도의 γ-C_2S 기반 클링커 제조

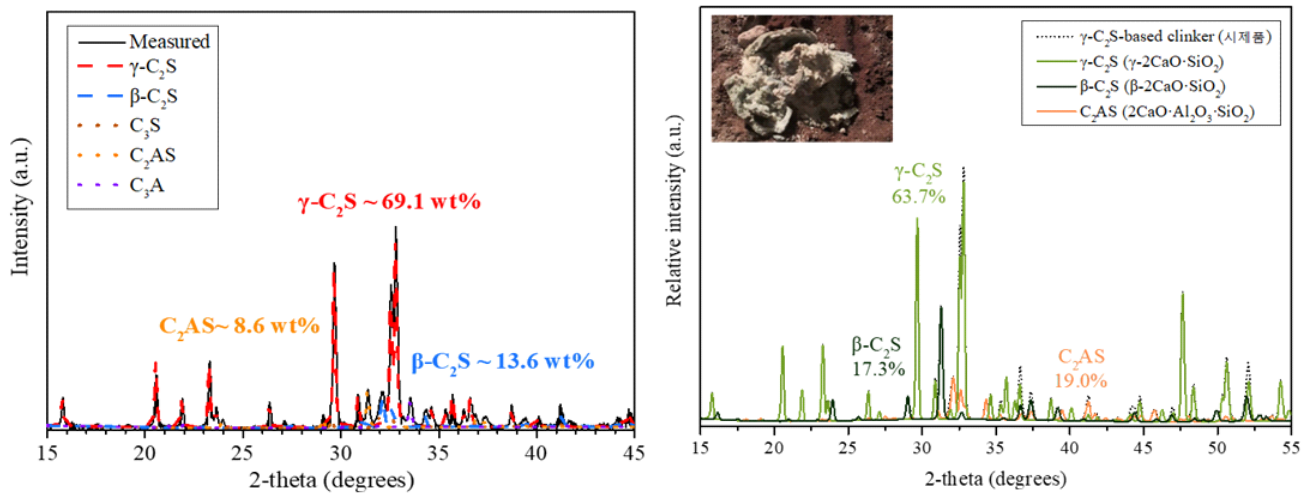
- Ca 제공 물질로 CaO, $CaCO_3$, $Ca(OH)_2$ 시약이, Si 제공 물질로 SiO_2 시약이 사용됨.
- 화학 시약을 이용하여 2의 CaO/SiO_2 몰 비에 맞추어 γ-C_2S 원료가 배합됨. Ca 제공 물질로 $Ca(OH)_2$를 사용 시, 1450℃의 고온 전기로에서 약 90% 이상의 γ-C_2S 순도를 확보할 수 있었으나, Ca 제공 물질로 $CaCO_3$를 사용할 때는 γ-C_2S의 순도가 약 77%로 감소함. CaO를 사

용했을 때, γ-C_2S의 제조 효율이 가장 낮았음.

- 화학 시약을 이용하여 γ-C_2S 기반 클링커를 제조할 시, 경제성이 낮았음 (9,340~9,950 원/kg). 화학 시약 사용시 효과가 좋았던 $Ca(OH)_2$는 $CaCO_3$(석회석의 주성분)보다 경제성이 매우 낮으므로, 제조 효율이 낮아지더라도 석회석 분말을 이용하는 것이 경제성 측면에서 효과적이라고 판단됨. γ-C_2S의 대량 제조기술 개발을 위해서 석회석과 규석 분말을 이용한 γ-C_2S 기반 클링커 제조 연구가 진행됨.

② 자연광물을 이용한 γ-C_2S 기반 클링커의 대량제조 기술 개발

- Ca 제공 물질로 석회석(약 13~17 원/kg) 분말이, Si 제공 물질로 규석(약 65~173 원/kg) 분말이 사용됨.
- 그림 3.2.9는 자연광물(석회석, 규석)을 원료로 고온 전기로 또는 rotary kiln에서 제조된 γ-C_2S 기반 클링커의 조성 결과임. 기본적으로 γ-C_2S 생성 및 순도를 확보하기 위해서는 최소 1,300℃의 소결온도가 필요하였고, 30분의 소결시간에서도 γ-C_2S의 확보가 가능하였음. 공업용 원료를 이용한 합성과 달리, Al_2O_3, Fe_2O_3와 같은 원소가 자연광물에 존재하기 때문에 γ-C_2S의 순도는 제한될 수밖에 없었음. C_3A, C_4AF, C_2AS와 같은 무기물이 확인되었으나, 약 70%에 가까운 γ-C_2S의 순도를 확보할 수 있었음.



(a) 고온 전기로에서의 제조결과 (b) rotary kiln에서의 제조결과.

그림 3.2.9 자연광물을 원료로 제조된 γ-C_2S 기반 클링커의 X-ray diffraction 패턴

- 그림 3.2.9의 Rotary kiln에서 제조된 γ-C_2S 기반 클링커는 약 64%의 순도를 확보할 수 있었고, Rotary kiln 내부에서 나온 γ-C_2S 기반 클링커는 대기 중에서 피막이 서서히 깨지며 분말로 전환됨 (분화과정). γ-C_2S 기반 클링커는 피막으로 인하여 자연스럽게 서냉 됨(γ-C_2S 기반 클링커의 제조과정에서 α-C_2S에서 β-C_2S로의 전환을 막기 위해서 서냉이 중요).
- γ-C_2S 기반 클링커는 포틀랜드 시멘트 제조보다 석회석 필요량이 적어 CO_2 저감에 기여하고, 제조과정에서 급냉이 필요하지 않기 때문에 경제성 확보도 가능한 것으로 판단됨. CO_3^{2-}과 특이적 반응성이 있는 γ-C_2S 기반 클링커는 앞으로 더 주목받을 것으로 기대됨.

(다) CO_3^{2-} 반응제어 물질이 적용된 시멘트계 재료의 CO_2 고정성능 향상 기술

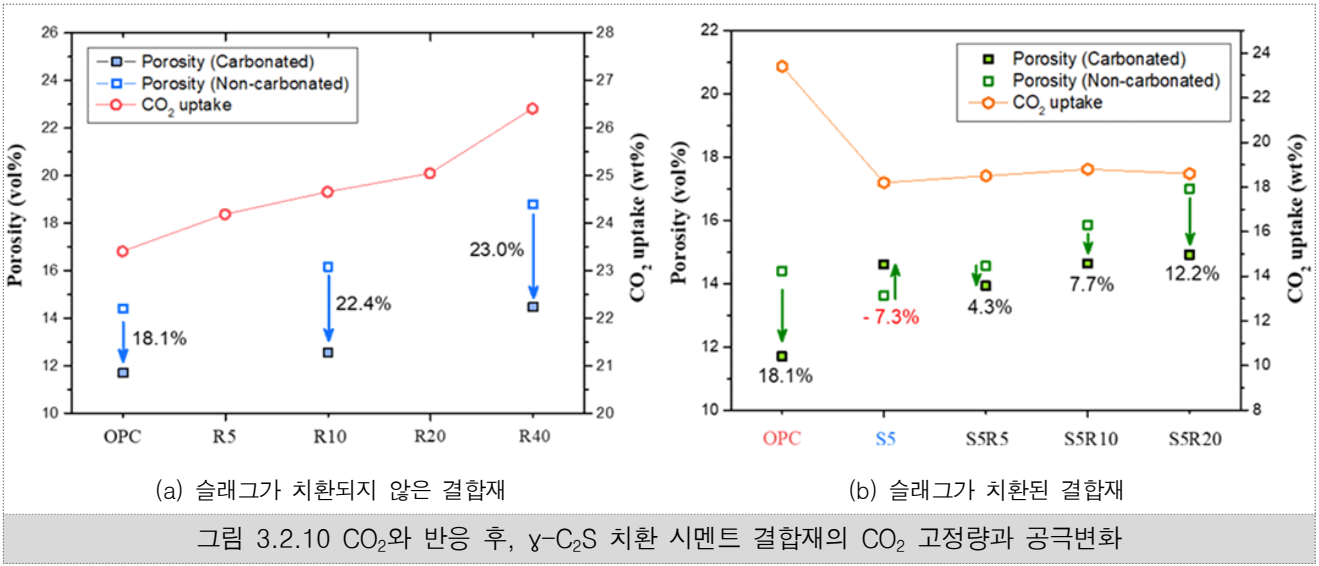
① γ-C_2S 혼입 시멘트 결합재의 CO_2 고정성능 및 공극 변화 평가

- 표 3.2.3은 γ-C_2S가 OPC의 5%, 10%, 20%, 40% 치환된 결합재와 고로슬래그 미분말이 기본적으로 OPC의 50% 치환된 OPC 기반 결합재에서 γ-C_2S가 추가로 OPC의 5%, 10%, 20% 치환된 결합재의 배합을 나타냄.

표 3.2.3 γ-C_2S가 치환된 결합재의 배합비

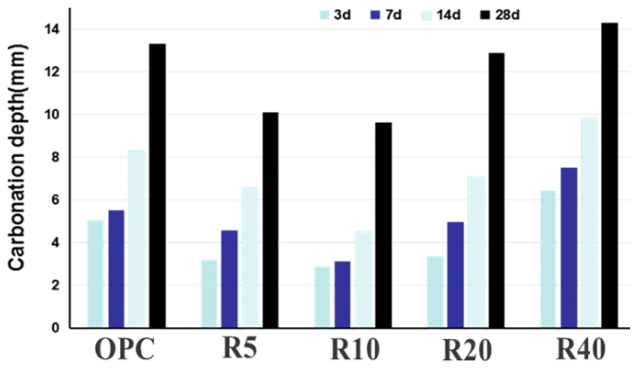
실험체명	물-결합재 비(%)	결합재 (wt.%)			잔골재-결합재 비
		시멘트	슬래그	γ-C2S	
OPC	50	100	0	0	0 or 3
R5		95		5	
R10		90		10	
R20		80		20	
R40		60		40	
S5		50	50	0	
S5R5		45		5	
S5R10		40		10	
S5R20		30		20	

- γ-C_2S가 치환된 시멘트 페이스트는 CO_2 고정량 측정에 사용되었고, γ-C_2S가 치환된 모르타르는 공극분포 측정과 탄산화 깊이 측정에 사용되었음. 결합재의 CO_2 고정량은 열중량 분석(TGA) 방법으로 측정되었고, 탄산화 깊이는 페놀프탈레인 용액 분무법이, 공극측정에는 수은 압입 주입법(MIP)이 이용되었음.
- 그림 3.2.10은 CO_2와 반응 후 γ-C_2S 치환 시멘트 결합재의 CO_2 고정량과 공극변화를 보여줌. 탄산화 전후의 공극 변화율을 보면 γ-C_2S는 CO_3^{2-}와 반응함에 따라 공극 개선에 기여함. 특히, γ-C_2S는 슬래그가 치환된 결합재에서 더 공극 개선 효과를 보여주었음.

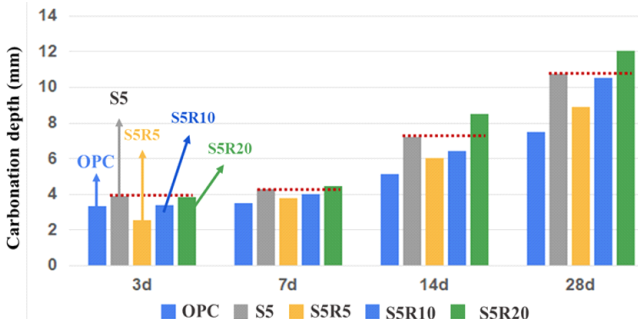


(a) 슬래그가 치환되지 않은 결합재 (b) 슬래그가 치환된 결합재

그림 3.2.10 CO_2와 반응 후, γ-C_2S 치환 시멘트 결합재의 CO_2 고정량과 공극변화



(a) 슬래그를 치환하지 않은 결합재,



(b) 슬래그가 치환된 결합재

그림 3.2.11 CO_2와 반응 후, γ-C_2S 치환 시멘트 결합재의 탄산화 깊이 측정결과

- 그림 3.2.11은 CO_2와 반응 후 γ-C_2S 치환 시멘트 결합재의 탄산화 깊이를 보여줌. 탄산화가 진행됨에 따라 탄산화 깊이는 R10에서 가장 작게 나타났음. γ-C_2S 치환율이 10%를 넘어가면, 일반적인 배합수에서 γ-C_2S의 낮은 수화반응성으로 인하여 수화생성물이 치밀하게 형성하지 못하므로 성능이 떨어졌음. OPC 시스템에서는 최대 10%까지의 γ-C_2S 혼입률이 적정하다고 판단됨.
- 슬래그가 기본적으로 50% 치환된 OPC 결합재에서는 OPC보다 탄산화 저항성이 떨어지는 것이 잘 알려져 있음. 이러한 결합재에 γ-C_2S가 OPC의 10%까지 치환됨에 따라 탄산화 저항성이 높게 나타나는 것(탄산화 깊이가 작음)을 확인할 수 있었음. γ-C_2S는 탄산화 저항성이 낮은 슬래그 치환 OPC에서 높은 탄산화 저항성을 보여주기 때문에, 시멘트 대체재로써 슬래그와 같이 효과적으로 사용될 것으로 기대됨.
- 슬래그가 혼입되지 않은 결합재를 보면, γ-C_2S가 혼입되었을 때 OPC의 3.3~12.8%의 향상된 CO_2 고정량을 확인할 수 있었음. 슬래그가 혼입된 경우에는, 기본적으로 CO_2 고정량이 적은 것을 확인할 수 있으며 (CO_2와 쉽게 반응이 일어나는 $Ca(OH)_2$의 생성량이 기본적으로 적음), γ-C_2S가 추가로 혼입될 시, CO_2 고정량이 조금 증가하는 경향이 보이나 전체적으로 비슷하다고 판단됨.
- γ-C_2S가 CO_3^{2-}와 반응함에 따라 생성되는 물질은 주로 Calcite의 Polymorph 중 하나인 Vaterite이었음. Vaterite는 Calcite에 비해 체적이 더 크기 때문에, 탄산화가 일어났을 때 Calcite보다 공극 개선 효과에 더 이점을 주는 것으로 판단됨. 표면부에서 탄산화가 일어남으로써 공극 개선 효과가 나타났으며, 이는 탄산화가 촉진되는 것을 억제하는 것으로 판단됨. γ-C_2S가 CO_2를 고정하며 생기는 표면 밀실화의 이점을 이용하여, γ-C_2S를 하이브리드 보수용 모르타르 개발에 이용함.
- 슬래그가 혼입되지 않은 결합재의 탄산화 깊이는 R10이 가장 작았으며, γ-C_2S의 혼입률이 10%가 넘어감에 따라 탄산화 깊이가 다시 증가하기 때문에, γ-C_2S의 혼입률은 10% 이하가 적절하다고 판단됨.

(라) CO_3^{2-} 반응제어 물질이 적용된 시멘트계 보수재료 개발

① CA_2 기반 클링커(A)와 γ-C_2S 기반 클링커(G)가 치환된 OPC 보수재료의 탄산화 저항성

- 그림 3.2.12는 A 또는 G가 치환된 OPC 하이브리드 결합재의 CO_3^{2-} 반응제어 원리를 나타냄.

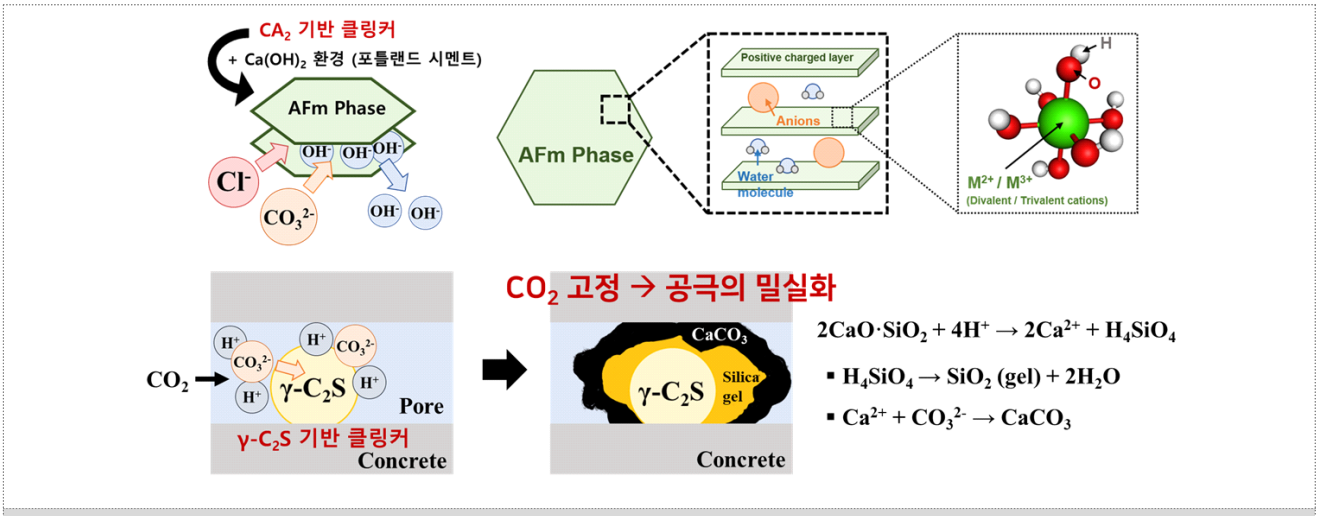
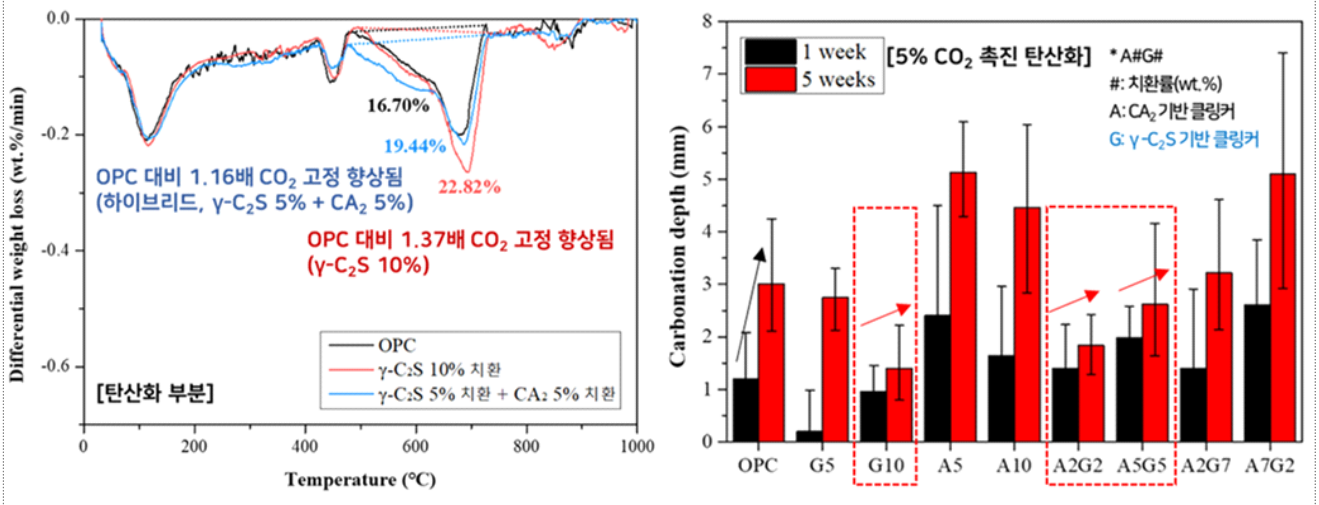


그림 3.2.12 하이브리드 보수용 모르타르의 CO_3^{2-} 반응제어 원리

- 그림 3.2.13은 A와 G가 OPC에 치환된 하이브리드 결합재의 TGA 결과와 탄산화 깊이 측정 결과임(실험체명의 숫자: 치환율). 탄산화가 완전히 일어난 부분에서의 CO_2 고정량은 OPC 대비 A5G5가 1.16배, G10이 1.37배 컸음. 탄산화 깊이 결과에서는 G10, A2G2, A5G5가 CO_2 침투 기간이 증가함에 따라 탄산화 진전 폭이 작은 우수한 결과를 보여주었음.
- 하이브리드 결합재 중 A2G2, A5G5는 탄산화가 됨에 따라 표면이 밀실 해지는 장점이 있고, 특히, 그림 3.2.8을 추가로 참고하면 A가 들어있기 때문에 탄산화와 염해가 복합적으로 나타나는 환경에서 우수한 성능을 발휘할 것으로 판단됨.



(a) TGA 분석결과 (b) 탄산화 깊이 측정결과

그림 3.2.13 하이브리드 결합재 모르타르의 TGA 및 탄산화 깊이 측정결과

(3) 황산이온(SO_4^{2-}) 반응제어 물질을 활용한 시멘트계 재료의 SO_4^{2-} 고정성능 향상 기술

(가) SO_4^{2-} 반응제어 소재 선정

① 시멘트계 재료의 SO_4^{2-} 고정성능 향상 기술에 관한 개요

- SO_4^{2-}가 시멘트 내 수화물과 반응하여 나타나는 황산염 침식 방지를 위해, SO_4^{2-}를 선택적으로 고정 가능한 물질을 활용한 시멘트계 재료 내 SO_4^{2-} 고정기술이 필요함.
- 본 시멘트계 재료의 SO_4^{2-} 고정성능 향상 기술 개발에서는 SO_4^{2-} 선택적 고정에 기여하는 이온교환수지의 활용 기술을 개발함(특허 등록 및 PCT 국제 특허출원)(특허-37).



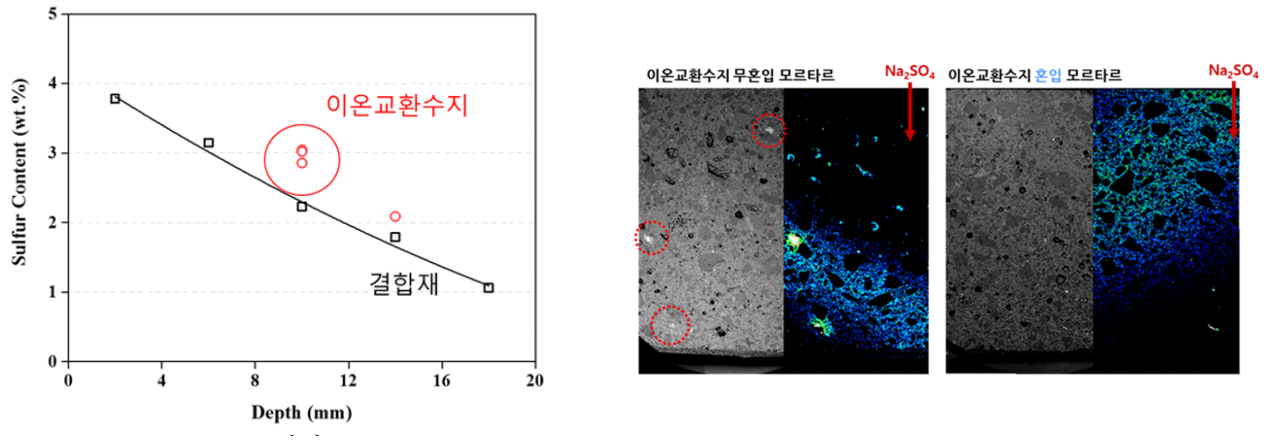
② 반응제어 소재의 SO_4^{2-} 고정성능 평가 및 SO_4^{2-} 반응제어 소재 선정

- 연구에서 이온교환수지가 SO_4^{2-} 고정 반응제어 소재의 후보군으로 선정됨.
- SO_4^{2-} 반응제어 소재 후보군은 Na_2SO_4 수용액(증류수 또는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 환경이 모사된 포화 $Ca(OH)_2$ 수용액 조건)에서 SO_4^{2-} 고정능력이 평가됨. 이온교환수지의 SO_4^{2-} 고정능력은 이온 크로마토그래피(Ion chromatography) 방법을 이용하여 측정됨.
- 이온 교환 수지가 시멘트계 재료의 SO_4^{2-} 고정성능 향상을 위한 반응제어 소재로 선정됨.

(나) SO_4^{2-} 반응제어 물질이 적용된 시멘트계 재료의 SO_4^{2-} 고정성능 향상 기술

① 이온교환수지 혼입 시멘트 결합재의 SO_4^{2-} 고정성능 평가

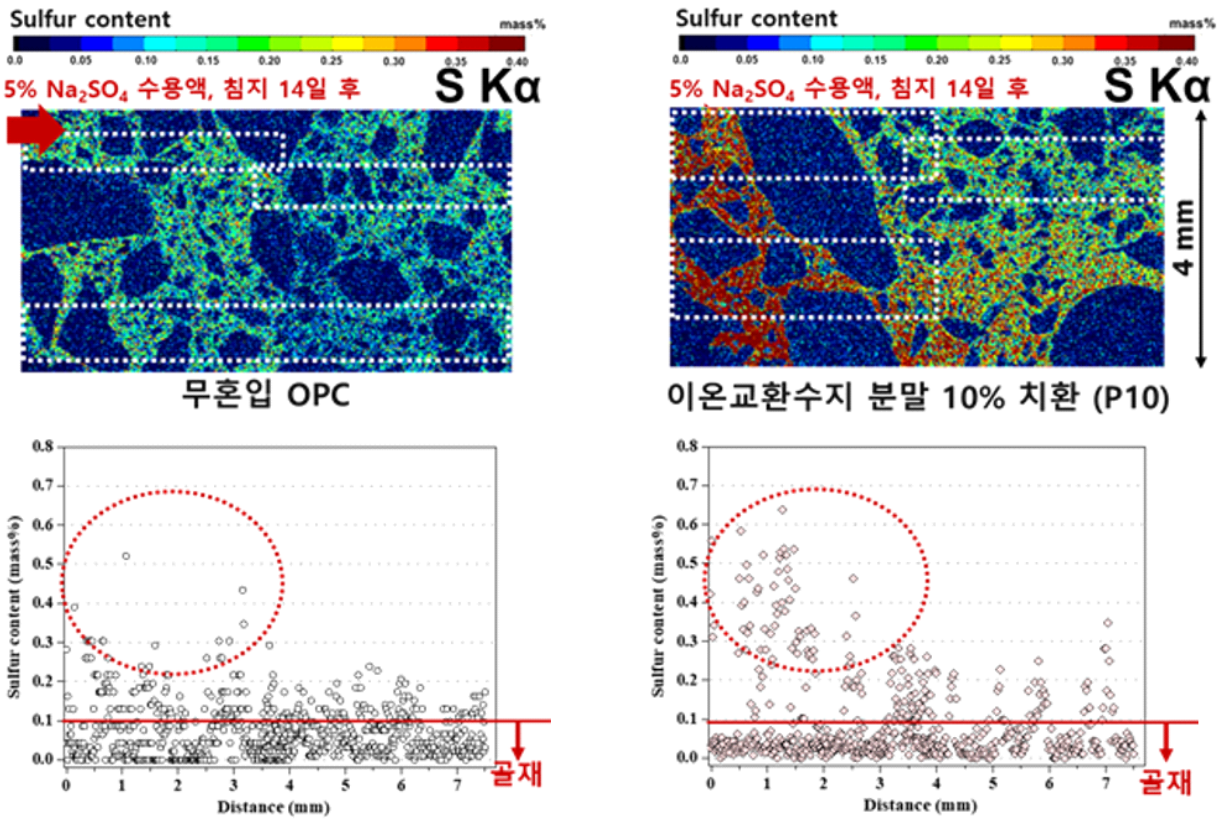
- Energy dispersive X-ray fluorescence(EDXRF)와 EPMA 방법을 통해, 시멘트 결합재 내 황(Sulfur) 함유량 (wt.%)이 분석되었음.
- 그림 3.2.14는 5%의 Na_2SO_4 수용액에 140일간 침지된 모르타르(음이온 교환 수지 혼입)의 침투단면을 EDXRF와 EPMA 방법을 이용하여 측정한 결과임. 그림 3.2.14(a)를 보면, 모르타르 내 음이온 교환 수지 부분의 황 함유량은 모르타르의 시멘트 결합재 부분 보다 황의 함유량이 약 1.16~1.33배 높게 나타남. 이는 음이온 교환 수지 비드가 시멘트 결합재로 침투되는 모르타르 내 황을 고정할 수 있을 나타냄.
- 추가로, 음이온 교환 수지 혼입 모르타르에서는 무혼입 모르타르(대조군)에서 보다 시멘트 수화물 주변의 높은 황의 농도로 형성되는 gypsum이나 ettringite가 거의 나타나지 않았음.



(a) EDXRF 결과 (b) EPMA 결과

그림 3.2.14 음이온 교환 수지 비드 혼입 모르타르의 Na_2SO_4 수용액 침지 실험결과

- 그림 3.2.15는 5%의 Na_2SO_4 수용액에 2주간 침지된 모르타르(음이온 교환 수지 분말 혼입)의 침투단면을 EPMA 방법을 이용하여 측정한 결과임. 그림 3.2.15(b)를 보면, 음이온 교환수지 분말은 대부분 100 μm 이하의 입도 분포를 이루고 있으므로, 비드 형태의 음이온교환수지와 달리 시멘트 결합재와의 구분이 어려움.



(a) 음이온 교환 수지 무혼입 모르타르 (b) 음이온 교환 수지 분말 혼입 모르타르

그림 3.2.15 Na_2SO_4 수용액에 침지된 모르타르 단면의 EPMA 결과

- 그림 3.2.15의 P10 실험체의 표면에서 SO_4^{2-}의 함유량이 현저히 높은 이유는 동일한 침지 기간 내에서 음이온 교환 수지 분말이 SO_4^{2-}의 침투를 촉진하는 구동체로 작용했을 가능성이 크다고 판단됨(공극수 내 SO_4^{2-}가 빠르게 감소함에 따라 외부와 내부의 농도구배가 다시 커질 수 있고, 이로 인하여 수용액 내에서는 외부의 SO_4^{2-}가 모르타르 내부로 빠르게 확산 될 수 있음).
- 그림 3.2.16은 황산염이 침투된 음이온 교환 수지 분말이 혼입된 결합재의 표면을 scanning electron microscope-energy dispersive X-ray spectroscopy(SEM-EDS)를 이용하여 분석한 결과임. 음이온 교환 수지 분말이 들어간 결합재의 SO_4^{2-} 고정량은 무혼입 시멘트 결합재보다 평균적으로 약 1.22~2.17배 높았고, 음이온 교환 수지 분말 표면의 양이온 작용기가 공극수의 SO_4^{2-}를 고정하여 공극수의 SO_4^{2-} 농도를 낮출 수 있을 것으로 판단됨.
- 기본적으로 SO_4^{2-}와 반응성이 낮은 결합재 또는 밀실한 결합재에서 음이온 교환수지의 효과가 커질 것으로 판단됨. 따라서 시중에 판매되는 보수용 모르타르 제품에 일부 음이온 교환 수지 분말을 치환하여 보수용 모르타르의 내황산염 성능 평가를 계획함.

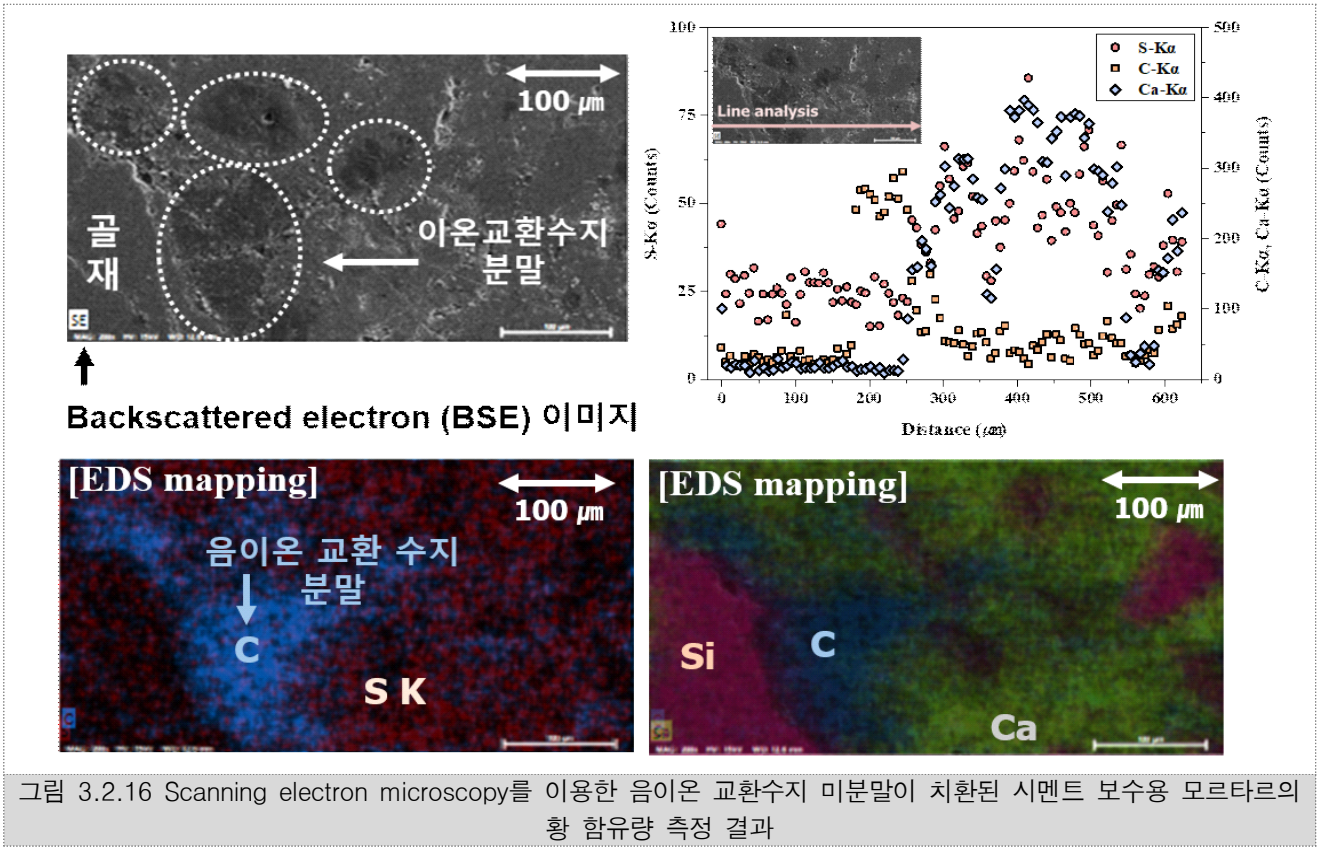


그림 3.2.16 Scanning electron microscopy를 이용한 음이온 교환수지 미분말이 치환된 시멘트 보수용 모르타르의 황 함유량 측정 결과

(다) SO_4^{2-} 반응제어 물질이 적용된 시멘트계 보수재료 개발

① 음이온 교환 수지 미분말이 치환된 시멘트 보수용 모르타르의 황산염 저항성 개선

- 시중에 판매되는 보수용 모르타르가 대조군(Plain)으로 설정되었고, 보수용 모르타르 결합재의 1.5 wt.%가 음이온 교환 수지 분말로 치환된 보수용 모르타르(I5)가 비교군으로 설정됨. 실험체는 4주간 수중 양생 된 후에 한 면을 제외하고 전부 에폭시 코팅되었고, 에폭시로 코팅된 실험체는 황산염 수용액(5% Na_2SO_4 수용액)에 침지 되어 평가됨.

- 그림 3.2.17은 Na_2SO_4 수용액에 2주간 침지 된 음이온 교환 수지 미분말 혼입 보수용 모르타르의 EPMA 결과임. Plain 표면의 황 함유량이 I5보다 두드러지게 높게 나타남.

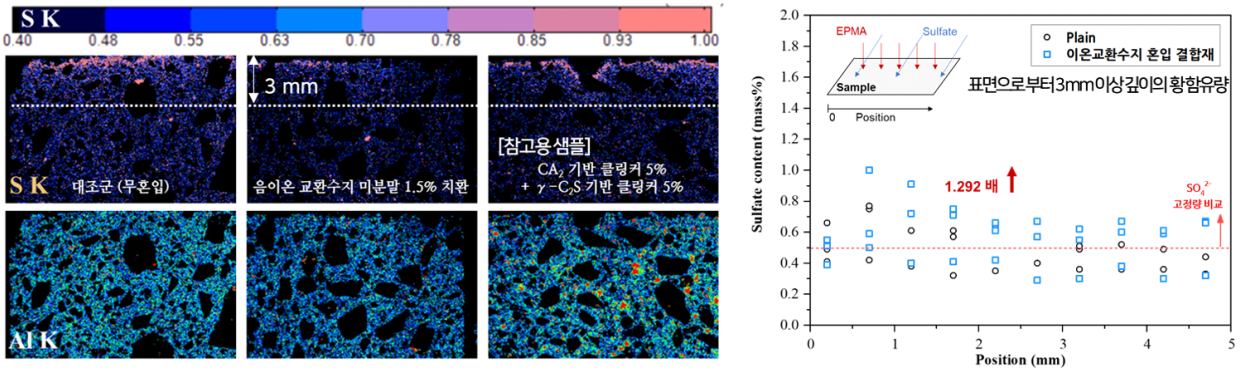


그림 3.2.17 음이온 교환수지 미분말이 치환된 시멘트 보수용 모르타르의 EPMA 측정결과: Na_2SO_4 수용액 내 2주간 침지 후 결과

- 그림 3.2.18는 Na_2SO_4 수용액에 4주간 침지 된 음이온 교환 수지 미분말 혼입 보수용 모르타르의 EPMA 결과임. 앞서 그림 3.1.28에서처럼 Plain과 I5 표면의 황 함유량에서 두드러진 차이가 없었으나, 상대적으로 Plain의 표면부(3.5 mm 이내)에서 높은 황 함유량이 나타남.

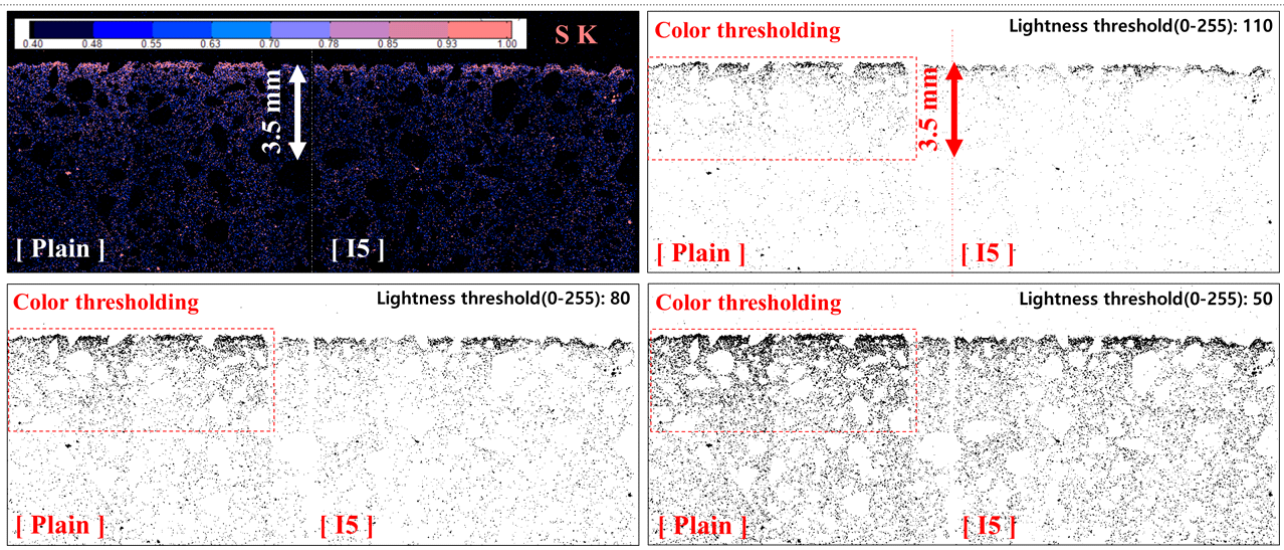


그림 3.2.18 음이온 교환수지 미분말이 치환된 시멘트 보수용 모르타르의 EPMA 측정결과: Na_2SO_4 수용액 내 4주간 침지 후 결과

- 이전의 연구에서 Cl^-가 침투된 음이온 교환 수지 미분말이 들어간 시멘트 결합재에서는 Cl^-가 농도 구배 없이 고르게 나타나는 현상을 보여주듯이, 표면부의 농도 구배가 강하게 나타나지 않은 것은 음이온 교환수지의 SO_4^{2-} 고정능력의 영향이 있었을 것으로 판단됨. 음이온 교환수지 미분말은 SO_4^{2-}를 고정하여 표면부의 SO_4^{2-}를 내부로 분산시킬 수 있는 것으로 판단됨(표면부의 국부적인 SO_4^{2-} 농도 증가를 방지).

3-2. 연구 성과

가. 국내외 논문 게재

(1) 국내 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	다양한 물-결합재비를 갖는 모르타르의 물성에 대한 파쇄 바텀애시의 영향	자원 리싸이클링	밀리언 타페세	25(6)	대한민국	한국자원리싸이클링학회	비SCI	2016.12.31
2	음이온 교환수지를 이용한 포화 수산화칼슘 수용액 내 염소이온 및 황산이온 제거 특성 평가	한국구조물 진단유지관리 공학회논문집	이윤수	21(2)	대한민국	한국구조물 진단유지관리 공학회	비SCI	2017.03.01
3	나트륨계 알칼리 활성화제 조합에 따른 섬유보강 무시멘트 복합재료의 압축 및 인장특성	한국건설순환 자원학회 논문집	최정일	5(1)	대한민국	한국건설순환 자원학회	비SCI	2017.03.30
4	탄산화된 콘크리트 이미지 특성과 자동검출 기법	콘크리트학회 논문집	이방연	29(6)	대한민국	한국콘크리트 학회	비SCI	2017.12.01
5	수경성 무기재료의 수화도 측정에 대한 건조방법의 영향: 1) 보통 포틀랜드 시멘트 페이스트 및 모르타르	자원 리싸이클링	이효경	27(1)	대한민국	한국자원리싸이클링학회	비SCI	2018.02.28
6	수경성 무기재료의 수화도 측정에 대한 건조방법의 영향: 2) 알칼리 활성 슬래그	자원 리싸이클링	이효경	27(1)	대한민국	한국자원리싸이클링학회	비SCI	2018.02.28
7	CO_2 양생을 이용한 $Mg(OH)_2$ 혼입 시멘트 페이스트의 물리화학적 특성	한국건축시공 학회지	진정심	18(3)	대한민국	한국건축 시공학회	비SCI	2018.06.20
8	섬유의 형상비에 따른 고연성 무시멘트 복합재료의 인장특성	한국건설순환 자원학회 논문집	최정일	6(3)	대한민국	한국건설 순환자원 학회	비SCI	2018.09.30
9	알칼리활성 슬래그기반 초고연성 복합재료의 휨거동 해석	한국건설순환 자원학회 논문집	이방연	7(2)	대한민국	한국건설순환 자원학회	비SCI	2019.06.30
10	합성섬유 종류가 무시멘트 복합재료의 재료 거동에 미치는 영향	한국건설순환 자원학회 논문집	최정일	7(3)	대한민국	한국건설순환 자원학회	비SCI	2019.09.30
11	음이온교환수지 분말이 치환된 포틀랜드 시멘트 모르타르의 염소이온 침투 특성	한국건축시공 학회지	이윤수	20(1)	대한민국	한국건축시공 학회	비SCI	2020.02.01

(2) 국외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	Composite properties of high-strength polyethylene fiber-reinforced cement and cementless composites	Composite Structures	최정일	138	영국	Elsevier	SCI	2016.03.15

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
2	Control of Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete Through Artificial Flaws and Fiber Hybridization	International Journal of Concrete Structures and Materials	강수태	10	한국	Springer	SCI	2016.06.28
3	Internal-curing efficiency of cold-bonded coal bottom ash aggregate for high-strength mortar	Construction and Building Materials	김형기	126	영국	Elsevier	SCI	2016.11.15
4	Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder	Construction and Building Materials	표석훈	131	영국	Elsevier	SCI	2017.01.30
5	Effects of a defoamer on the compressive strength and tensile behavior of alkali-activated slag-based cementless composite reinforced by polyethylene fiber	Composite Structures	이윤	172	영국	Elsevier	SCI	2017.07.15
6	Tensile Behavior and cracking Pattern of an Ultra-High Performance Mortar Reinforced by Polyethylene Fiber	Advances in Materials Science and Engineering	최정일	2017	이집트	Hindawi	SCI	2017.08.02
7	Numerical technique for chloride ingress with cover concrete property and time effect	Computers and Concrete	이방연	20(2)	대한민국	Techno-Rress	SCI	2017.08.25
8	Effect of chloride content on mechanical properties of ultra high performance concrete	Cement and Concrete Composites	표석훈	84	영국	Elsevier	SCI	2017.11.01
9	Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with a phenolphthalein solution	Construction and Building Materials	최정일	154	영국	Elsevier	SCI	2017.11.15
10	Use of recycled aggregates as internal curing agent for alkali-activated slag system	Construction and Building Materials	이남곤	159	영국	Elsevier	SCI	2018.01.20
11	Self-healing properties of cement-based and alkali-activated slag-based fiber-reinforced composites	Construction and Building Materials	Huy Nguyễn Hoàng	165	영국	Elsevier	SCI	2018.03.20
12	Internal curing effect of raw and carbonated recycled aggregate on the properties of high-strength slag-cement mortar	Construction and Building Materials	Selamu Yihune Abate	165	영국	Elsevier	SCI	2018.03.20

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
13	Chloride-Binding Capacity of Portland Cement Paste Blended with Synthesized CA2 ($CaO{\cdot}2Al_2O_3$)	Advances in Materials Science and Engineering	이윤수	2018	이집트	Hindawi	SCI	2018.03.25
14	Chloride Ion Adsorption Capacity of Anion Exchange Resin in Cement Mortar	Materials	이윤수	11(4)	스위스	MDPI	SCI	2018.04.05
15	Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing	Cement and Concrete Composites	김형기	91	영국	Elsevier	SCI	2018.08.01
16	Improvement in Carbonation Resistance of Portland Cement Mortar Incorporating γ-Dicalcium Silicate	Advances in Materials Science and Engineering	Zhengxin Chen	2019	이집트	Hindawi	SCI	2019.08.05
17	Effects of Aging on the Tensile Properties of Polyethylene Fiber-Reinforced Alkali-Activated Slag-Based Composite	Advances in Materials Science and Engineering	최정일	2019	이집트	Hindawi	SCI	2019.08.27
18	Incorporation of CFBC ash in sodium silicate-activated slag system: Modification of microstructures and its effect on shrinkage	Cement and Concrete Research	김희정	123	영국	Elsevier	SCI	2019.09.01
19	Effect of Carbonation on Abrasion Resistance of Alkali-Activated Slag with Various Activators	Materials	김형기	12(17)	스위스	MDPI	SCI	2019.09.02
20	Strain-Hardening and High-Ductile Behavior of Alkali-Activated Slag-Based Composites with Added Zirconia Silica Fume	Materials	최정일	12(21)	스위스	MDPI	SCI	2019.10.27
21	Effects of the type of activator on the self-healing ability of fiber-reinforced alkali-activated slag-based composites at an early age	Construction and Building Materials	Huy Hoàng Nguyễn	224	영국	Elsevier	SCI	2019.11.10
22	Mechanical properties and self-healing capacity of eco-friendly ultra-high ductile fiber-reinforced slag-based composites	Composite Structures	Huy Hoàng Nguyễn	229	영국	Elsevier	SCI	2019.12.01
23	Chloride Resistance of Portland Cement-Based Mortar Incorporating High Aluminate Cement and Calcium Carbonate	Materials	이윤수	13(2)	스위스	MDPI	SCI	2020.01.12

나. 국내 및 국제 학술회의 발표

(1) 국내 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	송진규	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
2	한국건설순환자원학회 2016 봄 학술대회	최정일	2016.04.15	전남대학교 용봉캠퍼스	한국
3	한국건축시공학회 2016년도 추계학술발표대회	진정심	2016.10.21	한서대학교	한국
4	한국건축시공학회 2016년도 추계학술발표대회	박장현	2016.10.21	한서대학교	한국
5	한국건설순환자원학회 2017년 봄 학술대회	송금일	2017.04.06	상명대학교 천안캠퍼스	한국
6	한국건설순환자원학회 2017년 봄 학술대회	송금일	2017.04.06	상명대학교 천안캠퍼스	한국
7	한국구조물진단유지관리공학회 2017년 봄 학술대회	최정일	2017.04.14	동명대학교	한국
8	2017 대한건축학회 춘계학술발표대회	Nguyễn Hoàng Huy	2017.04.27	제주 해비치 호텔	한국
9	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	김형기	2017.11.02	안동 그랜드호텔	한국
10	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	김형기	2017.11.02	안동 그랜드호텔	한국
11	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	최정일	2017.11.02	안동 그랜드호텔	한국
12	한국건축시공학회 2017년 춘계학술발표대회	진정심	2017.10.10	한국해양대학교	한국
13	한국건축시공학회 2017년 추계학술발표대회	진정심	2017.11.10	한국해양대학교	한국
14	한국건축시공학회 2017년 추계학술발표대회	정승배	2017.11.10	한국해양대학교	한국
15	한국건설순환자원학회 2017년 가을 학술대회	정승배	2017.11.16	제주 해비치 호텔	한국
16	한국건설순환자원학회 2017년 가을 학술대회	송금일	2017.11.17	제주 해비치 호텔	한국
17	한국건설순환자원학회 2018년 봄 학술대회	송금일	2018.04.05	전북대학교 전주캠퍼스	한국
18	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	최정일	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
19	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	이윤수	2018.05.04	창원 컨벤션센터	한국
20	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	진정심	2018.05.04	창원 컨벤션센터	한국
21	한국건축시공학회 2018 춘계 학술대회	이윤수	2018.05.04	제주 신화월드 랜딩리조트	한국
22	한국건축시공학회 2018 춘계 학술대회	정도현	2018.05.04	제주 신화월드 랜딩리조트	한국
23	한국구조물진단유지관리공학회 2018년도 가을 학술발표회	정도현	2018.10.04	진주 경상대학교 BNIT R&D센터 (산학협력센터)	한국
24	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	최정일	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
25	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	최정일	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
26	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	이윤수	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
27	한국건축시공학회 2018 추계학술발표대회	정도현	2018.11.16	서울과학기술원	한국
28	한국건설순환자원학회 2019년 봄 학술대회	박세언	2019.04.03	오크밸리 리조트	한국
29	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	최연왕	2019.05.08	제주신화월드	한국
30	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	이방연	2019.05.08	제주신화월드	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
31	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	이윤수	2019.05.08	제주신화월드	한국
32	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	진정심	2019.05.08	제주신화월드	한국
33	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	옌스뤠이	2019.05.08	제주신화월드	한국
34	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	옌스뤠이	2019.11.08	변산대명리조트	한국

(2) 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The 10th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-10)	김형기	2016.10.17	BEXCO (부산)	한국
2	2016 International Conference on Frontiers of Composite Materials (ICFCM2016)	김형기	2016.11.20	Amora Hotel (오클랜드)	뉴질랜드
3	The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum	이윤수	2017.08.23	한양대학교 (서울)	한국
4	The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum	진정심	2017.08.23	한양대학교 (서울)	한국
5	The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)	김형기	2017.10.29	킨텍스 (일산)	한국
6	The 2017 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM17)	김형기	2017.10.29	킨텍스 (일산)	한국
7	4th International Conference on Computational Design in Engineering (CODE 2018)	김형기	2018.04.04	창원컨벤션센터 (창원)	한국
8	4th International Conference on Computational Design in Engineering (CODE 2018)	S. Y. Abate	2018.04.04	창원컨벤션센터 (창원)	한국
9	4th Internationalks Conference on Computational Design in Engineering (CODE 2018)	M. Tafesse	2018.04.04	창원컨벤션센터 (창원)	한국
10	The 12th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA 2018)	이윤수	2018.10.23	알펜시아리조트 (평창)	한국
11	The 12th International Symposium on Architectural Interchanges in Asia (ISAIA 2018)	정도현	2018.10.23	알펜시아리조트 (평창)	한국
12	The 8th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2018)	H.H. Nguyễn	2018.11.06	Crowne-plaza Fuzhou Riverside (푸저우)	중국
13	LORCENIS 2019 (Long Lasting Reinforced Concrete for Energy Infrastructure under)	Zhengxin Chen	2019.09.10	Ghent University (겐트)	벨기에
14	LORCENIS 2019 (Long Lasting Reinforced Concrete for Energy Infrastructure under)	이윤수	2019.09.10	Ghent University (겐트)	벨기에
15	International Conference on Sustainable Built Environment (SBE19 SEOUL)	한재도	2019.12.13	GLAD 호텔 여의도 (서울)	한국

다. 지식재산권(특허, 실용신안, 디자인, 상표, 신품종 등)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
1	디지털이미지프로세싱을이용한 콘크리트 중성화영역 검출 방법	대한민국	전남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.11.07	10-2016-0147585	-	전남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.04.05	10-1848067	-	100
2	시멘트 조성물 및 그 제조 방법	대한민국	한양대학교에리카산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.01.17	10-2017-0007959	-	-	-	-	-	100
3	매스 콘크리트용 초저발열 무시멘트 결합재	대한민국	전남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.11.23	10-2017-0157136	-	전남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2019.08.21	10-2014870	-	100
4	이온 교환 수지를 포함하는 알칼리 활성 결합재 구조물, 및 그 제조 방법	대한민국	한양대에리카산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2017.12.05	10-2017-0165744	-	한양대에리카산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2019.11.18	10-2048127	-	100
5	이온 교환 수지를 포함하는 알칼리 활성 결합재 구조물, 및 그 제조 방법	PCT	한양대학교에리카산학협력단	2017.12.05	PCT/KR2017/014156	-	-	-	-	-	100
6	고로슬래그 기반 무시멘트 결합재의 고온 양생 전용 분말형 알칼리 활성화제, 상기 알칼리 활성화제를 포함하는 고온 양생 전용 고로슬래그 기반 무시멘트 결합재, 상기 결합재를 포함하는 콘크리트 조성물 및 콘크리트 2차제품	대한민국	전남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.11.22	10-2018-0145134	-	-	-	-	-	100
7	칼슘 알루미네이트계로 구성된 무기물의 제조 방법	대한민국	한양대학교에리카산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.11.28.	10-2018-0149083	-	-	-	-	-	100

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호 *	등록인	등록일	등록번호	등록번호 *	
8	칼슘 알루미네이트 무기물 및 그 제조방법, 그리고 이를 포함하는 시멘트 조성물	대한민국	한양대학교에리카산학협력단,성균관대학교산학협력단	2019.11.28	10-2019-0155740	-	-	-	-	-	100
9	칼슘 알루미네이트 무기물 및 그 제조방법, 그리고 이를 포함하는 시멘트 조성물	PCT	한양대학교에리카산학협력단,성균관대학교산학협력단	2019.11.28	PCT/KR2019/016611	-	-	-	-	-	100
10	염해 및 탄산화 방지용 하이브리드 시멘트 결합재 조성물	대한민국	한양대학교에리카산학협력단,성균관대학교산학협력단	2020.02.12	10-2020-0017229	-	-	-	-	-	100

* 연구개발성과 관리・유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

라. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	콘크리트 탄산화 영역 검출 프로그램	2016.11.27	전남대학교산학협력단	2016.12.19	C-2016-033114	전남대학교산학협력단	100
2	자기치유 고연성 복합재료의 주기이력 에너지소산량 계산 프로그램	2019.12.13	전남대학교산학협력단	2019.12.16	C-2019-043825	전남대학교산학협력단	100

마. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준년도	현 황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	-	2016	-	2	-	-	2	-	2	-	-	-	-
2	-	2017	1	2	-	-	3	-	2	-	-	1	-
3	-	2018	1	7	-	-	8	-	5	-	-	3	-
4	-	2019	2	3	-	-	5	-	4	-	-	1	-
5	-	2020	2	2	-	-	4	-	4	-	-	-	-

바. 기술 거래(이전) 등

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생 일자	기술료 (당해 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	기술이전	“지반차수보강 그라우트용 친환경 무시멘트 결합재 제조 및 배합 방법 노하우”	㈜엠에스건설기술	2017.02.20	3,000천원	3,000천원

사. 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치 장소	이용분야
1	합성 CA_2 ($CaO{\cdot}2Al_2O_3$)	2017.08.29	한양대에리카 산학협력단	한양대에리카 산학협력단	구조물 보수 보강
2	반응제어형 C_2A 소재	2018.11.30	한양대에리카 산학협력단	한양대에리카 산학협력단	구조물 보수 보강
3	CA_2 기반 클링커	2019.09.02	한양대에리카 산학협력단	한양대에리카 산학협력단	구조물 보수 보강
4	γ-C_2S 기반 클링커	2019.09.06	한양대에리카 산학협력단	한양대에리카 산학협력단	구조물 보수 보강

아. 현장 시험 및 검증

번호	현장시험/검증명	시험/검증기간	제작업체명	시험/검증장소	이용분야
1	친환경 무시멘트 그라우트재 시험시공	2017.03.06.~ 2017.03.27	전남대학교 산학협력단	전라남도 나주시 경현동 일원오두제	보수.보강
2	친환경 무시멘트 그라우트 시험시공	2019.12.14.~ 2019.12.16	전남대학교 산학협력단	서울시 용산구 원료로 90길 32	보수.보강

자. 보고서 원문

번호	보고서 구분	발간일	등록번호
1	알칼리 활성 슬래그 결합재 반응 매커니즘 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-3
2	무시멘트 모르타르의 자기치유 성능 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-4
3	고유동/고강도 무시멘트 콘크리트의 내구성 평가 보고서	2020.02.13	SHGC-2020-3

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4-1. 목표 달성도

가. 정성적 연구 목표 달성도

(1) 1차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표					해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	무시멘트 콘크리트의 반응 매커니즘 및 모델	A-1	무시멘트 반응 매커니즘 정립 및 모델링	①	무시멘트 반응 예측 기술 수준 향상	무시멘트 반응매커니즘 문헌보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	전남 대학교

(2) 2차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표					해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	무시멘트 콘크리트의 반응 메커니즘 및 모델링 기술	A-1	무시멘트 반응 메커니즘 정립 및 모델링	②	압축강도 및 탄산화 영향인자의 예측 정확도	압축강도 및 탄산화 영향인자의 결과-예측 상관계수(R)	0.8 이상	0.9~0.95	자체 평가	전남 대학교
D	수축저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	D-1	무시멘트 수축 제어 기술	①	수축 반응 모델의 예측 정확도	수축 반응 모델의 성능예측 상관계수(R)	0.8 이상	0.9~0.95	자체 평가	전남 대학교
E	Cl^- 이온 고정 원천소재	E-1	Cl^-이온 반응제어 최적 원천소재군 확보	①	수용액 수준 Cl^- 이온 최적 고정량 향상	Cl^- 고정량(mg/g)을 이용한 고정율(%) (KS I ISO 9297, KS I 3205)	50% 이상	96.75%	자체 평가	한양 대학교
F	CO_2 고정 원천소재	F-1	CO_2 반응제어 최적 원천소재군 확보	①	수용액 수준 CO_2 최적 고정량 향상	CO_2 고정(mg/L)을 이용한 고정율(%) (TG/DTA 분석, KS I 3205)	50% 이상	60% 이상	자체 평가	한양 대학교
G	SO_4^{2-} 이온 고정 원천소재	G-1	SO_4^{2-} 이온 반응제어 최적 원천소재군 확보	①	수용액 수준 SO_4^{2-} 이온 최적 고정량 향상	SO_4^{2-} 이온 고정량(mg/L)을 이용한 제거율(%) (이온 크로마토그래피, KS I 3205)	20% 이상	42~92%	자체 평가	한양 대학교

(3) 3차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표					해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	무시멘트 콘크리트의 반응 메커니즘 및 모델링 기술	A-2	무시멘트 반응모델 정확도	①	무시멘트 반응제어 모델의 예측 정확도	반응제어모델의 성능예측 상관계수(R)	0.8 이상	0.90	자체 평가	전남 대학교
B	자기치유형 고유동/ 고강도 무시멘트 콘크리트 제조 기술	B-1	무시멘트 강도발현 제어 기술	①	무시멘트 강도제어 기술수준 향상	40MPa급 무시멘트 모르타르의 압축강도 (KS L 5105)	40MPa 이상	38.25 MPa	공인 시험 성적서	전남 대학교
						40MPa급 무시멘트 모르타르의 압축강도 발현 비[f3 / f28] (KS L 5105)	0.3 이하	0.245	공인 시험 성적서	
C	표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	C-1	무시멘트 탄산화 제어 기술	①	무시멘트 수화생성물 제어 기술 수준 향상	탄산화 저항성이 높은 수화물(CS(A)H) 석출 유도 [CS(A)H의 Ca/Si] (SEM-EDS)	1.0 이상	1.0~1.2	자체 평가	전남 대학교
D	수축저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	D-1	무시멘트 수축 제어 기술	②	무시멘트 수축 제어 기술 수준 향상	40MPa급 모르타르 28일 건조수축량 (건조+자기수축)	1,500με 이하	1,480με	자체 평가	전남 대학교
E	Cl^- 이온 고정 원천소재	E-2	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 배합 기술	①	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 Cl^- 이온 고정 성능 향상	고정염화물량(mg/g)을 이용한 OPC 대비 염화물 고정율(%) (KS F 2711, KS F 2713)	130% 이상	104 ~360%	자체 평가	한양 대학교
				②	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 역학성능 향상	3, 7, 14, 28일 무혼입 대비 압축강도 비(%) (KS F 2405)	100% 이상	평균 84.2%	공인 시험 성적서	
F	CO_2 고정 원천소재	F-2	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 배합 기술	①	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 CO_2 고정 성능 향상	CO_2 고정(mg)을 이용한 고정율(%) (TG-DTA, 600℃:CaCO3 분해 온도)	10% 이상	10.45~ 18.83%	자체 평가	한양 대학교
				②	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 역학성능 향상	3, 7, 14, 28일 무혼입 대비 압축강도비(%) (KS F 2405)	100% 이상	평균 84.8%	공인 시험 성적서	
G	SO_4^{2-} 이온 고정 원천소재	G-2	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 배합 기술	①	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 SO_4^{2-} 이온 고정 성능 향상	SO_4^{2-} 이온 고정량(mg/L)을 이용한 고정율(%) (XRF 및 EPMA)	5.0% 이상	116 ~133%	자체 평가	한양 대학교
				②	선정 물질 적용 시멘트 페이스트 및 모르타르 역학성능 향상	3, 7, 14, 28일 무혼입 대비 압축강도 비(%) (KS F 2405)	100% 이상	평균 85.7%	공인 시험 성적서	

(4) 4차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표					해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
B	자기치유형 고유동/ 고강도 무시멘트 콘크리트 제조기술	B-1	고유동/ 고강도 무시멘트 콘크리트 제조 기술	②	배합 기술 수준 향상	28일 콘크리트 압축강도 (KS F 2405)	40MPa 이상	42~51 MPa	자체 평가	전남 대학교
						slump flow (KS F 2594)	650mm 이상	654~675 mm	자체 평가	
		B-2	자기치유형 무시멘트 모르타르 제조 기술	①	자기치유 성능평가 기술 확보	무시멘트 모르타르의 자기치유 성능 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	
C	표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조기술	C-1	무시멘트 탄산화 제어기술	②	탄산화 제어 기술 수준 향상	탄산화 깊이 감소율 [(DRef-D)/DRef×100] (KS F 2584)	50% 이상	49~66%	자체 평가	전남 대학교
D	수축저감형 무시멘트 콘크리트 제조기술	D-1	무시멘트 수축 제어기술	③	수축 제어 기술 수준 향상	40MPa급 모르타르 28일 자기수축량	1,000με 이하	800με	자체 평가	전남 대학교
E	Cl^- 이온 고정 원천소재	E-3	선정물질 혼입 자기치유 콘크리트 배합기술	①	Cl^- 고정 성능 향상	고정염화물량(mg/g)을 이용한 OPC 대비 염화물 고정률(m%) (KS F 2711, KS F 2713)	130% 이상	108~ 394%	자체 평가	한양 대학교
				②	역학적성능 향상	3, 28일 압축강도 [S/Sref×100] (KS F 2405)	85% 이상	97.5% (3일) 91.2% (28일)	공인 시험 성적서	
F	CO_2 고정 원천소재	F-3	선정물질 혼입 자기치유 콘크리트 배합기술	①	CO_2 고정 성능 향상	CO_2 고정량(mg)을 이용한 고정률(m%) (TG-DTA)	10% 이상	3.33~ 12.82%	자체 평가	한양 대학교
				②	역학적성능 향상	3, 28일 압축강도 [S/Sref×100] (KS F 2405)	85% 이상	96.5% (3일) 88.3% (28일)	공인 시험 성적서	
G	SO_4^{2-} 이온 고정 원천소재	G-3	선정물질 혼입 자기치유 콘크리트 배합기술	①	SO_4^{2-} 고정 성능 향상	SO_4^{2-} 이온 고정량을 이용한 고정률(m%) (XRF, EPMA)	5.0% 이상	22~ 117%	자체 평가	한양 대학교
				②	역학적성능 향상	3, 28일 압축강도 [S/Sref×100] (KS F 2405)	85% 이상	101.0% (3일) 95.5% (28일)	공인 시험 성적서	

(5) 5차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
B	자기치유형 고유동/ 고강도 무시멘트 콘크리트 제조 기술	B-3	고유동 /고강도 무시멘트 콘크리트 제조 기술	①	고유동/고강도/ 고내구성 무시멘트 콘크리트 제조기술 개발	고유동/고강도 무시멘트 콘크리트의 내구성 평가 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	전남 대학교
C	표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	C-2	대기노출에 의한 표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	①	표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 성능 향상	40MPa 급 모르타르의 촉진탄산화 후 압축강도 감소율 [(S28-SC)/S28×100] (KS F 2584, KS F 5105)	30% 이하	0~12%	자체 평가	전남 대학교
						무시멘트 PC의 고온양생 탈형(1일) 압축강도 (KS F 2405)	30MPa 이상	46.0 MPa	자체 평가	
D	수축저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	D-2	수축 저감형 고성능 무시멘트 콘크리트 제조 기술	①	수축 저감형 고성능 무시멘트 콘크리트 성능 향상	40MPa급 콘크리트의 28일 수축(자기+건조)량	1,500με 이하	0~800 με	자체 평가	전남 대학교
E	Cl^- 이온 고정 원천소재	E-4	Cl^- 이온 반응제어 물질 혼입 보수재	①	반응제어 보수재의 Cl^- 이온 고정 성능 향상	OPC 대비 염화물 고정률(%) (KS F 2711, KS F 2713)	140% 이상	141.7%	자체 평가	한양 대학교
				②	반응제어 보수재의 역학성능 향상	보수재와 콘크리트의 부착강도 (KS F 2762)	1.4 MPa 이상	1.8MPa	공인 시험 성적서	
F	CO_2 고정 원천소재	F-4	CO_2 및 CO_3^{2-} 이온 반응제어 물질 혼입 보수재	①	보수재의 CO_2 및 CO_3^{2-} 이온 고정 성능 향상	OPC 대비 CO_2 고정률(%) (열중량 분석 이용)	110% 이상	116%	자체 평가	한양 대학교
				②	반응제어 보수재의 역학성능 향상	보수재와 콘크리트의 부착강도 (KS F 2762)	1.4 MPa 이상	1.8MPa	공인 시험 성적서	
G	SO_4^{2-} 이온 고정 원천소재	G-4	SO_4^{2-} 이온 반응제어 물질 혼입 보수재	①	보수재의 SO_4^{2} 이온 고정 성능 향상	OPC 대비 SO_4^{2-} 고정률(%) (XRF, EPMA)	120% 이상	129.2%	자체 평가	한양 대학교
				②	반응제어 보수재의 역학성능 향상	보수재와 콘크리트의 부착강도 (KS F 2762)	1.4 MPa 이상	1.6MPa	공인 시험 성적서	

나. 정량적 연구 목표 달성도

구분		목표	달성	달성률(%)	비고
논문 게재	SCI급	13	23	176.9	- Effect of chloride content on mechanical properties of ultra high performance concrete (Cement and Concrete Composites)
	국내 논문	8	11	137.5	- 음이온 교환수지를 이용한 포화 수산화칼슘 수용액 내 염소이온 및 황산이온 제거 특성 평가 (한국구조물진단유지관리공학회논문집)
학술 회의	국내	22	34	222.7	- 고 알루미나 시멘트 및 $CaCO_3$ 혼입 포틀랜드 시멘트 모르타르의 염소이온 침투 저항성 (한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회)
	국외		15		
특허 출원	국내	7	8	114.3	- 칼슘 알루미네이트 무기물 및 그 제조 방법, 그리고 이를 포함하는 시멘트 조성물 (10-2019-0155740)
	국외	3	2	66.7	- 이온 교환수지를 포함하는 알칼리 활성 결합재 구조물 및 그 제조 방법 (PCT/KR2017/014156)
특허 등록	국내	3	3	100.0	- 디지털 이미지 프로세싱을 이용한 콘크리트 중성화 영역 검출 (10-1848067)
	국외	-	-	-	
인력 양성	석사	7	16	228.6	- 전남대, 한양대, 조선대
	박사	2	6	300.0	- 전남대, 한양대
기술 이전	계약 건수	-	1	초과 달성	- '지반차수보강 그라우트용 친환경 무시멘트 결합재 제조 및 배합 방법 노하우' ((주)엠에스건설기술)
	계약액	-	3,000천원	3,000천원	
	징수액	-	3,000천원	3,000천원	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	3	3	100.0	- 무시멘트 활성화 반응 평가 기법 문헌분석 보고서
	생명자원 / 생물자원	-	-	-	
	소프트웨어	1	2	200.0	- 콘크리트 탄산화 영역 검출 프로그램 (C-2016-033114)
기타	표준 채택	-	-	-	
	시제품	4	4	100.0	- CA_2 및 γ-C_2S 기반 클링커
	현장 시험	-	2	초과 달성	- 친환경 무시멘트 그라우트 시험시공
	성과 홍보	-	-	-	

4-2. 관련 분야 기여도

가. [2-1] 중합반응 제어형 내열화 콘크리트 기술 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

- 무시멘트 결합재를 시멘트 대체용이 아닌, 고기능성의 재료로 활용가능한 기술 개발
  : 무시멘트 콘크리트의 물리·화학적 내구성의 장점(OPC 대비)과 성능확보에 유리한 제품생산방법 등의 종합고려를 통하여 시멘트 제품을 뛰어넘는 목표제품(Target product) 설정
- 무시멘트 콘크리트 개발을 위해 첨단기술 활용
  : 기존 연구는 무시멘트(AAS) 결합재의 문제점인 높은 건조수축(균열) 및 낮은 탄산화 저항성(강도저하)개선을 위한 혼화제 적용 및 배합개발이 대부분으로 내구성 문제는 한계 있음.
  : 무시멘트 콘크리트의 자기치유 성능 확보 및 내구성 개선을 위하여 수화생성물 조정, 미세조직 및 공극구조 개질 등의 연구를 수행하였으며, 이온반응제어 및 이온배합기술, 내부양생 기술 등의 첨단기술을 활용한 기술개발이 이루어짐.
- 반응제어형 자기치유 무시멘트 콘크리트의 품질 확보 기술 개발
  : 구조부재 적용을 위해 무시멘트 콘크리트의 낮은 재현성 문제의 해결이 필요
  : 모재료인 고로슬래그는 철광석 및 고로 종류, 급랭 온도 및 시간에 따른 슬래그 원석의 유리화도, 분쇄법, 슬래그 미분말의 대기노출 기간 등 조건에 따라 성분 및 물성이 변함.
  : 무시멘트 콘크리트의 재현성 확보를 위해 반응메커니즘의 분석 및 정립과 이온반응 최적화 배합기술 개발을 통해 무시멘트 결합재 및 콘크리트의 품질 기술을 확보함.

표 4.8 중합반응 제어형 내열화 콘크리트 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술한계)** 반응제어 자기치유 기술은 세계적으로 가시화되어 있는 연구성과가 없는 분야로 기존에 비교할 수 있는 대상이 없음.	▪ **(기술선도)** 중합반응 제어 무시멘트 콘크리트 개발 - 메카노케미컬(Mechano-Chemical) 합성으로 결합재의 중합반응을 제어하여 무시멘트 결합재의 한계기술을 극복 - 자극제/혼합재 반응성 향상 및 제어를 통해 탄산화, 수축 등의 열화요인을 자기제어하는 내열화 무시멘트 개발

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 무시멘트의 결합재/활성화제의 화학적 조성에 의한 결합재의 성능 예측
- 강도발현/탄산화/수축 등 콘크리트의 내구성에 영향을 미치는 요인을 분석을 반응제어
- 기존 시멘트 콘크리트의 배합프로세스와 설비를 그대로 이용할 수 있는 고성능 무시멘트 콘크리트 배합 기술 및 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술 개발
- 무시멘트 콘크리트의 탄산화에 의한 표면열화 방지 및 수축균열 저감을 통한 내구성 향상

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.9 핵심성과 기술수준

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
무시멘트 콘크리트의 반응 메커니즘 및 모델링 기술	• 무시멘트의 정확한 반응 메커니즘 분석이 부족하며, 예측식의 경우 압축강도에 대한 실험식임(품질계수(k))	• 무시멘트의 각 성능(강도/유동성, 탄산화, 수축 등)에 영향을 미치는 인자를 도출하고 각 성능에 대한 반응식 수립 및 모델링하여 무시멘트의 성능 제어(개선)	• 무시멘트의 성능한계 극복을 위해 성능예측을 넘어 성능개선을 위한 정교한 반응제어 기술 필요
자기치유형 고유동/고강도 무시멘트 콘크리트 제조 기술	• 기존 무시멘트 기술은 높은 강도를 위해 강알칼리성(pH 13 이상)의 고농도 액상형 활성화제를 적용함으로써 급결 및 유동성 불량의 문제점 발생, 시멘트 콘크리트 배합 프로세스를 따르기 어려움.	• 분말형 결합재 형태로써 기존 시멘트 콘크리트 배합프로세스 적용이 가능하며, Slump flow 650 mm, 28일 압축강도 60 MPa 이상의 자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합 기술 개발	• 시멘트 콘크리트의 '고유동 및 고강도 콘크리트' 기준 적용 • 시멘트 콘크리트의 자기치유 기술 적용
표면열화 저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	• 무시멘트는 비슷한 강도의 시멘트 콘크리트에 비해 약 2배 이상 탄산화 속도가 빠르고, 탄산화 후 약 50% 강도 손실 발생하며, 탄산화에 의해 표면 경도 낮음.	• 탄산화속도 감소 : 동일강도 기존 무시멘트(R) 대비 50% 이상 • 탄산화 후 강도 저하 : 20% 이하 (R은 강도저하 50%이상) • 탄산화 후 표면경도 저하 : 30% 이하	• 기존 탄산화 속도 측정 방법인 '촉진탄산화 시험방법'이 최근 무시멘트에 적용하는데 문제점이 있다고 알려져 있고, 무시멘트의 탄산화에 의한 성능저하는 탄산화 속도 보다는 탄산화 후 강도저하의 영향이 크기 때문에 탄산화 후 강도 및 경도 손실 저감에 중점을 둠.
수축저감형 무시멘트 콘크리트 제조 기술	• 무시멘트는 시멘트와 수화성상과 공극구조가 다르기 때문에, 강도가 발현되지 않은 재령 초기에 자기수축이 크게 발생함.	• 무시멘트 모르타르의 재령 28일 건조수축 1,500 με, 자기수축 1,000 με 이하의 수축저감 기술 • 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 건조수축 1,000 με, 자기수축 500 με 이하의 수축저감 기술	• 현재 무시멘트 모르타르의 28일 건조수축은 3,000 με, 자기수축은 2,000 με 이상, 무시멘트 콘크리트의 재령 28일 건조수축은 2,000 με, 자기수축은 1,000 με으로 50% 수준으로 수축 감소를 목표로 함.

나. [2-2] 유해이온 반응제어 자기치유 기술 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

- 콘크리트 열화 유해이온인 CO_3^{2-}, Cl^-, SO_4^{2-}를 억제하기 위한 콘크리트 자체의 연구는 주로 W/C의 향상, 포졸란 반응 혼화재료의 사용, 혼화제에 의한 수밀성의 확보가 현재까지는 주요 대응책이며, 열화 유해이온을 고정 및 흡수하는 연구는 거의 없음.

  : 유해 이온을 고정화하기 위한 연구는 층상이중수산화물(LDH: Layered Double Hydrocide)를 이용하여 인산염이나 비소 등 폐기물이나 유해물질을 정화하는 연구 등이 타 산업분야에서 진행되고 있으나, 콘크리트 내로 침투하는 유해인자를 LDH로 고정하는 연구는 거의 없음.

  : 최근 침투하는 열화인자를 고정하거나 흡수하는 원천재료를 도료나 보수재에 혼입하여 사용하는 열화인자 능동제어 시스템이 개발되고 있으나, 아직 시험단계 수준이며, 콘크리트 재료로써 대량으로 사용할 수 있는 원천소재의 개발 및 활용연구가 필요한 실정임.

표 4.10 유해이온 반응제어 자기치유 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술한계)** 유해이온 반응제어 자기치유 기술은 세계적으로 가시화되어 있는 연구성과가 없는 분야로 기존에 비교할 수 있는 대상이 없음.	▪ **(기술선도)** 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발 - 콘크리트 내부로 침투하는 유해이온(CO_2, Cl^-, SO_4 등)을 단순 억제하는 기존의 수동형 기술에서 탈피, 능동형 반응 제어기술을 통한 유해이온 제어기술을 개발 * 유해이온 자가진단 및 자가반응(생체모방 기술)을 통한 내열화콘크리트 기술

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 원천기술 확보가능성이 높은 소재를 선정하여 저비용·고효율의 Cl^- 이온 반응제어할 수 있는 콘크리트 및 시멘트계 보수재 개발
- 탄산화 반응 촉진에 의한 공극의 치밀화를 이용하여 CO_2를 반응제어할 수 있는 콘크리트 및 시멘트계 보수재 개발
- 물리적 흡착, 화학적 반응, 이온 교환을 이용하여 SO_4^{2-} 이온을 반응제어할 수 있는 콘크리트 및 시멘트계 보수재 개발

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.11 핵심성과 기술수준

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
Cl^- 이온 고정 원천소재	• 기존 Cl^- 이온 물질의 경우 고정능력이 뛰어나지 않으며 Cl^- 이온을 선택적으로 제어할 수 있는 방법은 없음.	• 선택적으로 Cl^- 이온 고정할 수 있는 소재 선정 및 선정물질 적용 반응제어 콘크리트 및 시멘트계 보수재 개발 • Cl^- 반응제어 콘크리트의 염화물 고정량 : OPC대비 108~394% • Cl^- 반응제어 보수재의 염화물 고정량 : OPC대비 141.7%	• Cl^- 이온 반응제어가 가능한 내구성을 향상시킬 수 있는 기술 필요
CO_2 고정 원천소재	• 기존 CO_2 고정 물질의 경우 고정능력이 뛰어나지 않으며 CO_2를 선택적으로 제어할 수 있는 방법은 없음.	• CO_2를 대량 흡수하는 역발상 개념을 이용하여 최적 고정 소재 선정 및 반응제어 콘크리트 및 시멘트계 보수재 개발 • CO_2 반응제어 콘크리트의 CO_2 고정량 : 3~12% • CO_2 반응제어 보수재의 CO_2 고정율 : OPC대비 116%	• CO_2 반응제어가 가능한 내구성을 향상시킬 수 있는 기술 필요
SO_4^{2-} 이온 고정 원천소재	• 비소, 인 등 중금속 제거의 용도로만 사용하고 있으며 콘크리트 분야 사용 미비	• 타 분야에서 SO_4^{2-} 이온을 고정할 수 있는 소재를 이용한 선정물질 적용 반응제어 콘크리트 및 시멘트계 보수재 개발 • SO_4^{2-} 반응제어 콘크리트의 SO_4^{2-} 고정량 : 22~117% • SO_4^{2-} 반응제어 보수재의 SO_4^{2-} 고정량 : OPC대비 129.2%	• SO_4^{2-} 이온 반응제어가 가능한 내구성을 향상시킬 수 있는 기술 필요

5. 연구개발성과의 활용 계획

가. 지적재산권 확보

- 친환경 콘크리트에 대한 지적재산권 출원은 첨가물질의 함량 조정 등 배합비 미세조정에 의한 유사특허의 난립으로 제품에 대한 성능검증 및 실용화 적용이 어려웠으나, 본 기술을 통해 반응메커니즘에 의한 성능개선 및 내구성 평가 등 국내 시장의 여건에 적합한 기술개발 도입으로 국내시장의 자생력을 확보하고 더 나아가 친환경 건설재료 및 보수재 시장의 확대 적용에 대한 발판을 마련하는 계기가 됨.
- 무시멘트 결합재의 반응 메커니즘 해석과 혼화재(제)에 대한 원천기술을 습득 확보함으로써 친환경 건설재료 기술 적용의 요청 시에 장시간과 고비용 소요를 개선하여 국내 실용화뿐 아니라 해외 기술분야 적용이 가능하게 됨.

나. 기술 제품화 및 상용화

- 무시멘트 결합재의 반응특성을 평가하여 성능에 영향을 미치는 영향인자에 따른 반응제어기술을 적립하였고, 이를 활용하여 무시멘트 콘크리트의 내구성능을 향상시켜 현장 적용 가능.
- 성능기반형 무시멘트 결합재 기술을 바탕으로 한 타겟 제품

  : 응급복구용 초속경 무시멘트 모르타르 (G1, G2 결합재 기반 개발완료)

  : 무수축 무시멘트 모르타르 (G3 결합재 기반 개발완료)

  : 환경친화형 지중, 수중 그라우트재 (시험시공 완료, 성능확보)

  : 고강도, 고유동 무시멘트 콘크리트 (G3 결합재 기반 개발완료)

  : 저발열 무시멘트 매스 콘크리트 (G3 결합재 기반 특허출원)

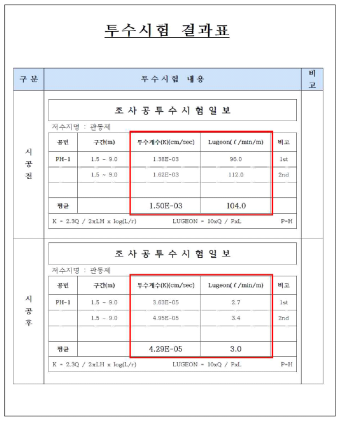
  : 고성능(화학저항성) 무시멘트 프리캐스트 콘크리트 (G2+G3 결합재 기반 특허출원)
- 수축저감형 무시멘트 콘크리트용 재생 골재의 품질관리

  : 무시멘트 콘크리트의 자기수축 및 건조수축 저감을 위해 재생골재를 사용할 시 가장 중요한 것은 재생골재의 흡수율 관리이며, 본 연구에서 재생골재는 물을 포함하는 일종의 경량골재와 같은 의미로 사용되었으므로, 기존의 경량골재 관련 기준(시방서 및 KS)을 적용해 관리 할 수 있음.

  : 단, 기존 경량골재 콘크리트 관련 기준인 KS F 2534 (KCS 14 20 20: 2016)에서 제시하는 골재 및 콘크리트 단위(용적)질량은 제외하고 다른 부분의 기준을 따르도록 함.
- 친환경 무시멘트 그라우트 기술이전 및 시험시공

  : 참여기업인 '㈜엠에스건설기술'에 무시멘트 그라우트 기술이전을 실시하고 현장 적용성 및 시공성 평가를 위해 3차례 시험 시공을 실시함.

  : 기존 장비를 그대로 이용하고 그라우트 재료만 본 연구에서 개발된 결합재를 사용하여 시험시공을 실시함.

현장명	관동제 일대 제방 차수그라우팅		
주소	전남 무안군 청계면 관동제 일대		
공사개요	커텐공 8공, 조사(시험)공 4공 (완결 1 shot)		
투수시험 결과 (cm/sec)	1.50×10^{-3} → 4.29×10^{-5}	 	

투수시험 결과표

조사공 투수시험일보

공번	구간(m)	투수계수(K)(cm/sec)	Lugeon(ℓ/min/m)	비고
PH-1	1.5 ~ 9.0	1.38E-03	95.0	1st
	1.5 ~ 9.0	1.62E-03	112.0	2nd
평균		1.50E-03	104.0	

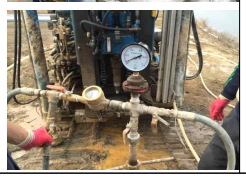
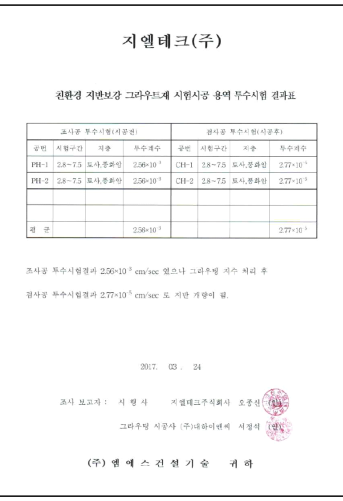
K = 2.3Q / 2πLH x log(L/r) LUGEON = 10πQ / PaL P=H

조사공 투수시험일보

공번	구간(m)	투수계수(K)(cm/sec)	Lugeon(ℓ/min/m)	비고
PH-1	1.5 ~ 9.0	3.63E-05	2.7	1st
	1.5 ~ 9.0	4.95E-05	3.4	2nd
평균		4.29E-05	3.0	

K = 2.3Q / 2πLH x log(L/r) LUGEON = 10πQ / PaL P=H

(a) 시험시공-1

현장명	오두제 일대 제방 차수그라우팅		
주소	전남 나주시 경현동 일원		
공사개요	커텐공 10공, 조사(시험)공 2공 (완결 1 shot)		
투수시험 결과 (cm/sec)	2.56×10^{-3} → 2.77×10^{-5}	  	

지엘테크(주)

관련성 지반보강 그라우트재 시험시공 용역 투수시험 결과표

조사공 투수시험(시공전)

공번	시험구간	지층	투수계수
PH-1	2.8~7.5	토사,풍화암	2.56×10^{-3}
PH-2	2.8~7.5	토사,풍화암	2.56×10^{-3}
평 균			2.56×10^{-3}

검사공 투수시험(시공후)

공번	시험구간	지층	투수계수
CH-1	2.8~7.5	토사,풍화암	2.77×10^{-5}
CH-2	2.8~7.5	토사,풍화암	2.77×10^{-5}
평 균			2.77×10^{-5}

조사공 투수시험결과 2.56×10^{-3} cm/sec 였으나 그라우팅 지수 처리 후

검사공 투수시험결과 2.77×10^{-5} cm/sec 로 지반 개량이 됨.

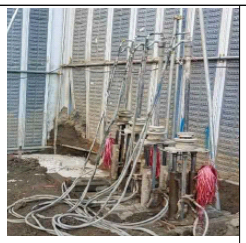
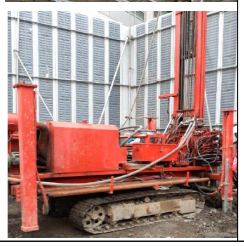
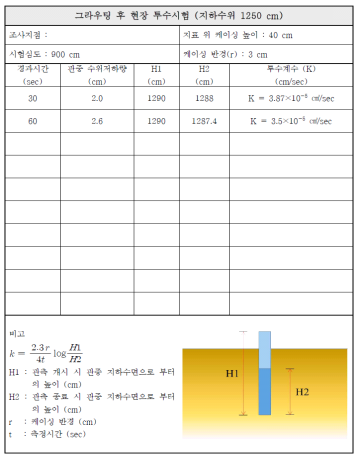
2017. 03. 24

조사 보고자 : 시 행 사 지엘테크주식회사 오종선

그라우팅 시공사 (주)대화이엔씨 시정석

(주) 엠 에 스 건 설 기 술 귀 하

(b) 시험시공-2

현장명	용산구 문배동 주상복합 신축공사		
주소	서울시 용산구 원료로 90길 32 주상복합 신축		
공사개요	커텐공 8공, 조사(시험)공 2공 (급결 1.5 shot)		
투수시험 결과 (cm/sec)	2.58×10^{-3} → 3.87×10^{-5}	 	

그라우팅 후 현장 투수시험 (지하수위 1260 cm)

조사지점 :			지표 의 케이싱 높이 : 40 cm	
시험심도 : 900 cm			케이싱 반경(r) : 3 cm	
경과시간 (sec)	관중 수위저하량 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	투수계수 (K) (cm/sec)
30	2.0	1290	1288	$K = 3.87\times10^{-5}$ cm/sec
60	2.6	1290	1287.4	$K = 3.5\times10^{-5}$ cm/sec

비고

$k = \frac{2.3r}{4t}\log\frac{H1}{H2}$

H1 : 관측 개시 시 관중 지하수면으로 부터의 높이 (cm)

H2 : 관측 종료 시 관중 지하수면으로 부터의 높이 (cm)

r : 케이싱 반경 (cm)

t : 측정시간 (sec)

(c) 시험시공-3

그림 5.1 무시멘트 결합재 활용 콘크리트의 시험시공

- 친환경 무시멘트 그라우트 공법 비교 및 경제성 분석

: 시멘트의 겔화를 이용한 물유리계 공법인 SGR과 LW공법은 시공이 단순하고 공사비가 저렴해서 기존에 많은 현장에 적용되었지만, 물유리의 용탈에 의한 내구성 문제가 발생함에 따라 최근에는 무기질계(광물질급결재+고분말시멘트) 공법을 적용하는 현장이 증가하는 추세임.

: 무기질계 공법은 내구성은 우수하지만, 고가장비와 고가재료의 사용으로 공사비가 비쌈.

: 무시멘트 그라우트 공법은 기존 물유리계 공법(SGR) 장비를 그대로 이용하면서도 주입재료는 무기질인 무시멘트 결합재를 사용하기 때문에 공사비가 비교적 저렴하고 내구성 우수

: 무시멘트 주입재는 물유리의 용탈이나 시멘트의 중금속 용출 및 pH 증가로 인한 지중환경의 교란이 없는 친환경 공법임.

구 분	물유리계		무기질계	
	SGR 공법	LW 공법	ET&G 강관방식	무시멘트 그라우팅
공법개요	지중에 이중관 주입 Rod를 설치한 후 선단장치를 통해 주입재를 대상지반에 주입하는 침투주입 공법	지중에 멘젯트 튜브를 삽입한 후 에어팩커를 이용하여 물유리와 시멘트가 혼합된 주입재를 주입하는 최초의 약액 주입 공법	특수 분사밸브가 장착된 ET 강관을 대상지반에 설치한 후 ET-Packer를 사용하여 무기질 지반 주입재를 주입하는 공법	차수성, 내구성이 우수한 친환경 무시멘트 무기질계 지반주입재를 주입하는 공법
주입재료	① 물유리 ② 시멘트 ③ SGR 주입약재	① 물유리 ② 시멘트 ③ 벤토나이트	① 광물질 급결재 ② 고분말시멘트	① EG-1 (AAS) ② EG-2 (AAS + 급결재)
재료타입	물유리계	물유리계	무기질계	무기질계
압축강도	0.1~1 MPa	0.1~2 MPa	0.1~4.5 MPa	4~6 MPa
차수효과	$k = 10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec	$k = 10^{-5}$ cm/sec	$k = 10^{-5}$ cm/sec	$k = 10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/sec
겔타임	조절 용이 완결 10~20 분 / 급결 6~10 초	조절 어려움 10~30 분	조절 용이 3초 ~ 2분	조절 용이 완결 20~30 분 / 급결 2~3 분
내구성	물유리의 용탈에 의한 내구성 저하	물유리의 용탈에 의한 내구성 저하	무가질계 지반주입재 사용으로 용탈현상이 없음	고로슬래그의 수화반응으로 장기적인 내구성 확보
환경성	pH 증가 및 중금속 용출에 의한 지반 오염 물유리 용탈에 의한 지하수 오염	pH 증가 및 중금속 용출에 의한 지반 오염 물유리 용탈에 의한 지하수 오염	고분말 시멘트의 사용으로 지하수에 의한 중금속 용출 및 pH 증가 위험	pH 안정 및 5대중금속 및 6가크롬 용출 없음
공사비 (경제성)	78,400원/m^2	81,100원/m^2	124,400원/m^2	71,400원/m^2

그림 5.2 무시멘트 콘크리트의 재료에 따른 공법

- 다양한 재료들에 대한 유해이온 고정 성능을 평가하여 CA_2, γ-C_2S 및 음이온 교환 수지를 유해이온 반응제어 소재를 선정함.

: CA_2, γ-C_2S를 clinker 형태로 대량생산, 음이온 교환 수지는 분말 또는 bead 형태로 사용목적에 따라 기존 보수용 모르타르에 10 cwt% 치환

- 유해이온 별 맞춤형 시멘트계 보수 모르타르 제품화

: 유해이온 반응제어형 시멘트계 보수 모르타르

다. 신규시장 개척 및 선도

- '2030 온실가스 배출량 감소'를 목표로 '기후변화대응 기본계획 및 로드맵'에 따라 건설재료 분야의 온실가스 저감 노력이 요구되는 상황에서 향후 친환경 저탄소 건설재료 시장의 급격한 성장이 예상됨.
- 녹색인증제품은 에너지 및 자원의 투입과 온실가스 및 오염물질 발생을 최소화하는 제품에 대한 인증으로 기존 환경표지 인증제품과 우수재활용 인증제품으로 구성되었으나, 법률개정으로 '저탄소 인증제품'도 녹색인증제품에 추가됨(2020.01.29.).
- 본 연구개발 재료인 무시멘트 친환경 결합재는 '저탄소 제품' 인증에 매우 유리한 재료로써 녹색인증획득에 의한 기업의 세제혜택 및 입찰 가점 등의 국가지원을 목적으로 수요기업의 기술이전 요구가 많을 것으로 예상됨.
- 규모의 경제원리에 의해 양회(시멘트)산업과 직접적인 가격경쟁은 불가능하지만, 시멘트보다 우수한 특성들을 고려한 특수목적 제품(친환경, 고내구성 등)에 특화된 타겟제품 개발로 틈새시장의 확대를 도모함.

라. 융합기술 개발

- 무시멘트 콘크리트에 자기치유 기술을 도입함으로써 무시멘트 결합재의 약점인 염해/동결융해/철근부식 등의 열화에 의한 균열을 스스로 치유하게 함으로써 무시멘트 결합재의 단점을 극복할 수 있음.
- 콘크리트 열화 인자(Cl^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-})에 적용 가능한 유해이온 반응제어 소재의 대량생산 기술을 확보하여, 복합 열화 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 보수재로 활용
- 유해이온 반응제어(차단/고정) 기술을 통해 사후 보수재가 아닌 사전 보수재로써 능동적인 자기방어 기술을 접목함으로써 기존 친환경 콘크리트의 성능한계를 극복하고 건설 현장에서의 실용화를 기대할 수 있음.

6. 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

가. RILEM TC 224

- RILEM Technical Committee (TC) 중 알칼리 활성 물질에 대한 그룹으로, 2007년 구성, 15개 국가에서 36명의 전문가로 구성됨.

  : 스페인 Instituto de Ciencias de la Construccion Eduardo Torroja in Madrid의 Angel Palomo 교수가 시작

  : 2014년 John Provis 교수(University of Sheffield, UK)와 Jannie van Deventer 교수(University of Melbourne, Austalia)에 의해 State-of-the-Art Report를 출판.

- 다음과 같은 내용으로 구성됨: 1) WG1-AAM의 산업 적용 및 관련 연구내용의 리뷰, 2) WG2-AAM 관련 규정 설정을 위한 유사 규정 분석, 3) WG 3-AAM 성능 평가를 위한 실험방법의 개발.

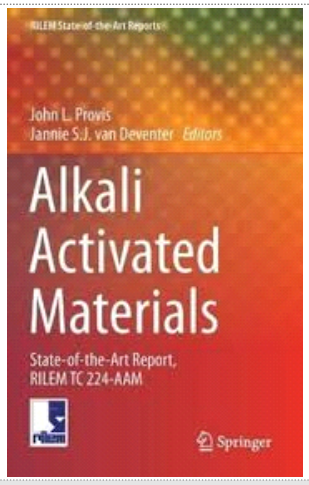


그림 6.1 RILEM TC 224 State-of-the-Art Report

나. M2i (Materials innovation institute) 및 4TU Lighthouse Project

- 현재 TU Delft를 중심으로 진행중인 다양한 Geopolymer 연구 센터 및 과제를 수행중임. M2i (네델란드)는 건설 재료 뿐 아니라 다양한 종류의 혁신적 재료를 개발하기 위한 국책 연구소이며, 4TU는 네델란드의 건축분야 기술혁신을 위해 4개의 대학(Delft, Eindhoven, Twente, Wageningen)이 협력하는 공동체임.

  : 현재 수행중인 대표적인 연구 프로젝트에는

  1) Long-term performance of geopolymer concrete systems for production of environment friendly building materials,

  2) Experimental study and numerical simulation of geopolymerization process and microstructure formation of inorganic polymer materials (중국 연구재단 China Scholarship Council 협력),

  3) Sino-Dutch joint research projects on Advanced Materials: Utilization of regional

wastes and industrial residuals for producing high value construction materials through alkali-activation technology (중국과학원 및 네델란드 연구재단 공동과제),

4) 4TU Lighthouse Project 2017: Geopolymer concrete bridge, from research to reality、

5) Long-term performance simulation of geopolymer concrete under coupled carbonation and chloride transport (GeoCrete) 등이 있음.



그림 6.2 4TU Lighthouse Project 홈페이지 및 Center 소개

다. LC^3 project

- Limestone Calcined Clay Cement (LC3) 기술을 연구: 저온소성 시멘트의 일환으로 OPC를 대폭 줄인 소성점토를 적용한 기술임. 경우에 따라 활성화제를 사용함.

: 현재 전세계적으로 가장 유명한 저시멘트계 재료 연구단이며, 저탄소, 저가격, 저자본 기술을 목표로 하고 있음. 기존 시멘트 대비 탄소 발생량 30 % 감축이 목표임.

- 스위스의 Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)를 중심으로 The Global Programme on Climate Change (GPCC)의 일환의 연구 프로젝트. 인도의 Technology and Action for Rural Advancement (TARA), The Indian Institute of Technology Delhi (IIT Delhi), The Indian Institute of Technology Delhi (IIT Delhi), 쿠바의 Central University "Marta Abreu" de Las Villas 가 참여하고 있음.

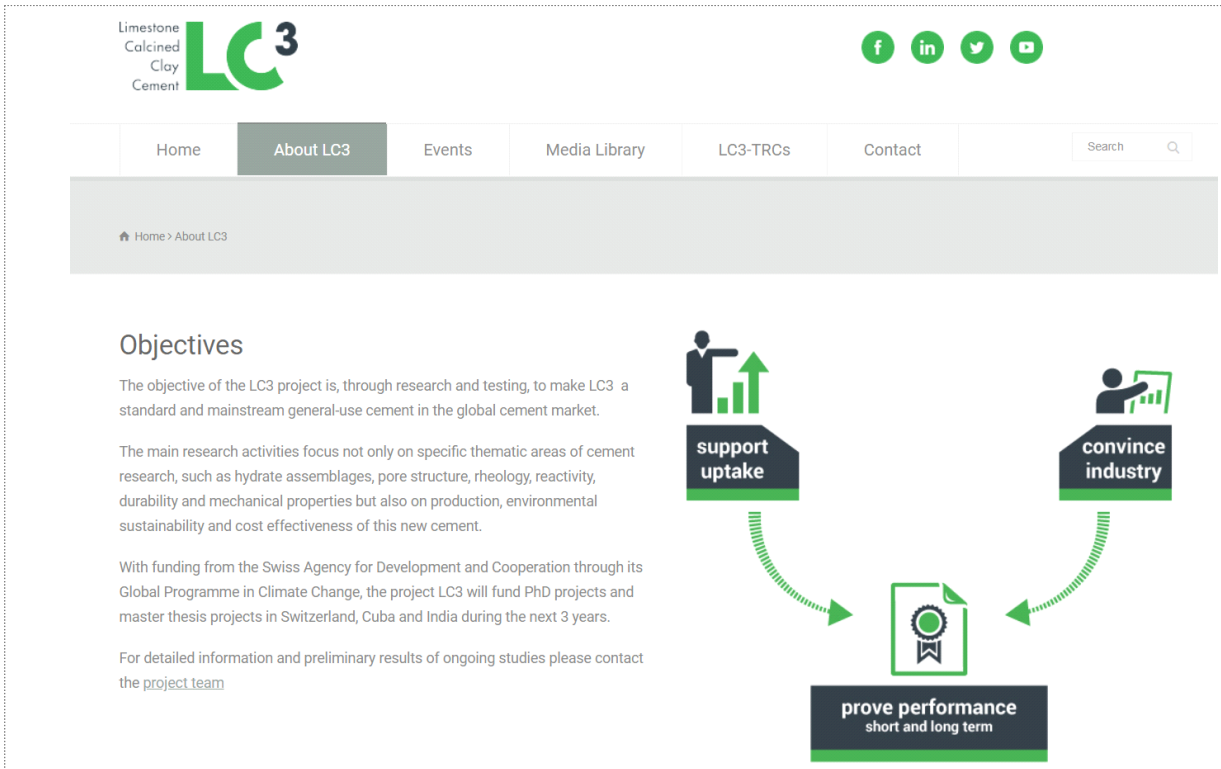


그림 6.3 LC^3 project 홈페이지 및 Center 소개



그림 6.4 LC^3 project를 통해 개발된 저온소성 시멘트의 소성 (쿠바) (좌) 및 본 기술이 적용된 주택 (인도) (우)

7. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정사유	본 연구개발사업은 [국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정(2019.9.1)] 제 5 장 국가연구개발사업의 보안 및 정보관리 제 24 조의 4(보안 분류 기준)에 명시된 보완등급분류에 따라 일반과제로 분류하였음.	

8. 국가과학기술종합시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기간	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

※ 해당사항 없음

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

(1) 실험실 안전점검 및 진단

- 실험실 안전관리는 센터 사무국의 전담인력 1인이 상시 순환 감시하여 진행할 예정으로 다음의 사항을 준수하여 정기 점검을 실시하도록 함.

: 안전점검으로 인한 안전수칙 준수

: 사고 발생 환경인자의 조기 발견을 통한 개선 및 보수

: 실험환경 이상으로 부터 발생 가능한 사고 최소화

종류 / 내용	일상 점검	정기 점검	특별 안전 점검
점검대상	• 주관기관 내 과학기술분야 연구활동을 위하여 설치된 연구실	• 과학기술분야 연구활동을 위하여 설치된 연구실 • 연구 중단으로 1년 이상 방치된 후 연구를 재개하려는 연구실	• 일상·정기점검 결과 안전에 취약한 연구실 • 폭발·화재사고 등 연구활동 종사자의 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있다고 판단되는 연구실
점검 내용	• 기계·기구·전기·가수·약품·병원체 등의 이상 유무 및 보호 장비의 관리실태 점검	• 연구실 내의 모든 인적·물적인 면에서의 물리화학적·기능적 결함 여부 점검	• 폭발사고·화재사고 등 연구활동 종사자의 안전에 치명적인 위험을 야기할 가능성이 있는 인적·물적 연구자원의 세부적인 특별점검
점검 방법	외부육안검사 및 점검 장비를 사용한 점검		
점검 시기	1회/일	1회 이상 / 년	연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 경우

(2) 실험실 안전관리 방안

- 연구실 안전환경조성에 관한 법률에 따라 연구실의 안전 확보와 연구자원 효율적 관리를 위해 실시하여야 하며 연구개발활동을 수행하기 위하여 설치한 연구실에 관하여 적용 관리할 예정임.

- 안전점검필요에 대한 따라 <연구실 안전환경조성에 관한 법률>이 제정되었고, 쾌적하고 안전한 연구환경조성과 모든 연구활동 종사자들의 생명과 신체안전을 도모하고 연구 또는 기술 개발전략이나 국가적인 인재보호차원에서 연구실 안전 환경조성에 관한 법률 [시행 2008.2.29] [법률 제 8852호 2008.2.29 타법개정]이 시행됨.

(3) 안전관리규정 작성 사항

- 안전관리조직체계 및 그 직무에 관한 사항
- 연구실별 안전관리담당자의 지정 및 그 책임과 권한의 부여
- 주기적 안전교육의 실시에 관한 사항
- 연구실 안전표식의 설치 또는 부착
- 사고발생시 긴급대처방안과 행동요령에 관한 사항
- 사고조사 및 후속대책수립에 관한 사항
- 그 밖의 안전관리에 관한 사항

(4) 연구참여자를 위한 안전교육

- 실험실 사용자 등 연구 참여자들을 대상으로 1학기 1회의 안전교육을 의무화하고 있으며, 웹 기반 안전관리 시스템을 별도로 운영하고 있음.



나. LMO 연구시설 및 수입신고 현황

※ 해당사항 없음

참고 문헌

- Berger, R. L., Young, J. F., Leung, K. (1972). Acceleration of hydration of calcium silicates by carbon dioxide treatment. Nature Physical Science, 240(97), 16-18.
- Béarat, H., McKelvy, M. J., Chizmeshya A. V. G. et al., (2006). Carbon sequestration via aqueous olivine mineral carbonation: role of passivating layer formation. Environmental Science & Technology, 40(15), 4802-4808.
- Brough, A. R., Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure. Cement and Concrete Research, 32(6), 865-879.
- Chen, Z., Lee, Y., Cho, H., Lee, H., Lim, S. (2019). Improvement in Carbonation Resistance of Portland Cement Mortar Incorporating γ-Dicalcium Silicate. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 1-10.
- Guan, X., Liu, S., Feng, C., Qiu, M. (2016). The hardening behavior of γ-C_2S binder using accelerated carbonation. Construction and Building Materials, 114, 204-207.
- Haha, M. B., Le Saout, G., Winnefeld, F., Lothenbach, B. (2011). Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags. Cement and Concrete Research, 41(3), 301-310.
- Ikumi, T., Segura, I. (2019). Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review. Cement and Concrete Research, 121, 91-105.
- Kerisi, S., Bylaska, E. J., Felmy, A. R. (2013). Water and carbon dioxide adsorption at olivine surfaces. Chemical Geology, 359, 81-89.
- Kim, H. K., Lee, H. K. (2018). Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing. Cement and Concrete Composites, 91, 67-75.
- Kim, H. J., Tafesse, M., Lee, H. K., Kim, H. K. (2019). Incorporation of CFBC ash in sodium silicate-activated slag system: Modification of microstructures and its effect on shrinkage. Cement and Concrete Research, 123, 105771.
- Kim, H. K., Song, K. I., Song, J. K., Jang, J. G. (2019). Effect of Carbonation on Abrasion Resistance of Alkali-Activated Slag with Various Activators. Materials, 12(17), 2812.
- Knapen, E., Cizer, O., Van Balen, K., Van Gemert, D. (2009). Effect of free water removal from early-age hydrated cement pastes on thermal analysis. Construction and Building Materials, 23(11), 3431-3438.
- Lee, B. Y., Kim, M. Y., Chen, Z. X., Lee, H. S, Lim, S. M., (2018). Chloride-binding capacity of Portland cement paste blended with synthesized $Ca_2(CaO\cdot 2Al_2O_3)$. Advances

in Materials Science and Engineering, 2018, 1-11.

- Lee, Y., Lee, H., Jung, D., Chen, Z., Lim, S., (2018). Chloride ion adsorption capacity of anion exchange resin in cement mortar. Materials, 11(4), 560.
- Lee, Y., Lim, S., Lee, H., (2020). Chloride Resistance of Portland Cement-Based Mortar Incorporating High Aluminate Cement and Calcium Carbonate. Materials, 13(2), 359.
- Lee, Y. S., Chen, Z. X., Lee, H. S. (2017). Performance Evaluation of Chloride and Sulfate Removal using Anion Exchange Resin in Saturated $Ca(OH)_2$ Solutions. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 21(2), 146-154.
- Lee, Y. S., Lim, S. M., Park, J. H., Lee, H. S. (2020). Chloride Penetration Properties of Portland Cement Mortar Substituted with Anion Exchange Resin Powder. J. Korea Inst. Build. Constr., 20(1), 1-9.
- Liu, Z., Zhang, B., Yu, X. B. (2011). Multiphysics for early stage cement hydration: theoretical framework. Advanced Materials Research, 255.
- Mu, Y., Liu, Z., Wang, F., Huang, X. (2018). Carbonation characteristics of γ-dicalcium silicate for low-carbon building material. Construction and Building Materials, 177, 323-331.
- Mu, Y., Xue, G., Zhao, S., Huang, X. Wang, F. (2017). Development of carbonation of γ-dicalcium silicate. Journal of the Chinese Ceramic Society,
- Myers, R. J., Lothenbach, B., Bernal, S. A., Provis, J. L. (2015). Thermodynamic modelling of alkali-activated slag cements. Applied Geochemistry, 61, 233-247.
- Nguyễn, H. H., Choi, J. I., Song, K. I., Song, J. K., Huh, J., Lee, B. Y. (2018). Self-healing properties of cement-based and alkali-activated slag-based fiber-reinforced composites. Construction and Building Materials, 165, 801-811.
- Sanahuja, J., Dormieux, L., Chanvillard, G. (2007). Modelling elasticity of a hydrating cement paste. Cement and Concrete Research, 37(10), 1427-1439.
- Wang, S. D., Scrivener, K. L., Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. Cement and concrete research, 24(6), 1033-1043.

※ 주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 건설기술연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

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