19SCIP-B103732-05

자기치유형친환경콘크리트기술개발 최종보고서 2020 국토교통부 국토교통과학기술진흥원

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

R&D / 19SCIP-B103732-05

자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발 최종보고서(1세부)

2020. 4. 21

협동연구기관 / 한국건설생활환경시험연구원

공동연구기관 / 중앙대학교 산학협력단
(주)인트켐
고려대학교 산학협력단
경기대학교 산학협력단
세명대학교 산학협력단
연세대학교 원주산학협력단

위탁연구기관 / 군산대학교 산학협력단
울산대학교 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 최종보고서를 제출합니다.

2020. 04. 21.

협동연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원 (윤갑석)
공동연구기관명 : 중앙대학교 산학협력단 (김원용)
㈜인트켐 (안상욱)
고려대학교 산학협력단 (허 준)
경기대학교 산학협력단 (이준성)
세명대학교 산학협력단 (신용국)
연세대학교 원주산학협력단 (김택중)
위탁연구기관명 : 군산대학교 산학협력단 (김영철)
울산대학교 산학협력단 (조홍래)

협동연구기관책임자 : 정윤석
공동연구기관책임자 : 최성철
안상욱
박우준
양근혁
최연왕
정찬문
위탁연구기관책임자 : 이승헌
차수원

참여기관명 : ㈜세안 (김태한), ㈜위드엠텍 (박동철), 안덕테크㈜ (이동균), 대원토질 (최홍기), ㈜인트켐(안상욱), ㈜홍익산업개발 (정연용), 진올바이오테크놀로지 (김용우), ㈜에이치비티(김경환), ㈜대신이엔지, ㈜에이티랩 (김영택),삼중씨엠텍㈜ (지상호)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라
최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>19SCIP-B103732-05</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2019. 01. 01-2020. 02. 13</td><td>단계구분</td><td>(5차년도)/(5차년도)</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="5">건설기술연구사업</td></tr>
<tr><td>주관연구과제명</td><td colspan="5">자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발</td></tr>
<tr><td>협동연구과제명</td><td colspan="5">균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">정윤석</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 106명
내부: 106명
외부: 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부: 3,100,000 천원
민간: 1,034,800 천원
계: 4,134,800 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 409명
내부: 409명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 7,671,000 천원
민간: 2,592,200 천원
계: 10,263,200 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관</td><td colspan="3">연구기관명:
한국건설생활환경시험연구원
중앙대학교 산학협력단
㈜인트켐
고려대학교 산학협력단
경기대학교 산학협력단
세명대학교 산학협력단
연세대학교 원주산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명 :
㈜세안
㈜위드엠텍
안덕테크㈜
㈜인트켐
대원토질
진올바이오테크놀로지
㈜홍익산업개발
㈜대신이엔지
㈜에이치비티
㈜에이티랩
삼중씨엠텍㈜</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:
군산대학교 산학협력단
울산대학교 산학협력단</td><td colspan="2">연구책임자:
이승헌
차수원</td></tr>
<tr><td colspan="6">※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음</td></tr>
</table>

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허		보고서 원문	연구시설・장비	기술요약정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
		출원	특허						생명정보	생물자원	정보	실물
등록・기탁번호	60	46	19	17	-	-	3	-	-	3	-	-

보고서 면수 177

연구개발목표	• 본 연구개발과제는 **콘크리트 구조물의 장수명화 및 유지관리 최소화가 가능한 자기치유 선도 기술 개발**을 최종목표로 함. • 이를 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같음. - 균열폭(0.1~0.3 mm), 치유시간(1일~28일) 제어 자기치유 기술 개발
연구개발내용	**[1세부] 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발** ❍ 유·무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 기술 개발 ❍ 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발 ❍ 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발
연구개발성과 (핵심성과)	**[1세부] 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발** ❍ 균열 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재료 기술 개발 - 무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 메커니즘 및 모델링 기술 - 무기혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술 - 기능성 폴리머 적용을 통한 무기혼합재 활용 자기치유 성능 향상 기술 ❍ 스마트 폴리머 활용 균열 자기치유 기술 개발 - 콘크리트 pH응답형 스마트 폴리머 확보 기술 - 장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술 ❍ 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술 개발 - 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술 - 균열폭 0.3 mm 이내 자기치유 기술 ❍ 박테리아 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발 - 자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술 - 담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술 - 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술 ❍ 박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발 - 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 최적생산조건 확립 - 생체모방형 코팅재 구성 요소 기술 - 생체모방형 콘크리트 코팅재 성능 평가 및 시공기술 ❍ 캡슐 활용 균열 자기치유 시멘트 복합재료 개발 - 시멘트 복합재료용 자기치유 캡슐 제조 기술 - 캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능 제어 기술 ❍ 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발 - 자기치유 코팅재의 치유물질 선정 및 캡슐화 기술 - 자기치유 코팅재 제조 및 최적화 기술

<table>
<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 반응 제어형 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>자기치유</td><td>균열제어</td><td>반응제어</td><td>성능 평가</td><td>표준화</td></tr>
</table>

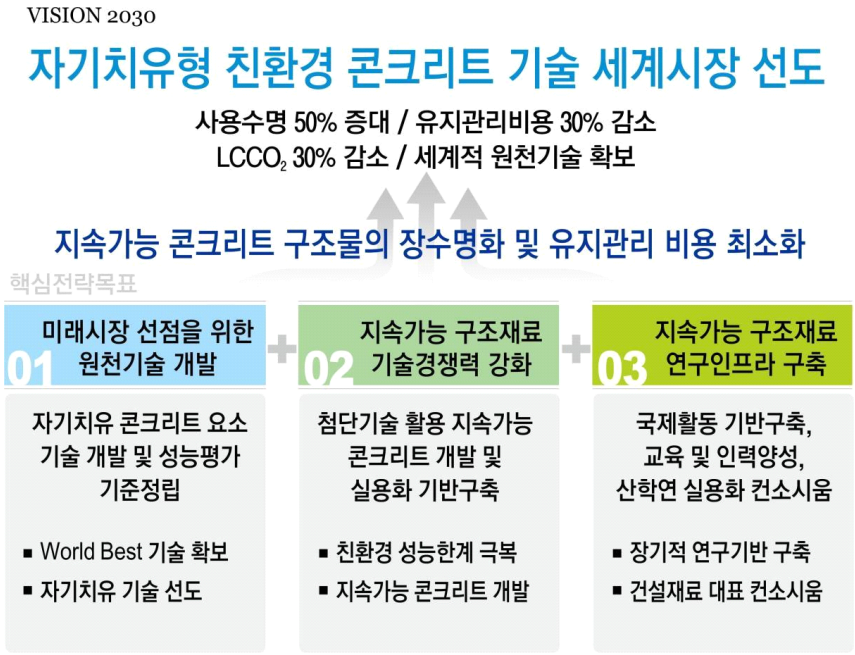
〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술개발 현황 ····· 22
3. 연구수행내용 및 성과 ····· 34
3-1. 연구수행 내용 ····· 34
3-2. 연구 성과 ····· 128
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 147
4-1. 목표 달성도 ····· 147
4-2. 관련 분야 기여도 ····· 156
5. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 163
6. 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 167
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 171
8. 국가과학기술종합시스템에 등록한 연구시설·장비현황 ····· 171
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 ····· 172

붙임. 참고 문헌 ····· 174

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 최종 목표



○ 미래시장 선점을 위한 원천기술 개발

- 미래 건설시장을 선점할 수 있는 자기치유(Self-healing) 콘크리트 요소 기술 개발
- 세계최고기술(World best technology) 수준의 자기치유 콘크리트 분야의 원천기술을 확보하여 해당 분야 기술선도를 목표로 함.

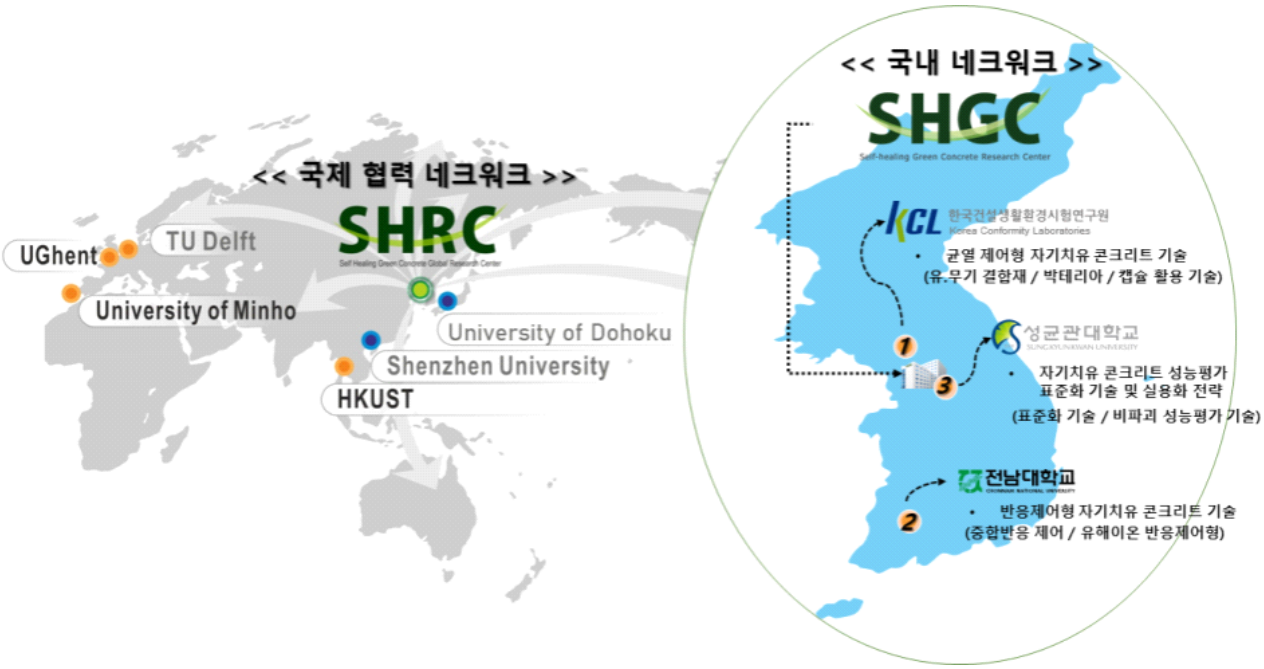
○ 지속가능 구조재료 기술경쟁력 강화

- 자기치유 기술을 접목하여 기존 콘크리트의 성능한계를 극복, 향후 건설 현장에서의 실용화를 위한 토대를 구축하고자 함.
- HVSCM, 무시멘트 콘크리트의 문제점을 자기치유 기술을 통해 제어하는 기술을 포함함.
- 사용수명 50% 증대, 생애주기 이산화탄소 배출량 30% 감소를 통해 최종적으로 유지관리 비용 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 실 사용자의 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.

나. 연구개발의 개요



○ “자기치유형 친환경 콘크리트 기술”은 세계 최고 수준의 하이테크 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술로써, 구조물의 위험 및 열화인자에 대하여 구조물 스스로 치유하는 스마트 구조물 개발을 통하여 급변하는 건설재료 시장에서 새로운 개념의 미래형 건설소재에 대한 국내 요소기술을 확보하고 국제적 니즈에 대응하기 위한 기술임.

○ 본 연구개발과제인 “자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발”에서는 콘크리트 구조물의 장수명화 및 유지관리 최소화가 가능한 자기치유 선도 기술개발을 최종목표로 하였음. 이를 달성하기 위한 1세부 핵심 세부 목표는 다음과 같음.

- 유·무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발
- 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발

○ 본 연구개발과제는 최종 목표를 달성하기 위하여 자기치유 친환경 콘크리트 분야의 Control Tower인 R&D 연구센터를 구축하고 국내외 연구 네트워크를 통하여 효율적인 연구 수행을 위한 개발방향 및 전략을 다음과 같이 구성하여 추진하였음.

1세부 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발

- [1-1] 유·무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 기술 개발
  - 균열 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재료 기술 개발
    : 무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 메커니즘 및 모델링 기술
    : 무기혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술
    : 기능성 폴리머 적용을 통한 무기혼합재 활용 자기치유 성능 향상 기술
  - 스마트 폴리머 활용 균열 자기치유 기술 개발
    : 콘크리트 pH응답형 스마트 폴리머 확보 기술
    : 장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술
  - 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술 개발
    : 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술
    : 균열폭 0.3 mm 이내 자기치유 기술

- [1-2] 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발
  - 박테리아 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발
    : 자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술
    : 담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술
    : 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술
  - 박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발
    : 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 최적생산조건 확립
    : 생체모방형 코팅재 구성 요소 기술
    : 생체모방형 콘크리트 코팅재 성능 평가 및 시공기술

- [1-3] 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발
  - 캡슐 활용 균열 자기치유 시멘트 복합재료 개발
    : 시멘트 복합재료용 자기치유 캡슐 제조 기술
    : 캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능 제어 기술
  - 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발
    : 자기치유 코팅재의 치유물질 선정 및 캡슐화 기술
    : 자기치유 코팅재 제조 및 최적화 기술

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

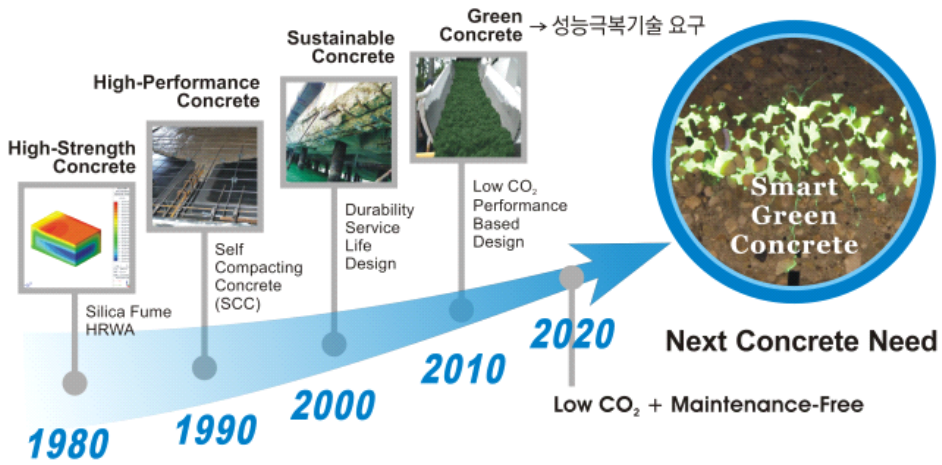


그림 1.1 시대별 콘크리트 기술 발전 변천사

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

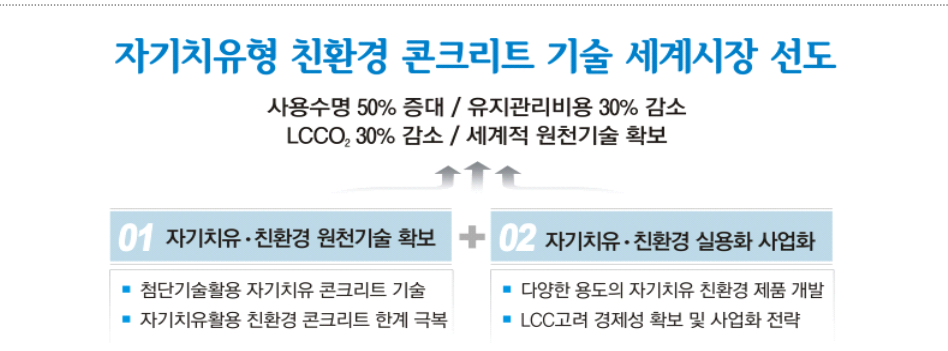


그림 1.2 연구개발 추진 목적

- 첨단 하이테크 기술 : 바이오(Bio), 나노(Nano), 폴리머(Smart-Polymer) 등의 새로운 소재의 기능을 활용하여 콘크리트에 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

(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

- 고도성장기(80, 90년대)의 사회기반 시설물뿐만 아니라 신규, 특히_사회적 중요도가 높은 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물, 해양구조물 등)에 대한 유지관리의 중요성이 증대

: 최근 들어 균열 등 콘크리트의 손상을 저감시키거나 자기치유(Self-healing)할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적용을 위한 연구가 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음.

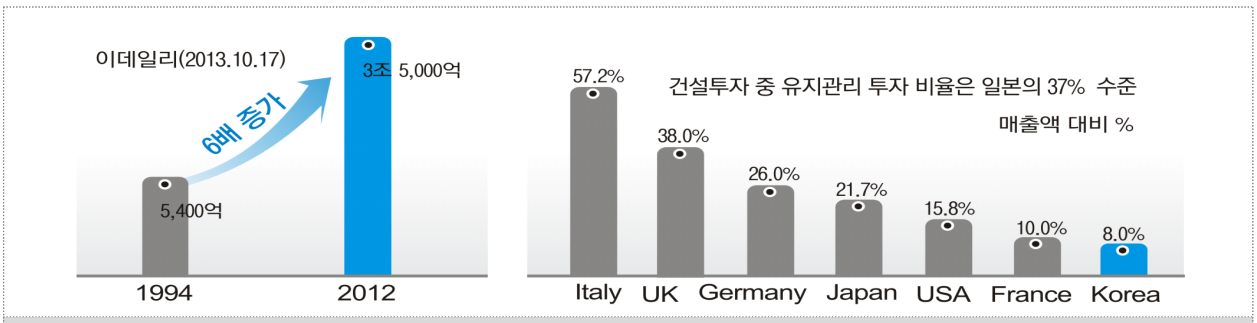


그림 1.3 국내 건설유지관리 시장현황



그림 1.4 World Economic Forum – 2013년 10대 유망기술

- 2013년도 World Economic Forum에서 자기치유 재료(Self-healing Materials) 기술이 10대 유망기술(Emerging Technologies)에 포함되었음.

- 자기치유(Self-healing)형 친환경 콘크리트에 대한 선진국과의 기술격차 감소 필요

: 해외 건설시장에서의 경쟁력 강화를 위한 연구·산업 인프라 구축 필요

※ 자기치유형 콘크리트의 현 기술 수준 : 일본 및 유럽의 약 40% 수준

※ 친환경 콘크리트의 현 기술 수준 : 호주 및 유럽의 약 60% 수준 (‘고로슬래그의 고부가가치 활용제품 실용화 추진전략 수립’, 전남대학교, 2012)

: “Self-healing materials for prolonged lifetime” 주제로 EU-FP7 HealCON 프로젝트(2013~2017) 완료됨.

※ 유럽 12개 기관 참여 : Ghent University, Avecom, TU Delft, Acciona, TUM, TTI, VTT, COWI, DTI, CEINNMAT, Devan and Fescon

: “SARCOS(Self-healing As prevention Repair of COncrete Structures)” 프로젝트는 신규뿐만 아니라 기존 사회기반시설의 사용기한을 연장하기 위해 자기치유 기술을 개발하는 프로젝트로 2016년 시작되어 3개의 Working Group을 통하여 기술개발이 이루어짐.

※ 벨기에, 덴마크, 프랑스, 독일 등 28개 국가의 연구기관 참여

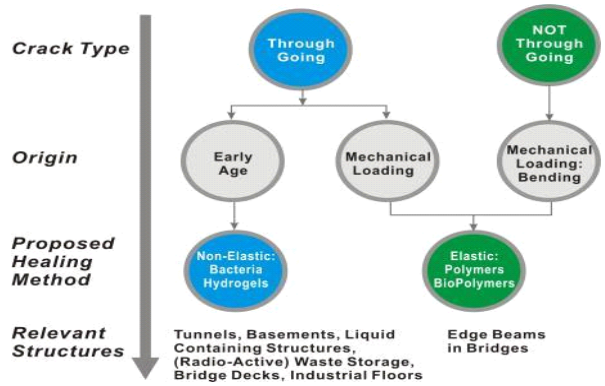


그림 1.5 HealCON 프로젝트 개요

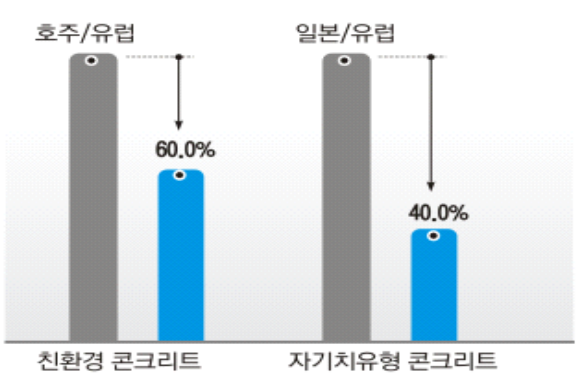


그림 1.6 기술 격차

- 첨단기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 기술수요 급증

: 콘크리트 성능열화는 크게 Micro/Meso/Macro 영역의 관점에서 분류할 수 있음.

※ Micro: 수화(Hydration)/수축(Shrinkage)/탄산화(Carbonation) 등 미세조직구조 변화에 따른 열화

※ Meso/Macro: 외부하중(External loading)/부식(Corrosion) 등에 의한 균열 발생에 따른 열화

: 기존 균열치유 개념의 자기치유(Self-healing) 기술 법위를 확장하여 콘크리트의 미세조직구조 변화에 따른 손상의 치유 및 첨단기술 융합을 통한 자기성능 개선을 위한 기술개발이 필요하며, 이를 통해 기존 친환경 콘크리트 기술의 한계점 극복

※ 시멘트 무기복합체 자기치유 기능 극대화를 통한 결함인자(조기강도, 균열, 탄산화 및 수축 등) 제거

- 자기치유형 친환경 콘크리트의 원천기술기반 산업화 네트워크 취약

: 산학연 네트워크 형성 및 경쟁력 강화를 위한 인프라 관리체계 필요

: 자기치유형 친환경 콘크리트의 실용화 전략을 위한 적용 분야별 산업화 컨소시엄 구성 필요

※ 레디믹스트 콘크리트, 프리캐스트 콘크리트, 보수재료 분야 등

② 정부지원의 필요성

- 본 과제는 자기치유 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 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.

- 자기치유 기술은 건설 분야에서 모든 시설물에 적용될 수 있지만, 원전구조물, 터널 및 지하구조물 등 사회적으로 중요도가 높고, 직접적 유지보수가 어려운 사회기반 시설물에 적용하여 구조물의 안전도 향상 및 유지관리 비용 감소로 국가예산을 감축할 수 있어 공공성 측면에서 접근이 필요함.

- 자기치유분야 전문 인력, 기술 수준, 연구 인프라 등의 미흡으로 향후 건설 기술의 해외 의존도 증대가 불가피할 것으로 판단됨.

: 또한 건설 산업의 해외경쟁력 약화로 국내 건설시장의 장기적 침체가 예상됨.

: 중소기업의 기술경쟁력을 강화시키고 관련분야 시장확대 및 활성화를 위해서 정부의 지원이 필수적임.

- 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 국가경제에 크게 기여할 수 있을 것으로 예상됨.

: 해당 분야는 연구개발 뿐만 아니라 관련 교육프로그램과 연계한 전문가 인력양성, 장비·시설 등의 기반 인프라 구축이 병행되어야 하기때문에 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.

- 향후 자기치유 성능부여 소재와 관련된 국내 전문가 및 기업과의 연계와 협력을 통해 기술 및 연구방향에 대한 지속적인 기술자문과 협력을 추진할 계획임.
- [관련 산업분야] : (화학) 기능성 캡슐 제조분야, 기능성 폴리머(Fiber, SAP 등)
  : (바이오) 생체광물 형성 미생물 배양 및 적용 분야, 자기정화 박테리아

② 국제 공동연구를 통한 국제협력

- 본 연구단은 벨기에 겐트대학 Belie 교수팀과 자기치유 기술 개발 및 성능평가 분야에 대한 정보교류 및 노하우 전수에 대한 양해각서를 작성하고 공동연구를 통한 협력체계 구축

: Ghent 대학과의 연구 - 자기치유 콘크리트의 효율적인 성능평가 방법 개발

※ 2차년도 : 복합 자기치유 물질을 포함한 콘크리트 연구

※ 3차년도 : 자기치유 콘크리트의 투수 실험

※ 4차년도 : 자기치유 콘크리트의 내구성 실험

※ 5차년도 : 자기치유 콘크리트의 성능평가 기법 표준화

- 본 연구단은 네덜란드 TU Delft 대학 Erick Schlangen 교수팀 등의 우수한 연구기관의 연구자들과 공동연구를 통한 협력체계 구축 및 선진기술 교류를 통해 자기치유 기술력을 향상

※ TUDelft와 SAP를 이용한 자기치유에 관한 공동연구 수행

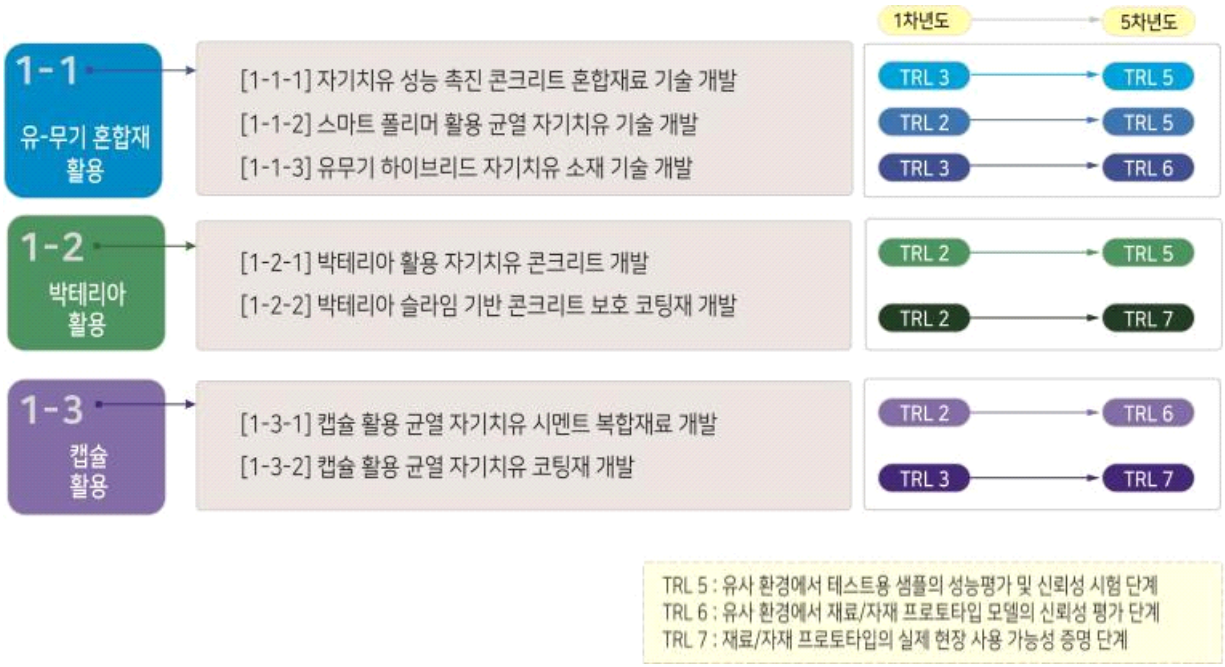
- 본 연구단에서는 연구자 교류, 자문회의 등을 통해 국제협력 네크워크를 구축하였음.
- 국제 협력 기관을 통해 실질적인 자문 등의 협력을 효율적으로 확보하기 위해 기관 및 전문가별 초청, 방문 등을 통하여 해외자문을 실시함.

표 1.1 국제 네트워크 구축 현황

분류	전문가명	소속기관	전문기관	지위
국외	Nele De Belie	Ghent University, Belgium	Magnel Laboratory	Professor
국외	Erik Schlangen	Delft University of Technology, Netherlands	Microlab	Professor
국외	John S. Popovics	University of illinois at Urbana-Champaign, USA	Newmark Civil Engineering Laboratory	Associate Professor
국외	F. Pacheco Torgal	University of Minho, Portugal	C-TAC Research Centre	FCT Investigator
국외	Christopher C.K. Leung	HKUST, Hong Kong	Dept. of Civil Engineering	Professor
국외	Tomoya Nishiwaki	Tohoku University, Japan	Dept. of Archiectural Engineering	Professor
국외	Xian Feng Wang	Shenzhen University, China	Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering	Professor
국외	Khanh Son Nguyen	Ho Chi Minh City University of Technology(HCMUT), Vietnam	Faculty of Materials Engineering Laboratory	Associate Professor

(4) 연구개발 단계

- 본 연구개발의 기술 수준 및 단계는 다음과 같음.
- 본 연구개발의 2단계 자기치유 실용화 계획은 자기치유 콘크리트, PC용 콘크리트 실용화 기술 및 자기치유 보수재 실용화 기술을 핵심성과로 계획하고 있으며, 자기치유 콘크리트 활용 기술 개발에 대한 실증시험을 통하여 종합적인 검증안을 수립하고 있음.





라. 연구개발의 세부내용 및 범위

(1) 1차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(한국건설생활환경시험연구원) : [1-1-1] 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재료 기술 개발
- 공동연구기관(중앙대학교 산학협력단) : [1-1-2] 스마트 폴리머 활용 균열 자기치유 기술 개발
- 공동연구기관(㈜ 인트켐) : [1-1-3] 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
1세부 -협동- KCL	자기치유 무기바인더 특성분석	• 기초물성 평가(입도, 화학성분, 밀도 등) • 미반응 클링커의 지속적 수화반응에 의한 자기치유 특성분석 • 시멘트 대체재료 (SCM)에 의한 자기치유 특성분석 • 자기치유 무기바인더 결정질 석출에 의한 치유 특성분석
	자기치유 수화생성물 종류 및 생성조건 분석	• 자기치유 수화생성물 분석 - 결정질과 겔 타입 특성분석 (SEM, EDS, XRD, TG-DTA) • 침상형과 판상형의 수화생성물 분석 및 생성조건 분석 (Portlandite, Ettringite 등) • 수화생성물에 따른 자기치유 특성 분석 - Water flow test 등
	무기바인더 자기치유 메커니즘 분석	• 기존 OPC, SCM의 Further hydration 메커니즘 분석 • 자기치유 메커니즘 문헌분석 (화학양론적, Thermo-dynamic model 등)
1세부 -공동- 중앙대	스마트 폴리머 요구성능 도출	• 스마트 폴리머활용 자기치유 메커니즘 문헌 분석 - 반응 메커니즘, 치유 가능 균열폭, 치유 속도, 단기/장기 성능 • 균열 자기치유를 위한 스마트 폴리머 요구성능 도출 - 물리적 특성(형상, swelling ratio, sorption capacity, particle size distribution) - 화학적 특성(자기치유생성물 seed 역할 및 추가 반응성) - 환경 조건(양생조건, pH level, 상대습도)
	스마트 폴리머 기초 특성 평가	• 팽윤도 차이별 스마트 폴리머 제조 - chain의 화학구조 변화 및 가교도 변화 조사 • 제조 방법별 물리/화학적 특성 분석 • 환경 조건별 물리/화학적 특성 분석 • 상용 제품 성능 분석
1세부 -공동- 인트켐	자기치유 소재 기초물성 분석	• 유무기 자기치유 소재간 영향성 평가 • 자기치유 반응 소재 성분에 따른 유무기 반응 특성 분석 검토 • 유무기 하이브리드 자기치유 유기결정화 생성물 분석 • 유무기 하이브리드 자기치유 무기반응생성물 분석 • SEM, XRD 등 성능 특성분석

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 인트켐	자기치유 소재 흡수 특성 분석	• 자기치유 소재에 대한 팽윤 및 팽창특성 분석 • 수분 흡수제어를 통한 팽창 및 팽윤특성 제어 기술개발 • 팽윤 및 팽창특성에 따른 물리특성 영향 검토
	칼슘이온 용출 제어 특성 분석	• 유무기 칼슘이온 함유 소재간 칼슘이온 반응특성 검토 • 유기 칼슘이온 함유 소재별 특성 및 이온용출 영향성 평가 • 유기칼슘 소재별 이온용출속도 해석 및 제어인자 분석 • 칼슘이온 용출 특성별 pH에 대한 영향 분석

(2) 2차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(한국건설생활환경시험연구원) : [1-1-1] 무기계 자기치유 요소 기술 개발
- 공동연구기관(중앙대학교 산학협력단) : [1-1-2] 자기응답형 스마트 폴리머 활용 요소 기술 개발
- 공동연구기관(㈜ 인트켐) : [1-1-3] 유무기 하이브리드 자기치유 소재 반응제어 처리기술 개발
- 공동연구기관(고려대학교 산학협력단) : [1-2-1] 생체광물형성 박테리아 선정 및 담체화 생존율 향상
- 공동연구기관(경기대학교 신흑협력단) : [1-2-2] 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아 분리동정 및 흡착 기술
- 공동연구기관(세명대학교 산학협력단) : [1-3-1] 시멘트 복합재료용 자기치유 소재 및 요소 기술 개발
- 공동연구기관(연세대학교 원주산학협력단) : [1-3-2] 환경인자 대응 반응특성 및 안정성을 가지는 치유물질의 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
1세부 -협동- KCL	무기바인더 수화모델링 정립	• OPC, 고로슬래그 미분말, 플라이애시의 수화 반응 모델링 • 재령에 따른 미반응 입자 정량적 모델링
	자기치유 무기바인더에 의한 자기치유 메커니즘 정립	• 무기바인더 종류 및 배합에 따른 균열면 Further hydration 분석 • 무기바인더에 따른 균열 자기치유 생성물 석출 환경조건 도출 – Dry/wet condition, 이온 농도 등 – 자기치유 생성물 정량분석(TG-DTA, XRD 등)
	자기치유 시멘트계 무기바인더 활용 균열 자기치유 배합 개발	• 자기치유 생성물에 따른 자기치유 배합(안) 도출 – 균열폭 0.2 mm 치유 기술 확보 • 무기바인더의 자기치유 성능 평가 – 미반응 바인더 및 환경조건에 대한 영향 (양생조건, 습도 등) – 흡수율 실험, Water flow test 등

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 중앙대	자기응답형 스마트 폴리머 확보기술	• pH 응답형 스마트 폴리머 선정 - high/low pH level 응답형, 추가 반응성 • 이온 응답형 스마트 폴리머 선정 - 팽윤도 및 흡수능력, 추가 반응성
	스마트 폴리머 활용 균열 자기치유 배합 기술	• 페이스트/모르타르 기초 배합 도출 - 스마트 폴리머 종류, 양 - 투수시험 • 자기치유 생성물 분석 - SEM/EDS/XRF/Micro-CT, 광학현미경 • 스마트 폴리머의 자기치유 성능 분석 - 스마트 폴리머의 종류에 따른 자기치유 영향 - 균열폭에 따른 자기치유 영향 - 시멘트 매트릭스와 스마트 폴리머의 상호작용 분석
1세부 -공동- 인트켐	유무기 자기치유 소재 메커니즘 해석	• 유무기 하이브리드 자기치유 메커니즘 규명 및 미세구조변화 해석 • 유기칼슘계 이온화제에 따른 자기치유 형성 미세구조 분석 • 유무기 자기치유 소재와 자기치유 성능간의 상호관계 분석
	유무기 자기치유 소재 물리화학적 처리기술 확보	• 알칼리 조건하에서 자기치유 소재의 용출 결정화 특성 분석 • 알칼리 조건하에서 자기치유 소재의 수화반응성과의 영향관계 분석 • 유무기 하이브리드 자기치유 소재 반응성 향상 기술 - 입도제어 기술 확보(분급, 분쇄 등)
1세부 -공동- 고려대	생체광물형성 박테리아 선정	• 콘크리트에 적용 가능한 생체광물형성 박테리아 조건 검토 • 생체광물형성 박테리아 확보 - 고염, 알칼리 조건에서의 생체광물형성 검증 - Non-ureolytic 생체광물형성 검증
	담체화 된 박테리아의 생존율 향상 기술	• 박테리아 및 포자의 담체화 안정성 확인 • 담체화 후 온도, 습도, pH에 의한 박테리아 생존율 평가 • 담체의 크기 조절 기술 확보
	생균 혼입 모르타르 성능 평가	• 영양소에 의한 모르타르 물성변화 평가 - 유동성능, 압축강도 평가 • 생체광물형성 박테리아 (생균) 혼입 모르타르 성능 평가 - 유동성능, 압축강도 평가

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 경기대	자료조사 및 분석	• 하수관거 균열 보수 및 보강에 대한 국내·외 기술 분석 • 균열 보수재 기술 수준 분석 및 품질분석 • 박테리아 배양 및 글라이코 캘릭스 막 형성 기술수준 분석 • 하수관거 환경에서 생장이 가능한 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 계통수(Phylogenetic tree)분석 • 박테리아 흡착을 위한 재료들의 특성 분석
	최적의 박테리아 분리 및 증식 기술 제시	• 하수관거 환경 및 콘크리트 내화학성에 적합한 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리 및 동정 • 박테리아의 최적 배양조건 평가 • 고효율 균주 스크린 방법 제시
	최적의 자가영양 박테리아 흡착 기술 개발	• 박테리아 및 유기영양분(배지)의 최적 흡착을 위한 흡착재료 선정 • 박테리아 및 유기영양분의 흡착 균일성을 갖는 흡착 기술 개발
1세부 -공동- 세명대	시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기반기술	• 문헌 조사 및 분석 – 캡슐 활용 자기치유 반응 매커니즘 정립 – 시멘트 복합재료 혼합용 자기치유 캡슐의 요구성능 도출 • 시멘트 복합재료용 자기치유 캡슐의 제조 특성 평가 – 코어 선정 및 품질 특성 – 쉘 선정 및 품질 특성 – 촉매 선정 및 품질 특성
	시멘트 복합재료용 캡슐 분산기술	• 시멘트 복합재료용 캡슐 분산성능 평가 – 시멘트 복합재료내 캡슐 분산 특성 – 캡슐 분산 제어용 화학 혼화제 제조
1세부 -공동- 연세대	치유물질의 선정, 반응특성 조사, 반응 생성물 특성 연구	• 치유(코어) 물질 분자 설계 및 선정 – 암소 및 저온에서도 중합 가능한 일성 또는 이성분계 치유물질 선정 • 치유물질의 치유 반응특성 조사 – 화학구조/외형/상태/물성 변화 조사 : NMR, IR, GPC, UV-Vis, 광학현미경, 점탄성 측정기를 사용하여 조사 • 치유물질의 치유 반응 생성물의 기계적 자극에 따른 특성 변화 조사 – 효과적인 균열 폭 탄력 대응이 가능한 점탄성 물질 특성 조사
	외부 환경에 따른 치유 반응특성 및 치유물질 안정성 연구	• 외부 환경에 따른 치유 반응 조사 – 습도, 온도 등에 따른 영향 조사. 특히 겨울철의 낮은 습도 및 온도 고려 • 환경 인자(햇빛, 습기, 대기온도)에 대한 치유 생성물의 안정성 평가 • 코어 물질의 마이크로캡슐화 예비 실험

(3) 3차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(한국건설생활환경시험연구원) : [1-1-1] 무기계 균열 자기치유 성능 최적화
- 공동연구기관(중앙대학교 산학협력단) : [1-1-2] 스마트 폴리머 활용 자기치유 기술 개발
- 공동연구기관(㈜ 인트켐) : [1-1-3] 유무기 하이브리드 자기치유 소재 제조 기반 기술 개발
- 공동연구기관(고려대학교 산학협력단) : [1-2-1] 다종 박테리아 혼합 배양기술 및 담체 조건 최적화
- 공동연구기관(경기대학교 신힉협력단) : [1-2-2] 생체모방형 코팅재 구성 요소 기술 개발
- 공동연구기관(세명대학교 산학협력단) : [1-3-1] 캡슐 활용 자기치유 시멘트 복합재료의 성능 평가
- 공동연구기관(연세대학교 원주산학협력단) : [1-3-2] 치유물질의 캡슐화 및 캡슐특성 제어 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
1세부 -협동- KCL	균열면 자기치유 모델링	• 균열면 자기치유 수치해석 모델링 – 균열면 및 내부 미반응 무기바인더 정량화 – 미반응 무기바인더의 용해 및 이온이송모델 정립 – 균열면 공극수 화학적 모델링
	균열 제어성능 향상을 위한 무기계 바인더 개발	• 균열 충진 및 가교성능 향상 기술 – 결정 촉진제, 치유 촉진 바인더 개발 • 침상형 결정 촉진기술 개발 – 판상형(calcite 등)/침상형(ettringite 등) 구성 제어 기술
	자기치유 성능기반 무기계 바인더 배합 기술	• 균열 치유 폭에 따른 무기계 자기치유 바인더 배합설계 기술 – 자기치유 성능 평가(투수성, 균열 충진, 내구성 회복 등) – 균열폭 0.3 mm 치유 기술 확보 • 균열 치유 속도에 따른 무기계 자기치유 바인더 배합설계 기술 – 자기치유 성능 평가(투수성, 균열 충진, 내구성 회복 등)
1세부 -공동- 중앙대	급속 자기치유 콘크리트 배합 기술	• 스마트 폴리머 함량에 따른 급속 자기치유 속도 분석 • 유입수 종류에 따른 급속 자기치유 성능 • 스마트 폴리머 종류에 따른 급속 자기치유 성능 (균열폭 0.1~0.4 mm) • 균열면 정성/정량 분석 – 투수실험, SEM/EDS/XRF/Micro-CT, 광학현미경 • 유동성능 및 강도 • 초단기 균열 자기치유 성능 향상을 위한 최적배합 도출
	스마트 폴리머 활용 급속 자기치유 메커니즘 정립	• 자기치유반응에 대한 물리/화학적 메커니즘 도출 • 환경조건에 따른 급속 자기치유 성능 도출 (주변 습도 및 유입수 종류) • 스마트 폴리머 자기치유 메커니즘 분석

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 중앙대	자기치유 성능향상 기술	• 주변 습도에 따른 장기 자기치유 성능 • 균열폭에 따른 장기 자기치유 성능 (균열폭 0.1~0.4 mm) • 자기치유 생성물 정성/정량 분석 – 미세구조, 형상, 화학성분
1세부 -공동- 인트켐	유무기 자기치유 소재 제조기반 기술 확보	• 하이브리드 자기치유 소재 조성물 선정 – 소요 치유기간 단축(28일→14일) – 치유생성물 분석 및 치유 메커니즘 정립 • 하이브리드 치유 소재를 사용한 시멘트 복합체 물성 평가 – 유동성, 수화반응, 응결 – 강도, 수축 특성(자기 및 건조), 탄산화
1세부 -공동- 고려대	박테리아 혼합 배양기술	• 생체광물형성 박테리아 2종 이상 혼합 배양 – 혼합 배양에 적합한 생체광물형성 박테리아 선정 – 생존률 향상 기법 확립 • 칼슘 혼합 유기염 첨가 배양 복합 배지 개발 • 대량 배양을 위한 배지 조성 – 2리터 및 20리터 배양기 규모의 배양 기법 확립 • 대량 배양 후 박테리아 분리 기법 확립
	박테리아 담체 고정 조건 최적화	• 모르타르 담체 최적화 – 모르타르 혼입에 최적 담체 형상 결정 • 담체 보조제 비율에 따른 박테리아 고정화 평가 (생존율) – 고정화된 포자의 생리적 물리적 특성 평가 (pH 적응도, 요소분해능, 생존율, 생존 조건 등)
	포자 및 기본 담체 혼입 모르타르 성능 평가	• 생체광물형성 박테리아 (포자) 혼입 모르타르 성능 평가 – 유동성능, 압축강도 평가 • 담체의 형상 및 혼입율에 따른 모르타르 성능 평가 – 유동성능, 압축강도 평가 / 안정성(수축 특성) 평가
1세부 -공동- 경기대	박테리아 생장환경 조성을 고려한 pH 8~10 수준의 결합재 개발	• 마그네시아 인산염 복합체의 구성재료와 비율의 결정 • 마그네시아 인산염 복합체의 응결시간, 강도발현 및 pH 평가
	박테리아 그룹의 내황산 및 H_2S 차단 메커니즘 제시	• 글라이코 캘릭스 막의 구성성분 분석 • 박테리아의 글라이코 캘릭스 막 형성을 위한 최적조건 평가 • 글라이코 캘릭스 막의 H_2S 차단 효과 분석
	코팅재 최적 배합 제시	• 자가영양 박테리아 흡착재의 비율에 따른 코팅재의 압축강도 및 부착강도 특성 평가 • 자가영양 박테리아 흡착재의 비율에 따른 코팅재의 응결특성 및 수화발열 특성 평가 • 잔골재 혼입에 따른 자가영양 박테리아 코팅재의 압축강도, 휨 강도 및 부착강도 특성 평가

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 세명대	자기치유 캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 기술	• 자기치유 캡슐 활용 시멘트 복합재료의 제조 특성 - 캡슐의 종류, 혼합량, 분산 특성, 소요 작업성 등 • 자기치유 캡슐 활용 시멘트 복합재료의 품질 특성 - 시멘트 복합재료의 유동성능 (점성, 슬럼프) - 시멘트 복합재료의 역학성능 (목표 강도 및 강도 손실률)
	자기치유 캡슐 활용 시멘트 복합재료 성능 향상 기술	• 시멘트 복합재료용 자기치유 캡슐의 자기치유 성능 - 환경 조건에 따른 자기치유 성능 도출 - 자기치유 반응에 따른 물리/화학적 특성 검토 및 메커니즘 도출 - 자기치유 생성물과 시멘트 복합재료의 상호작용 분석 • 자기치유 캡슐 활용 시멘트 복합재료의 자기치유 특성 - 균열치유 성능 및 효율
1세부 -공동- 연세대	캡슐화 방법 선정(관련 성분 선정 포함) 및 캡슐특성 연구	• 캡슐화 방법 및 관련 성분 선정 - 계면중합법/in-situ법, 계면활성제, 캡슐막 구성물질 선정 • 제조된 캡슐의 특성 조사 - 화학 구조 확인, 평균 직경/직경 분포/외형/표면 형상/캡슐막 두께 등 확인 - 코어 물질 함량 및 보관안정성 조사
	캡슐화 최적 조건 탐색 및 scale-up 기술 연구	• 캡슐화 최적 조건 탐색 - 계면활성제의 농도, 캡슐막 구성 물질 종류, 온도, 시간, pH, 교반 속도 등 탐색 • 실험실 규모의 대량 제조(scale-up) 기술 개발 - 효과적인 자기치유가 가능한 캡슐 평균 직경/직경 분포 등과 보관 안정성을 고려
	캡슐 배합 기술 연구	• 배합시 캡슐의 안정성 최대화 기술 연구

(4) 4차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관 (한국건설생활환경시험연구원) : [1-1-1] 무기계 성능맞춤형 균열 제어 복합 자기치유 기술 개발
- 공동연구기관 (중앙대학교 산학협력단) : [1-1-2] 스마트 폴리머 장기 자기치유 기술 개발
- 공동연구기관 (㈜ 인트켐) : [1-1-3] 유무기 하이브리드 자기치유 소재 제조 기술 개발
- 공동연구기관 (고려대학교 산학협력단) : [1-2-1] 모르타르 내 박테리아 생존율 평가 및 생존율 향상 기술 개발
- 공동연구기관 (경기대학교 신학협력단) : [1-2-2] 코팅재 내 박테리아의 생장성 및 코팅 콘크리트의 내구성능 평가
- 공동연구기관 (세명대학교 산학협력단) : [1-3-1] 캡슐 활용 자기치유 시멘트 복합재료의 성능 최적화
- 공동연구기관 (연세대학교 원주산학협력단) : [1-3-2] 자기치유 코팅재 제조 및 균열 폭 대응 자기치유 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
1세부 -협동- KCL	자기치유를 위한 균열면 환경 제어 기술	• 균열 면 추가수화반응 속도제어 기술 개발 – 수화반응 속도 영향인자(pH, 이온농도, 수분, 온도 등) 도출 – 무기혼합재에 따른 추가수화반응 제어 속도 분석 • 균열면 추가수화반응 모델링을 통한 자기치유 성능 예측 – 균열면 자기치유 경계조건 및 초기조건 결정 – 열역학적 모델링을 통한 균열 발생 시기에 따른 균열 충진률 평가
	무기계 자기치유 시멘트 복합체 성능 평가	• 무기혼합재 활용 자기치유 시멘트 복합체 성능 평가 – 유동성능, 압축강도 평가 – 자기치유 성능 평가 (투수성능, 균열 충진 등) • Mock-up 시험에 의한 자기치유 성능 평가 및 분석
	복합소재 활용 균열 자기치유 성능 향상 기술	• 기능성 폴리머(Fiber 등) 첨가에 따른 자기치유 특성 분석 – 폴리머 첨가량에 따른 자기치유 특성 분석 (투수성능, 균열 충진 등) – 자기치유 성능 향상을 위한 무기바인더 및 적정 혼입률 도출 • 복합 소재 활용 자기치유 매커니즘 정립 – 기능성 폴리머 첨가에 따른 균열 제어 성능 분석 – 수분 방출에 의한 추가 수화반응 및 결정생성물의 seeding 효과 분석
1세부 -공동- 중앙대	스마트 폴리머 균열 자기치유 성능 향상 기술	• 스마트 폴리머 활용 시멘트 복합체의 자기치유 성능 분석 – 급속 및 장기 균열 자기치유 성능 평가 • 스마트 폴리머 장기 자기치유 메커니즘 분석 – 내부양생 효과에 의한 추가 반응성(Further hydration) 검토
	장기 자기치유 성능 분석	• 스마트 폴리머 반복 팽윤 거동 특성 분석 – 시멘트계 재료 내에서의 거동 변화 / 히스테리시스 손실 • 습윤/건조 반복 조건에 따른 장기 자기치유 성능 분석 • 스마트 폴리머 입도 및 함량에 따른 장기 자기치유 성능 분석
1세부 -공동- 인트켐	유무기 하이브리드 자기치유 소재 활용 배합 개발	• 하이브리드 치유 소재의 치유 특성 규명 – W/B, 양생온도(저온 및 고온), 균열 도입 시기에 따른 영향 – 치유 소재 사용량과 소요 치유기간 관계 도출 • 하이브리드 치유 소재 활용 최적 배합 개발 • Mock-up 시험에 의한 자기치유 평가 및 분석
	유무기 하이브리드 자기치유 소재 대량 생산 기술	• 자기치유 소재 시제품 생산 및 치유성능 평가 – 양산화 설비활용 치유소재 생산 – 생산된 자기치유 소재 활용 시멘트 복합체 성능 평가 (유동성능, 압축강도, 투수성능)

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 고려대	모르타르 내 박테리아 생존율 평가 기법 정립	• 생체광물형성 박테리아의 모르타르 내 생존율 평가 기법 제안 – 모르타르 내 미생물 군집 분석 – 박테리아 활용 모르타르의 치유 성능 평가 결과와 비교 분석 • 모르타르 내 치유생성물 분석 – 생체광물 형태적 특징 평가 (calcite, vaterite, aragonite, Mg-ACC)
	박테리아 생리적 특성 평가 및 생존율 향상 기술	• 담체 내 다종 박테리아 생존율 정량 기술 정립 – 담체 내 생체광물형성 특성 평가 – 담체 내 다종 박테리아 요소분해능 측정 • 시간 경과에 따른 담체 내 박테리아 생존율 분석 – 고정화된 포자의 생리적 특성 평가 (pH 적응도, 요소분해능, 생존율, 생존 조건 등)
	박테리아 활용 시멘트 복합체 배합 개발	• 담체화 된 박테리아 혼입 시멘트 복합체 성능 평가 – 유동성능, 압축강도 평가 / 자기치유 성능 평가 (투수성능) • 박테리아 활용 시멘트 복합체 최적 배합 도출 (박테리아 혼입량)
1세부 -공동- 경기대	제시된 코팅재에서 박테리아의 생장성 평가	• 최적 배양 조건 및 생산 조건 확립을 위한 회분식 연구 • 최적 코팅 조건 확립 • 경화된 코팅재에서 박테리아의 활동성 및 생장율 평가 • 코팅재에서 박테리아의 글라이코 캘릭스 막 형성에 대한 지속성 평가 • 코팅재의 황산용액 침지 후 박테리아의 활동성 및 생장율 평가
	코팅재 자체의 황산저항성 평가 (3차년도 연속)	• 황산침지에 따른 코팅재의 압축강도, 질량 및 외관 변화 • 황산염 침투 저항성 평가 • 무기영양염류 제거 효율 평가
	코팅재 적용 콘크리트 구조체의 내구성 평가	• 코팅된 콘크리트의 압축강도, 질량 및 외관 변화 • 동결융해 / 탄산화 / 염소이온 확산계수 / 황산염 침투 저항성 평가 • 콘크리트의 깊이별 수화생성물 변화 평가
1세부 -공동- 세명대	고상캡슐 활용 시멘트 복합재료의 치유성능 최적화 및 대량 제조 기술	• 고상캡슐의 치유 성능 최적화 – 고상캡슐의 반응성 개선을 통한 치유 성능 향상 – 고상캡슐 활용 시멘트 복합체 치유 성능 평가 (투수성능) • 고상캡슐의 대량 제조 기술 확보 – 캡슐 대량 제조 설비(파일럿) 제작 · 구축 • 실험실 수준 Mock-up 시험을 통한 자기치유 성능 평가
	마이크로캡슐 활용 시멘트 복합재료의 제조 기술	• 마이크로캡슐 특성 조절 기술 및 배합 안정성 확보 – 캡슐의 직경, 캡슐막의 두께, 혼합량 및 손실량 검토 • 마이크로캡슐 활용 시멘트 복합재료의 특성 평가 – 유동성능, 압축강도 평가 / 자기치유 성능 평가 (투수성능)

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 연세대	자기치유 코팅재 제조 기술	• 캡슐 함유 코팅재 조성물 제조 및 도포 기술 개발 - 코팅재 선정, 캡슐 분산 기술 - 조성물 도포 기술/부착 강도 향상 기술 개발
	자기치유 성능 평가 및 균열 폭 대응 자기치유 기술	• 자기치유 코팅재 시험 평가 및 개선 - 콘크리트 자기치유 코팅재 제조 기술, 균열 발생 방법 등 탐색 - KS F 4936 시험을 통한 자기치유 코팅재 평가 및 개선 • 균열 폭 대응 자기치유 기술 연구 - 캡슐 평균 직경/직경 분포/ 밀도의 영향 연구 • 자기치유 성능 평가 - 1차 치유 성능 평가 및 반복 진동 인가시 균열 폭 탄력 대응 기능

(5) 5차년도

① 개발 목표

- 협동연구기관(한국건설생활환경시험연구원) : [1-1-1] 무기계 균열 자기치유 성능 예측
- 공동연구기관(중앙대학교 산학협력단) : [1-1-2] 스마트 폴리머 균열 자기치유 모델링
- 공동연구기관(㈜ 인트켐) : [1-1-3] 유무기 하이브리드 자기치유 콘크리트 응용 기술 개발
- 공동연구기관(고려대학교 산학협력단) : [1-2-1] 박테리아 담체 혼합 콘크리트 제조 기술 개발
- 공동연구기관(경기대학교 신학협력단) : [1-2-2] 자가영양 박테리아 활용 열화지연 코팅재 시공 기술 개발
- 공동연구기관(세명대학교 산학협력단) : [1-3-1] 캡슐 활용 자기치유 시멘트 복합재료의 활용기술 개발
- 공동연구기관(연세대학교 원주산학협력단) : [1-3-2] 자기치유 코팅재의 치유 효율 최적화

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
1세부 -협동- KCL	무기계 자기치유 콘크리트 장기 성능평가 및 구조물 적용 방안 검토	• 무기계 자기치유 콘크리트의 장기 자기치유 성능 검토 - 균열 발생 시기에 따른 치유 가능 균열 폭 분석 • 무기계 자기치유 배합의 현장 적용성 검토 - 대상 구조물에 따른 자기치유 콘크리트 기본 물성 평가 - Mock-up 실험을 통한 현장 조건에서의 자기치유 성능 검토 • Pilot plant 구축을 통한 무기계 자기치유 소재 생산 기반 확립 - 1톤 이상의 분체형 정밀 생산 기반 구축
	복합소재 활용 자기치유 콘크리트 최적 배합 기술	• 복합소재 활용 자기치유 콘크리트 최적 배합 도출 - 자기치유 성능 평가 (내구성 회복 등) - 기초물성 평가 (28일 압축강도비 및 유동성비)

구분	개발 내용	범 위
	무기계 자기치유 성능예측 수치해석 프로그램 개발	• 무기계 바인더의 자기치유 반응 모델링 • 균열 자기치유 수치해석 프로그램 개발 및 검증 – 균열 내 자기치유 simulation 및 균열 충진률 예측 등
1세부 –공동– 중앙대	유사환경 대응 스마트 폴리머 균열 자기치유 성능 최적화	• 스마트 폴리머 활용 자기치유 모르타르 성능 평가 – 급속 및 장기 균열 자기치유 성능 • 스마트 폴리머 자기치유 배합 최적화 및 현장 적용성 검토 – 기초 물성 평가 (28일 압축강도, 자기수축 등) – Mock-up 실험 통한 유사환경에서의 자기치유 성능 검토
1세부 –공동– 중앙대	스마트 폴리머 균열 자기치유 모델링	• 균열면에서 스마트 폴리머의 역할 정립 • 스마트 폴리머 혼입 시멘트계 재료의 급속 균열 자기치유 성능 예측 – 스마트 폴리머 입자 크기 및 함량에 따른 영향 – 스마트 폴리머와 시멘트 경화체간의 상호작용 • 실험을 통한 스마트 폴리머 균열 자기치유 모델링 검증
1세부 –공동– 인트켐	유무기 하이브리드 자기치유 소재 사용 콘크리트 적용기술 개발	• 하이브리드 소재 사용 콘크리트 배합설계 및 품질 검증 – 자기치유 콘크리트 최적배합 선정 – 치유성능 평가 및 물성 평가 (강도, 유동성 등) • 하이브리드 소재 활용 자기치유 콘크리트의 현장 적용성 평가 – 현장 Mock-up 시험체 제작 및 치유성능 평가
1세부 –공동– 고려대	생체광물형성 박테리아 활용 자기치유성능 정량화	• 생체광물박테리아 담체 고정률 및 결정 생성량 정량화 • 생체광물박테리아 활용 콘크리트 자기 치유량 정량화
	생체광물형성 박테리아 자기치유 대량 생산 기술 개발	• 생체광물형성박테리아 포자 배양 대량 생산 기술 확보 • 박테리아 담체 대량 제조 기술 확보 • 생체광물형성박테리아 활용 자기치유 콘크리트 배합 도출 – 치유성능 평가 및 물성 평가 (강도, 유동성 등)
1세부 –공동– 경기대	개발된 코팅재를 활용한 하수관거 코팅 시공기술 정립	• 코팅재의 플로우 및 응결시간에 따른 최적의 시공 공법 적용성 평가 • 최적 공법 적용 후의 코팅재에서 박테리아의 생장성 평가 • 균주 적용 전·후 생태계 미생물 군집 분석 조사 (NGS 분석 및 인체 유해성 평가)
	생체모방형 콘크리트 코팅재의 시작품 제시 및 실용화 기반 구축	• 코팅된 하수관거에서 코팅재의 보호 효과 평가 • 박테리아의 대량 생산 시스템 구축 및 경제성 평가 • 코팅재의 시공성 평가

구분	개발 내용	범 위
1세부 -공동- 세명대	고상캡슐 활용 시멘트 복합재료의 적용기술	• 고상캡슐 활용 시멘트 복합재료의 현장 적용성 평가 - 실험실 / 현장 Mock-up 시험체 제작 및 치유성능 평가 • 고상캡슐 활용 시멘트 보수재료 제조 기술 - 최적 배합(캡슐 혼입율) 도출 및 Premix형 시제품 제조
	마이크로캡슐 활용 시멘트 복합재료의 성능향상 기술	• 마이크로캡슐의 치유성능 최적화 - 코어재료의 반응성을 고려한 치유성능 평가 - 마이크로캡슐 활용 시멘트 복합체의 품질특성 평가 • 마이크로캡슐의 실험실 다량 제조기술 확보 - 캡슐 다량 제조 설비(파일럿) 제작 및 회당 생산량 평가
1세부 -공동- 연세대	환경 대응 자기치유 성능 및 이차적 균열 방지 기술 연구	• 다양한 환경조건(-20~35℃)에서의 자기치유 성능평가 • 일차 치유 부위의 이차적 균열 발생 방지기술 개발
	자기치유 코팅재 최적화 연구	• 균열 치유 후 자기 치유 코팅재 성능 회복 기술 개발 • 자기치유 코팅재 구성 물질(치유물질, 캡슐막, 코팅재 등) 최적화 • 코팅재의 자기치유 효율 최대화 - 캡슐의 평균 직경, 직경 분포, 캡슐막 두께, 캡슐의 밀도 등의 최적화 • 치유 효율 조사 및 최대화 - 내투수성, 탄산화 깊이, 염소이온 침투 저항성 등에 의한 평가 수행

2. 국내외 기술개발 현황

가. 기술개발 동향

(1) 자기치유 친환경 콘크리트

- 자기치유 콘크리트 기술은 균열을 스스로 치유하여 구조물의 내구 수명을 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술로 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 연구가 진행됨.

: 자기치유 콘크리트 기술은 1990년대에 개념이 정립되었고, 미국, 유럽, 일본 등에서는 2010년 이후로 자기치유 콘크리트 기술의 실용화를 목적으로 연구 프로젝트를 활발하게 진행하고 있음.

: 국내의 경우 2004년 이후 그 개념이 도입되어 자기치유 소재에 대한 기초 연구가 수행되었으며, 2015년 이후 자기치유 친환경 콘크리트 연구단에서 자기치유 기술을 콘크리트에 적용하기 위한 연구를 수행하고 있음.

- 미국, 유럽, 일본 등 선진국의 경우 자기치유 콘크리트의 기초기술에 대한 개발을 완료하였고, 실제 구조물에 적용하기 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며 자기치유 기술을 통한 제품 개발을 추진하고 있음.

: 유럽은 HealCON 및 SARCOS와 같은 대형 프로젝트를 통해 다양한 소재에 대한 자기치유 콘크리트 기술개발을 수행하여 박테리아를 활용한 기술을 제품화하였으며, 자기치유 콘크리트에 적용하기 위한 SAP 및 캡슐의 제작을 위한 파일럿 플랜트를 설치한 상태임.

: 미국의 경우 Engineered Living Materials (ELM) 프로젝트를 통해 단순히 균열을 치유하는 기술 수준을 넘어서 자기 보수/성장이 가능한 “살아있는 건설재료”을 목표로 하고 있음.

: 일본의 경우 유럽/미국과 같이 대형 프로젝트를 수행하고 있지는 않으나 동경대학교를 중심으로 자기치유 관련 프로젝트를 지속적으로 수행하고 있으며, 대부분 무기계 혼화재를 활용한 기술에 집중하여 자기치유 콘크리트 제품을 개발하여 현장에 적용한 바 있음.

- 국내의 경우 2015년 시작된 “자기치유 친환경 콘크리트 연구단”을 통해 자기치유 소재와 관련된 기초연구를 수행하였으며, 이를 콘크리트에 적용하기 위한 응용 연구를 수행하고 있음.

- 자기치유 콘크리트 기술은 사용되는 자기치유 소재에 따라 무기계 혼합재료 활용기술, 박테리아 활용 기술, 캡슐 활용, 기타 기술 등으로 구분하고 있으나 최근에는 한 가지 기술이 아닌 복합 소재를 활용한 하이브리드 기술 개발을 추진하고 있음.

: 자기치유 콘크리트는 사용하는 소재에 따라 자기치유 특성이 달라지는데 자기치유 성능을 향상시키기 위해 두 가지 이상의 소재를 복합적으로 활용하여 각각의 자기치유 소재의 단점을 극복하기 위한 하이브리드 자기치유 연구를 진행하고 있음.

(2) 무기계 혼합재료 활용 자기치유 콘크리트 기술

- 무기계 혼합재료 활용 자기치유 콘크리트는 주로 일본이 최고 기술 선도국으로 조사되었는데, 일본은 지난 10년간 약 20여개의 무기계 혼합재료 활용 자기치유 콘크리트 기술개발 연구를 수행하였으며, 2007년 동인도 철도회사에서 실제 터널공사에 시범 적용한 것으로 시작

으로 자기치유 보수재, 균열 주입제, PC 제품 등 다양한 분야에 적용하고 있음.

: 동경대학교 Kishi 교수 연구진은 일본에서 가장 활발하게 자기치유 콘크리트 기술 연구를 수행하고 있으며, 주로 팽창재(Expansive agent), 팽윤재(Geo-material), 결정촉진제 ($NaHCO_3$, Na_2CO_3, Li_2CO_3 등) 등의 무기질 혼합재료를 사용하여 균열 내부에 치유물질의 생성을 촉진하는 자기치유 기술에 관한 연구를 수행하고 있으며, 이를 통해 자기치유 보수재 등을 실용화함.

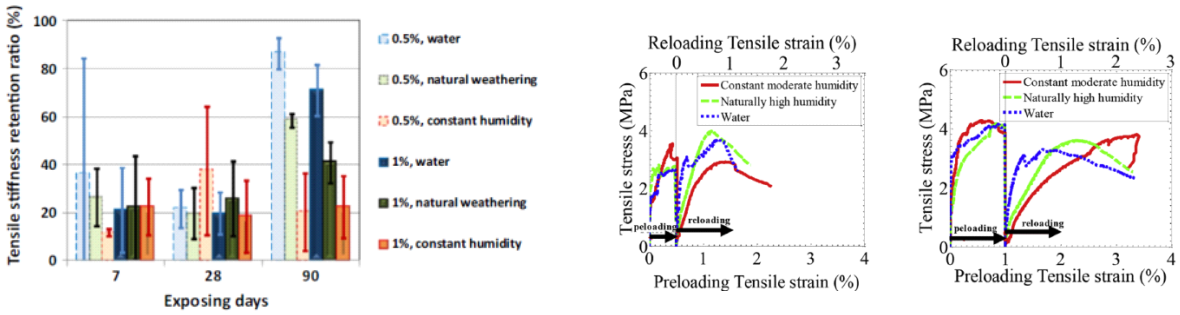
: 일본 토호쿠 대학의 니시와키 교수는 장기 재령 콘크리트의 자기치유 성능을 확보하기 위한 목적으로 자기치유 조성물의 조립화를 통해 균열 발생 전 자기치유 물질의 수화 반응을 억제하고 자기치유 물질을 장기 재령에도 보존하는 연구를 수행하였음.



그림 2.1 자기수복형 프리캐스트 콘크리트 말뚝 ((주)이케나가 시멘트 공업소)

- PVA 섬유 보강 콘크리트에 무기계 혼합재료 활용한 자기치유 연구가 수행되고 있는데, 아울러 자기치유에 의한 역학적 성능(강도, 강성)과 같은 회복 및 반복적인 균열 생성에 대한 자기치유 성능평가도 이루어지고 있음.

: PVA 섬유를 활용한 무기계 혼합재료 자기치유 콘크리트 기술은 Michigan 대학의 Li 교수팀의 섬유보강 콘크리트(ECC) 연구에서 포졸란 반응에 의한 미세균열 치유 성능을 확인함.



(a) 자기치유에 의한 Stiffness 회복률 평가 (b) 자기치유에 따른 인장 성능 향상 분석

그림 2.2 자기치유에 의한 ECC의 역학적 성능 변화 분석

- 국내의 경우에는 한국건설생활환경시험연구원을 중심으로 무기계 혼합재료를 활용한 자기치유 콘크리트 기술 개발 연구가 수행되고 있으며, Supplementary Cementitious Materials (SCMs), Crystalline admixture, Swelling materials을 활용하여 자기치유 생성물의 형상을 제어하여 자기치유 성능을 향상시키는 연구를 수행하고 있음.

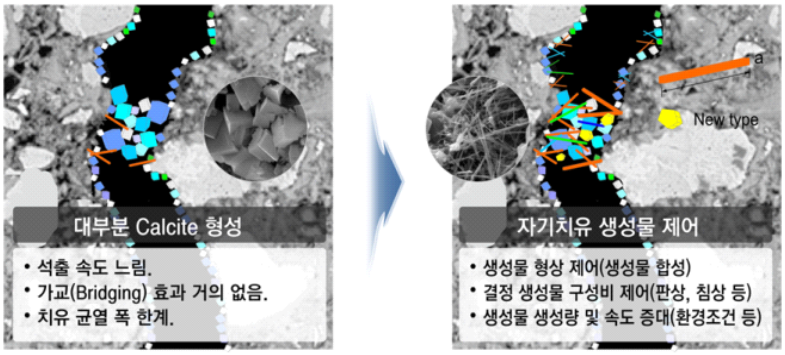


그림 2.3 자기치유 생성물의 형상 제어를 통한 자기치유 성능 향상 기술 (개념도)

(3) 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 기술

- 자기치유 콘크리트 기술과 관련하여 가장 활발하게 연구되고 있는 기술은 유럽의 HealCON 프로젝트에 참여한 네덜란드 Delft 공대의 Schlangen 교수와 Jonkers 교수 연구진과 벨기에 Ghent 대학의 Belie 교수 연구진이 선도하고 있음.
- 박테리아 활용 자기치유 기술은 자기치유에 활용될 수 있는 박테리아의 선정 및 배양 기술, 박테리아의 생존 및 영양소 공급을 위한 담체의 선정 및 담체화 기술, 콘크리트 적용 기술로 구분될 수 있음.

  : 박테리아를 자기치유 기술에 활용하기 위해서는 생체광물 작용을 통해 Calcite를 석출하여 균열을 치유할 수 있으면서 콘크리트 환경에서 생존 가능한 Alkali-resistant, Spore-forming Bacteria이 필요함.

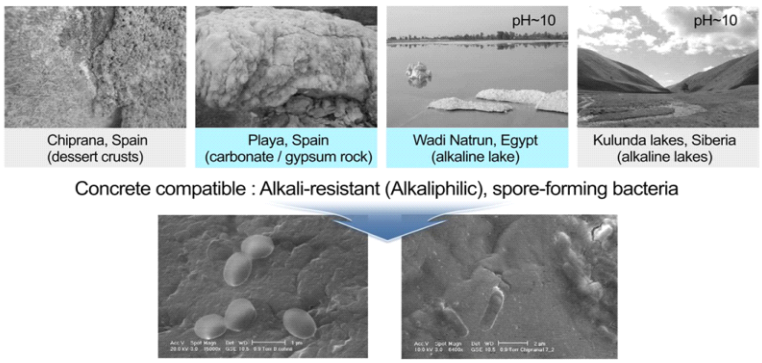


그림 2.4 Alkali-resistant, Spore-forming bacteria (Henk Jonkers et. al., TU Delft, 2014)

  : TU Delft에서는 박테리아 선정 이후 콘크리트에 적합한 담체에 대한 연구를 지속적으로 수행하였으며, 비용을 절감할 수 있으면서, 역학적 성능을 확보할 수 있는 담체화 기술을 개발하였음.

- 국내에서는 경북대학교 김화중교수 연구진과 고려대학교 박우준 교수 연구진, 경기대학교 양근혁 교수와 이상섭 교수 연구진을 중심으로 박테리아 활용 기술에 대한 연구가 수행되고 있으며, 원천 기술 확보를 위한 새로운 박테리아의 선정 및 배양 기술 개발 및 담체화 기술에 대한 연구를 수행하고 있음.

  : 경기대학교 양근혁 교수 연구진이 박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재를 개발하였으며, 개발한 기술을 활용하여 일본과 중국에 특허를 출원한 상태임.

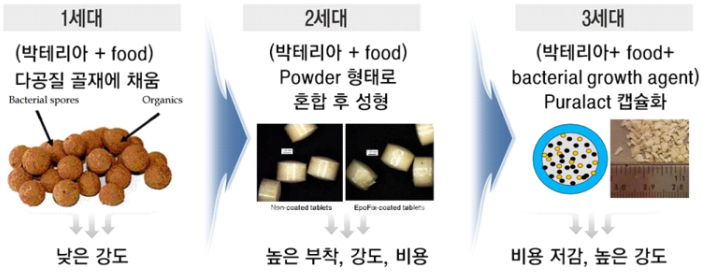


그림 2.5 Delft의 박테리아 담체화 연구 현황

(4) 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 기술

- 마이크로 캡슐을 활용한 기술은 Scott White 교수(미국 일리노이 대학)가 마이크로 캡슐을 이용한 폴리머 재료의 균열 자기치유 연구를 Nature 저널에 발표하면서 관심을 끌기 시작하였으며 최근에는 중국의 심천대학교를 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있음.

  : Biqin Dong은 마이크로캡슐 내의 Healing Materials을 균열 발생 시 효과적으로 배출시키기 위한 목적으로, pH값 변화에 따른 Healing Materials의 배출 속도 제어 연구를 수행함.

  : Kim Van Tittelboom은 균열 발생 위치에 캡슐이 설치된 자기치유 콘크리트 부재의 자기치유 성능을 X-ray 토모그래피, 형광주사 광학현미경 활용 이미지 분석 외관 관찰을 통해 검증하였음.

- 최근에는 콘크리트의 성능 저하를 방지하고, 지속적인 자기치유 성능을 확보하기 위한 목적으로 박테리아 및 무기계 혼합재료를 healing materials로 사용하는 복합 소재 활용 기술에 대한 연구에 대한 관심이 높아지고 있음.

  : Kanellopoulos는 구형의 물유리를 포함한 폴리머계 마이크로캡슐을 모르타르에 적용하는 연구를 수행하였으며, 캡슐 혼입에 따른 역학적 성능평가 및 초음파측정, 미세공극흡착 및 광학현미경 등을 활용하여 자기치유 성능을 평가하였음.

  : Qureshi은 healing materials로 물유리와 콜로이드 실리카 및 MgO 파우더를 활용하여 균열이 발생된 모르타르의 내구성을 크게 개선함.

- 국내의 경우 세명대학교의 최연왕 교수 연구진과 연세대학교 정찬문 교수 연구진을 중심으로 활발하게 캡슐활용 자기치유 연구를 수행하고 있음.

  : 세명대학교 최연왕 교수 연구진에서는 무기계 바인더를 활용한 고상 캡슐 제조 기술을 개발하였으며, 이를 골재로 활용한 자기치유 콘크리트 기술 개발 연구를 수행하고 있음.

  : 연세대학교 정찬문 교수 연구진에서 마이크로캡슐을 활용한 자기치유 콘크리트 기술 개발을 통해 폴리이미드 입자를 이용한 피커링 에멀젼 조성물 및 이의 제조 방법과 관련한 국제 특허를 출원하였음.

나. 기술동향 분석

(1) 연구논문 동향

① 소재별 논문 동향

- 2011년부터 현재까지 자기치유 콘크리트 기술에 관한 SCI급 논문은 총 215편으로 집계되며, 그 중에서 박테리아, 캡슐, 무기계 혼합재료를 활용한 기술은 전체 논문의 73%를 차지함.

  : 자기치유 소재별로는 박테리아 활용기술에 관한 논문이 30%로 가장 많지만, 캡슐 및 무기계 혼합재료를 활용한 기술도 각각 24%, 23%로 높은 비중을 차지하고 있음. 또한, 이를 제외한 자기치유 소재기술에 관한 논문은 25% 수준이며, 최근에 논문 수가 증가하고 있어 다양한 소재를 활용한 자기치유 콘크리트 연구가 진행되고 있음을 알 수 있음.

- 자기치유 연구단에서 발표된 자기치유기술과 직접 관련성이 높은 SCI급 논문은 총 35편이며, 이는 전 세계에서 발표된 자기치유 콘크리트 관련 SCI급 논문의 17% 수준으로 높은 비중을 차지함. 자기치유 소재별로는 무기계 혼화재료에 관한 연구논문이 14편으로 가장 많은 연구성과를 나타내었음.

  : 본 연구단은 자기치유 소재별 논문 성과에서 무기계 혼화재료에 관한 연구논문의 비중이 가장 높지만, 소재에 대한 타 분야의 융복합 기술이 요구되는 박테리아 및 캡슐과 관련된 자기치유에 관한 연구도 각 5편 이상의 논문 실적을 나타냄.

  : 자기치유 소재에 관한 논문 이외에도 자기치유 기초연구와 관련된 논문이 16편 발표되었고, 자기치유 연구단의 성과는 자기치유 콘크리트의 원천기술 확보와 기술 고도화로 구분됨.

표 2.1 자기치유 콘크리트 기술 관련 논문 현황 (2011~2019)

구분	Admixture	Bacteria	Capsule	ECC	etc.	총계
전세계 SCI급	51	59	47	31	27	215
자기치유연구단 SCI급	14	7	5	1	8	35

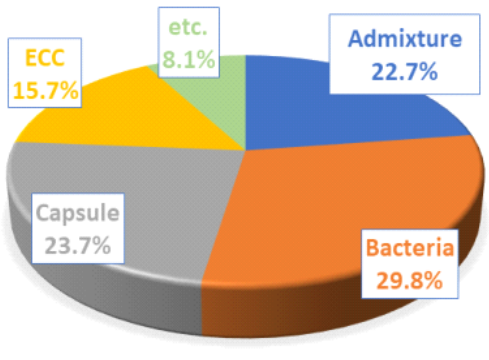


그림 2.6 자기치유 소재별 논문 구성비

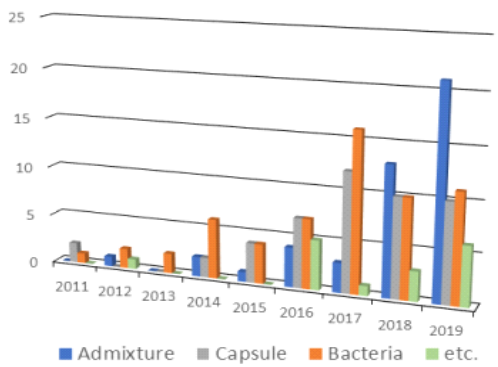


그림 2.7 자기치유 소재의 년도별 논문 수

② 평가방법에 따른 논문 동향

- 자기치유 콘크리트 기술은 대상 구조물 및 치유소재 등에 따라 적합한 평가방법을 사용하여

야 하는데, 연구자에 따라 고유의 규격이 있고, 치유 원리가 다르기 때문에 다양한 평가방법을 활용하여 성능을 입증하고 있으며, 대표적으로 투수시험, 역학적시험, 이미지조사방법이 주로 활용되고 있음.

: 과거에는 정량적인 분석이 가능한 역학적 시험방법을 주로 활용하였으나, 자기치유를 평가하는 방법이 점차 발전하여 최근에는 역학적 시험방법과 더불어 직관적이고 결과를 간편하게 도출할 수 있는 투수시험 및 이미지 조사방법도 많이 활용되고 있음.

: 자기치유 콘크리트의 기술이 고도화됨에 따라 평가방법도 다양하게 진화하고 있는데 2017년 이후에는 비파괴 평가 기법으로 초음파 시험(UT), 방사선 시험(RT), 공진시험 등 최신 기술을 도입한 평가방법이 활용되고 있음.

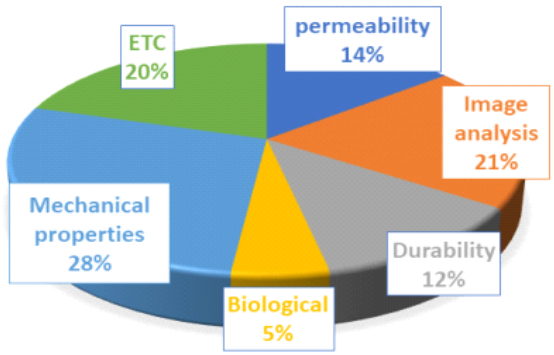


그림 2.8 자기치유 평가방법별 논문 구성비

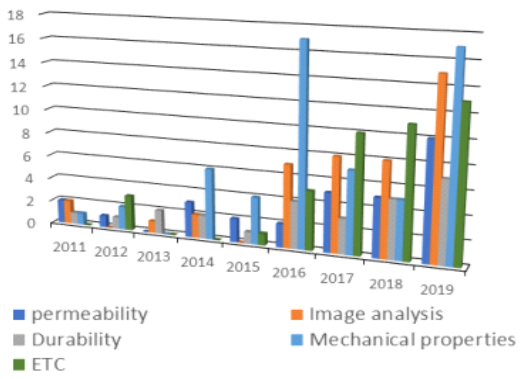


그림 2.9 평가방법에 관한 년도별 논문 수

③ 국가별 논문 동향

- 세계적으로도 자기치유 콘크리트 기술은 최근에 개발되기 시작하여 기술의 격차가 크지 않지만, 벨기에를 비롯한 유럽 각국에서 먼저 자기치유 콘크리트에 대한 관심을 갖고 연구를 진행하였으며, 이후 미국과 중국 등 여러 국가들도 유사한 시기에 연구를 진행하였으며, 한국도 2015년 자기치유 연구단이 출범하며 많은 연구성과를 나타내고 있음.
- 대륙별 자기치유 콘크리트 논문 건수를 비교하면 아시아권이 117건의 논문이 발표되어 가장 많은 연구성과를 나타내었고, 특히 이 중에서도 중국과 한국에서 발표한 논문이 79건으로 아시아권에서도 높은 비중을 차지하고 있음.

표 2.2 대륙별 연구논문 등록 현황

구분	Asia	Europe	America	Africa	계
연구논문 편수 (편)	117	71	26	1	215

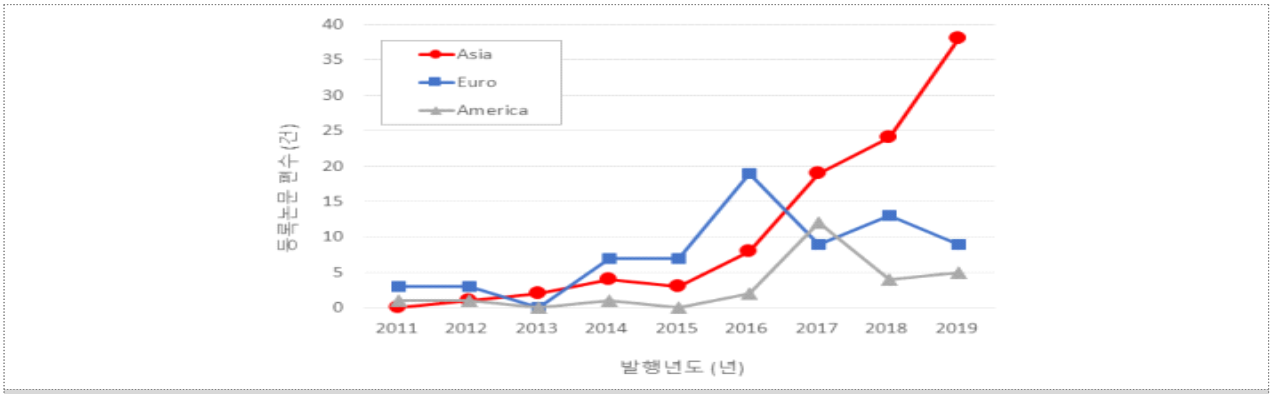


그림 2.10 년도별 각 대륙의 논문 수

- 벨기에, 중국, 한국 등을 제외한 유럽과 아시아권의 각국에서도 최근에 자기치유 콘크리트 논문이 증가되고 있어 세계 각국에서도 구조물의 유지관리 측면에서 자기치유 콘크리트 기술에 대한 관심은 계속적으로 지속될 전망임.
- 유럽과 미국 등은 후속 연구가 이어지지 못하여 최근에는 자기치유 콘크리트에 관한 연구성과가 감소하고 있는 추세임.

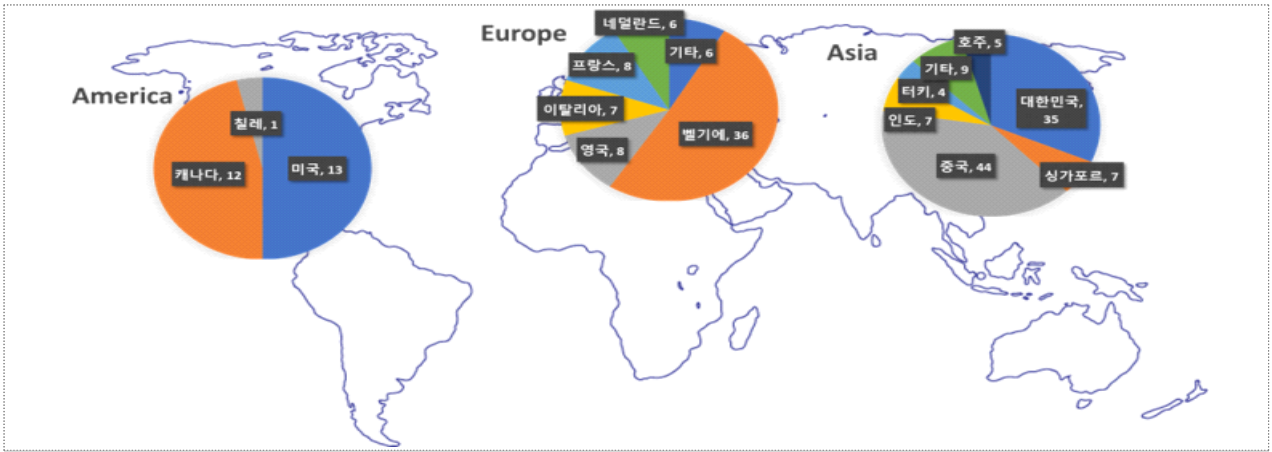


그림 2.11 대륙별 자기치유 콘크리트 기술 관련 논문 수

(2) 지적재산권

① 기술분야별 분류

- 2012년에서부터 2019년까지 전 세계에 등록된 특허는 119건이며, 이 중에서 자기치유 소재의 성능에 관한 특허는 98건, 자기치유 기술을 평가하는 방법에 대한 특허는 21건으로 주로 제품 판매를 목적으로 하는 자기치유의 소재 관련 특허가 높은 비중을 차지함.
- 자기치유 소재별로는 무기계 혼합재료에 관한 특허가 44.9%로 가장 많은 비중을 차지하였고, 캡슐과 박테리아에 관한 특허도 각각 27.6%, 19.4% 수준으로 나타나 실용화를 위한 특허기술로는 무기계 혼합재료, 캡슐, 박테리아 소재가 대부분을 차지하고 있음.
- 무기계 혼합재료, 캡슐, 박테리아를 제외한 자기치유 소재의 특허는 8.2%이며, 자기치유 기술에 다양한 소재를 활용하는 연구가 진행되고 있지만, 특허기술로 발전하지는 못하였음.

표 2.3 특허기술 관련 분류 (2012~2019)

구분	자기치유 소재에 관한 특허	자기치유 평가방법에 관한 특허	총계
등록특허	98	21	119

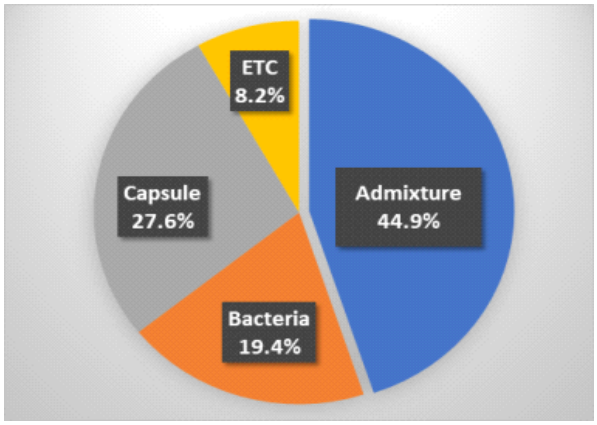


그림 2.12 자기치유 소재별 특허기술 구성

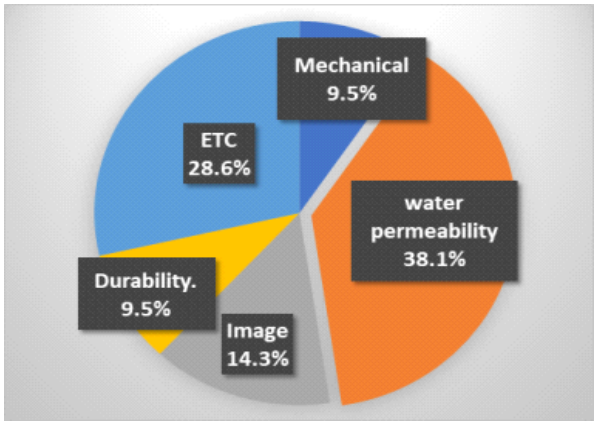


그림 2.13 자기치유 평가방법별 특허기술 구성

② 국가별 특허 현황

- 국가별로 보유하고 있는 자기치유 콘크리트 관련 특허를 비교하면 중국이 42건으로 가장 많고, 한국은 두 번째로 많은 특허를 보유하고 있으며, 아시아권에서 많은 특허를 보유함.
- 2012년 이후 자기치유 콘크리트 관련 특허는 점차 증가하고 있는 추세이며, 한국은 2014년 이후 특허 건수가 증가하여 2019년에는 한해에 11건의 등록특허를 보유하여 가장 많은 특허 기술을 취득함.
- 콘크리트 자기치유 기술분야에서 최근 5년간의 국가별 현재 영향력지수를 비교하면 중국의 CII는 6.18로 기술영향력이 가장 높은 것으로 나타났고, 한국의 CII는 2.48로 세 번째로 높은 기술영향력을 갖추고 있음.

  : 중국의 경우 거대한 내수시장에 미치는 영향이 반영되어 기술영향력지수가 높게 평가되고 있지만, 최근 국내에서 발명된 특허의 기술력은 세계적으로 인용수가 증가하여 높은 기술력을 인정 받고 있음.

표 2.4 국가별 자기치유 콘크리트 기술 관련 특허 수 (2012~2019)

구분	한국	중국	일본	미국	EU	총계
특허수	32	42	24	12	9	119

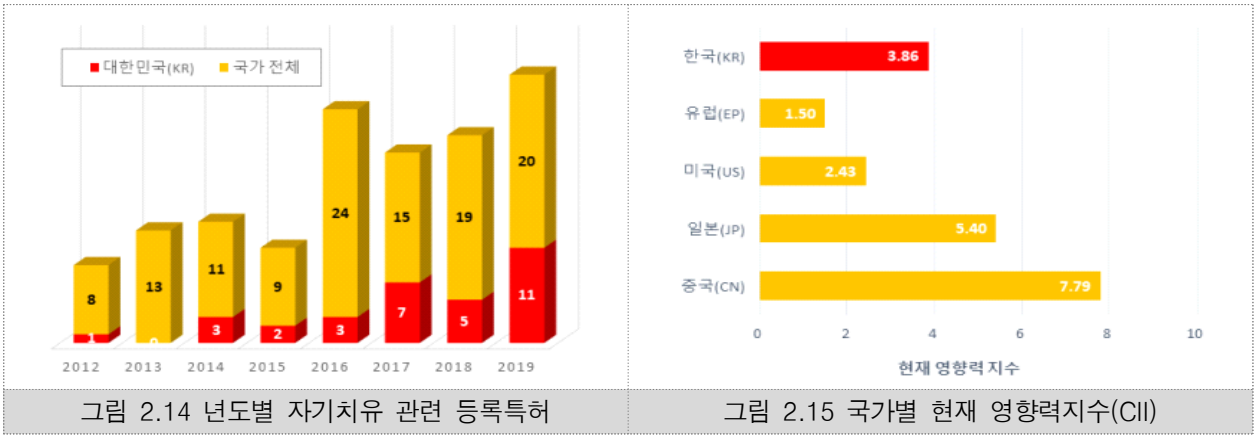


그림 2.14 년도별 자기치유 관련 등록특허

그림 2.15 국가별 현재 영향력지수(CII)

: 유럽 및 미국이 자기치유 콘크리트 관련 기술을 선점하였지만, 최근 5년간의 데이터로 분석한 기술영향력지수는 높지 않은 것으로 확인되었고, 일본의 경우에는 등록된 특허수는 한국보다 적지만 높은 기술영향력지수를 나타내어 최근 특허기술 활동이 활발했던 것을 확인함.

※ 현재 영향력지수(Current Impact Index, CII) : 최근 5년간 타 특허로부터 인용된 정도를 나타내는 지표로 특정 출원인의 기술력을 나타냄.

- 특허의 질적평가를 반영하는 기술력지수에서도 중국은 225.95로 가장 높았고, 한국은 108.00으로 최근 5년간 양국의 자기치유 콘크리트 기술이 상당히 발전되었음을 확인함.
- 시장확보지수는 특허가 영향을 미치는 범위를 의미하는데, 유럽은 특허의 PFS가 0.45로 특허를 활용할 수 있는 범위가 가장 넓은 반면, 한국은 0.02로 비교대상 국가 중에서 가장 낮음.

: 유럽국가의 시장확보지수가 높은 것은 패밀리 국가 선정 범위에서 적극적인 경향을 보였기 때문이며, PFS가 높은 유럽국가의 특허는 세계적으로 많은 영향을 미칠 수 있음.

: 중국 및 한국은 상당히 많은 수의 특허를 보유하였지만, 특허가 인정되는 국가가 적기 때문에 대외적인 영향력이 적고, 내수시장에 활용하는 용도로 사용될 수 있음.

※ 기술력지수(Technology strength, TS) : 특허의 영향력지수에 해당 특허등록 건수를 곱한 값으로 기술혁신 활동의 양적 규모와 실적 수준 모두를 나타내는 지표

※ 시장성확보지수(Patent family size, PFS) : 특정 기술분야에서 인정받는 권리를 나타내는 지표



그림 2.16 국가별 기술력지수(TS)

그림 2.17 국가별 시장확보지수 (PFS)

다. 시장 및 산업 현황

(1) 국내 시장 동향

- 국내 건설시장은 2030년까지 현재 규모를 유지하며 성숙기를 지속할 것으로 예측되나, 2020년 이후 국내 건설시장에서 주택 리모델링 및 재건축, 도시재생, 사회기반시설의 보수·보강 및 재·개축 등과 관련된 유지보수 수요가 급증할 것으로 전망됨.
- 시설물 안전 및 유지관리와 관련된 유지관리업 공공부문 유지관리 비용은 2007년 1조 3,207억원에서 2015년 2조 5,432억원으로 95% 상승하여, 8년간 연간 8.7%가 상승함.

  : 주요 선진국들의 경우 자국 건설시장에서 유지보수 시장의 비중이 대체적으로 40~50% 수준이나, 현재 우리나라는 20% 이하 수준으로 추정되며, 2020년 이후 동 비중의 증가가 예상됨.

  : 현재 약 14% 수준인 우리나라의 GDP 대비 건설투자 비중이 2020년에는 약 11%, 2030년에는 약 9% 수준으로 하락할 전망이며, 1인당 GDP가 3만 달러 이상인 주요 선진국들의 GDP 대비 건설투자 비중이 대체적으로 10% 내외임을 감안할 때 우리나라 건설시장 환경이 본격적으로 선진국 건설시장과 유사하게 변화될 것임을 시사함.

표 2.5 국내 건설투자의 중간기 변화 추이 전망 (출처 : 건설산업연구원)

구분	2020년	2025년	2030년
GDP 대비 건설투자 비중	11.0~11.5%	10.0~10.5%	7.2~9.7%
구분	**2013~2020년**	**2020~2030년**	
건설투자 연평균 증가율	0.8~1.5%	0.6~0.7%	

- 공공 시장은 예산상 한계로 인해 대규모 재·개축을 통한 성능 개선보다 소규모 보수·보강에 그칠 전망이며, 민간 시장은 도심 노후 아파트, 상업용 빌딩 등 사업성 확보가 가능한 건축물 중심으로 공공 시장에 비해 대규모 재·개축이 활성화될 전망임.

  : 20년 이상된 교통관련 SOC 분야(교량, 터널 등)의 유지관리 예산은 10~20년된 구조물에 비해 도로 관련 시설물은 2.5배, 철도 관련 시설물은 8~10배 수준으로 증가함에 따라 2030년 유지관련 예산은 현재 대비 3.5배로 증가가 전망됨.

  : 국토교통부 소관 시설물에 대한 안전 및 유지관리 예산(시설개량 포함)은 2009년 8,467억원에서 2015년 도로구조물 기능개선 사업 확대를 기점으로 2018년 2조 3,724억원으로 180% 수준 상승

- 2016년 말 기준 안전점검 또는 안전정밀진단 대상 국내 사회기반 시설물 현황은 다음과 같음.

  : '시설물의 안전관리에 관한 특별법'에 의해 관리되는 시설물의 개수는 78,499개로 이 중 시설물 안전등급 D, E급인 취약시설은 37개 정도로 파악되며, 향후 10년 후 시설물의 노후화가 급격하게 진행될 것으로 판단됨.

  : '재난 및 안전관리 기본법'에 의해 관리되는 특정관리대상 시설은 총 167,117개로 이 중 위험등급 시설은 중앙부처 소관 시설이 302개, 지자체 소관 시설이 724개임.

표 2.6 국가 주요 시설물 안전등급 현황 (단위 : 개소)

(출처 : 한국시설안전공단, 행정안전부)

(a) 1종 시설물

구분	1종시설물						
	전체	A	B	C	D	E	불명
전체	8.487	2.014	5.921	512	3	-	37
10년 미만	3.576	1.727	1.795	19	-	-	35
10~20년 미만	3.249	227	2.844	178	-	-	-
20~30년 미만	1.059	32	850	175	1	-	1
30~40년 미만	404	20	308	74	1	-	1
40년 이상	199	8	124	66	1	-	-
고령화율	7.1	1.4	7.3	27.3	66.7	0.0	2.7

(b) 2종시설물

구분	2종시설물						
	전체	A	B	C	D	E	불명
전체	70.012	13.915	50.388	2.000	32	2	3.675
10년 미만	27.380	12.139	13.822	122	1	1	1.295
10~20년 미만	29.478	1.155	26.207	485	2	-	1.629
20~30년 미만	10.438	380	8.820	691	12	-	535
30~40년 미만	1.604	121	974	335	8	-	166
40년 이상	1.112	120	565	367	9	1	50
고령화율	3.9	1.7	3.1	35.1	53.1	50.0	5.9

(c) 특정관리대상시설 (중앙부처)

구분	중앙부처					
	전체	A	B	C	D	E
전체	65.082	29.631	30.394	4.755	249	53
시설물	8.363	2.617	4.984	716	34	12
건축물	56.719	27.014	25.410	4039	215	41

(d) 특정관리대상시설 (지자체)

구분	지자체					
	전체	A	B	C	D	E
전체	102.035	30.608	60.366	10.337	666	58
시설물	14.748	3.694	8.568	2.316	154	16
건축물	87.287	26.914	51.798	8.021	512	42

※ 주 1) '불명'인 시설물은 점검진단 미제출 등의 사유로 안전 등급이 미지정된 시설물임.

2) '고령화율'은 30년 이상의 노후화된 시설물의 비율을 말함.

3) 특정관리대상시설은 노후화에 대한 통계자료가 마련되어 있지 않음.

4) 특정관리대상시설 중 '시설물'은 도로, 지하도 상가, 스키장, 삭도·궤도, 유원시설, 토목공사장, 수상안전시설 등이며, '건축물'은 공동주택, 판매시설, 숙박시설, 공연시설, 관람장, 의료시설, 종교시설, 운동시설, 건축공사장 등이 있음.

(2) 국외 시장 동향

- 미국 연방 도로 교통부(US Department of Transportation)에 의하면 미국 전역에 구조적 결함 또는 붕괴 위험이 발견된 교량은 7,795개이며, 이로 인해 발생되는 연간 유지 보수비용은 약 205억 달러 수준임을 발표함(그림 2.18).
- 일본 공공시설물 보전 시장은 2013년 기준 2,012억 엔 규모를 기록하였고, 이 중 교량 유지관리 시장은 851억 엔으로 전년 대비 50% 증가하였으며, 사회자본 투자 총액이 2010년과 같은 수준으로 지속될 경우 2037년에는 유지관리 및 보수비가 투자총액을 상회할 것으로 예측함.
- 서유럽은 전체 SOC 투자 금액 중 약 30%를 유지·보수에 투자하고 있으며, 이를 적용하면 2015년 기준 세계 도로 및 교량 유지·보수 시장은 약 1,470억 달러 규모로 추정됨.
- 전 세계 자기치유 재료 시장은 약 120.4백만 달러로 건설산업 적용되는 분야는 약 27%를 차지하고 있으며, 이 중 콘크리트 관련 시장은 약 21%를 차지하고 있음.

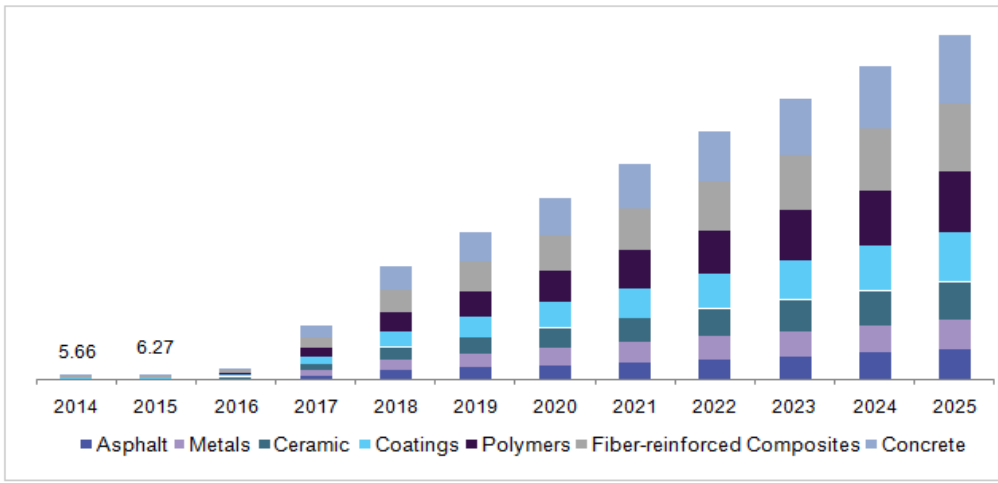


그림 2.18 미국 유지보수 시장 현황 및 전망

- 세계 경제 저성장이 장기화됨에 따라 사회기반 시설의 신규 건설보다 기존 시설의 체계적인 유지· 보수를 통한 사용성 및 내구 수명 증진 도모

  : (미국) 시설물 유지관리 정책의 미비로 2020년까지 3,830조원 추가 투입

  : (일본) 사회기반시설물의 장수명 기본계획을 수립하여 국토교통성의 예산 내 시설물 유지보수 투자 비율 증가 추세

- 국내/외 자기치유 재료 관련 시장은 확대 추세이며, 이에 대한 대응 및 선도 연구개발이 필요한 실정

  : 자기치유 재료 시장은 약 120.4백만 달러이며, 건설산업 적용되는 분야는 27.4% 차지

  : 또한, 관련된 제품 중 콘크리트 관련 시장은 약 21%를 차지하고 있음

  : 주요 선진국들은 건설 산업의 경쟁력 향상을 위해 친환경/다기능의 건설재료 개발을 위한 로드맵을 수립하여 R&D 집중 투자

3. 연구수행 내용 및 성과

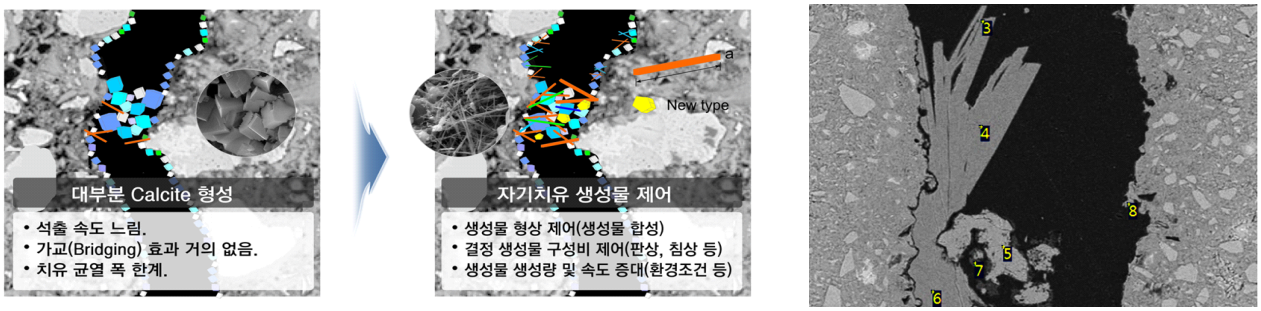
3-1. 연구수행 내용

가. 균열 자기치유성능 촉진 콘크리트 혼합재료 기술 개발

(1) 무기혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술

(가) 핵심 기술 개요

- 콘크리트 구조물은 종류 및 노출 환경에 따라 목표 내구성능이 달라지며, 이에 따라 요구되는 자기치유 성능의 차이가 있음. 본 기술은 자기치유 요구 성능에 따라 200~300 μm인 균열을 치유할 수 있는 요구 성능 맞춤형 무기계 혼합재료 활용 자기치유 배합 기술임.
- 무기계 혼합재료의 종류에 따라 균열에 생성되는 자기치유 생성물의 질량 및 화학성분을 분석하였으며, 자기치유성능 평가와 비교하여 자기치유성능을 향상시킬 수 있는 최적 자기치유 생성물을 도출하였음. 균열 자기치유에 유리한 자기치유 생성물을 유도하기 위하여 무기계 혼합재료를 선정하였으며, 이를 이용한 자기치유 배합을 도출하였음. 또한, 장기적인 자기치유성능을 향상시키기 위하여 무기계 혼합재료의 가공 기술을 개발하였음.



(a) 자기치유 생성물의 제어를 통한 자기치유성능 향상 (b) 균열 내 유도된 침상형 자기치유 생성물

그림 3.1.1 무기계 혼합재료 활용 자기치유 콘크리트 기술 개요

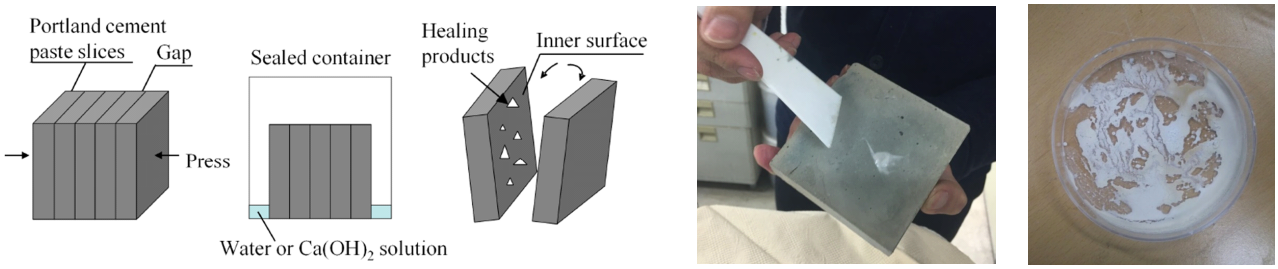
(나) 무기계 혼합재료에 의한 자기치유 특성 분석

① 무기계 혼합재료에 따른 균열 자기치유 생성물의 화학적 특성 분석

- 무기계 혼합재료(표 3.1.1)의 종류 및 치환량에 따른 자기치유 생성물을 조사하였음. 자기치유 생성물은 슬라이스 시편(100×100×10 mm)의 사이에 생성되는 물질을 수집·조사하였음.
- 그림 3.1.2는 자기치유 생성물의 질량 및 화학 분석을 위한 자기치유 생성물의 유도 및 수집 방법을 나타냄. 실제로 생성물 채취가 어렵기 때문에 재령 7일의 slice 시편을 겹쳐서 인공균열을 만들고 균열에 생성된 자기치유 생성물을 채취하였음. 이 때 양생 온도는 20±1°C, 자기치유 기간은 7일로 하였음. 자기치유 생성물은 40°C로 24시간 동안 건조시킨 이후 질량을 측정하고 XRD/Rietveld refinement, TG-DTA, SEM-EDS를 통하여 분석하였음.

표 3.1.1 무기계 혼합재료

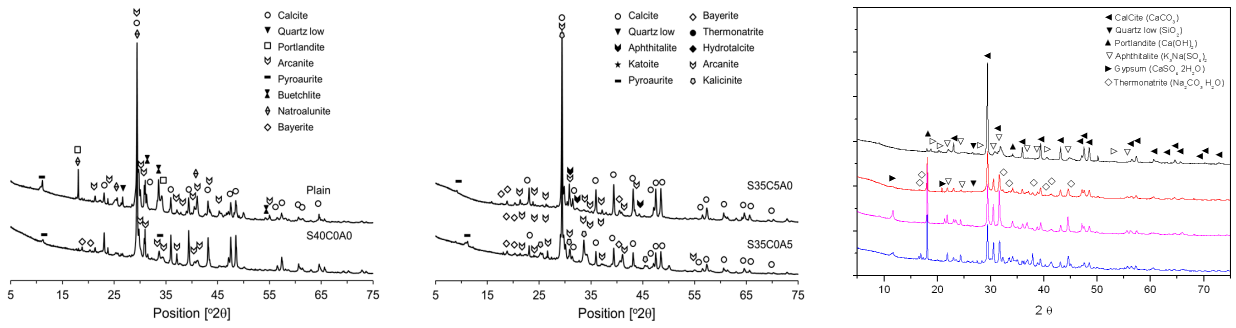
무기계 혼합재료 분류		사용 재료
SCMs		고로슬래그 미분말, 플라이애쉬, 실리카 퓸
팽창재		CSA 팽창재, MgO
팽윤재		Na-벤토나이트, Ca-벤토나이트, 규조토
결정촉진제 (CAs)	SO_4 공급	석고(이수, 반수, 무수), Na_2SO_4, $Al_2(SO_4)_3$
	CO_3 공급	Limestone powder, Na_2CO_3, $NaHCO_3$, Li_2CO_3, Talc
	기타 소재	Na_2PO_3F, $KF{\cdot}nH_2O$, $NaAlO_2$, $CaSiO_3$, Al_2SiO_5, 알루미나 시멘트, Nano-calcite, Ethylendiamine, Stainless steel slag(γ-C_2S)



(a) 인공 균열을 이용한 자기치유 생성물 채취 방법 (b) 균열 면에서 채취한 자기치유 생성물

그림 3.1.2 자기치유 생성물 채취 방법 개요

- 그림 3.1.3은 XRD pattern 분석 결과이며, 표 3.1.2는 Rietveld refinement를 통한 정량 분석 결과임. 무기계 혼합재료 활용에 따른 자기치유 생성물은 주로 Amorphous와 Calcite로 구성되었으며, 결정촉진제 및 팽창재의 사용에 따라 Bayerite, Alkali sulfate hydrate, Ettringite 등이 추가로 생성되었음.
- 표 3.1.2를 보면 팽창재와 결정촉진제(SO_4 공급재료)를 혼입하는 경우 SO_4 공급으로 인해 Alkali sulfate 수화물이 생성되었음. GGBFS, 팽창재, 결정촉진제를 모두 사용한 경우 Ettringite가 생성되었음. 결정촉진제(CO_3 공급재료)를 혼입하는 경우 Calcite가 주로 생성물로 나타났으나, OPC만 사용한 경우에 비해 별다른 차이가 없었음. 팽창성 자기치유 생성물의 유도에는 GGBFS, CSA 팽창재, 결정촉진제(SO_4 공급재료)가 유리하다는 것을 확인하였음.



(a) OPC, GGBFS (b) GGBFS+SO_4 공급재료 (c) 팽창재+CO_3 공급재료

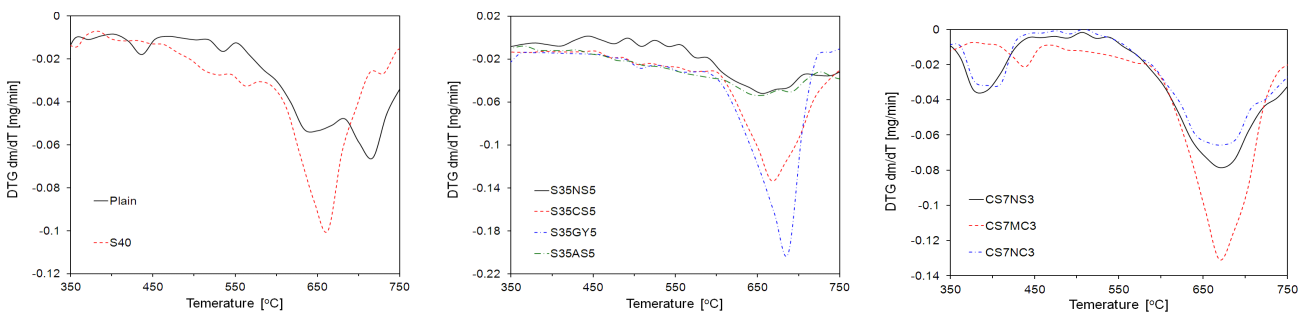
그림 3.1.3 XRD pattern 분석을 통한 자기치유 생성물 조사

표 3.1.2 XRD/Rietveld Refinement에 의한 자기치유 생성물의 정량 평가 결과

Sample	Amorphous	Calcite	$Ca(OH)_2$	Bayerite	A-S-H	M-C-H	A-C-H	Ettringite
OPC	48.7	43.0	2.8	0.0	3.2	0.1	0.0	0.0
GGBFS	44.2	46.6	0.6	1.5	0.7	6.0	0.0	0.0
GGBFS+CAs	63.8	25.8	0.0	0.3	6.4	0.0	2.5	0.0
FA	64.4	28.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CSA 팽창재	46.1	39.3	0.1	3.1	9.9	0.0	0.0	0.0
GGBS+CSA+CAs(SO_4)	68.9	15.5	0.4	0.0	7.2	0.4	0.0	6.7
CSA+CAs(CO_3)	38	35	5	0	20	0	0	0
CAs(기타)	67.9	17.3	7.8	0	4.1	2.1	0	0

*A-S-H: Alkali sulfate hydrate, M-C-H: Magnesium carbonate hydrate, A-C-H: Alkali carbonate hydrate

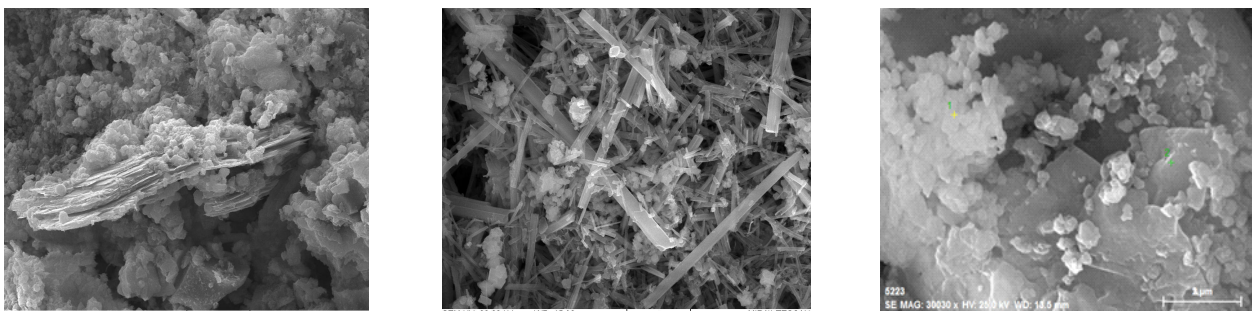
- 그림 3.1.4는 TG-DTA를 통한 Calcite 분석 결과임. GGBFS를 혼입하는 경우 Calcite가 증가하였으며, 결정촉진제(SO_4 공급재료)와 복합 활용하는 경우 결정촉진제의 종류에 따라 calcite의 생성량이 변화하였음. 팽창재와 결정촉진제(CO_3 공급재료)를 사용한 시편의 자기치유 생성물을 분석한 결과 $MgCO_3$를 사용한 경우 Calcite가 증가하였으며, 그 외에는 GGBFS를 사용한 경우와 별다른 차이가 없는 것을 확인하였음.



(a) OPC (b) GGBFS+SO_4 공급재료 (c) 팽창재+CO_3 공급재료

그림 3.1.4 TG-DTA를 통한 자기치유 생성물 분석 결과

- Morphology 분석 결과 GGBFS 혼입 시 CH가 감소하고 Amorphous와 Monosulfate가 확인되었으며, 팽창재 및 결정촉진제(SO_4 공급재료)의 혼입 시 Ettringite가 나타남. 결정촉진제(CO_3 공급재료) 혼입 시에는 OPC와 유사한 CH와 Calcite가 주로 생성되었음.

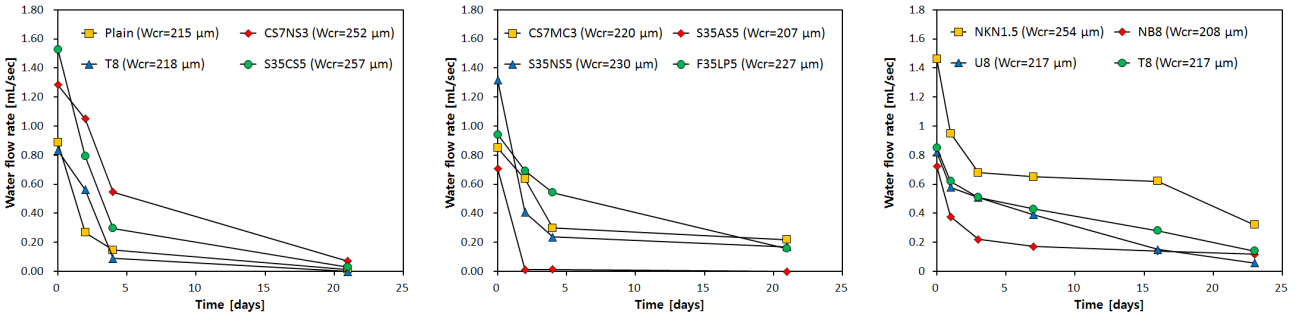


(a) GGBFS (b) 팽창재, 결정촉진제(SO_4 공급재료) (c) 결정촉진제(CO_3 공급재료)

그림 3.1.5 자기치유 생성물의 Morphology 분석 결과

② 무기계 혼합재료의 자기치유성능 평가

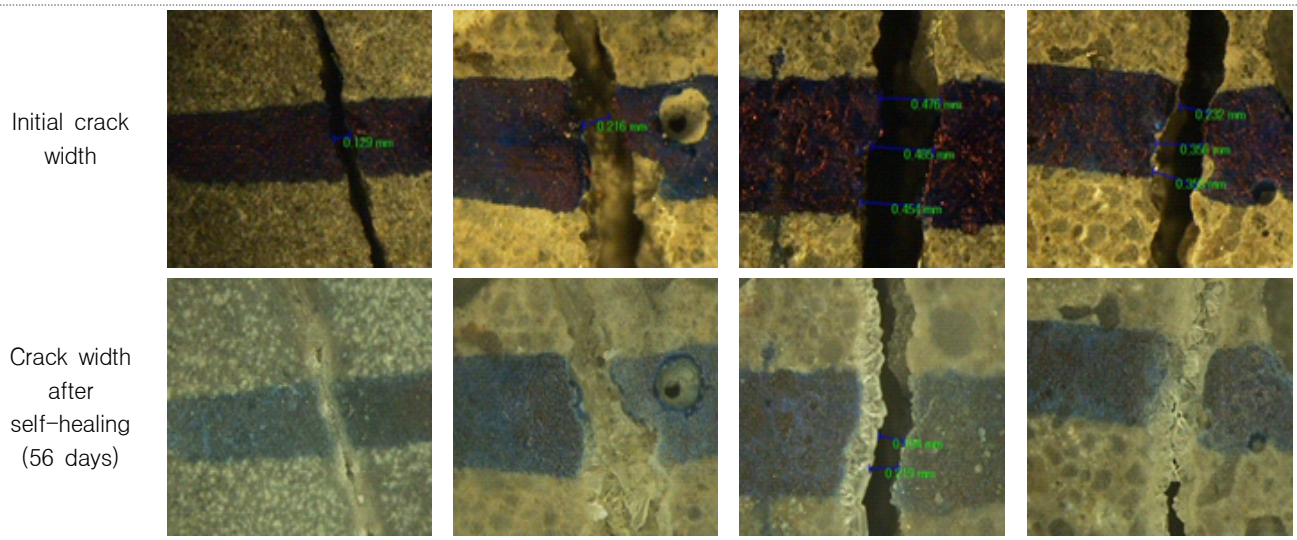
- 자기치유 성능 평가는 3세부에서 개발한 방법을 이용하였음. 재령(7일, 28일) 및 균열폭(200 ~250 μm)에 따른 검토 결과, 재령 및 균열폭 증가에 따라 자기치유성능이 감소하는 것을 확인하였음. 재령 7일 균열 시 소재에 관계없이 균열폭 200 μm의 균열을 90% 정도 치유하였으며, 팽창재, 결정촉진제 사용 시 균열폭 250 μm을 치유하였음. 팽창재는 재령 28일에는 치유성능이 감소하였으며, GGBFS는 재령에 관계없이 자기치유성능이 가장 증가하는 것으로 나타났음. 팽윤재는 재령 28일 균열 시 별다른 효과가 없었으며, Na_2PO_3F, $KF{\cdot}nH_2O$, $NaAlO_2$ 및 Talc를 사용한 경우 치유성능이 상승되었음.
- 재령 7일 균열 시 무기계 소재에 따라 최대 250 μm 균열을 95% 이상 치유하였으며, 재령 28일 균열 시 GGBFS와 결정촉진제를 사용하면 200 μm 균열을 치유하는 것으로 확인되었음.



(a) 재령 7일 균열 유도 (b) 재령 28일 균열 유도 (c) 팽윤재 및 기타 소재

그림 3.1.6 투수시험을 통한 자기치유성능 평가

- 자기치유에 의한 표면 균열폭 측정 결과 OPC의 경우 최대 100 μm의 균열 치유하였으며, GGBFS와 결정촉진제(SO_4 공급재료)를 사용한 경우 200 μm의 균열을 치유하였음. 팽창재와 결정촉진제(CO_3 공급재료)를 사용한 경우에도 약 200 μm 만큼 균열폭이 감소하였으며, FA를 사용한 경우 150 μm 정도 균열폭이 감소하였음.

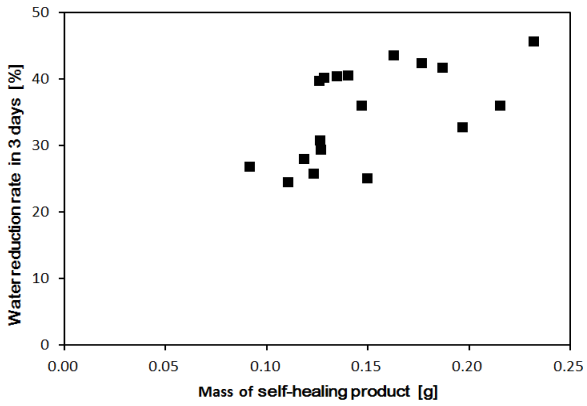


(a) OPC (b) OPC + GGBFS + Na_2SO_4 (c) OPC + FA (d) OPC + CSA + $MgCO_3$

그림 3.1.7 Crack closing test에 의한 자기치유성능 평가

③ 자기치유 생성물과 자기치유성능의 비교 분석을 통한 무기계 자기치유 소재 도출

- 그림 3.1.8(a)는 자기치유 총량 대비 초기 투수 감소량을 정리한 그래프로 자기치유 생성물의 총량이 증가함에 따라 치유성능이 향상되는 경향이 나타났으나, 동일한 자기치유 생성물의 질량에도 불구하고 치유성능의 차이가 발생하는 것이 확인되었음.
- 그림 3.1.8(b)는 자기치유 생성물 정량 평가 결과로 대부분 Amorphous와 Calcite로 구성되었으며, 자기치유 생성물에 Ettringite, Alkali sulfate hydrate, Alkali carbonate hydrate가 포함된 경우 자기치유성능이 향상되었음. 자기치유성능을 향상시키기 위해 자기치유에 유리한 생성물을 유도할 수 있는 무기계 혼합재료를 선정하고 이를 이용한 자기치유 배합을 선정하였음.



(a) 자기치유 생성물 총량 대비 자기치유성능

수화 생성물 (mass %)

Sample	Amorphous	Calcite	$Ca(OH)_2$	Bayerite	Calcium aluminate hydrate	Sulfate hydrate	Alkali sulfate hydrate	Magnesium Carbonate hydrate	Alkali carbonate hydrate	Ettringite	oders	Totals
SH 1-1	48.7	43.0	2.8	0.0	0.0	0.2	3.2	0.1	0.0	0.0	1.9	100
SH 1-2	44.2	46.6	0.6	1.5	0.0	0.0	0.7	6.0	0.0	0.0	0.4	100
SH 1-3	57.7	34.7	-	1.3	0.0	0.0	1.1	1.3	0.0	0.0	4	100
SH 1-4	37.5	50.2	-	1.5	0.0	0.0	0.7	9.2	0.0	0.0	0.9	100
SH 1-5	53.8	25.8	-	0.3	0.0	0.0	6.4	0.0	12.5	0.0	1.1	100
SH 1-6	64.4	31.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4	1.4	0.0	0.0	1.8	100
SH 1-7	64.4	28.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	100
SH 1-8	82.9	6.3	2.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	7	100
SH 2-1	46.1	39.3	0.1	3.1	0.0	0.0	9.9	0.0	0.0	0.0	1.5	100
SH 2-2	61.1	23.7	0.3	1.9	0.0	0.0	9.8	0.0	0.0	0.0	3.2	100
SH 2-3	48.0	17.6	0.4	0.0	0.0	0.0	14.0	2.9	16.1	0.0	0.9	100
SH 2-4	58.5	25.0	0.3	0.0	0.0	0.8	5.8	1.9	6.7	0.0	1	100
SH 2-5	68.9	16.2	2.9	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0	2.5	0.0	0.6	100
SH 2-6	65.6	16.1	2.1	0.0	0.0	0.6	13.2	1.5	0.0	0.0	1	100
SH 2-8	58.2	10.3	1.6	0.0	1.0	0.2	13.4	1.7	12.6	0.0	0.8	100
SH 3-1	70.4	12.1	0.8	0.0	0.0	0.9	7.0	0.6	7.4	0.7	0.2	100
SH 3-2	68.9	15.5	0.4	0.0	0.0	0.5	7.2	0.4	0.0	6.7	0.4	100
SH 3-3	70.4	16.1	-	0.4	9.6	1.1	1.1	0.5	0.0	0.0	0.9	100
SH 3-4	70.7	7.1	-	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.8	100
SH 3-5	78.0	7.6	-	0.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.9	100
SH 3-6	62.6	10.0	-	0.0	7.9	0.0	0.0	19.1	0.0	0.0	0.4	100
SH 3-7	64.6	6.0	-	0.0	26.5	0.2	0.0	2.5	0.0	0.0	0.2	100
SH 3-8	56.6	3.8	-	0.0	35.1	0.8	0.0	3.1	0.0	0.6	0	100

(b) 자기치유 생성물의 종류에 따른 영향 검토

그림 3.1.8 자기치유 생성물과 자기치유성능의 비교 분석을 통한 자기치유 생성물 도출

- 무기 혼합재료에 따른 자기치유 생성물의 성분 분석 및 성능 평가 결과를 비교하여 자기치유에 유리한 생성물을 도출한 결과를 정리하여 SCI(E) 논문(SCI-48)을 게재하고 특허(특허-17)를 등록하였음.


Construction and Building Materials 184 (2018) 1–10

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

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

Quantitative evaluation of crack self-healing in cement-based materials by absorption test

Byoungsun Park[a], Young Cheol Choi[b,*]

[a] High-Tech Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul 08503, South Korea
[b] Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, 1342 Seongnamdaero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13120, South Korea


특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number 제 10-1863964 호

출원번호 Application Number 제 10-2017-0000100 호

출원일 Filing Date 2017년 01월 02일

등록일 Registration Date 2018년 05월 28일

발명의 명칭 Title of the Invention

S T S 전기로 환원슬래그를 이용한 자기치유 콘크리트용 잔골재, 그의 제조방법 및 그를 이용한 자기치유 콘크리트

(다) 무기계 혼합재료 활용 자기치유 콘크리트 배합 기술

① 자기치유 생성물 제어를 통한 자기치유 배합(안) 도출

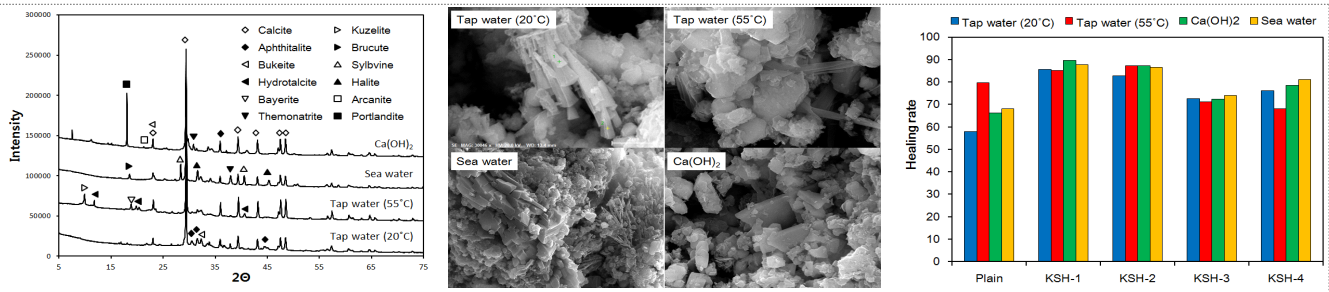
- 그림 3.1.8의 분석 결과를 토대로 GGBFS, CSA 팽창재, 결정촉진제(SO_4 공급재료, CO_3 공급재료), 기타 소재를 이용한 자기치유 배합(안)을 도출하였음. 표 3.1.3의 자기치유 배합(안)을 이용하여 환경조건(온도 및 외부 용액의 종류)에 다른 자기치유성능 평가 및 생성물 분석을 수행하고, 최적의 자기치유 배합을 도출하고자 함.

표 3.1.3 무기계 혼합재료 활용 자기치유 배합(안)

Labels	OPC	GGBFS	결정촉진제(SO_4)		CSA 팽창재	결정촉진제(CO_3)		기타소재		
			Na_2SO_4	anhydrite		$MgCO_3$	Na_2CO_3	Na_2PO_3F	$KF{\cdot}nH_2O$	$NaAlO_2$
Plain	100									
KSH-1	60	35	5							
KSH-2	60	27	5	5		3				
KSH-3	60	27		5	5		3			
KSH-4	88		2.5	4	4			0.5	0.5	0.5

② 환경 조건에 따른 성능 평가

- 표 3.1.3으로 배합한 재령 28일 시편에 대하여 Tap water (20℃, 55℃), Sea water, $Ca(OH)_2$ 환경에서 자기치유 특성을 분석하였음. KSH-1과 KSH-2의 경우 sea water 환경에서 팽창성 수화물인 Brucite 등이 나타났으며, $Ca(OH)_2$ 환경에서 지속적인 수화 촉진으로 인해 치유 생성물이 증가하였음. KSH-3은 CSA팽창재와 Na_2CO_3의 높은 초기 반응성으로 인해 재령 28일에는 미반응 결합재가 감소하여 환경조건에 따른 영향이 더 적은 것으로 확인되었음.
- 균열 폭 250 μm의 시편을 이용한 환경조건에 따른 자기치유성능 평가 결과인 그림 3.1.9에 따르면 KSH-1를 혼입한 경우 자기치유성능이 가장 높았는데, $Ca(OH)_2$ 및 Sea water 환경에서는 자기치유성능이 향상되었으나, 고온 환경에서 감소하였음. KSH-3은 CSA팽창재와 CO_3 공급재료를 사용한 경우에는 장기재령에서 치유성능이 크게 향상되지 않는 것으로 나타났으며, KSH-4는 고온에서 자기치유성능이 크게 감소하였음.



(a) 재령 7일 균열 유도 (b) 재령 28일 균열 유도 (c) 자기치유 특성

그림 3.1.9 환경 조건에 따른 자기치유 특성 분석

③ 침상형 및 판상형 결정 촉진 기술 개발

- 그림 3.1.9의 분석을 통해 GGBFS와 결정촉진제(SO_4 공급재료)를 사용한 경우 자기치유성능이 높은 것을 확인했으며, 침상형 자기치유 생성물을 촉진시키기 위해 재령 28일에 균열을 유도한 시편을 이용하여 BSE-DIP를 통한 균열 내 자기치유 생성물 분석을 수행하였음(그림 3.1.10).
- 균열 바깥쪽의 자기치유 생성물에는 주로 calcite가 나타난 반면, 내부의 자기치유 생성물에는 주로 amorphous가 나타났음. GGBFS와 Na_2SO_4, 무수석고를 사용한 경우 침상형 수화물(afm phase와 ettringite)이 나타났으며, CSA 팽창제를 사용한 경우에는 일 균열 유발 시 침상형 수화물이 확인되지 않았음.

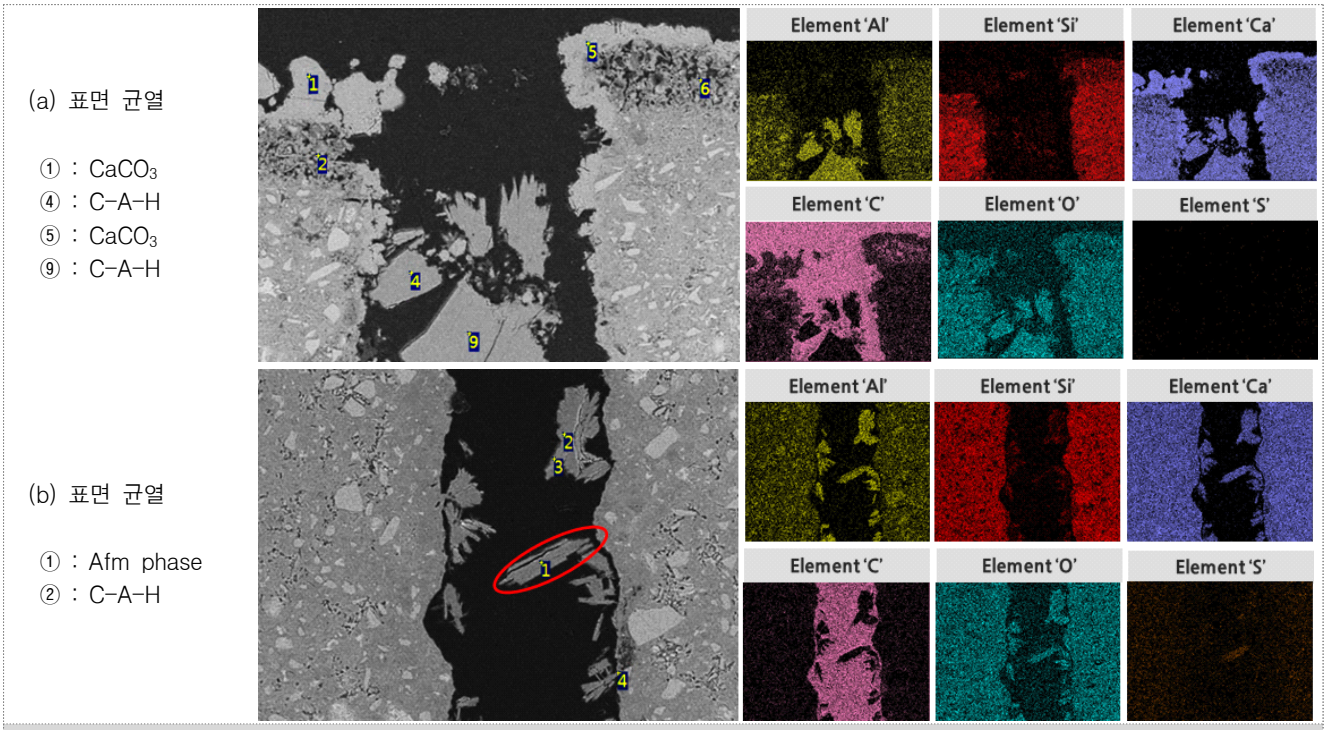
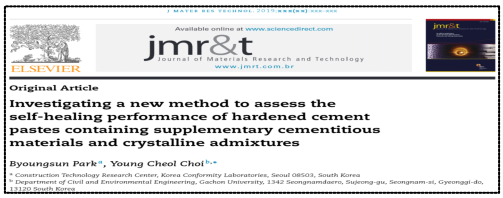


그림 3.1.10 BSE-DIP를 통한 생성물 분석 (GGBFS+Na_2SO_4+무수석고)

- 균열 내 침상형 생성물 촉진을 위한 소재 연구 및 생성물 분석 실험결과, 성능 평가 결과를 이용하여 SCI(E) 논문(SCI-81)을 게재하였음.



(라) 균열 치유성능 향상을 위한 무기계 혼합재료 가공 기술

① 무기계 혼합재료의 가공 기술 개요

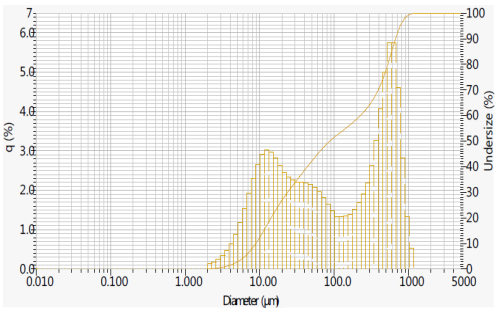
- 무기계 혼합재료를 콘크리트에 직접 배합하는 경우 시멘트 복합체의 수화 과정 중 반응하여 재령 28일 이후 목표 균열폭인 300 μm의 균열이 치유하기 어려운 것을 확인하였음. GGBFS와 OPC의 조립화 및 결정촉진제의 코팅 기술 개발을 통해 치유성능을 향상시키기 위한 기술을 개발하였음.

② 무기계 혼합재료의 조립화 기술 개발

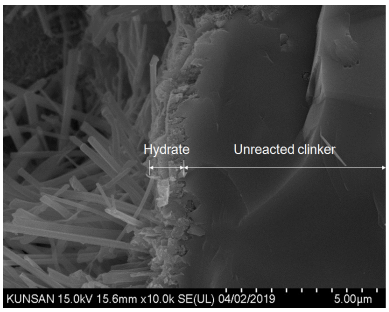
- 조립화할 소재는 클링커로 클링커를 분쇄하여 클링커 바인더(850 μm 이하)와 클링커 골재(2.5 mm 이하)로 제조하였으며, 이를 각각 바인더와 골재를 치환하여 사용하였음.
- 그림 3.1.11은 제조한 클링커 바인더와 입도 분포로 클링커 바인더 및 골재는 지름이 크고 무수석고를 혼합하지 않아 수화속도가 느리기 때문에 장기적으로 미수화물이 증가함(그림 3.1.11(c)). 또한, 클링커 바인더 및 골재는 주변 페이스트와 반응하여 천이대(ITZ)를 감소시키기 때문에 균열 발생 시 클링커 바인더 또는 골재를 관통하여 균열이 발생할 수 있으며, 이 경우 클링커 바인더 균열 면에서 치유 효율이 향상될 수 있음.



(a) 클링커 바인더



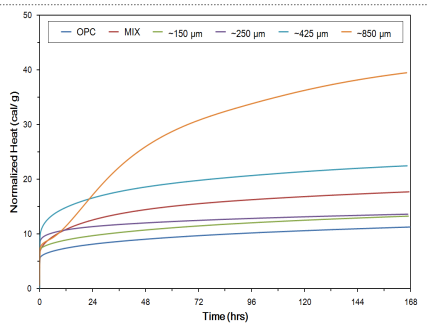
(b) 클링커 바인더 입도



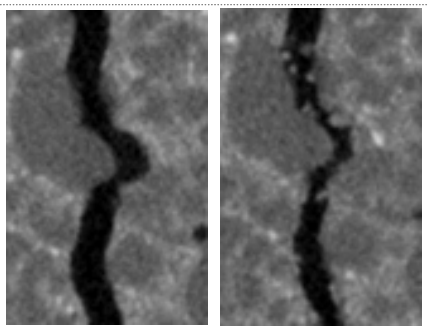
(c) 표면 수화된 클링커 바인더

그림 3.1.11 Water flow test을 통한 자기치유성능 평가

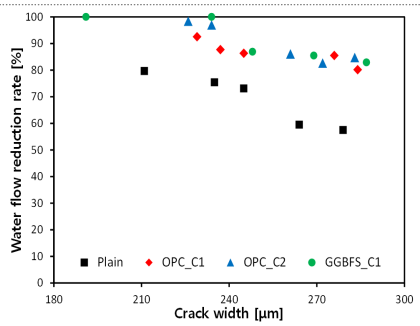
- 그림 3.1.12(a)는 미수화 클링커의 재수화에 의한 발열량으로 클링커 바인더의 평균 직경이 증가함에 따라 증가하였으며, 이는 장기적으로 미반응 상태의 클링커가 증가함을 의미함. CT 측정을 통해 클링커 바인더 주변부로 치유성능이 향상되는 것으로 확인(그림 3.1.12(b))하였으며, water flow test를 통해 클링커 바인더와 골재를 치환한 경우 자기치유성능이 향상되며, 균열폭이 250 μm인 경우, 투수량이 약 86.9%까지 감소하는 것을 확인하였음.



(a) 입도 별 자기치유 잠재성 평가



(b) 클링커 바인더의 자기치유(CT 측정)

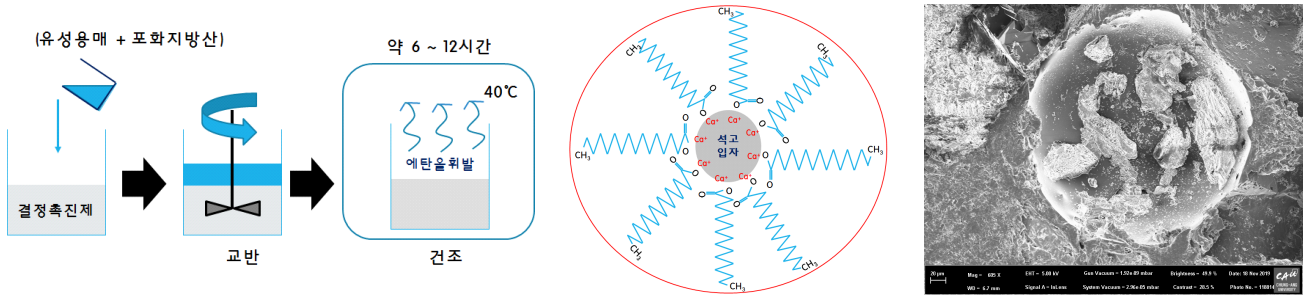


(c) 자기치유성능 평가

그림 3.1.12 클링커 바인더 및 골재의 혼입에 따른 성능 평가

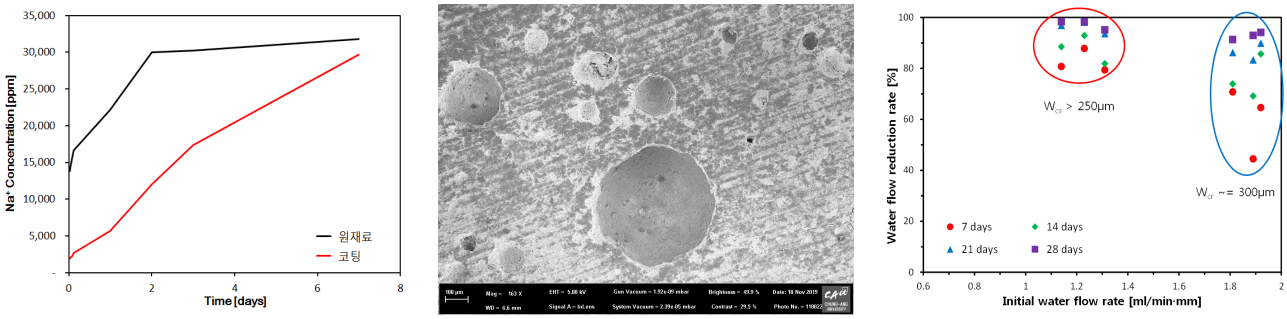
③ 결정촉진제의 코팅 기술 개발

- 결정촉진제(SO_4 공급재료)는 침상형 치유 생성물을 유도하기 위해 사용되는 소재로 초기 반응을 억제하여 장기적으로 미반응 상태로 유지시키기 위한 코팅 기술을 개발하였음.
- 결정촉진제의 코팅은 그림 3.1.13(a)와 같이 결정촉진제를 유성용매와 포화지방산(용액)에 넣고 교반 후 건조하는 형태로 제작하였으며, 그림 3.1.13(b)와 같이 결정촉진제 주변으로 포화지방산이 붙어 그림 3.1.13(c)와 같은 형태가 됨. 코팅 기술은 캡슐 기술과 다르게 수분과의 일정시간 이상의 접촉을 통해 제거되며, 코팅 막이 제거된 이후 내부 물질은 반응할 수 있는 상태로 유지됨.
- 그림 3.1.14(a)는 코팅 소재의 용해도 평가 결과로 초기에는 소량이 용해되다가 시간이 증가함에 따라 코팅이 약해져 용해되는 양이 증가하였음. 그림 3.1.14(b)는 재령 3일 시편에 존재하는 코팅 소재임. 코팅 소재를 5% 치환하여 자기치유성능을 평가한 결과 균열폭 250 μm의 균열은 90.3%, 균열폭 300 μm의 균열은 86.2% 치유되었음



(a) 결정촉진제의 코팅 방법 (b) 결정촉진제의 코팅 상태 (c) 코팅된 결정촉진제(SEM)

그림 3.1.13 클링커 바인더 및 골재의 혼입에 따른 성능 평가



(a) 코팅 소재의 용해도 평가 (b) 시멘트 복합체 내부의 코팅 소재 (c) 자기치유성능 평가

그림 3.1.14 코팅 소재 사용에 따른 자기치유성능 평가

(마) 자기치유성능 기반 무기계 바인더 배합기술

① 무기계 자기치유 소재 활용 최적 자기치유 배합 선정

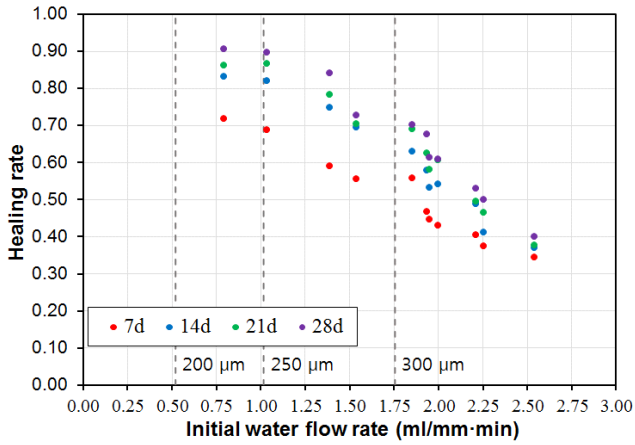
- 목표 균열폭이 200, 250, 300 μm인 경우로 나누어 자기치유 배합을 도출하였음. 각각의 배합은 재령 28일에 발생한 균열폭 200, 250, 300 μm의 균열을 28일 이내에 90% 이상 치유 가능함.

표 3.1.4 무기계 혼합재료 활용 자기치유 모르타르 배합(안)

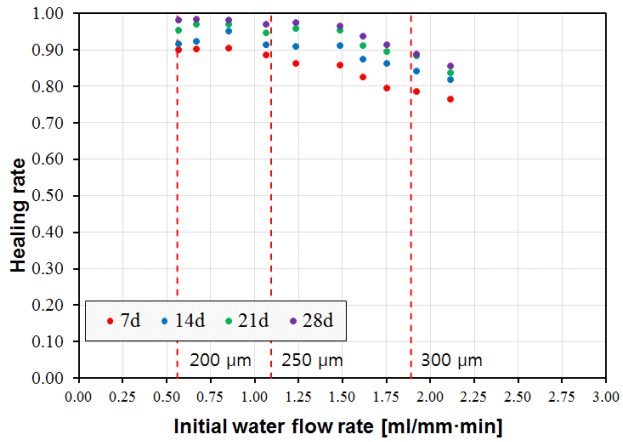
Labels	결합재					골재	
	OPC	GGBFS	결정촉진제		클링커 바인더	클링커 골재	잔골재
			원재료	코팅			
KCL-SH1 (W_{cr} = 200 μm)	62	35	5				200
KCL-SH2 (W_{cr} = 250 μm)	62	25	5		10	20	180
KCL-SH3 (W_{cr} = 300 μm)	60	25		5	10	20	180

② 자기치유 배합의 성능 평가

- 그림 3.1.15는 자기치유 배합 별 자기치유성능 평가 결과를 나타내는 그래프로, KCL-SH2는 균열폭 250 μm의 균열을 약 90.0% 치유 가능하였으며, KCL-SH3은 균열폭 300 μm의 균열을 약 91.4% 치유 가능한 것으로 확인되었음.



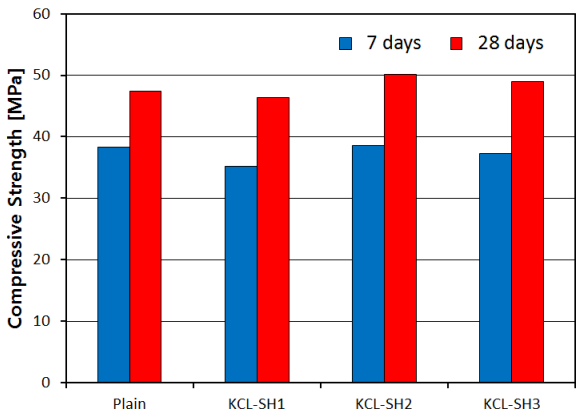
(a) KCL-SH2



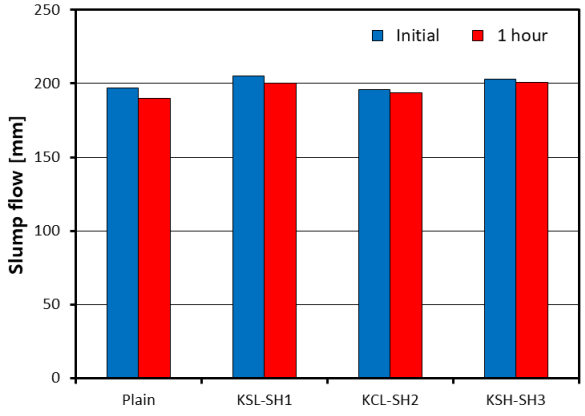
(b) KCL-SH3

그림 3.1.15 자기치유 배합 별 자기치유성능 평가 결과

- 그림 3.1.16은 역학적 성능과 슬럼프 플로우 측정 결과로 KCL-SH2와 KCL-SH3은 클링커 골재 사용으로 인해 Plain 배합에 비해 강도가 증진되었으며, KCL-SH1은 약 1~2 MPa 저하되었음. 슬럼프 플로우는 Plain에 비해 미세하게 증가하였으며, 차이는 10% 이내로 나타났음.



(a) 압축 강도 측정 결과



(b) 슬럼프 플로우

그림 3.1.16 자기치유 배합 별 자기치유성능 평가 결과

(2) 무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 메커니즘 및 모델링 기술

(가) 핵심 기술 개요

- 콘크리트에 사용하는 무기 혼합재료는 그 종류가 매우 다양하고, 같은 소재라도 분말도 및 화학조성에 따라 특성이 달라지기 때문에 실험만으로 새로운 자기치유 배합을 개발하는 것은 한계가 있으며, 자기치유 모델링을 통한 자기치유 소재 별 성능 예측 프로그램이 필요함.
- 자기치유성능 제어를 위해 무기 혼합재료의 종류 및 특성, 배합 조건 및 환경조건에 따른 자기치유 반응 메커니즘을 정립하고, 운동학적 모델링 및 열역학적 모델링을 접목하여 균열 자기치유성능을 예측할 수 있는 모델링 기술을 개발하였음.

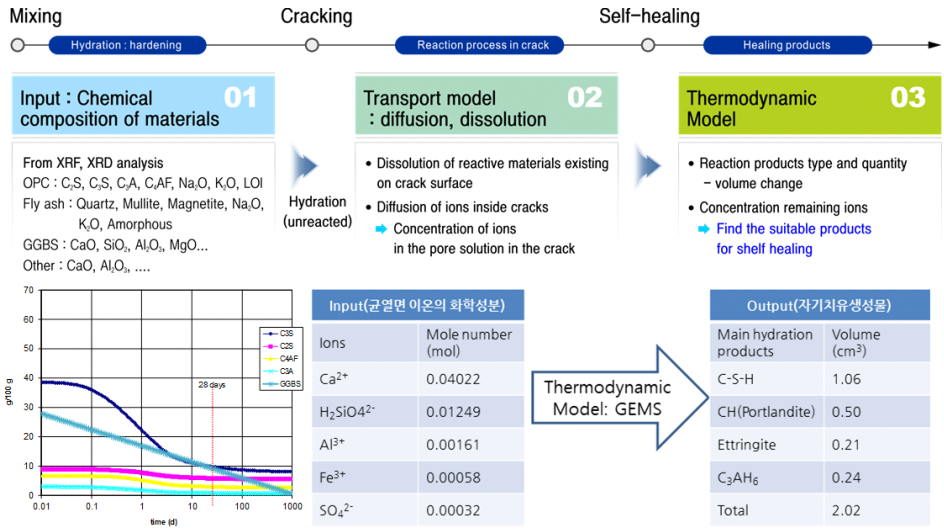
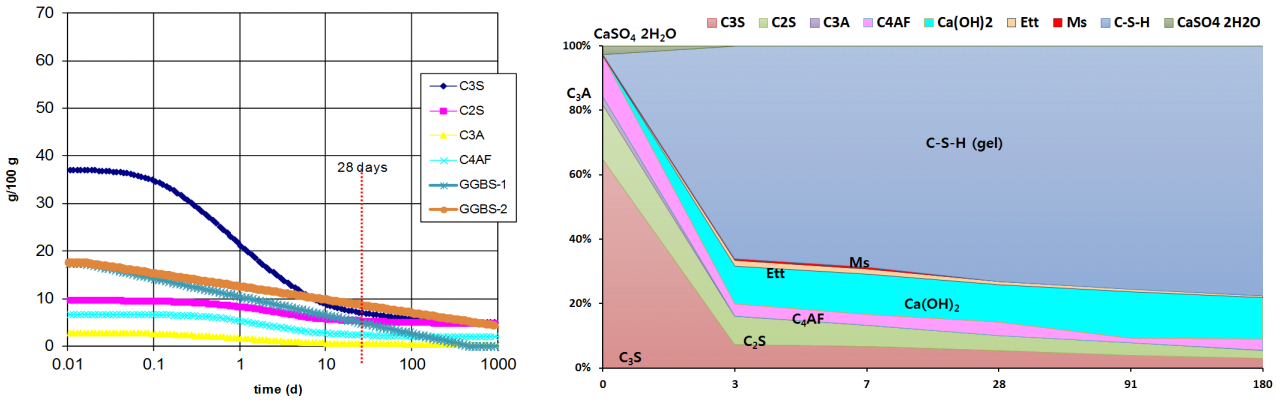


그림 3.1.17 무기계 혼합재료에 의한 균열 자기치유 모델링 개요

(나) 무기계 자기치유 소재의 운동학적 모델링

① 무기계 혼합재료의 운동학적 모델 정립 및 검토

- OPC, SCMs, 결정촉진제의 재령에 따른 미반응량을 정량화하기 위한 운동학적 모델(OPC: Parrot & Killoh 모델, SCMs: arrhenius 방정식 기반 모델)을 선정하고, 원재료를 이용한 실험 결과를 통해 OPC 및 SCMs 운동학적 모델의 계수를 산정하였음.



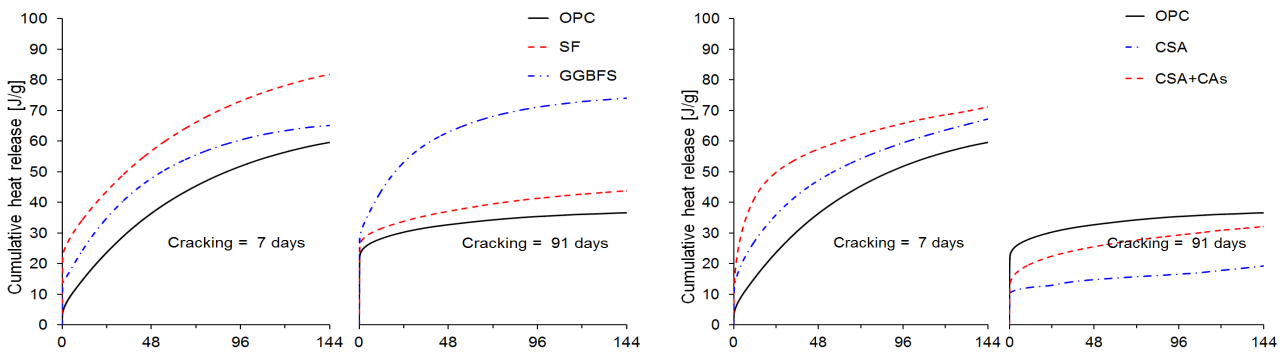
(a) 운동학적 모델링 (OPC, SCMs) (b) XRD/Rietveld refinement를 통한 검증

그림 3.1.18 운동학적 모델을 통한 미반응 결합재 정량화 및 검증

② 미수화 결합재의 지속적인 수화(Further hydration)에 의한 누적 발열량 측정

- 무기계 혼합재료는 재령에 따라 감소하며, 균열 발생 시 미수화 상태인 결합재만 침투한 물과 Further hydration에 의해 자기치유 물질을 생성하는데, 이때 Further hydration 특성은 일반적인 수화 메커니즘과 다르며, 무기계 혼합재료의 종류에 따라 변화함.
- 무기계 혼합재료에 따른 분석 결과, SCMs의 경우 재령 7일에는 SF의 발열량이 높았으나, 재

령 91일에는 GGBFS의 발열량이 높았으며, CSA 팽창재 및 결정 촉진제(CAs)는 빠른 반응 속도로 인해 재령 7일에는 높은 발열량을 나타났으나, 재령 91일에는 급격하게 감소하였음.



(a) SCMs (b) CSA 팽창재 + 결정촉진제

그림 3.1.19 무기혼합재료의 종류에 따른 재령 별 Further hydration에 의한 누적 발열량

- 무기계 자기치유 소재의 종류 및 혼입율에 따른 재령 별 further hydration 특성을 분석하여 SCI(E) 논문(SCI-64)을 게재하였음.


Park and Choi *Int J Concr Struct Mater* (2019) 13:36
https://doi.org/10.1186/s40069-019-0349-9

International Journal of Concrete Structures and Materials

RESEARCH Open Access

Prediction of Self-Healing Potential of Cementitious Materials Incorporating Crystalline Admixture by Isothermal Calorimetry

Byoungsun Park[1] and Young Cheol Choi[2*]

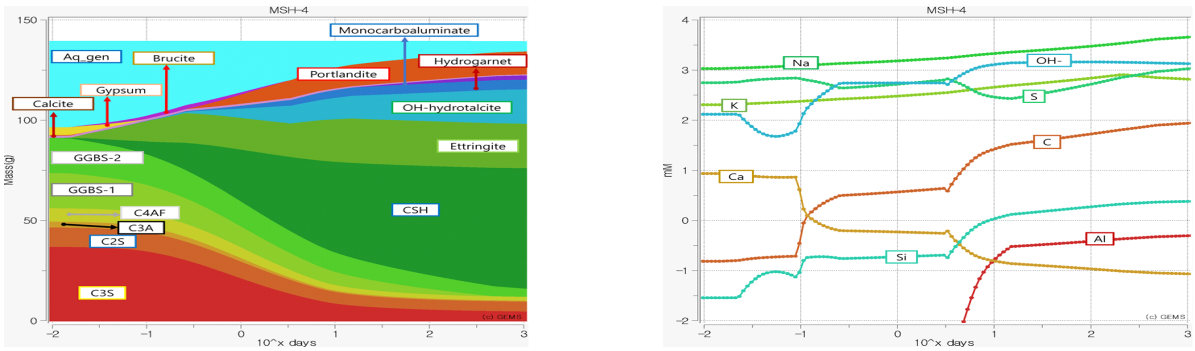
(다) 열역학적 모델링 프로그램(GEMS)을 활용한 무기계 혼합재료의 수화생성물 모델링 기술

① 열역학적 모델링을 위한 무기계 혼합재료의 정규화

- 열역학적 모델링에 사용된 무기계 혼합재료의 정보를 구성하기 위해 무기계 혼합재료의 물리적, 화학적 특성을 분석하고 Boque equation 등을 이용하여 정규화하였으며, 정규화된 정보는 열역학적 모델링 프로그램에 Input data로 사용되었음.

② 열역학적 모델링 프로그램(GEMS)을 이용한 수화생성물 및 공극 용액 농도 정량화

- 정규화된 Input data를 GEMS에 적용하여 무기계 혼합재료의 종류 및 혼입량에 따른 재령 별 미수화 결합재 및 수화생성물, 공극 내부에 존재하는 이온의 종류 및 농도를 예측하였음. 균열 발생 시기 별로 자기치유에 유리한 상태로 구성될 수 있는 무기계 혼합재료 활용 최적 자기치유 배합비를 구성하는데 열역학적 모델링을 이용하였음.



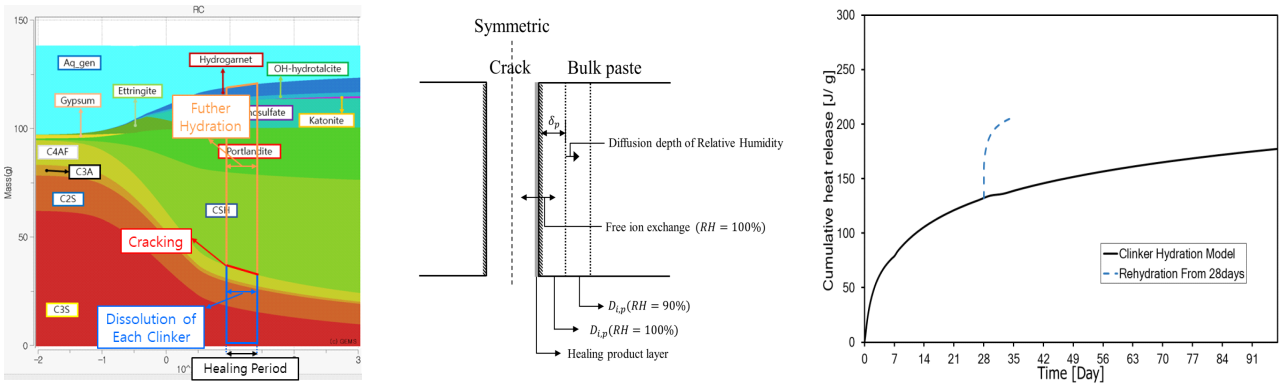
(a) 미수화 반응물 및 수화생성물 모델링 (b) 공극 용액 내 이온 농도 모델링

그림 3.1.20 열역학적 모델링(GEMS)를 통한 수화생성물 및 공극 내 이온 농도 예측

(라) 균열 자기치유 반응 모델링 기술

① 미수화 무기계 자기치유 소재의 2차 수화반응 모델링

- 자기치유 생성물은 균열 용액에서 이온의 침전 반응에 의해 생성되는데, 균열의 이온은 (1) 미수화 결합재로부터 용해된 이온, (2) 공극 용액으로부터 균열로 이동한 이온으로 구성됨. 미수화 결합재는 운동학적 모델에 따라 치유 기간에 해당하는 만큼 용해되며, 공극 용액 내부 이온은 확산에 의해 균열로 이동하는데, 이때 상대 습도의 차이에 의해 확산 속도가 결정됨.
- 균열로 용해된 이온의 종류 및 농도를 정량화하기 위해 GEMS와 운동학적 모델을 결합하여 미수화 결합재로부터 용해된 이온의 농도와 GEMS와 상대습도 이론 그리고 Isothermal calorimetry를 통해 균열에서 용해되는 이온의 농도 및 속도를 계산하였음(그림 3.1.21).

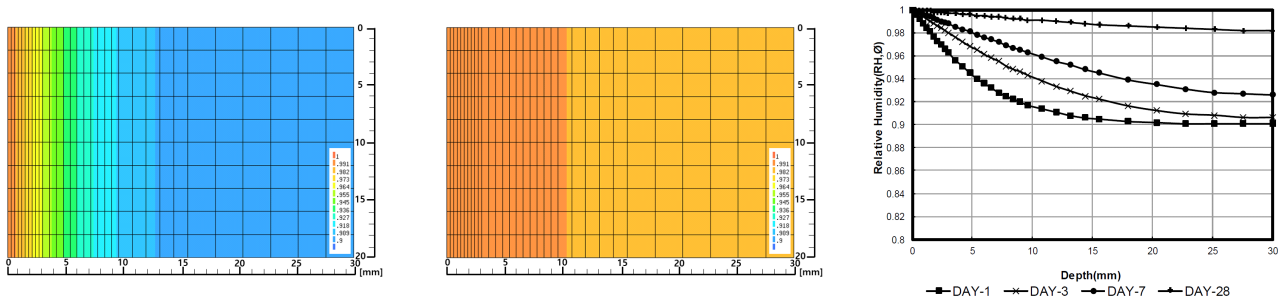


(a) 재령 별 미반응 바인더 정량 분석 (b) 상대습도 차이에 따른 확산 특성 (c) Further hydration에 의한 발열량 모델링

그림 3.1.21 균열면에서의 자기치유 모델링을 위한 수화 반응 모델 및 이온 확산 모델

② Ion diffusion modelling을 위한 상대습도 해석

- 3D 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 균열 발생 시점에 따른 깊이 별 상대 습도 분포를 조사하였으며, 자기치유 기간이 증가함에 따라 내부의 상대습도가 증가하는 것을 확인하였음.

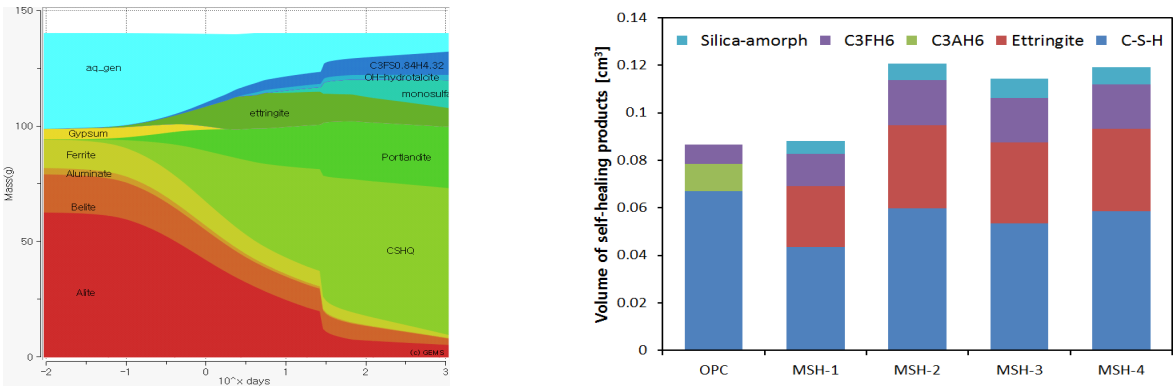


(a) 치유 기간 1일의 상대습도 분포 (b) 치유 기간 28일의 상대습도 분포 (c) 깊이에 따른 상대습도 분포

그림 3.1.22 치유 기간 및 깊이에 따른 상대습도 분포

③ 균열 자기치유 모델링 기술을 활용한 생성물 정량 분석

- 그림 3.1.23은 자기치유 모델링 기술을 통해 예측한 치유 생성물의 정량 평과 결과임. 그림 3.1.23(a)는 클링커 바인더를 20% 치환한 시편이 재령 28일에 균열이 발생하는 경우 생성물의 양을 GEMS를 통해 예측한 결과로 균열 발생 이후 portandite와 CSH가 증가하는 것으로 나타났음. 그림 3.1.23(b)는 GGBFS의 분말도 및 결정촉진제의 혼입량에 따른 자기치유 생성물의 부피 예측 결과임. 치유 물질의 부피를 저 분말도의 GGBFS와 결정촉진제(SO_4 공급재료)의 혼입 시 ettringite 생성에 의해 자기치유 생성물의 부피가 증가하는 것을 확인함.
- 자기치유 모델링 기술을 통해 무기계 혼합재료의 분말도 및 배합비에 따른 자기치유 생성물의 예측이 가능하였으며, 자기치유성능을 최적화하는데 이용할 수 있을 것으로 판단됨.



(a) 균열 발생(28일) 이후 자기치유에 의한 부피 증가 (클링커 바인더 20% 치환)

(b) GGBFS 및 결정촉진제의 혼입량 별 치유 물질의 부피

그림 3.1.23 자기치유 모델링을 통한 치유 생성물 예측

- 균열 면 2차 수화 반응 모델링을 통해 무기계 혼합재료 활용 자기치유 배합비 및 균열 발생 시기, 자기치유 기간에 따라 생성되는 자기치유 물질이 종류 및 부피를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였음. 개발 프로그램은 소프트웨어(프로그램-6)로 등록하였음.



(3) 기능성 폴리머 적용을 통한 무기혼합재 활용 자기치유성능 향상 기술

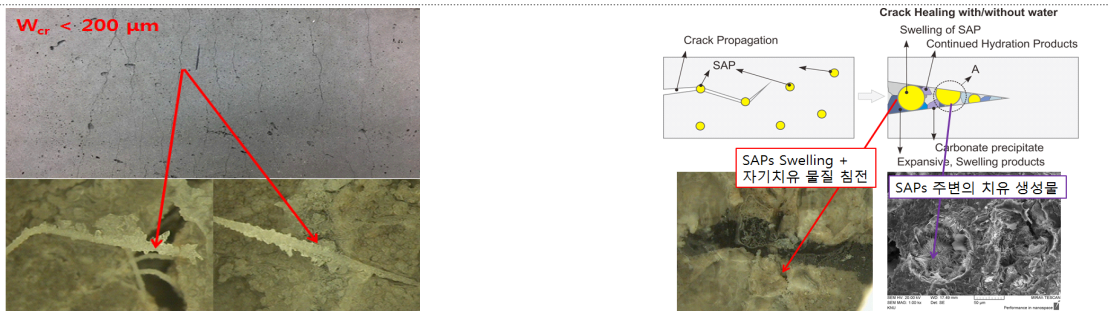
(가) 핵심 기술 개요

- 무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 기술은 water flow test로 평가할 때 250~300 μm의 균열을 치유할 수 있음. 기능성 폴리머는 콘크리트의 균열폭을 감소시키거나, 균열의 일부를 급속하게 실링하여 무기 혼합재와 복합 활용하는 경우 치유성능을 향상시킬 수 있음.
- 기능성 폴리머인 PVA 섬유 및 고흡수율 폴리머(SAPs)와 무기계 혼합재료를 복합 활용하는 경우 자기치유 메커니즘을 분석하고, 실험 분석을 통해 최적 자기치유 배합을 도출하였음.

(나) PVA fiber와 무기계 혼합재료를 복합 활용한 자기치유 콘크리트 기술

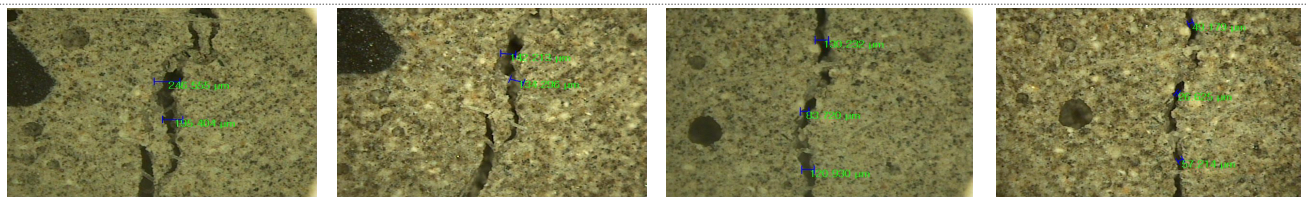
① PVA fiber의 혼입에 따른 균열 제어 및 자기치유성능 평가

- 휨 시험체(10×100×400 mm)를 이용하여 PVA 섬유 혼입율(0.5~2.0%)에 따른 균열 제어 성능을 검토한 결과 PVA 섬유 혼입율이 1.50%, 2.00%인 경우 균열폭을 각각 250 μm, 150 μm 이하로 제어하였음. Crack closing test를 통한 자기치유성능 평가 결과 OPC의 경우 자기치유에 의해 100 μm까지 균열을 치유하는 것을 확인하였음.



(a) PVA 섬유 + 무기계 소재의 자기치유 메커니즘 (b) SAPs + 무기계 소재의 자기치유 메커니즘

그림 3.1.24 무기계 혼합재료 활용 자기치유 콘크리트 기술 개요



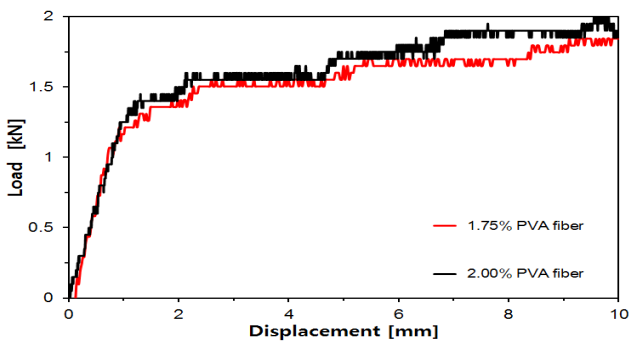
Initial Crack Width Self - healing (28 days) Initial Crack Width Self - healing (28 days)

(a) PVA 섬유 혼입율 1.5% (b) PVA 섬유 혼입율 2.0%

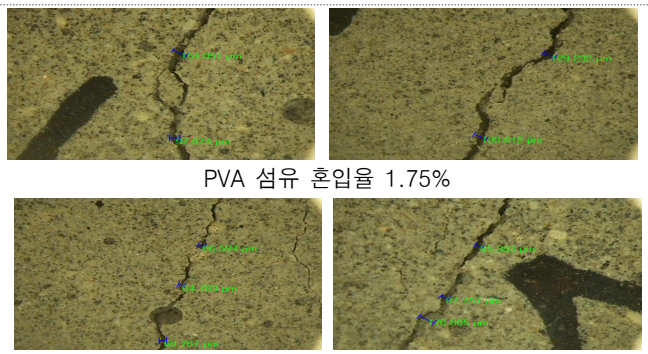
그림 3.1.25 PVA 섬유 혼입율에 따른 균열 제어 및 자기치유성능 평가

- PVA 섬유 복합 활용 기술은 Engineered Cementitious Composites (ECCs) 배합을 기반으로 무기계 혼합재료를 결합재료 사용하는 것이 실용화의 측면에서 유리할 것으로 판단되어, ECCs 기반으로 역학적 성능 및 균열 제어 성능, 섬유 분산성, 작업성 등을 고려한 최적 섬유 혼입량과 무기계 혼합재료 치환량을 선정하기 위한 연구를 수행하였음.

- 클링커 바인더 및 결정촉진제의 사용으로 인해 PVA 섬유 혼입율이 2.00%인 경우 섬유 분산성 및 작업성을 확보하기 어려웠음. 역학적 성능 평가 결과에서도 이러한 영향에 의해 섬유 혼입량이 1.75%인 경우와 2.00%인 경우 유사하게 나타났으며, PVA 섬유 혼입율에 다른 균열 제어 성능 검토 결과 PVA 섬유 혼입율이 1.75% 이상인 경우 2.00%인 경우와 유사한 균열 제어 성능을 나타냈음. 따라서 PVA 섬유 혼입율을 1.75%로 결정하였음.



(a) PVA 섬유 + 무기계 소재의 자기치유 메커니즘



PVA 섬유 혼입율 1.75%

PVA 섬유 혼입율 2.0%

(b) SAPs + 무기계 소재의 자기치유 메커니즘

그림 3.1.26 최적 섬유 혼입율 도출을 위한 실험 수행

② 복합 소재 활용 자기치유 콘크리트 배합 도출 및 성능 평가

- 표 3.1.5는 PVA 섬유 혼입량이 1.75%인 자기치유형 ECCs 배합(안)으로 작업성 및 PVA 섬유의 분산성을 고려하여 클링커 골재는 사용하지 않는 배합을 도출하였음.
- 그림 3.1.27은 KCL-SHF을 이용하여 제작한 시편을 이용한 자기치유성능 평가 결과이며, 재령 28일 균열 유발 시 균열폭을 150 μm 이하로 제어하는 것을 확인하였으며, KCL-SHF 배합은 28일 동안 균열을 치유하였음.

표 3.1.5 PVA 섬유와 무기계 혼합재료 복합 활용 자기치유 배합 (안)

Labels	재료 사용량 (g)									
	Water	OPC	GGBFS	CAs	클링커 바인더	규사7호	규사8호	감수제	증점제	소포제
KCL-SHF	375	517	208	25	83	737	369	1.67	1.5	0.83

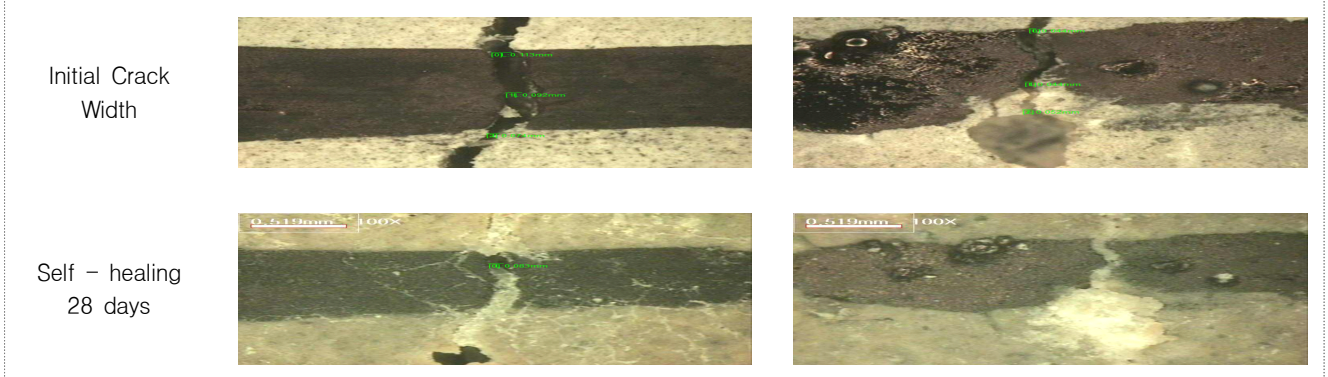


그림 3.1.27 복합 소재 활용 자기치유 배합을 활용한 균열 자기치유성능 평가

나. 스마트 폴리머 활용 균열 자기치유 기술 개발

(1) 콘크리트 pH 응답형 스마트 폴리머 확보 기술

(가) pH 응답형 스마트 폴리머 확보 기술 개요

- 콘크리트 내부 및 유입수 특성(pH, 이온 등)을 고려하여, 급속(수분 이내) 자기치유성능을 최적화할 수 있는 스마트 폴리머를 확보하는 기술임.
- 재령 1년 이내 발생하는 폭 0.3 mm 이하 균열의 유출수량을 15분 이내 60% 이상 감소함.

: 스마트 폴리머에 의한 급속 균열 자기치유 메커니즘을 분석하여, 급속 자기치유 효과를 발현하기 위해 요구되는 스마트 폴리머의 특성을 도출하였음.

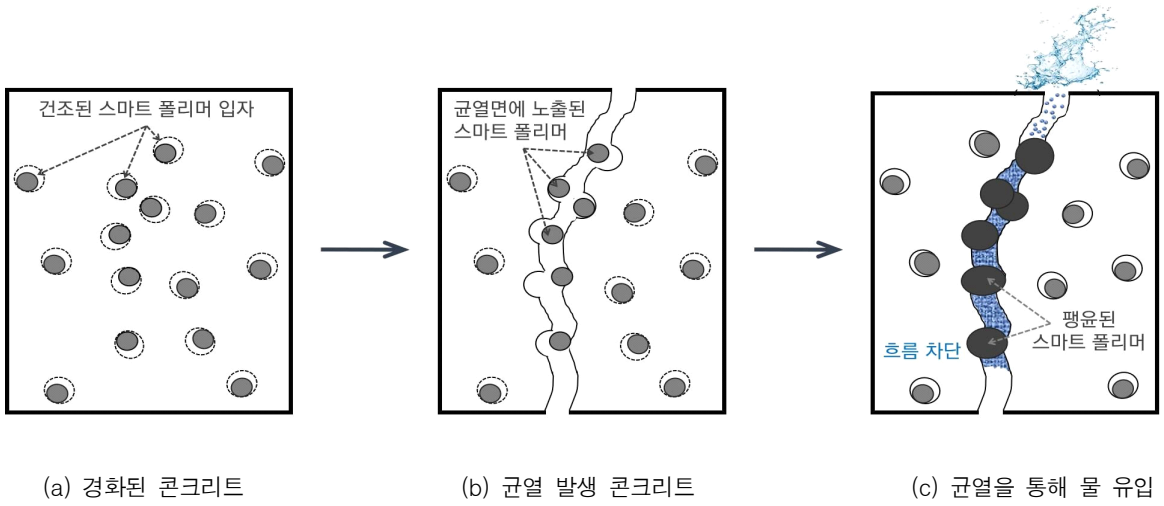
: 요구 특성 평가를 통해 상용되는 스마트 폴리머 중 최적 스마트 폴리머를 선정하였으며, 상용 스마트 폴리머의 한계를 극복할 수 있는 스마트 폴리머 제조 기초 기술을 확보하였음.

: 균열 발생 후 최초로 유입되는 물에 의한 급속 자기치유성능을 평가하였으며, 균열을 통한 유량 감소율을 예측할 수 있는 모델을 제시하였음.

(나) 스마트 폴리머 급속 자기치유 메커니즘 및 평가 방법 정립

① 균열 내 스마트 폴리머 팽윤 거동 및 자기치유 메커니즘 분석

- 콘크리트에 혼입된 스마트 폴리머 입자들은 타설 직후 배합수에 의해 최초 팽윤되며, 이후 콘크리트가 점차적으로 경화됨에 따라 초기에 형성된 공극 내에서 건조됨(그림 3.2.1(a)).
- 건조된 스마트 폴리머 입자들은 균열 발생에 따라 균열면에 노출됨(그림 3.2.1(b)).
- 균열을 통해 외부로부터 물이 유입되면, 균열면에 노출된 스마트 폴리머 입자들은 유입수를 흡수하여 팽윤하며, 그에 따라 균열을 통한 물의 흐름이 수 분 이내에 급속하게 차단될 수 있음(그림 3.2.1(c)). → 급속 균열 자기치유 효과 발현



(a) 경화된 콘크리트 (b) 균열 발생 콘크리트 (c) 균열을 통해 물 유입

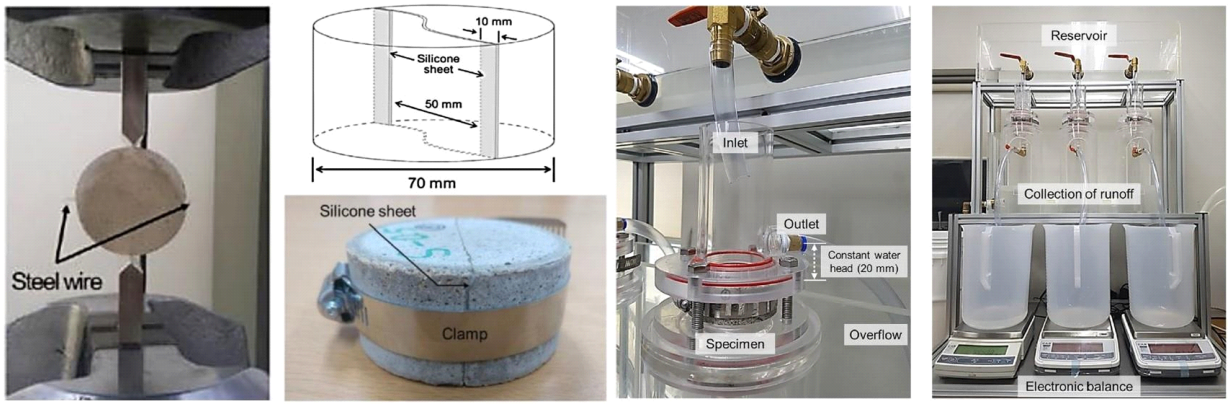
그림 3.2.1 스마트 폴리머 급속 균열 자기치유 메커니즘

② 스마트 폴리머 활용 자기치유성능 평가 방법 정립

- 기존 연구에서 스마트 폴리머 자기치유성능 분석을 위해 주로 사용된 평가 방법을 분석하였으며, 스마트 폴리머 자기치유성능 분석에 적합한 평가 방법을 선별하였음.
- 투수시험이 가장 일반적인 자기치유 평가 방법이며, 다양한 방법론이 적용되고 있음.

: 본 기술에서는 스마트 폴리머의 급속한 팽윤에 따른 급속 자기치유성능을 균열폭에 따라 정량적으로 평가하고자 했기 때문에, 휨 균열에 비해 상대적으로 균열폭 제어가 용이한 관통 균열을 유발하여 투수시험을 실시하였음.

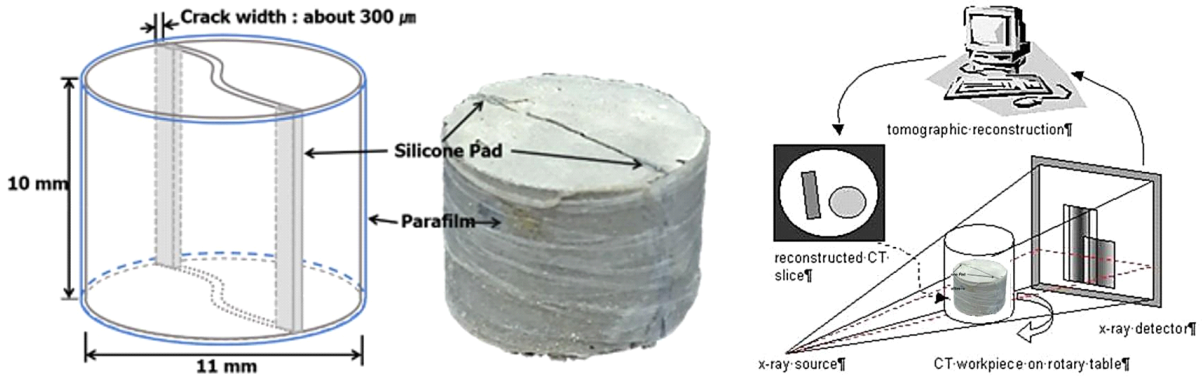
: 또한, 스마트 폴리머의 팽윤에 따른 영향을 분석하기 위해 시편을 수중에 포화시키지 않은 상태로 투수시험을 진행하였으며 균열을 통한 단위 시간 당 유출수량을 측정하였음.



(a) 관통 균열 유발 (b) 균열폭 제어 (c) 정수두 투수시험 방법

그림 3.2.2 투수시험 개요

- 또한, 본 기술에서는 투수시험 결과의 타당성을 입증하기 위해, X-ray CT 이미지 분석을 통해 투수시험 전/후 균열 내 스마트 폴리머의 팽윤 거동, 자기치유 생성물의 분포 및 그로 인한 균열 부피의 변화 등을 분석하였음.



(a) 관통 균열 시편 제작 (b) X-ray 단층 촬영 방법

그림 3.2.3 X-ray CT 이미지 분석 실험 개요

- 그밖에도 흡수율 시험, 강도 회복 시험 등을 통해 자기치유 효과를 분석하였음.

(다) 급속 자기치유 기능성 스마트 폴리머 확보 기술

① 요구 성능 평가를 통한 상용 스마트 폴리머 선정

- 콘크리트에 혼입된 스마트 폴리머 입자들은 배합수에 의해 1차적으로 팽윤/건조되고, 균열 이후 유입수에 의해 2차/반복적으로 팽윤됨. 이때, 배합수에 의한 팽윤도가 높을수록 시멘트 매트릭스 내에 보다 큰 공극을 형성하여 강도 저하가 증가할 수 있음. 따라서 본 기술에서는 실험을 통해 배합수에 의한 팽윤도 대비 유입수에 의한 팽윤도가 높고, 배합수에 의한 최초 팽윤 이후 유입수에 의한 반복 팽윤 성능이 우수한 스마트 폴리머를 선정하였음.

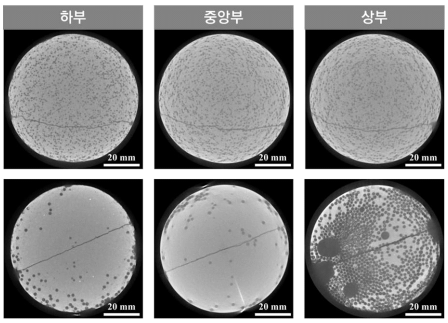
  : 균열 유입수(중성빗물 가정)에 의해 균열폭 0.5 mm 이하까지 실링 가능하도록 선정함.

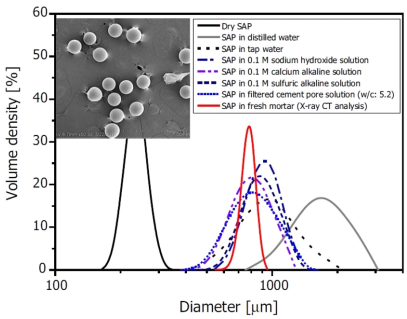
- 급속 자기치유 측면에서 스마트 폴리머의 팽윤 속도는 빠를수록 유리함. 따라서 실험을 통해 스마트 폴리머의 초기 및 반복 팽윤시의 최대 팽윤 속도가 빠른 스마트 폴리머를 선정함.

  : 반복 팽윤에 따라 최대 팽윤 속도가 감소하더라도 약 20분 이내 90% 이상 팽윤하도록 선정함.

- 콘크리트 내 스마트 폴리머의 분산성이 좋을수록 자기치유 효율이 향상되므로, 이미지 분석을 통해 입자 크기에 따른 분산성을 평가하여 적절한 입자 크기를 결정하였음.

SAP	Max absorption capacity (g/g)			Swelling time[a] [min]	
	FCPS (1^{st})	DW (1^{st})	FCPS (1^{st}) –DW (2^{nd})[b]	1^{st}	2^{nd}
S1	48.8	238.3	160.3	<10	<20
S2	29.6	138.1	81.8	<10	<20
S3	49.4	244.3	158.6	<30	<60
S4	20.7	106.6	47.6	<10	<20
S5	60	263.6	186.9	<40	<40
S6	54.4	323.9	54.2	<15	<40
S7	35.5	258.8	46.1	<20	<60
S8	16.6	88.7	36.7	<10	<30
S9	24.1	93.1	36.4	<10	<30
S10	28.3	133.3	50.1	<10	<60



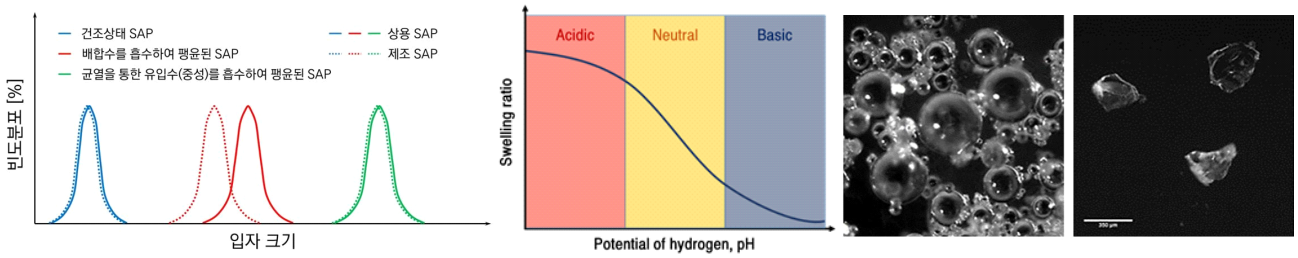


(a) 팽윤도/속도 평가 (b) 입자크기에 따른 분산성 평가 (c) 선정 폴리머/팽윤 특성

그림 3.2.4 급속 자기치유를 위해 요구되는 성능 평가를 통한 스마트 폴리머 선정

② 스마트 폴리머 제조 기초 기술 확보

- 스마트 폴리머는 시멘트계 재료 내부에 다수의 공극을 형성할 수 있으며(그림 3.2.1(a)), 이로 인해 역학적 성능이 저하되거나 균열 부피가 증가되는 부분이 문제점으로 지적되고 있음.



(a) 콘크리트 내 팽윤 특성 (b) 제조 스마트 폴리머 pH에 따른 팽윤 특성, 입자 크기 및 형상

그림 3.2.5 상용 및 제조 스마트 폴리머의 팽윤 특성 및 제조 스마트 폴리머 형상

- 그러나, 자기치유 소재로 스마트 폴리머를 활용한 종래 다수의 연구 및 기술에서는 문제 해결을 위한 시도 없이 단순히 균열 지수 효과 측면에만 초점을 맞추고 있음.
- 따라서 본 기술에서는 종래 기술의 문제점을 개선하기 위하여 타설 직후 배합수에 의한 스마트 폴리머의 팽윤을 억제함으로써 형성되는 공극에 의한 역학적 특성 손실을 저감할 수 있고, 동시에 균열을 통한 유입수(중성 및 약산성)에 의해 급속 자기치유 효과를 나타낼 수 있는 스마트 폴리머의 제조기술을 확보하고자 하였음.

  : 특허 출원 및 등록(특허-5)을 통해 시멘트계 내 환경 조건에서 팽윤이 억제될 수 있으며 급속 균열 자기치유 특성을 갖는 스마트 폴리머(아민계열 및 양이온성) 제조 기술을 확보함.



특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number 제 10-1741136 호
출원번호 Application Number 제 10-2016-0027182 호
출원일 Filing Date 2016년 03월 07일
등록일 Registration Date 2017년 05월 23일
발명의 명칭 Title of the Invention
시멘트 균열 치유를 위한 pH 응답형 팽창 특성 제어 가능한 고흡수율 폴리머 및 이의 제조방법

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2018.11.14
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무)
출 원 번 호	10-2018-0140190 (접수번호 1-1-2018-1133928-88)
출원인 명칭	중앙대학교 산학협력단(2-2004-038530-5) 외 1명
대 리 인 성 명	특허법인세원(9-2011-100121-1)
발 명 자 성 명	최성철 이종휘 이광명 홍근태 이서린 심예원
발 명 의 명 칭	급속 균열 셀프실링 특성을 가진 양이온성 고흡수율 폴리머를 포함한 자기치유 개선용 시멘트 결합재 조성물 및 양이온성 고흡수율 폴리머의 제조방법

(라) 스마트 폴리머 활용 급속 자기치유 배합 기술

① 스마트 폴리머 급속 균열 자기치유 기초 배합 도출

- 본 기술에서는 스마트 폴리머가 혼입된 배합이 스마트 폴리머가 혼입되지 않은 기준 배합과 동일한 유동성을 갖게 하여, 궁극적으로 동일한 모세관 기공 구조를 형성하게 하고자 함.
- 스마트 폴리머의 고른 분산을 위해 시멘트와 1분간의 건비빔 이후 ISO 679 모르타르 믹싱 기준에 따라 배합을 진행하였으며, 스마트 폴리머를 포함한 배합에는 응결(setting) 전에 스마트 폴리머가 팽윤하는 데 필요한 양의 물을 산정하여 첨가하였음.

  : KS L 5111 기준에 부합하는 시험기를 사용하여 낙하를 시키지 않은 상태로 플로우(flow)를 측정하였음. → 스마트 폴리머 혼입 배합이 스마트 폴리머 미혼입 기준 배합과 동일한 유동성(180 mm)을 갖도록 추가 배합수 결정

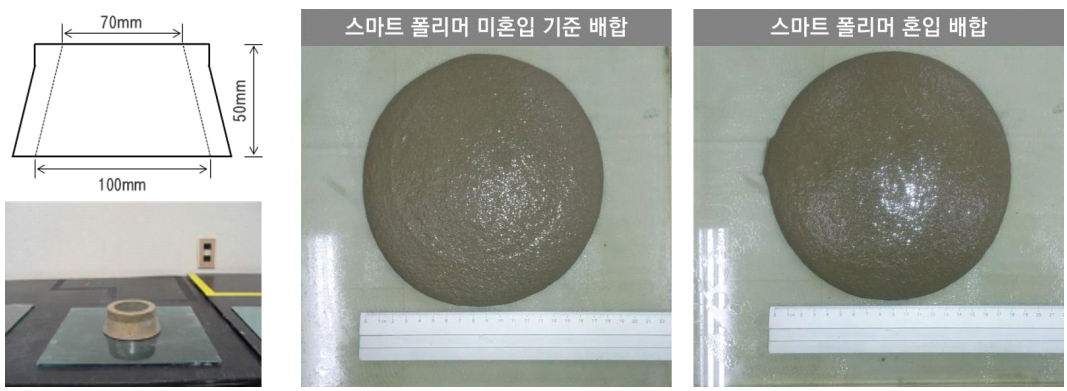
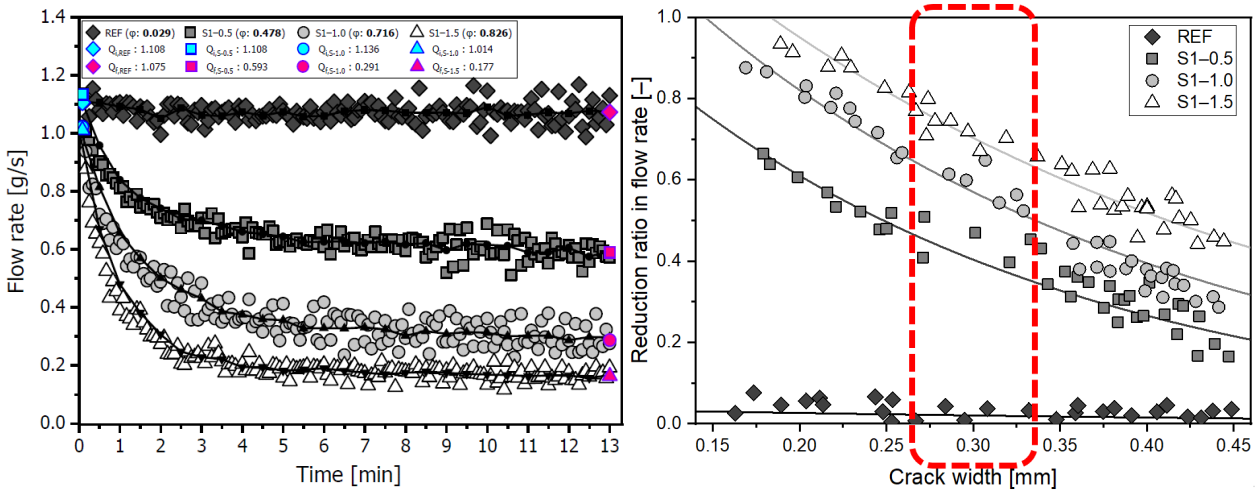


그림 3.2.6 스마트 폴리머 미혼입/혼입 배합의 유동성(flow) 평가

② 스마트 폴리머 급속 균열 자기치유성능 평가

- 실험을 통해 선정된 스마트 폴리머 함량 (시멘트 질량 대비 0.5~1.5%) 및 균열폭에 따른 급속 자기치유성능을 분석하고, 본 기술에서 설정한 성능 목표의 만족 여부를 평가하였음.
- 정수두 조건의 투수시험방법(그림 3.2.2)을 이용하여 재령 28일 균열 발생 이후 최초로 침투하는 유입수의 균열을 통한 유출수량을 측정하였음.

  : 실험은 유입수로 증류수를 사용하여 온도 20±1 ℃, 상대습도 50%의 통제된 환경 조건에서 진행하였으며, 균열을 통한 유출수량을 5초 간격으로 측정하였음.



(a) 시간에 따른 균열을 통한 유량 변화 (b) 균열폭 & 함량에 따른 15분 이내 투수감소율

그림 3.2.7 투수시험 결과 (균열을 통한 유량 변화 및 투수감소율)

- 투수시험 결과, 스마트 폴리머 미혼입 기준 시편(REF)의 경우, 전체 측정 기간에 걸쳐 균열을 통해 유출되는 유량이 거의 일정하게 나타남.
- 반면 스마트 폴리머 혼입 시편(S-series)의 경우, 균열 내 스마트 폴리머가 유입수를 흡수하여 급속하게 팽윤함에 따라 균열을 통한 유출수량은 약 5분 이내에 급격히 감소하였으며, 스마트 폴리머 함량이 증가할수록/균열폭이 작을수록 감소폭은 더 크게 나타남.
- 균열폭 0.3 mm 기준 유량 감소율 [$\frac{Q_i - Q_f}{Q_i} \times (\%)$, Q_i : 초기 유량(■), Q_f : 수렴 유량(■)]

  : REF = 약 4% 이내, S-0.5: 약 50% 이상, S-1.0: 약 60% 이상, S-1.5: 약 70% 이상

③ 균열면 스마트 폴리머의 팽윤 거동 분석

- X-ray CT 및 SEM 이미지 분석을 통해, 균열면에 노출된 스마트 폴리머 입자들이 외부로부터 유입되는 물을 흡수하여 급격히 팽윤하는 거동을 분석하여 투수시험 결과(균열을 통한 유량의 급속한 감소)의 타당성을 검증함.
- 스마트 폴리머의 유입수에 의한 팽윤 거동은 두 가지 유형으로 나타남. 일부 입자들은 균열 발생에 따라 찢어져 균열면 양쪽 공극 벽면에 부착한 상태로 팽윤하며(그림 3.2.8(1)), 일부 입자들은 찢어지지 않고 온전한 상태로 팽윤함(그림 3.2.8(2)).

- 균열면의 스마트 폴리머는 주위 경화된 시멘트 매트릭스의 구속으로 인해, 시멘트계 재료에 포함되지 않은 자유 상태에서의 유입수에 의한 팽윤 한계까지가 아닌 균열을 포함한 공극 크기까지만 팽윤함.

  : 균열폭 및 스마트 폴리머 함량을 변수로 하여 최초 유입수에 의한 급속 자기치유 성능 및 스마트 폴리머의 팽윤 거동에 관한 SCI(E) 논문(SCI-18)을 발표하였음.

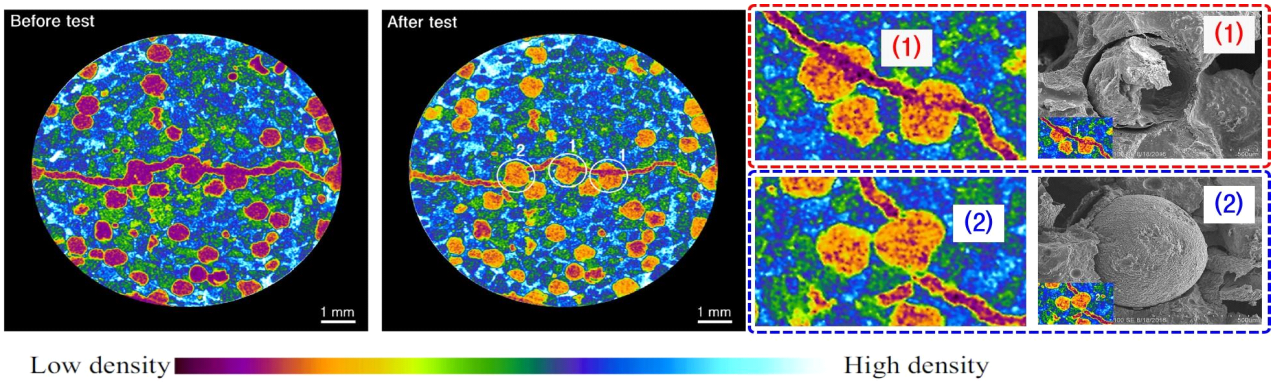


그림 3.2.8 유입수에 의한 균열 내 스마트 폴리머의 팽윤 거동

(마) 스마트 폴리머 균열 자기치유 모델링

① 스마트 폴리머 급속 자기치유성능 예측 모델링

- 균열 내 스마트 폴리머의 팽윤에 따른 균열 충진률 및 그에 따른 유량 감소율을 예측할 수 있는 모델을 제안함.

  : 종래 연구와 달리 스마트 폴리머의 실제 팽윤 거동을 고려하였음.

② 실험값과의 비교를 통한 모델링 검증 및 개선

- 투수시험을 통한 실측값과 모델을 통한 예측값의 비교를 통해 모델링을 검증 및 개선하였음.

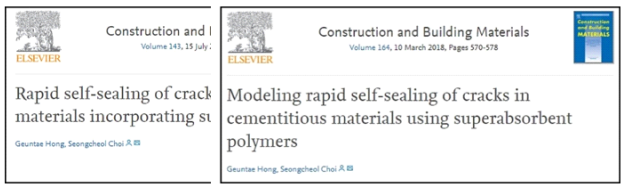
  : 균열폭 및 스마트 폴리머 함량에 따라 급속 자기치유성능(균열 충진률 및 유량 감소율)을 예측할 수 있는 모델링에 관한 SCI(E) 논문(SCI-35)을 발표하였음.

③ 급속 자기치유성능 예측 소프트웨어 개발

- 스마트 폴리머 특성 및 배합 조건(물/시멘트 비, 모래/시멘트 비 등)에 따라 급속 자기치유성능을 예측할 수 있는 모델링 소프트웨어를 개발하였으며 연구 성과로 등록하였음.



(소프트웨어 등록 - 급속 자기치유 성능 예측)



(SCI(E) - 급속 균열 자기치유 정량적 평가 / 모델링)

(2) 장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술

(가) 장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 기술 개요

실제 콘크리트 구조물이 일반적으로 노출되는 환경조건(습윤/건조 반복)에서 스마트 폴리머의 수분 공급으로 인한 장기(수 일 이내) 자기치유성능을 최적화하기 위한 기술임.

- 재령 14일 이내 발생하는 폭 0.3 mm 이하 균열의 유출수량이 28일 이내 90% 이상 감소함.

: 스마트 폴리머 자체의 장기 팽윤 거동 특성 및 장기 균열 자기치유 메커니즘을 분석하였음.

: 스마트 폴리머 혼입 시멘트계 재료의 급속 균열 자기치유 히스테리시스 거동을 분석하였으며, 장기 균열 자기치유성능을 평가하였음.

: 균열 이후 노출 조건에 따른 스마트 폴리머의 역할을 정립하고 역학적 특성을 분석하였음.

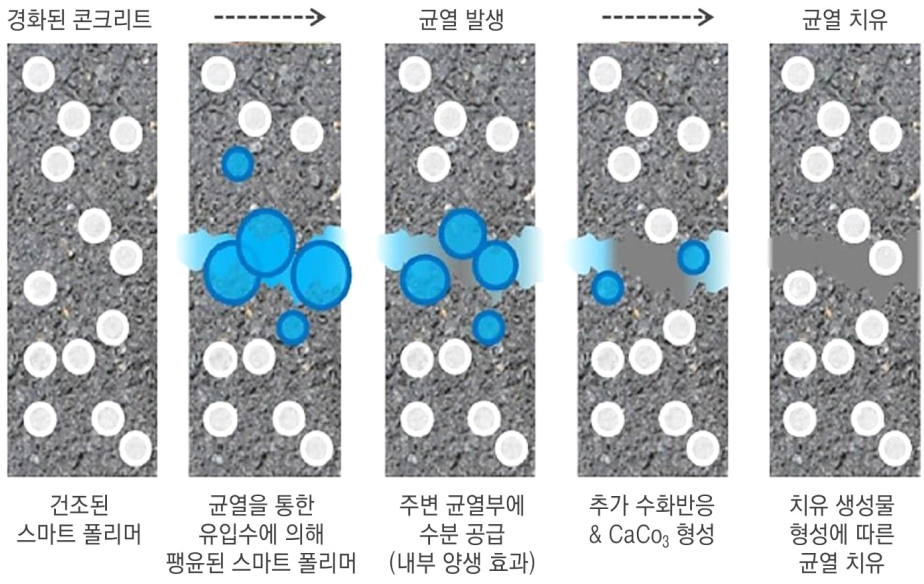


그림 3.2.9 스마트 폴리머 장기 균열 자기치유 메커니즘

(나) 스마트 폴리머 장기 자기치유 메커니즘 정립

① 스마트 폴리머 장기 팽윤 거동 특성 분석

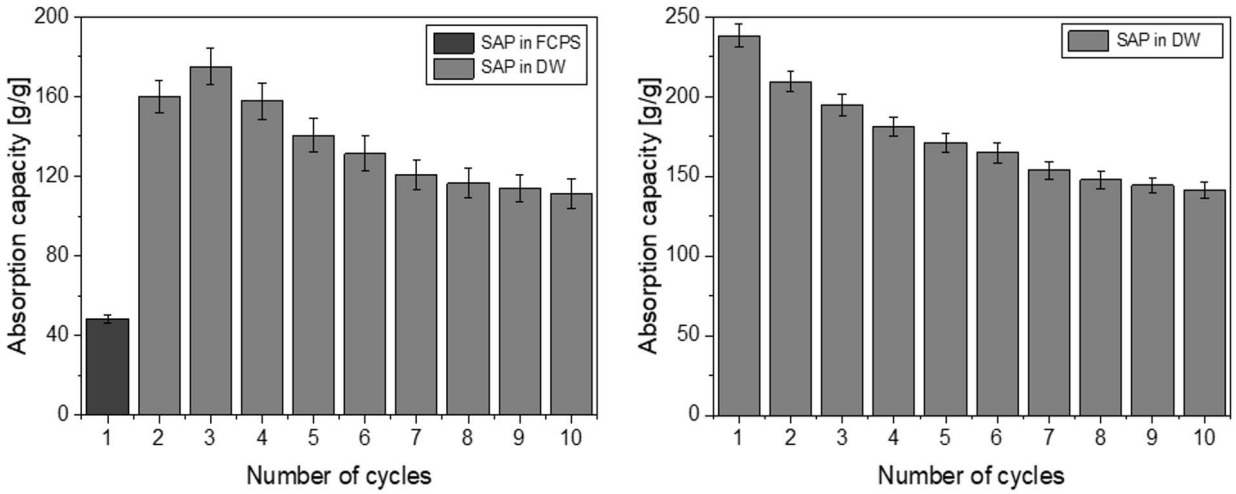
- 일반적으로 콘크리트는 습윤/건조가 반복되는 환경 조건에 노출되므로, 스마트 폴리머가 습윤 조건마다 반복적으로 팽윤하고 건조 조건마다 주변 균열부에 수분을 공급하여 장기적으로 자기치유 효과가 향상될 수 있는지에 대한 확인이 요구됨. 이는 실용화 관점에서 스마트 폴리머의 자기치유 소재로서의 적합성을 판단하기 위함임.
- 이에 따라 본 기술에서는 스마트 폴리머의 장기 내구성을 평가하기 위해, 티백 실험(tea-bag test)을 통해 습윤/건조 반복 조건(습윤 20분, 건조 47시간 40분)에서 스마트 폴리머의 반복적인 팽윤/수축 거동에 의한 흡수율(g/g)*의 변화를 분석하였음.

※ 흡수율 = 팽윤된 스마트 폴리머의 무게 (g) / 건조 상태 스마트 폴리머의 무게 (g)

: 콘크리트에 혼입된 스마트 폴리머의 환경 조건을 모사하기 위해, 배합수로 FCPS(Filtered cement pore solution)을 사용하였고, 유입수로 DW(Distilled water)를 사용하였음.

※ 배합수에 의한 영향을 분석하기 위해, 유입수에 의해서만 반복 팽윤시의 흡수율도 측정함.

- 실험 결과 시멘트계 재료에 스마트 폴리머가 혼입될 경우, 배합수(FCPS)에 의한 최초 팽윤에 의해 팽윤 특성이 저하될 수 있는 것으로 확인됨(Ca^{2+} 복합체 형성). 그러나 흡수 용액이 유입수(DW)로 변경됨에 따라 Ca^{2+} 복합체가 분해되어 스마트 폴리머의 흡수율은 회복되는 것으로 나타남(그림 3.2.10(a)).
- 습윤/건조 반복 조건에서 스마트 폴리머가 팽윤/수축을 반복함에 따라 가수분해 및 용해 등이 발생하여 흡수율이 약간씩 저하될 수 있는 것으로 나타남(그림 3.2.10).
- 흡수율이 저하되더라도 스마트 폴리머는 지속적으로 유입수에 의해 우수한 팽윤 특성을 발현함.



(a) 배합수/유입수에 의한 반복 팽윤 (b) 유입수에 의한 반복 팽윤

그림. 3.2.10 습윤/건조 반복에 따른 스마트 폴리머의 흡수율 변화

② 스마트 폴리머 장기 균열 자기치유 메커니즘 분석

- 스마트 폴리머 혼입 시멘트계 재료가 균열 이후 지속적으로 물이 공급되는 조건에 노출된 경우

: 균열면의 스마트 폴리머 입자들이 팽윤된 상태를 유지하기 때문에, 유효 균열폭이 감소하여 팽윤된 스마트 폴리머 입자들 둘레로 치유물이 형성되기 용이함(그림 3.2.11).

- 스마트 폴리머 혼입 시멘트계 재료가 균열 이후 습윤/건조 반복 조건에 노출된 경우

: 스마트 폴리머 입자들이 건조 주기마다 균열면에 수분을 공급하여(내부 양생 효과) 치유물이 균열 내부에 집중적으로 형성되기 용이함(그림 3.2.11).

③ 노출 조건에 따른 균열 내 스마트 폴리머의 역할 정립

- SEM-EDS 분석 결과, 그림 3.2.11과 같이 균열 이후 노출 조건에 따라 치유물($CaCO_3$)이 스마트 폴리머 둘레 및 주위에 형성된 것으로 확인됨.

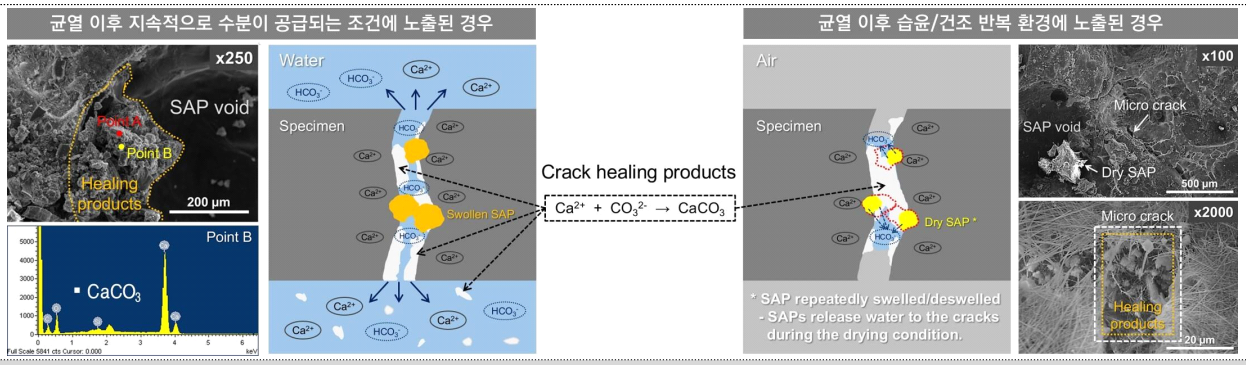


그림 3.2.11 균열 이후 노출 환경에 따른 스마트 폴리머의 장기 자기치유 특성

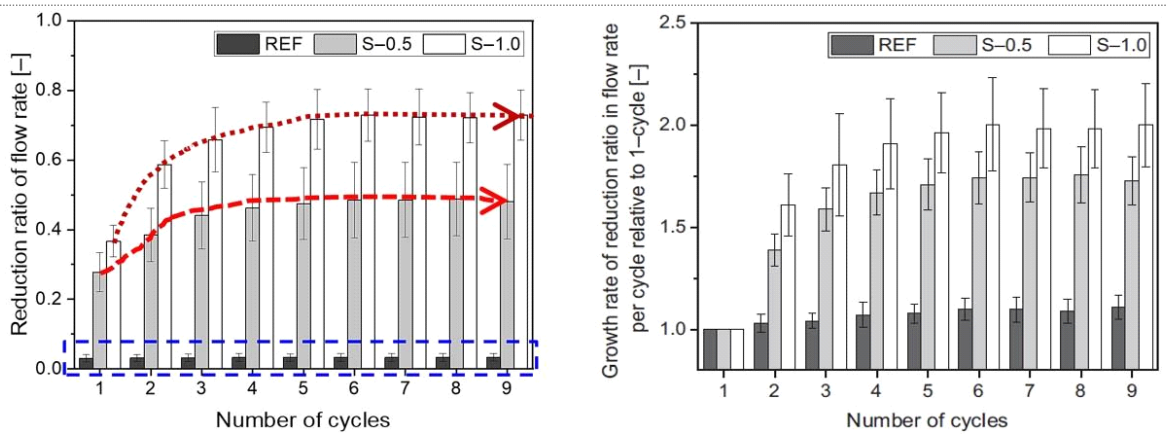
(다) 스마트 폴리머 장기 자기치유성능 향상 기술

① 스마트 폴리머 급속 자기치유 반복 성능 평가

- 자기치유 소재로 스마트 폴리머를 활용한 기존 연구에서, 급속 자기치유 효과가 일회성이 아닌 장기적인 관점에서 반복적으로 발현될 수 있는지에 대한 평가는 이루어지지 않았음.

  : 자기치유 콘크리트의 주목적이 균열을 통한 물의 흐름의 차단임을 고려할 때, 스마트 폴리머가 장기적인 측면에서 반복적으로 급속하게 효과를 나타낼 수 있는지에 대한 평가는 필수적임.

- 투수시험을 통해 약 0.4 mm의 균열이 발생한 시멘트계 재료에 포함된 스마트 폴리머의 반복 팽윤 거동 및 그에 따른 급속 균열 자기치유 히스테리시스 거동을 분석하였음(그림 3.2.2).



(a) 유량 감소율의 변화 (b) 1주기 대비 증가율

그림 3.2.12 습윤/건조 반복에 따른 균열을 통한 유량 감소율의 변화 및 증가율

- 스마트 폴리머가 혼입되지 않은 REF 시편의 경우, 전체 주기에 걸쳐 거의 일정한 유량 감소율을 나타냄. 반면, 스마트 폴리머가 0.5%, 1.0% 혼입된 S-0.5 및 S-1.0 시편의 유량 감소율은 습윤/건조 주기가 반복됨에 따라 점차 증가하다가 수렴하는 경향을 나타냄.

- 실험 결과 0.4 mm 이하 균열에 대해서는 선정 스마트 폴리머가 반복적으로 15분 이내 급속 자기치유 효과를 나타낼 수 있는 것으로 확인됨.

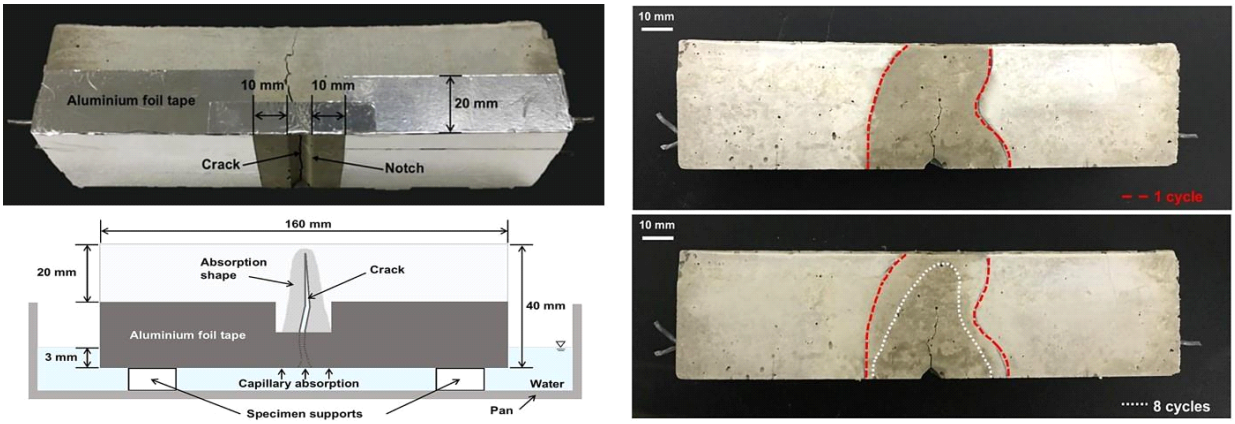
  : 스마트 폴리머의 급속 자기치유 반복 성능에 대한 내용으로 SCI(E) 논문(SCI-55)을 발표함.

② 스마트 폴리머 장기 균열 자기치유성능 평가

- 스마트 폴리머의 내부 양생 효과에 의한 추가 반응성(crystallization & further hydration) 분석
- 흡수율 시험(capillary absorption test)을 통해, 재령 7일 균열 발생 이후 습윤/건조(습윤 1시간: 온도 20±1 ℃, 건조 47시간: 온도 25±1 ℃, 상대습도 50%)에 따라 균열을 통한 흡수량의 변화를 측정하여, 스마트 폴리머에 의한 자기치유 효과를 분석함.

  : 실제 균열을 모사하기 위해 빔 형 페이스트 시편을 제작하여 휨 균열을 유발하였으며, 48시간 간격 (1주기)으로 1시간씩 균열면에 물을 공급함(그림 3.2.13(a)).
- 스마트 폴리머(0.5%)의 내부 양생 효과로 인해 균열 치유물이 형성되어, 단위 시간 당 균열을 통한 흡수량(g) 및 흡수 영역(mm^2)이 감소됨을 확인함(그림 3.2.13(b)).

  : 스마트 폴리머 함량이 증가할수록 흡수량 및 흡수영역 감소율은 증가함.

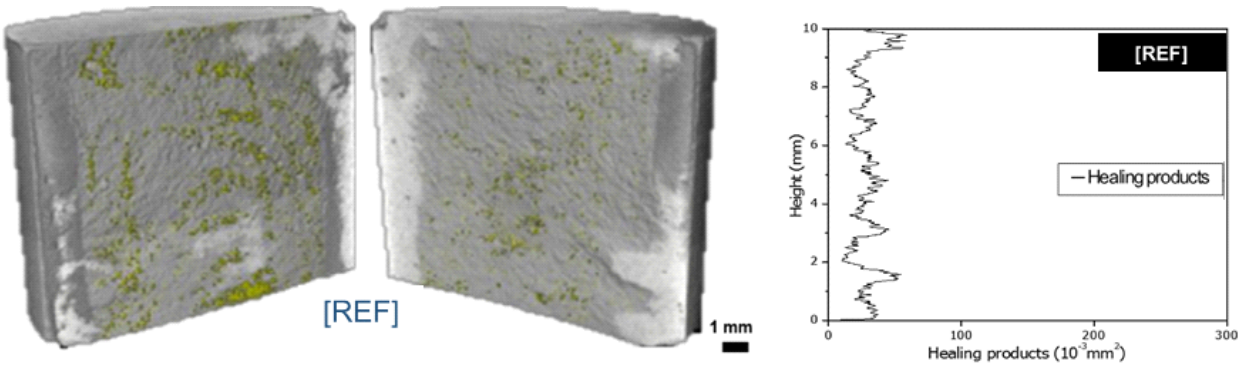


(a) 흡수율 시험 시편 및 방법 (b) 1주기 및 8주기 경과 후의 흡수 영역

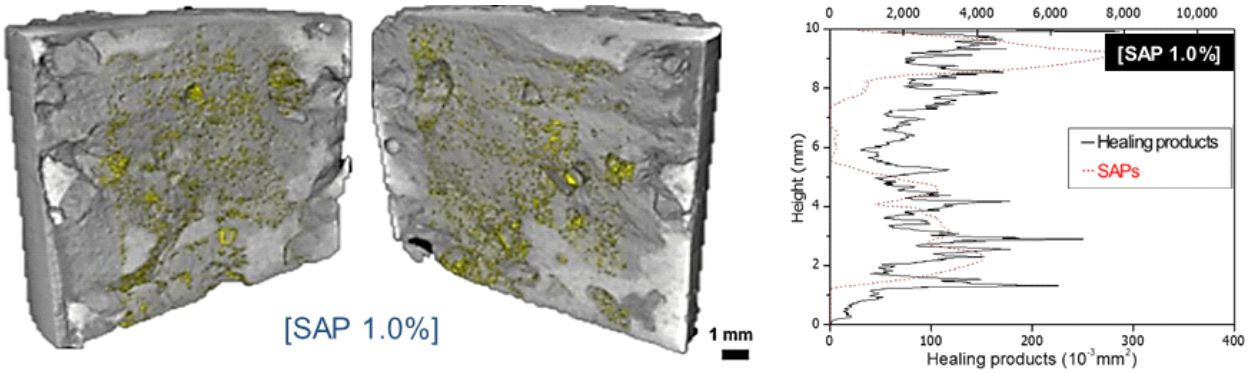
그림 3.2.13 흡수율 시험 개요 및 습윤/건조 반복에 따른 균열을 통한 흡수 영역 변화

- X-ray CT 분석 결과, 스마트 폴리머 혼입에 따라 치유 생성물(■)이 증가한 것으로 확인됨.

  : 재령 7일 0.3 mm 균열유도, 습윤/건조 반복 조건에서 치유재령 16일 경과 후
- 균열 내 치유 생성물은 스마트 폴리머 근처에서 더 집중적으로 형성됨.



(a) 스마트 폴리머 미혼입 기준 시편



(b) 스마트 폴리머 혼입 시편

그림 3.2.14 스마트 폴리머 미혼입/혼입 시편의 균열부 3차원 이미지

(라) 유사환경 대응 스마트 폴리머 자기치유성능 최적화

① 자기치유 배합 최적화 및 현장 적용성 검토

- 스마트 폴리머 혼입에 따른 기초 물성을 평가하여, 적정 혼입량을 검토하였음.

: 스마트 폴리머 함량이 증가할수록 그림 3.2.8과 같이 배합수에 의한 최초 팽윤에 의해 생성된 공극의 부피가 증가함에 따라, 스마트 폴리머 미혼입 기준 배합 대비 강도 감소율이 증가함.

※ 강도 감소율을 고려했을 때, 시멘트 중량 대비 최대 1% 이하의 혼입이 권장됨.

: 스마트 폴리머 1.0% 혼입시 기준 모르타르 배합 대비 건조 수축량이 20% 저감됨.

② 조기 발생 균열에 대한 장기 자기치유성능 평가

- 투수시험을 통해, 재령 7일 균열 발생(균열폭 0.34~0.42 mm) 이후 노출 조건(수중 및 습윤/건조 반복)에 따른 균열을 통한 유량의 변화를 측정하여 자기치유 효과를 분석함.

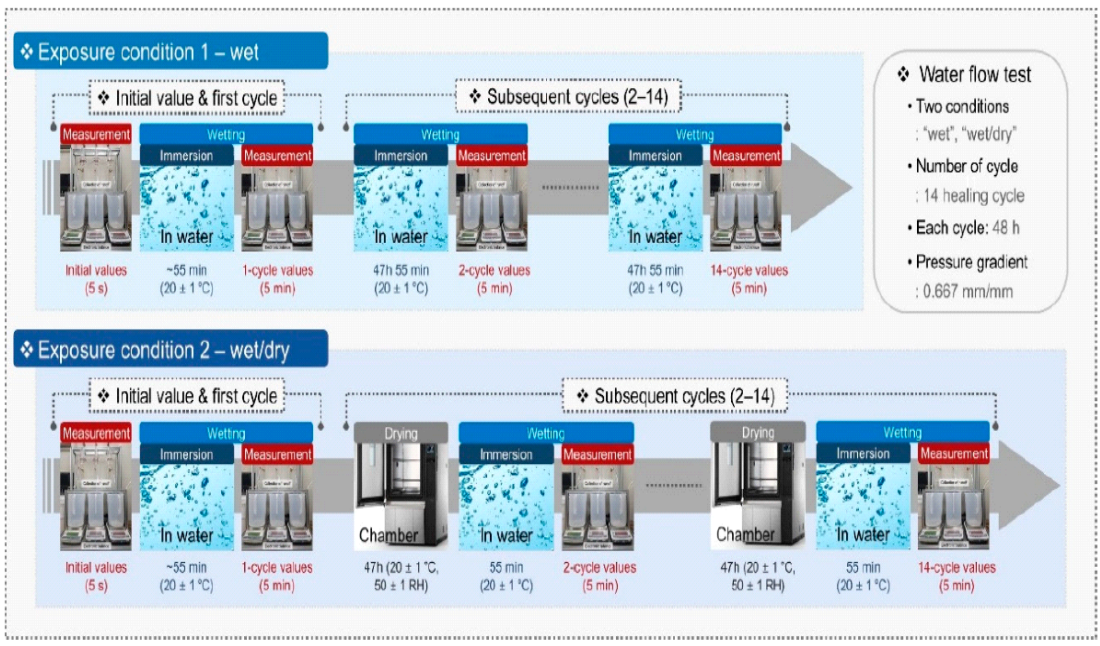
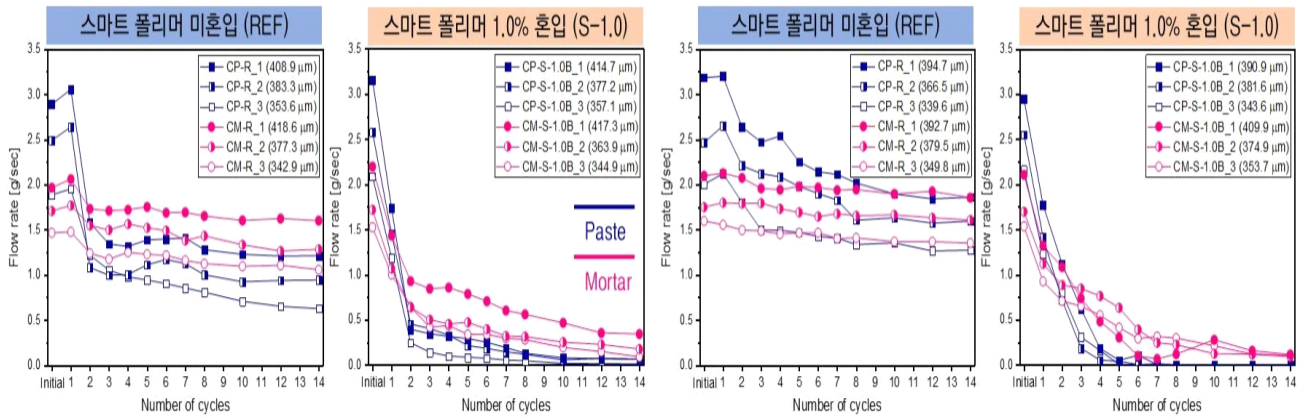


그림 3.2.15 투수시험 시편의 균열을 통한 유량 측정을 위한 노출 조건

: 스마트 폴리머 1.0% 혼입 모르타르의 경우, 치유재령 14일 이내 유량 감소율이 수중 및 습윤/건조 조건에서 각각 약 80%, 90% 이상 감소하였음(REF 시편의 경우 최대 25% 이하).

: 스마트 폴리머에 의한 자기치유 효과는 수중 조건에 비해 습윤/건조 조건에서 우수함.



(a) 균열 이후 수중 침지 조건 (노출 조건 1)　　(b) 균열 이후 습윤/건조 반복 조건 (노출 조건 2)

그림 3.2.16 균열 이후 노출 조건에 따른 유량 변화

③ 자기치유에 따른 압축 강도 회복 특성 분석

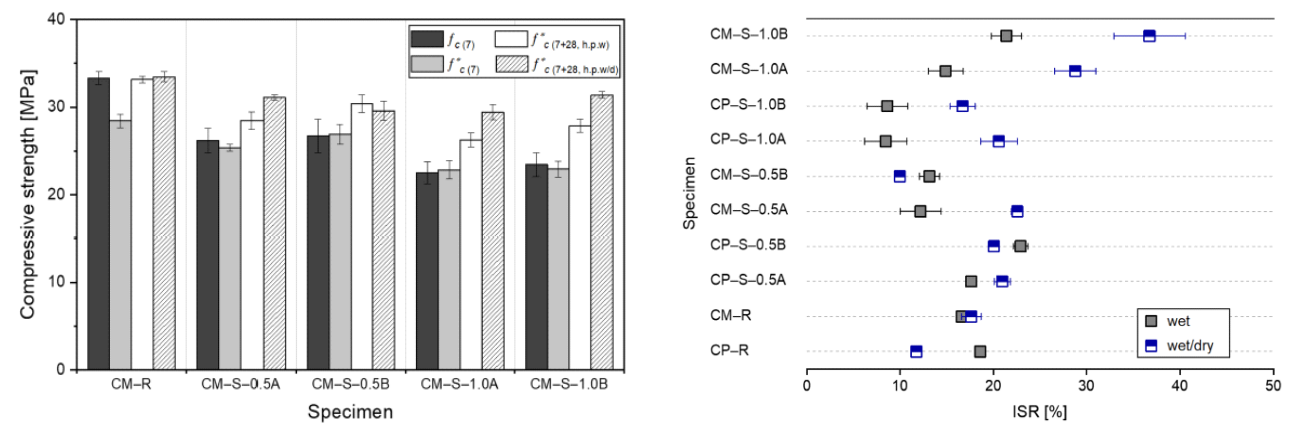
- KS L 5105 기준에 따라 압축강도 시편을 제작하고, 재령 7일 시편에 대해 7일 강도의 80% 강도로 균열을 유발한 뒤, 28일 치유 양생을 실시하여 균열 유발 직후 대비 강도 증가율을 평가함.

- 강도 증가율 [$\frac{f^*_{c(7+28)} - f^*_{c(7)}}{f^*_{c(7)}} \times (\%)$, $f^*_{c(7+28)}$: 28일 치유 양생 이후 강도, $f^*_{c(7)}$: 균열 유발 직후 강도]

: SAP 미혼입 기준 시편 = 약 19% 이내, SAP 1.0% 혼입 & 습윤/건조 조건 = 약 37%

※ 스마트 폴리머 혼입에 따른 초기 강도 저하 문제의 극복 가능성 확인

: 스마트 폴리머에 의한 강도 회복 효과는 수중 조건에 비해 습윤/건조 조건에서 우수하며, 이는 투수시험 결과와도 동일함.



(a) 7일 강도, 균열 직후 및 치유 양생 이후 강도　　(b) 28일 치유 양생 이후 강도 증가율

그림 3.2.17 압축강도 회복 시험 결과



(SCI(E) – 급속 자기치유 반복 성능 평가) (SCI-55)

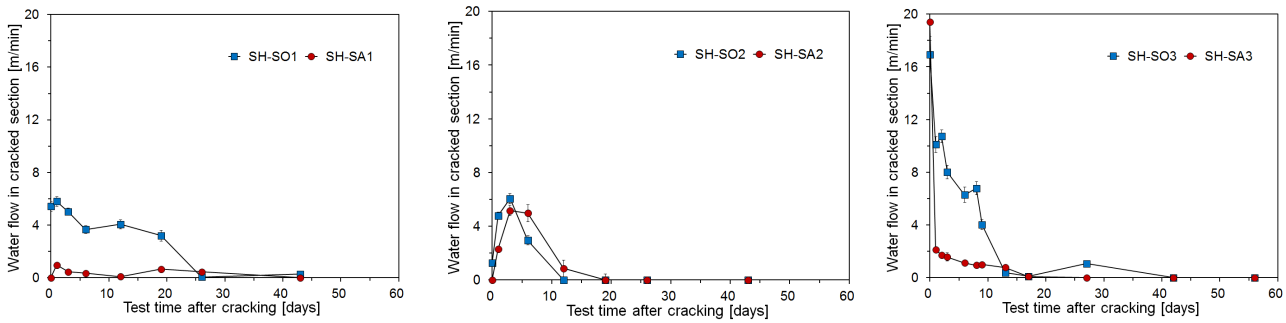


(SCI(E) – 조기균열 장기 자기치유 성능 평가) (SCI-86)

(마) SAPs와 무기계 혼합재료를 복합 활용한 자기치유 콘크리트 기술

① SAPs와 무기계 자기치유 소재를 복합 활용한 자기치유 콘크리트 성능 평가

- SAPs와 무기계 혼합재료의 복합 활용에 따른 자기치유성능을 평가하기 위해 세 가지 입도의 SAPs를 바인더의 0.5% 치환한 시편을 제작하였으며, 균열폭 250 μm에 대해 water flow test를 통해 자기치유성능 평가 실험을 수행하였음.
- 그림 3.2.18은 실험 결과를 정리한 그래프로 복합소재를 사용한 경우 자기치유성능이 향상되는 것으로 나타났음. 균열폭에 비해 직경이 크거나 유사한 SAP-A와 SAP-B 혼입 시 초기에 급격한 투수 감소가 나타났음. 균열폭에 비해 직경이 작은 SAP-C의 경우 SAPs의 crack sealing에 의해 초기 투수량이 감소하였고, 무기계 혼합재료에 의한 자기치유 생성물 침전으로 인해 급격하게 투수량이 감소하였음. 목표 균열폭과 유사한 크기의 SAPs를 사용하는 것이 초기 투수량을 감소시키는데 유리하다고 판단됨.



(a) SAP-A (평균 직경: 541 μm) (b) SAP-B (평균 직경: 234 μm) (c) SAP-C (평균 직경: 83 μm)

그림 3.2.18 SAPs의 크기와 무기계 혼합재료의 복합 활용에 따른 자기치유성능 평가

- 그림 3.2.19는 염소이온 침투 저항성 회복 실험 결과를 나타내는데 자기치유 소재 별로 제작한 시편을 재령 28일에 균열 유발한 후 14일간 자기치유 시키고 NaCl 용액에 접촉시켜 염소이온의 침투를 유도했으며, 질산은 용액을 뿌려 침투 깊이를 측정하였음.
- 균열 발생 직후에는 염소이온 용액이 균열 상부까지 침투하였으나, 무기계 자기치유 소재와 SAPs를 사용하여 자기치유 한 경우에는 침투 깊이가 크게 감소하였음. 무기계 소재와 SAPs를 복합 활용한 경우에는 염소이온 침투 깊이가 절반 이하로 감소하였으며, 이를 통해 복합 소재를 활용하는 경우 염해 저항성 회복률이 가장 높은 것을 알 수 있었음.



(a) 균열 발생 직후 (b) 무기계 자기치유 소재 (c) SAPs (d) 무기계 소재 + SAPs

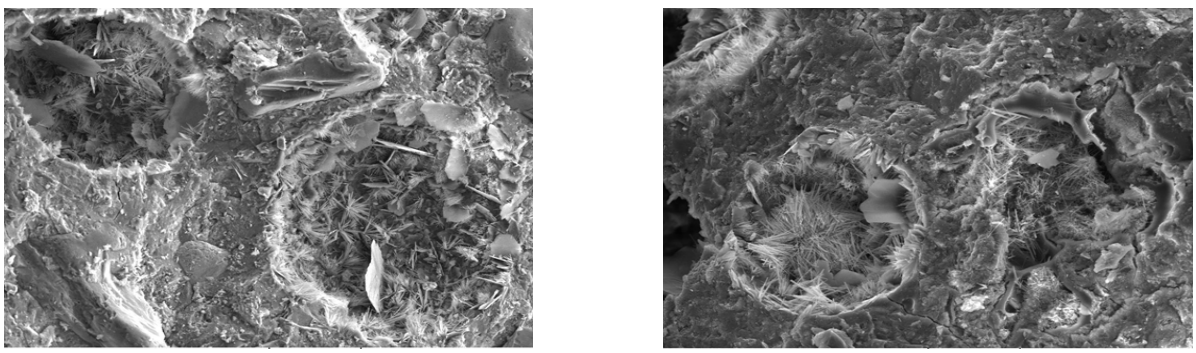
그림 3.2.19 SAPs와 무기계 자기치유 소재의 혼입에 따른 염소이온 침투 저항성 평가

- 그림 3.2.20은 광학현미경을 이용한 표면 균열의 측정 결과로 SAPs만 사용한 경우에 비해 무기계 혼합재료를 복합 활용한 경우에는 SAPs 주변으로 further hydration에 의한 치유 생성물이 증가하는 것을 확인하였음. 그림 3.2.21은 SEM을 통한 SAPs 주변의 분석 결과로 무기계 혼합재료를 복합 활용한 경우 SAPs에서 방출되는 이온 및 수분에 의해 무기계 혼합재료의 지속적인 수화가 촉진되어 ettringite 등의 치유 생성물이 증가하는 것을 확인하였음.



(a) SAPs + OPC (b) SAPs + 무기계 자기치유 소재

그림 3.2.20 광학현미경을 통한 표면 균열 측정 결과



(a) SAPs + OPC (b) SAPs + 무기계 자기치유 소재

그림 3.2.21 SEM을 통한 SAPs 주변의 자기치유 생성물 분석

- SAPs와 무기계 혼합재료를 복합 활용한 자기치유 콘크리트 특성 분석 결과를 정리하여 SCI(E) 논문(SCI-50)으로 게재하였음.

Construction and Building Materials 189 (2018) 1054–1066

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

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

Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs)

Byoungsun Park [a], Young Cheol Choi [b,*]

[a] High-Tech Construction Materials Center, Korea Conformity Laboratories, Seoul 08503, South Korea
[b] Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, South Korea

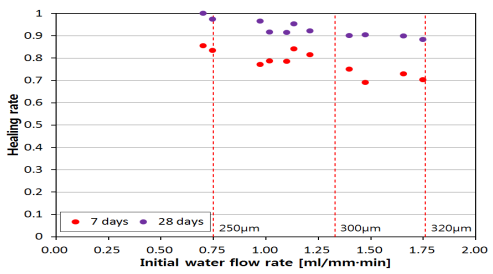
② 복합 소재 활용 자기치유 콘크리트 최적 배합(안) 도출

- SAPs를 복합 활용한 기술은 균열폭 300 μm 이상의 균열을 치유하는 것을 목표로 하였으며, 배합은 표 3.2.1과 같음. SAPs는 입도 분포가 250~400 μm이며, 평균 직경이 340 μm인 제품을 이용하였으며, Binder의 0.5% 만큼 치환하였음. 유동성 확보를 위해 배합수를 SAPs 질량의 10배 추가하였음.

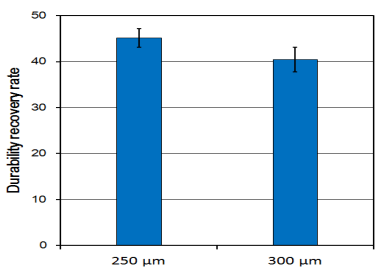
표 3.2.1 무기계 혼합재료 활용 자기치유 모르타르 배합

Labels	Mass (g)						Binder%	
	OPC	GGBFS	Coating CAs	클링커 바인더	클링커 골재	잔골재	추가 배합수	SAPs
KCL-SHS	62	25	3	10	20	180	5	0.5

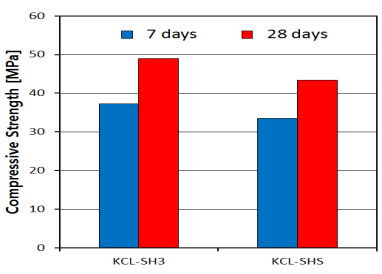
- 그림 3.2.22(a)는 균열폭 250~320 μm에 대한 자기치유성능 평가 결과임. SAPs를 넣지 않은 배합 대비 초기 투수량이 약 30~40% 정도 감소하는 것을 확인하였음. 균열폭 별 성능 평가 결과 250 μm의 균열을 98% 이상 치유하였으며, 300 μm의 균열은 약 92% 이상, 320 μm의 균열을 약 89%까지 치유하는 것을 확인할 수 있었음.
- 내구성 평가 결과 250 μm의 균열은 약 45%까지 회복되었으며, 300 μm의 균열은 약 40% 회복되었음. 그림 3.2.22(c)는 압축강도 측정 결과로 Plain 대비 압축강도가 약 8% 정도 감소하였음. 슬럼프 플로우는 KCL-SH3과 KCL-SHS가 유사하게 나타났음.



(a) Water flow test



(b) 내구성 회복율 평가 실험



(c) 압축 강도

그림 3.2.22 자기치유 배합 별 자기치유성능 평가 결과

다. 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술 개발

(1) 유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술

(가) 자기치유 소재 조성물

① 무기계 및 유·무기계 자기치유 소재 기술

- 무기계 자기치유 소재를 활용한 자기치유 기술은 팽윤재, 팽창재, 다종의 촉진제로 구성됨.

  : 균열이 발생한 콘크리트에 물이 침투하면, 팽윤재와 팽창재가 물과 반응함으로써 팽윤 및 팽창 작용에 의해 균열이 복원되며, 침투된 이산화탄소(CO_2)의 탄산화 반응을 통한 치유생성물($CaCO_3$)의 생성으로 균열부를 치유함.

- 유·무기계 자기치유 소재 기술은 무기계 소재의 인삼염계 유기소재를 활용함으로써 치유생성물의 형상이 침상/섬유형태로 생성되어 균열부가 밀실해져 균열이 치유되는 기술임.

② 유·무기 하이브리드 자기치유 소재 기술

- 다공성 소재 내부에 CO_3^{2-}을 함침시킨 결정성장 촉진제와 팽창재 및 팽윤재로 구성된 유·무기 하이브리드 자기치유 소재를 사용하여 치유생성물을 생성시키는 기술임.

표 3.3.1 치유소재의 조성물

구분	치유 소재의 조성물
무기계	팽창재 + 팽윤재 + 다종의 촉진제
유·무기계	무기계 + 유기소재
하이브리드	결정성장촉진제(주재료) + [팽창재 + 팽윤재](보조재료)

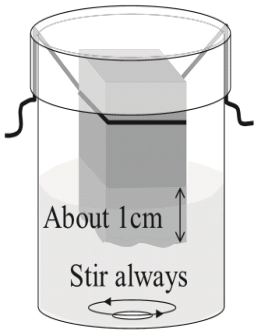
(나) 유무기 하이브리드 자기치유 소재에 대한 칼슘이온의 영향

- Ca^{2+}은 수산화칼슘 및 탄산칼슘으로 생성될 수 있기 때문에 중요한 영향 인자임. 따라서, 유무기 하이브리드 자기치유 소재를 혼입한 모르타르의 용출시험을 통해, Ca^{2+}을 재령별로 pH를 측정한 결과인 그림 3.3.2를 보면 무기계(SHM-1) 및 유무기 하이브리드 소재(SHM-2)가 OPC(PM)보다 높은 pH 값을 나타내어 치유성능 개선에 영향을 주는 것으로 판단됨.

표 3.3.2 자기치유 소재 혼입 모르타르 칼슘이온 용출 시험 배합

구분	W/B (%)	S/B	W	Binder(%)			Sand	시험체
				OPC	무기계	유무기계		
OPC-M	40	2.0	40	100	-	-	200	각주형공시체 40×40×160 mm
SHM-I*				92.0	8.0	-		
SHM-2*				92.0	-	8.0		

*SHM-I : 무기계 혼입, SHM-2 : 유무기계 혼입

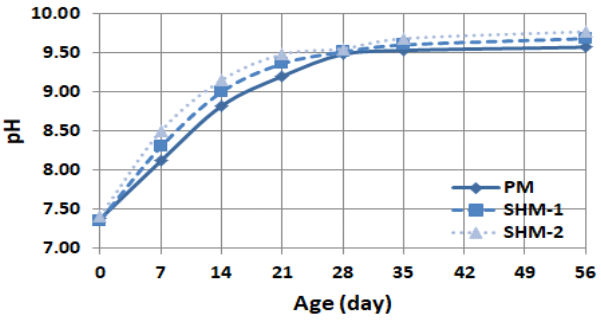


(a) 칼슘원소 용출시험 장치도

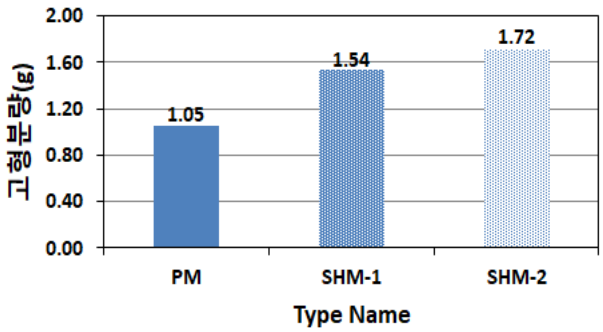


(b) 칼슘원소 용출 시험장면

그림 3.3.1 유무기 하이브리드 자기치유 소재의 칼슘이온 용출량 확인 시험



(a) 자기치유 소재별 pH 측정결과



(b) 자기치유 소재별 고형물량 측정결과

그림 3.3.2 자기치유 소재별 pH 측정 및 고형물량 측정결과

(다) 자기치유 소재의 자기치유성능 평가

- 표 3.3.3의 무기 및 유·무기계, 하이브리드 치유소재를 사용한 모르타르 배합을 나타내며, 표 3.3.4에 자기치유성능을 평가한 결과를 나타냄. 균열폭 0.25 mm에서 치유재령 14일에 투수시험에 의한 치유율이 각각 69%, 64%, 80%, 28일에 75%, 82%, 86%로 하이브리드 치유소재의 치유 효과가 가장 크게 나타남. 유·무기계는 무기계 대비 치유 재령 14일에 5% 감소한 반면 28일에는 7% 증가하였고, 치유 재령 28일에 하이브리드 자기치유 소재는 무기계 소재 대비 치유성능이 11% 향상되었음. 따라서, 결정성장 촉진제, 팽창재 및 팽윤재로 구성되어 있는 유·무기 하이브리드 자기치유 소재를 활용하는 것이 치유성능 발현에 가장 효과적임.

표 3.3.3 자기치유 소재 혼입 모르타르 배합비

구분	W/B (%)	S/B	W	Binder (%)				Sand	투수시험체
				OPC	무기계	유무기계	하이브리드소재		
OPC	40	2.0	40	100	–	–	–	200	Φ100×50 mm
SH-I*				85.0	15.0	–	–		
SH-IO*				91.5	–	9.5	–		
SH-C*				92.0	–	–	8.0		

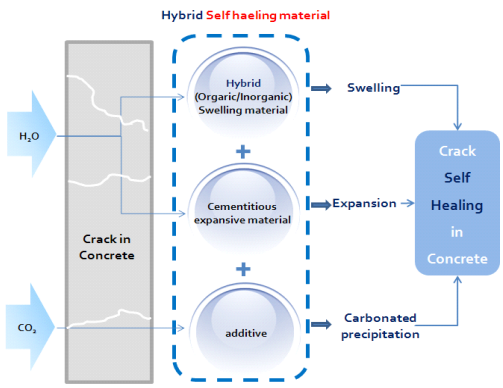
* SH-I :무기계 혼입, SH-IO :유무기계 혼입, SH-C :하이브리드 소재 혼입

표 3.3.4 투수시험에 의한 모르타르의 자기치유성능평가 결과

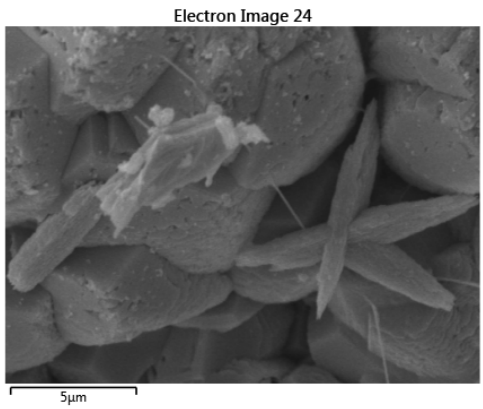
구분	균열폭 (mm) [균열도입 재령 7일]	치유율 (%)	
		14일	28일
무기계	0.24	69	75
유무기계	0.25	64	82
하이브리드	0.25	80	86
SH-C*	0.28	83	91

(라) 하이브리드 치유소재의 치유메커니즘 및 치유생성물 분석

- 균열부에 생성된 치유소재의 수화물을 샘플링하여 XRD 분석을 수행한 결과, Calcite ($CaCO_3$) 광물의 피크가 검출되었음. Calcite($CaCO_3$) 광물은 시멘트 수화물, 하이브리드 자기치유 소재에서 용출된 칼슘이온(Ca^{2+})과 대기 중의 이산화탄소가 물에 녹아 공급된 탄산염 이온(CO_3^{2-} 또는 HCO_3^-)이 반응하여 석출됨.



(a) 하이브리드 자기치유 소재 치유 메커니즘



(b) 치유생성물 SEM 분석

그림 3.3.3 자기치유 소재 치유 메커니즘 및 치유생성물 분석

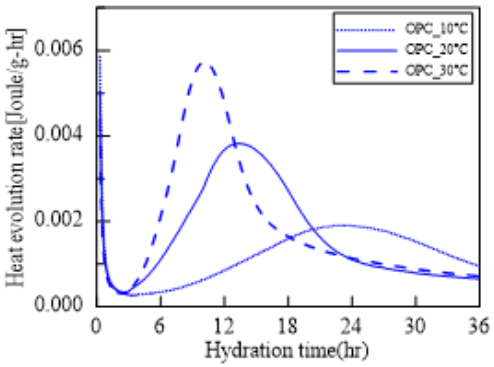
- 자기치유 혼화재 조성물 및 제조방법에 대한 독창성을 인정받아 특허등록(10-1683090, 10-1843816)(특허-1, 특허-11)을 완료함(2016.11.13., 2018.03.26.).



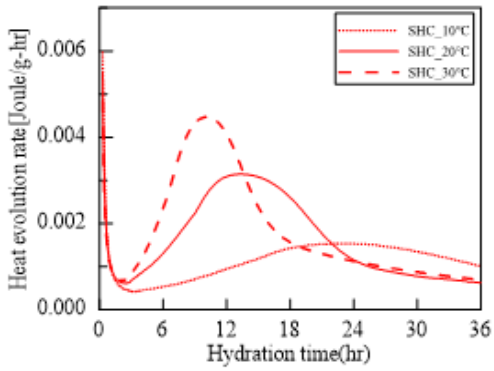
(마) 유무기 하이브리드 자기치유 소재 혼입 시멘트 복합체 기초물성평가

① 유무기 하이브리드 자기치유 소재의 수화반응 평가

- 하이브리드 자기치유 소재의 혼입이 시멘트 복합체의 수화반응에 미치는 영향에 대해 미소수화열 분석(10, 20 및 30℃) 및 응결시험을 통해 OPC의 수화반응 특성과 비교한 결과, 일반적으로 시멘트의 반응온도가 증가함에 따라 수화발열속도도 증가하고, 2차 피크 값 발생시기도 빨라지는 특성을 확인함(그림 3.3.4(a)).
- 하이브리드 소재를 혼입한 SHC 모르타르의 경우 OPC 수화발열속도 패턴과 전반적으로 동일한 경향을 나타내었음(그림 3.3.4(b)).
- 반응온도가 증가함에 따라 누적 수화열은 증가하고, 반응온도 10~30℃ 범위에서의 SHC의 누적 발열량은 OPC 대비 97% 수준으로 확인됨(표. 3.3.5).
- 결론적으로 하이브리드 자기치유 소재가 시멘트 복합체 수화반응에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단됨.



(a) OPC의 온도별 미소수화열



(b) SHC의 온도별 미소수화열

그림 3.3.4 반응온도 증가에 따른 수화발열속도 변화

표 3.3.5 72hr 누적 미소수화 발열량 분석 결과

구분	누적 발열량 (Joule/g) 반응온도(℃)		
	10	20	30
OPC	219.4 (100%)	283.74 (100%)	308.96 (100%)
SHC	213.9 (97.5%)	274.44 (96.7%)	298.81 (96.7%)

② 유무기 하이브리드 자기치유 소재의 기초특성 평가

- 하이브리드 자기치유 소재의 혼입이 시멘트 복합체 물성에 미치는 영향을 평가한 결과인 표 3.3.7에 따르면 SHC 모르타르의 압축강도는 OPC 모르타르 대비 감소하며 치유재령 28일에서 OPC 모르타르 강도의 89% 수준임.
- 하이브리드 자기치유 소재 사용으로 인하여 유동성 및 압축강도가 감소하는 문제점이 있으나 혼화제 및 기타 유동성 개선제 등으로 개선이 가능할 것으로 판단됨.

표 3.3.6 자기치유 소재 혼입 모르타르 배합

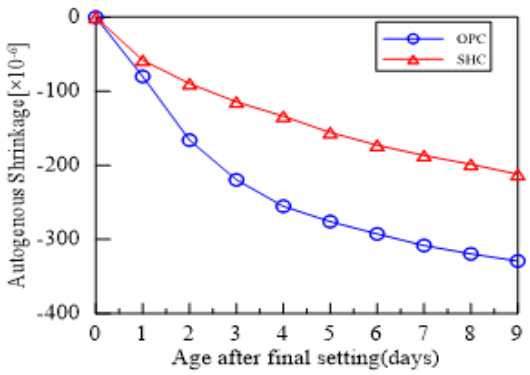
구분	W/B (%)	S/B	W	Binder (%)		Sand	투수시험체
				OPC	하이브리드 소재		
OPC	40	2.0	40	100		200	Φ100×50mm
SHC				92.0	8.0		

표 3.3.7 모르타르의 Flow 및 압축강도 측정결과

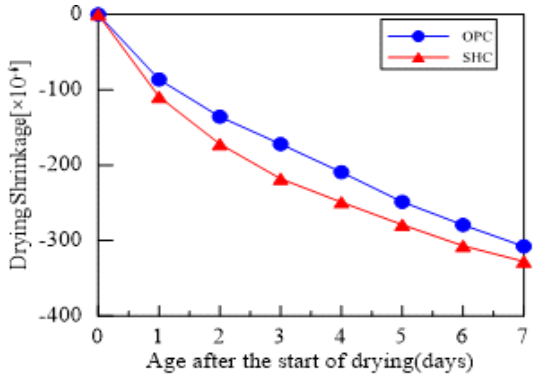
구분	Flow(mm)	압축강도 (MPa)			
		1d	3d	7d	28d
OPC	200	30.2 (100%)	40.3 (100%)	43.6 (100%)	56.9 (100%)
SHC	175	24.7 (81.7%)	33.6 (83.4%)	36.6 (84.0%)	50.7 (89.1%)

③ 유무기 하이브리드 자기치유 소재의 길이변화 특성

- 하이브리드 자기치유 소재 혼입 시멘트 복합체의 길이변화 특성을 알아보기 위하여 모르타르의 자기수축 및 건조수축 실험을 실시한 결과, OPC와 SHC의 자기수축 변형률 경시변화는 재령 7일 기준에서 OPC와 SHC 수축변화는 각각 -311 ㎛과 -191 ㎛로 측정되어 SHC의 자기수축은 OPC 대비 39% 감소함을 알 수 있음(그림 3.3.5).
- OPC와 SHC의 건조수축 변형률 경시변화는 건조 재령 7일 기준에서 각각 -324 ㎛와 -308 ㎛로 측정되어 동등 수준의 수축특성을 나타내었음.



(a) 자기수축 변형률



(b) 건조수축 변형률

그림 3.3.5 자기수축 및 건조수축 변형률 경시변화

(바) 유무기 하이브리드 자기치유 소재 활용 치유 특성

① 균열폭에 따른 자기치유 특성

- 초기균열 폭 변동에 따른 투수시험을 통하여 OPC 모르타르와 하이브리드 자기치유 소재 혼입 모르타르의 자기치유성능을 평가한 결과, OPC의 치유율은 53%, SHC는 84%로 치유성능이 OPC 대비 58% 증가함(그림 3.3.6(a)).

- 균열폭 0.18~0.27 mm인 SHC 시편의 경우 치유재령 7일에서 61%로, OPC보다 22% 치유율 차이가 나는 것을 확인하였고, 7일 이후 치유율은 완만하게 증가하여 28일에 95~84% 치유율을 나타냄(그림 3.3.6(b)).

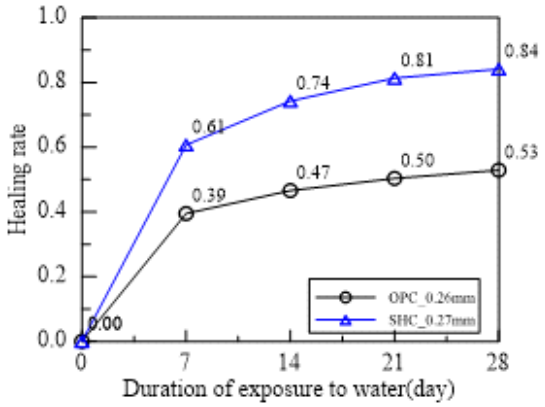
표 3.3.8 하이브리드 자기치유 소재 혼입 모르타르 배합조건

구분	내용	W/B (%)	S/B	W	Binder(%)		Sand	투수시험체
					OPC	SH		
OPC	보통 포틀랜드 시멘트	40	2.0	40	100	-	200	Φ100×50 mm
SHC	하이브리드 치유소재 8.0% 혼입				92.0	8.0		

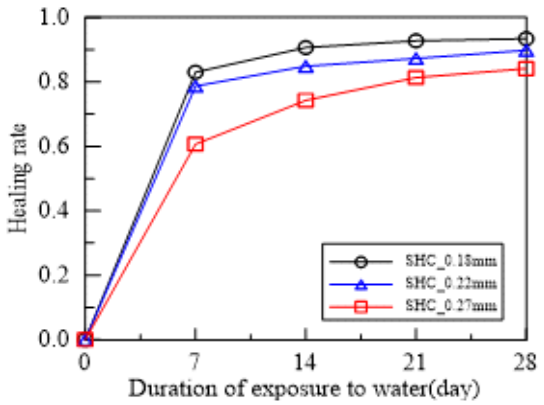
표 3.3.9 균열시편 제작 내용 및 투수량 측정재령

구분	투수시험				
	시험체 형상	균열재령	균열폭	균열시편 제작	투수량 측정재령
OPC	자기치유 시험체 전용 몰드* (Φ100×50 mm)	7일	0.25±0.03 mm	3 of 5ea	0, 7, 14, 21, 28일
SHC			0.17±0.03 mm	3 of 5ea	
			0.22±0.03 mm	3 of 5ea	
			0.27±0.03 mm	3 of 5ea	

자기치유 시험체 전용 몰드*:성균관대 자기치유 센터에서 제공한 몰드 사용



(a) OPC와 SHC의 치유율 비교



(b) 균열폭에 따른 SHC의 치유율 비교

그림 3.3.6 OPC와 SHC의 투수량 및 치유율 경시변화

② 균열도입 시기에 따른 자기치유 특성

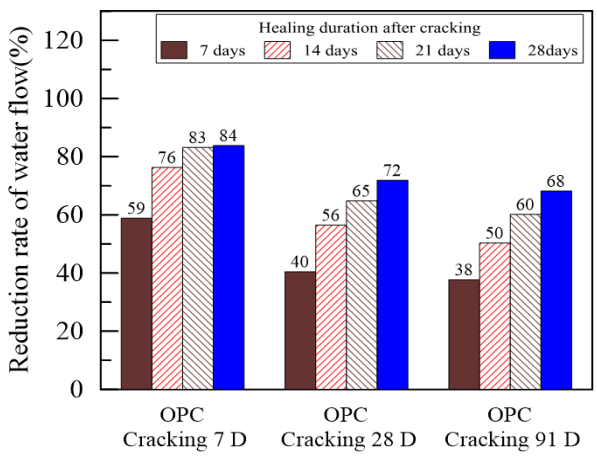
- 자기치유는 균열 발생과 동시에 치유반응을 시작하기 때문에 치유소재의 특성에 따른 치유성능은 균열 발생 시기에 따라 상이할 수 있음.
- 따라서 하이브리드 자기치유 소재를 첨가한 모르타르에 대해 균열 발생 시기(7, 28일 및 91일)에 따른 치유성능 평가결과, OPC는 미반응 시멘트 입자의 지속 수화에 의해 생성된 반응물이 균열면에 생성됨에 따라 균열폭이 감소하여 투수량이 감소되었음(표 3.3.10).

표 3.3.10 균열도입 재령별 OPC의 치유율의 변화

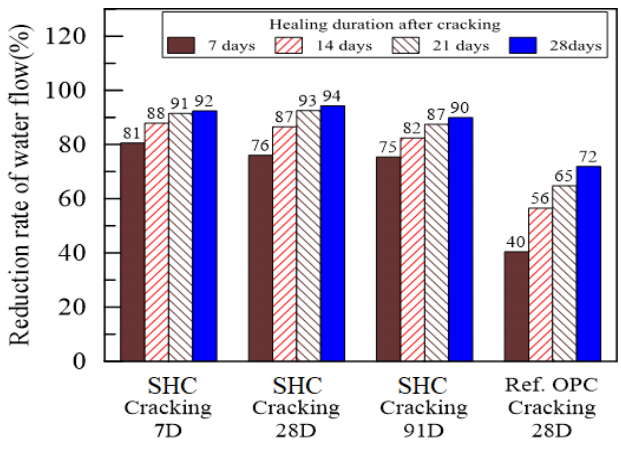
구분	균열도입재령	초기투수량 (ml/min-mm)	균열폭 (mm)	투수감소율 (%)			
				7일	14일	21일	28일
OPC	7	0.705	0.232	59	76	83	84
		0.814	0.243	43	65	70	76
		0.863	0.248	35	59	62	65
	28	0.453	0.211	35	66	72	78
		0.560	0.227	41	62	71	76
		0.632	0.236	40	59	67	74
		0.711	0.239	40	56	65	72
	91	0.535	0.227	56	58	62	68
		0.698	0.248	38	50	60	68
		1.096	0.270	34	56	66	67

표 3.3.11 균열도입 재령별 SHC의 치유율의 변화

구분	균열도입재령	초기투수량 (ml/min-mm)	균열폭 (mm)	투수감소율 (%)			
				7일	14일	21일	28일
SHC	7	**0.683**	**0.227**	**81**	**88**	**91**	**92**
		1.209	0.278	69	82	83	87
		1.329	0.287	70	83	85	86
		1.367	0.289	68	78	77	81
	28	0.549	0.225	72	83	94	100
		0.678	**0.242**	**76**	**87**	**93**	**94**
		0.702	0.244	77	87	92	93
		0.784	0.254	65	82	88	94
	91	0.461	0.213	82	84	89	95
		0.701	**0.233**	**75**	**82**	**87**	**90**
		0.979	0.256	62	71	80	82



(a) 균열도입시기에 따른 OPC의 치유율



(b) 균열도입시기에 따른 SHC의 치유율

그림 3.3.7 초기투수량이 0.7 ml/min-mm 정도인 시편의 균열유도시기에 따른 치유성능

- 표 3.3.10과 3.3.11에 따르면 OPC와 SHC의 경우 모두 균열시험체의 초기 투수량이 증가할수록 치유성능이 감소함. 이러한 결과는 균열도입시기에 관계없이 동일한 경향이 나타남.
- 그림 3.3.7의 결과, 균열유도 28일의 치유재령 28일에서 OPC의 치유율은 72%인 반면, 하이브리드 치유소재의 치유율은 94%로 나타남에 따라 OPC에 비해 치유성능이 22% 향상되었음.
- 균열유도시기가 7일, 28일 및 91일인 OPC 균열시편(초기투수량이 0.7±0.011 ml/min-mm)의 치유기간 28일에서의 투수 감소율은 각각 84%, 72% 및 68%로 감소하는 결과가 나타나, 균열유도 시점이 늦어짐에 따라 치유성능이 감소하였음(그림 3.3.7). 그러나 SHC 균열시편의 경우 균열유도시기에 관계없이 재령 28일에서 90~94% 치유율을 나타냄.

(사) 유무기 하이브리드 자기치유 소재 대량 생산 기술

① 유무기 하이브리드 자기치유 소재 제조 방법

- Ⅰ단계: 이온흡착재와 CO_3^{2-}이온공급소재를 2.0 : 1.5 : 3.5 비율로 준비하여 시료(이온흡착재+CO_3^{2-}이온공급소재)와 물을 1:1에 맞게 20 L 통에 투입함.
- Ⅱ단계: CO_3^{2-}이온공급소재를 물에 먼저 투입하여 교반을 통해 이온화를 시킨 후, 다공성 소재인 이온흡착재를 투입하여 2 hr 이상 혼합 교반을 실시함.
- Ⅲ단계: 교반 작업이 끝난 시료를 직사각형 틀에 넣어 건조기에서 양생 및 건조를 실시함. 이때, 40℃_24 hr, 80℃_24 hr, 100℃_72 hr 동안 양생 및 건조를 실시함.
- Ⅳ단계: 건조가 끝난 이온흡착소재와 Ca^{2+}이온 공급소재를 투입하여 혼합 분쇄함. 15분 분쇄 시 분말도는 2,480 cm^3/g와 밀도 2.4g/cm^3인 유무기 하이브리드 자기치유 소재가 생산됨.

② 유무기 하이브리드 자기치유 소재 시작품 품질관리

- 유·무기 하이브리드 자기치유 소재를 제조하여 모르타르의 유동성 및 압축강도, 투수성능을 평가한 결과, 모르타르의 유동성은 160 mm이고, 압축강도는 재령 1일에 22.1 MPa, 7일에 41.6 MPa, 28일에 50.4 MPa로 점차 증가하였으며, 장기재령인 91일에서는 54.1 MPa이었음. 투수시험에 의한 치유율은 7일, 14일, 21일, 28일에 59%, 82%, 88%, 90%로 증가하는 경향을 나타냄.

표 3.3.12 유무기 하이브리드 치유소재 시작품 모르타르 배합비

구분	내용	목표균열폭 (mm)	W/B (%)	S/B	W	Binder(%)		시험항목
						OPC	SH	
SHC	하이브리드 치유소재 8.0%	0.25±0.02	40	2.0	40	92.0	8.0	유동성, 압축강도, 투수시험

③ 현장적용에 의한 자기치유 평가 및 분석

- 진접선 복선전철 3공구 중, 지하집수정에 유·무기 하이브리드 자기치유 소재를 사용함. 콘크리트의 현장 적용성 평가를 목적으로 시제품을 제조하고 레미콘 B/P 설비를 이용하여 자기치유 콘크리트를 타설하였고, 균열조사 및 콘크리트 추적조사를 실시함.

표 3.3.13 현장적용 자기치유 콘크리트 배합비

W/B (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m^3)					
		W	C	S	G	SH	add.
41.6	49.3	164	394	866	898	21.7	2.76

- 하이브리드 자기치유 소재는 결합재 질량 대비 5.5%를 치환하여 사용하였음. 시멘트, 잔골재, 굵은 골재, 혼화제는 현장에서 제공된 재료를 사용하고, 3 m^3 용량의 믹서에서 콘크리트를 생산한 결과, 콘크리트 슬럼프는 155 mm, 공기량 4.3 % 그리고 염화물량은 0.038 kg/m^3 임.
- 현장적용 콘크리트 품질 추적조사 결과, 재령 7일 현재 외관상 소성수축 및 건조수축으로 인한 균열은 발생하지 않은 것을 확인함.

표 3.3.14 자기치유 콘크리트 현장 시험 개요

구분	내용
현장명	진접선(당고개~진접) 복선전철 3공구 건설 공사
적용부위	002 정거장 집수정, 타설량 250 m^3
레미콘 규격	25-30-150
온도 및 습도	15℃, 72%
작업일	2018. 11. 05
목표 물성	슬럼프 150±25 mm, 공기량 4.0±1.5%, 염화물 0.30 kg/m^3 이하
하이브리드 치유 소재 혼입 비율	외비 5.5%

- 결정성장촉진재료 제조방법에 대한 독창성을 인정받아 특허등록(10-1966101)(특허-33)을 완료함(2019.04.01.).


특허증
CERTIFICATE OF PATENT
특 허 Patent Number 제 10-1966101 호
출원번호 Application Number 제 10-2017-0159437 호
출 원 일 Filing Date 2017년 11월 27일
등 록 일 Registration Date 2019년 04월 01일
발명의명칭Title of the Invention
결정성장 촉진형 하이브리드 자기치유 혼화재의 제조방법과 그 자기치유 혼화재를 이용한 시멘트 결합재 조성물

(2) 균열폭 0.3 mm 이내 자기치유 기술

(가) 유·무기 하이브리드 자기치유 소재 사용 모르타르 유동성 및 압축강도

- Na, Ca계 팽윤재가 사용함량별로 강도 및 유동성에 미치는 영향을 확인함(표 3.3.15). 팽윤재 종류 및 사용함량별 유동성 및 압축강도를 시험한 결과(표 3.3.16), Na계 팽윤재를 OPC 질량 대비 0.5, 1,5%의 사용하였을 때, Plain 대비 압축강도가 90%가 넘는 결과를 확인하였으나, 플로우는 약 80 mm 낮아 개선이 필요한 것으로 판단됨.

표 3.3.15 하이브리드 치유소재 혼입 모르타르 배합

구분	W/B (%)	S/B	W	Binder (%)				Sand	시험항목
				OPC	SH				
					결정성장촉진제	팽윤재			
						Na계	Ca계		
Plain	40	2.0	40	100	-	-	-	200	Flow 압축강도
Na-1				94.5	4.0	1.5	-		
Na-2					4.5	1.0	-		
Na-3					5.0	0.5	-		
Ca-1					4.0	-	1.5		
Ca-2					4.5	-	1.0		
Ca-3					5.0	-	0.5		

표 3.3.16 하이브리드 치유소재 혼입 모르타르의 플로우 및 압축강도

구분	Flow (mm)	압축강도(MPa)		
		3일	7일	28일
Plain	210	34.1 (100)	38.3 (100)	40.3 (100)
Na-1	**135**	**28.9 (84.8)**	**33.2 (86.7)**	**38.1 (94.5)**
Na-2	130	23.0 (67.5)	29.7 (77.6)	34.2 (84.8)
Na-3	**135**	**28.8 (84.6)**	**34.0 (88.7)**	**39.6 (98.2)**
Ca-1	120	27.4 (80.4)	33.8 (88.2)	36.1 (89.6)
Ca-2	125	26.3 (77.1)	31.2 (81.4)	34.7 (86.1)
Ca-3	130	21.6 (63.3)	28.0 (73.1)	30.2 (74.9)

- 유동성 개선제 0.03～0.10%를 하이브리드 치유소재에 혼입하여 모르타르의 유동성 및 압축강도를 비교한 결과, 초기 플로우는 Plain과 동등 이상의 값으로 확인되었음(표 3.3.18). 실험 후, 플로우 로스를 대비하여 60분 후의 플로우를 측정한 결과, 유동성 개선제를 0.03% 혼입한 Type의 경우, 측정이 불가하였음.
- 유동성 개선제의 함량의 적정선은 0.05%일 것으로 판단되며 팽윤재 사용량 1.5%에 유동성 개선제를 0.05%를 하이브리드 치유소재에 혼입하였을 때, 플로우 손실이 가장 적은 것으로 나타남.

- 콘크리트의 압축강도 시험 결과 재령 28일에서 유동성 개선제의 함량의 0.05%일 때, Plain 대비 재령에 따른 압축강도가 90.9% 이상으로 유동성 개선제의 사용량이 증가할수록 압축강도가 저하되므로 유동성 개선제는 0.05% 이하로 사용하여야 압축강도의 손실이 적음.

표 3.3.17 유동성 개선제 혼입 모르타르 배합

구분	W/B (%)	S/B	W	Binder (%)			유동성개선제*	Sand	시험항목
				OPC	SH				
					결정성장촉진제	팽윤재 (Na계)			
Plain	40	2.0	40	100	–	–	–	200	Flow 압축강도 투수시험
Na-1-1				94.5	4.0	1.5 –	0.10		
Na-1-2					4.0	1.5 –	0.05		
Na-1-3					4.0	1.5 –	0.03		
Na-3-1					5.0	– 0.5	0.10		
Na-3-2					5.0	– 0.5	0.05		
Na-3-3					5.0	-- 0.5	0.03		

유동성개선제*:콘크리트 지연제로서 사용하는 구연산을 사용

표 3.3.18 유동성개선제 함량별 모르타르의 유동성 및 압축강도

구분	유동성개선제	Flow (mm)		압축강도 (MPa)		
		0 min	60 min	3일	7일	28일
Plain	–	210	195	40.3 (100)	41.3 (100)	48.2 (100)
Na-1-1	0.10%	250	200	28.8 (71.6)	38.6 (91.1)	44.6 (92.6)
Na-1-2	**0.05%**	**230**	**190**	**38.5 (90.5)**	**41.2 (97.4)**	**42.8 (90.9)**
Na-1-3	0.03%	210	N/A	31.7 (78.6)	38.6 (91.4)	47.2 (98.0)
Na-3-1	0.10%	250	190	27.6 (68.5)	37.0 (87.4)	45.8 (95.1)
Na-3-2	**0.05%**	**250**	**180**	**35.1 (87.1)**	**38.4 (90.8)**	**44.8 (93.0)**
Na-3-3	0.03%	210	N/A	34.4 (85.5)	39.2 (92.7)	49.7 (103.2)

(나) 유동성이 개선된 모르타르의 치유율

- 표 3.3.19와 같이 팽윤재 1.5% 및 0.5%에 유동성 개선제 0.05%를 사용한 하이브리드 치유소재를 혼입한 모르타르 투수시험을 확인한 결과, 팽윤재 및 유동성 개선제를 혼입한 배합의 경우, 치유재령 28일에서 치유율 90%가 넘는 것을 확인함.
- 재령 28일에서 균열폭 0.25 mm일 때(그림 3.3.8(a)), 팽윤재 1.5%인 Na-1-2는 94.1%, 팽윤재 0.5%인 Na-3-2는 92.8%로 동등한 수준의 치유율을 나타났으며. 균열폭 0.30 mm일 때(그림 3.3.8(b)), Na-1-2는 88.4%, Na-3-2는 85.3%로 균열폭 0.25 mm일 때 보다 약 6% 낮았음.

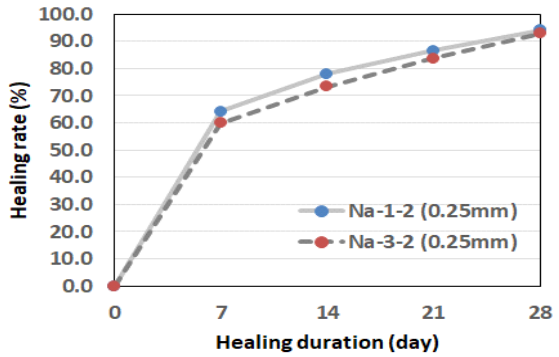
(다) 유·무기 하이브리드 자기치유 소재 치유율

- 표 3.3.20과 같이 유·무기 하이브리드 자기치유 소재 5.5% 배합은 결정성장촉진제 4.0%와 팽윤재 1.5%로 구성되어 있고, 8.0% 배합은 팽창재를 추가하여 결정성장 촉진제 4.0%, 팽윤재 1.5%, 팽창재 2.5%로 구성되어 있음.

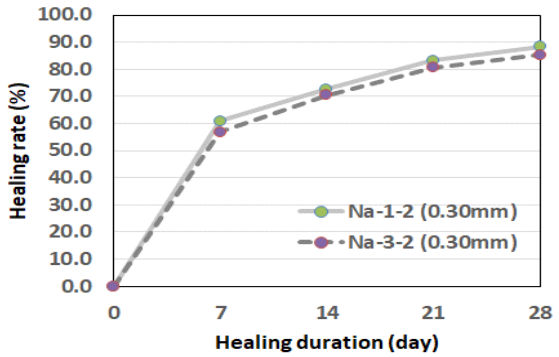
- 유·무기 하이브리드 자기치유 소재 함량별 치유율 확인을 위해, 투수시험을 통한 자기치유 특성을 확인한 결과, SH-5.5는 86.0%, SH-8.0은 90.4%인 결과를 얻었음(그림 3.3.3). 또한, 5.5% Type 보다 8.0% Type의 치유율이 재령 28일에서 약 3.6%가 높게 나타남.
- 유·무기 하이브리드 자기치유 소재의 함량을 5.5%에서 8.0%로 증가시킨 경우, 치유 재령 14일까지는 약 10% 정도 치유율이 높지만, 그 이후부터는 치유율 증가량이 점차 감소하는 것을 확인하였음.

표 3.3.19 유동성이 개선된 자기치유 모르타르 배합

구분	W/B (%)	S/B	W	Binder (%)			유동성 개선제	Sand
				OPC	결정성장촉진제	팽윤재		
Na-1-2	40	2.0	40	94.5	4.0	1.5	0.05	200
Na-3-2	40	2.0	40	94.5	5.0	0.5	0.05	200



(a) 균열폭 0.25 mm



(b) 균열폭 0.30 mm

그림 3.3.8 유동성이 개선된 모르타르의 균열폭에 따른 치유율 결과

표 3.3.20 유무기 하이브리드 자기치유 소재 함량별 모르타르 배합

구분	W/B (%)	S/B	W	Binder(%)				유동성 개선제	S
				OPC	결정성장촉진제	팽윤재	팽창재		
SH-5.5	40	2.0	40	94.5	4.0	1.5		0.05	200
SH-8.0				92.0	4.0	1.5	2.5	0.05	

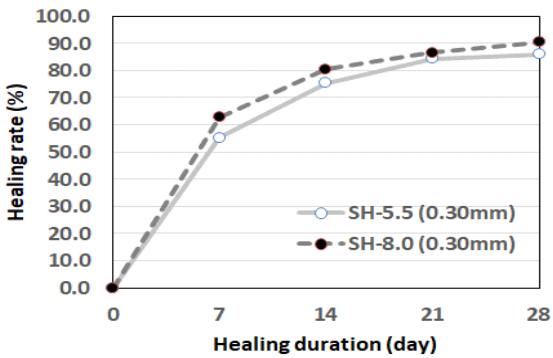


그림 3.3.9 유무기 하이브리드 자기치유 소재 함량별 치유율 결과

(라) 유·무기 하이브리드 치유 소재 혼입 콘크리트 기초특성

① 기초특성 시험 개요

- 치유율이 높은 유·무기 하이브리드 자기치유 소재를 8.0% 혼입한 자기치유 콘크리트 시작품을 제조하였음. 하이브리드 치유소재를 콘크리트에 적용하여 길이변화 및 역학적 특성을 시험하여 결과를 평가함. 표 3.3.21은 유·무기 하이브리드 치유소재를 혼입한 콘크리트의 배합을 나타냄.

표 3.3.21 유무기 하이브리드 치유소재 혼입 콘크리트 배합표

구분	내용	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m³)						
				W	C	S	G	SH	ad	add.
OPC	OPC only	46.9	45	206	438	700	869			0.3
SH-8.0	하이브리드 치유소재 8.0%				403			35	0.05	0.3

② 길이변화 특성

- 길이변화 시험은 100×100×400 mm의 시험체에 스테레인 게이지를 부착시켜 데이터로거에 연결하여 항온항습기(20±2℃/60±5%)에서 28일동안 측정함.
- 콘크리트의 길이변화율 시험결과, OPC와 SH-8.0의 건조수축은 재령 28일에서 각각 584 ㎛와 500 ㎛로 측정되었음. SH-8.0은 팽창재의 수축 보상효과로 인해 건조수축이 약 15% 정도 감소함(그림 3.3.10).

③ 역학적 특성

- 유무기 하이브리드 자기치유 소재 8.0% 혼입 콘크리트의 유동성 측정한 결과, 플로우가 180 mm로 OPC(190 mm) 대비 94.7%의 유동성을 확보하였음.
- 표 3.3.22에서 SH-8.0의 압축강도 측정결과, 3일, 7일, 28일에서 OPC 대비 각각 86.2%, 87.0%, 90.4%의 강도 수준을 나타내어 재령이 경과할수록 강도회복율이 증가하는 경향을 확인하였음.
- 유동성 개선제와 폴리칼본산계 유동화제를 사용하여 초기 작업성과 응결 지연이 발생되었지만, 장기적으로는 압축강도가 지속적으로 증진됨.

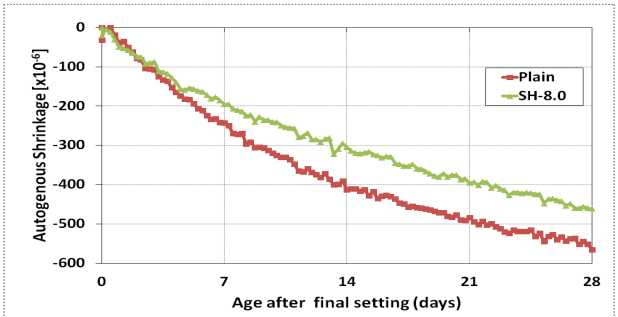


그림 3.3.10 건조수축 변형률 경시변화

표 3.3.22 유무기 하이브리드 자기치유 소재 혼입 콘크리트 유동성 및 압축강도

구분	Flow (mm)	압축강도 (MPa)		
		3일	7일	28일
OPC	190 (100)	27.7 (100)	34.7 (100)	54.6 (100)
SH-8.0	180 (94.7)	23.9 (86.2)	30.2 (87.0)	49.4 (90.4)

라. 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발

(1) 자기치유 가능 생체광물 형성 박테리아 확보

(가) *Bacillus, Lysinibacillus* 속 생체광물 형성 박테리아 분리

① 콘크리트 환경을 고려한 박테리아 샘플링 전략

- 콘크리트 내부는 높은 pH와 낮은 용존 산소량, 협소한 공극 같은 요인으로 인해 박테리아를 포함한 생명체가 생존하기 적합하지 않은 환경임. 따라서 알칼리 환경에서 대사활동 할 수 있고 장기 생존을 위한 포자 형성능과 동시에 탄산칼슘을 석출할 수 있는 박테리아를 확보해야 함.

② 억새풀 근권 및 건물 내부 콘크리트 박테리아 샘플링

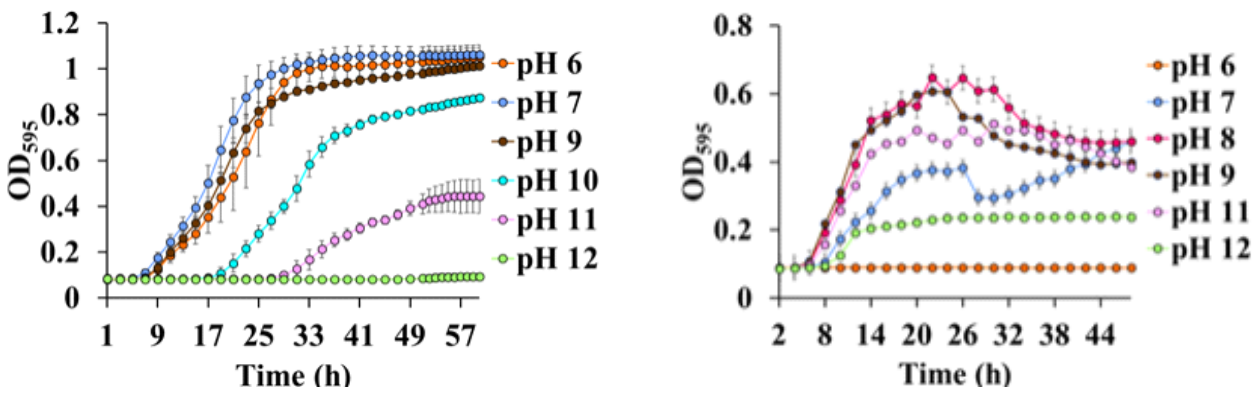
- 물억새 근권의 토양(위치: 서울특별시 성북구 소재 성북천 인근)과 재령이 오래된 콘크리트(>5년) 내의 미생물을 채취하였으며, 군집 분석 결과 Bacillaceae 및 Pseudomonadaceae 등의 박테리아가 공통적으로 우점하고 있음.

- 내염/호알칼리성 박테리아를 선별하기 위해 농후 배양 배지(Mineral salts media + 0.25% Calcium acetate 혹은 Mineral salts media + 0.25% Calcium lactate 첨가)를 통해 20가지 종을 분리하였음.

③ 내알칼리·내염·비요소분해 균주 선정

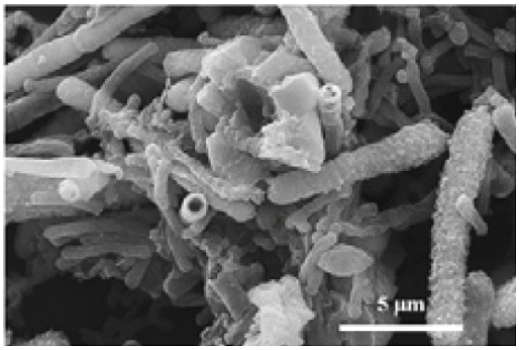
- 분리된 20가지 종 중 강알칼리(pH 11), 고염 환경 (6% NaCl)에서 생존할 수 있으며 비요소분해 가능한 균주 2종(*Lysinibacillus boronitolerans* YS11, *Bacillus miscanthi* AK13)을 선정함.

- YS11 균주는 pH 6~11에서, AK13 균주는 pH 7~12에서 생장 가능함(그림 3.4.1). YS11과 AK13 균주 모두 알칼리/비요소 환경에서 탄산칼슘 석출 가능함(그림 3.4.2).

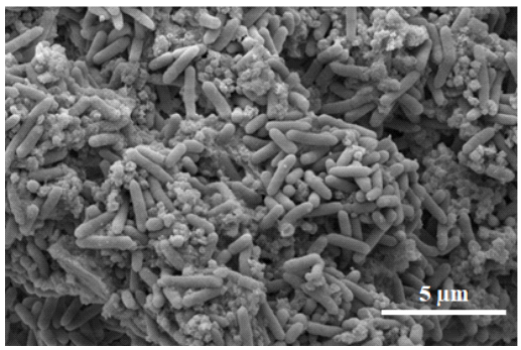


(a) YS11 균주 (b) AK13 균주

그림 3.4.1 최종 분리 균주의 pH별 생장 곡선



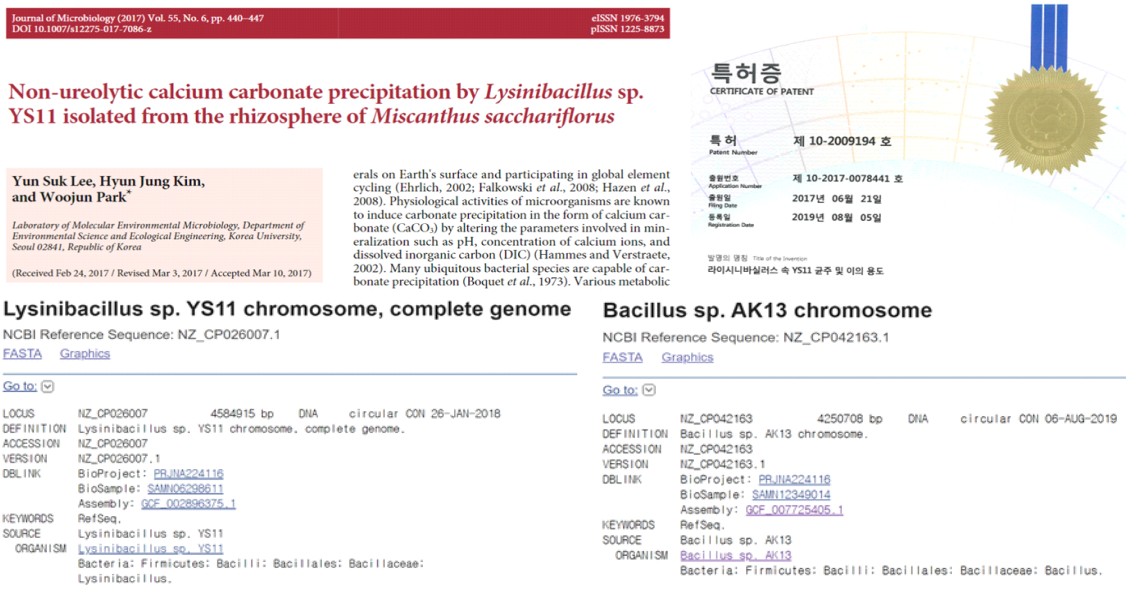
(a) YS11 균주



(b) AK13 균주

그림 3.4.2 비요소분해 탄산칼슘 석출 확인

- 분리된 YS11 균주에 대한 SCI(E)논문(*Journal of Microbiology*, impact factor : 2.319)을 게재(SCI-13)하였음. YS11 균주와 AK13 균주의 유전체 서열 분석 후 NCBI (National Center for Biotechnology Information)에 등록(특허-22)하였음(Genbank accession number; YS11 : NZ_CP026007.1, AK13 : NZ_CP042163.1). YS11 균주는 특허 등록을 완료함(10-2009194호).



Journal of Microbiology (2017) Vol. 55, No. 6, pp. 440–447
DOI 10.1007/s12275-017-7086-z
eISSN 1976-3794
pISSN 1225-8873

Non-ureolytic calcium carbonate precipitation by *Lysinibacillus* sp. YS11 isolated from the rhizosphere of *Miscanthus sacchariflorus*

Yun Suk Lee, Hyun Jung Kim, and Woojun Park*

Laboratory of Molecular Environmental Microbiology, Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

(Received Feb 24, 2017 / Revised Mar 3, 2017 / Accepted Mar 10, 2017)

erals on Earth's surface and participating in global element cycling (Ehrlich, 2002; Falkowski *et al.*, 2008; Hazen *et al.*, 2008). Physiological activities of microorganisms are known to induce carbonate precipitation in the form of calcium carbonate ($CaCO_3$) by altering the parameters involved in mineralization such as pH, concentration of calcium ions, and dissolved inorganic carbon (DIC) (Hammes and Verstraete, 2002). Many ubiquitous bacterial species are capable of carbonate precipitation (Boquet *et al.*, 1973). Various metabolic

특허증
CERTIFICATE OF PATENT
특허 Patent Number 제 10-2009194 호
출원번호 Application Number 제 10-2017-0078441 호
출원일 Filing Date 2017년 06월 21일
등록일 Registration Date 2019년 08월 05일
발명의 명칭 Title of the Invention
라이시니바실러스 속 YS11 균주 및 이의 용도

Lysinibacillus sp. YS11 chromosome, complete genome

NCBI Reference Sequence: NZ_CP026007.1
FASTA Graphics
Go to:

LOCUS NZ_CP026007 4584915 bp DNA circular CON 26-JAN-2018
DEFINITION Lysinibacillus sp. YS11 chromosome, complete genome.
ACCESSION NZ_CP026007
VERSION NZ_CP026007.1
DBLINK BioProject: PRJNA224116
BioSample: SAMN06298611
Assembly: GCF_002896375.1
KEYWORDS RefSeq.
SOURCE Lysinibacillus sp. YS11
ORGANISM Lysinibacillus sp. YS11
Bacteria: Firmicutes: Bacilli: Bacillales: Bacillaceae: Lysinibacillus.

Bacillus sp. AK13 chromosome

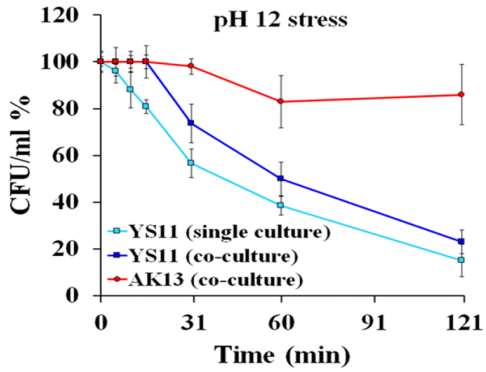
NCBI Reference Sequence: NZ_CP042163.1
FASTA Graphics
Go to:

LOCUS NZ_CP042163 4250708 bp DNA circular CON 06-AUG-2019
DEFINITION Bacillus sp. AK13 chromosome.
ACCESSION NZ_CP042163
VERSION NZ_CP042163.1
DBLINK BioProject: PRJNA224116
BioSample: SAMN12349014
Assembly: GCF_007725405.1
KEYWORDS RefSeq.
SOURCE Bacillus sp. AK13
ORGANISM Bacillus sp. AK13
Bacteria: Firmicutes: Bacilli: Bacillales: Bacillaceae: Bacillus.

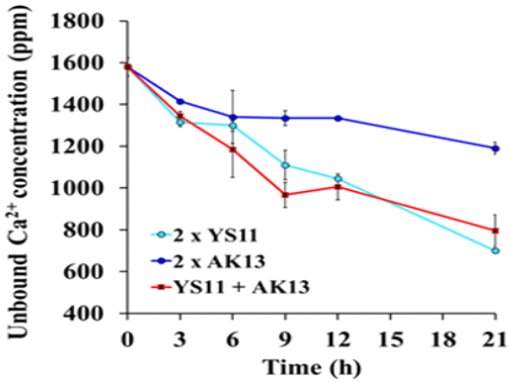
(나) 생체광물 형성 박테리아 혼합 배양

① YS11과 AK13 균주 혼합 배양 시 상호작용

- AK13 균주와 혼합 배양 시 강알칼리 조건 내 YS11 균주의 생존율이 단독 배양 대비 증대됨(그림 3.4.3(a)).
- 혼합 배양 조건에서 배지 내 칼슘 소비가 YS11 균주 단독 배양 대비 차이가 없으며, 탄산칼슘 석출능이 변하지 않는 것을 확인함(그림 3.4.3(b)).



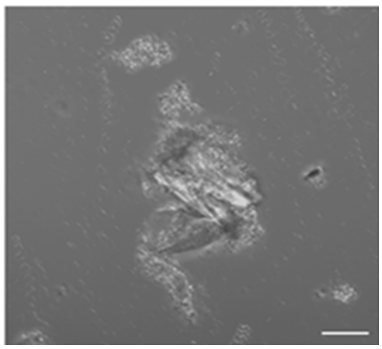
(a) 강알칼리 환경에서의 생존율 증진



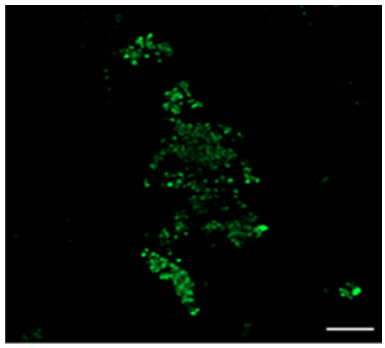
(b) 칼슘 이온 소비량

그림 3.4.3 혼합 배양 시 박테리아 생존율 및 칼슘 이온 소비량 추이

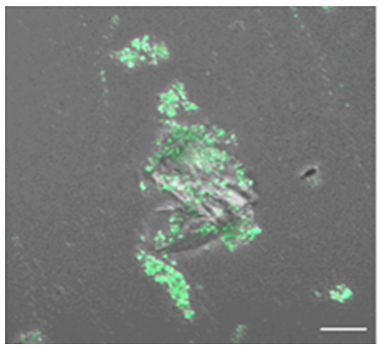
- Calcein 형광염료를 활용하여 박테리아의 활성에 의한 탄산칼슘 석출 유무를 공초점 레이저 주사 현미경을 통해 확인 가능함. 살아있는 박테리아 군집 분포와 탄산칼슘 결정 분포가 일치하는 것을 관찰함으로써 생체광물의 박테리아 유래를 증명함(그림 3.4.4).
- 단일배양 대비 혼합배양 시 더 큰 단면적을 갖는 결정형태로 탄산칼슘이 개질됨(그림 3.4.5).



(a) 탄산칼슘 침전 위치

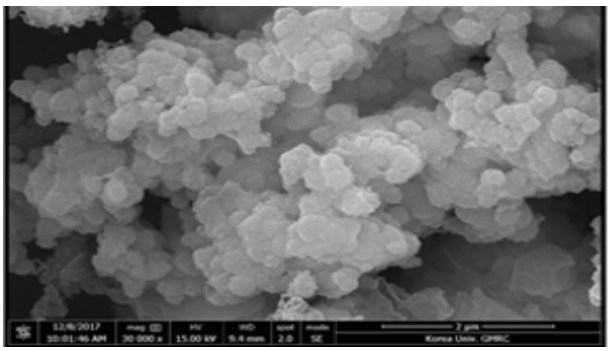


(b) 혼합 박테리아 군집 위치

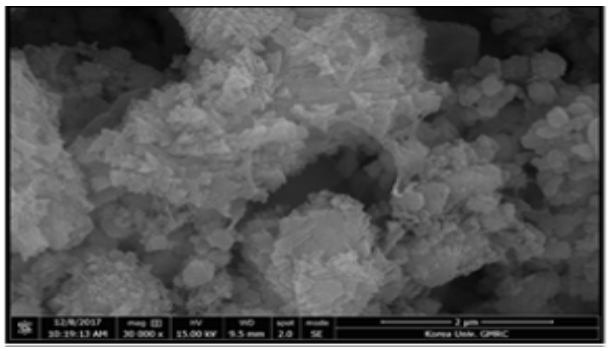


(c) 침전지와 군집 위치 동일

그림 3.4.4 생체광물의 박테리아 유래 증명



(a) YS11 단독 균주의 탄산칼슘 결정



(b) 혼합 배양 균주의 탄산칼슘 결정

그림 3.4.5 단일 균주와 혼합 배양 균주의 탄산칼슘 결정 morphology

(다) 혼합 균주 포자 대량 생산 기술

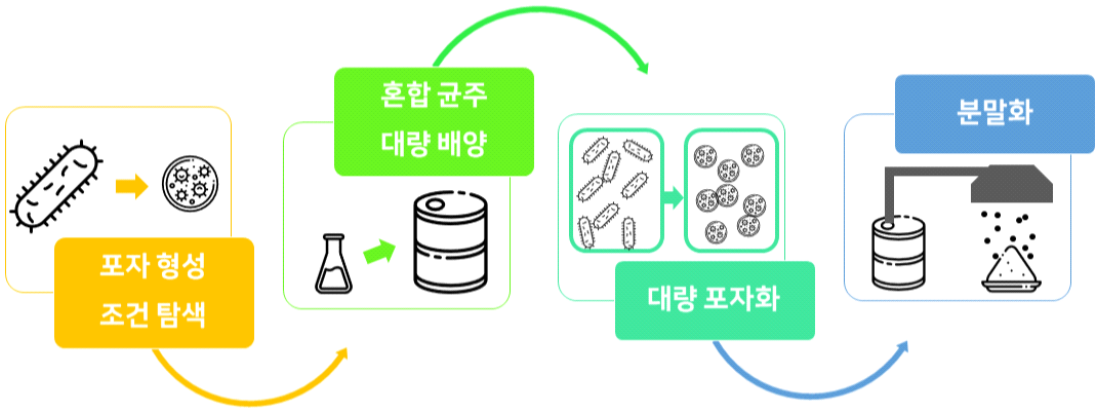


그림 3.4.6 혼합 균주 포자 대량 생산 과정

① 포자형성 상용 배지 활용 포자 생산

- 콘크리트 균열 발생 시점까지 생존하기 위해 혼합 균주의 포자형성이 필수적임.
- 영양배지(Luria-Bertani medium; LB) 이용 시 24시간 기준 박테리아 포자 형성률은 0.01% 이하로 박테리아 포자 생산이 어려우므로, 대량의 포자를 획득하기 위해서 포자형성 배지가 요구됨.
- 포자형성 배지(Difco^{TM} sporulation medium; DSM) 이용 시 24시간 기준 포자 형성률은 영양배지 대비 약 1,000배 이상 증가함(표 3.4.1).

표 3.4.1 영양배지 (LB)와 포자형성 배지 (DSM)의 비교

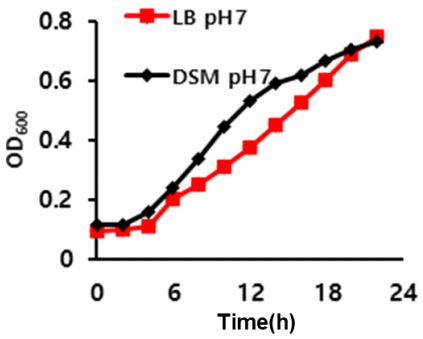
배양 시간	혼합 균주 생장률 (CFU/ml)		혼합 균주 포자 형성률 (CFU/ml)	
	LB	DSM	LB	DSM
24시간	6.45 (±0.35) x 10^8	2.15 (±0.23) x 10^8	7.90 (±1.19) x 10^3	4.89 (±1.22) x 10^7
48시간	7.75 (±0.21) x 10^8	9.72 (±0.44) x 10^7	2.67 (±0.25) x 10^5	4.67 (±1.78) x 10^7
72시간	8.68 (±0.67) x 10^7	1.43 (±0.05) x 10^8	3.27 (±0.51) x 10^4	1.21 (±0.18) x 10^8

② 10 L pilot scale 배양기 활용 포자 생산조건 확보

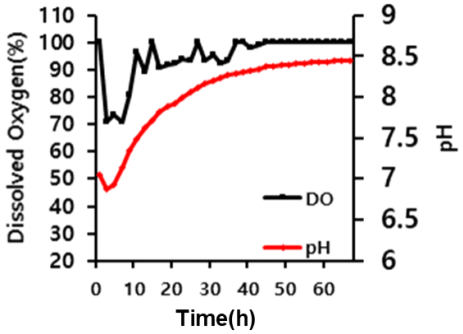
- Scale-up 단계로 10 L pilot scale의 대량 배양기를 활용한 포자 생산조건을 선정함. 배양온도 37℃, 교반속도 100 rpm, p.H 7의 조건이 포자생성 최적 조건으로 선정되었음. 해당 조건에서 흡광도(OD_{600})와 용존 산소량 측정을 통해 박테리아의 생장을 확인하였으며, 생장에 따른 pH 상승을 확인함(그림 3.4.7).



(a) 10L 대량 배양기



(b) Scale-up 생장 곡선

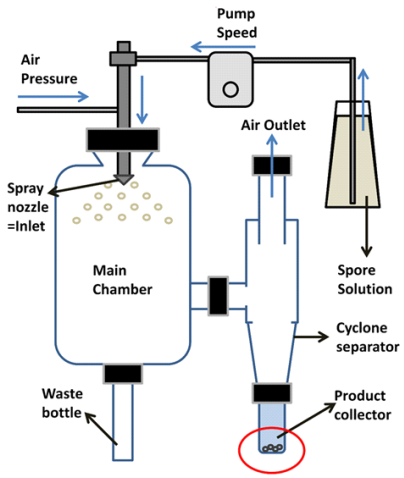


(c) DSM 내 용존 산소량, pH 변화

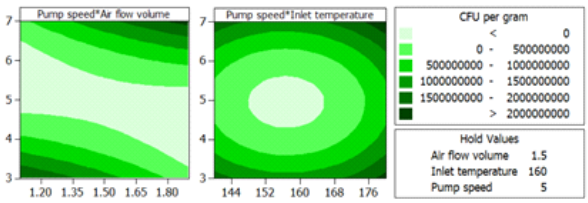
그림 3.4.7 10L 배양기 내 혼합 균주 생장 곡선 및 산소 포화도, pH 변화 확인

③ 분무건조기 활용 포자 분말화 기술 확보

- 포자 혼탁액은 보관과 취급이 어려워 저장과 운반의 용이성을 위해 분무건조 과정을 거쳐 분말화함.
- 통계적 기법을 활용하여 포자 생존율을 최대화하는 분무건조 최적 조건 확립함. 2.1 × 10^9 CFU/g의 박테리아 포자를 입구 온도(Inlet temperature) 180℃, 공기 압력(Airflow volume) 1.9MPa, 펌프 속도(pump speed) 22.2ml/분의 조건으로 획득할 수 있음(그림 3.4.8).



(a) 분무건조기 모식도



혼탁액 내 포자량 (CFU/ml)	분말 내 포자량 (CFU/g)
1.05 (±0.04) x 10^8	2.01 (±0.32) x 10^9

(b) 최적 건조 조건 내 혼합 포자 생산량

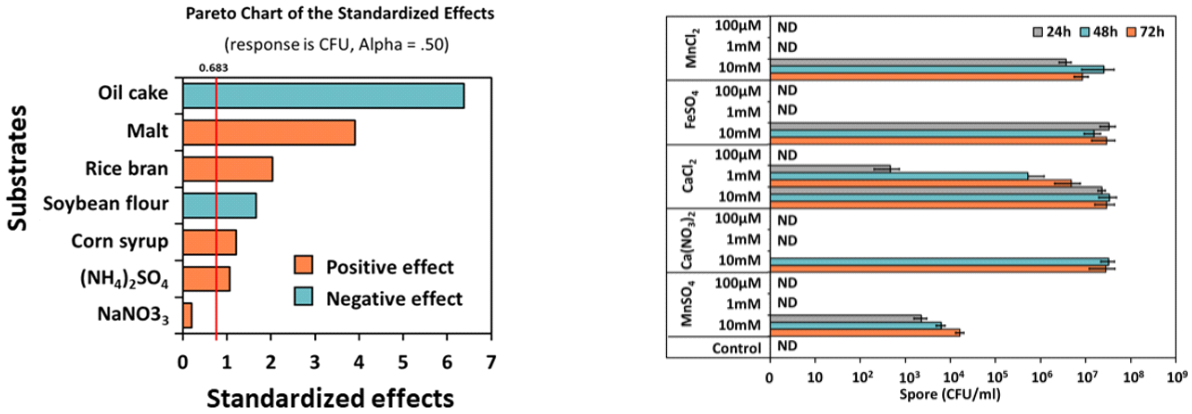
그림 3.4.8 혼합 박테리아 포자 분말화 모식도 및 포자 분말 균 수 측정

(라) 농업 부산물 활용 경제적 배지 개발

① 농업 부산물 활용 포자 대량 생산 가능 경제적 배지 개발 기술

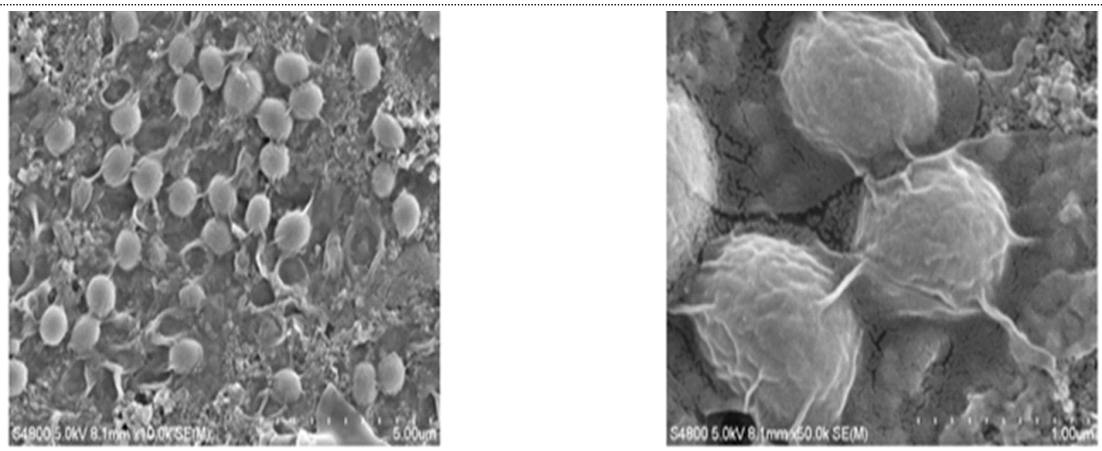
- 기존의 포자형성 배지로 생산한 포자분말은 가격이 1 kg당 약 70만원대의 고가이므로 대량 생산에는 적합하지 않음. 본 연구에서는 농업 부산물을 활용하여 생산비용을 절감할 수 있는 경제적 배지를 개발함.

- 7가지 농업 부산물 중 균 성장에 긍정적 요인으로 미치는 요인 5가지를 선별한 뒤, 파레토 도표(Pareto chart)에서 통계적으로 신뢰할 만한 데이터를 보여준 4개 요인과 농도(쌀겨 1%, 엿기름가루 1%, 물엿 1%, $(NH_4)_2SO_4$ 0.25%)를 선정함.
- 혼합 균주 포자 유도를 위한 요인 선정 및 농도 설정을 진행, 양이온을 첨가하여 포자화능 확인 실험을 수행하였음(그림 3.4.9 및 그림 3.4.10). 10mM의 $FeSO_4$을 첨가한 경제적 배지에서 접종 24시간 내 포자형성을 유도함. 상업적 배지 대비 포자분말 생산가격을 70배 절감함(표 3.4.2).



(a) 대량 배양 배지 요인 선정 (b) 혼합 균주 포자화 요인 선정

그림 3.4.9 경제적 배지 개발을 위한 통계적 분석 실시 (ND : not detected)



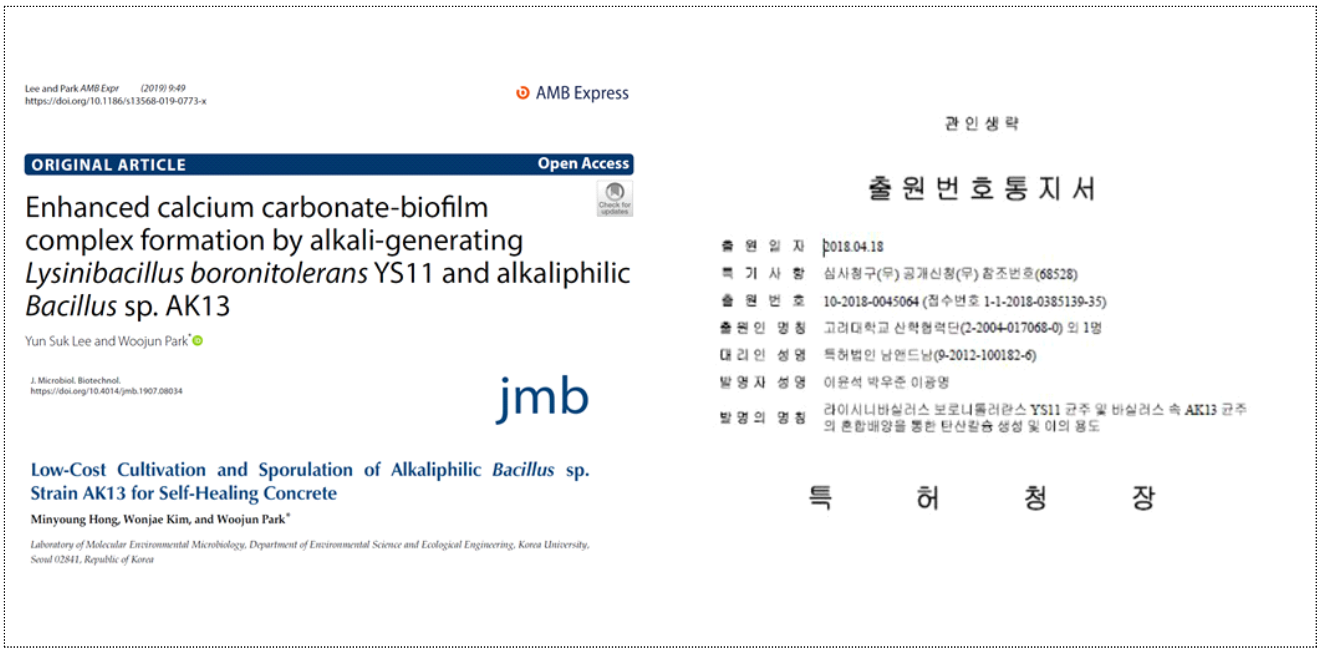
(a) x10,000 (b) x50,000

그림 3.4.10 경제적 배지 내 혼합 균주의 포자 형성 확인

표 3.4.2 상업 배지와 경제적 배지의 재료 및 포자분말 생산비용 비교

경제적 배지 재료					포자 생산가격 (₩/kg)	
대량 배양 요인 [% (v/v)]				포자화 요인	상업적 배지	경제적 배지
쌀겨 1%	엿기름가루 1%	물엿 1%	$(NH_4)_2SO_4$ 0.25%	10mM $FeSO_4$	₩735,900	₩10,500

- YS11과 AK13의 혼합 배양에 관한 특성을 다룬 SCI(E)논문 1편(*AMB Express*, impact factor : 2.22)과 경제적 배지에 대한 논문 1편(*Journal of Microbiology and Biotechnology*, impact factor : 1.97)을 게재(SCI-59, SCI-76)하였으며, 혼합 배양 균주에 의한 탄산칼슘 생성 및 자기치유 용도로의 활용에 대한 특허(특허-40)를 출원함(10-2018-0045064).



Lee and Park *AMB Expr* (2019) 9:49
https://doi.org/10.1186/s13568-019-0773-x

AMB Express

ORIGINAL ARTICLE Open Access

Enhanced calcium carbonate-biofilm complex formation by alkali-generating *Lysinibacillus boronitolerans* YS11 and alkaliphilic *Bacillus* sp. AK13

Yun Suk Lee and Woojun Park*

J. Microbiol. Biotechnol.
https://doi.org/10.4014/jmb.1907.08034

jmb

Low-Cost Cultivation and Sporulation of Alkaliphilic *Bacillus* sp. Strain AK13 for Self-Healing Concrete

Minyoung Hong, Wonjae Kim, and Woojun Park*

Laboratory of Molecular Environmental Microbiology, Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2018.04.18
특기사항	심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(68528)
출원번호	10-2018-0045064 (접수번호 1-1-2018-0385139-35)
출원인 명칭	고려대학교 산학협력단(2-2004-017068-0) 외 1명
대리인 성명	특허법인 남앤드남(9-2012-100182-6)
발명자 성명	이윤석 박우준 이공명
발명의 명칭	라이시니바실러스 보로니톨러란스 YS11 균주 및 바실러스 속 AK13 균주의 혼합배양을 통한 탄산칼슘 생성 및 이의 용도

특 허 청 장

(2) 담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술

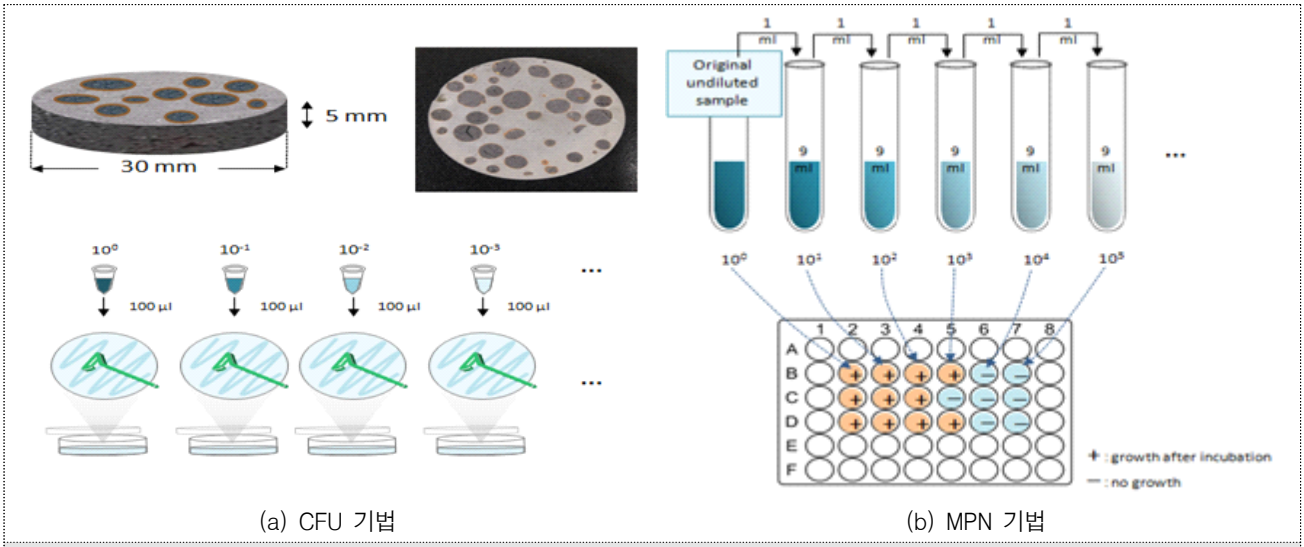
(가) 시멘트 복합체 내부 박테리아 생존율 평가 기법

① 박테리아 CFU 정량 기법 스크리닝

- 균열 발생 시점의 시멘트 복합체 내부 *in-situ* 상태의 박테리아 생존율 측정이 요구되어 MPN(Jonkers, 2010) 및 DO 측정(Wiktor, 2010)이 사용되었음.
- 7가지 실험 기법을 적용하여 시멘트 내부 박테리아의 생존율 측정 시 결과의 일관성을 평가함. 1) Colony Forming Unit(CFU) 측정, 2) Most Probable Number(MPN) 기법, 3) Desolved Oxygen(DO) 측정, 4) Iodonitrotetrazolium Chloride(INT) 기법, 5) 2-(4-amidinophenyl)-1H-indole-6-carboxamidine(DAPI) Staining 기법, 6) Adenosine Triphosphate(ATP) 기법, 7) Live/Dead Cell Staining 기법.
- 7가지 기법 중 CFU, MPN 측정을 추후 박테리아 장기 생존율 평가 방법으로 선정함.

② CFU 및 MPN 실험 방법

- CFU 기법 : 1) 박테리아 포자 혼입 모르타르를 분쇄한 뒤 PBS에 1/10로 희석하여 균 혼탁액을 제작함. 2) 현탁액을 5분간 강하게 vortexing 및 원심분리하여 모르타르 입자와 균을 분리함. 3) 상층액 내 박테리아 수를 2종류의 고체배지(LB 한천배지 및 Petrifilm^{TM})에 도포함. 4) 37℃에서 3일 양생한 후 LB 한천배지 및 Petrifilm^{TM} 에 도말하여 박테리아 수를 측정하고 모르타르 1g당 박테리아 수를 산정함.



(a) CFU 기법 (b) MPN 기법

그림 3.4.11 CFU 및 MPN 기법 모식도

- MPN 기법의 경우 균 혼탁액을 얻어내어 원심분리하지 않고 액체배지에 직접 접종하여 생존율을 검증하는 방법임. 모르타르 시편에 부착되어 분리되지 않은 포자도 생존율을 검증할 수 있음.

표 3.4.3 CFU 및 MPN 기법의 비교

양생 기간 (일)	포자 혼입 모르타르 내 박테리아 생존율	
	CFU 기법 (CFU/g)	MPN 기법 (MPN/g)
7	7.25 (±3.89) x 10^5	4.90 (±1.49) x 10^5
14	8.75 (±0.24) x 10^5	2.67 (±1.78) x 10^5
28	2.68 (±1.17) x 10^6	4.27 (±3.51) x 10^5

- CFU와 MPN 기법은 높은 재현성을 갖고 있음(표 3.4.3). CFU 및 MPN 기법을 생존율 평가 기법으로 선정하여 포자가 혼합된 모르타르를 이용해 생존율을 확인함.

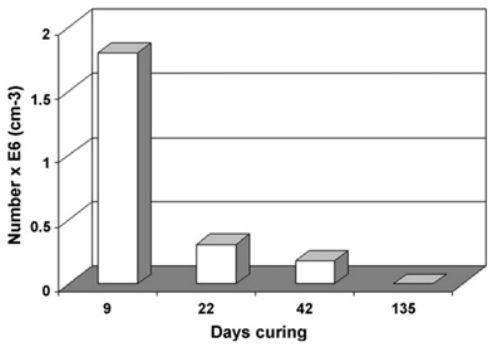
③ 실험 결과 활용 및 분석

- CFU 기법을 통해 콘크리트에 부착되어 분리되지 않은 박테리아 포자를 제외하고 분리된 포자 수를 측정함. Petrifilm^{TM} 활용 시 빠른 분석이 가능함.
- 10^8 CFU/g의 포자를 50g의 모르타르 내에 2.5 g을 혼입했을 때 모르타르 1 g당 평균 10^5 CFU/ml를 확인할 수 있었으며 CFU 및 MPN 기법에서 같은 양상을 확인할 수 있음.

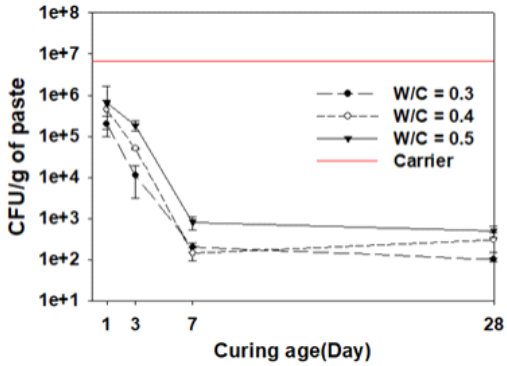
(나) 시멘트 복합체 생존율 향상

① 생균 혼입 시멘트 복합체 내부 생존율

- 서로 다른 물-시멘트비의 페이스트에서 YS11 균주의 1일 대비 28일 생존율은 모두 0.08% 수준으로(그림 3.4.12), 해외 Delft의 연구 결과와 유사한 생존율(0.1%)을 보임.



(a) *Bacillus cohnii* (Jonkers, 2010)- MPN method

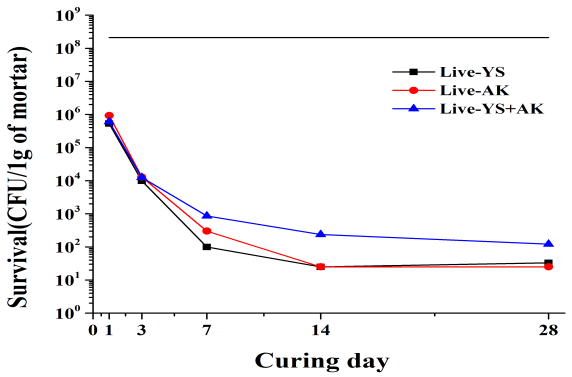


(b) YS11 - CFU method

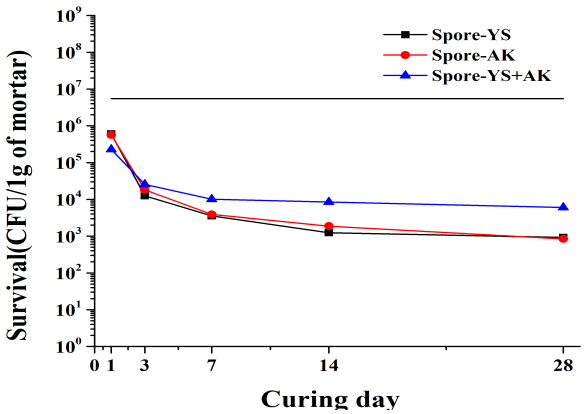
그림 3.4.12 해외 주요 균주와 YS11의 시멘트 복합체 내부 생존율 비교

② 혼합 배양 박테리아 및 포자 활용

- YS11과 AK13 균주 혼합 배양 시 단일 배양 대비 박테리아 생존율이 향상됨. 생균 대비 포자의 모르타르 내 생존율이 더 우수함(1일 대비 생존율 기존 0.08% → 혼합 균주 포자 활용 시 13%, 그림 3.4.13).



(a) 생균 활용 시



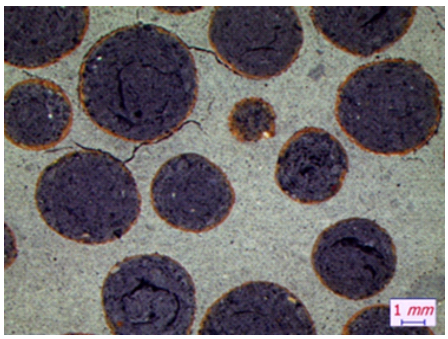
(b) 포자 활용 시

그림 3.4.13 혼합 배양 박테리아의 포자 활용 시 생존율 변화

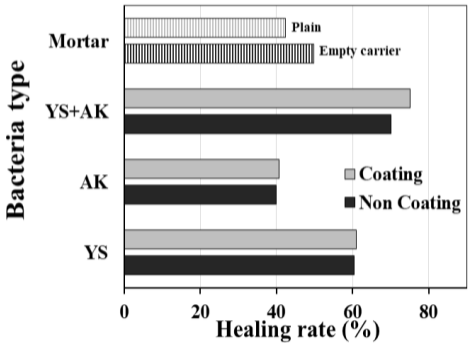
(다) 셀룰로오스 기반 펠렛 담체 활용 생존율 향상

① 배경 및 기존 담체 활용

- 담체는 시멘트 복합체의 높은 pH 침출수, 압력 등 스트레스 환경 조건으로부터 박테리아를 보호함. 현재 전 세계적으로 팽창 점토, 마이크로 캡슐, 분말 흡착과 같은 박테리아 담체화 방식이 활용되고 있음. 따라서 가장 널리 연구된 팽창 점토 진공 고정 방법을 활용하여 선행 연구를 진행하였고, 박테리아 직접 투입 대비 팽창 점토 활용 시 우수한 자기치유 성능을 보이는 것을 확인함(그림 3.4.14).
- 팽창 점토를 활용 시 박테리아 고정률이 낮아 치유성능 목표 달성을 위해 다량의 박테리아 고정 담체가 필요하다는 문제점이 있음(잔골재 wt 10%).



(a) 모르타르 내부 팽창점토 단면

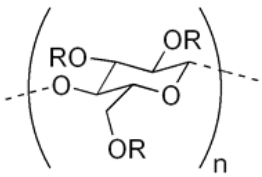


(b) 팽창점토 활용 자기치유 성능

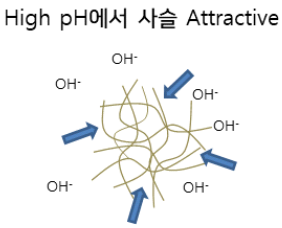
그림 3.4.14 팽창 담체 활용 자기치유 성능 검증

② 셀룰로오스 기반 펠렛

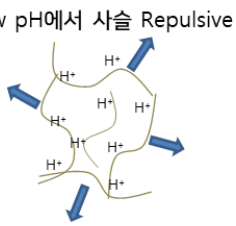
- 셀룰로오스는 선형 사슬의 다당류로 제약 분야에서 사용되고 있는 재료 중 하나이며, 생체에 미치는 영향이 매우 미미한 것으로 알려져 있음. 알킬-셀룰로오스(Alkyl-cellulose)는 셀룰로오스 반응기(R)를 메틸기로 치환하여 pH 반응성을 띰(그림 3.4.15).
- 알킬-셀룰로오스를 기반으로 만든 펠렛은 콘크리트 초기 재령의 높은 pH로부터 박테리아를 보호, 이후 박테리아 활동을 위한 결정핵 장소(Nulceation site)를 제공함.



(a) 셀룰로오스 단위 분자구조



(b) 높은 pH 내 반응



(c) 낮은 pH 내 반응

그림 3.4.15 셀룰로오스의 pH 반응성

③ 셀룰로오스 기반 펠렛 제작 기법 및 효과

- 셀룰로오스 펠렛 제작을 위해 표 3.4.4와 같은 재료가 사용됨. 재료를 모르타르 배합용 믹서에 넣어 반죽하여 2mm 구경(Outlet)을 가진 유압 프레스를 통해 압출함. 펠렛은 적절한 길이를 갖도록 절단하고 60℃에서 3일간 건조함.

표 3.4.4 펠렛 재료 및 효과

재료	효과
Alkyl-cellulose	펠렛에 pH 반응성을 부여 및 재료 접착
박테리아 분말	YS11 및 AK13의 혼합 배양 포자 분말과 박테리아 영양소 (젖산 칼슘 5 수화물, 효모 추출물)로 구성
규조토	박테리아 흡착, 펠렛 부피 채움재, 결정핵 장소 (nucleation site) 제공
PVA	펠렛 자체 강도 확보

④ 시멘트 복합체 내 펠렛의 박테리아 보호 효과

- NaOH(pH 14) 용액에서 펠렛은 안정한 상태를 유지하나, 중성 pH에서 체적 팽창함. 팽창한 뒤 영양소가 용출되고, 박테리아가 활동하여 점액질과 반투명 결정을 형성함(그림 3.4.16).

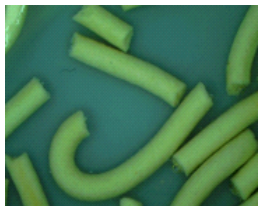
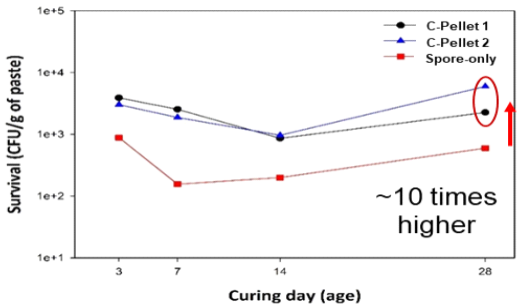
구분	용액 투입 직후	3시간 후	24시간 후
NaOH 용액			
물			

그림. 3.4.16 염기 및 중성 조건 내 펠렛 반응

- 2 mm 구경의 펠렛을 시멘트 페이스트에 투입하여 CFU 기법으로 박테리아 생존율을 측정함. 펠렛화 된 혼합 균주 포자 활용 시 포자 직접 혼입 대비 10배 이상의 박테리아 생존율 확인함(그림 3.4.17). 요소 기술 별 박테리아 생존률 실험 결과는 표 3.4.5과 같음.



(a) 펠렛의 크기



(b) 시멘트 복합체 내부 생존율 변화

그림 3.4.17 펠렛 크기 및 시멘트 복합체 내부 보호 효과

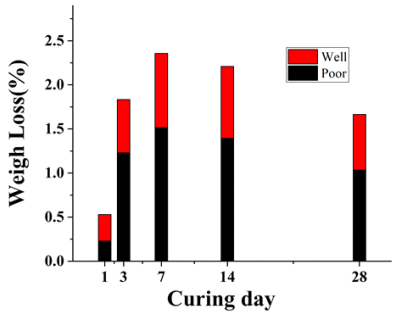
표 3.4.5 요소 기술별 박테리아 생존률

요소기술	실험 조건	박테리아 조건	1일 대비 28일 생존률(%)
해외 균주	페이스트 (W/C = 0.5)	B.cohnii 생균 배양액	0.1
단독배양 생균	페이스트 (W/C = 0.4)	YS11 생균 배양액	0.08±0.01
혼합배양	모르타르 (W/C = 0.4, S/C = 2.0)	YS11 및 AK13의 혼합 생균 배양액	0.56±0.03
혼합배양 포자 분말화	모르타르 (W/C = 0.4, S/C = 2.0)	혼합 배양 포자 분말	2.6±0.3
분말 포자 펠렛화	모르타르 (W/C = 0.4, S/C = 2.0)	혼합 배양 포자 분말 펠렛	70.4±5

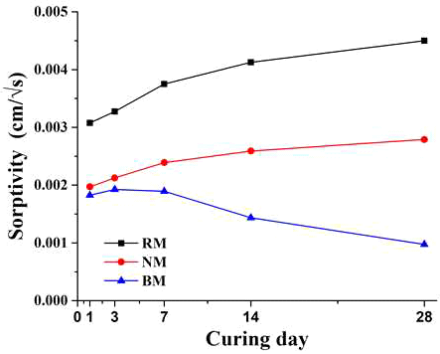
(3) 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술

(가) 박테리아 포자 직접 혼입 시멘트 복합체의 특성

① 포자 직접 혼입 모르타르 특성 변화



(a) 박테리아에 의한 탄산칼슘 석출 (TGA)



(b) 흡수율 저감 효과 (water absorption)

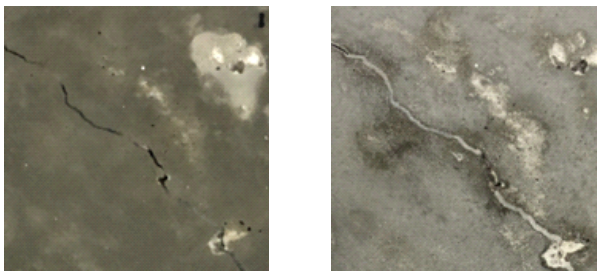
그림 3.4.18 박테리아 직접 혼입 시 모르타르의 변화

- 물-시멘트비(W/C) 0.4, 시멘트-모래비(C/S) 2.0인 모르타르에 시멘트 질량 1%의 혼합 박테리아 포자와 2%의 영양분(Calcium lactate 및 Yeast extract)을 혼입하여, 혼합 균주 포자가 시멘트 복합체에 미치는 영향을 평가함.
- TGA(Thermogravimetric analysis) 분석 결과 모르타르 내부 박테리아의 탄산칼슘은 Well-crystalline 형태로 석출되었음(그림 3.4.12(a)). 혼합 균주 혼입 시 모르타르 내 Pore-pore interconnection을 통한 Water transportation이 감소하였기 때문에 시멘트 복합체 내부 공극률이 증가하였지만, 흡수율은 감소함(그림 3.4.12(b), RM: reference, NM: nutrient only, BM: bacteria mixed).

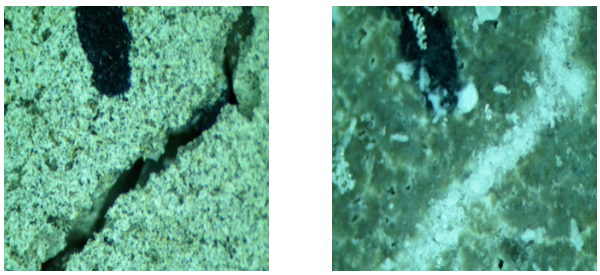
(나) 펠렛 혼입 시멘트 복합체의 자기치유 성능

① 광학현미경 이용 균열 충진 확인

- W/C=0.4, S/C=2.0인 모르타르에 시멘트 질량의 5% 펠렛을 혼입, 재령 7일에 균열을 유도함. 28일간 수돗물 양생 후 흰색 결정이 균열 전면에 분포한 것을 확인함(그림 3.4.19).



(a) 모르타르 균열 (좌: 0일, 우: 28일)

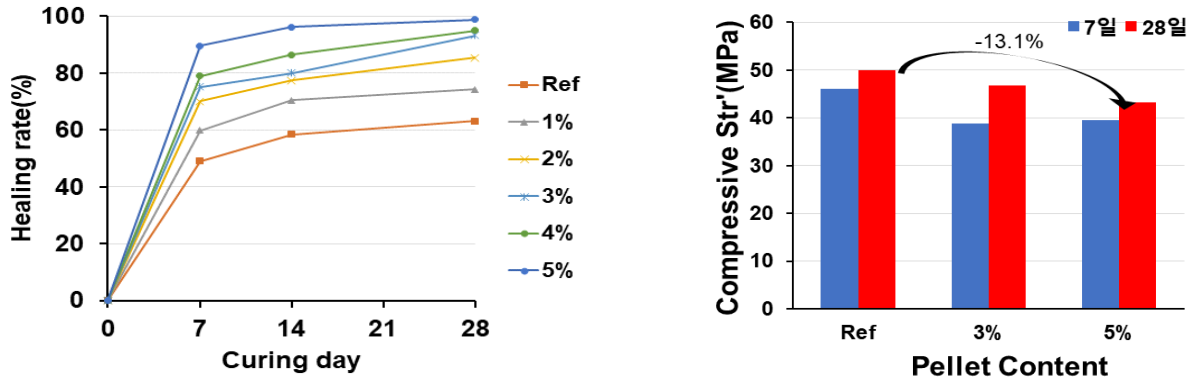


(b) 모르타르 균열 부위 확대 (좌: 0일, 우: 28일)

그림 3.4.19 펠렛 혼입 모르타르의 균열 외부 관찰

② 펠렛 혼입 수준에 따른 모르타르의 성능 평가

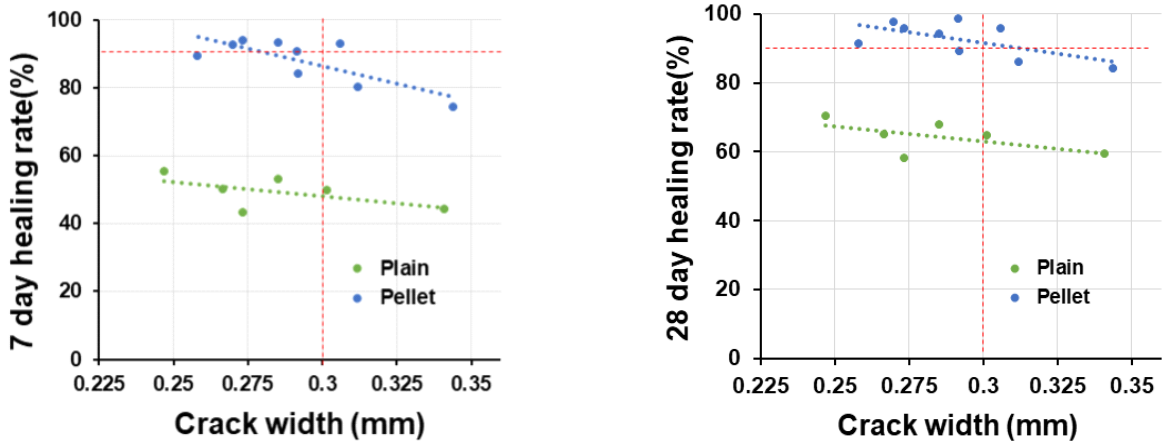
- W/C=0.4, S/C=2.0인 배합을 표준배합으로 설정한 뒤 시멘트 질량 대비 1~5%를 펠렛으로 치환하고, 치환한 펠렛 부피만큼의 잔골재를 제거함. 해당 시편은 재령 7일까지 수중 양생한 후 균열을 유도하고(평균 균열 크기 0.28 mm), 정수위 투수실험을 수행함. 펠렛 3%, 5%를 혼입한 모르타르에 대해 압축강도실험을 실시함(그림 3.4.20).



(a) 균열 치유량 변화 (b) 압축강도

그림 3.4.20 펠렛 혼입량의 변화에 따른 균열 치유량 및 압축강도 변화

- 펠렛 혼입량이 증가함에 따라 균열 치유 속도가 증가하였으며, 3% 이상 혼입 시 28일 균열 치유율 목표(90% 이상)을 달성함(그림 3.4.20(a)). 28일 압축강도는 펠렛 3% 투입 시 대조군 대비 6.25%, 5.00% 투입 시 13.1%만큼 감소함(그림 3.4.20(b)). 강도 저하는 배합 조정 및 혼화제 투입으로 보완할 수 있는 수준임.
- 셀룰로오스 기반 펠렛의 특징으로 7일 이내 빠른 투수량 감소가 있으며, 셀룰로오스 펠렛 성분이 박테리아를 위한 결정핵 장소를 형성하기 적합한 조건임을 분석함.
- 모르타르 표준배합에 대해 시멘트 질량의 5%를 펠렛으로 치환하여 투입 시 재령 28일 균열 치유량은 0.25 mm 균열에서 97.7%, 0.3 mm 균열에서 91.5%로 측정됨(그림 3.4.21).



(a) 치유 재령 7일 (b) 치유 재령 28일

그림 3.4.21 정수위 투수실험에 의한 균열 치유 양상

마. 박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발

(1) 글라이코 캘릭스(슬라임) 형성 박테리아의 분리·동정 흡착기술

(가) 글라이코 캘릭스 형성 광합성 박테리아 분리 및 동정

- 화학적 열화(황산)에 의한 노출된 하수환경에서 생장이 가능하며 콘크리트의 표면 보호의 효과를 부여할 수 있는 글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 선별해 내기 위해 수행되었음.
- 16s-rRNA 염기서열 분석 방법을 이용한 2차 선별에서는 글라이코 캘릭스 형성 박테리아 균주인 *Rhodobacter capsulatus, Rhodopseudomonas palustris, Rhodobacter blasticus, Rhodospirillum rubrum* 및 *Rhodobacter sphaerodies*의 5개 균주를 동정하였음.

(나) 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 최적 배양조건 제시

- 글라이코 캘릭스 형성 고효율 균주인 *Rhodobacter capsulatus* 및 *Rhodobacter blasticus* 균주의 배양액 및 탄소원 구성요소, 배양재령과 환경 변화에 따른 균주 개체수, 글라이코 캘릭스 형성량을 평가하였음.
- 27s Media(배지조성), Malic acid(탄소원)의 조건(표 3.5.1)에서 *Rhodobacter capsulatus*의 글라이코 캘릭스 형성량은 9.54 g/L로 가장 우수하였음.
- 이때의 박테리아 배양 농도는 접종 후 11시간에서 1.0×10^9 cell/mL으로 당초 목표인 1.0×10^5 cell/mL의 농도에 비해 높은 생균수를 보였음(그림 3.5.1).

(다) 박테리아 생장을 고려한 고정화 재료 선정

- 콘크리트의 강알칼리성(pH 12 이상) 및 극건조의 환경에서 박테리아의 생장성 향상을 위해서는 생장처(living pore) 제공 및 극건조 환경에서 지속적인 영양분의 공급이 필요함.
- 고흡수성 수지(SAP), 펄라이트, 팽창질석으로 고정화 재료의 타입을 변화하였으며, 10^9 cell/mL 농도로 배양 된 *Rhodobacter capsulatus* 배양액에 고정화 재료를 7일간 침지한 후 원심분리를 통해 고정화된 균주 분리하고 Hemocytometer를 이용한 개체수를 평가하였음.
- 박테리아 고정화를 위한 최적의 재료로서 중성수준의 pH 및 높은 보수성을 가지며, 100~150 meq/100 g의 우수한 양이온 교환용량으로 박테리아 생장에 필요한 양이온(Ca^{2+} 및 Si^{4+}) 등 공급에 유리한 팽창질석이 선정되었음.

표 3.5.1 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 최적 배양 조건

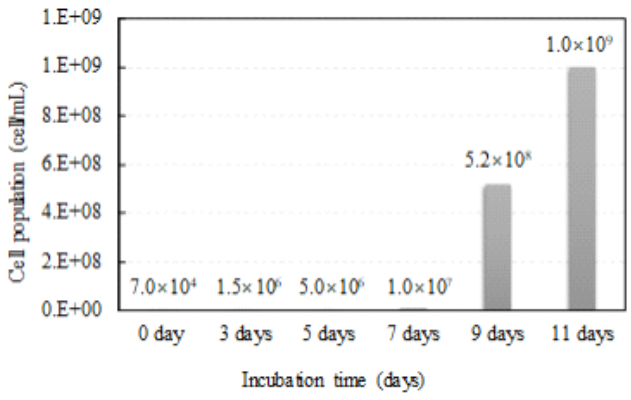
균주	산소공급	광조건	온도	pH
Rhodobacter capsulatus	통성혐기	광조건	28±2℃	6.8

배양액 조성			
Yeast extract	0.1 g	Malic acid	3.0 g
Ferric citrate solution(0.5%)	1.0 mL	KH_2PO_4	0.5 g
$MgSO_4{\cdot}7H_2O$	0.4 g	NaCl	0.4 g
NH_4Cl	0.4 g	$CaCl_2{\cdot}2H_2O$	0.05 g
Trace element solution SL-6	1.0 mL	D.W	1 L

- 팽창질석으로 고정화 유도시 빗살 형태의 팽창질석 내부공극에 *Rhodobacter capsulatus* 군집이 다수 분포하며(그림 3.5.2) 고정화 생균수는 1.6×10^{9} cell/mL 이상으로 평가됨.

(라) 박테리아 및 유기영양분의 흡착 균일성을 갖는 고정화 기술 개발

- 박테리아의 생장처(Shelter)로 활용되는 고정화 재료인 팽창질석의 경우 밀도가 0.25 g/cm^{3}으로서 박테리아 배양액에 단순 침지하여 흡착을 유도할시 부유할 수 있으며, 재료의 응집이 빈번하여 박테리아의 균질한 흡착이 어려움.
- 흡착 패드 및 내부 순환식의 멸균 배양액 용기를 개발하였으며(그림 3.5.3), 박테리아 고정화 실시 72시간에서의 고정화 생균수는 9.0×10^{8} cell/mL로 단순 침지 방법에 비해 32% 높은 효율성 보임.
- 흡착 패드 및 밀폐형 고정화 기기를 이용한 박테리아 고정화 방법은 고정화 생균수 농도 향상을 위하여 72 시간 이상을 지속해야 하는 단점 및 고정화 재료 부유 방지를 위한 망사형 흡착패드 사용으로 고정화 재료의 대량 생산에 불리함.
- 박테리아의 고정화 시간 단축을 위하여 음압조성 장비를 개발하였음(그림 3.5.4).
- 10~20 torr 환경의 음압조성 장비를 이용한 박테리아 고정화는 30분 이내에 1.2×10^{9} cell/mL 농도의 박테리아를 고정화함. 72시간이 경과한 이후에도 9.0×10^{8} cell/mL의 박테리아 생균수 농도를 보이는 밀폐형 고정화 기기 이용 방법에 비해 47% 우수함(그림 3.5.5).



(a) 재령별 박테리아 농도



(b) 박테리아 접종 직후



(c) 박테리아 배양 11일 후

그림 3.5.1 박테리아 배양 생균수 변화

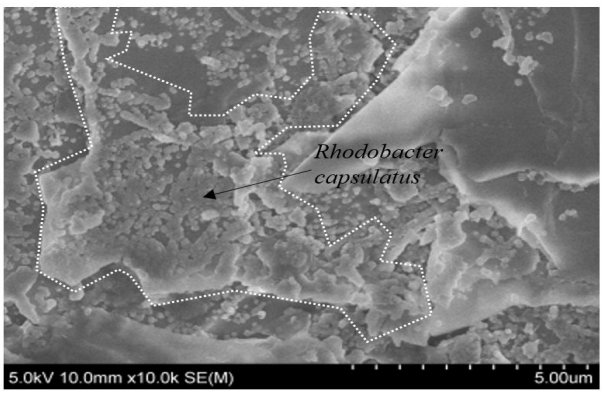


그림 3.5.2 박테리아 고정화 된 팽창질석

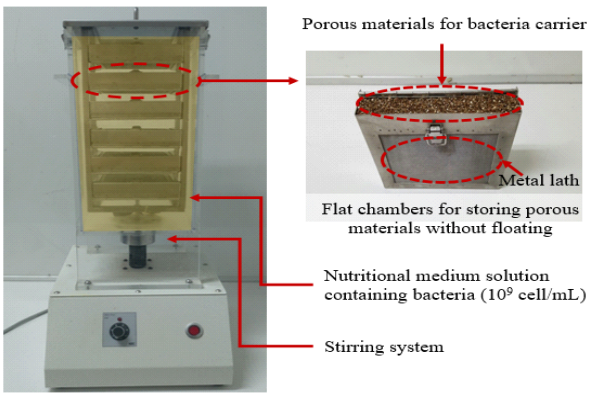


그림 3.5.3 밀폐형 고정화 기기

(마) 균주 적용 전·후 생태계 미생물 군집 분석 조사

- 글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 코팅 콘크리트 하수관거와 일반 하수관거의 표면 분말 시료 및 하수시료를 채취하여, 16s-rRNA meta barcoding 방법을 이용하여 미생물군집(NGS)을 분석하였음.
- 코팅 콘크리트 하수관거의 표면 분말 시료 및 하수시료에서 α-proteobacteria의 군집이 일반 하수관거 시료에 비해 높게 나타났으나, 이는 코팅재에 포함되는 글라이코 캘릭스 형성 박테리아에 의한 영향임(그림 3.5.6).
- 이를 제외한 미생물 군집은 코팅 콘크리트 하수관거와 일반 하수관거에서 큰 차이를 보이지 않으며, 환경유해균주인 장내세균총(Enterobacterales)은 발견되지 않음.

(바) 박테리아 대량생산 시스템 구축 및 가격 저감율 확보 방안 제시

- 그림 3.5.7과 같은 1.5 ton의 박테리아 대량 배양기 및 6 ton의 컨테이너를 비치할 수 있는 대량배양실 구축과 함께, 10^9 cell/mL 농도의 박테리아 농축이 가능한 시스템을 구축하였음.
- 안양 하천에서 분리 한 균주 중 하나인 AF1-31 strain (16s-rRNA 동정결과 *Rhodobacter capsulatus*와 99.6%의 유사도)의 경우 27s media에서 25℃, 11일 동안 대량 배양 시 7.5×10^9 cell/mL의 박테리아를 1 ton 생산이 가능함(생산 가격 20% 저감 가능).

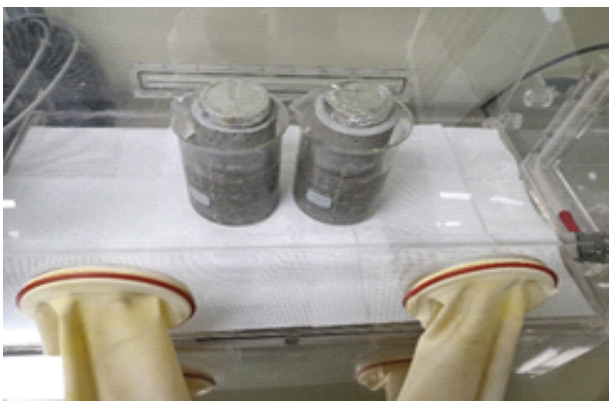


그림 3.5.4 음압 조성 장비

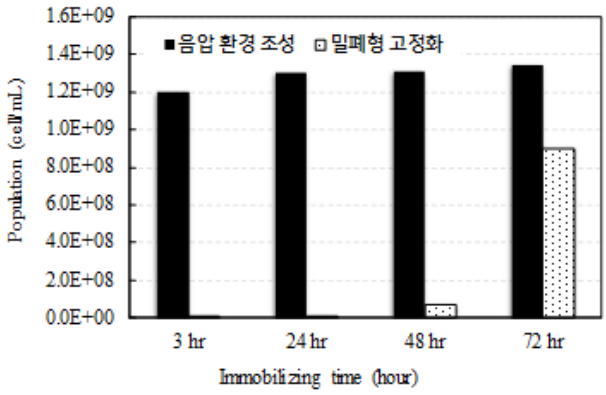


그림 3.5.5 고정화 기술에 따른 박테리아 농도

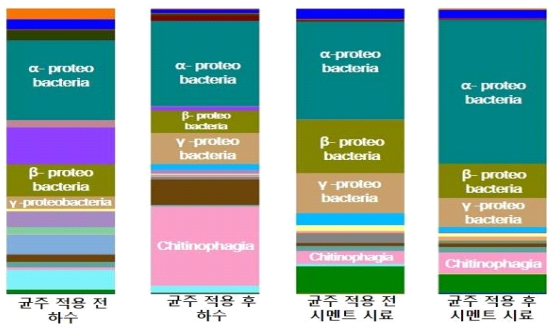


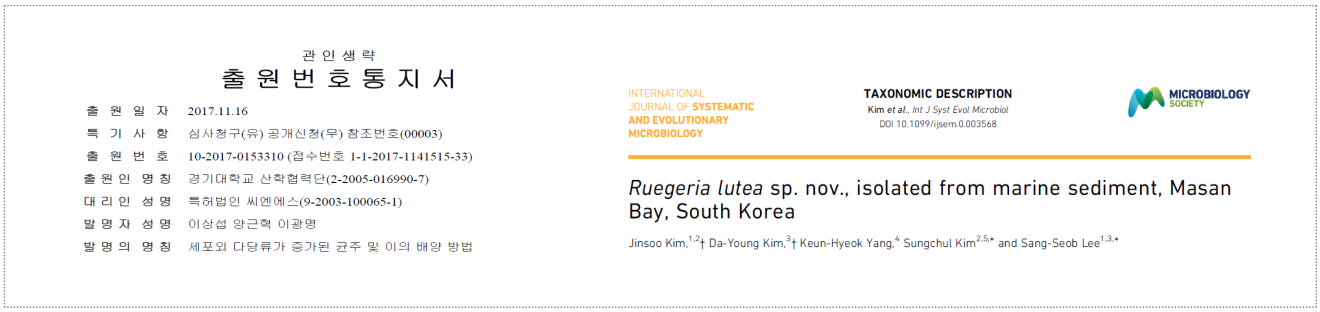
그림 3.5.6 균주 적용 전 후 생태계 미생물 군집 분석 (16s meta-barcoding)



그림 3.5.7 박테리아 대량 생산 시스템 (대량 배양기)

(사) 주요 성과

- 글라이코 캘릭스 형성 박테리아 균주 및 배양 기술에 대한 연구개발 성과로서 특허 등록 1건(특허-24)과 SCI(E) 게재 1건(SCI-69)을 달성함.



관 인 생 략

출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자	2017.11.16
특 기 사 항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(00003)
출 원 번 호	10-2017-0153310 (접수번호 1-1-2017-1141515-33)
출원인 명칭	경기대학교 산학협력단(2-2005-016990-7)
대 리 인 성 명	특허법인 씨엔에스(9-2003-100065-1)
발 명 자 성 명	이상섭 양근혁 이광명
발 명 의 명 칭	세포외 다당류가 증가된 균주 및 이의 배양 방법

INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY

TAXONOMIC DESCRIPTION

Kim *et al.*, *Int J Syst Evol Microbiol*

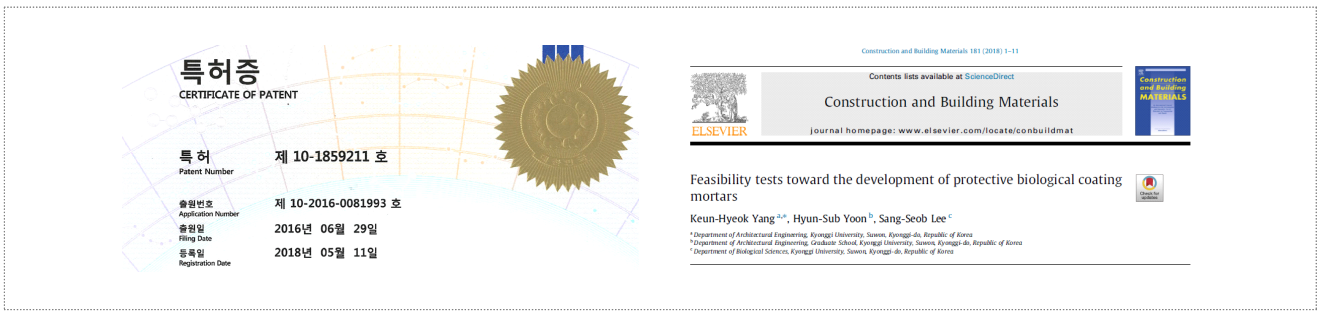
DOI 10.1099/ijsem.0.003568

MICROBIOLOGY SOCIETY

Ruegeria lutea sp. nov., isolated from marine sediment, Masan Bay, South Korea

Jinsoo Kim,[1,2]† Da-Young Kim,[3]† Keun-Hyeok Yang,[4] Sungchul Kim[2,5]* and Sang-Seob Lee[1,3]*

- 생장처 제공 고정화 재료 및 흡착패드와 음압 조성 장비 개발에 대한 특허 등록 1건(특허-7)과 SCI(E) 논문 게재 1건(SCI-46)을 달성함.



특허증

CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number	제 10-1859211 호
출원번호 Application Number	제 10-2016-0081993 호
출원일 Filing Date	2016년 06월 29일
등록일 Registration Date	2018년 05월 11일

Construction and Building Materials 181 (2018) 1–11

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

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

Feasibility tests toward the development of protective biological coating mortars

Keun-Hyeok Yang[a,*], Hyun-Sub Yoon[b], Sang-Seob Lee[c]

[a] Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, Republic of Korea
[b] Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, Republic of Korea
[c] Department of Biological Sciences, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-do, Republic of Korea

(2) 생체모방형 코팅재 구성 요소 기술

(가) 박테리아 그룹의 내황산 및 H_2S 차단 메커니즘 정립

① 하수관거 황화수소(H_2S)가스 및 황산(H_2SO_4) 발생 기구 분석

- 하수층 하부 퇴적 슬러지 층의 혐기성 미생물은 대사반응의 과정에서 퇴적 유기물을 산화하고 이 때 발생되는 H^- 및 S^{2-} 이온이 결합하여 H_2S 가스를 생성함.
- 콘크리트 기층부 면에 서식하는 황산염환원세균(*Thiobaillus*)는 생체대사의 과정에서 식 (3.5.1)과 같이 황산염(SO_4^{2-})을 환원시키며, 식 (3.5.2)와 같이 기층부로 상승한 H_2S 가스 및 관거 내 유입되는 산소와 결합하여 황산을 형성함.
- 여기서 생성된 황산은 콘크리트 표면 부식뿐만 아니라 시멘트 수화생성물인 수산화칼슘($Ca(OH)_2$) 및 규산칼슘수화물(C-S-H)와 반응하여 석고 및 에트린자이트를 형성하며, 콘크리트의 체적팽창 및 균열을 유발함.

$$SO_4^{2-} + ATP \rightarrow adenosylphosphate\ sulfate\ (APS) \rightarrow SO_3^{2-} (+ AMP) \rightarrow S_3O_6^{2-} \quad (3.5.1)$$
$$S_3O_6^{2-} \rightarrow S_2O_3^{2-} (+ SO_3^{2-}) \rightarrow H_2S$$

$$H_2S + 2O_2 \rightarrow H_2SO_4 \quad (3.5.2)$$

② 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 황산열화 제어 기구

- 글라이코 캘릭스 형성 균주인 *Rhodobacter capsualtus* 등이 형성하는 글라이코 캘릭스는 하수 환경에 존재하는 황산염(SO_4^{2-}) 및 황화수소(HS^-) 이온의 고정화를 통해 황산(H_2SO_4 및 황화수소(H_2S) 가스로의 환원을 억제함(그림 3.5.8).
- 더불어 당·단백질 복합체로서 막(Membrane)의 형태를 띄는 글라이코 캘릭스는 강산에 의한 콘크리트 구조체 표면 부식을 물리적으로 차단함.
- 해당 균주는 하수환경에서 서식하는 황산염환원세균의 생장의 저해와 함께 악취 발생의 원인 물질인 황화메틸(Methyl Sulfide) 및 이황화메틸(Dimethyl Sulfide) 등의 황화합 물을 제거함.
- 이러한 매커니즘은 하수환경에서 콘크리트 구조체의 열화제어 기구로 활용되며, 특히 박테리아의 지속적인 생장과 번식활동을 통해 형성되는 글라이코 캘릭스는 유지관리-프리 개념으로 콘크리트 내황산을 포함한 내구성 향상을 유도함.

③ 박테리아가 형성하는 글라이코 캘릭스의 성분 분석

- 그림 3.5.9의 글라이코 캘릭스의 성분분석을 위해 중성당(Phenol-H_2SO_4 분석), 산성당(Uronic acid 분석), 단백질(Bradford 분석)의 분석과 함께, 구성당(Aldidol accetate 분석) 및 분자량 분석(액체크로마토그래피)을 실시하였음.
- *Rhodobacter capsulatus*가 형성하는 글라이코 캘릭스의 단백질과 중성당의 혼합비율 2:1이며, 구성당은 Mannose, Galactose, Glucose로 분석되었음. 더불어 글라이코 캘릭스의 분자량은 687.9 kDa로 평가되었음.

(나) 코팅재 최적 배합 제시 및 박테리아 생장성 평가

① 박테리아 글라이코 캘릭스 기반 콘크리트 보호 코팅재 배합설계 제시

- 박테리아 고정화 재료의 혼입율(골재 부피 대비 10%, 20%, 35%)과 고정화 재료 타입(팽창질석, 펄라이트, 고흡수성 수지) 및 사용 결합재 및 배합요소(물-결합재비 등)을 주요 변수로 하여 박테리아 글라이코 캘릭스 기반 콘크리트 보호 코팅재의 배합설계를 수행하였음.
- 배합설계를 재료는 *Rhodobacter capsulatus*(10^9 cell/mL), 팽창질석, 보통포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC), 플라이애시(fly ash, FA), 고로슬래그(blast furnace slag, GGBS), 규사(silica sand)가 이용되었음.

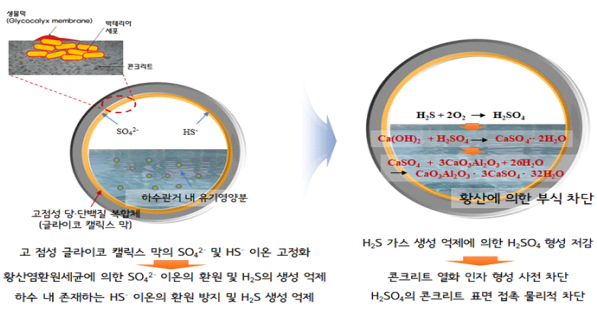
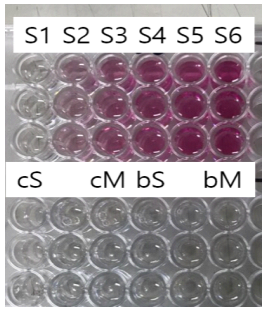


그림 3.5.8 글라이코 캘릭스 막의 H_2S 차단 효과



(a) 산성당 분석

그림 3.5.9 글라이코 캘리그의 구성당 분석

- 코팅재의 특성평가는 휨강도, 압축강도, 부착강도, 내알칼리성, 길이변화율, 중성화 저항성, 투수량, 물 흡수 계수 등 KS F 4042 품질 규격 성능, viable cell count method에 의한 박테리아 생장성 평가가 수행되었음.
- 박테리아 글라이코 캘릭스 기반 콘크리트 보호 코팅재의 최적 배합상세는 콘크리트 보호 코팅재의 적용방식에 따라 두께 1~5 mm의 표면 코팅, 10~100 mm의 단면 보수 형태로서 활용됨.(참여기업과 협력) 최적 배합 상세는 표 3.5.2 및 표 3.5.3에 제시하였음.
- 표면 코팅의 용도로서 활용되는 코팅재는 콘크리트 구조물 보수용 재료로서 요구되는 KS F 4042의 품질 시험 항목의 요구성능을 만족함(표 3.5.4). 더불어 해당 배양에서 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 생균수는 4.6×10^6 cell/mL 수준임(그림 3.5.10).
- 제시된 최적 배합을 기반으로 하는 글라이코 캘릭스 코팅재의 배합설계 가이드라인이 제시하였음. 이 가이드라인은 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 배양 및 보관과 운반, 코팅재 성능과 품질관리 방안의 내용을 포함하고 있음.

표 3.5.2 박테리아 글라이코 캘릭스 코팅재 최적 배합 상세 – 코팅

W/B(%)	S/B	결합재 혼합 비율 (%)			적용 균주	고정화 재료 타입	고정화 재료 치환율 (%)	박테리아 생균수 (cell/mL)
		OPC	FA	GGBS				
35	2	40	20	40	*Rhodobacter capsulatus*	Expanded vermiculite	10~35	4.6×10^6

Note : 박테리아 글라이코 캘릭스 코팅재의 접착강도 향상을 위한 필요 시 EVA계 재유화형 분말수지를 전체결합재 질량의 5~15% 첨가함.

표 3.5.3 박테리아 글라이코 캘릭스 코팅재 최적 배합 상세 – 단면보수

W/B(%)	S/B	결합재 혼합 비율 (%)		섬유혼입율 (%)	적용 균주	고정화 재료 타입	고정화재료 치환율 (%)
		OPC	CSA Cement				
34	1	80	20	0.1	*Rhodobacter capsulatus*	Expanded vermiculite	10~35

Note : 접착강도 향상 및 수축제어를 위한 아크릴계 재유화형 분말 수지 및 수축저감제는 필요시 전체 결합재 질량의 2% 미만 첨가함.

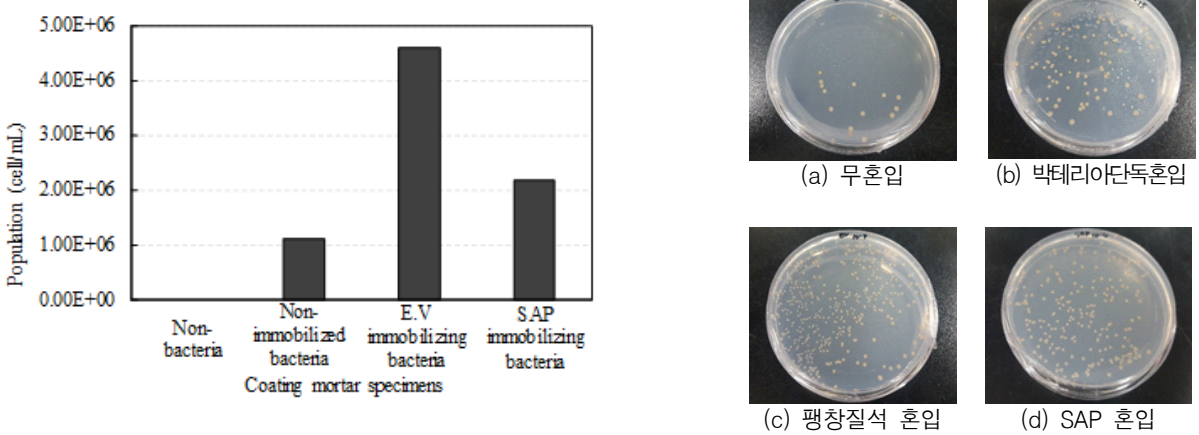


그림 3.5.10 코팅재 배합에서 박테리아 생장성 평가결과

표 3.5.4 박테리아 글라이코 캘릭스 코팅재의 성능 평가 결과

시험 항목		시험방법	시험 결과	
			성능요구조건	글라이코 캘릭스 코팅재
휨 강도		KS F 4042 : 2012	6.0 MPa 이상	10.1 MPa
압축강도			20.0 MPa 이상	52.6 MPa
부착강도	표준조건		1.0 MPa 이상	2.1 MPa
온·냉 반복 후			1.0 MPa 이상	1.6 MPa
내알칼리성			20.0 MPa 이상	46.1 MPa
중성화 정항성			2.0 mm 이하	1.0 mm
투수량			20.0 g 이하	6.4 g
물 흡수 계수			0.5 kg/m^{2}h$^{0.5}$ 이하	0.10 kg/m^{2}h$^{0.5}$
습기 투과 저항성			2.0 m 이하	1.0 m
염화물 이온 침투 저항성			1,000 Coulombs 이하	390 Coulombs
길이변화율			± 0.15 % 이내	0.04 %

(다) 코팅 콘크리트 내황산성 평가 및 열화제어의 학술적 이론 정립

① 코팅재 적용 콘크리트 구조체의 내황산성 평가

- 표 3.5.2의 코팅재 배합을 이용하여 코팅(두께 2.5 mm)한 콘크리트의 내황산성 평가와 박테리아 생장성 평가절차 및 그 결과는 다음과 같음.
- 글라이코 캘릭스 코팅 유·무(일반 모르타르, 글라이코 캘릭스 기반 코팅 모르타르)를 주요 변수로 하여 *Rhodobacter capsulatus*(10^9 cell/mL), 팽창질석, 보통포틀랜드시멘트(Ordinary portland cement, OPC), 플라이애시(Fly ash, FA), 고로슬래그(Blast furnace slag, GGBS), 규사(Silica sand)의 재료가 사용되었음.
- JSTM C 7401에 따라 황산 5% 수용액 침지 후 압축강도 및 질량변화를 평가하였으며, 경화 코팅재 표면에서 채취한 분말시료에서 박테리아의 생균수 평가(Viable cell count methode), XRD 및 TG-DTG에 의한 수화물 변화 분석을 수행하였음.
- 코팅재 적용 콘크리트 구조체의 내황산성 및 박테리아 생장성은 기존 일반 보수 모르타르 적용 콘크리트에 비해 매우 우수한 결과를 보였음(표 3.5.5).

② 코팅재 적용 콘크리트 열화제어에 대한 학술적 이론 정립

- 황산염의 침투 및 시멘트 수화물의 반응수준을 고려할 때 개발 된 기술인 글라이코 캘릭스 코팅재는 황산염확산계수 및 열화속도의 정립을 통해 황산열화에 의한 저항성능과 보수 콘크리트 구조물에 대한 내수수명 설계가 가능함.
- NUREG/CR-5542에서는 식 (3.5.3)과 같이 황산염 열화속도 예측 모델을 제시하고 있지만, 정확한 황산염 확산계수 평가에 대한 자료를 제시하고 있지 않음.

$$R = \frac{E \cdot B^2 \cdot c_o \cdot C_E \cdot D_i}{\alpha \cdot \gamma(1-\nu)} \quad (R = \text{콘크리트 열화계수; m/yr}) \qquad (3.5.3)$$

- 이에 본 연구팀은 실제 구조물의 염화물 노출 환경을 고려한 장기적 시험 방법인 확산 셀에 의한 농도차 시험방법을 이용하여 생태학적 단면 보수재의 황산염 확산계수를 측정하였으며(그림 3.5.11), 다음과 같음 결과를 얻음.

$$D_i = \frac{V\Delta Q}{A\Delta T} \times \frac{L}{c_1 - c_2} \qquad (D_i = \text{황산염 확산계수; } m^2/s) \quad (3.5.4)$$

- 하수환경(황산염 120 ppm)에서 글라이코 캘릭스 코팅재의 내구연한은 일반 코팅재 대비 9배 상승(그림 3.5.12)

: 글라이코 캘릭스 코팅재 - 황산염 확산 계수 = 0.176×10^{-13} m^2/s

: 글라이코 캘릭스 코팅재의 열화속도 - 0.011 cm/year, 20 mm 두께 시공시 내구연한 : 20.5년

: 일반 코팅재 - 황산염 확산 계수 = 1.59×10^{-12} m^2/s

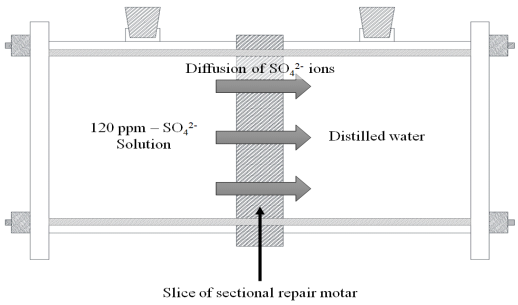
: 일반 코팅재의 열화속도 - 0.097 cm/year, 20 mm 두께 시공시 내구연한 : 185.2년

- 코팅재 시공 두께 20 mm 및 보수 대상 콘크리트 구조물의 철근 피복두께 20 mm를 고려할 때 글라이코 캘릭스 코팅재 시공 콘크리트의 내구연한은 일반 코팅재 시공 콘크리트에 비해 약 6배 우수함.

표 3.5.5 박테리아 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트의 내황산성 및 박테리아 생장성 평가결과

시험체	황산 5% 수용액 침지 후 압축강도 비		황산 5% 수용액 침지 후 질량 감소율 (%)		황산 5% 수용액 침지 후 박테리아 생균수(cell/mL)	황산 5% 수용액 침지 후 콘크리트의 주요 수화생성물
	28 days	56 days	28 days	56 days	28 days	
일반 코팅*	0.81	0.71	7	18	0	Gypsum
글라이코 캘릭스 코팅	0.92	0.88	3	9	7.5×10^2	Portlandite, C-S-H gels

* 일반 코팅: 박테리아 고정 팽창질석이 혼입되지 않은 일반 모르타르 코팅



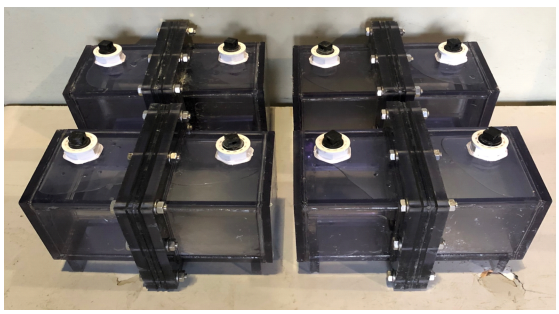


그림 3.5.11 확산 셀에 의한 황산염의 농도차 시험방법

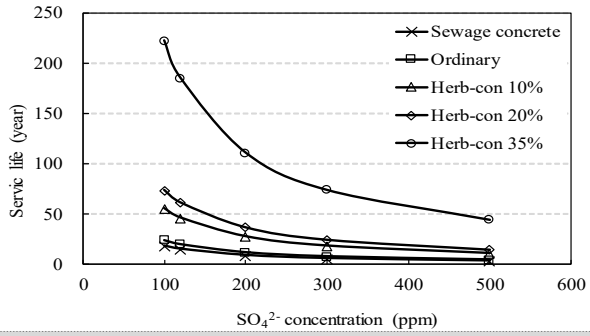


그림 3.5.12 내구수명 예측값

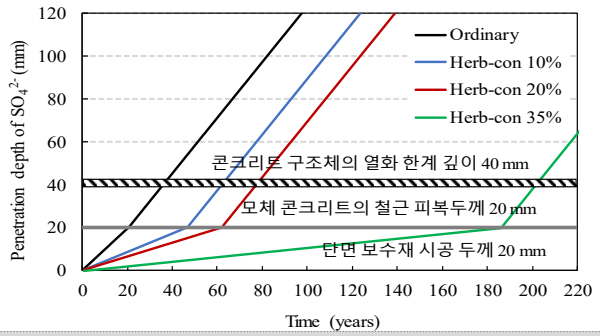


그림 3.5.12 내구연한 변화 추이

(라) 주요 성과

- 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트의 내황산 저항성 향상에 대한 실험결과를 기반으로 특허 등록 1건(특허-8) 및 국내 학술지 게재 1건과 배합설계 가이드라인 제시 1건의 성과를 달성함.



특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number: 제 10-1779935 호
출원번호 Application Number: 제 10-2016-0081956 호
출원일 Filing Date: 2016년 06월 29일
등록일 Registration Date: 2017년 09월 13일

Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 31, No. 1, pp. 61-68, February, 2019
https://doi.org/10.4334/JKCI.2019.31.1.061
pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842
www.jkci.or.kr

콘크리트 표면 보호용 생태학적 코팅 모르타르의 내황산성 평가

윤현섭 [1] · 양근혁 [2]* · 이상섭 [3]

[1]경기대학교 일반대학원 건축공학과 박사과정 [2]경기대학교 건축공학과 정교수 [3]경기대학교 생명과학과 정교수

Evaluation of Sulfuric Acid Resistance of Biomimetic Coating Mortars for Concrete Surface Protection

Hyun-sub Yoon,[1] Keun-hyeok Yang,[2]* and Sang-seob Lee[3]

[1]Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul 03746, Rep. of Korea
[2]Professor, Department of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea
[3]Professor, Department of Biological Sciences, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea

(3) 생체 모방형 콘크리트 코팅재 성능 평가 및 시공 기술

(가) 개발된 코팅재를 활용한 하수관거 코팅 및 보수 스프레이 시공 기술 제시

① 시공기술의 필요성

- 개발된 글라이코 캘릭스 코팅재의 주요 적용처인 화학적 침식에 노출된 콘크리트 구조체는 대부분이 지하에 매립된 지중 구조물로서, 빠른 교통개방 요구에 따른 급속 보수 시공의 난공사임. 이에 시공의 용의성 및 균질 품질 확보를 위한 적절한 시공기술이 필요함.

② 원심력에 의한 라이닝 공법(그림 3.5.13(a)) - 하수관(원형 타입)

- 코팅재 혼합 및 토출과 함께 급결제의 혼입·분사량 조절이 가능(계절적 변화 및 공기조절 유연성)하며, 도포 두께는 1~5 mm, 시공속도는 3.75 m/분, 종결 시간 100~350분 범위(그림 3.5.14)로 조절이 가능함(그림 3.5.13(a)).

③ 단면 뿜어 붙이기 공법(그림 3.5.13(b)) - 하수암거(박스구조물)

- 코팅재 도포 두께는 10~100 mm(열화 보수 부위 두께에 따라 조절가능)로 조절 가능하며, 재료분리 및 흘러내림이 없는 일반적인 시공품질 확보가 가능함.

(나) 유사하수환경 목업 실험

- 실제 하수관거 환경에서 생체 모방형 코팅재 도포 콘크리트에서 재령 변화에 따른 내구성 및 박테리아의 생장성 평가를 통한 실용성 확인 필요하며, 글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 이용한 콘크리트 구조체의 표면코팅 기술의 실현 및 이론적 접근의 검증 필요

- 유사하수환경 목업 실험을 위한 환경조성은 유입수 유속 1.0~1.4 m/s, 하수 오염도(BOD 100 ppm, T-N 10 ppm, T-P 1 ppm; 일반적인 서울시 생활하수 오염도), 황산염(SO_4^{2-}) 농도 100 ppm으로 하였으며, 코팅 콘크리트 시험체에서 글라이코 캘릭스 생성량 평가 및 표면관찰, 콘크리트 압축강도 및 질량변화를 평가하였음.

- 유사하수 환경 목업 실험 결과 글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트의 황산열화에 의한 압축강도 및 질량감소율은 각각 0%로 우수한 열화 저항성능을 보였음(표 3.5.6).

- 목업 시험체에서 글라이코 캘릭스 생성량은 0.25 g/cm^{3}이었으며, 글라이코 캘릭스 형성 두께는

200 ㎛(그림 3.5.16), 박테리아 생균수는 4.9×10^4 cell/mL 이었음(그림 3.5.17 및 그림 3.5.18).

(다) 생체모방형 콘크리트 코팅재의 시작품 제시 및 실용화 기반 구축

① 실용화 요구조건

- 개발 기술 경쟁 제품과의 차별성 및 경쟁력을 확보하면서 원할한 시장진입을 위한 기본 인프라 구축이 필요함.
- 개발 된 코팅재의 현장 적용 및 실용화 측면에서 기술 특허의 독창성, 경제성 분석과 물가정보지 등재 및 시공·유지관리 등의 방안이 마련될 필요가 있음.

② 브랜드, BI 개발 및 시작품 제시

- 더블디팩토리와의 협업을 통해 개발된 기술의 고유 브랜드 및 BI를 제시하였음(그림 3.5.19).



(a) 원심력 라이닝 공법 (b) 뿜어 붙이기 공법

그림 3.5.13 글라이코 캘릭스 코팅재의 시공 방법

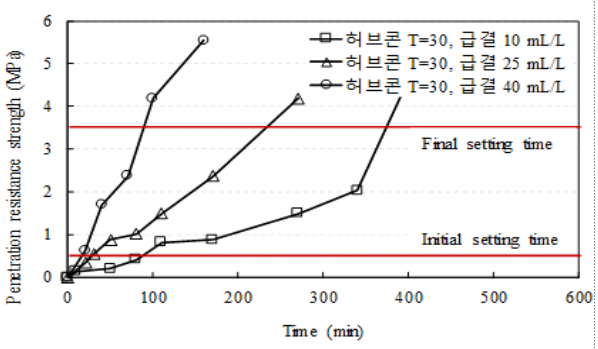


그림 3.5.14 글라이코 캘릭스 코팅재의 응결시간제어

관내 유입 유속 (m/s)	조도계수	평균유량 (CMD, m^3/day)	온도 (℃)	오염도 (ppm)			
				COD	T-N	T-P	SO_4^{2-}
1.0~1.4	0.013	200	20	100	10	1	120



(a) 코팅재 도포 시험체 제작 (b) 유사 하수관 환경 조성

그림 3.5.15 유사 하수 환경 조성 실험의 개요

표 3.5.6 유사하수 환경 목업 실험 결과

시험체	유사하수 침시 시험에 따른 내황산성 평가결과 (100 ppm)				박테리아 생균수 (cell/mL)	글라이코 캘릭스 생성량 (g/cm^3)
	압축강도 감소율(%)		질량 감소율 (%)			
	28 days	56 days	28 days	56 days		
무코팅 콘크리트	3	7	2	5	0	0
글라이코 캘릭스 코팅 콘크리트	0	0	0	0	4.9×10^4	0.25

- 개발된 제품의 브랜드명은 '허브콘'이며, 부수제품 브랜드로서 '힐링플러스'가 개발되었음. 시작품은 브랜드명에 따라 보수재(허브콘, 25 kg/포)와 박테리아 캐리어(힐링플러스, 20 kg/통)로 제시되었음(그림 3.5.20).

③ 특허맵 분석

- 글라이코 캘릭스 코팅재의 배합 및 시공방법과 성능에 대한 독창성 인정을 인정받아 국내뿐만 아니라 베트남, 홍콩, 중국 및 일본 등에서의 지식재산권 출원 및 등록 진행 중에 있음.

④ 비즈니스 모델

- 기술의 실용화 및 신기술 인증을 통해 서울·경기지역 노후 하수관거 보수 시장 20% 점유를 기대하고 있으며, 코팅재 적용단가는 47,000 원/m^2(T=20 mm)으로 일반 보수재(56,000 원/m^2) 대비 17% 저렴함. 이와 같은 기술 제품의 단가 정보는 2019년 8월호 물가정보지에 등재됨.

⑤ 기술홍보

- 2017 및 2019 경향하우징페어, 2019 한국구조물진단유지관리공학회, 2019 스마트건설안전기술 엑스포 기술 전시를 통해 기술 개발의 성과를 홍보하였음.

⑥ 시공 및 유지관리 가이드라인

- 글라이코 캘릭스 코팅재를 활용한 보수공법의 특별시방서 및 유지관리 가이드라인 제시하였음. 생체 모방형 코팅재의 품질관리는 부착강도와 함께 글라이코 캘릭스 형성 박테리아의 생균수 및 글라이코 캘릭스 형성량 측정 등을 통해 수행됨.

⑦ 현장 시범 적용

- 영등포 선유서로 하수시설 보수공사(2019년 11월)에 적용되었음. 향후 금천구 및 양천구의 노후 하수시설 보수 공사에서도 적용을 실시할 계획임.

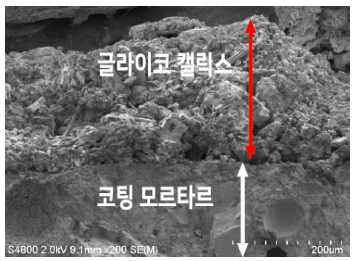


그림 3.5.16 글라이코 캘릭스 형성

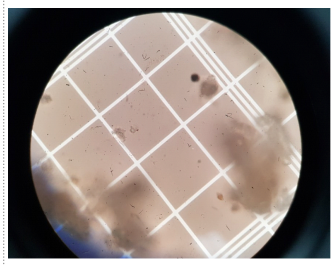
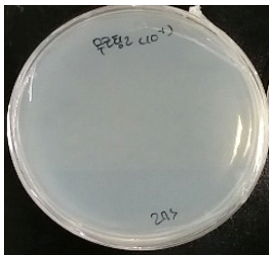
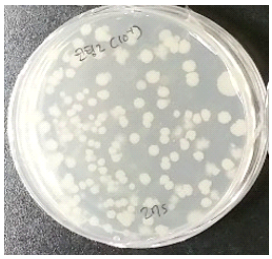


그림 3.5.17 박테리아 생장성 관찰



(a) 무코팅



(b) 글라이코 캘릭스 코팅

그림 3.5.18 박테리아 재배양 결과

HERB·CON
Healing & Renewal Bio Concrete
허브·콘
HERB CON HEALING PLUS

그림 3.5.19 코팅재 브랜드 개발





그림 3.5.20 글라이코 캘릭스 코팅재 시작품

바. 캡슐 활용 균열 자기치유 시멘트 복합재료 개발

(1) 시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기술

(가) 시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기반 기술 확보

① 시멘트 복합재료용 캡슐 개요

- 무기계 재료를 캡슐화하여 시멘트 복합재료 배합에 직접 혼입함으로써 균열 발생시 캡슐이 파괴되어 무기계 재료의 반응 수화물로 균열을 치유하는 자기치유 기술

  : 직접적인 자기치유 소재를 다량 포함할 수 있으며, 균열 발생 부위만 선택적 반응유도

  : 반응하지 않은 캡슐은 지속적인 자기치유 소재의 저장효과 및 성능 유효

  : 시멘트 복합재료의 배합에 직접 혼합함에 따른 자유로운 성형성 확보 가능

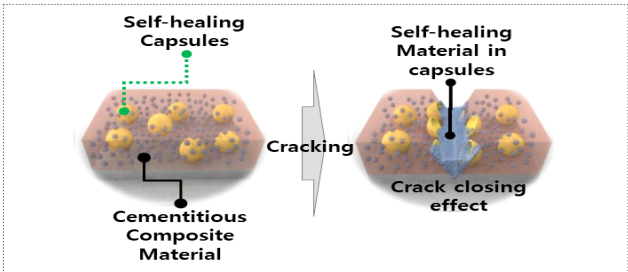


그림 3.6.1 캡슐 활용 균열 자기치유 메커니즘

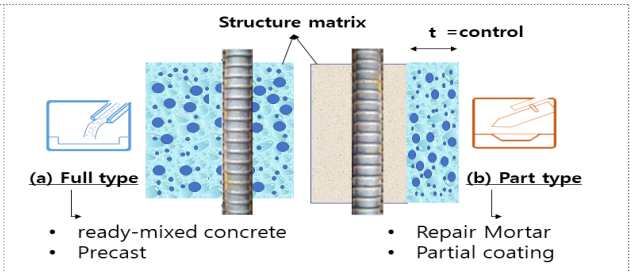


그림 3.6.2 시멘트 복합재료용 캡슐의 적용

② 시멘트 복합재료용 캡슐의 종류

- 시멘트 복합재료용 캡슐은 분체상 무기재료를 활용한 고상캡슐과 액체상 무기재료를 활용한 마이크로캡슐로 구분되며, 2가지 형태의 시멘트 복합재료용 캡슐을 모두 개발하였음.

표 3.6.1 시멘트 복합재료용 캡슐의 정의 및 특징

구분	고상캡슐	마이크로캡슐
사용재료	분체상 무기재료	액체상 무기재료
캡슐화	물리적 제법 (Granulation)	화학적 제법 (In-situ Polymerization)
소요기술	• 코어 제조 기술(응집기술) : 치유소재의 입상(조립)화 • 막 제조 기술(코팅기술) : 치유소재의 반응제어	• Water/Oil/Water상 합성기술(캡슐화 기술) : 액체상 무기재료의 캡슐화 • 막강화 기술(캡슐 강화 기술) : 캡슐막 강화
캡슐크기	500~1,500 μm	100~500 μm
반응촉매	수분	습기
자기치유 매커니즘	calcium sulfo-aluminate (Hauyne, ye'elimite) $4CaO{\cdot}3Al_2O_3{\cdot}SO_4$ + anhydrous gypsum $2CaSO_4$ + Free CaO + $38H_2O$ → $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O + 4Al(OH)_3$	Silicate $A_2SiO_2 + xH_2O$ + Hydrate $Ca(OH)_2$ → $CaSiO_2{\cdot}xH_2O$ (Silicate Reaction Products) + 2AOH (Alkali ion)
적용대상	수처리 구조물 (물에 노출된 구조물)	일반 구조물 (물에 상시 노출되지 않은 경우)

- 고상캡슐은 물리적 제법을 통하여 제조하며, 마이크로캡슐은 화학적 제법을 통하여 제조하였음. 표 3.6.1은 시멘트 복합재료용 캡슐의 특징 및 메커니즘을 나타냄.
- 고상캡슐 제조를 위하여 코어제조 기술 및 막코팅 기술을 확보하였으며, 마이크로캡슐을 제조하기 위하여 Water/Oil/Water상의 합성기술 및 막강화 기술을 확보하였음.

③ 고상캡슐 제조

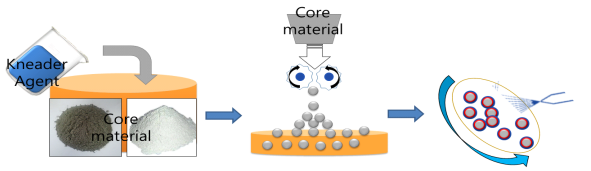
- 고상캡슐의 제조는 코어 제조단계 및 막코팅 단계로 이루어짐. 그림 3.6.3은 고상캡슐 제조장비를 나타낸 것이며, 그림 3.6.4 및 그림 3.6.5는 고상캡슐의 캡슐화 메커니즘 및 제조방법을 나타냄.
- 고상캡슐의 코어 제조를 위해서는 최적 응집제 및 응집기술을 확보하여야 하며, 그림 3.6.6과 같이 분체상 무기재료의 입상화를 위하여 응집하는 기술을 확보함.

  : 수분함량이 매우 적은 특수 응집제인 우레탄계 응집제를 선정하였으며, 최적 응집제량은 10~15%로 나타남.
- 고상캡슐의 막코팅은 응집된 코어의 반응제어를 위하여 그림 3.6.7과 같이 500~1,500 μm의 크기에 구형으로 제조되며, 자기치유를 위한 최적의 크기는 850~1,200 μm 수준임.
- 고상캡슐의 최적 자기치유 소재는 아윈계 CSA 팽창재 및 무수석고를 7:3으로 혼합하여 사용하였으며, 우레탄계 응집제와 액상 고무를 코팅제를 사용하여 고상캡슐을 제조하였음.



(a) 코어 제조기 (b) 막 코팅 제조기

그림 3.6.3 고상캡슐 제조장비



< Mixing of Kneader Agent> (Step 1) <Granulation> (Step 2) <Membrane coating> (Step 3)

그림 3.6.4 고상캡슐의 캡슐화 메커니즘

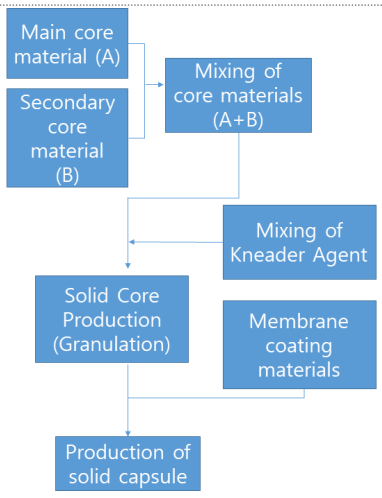
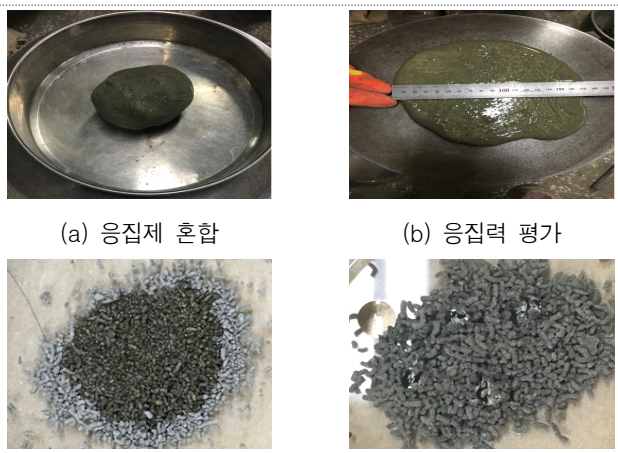


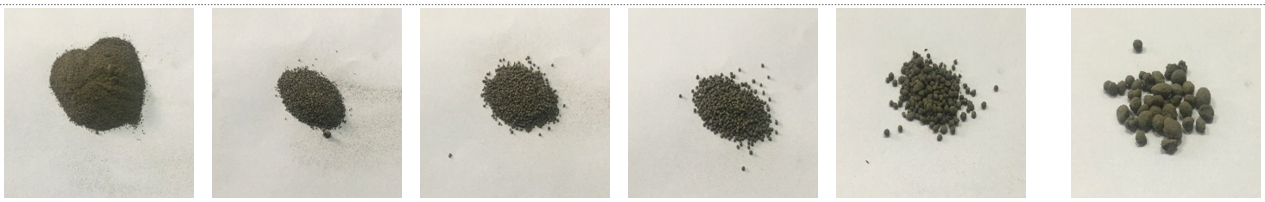
그림 3.6.5 고상캡슐의 제조방법



(a) 응집제 혼합 (b) 응집력 평가

(c) 코어 제조 (d) 막 코팅

그림 3.6.6 고상캡슐 제조를 위한 응집 및 코팅기술



(a) 150 μm (b) 300 μm (c) 600 μm (d) 850 μm (e) 1,200 μm (f) 2,400 μm

그림 3.6.7 시멘트 복합재료용 고상캡슐

- 고상캡슐은 그림 3.6.8과 같은 입도를 가지고 있음. 고상캡슐의 코어 유효성(캡슐 제조시 응집제와 반응수준)은 순수 코어 및 응집제와 반죽된 코어를 분쇄하여 각 밀도를 비교하였음. 평가결과, 순수 코어의 밀도는 약 3.14 g/cm^{3}인 것으로 나타났으며, 응집제를 혼합한 코어 분쇄분 밀도는 약 3.13 g/cm^{3}으로 나타나 코어가 반응하지 않은 것으로 확인됨(그림 3.6.9).

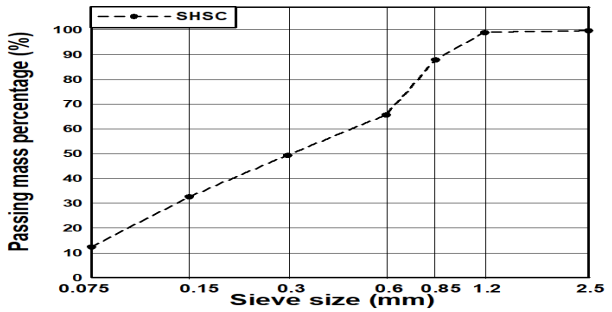


그림 3.6.8 고상캡슐의 입도

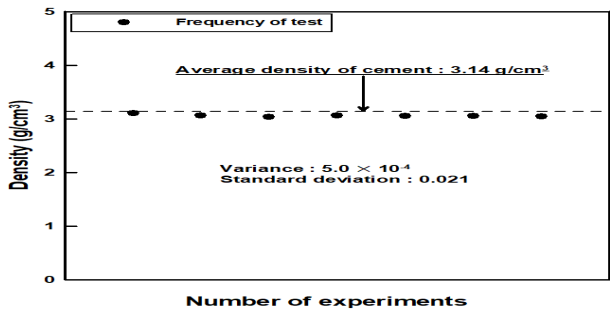


그림 3.6.9 코어 유효성 평가(밀도)

④ 마이크로캡슐의 제조특성

- 마이크로캡슐의 제조는 In-situ 중합법을 통하여 1차 합성단계, 2차 합성단계 및 막 강화단계로 이루어짐. 그림 3.6.10은 마이크로캡슐 제조장비이며, 그림 3.6.11과 그림 3.6.12에 마이크로캡슐의 캡슐화 메커니즘과 제조방법을 나타냄.
- 마이크로캡슐의 제조를 위해서는 액체상 무기재료를 캡슐화할 수 있는 합성기술이 요구되며, 그림 3.6.11과 같이 W/O/W상에서 2중막을 가지는 캡슐 합성기술을 확보함.

  : 마이크로캡슐 소재의 최적비율은 Potassium silicate(K_2SiO_3), Sodium silicate(Na_2SiO_3), Lithium silicate(Li_2SiO_3)를 5:4:1로 혼합하는 것으로, 수득량을 90% 이상 확보할 수 있음.

  : 마이크로캡슐의 막보강을 위하여 레조르시놀(Resorcinol)을 사용하였으며, 캡슐화 효율을 증대시키기 위하여 pH 조절제인 수산화나트륨(Sodium Hydroxide) 및 염산(Hydrochloric Acid), 소포제 옥탄올(1-Octanol) 및 염화암모늄(Ammonium Chloride)을 사용함.
- 마이크로캡슐 막의 강도를 보강하고, 손실량을 최소화하기 위한 막강화 기술을 확보하였으며, 실리카(TEOS)를 통하여 손실량을 10% 이내로 저감시킴.

  : 막 강화재료는 1인산 나트륨(monobasic sodium phosphate), 테트라부틸암모늄 플루오르화물(TBAF(tetrabutylammonium fluoride) solution), 테트라에틸 오르소실리케이트(TEOS(tetraethyl orthosilicate)를 사용하여 실리카 코팅을 실시함.



그림 3.6.10 마이크로캡슐 제조장비

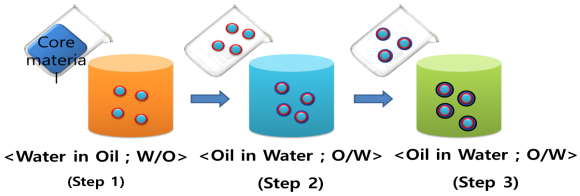


그림 3.6.11 마이크로캡슐의 캡슐화 메커니즘

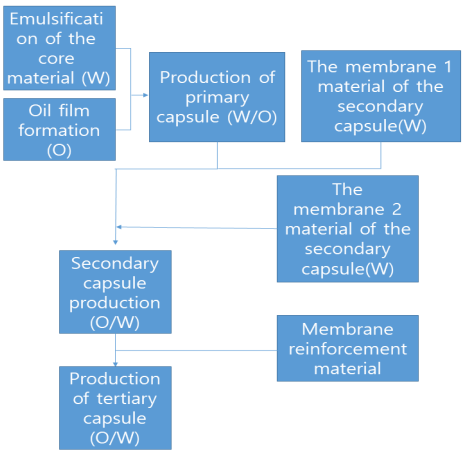
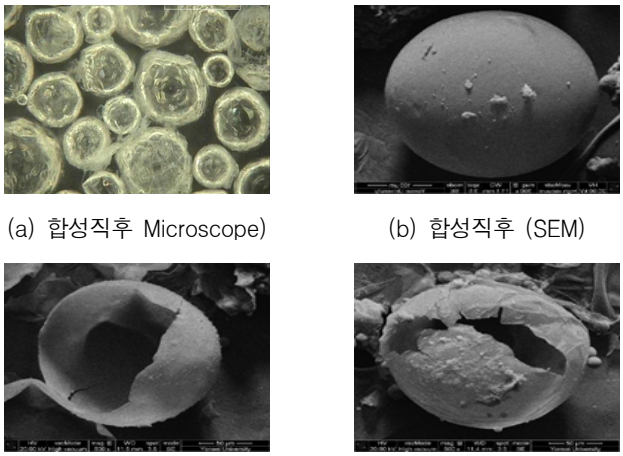


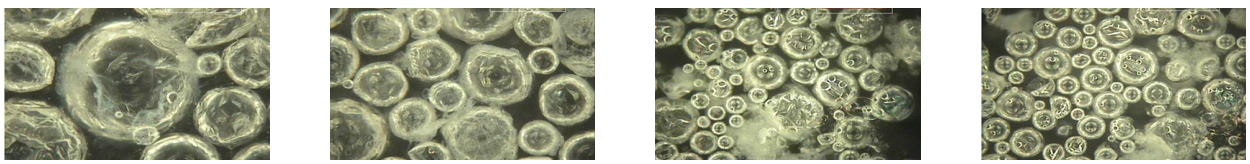
그림 3.6.12 마이크로캡슐의 합성방법



(a) 합성직후 Microscope)　(b) 합성직후 (SEM)

(c) 파괴된 캡슐(SEM)

그림 3.6.13 마이크로캡슐의 제조



(a) RPM 50 : 350~160 μm　(b) RPM 150 : 270~80 μm　(c) RPM 250 : 210~50 μm　(d) RPM 300 : 180~30 μm

그림 3.6.14 시멘트 복합재료용 마이크로캡슐(×300)

- 마이크로캡슐은 100~500 μm의 크기로 제조되며, 자기치유를 위한 최적 입경은 300~350 μm 수준임.

  : 마이크로캡슐의 사이즈는 그림 3.6.14와 같이 교반 속도(RPM)에 매우 의존적인 경향이 나타남. 교반 속도에 따른 마이크로캡슐의 크기는 50 RPM의 경우 약 350 μm, 150 RPM의 경우 약 270 μm, 250 RPM의 경우 약 210 μm, 350 RPM의 경우 약 180 μm로 나타남.

  : 마이크로캡슐의 사이즈는 시멘트 복합재료의 품질에 미치는 영향 및 자기치유 성능을 고려하여 300~350 μm 내외를 적합한 사이즈로 선정하였으며, 그림 3.6.15와 같은 입도를 가짐.

- 마이크로캡슐의 코어 유효성 검토결과, 캡슐화가 잘 이루어진 것으로 판단됨(그림 3.6.16).

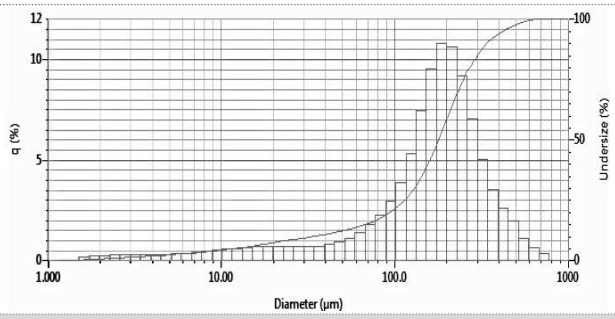


그림 3.6.15 마이크로캡슐의 입도

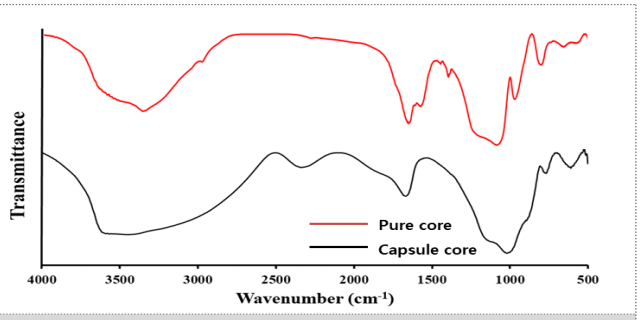


그림 3.6.16 코어 유효성 평가(FT/IR)

⑤ 시멘트 복합재료용 캡슐 소재 개발

- 표 3.6.2는 고상캡슐과 마이크로캡슐에 사용되는 재료와 목표성능을 나타냄. 고상캡슐의 목표성능은 균열폭이 0.30 mm인 시편에서 치유재령 28일에 치유율 90% 이상이며, 마이크로캡슐의 목표성능은 균열폭이 0.25 mm인 시편에서 치유재령 28일에 치유율 90% 이상임.
- 고상캡슐의 혼입량은 시멘트 질량 대비 최대 10%이며, 최적 혼입량은 5%임. 마이크로캡슐의 혼입량은 시멘트 질량 대비 최대 5%이며, 최적 혼입량은 3%임.

표 3.6.2 시멘트 복합재료용 캡슐 소재의 특성

구분		고상캡슐	마이크로캡슐
사용 재료	코어	Calcium Sulfoaluminate (CSA) Anhydrous Gypsum ($CaSO_4$)	Potassium silicate (K_2SiO_3) Sodium silicate (Na_2SiO_3) Lithium silicate (Li_2SiO_3)
	응집제 / 1차 막재	Urethane Coagulant	Polyurethane
	막	Liquid type Rubber	Urea-Formaldehyde
혼입량 / (최적량)		3%, 5%, 7%, 10% / (5%)	1%, 3%, 5% / (3%)
목표성능		균열폭 0.30 mm / 28일 이내 90% 이상 치유	균열폭 0.25 mm / 28일 이내 90% 치유

- 시멘트 복합재료용 고상캡슐은 제조기술의 독창성을 인정받아 특허등록(10-1761608, 시멘트 복합재료에 혼합이 가능한 자기치유 고상캡슐 제조방법)을 완료하였음(특허-13).
- 시멘트 복합재료용 마이크로캡슐은 제조기술의 독창성을 인정받아 특허등록(10-1761609, 무기질 재료를 포함하는 자기치유 액상캡슐)을 완료하였음(특허-14).



(나) 시멘트 복합재료용 캡슐 분산기술

① 캡슐의 분산성 평가

- 고상캡슐의 분산성 계수를 평가가 결과, a_f = 0.2로 나타남에 따라 본 연구에서는 특수 혼화제로써 우레탄계 회합형 증점제를 활용하여 a_f = 0.5 수준으로 향상시켰음(그림 3.6.17).

$$a_f = \exp\left[-\sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}\right]$$

여기서, a_f : 분산성 계수, n : 영역의 개수, i : 임의 영역의 캡슐량, $\bar{x}$: 각 영역의 평균 캡슐량

② 캡슐의 손실량 평가

- 모르타르 상의 시멘트 복합재료의 배합비(Water:Binder:Sand = 0.4:1:2)에 따라 혼합을 실시하였으며, 페이스트 상의 캡슐 손실량과 동일한 절차를 거쳐 실험을 실시하였음.
- 그림 3.6.18은 고상캡슐(SHSC) 및 마이크로캡슐(SHMC)의 손실량을 나타낸 것으로 페이스트의 경우 약 1% 및 3%이었으며, 모르타르의 경우 약 5% 및 10%의 손실량이 발생하는 것으로 나타남. 모르타르의 경우 골재에 의하여 손실량이 증가되는 것으로 판단됨.
- 마이크로캡슐의 손실량은 막 보강전(약 20%)과 비교하여 약 50% 손실량 저감이 가능한 것으로 나타남.

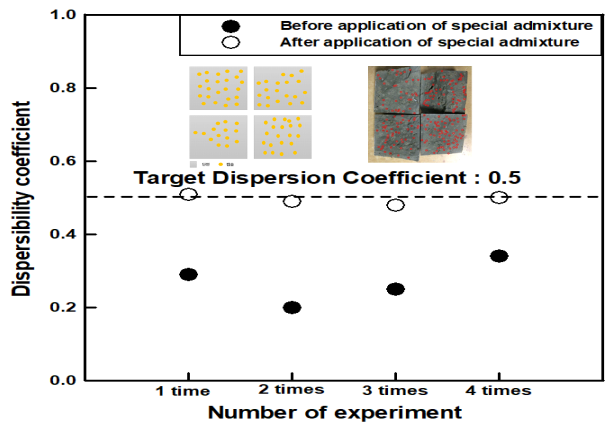


그림 3.6.17 분산성 계수 평가결과

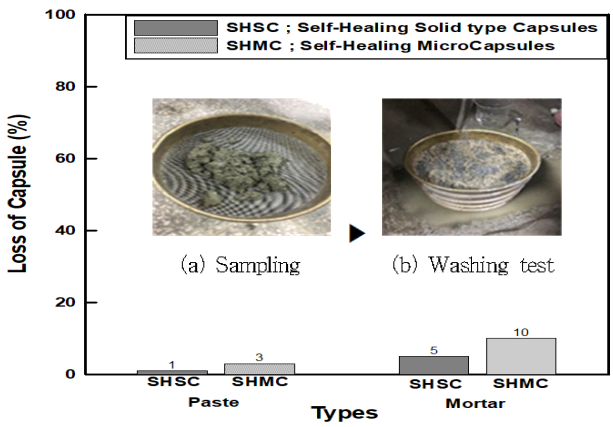
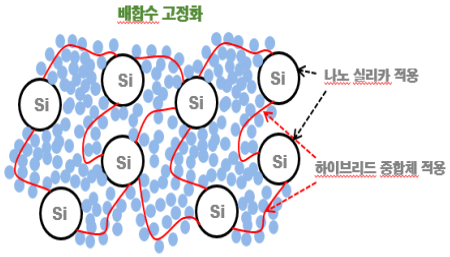
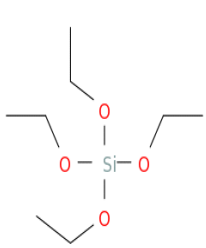
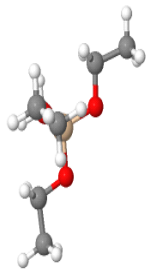


그림 3.6.18 손실량 평가결과

③ 캡슐의 분산성 향상 기술 개발

- 시멘트 복합재료용 캡슐 분산기술은 표 3.6.3과 같이 캡슐 분산성 향상기술 및 캡슐 손실량 저감기술로 구분되며, 모두 목표성능을 만족하였음.
- 고상캡슐의 분산성 향상을 위하여 우레탄계 회합형 화학혼화제를 개발하였으며, 이를 통하여 고상캡슐의 분산성을 2배 이상 향상시키는 성과를 얻음.
- 마이크로캡슐의 손실량 저감을 위하여 테트라에틸 오르소실리케이트(Tetraethyl orthosilicate, TEOS)을 통한 캡슐 막의 강화로 손실량을 50% 이상 저감하는 성과를 얻음.

표 3.6.3 캡슐 분산성 향상 기술

구분	캡슐 분산성 향상	캡슐 손실량 저감
기존성능 및 적용대상	분산성 계수 - 고상캡슐 0.2 / 마이크로캡슐 0.5 ※ 고상캡슐의 분산성 향상 필요	캡슐 손실량 - 고상캡슐 5% / 마이크로캡슐 20% ※ 마이크로캡슐의 손실량 저감 필요
목표 성능	분산성 계수 0.5 이상 확보	캡슐 손실량 10% 이내
해결 방안	특수 혼화제의 개발 및 적용	실리카 코팅 실시
개발 기술의 특징	우레탄계 회합형 화학혼화제 - 점성증대로 고상캡슐의 분산성 향상 	Tetraethyl silicate - 마이크로캡슐 합성 후 추가 막코팅 ※ 합성시간 12시간  

- 시멘트 복합재료용 캡슐의 분산성 평가에 대한 연구결과를 시멘트 복합재료용 캡슐의 제조특성 및 시멘트 복합재료의 품질에 미치는 영향으로 논문에 게재하였음(SCI-65).


Construction and Building Materials 214 (2019) 574–580

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

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

Effect of cement powder based self-healing solid capsule on the quality of mortar

Sung-Rok Oh [a], Yun Wang Choi [a], Yong Jic Kim [b,*]

[a] Department of Civil Engineering, Semyung University, 65 Semyeong-ro, Jecheon, Chungbuk 27136, South Korea
[b] Civil Engineering Research Team, Daewoo Institute of Construction Technology, 20 Suil-ro, Jangan-Gu, Suwon 16297, South Korea

(다) 시멘트 복합재료용 캡슐 대량 제조기술

① 대량 제조설비 구축

- 고상캡슐 및 마이크로캡슐을 생산하는 기존의 소형장비를 개량하여 시멘트 복합재료에 적용하기 적합한 생산량을 갖는 대량 제조설비를 표 3.6.4와 같이 구축함.
- 고상캡슐을 생산하는 기존 소형장비의 생산량은 0.1 kg/hr이지만, 대량 제조설비의 생산량은 최소 5 kg/hr으로 기존 소형장비에 비하여 50배 이상 제조성능을 개선함.
- 마이크로캡슐을 생산하는 기존 소형장비의 생산량은 0.5 kg/day이지만, 대량 제조설비의 생산량은 최소 10 kg/day으로 기존 소형장비에 비하여 20배 이상 제조성능을 개선함.

표 3.6.4 캡슐 대량 제조설비

구분	고상캡슐 대량 제조설비		마이크로캡슐 대량 제조설비	
개발장비 및 스펙		▪ 코어 제조기 ;압력에 의한 연속 코어 제조 설비, 응집제 사용량 코어재료의 10~20%, 1kg/hour (최소)		▪ 증류수 제조기 ;캡슐 합성을 위한 Base 용액인 1차 증류수 대량 제조설비, 30L/hour (최소 15L)
		▪ 막 코팅 제조기 ;코어재료 회전 교반 중 및 막재료 분사를 통한 대량 코팅 설비, 1회 코팅 약 15분		▪ 캡슐 합성기 ;마이크로캡슐의 합성을 위한 대형 교반기, 온도 0~100℃ (55℃ 유지), 30kg/회 합성
		▪ 캡슐 분별기 ;자동으로 분별하여 저장 ※ 300μm, 600μm, 850μm, 1,200μm		▪ 세척 분별기 ;합성된 마이크로캡슐의 불순물 세척분별 ※ 100μm, 200μm, 350μm, 400μm, 500μm
		▪ 캡슐 건조기 ;캡슐 막의 종류에 따라 고온 또는 냉각이 가능한 설비 (내부 챔버 100L)		▪ 습식 캡슐 저장용기 ;습윤상태의 캡슐 대량 저장 (200L)

(2) 캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능 제어 기술

(가) 캡슐 활용 시멘트 복합재료의 품질특성 및 자기치유 성능

① 고상캡슐 활용 시멘트 복합재료

- 시멘트 복합재료는 보통포틀랜드시멘트(OPC) 및 ISO 표준사(S)를 사용하였으며, 시멘트 복합재료의 배합비는 W:OPC:S=0.4:1.0:2.0임. 고상캡슐(850~1,200 μm)은 시멘트량에 5% 및 10% 치환하여 시멘트 복합재료 배합에 혼입함.
- 고상캡슐 혼입에 따른 플로우와 압축강도 측정결과, 플로우는 캡슐 혼입량에 관계없이 동등한 수준으로 나타났지만, 압축강도는 캡슐 혼입량 증가에 따라 최대 10.9% 감소하였음.



그림 3.6.19 균열 유도 시편

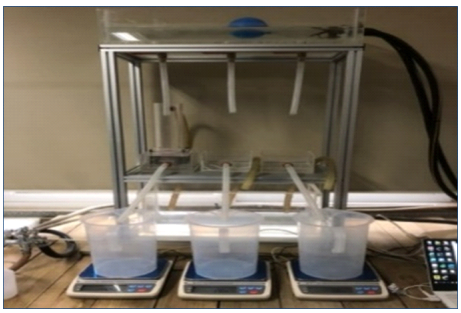


그림 3.6.20 Water Flow Test

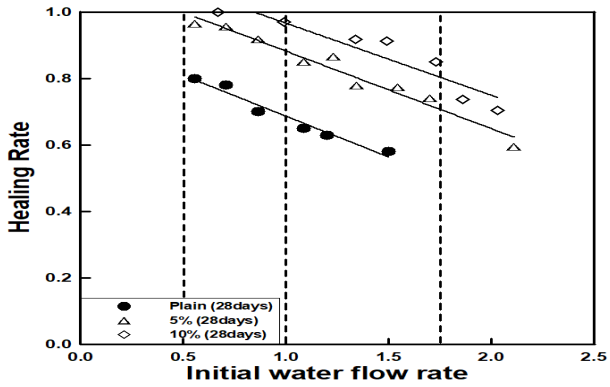


그림 3.6.21 초기 투수량에 따른 치유율

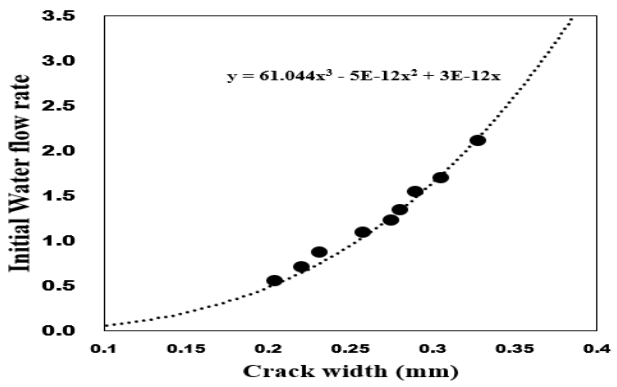


그림 3.6.22 균열폭에 따른 초기 투수량의 관계

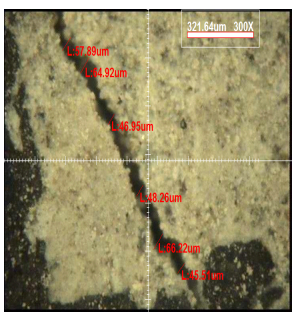
- Water Flow Test를 위한 시편은 타설 후 균열 유도 재령일에 관통 균열을 발생한 다음 균열 폭 제어를 위한 실리콘 시트를 삽입하여 균열 시편을 제조하였음. 초기 균열이 유도된 시편의 초기 투수량을 측정한 다음 치유재령 7일, 14일, 21일 및 28일(수중양생)에 투수감소율을 평가하였음.

  ※ 시편 크기 : Ø 100×50 mm, 균열유도 재령 : 28 days, 균열폭 : 0.2~0.3 mm

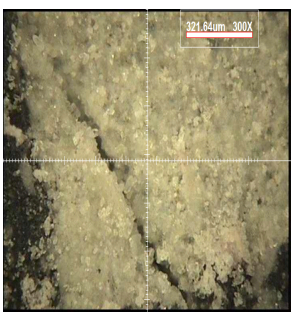
- 균열이 유도된 시편에 대하여 정수위 투수시험를 실시하여 고상캡슐에 의한 치유율을 그림 3.6.21과 같이 평가하였으며, 그림 3.6.22와 같이 초기 균열폭에 대한 초기 투수량을 측정하여 목표 균열폭 0.25 mm 및 0.30 mm를 제어하였음.

- 균열폭이 0.25 mm인 시편에서 Plain의 치유율은 76.0%이며, 캡슐을 5% 혼입한 경우 95.3%, 캡슐을 10% 혼입한 경우 96.4%의 치유율을 나타내었음. 균열폭 0.25~0.30 mm인 시편은 Plain의 치유율은 61.3%이며, 캡슐을 5% 혼입한 경우 81.2%, 캡슐을 10% 혼입한 경우 90.1%의 치유율을 나타냄. 캡슐 혼입량이 10%인 시편의 치유율은 Plain에 대비하여 최대 28.6% 향상됨.

- 그림 3.6.23과 그림 3.6.24는 Plain와 고상캡슐을 혼입한 시편의 표면 균열 관찰결과로 Plain은 자연치유 반응에 의해 표면의 일부가 치유되었지만, 고상캡슐을 혼입한 시편은 균열면의 대부분이 치유반응에 의하여 수복됨.

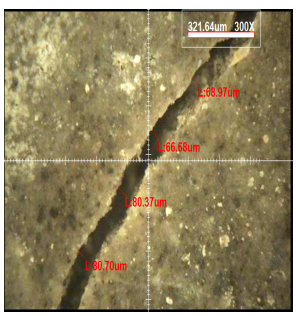


(a) 균열 초기

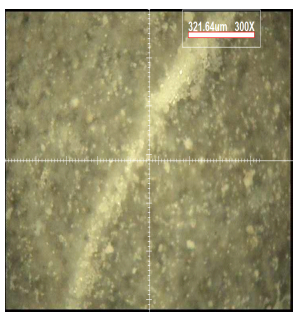


(b) 치유양생 이후

그림 3.6.23 균열면 관찰(치유재령 28일, Plain)



(a) 균열 초기



(b) 치유양생 이후

그림 3.6.24 균열면 관찰(치유재령 28일, SHSC)

② 마이크로캡슐 활용 시멘트 복합재료

- 시멘트 복합재료 배합은 고상캡슐과 동일하며, 마이크로캡슐(300~350 μm)은 시멘트량에 대비하여 1%, 3%, 5%를 치환하여 시멘트 복합재료에 혼입하였음.
- 마이크로캡슐 혼입에 따른 플로우 및 압축강도 시험결과, 마이크로캡슐의 혼입량이 증가함에 따라 플로우와 압축강도 모두 감소하는 결과가 나타냈으며, 마이크로캡슐을 5% 혼입한 시편의 압축강도는 최대 11.5%까지 감소하였음.
- 그림 3.6.25는 마이크로캡슐의 치유성능을 나타내며, 균열폭이 0.25 mm인 시편에서 캡슐의 혼입량이 1%, 3%, 5%로 증가함에 따라 치유율은 76.7%, 80.1%, 90.8%로 증가하였으며, 그림 3.6.26과 같이 마이크로캡슐을 5% 혼입한 시편은 Plain와 비교하여 최대 20% 치유율이 향상됨.
- 표면 균열 관찰결과, 마이크로 캡슐을 혼입한 시편은 그림 3.6.19 및 그림 3.6.20과 같이 균열면이 치유반응에 의하여 수복됨.

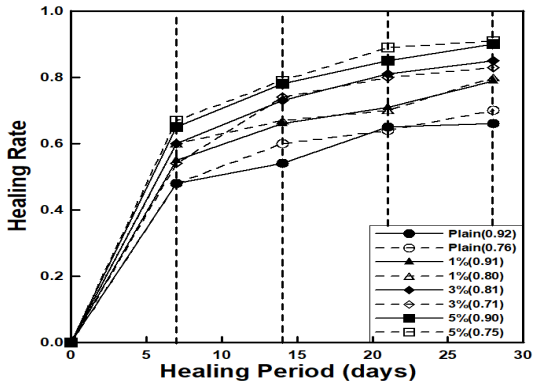


그림 3.6.25 캡슐 혼합량에 따른 치유율

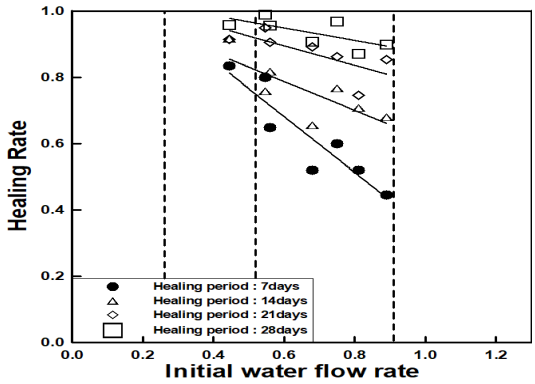
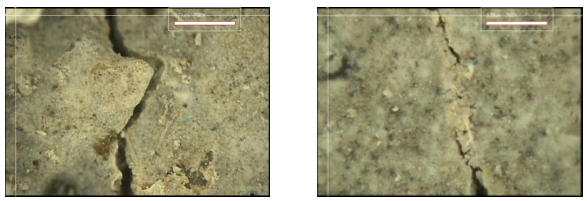
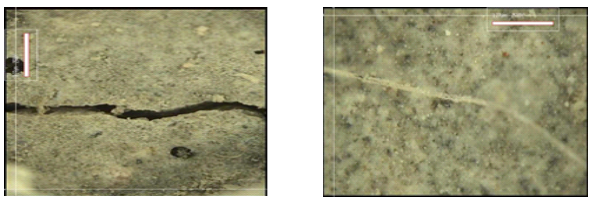


그림 3.6.26 치유재령에 따른 치유율(5%)



(a) 균열 초기 (b) 치유양생 이후

그림 3.6.19 균열면 관찰(치유재령 28일, Plain)



(a) 균열 초기 (b) 치유양생 이후

그림 3.6.20 균열면 관찰(치유재령 28일, 캡슐)

- 그림 3.6.29는 마이크로캡슐 혼합에 따른 자기치유 성능평가 결과로 Plain의 경우 치유재령 28일 후 약 70%의 치유성능이 나타났지만 캡슐을 혼합한 경우 캡슐 혼합량 증가에 따라 치유성능이 향상되는 경향이 나타남. 캡슐 1%은 약 75%의 치유성능이 나타났으며, 캡슐 3%은 약 80%, 캡슐 5%은 약 85%로 균열폭 0.25 mm 이내 Plain의 치유성능을 5~15% 향상시킴.
- 치유재령에 따른 치유성능은 그림 3.6.30과 같이 치유재령 7일 및 14일 이내에 대부분의 치유성능이 발현되며, 21일 이후 상대적으로 치유율 수준이 감소하는 경향이 나타남.
- 초기 균열면에 대한 치유 후 균열면 관찰결과 Plain은 치유재령 28일 후 일부 구간에서 반응생성물을 관찰할 수 있었지만 모든 구간을 수복하지는 못하는 것으로 나타났으며, 캡슐을 혼

합한 경우에는 대부분의 균열면이 반응 생성물에 의하여 수복된 것을 관찰할 수 있었음.

- 고상캡슐 활용 시멘트 복합재료의 품질 및 균열 자기치유 특성에 대하여 논문을 게재함(SCI-29).


Hindawi
Advances in Materials Science and Engineering
Volume 2017, Article ID 5187543, 10 pages
https://doi.org/10.1155/2017/5187543

Hindawi

Research Article

A Study on the Manufacturing Properties of Crack Self-Healing Capsules Using Cement Powder for Addition to Cement Composites

Yun-Wang Choi, Sung-Rok Oh, and Byung-Keol Choi

Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon 390-711, Republic of Korea

(나) 캡슐 활용 자기치유 보수 모르타르 개발 및 장기재령 자기치유 성능

① 캡슐 활용 자기치유 보수 모르타르 제조

- 캡슐 활용 자기치유 보수 모르타르의 배합비는 W:B:S=0.4:1.0:1.5이며, 결합재는 시멘트와 기능성 분체를 혼입하여 사용하였음. 잔골재로 규사(#6, #7, #8)가 사용되었으며, 폴리머 단섬유를 모르타르 총 부피의 0.1% 사용함(설계강도 40 MPa).
- 보수용 건식 모르타르는 결합재, 규사, 섬유 등을 혼입한 프리믹스 형태로 제조되며 배합수와 고상캡슐을 혼입하여 배합하였음(고상캡슐 혼입량은 결합재 질량 대비 5%, 10%를 혼입).

② 캡슐 활용 보수 모르타르의 품질특성 및 자기치유 성능 평가

- 그림 3.6.28은 캡슐 활용 보수 모르타르의 압축강도 시험결과를 나타낸 것으로 고상캡슐의 혼입량에 따라 압축강도가 최대 10% 감소되었음. 또한 보수 모르타르의 경우 체적 안정성이 요구되기 때문에 고상캡슐 혼입에 따른 길이변화율 평가결과 미치는 영향이 크지 않은 것으로 확인됨(그림 3.6.29).

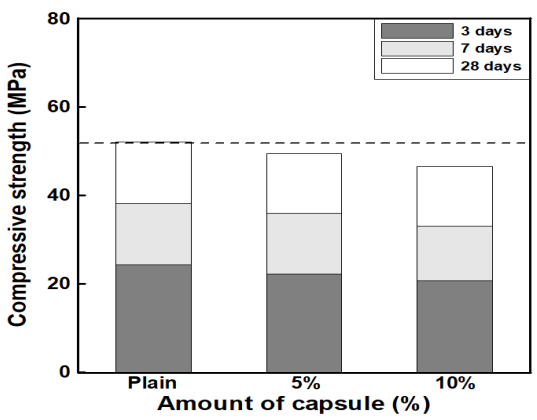


그림 3.6.28 보수 모르타르의 압축강도 결과

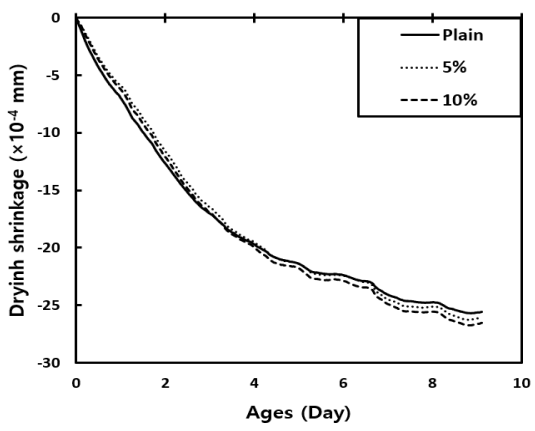


그림 3.6.29 보수 모르타르의 길이변화

- 그림 3.6.30은 캡슐 활용 보수 모르타르의 초기 투수량에 따른 치유성능을 나타내며, 그림 3.6.61은 초기 균열폭에 따른 치유율을 나타낸 것임.
- 균열폭이 0.25 mm인 시편에서 Plain의 치유율은 80%이지만, 고상캡슐을 5%, 10% 혼입한 시편의 치유율은 90%, 95%로 치유율이 향상되었음.
- 균열폭이 0.3 mm인 시편에서도 고상캡슐의 혼입량이 5%, 10%인 경우 치유율이 80%, 90%로 치유성능이 개선되었음. 표면 균열 관찰결과에서도 그림 3.6.32 및 그림 3.6.33과 같이 고상캡슐을 혼입한 시편의 균열면이 치유반응에 의하여 수복되는 것을 확인함.

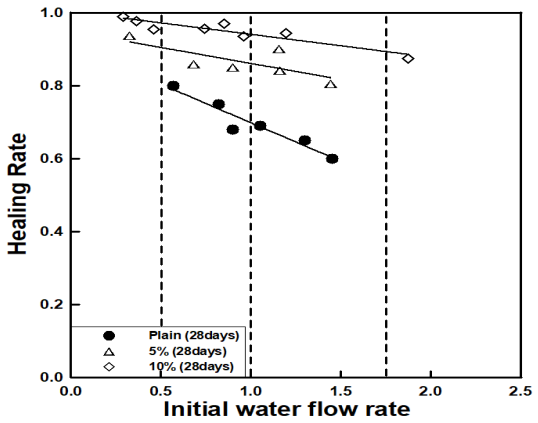


그림 3.6.30 초기 투수량에 따른 치유율

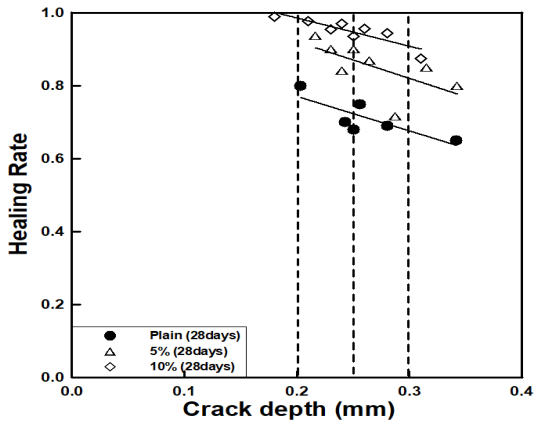
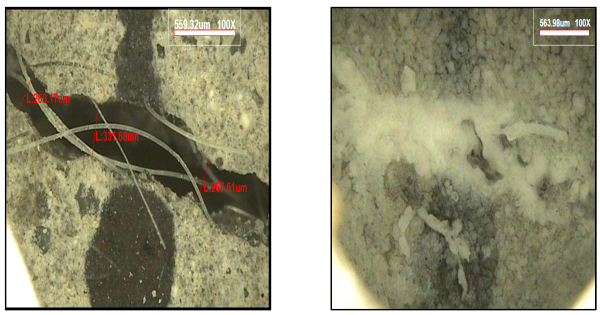
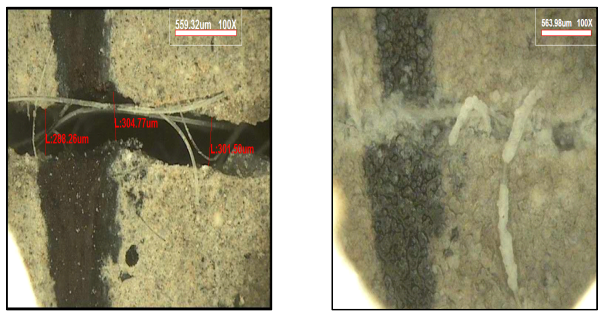


그림 3.6.31 초기 균열폭에 따른 치유율



(a) 균열 초기 (b) 균열 치유

그림 3.6.32 균열폭 0.25 mm(치유재령 28일)



(a) 균열 초기 (b) 균열 치유

그림 3.6.33 균열폭 0.30 mm(치유재령 28일)

③ 장기재령의 자기치유 성능

- 장기재령에서 캡슐 활용 자기치유 보수 모르타르의 자기치유 성능을 평가하기 위해 균열 유도재령이 28일과 91일이 경과된 시편의 자기치유 성능을 비교하였음.(균열폭 0.25 mm)
- 그림 3.6.34 및 그림 3.6.35는 균열 유도재령 28일, 91일인 시편의 자기치유 성능 평가결과를 나타냄. 균열 유도재령 28일의 치유성능은 캡슐을 혼입하지 않은 HRM-P의 치유재령 28일의 치유율은 약 70.1%이지만, 고상캡슐을 5%, 10% 혼입한 시편의 치유율은 89.5%, 98.3%로 HRM-P의 치유율 대비 19.4%, 28.2% 향상됨.
- 균열 유도재령 91일의 치유성능은 캡슐을 혼입하지 않은 HRM-P의 치유재령 28일의 치유율

은 약 53.8%이지만, 고상캡슐을 5%, 10% 혼입한 시편의 치유율은 76.9%, 91.3%로 HRM-P의 치유율 대비 23.4%, 37.5% 향상됨. 또한 치유재령 91일 이후 HRM-P의 치유율은 약 78.5%이지만, 고상캡슐을 5%, 10% 혼입한 시편의 치유율은 90.0%, 95.3% 치유율이 나타남에 따라 장기재령이 경과한 후에도 치유성능이 향상됨.

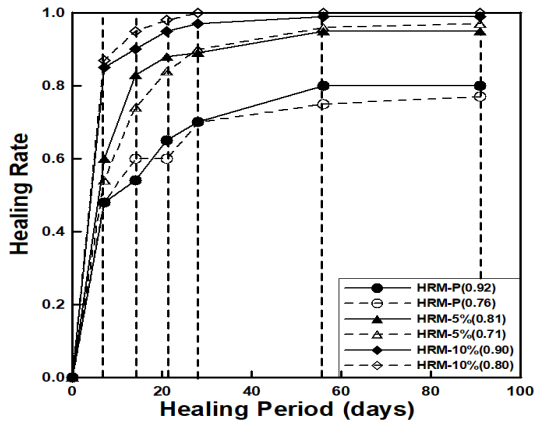


그림 3.6.34 치유기간에 따른 치유율
(재령 28일 균열 유도)

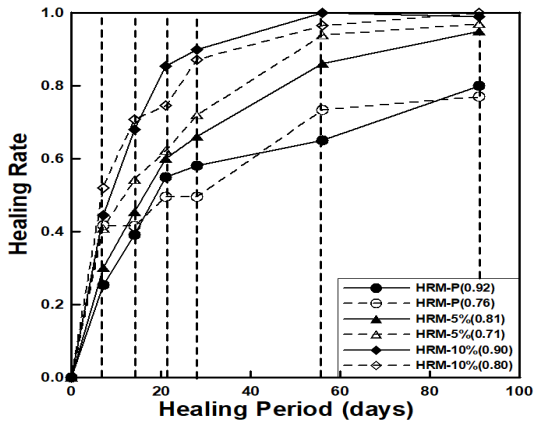
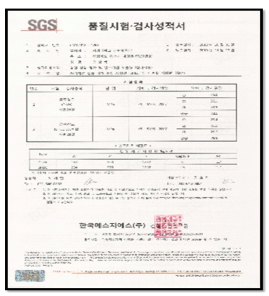


그림 3.6.35 치유기간에 따른 치유율
(재령 91일 균열 유도)

④ 고상캡슐 및 고상캡슐 활용 자기치유 보수 모르타르의 시제품 개발

- 본 연구에서는 고상캡슐을 시제품화 하였으며, 이를 활용한 프리믹스형 캡슐 활용 자기치유 보수모르타르를 개발 성과품으로 확보하였음.

표 3.6.6 주요 연구개발 내용 및 성과

구분	고상캡슐 시제품		캡슐 활용 자기치유 보수 모르타르	
제품화 형태				
특징	▪ 고상캡슐의 진공포장 (일반비닐형/ 수용성필름형) ▪ 포대안에 함께 공급 / 캡슐 별도 공급방식		▪ 캡슐 혼합에 따라 자기치유 성능이 부여된 보수용 모르타르 제품 ▪ 보수 모르타르의 기본 성능 확보 ▪ 목표강도 2수준 (40 MPa / 60 MPa)	

사. 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발

(1) 자기치유 코팅재의 치유 물질 선정 및 캡슐화 기술

(가) 치유 물질의 선정, 반응 특성 조사, 반응 생성물 특성 확인

① 치유 물질에 대한 분자 설계 및 선정

- -20℃의 저온 및 암소에서 흐름성과 반응성이 있고 반응 생성물이 점탄성 성질을 가지는 것과 동시에 대기, 온도, 습도 및 태양빛에서 화학적 안정성을 가지고 마이크로캡슐화가 가능한 조건으로 일성분계 혹은 이성분계 치유 물질에 대하여 문헌을 조사함.

② 치유 물질의 반응 특성

- 치유 물질의 질량 비율별로 혼합하여 반응을 통해 생성된 물질의 흐름성(점성)을 확인하고 추가적으로 점탄성의 성질을 조사함.
- 10:1의 비율과 이 비율의 근접 비율(8~12:1)에서는 가시적으로 적절한 점탄성을 가지는 것을 나타났으며, 다른 종류의 치유 물질 혼합물의 경우에도 다양한 비율로 혼합하여 반응을 진행하였음. 그 이후 얻어진 반응 생성물의 흐름성(점성) 및 탄성을 가시적으로 평가하였음.
- 자기치유 물질의 반응 생성물의 점탄성을 측정함. 측정 방법은 치유 물질을 10:1의 무게 비율로 반응시켜서 얻은 직경 25 mm × 높이 1 mm의 원반형 물질을 점탄성을 측정할 수 있는 기기인 ARES를 이용하여 측정함.
- 그림 3.7.1의 그래프에서 점탄성 성질을 가지는 물질의 고유한 특성으로 110 rad/s에서 교차점(crossover point)이 확인됨. 여기에서 G′은 storage modulus로 탄성의 성질을 확인할 수 있고 G″은 loss modulus로 점성의 성질을 확인할 수 있음.

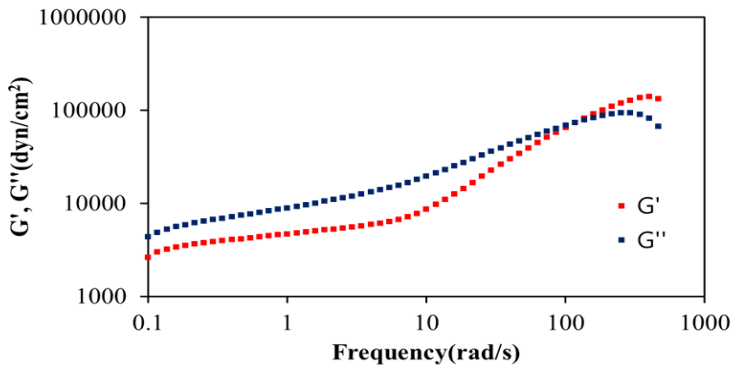


그림 3.7.1 치유 물질의 반응 생성물의 점탄성 그래프

③ 치유 반응 생성물에 대한 치유 특성 변화

- 치유 물질의 반응 생성물이 균열 폭에 대한 탄력적 대응이 가능한지 평가하기 위하여 치유 물질을 10:1의 비율로 혼합하였으며, 2개의 슬라이드 글라스의 표면과 사이의 틈에 도포한 후 48시간 동안 반응을 진행하여 연신 실험을 실시함.
- 그림 3.7.2의 연신 실험 결과를 통해서 균열폭이 늘어남과 동시에 반응 생성물도 같이 늘어나는 것으로 나타났으며, 최소 700 ㎛에서 최대 900 ㎛까지 반응 생성물이 늘어나는 것으로 나

타남. 이러한 결과는 균열이 발생될 경우 1차적으로 자기치유가 진행되며, 균열폭이 늘어날 경우 반응 생성물의 특성에 따라 지속적으로 보호해 줄 수 있음을 의미함.

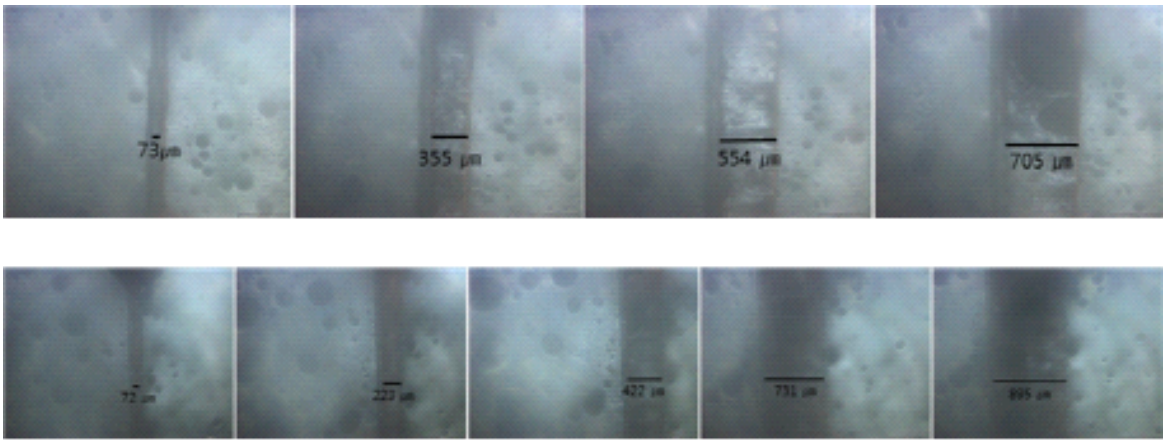


그림 3.7.2 반응 생성물에 대한 연신 실험 결과

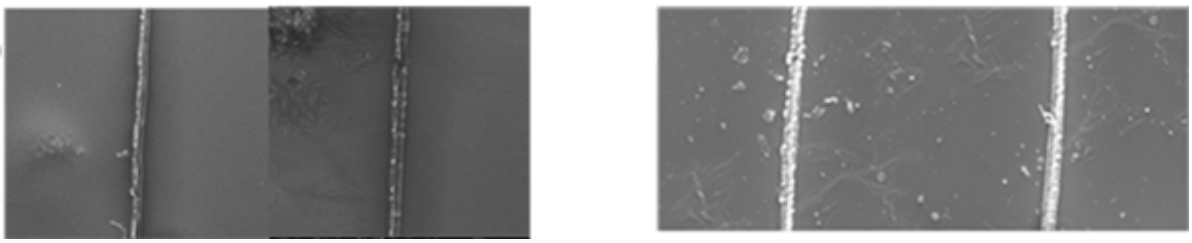
(나) 외부 환경에 따른 치유 반응 특성 및 치유 물질의 안정성 평가

① 외부 환경에 따른 치유 반응

- 겨울철 낮은 온도를 고려하여 -20℃의 저온에서 치유 물질의 흐름성과 반응성을 평가하였음. -20℃에서 치유 반응성을 확인한 결과 저온에서 흐름성이 존재하며 균열이 발생할 경우 저온에서도 치유 물질의 반응이 가능한 것을 확인하였음.

② 환경 인자에 대한 치유 반응 생성물의 안정성 조사

- 반복적인 진동으로 10~30 Hz의 진동을 15분 동안 4번씩 1시간 동안 가하여 반응 생성물 내부 및 표면에 균열의 발생 여부를 평가함. 이를 이용하여 자기치유 코팅재의 1차적 자기치유 및 진동 발생에 의한 2차 균열 방지 기능을 평가하였음.
- 그림 3.7.3(b)를 통해서 일차적으로 자기치유된 코팅재에 진동을 가하였을 때 2차 손상이 발생되지 않았으며, 이는 진동이 발생하더라도 반응 생성물의 점탄성 성질로 인하여 치유된 부위에 이차 손상이 발생되지 않음을 확인함.



(a) 마이크로캡슐이 분산된 코팅재의 자기치유된 손상 부위 (b) 자기치유된 코팅재의 진동 발생 후 손상 부위

그림 3.7.3 자기치유 코팅재의 손상 부위에 대한 SEM 사진

(다) 치유 물질의 캡슐화 방법 선정, 최적화 조건 및 scale-up 기술

① 캡슐화 방법, 계면활성제 및 캡슐막 물질 선정

- 치유 물질과 반응을 일으키지 않고 합성된 마이크로캡슐을 코팅재에 분산시킬 때 안정적으로 혼합되지만 손상이 발생할 때에는 쉽게 깨질 수 있는 막 강도를 가지는 마이크로캡슐화 방법을 선정함.
- 선정된 마이크로캡슐의 합성 방법은 in-situ 중합법과 계면중합법이고 주로 in-situ 중합법을 이용하여 자기치유 물질을 캡슐 코어로 하는 마이크로캡슐을 합성함.
- 치유 물질과 화학적으로 반응성이 없고 캡슐막의 구성 물질과 화학적 반응성을 가지지 않으며, 온도, 습도, 태양빛과 같은 외부 환경 조건에서 화학적으로 안정성을 가지는 계면활성제를 선정함.
- 선정된 계면활성제는 poly((ethylene-co-maleic) anhydride)외 3종을 선정하였고 이를 이용하여 마이크로캡슐을 합성함.
- 캡슐막 구성 물질은 자기치유 물질과 반응성을 가지지 않고 계면활성제와 화학적으로 반응성을 가지지 않으며, 외부 환경 조건에서 물리적/화학적 안정성을 가지는 캡슐막 구성 물질을 선정함.
- 마이크로캡슐의 캡슐막 강도는 마이크로캡슐을 코팅재 사이에 분산시키는 과정에서 마이크로캡슐이 깨지지 않는 안정성을 가짐과 동시에 손상이 발생할 때 쉽게 깨질 수 있을 정도의 막 강도를 가지는 캡슐막 구성 물질을 선정하고 위의 마이크로 캡슐화 방법, 계면활성제, 캡슐막 물질을 이용하여 마이크로캡슐을 합성함.
- 합성된 마이크로캡슐을 일부 분취하여 슬라이드 글라스에 분산시킨 후 광학현미경을 이용하여 마이크로캡슐의 외형과 직경을 측정하였고 마이크로캡슐의 평균 직경은 마이크로캡슐의 직경 분포 그래프 통해서 확인함(그림 3.7.4).

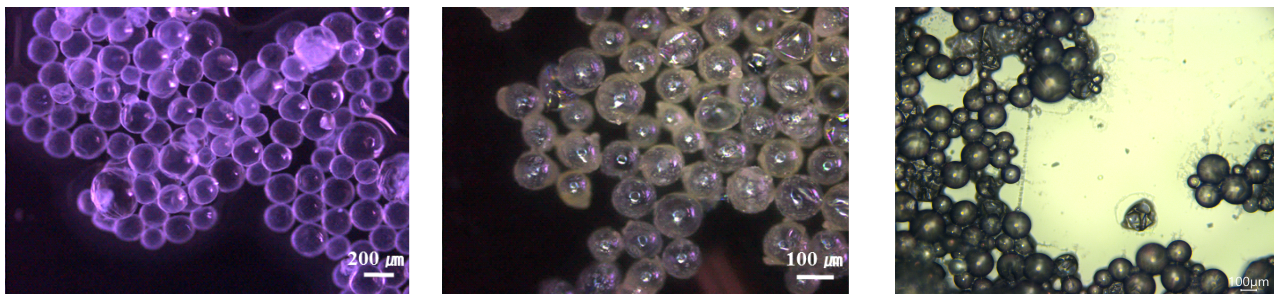


그림 3.7.4 합성된 마이크로캡슐의 외형 및 직경

- 측정된 마이크로캡슐의 개수를 기본 300~1000개 이상 측정하고 얻은 결과를 직경 범위별로 분류하여 합성된 마이크로캡슐의 직경 분포를 확인한 후 분석하여 평균 직경을 확인함(그림 3.7.5).
- 그림 3.7.4와 그림 3.7.5를 통해서 다양한 크기의 마이크로캡슐을 합성할 수 있음을 확인할 수 있으며, 평균 크기에 따라 치유 물질의 함량도 다르기 때문에 넓은 범위로 활용 할 수 있음.

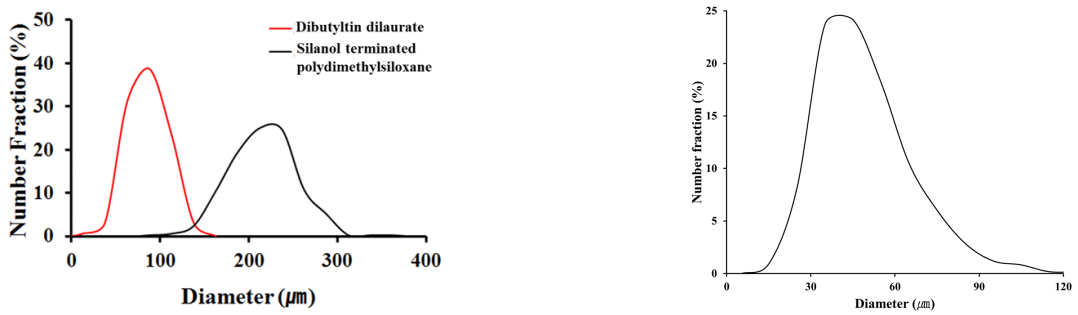
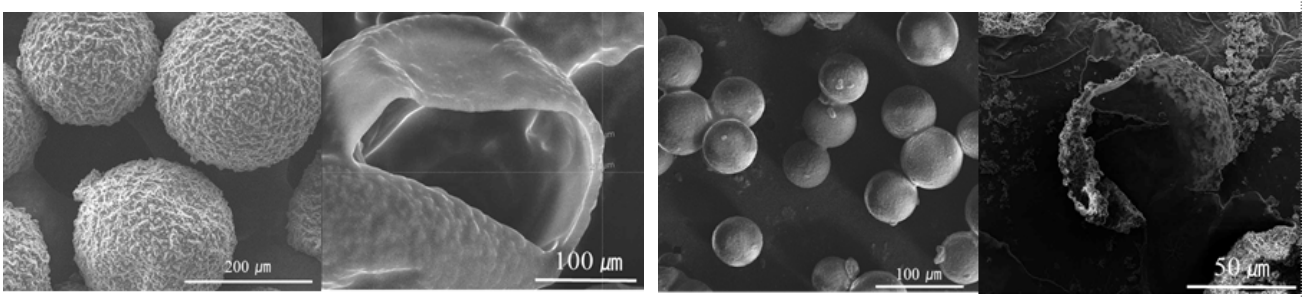


그림 3.7.5 합성된 마이크로캡슐의 직경 분포도

- SEM을 이용하여 마이크로캡슐의 합성법에 따른 외형, 표면 형상 및 캡슐 막 두께를 확인함.
- 그림 3.7.6을 통해서 마이크로캡슐은 대체로 구형의 형태를 가지고 있음을 확인함. 표면 형상에 대해서 in-situ 중합법을 통해서 합성된 마이크로캡슐은 거친 표면을 가지고 있고 평균 막 두께는 약 11 ㎛로 측정됨. 계면중합법으로 합성된 마이크로캡슐은 비교적 매끈한 표면을 가지고 막 두께는 평균 약 189 ㎚로 측정됨.



(a) In-situ 중합법 (b) 계면 중합법

그림 3.7.6 합성된 마이크로캡슐의 외형, 표면 형상 및 두께

- 합성된 마이크로캡슐의 보관안정성은 실온에서 대기 노출 및 밀폐 보관, 수중 보관, 냉장 보관(2℃)의 조건하에서 보관하여 보관안정성을 확인함.
- 실온 조건에서 대기 노출, 밀폐 보관, 수중 보관 그리고 냉장 보관 조건에서 마이크로캡슐의 뭉침 현상이 일어나지 않고 외형 및 특성에 변화가 없었으며. 보관 조건에 따라 마이크로캡슐의 보관안정성은 2년 이상으로 확인함.

② 마이크로 캡슐화 반응 최적화

- 계면활성제의 다양한 농도에 따라 마이크로캡슐의 직경을 조사함. 계면활성제의 농도를 낮을수록 마이크로캡슐의 직경은 커지고 높을수록 작아지는 경향이 있으며, 농도가 매우 높을 경우 Capsule-in-capsule의 마이크로캡슐이 합성되는 것으로 인해 직경이 반대로 커짐.
- 마이크로캡슐 합성시 교반 속도에 따라서 직경이 변화하며, 교반 속도에 느려질수록 생성되는 에멀젼의 크기가 커져 마이크로캡슐의 평균 직경이 커짐. 교반속도가 빠를수록 에멀젼의 크기가 작아져 마이크로캡슐의 평균 직경이 작아지는 결과가 나타남.

③ 마이크로캡슐의 scale-up 기술 및 안정성

- Pilot 장비를 이용한 scale-up 기술을 개발함. 50 L 규모의 Pilot 반응 장비를 이용하여 마이크로캡슐을 대량 합성을 진행하여 약 4.5 kg 정도의 마이크로캡슐을 생산하였고 교반 속도 조건에 변화를 주어 20~200 ㎛의 다양한 직경을 가진 마이크로캡슐을 제조함.
- 대량 합성된 마이크로캡슐의 보관안정성을 검토함. 실온 조건에서 대기 노출과 밀폐 보관에 따른 마이크로캡슐에 다소 뭉침 현상은 존재하지만 코팅재에 분산시킬 때 고르게 분산되며, 분산된 마이크로캡슐의 외형 및 특성에는 변화가 없는 것으로 나타남.
- 보관 안정성은 실온에서 수중에 보관하였을 때, 최소 1년 6개월까지 안정적인 것으로 나타났으며, 마이크로캡슐 건조 후 실온 대기 하에서 보관할 경우에는 최소 1년까지 안정적으로 나타남.
- 이와 관련하여 치유 물질의 캡슐화 방법 선정 및 최적기술에 대한 특허 등록(특허-21) 및 SCI(E) 학술지(SCI-47) 게재함.



polymers

MDPI

Article

An Oligoimide Particle as a Pickering Emulsion Stabilizer

Yu-Jin Cho [1], Dong-Min Kim [1], In-Ho Song [1], Ju-Young Choi [1], Seung-Won Jin [1], Beom-Jun Kim [1], Jin-Won Jeong [1], Chae-Eun Jang [1], Kunmo Chu [2] and Chan-Moon Chung [1,*]

특허증

CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number 제 10-1981853 호

출원번호 Application Number 제 10-2017-0077212 호

출원일 Filing Date 2017년 06월 19일

등록일 Registration Date 2019년 05월 17일

발명의 명칭 Title of the Invention

폴리이미드 입자를 이용한 피커링 에멀젼 조성물 및 이의 제조방법

(2) 자기치유 코팅재의 제조 및 최적화 기술

(가) 마이크로캡슐과 코팅재을 이용한 자기치유 코팅재 제조 기술

① 코팅재와 마이크로캡슐 배합시 캡슐의 안정성

- 마이크로캡슐의 분산을 위한 코팅재를 선정하기 위해 캡슐막과 화학적 반응이 일어나지 않고 균일하게 분산될 수 있으며, 보관 안정성이 최소 1년 이상이 가능한 코팅재를 선정함. 이러한 조건을 만족하는 수용성 아크릴계 중성화 염해방지 코팅재 및 하도재를 선정하였고 하도재 및 중성화 염해방지 코팅재를 이용하여 자기치유 코팅재 조성물을 제조함.
- 마이크로캡슐을 코팅재에 분산 할 경우 캡슐 뭉침현상이 없어 균일하게 분산시킬 수 있으며 캡슐 손실량을 최소화시킬 수 있는 방법을 선정하였음. 자기치유 코팅재 조성물 제조시 마이크로캡슐의 분산 과정에 의해 발생되는 캡슐의 손실량을 평가함.
- 중성화 염해 방지 코팅재의 하도재와 마이크로캡슐을 20 wt%의 비율로 분산시킨 후 200 rpm의 속도로 교반하여 하도재에 고르게 분산시켰으며, 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과, 분산된 마이크로캡슐 중 약 4.4%의 마이크로캡슐이 파괴된 것으로 나타남.

② 자기치유 코팅재의 도포 기술 개발

- 마이크로캡슐이 분산된 코팅재의 도포는 마이크로캡슐이 파괴되지 않는 방법 및 도포 표면에 대한 조건 등 을 고려하여 도포 방법을 선정함. 선정된 자기치유 코팅재의 도포 도구는 롤러나 붓 그리고 스프레이 장비를 이용하여 도포하는 것이 최적인 것으로 나타남.
- 하도재에 분산된 마이크로캡슐의 비율에 따른 자기치유 코팅재의 부착 강도는 KS F 4936에 따른 공인 시험을 통하여 측정함.

표 3.7.1 마이크로캡슐의 비율에 따른 부착 강도(실온) (MPa)

구분	Control (0 wt%)	10 wt%	20 wt%	30 wt%
Sample 1	1.6	1.7	1.4	1.6
Sample 2	1.7	1.8	1.3	1.4
Sample 3	1.7	1.7	1.3	1.4

표 3.7.2 마이크로캡슐의 비율에 따른 부착 강도(온·냉반복) (MPa)

구분	Control (0 wt%)	30 wt%
Sample 1	1.4	1.0
Sample 2	1.3	1.2
Sample 3	1.3	1.0

- 표 3.7.1과 3.7.2에 의하면 분산되는 마이크로캡슐의 비율이 증가함에 따라 측정되는 부착 강도가 감소하였으며, 온·냉 반복 시험을 통하여 부착 강도를 측정하였을 때 KS F 4936의 통과 기준인 1.0 MPa을 만족하는 결과를 얻음.
- 마이크로캡슐이 분산된 자기치유 코팅재의 대면적 시험 도포를 진행함. 대면적 시험 도포 이후 자기치유의 성능 및 치유 지속성 평가를 위하여 마이크로캡슐의 코어에 형광 색소를 일부 혼합하였음.
- 대면적 시험 도포 결과, 기존 코팅재와 비교하였을 때 도포 직후 겉표면의 차이가 없음을 확인하였고 도포한 후 8개월 이후 기존 코팅재와 자기치유 코팅재간의 표면적 차이가 없는 것으로 나타남.



그림 3.7.7 기존 코팅재와 자기치유 코팅재의 대면적 시험 도포 장면

- 자기치유 코팅재의 제조에 관한 특허(특허-18)을 출원 및 등록하였음.



(자기치유 코팅재의 제조에 대한 특허 등록)

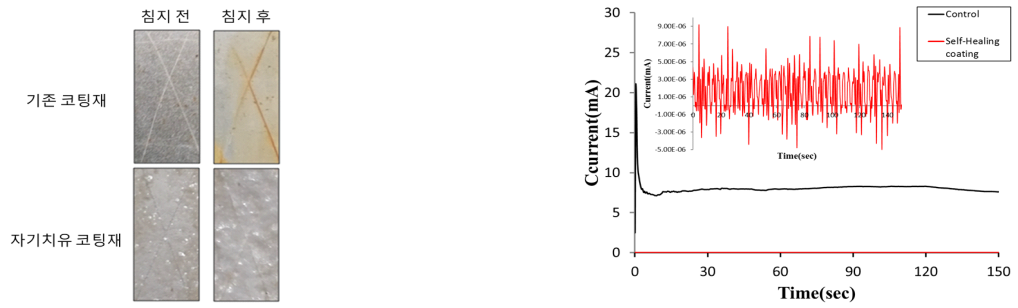
(나) 자기치유 코팅재를 이용한 치유 성능 평가 및 균열 폭에 따른 자기치유 효과

① 자기치유 코팅재 시험 평가 및 개선

- 도포된 자기치유 코팅재에 대하여 KS F 4936의 도막 형성 후의 겉모양 시험에서 코팅재 표면에 잔갈림이 없음을 확인하였고, 촉진내후성, 온냉 반복, 내알칼리성, 내염수성 시험을 실시하였을 때 역시 코팅재 표면에 잔갈림이 발생되지 않음을 확인함.
- 코팅재에 인위적인 손상으로서 스크래치를 만들기 위해서 바늘, 면도칼, 여러 종류의 커터칼 그리고 너비별 스크래치 발생 도구를 사용하였음. 그리고 UTM의 3점 굽힘 시험 방법을 이용하여 모르타르 시편 표면에 균열을 발생시킴.

② 자기치유 성능 평가

- 콘크리트 적용 전 자기치유 코팅재의 금속에 대한 내부식성 및 전기전도도를 평가함. 20 wt%의 비율로 마이크로캡슐이 분산된 자기치유 코팅재를 금속판 표면에 도포하고 스크래치를 발생시킨다음 소금물에 담근 후 부식 시험을 실시함.
- 내부식성 평가결과, 기존 코팅재는 스크래치를 통해서 금속이 그대로 노출되어 부식이 발생되었으며, 자기치유 코팅재는 스크래치 부위에 치유 물질이 흘러나와 치유됨에 따라 소금물로부터 금속을 보호하여 부식이 일어나지 않는 결과가 나타남(그림 3.7.8(a)).
- 전기전도도 측정결과, 기존 코팅재는 약 8 ㎃의 전기전도도가 존재하는 것을 확인하였고, 자기치유 코팅재는 약 7 ㎁의 전기전도도가 존재하는 것을 확인함. 여기서 인체에서 기본적으로 흐르는 전류는 40~60 ㎂로 이것은 자기치유 코팅재 시료에 대하여 전기전도도가 존재하지 않는 것을 확인함(그림 3.7.8(b)).



(a) 내부식성 실험결과 (b) 전기전도도 측정결과

그림 3.7.8 기존 코팅재와 자기치유 코팅재의 내부식성 시험과 전기전도도 시험

- 자기치유 코팅재의 내투수성 시험 결과, 기존 코팅재가 도포된 모르타르 시편에 균열이 발생되었을 때 투수가 발생하였고 자기치유 코팅재에 균열이 발생하였을 때에는 자기치유 효과로 인하여 투수되지 않음을 확인함(표 3.7.3).
- 자기치유 코팅재의 중성화 깊이 시험 결과, 기존 코팅재가 도포된 모르타르에 균열이 발생되었을 때 중성화 깊이는 평균 2.4 ㎜이었고 자기치유 코팅재에 손상이 발생하였을 때에는 자기치유 효과로 인하여 중성화 깊이가 평균 0.0 ㎜임을 확인함(표 3.7.3).
- 자기치유 코팅재의 염화물 이온 침투 저항성 시험 결과, 기존 코팅재에서는 손상이 발생되었을 때 염화물 이온 침투 저항성은 평균 6,164 Coulombs임을 확인하였고 자기치유 코팅재에 손상이 발생하였을 때에는 자기치유 효과로 인하여 염화물 이온 침투 저항성은 평균 1,785 Coulombs임을 확인함(표 3.7.3).

표 3.7.3 손상된 기존 코팅재와 자기치유 코팅재의 공인 시험 결과

구분	기존 코팅재	자기치유 코팅재
내투수성 시험	투수됨	투수되지 않음
중성화 깊이 시험	2.4,㎜	0.0 ㎜
염화물 이온 침투 저항성 시험	6,164 Coulombs	1,785 Coulombs

- 물 흡수도 시험을 통한 자기치유 코팅재의 치유 성능을 평가하기 위하여 5, 10, 20, 30 wt%의 비율로 마이크로캡슐이 분산된 하도재를 이용한 자기치유 코팅재의 물 흡수도 시험을 실시함. 스크래치는 평균 30 ㎛와 90 ㎛의 폭을 가지고 균열은 최소 30 ㎛에서 최대 300 ㎛의 폭을 발생시킴.

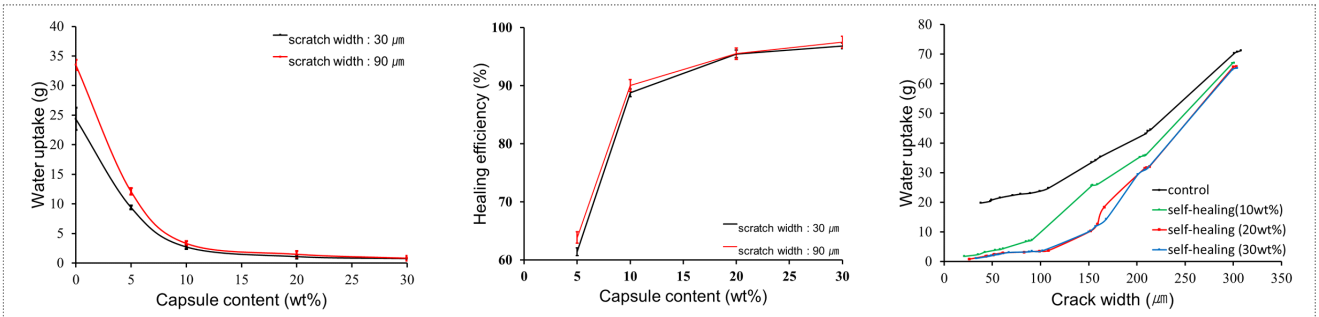
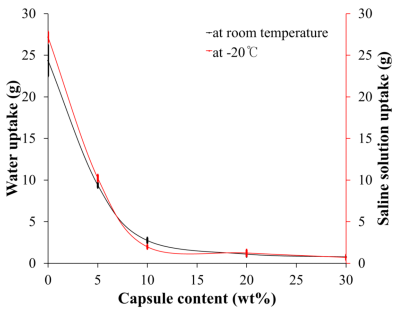


그림 3.7.9 자기치유 코팅재의 스크래치와 균열 너비 및 마이크로캡슐의 분산 비율에 따른 물 흡수도와 치유 효율

- 치유 효율은 $((W_{Control}-W_{Self\text{-}Healing})/W_{Control} \times 100)$을 이용하여 확인함. 이때 $W_{Control}$은 기존 코팅재에 손상이 발생하였을 때의 물 흡수량을 나타낸 것이고 $W_{Self\text{-}Healing}$은 자기치유 코팅재에 균열이 발생하였을 때의 물 흡수량을 나타내었음.
- 그림 3.7.9의 결과를 통해서 5 wt%의 마이크로캡슐이 분산되었을 때에는 치유 효율이 60~65%임을 확인하였고, 발생시킨 스크래치 폭에 따라 물 흡수량이 달라짐을 확인함. 그리고 10 wt%이상의 마이크로캡슐이 분산되었을 때에는 스크래치 폭에 큰 영향을 받지 않고 치유 효율이 평균 90% 이상인 것으로 나타남. 그림 3.7.10의 결과를 통해서 20 wt% 또는 30 wt%의 비율로 자기치유 코팅재를 사용한 경우 넓은 균열 범위에서 비슷한 물 흡수량을 확인하였고, 10 wt%의 비율로 자기치유 코팅재와 비교하였을 때 높은 치유 효율을 확인함.

- -20℃의 저온에서는 일반적인 물은 냉각되어 결빙이 되기 때문에 실험 온도에서 얼지 않는 소금물을 이용하여 흡수도 실험을 진행함.



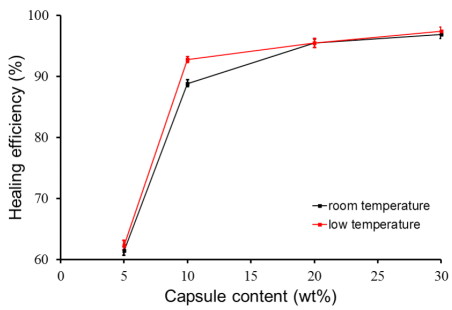


그림 3.7.10 자기치유 코팅재의 실온과 -20℃의 저온에 따른 흡수도 및 치유 효율

- 그림 3.7.10의 결과를 통해서 온도가 변화함에 따라 물 및 소금물의 흡수량의 차이는 거의 없으며 이는 저온에서 자기치유가 가능한 것을 의미함.

③ 균열폭에 따른 자기치유 기술

- 최대 균열폭으로 치유 목표인 300 ㎛의 균열폭에 대한 자기치유 성능을 40 wt%의 비율로 마이크로캡슐이 분산된 하도재를 이용하여 내투수성 시험을 실시함. 시험 결과 기존 코팅재가 도포된 모르타르 시편에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때 앞에서의 결과와 같이 투수가 발생하였고 자기치유 코팅재가 도포된 모르타르에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때에는 넓은 균열폭에도 불구하고 자기치유 효과로 인하여 투수되지 않음을 확인함(표 3.7.4).
- 최대 균열폭으로 치유 목표인 300 ㎛의 균열폭에 대한 자기치유 성능을 40 wt%의 비율로 마이크로캡슐이 분산된 하도재를 이용하여 중성화 깊이 시험을 실시함. 시험 결과, 기존 코팅재가 도포된 모르타르 시편에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때 중성화 깊이는 평균 1.4 ㎜ 이었고 자기치유 코팅재가 도포된 모르타르에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때에는 넓은 균열폭에도 불구하고 자기치유 효과로 인하여 중성화 깊이가 평균 0.3 ㎜로 감소하는 것을 확인함(표 3.7.4).
- 최대 균열폭으로 치유 목표인 300 ㎛의 균열폭에 대한 자기치유 성능을 40 wt%의 비율로 마이크로캡슐이 분산된 하도재를 이용하여 염화물 이온 침투 저항성 시험을 실시함.
- 시험 결과, 기존 코팅재가 도포된 모르타르 시편에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때에는 염화물 이온 침투 저항성은 평균 6,164 Coulombs임을 확인하였고, 자기치유 코팅재가 도포된 모르타르에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때에는 넓은 균열폭에도 불구하고 자기치유 효과로 인하여 염화물 이온 침투 저항성은 평균 474 Coulombs으로 감소하였음을 확인함(표 3.7.4).

표 3.7.4 300 ㎛ 손상 폭에 대한 기존 코팅재와 자기치유 코팅재의 공인 시험 결과

구분	기존 코팅재	자기치유 코팅재
내투수성 시험	투수됨	투수되지 않음
중성화 깊이 시험	1.4,㎜	0.3 ㎜
염화물 이온 침투 저항성 시험	6,164 Coulombs	474 Coulombs

- 치유 목표인 300 ㎛의 균열폭에 대한 자기치유 성능은 환경 대응적인 치유 효과를 확인하기 위해서 40 wt%의 비율로 마이크로캡슐이 분산된 하도재를 이용하여 내투수성 시험함.
- 시험 결과, 자기치유 코팅재가 도포된 모르타르에 300 ㎛의 균열이 발생하였을 때에는 넓은 균열폭에도 불구하고 -20℃에서 자기치유가 진행되어 투수되지 않음을 확인하였고 1차적으로 자기치유된 모르타르 시료에 대해서 반복적인 진동을 가하였음에도 불구하고 투수되지 않음을 확인함(표 3.7.5).

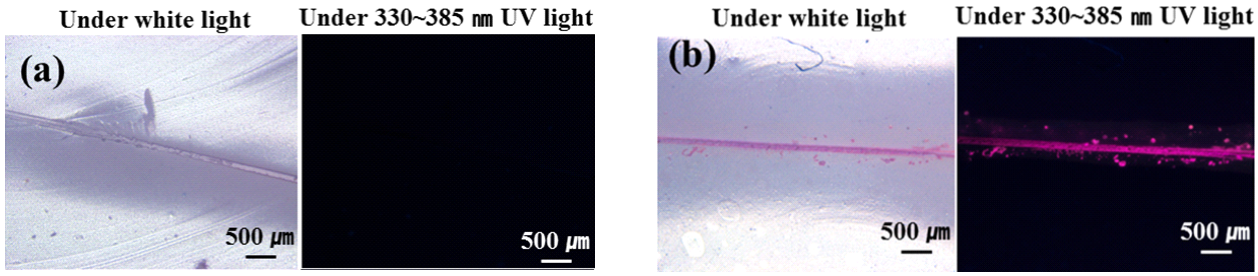
표 3.7.5 -20℃의 저온과 반복적인 진동을 통한 자기치유 코팅재의 내투수성 시험 결과

구분	자기치유 코팅재 (-20℃)	자기치유 코팅재 (10-30 Hz 반복적 진동)
내투수성 시험	투수되지 않음	투수되지 않음

(다) 환경 대응 자기치유 성능 평가 및 2차적 균열 방지 기술

① 저온 조건에 따른 자기치유 기술

- -20℃의 저온에서 자기치유 코팅재에 균열이 발생하였을 때 마이크로캡슐이 잘 흘러나오는지 확인하기 위해 흐름성 평가를 실시함. 그리고 치유 물질의 흐름성 확인을 가시화하기 위해서 형광 색소를 사용함.



(a) 비교 물질(n-hexadecane)의 흐름성 (b) 치유 물질의 흐름성

그림 3.7.11 -20℃에서 치유 물질의 흐름성

- 그림 3.7.11의 흐름성 시험 결과에서 비교 물질로서 어는점이 18℃인 n-hexadecane을 사용하였고 -20℃에서 흐름성이 존재하지 않음을 확인함. 저온 자기치유 성능을 세밀하게 확인하기 위해서 위에서 진행하였던 금속판을 이용한 전기전도도 실험을 실시함.
- 그림 3.7.12의 전기전도도 시험 결과에서 -20℃에서 스크래치가 발생된 기준 코팅재는 전기가 흐른다는 것을 확인하였고 스크래치가 발생된 자기치유 코팅재는 자기치유로 인해 전기전도도가 없음을 확인함. 그리고 추가적으로 -20℃에서 NaCl 수용액 흡수도 시험을 실시함. 모르타르 표면에 자기치유 코팅재를 도포한 후 스크래치를 발생시켜 -20℃에서 48시간동안 NaCl 수용액에 침지시켜 흡수도를 확인함.
- 그림 3.7.13의 흡수도 시험 결과에서 기존 코팅재에 스크래치가 발생하였을 때 약 36 g의 NaCl 수용액이 흡수된 것을 확인하였고 자기치유 코팅재에 스크래치가 발생하였을 때 약 1 g정도의 NaCl 수용액이 흡수된 것을 확인함.

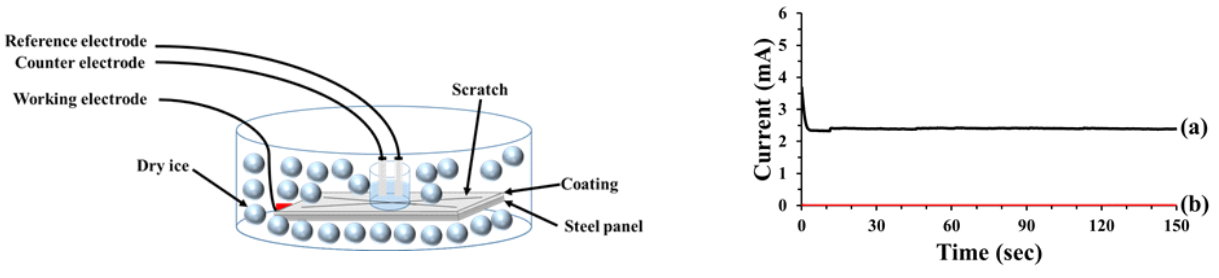


그림 3.7.12 자기치유 코팅재의 -20℃에서의 전기전도도 시험 모식도 및 시험 결과

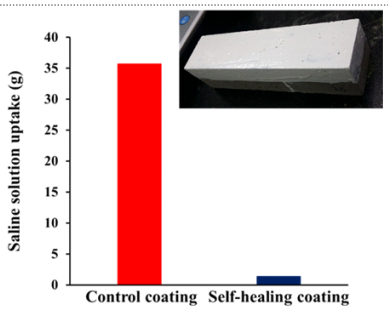
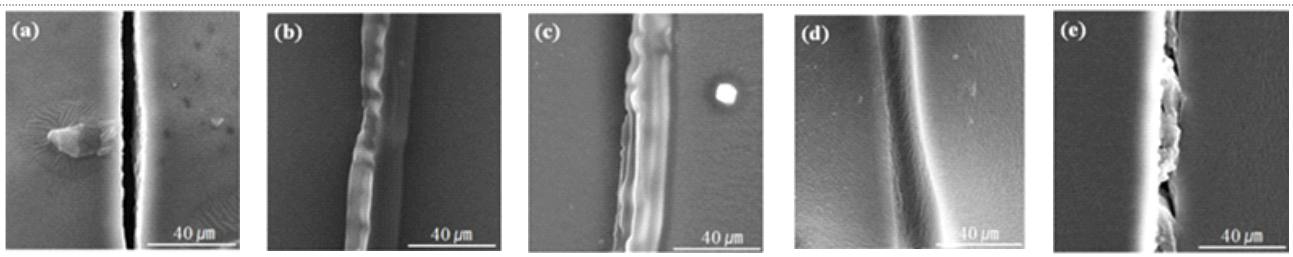


그림 3.7.13 자기치유 코팅재가 도포된 모르타르의 -20℃에서의 NaCl 수용액 흡수도

② 2차 균열 방지 자기치유 기술

- 모르타르 시편에 위의 조건으로 진동을 가하여 1차적으로 치유된 자기치유 코팅재의 표면에 2차 균열의 발생 여부를 손상 부위의 SEM을 통한 표면 형상 관찰을 통해서 확인함.



(a) 기존 코팅재 | (b) 자기치유 이후와 진동 발생 전의 자기치유 코팅재 | (c) 자기치유 이후와 진동 발생 이후의 자기치유 코팅재 | (d) 자기치유 이후와 진동 발생 전의 비교용 자기치유 코팅재 | (e) 자기치유 이후와 진동 발생 이후의 비교용 자기치유 코팅재

그림 3.7.14 자기치유 코팅재의 도포된 모르타르 시편의 진동 시험 후 표면의 SEM 사진

- 그림 3.7.14의 결과에서 (a)는 기존 코팅재에 손상이 발생되면 손상된 부위에 아무런 변화가 없으며, (b)와 (d)의 결과를 통해서 자기치유가 일어난 것을 관찰함. 그리고 (c)와 (e)의 결과를 통해서 (c)는 반복적인 진동에도 불구하고 점탄성의 성질로 인하여 2차 손상이 발생하지 않았지만 치유 물질이 딱딱하게 경화되는 (e)는 반복적인 진동을 통해 자기치유된 부위에서 2차 손상이 발생된 것을 확인함.
- 이에 대해 2차 손상방지 자기치유 코팅재와 저온 자기치유 성능에 대하여 SCI(E)논문(SCI-7, SCI-28)을 게재하였음.

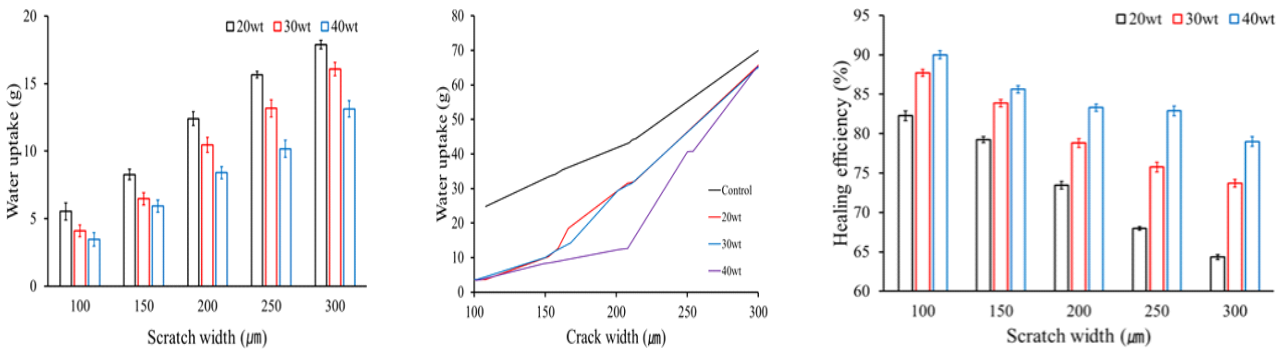
materials
MDPI
Article
Microcapsule-Type Self-Healing Protective Coating for Cementitious Composites with Secondary Crack Preventing Ability

materials
MDPI
Article
Low-Temperature Self-Healing of a Microcapsule-Type Protective Coating
Dong-Min Kim, Yu-Jin Cho, Ju-Young Choi, Beom-Jun Kim, Seung-Won Jin and Chan-Moon Chung *

(라) 자기치유 코팅재의 최적화 기술

① 균열 폭에 따른 자기치유 코팅재의 자기치유 효율 최대화 및 최적 코팅 조건

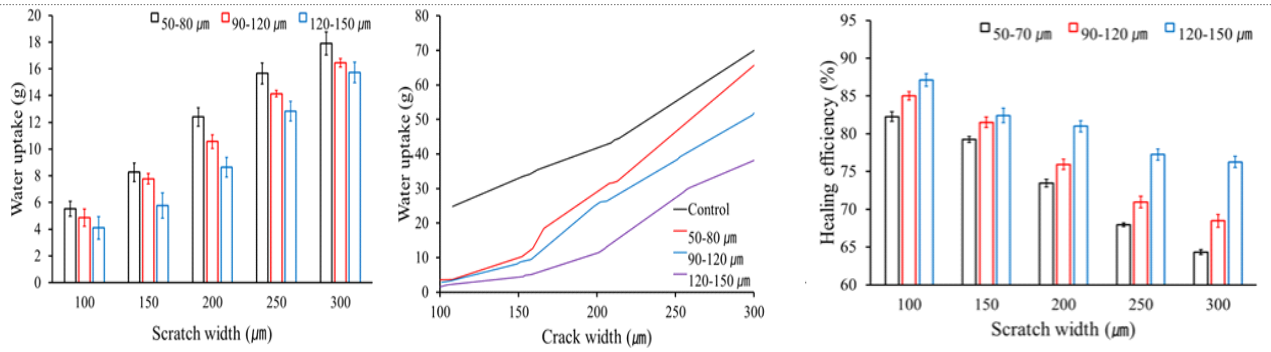
- 균열 폭에 따른 분산된 마이크로캡슐의 함량과 평균 직경 및 모르타르에 도포되는 하도재의 도포 두께에 따른 물 흡수도 실험을 통해 자기치유 효과 및 치유 효율을 조사함.
- 마이크로캡슐의 함량을 20, 30, 40 wt%의 비율로 분산시킨 하도재를 모르타르 시편에 도포시킨 후 물 흡수도와 치유 효율을 조사함.
- 그림 3.7.15의 결과를 통해서 마이크로캡슐의 비율이 증가할수록 흡수량이 감소하였으며, 균열폭이 넓어질수록 치유 효율이 증가하였음. 그리고 40 wt%의 마이크로캡슐이 분산된 자기치유 코팅재의 경우 200 ㎛의 균열폭까지 효과적으로 자기치유가 되는 것을 확인함.



(a) 스크래치 및 균열 너비에 따른 물 흡수도 (b) 스크래치 너비에 따른 치유 효율

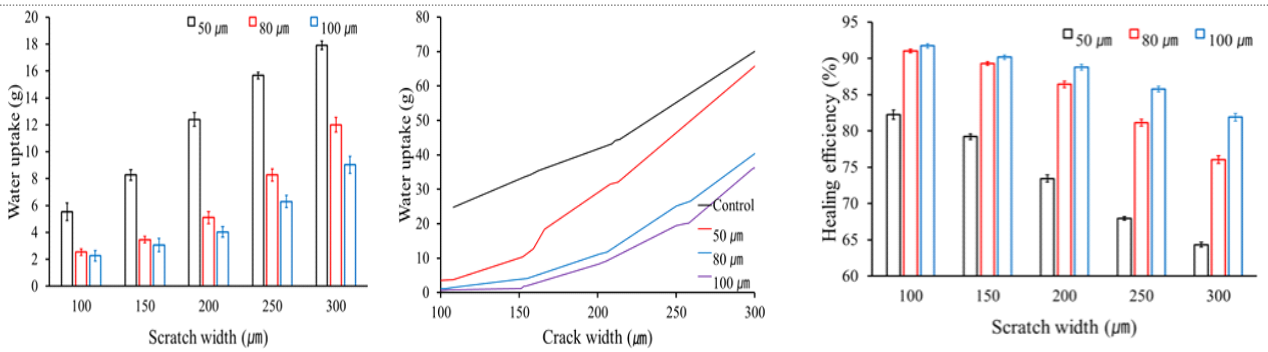
그림 3.7.15 자기치유 코팅재의 스크래치 및 균열 너비에 대한 마이크로캡슐 분산 비율에 따른 물 흡수도와 치유 효율

- 65 ㎛, 102 ㎛, 135 ㎛의 평균 직경을 가지는 마이크로캡슐을 20 wt%의 비율로 분산된 하도재를 모르타르에 도포하여 물 흡수도와 치유 효율을 확인함.
- 그림 3.7.16의 결과를 통해서 분산되는 마이크로캡슐의 평균 직경이 증가할수록 흡수량이 감소하였고 균열폭이 커질수록 치유 효율이 증가하였음. 또한 마이크로캡슐의 함량과는 달리 마이크로캡슐의 평균 직경이 증가함에 따라 흡수량의 차이가 커지는 것으로 나타남.
- 마이크로캡슐이 분산된 하도재를 50 ㎛, 80 ㎛, 100 ㎛ 내외의 두께로 도포시킨 모르타르의 물 흡수도와 치유 효율을 조사함.
- 그림 3.7.17과 같이 도포된 두께가 두꺼워질수록 흡수되는 물의 양이 감소하였고 이에 따라 자기치유 효율 또한 균열 폭이 커질수록 증가하는 것으로 나타남.



(a) 스크래치 및 균열 너비에 따른 물 흡수도 (b) 스크래치 너비에 따른 치유 효율

그림 3.7.16 자기치유 코팅재의 스크래치 및 균열 너비에 대한 마이크로캡슐의 평균 직경에 따른 물 흡수도와 치유 효율



(a) 스크래치 및 균열 너비에 따른 물 흡수도 (b) 스크래치 너비에 따른 치유 효율

그림 3.7.17 자기치유 코팅재의 하도재 도포 두께에 따른 물 흡수도와 치유 효율

- 도포된 하도재의 두께가 80 ㎛ 이상부터 균열 너비가 증가함에 따라 흡수되는 물의 양이 증가하지만 위의 다른 영향 요소와는 달리 흡수되는 물의 양이 현저히 감소됨. 위의 실험에 대한 효과를 확인하기 위해 SEM을 이용하여 300 ㎛ 의 균열폭을 가지는 자기치유 코팅재의 표면 형상을 확인함.
- 그림 3.7.18의 표면 형상 관찰 결과, 자기치유 코팅재가 도포된 시편은 마이크로캡슐이 스크래치로 인해 흘러나온 치유물질이 손상 부위에 채워짐에 따라 치유가 일어나는 것을 확인하였지만 손상된 부위를 채워준 치유물질의 양이 적어 아래로 파여진 형상을 가짐을 관찰함.



(a) 기존 코팅재 (b) 자기치유 코팅재

그림 3.7.18 300 ㎛ 너비의 손상 폭의 코팅재 표면 형상

3-2. 연구 성과

가. 국내외 논문 게재

(1) 국내 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	박테리아를 흡착한 팽창질석 기반의 친생태 모르타르 개발	한국건설순환자원학회 논문집	윤현섭	4(2)	한국	한국건설순한자원학회	비SCI	2016.06.30
2	박테리아 흡착 팽창질석 기반 친생태 잔디블록의 개발	한국건설순환자원학회 논문집	윤현섭	4(3)	한국	한국건설순한자원학회	비SCI	2016.09.30
3	플라이애시 종류에 따른 플라이애시 모르타르의 특성에 대한 연구	한국건설순환자원학회 논문집	김주형	4(4)	한국	한국건설순한자원학회	비SCI	2016.12.30
4	균열 자기치유를 위한 캡슐용 무기계 코어재료의 시멘트복합체 성능에 미치는 영향에 관한 기초적 연구	한국구조물진단유지관리공학회논문집	최연왕	21(1)	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2017.01.01
5	Self-Cementitious Hydration of Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ash	Journal of The Korean Ceramic Society	이승헌	54(2)	한국	한국세라믹학회	비SCI	2017.03.31
6	$MgO-KH_2PO_4$ 몰비 변화에 따른 마그네시아-인산염 모르타르의 배합실험	한국건축시공학회지	윤현섭	17(3)	한국	한국건축시공학회	비SCI	2017.06.20
7	규산염계 무기 재료를 활용한 침투성 보수재의 기초 특성에 관한 실험적 연구	한국산학기술학회논문지	하상우	18(7)	한국	한국산학기술학회	비SCI	2017.07.31
8	시멘트계 자기치유 시편에 대한 반사전자 현미경 이미지 분석을 위한 함침과 연마의 중요성	한국건설순환자원학회 논문집	김동현	5(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2017.12.30
9	슬라임 생성 박테리아를 혼입한 코팅재의 염해 저항성 및 초음파 특성	한국건설순환자원학회 논문집	권성준	5(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2017.12.30
10	박테리아 영양소 성분이 시멘트 복합체의 초기 특성에 미치는 영향	대한건축학회 논문집 구조계	장인동	34(3)	한국	대한건축학회	비SCI	2018.03.30
11	콘크리트 보호용 생태학적 코팅재 개발을 위한 박테리아 고정화 기술	콘크리트학회 논문집	윤현섭	30(2)	한국	한국콘크리트학회	비SCI	2018.04.01
12	액상 무기재료를 활용한 시멘트 복합재료 혼합용 자기치유 마이크로 캡슐의 제조 특성에 관한 실험적 연구	한국건설순환자원학회 논문집	최연왕	6(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2018.12.30
13	자기치유 마이크로 캡슐을 혼합한 시멘트 복합재료의 품질 및 균열 치유 특성에 관한 실험적 연구	한국구조물진단유지관리공학회논문집	최연왕	23(1)	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2019.01.01

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
14	콘크리트 표면 보호용 생태학적 코팅 모르타르의 내황산성 평가	콘크리트학회 논문집	윤현섭	31(1)	한국	한국콘크리트학회	비SCI	2019.02.01
15	고로 슬래그 시멘트 페이스트 균열에서의 자기치유 특성	한국건설순환자원학회 논문집	이승헌	7(1)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2019.03.30
16	고로슬래그 시멘트 페이스트의 초기 균열에서의 자기치유에 미치는 Na_2SO_4 의 영향	콘크리트학회 논문집	이승헌	31(3)	한국	한국콘크리트학회	비SCI	2019.06.01
17	콘크리트 보호코팅재의 자기치유 시각화	융합정보 논문지	김동민	9(10)	한국	중소기업융합학회	비SCI	2019.10.28
18	결정성장형 자기치유 고상캡슐을 혼합한 보수 모르타르의 품질 및 균열 치유 특성에 관한 실험적 연구	한국구조물진단유지관리공학회논문집	오성록	24(1)	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2020.02.01

(2) 국외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	Recently developed applications for natural hydrophilic polymers	Journal of Industrial and Engineering Chemistry	Kantappa Halake	40	한국	Elsevier	SCI	2016.08.25
2	Effect of internal curing by superabsorbent polymers – Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars	Construction and Building Materials	송치원	123	영국	Elsevier	SCI	2016.10.01
3	Effects of the physicochemical properties of fly ash on the compressive strength of high-volume fly ash mortar	Construction and Building Materials	문규돈	124	영국	Elsevier	SCI	2016.10.15
4	Microcapsule-Type Self-Healing Protective Coating for Cementitious Composites with Secondary Crack Preventing Ability	Materials	김동민	10(2)	스위스	MDPI	SCI	2017.01.26
5	Simple Technique for Tracking Chloride Penetration in Concrete Based on the Crack Shape and Width under Steady-State Conditions	Sustainability	양근혁	9(2)	스위스	MDPI	SCI	2017.02.15
6	Modelling of chloride diffusivity in concrete considering	Construction and Building Materials	최영철	136	영국	Elsevier	SCI	2017.04.01

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
7	Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag	Construction and Building Materials	최영철	137	영국	Elsevier	SCI	2017.04.15
8	Non-ureolytic calcium carbonate precipitation by Lysinibacillus sp. YS11 isolated from the rhizosphere of Miscanthus sacchariflorus	Journal of Microbiology	이윤석	55(6)	한국	Springer	SCI	2017.05.28
9	Effects of aluminate rich slag on compressive strength, drying shrinkage and microstructure of blast furnace slag cement	Construction and Building Materials	조봉석	140	영국	Elsevier	SCI	2017.06.01
10	Moisture-dependent piezoresistive responses of CNT-embedded cementitious composites	Composite Structures	송치원	170	영국	Elsevier	SCI	2017.06.15
11	Modulation of calcium carbonate precipitation by exopolysaccharide in Bacillus sp. JH7	Applied Microbiology and Biotechnology	김현정	101	독일	Springer	SCI	2017.06.22
12	Roseomonas suffusca sp. nov., isolated from lagoon sediments	International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology	Y. Subhash	67(7)	영국	Microbiology society	SCI	2017.07.01
13	Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers	Construction and Building Materials	홍근태	143	영국	Elsevier	SCI	2017.07.15
14	Aneurinibacillus sediminis sp. nov., isolated from lagoon sediments	International journal of systematic and evolutionary microbiology	Y. Subhash	67(8)	영국	Microbiology society	SCI	2017.08.04
15	Tests on magnesium potassium phosphate composite mortars with different water-to-binder ratios and molar ratios of magnesium-to- phosphate	Construction and Building Materials	이경호	146	영국	Elsevier	SCI	2017.08.15

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
16	Internal relative humidity and drying shrinkage of hardening concrete containing lightweight and normal-weight coarse aggregates: A comparative experimental study and modeling	Construction and Building Materials	최성철	148	영국	Elsevier	SCI	2017. 09.01
17	Description of Oceanispirochaeta sediminicola gen. nov., sp. nov., an obligately anaerobic bacterium isolated from coastal marine sediments, and reclassification of Spirochaeta litoralis as Oceanispirochaeta litoralis comb. nov.	International Journal of systematic and Evolutionary Microbiology	Y. Subhash	67(9)	영국	Microbiology society	SCI	2017. 09.01
18	Low-Temperature Self-Healing of a Microcapsule-Type Protective Coating	Materials	김동민	10(9)	스위스	MDPI	SCI	2017. 09.14
19	A Study on the Manufacturing Properties of Crack Self-Healing Capsules Using Cement Powder for Addition to Cement Composites	Advances in Materials Science and Engineering	최연왕	2017	이집트	Hindawi	SCI	2017. 10.01
20	Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete	Applied Microbiology and Biotechnology	이윤석	102(7)	독일	Springer	SCI	2018. 02.27
21	Modeling rapid self-sealing of cracks in cementitious materials using superabsorbent polymers	Construction and Building Materials	홍근태	164	영국	Elsevier	SCI	2018. 03.10
22	Blood-clotting mimetic behavior of biocompatible microgels	Journal of Industrial and Engineering Chemistry	Mallinath S. Birajdar	63	대한민국	Elsevier	SCI	2018. 07.25
23	Feasibility tests toward the development of protective biological coating mortars	Construction and Building Materials	양근혁	181	영국	Elsevier	SCI	2018. 08.30
24	An Oligoimide Particle as a PickeringEmulsion Stabilizer	Polymers	조유진	10(10)	스위스	MDPI	SCI	2018. 09.27
25	Quantitative evaluation of crack self-healing in cement-based materials by absorption test	Construction and Building Materials	박병선	184	영국	Elsevier	SCI	2018. 09.30
26	Self-Healing Coatings Based on Microcapsules Containing Linseed Oil for Protection of Cementitious Materials	Coatings	김동민	8(11)	스위스	MDPI	SCI	2018. 11.15

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
27	Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs)	Construction and Building Materials	박병선	189	영국	Elsevier	SCI	2018.11.20
28	Strategies for Fabrication of Hydrophobic Porous Materials Based on Polydimethylsiloxane for Oil-Water Separation	Macromolecular Research	Kantappa Halake	27(2)	대한민국	Springer	SCI	2019.01.03
29	Hysteretic behavior of rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers	Construction and Building Materials	홍근태	195	영국	Elsevier	SCI	2019.01.20
30	Effectiveness of expanded clay as a bacteria carrier for self-healing concrete	Applied Biological Chemistry	한상현	62	대한민국	Springer	SCI	2019.03.30
31	Enhanced calcium carbonate-biofilm complex formation by alkali-generating Lysinibacillus boronitolerans YS11 and alkaliphilic Bacillus sp. AK13	AMB Express	이윤석	9(1)	독일	Springer	SCI	2019.04.11
32	Prediction of Self-Healing Potential of Cementitious Materials Incorporating Crystalline Admixture by Isothermal Calorimetry	International Journal of Concrete Structures and Materials	박병선	13	대한민국	Springer	SCI	2019.07.01
33	Effect of cement powder based self-healing solid capsule on the quality	Constructiona nd Building Materials	오성록	214	영국	Elsevier	SCI	2019.07.30
34	Enhanced autogenous healing of ground granulated blast furnace slag blended cements and mortars	Journal of materials research and technology	최영철	8(4)	브라질	Elsevier	SCI	2019.08.01
35	Ruegeria lutea sp. nov., isolated from marine sediment, Masan Bay, South Korea	International journal Systematic and Evolutionary Microbiology	김진수	69(9)	영국	Microbiology society	SCI	2019.09.01
36	Polyimide-Based PolyHIPEs Prepared via Pickering High Internal Phase Emulsions	Polymer	송인호	11(9)	스위스	MDPI	SCI	2019.09.13
37	Low-Cost Cultivation and Sporulation of Alkaliphilic Bacillus sp. Strain AK13 for Self-Healing Concrete	Journal of microbiology and biotechnology	홍민영	29(12)	대한민국	JMB	SCI	2019.10.25

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
38	Complete Genome and Calcium Carbonate Precipitation of Alkaliphilic Bacillus sp. AK13 for Self-Healing Concrete	Journal of microbiology and biotechnology	정윤희	30(0)	대한민국	JMB	SCI	2019.11.01
39	Investigating a new method to assess the self-healing performance of hardened cement pastes containing supplementary cementitious materials and crystalline admixtures	Journal of Materials Research and Technology	박병선	8(6)	브라질	Elsevier	SCI	2019.12.01
40	Algoriphagus aquimaris sp. nov.,isolated from seashore sand	International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology	김진수	2020 (70)	영국	Microbiology society	SCI	2019.12.13
41	Bacillus miscanthi sp. nov.,a alkaliphilic bacterium from the rhizosphere of Miscanthus sacchariflorus	International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology	신보라	2020	영국	Microbiology society	SCI	2020.01.17
42	Autogenous Healing of Early-Age Cracks in Cementitious Materials by Superabsorbent Polymers	Materials	홍근태	13(3)	스위스	MDPI	SCI	2020.02.04

나. 국내 및 국제 학술회의 발표

(1) 국내 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	최영철	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
2	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	최성철	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
3	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	이정우	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
4	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	이광명	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
5	한국콘크리트학회 2016년 봄 학술대회	박병선	2016.05.11	여수 엑스포 컨벤션센터	한국
6	한국콘크리트학회 2016년 봄 학술대회	김지영	2016.05.11	여수 엑스포 컨벤션센터	한국
7	한국콘크리트학회 2016년 봄 학술대회	홍근태	2016.05.11	여수 엑스포 컨벤션센터	한국
8	한국고분자학회 2016 IUPAC-PSK40	김동민	2016.10.07	제주국제컨벤션센터	한국
9	한국구조물진단유지관리공학회 2016년 가을 학술발표회	최연왕	2016.10.13	충남대학교	한국
10	2016 대한토목학회 정기학술대회	안상욱	2016.10.20	제주국제컨벤션센터	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
11	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	박병선	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
12	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	양근혁	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
13	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	윤현섭	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
14	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	정승배	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
15	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	이지수	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
16	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	최연왕	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
17	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	김동민	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
18	한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	박병선	2016.11.03	델피노리조트 (설악)	한국
19	한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	박병선	2016.11.03	델피노리조트 (설악)	한국
20	한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	이지수	2016.11.03	델피노리조트 (설악)	한국
21	한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	이홍재	2016.11.03	델피노리조트 (설악)	한국
22	한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	윤현섭	2016.11.03	델피노리조트 (설악)	한국
23	한국콘크리트학회 2016년 가을 학술대회	최연왕	2016.11.03	델피노리조트 (설악)	한국
24	한국분자세포생물학회2017년 동계학술대회	조미주	2017.01.18	강원도 용평리조트	한국
25	한국건설순환자원학회2017년 봄 학술대회	윤현섭	2017.04.06	상명대학교 천안캠퍼스	한국
26	한국건설순환자원학회 2017년 봄 학술대회	최연왕	2017.04.06	상명대학교 천안캠퍼스	한국
27	한국고분자화학회 2017 추계학술대회	김동민	2017.04.06	대전 국제컨벤션센터	한국
28	한국고분자화학회 2017 추계학술대회	조유진	2017.04.06	대전 국제컨벤션센터	한국
29	한국구조물진단유지관리공학회 2017년 봄 학술대회	최연왕	2017.04.12	동명대학교	한국
30	한국세라믹학회 2017년 추계학술대회	김진응	2017.04.19	군산 새만금컨벤션센터	한국
31	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	박병선	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
32	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	오성우	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
33	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	홍근태	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
34	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	황지순	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
35	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	장인동	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
36	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	윤현섭	2017.05.10	휘닉스 제주 아일랜드	한국
37	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	최연왕	2017.05.10	휘닉스 제주 아일랜드	한국
38	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	김민균	2017.05.12	휘닉스 제주 아일랜드	한국
39	한국구조물진단유지관리공학회 2017년 가을 학술대회	최연왕	2017.09.20	원광대학교	한국
40	대한토목학회 2017년 정기학술대회	최연왕	2017.10.18	부산 BEXCO	한국
41	대한건축학회 추계학술발표대회	윤현섭	2017.10.25	경주 더 케이호텔	한국
42	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	최연왕	2017.11.01	안동 그랜드 호텔	한국
43	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	박병선	2017.11.02	안동 그랜드 호텔	한국
44	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	박병선	2017.11.02	안동 그랜드 호텔	한국
45	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	심예원	2017.11.02	안동 그랜드 호텔	한국
46	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	장인동	2017.11.02	안동 그랜드 호텔	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
47	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	김동현	2017.11.03	안동 그랜드 호텔	한국
48	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	강국희	2017.11.03	안동 그랜드 호텔	한국
49	한국건축시공학회 2017년 추계학술발표대회	정승배	2017.11.10	한국해양대학교	한국
50	한국건설순환자원학회 2017년 가을 학술대회	정승배	2017.11.16	제주 해비치 호텔	한국
51	한국건설순환자원학회 2017년 가을 학술대회	최연왕	2017.11.16	제주 해비치 호텔	한국
52	한국분자세포생물학회 2018년 동계학술대회	한상현	2018.01.18	홍천 비발디파크	한국
53	한국고분자학회 2018 춘계학술대회	배수민	2018.04.06	대전 컨벤션센터	한국
54	한국고분자학회 2018 춘계학술대회	조승빈	2018.04.06	대전 컨벤션센터	한국
55	한국고분자학회 2018 춘계학술대회	김동민	2018.04.05	대전 컨벤션센터	한국
56	한국건설순환자원학회 2018년 봄 학술대회	박병선	2018.04.06	전북대학교 전주캠퍼스	한국
57	한국건설순환자원학회 2018년 봄 학술대회	최연왕	2018.04.06	전북대학교 전주캠퍼스	한국
58	한국세라믹학회 2018년도 춘계학술대회	김진응	2018.04.11	창원 컨벤션센터	한국
59	한국구조물진단유지관리공학회 2018년도 봄 학술발표회	최연왕	2018.04.19	메종글래드 제주	한국
60	제121회 대한화학회 학술발표회	정찬문	2018.04.20	제주국제컨벤션센터	한국
61	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	강국희	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
62	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	김동현	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
63	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	박병선	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
64	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	양영탁	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
65	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	심예원	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
66	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	윤현섭	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
67	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	최연왕	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
68	한국고분자학회 2018 추계학술대회	이서린	2018.10.12	경주 화백컨벤션센터	한국
69	한국고분자학회 2018 추계학술대회	조승빈	2018.10.12	경주 화백컨벤션센터	한국
70	한국고분자학회 2018 추계학술대회	김동민	2018.10.12	경주 화백컨벤션센터	한국
71	한국고분자학회 2018 추계학술대회	송인호	2018.10.12	경주 화백컨벤션센터	한국
72	2018년도 대한토목학회 학술대회	최연왕	2018.10.18	경주 화백컨벤션센터	한국
73	2018 한국화학공학회 추계학술대회	이서린	2018.10.25	대구 EXPO	한국
74	2018 한국화학공학회 추계학술대회	조승빈	2018.10.26	대구 EXPO	한국
75	2018 한국공업화학회 추계학술대회	이서린	2018.10.31	제주국제컨벤션센터	한국
76	한국건설순환자원학회 2018년 가을 학술대회	박병선	2018.11.02	한양대학교 에리카캠퍼스	한국
77	한국건설순환자원학회 2018년 가을 학술대회	심예원	2018.11.02	한양대학교 에리카캠퍼스	한국
78	한국건설순환자원학회 2018년 가을 학술대회	윤현섭	2018.11.02	한양대학교 에리카캠퍼스	한국
79	한국건설순환자원학회 2018년 가을 학술대회	최연왕	2018.11.02	한양대학교 에리카캠퍼스	한국
80	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	박병선	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
81	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	이승헌	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
82	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	홍근태	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
83	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	장인동	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
84	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	윤현섭	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
85	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	최연왕	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
86	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	김동민	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
87	2018 한국세라믹학회 추계학술대회	김진응	2018.11.14	코엑스	한국
88	한국건설순환자원학회 2019년 봄 학술대회	최연왕	2019.04.03	오크밸리 리조트	한국
89	한국건설순환자원학회 2019년 봄 학술대회	방지원	2019.04.03	오크밸리 리조트	한국
90	한국고분자학회 2019 춘계 학술대회	이서린	2019.04.10	부산컨벤션센터	한국
91	한국고분자학회 2019 춘계 학술대회	조윤호	2019.04.10	부산컨벤션센터	한국
92	한국고분자학회 2019 춘계 학술대회	김동민	2019.04.10	부산컨벤션센터	한국
93	한국고분자학회 2019 춘계 학술대회	송인호	2019.04.10	부산컨벤션센터	한국
94	한국세라믹학회 2019 춘계학술대회	김진웅	2019.04.11	제주 라마다 프라자 호텔	한국
95	한국구조물진단유지관리공학회 2019년도 가을 학술발표회	최연왕	2019.04.11	라카이 샌드파인 (강릉)	한국
96	한국공업화학회 019 춘계학술대회	조승빈	2019.05.01	부산 벡스코	한국
97	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	이원준	2019.05.08	제주신화월드	한국
98	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	임귀환	2019.05.08	제주신화월드	한국
99	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	홍근태	2019.05.08	제주신화월드	한국
100	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	손다솜	2019.05.08	제주신화월드	한국
101	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	장인동	2019.05.08	제주신화월드	한국
102	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	윤현섭	2019.05.08	제주신화월드	한국
103	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	최연왕	2019.05.08	제주신화월드	한국
104	한국고분자학회2019 추계학술대회	이서린	2019.10.09	제주국제컨벤션센터	한국
105	한국고분자학회2019 추계학술대회	조승빈	2019.10.09	제주국제컨벤션센터	한국
106	한국고분자학회2019 추계학술대회	조윤호	2019.10.09	제주국제컨벤션센터	한국
107	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	윤현섭	2019.11.06	변산대명리조트	한국
108	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	오성록	2019.11.07	변산대명리조트	한국
109	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	윈홍휘	2019.11.07	변산대명리조트	한국
110	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	박병선	2019.11.08	변산대명리조트	한국
111	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	홍근태	2019.11.08	변산대명리조트	한국
112	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	손다솜	2019.11.08	변산대명리조트	한국
113	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	장인동	2019.11.08	변산대명리조트	한국
114	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	최연왕	2019.11.08	변산대명리조트	한국
115	한국건설순환자원학회 2019 가을 학술대회	최연왕	2019.11.22	제주 해비치 호텔&리조트	한국

(2) 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM 16 / Structures16)	안상욱	2016.08.28	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
2	2016 The 8th Asian Symposium on Microbial Ecology	김현정	2016.09.30	National Taiwan University (타이페이)	대만
3	The 7th International Conference of Asia Concrete Federation (ACF 2016)	홍근태	2016.11.01	JW Marriott Hotel (하노이)	베트남
4	The 7th International Conference of Asia Concrete Federation (ACF 2016)	오성우	2016.11.01	JW Marriott Hotel (하노이)	베트남
5	The 7th International Conference of Asia Concrete Federation (ACF 2016)	송치원	2016.11.02	JW Marriott Hotel (하노이)	베트남
6	2016 International Meeting of the Federation of Korean Microbiological Societies	김현정	2016.11.03	Kintex (일산)	한국
7	HealCON Conference 2016	박병선	2016.11.28	TU Delft (델프트)	네덜란드
8	HealCON Conference 2016	최성철	2016.11.28	TU Delft 델프트)	네덜란드
9	2017 International Meeting of the Microbiological Society of Korea	이윤석	2017.04.26	BEXCO (부산)	한국
10	2017 International Symposium and Annual Meeting of the KSABC	한상현	2017.06.14	해운대 그랜드 호텔 (부산)	한국
11	6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017)	이윤석	2017.06.26	Graf-Zeppelin-Haus (프리드리히스하펜)	독일
12	6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017)	김동민	2017.06.26	Graf-Zeppelin-Haus (프리드리히스하펜)	독일
13	6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017)	최성철	2017.06.28	Graf-Zeppelin-Haus (프리드리히스하펜)	독일
14	FEMS MIcrobiology Congress 2017	이상섭	2017.07.11	Feria Valencia (발렌시아)	스페인
15	FEMS MIcrobiology Congress 2017	이윤석	2017.07.12	Feria Valencia (발렌시아)	스페인
16	The 6th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum	최연왕	2017.08.22	한양대학교 (서울)	한국
17	IUPAC-FAPS 2017 Polymer Congress	김동민	2017.10.11	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
18	Polymer: Design, Function and Application (Polymer-2018)	김동민	2018.03.21	University of Barcelona (바로셀로나)	스페인
19	International Meeting of the Microbiological Society of korea (MSK2018)	이윤석	2018.04.25	알펜시아리조트 (평창)	한국
20	ASM Microbe 2018 (American Society for Microbiology)	박예운	2018.06.10	Georgia World Congress Center (애틀란타)	미국
21	2018 International Symposium and Annual Meeting of the KSABC	한상현	2018.06.19	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
22	Asian Crystalllization Technology Symposium 2018 (ACTS-2018)	김형주	2018.06.21	Matrix (바이오폴리스)	싱가포르
23	Asian Crystalllization Technology Symposium 2018 (ACTS-2018)	조승빈	2018.06.21	Matrix (바이오폴리스)	싱가포르
24	45th Annual meeting & international Symposium The Korean Society for microbiology&biotechnology	이윤석	2018.06.27	여수엑스포컨벤션센터 (여수)	대한민국
25	10th Asian Symposium on Microbial Ecology	이윤석	2018.07.11	Okinawa Convention Center (오키나와)	일본
26	17th International Symposium on Microbial Ecology	이윤석	2018.08.12	Congress Center Leipzig	독일
27	13th International Workshop on Crystal Growth of Organic Materials (CGOM13)	조승빈	2018.08.28	고려대학교 (서울)	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
28	13th International Workshop on Crystal Growth of Organic Materials (CGOM13)	조승빈	2018.08.28	고려대학교 (서울)	한국
29	The 4th International Conference on Service Life Design for Infrastructures (SLD4)	장인동	2018.08.29	Lijm & Cultuur (델프트)	네덜란드
30	The 8th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2018)	오성록	2018.11.05	Crowne-plaza Fuzhou Riverside (푸저우)	중국
31	International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019)	박병선	2019.03.22	Hotel Lone (로빈)	크로아티아
32	International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019)	최성철	2019.03.22	Hotel Lone (로빈)	크로아티아
33	2019 International Meeting of the Microbiological Society of Korea	류영웅	2019.04.17	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
34	2019 8th International Conference on Advanced Materials and Engineering Maherials (8th ICAMEM 2019)	윤현섭	2019.04.18	Regal Oriental Hotel	홍콩
35	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	홍근태	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
36	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	이윤석	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
37	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	정윤희	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
38	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	김동민	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
39	46th Annual Meeting & International Symposium (2019 KMB)	김원재	2019.06.23	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
40	46th Annual Meeting & International Symposium (2019 KMB)	홍민영	2019.06.23	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
41	8th Congress of European Microbiologists (FEMS 2019)	류영웅	2019.07.07	Glasgow (스코트랜드)	영국
42	8th Congress of European Microbiologists (FEMS 2019)	박철우	2019.07.07	Glasgow (스코트랜드)	영국
43	The 9th International Conference on Separation Science and Technology	이서린	2019.07.09	Tianyu Gloria Grand Hotel (시안)	중국
44	The 9th International Conference on Separation Science and Technology	조윤호	2019.07.09	Tianyu Gloria Grand Hotel (시안)	중국
45	BEI-2019 (Bridge Engineering Institute Conference)	박병선	2019.07.22	Hyatt Regency Waikiki Beach Resort (하와이)	미국
46	22nd International Conference on Comosite Materials	김동민	2019.08.13	Melbourne Convention and Exhibition Centre (멜버른)	호주
47	AMERICAN CHEMICAL SOCIETY FALL 2019 NATIONAL MEETING&EXPO	이서린	2019.08.25	San Diego Convention Center (샌디에이고)	미국

다. 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생물자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도
1	Lysinibacillus sp. YS11	KACC 19227	국립농업과학원	2017
2	Rhodobacter blasticus	KACC 92179P	국립농업과학원	2017
3	Rhodopseudomonas palustris 14	KACC 92180P	국립농업과학원	2017

라. 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	침상형 결정구조를 갖는 유무기 융합 자기치유 혼화재 조성물 및 이를 포함하는 시멘트 결합재 조성물	대한민국	㈜인트켐	2016.02.26	10-2016-0023279	-	㈜인트켐	2016.11.30	10-1683090	-	100
2	자기치유 생성물질의 분석을 통한 시멘트계 재료의 자기치유 개선방법	대한민국	KCL, 성균관대학교산학협력단	2016.03.07	10-2016-0027184	-	-	-	-	-	100
3	시멘트 페이스트의 자기치유 성능을 평가하는 방법	대한민국	KCL, 성균관대학교산학협력단	2016.03.07	10-2016-0027187	-	KCL, 성균관대학교산학협력단	2017.05.23	10-1741137	-	100
4	3D X-선 CT를 활용한 시멘트계 재료 내 고흡수율 폴리머의 거동 및 정량화를 위한 분석 방법	대한민국	중앙대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.03.07	10-2016-0027179	-	중앙대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.05.23	10-1741135	-	100
5	시멘트 균열 치유를 위한 pH 응답형 팽창 특성 제어 가능한 고흡수율 폴리머 및 이의 제조방법	대한민국	중앙대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.03.07	10-2016-0027182	-	중앙대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.05.23	10-1741136	-	100
6	콘크리트에 미생물 투입 시 미생물 생장환경 조성을 위한 미생물 흡착 방법	대한민국	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.06.29	10-2016-0081993	-	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.05.11	10-1859211	-	100
7	박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발	대한민국	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.06.29	10-2016-0081956	-	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.09.13	10-1779935	-	100

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
8	유기계 자기치유 혼화재의 제조 방법과 그 유기계 자기치유 혼화재를 이용한 조기발현형 유무기 융합 자기치유 혼화재 조성물, 그리고 그 유무기 융합 자기치유 혼화재를 포함하는 자기치유 시멘트 결합재 조성물	대한민국	㈜인트켐	2016.11.29	10-2016-0160136	-	㈜인트켐	2018.03.26	10-1843816	-	100
9	Development of concrete protect coating materials based bacteria slime	PCT	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.12.16	KR2016/014707	-	-	-	-	-	100
10	시멘트 복합재료에 혼합이 가능한 자기치유 고상캡슐 제조방법 및 이에 의해 제조되는 고상캡슐	대한민국	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.12.26	10-2016-0178856	-	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.07.20	10-1761608	-	100
11	무기질재료를 포함하는 자기치유 액상캡슐	대한민국	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.12.26	10-2016-0178857	-	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.07.20	10-1761609	-	100
12	박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발	일본	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.12.27	2016-254102	-	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.07.06	P6361053	-	100
13	시멘트 복합체의 자기치유 성능 평가 방법	대한민국	KCL, 성균관대학교산학협력단	2017.01.02	10-2017-0000101	-	-	-	-	-	100
14	STS 전기로 환원슬래그를 이용한 자기치유 콘크리트용 잔골재, 그의 제조방법 및 그를 이용한 자기치유 콘크리트	대한민국	KCL, 성균관대학교산학협력단	2017.01.02	10-2017-0000100	-	KCL,성균관대학교산학협력단	2018.05.28	10-1863964	-	100
15	실란올 말단기 함유 폴리디메틸 실록산을 포함하는 마이크로 캡슐형 자기치유 코팅액	대한민국	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2017.01.11	10-2017-0004178	-	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2019.02.18	10-1951471	-	100
16	박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발	중국	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.05.18	PW70578	-	-	-	-	-	100
17	폴리이미드 입자를 이용한 피커링 에멀젼 조성물 및 이의 제조 방법	대한민국	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2017.06.19	10-2017-0077212	-	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2019.05.17	10-1981853	-	100

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
18	라이시니 바실러스 속 YS11 균주 및 이의 용도	대한민국	고려대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.06.21	10-2017-0078441	-	고려대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2019.08.05	10-2009194	-	100
19	폴리이미드 입자를 이용한 피커링 에멀젼 조성물 및 이의 제조 방법	PCT	연세대학교원주산학협력단,성균관대학교산학협력단	2017.11.10	PCT/KR2017/012738	-	-	-	-	-	100
20	세포외 다당류가 증가된 균주 및 이의 배양 방법	대한민국	경기대학교산학력단,성균관대학교산학협력단	2017.11.16	10-2017-0153310	-	경기대학교산학력단,성균관대학교산학협력단	2020.01.23	10-2071861	-	100
21	표면 개질된 실리콘을 포함하는 시멘트 복합재료용 균열 자기치유 캡슐 및 그 제조방법	대한민국	세명대학교산학협력단,성균관대교산학협력단	2017.11.21	10-2017-0155451	-	-	-	-	-	100
22	STS 전기로 환원슬래그를 이용한 자기치유 콘크리트용 잔골재, 그의 제조방법 및 그를 이용한 자기치유 콘크리트	PCT	KCL	2017.11.23	PCT/KR2017/013325	-	-	-	-	-	100
23	미생물을 포함하는 친환경 마그네시아-인산염 복합체 기포 콘크리트 조성물	대한민국	경기대학교,성균관대학교산학협력단	2017.11.23	10-2017-0157548	-	경기대학교,성균관대학교산학협력단	2019.04.22	10-1972803	-	100
24	결정성장 촉진형 하이브리드 자기치유 혼화재의 제조방법과 그 자기치유 혼화재를 이용한 시멘트 결합재 조성물	대한민국	㈜인트켐	2017.11.27	10-2017-0159437	-	㈜인트켐	2019.04.01	10-1966101	-	100
25	무기계 광물질이 함유된 자기치유 콘크리트	대한민국	한국건설생활환경시험연구원,성균관대학교산학협련단	2017.12.05	10-2017-0166003	-	-	-	-	-	100
26	콘크리트 구조체 균열 보수를 위한 미생물 보수액 주입 방법	대한민국	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.03.29	10-2018-0036435	-	-	-	-	-	100
27	콘크리트 구조체 균열 보수를 위한 미생물 보수액 주입 방법	PCT	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.03.30	KR2018/003794	-	-	-	-	-	100
28	라이시니바실러스 보로니톨러란스 YS11 균주 및 바실러스 속 AK13균주의 혼합배양을 통한 탄산칼슘 생성 및 이의 용도	대한민국	고려대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.04.18	10-2018-0045064	-	-	-	-	-	100

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
29	콘크리트용 자기치유 골재 제조방법 및 이에 의해 제조되는 자기치유 골재	대한민국	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.07.26	10-2018-0087306	-	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2019.03.08	10-1958444	-	100
30	표면 개질된 실리콘을 포함하는 시멘트 보합재료용 균열 자기치유 캡슐 및 그 제조방법	대한민국	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.08.23	10-2018-0098279	-	-	-	-	-	100
31	자기 치유가 촉진된 콘크리트	대한민국	고려대학교산학협력단	2018.10.31	10-2018-0131971	-	-	-	-	-	100
32	包含表面改性硅的水泥复合材料用裂缝白修复胶囊及其制造方法	중국	세명대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.11.12	2018113376891	-	-	-	-	-	100
33	급속 균열 셀프실링 특성을 가진 양이온성 고흡수율 폴리머를 포함한 자기치유 개선용 시멘트 결합재 조성물 및 양이온성 고흡수율 폴리머의 제조방법	대한민국	중앙대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.11.14	10-2018-0140190	-	-	-	-	-	100
34	박테리아를 이용한 콘크리트 자기치유 코팅 담체 및 이의 제조 방법	대한민국	고려대학교산학협력단	2018.11.16	10-2018-0141902	-	-	-	-	-	100
35	무기계 자기치유 소재를 배합한 자기치유 콘크리트	대한민국	(재)한국건설생활환경시험연구원, 성균관대학교산학협력단	2018.11.20	10-2018-0143990	-	-	-	-	-	100
36	Pickering emulsion composition using polyimide particles and preparation method thereof	미국	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교 산학협력단	2018.11.29	16/305713	-	-	-	-	-	100
37	이차 손상 방지 기능을 가진 자기치유 보호 코팅재	대한민국	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2018.11.30	10-2018-0151861	-	-	-	-	-	100
38	유무기 하이브리드 자기치유 구체방수재의 제조 방법 및 그 자기치유 구체방수제를 이용한 구체방수제용 시멘트 결합재 조성물	대한민국	성균관대학교산학협력단,㈜인트켐	2018.12.05	10-2018-0155442	-	-	-	-	-	100
39	글라이코 캘릭스가 증가된 균주의 배양 방법	대한민국	경기대학교산학협력단	2018.12.19	10-2018-0165567	-	-	-	-	-	100

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
40	박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발	베트남	경기대학교산학협력단;성균관대학교산학협력단	2019.07.12	1-19-03777	-	-	-	-	-	100
41	고내상 에멀전을 이용한 다공성 폴리이미드의 제조방법	대한민국	연세대학교원주산학협력단, 성균관대학교산학협력단	2019.08.30	10-2019-0107360	-	-	-	-	-	100
42	미생물 콘크리트 기술에서 미생물 음압 고정화 기술	대한민국	경기대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2019.10.29	10-2019-013584	-	-	-	-	-	100
43	박테리아 기반 생태학적 열화 콘크리트 단면보수 공법	대한민국	경기대학교산학협력단;,성균관대학교산학협력단	2019.10.29	10-2019-0135269	-	-	-	-	-	100
44	콘크리트 자기치유 성능을 향상시킬 수 있는 미생물 고정을 위한 코팅 담체 및 이의 제조방법	대한민국	고려대학교산학협력단	2019.11.15	10-2019-0147011	-	-	-	-	-	100
45	글라이코 캘릭스 형성 박테리아를 포함하는 콘크리트 코팅 조성물 및 이를 이용하는 형성된 콘크리트 구조체	대한민국	경기대학교산학협력단	2020.01.06	10-2020-0001289	-	-	-	-	-	50
46	자기치유 조성물 및 그 코팅방법	대한민국	한국건설생활환경시험연구원,성균관대학교산학협력단	2020.01.31	10-2020-0011888	-	-	-	-	-	100
47	열수축성을 가지는 형상기억 고분자 섬유 번들 조립체 및 그를 활용한 자기치유형 콘크리트 급속 보수 시스템	대한민국	-	-	-	-	KCL	2019.06.12	10-1990295	-	100

* 연구개발성과 관리・유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

마. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	시멘트 클링커 및 고로슬래그 미분말의 미반응량 정량 평가 프로그램	2017.11.06	한국건설생활환경시험연구원	2017.11.20	C-2017-029065	한국건설생활환경시험연구원	100
2	스마트 폴리머 급속 균열 자기치유 성능 예측 프로그램	2019.12.10	중앙대학교산학협력단	2019.12.17	C-2019-041081	중앙대학교산학협력단	100
3	콘크리트의 자기치유생성물 산정 프로그램	2019.12.24	한국건설생활환경시험연구원	2020.01.07	C-2020-001645	한국건설생활환경시험연구원	100

바. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 년도	현 황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	-	2016	-	2	-	-	2	-	1	-	-	1	-
2	-	2017	1	11	-	-	5	7	6	1	-	1	4
3	-	2018	-	8	-	-	6	2	5	2	-	1	-
4	-	2019	4	13	-	-	9	8	10	-	1	5	1
5	-	2020	2	2	-	-	3	1	2	1	-	1	-

사. 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	“박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 현장 배합” 관련 노하우 기술	홍익산업개발(주)	2019.03.15	55,000천원	55,000천원

아. 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치 장소	이용분야
1	유무기 하이브리드 자기치유 혼화재 시제품	2018.11.05	㈜인트켐	㈜인트켐	구조물 보수 보강
2	자기치유 보호코팅재	2019.03.25	연세대학교 원주산학협력단, 삼중씨엠텍	연세대학교 원주산학협력단	구조물 보수 보강
3	HERB-CON	2019.09.27	경기대학교 산학협력단, ㈜콘스타	콘스타	구조물 보수 보강
4	Healing+	2019.09.27	경기대학교 산학협력단, 한국미생물은행	경기대학교 산학협력단	구조물 보수 보강
5	자기치유 고상캡슐	2019.12.30	세명대학교 산학협력단	세명대학교 산학협력단	구조물 보수 보강
6	캡슐 활용 보수 모르타르	2019.12.30	세명대학교 산학협력단	㈜에이치비티	구조물 보수 보강

자. 현장 시험 및 검증

번호	현장시험/검증명	시험/검증기간	제작업체명	시험/검증장소	이용분야
1	서울시 선유서로 하수암거 보수공사	2019.10.02.~ 2019.12.09	홍익산업개발(주)	서울시 영등포구 선유서로 34길 17주변 하수암거	보수·보강

차. 보고서 원문

번호	보고서 구분	발간일	등록번호
1	무기혼합재 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-1
2	스마트 폴리머 활용 자기치유 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-2
3	자기치유 생성물 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-8
4	스마트 폴리머 성능 평가 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-9
5	유무기 결정생성물 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-10
6	자기치유 반응 메커니즘 분석 보고서	2017.01.06	SHGC-2017-1
7	유무기 하이브리드 소재에 의한 미세구조 및 치유형상 분석 보고서	2017.01.06	SHGC-2017-2
8	Non-ureolytic 환경에서의 생체광물형성 메커니즘 분석 보고서	2017.01.06	SHGC-2017-3
9	영양소 및 생체광물형성 박테리아 혼입 모르타르 물성 분석 보고서	2017.01.06	SHGC-2017-4
10	무기 혼합재 자기치유 반응 모델 분석보고서	2017.11.27	SHGC-2017-8
11	하이브리드 자기치유 소재 활용 시멘트 복합체 물성 평가 보고서	2017.11.27	SHGC-2017-9
12	포자 혼입에 따른 모르타르 성능 평가 보고서	2017.11.27	SHGC-2017-10
13	하이브리드 소재 활용 자기치유 콘크리트 Mock-up 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-1
14	모르타르 내 박테리아 생존율 평가 기법 및 치유생성물 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-2
15	고상캡슐 활용 자기치유 시멘트 복합재료 Mock-up 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-3
16	현장시험시공 보고서	2020.02.13	SHGC-2020-1
17	탄산칼슘 석출능 및 치유성능 정량화 분석보고서	2020.02.13	SHGC-2020-2

카. 표준 채택

번호	수행기관명	표준명	표준 번호	채택 기관	제정 구분	제정일
1	경기대학교 산학협력단	콘크리트의 압축 크리프 시험 방법	KS F 2453	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.08.12
2	경기대학교 산학협력단	콘크리트용 팽창재	KS F 2562	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.11.19
3	경기대학교 산학협력단	주입모르터의 컨시스턴시 시험 방법	KS F2 432	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
4	경기대학교 산학협력단	콘크리트용 팽창재	KS F 2562	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
5	경기대학교 산학협력단	콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법	KS F 2596	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
6	경기대학교 산학협력단	콘크리트용 화학혼화제	KS F 2560	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
7	경기대학교 산학협력단	주입모르터의 컨시스턴시 시험 방법	KS F 2432	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
8	경기대학교 산학협력단	폴리머 시멘트 모르타르의 시험방법	KS F 2476	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31

타. 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	언론보도	YTN Science	YTN Science 기발한 실험실 – 자기치유 기술 프로그램 출연을 통한 홍보	2016.04.12
2	언론보도	동아일보 IT/과학	[자기치유물질의 잇단 개발]에 관한 기사 소개 (세균을 이용한 콘크리트 균열 복구에 관한 인터뷰)	2016.11.11
3	행사개최	2017 서울경향하우징페어	박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 개발 연구내용 홍보	2017.06.29
4	언론매체	Monthly people 월간인물	반복적으로 치유가 가능한 자기치유 물질의 개발 및 마이크로캡슐형 자기치유 보호코팅재 개발 소개 기사	2017.12.01
5	기타	한국구조물진단유지관리공학회	생태학적 단면 보수 공법(HERB-CON) 기술 전시	2019.10.09
6	기타	2019 서울경향하우징 페어	‘박테리아 슬라임 기반 콘크티르 보호 코팅재 개발’ 연구 내용 전시	2019.11.07
7	언론매체	건설기술 신문	‘무기계 혼합재료 활용 최적 콘크리트 배합기술 만들다’ 연구 소개 및 연구자 인터뷰 기사	2019.11.28

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	무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 매커니즘 및 모델링 기술	A-1	무기혼합재 자기치유 생성물 분석 기술	①	자기치유 생성물 분석 기술 수준 향상	무기혼합재 문헌보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	KCL
						자기치유 생성물 분석보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	
D	콘크리트 pH 응답형 스마트 폴리머 제조 기술	D-1	스마트 폴리머 기초 기술 평가	①	스마트 폴리머 기초 기술 수준 향상	스마트 폴리머 활용 자기치유 문헌보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	중앙대학교
						스마트 폴리머 성능 평가 분석보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	
F	유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술	F-1	유무기 소재 기초물성 분석 및 이온화 처리기술	①	유무기 소재 기초 기술 수준 향상	유무기 결정 생성물 분석보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	㈜인트켐
						치유생성물 칼슘이온 함량	15% 이상	48.9%	공인 시험 성적서	

(2) 2차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 메커니즘 및 모델링 기술	A-1	무기 혼합재 자기치유 생성물 분석 기술	①	자기치유 반응 예측 기술 확보	자기치유 반응 매커니즘 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	KCL
B	무기혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술	B-1	균열 자기치유 성능 향상 무기 혼합재 기술	①	무기혼합재 활용 자기치유 성능 향상	14일 이내 자기치유 균열폭 (RILEM TC 221)	0.20mm	0.23mm	자체 평가	KCL
D	콘크리트 pH 응답형 스마트 폴리머 확보 기술	D-2	자기응답형 스마트 폴리머 확보 기술	①	스마트 폴리머 자기응답 성능 향상	스마트 폴리머 부피 팽창 비율 [Vswollen/Vdry]	40 이상 (≥pH 12) 30 이상 (≤pH 3)	98 (≥pH 12) 31.5 (≤pH 3)	자체 평가	중앙대학교
						스마트 폴리머 흡수율 [(Wswollen-Wdry)/Wdry]	50g/g 이상	78g/g	자체 평가	
		D-3	급속 자기치유 모르타르 배합 기술	①	스마트 폴리머 활용 자기치유 성능 향상	48시간 투수감소율 [(Ri-R48)/Ri×100]	40% 이상	50% 이상	자체 평가	중앙대학교
				②	스마트 폴리머 활용 모르타르 배합 기술 수준 향상	28일 압축강도 손실률 [(Sref-Ssap)/Sref×100] (ASTM C 109)	25% 이하	20.2%	공인 시험 성적서	

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
F	유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술	F-2	유무기 소재 메커니즘 규명 및 반응제어 처리기술	①	유무기소재 반응 예측 기술 확보	소재에 의한 미세구조 및 치유형상 분석 보고서 작성여부	1건	1건	자체 평가	㈜ 인트켐
				②	유무기소재 반응성 향상	소재 분말도	2,500㎠/g 이상	2,618 ㎠/g	공인 시험 성적서	
H	자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술	H-1	생체광물형성 박테리아 선정	①	생체광물형성 박테리아 선정 기술 확보	고염 환경(5% NaCl) 에서의 생존율 [SNaCl/Sref×100] (Optical Density)	20% 이상	100%	자체 평가	고려 대학교
						알칼리 환경(pH 8)에서의 생존율 [SpH8/Sref×100] (Optical Density)	20% 이상	100%	자체 평가	
						Non-ureolytic 환경에서의 생체광물형성 메커니즘 분석 보고서 작성여부	1건	1건	자체 평가	
I	담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술	I-1	담체화 된 박테리아의 생존율 향상 기술	①	박테리아 및 포자의 담체화 안정성 향상	30일 이후 생존율 [Scarrier/Sref×100] (Urease Activity)	2%	90% 이상	자체 평가	고려 대학교
J	박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술	J-1	박테리아 활용 모르타르 제조 기술	①	박테리아 혼입 모르타르 제조 기술 확보	영양소 및 생균 혼입에 따른 모르타르 물성 평가 분석 보고서 작성여부	1건	1건	자체 평가	고려 대학교
K	글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 흡착 기술	K-1	박테리아의 분리 증식 기술	①	박테리아 분리 기술 수준 향상	원심분리법에 의한 슬라임 형성 양	0.5 g/L 이상	1.4 g/L	자체 평가	경기 대학교
		K-2	자가영양 박테리아 흡착 기술	①	박테리아 흡착 기술 수준 향상	Hemo-Cytometer에 의한 박테리아 개체 수 평가	10^5cell/ml 이상	9×10^8 cell/ml	자체 평가	
N	시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기술	N-1	캡슐 코어 제조 기술	①	자기치유 코어 조성물 확보	흡수 저항 계수비 [코어 적용 시편 / Plain] (KS F 4930)	0.5 이하	0.5 이하	자체 평가	세명 대학교
						투수 저항 계수비 [코어 적용 시편 / Plain] (KS F 4930)	0.1 이하	0.1 이하	자체 평가	
						부착강도 [Tmax/A] (KS F 4936)	2MPa 이상	2MPa 이상	자체 평가	
						자기치유 균열 폭	0.3 mm	0.3 mm	자체 평가	
		N-2	캡슐 막 제조 기술	①	캡슐 막 강도 및 안정성 확보	교반 이후 캡슐 손실률 [(Wbefore-Wafter)/Wbefore ×100] (씻기시험)	10% 이내	10% 이내	자체 평가	
O	캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능제어 기술	O-1	시멘트 복합재료 제조 기술	①	캡슐 분산 성능 확보	캡슐의 분산성 계수 $[a_f=\exp\left[-\sqrt{\frac{\sum_1^n(x_i-1)^2}{n}}\right]]$	0.5 이상	0.5 이상	자체 평가	세명 대학교
P	자기치유 코팅재의 치유물질 선정 및 캡슐화 기술	P-1	치유물질의 선정	①	균열치유에 적합한 치유물질 확보	점탄성 물질로 전환 가능한 치유물질의 종류(치유 반응 생성물의 G', G" 확인)	5종 이상	5종	자체 평가	연세 대학교
				②	외부 환경 대응 반응성 확보	암소 반응 가능 여부 (FT-IR에 의한 반응 전환률 측정)	70% 이상	80~90%	자체 평가	
						-20~35℃ 반응 가능 여부 (FT-IR에 의한 반응 전환률 측정)	70% 이상	80~90%	자체 평가	

(3) 3차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 메커니즘 및 모델링 기술	A-2	무기 혼합재 자기치유 반응 메커니즘 및 모델링 기술	②	자기치유 반응 예측 기술 확보	자기치유 반응 모델 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	KCL
B	무기혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술	B-1	균열 자기치유 성능 향상 무기 혼합재 기술	①	무기혼합재 활용 자기치유 성능 향상	14일 이내 자기치유 균열폭 (RILEM TC 221)	0.3mm	0.305mm	자체 평가	KCL
						균열 충진률 (CT, SEM image analysis)	30%	32.5%	자체 평가	
						내구성 회복률 (염소이온 침투 시험)	55%	59%	자체 평가	
D	콘크리트 pH 응답형 스마트 폴리머 확보 기술	D-4	급속 자기치유 콘크리트 배합 기술	①	스마트 폴리머 활용 급속 자기치유 성능 향상	48시간 투수감소율 [(Ri-R48)/Ri)×100]	40% 이상	70% 이상	자체 평가	중앙 대학교
				②	스마트 폴리머 활용 콘크리트 배합 기술 수준 향상	28일 압축강도 손실률 [(Sref-Ssap)/Sref)×100] (ASTM C 109)	25% 이하	12% 이하	공인 시험 성적서	
E	장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술	E-1	자기치유 성능향상 기술	①	스마트 폴리머 활용 자기치유 성능 향상	자기치유 균열폭	0.2mm (Rwf=0)	≤0.3mm (Rwf=0)	자체 평가	중앙 대학교
						28일 균열 충진률 [(Vi-V28)/Vi)×100]	35%	37.6%	자체 평가	
F	유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술	F-3	유무기 소재 제조기반 기술 확보	①	하이브리드 소재 조성물 확보	무기계 대비 치유 기간 단축 [투수감소율 80%]	14일 이내	14일	자체 평가	㈜ 인트켐
				②	하이브리드 소재 사용 시멘트 복합체 품질 확보	물성평가 분석 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	
H	자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술	H-2	박테리아 혼합/대량 배양기술	①	박테리아 혼합 배양기술 수준 향상	단일 종 대비 생존율 (Optical Density, CFU)	0.5 이상	0.88	자체 평가	고려 대학교
				②	혼합 배양 안정성 향상	단일 종 대비 생존율 (live/deadTM cell staining)	10% 이상	43%	자체 평가	
H	자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술	H-2	박테리아 혼합/대량 배양기술	③	개별 배양 대비 생체광물 형성 수준 향상	단일종 대비 생체광물 생성량 향상도 [(Rmix-Rind.)/Rind.×100] (Freeze dry,centrifuge)	2% 이상	5%	자체 평가	고려 대학교
				④	대량 배양 배지 조성 및 박테리아 분리 기법 확보	기존 대비 대량 배양 비용 감축률	20% 이상	92%	자체 평가	
I	담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술	I-2	박테리아 담체고정 조건 최적화 기술	①	담체 및 보조제 조합 최적화 조건 확립	기존 박테리아 대비 urease와 carbonatogenesis 활성도 (Ureolytic activity, carbonatogenesis activity)	30% 이상	99.07%	자체 평가	고려 대학교

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
J	박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술	J-1	박테리아 활용 모르타르 제조 기술	①	박테리아 혼입 모르타르 제조 기술 확보	포자 혼입에 따른 모르타르 성능 평가 분석 보고서 작성여부	1건	1건	자체 평가	고려 대학교
				②	담체화된 박테리아 혼입 모르타르 제조 기술 확보	기본 담체 혼입 모르타르의 압축강도 손실률 [(Sref-S)/SrefX100] (KS F 2405)	10% 이하	7.1%	공인 시험 성적서	
K	글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 흡착 기술	K-1	박테리아의 분리 증식 기술	②	슬라임 형성 최적 환경 조건 확립	황산 침식 후 박테리아 기반의 코팅재만의 압축강도 감소율 [(fc.무침지-fc.침지) /fc.무침지×100] (JSTM C 7401)	5% 이하	3.5%	공인 시험 성적서	경기 대학교
L	생체 모방형 코팅재 구성 요소 기술	L-1	pH 8~10 수준의 결합재 개발	①	저알칼리 결합재 제조 기술 확보	결합재의 pH (KS F 2103)	8~10	8.86	공인 시험 성적서	경기 대학교
						28일 압축강도 (KS F 2405)	35MPa 이상	57.6MPa	공인 시험 성적서	
		L-2	박테리아 흡착제 기반의 코팅재 배합설계	①	코팅재의 내황산성능 향상	코팅재 자체에서 28일 황산부식에 의한 질량변화 감소율 [(m무침지-m침지) /m무침지×100] (JSTM C 7401)	10% 이하	9.5%	공인 시험 성적서	
N	시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기술	N-1	캡슐 코어 제조 기술	②	자기치유 코어 성능 향상	코어물질의 자기치유 균열 폭	0.5mm	0.5mm	자체 평가	
O	캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능제어 기술	O-1	시멘트 복합재료 제조 기술	②	시멘트 복합재료의 제조 기술 확보	28일 압축강도 손실율 [(Sref-Ssh)/Sref)×100] (KS F 5105)	20% 이내	12.8%	공인 시험 성적서	세명 대학교
		O-2	자기치유 성능 제어 기술	①	자기치유 균열 회복성능 향상 (0.3mm 균열폭 대응)	균열 회복 속도 (투수시험)	14일 이내	14일	자체 평가	
						염소이온침투 저감율 [(Hbefore-Hafter/ Hbefore×100] (NT Build 492)	40% 이상	45%	자체 평가	
						흡수량 저감율 [(Hbefore-Hafter)/Hbefore×100] (KS F 4930)	40% 이상	80%	자체 평가	
P	자기치유 코팅재의 치유물질 선정 및 캡슐화 기술	P-2	캡슐화 기술 및 캡슐특성 조절 기술	①	캡슐의 최적화 기술 확보	캡슐의 평균 직경 (광학현미경, 300개이상 측정)	100~ 200㎛	66~240 ㎛	자체 평가	연세 대학교
						합성된 캡슐의 수율 측정 [W실험/W이론×100]	80% 이상	90% 이상	자체 평가	
						캡슐막의 두께 측정 (SEM)	50~ 200㎚	11~189 nm	자체 평가	
		P-3	캡슐 합성 scale-up 기술	①	합성된 캡슐의 수득량 증가	1 batch당 합성된 캡슐의 양	100g/회	4,000g/회	자체 평가	
Q	자기치유 코팅재 제조 및 최적화 기술	Q-1	캡슐 배합 기술	①	캡슐 안정성 확보	캡슐 300개 중 파괴된 캡슐의 비율 (배합 공정 후 광학 현미경을 이용하여 캡슐 외형 관찰)	5% 이하	4.4%	자체 평가	연세 대학교

(4) 4차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
B	무기혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술	B-2	무기혼합재 활용 자기치유 시멘트 복합체 제조기술	①	제조기술 확보	28일 압축강도 손실율 [(Sref-S)/Sref×100] (KS F 2405)	10% 이하	5.1%	공인 시험 성적서	KCL
				②	자기치유 성능 확보 (w0=0.25mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	91.2%	자체 평가	KCL
						치유재령 28일 균열 충진률 [(V0-V28)/V0] (이미지분석)	40% 이상	42.7%	자체 평가	
C	기능성 폴리머 활용 무기혼합재 자기치유 성능 향상 기술	C-1	복합소재 활용 자기치유 기술	①	자기치유 성능 확보 (w0=0.25mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	90.6%	자체 평가	KCL
						치유재령 28일 균열 충진률 [(V0-V28)/V0] (이미지분석)	40% 이상	40.5%	자체 평가	
E	장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술	E-1	자기치유 성능 향상 기술	②	급속 자기치유 성능 향상 (w0=0.25mm)	15분 이내 투수감소율 [(wf0-wf15min)/wf0] (투수시험)	60% 이상	70.0% 이상	자체 평가	중앙 대학교
		E-2	습윤/건조 반복 환경 자기치유 기술	①	자기치유 성능 확보 (w0=0.25mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	98.6% (0.30mm)	자체 평가	
						치유재령 28일 일반모르타르 대비 균열 충진률 [(Vsap.0-Vsap.28)/ (Vref.0-Vref.28)] (이미지분석)	300% 이상	372.7% (0.30mm)	자체 평가	
G	균열폭 0.4mm 이내 자기치유 기술	G-1	하이브리드 소재 활용 배합기술	①	적용 기술 확보	Mock-up 실험 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	㈜ 인트켐
		G-2	하이브리드 소재 대량 제조기술	①	대량 제조 기술 확보	1회 제조된 소재의 양	20kg/회	40kg/회	자체 평가	
				②	자기치유 성능 확보 (w0=0.30mm)	바인더 대비 유무기 소재 혼입율	10% 이하	8.0%	자체 평가	
						치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	94.1% (0.25mm)	자체 평가	
H	자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술	H-3	모르타르 내 박테리아 생존율 평가 기법 정립	①	생존율 평가 기법 확보	모르타르 내 박테리아 생존율 평가 및 치유생성물 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	고려 대학교
				②	치유생성물 분석 기법 확보					

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
I	담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술	I-3	담체 내 박테리아 생리적 특성 평가기법 정립	①	생체광물형성 정량 분석 기법 확보	생균 대비 탄산칼슘 형성능 (Ca^{2+} cresolphthalein method)	20% 이상	88.96%	자체 평가	고려 대학교
		I-4	모르타르 내 고정화한 박테리아 생존율 향상 기술	①	박테리아 생존율 향상 기술 확보	30일 이후 포자 생존율 (FDA assay)	10% 이상	20.3%	자체 평가	
J	박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조기술	J-2	담체화 된 박테리아 활용 자기치유 모르타르 제조 기술	①	제조 기술 확보	28일 압축강도 손실율 [(Sref-S)/Sref×100] (KS F 2405)	10% 이하	8.1% (LW10%)	공인 시험 성적서	고려 대학교
				②	자기치유 성능 확보 (w0=0.25mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	91.3%	자체 평가	
K	글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 흡착 기술	K-1	박테리아의 분리 증식 기술	③	경화된 코팅재 내 박테리아의 생장 향상	Hemo-Cytometer에 의한 박테리아 개체 수	10^3cell/ml 이상	4.9 ± 1.3 X 10^4 cell/ml	자체 평가	경기 대학교
L	생체 모방형 코팅재 구성 요소 기술	L-2	박테리아 흡착제 기반의 코팅재 배합설계	②	코팅재의 부착강도 확보	부착강도 (KS F 4042)	1.0MPa 이상	1.4MPa	공인 시험 성적서	경기 대학교
M	생체 모방형 콘크리트 코팅재 성능평가 및 시공 기술	M-1	코팅 콘크리트의 내황산성 향상 기술	①	내황산성 향상	28일 압축강도 감소율 [(Sref-S)/Sref×100] (JSTM C 7401)	5% 이하	2.7%	자체 평가	경기 대학교
						28일 질량변화 감소율 [(mref-m)/mref×100] (JSTM C 7401)	10% 이하	8.1%	자체 평가	
N	시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기술	N-2	고상캡슐 제조 기술	③	최적화 기술 확보	캡슐의 수율 [m실험/m이론]	80% 이상	90% 이상	자체 평가	세명 대학교
		N-3	마이크로 캡슐 제조 기술	②	안정성 확보	교반 이후 캡슐 손실률 [(m-mafter)/m×100] (씻기시험)	10% 이내	10% 이내	자체 평가	
O	캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능제어 기술	O-1	고상캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조기술	③	자기치유 성능 향상 (w0=0.30mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	90.4%	자체 평가	세명 대학교
		O-2	마이크로 캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조기술	①	제조기술 확보	28일 압축강도 손실율 [(Sref-S)/Sref×100] (KS F 2405)	15% 이하	10.7%	공인 시험 성적서	
				②	자기치유 성능 확보 (w0=0.25mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	90.1%	자체 평가	
		O-3	캡슐 활용 시멘트 복합재료 활용 기술	①	적용기술 확보	고상캡슐 활용 시멘트 복합재료 Mock-up 실험 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
Q	자기치유 코팅재 제조 및 최적화 기술	Q-2	자기치유 코팅재 제조 기술	①	코팅재의 기본 성능 확보 (KS F 4936 품질 기준 만족)	부착 강도 (KS F 4936)	1 MPa 이상	1.33 MPa	공인 시험 성적서	연세 대학교
						내투수성 (KS F 4936)	투수되지 않음	투수되지 않음	공인 시험 성적서	
						탄산화 깊이 (KS F 4936)	1.0 mm 이하	0.0 mm	공인 시험 성적서	
						염화물 침투저항성 (KS F 4936)	1000 Coulombs 이하	1,785 Coulombs	공인 시험 성적서	
		Q-3	환경 대응 자기치유 코팅재의 안정성 향상 기술	①	환경 대응 안정성 확보	촉진내후성, 온냉반복, 내알칼리성, 내염수성 시험 (KS F 4936)	외관 변형 없음	외관 변형 없음	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	
C	기능성 폴리머 적용을 통한 무기혼합재 활용 자기치유 성능 향상 기술	C-1	복합소재 활용 자기치유 기술	①	복합소재 활용 자기치유 성능 향상	내구성 회복률 (염소이온 침투실험)	40% 이상	40%	자체 평가	KCL
		C-2	복합소재 활용 자기치유 콘크리트 최적 배합 기술	①	복합소재 활용 자기치유 배합 기술 수준 향상	28일 압축강도비 [Ssh/Sref] (KS F 2405)	95% 이상	99%	공인 시험 성적서	KCL
						유동성비[fsh/fref] (KS F 2402)	95% 이상	96%	공인 시험 성적서	
E	장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술	E-3	유사환경 대응 자기치유 기술	①	급속 자기치유 성능 향상 (w0=0.30mm)	15분이내 투수감소율 [(wf0-wf15min)/wf0] (투수시험)	60% 이상	71.8%	자체 평가	중앙 대학교
				②	유사환경 대응 장기 자기치유 성능 향상 (w0=0.30mm)	치유재령 14일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	80% 이상	90.7%	자체 평가	
G	균열폭 0.3mm 이내 자기치유 기술	G-3	유무기 소재 적용 시멘트 복합체 배합 개발	①	소재적용 콘크리트 배합 기술 수준 향상 (w0=0.3mm)	28일 압축강도비 [Ssh/Sref] (KS F 2405)	80% 이상	90.4%	공인 시험 성적서	㈜인트켐
						유동성비[fsh/fref] (KS F 2402)	90% 이상	94.7%	공인 시험 성적서	
						치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	90% 이상	93.4%	자체 평가	
				②	소재적용 콘크리트 제조기술 확보	현장시험시공 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
H	자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보기술	H-2	박테리아 혼합/대량 배양기술	⑤	혼합균주 포자 대량 유도 기술 확보	혼합균주 포자 유도율 [포자/균주×100]	10% 이상	32.2%	자체 평가	고려 대학교
		H-4	박테리아 활용 자기치유 성능 최적화 기술	①	박테리아 활용 자기치유 성능 정량화	탄산칼슘 석출능 및 균열 치유성능 정량화 분석 보고서 작성여부	1건	1건	자체 평가	
J	박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술	J-2	담체화 된 박테리아 활용 자기치유 모르타르 제조 기술	③	자기치유 성능 향상 (w0=0.30mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	85% 이상	90.7%	자체 평가	
K	글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 흡착 기술	K-1	박테리아의 분리 증식 기술	④	박테리아의 생산 기술 수준 향상	농도 109의 박테리아 생산양	1ton/일	1ton/일	자체 평가	경기 대학교
						농도 109의 박테리아 생산 비용 절감율 (20L 생산대비)	20% 이상 (1ton기준)	20% 이상	자체 평가	
M	생체 모방형 콘크리트 코팅재 성능 평가 및 시공 기술	M-2	박테리아 활용 열화지연 코팅재 시공 기술	①	하수관거 코팅속도 향상	목업실험을 통한 하수관거 코팅속도	2m/분 이상	3.75m/분	자체 평가	경기 대학교
		M-3	코팅 하수관거의 내황산성 향상 기술	①	하수관거의 황산저항성 향상	하수관거 환경조건하에서 코팅 콘크리트의 재령 91일 압축강도 손실율 [(Sref-S)/Sref×100] (JSTM C 7401)	0% 이하	-1.04% (강도증진)	공인 시험 성적서	
N	시멘트 복합재료용 캡슐 제조 기술	N-3	캡슐 제조 및 최적화 기술	①	마이크로 캡슐의 제조성능 향상	다량 제조 기술 확보 (1일 생산량)	10kg/회	30kg/회	자체 평가	세명 대학교
O	캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능제어 기술	O-3	캡슐 활용 시멘트 복합재료 활용 기술	②	캡슐 활용 시멘트 보수재료 제조 기술	부착강도 (MPa)	1.4MPa 이상	1.6MPa 이상	공인 시험 성적서	세명 대학교
				③	캡슐 활용 시멘트 보수재료 제조 기술 (w0=0.30mm)	치유재령 28일 투수감소율 [(wf0-wf28)/wf0] (투수시험)	85% 이상	90%	자체 평가	세명 대학교
Q	자기치유 코팅재 제조 및 최적화 기술	Q-4	자기치유 성능 최적화 기술	①	균열 치유 후 자기 치유 코팅재 성능 회복 기술 확보	내투수성 (KS F 4936)	투수 되지 않음	투수 되지 않음	공인 시험 성적서	연세 대학교
						탄산화 깊이 (KS F 4936)	1.0 mm 이하	0.33 mm	공인 시험 성적서	
						염화물 침투저항성 (KS F 4936)	1000 Coulombs 이하	474 Couloms	공인 시험 성적서	
				②	환경 대응 자기치유 성능 및 이차적 균열 방지 기술 확보	일차 치유 부위의 이차적 균열 발생 여부 (10~30 Hz범위의 진동을 1시간 동안 가한 후 KS F 4936시험)	균열 발생 없음	균열 발생 없음	공인 시험 성적서	

나. 정량적 연구 목표 달성도

구분		목표	달성	달성률(%)	주요 실적
논문 게재	SCI급	33	42	127.3	- Microcapsule-Type Self-Healing Protective Coating for Cementitious Composites with Secondary Crack Preventing Ability (Materials)
	국내 논문	20	18	90.0	- 액상 무기재료를 활용한 시멘트 복합재료 혼합용 자기치유 마이크로 캡슐의 제조 특성에 관한 실험적 연구 (한국건설순환자원학회 논문집)
학술 회의	국내	71	112	223.9	- Self-healing protective coatings based on linseed oil-loaded microcapsules for application to cementitious materials (ICSHM 2019)
	국외		47		
특허 출원	국내	26	37	142.3	- 자기치유 조성물 및 그 코팅방법 (10-2020-0011888)
	국외	4	9	225.0	- Pickering emulsion composition using polyimide particles and preparation method thereof (미국, 16/305713)
특허 등록	국내	16	18	112.5	- 라이시니바실러스 속 YS11 균주 및 이의 용도 (10-2009194)
	국외	1	1	100.0	- 박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 (일본, P6361053)
인력 양성	석사	12	36	300.0	- 중앙대, 고려대, 경기대, 세명대, 연세대, 울산대, 군산대
	박사	4	7	175.0	- 중앙대, 경기대, 고려대, 세명대
기술 이전	계약 건수	-	1	초과 달성	- '박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 현장 배합' 관련 노하우 기술 (홍익산업개발(주))
	계약액	-	55,000천원	-	
	징수액	-	55,000천원	-	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	17	17	100.0	- 자기치유 생성물 분석 보고서
	생명자원 / 생물자원	-	3	초과 달성	- Lysinbacillus sp. YS11 (KACC 19227)
	소프트웨어	3	3	초과 달성	- 콘크리트의 자기치유 생성물 산정 프로그램 (C-2020-001645)
	화학물	-	-	-	
기타	표준 채택	-	8	초과 달성	- 콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법 (KSF2596)
	시제품	6	6	100.0	- 유무기 하이브리드 자기치유 혼화재
	현장 시험	-	1	초과 달성	- 서울시 선유서로 하수암거 보수공사
	성과 홍보	1	7	초과 달성	- YTN Science 기발한 실험실-자기치유 기술 프로그램 출연을 통한 홍보
	일자리 창출	-	-	-	

4-2. 관련 분야 기여도

가. [1-1] 유·무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 기술 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

- 기존의 무기계 광물질 혼입 자기치유 콘크리트 기술은 OPC 기반의 콘크리트 배합을 대상으로 하였으며, SCM이 많이 혼입된 친환경 콘크리트에는 적용에 한계가 있음.

  : 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등 SCM의 잠재수경성 및 포졸란 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 하여 자기치유 속도를 향상할 수 있는 기술 개발이 필요함.

  : 스마트 폴리머 기술과 접목하여 기존의 무기계 광물질을 활용한 자기치유 기술의 성능 한계로 판단되는 균열 방향성, 치유속도의 단점을 해결할 수 있음.

표 4.1 유·무기 혼합재 활용 자기치유 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술선도)** 일본 동경대 Kish 교수 연구팀 – 팽창, 팽윤 및 결정 촉진제을 조합한 무기계 자기치유 재료 배합기술 보유 * 2007년 실제터널공사 적용(동인도철도회사) ▪ **(기술한계)** 작업성 및 자기치유성능 – 급결성능 개선에 따른 작업성 확보 필요 – 자기치유 소요시간 약 7~28일, 치유 균열폭 약 0.3 mm로 구조물 적용을 위한 성능개선 필요 – 역학적 성능향상보다는 지수성능에 초점	▪ **(성능향상)** 유·무기계 원천소재 개발 – 원료소재 개질(mechno-chemical), 반응제어 및 화학적 배합 기술을 통한 자기치유 성능 향상 ▪ **(기술융복합)** 스마트 폴리머 기술 활용 – 환경 반응형 스마트 폴리머 개발 – 무기계 원천소재와의 성능복합화 ▪ **(성능개선)** 자기치유 성능 향상 – 자기치유 속도 및 역학적 성능개선

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 균열 자기치유 성능 제어를 위해 다양한 무기 혼합재의 자기치유 생성물의 종류, 생성 속도 및 반응 조건(온도, 습도 등)을 고려한 자기치유 반응 메커니즘 정립
- 다양한 무기 혼합재의 자기치유 특성 분석 및 균열폭 0.1~0.3 mm의 균열에 대하여 요구되는 자기치유 성능을 제어
- 기능성 폴리머의 수분 제어 및 균열제어 특성을 이용한 균열 환경 조건 제어기술 개발을 통해 균열에서의 자기치유 물질 생성 촉진하고 단기·장기 자기치유 성능 확보
- 자기치유 성능 최적화를 위해 다양한 콘크리트의 내부 환경(pH, 이온 농도)을 고려한 스마트 폴리머 기술 확보 및 이를 활용한 급속 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 자기치유 성능 최적화를 위해 실제 환경조건(건조/습윤)에서 스마트 폴리머가 함유한 수분의 공급으로 인한 장기 자기치유 기술 개발
- 유무기 하이브리드 소재의 성능 최적화를 통해 최대 치유가능 균열폭 0.3 mm, 균열치유속도 향상(치유소요시간 14일 이내)

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.2 유·무기 혼합재 활용 자기치유 기술의 핵심성과 기술수준(1/2)

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
무기계 혼합재료 활용 균열 자기치유 매커니즘 및 모델링 기술	• 무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트에 대한 이론적 연구 미흡 • 현재 자기치유 반응에 대한 메커니즘 정립과 모델링 기술 부재	• 무기 혼합재의 종류에 따른 균열면의 자기치유 생성물의 종류 및 생성속도를 예측하여 최적배합 도출에 활용할 수 있음.	• 무기 혼합재를 사용하여 균열면의 자기치유를 위해서는 균열면을 치유하는 생성물의 종류 및 속도 등을 제어할 수 있는 기술이 필요함.
무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트의 균열 치유성능 제어 기술	• 균열 자기치유 현상에 초점을 두고 있음. • 자기치유 성능 제어와 관련된 기술분야는 미흡한 수준	• 무기 혼합재 종류에 따른 자기치유 특성을 고려하여 자기치유 균열폭 0.1~0.3 mm에 대해 요구성능 별로 최적화된 자기치유 배합 기술임.	• 현재 일반적으로 자기치유 가능한 균열폭은 0.3 mm 이내로, 이에 대한 자기치유 성능을 제어할 수 있는 무기 혼합재 배합 기술이 필요함.
기능성 폴리머 적용을 통한 무기혼합재 활용 자기치유 성능 향상 기술	• SAP 등 팽윤 특성의 폴리머를 활용하여 균열을 self-sealing하는 방식의 자기치유 기술 연구는 수행되었음. • 기능성 폴리머를 활용하여 균열 환경을 제어하고, 무기혼합재에 의한 자기치유 성능을 향상시키기 위한 기술개발 미흡	• 기능성 폴리머를 활용한 균열 환경 제어를 통해 무기혼합재 활용 자기치유 기술의 성능을 극대화하고 장기적인 자기치유 성능을 확보하고자 함.	• 무기혼합재 활용 자기치유 기술은 치유 균열 폭이 다른 자기치유 기술에 비해 제한적이며, 반복적인 균열 발생에 취약하기 때문에 기능성 폴리머를 활용한 하이브리드 자기치유 기술을 통해 성능 향상이 필요한 실정임.
콘크리트 pH응답형 스마트 폴리머 확보 기술	• 단순 용액의 pH에 따라 팽윤비가 변화하는 스마트 폴리머에 대한 연구 수행. • 콘크리트 pore solution의 특성이 반영된 균열면 내부 환경을 고려한 자기치유형 스마트 폴리머 확보 기술 부재	• 급속 자기실링(self-sealing)을 위한 균열면 pH 변화에 따른 팽윤비(swelling ratio) 제어가 가능한 스마트 폴리머 확보 기술을 통해 구조물 외부 환경 맞춤형 최적 균열 치유 성능을 도출함. • 0.3mm 균열폭에 대해 15분이내 투수감소율 71.8%, 치유재령 14일에서의 투수감소율 90.7% 달성	• 균열면 침투수의 pH는 일반강우수·오폐수·해수 등 외부환경에 따라 민감하게 변화되기 때문에, 다양한 pH에서 자기치유 효과(균열치유 속도 등)를 극대화할 수 있는 기술이 필요함.

표 4.3 유·무기 혼합재 활용 자기치유 기술의 핵심성과 기술수준(2/2)

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 배합 기술	• 스마트 폴리머를 급속 자기치유 효과 증대에만 초점을 두어 연구 진행	• 고흡수/고팽윤 스마트 폴리머의 내부양생 효과를 활용한 장기 자기치유 성능 재현 가능 콘크리트 배합 기술 개발	• 균열은 사용수명 전 주기에 걸쳐 발생되며 건조 환경 조건에 장시간 노출될 수 있으므로, 자기치유 콘크리트의 실용화를 위해 장기 자기치유 스마트 폴리머 콘크리트 기술 개발이 필요함.
유무기 하이브리드 자기치유 소재 기술	• 자기치유가능 균열폭 0.3 mm 이내 • 팽윤, 팽창, 자기치유반응특성의 분체를 기본으로 하여 시멘트바인더의 10% 대체 사용 필요 • 자기치유 소재 미적용과 유사한 콘크리트 작업특성 유지	• 자기치유가능 균열폭 0.3 mm 이내 • 소재치유기간 단축 (28일 → 14일) • 유무기하이브리드 자기치유 소재 미적용과 유사한 콘크리트 작업특성	• 자기치유 소재 적용 콘크리트의 경쟁력 확보를 위해서는 자기치유가능 균열폭 증대와 자기치유 소재 혼입 사용율 최소화를 위한 신소재개발 기술이 필요함.
균열폭 0.3 mm 이내 자기치유 기술	• 기존 무기계소재 자기치유 가능 균열폭 0.2 mm이내, 치유소요시간 평균 28일 수준으로 치유 균열폭 향상과 소요시간 단축이 필요함(수중 침지시험 조건).	• 유무기 혼합재를 개발 활용함으로써 자기치유성능 시너지효과를 통한 최대 자기치유가능 균열폭 0.3 mm이내, 치유소요시간 28일 이내에 가능한 자기치유 배합 기술(3세부 과제에서 기술 정립한 투수시험 조건) • 유무기 복합처리를 통해 무기소재 단점(낮은 반응물 이온농도)과 유기소재 단점(물리성능, 수화반응 간섭 등)을 보완하고 해결할 수 있는 기술	• 기존 무기계 자기치유 소재의 치유성능향상에 대한 시장요구사항 충족을 위해 유무기 복합처리를 통한 소재개발 및 활용기술 필요

나. [1-2] 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

- 구조물의 노출 환경을 고려한 생체광물형성 미생물을 조사 및 배양하고 최적화된 기술 개발

  : 염해 환경하의 균열보수 기법을 개발하고, 탄산화 환경에서 최적화된 균열치유 및 탄산화 침투 저항성을 가진 코팅형/주입형 보수재료의 원천기술 확보

  : 콘크리트 내부 pH변화에 따른 미생물 생존능력 저하를 막기 위한 장기생존 미생물 분리 및 배양기술 확보

  : 외부 보수재로서만 가능성을 보였던 단점을 극복하여, 주변 환경 조건에 맞춘 주입, 도포 보수재 및 시공기술 개발

표 4.4 박테리아 활용 자기치유 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술선도)** 네델란드 델프트 공대 - 박테리아(Sporosarcina Pasteurii 종 등) 활용 탄산칼슘($CaCO_3$) 등의 무기질 광물질의 석출에 의한 균열 수복 * COWI에서 터널 적용성 평가 수행 ▪ **(기술한계)** 박테리아 생존률 - 캡슐화를 통해 박테리아 수명증진 효과 확보 - 다양한 환경조건에서의 콘크리트에 적용할 수 있는 박테리아 종 필요 - 치유가능 균열폭 0.1~0.25 mm로 성능향상 필요	▪ **(성능향상)** 박테리아 생존률 증대 - 마이크로 포자 기술 등의 적용을 통한 박테리아 생존율 증대 (3개월 이상) ▪ **(기능성확대)** 새로운 박테리아 종 선정 - 글라이코 캘리스 막 형성 후보 균주 선정 - 부착성능이 확보된 콘크리트 보호 코팅재 개발(부식 환경에 노출된 하수관거에 적용) ▪ **(성능개선)** 자기치유 성능 향상 - 박테리아 무기질 석출 반응속도 개선에 따른 균열 치유 성능 개선 : 치유 가능 균열폭 0.3 mm

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 고염, 강알칼리성 내성 박테리아의 생체광물형성 능력을 기준으로 선정한 후 이를 배양하는 기술과 포자형성능력을 향상시켜 현장적용 가능성을 높이는 기술 확보
- 박테리아를 콘크리트에 혼입할 시 생존율 및 치유 가능성을 향상시킬 수 있는 담체화 기술과 이를 평가할 수 있는 객관적인 평가기법 확보
- 담체화된 박테리아를 콘크리트에 혼입하기 위한 최적의 조건을 선정하고 박테리아 활용 균열 자기치유 콘크리트 제조 기술 개발
- 박테리아 생장환경 및 코팅재로서 요구 부착강도를 고려한 결합재 개발 및 결합재와 박테리아 흡착재의 최적 구성비율 확보
- 생체모방형 코팅재가 시공된 콘크리트 구조체의 내화학성과 내구성 평가 및 하수관거 내부에 대한 코팅 시공 기술

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.5 핵심성과 기술수준

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
자기치유 가능한 생체광물형성 박테리아 확보 기술	• 자기치유를 위해 강알칼리성 환경 또는 고염환경에서만 생존 가능한 박테리아 사용. Bacillus속을 주로 활용	• 고염과 강알칼리성 환경에서 생존 가능한 Bacillus 속과 다른 종의 박테리아 조합을 선정하여 사용하는 기술	• 강알칼리성 재료인 콘크리트는 고염을 포함한 다양한 환경에서 사용이 요구되어 다양한 생체광물형성 박테리아 확보
담체화를 통한 박테리아 생존율 향상 기술	• 현재 사용되는 담체는 박테리아 생존과 성장에 요구되는 환경이 제한적. 담체화 박테리아 생존기간은 40일임.	• 90일 수준의 생존기간 확보 및 장기적인 자기치유 효과 확보. 박테리아 생존율 및 안정성을 향상을 위한 담체화 기술 확보	• 콘크리트 장기강도 측정의 기준인 90일 수준의 생존기간을 확보하여 장기적인 자기치유 효과를 보기 위함.
박테리아 활용 자기치유 콘크리트 제조 기술	• Calcite 형성에 의한 콘크리트 자기치유 성능은 현재 0.2 mm 수준임.	• Calcite 형성에 의한 콘크리트 자기치유 성능을 0.3 mm 이상으로 향상 • 0.3mm 균열폭에 대해 치유재령 28일에서의 투수감소율 91.5% 달성	• 일반적으로 콘크리트 성능에 영향을 미치는 균열의 크기는 0.3 mm 이상임.
글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 분리동정 및 최적생산조건 확립	• 글라이코 캘릭스 막을 형성하는 박테리아를 활용한 콘크리트 코팅 기술은 없음.	• 글라이코 캘릭스 막의 생성량에 대한 정량적 평가 기술	• 박테리아의 글라이코 캘릭스 막 형성에 의한 열화저항성능을 일관되게 평가할 수 있는 기술이 필요함.
생체모방형 코팅재 구성 요소 기술	• 박테리아의 최적 생장환경 조성을 위하여 마그네시아-인산염 복합체를 활용한 경우는 없음.	• 박테리아의 최적 생장을 위한 pH 8~10 및 부착강도 1.5 MPa 이상의 코팅재 개발	• 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아의 최적 생장 및 콘크리트 구조체 적용을 위한 결합재(코팅재) 기술 개발이 필요함.
생체모방형 콘크리트 코팅재 성능 평가 및 시공 기술	• 코팅 콘크리트의 내황산성 증진을 위해 글라이코 캘릭스 막 형성 박테리아를 활용한 기술은 없음.	• 압축강도 감소율(재령 28) 5% 이하 및 수밀성(재령 28일 물침투 깊이 증가율) 40% 이하의 기술개발 • 하수관거 코팅속도(두께 3 mm 기준) 2 m 이상/분의 성능을 갖는 코팅기술 개발	• 실제 황산의 의한 부식환경에 노출된 하수관거의 효율적 보수를 위한 코팅기술 확보

다. [1-3] 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

- 마이크로 사이즈의 포자캡슐을 이용한 장기 생존형 캡슐 및 혼입기술을 개발하여 지금의 짧은 지속시간을 극복하고 치유 성능을 개선해 적용 범위 확대

  : 6개월 정도에 머물러 있는 지속시간을 1년 이상 연장

  : 0.1~0.25 mm 이하의 균열 폭에만 효과가 있는 기술을 개선하여 0.3 mm 수준까지 개선

표 4.6 캡슐 활용 자기치유 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술선도)** 연세대학교 정찬문교수 연구팀 – 마이크로 캡슐을 이용하여 특별한 자극 촉매 없이 UV light, Sunlight에 의해 균열을 자기치유할 수 있는 코팅재 개발 – 균열에 의해 캡슐 외벽물질이 붕괴되면서 심물질이 균열면을 충진하는 기술 ▪ **(기술한계)** 수밀성확보에 초점 – 수밀성 확보에 초점을 두어 균열면 강성회복 등의 다양한 성능구현 필요 – 균열 치유의 1회성으로 실제 콘크리트 구조물 적용에 어려움. – 지하구조물 등 다양한 환경 조건에서 적용할 수 있는 캡슐 제조기술 필요	▪ **(제조기술)** 다양한 용도의 캡슐 제조기술 – 균열면 강성회복을 위한 심물질 제조 – 반복적 균열 제어를 위한 심물질 제조 ▪ **(강성회복)** 콘크리트의 초기 구조성능 회복 – 높은 강성의 심물질 개발 및 균열면 자동 충진 기술을 통한 역학적 성능 개선 ▪ **(반복균열제어)** 자기치유 성능 향상 – 적정 점성과 높은 계면 부착성의 심물질 – 탄성조절에 따른 반복 균열 제어 ▪ **(활용기술)** 캡슐 활용 자기치유 적용범위 확대 – 구조물 표면 코팅재 – 신 구조물 및 구 구조물의 보수재

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 모르타르 또는 콘크리트와 같은 시멘트 복합재료 배합에 직접 투입하거나 혼합직후 교반 시 손실량이 최소가 될 수 있는 시멘트 복합재료용 캡슐 제조기술 확보
- 자기치유 캡슐을 모르타르 또는 콘크리트와 같은 시멘트 복합재료 배합에 직접 투입하여 소요 성능을 만족할 수 있는 시멘트 복합재료의 제조 및 환경에 대응할 수 있는 자기치유 성능 제어 기술 개발
- 혹한 및 혹서 지역에서도 사용 가능하며 햇빛이 드는 부분뿐만 아니라 햇빛이 들지 않는 부분에도 사용 가능하고 또한 환경 인자에 대한 안정성을 확보하여 상업화 요구에 대응하고자 함. 또한 치유물질의 캡슐화 기술 개발
- 자기치유 코팅재의 다양한 외부환경에 대응하여 자기치유 성능확보 및 국가표준 품질기준 성능 확보
- 환경인자(햇빛, 습기, 대기온도 등)에 대한 안정성 확보 및 상업화 기술 확보

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.7 핵심성과 기술수준

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
시멘트 복합재료용 자기치유 캡슐 제조 기술	• 시멘트 복합재료에 직접적으로 캡슐을 넣은 사례는 찾아보기 어려운 실정이며, 간혹 몇몇 국외 연구자들에 의하여 기술개발 기초 수준에서 검토되고 있음.	• 자기치유 소재 검토 및 선정, 캡슐화 방법 모색 및 적합한 쉘 재료를 적용하여 시멘트 복합재료에 직접 혼합이 가능한 자기치유 캡슐의 제조 및 개발	• 자기치유 캡슐을 활용할 경우 다량의 자기치유물질을 포함할 수 있으며, 시멘트 복합재료 내부에 적절하게 분산될 경우 효율적인 균열 자기치유 가능
캡슐 활용 시멘트 복합재료 제조 및 자기치유 성능 제어 기술	• 자기치유 캡슐을 시멘트 복합재료에 직접적으로 넣은 사례는 매우 드물며, 자기치유 캡슐을 포함하는 획일화된 시멘트 복합재료 배합 및 치유특성에 국한하여 검토	• 캡슐 보존성 및 분산성, 자기치유 성능을 극대화 할 수 있는 시멘트 복합재료 제조 기술 및 내외부 환경조건에 따라 자기치유 성능을 적용 할 수 있는 최적 배합 도출 • 0.3mm 균열폭에 대해 치유재령 28일에서의 투수감소율 89.9% 달성	• 자기치유물질 캡슐을 활용하여 시멘트 복합재료의 소요성능을 만족할 수 있는 배합 기술 필요, 성능 및 자기치유 생성물 제어를 통하여 자기치유 요구성능에 적합한 성능 제어 기술 확보
자기치유 코팅재의 치유물질 선정 및 캡슐화 기술	• 저온 및 암소에서 자기치유가 가능한 치유물질 및 환경 인자에 대한 안정성을 가지는 치유물질에 대한 연구는 거의 이루어지지 않음.	• -20 ~ 35℃의 온도 및 암소 조건에서 자기 치유가 가능한 치유물질 개발 • 상기 치유물질에 대한 캡슐화 기술 개발	• 극한적인 저온 조건으로서는 한국에서 가장 추운 지역(철원)의 겨울철 일 평균 최저 온도인 -20℃를, 고온 조건으로서는 한국에서 가장 더운 지역(대구)의 여름철 일 평균 최고 온도(31℃) 및 햇빛이 드는 곳의 콘크리트 표면 온도를 고려 35℃ 선정
자기치유 코팅재 제조 및 최적화 기술	• 환경 인자에 대한 안정성을 가지는 자기치유 코팅재에 대한 연구는 거의 이루어지지 않음.	• 도막형 콘크리트 표면 보호재에 관한 KS F 4936 기준 만족 • 균열 치유 후 자기 치유 코팅재 성능 회복 기술 확보 및 환경 대응 자기 치유 성능 및 이차적 균열 방지 기술 확보	• 한국산업규격(KS F 4936)에 명시된 품질기준 만족

5. 연구개발성과의 활용 계획

가. 지적재산권 확보

- 미래 건설시장을 선점할 수 있는 자기치유(Self-healing) 콘크리트 요소기술 및 핵심원천기술을 확보하고 이를 통해 관련 미래 선도 창의형 연구개발 가능

  : 자기치유 요소기술은 박테리아, 마이크로 캡슐, 무기계 혼합재료 등이 있으며, 이에 대한 제조 핵심원천기술 확보

  : 특화된 자기치유 기능성 콘크리트 배합 기술과 자기치유 성능 기준 표준화를 통해 자기치유 기술 표준 선점 및 해외 경쟁력 확보

- 개발된 자기치유 콘크리트 기술 기반 융·복합 기술 개발을 통해 창의형 연구개발 가능

  : 유무기 하이브리드 자기치유 소재 개발을 통해 무기계의 한계점으로 평가되는 치유 속도 등이 개선된 자기치유 기술을 확보함으로써 앞선 자기치유 기술력 확인 가능

나. 기술 제품화 및 상용화

- 도로 포장 콘크리트에 활용

  : 유지관리가 어렵고 지속적으로 균열피해가 발생하는 콘크리트 구조물에 적용하여 유지관리 비용 감축 가능

  : 교면 포장 적용 시, 보수면이 자기치유특성 갖게 되어 교량 바닥 콘크리트에 대한 보호 기능 부여 가능

  : 특정 외부환경(산성비·해수·대기조건) 및 염해, 균열, 동결융해 등의 복합적 열화로 인한 손상이 지속적으로 발생하고 있는 포장 콘크리트에 개발기술을 적용함으로써 지속가능한 고내구성 부여 가능

- 터널, 수리구조물, 원전구조물 등 유지보수가 힘든 콘크리트 구조물에 활용

  : 일반적인 유지보수가 용이하지 않은 사회기반시설물이나 특수구조물의 경우 초기 시공 시 비용이 더 소요되더라도 균열 예방과 유지관리가 안정적인 공법이 요구됨.

  : 자기치유 콘크리트 적용 시, 콘크리트 스스로 유지보수를 수행함으로써 구조물의 내구성 유지 및 내구연한 증가 가능

- 오폐수처리장 및 하수암거 시설물에 활용

  : 다양한 화학물질을 포함하고 있는 수분에 노출되는 콘크리트의 경우 열화로 인한 손상이 지속적으로 발생하므로 자기치유 콘크리트를 활용하여 열화저항성 향상 가능

  : 자기치유형태의 보수모르타르 적용 시 내구성 향상으로 인해 시설물의 내구연한 향상 가능

  : pH 및 상대습도 응답형 스마트 폴리머를 활용한 자기치유 콘크리트을 확보하여 구조물의 외부 환경조건에 구애없이 자기치유 성능 향상 가능

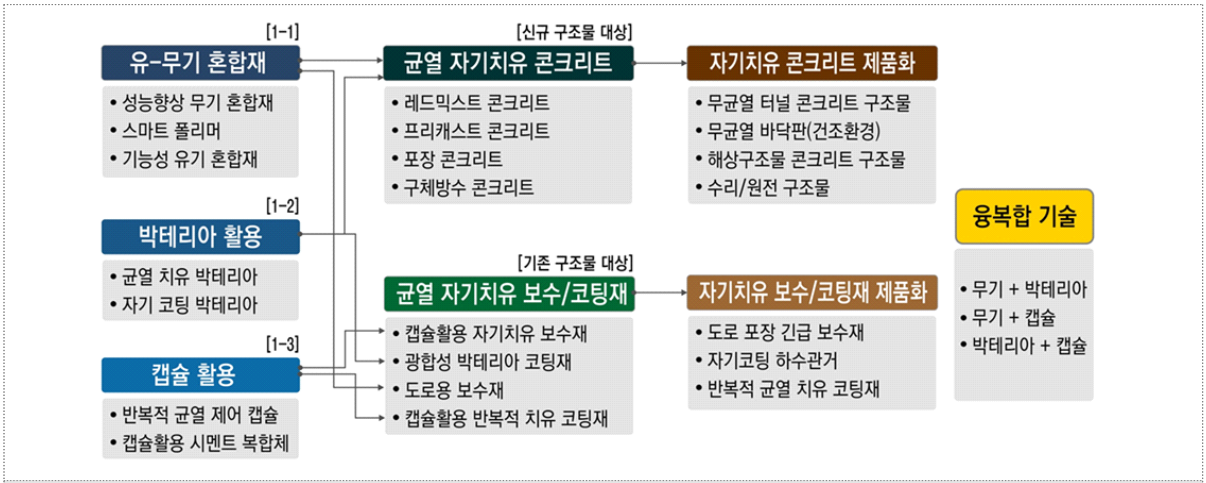


그림 5.1 자기치유 콘크리트의 소재기술과 제품화 Process

표 5.1 자기치유 소재의 제품화 및 상용화를 위한 예상 소요 일정

연구내용	소요 일정 (6개월 단위)								투자금액 (백만원)
	1년		2년		3년		4년		
무기계 자기치유 혼합재료	제품화			Mock-up	Test-bed	상용화			430
자기치유용 스마트 폴리머	제품화				Mock-up	Test-bed	상용화		480
유무기 하이브리드 자기치유 혼합재	제품화	Mock-up	Test-bed	상용화					200
자기치유용 박테리아 펠렛	제품화				Mock-up	Test-bed	상용화		500
박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재	Test-bed	상용화							130
자기치유용 고상/마이크로 캡슐	제품화		Mock-up	Test-bed	상용화				250
캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재	Test-bed	상용화							100



그림 5.2 개발된 자기치유 친환경 콘크리트 기술의 활용 분야

다. 신규시장 개척 및 선도

- 자기치유 콘크리트는 구조물의 사용수명 50% 증대 및 유지관리비 30% 감소시킬 수 있어 콘크리트 구조물 생애주기 CO_2 가스 배출 30% 감축 가능

  : 장기적·반복적 균열 등에 대한 맞춤형 균열제어 자기치유 콘크리트 기술을 제공하여 콘크리트 구조물의 장수명화에 따른 비용 절감 가능

- 신개념 콘크리트 제품 확보에 따라 건설재료 분야의 신규시장 창출 및 선도 가능

  : NT, BT 융합을 통한 자기치유형 콘크리트로 국내 건설시장 확대 및 신시장 창출 가능

  : 국내 콘크리트 재료관련 기업은 중소기업이 대부분으로서 개발기술의 국내 파급 및 국내 기업의 해외 진출 시, 해외 경쟁력 확보 가능

  : 자기치유 콘크리트 제조·시공 기술의 개발로 기술 경쟁력을 확보하여 해외건설시장의 신설 구조물설계 및 시공 사업에서 입찰 기회 증가

- 자기치유 기능성 콘크리트를 통해, 건설시장에서 '건설산업의 유지보수단계 돌입'이라는 패러다임의 변화를 유도할 수 있을 것으로 기대

- 자기치유 콘크리트 기술 분야로 인해 자기치유 관련 전문인력 양성 및 취업증대 효과가 있으며, 향후 건설산업의 신성장 동력원으로 기대할 수 있음.

라. 기술 고도화 및 실용화 체계 구축

- 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보하여 해외기술의 의존도를 해소하고, 세계 최고수준 기술을 확보하기 위한 초석을 마련함.

  : "자기치유(self-healing) 기술"은 선진국을 중심으로 연구 개발되고 있으며, 구조물 자체가 결함을 극복하는 기술로 특수구조물의 유지관리뿐만 아니라 친환경 콘크리트의 한계를 극복할 수 있는 기술이며, 국내의 기술은 선진국의 기술과 동등한 수준으로 발전되었음.

- 본 연구를 통하여 개발된 균열 자기치유 기술은 요소 및 응용기술 단계이므로 자기치유 기술을 적용한 제품화 및 실용화를 목적으로 하는 후속 연구가 요구됨.

  : 자기치유 기술은 현재 TRL 5~6 수준이며, 실용화 수준인 TRL 7~8까지 달성하기 위해서는 현재 자기치유 기술 고도화 및 실용화기술 개발이 필요함.

  : 자기치유 소재를 복합적으로 사용하는 하이브리드 자기치유 기술 적용을 통해 초기 및 장기에 발생하는 균열에 효과적으로 대응할 수 있는 성능 맞춤형 제품 개발을 위한 검토 및 신뢰성 확보가 필요함.

  : 개발된 자기치유 소재를 활용하여 결합재/보수재/코팅재 외의 다양한 형태의 제품 적용과 자기치유 성능이 필요한 제품에 맞춤형 기술을 적용하기 위한 기술 개발이 필요함.

- 연구 성과를 적극 활용하여 자기치유 기술을 실용화할 수 있는 체계 구축이 요구됨.

  : 산·학·연·관의 협동연구체계를 구성하여 실용화 기반구축을 효율적으로 진행하고 아울러 핵심기술 전문가 양성을 위하여 체계적이고 조직적인 기술개발 지원체계를 마련함.

  : Test-bed 준비단계부터 산·학·연 전문가들이 참여하여 자기치유 콘크리트 기술의 현장 적용성 검토가 효과적으로 진행되도록 추진함.

6. 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

가. HealCON

- EU는 'Self-healing materials for prolonged lifetime'라는 주제로 HealCON-Project (2013~2017)가 진행되었음.

  : 벨기에 Nele De Belie 교수(UGhent)가 프로젝트의 Coordinator임.

  : 공동연구기관은 UGhent, Avecom, TU Delft, Acciona, TUM, TTI, VTT, COWI, DTI, CEINNMAT, Devan and Fescon로 기초연구부터 실용화를 위한 기업들로 구성되어 있음.

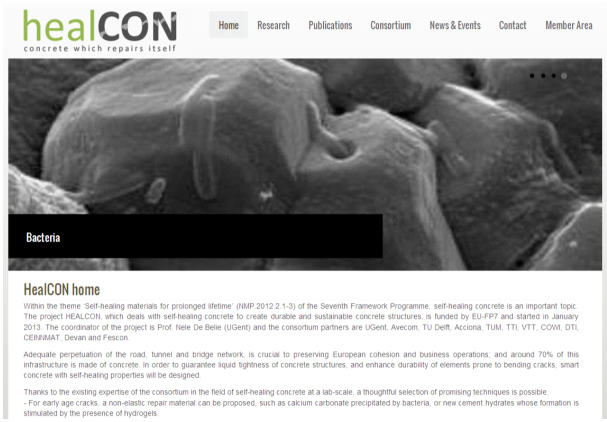


그림 6.1 HealCON Project 홈페이지

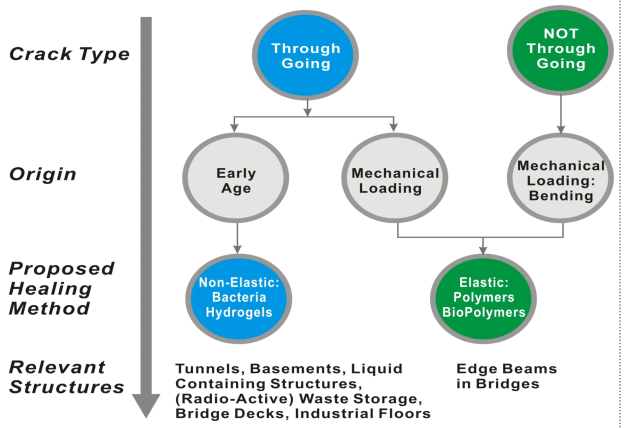


그림 6.2 HealCON Project 개요

나. SheMat

- SheMat 프로젝트는 "Training Network for Self-Healing Materials: from Concepts to Market"라는 주제로 유럽 "Marie Curie" programme에 의한 "Seventh Framework Programme" 범주에서 지원받은 Training and Research Network임.
- 독일 Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology (UMSICHT)의 주도로 다음과 같은 기관이 참여하고 있음.
- Partner로 8개 기관이 참여

  : 벨기에 Avecom (Added value Environmental Composites), 네델란드 Delft University of Technology (TU Delft), 스위스 École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 프랑스 École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles (ESPCI), 벨기에 Ghent University (UGhent), 독일 GKT (Gummi- und Kunststofftechnik), 영국 University of Bristol, 독일 University of Freiburg

- Associated Partner로 4개 기관이 참여

  : 프랑스 Arkema, 독일 BIOKON international, 네델란드 Ceratec과 KLM

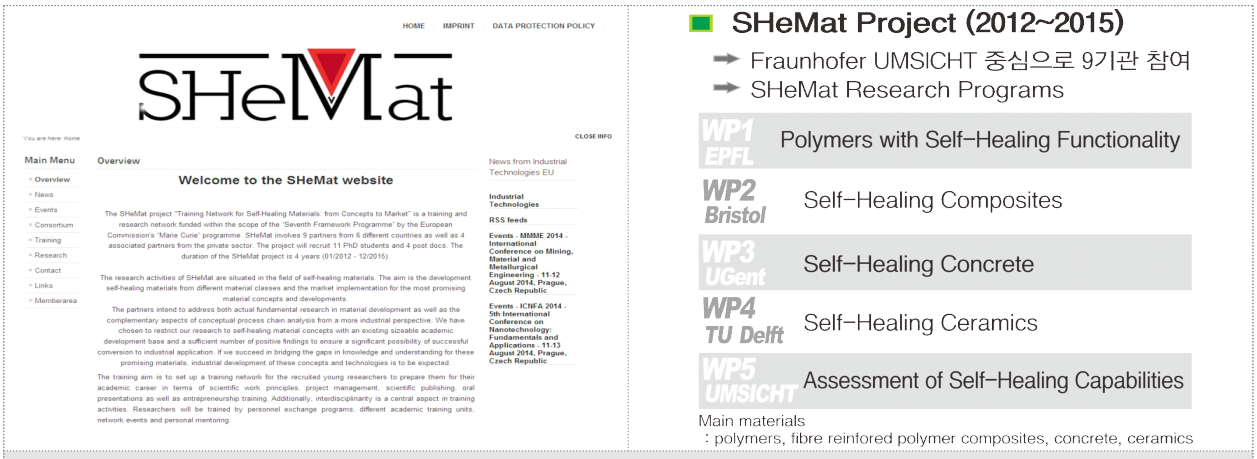


그림 6.3 SHeMat Project 홈페이지

Training Unit	Title	Lead
TU 1	Assessment of Self-Healing Capabilities	UMSICHT
TU 2	Trade-Off Analysis	TU Delft
TU 3	Scale-up and Industrial Processing	GKT
TU 4	Cost-Analysis	EPFL
TU 5	Sustainability Assessment	UMSICHT
TU 6	Standardization of Self-Healing Material	UGent
TU 7	Bioinspiration as a tool to novel technical solutions	PBG-F

그림 6.4 SHeMat Training-school Program

- Strategic Energy Technology Plan(2008)에 의하면 정책적 지원을 통해 조기 글로벌 경쟁력 확보가 가능한 지속가능한 건설, 바이오제품, 자원재활용, 재생가능 에너지 등을 선도시장으로 선정하였음.

  : 2020년까지 에너지 고효율 20% 제고, 온실가스 20% 감축, 재생에너지 20% 사용

  : 국가 R&D 예산의 12%를 지속가능발전 분야에 투자함.

- 유럽의 경우 환경, 에너지 그리고 자원개발 차원에서 범국가적인 과제로서 자원 리싸이클링에 관한 연구를 수행하고 있으며, 폐기물 재활용, 건축물 친환경/에너지절감 분야에 대한 다양한 기술개발을 진행하고 있음.

  : 시멘트 사용)량을 줄이기 위해 프랑스, 영국, 덴마크 등은 “Eco-Serve Network”를 결성함.

  : 기후협약에 따라 프랑스의 회사들이 2020년까지 시멘트 사용량을 20% 감축하기로 선언함.

  : 선진국에서는 혼화재료는 종래의 콘크리트에서는 생각할 수 없었던 특수 성능이나 고성능을 가지는 콘크리트의 실용화에 기여하고 있음.

  : 플라이애시를 사용한 수밀성 콘크리트 지침(영국)

  : 포졸란 재료를 활용한 구조물 설계 지침(네덜란드)

- 영국에서는 저탄소 지속가능 교통시스템 보고서를 통해, 온실가스 감축 및 기후변화 대응 및

구조물의 장수명화를 도모하여 환경 친환적인 구조물 건설을 추진하고 있음.

: 미래 세계건설시장에 경쟁우위를 확보하기 위해 “사회기반시설 혁신전략”을 마련함.

: IT와 나노 등 첨단기술과 융합한 건설 신자재 신기술개발 계획을 수립하여, 2030년까지 2,400억 유로 투자계획을 수립함.

- 덴마크에서는 정부기관인 무역산업부의 지원으로 덴마크 그린 콘크리트 센터에서 시멘트 생산업체, 국가연구기관, 대학(Technical University of Demark 외) 등이 참여하여 자원절약형 친환경 콘크리트 기술 개발 및 활용하기 위한 프로젝트를 수행(1998~2002)

: 주요 연구내용으로는 콘크리트의 환경부하 저감을 위한 기술개발로서 그린 시멘트 및 그린 콘크리트 개발, 그린 설계기법 및 그린 구조설계기법 개발 등이 있음.

- 유럽은 영국, 네덜란드, 스위스, 프랑스, 노르웨이 등 유럽 주요 국가들이 참여한 EUROCRETE 프로젝트를 통해 가혹 환경 하에 놓인 구조물의 내구성 향상 등에 대한 연구를 수행함.

다. IBRC

- IBRC(Innovative Bridge Research and Construction Program)에서 연간 약 157개의 프로젝트에 대하여 0.52억 달러의 연구비를 집행하고 있음.

: 이 프로그램은 구조물의 보수, 보강, 교체 및 신설 등과 관련한 연구를 포함하고 있음.

: 또한 유지관리 비용과 생애주기비용을 감소시키기 위하여 고성능 재료와 시공기법의 개발에 초점을 맞추고 있음.

- ASCE에 의하면 미국의 인프라수준이 D등급에 불과하며, 2020년까지 인프라 개선에 3조 6천억불이 필요할 것으로 예상함.

: 미국의 인프라는 노후화 대비 실패, 자연재해와 테러공격, 보수와 개량을 위한 재원 부족, 유지/보수 및 개선을 위한 향상된 기술이 부족한 상태임.

: 건설 선진국인 미국, 유럽 및 일본 등에서는 기존의 재료보다 성능이 우수한 재료를 적용하여 고품질화 고내구성을 지향하고 있으며, 이는 초기 비용은 증가되지만 수명이 연장되고 유지관리비용이 절약되므로 생애주기비용 측면에서 보다 유리함.

- 미시간대학에서는 토목공학 및 재료공학, 산업생태학, 환경경제학, 지질공학, 환경보건학 분야에 걸친 다학제적 협력 과제인 “Sustainable concrete infrastructure materials and systems-developing an integrated life cycle design framework"를 수행(2003~2008)

: 주요 연구내용으로는 콘크리트의 대체 재료로서의 고인성 섬유보강 시멘트 복합체의 일종인 ECC(Engineered Cementitious composites)의 설계 및 적용, 지속 가능한 인프라의 구축 등이 있음.

라. Innovation 25

- 일본의 Innovation 25는 제3차 과학기술 기본계획을 바탕으로 2025년까지의 장기 전략임.

  : 5가지 목표 중 Safe and Secure Society가 본 기획과 가장 밀접하며 아래와 같은 세부내용을 포함하고 있음.

  - 사회 및 국민의 안전을 제공하기 위한 센싱 모니터링 분야
  - 장수명을 위한 고강도 재료 및 자기치유 관련 기술 분야
  - 지능형 교통 시스템을 통한 혼잡 및 차량사고 감소를 통한 CO_2 배출 및 유통비용 절감

  : 일본의 주요 R&D정책은 '안전 · 안심한 사회와 실현', '그린 이노베이션에 의한 지속가능한 사회의 실현', '사회자본의 유지관리 · 장수명화' 등을 목표로 설정하고 이에 대한 연구를 많이 수행하고 있음.

- '저탄소 사회구현을 위한 국가행동계획(2008)' 수립

  : 2050년까지 60~80% 온실가스 감축 목표를 제시하고, 이를 위한 에너지 자립·장수명 주택 등 핵심기술 개발 추진

  : NEDO에 의해 고효율 건물에너지 시스템 도입(15~25% 이상 에너지 절감)시 도입비용의 1/3까지 보조금 지급

  : 환경행동계획 2008을 수립하여 CO_2 삭감 은행, 친환경 대출 등을 통해 시민들의 자발적 CO_2 감축 노력을 유도

마. SARCOS

- SARCOS(Self-healing As prevention Repair of COncrete Structures)는 신규뿐만 아니라 기존 사회기반시설의 사용기한을 연장하기 위해 자기치유 기술을 개발하는 프로젝트로 COST의 지원을 받아 진행되고 있음.

  : COST는 유럽의 연구 네트워크를 유지하기 위한 협회로 1969년 'European centre fore medium-range weather forecast'를 시작으로 현재 1,426개의 프로젝트를 지원하였음.

  : 연구기간은 2016년 9월 30일에 시작되었음.

  : 벨기에, 덴마크, 프랑스, 독일 등 28개 국가의 연구기관에서 참여하여 자기치유 관련 기술을 개발하고 있음.

  : 연구목표는 다음과 같음.

  - Working Group-1 : 자기치유 콘크리트 구조물의 보수공법
  - Working Group-2 : 치유성능 및 내구성능 평가 방법 및 표준 제작
  - Working Group-3 : 자기치유 및 공용기간 예측을 위한 모델링 개발

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

(1) 유·무기계 재료

- Ahn, T. H., Kishi, T. (2010). Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures. Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), 171-186.
- Bergman, S. D., Wudl, F. (2008). Mendable polymers. Journal of Materials Chemistry, 18(1), 41-62.
- Birajdar, M. S., Halake, K. S., Lee, J. (2018). Blood-clotting mimetic behavior of biocompatible microgels. Journal of Industrial And Engineering Chemistry, 63, 117-123.
- Blaiszik, B. J., Kramer, S. L. B., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., Sottos, N. R., White, S. R. (2010). Self-healing Polymers and Composites. Annual Review of Materials Research, 40, 179-211.
- Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-cabot, G., Chanvillard, G. (2007). Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material : mechanical tests and acoustic emission analysis, Cem. Concr. Res., 37, 519 - 527.
- Haoliang, H., Guang, Y. (2015). Self-healing of cracks in cement paste affected by additional ca^{2+} ions in the healing agent, Journal of Intelligent Material System and Structure, 26(3), 309-320.
- Qiu, J., Tan, H. S., Yang, E. H. (2016). Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on autogenous healing of engineered cementitious composites, Cem. Concr. Compos., 73, 203 - 212.
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., Koenders, E. A. B. (2012). Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additives and crystalline additive, Cement and Concrete Composites, 34, 566-574.
- Stuckrath, C., Serpell, R., Valenzuela, L. M., Lopez, M. (2014). Quantification of chemical and biological calcium carbonate precipitation: Performance of self-healing in reinforced mortar containing chemical admixtures. Cement and Concrete Composites, 50, 10 - 15.
- Snoeck, D. (2015). Self-healing and microstructure of cementitious materials with microfibres and superabsorbent polymers, PhD Thesis, Ghent University, 364.
- Snoeck, D., Tittelboom, K. V., Steuperaert, S., Dubruel, P., Belie, N. D. (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. J. Intel. Mat. Syst. Str. 25, 13 - 24.
- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S. (2001). Autonomic Healing of Polymer Composites. Nature, 409(6822), 794.

▢ Wu, D. Y., Meure, S., Solomon, D. (2008). Self-Healing Polymeric Materials: A Review of Recent Developments. Progress in Polymer Science, 33(5), 479-522.

▢ Xiao, D. S., Yuan, Y. C., Rong, M. Z., Zhang, M. Q. (2009). Self-Healing Epoxy Based on Cationic Chain Polymerization. Polymer, 50(13), 2967-2975.

▢ Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E. H., Li, V. C. (2009). Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet - dry cycles. Cem. Concr. Res., 39, 382 - 390.

(2) 박테리아

▢ Basaran Bundur, Z., Kirisits, M. J., Ferron, R. D. (2015). Biomineralized cement-based materials: impact of inoculating vegetative bacterial cells on hydration and strength. Cement and Concrete Research, 67, 237 - 245.

▢ Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., Perthuisot, J. P. (1999). Ca-carbonates precipitation and limestone genesis - the microbiogeologist point of view. Sedimentary Geology, 126(1 - 4), 9 - 23.

▢ De Muynck, W., Cox, K., Belie, N. D., Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. Construction and Building Materials, 22(5), 875 - 885.

▢ De Muynck, W., Debrouwer, D., Belie, N. D., Verstraete, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. Cement and Concrete Research, 38(7), 1005 - 1014.

▢ Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B. D., Pal, S. (2005). Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. Cement and Concrete Research, 35(10), 1980 - 1983.

▢ Jonkers, H. M. (2007). Self healing concrete: a biological approach, 195 - 204.

▢ Jonkers, H. M., Schlangen, E. (2007). Self-healing of cracked concrete: a bacterial approach. 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 3, 1821 - 1826.

▢ Ramakrishnan, V., Bang, S. S., Deo, K. S. (1998). A novel technique for repairing cracks in high performance concrete using bacteria. In Proc. of the Int. Conf. on HPHSC, 597 - 618.

▢ Tambutte E., Tambutte S., Segonds N., Zoccola D., Venn A., Erez J., Allemand D. (2011). Calcein labelling and electrophysiology: insights on coral tissue permeability and calcification, Proceedings of The Royal Society B, 279(1726), 19-27.

▢ Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. Cement and Concrete Composites, 33(7), 763 - 770.

▢ Zhang J. L., Wang C. G., Wang Q. L., Feng J. L., Pan W., Zheng X.C., Liu B., Han N.X.,

Xing F., Deng X. (2016). A binary concrete crack self-healing system containing oxygen-releasing tablet and bacteria and its Ca^{2+}-precipitation performance. Applied Microbiology and Biotechnology, 100(24), 10295-10306.

(3) 캡슐

▢ Archady, R. (1999). Microspheres, microcapsules & liposomes, Vol. 1, London, Citus Limitid.

▢ Benita, S. (1996). Microencapsulation: methods and industrial applications. Marcel Dekker, Inc., New York.

▢ Blaiszik, B. J., Sottos, N. R., White, S. R. (2008). Nanocapsules for self-healing materials. Composites science and technology, 68(3-4), 978 - 986.

▢ Chung, C. M. et. al. (2013). Sunlight-induced self-healing of a microcapsule-type protective coating. Journal of American Chemical Society, 1378-1384.

▢ Hunger, M,. Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H., Founti, M. (2009). The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials. Cement and Concrete Composites, 31(10), 731 - 743.

▢ Lim, F., Sun, A. M. (1980). Microencapsulated islets as bioartificial endocrine pancreas. Science, 210(4472), 908-910.

▢ Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H. and Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. Applied Energy, 139, 43 - 55.

▢ Mostavi, E., Asadi, S., Hassan, M. M., Alansari, M. (2015). Evaluation of self-healing mechanisms in concrete with double-walled sodium silicate microcapsules. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(12).

▢ Nesterova, T., Dam-Johansen, K., Pedersen, L.T., Kiil, S. (2012). Microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings: capsule size, coating formulation, and exposure testing. Progress in Organic Coatings, 75(4), 309 - 318.

▢ Park S. J., Shin Y. S., Lee J. R. (2001). Preparation and characterization of microcapsules containing lemon oil. Journal of colloid and interface science, 241(2), 502-508.

▢ Pavanetto, F., Conti, B., Genta, I., Giunchedi, P. (1992). Solvent evaporation, solvent extraction and spray drying for polylactide microsphere preparation. International Journal of Pharmaceutics, 84(2), 151-159.

▢ Pillay, V., Dangor, C. M., Govender, T., Moopanar, K. R., Hurbans, N. (1998). Ionotropic gelation: encapsulation of indomethacin in calcium alginate gel discs. Journal of

microencapsulation, 15(2), 215-226.

▢ Song, Y. K., Jo, Y. H., Lim, Y. J., Cho, S. Y., Yu, H. C., Ryu, B. C., Chung, C. M. (2013). Sunlight-Induced Self-Healing of a Microcapsule - Type Protective Coating. ACS applied materials & interfaces, 5(4), 1378-1384.

▢ Takenaka, H., Kawashima, Y., Lin, S. Y. (1981). Polymorphism of spray dried microencapsulated sulfamethoxazole with cellulose acetate phthalate and colloidal silica, montmorillonite, or talc. Journal of Pharmaceutical Sciences, 70(11), 1256-1260.

▢ Tan, N. P. B., Keung, L. H., Choi, W. H., Lam, W. C., Leung, H. N. (2016). Silica based self healing microcapsules for self repair in concrete. Journal of Applied Polymer Science, 133(12).

▢ Trask, R. S., Williams, G. J., Bond, I. P. (2007). Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres. Journal of the royal society Interface, 4(13), 363-371.

▢ Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z. (2013). Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules. Materials, 6(9), 4064-4081.

▢ Yang, Z., Hollar, J., He, X., Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules. Cement and Concrete Composites, 33(4), 506-512.

▢ Yao, K. D., Peng, T., Yin, Y. J., Xu, M. X., Goosen, M. F. (1995). Microcapsules/microspheres related to chitosan. Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews, 35(1), 155-180.

▢ Yuan, Y. C., Rong, M. Z., Zhang, M. Q., Chen, J., Yang, G. C., Li, X. M. (2008). Self-healing polymeric materials using epoxy/mercaptan as the healant. Macromolecules, 41(14), 5197-5202.

▢ Yang, Z., Hollar, J., He, X., Shi, X. (2011). A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules, Cem. Concr. Compos., 33, 506 - 512.

※ 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.