19SCIP-B103736-05

자기치유형친환경콘크리트기술개발 최종보고서 2020 국토교통부 국토교통과학기술진흥원

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

R&D / 19SCIP-B103736-05

자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발 최종보고서(3세부)

2020. 4. 21

협동연구기관 / 성균관대학교 산학협력단
공동연구기관 / 충남대학교 산학협력단
울산과학기술원
위탁연구기관 / 한국교통대학교 산학협력단
Ghent University
Delft University of Technology

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 : 성균관대학교 산학협력단 (추현승)
공동연구기관명 : 충남대학교 산학협력단 (김승범)
울산과학기술원 (이용훈)

위탁연구기관명 : 한국교통대학교 산학협력단 (전문수)
Ghent University
Delft University of Technology

협동연구기관책임자 : 이광명
공동연구기관책임자 : 신경준
신명수

위탁연구기관책임자 : 장승엽
Nele De Belie
Erik Schlangen

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라
최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>19SCIP-B103736-05</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td colspan="2">2019. 01. 01-2020. 02. 13</td><td>단계구분</td><td>(5차년도)/(5차년도)</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="6">건설기술연구사업</td></tr>
<tr><td>주관연구과제명</td><td colspan="6">자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발</td></tr>
<tr><td>협동연구과제명</td><td colspan="6">자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 전략</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이광명</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 44명
내부: 44명
외부: 명</td><td>해당단계 연구비</td><td colspan="2">정부: 1,504,000 천원
민간: 0 천원
정부외: 40,700 천원
계: 1,544,700 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 173명
내부: 173명
외부: 명</td><td>총 연구비</td><td colspan="2">정부: 5,262,000 천원
민간: 0 천원
정부외: 160,550 천원
계: 5,422,550 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관</td><td colspan="3">연구기관명 :
성균관대학교 산학협력단
충남대학교 산학협력단
울산과학기술원</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:
한국교통대학교 산학협력단
Ghent University
Delft University of Technology</td><td colspan="3">연구책임자:
장승엽
Nele De Belie
Erik Schlangen</td></tr>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허		보고서 원문	연구시설・장비	기술요약정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
		출원	등록						생명정보	생물자원	정보	실물
등록・기탁번호	31	8	7	20	-	-	1	-	-	-	-	-

보고서 면수 100

<table>
<tr><td>연구개발목표</td><td colspan="5">• 본 연구개발과제는 콘크리트 구조물의 장수명화 및 유지관리 최소화가 가능한 자기치유 선도 기술 개발을 최종목표로 함.
• 이를 달성하기 위한 세부 목표는 다음과 같음.
– 자기치유형 콘크리트 성능 평가 표준화 기술 개발</td></tr>
<tr><td>연구개발내용</td><td colspan="5">[3세부] 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 전략
• 자기치유 콘크리트 성능평가 표준화 기술 개발
• 비파괴시험 기반 자기치유 성능평가 기술 개발</td></tr>
<tr><td>연구개발성과
(핵심성과)</td><td colspan="5">[3세부] 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 전략

• 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술 개발
– 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술
– 지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축

• 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기술 개발
– 반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술

• 비파괴시험 기반 자기치유 성능 평가 기술 개발
– 비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술
– 비파괴시험 기반 균열면 내구성 복원 성능 평가 기술</td></tr>
<tr><td>활용계획 및
기대효과</td><td colspan="5">[활용 계획]
• 원전, 터널, 지하구조물 등 유지보수가 어려운 사회기반 시설물에 활용
• 다양한 구조물에 활용 가능한 기능성 건설 소재의 생산성 향상과 적용기술 개발에 활용 가능
• 복합 열화로 지속적인 손상이 발생하는 도로 포장 콘크리트에 활용
• 친환경 프리캐스트 제품 또는 레미콘, 높은 내열화 성능이 요구되는 구조물에 반응제어형 자기치유 콘크리트 활용

[기대효과]
• 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고 수준 기술 확보를 위한 초석 마련
• 자기치유형 기술을 접목함으로써 기존 친환경 콘크리트의 성능한계를 극복하고 건설 현장에서의 실용화 가능성 증대
• 자기치유형 친환경 콘크리트 개발을 통하여 구조물의 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, $LCCO_2$ 30% 감소
• 균열 자기치유 기술 적용으로 성능저하가 발생하지 않으므로 지속가능한 콘크리트 구조물 건설 가능</td></tr>
<tr><td>중심어
(5개 이내)</td><td>자기치유</td><td>균열제어</td><td>반응제어</td><td>성능 평가</td><td>표준화</td></tr>
</table>

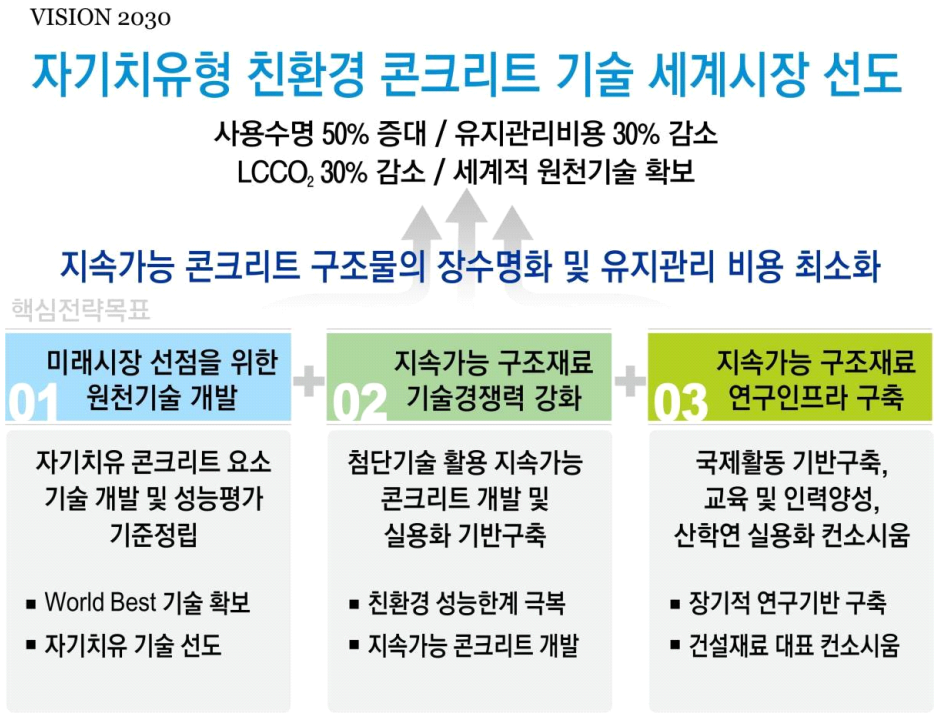
〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술개발 현황 ····· 13
3. 연구수행내용 및 성과 ····· 21
3-1. 연구수행 내용 ····· 21
3-2. 연구 성과 ····· 72
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 80
4-1. 목표 달성도 ····· 80
4-2. 관련 분야 기여도 ····· 85
5. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 89
6. 연구과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 92
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 95
8. 국가과학기술종합시스템에 등록한 연구시설·장비현황 ····· 95
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적 ····· 96

붙임. 참고 문헌 ····· 98

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 최종 목표



① 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.

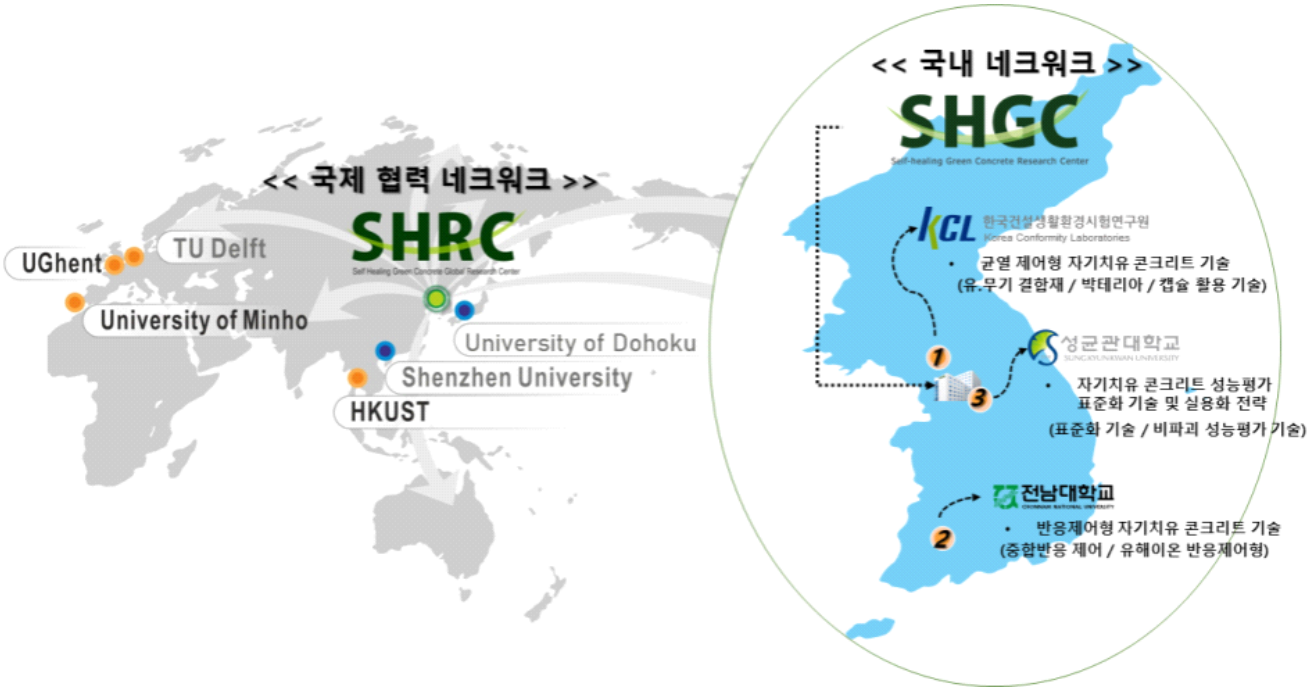
② 지속가능 구조재료 기술경쟁력 강화

- 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.

③ 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 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 연구개발과제의 최종 목표는 “콘크리트 구조물의 장수명화 및 유지관리 최소화가 가능한 자기치유 선도 기술개발”로 이를 달성하기 위한 핵심 세부 목표는 자기치유형 콘크리트 성능평가 표준화 기술개발임.
- 최종 목표를 달성하기 위하여 자기치유 친환경 콘크리트 분야의 Control Tower인 R&D 연구센터를 구축하고 국내외 연구 네트워크를 통하여 효율적인 연구 수행을 추진하였음.

3세부 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 전략

- [3-1] 자기치유 콘크리트 성능평가 표준화 기술 개발
  - 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술 개발
    : 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술
    : 지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축
  - 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기술 개발
    : 반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술

- [3-2] 비파괴시험 기반 자기치유 성능평가 기술 개발
  - 비파괴시험 기반 자기치유 성능 평가 기술 개발
    : 비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술
    : 비파괴시험 기반 균열면 내구성 복원 성능 평가 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

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

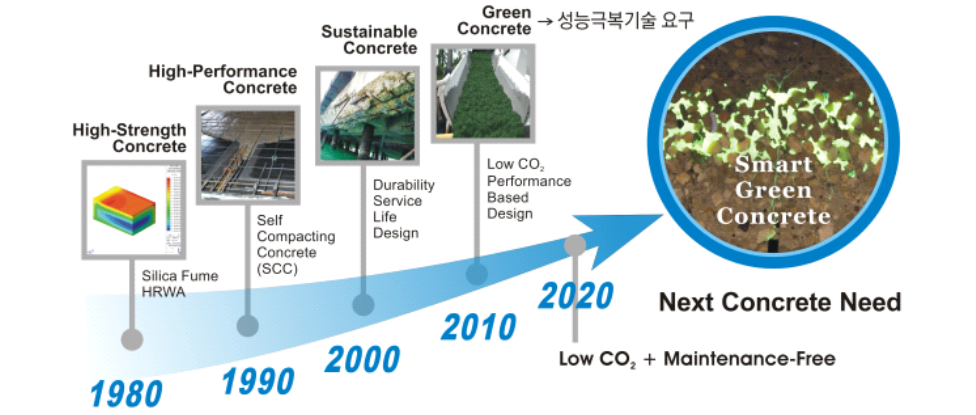


그림 1.1 시대별 콘크리트 기술 발전 변천사

② 연구개발과제의 추진목적

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

- 첨단 하이테크 기술 : 바이오(Bio), 나노(Nano), 폴리머(Smart-Polymer) 등의 새로운 소재의 기능을 활용하여 콘크리트에 자기치유 성능을 부여하는 기술
- 자기치유형 친환경 콘크리트 : 스스로 균열 및 열화를 치유하여 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, 생애주기CO_2 배출량 30% 감소를 달성할 수 있는 지속가능 콘크리트

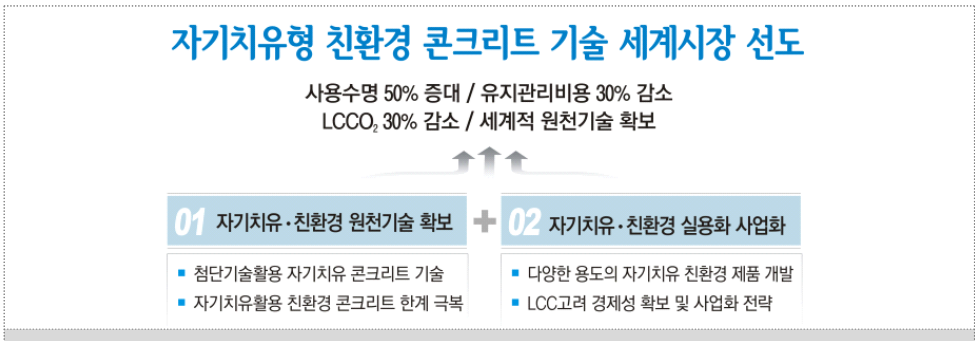


그림 1.2 연구개발 추진 목적

(2) 연구개발의 중요성

① 기술개발의 필요성

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

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

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

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

- 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.

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

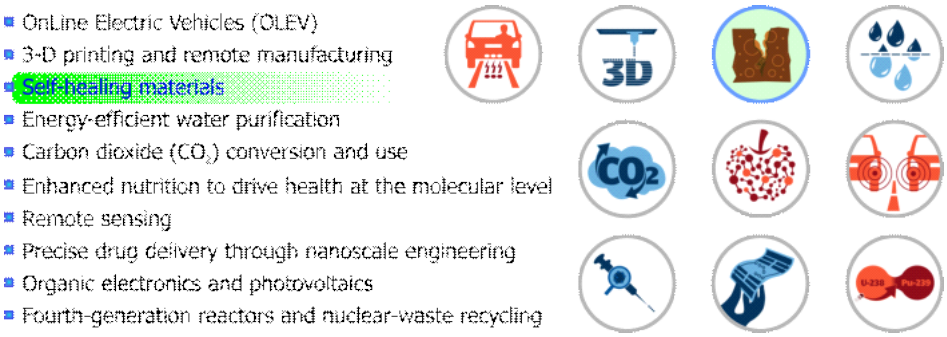


그림 1.3 World Economic Forum – 2013년 10대 유망기술

- 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)

: Ghent University, Avecom, TU Delft, Acciona, TUM, TTI, VTT, COWI, DTI, CEINNMAT, Devan and Fescon 등 유럽 12개 기관이 참여한 EU-FP7 HealCON 프로젝트 (2013~2017, “Self-healing materials for prolonged lifetime”) 완료됨.

: 벨기에, 덴마크, 프랑스, 독일 등 28개 국가의 연구기관 참여한 “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.

- 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

- 친환경 건설재료 분야 기술선점

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

: 기존 연구의 틀을 벗어나 반응메커니즘 분석 및 이를 활용한 고로슬래그 개질과 결합재 혼합 시스템 개발 등의 반응제어 기술은 무시멘트 기술의 세계최고 수준 및 표준이 될 수 있으며, 현장 적용 및 실용화에 가장 적합한 시멘트 대체 기술로써 무시멘트 분야 기술의 세계 선도를 위해 이에 대한 연구가 필요함.

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.

- 자기치유 기술은 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 확보가 가능한 분야로 건설산업의 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 개발하며, 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

  : 벨기에 겐트대학 Belie 교수팀과 지속적인 상호 교류를 통해 자기치유 기술개발 및 성능평가 분야에 대한 협력 연구를 수행함.

  ※ 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 신뢰를 바탕으로 한 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 수준은 TRL 5, 6단계로 그림 1.4와 같음.

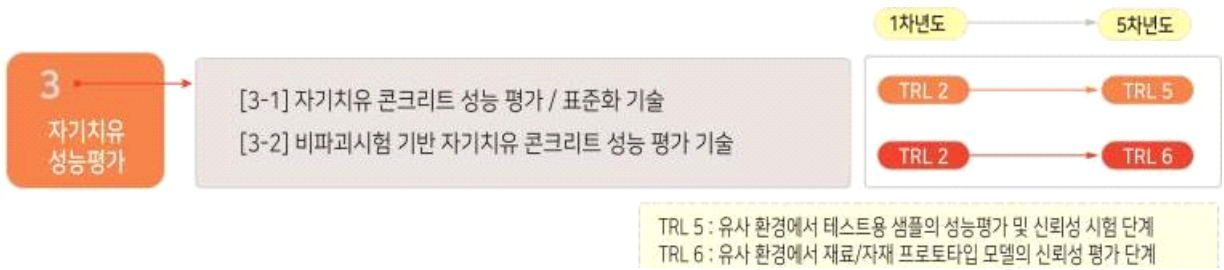


그림 1.4 연구개발의 기술 수준

- 2단계 자기치유 실용화 계획에서 자기치유 콘크리트 활용 기술 개발에 대한 실증시험을 통하여 종합적인 검증안을 수립하고 있음.

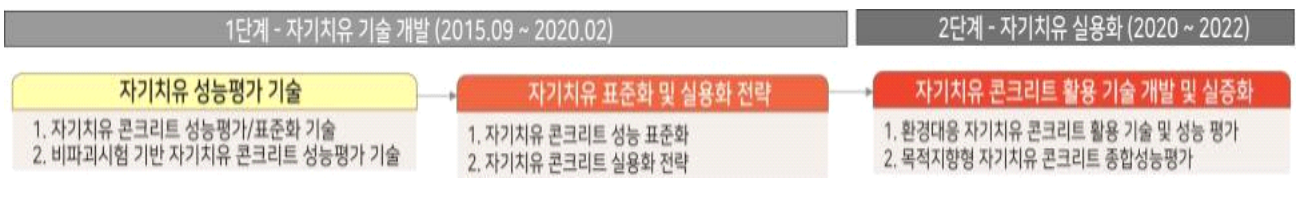


그림 1.5 연구개발의 2단계 계획

라. 연구개발의 세부내용 및 범위

(1) 1차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(성균관대학교 산학협력단) : [3-1-1] 균열 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화 기술개발
- 공동연구기관(충남대학교 산학협력단) : [3-1-2] 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능평가 기술개발
- 공동연구기관(울산과학기술원) : [3-2] 비파괴시험 기반 자기치유 성능평가 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
주관 - 성균관대	균열 자기치유 콘크리트 기초 성능평가 기술	• 균열의 정량적 평가기법 정립 - 균열 물성의 정량적 평가 방법 분석 (균열 폭, 깊이 등) • 균열유발 제어기술 도출 - 목표 균열폭을 유도하기 위한 시험 방법 분석 및 제안
공동 - 충남대	반응제어형 자기치유 기초성능 평가기술	• 무시멘트 콘크리트의 경화과정 평가기법 정립 - 중합/수화 반응의 평가 방법 분석 - 미세구조의 평가 방법 분석
공동 - UNIST	균열 크기 변화 측정 기술	• 자기치유 콘크리트 적용 영상 기반 균열 폭 측정 기술의 보완 사항 도출 • 자기 치유 콘크리트 적용 표면탄성파 기반 균열 깊이 측정 기술의 보완 사항 도출 • 콘크리트 내구성 평가를 위한 확산초음파 및 동특성추정 기술의 보완 사항 도출

(2) 2차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (성균관대학교 산학협력단) : [3-1-1] 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 제안
- 공동연구기관 (충남대학교 산학협력단) : [3-1-2] 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 제안
- 공동연구기관 (울산과학기술원) : [3-2] 비파괴시험 기반 콘크리트의 균열특성 평가 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
주관 – 성균관대	콘크리트 시편의 균열제어 기법 정립	• 목표 균열폭 유도를 위한 시험 방법 검증 – 휨구속 조건, 균열폭 유지
	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 제안	• 균열 자기치유 성능 평가 시험방법 분석 – 균열의 미세구조 평가 – 투수시험에 의한 평가 – 하중재하에 의한 평가 • 균열 자기치유 성능평가 기법 제안
	지속적인 연구개발 및 글로벌 네트워크 기반 확보	• 센터 운영 활성화 • 과제간 상호 연계· 협력 강화 • 글로벌 협력 네트워크 확대 • 글로벌 전문인력 양성을 위한 기반 구축
공동 – 충남대	반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능평가 기술 개발	• 콘크리트 반응제어 성능의 평가 기법 분석 – 수축현상의 측정방법 분석 및 검증 – 역학적 시험 방법에 의한 성능 평가 • 반응제어 콘크리트의 성능평가 기법 제안
공동 – UNIST	이미지 스캐닝 기반 균열폭 측정 기술 개발	• 균열폭 측정을 위한 이미지 스캐닝 기술 개발 – 균열 식별 및 식별된 균열의 위치와 폭 측정 알고리즘 개발 – 무균열부 영상(박리, 얼룩 등)에서 균열부 식별 알고리즘 개발 – 균열폭 측정을 위한 영상처리에 사용되는 매개변수 최적화
	표면탄성파 기반 균열깊이 측정 기술 개발	• 표면탄성파 기반 콘크리트의 균열특성 평가 – 균열깊이 차이에 따른 표면탄성파 신호의 거동 특성 분석 – 균열깊이 차이에 민감한 표면탄성파 파라미터 도출 – 표면탄성파 파라미터와 균열깊이의 상관관계 분석 • 표면탄성파 기반 콘크리트의 균열특성 평가 기법 제안

(3) 3차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (성균관대학교 산학협력단) : [3-1-1] 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 정립
- 공동연구기관 (충남대학교 산학협력단) : [3-1-2] 반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 제안
- 공동연구기관 (울산과학기술원) : [3-2] 비파괴시험 기반 균열 치유성능 평가 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
주관 – 성균관대	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 검증 및 정립	• 균열 자기치유 콘크리트의 투수시험과 하중재하시험 방법 검증 – 적정성 및 신뢰도 평가 – 시험 프로세스 제안 • 제안된 자기치유 성능평가 시험방법 정립 – 투수시험법, 역학적 시험법 규격 작성
	균열 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가방법 제안	• 균열 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가방법 분석 – 이온 확산 시험 / 탄산화 시험 • 균열 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가방법 제안
	전문 연구센터로의 자립기반 마련	• 전문 연구센터 기반 조성 • 센터 기술이전 시스템 기반 구축 • 글로벌 전문인력 양성 프로그램 구축
공동 – 충남대	반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 검증 및 정립	• 반응제어형 콘크리트의 수축 및 역학적 시험법 검증 – 적정성 및 신뢰도 평가 – 시험 프로세스 제안
	반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 제안	• 반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 방법 분석 – 염소이온 확산 시험 / 탄산화 시험 • 반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가방법 제안
공동 – UNIST	비파괴시험 기반 균열 치유성능 평가 기술 개발	• Computer vision 기법을 활용한 균열폭 평가 모델 개발 – 균열면적 계측 기술 개발 및 면적 변화의 해상도 분석 – 균열 크기 감소 평가를 위한 지수 제안 – Computer vision 기반 균열폭 감소 평가 방법 및 절차 제안 • 표면탄성파 파라미터를 활용한 균열깊이 평가 모델 개발 – 자기치유에 따른 균열깊이 평가 방법 및 절차 제안 – 도출된 평가 기법의 정확성 평가를 위한 blind test 수행
	비파괴시험 기반 콘크리트 내구성능 평가 기술 분석	• 균열면의 확산초음파 전달 특성 및 파라미터 분석 • 확산초음파 기반 콘크리트 투수성 평가 기술 분석 – 자기치유에 따른 균열면의 투수성 변화 특성 분석 – 콘크리트 투수성 차이에 민감한 확산초음파 파라미터 도출 • 확산초음파 기반 콘크리트 염소이온 확산성 평가 기술 분석 – 자기치유에 따른 균열면의 염소이온 확산성 변화 특성 분석 – 콘크리트 염소이온 확산성차이에 민감한 확산초음파 파라미터 도출

(4) 4차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관 (성균관대학교 산학협력단) : [3-1-1] 균열 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 정립
- 공동연구기관 (충남대학교 산학협력단) : [3-1-2] 반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 정립
- 공동연구기관 (울산과학기술원) : [3-2] 비파괴시험 기반 균열면 내구성능 평가 기술 개발

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
주관 – 성균관대	균열 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 검증 및 정립	• 제안된 이온확산시험의 정립 • 전기전도도 측정을 통한 내구성능 평가기법 개념 제안 – 전기전도도-확산계수 관계식을 이용한 확산계수 산정 방법 분석 – 확산계수 감소율 및 자기치유율 산정방안 제시 – 전기전도도 측정장치 구성방안 제시
	부재 단위 균열 자기치유 콘크리트 평가 기술 제안	• 부재단위 균열 자기치유 성능 평가를 위한 방법 분석 – 투수시험 및 역학적 시험에 의한 평가 • 부식실험을 이용한 자기치유 콘크리트 내구성능 평가기법 제안 – 매크로셀 부식 실험 관련 문헌 조사 및 구성·분석 방법
	글로벌 네트워크 활성화 및 연구성과 확산	• 전문 연구센터 운영 활성화 • 기술 및 성과의 지속적 공유와 확산 – 자기치유 기술의 경제성 분석 – 기존 개발기술(자기치유, 보수재료 등)에 대한 치유 성능 평가 수행 • 연구개발 성과 사업화 시스템 기반 구축 • 글로벌 전문인력 양성 프로그램 운영 및 활성화
공동 – 충남대	반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 검증 및 정립	• 반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 검증 – 적정성 평가 및 평가 기법의 신뢰도 평가 – 철근 등 보강재 사용에 따른 시험 방법 제안
	반응제어형 자기치유 콘크리트의 부재 단위 평가 기술 제안	• 부재단위 성능 평가를 위한 방법 제안 – 역학적 시험에 의한 평가
공동 – UNIST	비파괴시험 기반 균열 치유성능 평가 체계 정립	• 비파괴시험 기반 성능 평가 기법 표준화(안) 정립 – 이미지스캐닝 기반 자기치유 콘크리트의 균열폭 치유 평가 기법 – 표면탄성파 기반 자기치유 콘크리트의 균열깊이 치유 평가 기법
	비파괴시험 기반 균열면 내구성능 복원 평가 기술 개발	• 확산초음파를 활용한 자기치유 콘크리트의 투수계수 평가 모델 개발 – 균열면 투수성과 확산초음파 파라미터의 상관관계 분석 – 확산초음파 기반 투수계수 추정 방법 및 절차 제안 – 도출된 모델의 정확성 평가를 위한 Blind test 수행 • 확산초음파 활용 자기치유 콘크리트의 염소이온 확산계수 모델 개발 – 균열면 염소이온 확산성과 확산초음파 파라미터의 상관관계 분석 – 확산초음파 기반 염소이온 확산계수 추정 방법 및 절차 제안 – 도출된 모델의 정확성 평가를 위한 blind test 수행

(5) 5차년도

① 개발 목표

- 주관연구기관(성균관대학교 산학협력단) : [3-1-1] 균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 표준화 및 실용화 전략
- 공동연구기관(충남대학교 산학협력단) : [3-1-2] 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 표준화
- 공동연구기관(울산과학기술원) : [3-2] 비파괴시험 기반 성능 평가 기법 표준화(안)

② 개발 내용 및 범위

구분	개발 내용	범 위
주관 - 성균관대	부재 단위 균열 자기치유 콘크리트의 평가 기술 정립	• 부재단위 균열 자기치유 성능평가를 위한 방법 검증 및 정립 - 제안된 부재 시험법의 검증, 실외 환경 Mock-up 실험
	균열 자기치유 콘크리트의 성능평가 기법 표준화	• 자기치유 내구성능 평가기법 검증 및 보완 - 전기전도도 측정기법 및 이온확산시험을 이용한 치유성능 평가 - 자기치유 평가기법의 적용 타당성 분석 • 자기치유 콘크리트의 성능 평가 지침 확립 - 관련 지침 제안을 통한 단체 표준화 추진
	센터의 지속적인 자립기반 구축	• 기술 및 성과의 지속적 공유와 확산 - 자기치유 콘크리트 실용화 계획 수립 • 자기치유 성능인증 센터의 운영 지침 - 자립화를 위한 기술 인증제도 기반 구축
공동 - 충남대	반응제어형 자기치유 콘크리트의 부재 단위 평가 기술 정립	• 부재단위 반응제어 자기치유 성능평가를 위한 검증 및 정립 - 제안된 부재 시험법의 검증 - 실외 환경에서 부재 시험
	반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능평가 기법 표준화	• 자기치유 콘크리트의 성능 평가 지침 확립 - 실내-실외 시험 결과와 비교 검증 - 관련 지침 제안을 통한 단체 표준화 추진
공동 - UNIST	자기치유 콘크리트의 부재수준 성능평가 기술 개발	• 자기치유 콘크리트의 부재수준 성능평가 기술 개발 - 대형부재에 대한 비파괴 성능평가 기술 개발 - 대형부재 mock-up 실험을 통한 자기치유 성능 평가 기술 검증
	비파괴 성능 평가기법 표준화(안) 정립	• 자기치유 성능 비파괴 평가기법 표준화(안) 정립 - 확산초음파 기반 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법

2. 국내외 기술개발 현황

가. 기술개발 동향

(1) 투수시험에 의한 자기치유 성능 평가방법

- 투수시험은 치유성능을 직관적으로 평가할 수 있어 가장 대중적으로 사용되고 있음. 투수시험의 종류는 크게 변수위 투수시험과 정수위 투수시험으로 구분할 수 있음.

: Aldea *et al.*(1999)와 Wang *et al.*(1997)은 변수위 투수시험에 사용되는 시험장치와 시험방법에 대하여 제안하였음. 시험에 사용되는 시험체 제작과정은 원주형 공시체 에폭시수지와 PVC링을 이용하여 시험체를 제작하였음. 이후 시험 중 시험체에 물이 흡수되는 것을 방지하기 위하여 진공포화과정을 통하여 전처리과정을 거침. 전처리 과정을 마친 시험체의 윗면과 아랫면에 물이 차있는 파이프를 부착하여 시간경과에 따른 수위 감소량을 확인하였음.

: Edvarsen (1999)은 콘크리트 시험체에 수압이 가하도록 하여 균열로부터 발생하는 유출수량에 대하여 연구를 수행하였음.

: 이를 토대로 최근 종료된 유럽의 Healcon 프로젝트에서 투수시험을 개발하였음. Healcon에서 제안한 투수시험 방법은 시험체 내부에 5 mm의 중공관을 갖는 40×40×160 mm의 각주형 시험체에 3점 재하 방식에 의한 휨 균열을 유도하여 시험체를 제작함. 이 시험체에 일정한 수위를 갖는 수조를 이용하여 시험체 내부로 물을 유입하여 유출되는 수량을 측정하여 치유재령 경과에 따른 유출수량 감소율을 평가하였음.

: 투수시험에 의한 치유율 산출 방법은 2가지로 구분할 수 있음. 첫 번째로 치유되지 않은 시험체를 이용하는 경우와 두 번째로 동일한 시험체를 사용하여 치유 전·후의 유출수량을 비교하는 방법임.

$$SH_1 = \frac{W_{unhealed} - W_{healed}}{W_{unhealed}} \tag{2.1}$$

$$SH_2 = \frac{W_{first} - W_{final}}{W_{first}} \tag{2.2}$$

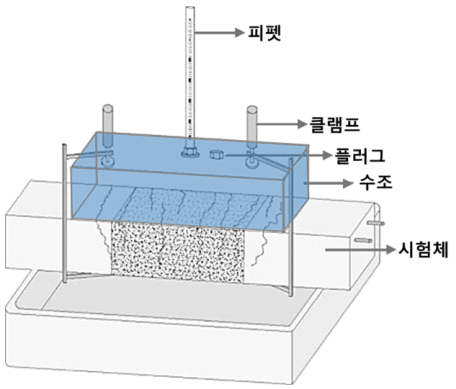


그림 2.1 변수위 투수시험

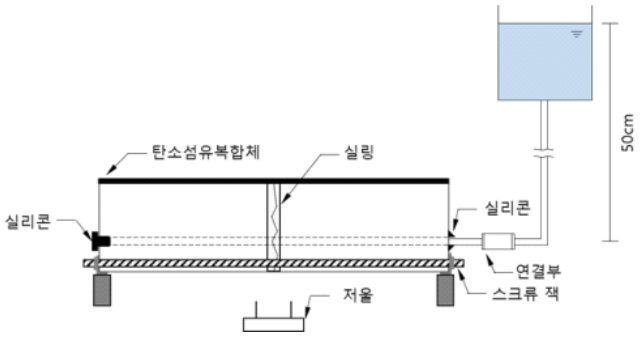


그림 2.2 정수위 투수시험

(2) 내구성 시험에 의한 자기치유 성능 평가방법

- 고압의 가스를 시멘트계 시편에 투과시켜 내구성을 평가하는 실험이 Talah (2013)과 Meziani and Skoczylas (1999)에 의하여 수행되었음.

  : 물을 활용한 실험의 경우 유입되는 물에 의한 팽창현상과 수화반응에 영향을 미치지만, 가스를 이용한 실험은 시편에 영향을 미치지 않음.

  : 시편 내부로 가스를 투과시키기 위하여 고압의 기체를 사용하여 실험을 수행하였음. Villani *et al.* (2014)은 고압의 기체침투 실험을 수행하였으며, 가스침투 실험에 영향을 미치는 인자로 시편의 포화도를 밝혀냄.

- Wu *et al.* (2017)는 균열 콘크리트에 고압의 기체를 투과하여 다양한 균열 크기를 가진 시편에서 균열을 통과하는 기체의 양을 측정하였음.

  : 균열시편의 포화도는 비균열 시편과 달리 가스의 침투에 큰 영향이 없음을 확인하였음.

- Abro *et al.* (2019)는 염소이온 확산시험에 균열시편을 사용하여 치유율을 산출하는 연구를 수행하였음.

  : 시간과 이온농도의 관계에서 준정상상태 도달시간이 인가전압이 증가할수록 빠르게 도달함을 확인하였음.

  : 준정상상태 구간에서의 기울기로 염소이온 확산계수를 산출하였으며, 균열시편과 비균열시편을 함께 수행하여 균열면에서의 이온이동량을 확인함.

- 벨기에의 겐트대학 Belie교수 연구진(2016)은 균열 모르타르 시험체를 이용하여 염화물 침투에 의한 치유성능 관련 연구를 수행하였음.

  : 시험체는 쪼갬인장강도 시험 방법에 준하여 균열을 유도하였으며, 압축력에 수직된 방향으로 LVDT를 부착하여 균열폭이 50 ~ 210 μm, 400 ~ 500 μm가 되도록 하중을 가하였음.

  : 측정방법은 시험체 내부에 질산은 용액을 도포하여 염화물 침투깊이를 측정하였음.

  : 시험체의 균열면에 프로파일링 장비를 이용하여 18×75 mm의 범위의 분말을 채취한 뒤 Cl 이온의 함유량을 측정하였음.



그림 2.3 고압 기체 침투 실험 장비

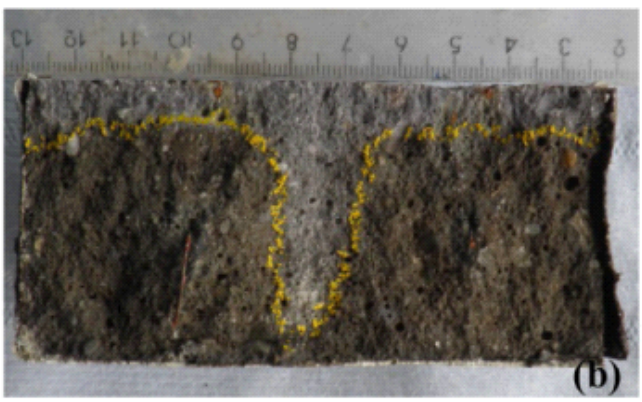


그림 2.4 염소이온 침투깊이 전경

(3) 역학성 시험에 의한 자기치유 성능 평가방법

- 휨 시험을 이용하여 시험체에 균열을 유도한 뒤 치유성능을 평가하는 연구가 수행되었음.

  : Ferrara *et al.*(2014)는 팽창재, Wang *et al.*(2015)은 박테리아, Teall *et al.*(2018)은 긴장재 등을 이용하여 시험체를 제작하였으며, 시험체의 단일 균열을 유도하기 위하여 노치를 도입하였음. 균열유도 방식은 3점 및 4점 재하에 의해 하중을 가하여 균열을 제어하였음.

  : Kanellopoulos *et al.*(2015)은 광물질 혼화제를 사용하여 시험체를 제작하였는데, Plain 시편과 비교하여 광물질 혼화제를 사용한 시험체의 최대하중 회복률이 20 ~ 25%로 나타남.

  : Salam *et al.*(2019)은 치유소재로 팽창제 및 팽윤제를 사용하였으며, 치유재령 경과에 따른 하중 및 할선강성을 이용하여 강도회복지수(ISR) 및 손상복구지수(IDR)을 통하여 치유성능을 평가하였음.

- 인장시험을 이용하여 치유성능을 평가하였는데, 그 종류로는 Uniaxial 인장시험과 spilitting 인장시험으로 구분할 수 있음.

  : Wang *et al.*(2014)은 박테리아를 사용한 각주형를 이용하여 Uniaxial 인장시험을 수행하였는데, 치유성능 평가로 시험체에 발생한 복합 균열의 균열폭 감소로 평가하였음.

  : Liu *et al.*(2017)는 Uniaxial 인장시험으로 강성, 균열발생 강도, 황산염 및 염해 환경에서의 내구성을 평가하였음.

  : Sahmaran *et al.*(2015)은 쪼갬인장시험으로 시험체에 균열을 유도하였으며, Ozbay *et al.*(2013)는 ECC 및 High volume 플라이애시를 사용한 시험체에 쪼갬인장시험을 이용하여 치유재령 및 양생조건에 따른 역학적 성능 회복을 확인하였음.

- 압축시험을 이용한 자기치유 성능평가는 역학적 시험에 가장 많이 사용되고 있음.

  : 치유소재로 박테리아를 사용하여 시험체 내부의 공극 및 균열에 탄산칼슘이 생성되어 내부조직이 치밀하게 됨. 이를 압축시험을 통하여 측정된 압축강도로 치유성능을 평가하였음.

  : Xu and Wang (2018)은 박테리아와 sulphoaluminate 시멘트를 사용하여 시험체를 제작한 뒤 20~450μm의 균열이 발생되도록 압축시험을 수행하였음. 균열유도 후 28일이 경과되었을 때 압축강도 회복율은 130%까지 증가하였으며, 최대 417 μm의 균열이 치유되는 것을 확인하였음.

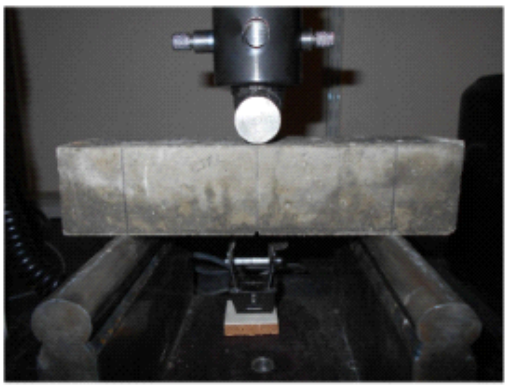


그림 2.5 3점 재하에 의한 휨 시험 전경

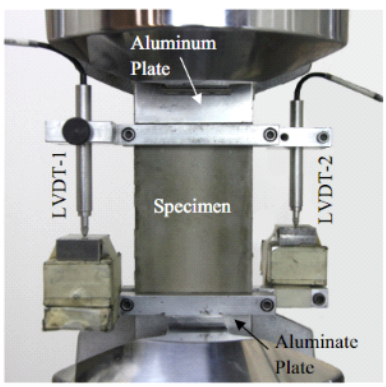


그림 2.6 직접인장 시험 전경

(4) 비파괴시험에 의한 자기치유 성능 평가방법

- 벨기에 겐트 대학교 Nele de Belie교수 연구진 및 공동 연구팀(2013)은 자기치유 소재(튜브형태 캡슐)를 혼입한 철근 콘크리트 시험체를 이용하여 비파괴 시험 기법으로 자기치유 성능을 모니터함.

  : 철근 콘크리트 시험체는 길이 3 m, 폭 250 mm, 높이 150mm 크기의 보를 이용하였으며, 4점 재하 방식을 통하여 평균 균열폭 0.25~0.3 mm를 갖는 20개 정도의 다중 균열을 생성함.

  : 시험체에서 초음파 속도가 자기치유 현상에 따라 균열 폭이 감소함에 따라 증가하는 관계가 있음을 확인하였음.

- 미국 조지아공과대학교 Laurence Jacobs & Kimberly Kurtis 교수 공동 연구팀(2013)은 확산초음파 기법으로 확산계수를 산출하여 균열치유에 관계를 확인하였음.

  : 길이 0.457 m(18 in.), 폭 127 mm(5 in.), 높이 127 mm(5 in.)의 시험체에 0.2 mm 폭의 휨균열 및 인장 균열을 각각 유도하기 위하여 3점 재하 방식과 나이프 엣지 베어링(knife edge bearing)으로 균열을 생성한 뒤 프리스트레스 텐던으로 균열 폭을 조정하였음.

  : 시험체에 확산초음파 기법으로 치유재령별(1~2주 간격으로 4달간) 모니터링을 통해 초음파 확산계수를 산출하였으며, 이 확산계수는 치유재령 경과에 따라서 증가하는 경향이 나타남을 확인함.

  : 시험체 초음파 확산계수가 자기치유 현상에 따라 균열 폭이 감소함에 따라 증가하는 관계가 있음을 확인하였음.

- 미국 텍사스 오스틴 대학교(현 네브라스카대학교) Jinying Zhu 교수 연구팀(2016)은 박테리아 혼입 모르타르 시험체의 자기치유 성능을 코다파 간섭기법을 활용하여 모니터링함.

  : 길이 50 mm, 높이 50 mm, 폭 50 mm 크기의 박테리아 혼입 모르타르 시험체에 코다파 간섭 기법을 적용하기 위하여 압전소자를 활용함.

  : 코다파 간섭기법을 활용하여 재령별(50일간) 모니터링을 통해, 상대 속도 변화(Relative velocity change)를 산출하였으며, 이 파라미터는 재령경과에 따라서 박테리아 혼입 모르타르에서 더 크게 증가하는 경향이 나타남을 확인함.

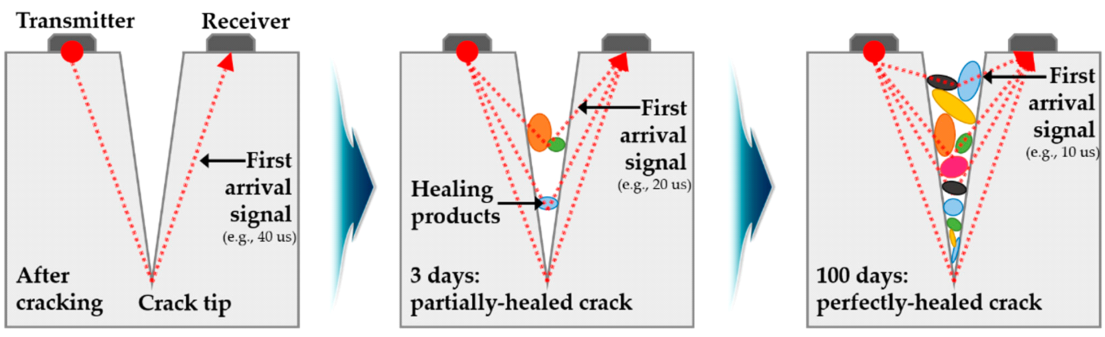


그림 2.7 비파괴 시험을 활용한 자기치유 성능평가 모식도

(5) 미세구조 분석에 의한 자기치유 성능 평가방법

- 기존 연구에 의하면 미세구조 분석을 활용하여 균열 닫힘 과정, 치유물질의 생성 및 결정화 과정에 관한 기술로 치유성능을 평가하였음. 미세구조 분석에 의한 치유성능 평가는 크게 광학현미경, SEM, 마이크로 토모그래피, XRD 등 다양한 분석 방법이 수행되고 있음.

- Wang *et al.*(2018)은 광학현미경을 이용하여 치유 전·후의 균열 이미지를 분석하여 치유성능 평가하였음.

  : 광물질 혼화재료를 사용하여 균열시편을 제작한 뒤 광학현미경을 이용하여 표면의 균열을 촬영하였음. 균열시편 제작일을 기준으로 28일이 경과되었을 때 동일한 위치에서의 균열 이미지를 비교하였음.

  : 이미지는 소프트웨어를 이용하여 균열면과 비균열면의 면적을 산출한 뒤 균열면의 감소율로 치유율을 평가하였음.

- SEM 분석은 광학현미경과 비교하여 배율이 높고 입체시를 제공하며 치유 생성물을 분석 및 관찰할 수 있음. Huang *et al.*(2014)은 슬래그 골재를 함유한 시멘트 재료의 자기치유 성능을 평가하기 위하여 SEM-EDX분석을 수행하였음.

  : 40*40*5mm의 박판형 시편을 제작하여 사포를 이용하여 표면을 정리함. 이후 시편을 겹친 다음 압력을 가하여 밀착시킨 뒤 수산화칼슘 수용액에 침지시킨 뒤 치유재령 8.3일(200시간)까지 양생하였음.

  : 이후 시편 사이에 생성된 치유생성물(수산화칼슘)을 채취하여 SEM-EDX에 의한 화학성분 분석을 실시함. 또한, 시편 사이의 균열면과 수직된 방향으로 컷팅을 실시하여 전처리 과정을 거친 뒤 충진율을 분석하였음.

- Wang *et al.*(2014)은 균열면과 표면에 생성된 치유생성물을 XRD를 이용하여 화학성분을 분석하였는데, 치유생성물은 주로 calcite로 조성되어 있음을 확인함. 또한, 마이크로 토모그래피 분석을 이용하여 치유성능을 확인함.

  : 지름 8 mm의 원주형 시편을 XCT장비를 이용하여 내부상태를 촬영한 뒤 reconstruction과정을 거쳐 내부 균열상태를 이미지로 나타냄. 이후 치유재령 28일이 경과되었을 때 이미지 소프트웨어를 이용하여 균열면적의 감소율을 평가하였음.

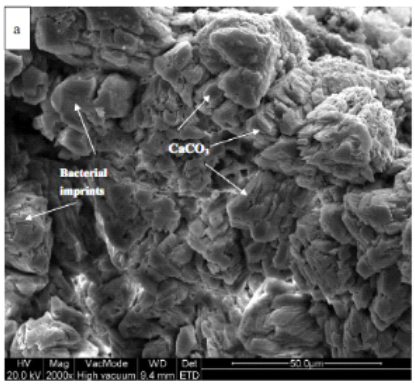


그림 2.8 치유생성물 SEM분석 결과

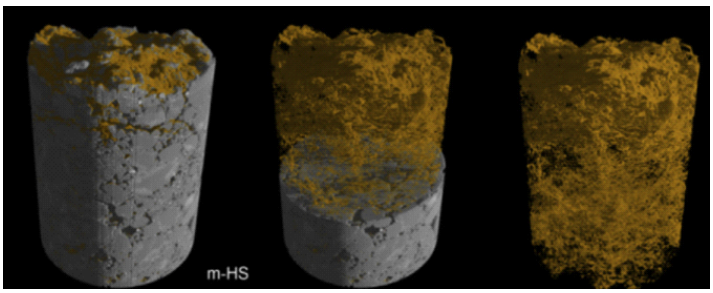


그림 2.9 내부 치유생성물 충진률 분석 결과

나. 기술동향 분석

(1) 연구논문 동향

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

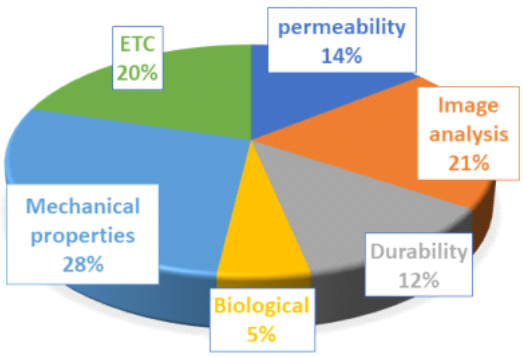


그림 2.10 자기치유 평가방법별 논문 구성비

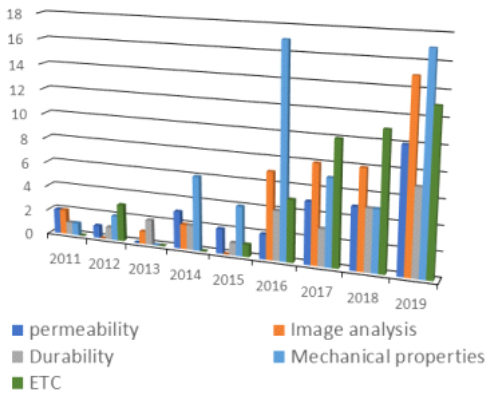


그림 2.11 평가방법에 관한 년도별 논문 수

(2) 지적재산권

- 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 소재와 비교하여 평가기술에 관한 특허는 미흡한 실정이며, 이는 평가기술은 실용화·상용화를 통한 경제적 이익으로 연결되기 어렵기 때문에 지적재산권 확보에 소극적인 것으로 판단됨.
- 평가방법별 특허기술 구성은 투수시험에 관한 특허가 38.1%, 이미지분석 14.3%, 내구성시험과 역학적시험과 관련된 평가가 각각 9.5%, 기타 방법이 28.6%를 차지함.

표 2.1 특허기술 관련 분류 (2012~2019)

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

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 2.2 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.

(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.

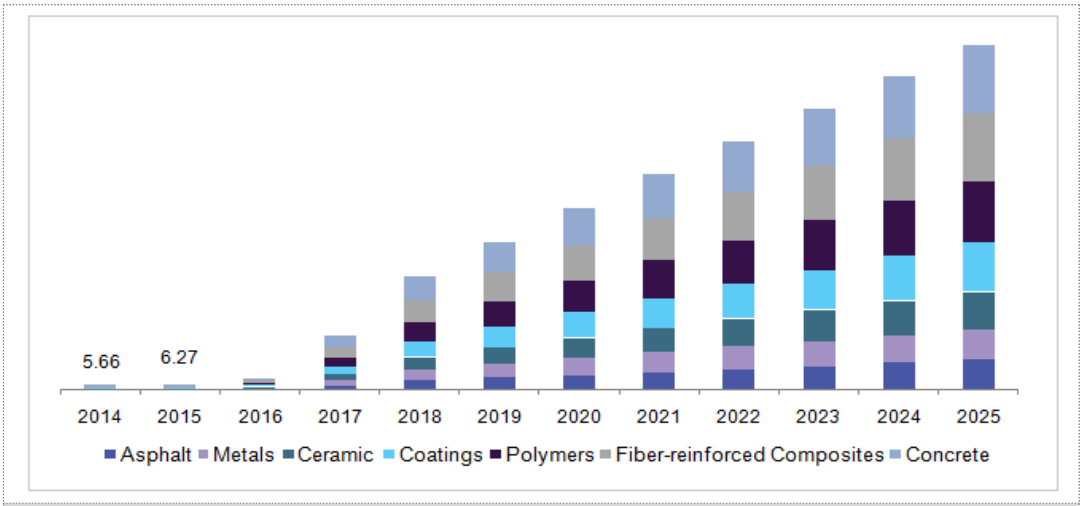


그림 2.12 미국 유지보수 시장 현황 및 전망

- 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.
- 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 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화 기술 개발

(1) 균열 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화 기술

(가) 자기치유 콘크리트의 성능평가 기술 개요

- 최근 자기치유 콘크리트 관련 연구가 활발히 진행되고 있으며, 치유소재 개발과 개발 기술을 평가하기 위한 치유성능평가 방법으로 연구되고 있음.
- 콘크리트의 자기치유 성능을 평가하는 대표적인 방법으로 투수시험, 내구성시험, 역학적시험, 미세구조분석 등이 있으나 전 세계적으로 표준화된 시험 방법이 제정되어 있지 않아 객관적인 치유 성능평가 방법이 요구됨.
- 기존 연구에 치유성능은 시험조건 및 평가방법에 따라 상이하게 나타나므로 서로 다른 방법으로 평가된 콘크리트의 자기치유 성능은 상호 비교 및 분석이 어려운 실정임.
- 자기치유 콘크리트의 시편 및 부재 단위 치유성능 평가방법을 표 3.1.1과 같이 제안하였으며, 제안된 방법의 평가 항목을 이용하여 연구단에서 개발된 자기치유 기술을 정량적으로 평가함.

표 3.1.1 자기치유 콘크리트의 성능평가 방법

평가 시험 방법	평가 항목	해당 Section
정수위 투수시험	유출수량 감소율	(다)
염소이온 확산 촉진시험	염소이온 영동확산계수 감소율	(라)
기체확산실험	기체확산계수 감소율	(마)
mCT 시험	충진률	(바)
보 부재의 반복 휨시험	강도 및 강성 회복율, 소산에너지 증가율	(사)
매크로셀 부식시험	총부식량 감소율	(아) ①
보시험체의 휨시험	전단 강성 및 강도 회복율	(아) ②

(나) 균열 유발 방법과 균열의 정량적 평가

① 균열시편 제작 및 균열폭 제어 기술

- 콘크리트에 사용되는 자기치유 재료의 성능을 객관적으로 평가하기 위해서는 균열시편을 제작해야 함.
- 균열시편은 실제 콘크리트 구조물에서 발생할 수 있는 균열과 유사한 형태로 제작되어야 함.

- 또한 시편의 제작은 균열 생성이 용이하고 목표 균열폭에 맞게 균열폭을 적절히 제어 가능해야 하며, 제작된 균열시편은 시험 중 외력에 의한 균열폭의 변형이 발생하지 않아야 함.
- 위와 같은 균열시편의 요구조건을 충족하기 위해 제안한 균열 유도, 균열폭 제어 및 변형 방지 방법이 표 3.1.2에 정리되어 있음.

표 3.1.2 균열시편 제작 및 균열폭 제어방법

요구조건	시편 제작 및 균열폭 제어 방법
균열 유도	시편을 구속할 수 있는 균열 지그를 이용하여 쪼갬인장균열 유도
균열폭 제어	절단 시편 양 끝단에 두께(0.1~0.5 mm)가 다른 실리콘 시트를 삽입
균열폭 변형 방지	스테인리스스틸 재질의 밴드로 횡구속하고 클램프로 고정

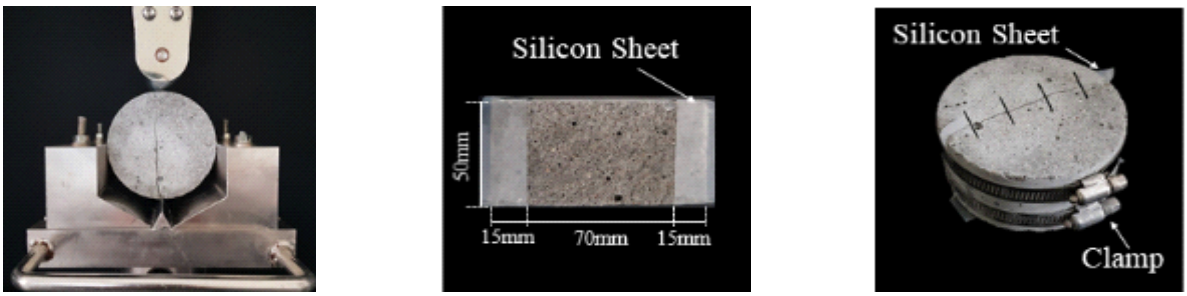
- 균열시편 제작과정을 그림 3.1.1에 나타내었으며, 각 단계별 상세설명은 다음과 같음.

(ⅰ) 균열시편 제작에는 ∅100×50 mm의 디스크형 시편을 사용하며 절단기를 이용하여 ∅100×200 mm의 원주형 공시체를 ∅100×50 mm의 디스크형 시편으로 가공함. 이때, 절단기를 사용함으로써 시편 표면 연마 과정을 생략할 수 있음.

(ⅱ) 곧은 형태의 균열유도를 위해 쐐기형의 균열 지그에 시편을 거치한 후 'KS F 2423'에 의해 하중을 가하여 시편 상하를 연결하는 균열이 발생하면 즉시 하중을 제거함.

(ⅲ) 분할된 시편은 붓을 이용하여 균열면에 입자가 큰 이물질을 제거한 뒤, 목표 균열폭을 생성하기 위하여 분할된 시편의 양 끝단에 일정한 두께를 갖는 15×70 mm 크기의 실리콘 시트를 넣고 균열면에 단차가 발생하지 않도록 결합함.

(ⅳ) 균열의 변형을 방지하기 위하여 결합된 시편의 윗면과 아랫면을 기준으로 5 mm의 간격을 두고 스테인리스스틸 재질의 밴드를 위치시킨 뒤 전동드릴을 이용하여 클램프로 고정함.



(a) 시편 분할 (b) 실리콘시트 삽입 (c) 클램프 체결

그림 3.1.1 균열시편 제작과 균열폭 제어 방법

② Microscope를 이용한 균열의 정량적 평가기법

- 균열길이 및 균열폭의 측정값은 초기 균열시편의 특성을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 높은 수준의 신뢰도 및 재현성이 요구됨.
- 하지만 광학현미경을 이용한 균열 측정은 실험자의 숙련도 및 개인차에 따른 편차가 크게 발

생할 수 있으므로 실험자의 재량을 최소화하여 신뢰도 및 재현성을 확보하기 위한 방법을 제안하였음.

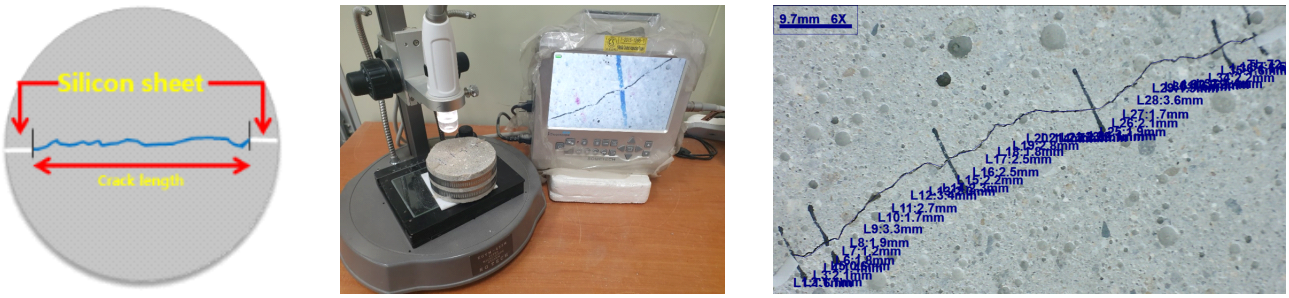
(ⅰ) 그림 3.1.2는 균열길이 측정방법을 나타낸 것으로 균열길이는 시편 양 끝단의 실리콘 시트를 제외하고 균열을 따라 측정한 누적직선길이로 함. 상·하면의 균열길이를 [mm]단위로 소수점 둘째 자리까지 측정하여 평균을 취함.

(ⅱ) 그림 3.1.3은 균열폭 측정방법을 나타낸 것으로 균열폭은 균열길이를 3개의 구간으로 나누어 각 구간별로 2곳의 균열폭을 측정함. 동일한 방법으로 상·하면에서 측정한 총 12개 균열폭을 [μm]단위로 소수점 둘째 자리까지 측정하여 그 평균값을 사용함. 이때, 시편 표면의 깨짐·탈락 등으로 균열이 과대 측정될 수 있는 지점은 피하여 측정하도록 함.

- Microscope는 균열폭 크기에 따라 적정한 해상도와 확대비율을 갖추고 있어야 함. 본 연구에서 균열길이와 균열폭 측정에 사용한 Microscope의 성능은 다음과 같음.

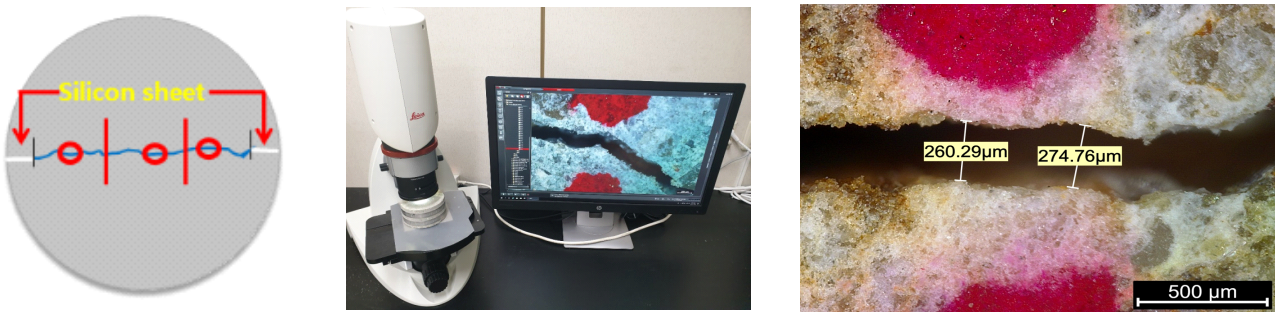
(ⅰ) 균열 길이 - 해상도(1,600 × 1,200 화소), 최대 확대배율(× 160)

(ⅱ) 균열폭 - 해상도(3,200 × 2,400 화소), 최대 확대배율(× 675)



(a) 측정 구간 (b) Microscope (c) 측정 결과

그림 3.1.2 균열 길이 측정방법



(a) 측정 구간 (b) Microscope (c) 측정 결과

그림 3.1.3 균열폭 측정방법

③ 제안된 균열 측정방법의 신뢰도 평가

- 제안한 균열폭 측정기술의 신뢰도 및 재현성을 확인하기 위하여 4개의 연구기관이 참여하여 동일시편의 균열폭을 측정함.

(ⅰ) 참여기관 : 성균관대학교, 세명대학교, 한국건설생활환경시험연구원, 겐트대학교

(ⅱ) 참여인원 : 연구원 5명

(iii) 사용시편 : Plain배합의 균열시편 5개

(iv) 목표 균열폭 : 0.20 ~ 0.25 mm

(v) 평가방법 : 광학현미경을 이용하여 균열시편 5개에 대하여 각각 6장의 균열폭을 촬영함. 5인의 연구원이 동일한 이미지를 이용하여 제안한 균열폭 측정방법에 의해 균열폭을 비교하였음.

- 균열폭 측정결과를 정리한 표 3.1.3에 따르면 균열폭의 변동계수(Coefficient Of Variation, COV)는 동일한 시편에 대해 최대 6.8% 최소 1.8%로 나타났으며 평균 변동계수는 4.5%로 낮게 나타남. 따라서 본 연구에서 제안한 균열폭 측정기법에 대한 재현성을 확보한 것으로 판단됨.

표 3.1.3 균열폭 측정에 따른 변동계수

구분	균열폭 (μm)				
	OPC-1	OPC-2	OPC-3	OPC-4	OPC-5
Min.	219.9	240.0	237.6	227.3	227.0
Max.	225.1	260.7	248.3	244.6	240.5
평균	222.5	251.8	245.1	233.3	233.1
표준편차	3.9	17.2	8.8	14.2	9.9
CoV	1.8%	6.8%	3.6%	6.1%	4.3%

관련 성과 [특허-9]

균열시편제작을 위한 균열 유발장치 및 균열유발방법에 대한 특허등록을 완료함.


특허증
CERTIFICATE OF PATENT
특허 Patent Number 제 10-1847053 호
출원번호 Application Number 제 10-2016-0106308 호
출원일 Filing Date 2016년 08월 22일
등록일 Registration Date 2018년 04월 03일
발명의 명칭 Title of the Invention
공시체에 대한 목표 균열폭의 균열 유발장치 및 균열 유발방법

(다) 정수위 투수시험에 의한 성능평가 기법

① 정수위 투수시험법의 개요

- 투수시험은 균열을 통해 유출되는 수량의 시간에 따른 변화로부터 치유성능을 확인할 수 있어 주 평가지표로 광범위하게 사용되고 있음.
- 투수시험은 크게 정수위 투수시험과 변수위 투수시험으로 구분할 수 있는데, 토질실험에서 정수위 투수시험은 유출수량이 많이 발생하는 사질토에 주로 수행되고 있으며, 변수위 투수시험은 유출수량이 적은 점성토에 적용되고 있음.
- 콘크리트의 관통 균열은 균열이 수로의 역할을 하여 유출수량이 많이 발생하기 때문에 정수위 투수시험을 활용한 성능평가 방법을 제안하였음.

② 정수위 투수시험 장치

- 그림 3.1.4(a)는 정수위 투수시험에 사용하는 전체 시험장치를 나타낸 것으로 부분별 세부설명은 다음과 같음.

  (ⅰ) 상부 수조 : 시험 중 수두유지를 위해 지속적으로 물을 공급하는 수조

  (ⅱ) 투수시험장치 : 균열시편을 결합하여 시편의 균열부로 공급수의 유출이 이뤄지는 장치

  (ⅲ) 하부 수조 : 목표 수두를 넘어 투수시험장치에 공급되는 물을 배수하는 수조

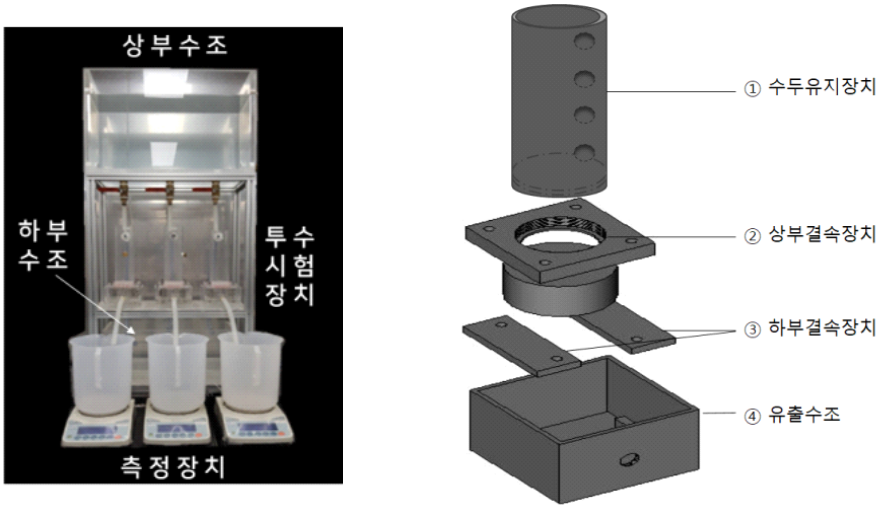
  (ⅳ) 측정장치 : 투수시험장치에서 유출되는 물을 저장하며 저울을 이용하여 단위시간당 질량 증가를 측정

- 그림 3.1.4(b)는 투수시험장치의 모식도이며 각 부분별 역할은 다음과 같음.

  (ⅰ) 수두유지장치 : 균열시편에 일정한 압력(수두)으로 물을 공급하는 부분으로 50 mm 단위로 최대 300 mm까지 수두유지가 가능하며 목표 수두를 넘어 공급되는 물을 배수하는 월류구 존재

  (ⅱ) 상·하부결속장치 : 균열시편을 수두유지장치와 결합하기 위한 부분으로 상부결속장치와 균열시편의 접촉부에 70 mm 실리콘 링을 두어 시편 표면의 손상과 물이 결합부로 유출되는 것을 방지

  (ⅲ) 유출수조 : 균열시편을 통해 유출되는 물이 배수되는 부분으로 일정량의 물이 채워진 상태(시편을 거치한 뒤 물이 배수되지 않는 안정 상태)에서 투수실험을 진행하여 유출수조에 추가로 공급되는 물(균열을 통한 유출수)을 측정장치로 전달



(a) 정수위 투수시험 장치 (b) 투수시험장치

그림 3.1.4 정수위 투수시험장치

③ 시험방법

(ⅰ) 균열시편 상면의 중앙에 상부결속장치 내 실리콘링(지름 70 mm)이 위치하도록 균열시편과 상·하부 결속장치를 스텐 볼트로 체결하여 고정시킴.

(ⅱ) 상부결속장치를 수두유지장치와 체결한 후, 균열시편 하면에 기포가 생기지 않도록 주의

하며 물이 채워져있는 유출수조에 거치함. 이때 시편의 거치와 함께 유출수조로부터 배수가 나타나야함.

(iii) 유출수조 내 수위가 안정화(더 이상 배수가 이뤄지지 않는 상태)된 후 수두유지장치에 물을 공급하여 목표 수두를 유지하며 균열을 통해 유출되는 분당 유출수량을 10분간 측정함.

(iv) 유출수량은 초기 3분을 제외한 4분～10분까지의 분당 유출수량의 평균값을 사용함. 평균 분당 유출수량을 균열길이로 나눈값을 단위 유출수량이라 하며 단위는 [ml/(min·mm)]을 사용함.

(v) 치유재령 0일에서 투수시험을 수행한 후 치유양생을 실시하며 시험재령마다 동일한 균열시편에 대해 투수시험을 반복 수행함.

④ 투수시험의 신뢰도 평가

- 제안한 투수시험 측정방법에 따라 3개 기관이 참여하여 초기 유출수량에 대한 재현성을 평가하였으며, 상세내용은 다음과 같음.

(i) 참여기관 : 성균관대학교, 중앙대학교, 한국건설생활환경시험연구원

(ii) 사용시편 : Plain 배합 (물 : 시멘트 : 잔골재 = 0.4 : 1.0 : 2.0)의 균열 시편 5개

(iii) 목표 균열폭 : 0.25 ± 0.03 mm (균열재령 28일)

- 초기 유출수량 측정결과 표 3.1.4와 같이 동일한 시편에 대한 초기 유출수량의 변동계수는 최대 8.3%, 최소 2.7%로 나타났으며, 평균 변동계수가 6.1%로 낮게 나타나 정수위 투수시험에 대한 재현성을 확보한 것으로 판된됨.

표 3.1.4 초기 유출수량 신뢰도 분석 결과

구분	초기 유출수량 [ml/(min·mm)]				
	Spec.1	Spec.2	Spec.3	Spec.4	Spec.5
Min.	1.805	1.786	2.709	1.748	2.427
Max.	2.053	1.909	3.188	2.114	2.770
평균	1.964	1.853	2.884	1.978	2.596
표준편차	0.113	0.051	0.215	0.164	0.149
CoV	5.7%	2.7%	7.5%	8.3%	6.4%

⑤ 분석 및 평가방법

- 치유율(SH_q)은 치유재령 0일 대비 치유재령 t에서의 유출수량 감소율로 나타냄.

$$SH_q(t) = [1 - \frac{q(t)}{q_0}] \times 100 \quad (3.1.1)$$

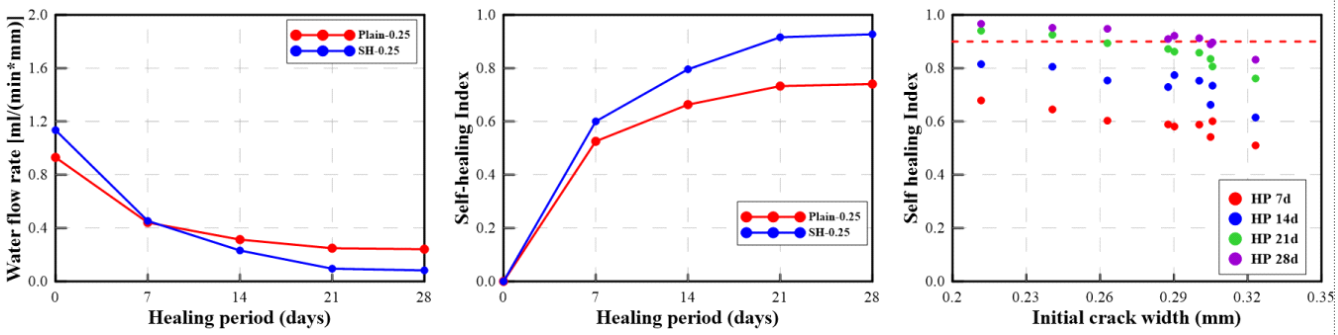
여기서, q_0는 치유재령 0일의 단위 유출수량, $q(t)$는 치유재령 t일에서의 단위 유출수량임.

- 그림 3.1.5에 정수위 투수시험에 의한 분석방법을 표현하였음.

(i) 그림 (a)는 정수위 투수시험에 의한 치유재령에 따른 단위 유출수량을 나타낸 것으로 유출수량이 감소하는 경향을 보임.

(ii) 그림 (b)는 식 (3.1.1)에 의하여 산출한 치유재령에 따른 치유율(SH_q)을 나타낸 것임.

(iii) 그림 (c)는 초기 균열폭에 따른 치유율의 관계를 나타낸 것으로 초기 균열폭이 작을수록 치유율이 높은 경향을 나타냄.



(a) 치유재령 vs. 단위 유출수량 (b) 치유재령 vs. 치유율 (c) 초기 균열폭 vs. 치유율

그림 3.1.5 정수위 투수시험에 의한 분석방법

- Poiseuille 법칙에 따르면 단위 유출수량은 균열폭의 관계는 3제곱에 비례하여 다음과 같으며, 이러한 유출수량과 균열폭의 관계를 통해 실험 상수(α)를 구할 수 있음.

$$q = \xi \frac{\triangle P b w^3}{12 \eta d} = \alpha w^3 \tag{3.1.2}$$

여기서, q는 유출수량, $\triangle P$는 유입·유출 균열면의 수압차, b는 균열 길이, w는 균열 폭, d는 시험체의 두께, η는 물의 점성계수, ξ는 균열면 마찰에 의한 감소계수임.

- 그림 3.1.6(a)는 치유재령 0일에서 균열폭에 따른 단위 유출수량의 관계를 표현한 것으로 추세식을 이용하여 식 (3.1.2)의 실험 상수(α)를 결정함(e.g. Plain=63.4, SH=66.2).

- 균열폭이 감소함에 따라 유출수량도 감소하지만 식 (3.1.2)의 Poiseuille 식에서와 같이 균열폭과 유출수량이 선형관계가 아니므로 유출수량의 감소를 통해 균열폭의 치유정도를 직접적으로 평가하기 어려움.

  : 또한 균열시편은 재령이 경과함에 따라 치유물질이 불규칙하게 생성되어 광학현미경을 이용하여 균열폭을 정확하게 측정하기 어려움.

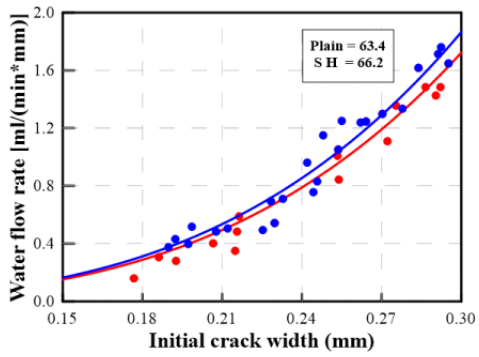
- 따라서 식 (3.1.2)의 관계를 이용하여 치유재령 t에서의 등가균열폭(equivalent crack width, $\overline{w}(t)$)를 산정하여 균열의 치유 정도를 직관적으로 평가하는 방법을 제안함.

$$\overline{w}(t) = (q(t)/\alpha)^{\frac{1}{3}} \tag{3.1.3}$$

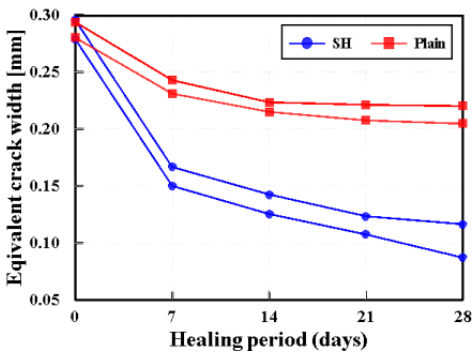
여기서, $q(t)$는 치유재령 t일에서 측정한 유출수량, α는 실험을 통해 구한 상수임.

- 그림 3.1.3(b)는 식 (3.1.3)의 관계를 이용하여 치유재령 t에서의 등가균열폭($\overline{w}(t)$)을 나타낸 것으로 치유재령에 따른 균열폭 감소 경향을 나타냄.

- 등가균열폭의 산정으로 자기치유 후 최종등가균열폭과 목표균열폭의 비교를 통하여 자기치유 기술의 효용성을 효과적으로 검토할 수 있음.



(a) 초기 균열폭과 유출수량의 관계



(b) 치유재령 vs. 등가균열폭

그림 3.1.6 등가균열폭을 이용한 분석방법

관련 성과 [SCI-30]

제안한 정수위 투수시험을 이용해 '균열 시편의 투수계수에 영향을 미치는 요소'에 관한 논문을 게재함.



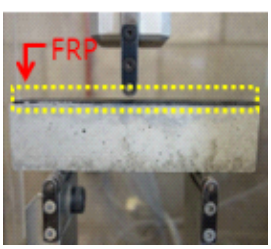
⑥ 각주형 시편을 사용한 정수위 투수시험

- 디스크형 시편의 관통균열과 다른 형태의 균열에 대한 자기치유 성능평가를 위해 각주형 시편을 이용하여 균열 시험체를 제작하여 정수위 투수시험을 적용하여 치유성능을 평가하는 방법을 제안함.
- 그림 3.1.7은 시험체 제작과정을 나타낸 것으로 시험체 제작 및 시험과정은 다음과 같음.

(ⅰ) 시편 중앙을 기준으로 5 mm 아래에 중공관을 갖는 40×40×160 mm의 시편에 FRP를 부착하여 3점재하에 의한 휨균열을 유도한 뒤, 측면의 균열부에 차수제를 도포하여 물이 외부로 유출되는 것을 방지하고 스크류잭을 이용하여 균열폭을 제어함.

(ⅱ) 그림 3.1.8(a)와 같이 수두높이를 500 mm로 고정하였으며, 1분 단위로 10분까지 투수시험을 수행하며 3~10분 동안 유출수량의 평균값을 사용함.

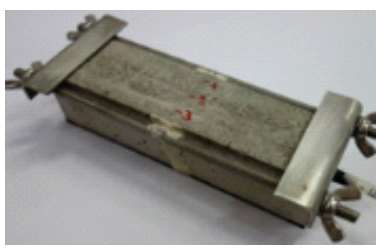
(ⅲ) 치유양생을 실시하며 시험재령마다 동일한 균열시험체에 대해 투수시험을 반복수행함.



(a) 균열유도

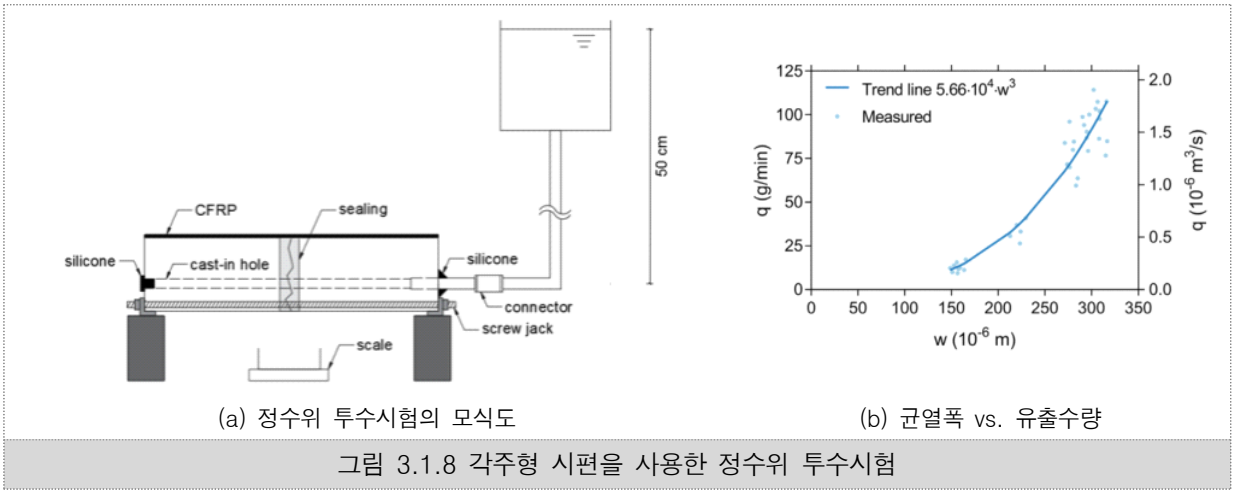


(b) 차수제 도포



(c) 균열폭 제어

그림 3.1.7 균열유도 및 균열시편 제작과정



(a) 정수위 투수시험의 모식도 (b) 균열폭 vs. 유출수량

그림 3.1.8 각주형 시편을 사용한 정수위 투수시험

- 각주형 시편을 사용한 정수위 투수시험 결과를 나타낸 그림 3.1.8(b)와 같이 단위유출수량은 균열폭의 관계는 3제곱에 비례하는 식 (3.1.2)의 법칙을 따름.
- 따라서 디스크형 균열 시편과 동일하게 식 (3.1.1)과 (3.1.3)을 이용하여 균열의 치유정도를 평가할 수 있음.

관련 성과 [SCI-58]

제안한 각주형 시편을 사용한 정수위 투수시험을 이용해 '투수시험 결과의 변동을 줄이기 위한 균열제어방법'에 관한 논문을 게재함.


Construction and Building Materials 203 (2019) 541–551

Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

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

Novel active crack width control technique to reduce the variation on water permeability results for self-healing concrete

Tim Van Mullem [a,1], Elke Gruyaert [b,2], Brenda Debbaut [a], Robby Caspeele [a,3], Nele De Belie [a,*,4]

[a] Magnel Laboratory for Concrete Research, Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Ghent University, Tech Lane Ghent Science Park, Campus A, Technologiepark Zwijnaarde 60, B-9052 Gent, Belgium

[b] Department of Civil Engineering, Technology Cluster Construction, Structural Mechanics and Building Materials, KU Leuven, Gebroeders De Smetstraat 1, B-9000 Gent, Belgium

(라) 염소이온 확산시험에 의한 내구성능 평가방법

① 염소이온 확산시험법의 개요

- 콘크리트 내 균열은 이온의 확산통로로 이용되어 콘크리트의 내구성능에 큰 영향을 미치지만, 자기치유에 따른 콘크리트의 내구성능 회복 효과는 작은 것으로 알려져 있음.
- ASTM 1202, NT Build 492 등 기존의 시험방법을 이용한 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 및 치유성능 평가가 수행되었으나 기존의 내구성 실험은 장기간 수행되므로 시험 중 치유성능이 발현될 수 있으며 균열 치유정도의 정량적 평가가 어려움.
- 따라서 전기영동시험(electrical migration test)을 적용하여 단 시간 내에 균열의 영향을 고려한 염소이온 확산시험에 의한 자기치유 성능평가 방법을 제안하였음.

② 염소이온 확산시험 장치

- 염소이온 확산시험은 이온확산장치와 이온측정장치로 구성됨.
- 그림 3.1.9(a)의 이온확산장치의 각 부분별 역할은 다음과 같음.

(ⅰ) 전원공급장치 : 전원공급장치는 시험 종료까지 설정된 전압을 확산셀에 일정하게 공급하는 역할로 ASTM C 1202 요건에 부합하여야 함.

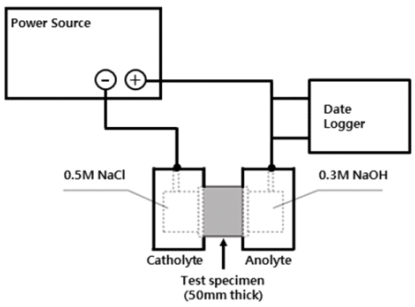
(ii) 시험용 확산셀 : 시험 중 시험용액을 채취할 수 있도록 윗면에 채취구가 있어야 함.

(iii) 데이터로거 : 확산셀에 전압을 가함에 따라 시험용액의 온도변화 등을 측정하여 저장함.

- 그림 3.1.9(b)의 이온측정장치는 Cl^-이온을 측정할 수 있는 이온전극(ion selective electrode)을 이용하여 전위차에 의한 시험용액의 농도를 측정하며, 사용된 전극의 사양은 다음과 같음.

(i) Cl^-이온의 농도의 측정범위 : $1 \sim 5 \times 10^{-5}$ M

(ii) 농도 측정값의 정확도 : ±2%



(a) 시험장치의 모식도

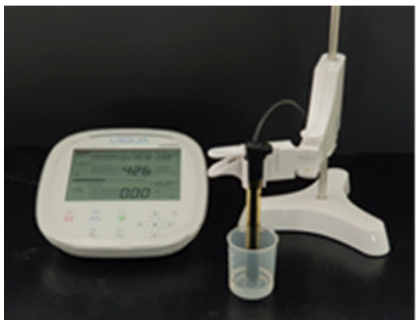

(b) 이온측정장치

그림 3.1.9 염소이온 확산시험장치

③ 시험방법

(i) 염소이온 확산시험은 균열시편과 함께 균열이 유도되지 않은 비균열시편에 대해 각각 시험을 수행함.

(ii) 염소이온 확산시험에 사용되는 균열시편은 전위차에 의한 이온 이동이 원활하도록 진공포화장치를 이용하여 12시간 전처리 과정을 진행함.

(iii) 균열 시편과 시험용 확산셀을 결합하며, 이때 편심이 발생하지 않도록 4곳에 균등한 힘을 가함. 이후 그림 3.1.10(a)와 같이 확산셀의 음극에 0.5 M NaCl, 양극에 0.3 M NaOH를 주입한 뒤 36V의 전압을 가해 36시간 동안 유지함.

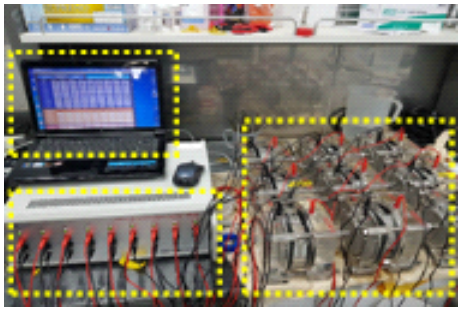
(iv) 시험용액의 농도변화를 확인하기 위하여 시험 시작 후 8시간까지는 1시간 간격, 이후 시험종료까지 2시간 간격으로 그림 3.1.10(b)와 같이 음극 시험용액을 채취하며, 채취한 용액의 온도가 20℃로 안정화된 후 이온측정장치를 이용하여 Cl^-이온의 농도를 측정함.

(v) 그림 3.1.11과 같이 일정 시간이 경과하여 Cl^-이온의 농도 변화가 일정한 준정상상태(quasi-steady-state)에 도달하게 되면 다음과 같이 Nernst-Planck 방정식을 이용하여 균열시편과 비균열시편의 염소이온 확산계수를 각각 산출함.

$$D_{ssm} = \frac{RTL}{zFU}\frac{V}{A}\left|\frac{\Delta(\ln c_1)}{\Delta t}\right| \tag{3.1.4}$$

여기서, F : 패러데이 상수, R : 기체상수, T : 절대온도, L : 시험체 두께, U : 전위차, c_1 : Cell1(Catholyte)의 농도, V : Cell의 부피, A : 시험체 단면적

(vi) 치유양생을 실시하며 시험재령마다 동일한 균열시편에 대해 염소이온 확산시험을 반복수행함.



(a) 시험 전경



(b) 시험용액 샘플링 과정

그림 3.1.10 염소이온 확산시험 전경

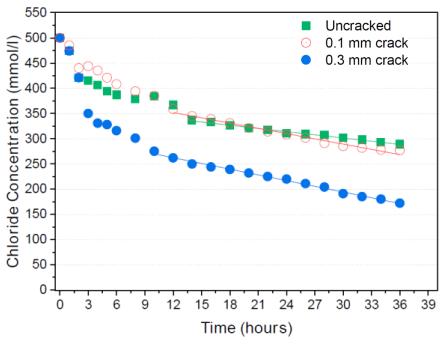


그림 3.1.11 시간에 따른 염소이온의 농도 변화

④ 염소이온 확산시험의 타당성 검토

- 균열폭 및 배합 종류에 따른 염소이온 확산계수의 영향을 확인하여 제안된 염소이온 확산시험을 통해 자기치유 성능평가의 타당성을 검토하였으며, 상세내용은 다음과 같음.

(ⅰ) 사용시편 : OPC, SH-A (Na_2CO_3, Ca^{2+}), SH-B(Na_2CO_3, Ca^{2+}와 CSA, bentonite)

(ⅱ) 균열폭 : 0.0(무균열), 0.1, 0.3, 0.5 mm

(ⅲ) 균열재령 : 28일

- 3종류 시편에 대한 염소이온 확산 시험 결과는 나타낸 그림 3.1.12에서 무균열(0.0mm) 시편은 배합 종류와 무관하게 동일 재령에서 유사한 염소이온 확산계수를 보임.
- 반면 동일 배합에서 균열폭이 0.0, 0.1, 0.3, 0.5 mm로 증가할수록 염소이온 확산계수는 높게 나타났으며, 치유재령이 0, 28, 56일로 증가할수록 염소이온 확산계수는 감소함.

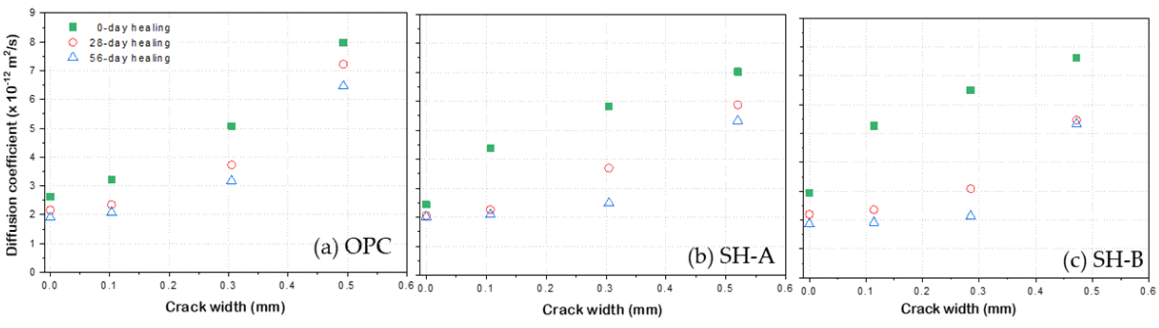


그림 3.1.12 균열폭과 확산영동계수 관계(균열폭 : 0.00, 0.30, 0.50 mm)

- 특히 OPC에 비해, 자기치유 소재를 사용한 SH-A와 SH-B 배합이 더 큰 폭으로 염소이온확산계수가 감소하는 것으로 나타남.
- 따라서 균열이 이온의 확산통로로 활용되므로 균열 시편과 비균열 시편의 염소이온 확산계수의 차를 균열의 영향으로 가정하고 치유재령에 따른 균열의 영향을 정량적으로 평가함.

⑤ 분석 및 평가방법

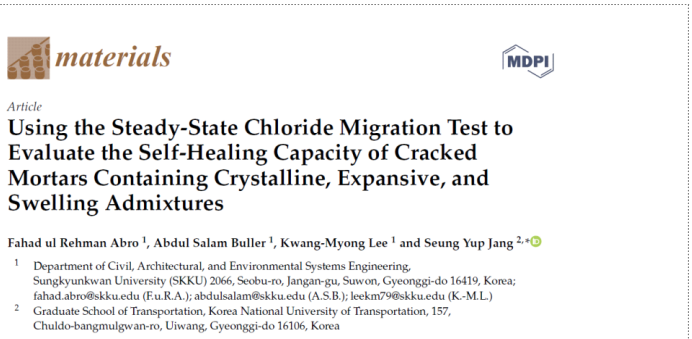
- 치유율($SH_{D_{ssm}}$)은 치유재령 0일 대비 치유재령 t에서의 균열 시편과 비균열 시편의 염소이온 확산계수의 차의 감소율로 나타냄.

$$SH_{D_{ssm}}(t) = 1 - \frac{D_{ssm.eq}(t) - D_{ssm.ucr}(t)}{D_{ssm.eq,0} - D_{ssm.ucr,0}} \quad (3.1.5)$$

여기서, $D_{ssm.eq}(t)$는 치유재령 t에서 균열시편의 염소이온 확산계수, $D_{ssm.eq,0}$는 치유재령 0일에서 균열시편의 염소이온 확산계수, $D_{ssm.ucr}(t)$는 치유재령 t에서 비균열시편의 염소이온 확산계수, $D_{ssm.ucr,0}$는 치유재령 0일에서 비균열시편의 염소이온 확산계수임.

관련 성과 [SCI-62]

제안한 내구성 시험방법을 이용해 '염소이온 촉진시험을 활용한 자기치유 균열모르타르의 치유성능 평가'에 관한 논문을 게재함.


materials

MDPI

Article

Using the Steady-State Chloride Migration Test to Evaluate the Self-Healing Capacity of Cracked Mortars Containing Crystalline, Expansive, and Swelling Admixtures

Fahad ul Rehman Abro [1], Abdul Salam Buller [1], Kwang-Myong Lee [1] and Seung Yup Jang [2,*]

[1] Department of Civil, Architectural, and Environmental Systems Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU) 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do 16419, Korea; fahad.abro@skku.edu (F.u.R.A.); abdulsalam@skku.edu (A.S.B.); leekm79@skku.edu (K.-M.L.)
[2] Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, 157, Chuldo-bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do 16106, Korea

(마) 기체확산실험에 의한 성능평가 기법

① 기체확산시험법의 개요

- 균열이 발생한 시편은 균열을 통해여 기체의 확산이 쉽게 이루어지므로 기체의 농도차이를 적용하여 균열에 대한 기체 확산 실험이 가능함.
- 특히 일반적인 실험실의 온도 조건(20℃)에서 물의 점성(1.02×10^{-3} Pa·s)에 비해 산소의 점성(2.04×10^{-5} Pa·s)은 약 1/50 정도로 작기 때문에 점성으로 인한 에너지 손실은 미소하여 균열면 조건이 실험결과에 대한 미치는 영향이 작아지게 됨.
- 따라서 시멘트 수화물과 반응하지 않고 독성이 없으며 농도의 측정이 용이한 산소 가스의 확산 특성을 이용하여 균열시편의 치유성능을 추정하는 기법을 제안하였음.

② 기체확산시험 장치

- 기체 확산시험장치는 그림 3.1.13과 같으며 세부역할을 아래와 같음.

(ⅰ) 하부 용기 : 질소가 주입되는 용기로 밀폐 용기의 마개는 직사각형의 홀을 두어 외부의 산소가 용기 내로 유입될 수 있도록 하였고, 용기 상부에 균열 시편을 거치 후 용기 내 산소 농도 변화를 측정함.

(ii) 산소 농도 측정 센서 : 하부 용기 내에 거치하여 산소 농도의 변화를 측정하며, 0.01%의 해상도를 가지고 있는 광학 기반 센서로 측정 중의 산소 소비가 없어야 함.

(iii) 블루투스 장치 : 하부 용기 내 측정된 산소농도를 실시간으로 모니터링하기 위한 장치

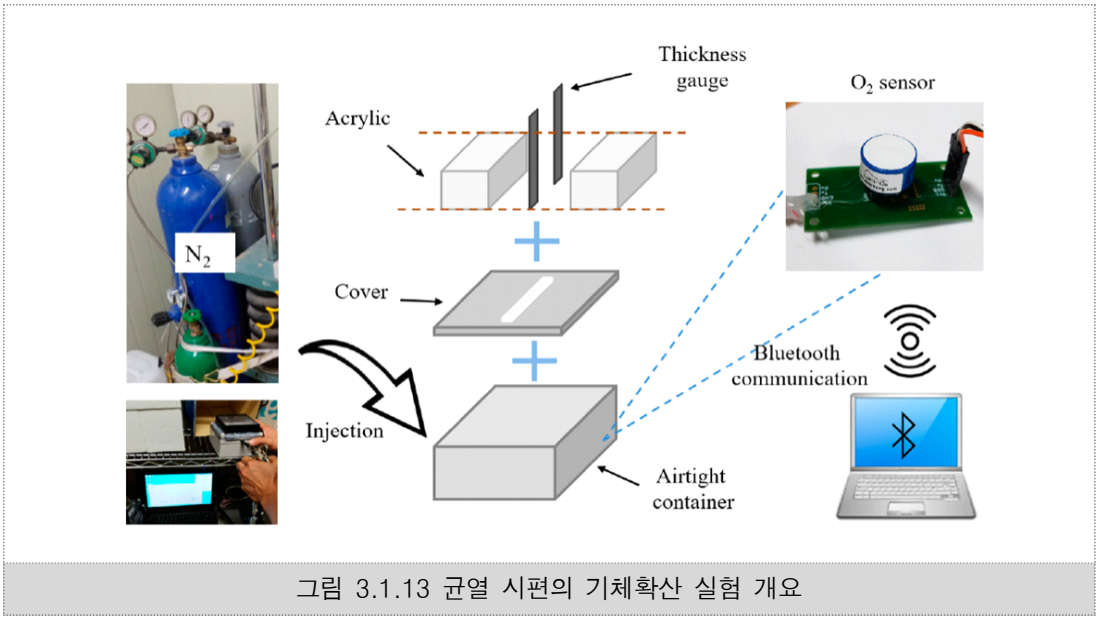


그림 3.1.13 균열 시편의 기체확산 실험 개요

③ 시험방법

(i) 에폭시를 이용하여 균열시편과 기체확산시험 용기와 결합시킨 후, 모르타르 시편이 포화될 경우, 수분이 표면으로 흡수되어 측정 결과에 영향을 미칠 수 있으므로 일반 실험실 조건에서 24시간 거치하여 안정화 작업을 수행하였음.

(ii) 시편을 기체확산시험 용기와 결합용기 내의 압력이 변동되지 않도록 마개를 일정 부분 개방한 채로 질소를 주입함. 이때, 질소의 주입 직후는 용기 내의 기류가 불안정한 상태이므로, 5분간의 안정화 시간을 둠.

(iii) 질소의 주입 후 0.5% 이하로 산소의 농도가 줄어들면, 마개를 닫고 30분간 용기 내 산소 농도의 변화를 측정을 함. 유효 데이터는 안정화 시간 5분을 차감한 25분임.

(iv) Fick의 확산법칙과 이상기체방정식를 조합하여, 균열을 통과하는 기체의 확산계수를 다음과 같이 산정할 수 있음.

$$K_c = \frac{V_v d}{L_c t} \cdot \ln\left(\frac{C_0}{C}\right) \tag{3.1.6}$$

여기서, Vv는 용기의 부피, d는 시편의 두께, Lc는 균열의 길이, C0 와 C는 각각 산소의 초기, 실험 중의 농도임.

(v) 치유양생 후 동일한 균열시편에 대해 기체확산시험을 반복 수행함.

④ 기체확산시험의 타당성 검토

- 균열폭에 따른 기체 확산속도를 측정한 결과, 그림 3.1.14와 같이 균열폭이 클수록 기체확산계수가 선형적으로 비례하여 증가함.

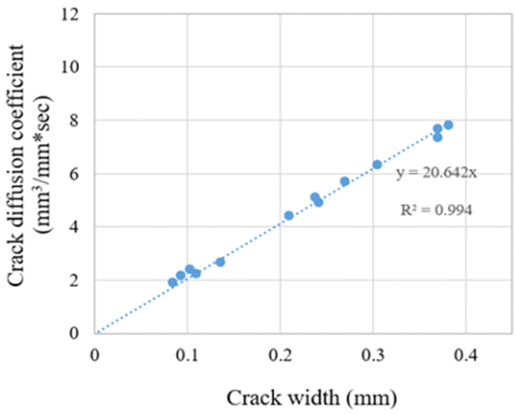


그림 3.1.14 모르타르 시편의 기체확산 실험 결과

- 이를 통해 균열폭의 예측이 가능하며, 균열폭의 예측값과 실측값을 비교한 결과, 표 3.1.5에서와 같이 평균 0.007mm, 4.12%의 오차율을 보였고, 최대 0.014mm의 오차를 나타냄.

표 3.1.5 모르타르 시편의 실측폭 및 추정폭 산정

Classification	Crack Width			
	Measured $w_m\,(mm)$	Predicted $w_p\,(mm)$	$\lvert w_m - w_p \rvert$ (mm)	$\frac{\lvert w_m - w_p \rvert}{w_p}$
M1	0.084	0.091	0.007	8.15%
M2	0.093	0.105	0.012	11.64%
M3	0.103	0.115	0.012	10.80%
M4	0.110	0.108	0.002	1.86%
M5	0.136	0.129	0.007	5.17%
M6	0.210	0.214	0.004	2.04%
M7	0.238	0.248	0.009	3.80%
M8	0.242	0.237	0.005	1.95%
M9	0.270	0.276	0.006	2.31%
M10	0.305	0.307	0.002	0.54%
M11	0.370	0.371	0.001	0.33%
M12	0.370	0.356	0.014	3.91%
M13	0.382	0.378	0.004	1.02%

⑤ 분석 및 평가방법

- 치유율(SH_{D_g})은 치유재령 0일 대비 치유재령 t에서 균열 시편의 기체확산계수 감소율로 다음 식 (3.1.7)로 나타냄.

$$SH_{D_g}(t) = \frac{D_{g,0} - D_g(t)}{D_{g,0}} \tag{3.1.7}$$

여기서, $D_{g,0}$는 치유재령 0에서 균열시편의 기체확산계수, $D_g(t)$는 치유재령 t에서 균열시편의 기체확산계수임.

- 실험 시간을 30분 이내로 제한할 경우, 기체의 확산은 정상 상태로 간주할 수 있어 실험결과의 모델링이 간단함.
- 또한 실험 시간의 최적화 설정을 통해 짧은 시간 내에 실험이 이루어질 수 있고 가스를 매개체로 실험이 진행되기 때문에 점도 및 실험 중의 재료 박리, 용해의 영향을 최소화하며 자기치유 콘크리트의 치유성능을 평가할 수 있을 것으로 판단됨.

관련 성과 [SCI-73]	
제안한 기체확산시험방법을 이용해 '기체확산 시험을 이용한 균열 모르타르 시편의 균열폭 예측'에 관한 논문을 게재함.	materials MDPI Article **Crack Width Estimation of Mortar Specimen Using Gas Diffusion Experiment** Do-Keun Lee [1], Min-Hyuk Lim [1], Kyung-Joon Shin [1,*] and Kwang-Myong Lee [2] [1] Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea; likedg@naver.com (D.-K.L.); limmh0701@naver.com (M.-H.L.) [2] Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea; leekm79@skku.edu * Correspondence: kjshin@cnu.ac.kr

(바) 마이크로 토모그래피 실험을 이용한 충진율 분석

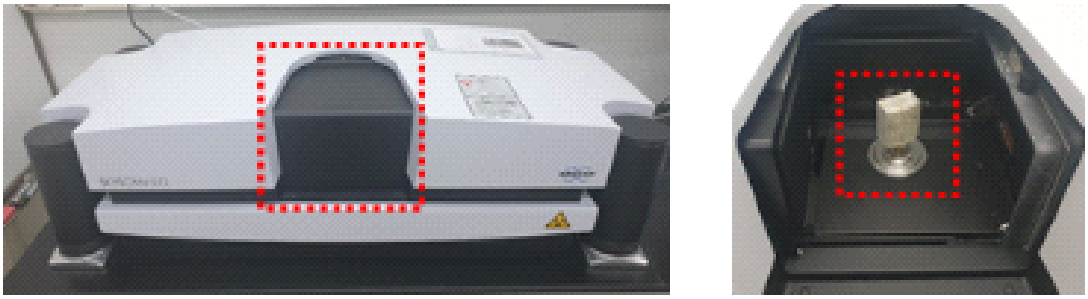
- 마이크로 토모그래피 실험을 이용한 자기치유 성능평가는 콘크리트 시편을 측정할 수 있는 CT 장비가 필요하므로 일반적으로 사용되는 방법은 아니지만 균열 충진을 직접적으로 평가할 수 있는 장점이 있음.
- 마이크로 토모그래피 실험방법은 다음과 같음.

(ⅰ) 그림 3.1.15(a)의 CT장비에 X-선이 균열면의 수직으로 통과할 수 있도록 그림 3.1.15(b)와 같이 시편을 거치함. 실험조건은 최소해상도 10 μm/픽셀임.

: X-선 에너지방출량, 균열시편-탐지기 거리, 각도당 X-선 노출시간, 시편크기 및 시편의 수분함유량 등을 조절하여 시편 내부의 공극상태를 확인할 수 있음.

(ⅱ) 시편 거치 후, CT장비를 이용하여 균열시편 내부 이미지를 촬영한 뒤 이미지 소프트웨어를 이용한 re-construction 과정을 통해 콘크리트 내부 공극의 부피를 제외하여 그림 3.1.16과 같이 균열면의 부피를 산출함.

(ⅲ) 치유양생 후 동일한 균열시편에 대해 동일한 방법으로 시편 내부 이미지를 촬영하여 균열면의 부피를 산출함.



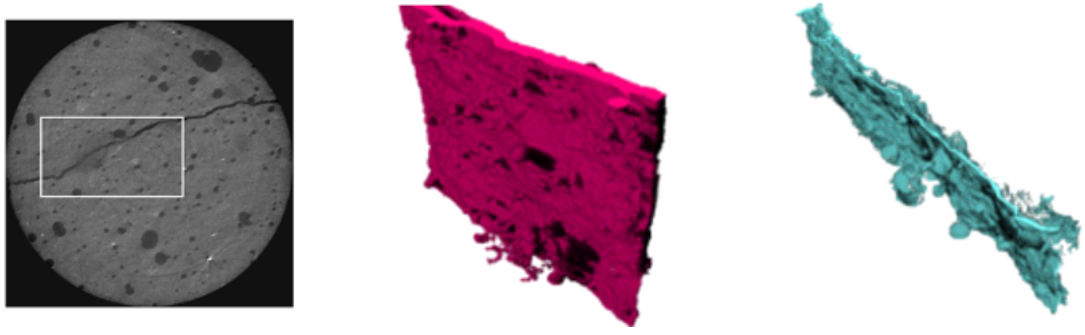
(a) Bruker, 'SKYSCAN 1272'　　(b) 시편 거치 방법

그림 3.1.15 마이크로 토모그래피 실험을 위한 CT장비

- 치유율(SH_v)은 치유재령 경과에 따른 균열시편 내부 균열면의 부피의 감소율로 나타냄.

$$SH_v(t) = \frac{V_{c,0} - V_c(t)}{V_{c,0}} \times 100 \quad (\%) \tag{3.1.8}$$

여기서, $V_{c,0}$은 치유재령 0일에서 균열의 부피, $V_c(t)$는 치유재령 t일에서 균열의 부피임.



(a) 균열부의 단층 이미지 (b) 균열부의 3차원 이미지 (c) 치유생성물의 3차원 이미지

그림 3.1.16 마이크로 토모그래피 시험에 의한 이미지 결과

(사) 반복 휨 시험에 의한 역학적 성능평가 기법

① 역학적 성능평가 기법 개요

- 기존 연구에서는 자기치유 콘크리트의 역학적 성능평가로 강도 및 강성회복을 주 평가지표로 사용함. 하지만 시험 중에 발생하는 균열의 위치와 폭이 일정하지 않기 때문에 이를 제어하기 위한 기술이 요구됨.
- 따라서 본 연구에서는 균열이 부재 중앙부에서 안정적으로 발생하도록 노치를 삽입하고, 균열개구변위(CMOD)를 측정하여 균열폭을 제어하는 방법을 적용함.
- 반복 휨 시험을 통해 측정한 최대하중 및 할선강성을 이용하여 강도회복지수(Index of Strength Recovery : ISR), 손상복구지수(Index of Damage Recovery : ISR) 및 소산에너지 증가지수(Index of dissipation energy gain : IDEG)를 이용하는 자기치유 성능평가 방법을 제안함.

② 시험체 제작

- 균열발생 위치를 제어하기 위하여 그림 3.1.17(a)와 같이 100×100×400 mm의 몰드 중앙에 길이 120 mm, 폭 40 mm, 두께 3 mm의 노치 도입용 아크릴을 부착하여 시험체를 제작하였음.
- 균열유도 과정에서 시험체의 연성파괴를 유도하기 위해 모르타르 배합에 PVA섬유를 0.5% 혼입하였음.

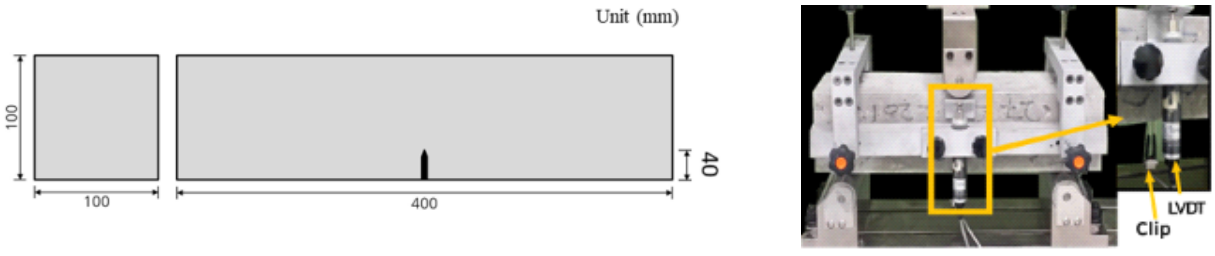
③ 시험방법

(ⅰ) 균열유도를 위하여 그림 3.1.17(b)와 같이 3점재하가 가능하도록 시험체를 위치시킨 후 0.05 mm/min의 속도로 하중을 가함.

(ⅱ) 균열유도를 위한 노치부에 클립게이지를 부착하여 하중 증가에 따른 균열개구변위(Crack Mouth Opening Displacement : CMOD)를 측정함.

(iii) CMOD가 목표 변위에 도달한 뒤 동일한 속도로 하중제거 후 광학현미경을 이용하여 시험체 측면의 균열선단변위(Crack Tip Opening Displacement : CTOD)를 측정하며 양 측면의 CTOD를 평균하여 사용함.

(iv) 동일한 균열시험체에 대해 치유양생을 실시한 뒤, 동일한 하중재하 속도로 휨시험을 반복 수행함.



(a) 시험체 제원 (b) 반복 휨 시험의 전경

그림 3.1.17 시험체의 휨시험 방법

④ 분석 및 평가방법

- 그림 3.1.18(a)는 하중과 CMOD의 관계를 나타냄. 치유양생 전·후의 실험결과로부터 하중과 할선강성을 구하여 식 (3.1.9)와 (3.1.10)에 의해 강도회복지수(ISR)와 손상복구지수(DR)를 계산함.

$$ISR = \frac{P_{reloading} - P_{unloading}}{P_{loading} - P_{unloading}} \tag{3.1.9}$$

$$IDR = \frac{K_{reloading} - K_{unloading}}{K_{loading} - K_{unloading}} \tag{3.1.10}$$

여기서, P는 최대하중, K는 강성, loading은 초기 균열유도단계의 실험결과, reloading은 재재하 단계 동안의 실험결과, unloading은 초기 균열유도단계에서 하중을 제거하였을 때의 실험결과를 나타냄.

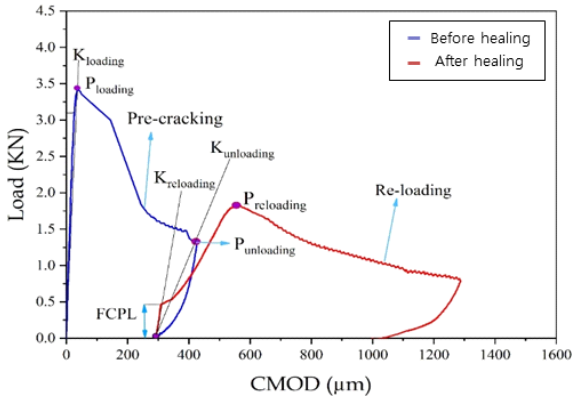
- 자기치유의 효과로 발생되는 소산에너지는 그림 3.1.18(b)와 같이 표현될 수 있으며, 응력과 CMOD의 추세로부터 소산에너지 지수, 소산에너지 증가지수(IDEG)를 계산함.

$$IDEG = \frac{E_{D\,healed}}{E_{D\,virgin}} \tag{3.1.11}$$

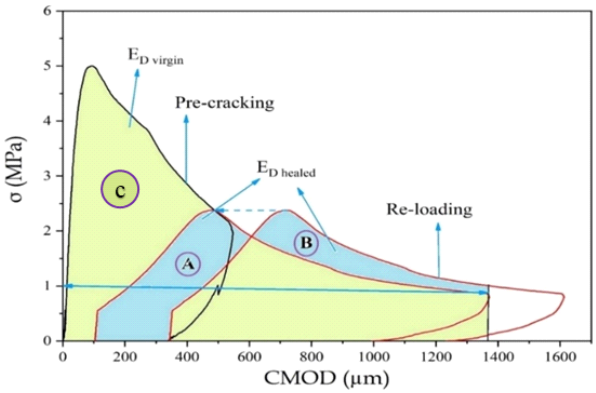
여기서, $E_{D\,healed}$는 치유효과로 인한 소산에너지(그림 3.1.18(b)의 Ⓐ 또는 Ⓑ영역), $E_{D\,virgin}$은 기준시편의 총 소산에너지(그림 3.1.18(b)의 Ⓒ영역)를 나타냄.

- 그림 3.1.18(c)은 반복휨시험에 의한 실험결과를 나타내었으며, 그림 3.1.18(d)는 식 (3.1.11)에 의해 산출한 소산에너지를 나타냄.

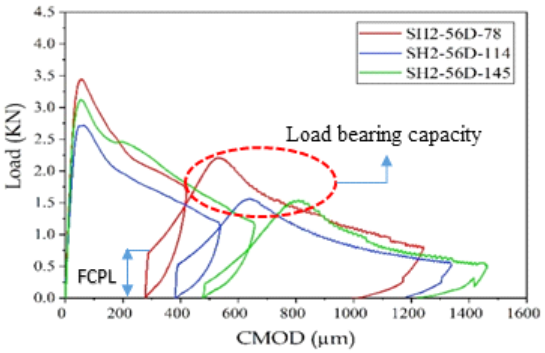
- 그림 3.1.18(d)는 초기 균열폭에 따른 치유율(IDEG)을 나타낸 것으로 초기 균열폭이 작을수록 치유율이 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, OPC와 비교하여 자기치유 소재를 활용한 SH 배합에서 더 큰 치유성능을 나타내는 것을 확인할 수 있음.



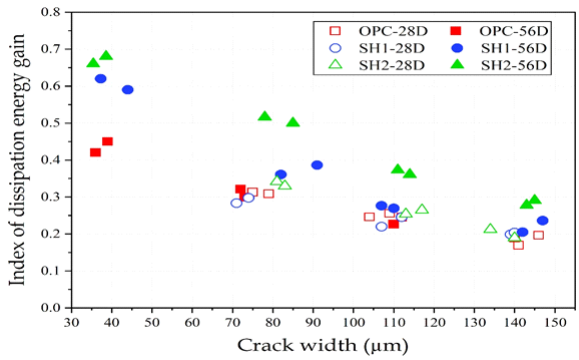
(a) 하중 vs. CMOD 곡선



(b) 소산에너지 계산



(c) 반복 휨실험 후 하중 vs. CMOD 결과



(d) 균열폭 vs. 치유율의 관계

그림 3.1.18 치유율 산출 방법

관련 성과 [SCI-74]

제안한 반복하중시험을 이용해 '치유소재를 사용한 섬유보강 균열모르타르의 역학적성능 회복'에 관한 논문을 게재함.

Hindawi
Advances in Materials Science and Engineering
Volume 2019, Article ID 3420349, 14 pages
https://doi.org/10.1155/2019/3420349

Hindawi

Research Article

Mechanical Recovery of Cracked Fiber-Reinforced Mortar Incorporating Crystalline Admixture, Expansive Agent, and Geomaterial

Abdul Salam Buller,[1] **Fahad ul Rehman Abro**,[1] **Kwang-Myong Lee**,[1] **and Seung Yup Jang**[2]

[1]*Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU) 2066, Seobu-Ro, Jangan-Gu, Suwodn-Si, Gyeonggi-Do 16419, Republic of Korea*
[2]*Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Uiwang, Gyeonggi-do 16106, Republic of Korea*

Correspondence should be addressed to Kwang-Myong Lee; leekm79@skku.edu

(아) 부재단위 자기치유 콘크리트의 성능평가 기술

① 매크로셀 부식 시험(macrocell corrosion test)

- 염해내구성에 대한 자기치유 성능을 정량적으로 평가하기 위해 그림 3.1.19와 같이 매크로셀 부식실험을 적용하였으며, 치유재령에 따른 부식발생 시간으로 내구성을 평가하는 방법을 제안하였음.
- 그림 3.1.19는 부식시험의 모식도를 나타낸 것으로 시험체 제작 및 시험과정은 다음과 같음.

(ⅰ) 시험체는 80×80×240 mm의 직육면체 시험체에 D10 스테리인리스 철근과 D6 철근을 배치하고, 전단철근으로 D6 철근을 사용함.

(ⅱ) 그림 3.1.20(a)와 같이 볼트를 통해 가력하여 균열을 유도한 후 시험체 상면의 5개 구간에서 균열폭을 측정함(균열폭 평균값 사용).

(iii) Ponding dot은 균열부로 3.5% NaCl 수용액을 침투 및 확산시키기 위한 장치로 상부를 제외한 5면에는 에폭시 코팅을 하여 수분의 유입을 차단함. 그림 3.1.20(b)는 균열유도 후 ponding dot을 설치한 모습임.

(iv) 균열을 유도한 후에 치유 양생을 위해 초기 28일 동안 물을 주입함. NaCl 수용액을 ponding dot에 주입한 다음 그림 12의 디지털 멀티미터를 이용하여 전류량을 측정하여 부식 개시 시기 및 진전도를 평가함.

(v) 전류량은 초기 5시간 동안 초당 1회의 데이터 측정하며, 5시간 이후 분당 1회의 데이터 측정함. 총 28일간 전류량을 측정하여 시간 단위 평균값을 사용함.

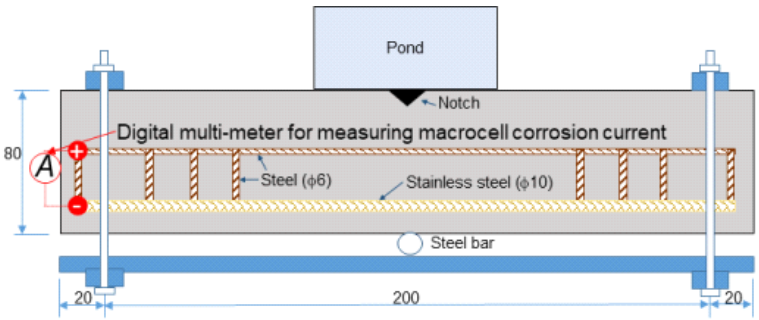
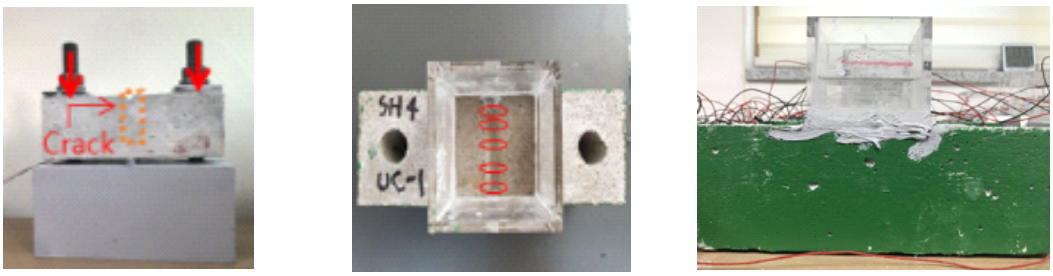


그림 3.1.19 부식 실험 개요도



(a) 균열유도 방법 (b) Ponding dot 설치 (c) Macro-cell 측정

그림 3.1.20 부식 시험체 제작 과정

- 부식 시험체를 이용한 실험 진행 및 결과 분석은 다음과 같음.

(i) 2019년 11월 2주차 부터 매크로셀 부식 전류(macro-cell corrosion current)를 측정함.

(ii) 그림 3.1.21은 전류측정 결과로, 모든 실험군에서 유효한 전류 변화가 나타나지 않음.

- 매크로셀 전류가 관찰되지 않은 것은 스터럽과 철근 접합부에서 절연처리 부족으로 스터럽을 통해, 매크로셀 전류가 흘렀기 때문일 가능성이 높음.

- 이와같은 문제를 보완하고자 시험체 제작과정을 그림 3.1.22와 같이 수정하였고, 시험 및 측정 방법을 다음과 같이 개선함.

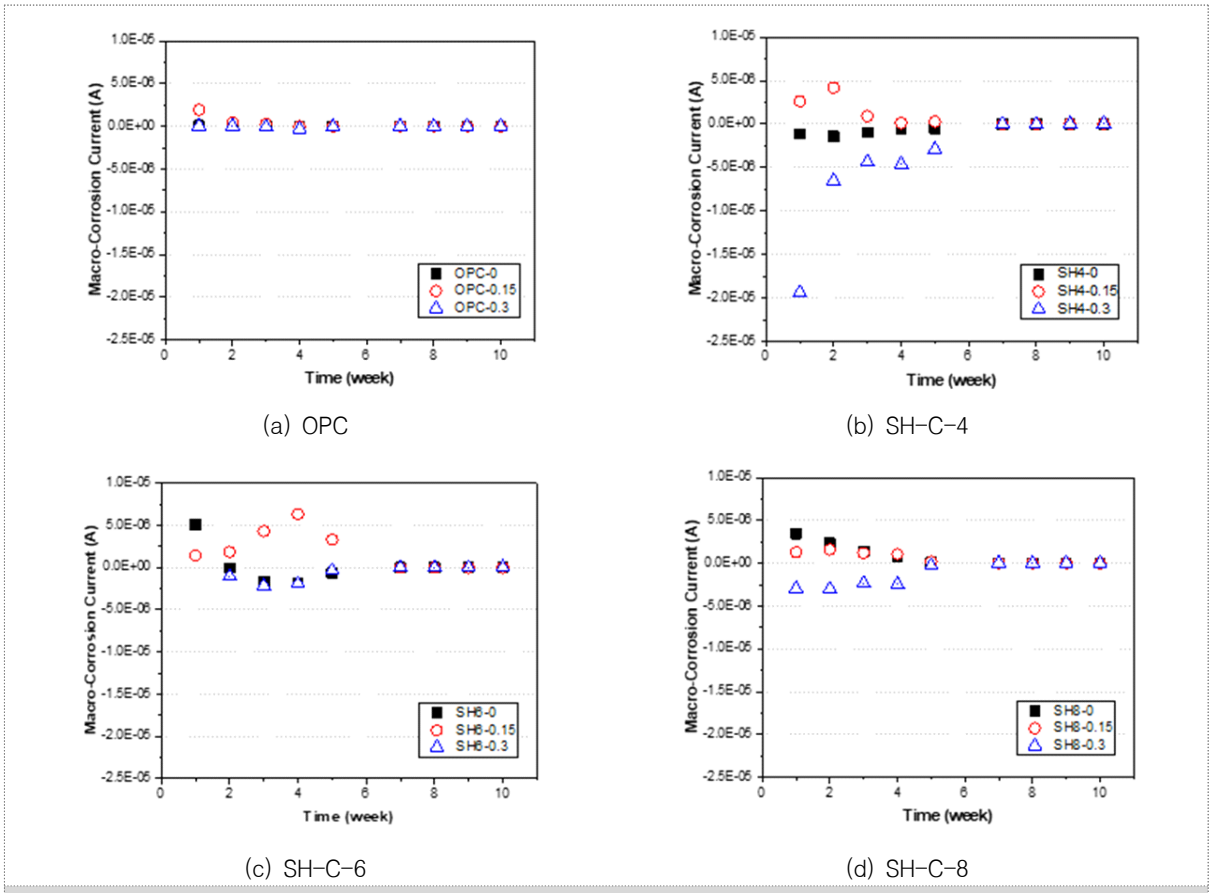
(i) 스터럽을 설치하는 구간을 에폭시 코팅하여 절연처리 시행함.

(ii) 균열유도 후 균열폭 유지를 위해, 지그에 고정시킨 상태에서 ponding을 진행함.

(iii) 이종금속 간 전위차 발생 방지를 위해 stainless steel을 사용하지 않고 위, 아래 모두 동일한 규격의 일반 철근(D10)을 사용함.

(iv) 측정 주기는 격주 간격으로 진행하며, 전류 측정을 통한 부식 발생여부를 평가함.

(v) 시편 절단 후 AgCl 용액을 분무하여 부식 발생이 확인 후 염소이온 침투깊이를 측정함.



(a) OPC (b) SH-C-4

(c) SH-C-6 (d) SH-C-8

그림 3.1.21 부식 시험 결과

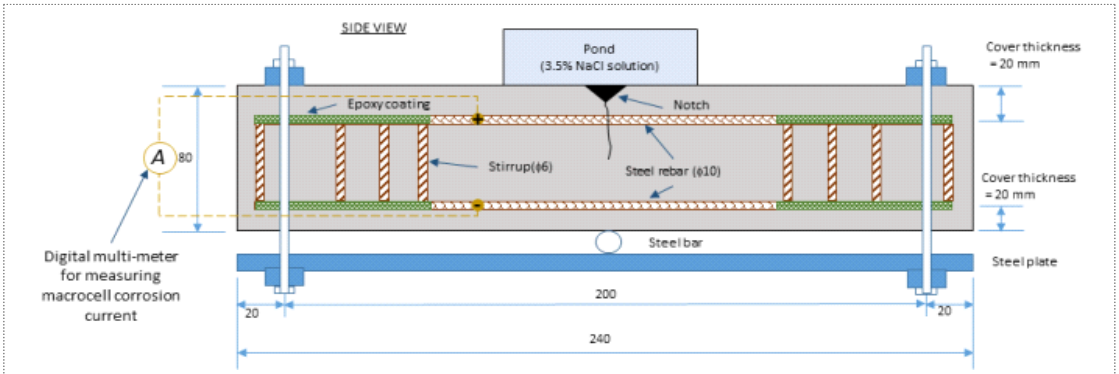


그림 3.1.22 수정된 부식 실험 개요도

② 보 시험체 휨시험

- 보 부재에 전단균열을 유도하여 자기치유 효과에 의한 균열회복성능(균열폭의 감소)와 반복실험을 통해 발생하는 최대하중 상승량(최대강도)을 평가함.
- 그림 3.1.23(a)는 시험체의 제원으로 시험체 제작 및 시험과정은 다음과 같음.

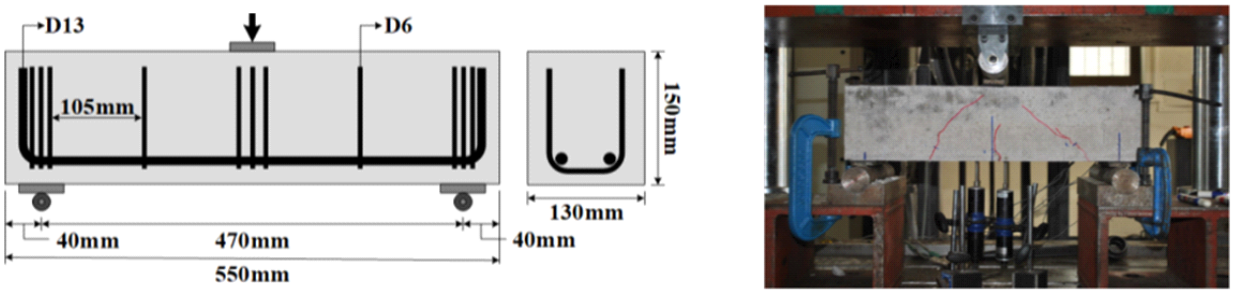
(i) 시험체는 전단균열이 유도될 수 있는 제원으로 설계(e.g. b = 130 mm, h = 150 mm, l = 550 mm, a/d = 1.8)하여 제작함.

(ii) 부재의 처짐량을 측정하기 위해 시험체 중앙 하단부에 LVDT를 설치하고 그림 3.1.23(b)와 같이 3점재하 변위제어 방법으로 0.02 mm/sec의 속도로 하중을 가함.

(iii) 균열의 폭은 하중 제거 후 디지털현미경을 사용하여 측정하며, 균열폭의 신뢰도를 위해 다수의 지점에서 균열폭을 측정하여 그 값을 평균하여 사용함.

(iii) 동일한 균열시험체에 대해 치유양생을 실시한 뒤, 동일한 하중재하 속도로 휨시험을 반복 수행함.

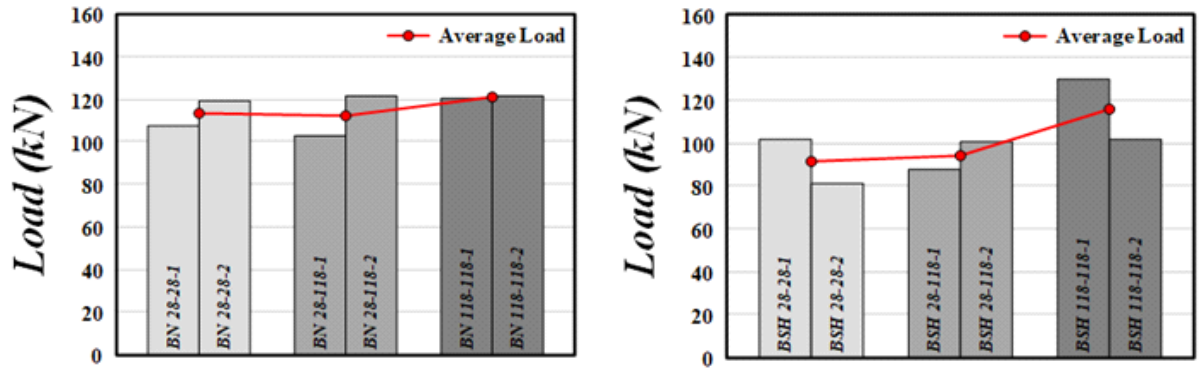
- 치유재령 0일에서 균열유도를 위해 설계전단하중의 80%를 가력했을 때 균열의 크기는 0.2 mm보다 크게 나타났지만, 하중을 제거한 뒤에는 균열이 닫히면서 균열폭이 0.05~0.14 mm로 감소하였음.



(a) 실험체 제원 (b) 하중재하에 의한 균열양상

그림 3.1.23 전단균열 유도 실험체 제작

- 그림 3.1.24은 치유양생을 진행하며 반복실험한 보 부재의 최대하중량을 나타낸 것으로 치유성능 평가는 반복실험을 통해 발생하는 최대하중 상승량으로 자기치유 성능을 평가함.



(a) 일반 모르타르 실험체 (b) 자기치유 실험체

그림 3.1.24 보 부재 최대하중 변화량

- 치유재령 0일과 치유재령 t에서의 최대하중을 이용하여 식 (3.1.12)로부터 치유율을 산출함.

$$SH_{P_{max}} = \frac{P_{max(t_2)} - P_{max(t_1)}}{P_{max(t_1)}} \times 100 \quad (\%) \qquad (3.1.12)$$

여기서, $P_{max(t_1)}$은 치유재령 t_1에서의 최대하중, $P_{max(t_2)}$는 치유재령 t_2에서의 최대하중임.

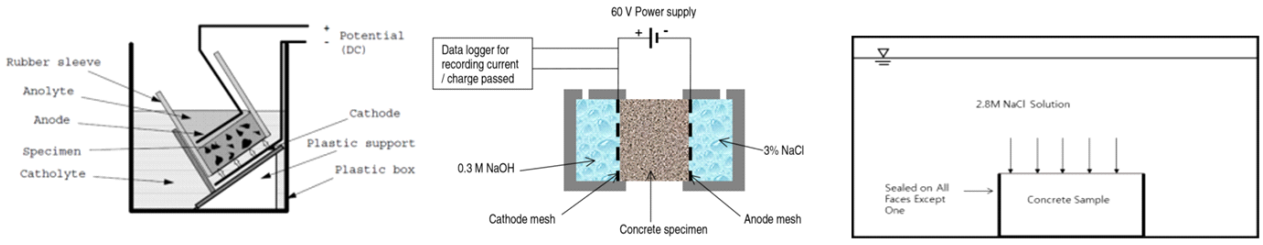
나. 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기술 개발

(1) 반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술

(가) AAS 모르타르의 염해 내구성 평가 방법

① 염해내구성 시험의 개요

- 대표적인 콘크리트의 확산계수 측정 시험방법으로는 자연 확산 시험(natural diffusion test), 침지 시험(immersion test), 전기 확산영동 시험(electrical migration test) 등이 있음.
- 일반적인 시멘트계 재질에서는 염해에 의한 내구성의 저하가 장시간에 걸쳐 일어나므로, 효율성을 위해 촉진실험에 의해 내구성능평가가 이루어지고 있음.
- 기존 시험방법 중 가장 측정시간이 짧은 방법은 전위차를 이용하여 염소이온을 침투시키는 전기 확산영동 시험으로 정상상태 시험(steady-state test)와 비정상상태 시험(non-steady-state test)으로 나눌 수 있는데, 그 중에서도 비정상상태 시험방법이 가장 빠른 시간에 측정이 가능함.
- 그림 3.2.1과 표 3.2.1에 대표적인 염소이온 확산시험 방법을 정리함.



(a) 침투실험 (NT build 492) (b) RCTP 실험 (ASTM C 1202) (c) 장기침지 실험 (NT build 443)

그림 3.2.1 염소이온 확산시험의 종류

표 3.2.1 염소이온 확산시험의 시험 방법 및 평가지표

시험 방법(기준)	평가지표
비정상상태 확산시험 (NT Build 492)	변색 침투깊이 (확산계수 산정)
정상상태 확산시험 (ASTM C 1202)	전하량
장기침지 실험 (NT Build 443)	염화물 농도 프로파일 (확산계수 산정)

- AAS 모르타르의 염해 내구성은 활성화제의 종류와 첨가량에 따라 OPC 콘크리트의 수준을 만족하거나 상회하는 것으로 알려져 있으나, 기존 일반적인 시멘트계 재질의 시험체에 대한 동일한 촉진 시험방법의 적용성 검증은 미흡한 실정임.
- 따라서 AAS 모르타르에서 기존 시멘트계 재질의 촉진 염해 내구성 평가 방법과 장기 침지 방법에 의한 결과 비교 및 분석을 통해 적용성을 검증하고자 하였음.

② AAS 모르타르의 염해내구성 시험

- 실험을 위해 알칼리 활성화제로서 수산화나트륨, 수산화칼슘 및 규산나트륨을 이용한 시편(G1, G2, G3)과 비교군으로 OPC 모르타르 시편 표 3.2.2와 같이 제작하였음.
- 각 표본에 대해 전기영동 촉진 방법인 NT BUILD 492, ASTM C 1202 방법과, 장기침지 방법인 NT BUILD 443(1995) 방법으로 염해 내구성 평가를 수행함.
- NT Build 492에 따라 확산시험을 수행한 결과, 이온침투 깊이가 매우 작게 나타나 제시된 조건의 두 배로 전압(2V)과 시험 시간(2t)을 증가시켜 각각의 조건에 대해 실험을 수행함.

표 3.2.2 AAS 모르타르 시편의 배합 비율

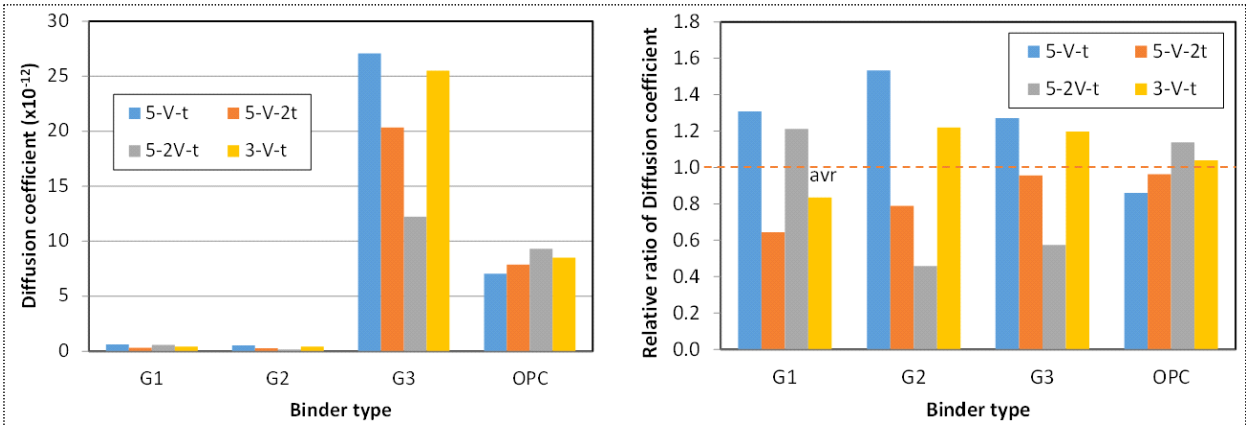
Mix	Source Material	Main activator	Sub activator 1	Sub activator 2
G1	Slag 93%	NaOH 3% (42.9%)	Na_2CO_3 4% (57.1%)	-
G2	Slag 90%	Na_2SiO_3 10% (100%)	-	-
G3	Slag 87%	$Ca(OH)_2$ 7% (53.8%)	Na_2SO_4 3% (23.1%)	Na_2SiF_6 3% (23.1%)
OPC	OPC 100%	-	-	-

③ AAS 모르타르의 염해내구성 시험 결과

- NT build 492에 따라 수행한 실험 결과(표 3.2.3)에 따르면 G1과 G2 배합은 매우 낮은 확산계수를 보였으나, G3는 OPC 모르타르 보다 높은 확산계수를 나타냈음.
- 그림 3.2.2(b)와 같이 OPC 배합의 경우 전압의 상승, 시험 시간의 증가 등 시험 조건의 변동에 따라 염소이온확산계수가 특정한 경향을 보였으나 AAS 모르타르는 시험 조건과 뚜렷한 연관성을 나타내지 않음.
- 특히 OPC 배합의 변동 계수(Coefficient of Variation, 이하 CoV)는 12%로서 NT Build 492에서 제시하고 있는 시험 결과의 CoV와 유사한 수준으로 평가된 반면 AAS의 확산계수의 CoV는 31% 이상으로 매우 높은 값을 보임.
- 따라서, NT build 492 방법은 AAS 모르타르의 염해내구성 평가에 미흡한 것으로 판단됨.

표 3.2.3 NT build 492에 따라 수행한 촉진 실험 조건 및 실험 결과

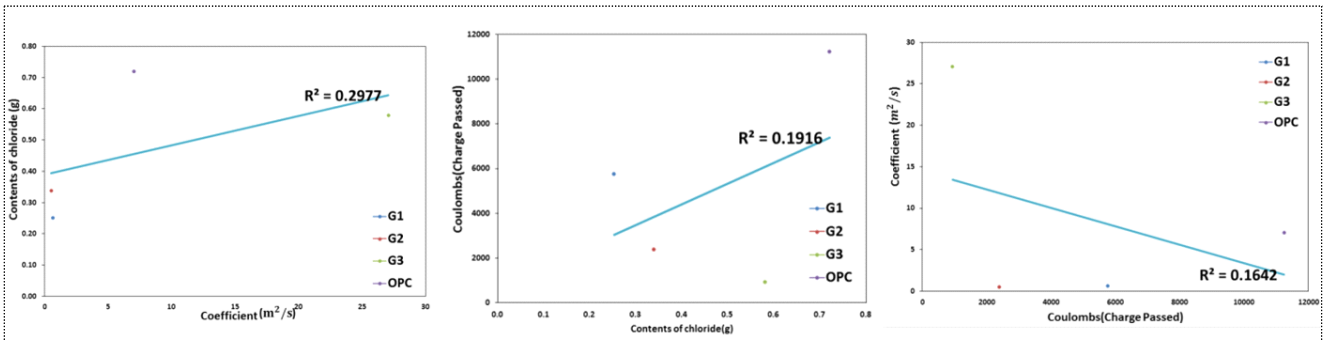
Test conditions	Diffusion Coefficients ($\times 10^{-12}$ m^2/s)			
	G1	G2	G3	OPC
50-V-t	0.6	0.5	27.1	7.0
50-V-2t	0.3	0.3	20.3	7.9
50-2V-t	0.6	0.2	12.2	9.3
30-V-t	0.4	0.4	25.5	8.5



(a) 염소이온 확산계수 (b) 평균값에 대한 염화물 확산계수 상대비율

그림 3.2.2 염화물 확산 실험 결과

- ASTM C 1202에 따른 염소이온 침투 저항성 실험 결과, OPC 배합은 가장 높은 통과전하량을 보였고, AAS 모르타르는 모두 OPC보다 낮은 값을 보임.
- 따라서 RCPT 실험을 통한 AAS 배합의 염소이온 침투 저항성은 OPC 배합보다 우수한 것으로 나타났으나 그 경향은 사용한 활성화제의 종류에 따라 다르게 나타났으며, NT Build 492 측정 결과와 RCPT 평가 결과는 일관된 경향을 보이지 않았음.
- NT build 443의 장기침지를 실험을 통해 5mm 깊이에서 염소이온 함유량 변화를 관찰한 결과 G1 < G2 < G3 < OPC 순으로 염소이온 함유량이 높게 나타남.
- 그러나 장기 침지 측정 결과와 RCPT 결과의 비교 시, 관계가 불분명하였으며 이는 각 시편의 서로 다른 활성화제 사용으로 인한 결과로 추정됨
- 각 실험간 상관관계 분석결과인 그림 3.2에 따르면 각 실험 결과간의 상관관계는 낮은 것으로 평가되었으며, 이를 통하여 기존의 염해내구성 촉진실험방법은 AAS 모르타르의 내구성 평가에 미흡한 것으로 판단됨.



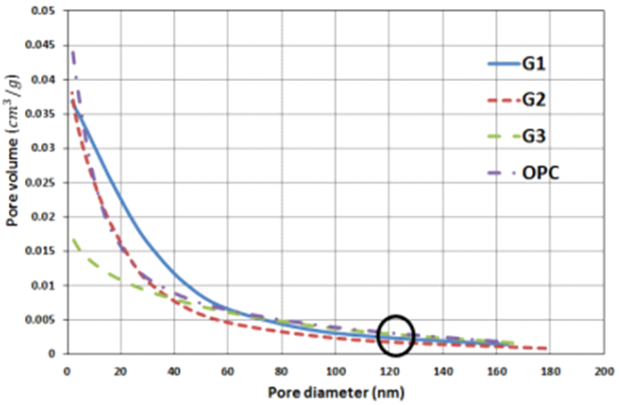
(a) NT build 443 vs. NT build 492 (b) NT build 443 vs. ASTM C 1202 (c) ASTM C 1202 vs. NT build 492

그림 3.2.3 실험 방법 간 상관관계 분석

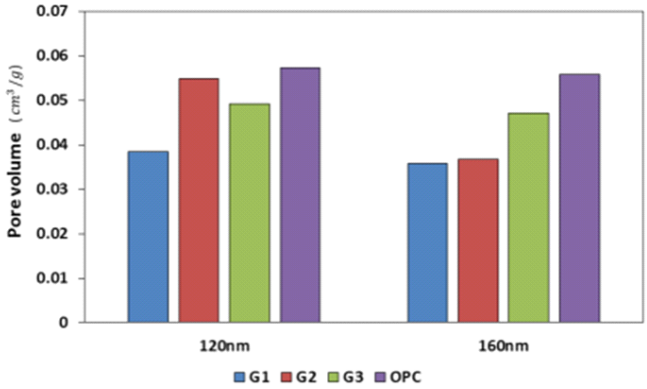
④ AAS 모르타르의 염해내구성 평가기법의 검증

- 내염해 성능의 간접적인 평가를 위해, 수은 압입법, 질소흡착법을 통해 시편의 공극 분포와 내염해성 실험 결과와 상관관계 분석을 수행함.

- 공극 크기에 따른 부피 측정 결과와 염해 내구성 실험 결과의 연관성을 분석하였으며, 그림 3.2.4와 같이 공극 직경 160nm에서의 공극 부피와 NT BUILD 443에 의한 확산계수는 선형 관계가 있음을 확인함.



(a) Result of gas adsorption



(b) Pore volume of specimen by diameter of pore

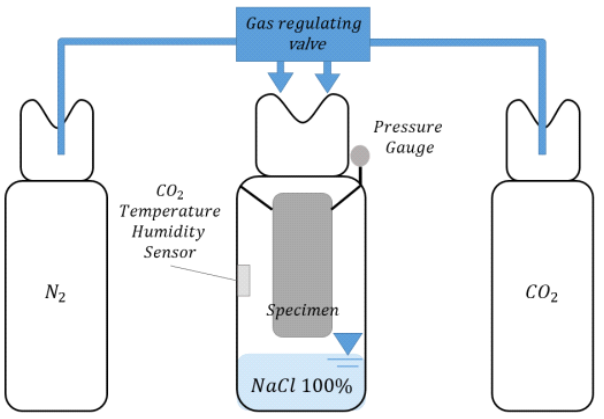
그림 3.2.4 시험시편의 공극 분석 결과

- 공극 부피와 NT BUILD 443에 의한 구한 확산계수는 선형관계가 관찰되었으나, 촉진 염해 내구성능 평가방법에서는 일관된 결과를 도출하지 못하였음.
- 따라서 AAS 모르타르에 촉진실험을 적용하기 위해서는 활성화제의 종류에 따른 메카니즘 분석과 함께 실험방법의 개선이 필요함.

(나) 탄산화 내구성 평가 방법

① 탄산화 촉진시험의 개요

- 무시멘트 콘크리트는 일반 콘크리트와 비교하여 탄산화에 의해 과다한 열화가 유발되는 경향이 있으며, 배합 및 활성화제에 따라 탄산화 반응이 활성화되는 습도 및 온도조건이 상이함.
- 따라서 기존의 대기압 고농도 촉진 시험을 대신하여, 그림 3.2.5와 같은 저농도 고압 촉진시험을 제안하여, 결과를 비교함으로써 기존 및 제안한 실험방법의 타당성을 검토하였음.





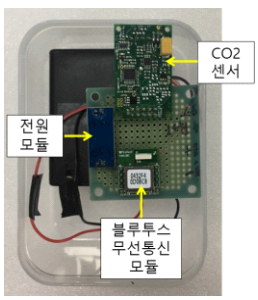
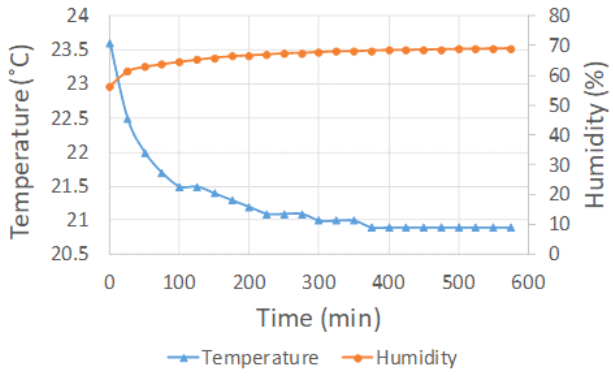
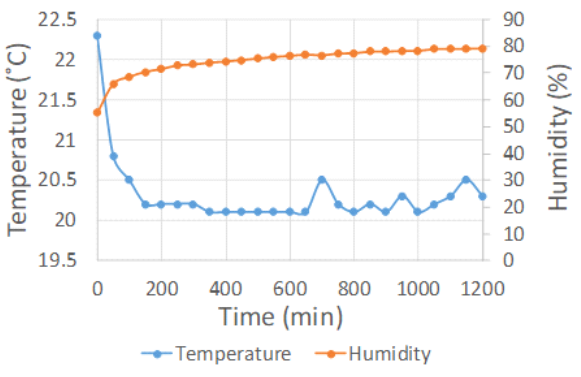


그림 3.2.5 고압 저농도 탄산화 시험 장치

- 실험장치에 대한 검증을 위해 그림 3.2.6과 같이 가스만을 주입하여 내부의 온도 및 습도를 측정한 결과, 3시간 이내에 70%의 목표 상대 습도를 회복하였으며 3시간 이내에 용기내부의 온도가 대기온도에 수렴하는 것을 관찰함.



(a) 고압 탄산화 4기압 1cycle



(b) 고압 탄산화 8기압 1cycle

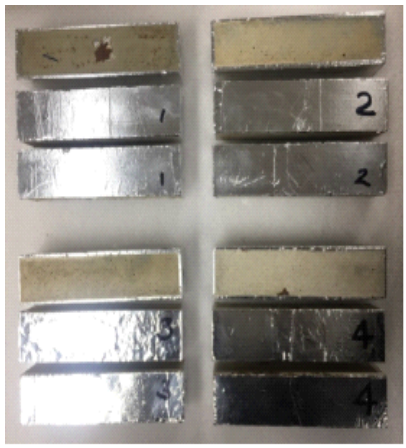
그림 3.2.6 탄산화 시험 압력 용기의 환경 변화

② AAS 모르타르의 고압 저농도 탄산화 촉진시험

- 염해내구성 실험과 동일하게 표 3.2.1의 OPC, 분말형 주 자극제 계열별(NaOH, Na_2SiO_3, $Ca(OH)_2$) AAS 모르타르 시편 G1, G2, G3의 시험체를 사용함.
- 양생 28일 후의 AAS 모르타르 시편을 용기 내에 거치시킨 뒤 초기 탄산화 속도 측정하였으며, $Na(OH)_2$ 수용액을 통해 압력용기내의 습도를 일정조건(60 ~ 80 %)으로 설정하였음.
- 그림 3.2.7과 같이 각 시편의 5면에 알루미늄 테이프를 부착하여 1방향 탄산화를 유도하였으며, 그림 3.2.8과 같이 특정 cycle에서 20 mm로 절단하여 절단면에 페놀프탈레인 용액을 도포하여 탄산화 깊이를 측정하였음.
- 용기내 CO_2 농도가 1.5% 이하가 된 경우 실험 1 cycle이 완료된 것으로 간주하고 CO_2 농도를 다시 높여 반복 실험을 진행하였으며 6 cycle까지 관찰함.

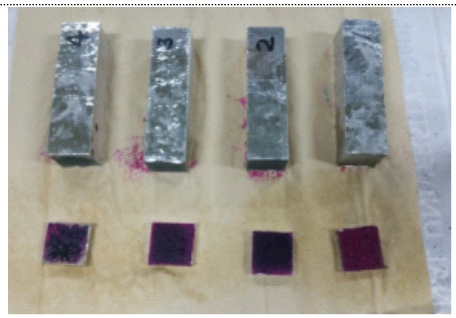


(a) 준비된 시험용 시편



(b) 탄산화 실험을 위한 표면 처리

그림 3.2.7 실험 시편의 준비



(a) 8기압 1cycle

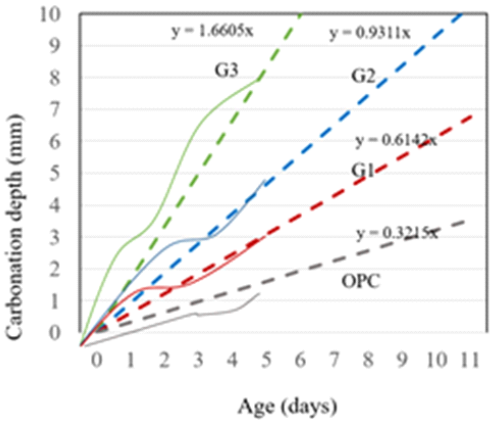


(b) 8기압 2cycle

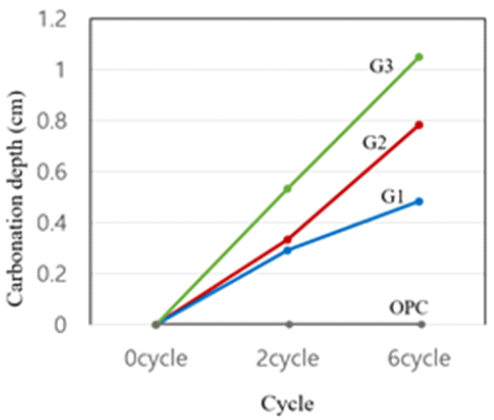
그림 3.2.8 탄산화 진행 후 침투 깊이 측정

③ AAS 모르타르의 고압 저농도 탄산화 촉진시험 결과

- AAS 모르타르와 OPC는 그림 3.2.9와 같이 일반적인 대기압 고농도 촉진탄산화 조건(20 ± 2 ℃, RH 65 ± 10%)과 고압 촉진탄산화 조건하에서 OPC > G1 > G2> G3 순으로 탄산화저항성이 높게 나타남.



(a) 5% 촉진탄산화



(b) 8기압 1% 고압탄산화

그림 3.2.9 고농도 촉진탄산화 및 고압 촉진탄산화 결과 비교

④ AAS 모르타르의 염압 저농도 탄산화 촉진시험의 검증

- 제안된 실험장치는 용기내의 온습도와 CO2 농도 및 압력을 임의로 설정하여 탄산화 실험을 수행할 수 있으며, 기존 실험방법의 결과와도 일관성을 보이는 것을 확인함.

- 제안된 실험방법은 탄산화 반응에 의하여 소모되는 CO_2의 양을 직접적으로 측정할 수 있기 때문에, 탄산화 반응의 분석에 장점을 갖고 있음.

다. 비파괴시험 기반 자기치유 성능 평가 기술 개발

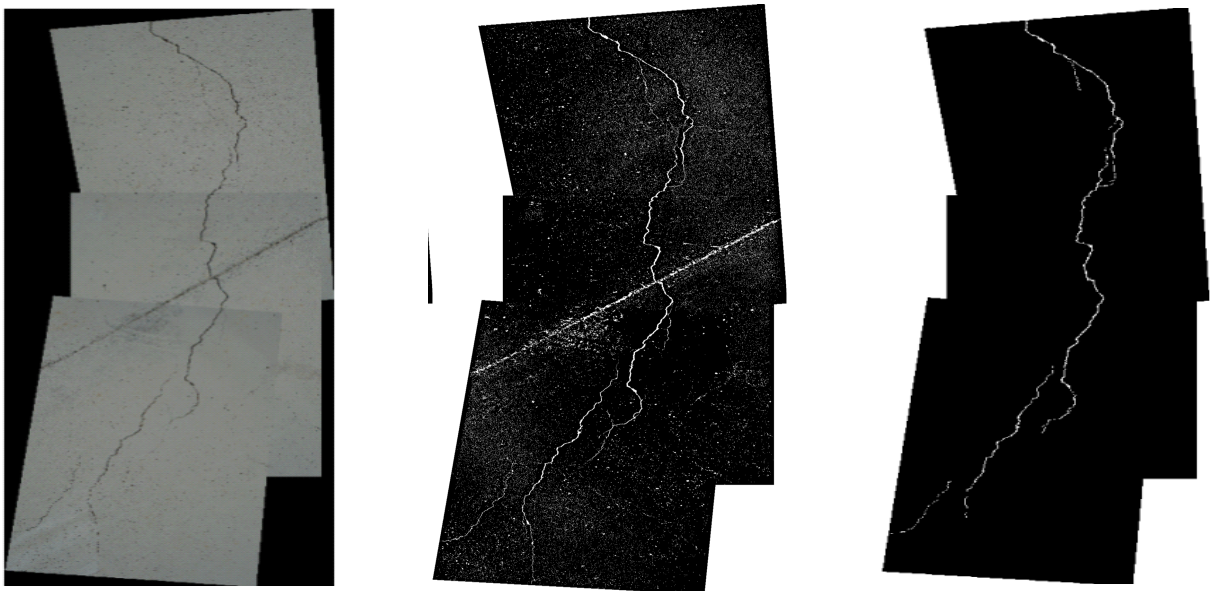
(1) 비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술

(가) 이미지스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술

- 자기치유 콘크리트의 균열크기 저감효과는 표면 균열폭의 변화를 정성적으로 관찰하는 수준임. 그러나 콘크리트의 표면 균열 폭은 측정 위치에 따라 달라지므로 특정 위치에서의 균열폭 변화만으로 자기치유 성능을 평가하는 것은 합리적이지 않음. 따라서 표면 개구 면적의 변화를 활용한 평가 방법을 개발함.

① 이미지스캐닝 기반 균열 폭/면적 측정 기법

- 콘크리트 표면에 발생한 전체적인 균열 정보를 효과적으로 추출하기 위해서는, 연속으로 촬영된 이미지들을 기반으로 한 영상정합 과정이 필요함.
- 따라서 연속으로 촬영된 이미지 내의 SURF(speeded-up robust features) 특징들을 추출하고, 이들의 관계를 기반으로 추정된 호모그래피(homography)를 통해 그림 3.3.1(a)와 같이 영상정합을 수행함.
- 이미지 이원화는 디지털 카메라를 통해 촬영한 이미지 내부 픽셀의 통계적인 특성을 바탕으로 명암을 구분하는 기술로서, 본 연구에서는 이를 활용하여 상대적으로 어두운 색을 가지고 있는 균열을 0(검은색)으로, 밝은 색을 가지고 있는 배경을 1(흰색)으로 그림 3.3.1(b)와 같이 구분하여 추출함.



(a) 영상 정합 (b) 이미지 이원화를 통한 균열 식별 (c) 딥러닝 기반의 무균열부 제거

그림 3.3.1 이미지스캐닝 기법 개요

- 다양한 이미지 이원화 기법 중, 본 연구에서는 잡음 제거에 효과적인 표 3.3.1의 Sauvola's method를 채택하고 미디안 필터(median filter) 및 형태학적 처리(morphological process)와 결합하여 균열을 효과적으로 식별함.

표 3.3.1 이미지 이원화 기법 종류 및 내용

기술	공식	내용
Niblack	$T = m + k \times s$	k는 sensitivity, m과 s는 각각 평균 및 표준편차
Sauvola	$T = m\left\{1 - k \times \left(1 - \frac{s}{R}\right)\right\}$	R은 표준편차를 normalize 하기 위한 값

- 콘크리트 표면에 대비하여 상대적으로 어두운 무균열부도 이미지 이원화를 통해 균열로 잘못 인식될 수 있기 때문에, 딥러닝 기술을 적용하여 그림 3.3.1(c)와 같이 이원화 이미지 내부의 무균열부들을 효과적으로 제거함.
- 즉, 영상정합을 통해서 연속으로 촬영된 다수의 이미지들을 정합하고 이원화 과정을 수행한 후, 내부에 남아 있는 모든 객체들을 포함하는 맞춤형 박스를 생성하고, 이를 앞서 언급한 딥러닝 네트워크에 적용하여 이미지 내부의 무균열부를 효과적으로 제거함.
- 이원화 이미지에서 균열로 인식되어 남아있는 픽셀들의 총합을 균열면적(crack opening area)으로 계산하고, 그림 3.3.2와 같이 식별된 균열을 구성하고 있는 픽셀들의 skeleton 및 edge 정보를 이용하여 균열폭을 산정함.

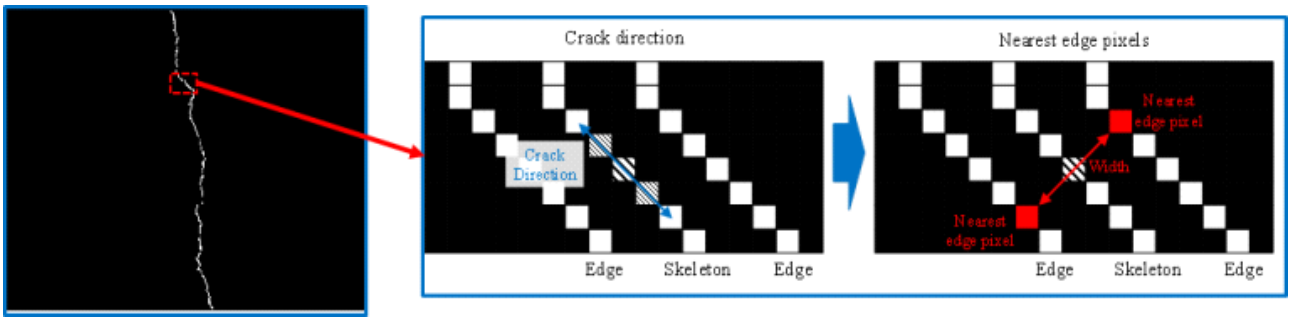


그림 3.3.2 균열폭 측정 방법

② 분석 및 평가 방법

- 그림 3.3.3의 자동 슬라이더에 카메라를 장착한 시스템을 개발하여, 자기치유 콘크리트의 회복된 균열 치유 성능을 평가하는 데 활용하였음.
- 앞서 개발한 이미지스캐닝 기반 균열폭/면적 측정 기법의 검증을 위하여 광학현미경으로 측정된 결과와의 비교를 수행함. 컬러타겟을 균열이 회복된 자기치유 콘크리트 표면에 부착하였으며, 이는 본 카메라 슬라이더 시스템과 광학현미경을 통해 각각 촬영하였음.
- 개발된 기법의 경우에는 앞서 언급된 과정을 통해 균열면적을 계산하며, 광학현미경으로 촬영된 이미지는 사용자가 직접 눈으로 확인하고 균열면적을 계산하였음.
- 15개 위치에서의 회복된 균열면적을 이미지분석 기법을 활용하여 측정하고 광학현미경과 비교한 결과는 그림 3.3.4와 같음.

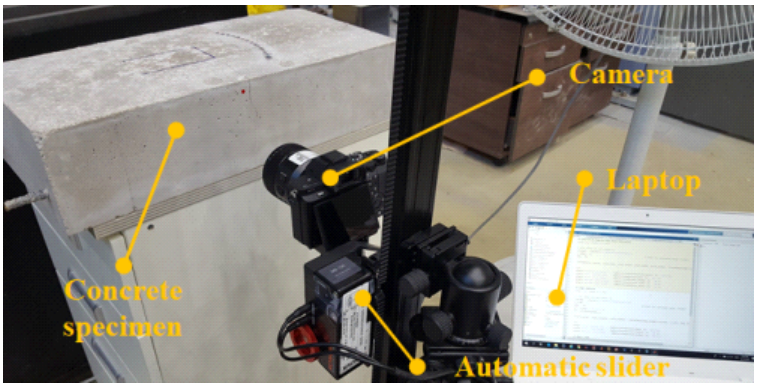


그림 3.3.3 카메라 슬라이더 시스템

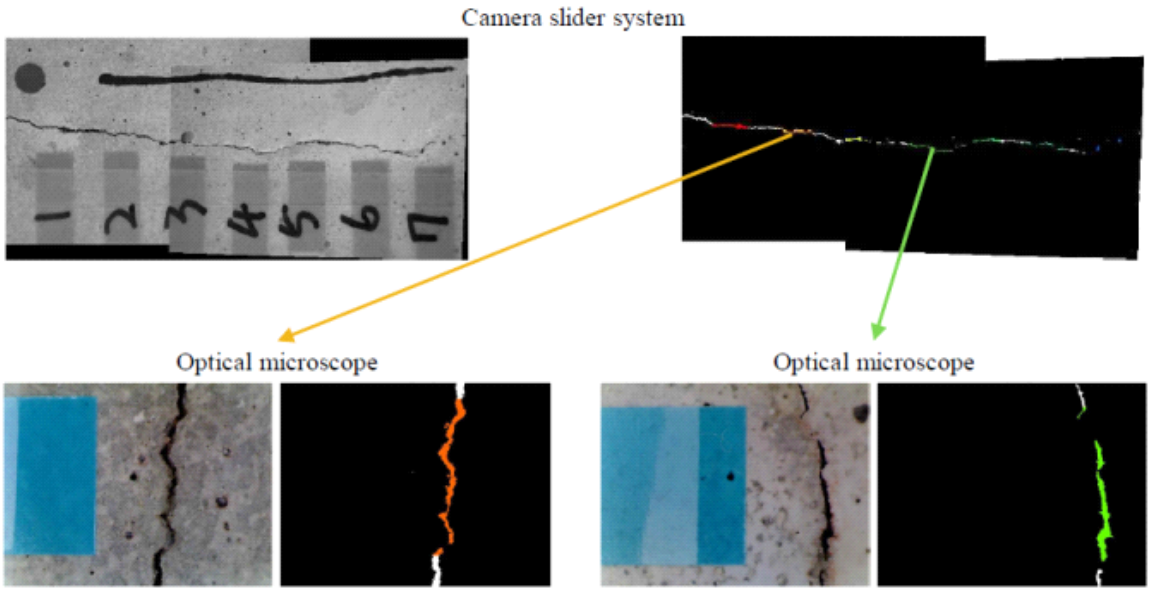


그림 3.3.4 카메라 슬라이더 시스템으로 촬영한 자기치유 콘크리트 표면의 균열 이미지

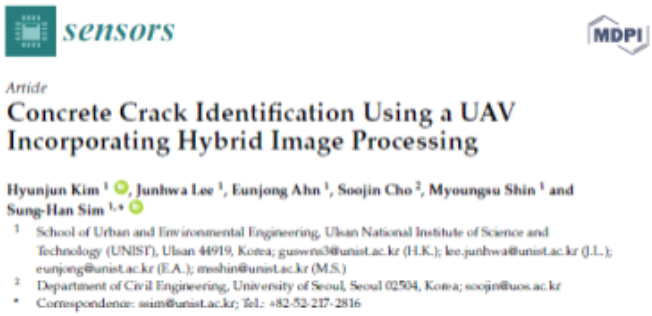
- 제안한 이미지스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술을 이용하여 측정된 자기치유 콘크리트의 회복된 균열면적 측정 결과를 광학현미경으로 측정한 결과와 비교하였을 때, 평균 오차율은 8.8%, 평균 정확도는 91.2%로 검증되었음.

③ 비파괴 성능 평가 기법 표준화(안)

- 자기치유 콘크리트의 비파괴 성능평가 기법 표준화(안)은 디지털 카메라로 촬영한 자기치유 콘크리트 표면 이미지에서 추출된 균열 정보를 이용하여 균열 회복 성능을 정량적으로 평가하는 기술적 내용을 규정함.
- 이미지스캐닝 기반 자기치유 콘크리트의 균열 면적 치유율은 다음 식과 같이 정의함.

$$SH_A = \frac{A_c(t)}{A_c} \times 100\ (\%) \tag{3.3.1}$$

여기서 $A_c(t)$는 치유재령 t일에서의 균열면적(mm^2), A_c는 초기 균열면적(mm^2)임.

관련 성과 [SCI-25]	
제안된 이미지스캐닝 기법을 이용하여 '콘크리트 구조물의 균열 식별을 위한 영상 이진화 방법의 비교 분석'에 관한 논문을 게재함.	
관련 성과 [SCI-27]	
제안된 이미지스캐닝 기법을 이용하여 'UAV 하이브리드 이미지 프로세싱을 이용한 콘크리트의 균열 식별'에 관한 논문을 게재함.	

(나) 표면탄성파 기반 균열치유 성능 평가 기술

① 표면탄성파 기반 균열 깊이 평가 기법

- 외부에서 촬영한 콘크리트의 표면 균열폭은 실험체 내부의 균열 정보를 제공하지 못하기 때문에 균열폭 변화만으로 자기치유 성능을 평가하는 것은 합리적이지 않다고 판단되어 균열깊이 변화를 포함한 자기치유 평가기법을 개발함.
- 표면탄성파 투과 기법은 에너지가 표면으로부터 한파장 이내에 집중되어 있어 (그림 3.3.5), 비파괴 시험 방법 중 균열깊이 평가에 가장 민감한 특성을 갖고 있음.
- 투과계수는 균열면에 입사한 파(그림 3.3.5, 센서 B)와 균열면을 통과한 파(그림 3.3.5, 센서 C)의 비율로 표현할 수 있음. 센서와 가진원의 다양성을 줄여주기 위하여 자기 보정기법을 적용하여, 균열면 전후 센서 B와 C사이의 투과계수 $T_{BC}(f)$를 식 (3.3.2)와 같이 계산할 수 있음.

$$T_{BC}(f) = \sqrt{\left| T_{BC}(f)T_{CB}(f) \right|} = \sqrt{\frac{X_{AC}(f)X_{DB}(f)}{X_{AB}(f)X_{DC}(f)}} \tag{3.3.2}$$

여기서 $X_{ij}(f)$는 위치 i에서 가진한 표면파를 위치 j에서 계측한 신호임.

- 투과계수는 주파수에 의존하는 특성이 있어, 높은 신호 일관성계수를 갖는 주파수 대역대에서 투과계수 면적(스펙트럼에너지)을 무균열 상태로 정규화된 값(식 (3.3.3))인 스펙트럼에너지투과비($SETR$)를 활용하여, 균열깊이, 보수 성능, 자기치유 성능 평가 연구를 수행함.

$$SETR(d_i) = \frac{\int_{f_L}^{f_U} \left| T_{BC}(f,d_i) \right| df}{\int_{f_L}^{f_U} \left| T_{BC}(f,d_0) \right| df} \tag{3.3.3}$$

- 콘크리트 배합이 표면탄성파 파라미터에 미치는 영향 분석을 위하여, 서로 다른 균열깊이(0, 15, 30, 45 mm)와 서로 다른 배합(모르타르, 일반강도 콘크리트, 고강도 콘크리트)을 갖는 총

12개 실험체에 대해 표면탄성파 투과실험을 수행하여, 표면탄성파 신호거동특성 분석, 민감한 표면탄성파 파라미터 도출 및 상관관계를 분석함.

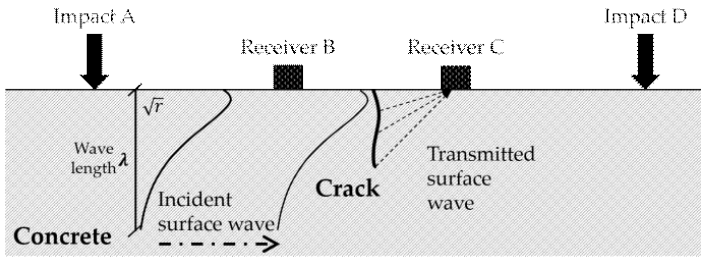


그림 3.3.5 표면탄성파의 균열 투과

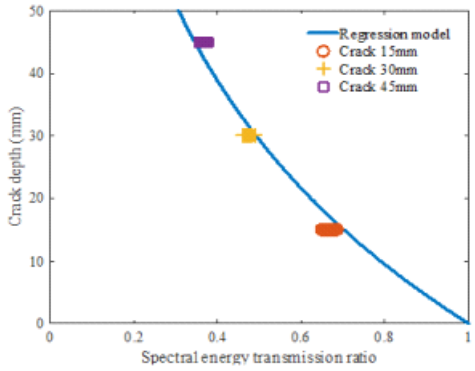


그림 3.3.6 스펙트럼에너지투과비 기반 균열깊이 추정 모델

- 콘크리트의 재료 특성이 표면탄성파 투과에 미치는 영향이 균열깊이보다 적음을 확인하였고, 이를 토대로 그림 3.3.6과 같이 콘크리트 균열깊이와 스펙트럼에너지투과비(SETR) 간의 지수함수 형태의 회귀분석 관계식인 식 (3.3.4)를 도출함.

$$\text{균열깊이}(mm) = -98.2 \times \log(SETR) \tag{3.3.4}$$

② 분석 및 평가 방법

- 계측한 스펙트럼 에너지투과비의 가진원-센서-균열 간 거리에 대한 민감도 분석을 위하여, 가진원-센서-균열 간 거리를 30/15 mm, 50/25 mm로 set-up으로 수행함.

  : 30/15 mm(그림 3.3.6)와 50/25 mm(그림 3.3.7의 파란선) setup으로 수행한 결과 가진원-센서-균열 거리를 변화가 균열깊이보다 스펙트럼 에너지투과비에 끼치는 영향이 적음을 확인함.

- 자기치유 성능 평가에 적용하기에 앞서 0, 15, 30, 45 mm 균열깊이를 갖는 일반강도 콘크리트에 보수재료로 가장 일반적으로 활용되고 있는 에폭시를 주입하여 균열보수 성능평가 실험을 수행함.

  : 그림 3.3.7과 같이 모든 균열깊이에서 에폭시를 활용한 균열 보수 시 스펙트럼에너지투과비가 무균열 대비 95% 이상으로 회복하는 것을 확인함.

- 탄성파 투과기법을 유황-시멘트 복합재료의 자기치유 성능 평가를 수행한 결과 최대 탄성파 투과에너지 회복률(절대값)은 그림 3.3.8과 같이 무균열 시편 대비 80% 수준임.

- 본 연구에서 그림 3.3.9와 같이 실험에 높은 재현성을 갖는 비접촉식 표면파 시험 시스템을 구축하여, 자기치유콘크리트 부재의 균열치유 성능평가 및 치유성능 평가기법 정확도를 검증에 활용함.

- 7일, 14일, 28일, 63일째 수중에서 치유양생한 일반 모르타르 실험체를 꺼내어, 표면탄성파 시험을 실시하였고, 계측한 스펙트럼 에너지투과비를 활용하여 식 (3.3.4)를 토대로 균열깊이를 추정함.

- 추정한 균열 깊이와 이미지스캐닝 기법으로 측정한 균열깊이(실험체 옆면)와 비교하였을 때, 그림 3.3.10과 같은 상관관계를 보였으며, 실 균열깊이 대비 평균 오차율은 19.1%로 분석됨.

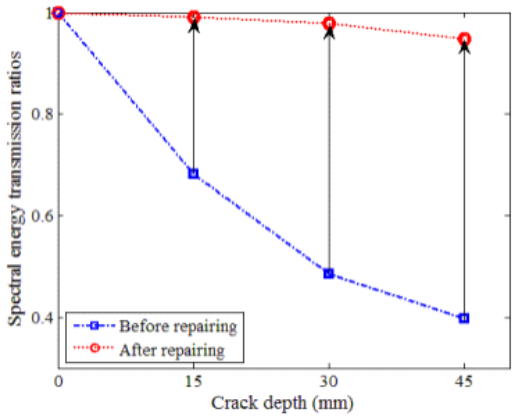


그림 3.3.7 콘크리트 균열 보수에 따른 스펙트럼에너지투과비 변화

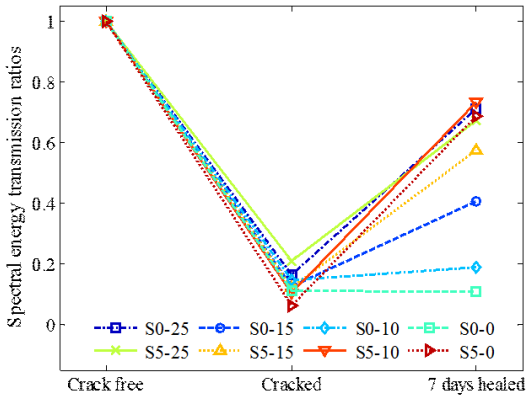


그림 3.3.8 유황-시멘트 복합재료 자기치유에 따른 스펙트럼에너지투과비 변화

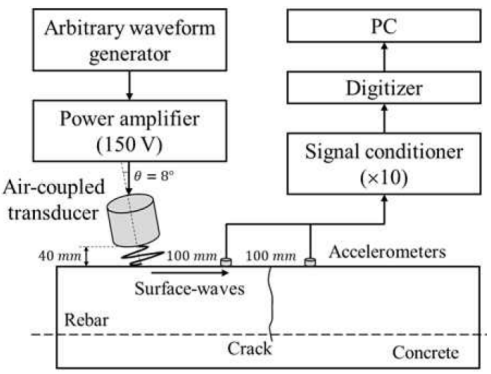


그림 3.3.9 비접촉식 표면파 시험 시스템

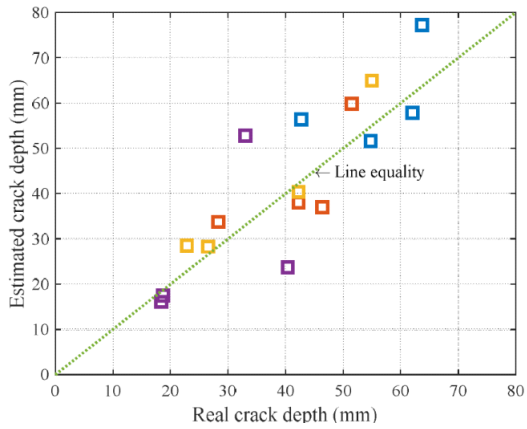


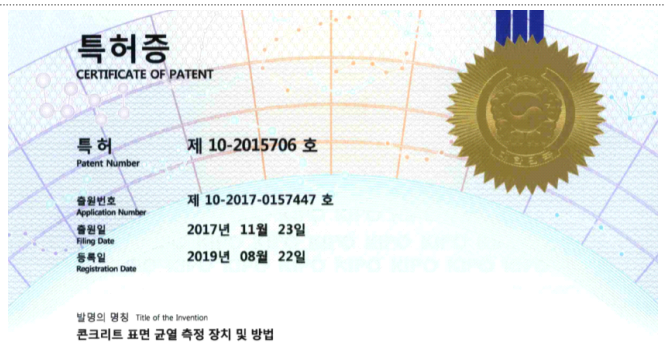
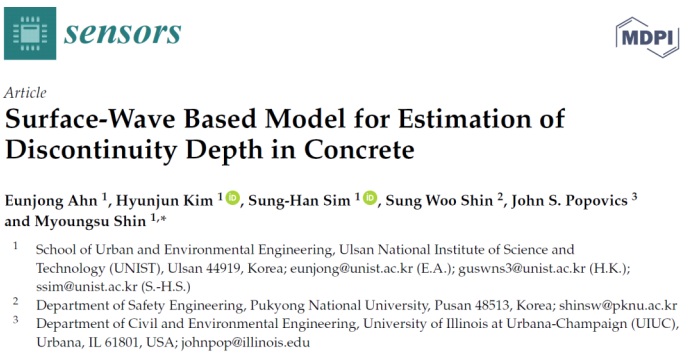
그림 3.3.10 부재수준 균열깊이 치유 성능 평가 정확도

③ 비파괴 성능평가 기법 표준화(안)

- 현재 표준화된 비파괴 성능 평가 기법 표준화(안)이 부재하여, 추후 현장에서 표면탄성파 기법을 활용한 자기치유 소재의 성능 평가시 활용할 수 있도록 실험 방법과 신호처리 방법을 포함한 전반적인 과정을 표준화(안)으로 작성함.
- 에너지투과비는 실험체마다 다른 초기값을 고려해야 하므로 자기치유 전·후의 균열시험체 외에 균열도입 전 시험체에 대한 표면탄성파 투과실험을 수행하여야 함. 즉, 균열 생성 전, 균열 생성 후, 자기치유 후 최소 3번의 측정이 필요함.
- 표면탄성파 기반 자기치유 콘크리트 균열의 치유율은 식 (3.3.5)와 같이 정의함.

$$SH_{SETR} = \frac{SETR(t) - SETR_0}{1 - SETR_0} \times 100 \qquad (3.3.5)$$

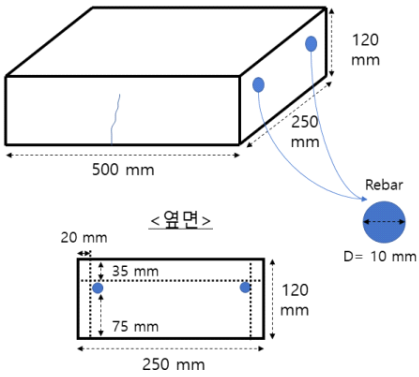
여기서, $SETR(t)$는 치유재령 t일에서 측정한 스펙트럼 에너지투과비, $SETR_0$ 는 치유재령 0일(균열 유도 직후)에서 측정한 스펙트럼 에너지투과비임.

관련 성과 [특허-30]	
제안한 비파괴시험 기반 자기치유 평가기법을 통해 '콘크리트 표면 균열 측정 장치 및 방법' 에 대해 특허 출원함.	
관련 성과 [SCI-10]	
제안한 표면탄성파 기법을 통해 '시멘트 재료의 자가치료를 위한 초음파 비파괴 시험 기법의 원리 및 적용'에 관한 논문을 게재함.	
관련 성과 [SCI-45]	
제안한 표면탄성화 기법을 통해 '콘크리트 불연속 깊이 추정을 위한 표면탄성파 기반 모델'에 관한 논문을 게재함.	

(다) 부재수준 자기치유 콘크리트 성능 평가

① 시험 개요

- 본 연구팀에서 개발한 이미지스캐닝 기법, 표면탄성파 기법, 비선형초음파 기법을 활용하여, 한국건설생활환경시험연구원(KCL)과 세명대학교(SMU)에서 개발한 치유소재를 혼입한 자기치유 모르타르 부재의 성능 평가 및 비교 분석을 수행함.
- 그림 3.3.11과 같이 실험체는 500(길이) × 250(폭) × 120(높이) mm로 제작하였고, 균열 생성 시 관통 균열 생성 방지를 위하여 시편의 윗면으로부터 40 mm 떨어진 위치(압축측)에 지름 10 mm인 철근 2개를 배근함.
- 0.25 ~ 0.35 mm 크기의 수직 단일 균열을 생성하기 위하여, 그림 3.3.12와 같이 UTM을 이용해 3점 하중 재하를 실시함.
- 각 실험체의 7일, 14일, 28일, 63일째 치유 성능을 평가하기 위하여, 해당 일자에 실험체를 수조에서 꺼내어 상온에서 6시간 정도 표면 건조시킨 후에 위 시험들을 수행하였고, 실험을 마친 후에 다시 수조에 양생하여 실험체 치유 과정을 연속으로 진행시켰음.

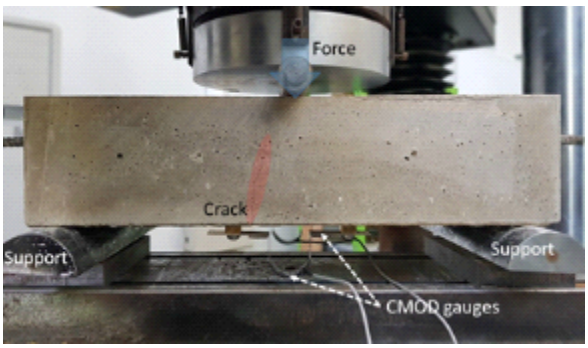


(a) 실험체 상세

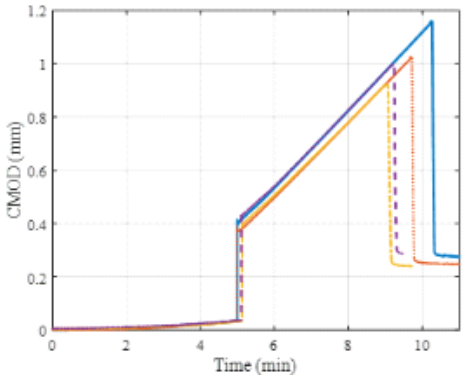


(b) 실험체 타설

그림 3.3.11 부재수준 자기치유 실험체 상세



(a) 3점 휨 시험



(b) 균열 개구 폭 변화

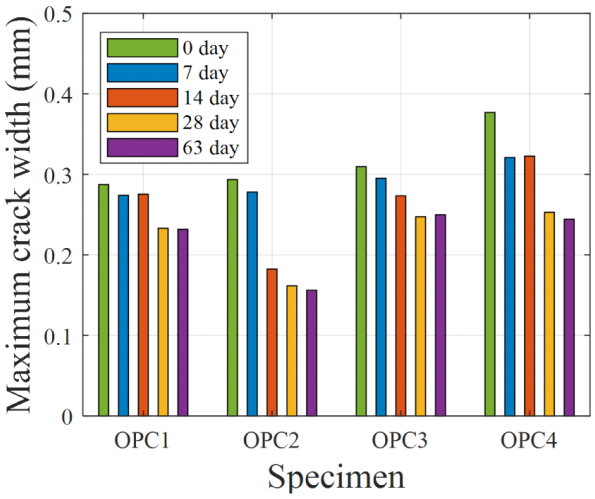
그림 3.3.12 부재수준 자기치유 실험체 균열 생성 과정

② 이미지스캐닝 기법

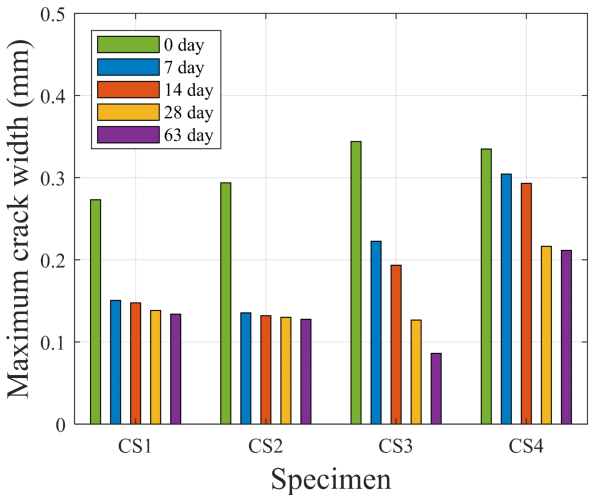
- 본 연구에서 제안된 이미지 스캐닝 기법을 활용하여 자기치유 모르타르 부재의 균열폭/면적 치유 성능 평가를 수행하였고, 이때 촬영거리는 약 100 mm 이며, 영상 정합 기술을 수행 후, pixel resolution은 약 0.01 mm/pixel 임.
- 자기치유의 특성 상, 상대적으로 얇은 균열이 포함된 균열 팁 부분에서 우선적으로 치유가 시작되기 때문에, 최대 균열 폭보다는 전체 균열 면적의 변화량이 자기치유 성능을 평가하기에 적합한 것으로 사료되어, 균열 면적 모니터링을 통하여 자기치유 성능 평가를 수행함.
- 자기치유 7 ~ 63일 기간 촬영한 균열면적은 그림 3.3.13과 같으며, 식 (3.3.1)에 따라 평가한 치유율은 각 배합별로 다음의 표 3.3.2와 같으며, 최종적인 치유율은 1) SMU 80%, 2) KCL 75%, 3) OPC 72% 순서로 나타남.

표 3.3.2 자기치유에 따른 균열면적 및 표면탄성파 투과계수 치유율

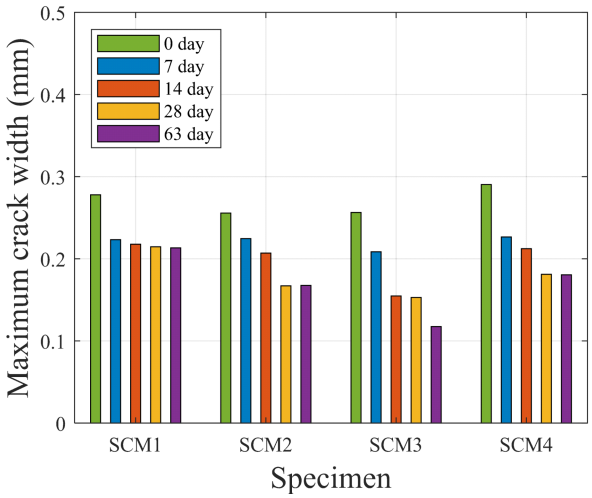
배합	균열면적 치유율 (%)				표면탄성파 투과계수 치유율 (%)			
	7일	14일	28일	63일	7일	14일	28일	63일
OPC	44	59	67	72	15	25	29	43
SMU	48	56	73	80	22	29	43	59
KCL	36	53	61	75	20	23	32	48



(a) OPC

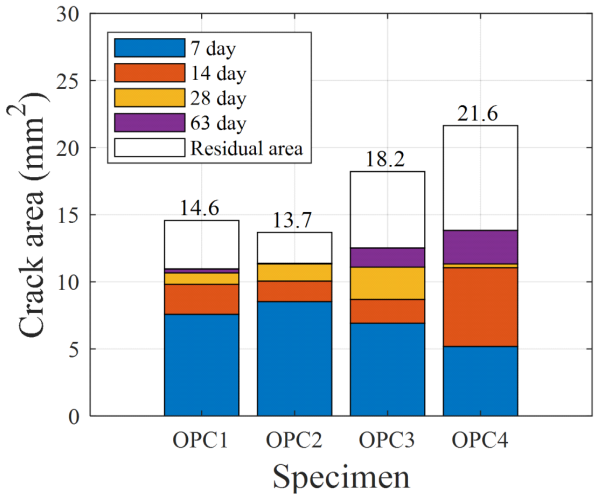


(b) SMU

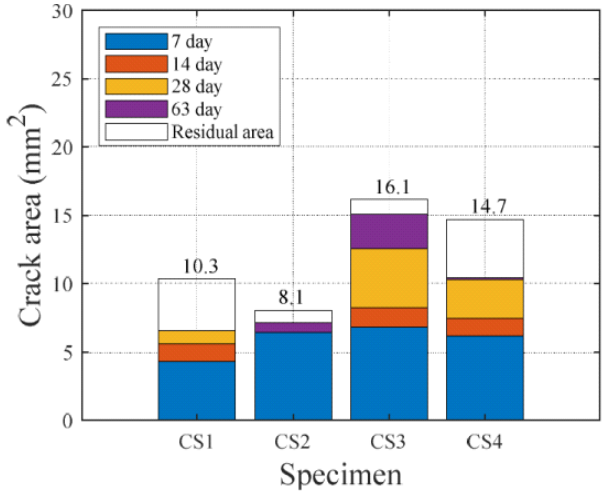


(c) KCL

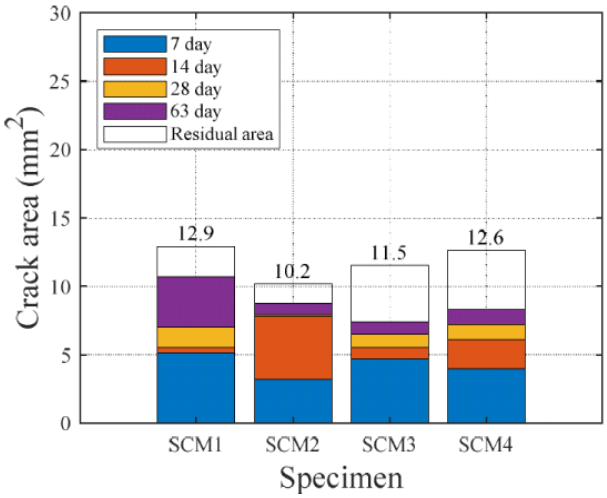
그림 3.3.13 자기치유에 따른 최대 균열폭 변화



(a) OPC

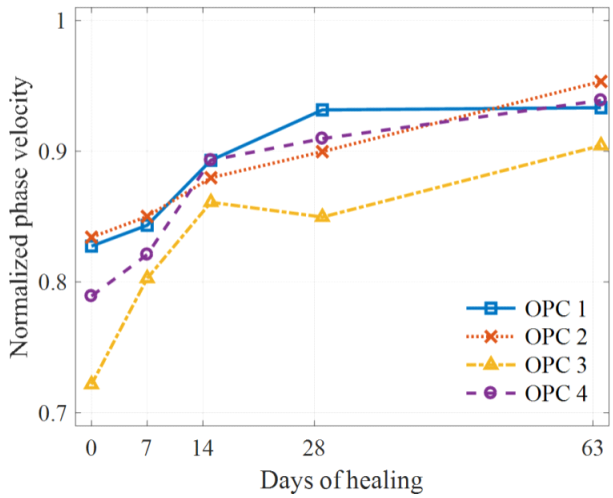


(b) SMU

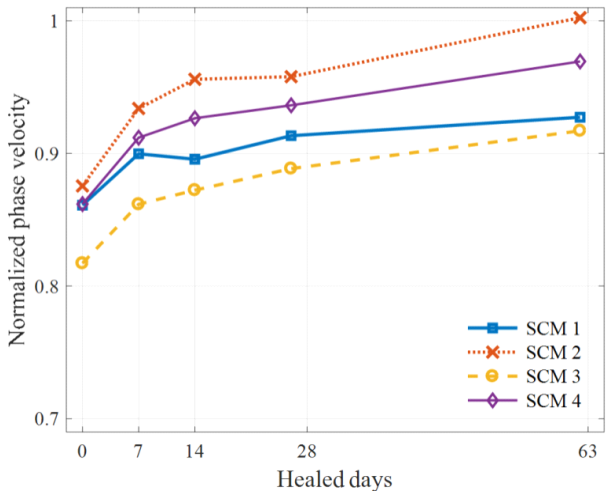


(c) KCL

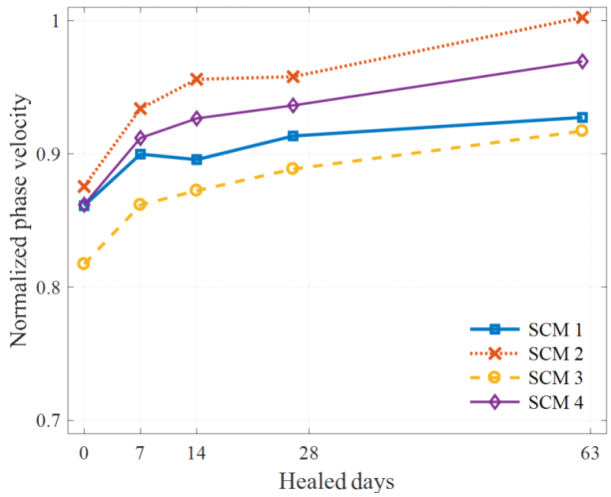
그림 3.3.14 자기치유에 따른 균열면적 변화



(a) OPC

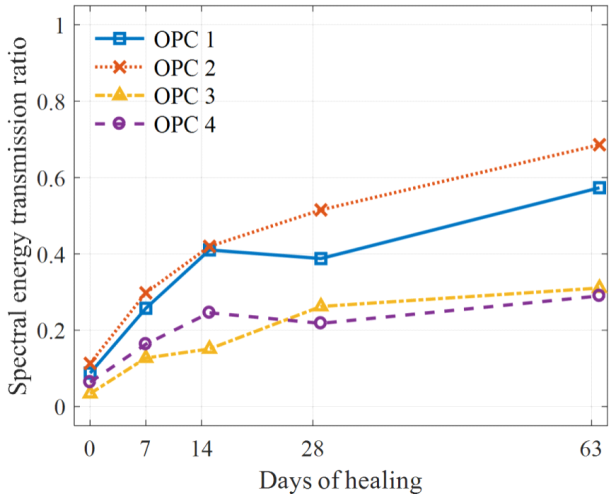


(b) SMU

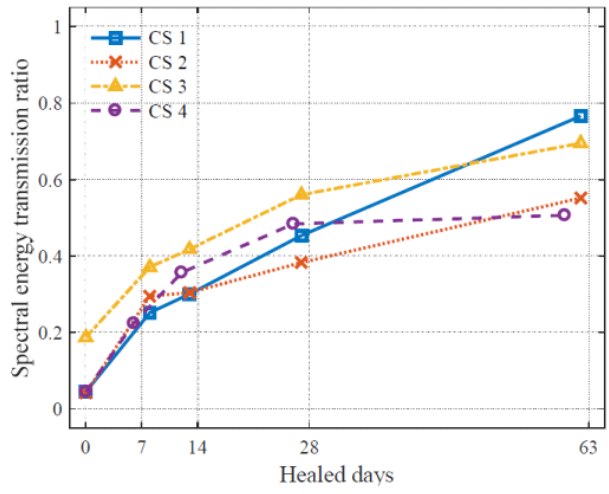


(c) KCL

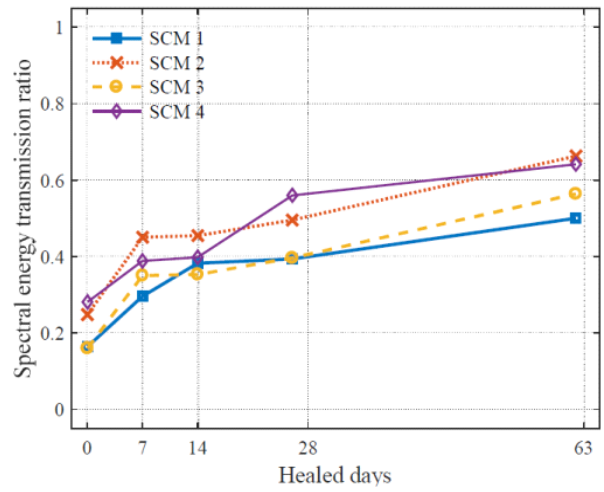
그림 3.3.15 자기치유에 따른 위상속도 변화



(a) OPC



(b) SMU



(c) KCL

그림 3.3.16 자기치유에 따른 표면탄성파 투과율 변화

③ 표면탄성파 기법

- 본 연구에서 제안된 비접촉식 표면탄성파 시험 시스템을 활용하여, 자기치유 모르타르 부재의 균열 치유 성능 평가를 수행하였음.

  : 이때 사용한 표면탄성파의 중심주파수는 28.8 kHz, 탐촉자-센서-균열 간 거리는 각각 100, 50 mm임.

- 스펙트럼에너지투과비는 균열이 발생함에 따라 70 ~ 90 % 정도 감소하나, 반면에 위상속도는 약 10 ~ 30 % 정도 감소하여, 스펙트럼에너지투과비가 위상속도에 비해 균열에 따라 더 민감하게 변화하여, 스펙트럼에너지투과비를 활용하여 치유성능 분석을 수행함.

- 자기치유 7 ~ 63일 기간 계측한 표면탄성파 실험 결과는 그림 3.3.15와 같으며, 식 (3.3.5)에 따라 평가한 치유율은 각 배합별로 표 3.3.2과 같으며, 최종적인 치유율은 1) SMU 59%, 2) KCL 48%, 3) OPC 43% 순서로 나타남.

④ 비선형초음파 기법

- 초음파의 비선형성은 식 (3.3.6)에서 2차 조화파 발생과 연관된 고전적인 비선형성(β)과 공진주파수 변화와 연관된 비고전적인 비선형성(α)으로 구분할 수 있음.

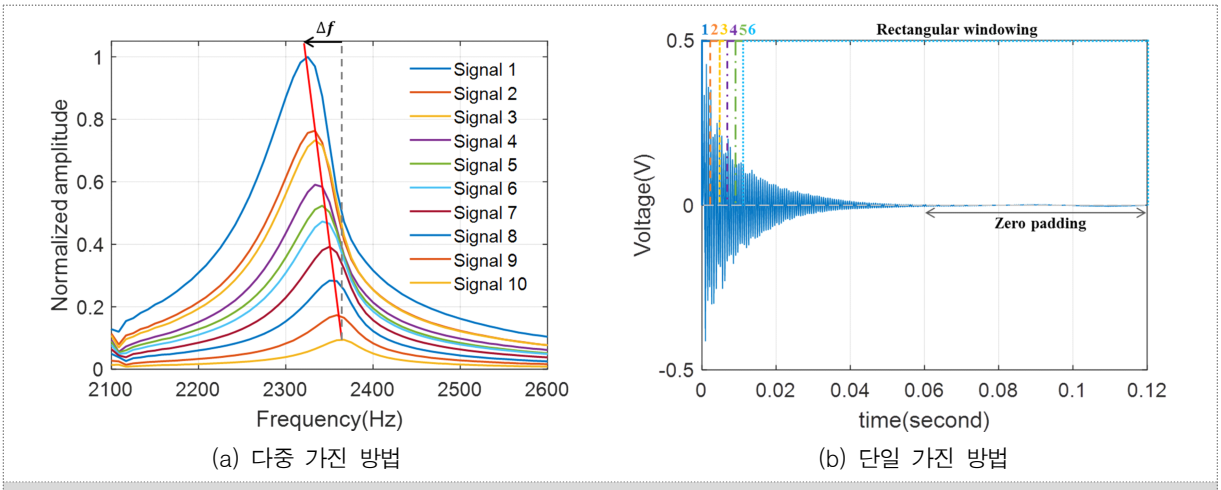
- 본 실험에서는 응력-변형률 이력현상에 따라 변화하는 주파수와 관련된 비선형성(α)를 자기치유 성능 평가에 활용함.

  : 비선형성(α)는 실험체의 공진주파수의 변화율$\left(\frac{f_0 - f}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0}\right)$를 해당 진폭으로 나누어준 값임.

$$\sigma = E_0\epsilon\left[1 + \beta\epsilon + \delta\epsilon^2 + \ldots + \alpha(\Delta\epsilon + sign(\dot{\epsilon}))\right] \tag{3.3.6}$$

- 공진주파수는 임팩트 해머의 가진 주파수인 8 kHz 내에 다수(여러개의 진동 모드)가 포착되었으나, 가장 에너지가 큰 0차 모드에 대해 비선형성 분석을 수행함.

- 응력-변형률 이력현상을 분석하기 위하여, 그림 3.3.17과 같은 1) 인위적인 진동 크기 변화를 이용한 다중 가진 방법과, 2) 한 신호 내에 크기가 다른 여러 구간 신호 분석 방법 두가지를 활용하여 비선형성(α)를 분석함.

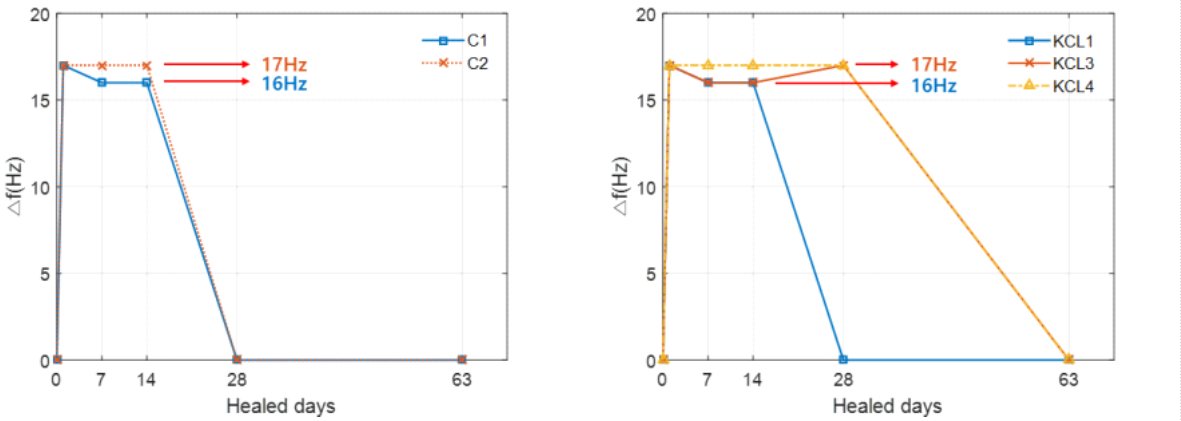


(a) 다중 가진 방법 (b) 단일 가진 방법

그림 3.3.17 비선형성 분석 기법

- 본 실험 수행 중에 1) 인위적인 진동 크기 변화 방법은 측정 일시(외부적 실험 환경 요인)에 따라 실험의 오차(가속도계 부착 상태 등)가 기술적 보완사항이 있는 것으로 판단되어, 2) 한 신호 내에 크기가 다른 여러 구간 신호 분석 방법에 따라, 자기치유에 따른 비선형성 변화를 계측함.

- 모든 자기치유 재료 혼입 모르타르 부재에서 균열 생성 후 비선형성 (주파수 변화량, Δf)은 약 16~17 Hz 발생하였으며, 증가한 비선형성, 주파수 변화량(Δf)가 콘크리트 균열이 63일 동안 자기치유 됨에 따라 무균열 상태와 같은 0으로 회복됨을 그림 3.3.18과 같이 확인할 수 있었음.



(a) SMU (b) KCL

그림 3.3.18 자기치유에 따른 비선형성 변화

(2) 비파괴시험 기반 균열면 내구성 복원 성능 평가 기술

(가) 확산초음파 기반 균열 손상 평가 기법

- 자기치유 콘크리트 내구성을 평가할 수 있는 대표적인 시험방법인 투수성 시험 및 염소이온 확산성 시험은 현장에 적용하기 어려운 단점이 있으므로 자기치유 콘크리트의 균열면 내구성 복원 성능을 평가하기 위해 내구성능의 핵심지표인 균열면 투수성과 염소이온 확산성을 확산 초음파 특성(확산계수, 확산에너지, 에너지 소산계수 등과의 상관관계)를 이용하여 평가할 수 있는 방법을 개발하였음.

① 확산초음파 시험 방법

- 초음파 확산계수(Ultrasonic diffusivity, m^2/s)와 초음파 에너지 소산계수(Ultrasonic dissipation, 1/s) 산정을 위한 확산초음파 신호 계측 및 처리 방법은 각각 그림 3.3.19와 그림 3.3.20와 같음.

- 확산초음파 실험 시, 계측 센서는 초음파 파장의 최소 10배 이상 가진원으로부터 떨어트려 부착하며, 한 곳에서 계측한 확산초음파 신호는 콘크리트 내부의 초음파 산란을 대표하기 어려워 20번 이상에서 임의의 위치에서 계측한 신호의 공간축 상에서의 평균화 작업을 권장함.

- 그림 3.3.20의 신호처리 과정은 1) 시간 평균화, 2) 시간 대역 데이터에서 주파수 대역 데이터

로 푸리에 변환, 3) 푸리에 변환된 데이터에 분석하고자 하는 주파수에 맞춰 해닝(Hanning) 등의 Cosine-bell 모양의 창곱하기, 4) 창(window)이 곱해진 주파수 대역대의 데이터를 시간 대역대로 역푸리에변환, 5) 역푸리에 변환된 시간대역대 데이터의 절대값의 로그 형태 취하기, 6) 공간 평균화, 7) 이론식과의 회귀분석을 통한 초음파확산계수 및 에너지 소산계수 산정으로 이루어짐.

- 3.3.20의 6) 공간 평균화 작업은 1) 시간 평균화 작업 이후에 일반적으로 수행하지만, 계측 신호들은 동일한 가우시안 랜덤 과정(Gaussian random process)을 거치기 때문에, 5)의 로그형태를 취하고 공간 평균화 작업을 수행해도 동일한 초음파 확산계수와 에너지 소산계수를 도출할 수 있음.

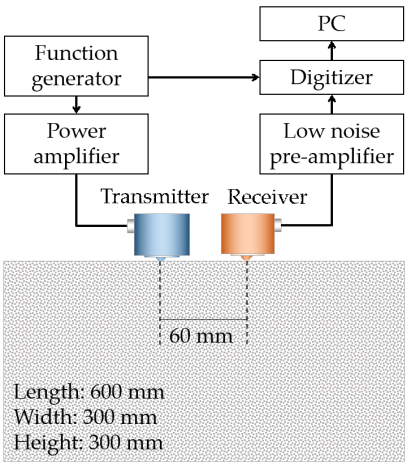


그림 3.3.19 확산초음파 계측 시스템

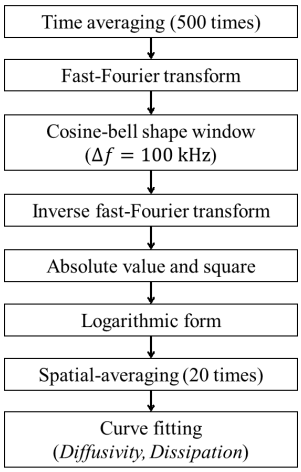


그림 3.3.20 확산 초음파 신호 처리 과정

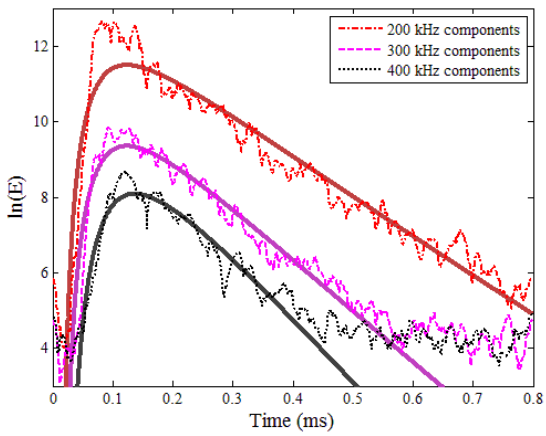


그림 3.3.21 확산초음파 신호 처리 결과

- 확산방정식은 3차원 무한체 내부에서 초음파의 산란이 이루어졌다고 가정하여, 식 (3.3.7)의 3차원 무한체 확산방정식을 활용함. 식 (3.3.7)의 확산방정식은 회귀분석에 편리한 로그형태로 식 (3.3.8)과 같이 변경한 후, 실험 데이터와의 회귀분석을 수행하여 초음파 확산계수(D)와 에너지 소산계수(σ)를 산정함.

$$\langle E(x,y,z,t)\rangle = \frac{E_0}{8(D\pi t)^{1.5}} e^{-\frac{d^2}{4Dt}-\sigma t} \tag{3.3.7}$$

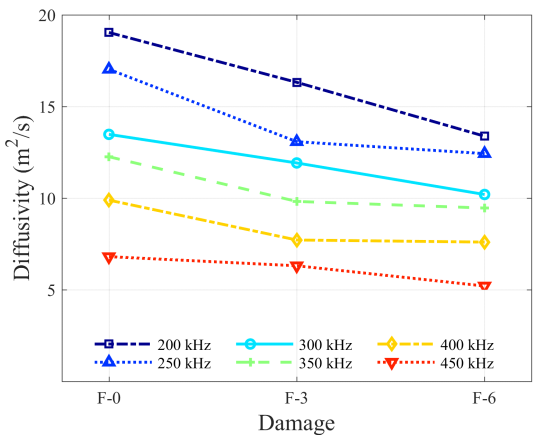
$$\log\langle E(x,y,z,t)\rangle = C_0 - 1.5\log(Dt) - \frac{d^2}{4Dt} - \sigma t \tag{3.3.8}$$

- 확산초음파 신호는 시간-주파수 분석에 있어서 분석하는 주파수에 따라 그림 3.3.21과 같이 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 초음파 확산계수와 에너지 소산계수 산정을 위한 이론식과의 회귀분석 구간은 신호대비 잡음비를 고려하여 선정함.

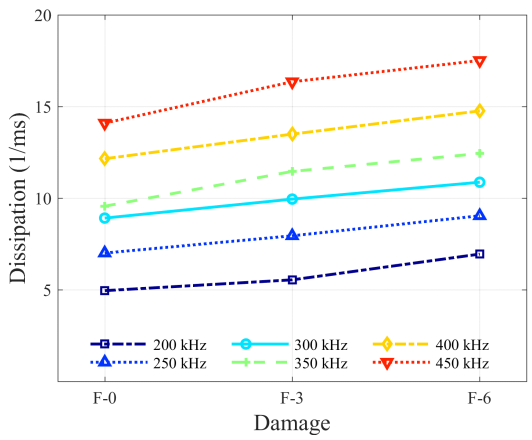
② 실험결과 활용 및 분석 방법

- 확산초음파 기법을 활용하여 콘크리트 내부에 미세 균열(강성이 상대적으로 낮은 PP섬유를 혼입하여 균열 모사) 손상 평가 실험을 수행하였고, 이때 콘크리트 내부에서 일어나는 초음파의 산란과 신호의 감쇄를 고려하여 150~500 kHz 대역대의 신호에 대한 분석을 수행함.

- 확산초음파 파라미터의 주파수 의존성(주파수가 증가함에 따라 초음파 확산계수는 감소, 초음파 에너지 소산계수는 증가)을 확인함.
- 콘크리트 내부에 미세 균열 증가(PP 섬유 혼입률 증가)에 따라 분석한 모든 주파수 대역대에서 그림 3.3.22과 같이 초음파 확산계수는 약 25% 감소하고, 초음파 에너지 소산계수는 약 32% 증가함을 알 수 있음. 이를 토대로, 미세균열 손상평가에 있어 확산초음파 기법의 높은 효율성 및 적용성이 있음을 확인함.



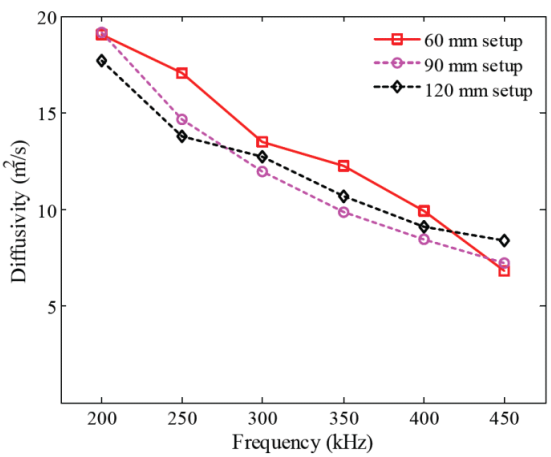
(a) 초음파 확산계수



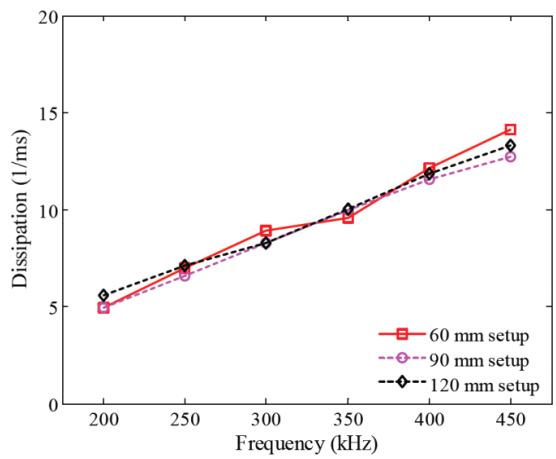
(b) 초음파 에너지 소산계수

그림 3.3.22 콘크리트 미세 균열 손상의 평가 (가진원-센서간 거리 60 mm)

- 확산초음파 실험에서 초음파 파장에 따른 산란 현상과 가진원-센서 거리의 영향 분석을 위하여, 가진원-센서 거리를 60, 90 & 120 mm로 변화시켜가며 확산초음파 실험을 수행하여, 그림 3.3.23과 같이 가진원-센서 거리변화에 따른 확산초음파 파라미터의 변화를 확인함.
- 가진원-센서 거리에 따른 초음파 확산계수의 변동계수는 약 9%, 초음파 에너지 소산계수의 변동계수는 약 5%로 분석됨. 확산초음파 파라미터의 가진원-센서 거리에 대한 민감도(그림 3.3.23)는 그림 3.3.22의 미세균열 손상보다 낮음을 확인함.



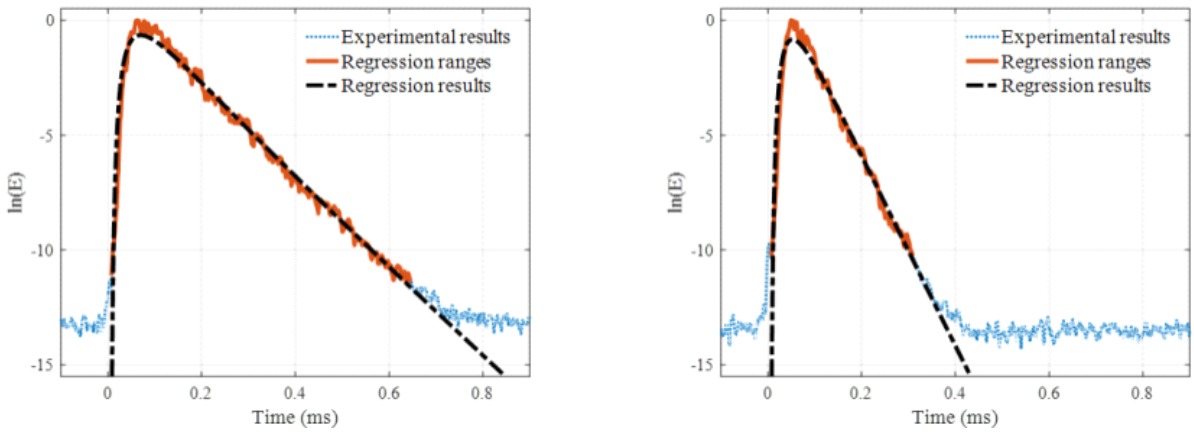
(a) 초음파 확산계수



(b) 초음파 에너지 소산계수

그림 3.3.23 가진원-센서간 거리가 확산초음파 파라미터에 미치는 영향

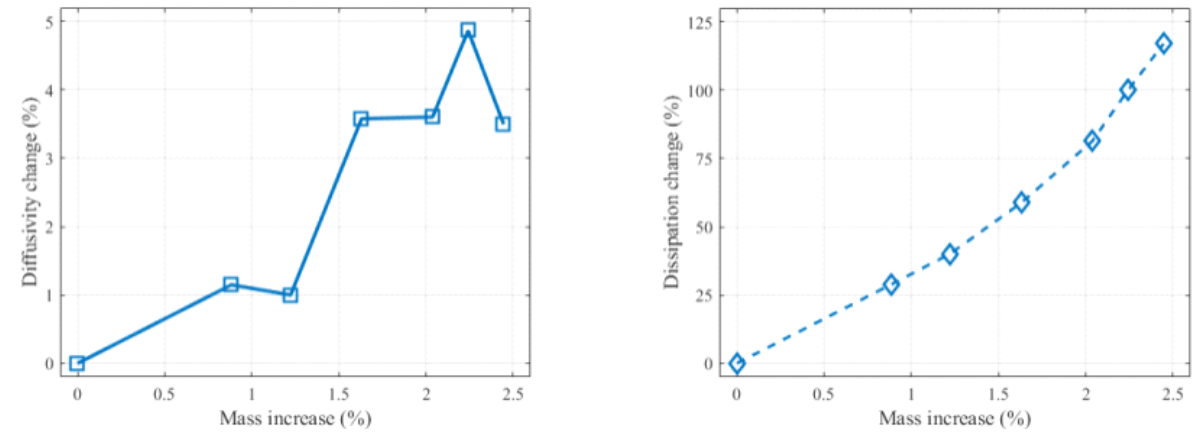
- 콘크리트 수분 함유량에 따른 확산초음파 파라미터의 민감도 변화를 파악하기 위하여, 완전 건조된 실험체를 수중에서 5일간 포화시키면서, 실험체의 함수율 변화 측정을 위한 무게 측정과 확산초음파 실험을 동시에 수행함.
- 그림 3.3.20에 따라 확산초음파 신호처리를 수행하였고, 완전 포화 상태와 완전 건조 상태에서 계측한 신호의 차이는 그림 3.3.24와 같음.
- 완전 건조된 실험체에서는 0.7-0.8 ms 이후에 신호의 크기가 잡음 수준을 변화한 반면, 완전 포화된 실험체에서는 0.3-0.4 ms 이후에 신호의 크기가 잡음 수준으로 변화한 것을 확인함.



(a) 완전 건조 상태 (b) 완전 포화 상태

그림 3.3.24 콘크리트 수분 함유량 변화에 따른 초음파 에너지 스펙트럼 밀도 변화

- 그림 3.3.25와 같이 콘크리트 수분 함유량 증가에 따라 실험체의 무게는 약 2.5% 가량 증가하였으며, 콘크리트 포화상태 변화에 따라 초음파 확산계수는 약 5%, 초음파 에너지 소산계수는 약 120% 변화한 것을 확인할 수 있음.
- 추후 확산초음파 기법을 활용한 비파괴 평가와 콘크리트 재료 특성 평가의 신뢰성 개선을 위하여, 다양한 종류의 콘크리트 실험체에 대한 확산초음파 파라미터와 콘크리트 함수율 사이의 상관관계 모델 개발 및 검증이 필요할 것으로 사료됨.



(a) 초음파 확산계수 (b) 초음파 에너지 소산계수

그림 3.3.25 콘크리트 수분 함유량 변화에 따른 확산초음파 파라미터 변화

관련 성과 [SCI-56]

제안한 확산초음파 기법을 통해 '크리트 내부의 미세 균열 손상 평가를 위한 확산초음파 기법의 효율성'에 관한 논문을 게재함.


Cement and Concrete Research 124 (2019) 105862

Contents lists available at ScienceDirect

Cement and Concrete Research

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

Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete

Eunjong Ahn[a], Myoungsu Shin[a,*], John S. Popovics[b], Richard L. Weaver[c]

[a] School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Republic of Korea
[b] Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC), Urbana, IL 61801, USA
[c] Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC), Urbana, IL 61801, USA

(나) 확산초음파 기반 투수성/염소이온확산성치유 평가 기술

① 투수시험 방법

- 3-1 세부과제에서 제안한 정수위 투수시험 방법에 따라 시험을 수행하였고, 세부 시험조건은 아래와 같음.
- 수두의 높이는 300 mm 이며, 균열 길이는 70 mm임. 투수시험 실시 후 처음 5분간 자유 방류 후, 5분간 매 1분마다 유출 수량 기록 후 평균 유출 수량 산출하였으며, 최종적으로 1분당 평균 유출 수량을 균열길이 70 mm로 나누어, 단위길이당 유출 수량을 계산함.

② 염소이온 확산시험 방법

- NT Build 355에 따라 1시간 마다 셀에서 용액을 추출하여 농도를 측정하고, 농도 변화가 일정해지는 정상상태에 도달한 후에, 염소이온 확산계수(D_{ssm})를 식 (3.3.9)에 따라 계산함.

$$D_{ssm} = \frac{RTL}{zF\Delta E}\frac{1}{c_1}\left|\frac{\Delta c_2}{\Delta t}\right| \tag{3.3.9}$$

여기서 R은 이상기체상수, T는 실험실 절대 온도, L는 실험체 두께, z는 염소이온의 원자가 수, F는 패러데이 상수(Faraday number), ΔE는 실험체 사이의 전위차, V는 용액방의 부피, A는 용액과 접촉하고 있는 시편의 단면적, Δc_1은 음극액에서의 염소이온 농도, Δc_2은 양극액에서의 염소이온 농도, Δt는 측정 시간임.

- 측정한 염소이온 확산계수($D_{ssm.eq}$)는 균열면과 콘크리트로 확산된 염소이온 확산계수를 모두 포함한 값이기 때문에 무균열 실험체에서 측정한 콘크리트의 염소이온 확산계수($D_{ssm.ucr}$)를 고려하여, 균열면에서 염소이온 확산계수($D_{ssm.c}$)을 식 (3.3.10)에 따라 계산함.

$$D_{ssm,c} = \frac{D_{ssm,eq}A_t - D_{ssm,ucr}A_{ucr}}{A_c} \tag{3.3.10}$$

여기서, A_{tot}은 용액과 접촉하는 전체 실험체 면적(ϕ80 mm), A_c은 이미지 이원화 기법으로 측정한 균열면적, A_{ucr}은 전체면적(A_{tot})에서 균열면적(A_c)을 제외한 콘크리트의 면적임.

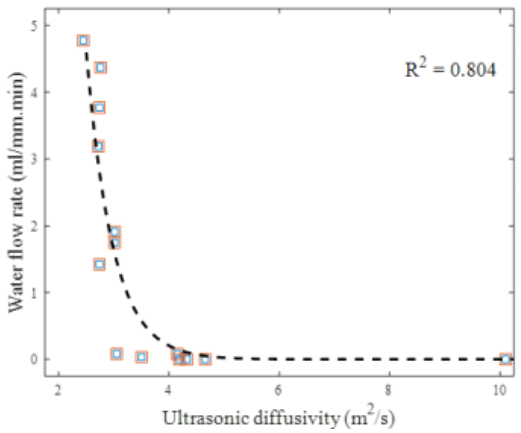
③ 상관관계 분석

- 확산초음파 실험과 투수실험 및 염소이온 확산 실험을 동일한 실험체에 수행하기 위하여, 모르타르 디스크 시편(ϕ100×50 mm)를 준비하였으며, 총 5 가지의 균열폭 0.01, 0.20, 0.35, 0.45, 0.60 mm를 유도함.

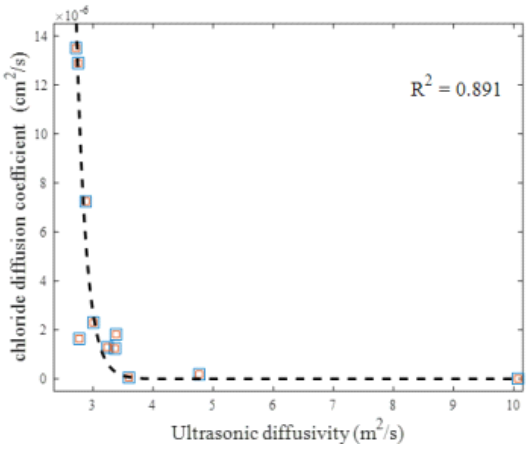
- 그림 3.3.11의 신호 분석 방법에 따라 200~440 kHz 대역대의 초음파 확산계수와 단위길이당 유출 수량, 염소이온 확산초음파 시험으로 측정한 초음파 확산계수(D_u)를 이용하여 균열 콘크리트의 유출수량(q) 및 균열면에서의 염소이온 확산계수($D_{ssm,c}$) 추정 모델은 다음과 같음.

$$q = 821 \times \exp(-2.07 D_u), \ R^2 = 0.80 \quad (3.3.11)$$

$$D_{ssm.c} = 2.16 \times 10^6 \times \exp(-6.07 D_u), \ R^2 = 0.89 \quad (3.3.12)$$



(a) 단위길이당 유출수량



(b) 염소이온 확산계수

그림 3.3.26 확산초음파 파라미터와 콘크리트 내구성 지표의 상관관계

④ 균열면 내구성능 평가기법 표준화(안)

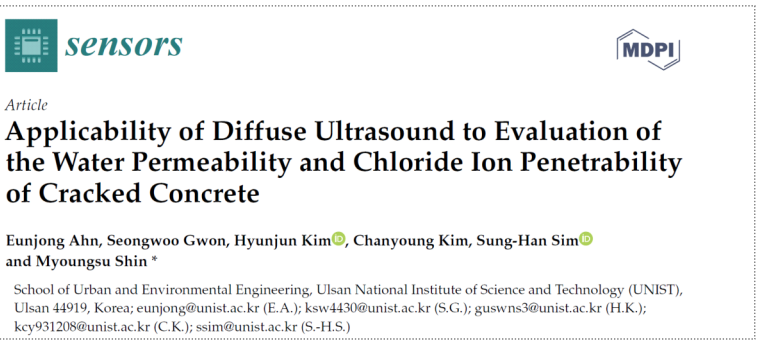
- 현재 표준화 된 비파괴시험 기반 균열면 내구성능 평가기법 표준화(안)이 부재하여, 내구성 지표인 투수계수와 염소이온 확산계수와 상관관계가 있는 확산초음파 기법에 대한 실험방법 및 신호처리 방법 등을 포함한 전반적인 과정을 표준화(안)으로 작성함.
- 실험체 마다 다른 초기값과 균열에 의한 영향을 고려하기 위하여 균열 생성 전/후, 자기치유 후 측정이 필요함.
- 확산초음파 기반 자기치유 콘크리트 균열의 치유율은 식 (3.3.13)과 같이 정의함.

$$SH_{D_u}(t) = \left(\frac{D_u(t) - D_{u,0}}{D_{u.ucr} - D_{u,0}} \right) \times 100 \ (\%) \quad (3.3.13)$$

여기서 $D_u(t)$는 치유재령 t일에서 측정한 초음파확산계수, $D_{u,0}$는 치유재령 0일(균열 유도 직후)에서 측정한 초음파확산계수, $D_{u.ucr}$은 무균열상태에서 측정한 초음파확산계수임.

관련 성과 [SCI-52]

제안한 확산초음파 기법을 통해 '균열 콘크리트의 투수계수와 염소이온 확산계수 평가를 위한 확산초음파 기법의 적용'에 관한 논문을 게재함.


sensors

MDPI

Article

Applicability of Diffuse Ultrasound to Evaluation of the Water Permeability and Chloride Ion Penetrability of Cracked Concrete

Eunjong Ahn, Seongwoo Gwon, Hyunjun Kim, Chanyoung Kim, Sung-Han Sim and Myoungsu Shin *

School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Korea; eunjong@unist.ac.kr (E.A.); ksw4430@unist.ac.kr (S.G.); guswns3@unist.ac.kr (H.K.); kcy931208@unist.ac.kr (C.K.); ssim@unist.ac.kr (S.-H.S.)

라. 지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축

(1) 지속적인 연구기반 조성

(가) 센터 위상 정립

- 자기치유형 친환경 콘크리트 분야의 R&D 연구센터로서의 위상과 정체성 확립

  : 성균관대학교 자연과학캠퍼스 부설연구기관 '자기치유 친환경 콘크리트 연구센터(SHGC)' 설립 (2015.10.)

  : 한국공학한림원이 주관하는 '2025년, 대한민국을 이끌 100대 기술과 주역'에 '자기치유 콘크리트' 선정 (2017.12.)



그림 3.4.1 SHGC 개소식



건설·교통 분야 △건설 미래기술 '첨단 건설재료 및 자재기술' △핵심기술 '자가치유 콘크리트' △ 차세대 주역 '박우준 교수(고려대), 최성철 교수(중앙대), 박병선 주임연구원(KCL)'

그림 3.4.2 '2025년, 대한민국을 이끌 100대 기술과 주역' 시상식

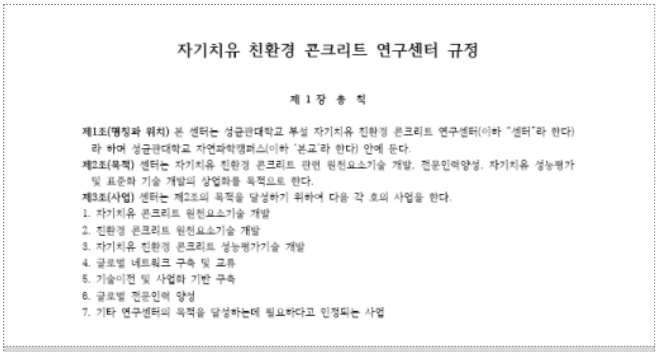
(나) 센터 운영기반 구축 및 센터 역량 강화

- 센터의 효율적인 운영 · 관리를 위한 운영 · 관리지침 및 규정 제정

  : 자기치유 친환경 콘크리트 글로벌 R&D 연구센터 운영 · 관리지침 (제정, 2015.10)

  : 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 규정 (시행, 2015.10)

- 연구개발, 연구관리, 국제협력, 교육, 기술이전 등 연구센터 역할의 충실한 수행을 위한 조직 구성 및 운용 체계 확립



자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 규정

제 1 장 총 칙

제1조(명칭과 위치) 본 센터는 성균관대학교 부설 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터(이하 "센터"라 한다)라 하며 성균관대학교 자연과학캠퍼스(이하 '본교'라 한다) 안에 둔다.

제2조(목적) 센터는 자기치유 친환경 콘크리트 관련 원천요소기술 개발, 전문인력양성, 자기치유 성능평가 및 표준화 기술 개발의 상업화를 목적으로 한다.

제3조(사업) 센터는 제2조의 목적을 달성하기 위하여 다음 각 호의 사업을 한다.

1. 자기치유 콘크리트 원천요소기술 개발
2. 친환경 콘크리트 원천요소기술 개발
3. 자기치유 친환경 콘크리트 성능평가기술 개발
4. 글로벌 네트워크 구축 및 교류
5. 기술이전 및 사업화 기반 구축
6. 글로벌 전문인력 양성
7. 기타 연구센터의 목적을 달성하는데 필요하다고 인정되는 사업

그림 3.4.3 연구센터 규정

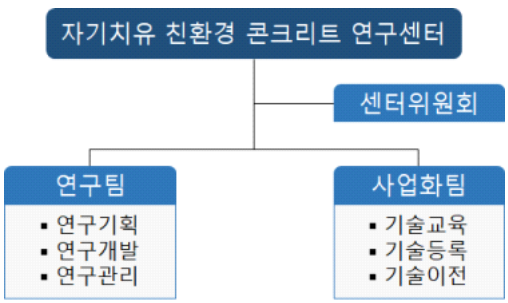


그림 3.4.4 연구센터 조직도

- 발전 단계별로 센터위원회를 주기적으로 개최하여 센터 역량 강화



◦ 제 1회 운영위원회 : 2015.12.11.
◦ 제 2회 운영위원회 : 2017.01.06.
◦ 제 3회 운영위원회 : 2017.11.23.
◦ 제 4회 운영위원회 : 2018.09.12.
◦ 제 5회 운영위원회 : 2020.01.21.

그림 3.4.5 운영위원회

(다) 지속 가능한 센터 운영방안 수립

- 향후 센터 자립화를 위하여 인증 및 성능 분석센터 운영 및 연구성과 사업화를 지원 또는 활용할 계획

(2) 국내외 연구개발 역량 결집

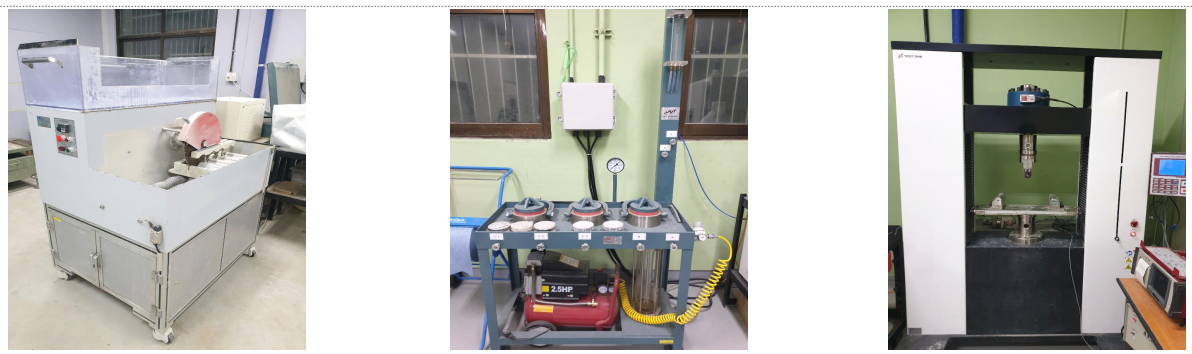
(가) 센터 R&D 관리시스템 구축

- 센터 홈페이지(www.healcrete.re.kr) 내 연구 정보 공유 서비스, 연구 결과 및 연구 성과 관리 체계를 구축하여 제공



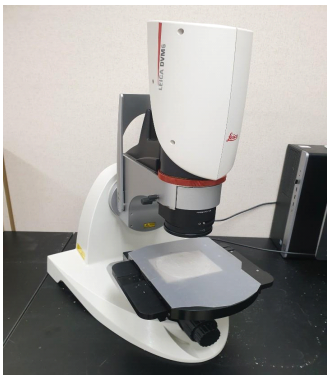
그림 3.4.6 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 홈페이지 메인 / 연구성과 관리 페이지

- 자기치유 콘크리트에 특화된 연구시설·장비를 구축하여 자기치유 성능평가 기본 환경 조성

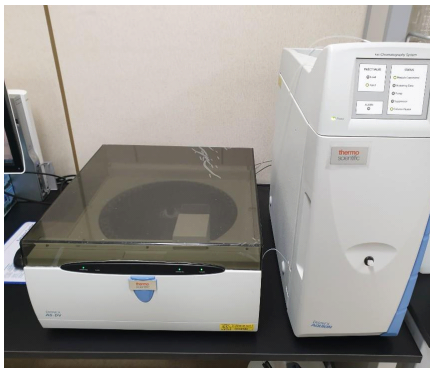


(a) 콘크리트 절단기 (b) 일축 투수시험장치 (c) 만능재료시험기

그림 3.4.7 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터-콘크리트 실험실



(a) 시멘트 경화체 편광광물 분석기



(b) 이온 크로마토그래피 & 오토샘플러



(c) 중성화 촉진 시험용 항온항습기

그림 3.4.8 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 – 미세구조실험실

(나) 기술 및 성과의 지속적 공유와 확산

- 매체홍보, 전시 등을 중심으로 지속적인 연구 기술 및 성과를 홍보하여 확보된 원천기술을 국내외 적용·확산·정착

  : [YTN Science 과학카툰 기발한 실험실] 스스로 복원되는 자기치유 기술에 관한 영상 소개 (2016.04.)

  : [동아일보 IT/과학] '사람의 피부상처 아물 듯이... 원전-터널 균열 부위가 저절로 메워진다면' 이란 주제로 세균을 이용한 콘크리트 균열 복구에 관한 인터뷰 기사 소개 (2016.11.)

  : [ISSUE MAKER] 자기치유 친환경 콘크리트 관련 기술 및 전망에 관한 인터뷰 기사 소개 (2017.06.)

  : [대한전문건설신문] 유망기술 미리보기-자기치유 콘크리트 기술 소개 (2019.03.)

  : [건설기술] '무기계 혼합재료 활용 최적 콘크리트 배합기술 만들다' 연구 및 연구자 인터뷰 기사 소개 (2019.11.)



균열 틈새 박테리아 투입 한달내 치유 도전… 내구성 향상이 숙제

이창훈 기자 | 승인 2019.03.11 07:00 | 댓글 0

유망 기술 미리보기 (1) - 자기치유 콘크리트

건설 분야의 새로운 기술을 연구하는 전문가들을 직접 만나 '기술의 현재'를 들여다보고, 이 기술이 미래에 어떤 모습으로 건설현장에 다가올지 살펴본다. 첫 번째로 '자기치유콘크리트 기술'을 연구하고 있는 이광명 성균관대 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터장을 만나봤다. /편집자 주

◇이광명 성균관대 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터장

"자기치유콘크리트 기술은 구조물의 유지관리 비용을 줄이는 동시에 사용수명을 늘릴 수 있는 혁신적인 기술입니다"

이광명 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터장(토목환경공학부 교수)은 '자기치유콘크리트 기술'을 미래 건설재료 시장을 선도할 주목할 분야로 꼽으면서, 특히 국가기반 중요시설물 등에 필수적으로 사용될 기술이라고 설명했다.

그림 3.4.9 대한전문건설신문 유망기술 미리보기 (2019.03.)



그림 3.4.10 YTN Science 과학카툰 기발한 실험실 (2016.04.)

: 학술발표회 특별세션 4회, 국토교통대전, 대한민국건설기술산업대전 등 전시 부스 6회 개최



◦ 한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회 특별세션 (2015.11.16. 제주도)
◦ 한국건설순환자원학회 2016 가을 학술대회 특별세션 (2016.10.29. 수원 호텔케슬)
◦ 한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회 특별세션 (2018.11.09. 알펜시아리조트)
◦ 한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회 특별세션 (2019.11.08. 변산 대명리조트)

그림 3.4.11 한국콘크리트학회 2019가을학술대회 특별세션 (2019.11, 변산 대명리조트)



◦ 2016 국토교통기술대전 (2016.05.25.~27. 코엑스)
◦ 대한토목학회 2017 컨벤션 (2017.10.18.~20. 벡스코)
◦ 대한민국건설기술산업대전 (2018.02.22.~24. 킨텍스)
◦ 2018 국토교통기술대전 (2018.06.07.~08. 코엑스)
◦ 2019 국토교통기술대전 (2019.05.29.~31. 킨텍스)
◦ 스마트건설기술안전엑스포 (2019.11.27.~29. 킨텍스)

그림 3.4.12 국토교통기술대전 (2019.05, 킨텍스)

(3) 글로벌 네트워크 구축 및 교류 활성화

(가) 글로벌 협력 네트워크 구축

- 국외 최신 기술 개발 동향 반영 및 우수 연구과제 도출을 위하여 국외 중진급 연구진으로 해외 기술자문위원회 구성

표 3.4.1 해외 기술자문위원회

소속 (국가)	위원명	직위
Ghent University (벨기에)	Nele De Belie	교수
TUDelft (네덜란드)	Erik Schlangen	교수
University of Minho (포르투칼)	F. Pacheco-Torgal	연구원
University of Illionis at Urbana-Champaign (미국)	John Popovics	교수
The Hongkong University of Science and Technology (홍콩)	Christopher KY Leung	교수
Ho Chi Minh City University of Technology (베트남)	Dr. Nguyen Khanh Son	교수
Shenzhen University (중국)	Ningxu Han	교수
Tohoku University (일본)	Tomoya Nishiwaki	교수

(나) 국제적 연구 네트워크 활성화

- 자기치유 콘크리트 분야 선도 연구기관인 UGhent(벨기에), TUDelft(네덜란드)와 공동연구 수행

표 3.4.2 해외 연구기관과의 공동연구 수행

연구 기관	연구 책임자	연구 기간	연구 내용
Ghent University	Prof. Nele De Belie	2016.02.~2020.02.	Development of standard methods to evaluate the efficiency of self-healing concrete
Delft University of Technology	Prof. Erik Schlangen	2017.01.~2020.02.	Optimization of self-healing techniques for concrete by modelling and testing

- 자기치유 국제 워크샵, 우수연구자 초청 세미나 등을 개최하여 국내외 연구자들 간에 교류의 장 마련



그림 3.4.13 Joint International Workshop (2016.11, TU delft - 네덜란드)



그림 3.4.14 'Self-healing techniques for concrete using bacteria' 세미나 (2017.03, 고려대)



Programs

MC I Prof. Lee Jong Ku (Korea University)

Time	Contents
13:30~14:00	Registration
14:00~14:10	Welcome address & Opening remarks Prof. Lee Kwang Myong (SHGC Director of Center)
14:10~15:00	Full scale application of bacteria-based self-healing concrete technology Prof. Erik Schlangen(Delft University)
15:00~15:30	Self-healing concrete incorporating inorganic binders & smart polymers Prof. Choi Seong cheol (Chung Ang University)
15:30~16:00	Microcapsule-based Self-Healing Protective coating Prof. Chung Chan Moon(Yonsei University)
16:00~16:30	Bacterial calcium carbonate precipitation for self-healing concrete Prof. Park Woo Jun (Korea University)
16:30~16:40	Photo time & Closing remarks Prof. Lee Kwang Myung (SHGC Director of Center)
16:40~17:00	Research meeting (with Prof. Erik Schlangen)

(워크샵 프로그램)

그림 3.4.15 2019 International Self-healing Concrete Workshop (2019.09, 성균관대학교)

(4) 기술이전 및 사업화 기반 구축

(가) 자기치유 건설재료 분야 국내 산·학·연·관 과의 전방위 협력·지원체계 구축

① 산 · 학 · 연 · 관 자기치유형 친환경 콘크리트 포럼 및 산업체 지원·기술 강좌 설치

- 스마트 건설재료 포럼 4회, 자기치유 친환경 콘크리트 연구 세미나 7회 개최



◦ 제 1회 SHGC 포럼 (2016.03.04. 한국과학기술회관)
: 자기치유 콘크리트 기술의 현황과 미래 전망

◦ 제 2회 SHGC 포럼 (2017.04.28. 한국과학기술회관)
: 4차 산업혁명과 Smart 건설재료

◦ 제 3회 SHGC 포럼 (2017.11.23. 킨텍스)
: 미래 건설과 스마트 건설재료

◦ 제 4회 SHGC 포럼 (2019.02.21. 킨텍스)
: 스마트 건설재료의 생태계

그림 3.4.16 SHGC 포럼



◦ 제 1회 SHGC 세미나 (2016.02.26. 성균관대)
: Crystalline materil를 활용한 자기치유 기술

◦ 제 2회 SHGC 세미나 (2016.05.26. 성균관대)
: 무기질계 소재의 실무기기분석 기법

◦ 제 3회 SHGC 세미나 (2016.09.09. 성균관대)
: 콘크리트 균열

◦ 제 4회 SHGC 세미나 (2016.09.23. 성균관대)
: Durability Design and Future Works; For Concrete Structures

◦ 제 5회 SHGC 세미나 (2016.11.11. 성균관대)
: 건설공사 하자 및 자기치유 콘크리트의 적용

◦ 제 6회 SHGC 세미나 (2016.12.09. 성균관대)
: Mass Transport in Concrete and Concrete Durability; Application to Corrosion of Steel Reinforcement

◦ 제 7회 SHGC 세미나 (2017.03.15. 고려대)
: Self-healing techniques for concrete using bacteria

그림 3.4.17 SHGC 세미나

② 산·학·연 컨소시움 구성

- 건설회사, 설계사, 시멘트·레미콘사, 프리캐스트 업체 등 업종별 맞춤형 시스템으로 구성

그림 3.4.18 컨소시움 참가 업체

(나) 사업화 시스템 및 자립화 기반 구축

- 연구 성과 기술 실시계약 체결 및 자기치유 기술의 경제성 증진 방안 검토를 위한 보고서 작성

: (실시계약) “박테리아 슬라임 기반 콘크리트 보호 코팅재 현장 배합 관련 노하우” (2019.04) 외 1건

: (보고서) 경제성 분석 보고서’ 1건, ‘실용화 전략 보고서’ 1건 작성

(5) 글로벌 전문인력 양성

(가) 글로벌 전문인력 양성 기반구축

- 국내 대학간 협력 네트워크를 통한 학점교류 시스템 구축

: 자기치유형 콘크리트 특성화를 위한 대학원 학위인증제 교육 강좌 ‘스마트 콘크리트 특론’ 2회 개설



구 분		강의 주제 Keyword	담당 강사
Lesson 1 [9/9 (금)]	강 의 I	친환경 콘크리트	이광명 교수(성균관대)
	강 의 II	자기치유 콘크리트 기술	이광명 교수(성균관대)
	세 미 나	특별 강연 I	
Lesson 2 [9/23 (금)]	강 의 I	시멘트 재료공학	이승헌 교수(군산대)
	강 의 II	콘크리트공학 개론	최연왕 교수(세명대)
	세 미 나	특별 강연 II	
Lesson 3 [10/7 (금)]	강 의 I	유무기 혼화재 활용 자기치유기술	최영철 박사(KCL)
	강 의 II	SAP 활용 자기치유기술	최성철 교수(중앙대)
	세 미 나	연구과제 참여연구원 주제 발표	
Lesson 4 [10/21 (금)]	강 의 I	미생물과 미래융합기술	박우준 교수(고려대)
	강 의 II	미생물의 다양성과 담체화	정남현 교수(고려대)
	세 미 나	연구과제 참여연구원 주제 발표	
Lesson 5 [11/11 (금)]	강 의 I	캡슐활용 자기치유기술	정찬문 교수(연세대)
	강 의 II	캡슐제조 방법 및 활용	김광수 박사(에이티랩)
	세 미 나	연구과제 참여연구원 주제 발표	
Lesson 6 [11/25 (금)]	강 의 I	친환경 콘크리트 개론	양근혁 교수(경기대)
	강 의 II	무시멘트 콘크리트 제조 및 특성	송진규 교수(전남대)
	세 미 나	연구과제 참여연구원 주제 발표	
Lesson 7 [12/9 (금)]	강 의 I	자기치유환경 콘크리트 성능평가기술	신경준 교수(충남대)
	강 의 II	비파괴기반 균열자기치유 성능평가기술	신명수 교수(UNIST)
	세 미 나	연구과제 참여연구원 주제 발표	

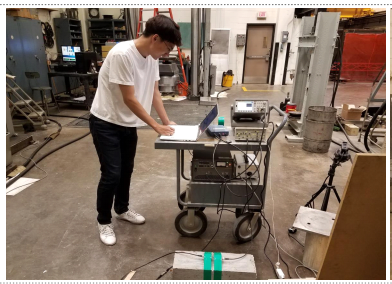
◦ 1차 스마트 콘크리트 특론 (2016.09.~12. 8회)
◦ 2차 스마트 콘크리트 특론 (2018.09.~12. 8회)

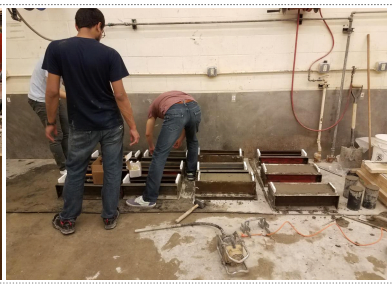
- 주제별 강의와 세미나를 통해 자기치유 콘크리트 관련 기초교육 및 심화 교육 진행
- 군산대, 고려대, 중앙대 등 11개 대학교 참여 (회차별 50여명 참석)

그림 3.4.19 스마트 콘크리트 특론 강좌

(나) 글로벌 전문인력 양성 프로그램 활성화

- 최신 연구 동향과 결과 등을 습득하기 위하여 관련 분야에서 선제적으로 연구를 수행하고 있는 해외 우수연구기관과의 인력 교류 진행





우수 연구 기관인 일리노이대학교 토목공학과 연구팀과 확산초음파 공동 연구 논의 및 관련 정보 습득

◦ 교류기관 : University of Illinois
◦ 참가자 : 울산과학기술원 1인
◦ 연수기간 : 2017.04.06.~07.02.(4개월)





스마트 폴리머 성능 정량화를 위한 모델링 구축 및 박테리아 활용 기술 자문 요청

◦ 교류기관 :
  - Delft Unversity of Technology
  - Ghent University
◦ 참가자 : 중앙대 2인, 경기대 1인
◦ 연수기간 : 2017.08.14.~28.(2주)

그림 3.4.20 해외 연구 교류 지원

3-2. 연구 성과

가. 국내외 논문 게재

(1) 국내 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	균열 자기치유 재료 혼입 모르타르의 투수성능 평가	한국건설순환자원학회 논문집	이웅종	4(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2016.12.30
2	매입형 센서를 활용한 시멘트 풀의 응결 시간 측정	한국건설순환자원학회 논문집	신경준	4(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2016.12.30
3	정수위 투수시험에 의해 측정된 균열 모르타르 시편의 유출수량과 균열폭의 상관관계	콘크리트학회 논문집	최슬우	29(3)	한국	한국콘크리트학회	비SCI	2017.06.01
4	콘크리트 표준시방서에 따른 콘크리트의 염해 내구성 설계 도표	콘크리트학회 논문집	이도근	29(6)	한국	한국콘크리트학회	비SCI	2017.12.01
5	표면탄성파를 활용한 콘크리트 균열 보수 성능 평가 기법	한국건설순환자원학회 논문집	안은종	5(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2017.12.30
6	노출환경 조건이 자기치유형 보수모르타르 시편의 균열 치유성능에 미치는 영향	한국건설순환자원학회 논문집	이웅종	6(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2018.12.30
7	균열 아크릴 시편의 기체 확산계수와 균열폭의 관계	한국건설순환자원학회 논문집	이도근	6(4)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2018.12.30
8	알칼리 활성 슬래그의 염해 내구성 평가 시험 방법 유효성	한국건설순환자원학회 논문집	임민혁	7(1)	한국	한국건설순환자원학회	비SCI	2019.03.30
9	자기치유 재료 혼입 모르타르 보의 자기치유 성능 평가	한국구조물진단유지관리공학회논문집	신동익	24(1)	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2020.02.01
10	확산초음파의 콘크리트 함수율에 대한 의존성	한국구조물진단유지관리공학회논문집	안은종	24(1)	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2020.02.01

(2) 국외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
1	Principles and Applications of Ultrasonic-Based Nondestructive Methods for Self-Healing in Cementitious Materials	Materials	안은종	10(3)	스위스	MDPI	SCI	2017.03.10
2	Comparative analysis of image binarization methods for crack identification in concrete structures	Cement and Concrete Research	김현준	99	미국	Elsevier	SCI	2017.09.01

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
3	Concrete Crack Identification Using a UAV Incorporating Hybrid Image Processing	Sensors	김현준	17(9)	스위스	MDPI	SCI	2017.09.07
4	Parameters influencing water permeability coefficient of cracked concrete specimens	Construction and Building Materials	신경준	151	영국	Elsevier	SCI	2017.10.01
5	Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance	Construction and Building Materials	Liberato Ferrara	167	영국	Elsevier	SCI	2018.04.10
6	Crack and Noncrack Classification from Concrete Surface Images Using Machine Learning	Structural Health Monitoring	김현준	18(3)	영국	Sage Journals	SCI	2018.04.23
7	Combined Effects of Set Retarders and Polymer Powder on the Properties of Calcium Sulfoaluminate Blended Cement Systems	Materials	권성우	11(5)	스위스	MDPI	SCI	2018.05.17
8	Surface-Wave Based Model for Estimation of Discontinuity Depth in Concrete	Sensors	안은종	18(9)	스위스	MDPI	SCI	2018.08.24
9	Effects of Redispersible Polymer Powder on Mechanical and Durability Properties of Preplaced Aggregate Concrete with Recycled Railway Ballast	International Journal of Concrete Structures and Materials	이사현	12	대한민국	Springer	SCI	2018.11.20
10	Applicability of diffuse ultrasound to evaluation of water permeability and chloride ion penetrabilityof cracked concrete	Sensors	안은종	18(12)	스위스	MDPI	SCI	2018.11.27
11	Microstructure evolution and strength development of ultra rapid hardening cement modified with redispersible polymer powder	Construction and Building Materials	권성우	192	영국	Elsevier	SCI	2018.12.20
12	Self-healing of modified sulfur composites with calcium sulfoaluminate cement and superabsorbent polymer	Composites Part B: Engineering	권승우	162	영국	Elsevier	SCI	2019.04.01
13	Novel active crack width control technique to reduce the variation on water permeability results for self-healing concrete	Construction and Building Materials	Tim Van Mullem	203	영국	Elsevier	SCI	2019.04.10
14	An approach to develop printable strain hardening cementitious composites	Materials & Design	Stefan Chaves Figueiredo	169	영국	Elsevier	SCI	2019.05.05

번호	논문명	학술지명	주저자명	권(호)	국명	발행기관	SCI여부	게재일
15	Performance assessment method for crack repair in concrete using PZT-based electromechanical impedance technique	NDT & E International	김현준	104	영국	Elsevier	SCI	2019. 06.01
16	Using the steady-state Chloride Migration Test to Evaluate the Self-Healing Capacity of Cracked Mortars Containing Crystalline, Expansive, and Swelling Admixtures	Materials	Fahad ul Rehman Abro	12(11)	스위스	MDPI	SCI	2019. 06.09
17	Influence of Na_2O Content and Ms (SiO_2/Na_2O) of Alkaline Activator on Workability and Setting of Alkali-Activated Slag Paste	Materials	최성	12(13)	스위스	MDPI	SCI	2019. 06.27
18	Crack Width Estimation of Mortar Specimen Using Gas Diffusion Experiment	Materials	이도근	12(18)	스위스	MDPI	SCI	2019. 09.16
19	Mechanical Recovery of Cracked Fiber-Reinforced Mortar Incorporating Crystalline Admixture, Expansive Agent, and Geomaterial	Advances in Materials Science and Engineering	Abdul Salam Bulle	2019	이집트	Hindawi	SCI	2019. 09.22
20	Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete	Cement and Concrete Research	안은종	124	영국	Elsevier	SCI	2019. 10.01
21	Numerical investigation of crack self-sealing in cement-based composites with superabsorbent polymers	Cement and Concrete Composites	C.Romer Rodríguez	104	영국	Elsevier	SCI	2019. 11.01

나. 국내 및 국제 학술회의 발표

(1) 국내 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국콘크리트학회 2015 가을 학술대회	이광명	2015.10.22	호텔현대(경주)	한국
2	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	이광명	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
3	한국건설순환자원학회 2015 가을 학술대회	안은종	2015.11.06	제주 해비치 호텔&리조트	한국
4	한국건설순환자원학회 2016 봄 학술대회	안은종	2016.04.15	전남대학교 용봉캠퍼스	한국
5	한국콘크리트학회 2016년 봄 학술대회	배원호	2016.05.11	여수 엑스포 컨벤션센터	한국
6	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	배원호	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
7	한국건설순환자원학회 2016년 가을 국제학술발표대회	김현준	2016.10.28	호텔캐슬 (수원)	한국
8	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	김성우	2017.05.12	휘닉스 제주 아일랜드	한국

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
9	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	임준택	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
10	한국콘크리트학회 2017 봄 학술대회	신경준	2017.05.11	휘닉스 제주 아일랜드	한국
11	대한토목학회 2017년 정기학술대회	Xiaoming Liu	2017.10.20	부산 BEXCO	한국
12	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	Abdul Salam Buller	2017.11.02	안동 그랜드호텔	한국
13	한국콘크리트학회 2017 가을 학술대회	이도근	2017.11.02	안동 그랜드호텔	한국
14	한국건설순환자원학회 2017 가을 학술대회	안은종	2017.11.17	제주 해비치 호텔	한국
15	한국건설순환자원학회 2018년 봄 학술대회	이웅종	2018.04.06	전북대학교 전주캠퍼스	한국
16	한국건설순환자원학회 2018년 봄 학술대회	이도근	2018.04.06	전북대학교 전주캠퍼스	한국
17	한국구조물진단유지관리공학회 2018년도 봄 학술발표회	안은종	2018.04.19	메종글래드 제주	한국
18	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	이웅종	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
19	한국콘크리트학회 2018 봄 학술대회	임민혁	2018.05.03	창원 컨벤션센터	한국
20	한국건설순환자원학회 2018년 가을 학술대회	이웅종	2018.11.02	한양대학교 에리카캠퍼스	한국
21	한국건설순환자원학회 2018년 가을 학술대회	안은종	2018.11.02	한양대학교 에리카캠퍼스	한국
22	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	이웅종	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
23	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	이도근	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
24	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	권성우	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
25	한국콘크리트학회 2018 가을 학술대회	안은종	2018.11.09	평창 알펜시아 리조트	한국
26	한국콘크리트학회 2019 봄 학술대회	무하마드 하룬	2019.05.08	제주신화월드	한국
27	한국구조물진단유지관리공학회 2019년도 가을 학술발표회	안은종	2019.10.10	해운대 한화리조트	한국
28	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	김형석	2019.11.08	변산대명리조트	한국
29	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	안은종	2019.11.08	변산대명리조트	한국
30	한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회	최하진	2019.11.08	변산대명리조트	한국
31	한국건설순환자원학회 2019 가을 학술대회	이도근	2019.11.21	제주 해비치 호텔&리조트	한국

(2) 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	Spring 2016 ACI Convention	안은종	2016.04.18	Wisconsin Center (밀워키)	미국
2	The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM 16 / Structures16)	김현준	2016.08.30	제주국제컨벤션센터 (제주)	한국
3	fib 11th PhD Symposium in Civil Engineering	안은종	2016.08.30	Tokyo University (도쿄)	일본
4	Fall 2016 ACI Convention	안은종	2016.10.24	Philadelphia Marriott Downtown (필라델피아)	미국
5	24th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM 24)	김현준	2016.12.07	Curtin University (퍼스)	호주
6	6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017)	Tim Van Mullem	2017.06.28	Graf-Zeppelin-Haus (프리드리히스하펜)	독일

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
7	6th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2017)	신경준	2017.06.25	Graf-Zeppelin-Haus (프리드리히스하펜)	독일
8	The 13th international workshop on Advanced Smart Materials and Smart Structures Technology	심성한	2017.07.23	Tokyo University (도쿄)	일본
9	Fall 2017 ACI Convention	안은종	2017.10.16	Disneyland Hotel (애너하임)	미국
10	The 7th International Conference of Asia Concrete Federation (ACF 2016)	배원호	2016.11.02	JW Marriott Hotel (하노이)	베트남
11	HealCON Conference 2016	신경준	2016.11.28	TU Delft 델프트)	네덜란드
12	Computational Modelling of Concrete and Strucures (Euro-C 2018)	C.Romero Rodriguez	2018.02.26	Congress Centre Bad Hofgastein (바트 호프카슈타인)	오스트리아
13	The 1st ZHITU (智途) Symposium	신명수	2018.07.12	Zhejiang University (항저우)	중국
14	The 1st ZHITU (智途) Symposium	안은종	2018.07.13	Zhejiang University (항저우)	중국
15	The 1st ZHITU (智途) Symposium	권승우	2018.07.13	Zhejiang University (항저우)	중국
16	The 7th World Conference on Structural Control and Monitoring (7WCSCM)	김현준	2018.07.23	Shangri-La hotel (청도)	중국
17	The 4th International Conference on Service Life Design for Infrastructures (SLD4)	Tim Van Mullem	2018.08.29	Lijm & Cultuur	네덜란드
18	The 12th fib PhD Symposium in Civil Engineering	권승우	2018.08.29	Czech Technical University (프라하)	체코
19	The 12th fib PhD Symposium in Civil Engineering	안은종	2018.08.29	Czech Technical University (프라하)	체코
20	SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approcaces for Cement-based Materials and Structural Concrete	Tim Van Mullem	2018.10.26	Hotel Pestana Casino Park (푼샬)	포르투칼
21	The 8th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2018)	권승우	2018.11.06	Crowne-plaza Fuzhou Riverside (푸저우)	중국
22	The 8th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2018)	F.R.Abro	2018.11.06	Crowne-plaza Fuzhou Riverside (푸저우)	중국
23	The 8th International Conference of Asian Concrete Federation (ACF2018)	A.S. Buller	2018.11.06	Crowne-plaza Fuzhou Riverside (푸저우)	중국
24	International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2018)	Tim Van Mullem	2018.11.19	University of Cape Town (케이프타운)	남아프리카공화국
25	The 19th edition of FEA Research Symposium (FEARS 2019)	Tim Van Mullem	2019.02.19	Ghent University (겐트)	벨기에
26	International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019)	F.R.Abro	2019.03.22	Hotel Lone (로빈)	크로아티아
27	Structures Congress 2019	심성한	2019.04.24	Orlando (플로리다)	미국
28	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	F.R.Abro	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
29	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	Tim Van Mullem	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
30	7th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2019)	이도근	2019.06.03	Osanbashi Hall (요코하마)	일본
31	Concrete Solutions 2019-7th International Conference on Concrete Repair	Tim Van Mullem	2019.10.01	Technical University of Cluj Napoca (클루지나포카)	루마니아

다. 지식재산권(특허, 실용신안, 디자인, 상표, 신품종 등)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*	
1	균열 콘크리트의 자기치유 성능 평가를 위한 투수시험장치	한국	성균관대학교산학협력단	2016.03.25	10-2016-0035909	-	성균관대학교산학협력단	2017.09.13	10-1783136	-	100
2	공시체에 대한 목표 균열폭의 균열 유발장치 및 균열 유발방법	한국	충남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2016.08.22	10-2016-0106308	-	충남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.04.03	10-1847053	-	100
3	자기치유형 유황복합재	한국	울산과학기술원성균관대학교산학협력단	2017.11.23	10-2017-0157207	-	울산과학기술원,성균관대학교산학협력단	2019.08.28	10-2017954	-	100
4	영상 정보 기반 입도 분포 추정 장치 및 방법	한국	울산과학기술원,성균관대학교산학협력단	2017.11.23	10-2017-0157288	-	울산과학기술원,성균관대학교산학협력단	2019.05.22	10-1983476	-	100
5	콘크리트 표면 균열 측정 장치 및 방법	한국	울산과학기술원,성균관대학교산학협력단	2017.11.23	10-2017-0157447	-	울산과학기술원,성균관대학교산학협력단	2019.08.19	10-2015706	-	100
6	특정 폭과 깊이를 가지는 휨 균열이 미리 발생되어 있는 휨 공시체, 및 이를 제작하는 방법	한국	충남대학교산학협력단	2017.11.24	10-2017-0157884	-	충남대학교산학협력단	2019.06.28	10-1996344	-	100
7	시멘트 복합체의 자기치유 성능 시험평가 방법	한국	충남대학교산학협력단	2017.11.29	10-2017-0161155	-	충남대학교산학협력단	2019.08.19	10-2013636	-	100
8	균열 공시체의 균열폭과 자기치유 성능 시험평가를 위한 기체 확산 시험 장치 및 시험 방법	한국	충남대학교산학협력단,성균관대학교산학협력단	2018.11.06	10-2018-0141557	-	-	-	-	-	100

* 연구개발성과 관리·유통 전담 기관에 등록한 번호 기재

라. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	영상처리 기반 콘크리트 균열 측정	2017.10.10	울산과학기술원	2017.10.19	C-2017-025085	울산과학기술원	100

마. 전문 연구 인력 양성

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

바. 보고서 원문

번호	보고서 구분	발간일	등록번호
1	자기치유 성능 평가 기법 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-4
2	무시멘트 활성화반응 평가 기법 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-5
3	균열 폭 측정 기법 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-6
4	균열 깊이 측정 기법 문헌 분석 보고서	2016.03.03	SHGC-2016-7
5	하중재하에 의한 자기치유 콘크리트 성능 평가 분석 보고서	2017.01.06	SHGC-2017-5
6	무시멘트 콘크리트의 수축 반응, 역학적 성능 평가 분석 보고서	2017.01.06	SHGC-2017-6
7	자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 운영 실적• 계획서	2017.01.06	SHGC-2017-7
8	균열 자기치유 콘크리트 내구성능 평가기법 문헌 분석 보고서	2017.11.27	SHGC-2017-11
9	확산초음파 기반 균열면 투수성능 평가 기술 분석 보고서	2017.11.27	SHGC-2017-12
10	확산초음파 기반 균열면 염소이온확산성능 평가 기술 분석 보고서	2017.11.27	SHGC-2017-13
11	자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 운영 실적 보고서	2017.11.27	SHGC-2017-14
12	자기치유 콘크리트 내구성능 평가 기법 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-5
13	부재단위 자기치유 콘크리트 성능 평가 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-6
14	부재단위 반응제어 콘크리트 성능 평가 기법 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-7
15	비파괴시험 기반 균열 자기치유 성능 평가 방법 표준화(안)	2018.11.26	SHGC-2018-8
16	자기치유 콘크리트 경제성 분석 보고서	2018.11.26	SHGC-2018-9
17	균열 자기치유 콘크리트 실외 환경 Mock-up 실험 보고서	2020.02.13	SHGC-2020-4
18	반응제어형 자기치유 콘크리트 실외 환경 실험 보고서	2020.02.13	SHGC-2020-5
19	균열면 내구성능 평가기법 표준화(안)	2020.02.13	SHGC-2020-6
20	실용화 전략 보고서	2020.02.13	SHGC-2020-7

사. 표준 채택

번호	수행기관명	표준명	표준 번호	채택 기관	제정 구분	제정일
1	성균관대학교 산학협력단	골재의 체가름 시험방법	KS F 2502	KS(대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
2	성균관대학교 산학협력단	공명 진동에 의한 콘크리트의 동탄성 계수 및 푸아송비 시험 방법	KS F 2437	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31
3	성균관대학교 산학협력단	굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법	KS F 2503	KS (대한민국 기술표준원)	개정	2019.12.31

아. 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	행사개최	자기치유친환경콘크리트연구센터	제 1회 SHGC 포럼 (자기치유 친환경 콘크리트 기술의 현황과 미래 전망)	2016.03.04
2	기타	2016 국토교통기술대전	'자기치유 친환경 콘크리트 연구센터' 전시 부스(스마트 SOC, F-08) 운영	2016.05.25
3	행사개최	자기치유친환경콘크리트연구센터	제 2회 SHGC 포럼 (4차 산업혁명과 Smart 건설재료)	2017.04.28
4	기타	KSCE 2017 CONVENTION (대한토목학회 2017 컨벤션)	'자기치유 친환경 콘크리트 연구센터' 전시 부스 운영	2017.10.19
5	기타	대한민국건설기술산업대전	'자기치유 친환경 콘크리트 연구센터' 전시 부스 운영	2018.02.22
6	행사개최	대한민국건설기술산업대전	제3회 SHGC 포럼 (미래 건설과 스마트 건설재료)	2018.02.23
7	기타	2018 국토교통기술대전	'자기치유 친환경 콘크리트 연구센터' 전시 부스 운영	2018.06.07
8	행사개최	자기치유친환경콘크리트연구센터	제4회 스마트 건설재료 포럼 (스마트 건설재료의 생태계)	2019.02.21
9	언론매체	대한전문건설신문	자기치유 콘크리트 기술 소개 기사	2019.03.11
10	기타	2019 국토교통기술대전	'자기치유 친환경 콘크리트 연구센터' 전시 부스(첨단인프라관, F-27) 운영	2019.05.29
11	행사개최	자기치유친환경콘크리트연구센터	2019 자기치유 친환경 콘크리트 국제워크샵	2019.09.20
12	기타	스마트건설기술 안전엑스포	'자기치유 친환경 콘크리트 연구센터' 전시 부스 운영	2019.11.27

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	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	L-1	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 정립	①	자기치유 성능 평가 기법 수준 향상	자기치유 성능 평가 기법 문헌보고서 작성	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
B	지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축	B-1	연구기반구축	①	운영 기반 확보	자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 운영지침 작성	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
C	반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	C-1	반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 정립	①	반응제어 성능 평가 기술 수준 향상	반응제어 성능 평가 기법 문헌보고서 작성	1건	1건	자체 평가	충남 대학교
D	비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술	D-1	이미지 스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술	①	이미지 스캐닝 기반 균열 치유 성능 평가 기술 수준 향상	균열 폭 측정기법 문헌보고서 작성	1건	1건	자체 평가	울산 과학 기술원
		D-2	표면탄성파 기반 균열치유 성능 평가 기술	①	이미지 스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술 수준 향상	균열 깊이 측정기법 문헌보고서 작성	1건	1건	자체 평가	

(2) 2차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	A-1	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 정립	②	균열 유도 기법의 신뢰도 향상	유도된 균열폭의 CoV	0.3 이하	0.12	자체 평가	성균관 대학교
				③	투수성능 평가 기법의 신뢰도 향상	투수시험 결과의 CoV	0.3 이하	0.19	자체 평가	
				④	하중재하에 의한 성능 평가 기술 확보	하중재하에 의한 자기치유 콘크리트 성능 평가 실험 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	
B	지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축	B-1	연구기반구축	②	운영 체계 확보	운영 실적·계획서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
C	반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	C-1	반응제어형 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 정립	②	반응제어 성능 평가 기술 확보	수축 반응, 역학적 성능 평가 분석 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	충남 대학교
D	비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술	D-1	이미지스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술	②	균열(폭) 식별 정확도	광학현미경으로 계측한 결과와 비교한 정확도	95% 이상	95%	자체 평가	울산 과학 기술원
		D-2	표면탄성파 기반 균열치유 성능 평가 기술	②	표면탄성파 파라미터와 균열깊이의 상관관계의 정확도	인공 균열깊이 대비 표면탄성파 파라미터의 상관계수	0.85 이상	0.916	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	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	A-1	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 기법 정립	③	투수성능 평가 기법의 신뢰도 향상	투수성능 평가 기법의 회송시험(RRT)	3회 이상	3회	자체 평가	성균관 대학교
		A-2	균열 자기치유 콘크리트의 내구성능 평가 기법 정립	①	내구성능 평가 기법의 수준 향상	내구성능 평가 기법 문헌 분석 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	
B	지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축	B-1	연구기반구축	②	운영 체계 확보	운영 실적 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
C	반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	C-2	반응제어형 자기치유 콘크리트의 내구성 평가 기법 정립	①	탄산화 내구성 성능 평가 기법의 신뢰도 향상	탄산화 속도계수의 CoV	0.3 이하	0.3 이하	자체 평가	충남 대학교
				②	염해 내구성 성능 평가 기법의 신뢰도 향상	염소이온 확산계수의 CoV	0.3 이하	0.3 이하	자체 평가	
D	비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술	D-1	이미지스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술	③	Computer vision 기법을 이용한 균열 개구 면적 추정 정확도	광학현미경으로 계측한 결과와 비교한 정확도	95% 이상	95.17%	자체 평가	울산 과학 기술원

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
D	비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술	D-2	표면탄성파 기반 균열치유 성능 평가 기술	③	표면탄성파 파라미터를 활용한 균열깊이 치유 평가 기법의 정확도	코어 채취 시험 대비 평가 기법의 평균 오차율	15% 이내	11.72%	자체 평가	울산 과학 기술원
E	비파괴시험 기반 균열면 내구성능 복원 평가 기술	E-1	확산초음파 기반 균열면 투수성 치유 평가 기술	①	확산초음파 기반 투수성 평가 기술 확보	확산초음파 기반 투수성 평가 기술 분석보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	울산 과학 기술원
		E-2	확산초음파 기반 균열면 염소이온확산성 치유 평가 기술	①	확산초음파 기반 염소이온확산성 평가 기술 확보	확산초음파 기반 염소이온확산성 평가 기술 분석보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	

(4) 4차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	균열 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화기술	A-2	내구성능 평가기법 정립	②	평가기법의 신뢰도 향상	내구성능 평가 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
		A-3	부재단위 평가기법 정립	①	평가기법 확보	부재단위의 성능평가 기법 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	
B	지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축	B-2	자기치유 콘크리트 실용화 전략 수립	①	실용화 촉진	경제성 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
C	반응제어 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화기술	C-3	반응제어형 자기치유 콘크리트의 부재단위 평가기법 정립	①	평가 기법 확보	부재단위의 성능평가 기법 분석 보고서	1건	1건	자체 평가	충남 대학교
D	비파괴시험 기반 균열치유 성능평가 기술	D-1	이미지 스캐닝 기반 균열치유 성능평가 기술	④	균열면적 평가체계 정립	균열 자기치유 성능평가 방법 표준화(안)	1건	1건	자체 평가	울산 과학 기술원
		D-2	표면탄성파 기반 균열치유 성능평가 기술	④	균열깊이 평가체계 정립					
E	비파괴시험 기반 균열면 내구성능 복원 평가 기술	E-1	확산초음파 기반 균열면 투수성 치유평가 기술	②	투수계수 정확도	투수계수 추정 기법의 평균 오차율	19.6%	19.6%	자체 평가	울산 과학 기술원
		E-2	확산초음파 기반 균열면 염소이온 확산성 치유평가 기술	②	염소이온 확산계수 정확도	염소이온 확산계수 추정 기법의 평균 오차율	10.9%	10.9%	자체 평가	

(5) 5차년도

핵심 성과물 (Level 1)		단위 성과물 (Level 2)		성과 목표						해당 기관
				성과지표		질적 목표 (측정 방법)	목표치	달성치	검증 방법	
A	균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	A-3	균열 자기치유 콘크리트의 부재단위 평가 기법 정립	②	부재단위 성능 평가 기법의 수준 향상	균열 자기치유 콘크리트 실외환경 Mock-up 실험 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
B	지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축	B-2	자기치유 콘크리트 실용화 전략 수립	①	자기치유 기술 실용성 향상	실용화 전략 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	성균관 대학교
C	반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	C-3	반응제어형 자기치유 콘크리트의 부재단위 평가 기법 정립	①	부재단위 성능 평가 기법의 수준 향상	반응제어형 자기치유 콘크리트 실외 환경 실험 보고서 작성 여부	1건	1건	자체 평가	충남 대학교
D	비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술	D-1	이미지스캐닝 기반 균열치유 성능 평가 기술	⑤	부재수준 균열면적 치유 성능 평가 정확도	광학현미경으로 계측한 결과와 비교한 정확도	90% 이상	91.2	자체 평가	울산 과학 기술원
		D-2	표면탄성파 기반 균열치유 성능 평가 기술	⑤	부재수준 균열깊이 치유 성능 평가 정확도	코어 채취 시험 대비 평가 기법의 평균 오차율	20% 이하	19.1	자체 평가	
E	비파괴시험 기반 균열면 내구성능 복원 평가 기술	E-1	확산초음파 기반 균열면 투수성 치유 평가 기술	③	내구성능 평가 체계 정립	균열면 내구성능 평가기법 표준화(안)	1건	1건	자체 평가	울산 과학 기술원
		E-2	확산초음파 기반 균열면 염소이온확산성 치유 평가 기술							

나. 정량적 연구 목표 달성도

구분			목표	달성	달성률(%)	주요 실적
논문 게재	SCI급		13	21	161.5	- Concrete Crack Identification Using a UAV Incorporating Hybrid Image Processing (Sensors)
	국내 논문		11	10	90.9	- 균열 자기치유 재료 혼입 모르타르의 투수성능 평가 (한국건설순환자원학회 논문집)
학술 회의	국내		36	31	172.2	- 팽창재 및 결정촉진제를 사용한 자기치유 모르타르의 기초물성 (한국콘크리트학회 2019 가을 학술대회)
	국외			31		
특허 출원	국내		7	8	114.3	- 콘크리트 표면 균열 측장 장치 및 방법 (10-2017-0157447)
	국외		-	-	-	
특허 등록	국내		4	7	175.0	- 균열 콘크리트의 자기치유 성능평가를 위한 투수시험장치 (10-1783136)
	국외		-	-	-	
인력 양성	석사		7	7	100.0	- 성균관대, 울산과학기술원, 충남대
	박사		3	4	133.3	- 성균관대, 울산과학기술원
기술 이전	계약 건수		-	-	-	
	계약액		-	-	-	
	징수액		-	-	-	
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문		20	20	100.0	- 자기치유 콘크리트 내구성능 평가 기법 분석 보고서
	연구시설·장비		-	-	-	
	기술요약정보		-	-	-	
	생명자원	생명정보	-	-	-	
		생물자원	-	-	-	
		신품종	-	-	-	
	소프트웨어		1	1	100.0	- 영상처리 기반 콘크리트 균열 측정 (C-2017-025085)
	화학물		-	-	-	
기타	표준 채택		-	3	초과 달성	- 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법(KS F 2503)
	시제품		-	-	-	
	현장 시험		-	-	-	
	성과 홍보		5	12	240.0	- 국토교통기술대전 및 대한토목학회 CIVIL EXPO 등 독립 부스 참가 및 성과 홍보 실시
	일자리 창출		-	-	-	

4-2. 관련 분야 기여도

가. [3-1] 자기치유 콘크리트 성능평가 표준화 기술 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

① 자기치유 콘크리트에 대한 표준화 기술 개발 필요

- 자기치유형 콘크리트 연구는 현재 세계적으로 원천기술 개발단계에 머물러 있음. 현재 자기치유 성능에 대한 평가는 치유물질 생성 정도와 특성에 대한 정성적 평가에 그치고 있음.
- 자기치유 콘크리트 개발 중 다양한 자기치유 기술들의 성능 분석 및 상호비교를 위해, 성능평가를 위한 표준 실험방법 및 성능기준의 정립이 필요
- SEM, Image analysis, X-ray, CT 등 이용 자기 치유 효과에 대한 정량적 분석과 투수 실험 등을 통해 간접적 방법으로 자기 치유 콘크리트에 대한 물성 복원 정도 평가
- 반응제어 자기치유 콘크리트의 능력을 미세구조 분석과 화학 분석 등 과학적 접근을 기반으로 중성화, 수축 실험 등으로 평가할 수 있는 성능 평가 기준 및 방법 정립

② 자기치유 콘크리트의 비파괴 성능평가 표준화 기술 개발 필요

- 현장적용된 자기치유형 콘크리트의 효율적 관리를 위해서는 손상 후 역학적, 내구적 물성에 대한 자기치유 성능 평가에 대한 표준화가 필요함.
- 자기치유 콘크리트 현장적용 후, 구조물의 사용중단 없이 안전진단 및 자기 치유 성능 모니터링이 지속적으로 요구되어 첨단기술을 활용한 비파괴 시험기법이 필요함.

표 4.12 자기치유 콘크리트에 대한 표준화 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술선도)** 벨기에 Belie 교수 연구팀 – 다양한 원리의 자기치유 콘크리트에 대하여 투수시험, 흡수시험 등의 평가수행 – 실험실 시편, 소규모 부재 대상 연구 진행 ▪ **(기술한계)** 수밀성 확인에 초점 – 수밀성 확보에 초점을 두어 평가 – 실험실 시편대상인 시험으로 구조물 대상의 실 구조물에 대한 평가는 어려움. – 비파괴 평가 기법과의 접목이 없음.	▪ **(표준화)** 균열 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화 기술 – 다양한 범위의 균열 자기치유 효과를 마이크로/매크로 관점에서 과학적/공학적으로 분석하고, 이를 정량적으로 평가할 수 있는 기술 개발 ▪ **(표준화)** 반응제어 자기치유 콘크리트의 성능평가 표준화 기술 – 반응제어 자기치유 콘크리트의 효과를 객관적으로 분석하고, 이를 평가할 수 있는 시험 방법의 규격화 및 성능평가 프로세스 표준화 기술 개발

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 다양한 원리에 의하여 치유되는 자기치유 콘크리트의 균열 치유 성능 및 반응제어 자기 치유 콘크리트의 성능을 객관적이고 일관적으로 평가할 수 있는 기준 마련

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.13 핵심성과 기술수준

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
균열 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	• 균열 자기치유 콘크리트에 대한 일관적이고 표준화된 평가 방법 및 기준은 없음.	• 자기 치유 콘크리트의 균열 치유 능력에 대한 성능 평가 기준 및 방법 정립	• 균열 자기치유 콘크리트의 핵심 성능을 일관되게 평가할 수 있는 기술이 필요함.
지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축	• 자기치유형 친환경 콘크리트 연구센터는 없음.	• 지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터 구축·운영	• 지속가능 자기치유 친환경 콘크리트 연구 체계 구축
반응제어 자기치유 콘크리트의 성능 평가 표준화 기술	• 서로 다른 자기치유 콘크리트의 직접적인 성능 평가 및 비교가 어려운 실정임.	• 반응제어 자기치유 콘크리트에 대한 성능 평가 기준 및 방법 정립	• 반응제어 자기치유 콘크리트의 핵심 성능을 일관되게 평가할 수 있는 기술 필요함.

나. [3-2] 비파괴시험 기반 자기치유 성능평가 기술 개발

(1) 개발기술 독창성 및 차별성

① 자기치유 콘크리트의 비파괴 성능평가 기술 개발 필요

- 고비용 고성능의 자기치유 콘크리트는 개발의 초기 단계로 실용화에 대한 접근은 전혀 이루어 진 바 없음.
- 개발된 자기치유 콘크리트의 실용화를 위해서는 다소 높은 초기투자 비용에 대한 타당성을 마련하는 것이 필요
- 자기치유 콘크리트의 장점을 활용할 수 있는 시방서, 설계 기법, 평가 기법 등의 실용화 전략 및 지침 제안

표 4.14 자기치유 콘크리트에 대한 표준화 기술 차별성

기존기술	개발기술
▪ **(기술선도)** 벨기에 Belie 교수 연구팀 – 다양한 원리의 자기치유 콘크리트에 대하여 투수시험, 흡수 시험 등을 사용하여 성능 평가 수행 – 실험실 시편, 소규모 부재를 대상으로 연구 진행 ▪ **(기술한계)** 수밀성 확인에 초점 – 수밀성 확보에 초점을 두어 치유성능 평가 – 구조물 대상의 실제 구조물의 평가는 어려움. – 비파괴 평가 기법과의 접목이 없음.	▪ **(기술융복합)** 비파괴 성능평가 표준화 기술 – 자기치유 콘크리트의 회복성능을 실제 구조물에서 평가할 필요가 있음. – 이를 위한 비파괴 성능평가 표준화 기술 개발 ▪ **(실용화)** 자기치유 성능 향상 – 높은 비용의 자기 치유 콘크리트의 실용화를 위해서는 다각도의 경제성 분석으로 활용의 타당성을 분석하고, 실용화 전략 수립

(2) 핵심성과의 관련 분야 확보 기술

- 자기치유 콘크리트의 균열 크기 저감 효과는 표면 균열폭의 변화를 정성적으로 관찰하는 수준임. 그러나 콘크리트의 표면 균열 폭은 측정 위치에 따라 다르므로 특정 위치에서의 균열폭 변화만으로 자기치유 성능을 평가하는 것은 합리적이지 않음.
- 표면 개구 면적의 변화와 균열 깊이 저감을 포함한 평가가 필요함. 이를 위해 이미지스캐닝 기반 균열폭 저감 평가 방법과 표면탄성파 기반의 균열 깊이 저감 평가 방법 개발
- 자기치유 콘크리트의 개발 목적은 수밀성 등과 같은 내구성능의 복원에 있음.
- 따라서 자기치유 콘크리트의 성능을 평가하기 위해서는 내구성능의 복원 정도를 평가할 수 있는 방법이 필요함.
- 자기치유 콘크리트의 균열면 내구성 복원 성능을 평가하기 위해 내구성능의 핵심지표인 균열면 투수성과 염소이온 확산성을 확산초음파를 이용하여 평가할 수 있는 방법 개발

(3) 핵심성과의 기술수준 분석

표 4.15 핵심성과 기술수준

핵심성과	기존기술 수준 (2015년)	개발기술 수준 (2019년)	분석 및 근거
비파괴시험 기반 균열치유 성능 평가 기술	• 균열 깊이 측정 정밀도 : 평균 오차율 30% 수준	• 균열 깊이 측정 정밀도 : 평균 오차율 20% 이내 • 표면 균열 개구면적 측정 해상도 : 부재수준 정확도 90% 이상	• 평균 오차율 20% 이내 정밀도의 균열 깊이 측정 기술은 세계적 수준의 균열크기 저감 평가 기술로 판단됨. • 부재수준 측정 정확도 90% 이상의 표면 균열 개구면적 측정 기술은 세계적 수준의 균열크기 저감 평가 기술로 판단됨.
비파괴시험 기반 균열면 내구성 복원 성능 평가 기술	• 투수성 평가 : 투수시험을 통한 투수계수 측정 • 염소이온 확산성 평가 : 염소이온 확산시험을 통한 염소이온확산계수 측정	• 투수계수 측정 정밀도 : 투수시험 대비 투수계수 측정 오차 25% 이내 • 염소이온 확산계수 측정 정밀도 : 염소이온 확산시험 대비 염소이온 확산계수 측정 오차 25% 이내	• 비파괴시험을 통한 내구성 계수 측정은 전 세계적으로 연구되지 않았고, 측정 오차 25% 이내의 측정 기술은 세계적 수준의 자기치유 성능 평가 기술로 판단됨.

5. 연구개발성과의 활용 계획

가. 지적재산권 확보

- 균열 유발 및 자기치유 성능평가 시험 장치 · 방법 확보를 통한 표준화 방향 제시

  : 자기치유 콘크리트의 재료성능 및 치유성능의 평가방법 및 기준으로 활용됨.

  : 다양한 자기치유 콘크리트 관련 기준으로 활용 및 확대 적용 가능함.

- 비파괴시험 기반 자기치유 콘크리트의 성능평가 기법 개발을 통해 실험실 수준 및 현장 성능평가 기술 확보

  : 첨단기술을 활용한 비파괴 시험방법을 통해 구조물의 사용중단 없이 안전진단 및 자기치유 성능 모니터링이 가능함.

- 다양한 종류의 자기치유 친환경 콘크리트의 사용 성능을 일관되고 효율적으로 평가할 수 있는 기반 기술 확보

  : KS & ISO 표준 기술 등재를 통한 국내·외 대표 표준 기술로 활용 가능함.

나. 기술 제품화 및 상용화

- 새로운 자기치유 소재의 사업화 및 실용화에 필수적인 표준 성능 분류 및 표준 성능평가에 적용되는 기반 기술로 활용 가능

  : 자기치유 콘크리트 구조물의 사회적, 환경적 효과에 대한 분석과 설계 기술을 제시하기 위한 기초자료로 활용 가능

- 기존의 초음파 등의 비파괴 기술(NDT)을 활용하여 구조물의 안전성을 평가하는 자기치유 콘크리트의 유지관리 기술 발전에 초석 마련

  : 과학적 접근방법을 이용해 자기치유 성능을 평가방법 및 기준 등을 마련하여 구조물의 안전도를 평가하는 기초자료로 활용 가능함.

  : 자기치유 콘크리트 구조물의 손상 후 역학적, 내구적 성능에 대한 평가방법을 표준화하여 구조물 관리시스템의 기초자료로 활용

다. 신규시장 개척 및 선도

- 자기치유 성능에 대한 실험방법 개발 및 성능 기준의 정립과 기술 활성화를 위한 성능평가 표준시험방법 제시하고 이에 대한 인증평가 시스템을 구축함.

  : 다양한 자기치유 기술들의 성능 분석 및 상호비교를 위해, 성능평가를 위한 표준 실험방법 및 성능 기준을 통해 자기치유 소재에 대한 인증이 가능

- 자기치유 콘크리트 관련 제품 인증제도 도입 등을 통행 국내 건설재료시장의 확장 가능

- 자기치유 콘크리트의 평가 기술을 제도화하여 건설시장에 자기치유 기술을 보편화하고, 이를 통해 비용 절감 및 안전한 시공기술을 갖춘 국가로 이미지를 쇄신하여 시공 경쟁력 제고

라. 성능평가방법의 실증화

- 자기치유 콘크리트의 치유성능에 대한 객관적인 지표를 제시하고 기존 콘크리트 기술과의 차별성을 입증하기 위해 실제 환경에서의 자기치유 콘크리트 full-scale 평가가 필수적임.

  : 본 연구과제에서 개발된 자기치유 성능평가(안)은 실험실 환경에서 부재 단위 성능평가 및 성능 검증이 이루어졌으며, Mock-up test를 통한 semi-scale 평가를 수행하였음.

- 실용화를 위한 자기치유 콘크리트 제품의 제품 등급화, 성능 검증을 위한 실험방법의 표준화 및 Test-bed 구축을 통한 종합 성능평가 시스템 개발이 요구됨.

  : 향후 목적 구조물 별 표준화를 수행하고 비파괴 기반 자기치유 모니터링 기술과 자기치유 성능평가 기술을 복합 활용한 종합성능평가 기술에 대한 검토가 요구됨.

- 환경대응 콘크리트 성능평가 및 목적지향형 자기치유 종합성능 평가 시스템 개발을 위해 자기치유 콘크리트 Test-bed를 구축을 통한 자기치유 콘크리트의 실증화를 수행하고자 함.

마. 자기치유 성능평가 시험방법 제도화

- 자기치유 기술 개발을 위한 국제 대형 프로젝트인 EU-SARCOS(Self-healing As prevention Repair of COncrete Structures) 프로그램의 Working Group-2의 연구분야에 자기치유 성능평가 시험방법(안)을 제안하여 국제표준을 취득하기 위하여 협력하고 있음.

  : SARCOS의 Working Group-2의 연구주제는 “균열 치유 특성 및 모니터링”으로 치유 및 내구성능 평가방법 및 표준화 기술에 관련된 연구를 수행하고 있음.

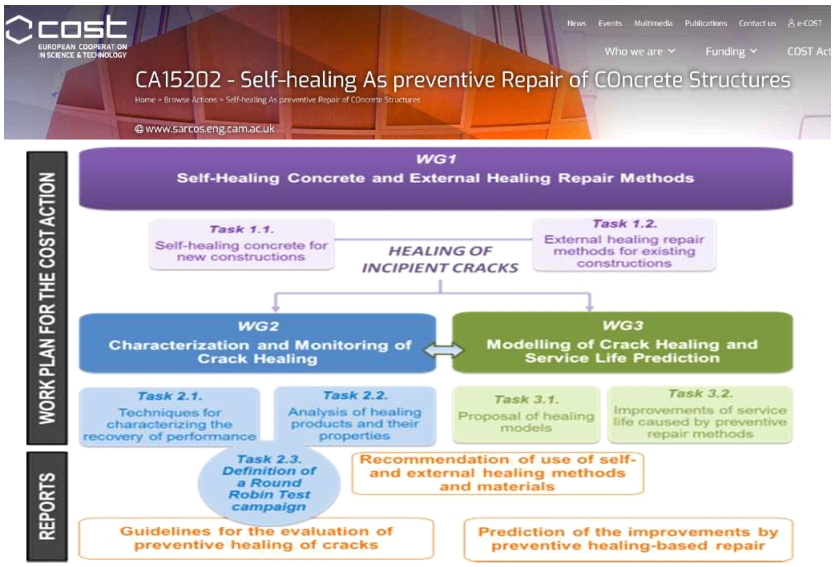
  : 본 연구과제에서 치유성능 평가방법에 대한 연구를 위탁 수행하며 기술 및 연구방향에 대한 지속적인 기술자문과 협력을 추진 중인 Ghent University 연구팀은 SARCOS 프로젝트에서 28개 국가의 연구기관과 협력하여 연구를 수행하고 있음.

- 국내 관련 학회인 한국콘크리트학회의 제규준에 자기치유 성능평가 시험방법(안)을 제안하여 전문기술자의 심의를 받아 제규준으로 인증받기 위한 계획을 추진하고 있음.

  : 한국콘크리트학회 KCI-제규준은 국가공인 시험방법에 해당하지 않지만 한국산업표준(KS)에서 즉시 수용하기 어려운 새로운 기술의 시험방법 등을 제안함으로써 신기술 개발과 활용을 장려하고, 시험방법의 보편화를 하기 위한 절차 및 방안임.

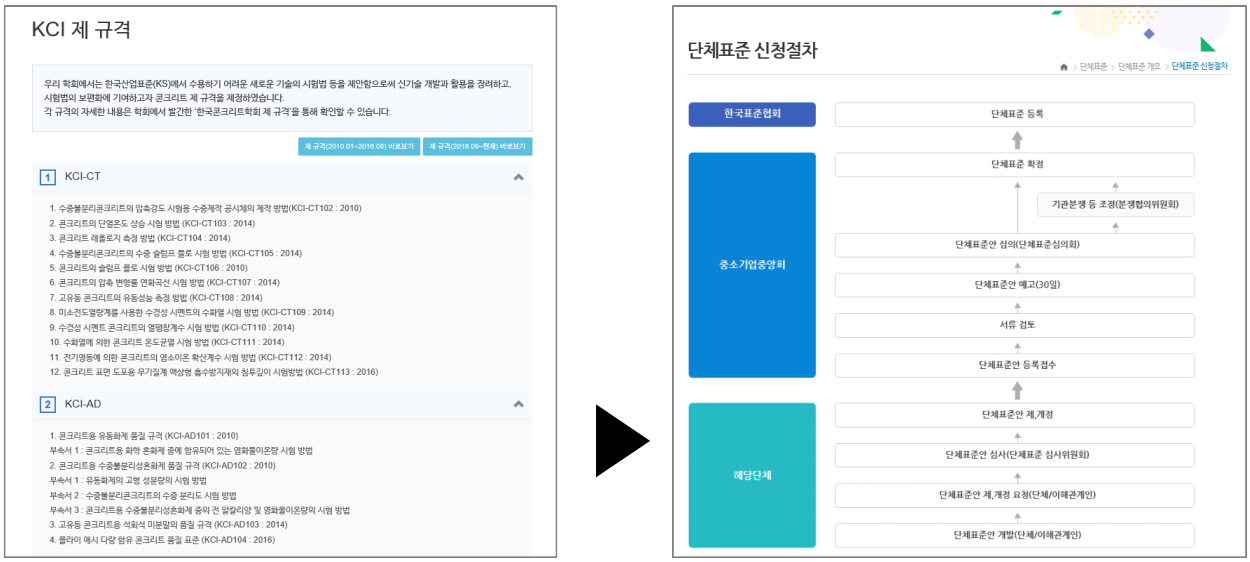
  : 현재 자기치유 관련 기술에 대한 시험방법이 없기 때문에 참고 지표로 활용이 가능하며, 제안된 시험방법은 산학연 전문기술자로 구성된 학회 규격위원회의 엄격한 심의를 거쳐 인증됨에 따라 시험방법의 검증 및 공인 시험방법으로 등록하기 위한 토대 마련이 가능함.

- 본 연구과제에서 개발한 자기치유 성능평가 시험방법(안)이 KCI 제규준으로 채택된 이후 국가표준인 한국산업표준(KS : Korean Industrial Standards) F(건설)분야에 등록하기 위한 계획을 수립하고 있으며, 향후 국제표준화기구(ISO, International Organization for Standardization) 인증을 받아 자기치유 성능평가 시험방법의 국제 표준화를 추진하고자 함.



※ Working Group 2: Characterization and Monitoring of Crack Healing

그림 5.1 EU(COST) 'SARCOS'프로젝트를 통해 국제 표준 채택 추진



KCI 제 규격 (1년 6개월)

한국표준협회 단체 표준 (3년)

그림 5.2 표준화를 위한 추진 계획 및 예상 소요 기간

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

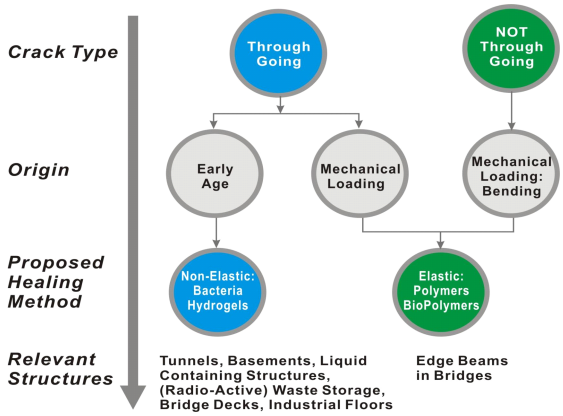


그림 6.2 HealCON Project 개요

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.



그림 6.3 SHeMat Project 홈페이지



그림 6.4 SHeMat Project 개요

- 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

- 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.

- 덴마크에서는 정부기관인 무역산업부 (Ministry of Trade and Industry)의 지원으로 덴마크 그린 콘크리트 센터에서 시멘트 생산업체, 국가연구기관 (Danish Technological Institute), 대학 (Technical University of Demark 외) 등이 참여하여 자원절약형(resource saving type) 친환경 콘크리트 기술 개발 및 활용하기 위한 프로젝트를 수행(1998~2002)

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 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

- '자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발(SHGC)'의 참여중인 UGhent이 SARCOS에서 함께 연구하고 있기때문에 SARCOS의 Working Group-2에 SHGC에서 개발한 치유성능 평가방법을 제안하여 국제표준을 취득하기 위한 협력을 하고 있음.

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 연구 활동을 위하여 설치된 연구실	• 과학기술분야 연구 활동을 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 연구 자원의 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

- ▢ Aldea, C.M., Shah, S.P., Karr, A. (1991). Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete, J. Mater. Civ. Eng,. 11 (3), 181 – 187.
- ▢ Bamforth P. B. (1987). The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. Magazine of Concrete Research, 39, 3 – 11.
- ▢ Collins, F.G., Sanjayan, J.G., (2000). Effect of pore size distribution on drying shrinkage if alkali-activated slag concrete. Cement and Concrete Research, 30(9), 1401-1406.
- ▢ Deroo, F., Kim, J.Y., Qu, J., Sabra, K. Jacobs, L.J. (2010). Detection of damage in concrete using diffuse ultrasound, J. Acoust. Soc. Am. 127(6), 3315 – 3318.
- ▢ Darquennes, A., Olivier, K., Benboudjema, F., Gagne, R. (2016). Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. Construction and Building Materials, 113, 1017-1028.
- ▢ Diamon, S. (2000). Mercury porosimetry : an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. Cement and Concrete Research, 30, 1517-1525.
- ▢ Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. ACI Material Journal, 96(4), 448-454.
- ▢ Ferrara, L., Krelani, V., Carsana, M. (2014). A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures, Construction and Building Materials, 68, 535 – 551.
- ▢ Ferrara, L. et al. (2018). Experimental characterization of the self-healing capacity of cement-based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. Constr. Build. Mater., 167, 115-142.
- ▢ Ferrara, L., Krelani, V., Carsana, M. (2014). A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. Constr. Build. Mater., 68, 535 – 551.
- ▢ Gérard, B., Breysse, D., Ammouche, A., Houdusse, O. Didry, O. (1996). Cracking and permeability of concrete under tension, Mater. Struct. 29, 141 – 151.
- ▢ Ham, S., Song, H., Oelze, M.L., Popovics, J.S. (2017) A contactless ultrasonic surface wave approach to characterize distributed cracking damage in concrete, Ultrasonics 75, 46 – 57.
- ▢ Helm, J.D. (2008) Digital image correlation for specimens with multiple growing cracks, Exp. Mech. 48(6), 753 – 762.
- ▢ In, C.W., Holland, R.B., Kim, J.Y., Kurtis, K.E., Kahn, L.F., Jacobs, L.J. (2013) Monitoring and evaluation of self-healing in concrete using diffuse ultrasound, NDT and E Int 57, (2013) 36 – 44.

- Jang, S. Y., Kim, B. S., Oh, B. H. (2011). Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. Cement and Concrete Research, 41, 9-19.
- Kermani, A. (1991). Permeability of stressed concrete, Build. Res. Inform. 19, 360 - 366.
- Kanellopoulos, A., Qureshi, T.S., Al-Tabbaa, A. (2015) Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites, Constr. Build. Mater. 98, 780 - 791.
- Lawler, J.S., Zampini, v, Shah, S.P. (2002). Permeability of cracked hybrid fiberreinforced mortar under load, ACI Mater. J. 99, 379 - 385.
- Lee, H. J., Lee, S. J., Bae, S. H., Kwon, S. O., Lee, K. M., Jung, S. H., (2016). Long-term durability estimation of cementless concrete based on alkali activated slag. Journal of the Korean Recycled Construction Resources, 4(2), 149-156.
- Liu, S., Bundur, Z.B., Zhu, J., Ferron, R.D. (2016). Evaluation of self-healing of internal cracks in biomimetic mortar using coda wave interferometry, Cem. Concr. Res. 83, 70 - 78.
- Maes, M., De Belie, N. (2014), Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. Cement and Concrete Composite, 53, 59 - 72.
- Maes, M., Snoeck, D., Belie, N. D. (2016). Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. Construction and Building Materials, 115, 114 - 124.
- Mcgrath, P. F., Hooton, R. D. (1996). Influence of voltage on chloride diffusion coeffcients from chloride migration tests. Cement and Concrete Research, 26(8), 1239-1244.
- Meziani, H. and Skoczylas, F. (1999) An experimental study of the mechanical behaviour of a mortar and of its permeability under deviatoric loading, Materials and Structures, 32, 403-409.
- Meziani, H. (2006). Gas permeability measurements of cement-based materials under hydrostatic test conditions using a low-transient method. Mag. Concr. Res., 58, 489 - 503.
- Michel, A., Otieno, M., Stang H., Geiker, M. R. (2016). Propagation of steel corrosion in concrete Experimental and numerical investigations. Cement and Concrete Composites, 70, 171-182.
- Otieno, M., Stang, H., Alexander, M. (2016). Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete- Part Ⅰ: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. Cement and Concrete Research, 79, 373-385.
- Otieno, M., Stang, H., Alexander, M. (2016). Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete-Part Ⅱ: Corrosion rate prediction models. Cement and Concrete Research, 79, 386-394.
- Ramamoorthy, S.K., Kane, Y., Turner, J.A. (2004) Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete, J. Acoust. Soc. Am. 115(2), 523 - 529.

▢ Rinaldi A., Placidi, L. (2014). A microscale second gradient approximation of the damage parameter of quasi-brittle heterogeneous lattices, ZAMM－Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift f¨ur Angewandte Mathematik und Mechanik, 94(10)10, 862 – 877.

▢ Sahmaran, M. (2007). Effect of flexure induced transverse crack and self-healing on chloride diffusivity of reinforced mortar. J. Mater. Sci. 42, 9131 – 9136.

▢ Schlangen, E., Sangadji, S. (2013). Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms-recent advances in self healing concrete and asphalt. Procedia Engineering, The 2nd International Conference, 54, 39-57.

▢ Shin, S.W., Zhu, J., Min, J., Popovics, J.S. (2008) Crack depth estimation in concrete using energy transmission of surface waves, ACI Mater. J. 105(5), 510 – 516.

▢ Talah, A. (2013). A modified test procedure to measure gas permeability of hollow cylinder concrete specimens. Int. J. Eng. Technol., 5, 91 – 94.

▢ Tittarelli F, (2009). Oxygen diffusion through hydrophobic cement-based materials, Cement and Concrete Research, 39, 924-928.

▢ Villani C., Loser M., Martine J. W., Carmelo D. B., Lura P., Weiss, W. J., (2014). An inter lab comparison of gas transport testing procedures: Oxygen permeability and oxygen diffusivity. Cement and Concrete Composites, 53, 357-366.

▢ Wang, K., Jansen, D. C., Shah, S. P. (1997). Permeability study of cracked concrete. Cem. Concr. Res., 27, 381-393.

▢ Wang, J.Y., Dewanckele, J., Cnudde, V., Vlierberghe, S.V., Verstraete, W., Belie, N.D., (2014) X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete, Cem. Concr. Compos. 53 289 – 304.

▢ Wang, J.Y., Snoeck, D., Vliergerghe, Verstraete, W., Belie, N.D. (2014) Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, Constr. Build. Mater. 68, 110 – 119.

▢ Wang, J.Y., Mignon, A., Snoeck, D., Wiktor, V., Vliergerghe, S.V., Boon, N., Belie, N.D. (2015) Application of modified-alginate encapsulated carbonate producing bacteria in concrete: a promising strategy for crack self-healing, Front. Microbiol, 6 1088.

▢ Wu, Z., Wong, H. S., Buenfeld, N. R. (2017). Transport properties of concrete after drying-wetting regimes to elucidate the effects of moisture content, hysteresis and microcracking. Cem. Concr. Res., 98, 136 – 154.

▢ Yang, Z., Hollar, J., He, X., et al. (2011). A self-healing cementitious composite using oilcore/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.