국토교통기술연구개발사업 R&D-13RDPP-C069725-01

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획 최종보고서

2014. 05.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 성균관대학교
협동연구기관 / 전남대학교
한국건설생활환경시험연구원
(주)날리지웍스

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발"기획과제의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 05.

주관연구기관명 : 성균관대학교

주관연구책임자 : 이 광명

연구원 : 최슬우

" : 홍성현

협동연구기관명 : 전남대학교

협동연구책임자 : 송 진규

연구원 : 송금일

협동연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원

협동연구책임자 : 정 상화

연구원 : 최영철

" : 문규돈

협동연구기관명 : (주)날리지웍스

협동연구책임자 : 류 형근

연구원 : 김황만

" : 손창수

" : 방영민

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>13RDPP
-C069725-01</td><td>해당단계
연구기간</td><td>2103.12.20 ~
2014.5.19</td><td>단계구분</td><td>1/1</td></tr>
<tr><td>연구사업명</td><td colspan="5">국토교통기술연구개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="4">연구과제명</td><td>최상위
과제명</td><td colspan="4">첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획</td></tr>
<tr><td rowspan="3">단위과제명</td><td colspan="4">친환경 콘크리트 기술동향 및 연구추진전략 수립기획</td></tr>
<tr><td colspan="4">자기치유형 친환경 가이드 및 타당성 기획</td></tr>
<tr><td colspan="4">자기치유형 친환경 콘크리트 실용화 기획</td></tr>
<tr><td>연구책임자</td><td>이 광명</td><td>총연구기간
참여
연구원수</td><td>총 : 12명
내부 : 12명
외부 : 0명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 65,000천원
기업 : 천원
계 : 65,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">성균관대학교
건축토목공학부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>300</td></tr>
</table>

○ 자기치유 콘크리트 요소기술은 세계적으로 기술개발 초기단계로 선택과 집중을 통한 효율적인 연구개발을 통한 원천기술 확보로 기술역전 또는 기술선도가 가능할 것으로 판단됨.

- 2013년도 World Economic Forum에서 자기치유 재료(self-healing materials) 기술이 10대 유망기술(emerging technologies)에 포함됨.

○ 본 보고서에서는 국토교통부의 국토해양 R&D 발전전략의 주요 목표인 세계 원천기술 확보, 해외시장 경쟁력 증대, 사회경제적 비용 절감을 구현하기 위한 기반 요소기술에 대하여 중점 연구 분야 및 후보과제를 도출함.

○ '자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 건설분야 Low-tech 이미지 탈피, 2020년까지 선진국 수준 기술경쟁력 확보, 2030년 해외시장 선점에 기여'하기 위해 사용수명 50% 증대, 유지관리비용 30% 감소, 생애주기 CO_2 30% 감소, 세계적 수준의 원천기술 확보 등의 구체성 있는 실현목표를 설정하여 이를 실현하기 위한 세부기술을 구성하였음.

색인어 (각 5개 이상)	한글	자기치유, 균열치유, 반응제어, 치유성능 평가, 친환경 콘크리트
	영어	Self-healing, Crack-healing, Reaction control, Healing Performance Assessment, Green Concrete

요 약 문

Ⅰ. 제목

▢ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

Ⅱ. 기술의 정의 및 필요성

[기술의 정의]

『첨단 기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발』 기술은
하이테크 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 지속가능한
콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공/유지관리 비용 최소화를 위한 콘크리트 개발 기술

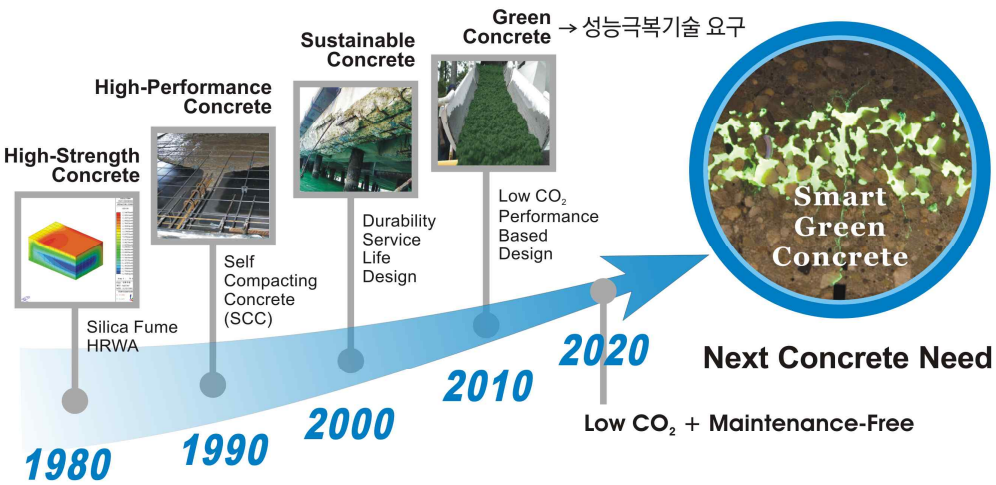
▢ 첨단기술 활용 자기치유 기술 : 바이오(bio), 나노(nano), 폴리머(smart-polymer) 등의 새로운 소재의 기능을 활용하여 콘크리트에 자기치유 성능을 부여하는 기술

▢ 자기치유형 친환경 콘크리트 : 외부의 인위적 행위 없이 스스로 균열 및 열화를 치유하여 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, 생애주기 이산화탄소 배출량($LCCO_2$) 30% 감소를 달성할 수 있는 지속가능 콘크리트

[기술의 필요성]

▢ 급격히 변화하는 건설재료 시장에서 미래형 건설 청정소재에 대한 국내 요소기술 개발 및 확보 전략이 미흡한 상태임.

- 로우테크(Low-tech) 이미지를 탈피하고 해외시장 견인을 위한 첨단기술(Bio/Nano/Eco Tech.)을 접목한 새로운 개념의 건설재료기술 개발 필요
- 급변하는 콘크리트 재료 시장은 '80~'90년대 고성능 개념에서 '00~'10년대 지속가능 및 친환경 콘크리트로 패러다임이 변한 후 새로운 개념의 콘크리트에 대한 개발요구 증대

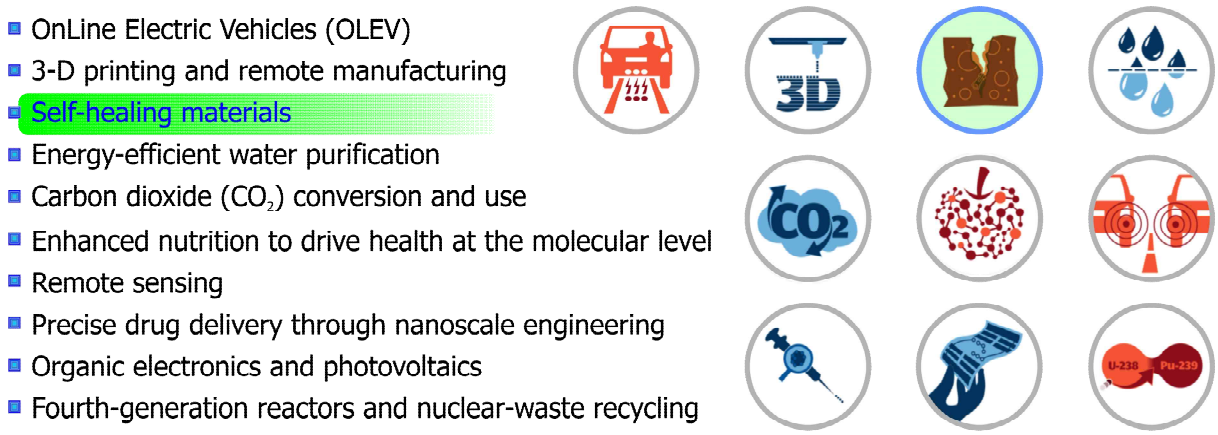


< 시대별 콘크리트 기술 변천사 >

▢ 고도성장기의 사회기반 시설물뿐만 아니라 신규, 특히 사회적 중요도가 높으면서 유지보수가 어려운 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물 등)의 유지관리 중요성 증대

- 최근 균열 등 콘크리트의 손상을 저감시키거나 자기치유(Self-healing)할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 이에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음.

▢ 2013년도 World Economic Forum에서 자기치유 재료(self-healing materials) 기술이 10대 유망기술(emerging technologies)에 포함됨.



< World Economic Forum - 2013년 10대 유망기술 >

▢ 자기치유 콘크리트 요소기술은 세계적으로 기술개발 초기단계로 선택과 집중을 통한 효율적인 연구개발을 통한 원천기술 확보로 기술역전 또는 기술선도가 가능할 것으로 판단됨.

- 세계적으로 자기치유 콘크리트 관련 특허출원은 102건, 논문게재는 72건으로 상당히 적은 것을 알 수 있으며, 2000년 후반부터 증가하는 추세임.
- 유럽의 경우 12개 기관이 참여하여 “Self-healing materials for prolonged lifetime"이라는 주제로 대형 HealCON 프로젝트가 2013년부터 진행 중임.

▢ 국내 자기치유 콘크리트관련 요소기술은 선진국 대비 40%의 수준임. 하지만 기술수준에 비해, 선진국의 경우도 기술도입기로 기술격차는 5~6년으로 판단됨.

※ 기술선진국 : 유럽(네델란드, 델프트공대), 일본(동경대), 미국(일리노이대학)

Ⅲ. 국내외 동향 및 환경분석

[국내외 정책동향]

▢ 건설기술기본계획에서 해외건설 경쟁력 강화를 위한 건설기술 경쟁력 기반 구축 분야로 R&D·신기술에서 ‘Green & Smart 건설기술 개발’ 및 ‘건설기술 실용화 촉진’ 등을 주요 전략으로 채택함.

▢ 국토교통부는 ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’을 2013년에 공포하여 2014년 1월 17일부터 시행하여 도로, 철도, 항만, 댐, 교량, 터널, 건축구조물 등 결함이 있는 시설물에 대하여 보수보강을 실시하도록 개정됨에 따라 노후 시설물 등의 유지보수 및 보강이 이슈화되어 관심이 집중되고 있음.

▢ 지식경제부(2012년 계획)는 일본 원전사고를 계기로 중대 사고에 대비하기 위한 안전 분야 R&D 확충과 안전성 강화 대책 후속조치를 지속적으로 추진함.

- 사회적으로 중요한 사회기반 시설물에 대한 안정성 향상을 위한 유지관리 분야의 지속적인 성장이 예상됨.

▢ 시설물 고령화 대비 효율적 유지관리의 필요성이 높아지고 있음.

- SOC 신규투자 감소(3.5조/년 감소) 및 유지관리 투자 급증
- SOC 고령화 시대 진입(고령화율 9%, 10년 후 20%)
- 미국과 일본의 인프라 고령화 추세를 살펴보면 국내의 경우 2020년부터 본격적인 고령화 시대가 도래될 예정임.
- 시설물 유지관리 3차 기본계획을 살펴보면 시설안전의 Blue화를 통한 행복사회 구현의 비전아래 안전한 시설물(Safe), 자연과 함께 지속가능한 시설물(Sustainable), 스마트한 시설물(Smart)의 3대 목표를 설정하였음.

▢ EU는 ‘Self-healing materials for prolonged lifetime’라는 주제로 HealCON-Project (2013~2017)가 진행 중임.

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

- 5가지 목표 중 Safe and Secure Society가 본 기획 주제와 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 교통혼잡 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 중점적으로 수행하고 있음.

[국내외 시장현황 및 전망]

▢ 건설교통부에 따르면 세계의 건설시장 규모는 2004년 기준 4조 1,364억 달러에 이르며, 2009년에는 5조 2,926억 달러에 이를 것으로 추정되고, 이 중 건설 재료시장의 규모는 일반적으로 건설시장의 50% 정도로써 2004년 약 2조 1천억 달러, 2009년 약 2조 7천억달러 정도로 추정됨.

▢ 국내 시설물 유지관리 산업 시장은 지난 1994년 성수대교가 붕괴됐던 19년 전에는 5,400억원에 불과했으나 2012년에 3조5,000억원을 기록하면서 6배 이상 증가함(이데일리, 2013.10.17).

- 이는 건설 분야 매출액 대비 8%로 선진국과 비교하면 상당히 낮은 수준임.

※ 이탈리아는 시설물 유지관리 투자 비중이 매출액 대비 57.2%에 달하며, 영국 38.0%, 독일 26.0%, 일본 21.7% 등의 순임.

- 건설투자 중 유지관리 투자 비중은 일본의 약 37% 수준임.

▢ 최근 유럽연합 및 일본은 콘크리트 구조물에 대하여 새로 건설되는 구조물의 시공에 관련된 비용보다 기존 구조물의 유지관리에 관한 비용이 기하급수적으로 증가하는 경향을 인식하여 유지관리에 관한 산업을 국제적으로 선점하기 위해 국제표준 제정 작업에 총력을 기울이고 있음.

[기술동향]

▢ 최근 들어 균열을 저감시키거나 자기치유할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적용을 위한 연구가 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음.

- 자기치유 콘크리트 기술은 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 약 20여 년 전에 개념이 정립되면서 시작되었으며 국내에는 2004년 이후 그 개념이 소개되어 현재는 일부 기초연구가 진행되고 있으며, 현재까지 콘크리트 응용연구는 미흡한 실정임.

▢ 현재 국내외적으로 연구되고 있는 자기치유 기술은 크게 3가지로 미생물 활용기술, 마이크로캡슐 활용기술 및 무기계 혼합재료 활용기술로 구분됨.

▢ 자기치유 콘크리트의 적용은 일반 콘크리트 구조물보다는 보수가 용이하지 않고 균열에 따른 2차 피해가 발생할 수 있는 구조물의 적용이 바람직할 것으로 판단됨.

- 지속적인 균열피해가 발생하는 교량, 도로, 지하철, 철도시설 등과 같은 인프라 구조물과 균열 누수 빈도가 잦은 지하시설물, 하수암거, 전력구, 통신구나 원전구조물, LNG 구조물, 해양구조물, 발전소 등에서의 우선 적용이 바람직함.

▢ 현재까지 자기치유 콘크리트에 대한 성능 평가는 대부분 자기치유 현상을 정성적으로 판단하거나, 투수성, 염소이온 확산시험 등을 통해 간접적으로 내구성 향상을 판단하거나, 단편적인 역학적 물성의 복원 정도를 평가하고 있음.

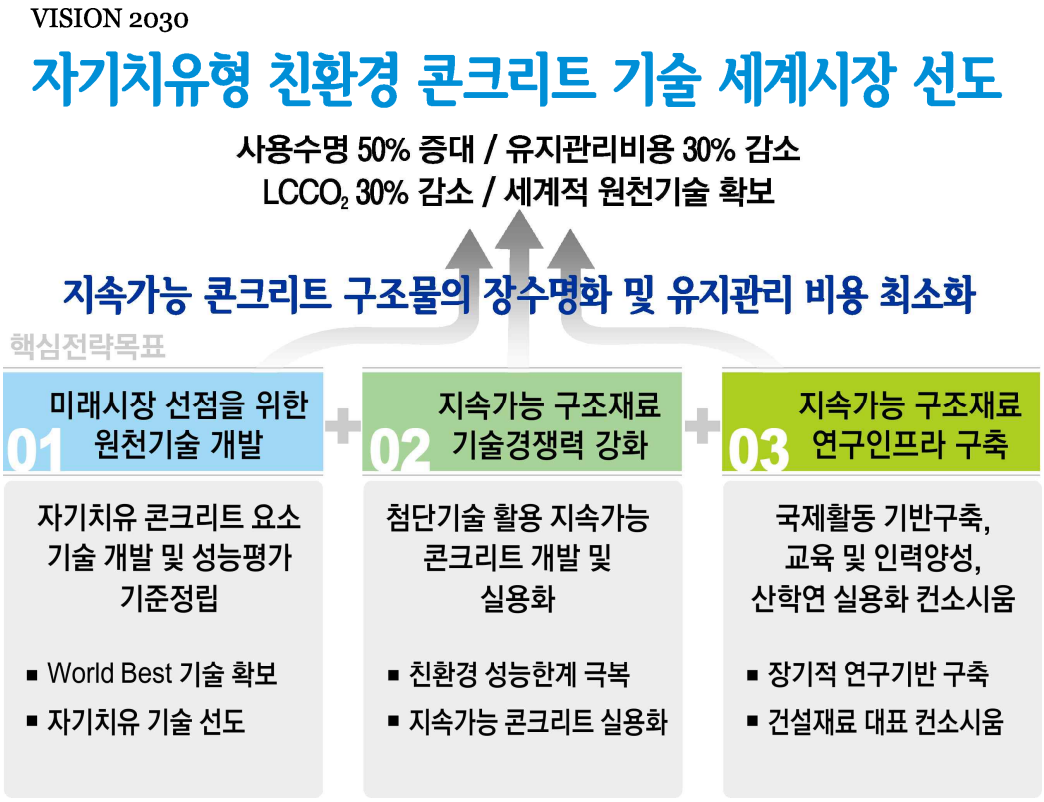
Ⅳ. 연구개발 구성 및 추진전략

[비전 및 목표]

자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 건설분야 Low-tech 이미지 탈피,
2020년까지 선진국 수준 기술경쟁력 확보, 2030년 해외시장 선점에 기여

▢ 비전을 실현하기 위한 연구 최종목표를 다음과 같이 설정하였으며, 연구의 비전 실현 및 최종목표 달성을 위한 핵심 전략목표를 다음과 같이 3가지로 도출함.

하이테크 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술개발을 통해
지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공/유지관리 비용 최소화



▢ 자기치유 콘크리트 분야의 기술격차 최소화 또는 기술선도를 위한 핵심적인 중점 추진분야를 다음과 같이 3개 분야로 설정하였음.

- 세부과제 1 : 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 세부과제 2 : 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 세부과제 3 : 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축

[세부과제별 주요내용]

▢ 세부과제 1

과제명	균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
배경 및 필요성	• 지속가능 및 친환경 콘크리트로 패러다임 변화 후 급변하는 콘크리트 재료 시장은 새로운 성능개념의 콘크리트에 대한 개발 요구가 증대되고 있으며, 이를 위해 첨단기술을 활용한 융합적인 건설재료 개발이 필요함. - 로우테크(Low-tech) 이미지를 탈피하여 해외시장 견인을 위하여 첨단기술(Bio/Nano/Eco Tech.)을 접목한 새로운 개념의 건설재료 기술전략 필요 • 자기치유 콘크리트 기술은 세계적으로 기술 초기단계로 선택과 집중을 통한 효율적인 연구개발을 통한 원천기술 확보로 기술역전 또는 기술선도가 가능할 것으로 판단됨. - 2013년도 World Economic Forum에서 자기치유 재료(self-healing materials) 기술이 10대 유망기술(emerging technologies)에 포함됨. • 고도 성장기의 사회기반 시설물뿐만 아니라 신규, 특히 사회적 중요도가 높으면서 유지보수가 어려운 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물 등)의 유지관리 중요성 증대 - 콘크리트의 내구성 향상 및 유지관리 중요성이 점차 증가됨에 따라서 균열 자기치유 기술이 그 대안으로 점차 부각되고 있음.
세부 목표	• 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발 • 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발 • 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발
주요 내용	• 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발 - 자기치유 성능 촉진 유-무기 혼합재 기술 개발 - 급속 자기치유 콘크리트 및 자기치유 도로 포장 콘크리트 개발 • 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발 - 광물석출 박테리아 포자 활용 및 배양기술 개발 - 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발 - 박테리아를 활용한 초기균열 자기치유 콘크리트 개발 • 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발 - 반복적 균열 제어 마이크로 캡슐 코팅재 개발 - 매크로 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발 - 균열강성 회복용 마이크로 캡슐 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발

▢ 세부과제 2

과제명	반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
배경 및 필요성	• 시멘트 사용량 감소를 통한 '친환경 콘크리트 개발'에 대한 연구가 다수 수행되었지만, 친환경 콘크리트의 성능한계로 인해 건설시장에서 외면당하는 상황으로, 기존 친환경 콘크리트 또는 고성능 콘크리트의 성능한계를 극복할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요함. ※ 콘크리트의 성능한계 : 조기강도 확보, 체적변화, 탄산화 등의 내구성 확보 • 첨단기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 기술수요 급증 - 콘크리트 성능열화는 크게 Micro/Meso/Macro 영역의 관점에서 분류할 수 있음. ※ Micro: 수화/수축/탄산화 등 미세조직구조 변화에 따른 열화 ※ Meso/Macro: 외부하중/부식 등에 의한 균열 발생에 의한 열화 - 기존의 균열(cracking)치유 개념의 자기치유(Self-healing) 개념을 확장하여 콘크리트의 미세조직구조 변화에 따른 손상의 치유 및 첨단기술을 융합을 통한 자기성능 개선을 위한 기술 개발이 필요하며, 이를 통해 기존 친환경 콘크리트 기술의 한계점 극복 ※ 시멘트 무기복합체 자기치유 기능 극대화를 통한 결함 (조기강도, 균열, 탄산화 및 수축 등) 완화 및 최소화 - 기존 구조물의 수동형 유지관리 기술에서 능동형 유지관리 기술로의 발상전환 필요 ※ 열화원인 억제 개념을 초월하여 열화원인을 능동적으로 제어(고정, 합성반응 등)하여 자기치유 성능을 부여하는 기술 필요
세부 목표	• 중합반응 제어 무기결합재 개발 • 반응제어형 내열화 무시멘트(AAS) 콘크리트 개발 • 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발
주요 내용	• 중합반응 제어 무기결합재 및 반응제어형 무시멘트 콘크리트 개발 - 메카노케미컬 합성법 이용 중합반응 제어 자기치유형 무시멘트 결합재 개발 - 탄산화/체적수축/공극구조 개질 기술 개발 - 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 - 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 • 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발 - 이온 반응형 균열 및 공극 충진소재 기술 개발 - 유해이온 제어를 위한 반응 촉매 및 촉진화 기술 개발 - 유해이온 반응 제어형 구조용 및 마감용 시멘트 복합체 기술 개발

▢ 세부과제 3

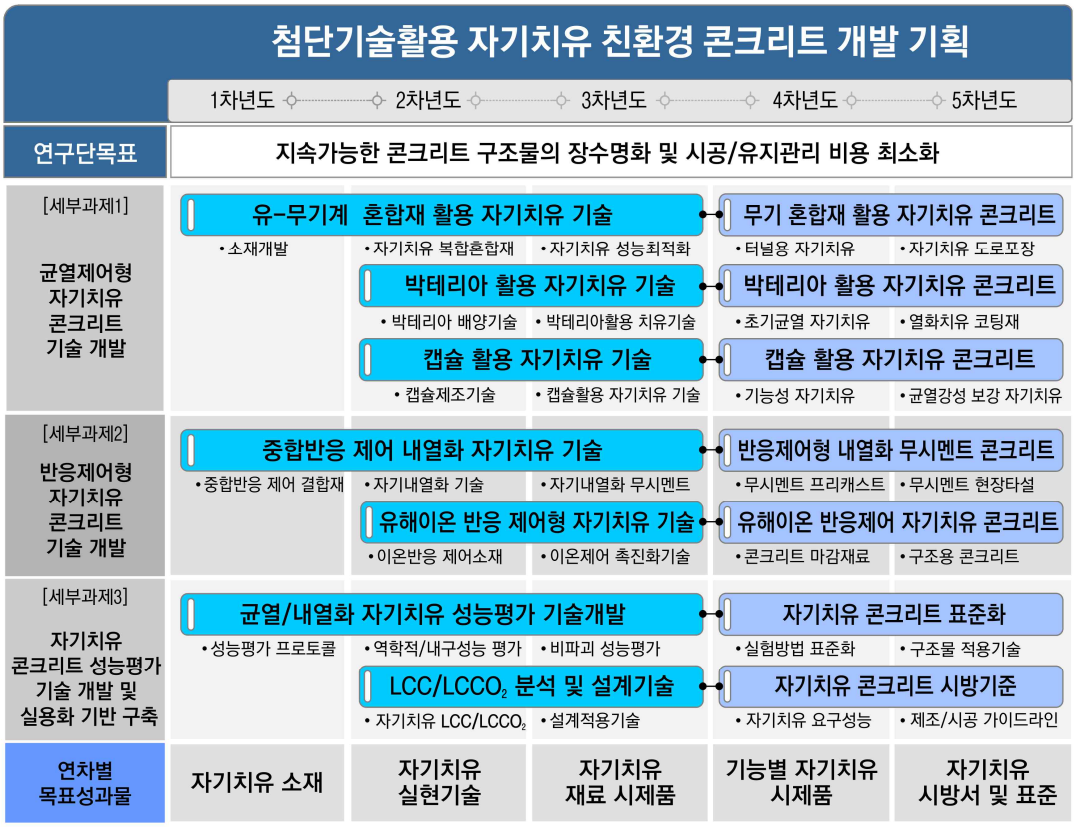
과제명	자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축
배경 및 필요성	• 자기치유형 콘크리트 연구는 현재 세계적으로 원천기술 개발단계에 머물러 있음. • 현재 자기치유 성능에 대한 평가는 균열부위의 치유물질 생성 정도와 이를 반영한 특성에 대한 정성적인 평가에 그치고 있음. - SEM, image analysis, X-ray 등 이용 균열 부위 수화물 관찰 - 투수 실험 등을 통해 간접적으로 내구성과 휨 실험 등을 통해 단편적으로 역학적 물성 복원 정도 평가 - 자기치유 콘크리트 개발 중 다양한 자기치유 기술들의 성능 분석 및 상호비교를 위해, 성능 평가를 위한 표준 실험방법 및 성능기준의 정립이 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 자기치유 성능 모니터링이 지속적으로 요구되어 첨단기술을 활용한 비파괴 시험기법이 필요함. ※ 최근 Acoustic emission, Ultra pulse velocity, Time reversal technique 등 초음파 특성을 활용한 연구 시도 ※ 공진주파수 또는 동탄성계수를 통해 자기치유 성능 평가 시도 • 개발된 자기치유 콘크리트의 실용화를 위해서는 다소 높은 초기투자 비용에 대한 타당성을 마련하는 것이 필수적임.
세부 목표	• 균열 자기치유 성능평가 기술 개발 • 내열화 자기치유 성능평가 기술 개발 • 자기치유 콘크리트 시방기준 개발
주요 내용	• 자기치유 성능 평가 프로토콜 개발 - 자기치유 성능의 정성/정량적 평가 방법 - 자기치유 성능 표준(등급, 요구기준) 정립 • 구조모형을 활용한 자기치유 성능 검증 • 비파괴 기법활용 자기치유 성능평가 기술 개발 • 자기치유 성능평가(균열, 내열화) 실험방법 표준화(KS, ISO) • 자기치유형 콘크리트의 생애주기 비용(Life Cycle Cost, LCC), CO_2(Life Cycle CO_2, $LCCO_2$) 분석 및 설계기술 • 자기치유형 콘크리트 시방기준 개발

[연구개발과제 구성]

구분		과제명
1세부		· 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
	1-1세세부	· 유-무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발
	구성기술1	· 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재 개발
	구성기술2	· 터널 구조물용 급속 자기치유 콘크리트 개발
	구성기술3	· 도로용 자기치유 포장 콘크리트 개발
	1-2세세부	· 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발
	구성기술1	· 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발
	구성기술2	· 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 개발
	1-3세세부	· 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발
	구성기술1	· 반복적 균열제어 마이크로 캡슐 코팅재 개발
	구성기술2	· 매크로 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발
	구성기술3	· 균열 강성 회복용 마이크로 캡슐 자기치유 콘크리트 개발
2세부		· 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
	2-1세세부	· 중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발
	구성기술1	· 메카노케미컬 합성이용 중합반응 제어 자기치유 결합재 개발
	구성기술2	· 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 개발
	구성기술3	· 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 개발
	2-2세세부	· 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발
	구성기술1	· 이온 반응형 원천소재 개발
	구성기술2	· 유해이온 반응 제어형 구조용 및 마감용 시멘트 복합체 개발
3세부		· 자기치유 콘크리트 성능평가 기술개발 및 실용화 기반 구축
	3-1세세부	· 자기치유 성능 평가 기술 개발
	구성기술1	· 균열 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발
	구성기술2	· 내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발
	구성기술3	· 자기치유 콘크리트 표준화 기술 개발
	3-2세세부	· 자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축
	구성기술1	· 자기치유형 콘크리트의 생애주기 비용(LCC), CO_2(LCCCO_2) 분석 기술 개발
	구성기술2	· 자기치유형 콘크리트 시방기준 개발

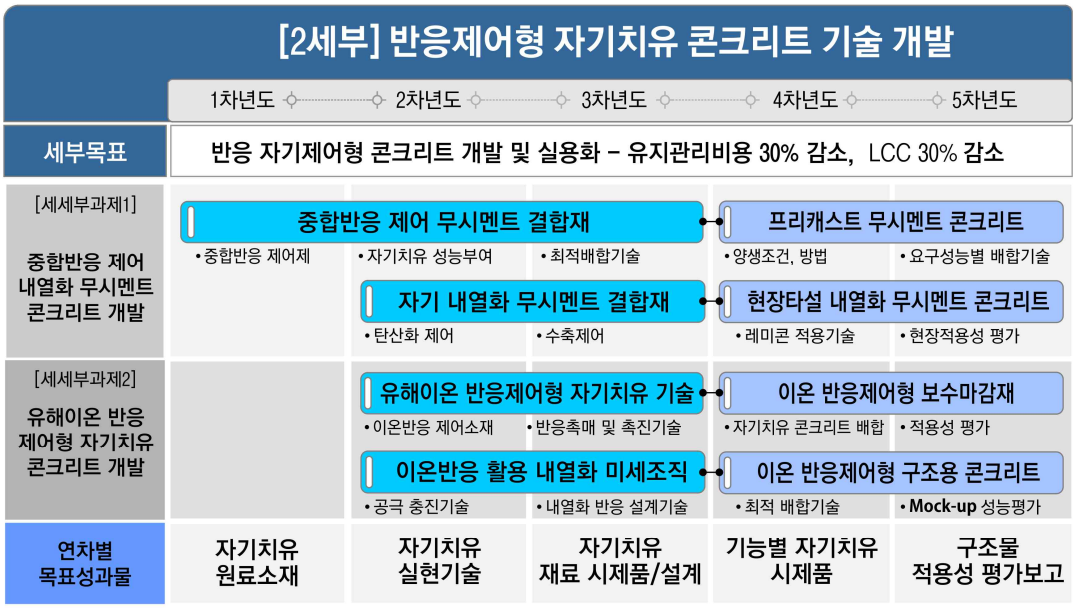
[기술 및 성과로드맵]

▢ 총괄로드맵

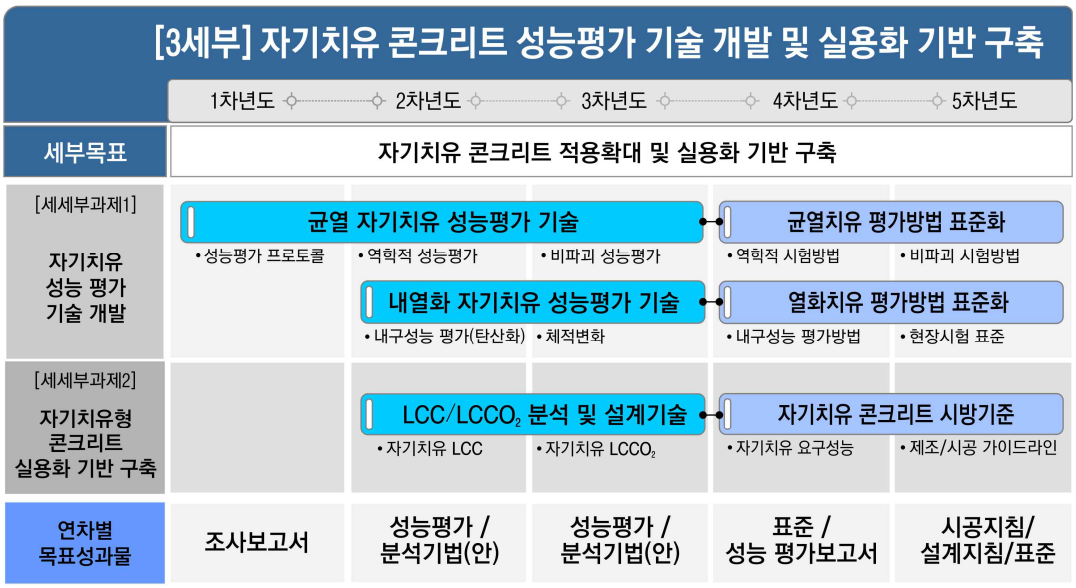


▢ 1세부 로드맵

□ 2세부 로드맵



□ 3세부 로드맵



Ⅴ. 사전타당성 검토

[정책적 타당성]

▢ ‘자기치유형 친환경 콘크리트 개발’ 기술은 스마트 유지보수 기술로서 지속가능한 사회를 구현하고 시설물 유지보수에 소요되는 사회적 비용을 획기적으로 절감하는데 기여할 것으로 판단됨.

▢ 본 연구단은 시장/기술 선점형 첨단 콘크리트 기술개발을 추진하여 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제(‘13)」, 「국가재정운용계획(‘13-‘17)」, 「건설산업진흥기본계획(‘13-‘17)」 방향성에 부합함.

- 세계적으로 기초연구 및 기술도입단계에 속하는 자기치유형 친환경 콘크리트 핵심원천기술 선점을 도모하여 세계시장 선도형 성장과 미래선도 창의형 연구개발을 추진하는 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제(‘13)」 방향성에 부합함.

▢ 기초원천 역량 확보를 추진하고 있어 창조경제의 기반이 되는 과학기술과 기초연구역량강화를 추진하는 「국가재정운용계획(‘13-‘17)」의 방향성에 부합하며, 「건설산업진흥기본계획(‘13-‘17)」 중 ‘부가가치 제고를 위한 건설기술 R&D 활성화’의 방향성에 부합함.

▢ 연구내용, 목적, 추진전략은 「제 3차 과학기술기본계획(‘13-‘17)」 「건설교통기술 R&D 중장기계획(‘12)」 등 방향성, 연구범위에 부합함.

[기술적 타당성]

▢ 본 연구단은 “자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 건설분야 Low-tech 이미지 탈피, 2020년까지 선진국 수준 기술경쟁력 확보, 2030년 해외시장 선점에 기여”하기 위해 사용수명 50% 증대, 유지관리비용 30% 감소, 생애주기 CO_2 30% 감소, 세계적 수준의 원천기술 확보 등의 구체성 있는 실현목표를 설정하여 이를 실현하기 위한 세부기술을 구성하였음.

- 유지관리가 어려운 사회기반시설물(터널, 원전구조물, 지하구조물 등)에 유지관리비용 최소화 및 안전도 향상을 위해 관련 자기치유 콘크리트 기술개발 니즈가 상당히 높음.
- 세부과제별 구성기술은 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 및 적용연구의 완성도 높은 연구결과를 도출하기 위하여 소재, 제품, 현장적용을 포함한 연구 과제를 구성하여 연구내용의 논리성과 적절성이 높음. 또한 세부과제의 개념 및 범위가 구체적으로 제시되었으며 각 세부과제간의 유기적 연계관계에 대해 기술되어 있음.

▢ 첨단기술을 활용한 자기치유형 친환경 콘크리트 개발은 기존 과제와 중복성이 없는 원천기술을 확보할 수 있는 과제임.

[경제적 타당성]

▢ 본 기획 대상 사업에 대한 비용편익 분석결과 B/C ratio가 1.25로 나타나 경제성 측면이 긍정적인 것으로 판단됨.

▢ 자기치유형 기술 개발을 통한 사회기반 시설물 유지관리 비용절감 효과가 기대되며, 기술개발을 통해 건설 산업의 신성장 동력원으로 기대됨.

▢ 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고수준 기술 확보를 위한 초석을 마련할 수 있는 연구임.

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

차 례

차 례

1. 서론 ····· 1-1

1.1 기술의 개요 ····· 1-3

1.1.1 기술의 정의 및 필요성 ····· 1-3

1.1.2 세부과제별 기술정의 ····· 1-6

1.2 기술분류 및 내용 ····· 1-7

1.2.1 기술분류 ····· 1-7

1.2.2 기술내용 ····· 1-9

2. 국내외 동향 및 환경 분석 ····· 2-1

2.1 국내외 정책동향 ····· 2-3

2.1.1 국내 정책동향 ····· 2-3

2.1.2 국외 정책동향 ····· 2-9

2.2 국내외 시장현황 및 전망 ····· 2-14

2.2.1 국내 시장현황 ····· 2-14

2.2.2 국외 시장현황 ····· 2-19

2.3 기술동향 분석 ····· 2-24

2.3.1 관련 기술개발 동향 ····· 2-24

2.3.2 특허동향 분석 ····· 2-52

2.3.3 논문동향 분석(Landmark 활용) ····· 2-72

2.3.4 기존 기술(연구)과의 차별성 ····· 2-91

2.4 연구개발 인프라 분석 ····· 2-96

2.4.1 인프라 및 역량분석 ····· 2-96

2.4.2 기업현황 ····· 2-104

2.5 종합분석 ····· 2-105

2.5.1 국내외 정책동향 및 환경분석 시사점 ····· 2-105

2.5.2 국내외 시장동향 분석 시사점 ····· 2-105

2.5.3 국내외 기술동향 분석 시사점 ····· 2-106

3. 기술수요 및 예측조사 ····· 3-1

3.1 기술수요조사 ····· 3-3

3.1.1 기술수요조사의 개요 ····· 3-3
3.1.2 기술수요조사 결과 ····· 3-4
3.1.3. 제안기술 리스트 ····· 3-5
3.2 기술예측/수준조사 ····· 3-8
3.2.1 기술예측/수준조사의 개요 ····· 3-8
3.2.2 기술예측조사 결과 ····· 3-12
3.2.3 기술수준조사 결과 ····· 3-19
3.2.4 기술성숙도 조사결과 ····· 3-33
3.2.5 기술의 획득방법 조사 ····· 3-38
3.2.6 정부우선 시행방안 조사결과 ····· 3-48
3.2.7 기술기반 성숙도 ····· 3-52
3.2.8 종합분석 ····· 3-53

4. 연구개발과제 구성 및 추진전략 ····· 4-1
4.1 SWOT 분석 ····· 4-3
4.1.1 내부역량 및 외부환경 ····· 4-3
4.1.2 SWOT 분석 ····· 4-4
4.1.3 미래시장 대응전략 ····· 4-5
4.2 비전 및 목표 ····· 4-6
4.2.1 비전 및 목표 ····· 4-6
4.2.2 기술개발에 따른 미래상 ····· 4-8
4.3 연구개발과제 구성 ····· 4-10
4.3.1 후보세부기술 도출 ····· 4-10
4.3.2 후보세부기술 1차 필터링 ····· 4-12
4.3.3 최종 후보세부기술 도출 ····· 4-13
4.3.4 중점 추진분야 ····· 4-14
4.3.5 핵심기술요소(CTE) 도출 ····· 4-23
4.3.6 기술성숙도(TRL) 단계별 목표 ····· 4-24
4.3.7 연구개발과제의 구성 ····· 4-25
4.3.8 과제별/연차별 기술로드맵 및 성과로드맵 ····· 4-27
4.3.9 성과의 활용방안 ····· 4-30
4.3.10 연구수행체계 제안 ····· 4-31

5. 사전타당성 검토 ····· 5-1
5.1 정책적 타당성 ····· 5-3
5.1.1 국가전략의 중요성 ····· 5-3
5.1.2 상위계획 부합성 ····· 5-4
5.1.3 정책적 추진의지 ····· 5-7

5.2 기술적 타당성 ····· 5-9
5.2.1 기술개발 계획의 적절성 ····· 5-9
5.2.2 기술수준 및 성공가능성 ····· 5-12
5.2.3 기존 사업과의 중복성 ····· 5-14
5.3 경제적 타당성 ····· 5-15
5.3.1 경제성 분석 ····· 5-15
5.3.2 파급효과 ····· 5-18
5.4 종합분석 ····· 5-19

6. 인력투입계획 및 소요예산 산정 ····· 6-1
6.1 연구일정에 따른 인력투입계획 ····· 6-3
6.1.1 전체사업 인력투입계획 ····· 6-3
6.2 연구 소요예산 산정 ····· 6-4
6.2.1 개요 ····· 6-4
6.2.2 전체사업 소요예산 ····· 6-4
6.2.3 세부과제별 소요예산 ····· 6-5

7. 과제 제안요구서 ····· 7-1
7.1 과제 제안요구서(RFP) ····· 7-3
7.1.1 총괄 RFP ····· 7-3
7.1.2 1세부과제 RFP ····· 7-11
7.1.3 2세부과제 RFP ····· 7-18
7.1.4 3세부과제 RFP ····· 7-24
7.2 평가기준의 선정 ····· 7-30
7.2.1 평가항목 ····· 7-30
7.2.2 가점 및 감점기준 ····· 7-33

8. 참고문헌 ····· 8-1

표 차례

[표 1-1] 기술분류 ····· 1-7
[표 1-2] 자기치유형 요소기술 분야 중분류 기술내용 ····· 1-9
[표 1-3] 자기치유형 요소기술 분야 소분류 기술내용 ····· 1-9
[표 1-4] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 중분류 기술내용 ····· 1-10
[표 1-5] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 소분류 기술내용 ····· 1-10
[표 1-6] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야 기술내용 ····· 1-11
[표 1-7] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 소분류 기술내용 ····· 1-11

[표 2-1] 국내 인프라 평가등급 ····· 2-4
[표 2-2] 미래사회 시설안전 주요이슈(대한건설정책연구원 설문조사, 2011) ····· 2-6
[표 2-3] 선진국 대비 지능형 안정 및 유지관리 기술격차 ····· 2-6
[표 2-4] 시멘트·콘크리트 시장 및 향후 무시멘트 콘크리트 시장 규모 전망 ····· 2-15
[표 2-5] 주요 환경부하 저감형 건축재료 시장 현황 ····· 2-16
[표 2-6] 사회기반시설 현황 (2013년 8월 기준) ····· 2-17
[표 2-7] 공용년수별 시설물 분포(FMS, 2012년 11월) ····· 2-18
[표 2-8] 공용년수별 시설물 분포 (FMS, 2012년 11월) ····· 2-18
[표 2-9] 국내 유지관리 시장 현황 ····· 2-19
[표 2-10] 국내 SOC 항목별 투자비용 현황 ····· 2-19
[표 2-11] 건설 재료 국외 시장규모 전망 ····· 2-20
[표 2-12] 혼합시멘트 사용 확대에 따른 CO_2 절감 계획 ····· 2-22
[표 2-13] 주요국 유지관리 시장현황 ····· 2-23
[표 2-14] 국외 SOC투자비용 중 유지관리 시장현황 ····· 2-23
[표 2-15] 자기치유 방법의 비교 ····· 2-35
[표 2-16] 국가별 분석기간 및 특허건수 : 자기치유 콘크리트 ····· 2-52
[표 2-17] 분석기간 및 분석대상 특허 추출 건수 : SCM 콘크리트 ····· 2-59
[표 2-18] SCM 기술 분야의 주요 특허출원인 ····· 2-60
[표 2-19] 분석기간 및 분석대상 특허 추출 건수 : 무시멘트 콘크리트 ····· 2-61
[표 2-20] 무시멘트 분야의 IPC 기술 분류에 의한 특허출원 건수 및 점유율 ····· 2-63
[표 2-21] 무시멘트 기술 분야의 주요 특허출원인 ····· 2-64
[표 2-22] 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 기술특허 ····· 2-66
[표 2-23] 마이크로캡슐 활용 자기치유 콘크리트 기술특허 ····· 2-67
[표 2-24] 자기치유 보수재료관련 특허 ····· 2-68

[표 2-25] 무기계 혼입재 활용 자기치유 콘크리트 특허 ····· 2-69
[표 2-26] 자기치유형 무시멘트 콘크리트관련 특허 ····· 2-71
[표 2-27] 논문 분석 키워드 (자기치유 콘크리트) ····· 2-72
[표 2-28] 주요 연구기관 및 연구자(박테리아 활용기술) ····· 2-75
[표 2-29] 주요 연구기관 및 연구자 (마이크로 캡슐 활용기술) ····· 2-76
[표 2-30] 주요 연구기관 및 연구자(섬유 활용기술) ····· 2-77
[표 2-31] 주요 연구기관 및 연구자(섬유 활용기술) ····· 2-78
[표 2-32] 논문 분석 키워드 ····· 2-80
[표 2-33] 무시멘트 AAS 콘크리트분야 주요 연구기관 및 연구자 ····· 2-83
[표 2-34] 논문 분석 ····· 2-84
[표 2-35] 논문 분석 ····· 2-85
[표 2-36] 자기치유형 보수재료 논문분석 ····· 2-86
[표 2-37] 무기계 광물질 활용 자기치유 콘크리트 논문분석 ····· 2-87
[표 2-38] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 논문분석 ····· 2-89
[표 2-39] 기존 기술과의 차별성 : 박테리아 활용 자기치유 기술 ····· 2-91
[표 2-40] 기존 기술과의 차별성 : 캡슐활용 자기치유 기술 ····· 2-92
[표 2-41] 기존 기술과의 차별성 : 자기치유형 보수재료 기술 ····· 2-92
[표 2-42] 기존 기술과의 차별성 : 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술 ····· 2-93
[표 2-43] 건축, 토목/도시, 소재/재료 분야의 인력현황 ····· 2-96
[표 2-44] 우리나라 주체별 전공별 연구원 현황 (2009) ····· 2-97
[표 2-45] 관련분야 기술자 현황 (출처 : 한국건설인협회, 2007 기준) ····· 2-99
[표 2-46] 분산공유형 건설인프라 실험시설 개요 ····· 2-100

[표 3-1] 기술수요조사 개요 ····· 3-3
[표 3-2] 자기치유형 요소기술분야 제안기술리스트 ····· 3-5
[표 3-3] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 제안기술 리스트 ····· 3-6
[표 3-4] 자기치유형 무시멘트 개발분야 제안기술 리스트 ····· 3-7
[표 3-5] 기술수준 급간별 설명자료 ····· 3-9
[표 3-6] 기술격차추세 평가기준 ····· 3-9
[표 3-7] 기술기반성숙도 평가기준 ····· 3-9
[표 3-8] 연구개발단계별 정의 ····· 3-10
[표 3-9] 기술성숙도 단계별 정의 ····· 3-10
[표 3-10] 기술획득방식별 설명자료 ····· 3-10
[표 3-11] 기술성숙도 단계별 정의 ····· 3-11
[표 3-12] 국내외 자기치유형 요소기술분야 기술의 실현시기 ····· 3-14
[표 3-13] 국내외 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 기술의 실현시기 ····· 3-16
[표 3-14] 국내외 자기치유형 무시멘트 개발분야 기술의 실현시기 ····· 3-18
[표 3-15] 기술분류별 최고기술보유기관 ····· 3-21

[표 4-1] 내부역량과 외부환경에 대한 시사점 ····· 4-3

[표 4-2] SWOT 분석 ····· 4-4
[표 4-3] 미래시장 대응전략 ····· 4-5
[표 4-4] 후보세부기술 ····· 4-10
[표 4-5] 최종 후보세부기술 ····· 4-13

[표 5-1] 국토부 소재분야 R&D 지원예산 ····· 5-8
[표 5-2] 국내 시설물 유지관리 시장규모 예측 ····· 5-15
[표 5-3] 비용추정 결과 ····· 5-16
[표 5-4] 편익추정 결과 ····· 5-16
[표 5-5] 비용편익분석 결과 ····· 5-17

그림 차례

[그림 1-1] 기술의 정의 및 개념 ····· 1-3
[그림 1-2] 국내 건설유지관리 시장현황 ····· 1-4
[그림 1-3] HEALCON 프로젝트 개요 ····· 1-5
[그림 1-4] 기술 격차 ····· 1-5
[그림 1-5] 시대별 콘크리트 기술 변천사 ····· 1-5

[그림 2-1] 제5차 건설기술진흥기본계획 개요 ····· 2-3
[그림 2-2] 녹색성장 3대전략 10대 정책 ····· 2-3
[그림 2-3] 21세기 경제사회 패러다임 변화 ····· 2-5
[그림 2-4] 미국과 일본의 인프라 고령화 현황 ····· 2-7
[그림 2-5] 국내 SOC 종류별 공용년수 분포 ····· 2-7
[그림 2-6] 미국의 인프라 평가 사례 ····· 2-9
[그림 2-7] HealCON Project 홈페이지 ····· 2-10
[그림 2-8] SHeMat Project 홈페이지 ····· 2-11
[그림 2-9] SHeMat Training-school Program ····· 2-11
[그림 2-10] 국내 건설수주 동향(2005년 ~ 2010년) ····· 2-14
[그림 2-11] 시멘트 대체재료의 성장 전망(발명진흥회) ····· 2-14
[그림 2-12] 주요국 건설투자 중 유지관리 투자 비중(2000년) ····· 2-16
[그림 2-13] 시특법 대상 1, 2종 시설물 현황 ····· 2-17
[그림 2-14] 미국 건설시장 현황 및 전망 ····· 2-20
[그림 2-15] 유럽 건설시장 현황 및 전망 (Erich Gluch) ····· 2-21
[그림 2-16] 유럽 건설시장 현황(2000년 기준) 및 전망 (Barbara Martins) ····· 2-21
[그림 2-17] 자기치유 재료관련 발표 논문 추세 ····· 2-24
[그림 2-18] 자기치유를 고려한 Life-Cycle-Cost 모델 개념도 (Van Breugel, 2007) ····· 2-25
[그림 2-19] Sporosarcina pasteurii에 의한 $CaCO_3$ 결정 성장과정 ····· 2-26
[그림 2-20] 미생물을 이용한 자치치유 개념 (김화중, 2009) ····· 2-26
[그림 2-21] 미세물을 이용한 균열 자기치유 사례 (Jonkers, 2011) ····· 2-26
[그림 2-22] 미생물을 이용한 콘크리트 균열 치유 단계별 메커니즘 (김화중, 2009; Li, 2012) ····· 2-26
[그림 2-23] 미생물에 의한 흡수율 감소: (a) 표면처리 전 (b) 표면처리 후 ····· 2-27
[그림 2-24] 마이크로 캡슐을 이용한 자기치유 메커니즘 (White *et al.*, 2001) ····· 2-28
[그림 2-25] 마이크로 캡슐의 역학적 자기치유 효과 (Brown *et al.*, 2004) ····· 2-28
[그림 2-26] 균열 주위에 보수재 방출 후 빈캡슐이 집중된 현상 (Mookhoek *et al.*, 2004). ····· 2-29
[그림 2-27] 중공 원형 유리섬유 및 손상 Visual enhancement (White *et al.*, 2001) ····· 2-29
[그림 2-28] 마이크로 캡슐을 이용한 자기치유 메커니즘 (정찬문, 2013) ····· 2-29
[그림 2-29] 실리카 겔 외벽으로 구성된 마이크로 캡슐 (Yang *et al.*, 2011) ····· 2-30

[그림 2-30] 두개의 튜브를 가까이 위치시킨 시스템 (Van Tittleboom *et al.*, 2011) ····· 2-31
[그림 2-31] 다공질 코어가 균열보수재료의 통로로 채용된 시스템(Sangadji *et al.*, 2011) ····· 2-31
[그림 2-32] 무기질 혼합재료 활용 자기치유 (Ahn and Kishi, 2010) ····· 2-34
[그림 2-33] ECC 활용 자기치유 (Li, 2012; Schlagen *et al.*, 2009) ····· 2-34
[그림 2-34] 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 현장적용 ····· 2-35
[그림 2-35] 미세구조 분석을 통한 정성적 자기치유 성능 평가 방법 (Huang and Ye, 2011) ····· 2-36
[그림 2-36] 투수실험을 통한 자기치유 성능 평가 방법 ····· 2-36
[그림 2-37] Acoustic Emission을 통한 자기치유 성능 평가 방법 (Tsangouri *et al.*, 2013) ····· 2-37
[그림 2-38] Time Reversal 기법을 통한 자기치유 성능 평가 방법 (Granger *et al.*, 2009) ····· 2-38
[그림 2-39] 친환경 콘크리트 기술분류 ····· 2-38
[그림 2-40] 친환경 콘크리트 적용 사례 ····· 2-40
[그림 2-41] 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 건조수축 감소 효과 ····· 2-41
[그림 2-42] 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 activator에 따른 콘크리트의 미세구조 ····· 2-42
[그림 2-43] 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 탄산화 및 scaling 특성 ····· 2-42
[그림 2-44] SAP를 이용한 자기치유 효과 ····· 2-43
[그림 2-45] 물-시멘트 비 0.3인 시멘트 페이스트의 SAP 함량에 따른 자기수축 ····· 2-44
[그림 2-46] 동결융해에 의한 콘크리트 손상 ····· 2-45
[그림 2-47] SAP의 구조 및 swelling 메커니즘 ····· 2-45
[그림 2-48] 무시멘트 콘크리트의 반응 메커니즘 ····· 2-46
[그림 2-49] 알칼리 활성화 시멘트 기술동향 ····· 2-47
[그림 2-50] 미국 시설물의 사용성능 지표 개발 및 기술동향 ····· 2-49
[그림 2-51] 영국의 유지보수 관리 체계 및 전산시스템 ····· 2-49
[그림 2-52] 호주의 지능형 유지보수 시스템 ····· 2-49
[그림 2-53] 일본의 기후변화 대응 시설물 유지보수 관리시스템 ····· 2-49
[그림 2-54] 특허 검색 기술 분야 ····· 2-52
[그림 2-55] 자기치유 기술분야 키워드 맵 : 한국 ····· 2-53
[그림 2-56] 자기치유 기술분야 키워드 맵 : 미국 ····· 2-53
[그림 2-57] 연도별 전체 출원동향 ····· 2-54
[그림 2-58] 국가별 특허 점유율 ····· 2-54
[그림 2-59] 국가별 기술분야 특허 동향 ····· 2-54
[그림 2-60] 국내 특허 출원 동향 ····· 2-55
[그림 2-61] 국내 기술 분야별 특허 출원 동향 ····· 2-55
[그림 2-62] 국내 특허 출원인 분석 ····· 2-55
[그림 2-63] 일본 특허 출원 동향 ····· 2-56
[그림 2-64] 일본 기술 분야별 특허 출원 동향 ····· 2-56
[그림 2-65] 일본 특허 출원인 분석 ····· 2-56
[그림 2-66] 중국 특허 출원 동향 ····· 2-57
[그림 2-67] 중국 기술 분야별 특허 출원 동향 ····· 2-57
[그림 2-68] 중국 특허 출원인 분석 ····· 2-57
[그림 2-69] 미국 특허 출원 동향 ····· 2-57

[그림 2-70] 미국 기술 분야별 특허 출원 동향 ····· 2-58
[그림 2-71] 미국 특허 출원인 분석 ····· 2-58
[그림 2-72] 유럽 특허 출원 동향 ····· 2-58
[그림 2-73] 유럽 기술 분야별 특허 출원 동향 ····· 2-58
[그림 2-74] 유럽 특허 출원인 분석 ····· 2-58
[그림 2-75] SCM 콘크리트 기술의 연도별 국가별 특허 출원동향 ····· 2-59
[그림 2-76] 주요시장국의 기술성장 단계 분석 ····· 2-60
[그림 2-77] 무시멘트 기술의 연도별 국가별 특허 출원동향 ····· 2-61
[그림 2-78] 주요시장국의 기술성장 단계 분석 ····· 2-62
[그림 2-79] 무시멘트 분야 세부 기술별 특허 출원동향 ····· 2-63
[그림 2-80] 무시멘트 기술의 세부 기술분야별 국가별 특허 출원동향 ····· 2-64
[그림 2-81] 세부 기술분야별 주요 특허 출원인 ····· 2-65
[그림 2-82] 발행년도별 자기치유 논문 발행건수 ····· 2-73
[그림 2-83] 발행년도별 자기치유 기술 분야별 논문 발행건수 ····· 2-73
[그림 2-84] 대륙별 자기치유 논문 발행건수 ····· 2-74
[그림 2-85] 박테리아 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수 ····· 2-74
[그림 2-86] 마이크로 캡슐 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수 ····· 2-75
[그림 2-87] 섬유 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수 ····· 2-77
[그림 2-88] 무기질혼합재 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수 ····· 2-78
[그림 2-89] 연도별 논문발표 동향 ····· 2-79
[그림 2-90] 주요국가별 논문발표 동향 ····· 2-79
[그림 2-91] 주요기관별 논문발표 동향 ····· 2-80
[그림 2-92] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 세부분야별 논문분포 ····· 2-81
[그림 2-93] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 년도별 논문발행 현황 ····· 2-81
[그림 2-94] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 국가별 논문발행 현황 ····· 2-82
[그림 2-95] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 저자별 논문발행 현황 ····· 2-82
[그림 2-96] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 국가별 논문발표 Top-30 저자 현황 ····· 2-83
[그림 2-97] 주체별 인력현황(출처: 교육과학기술부, 2007 이공계인력 실태조사 보고서) ····· 2-96
[그림 2-98] 우리나라 연구원 수 추이 (2010 연구개발 활동보고서, 교육과학기술부) ····· 2-97
[그림 2-99] 전공별 / 주체별 연구원 현황 ····· 2-98
[그림 2-100] 분산공유형 건설인프라 실험시설 ····· 2-101

[그림 3-1] 기술수요조사 절차 ····· 3-3
[그림 3-2] 기술수요조사 결과 ····· 3-4
[그림 3-3] 기술수준/예측조사 절차 ····· 3-8
[그림 3-4] 국내외 기술적 실현시기 분포 비교 ····· 3-12
[그림 3-5] 국내외 사회경제적 실현시기 분포 비교 ····· 3-13
[그림 3-6] 자기치유형 요소기술분야 국내외 기술적 실현시기 분포 ····· 3-13
[그림 3-7] 자기치유형 요소기술분야 국내외 사회경제적 실현시기 분포 ····· 3-14
[그림 3-8] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 국내외 기술적 실현시기 분포 ····· 3-15

[그림 3-9] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 국내외 사회경제적 실현시기 분포 ····· 3-15
[그림 3-10] 자기치유형 무시멘트 개발분야 국내외 기술적 실현시기 분포 ····· 3-17
[그림 3-11] 자기치유형 무시멘트 개발분야 국내외 사회경제적 실현시기 분포 ····· 3-17
[그림 3-12] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포 ····· 3-19
[그림 3-13] 자기치유형 요소기술분야 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포 ····· 3-19
[그림 3-14] 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포 ····· 3-20
[그림 3-15] 자기치유형 무시멘트 개발분야 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포 ····· 3-20
[그림 3-16] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-22
[그림 3-17] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 기술격차 추세 ····· 3-22
[그림 3-18] 자기치유형 요소기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-23
[그림 3-19] 자기치유형 요소기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-23
[그림 3-20] 콘크리트 자기치유 기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-24
[그림 3-21] 콘크리트 자기치유 기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-24
[그림 3-22] 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-25
[그림 3-23] 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-25
[그림 3-24] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-26
[그림 3-25] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술격차 추세 ····· 3-26
[그림 3-26] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-27
[그림 3-27] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-27
[그림 3-28] 자기치유형 친환경소재를 활용한 보수기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-28
[그림 3-29] 자기치유형 친환경소재를 활용한 보수기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-29
[그림 3-30] 자기치유형 무시멘트 콘크리트기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-29
[그림 3-31] 자기치유형 무시멘트 콘크리트기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-30
[그림 3-32] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-30
[그림 3-33] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-31
[그림 3-34] 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차 ····· 3-31
[그림 3-35] 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야의 기술격차 추세 ····· 3-32
[그림 3-36] 콘크리트 자기치유기술분야 기술성숙도 ····· 3-33
[그림 3-37] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야 기술성숙도 ····· 3-34
[그림 3-38] 자기치유형 콘크리트 적용기술 기술성숙도 ····· 3-35
[그림 3-39] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야 기술성숙도 ····· 3-36
[그림 3-40] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술 기술성숙도 ····· 3-37
[그림 3-41] 자기치유형 무시멘트 적용기술분야 기술성숙도 ····· 3-38
[그림 3-42] 첨단기술활용 자기치유형 친환경콘크리트 기술의 기술획득방법 선호도 ····· 3-38
[그림 3-43] 자기치유형 요소기술분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-39
[그림 3-44] 콘크리트 자기치유기술분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-39
[그림 3-45] 콘크리트 자기치유기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도 ····· 3-40
[그림 3-46] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-40
[그림 3-47] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도 ····· 3-41
[그림 3-48] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-41

[그림 3-49] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-42
[그림 3-50] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도 ····· 3-42
[그림 3-51] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-43
[그림 3-52] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도 ····· 3-43
[그림 3-53] 자기치유형 무시멘트 개발분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-44
[그림 3-54] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술의 기술획득방법 선호도 ····· 3-44
[그림 3-55] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도 ····· 3-45
[그림 3-56] 자기치유형 무시멘트 적용기술분야의 기술획득방법 선호도 ····· 3-45
[그림 3-57] 자기치유형 무시멘트 적용기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도 ····· 3-46
[그림 3-58] 콘크리트 자기치유 기술분야 정부우선시행방안 선호도 ····· 3-47
[그림 3-59] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야 정부우선시행방안 선호도 ····· 3-48
[그림 3-60] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야 정부우선시행방안 선호도 ····· 3-48
[그림 3-61] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야 정부우선시행방안 선호도 ····· 3-49
[그림 3-62] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야 정부우선시행방안 선호도 ····· 3-50
[그림 3-63] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술 정부우선시행방안 선호도 ····· 3-51
[그림 3-64] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술기반 성숙도 ····· 3-51
[그림 3-65] 국가연구개발사업 추진을 고려해야하는 기술개발분야 특성 ····· 3-52
[그림 3-66] 기술의 핵심성/원천성 등 평가를 통해 국가연구개발사업 추진 검토가 필요한 기술개발분야 특성 ····· 3-53

[그림 4-1] 비전 및 핵심전략목표 ····· 4-6
[그림 4-2] 중점 연구개발 목표 ····· 4-7
[그림 4-3] 추진전략 ····· 4-9
[그림 4-4] 산·학·연 협동연구체계 모식도 ····· 4-32

[그림 5-1] 상위계획 부합성 ····· 5-5
[그림 5-2] 중장기 R&D계획과의 부합성 ····· 5-7
[그림 5-3] 국토부 소재분야 R&D 지원예산 및 전체 국토교통 R&D 지원예산 중 비중 ····· 5-8

01 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

서 론

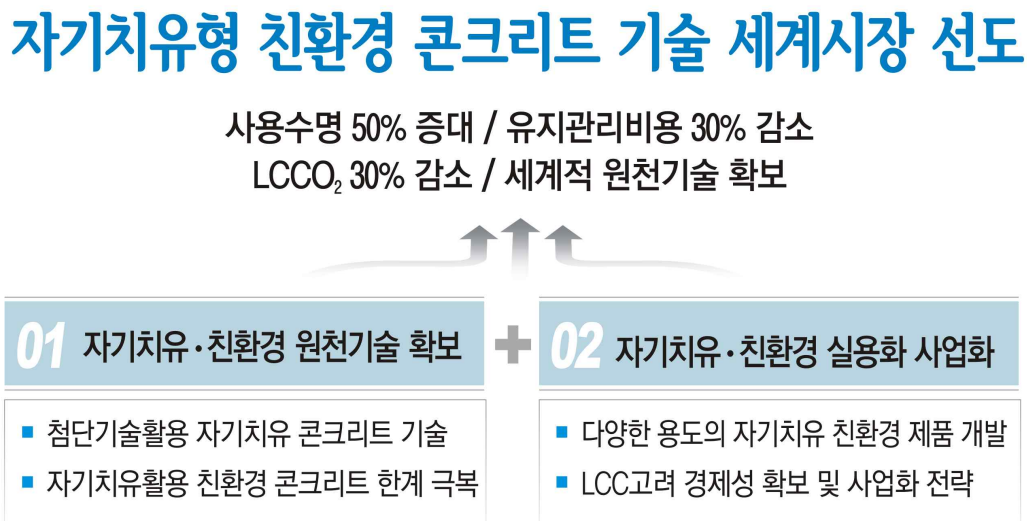
1.1 기술의 개요

1.1.1 기술의 정의 및 필요성

(1) 기술의 정의

『첨단 기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발』 기술은
하이테크 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 지속가능한
콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공/유지관리 비용 최소화를 위한 콘크리트 개발 기술

- ▢ 첨단기술 활용 : 바이오(bio), 나노(nano), 폴리머(smart-polymer) 등의 새로운 소재의 기능을 활용하여 콘크리트에 자기치유 성능을 부여하는 기술
- ▢ 자기치유형 친환경 콘크리트 : 외부의 인위적 행위 없이 스스로 균열 및 열화를 치유하여 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, 생애주기 이산화탄소 배출량($LCCO_2$) 30% 감소를 달성할 수 있는 지속가능 콘크리트



[그림 1-1] 기술의 정의 및 개념

(2) 기술의 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

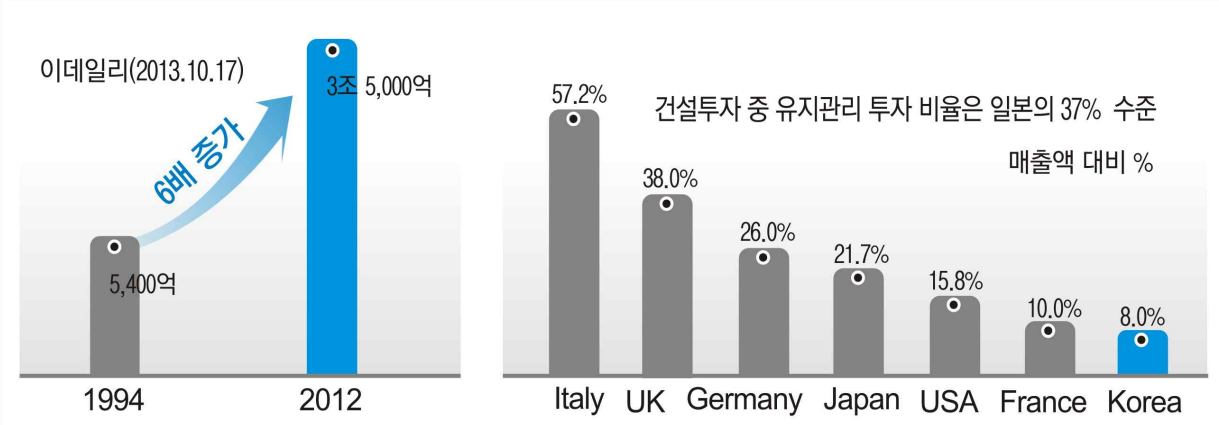
※ 친환경 콘크리트의 성능한계 : 조기강도 확보, 체적변화, 탄산화 등의 내구성 확보

▢ 급격히 변화하는 건설재료 시장에서 미래형 건설 청정소재에 대한 국내 요소기술 및 확보전략이 미흡한 상태임.

- 로우테크(Low-tech) 이미지 탈피 해외시장 견인을 위한 첨단기술(Bio/Nano/Eco Tech.)을 접목한 새로운 개념의 건설재료 기술전략 필요
- 급변하는 콘크리트 재료 시장은 '80~'90년대 고성능 개념에서 '00~'10년대 지속가능 및 친환경 콘크리트로 패러다임의 변화 후 새로운 개념의 콘크리트에 대한 개발요구 증대

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

- 최근 들어 균열 등 콘크리트의 손상을 저감시키거나 자기치유(Self-healing)할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적용을 위한 연구가 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음.
- 다양한 산이나 황산염 등 열화인자에 노출된 오수처리장, 지하배수로, 하수처리설비 및 맨홀 등의 지하 콘크리트 구조물은 수화물의 빠른 용해로 인해 콘크리트의 부식이 급속하게 발생하므로, 사회적 유지관리 비용절감을 위한 고내구성, 고내화학성 재료에 대한 기술개발이 요구되고 있음.



[그림 1-2] 국내 건설유지관리 시장현황

▢ 자기치유(Self-healing)형 친환경 콘크리트에 대한 선진국과의 기술격차 증가

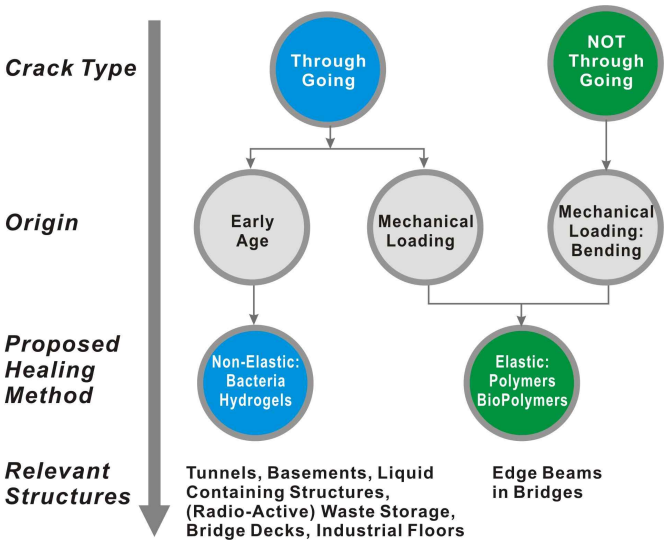
- 해외 건설시장에서의 경쟁력 강화를 위한 연구·산업 인프라 구축 필요

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

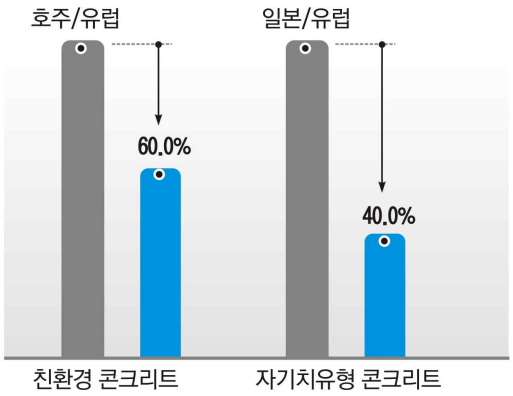
※ 친환경 콘크리트의 현 기술수준 : 호주 및 유럽의 약 60% 수준 ('고로슬래그의 고부가가치 활용제품 실용화 추진전략 수립', 전남대학교, 2012)

- "Self-healing materials for prolonged lifetime" 주제로 EU-FP7 HealCON 프로젝트(2013~2017) 진행 중.

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



[그림 1-3] HEALCON 프로젝트 개요



[그림 1-4] 기술 격차

▢ 첨단기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 기술수요 급증

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

※ Micro: 수화(hydration)/수축(shrinkage)/탄산화(carbonation) 등 미세조직구조 변화에 따른 열화

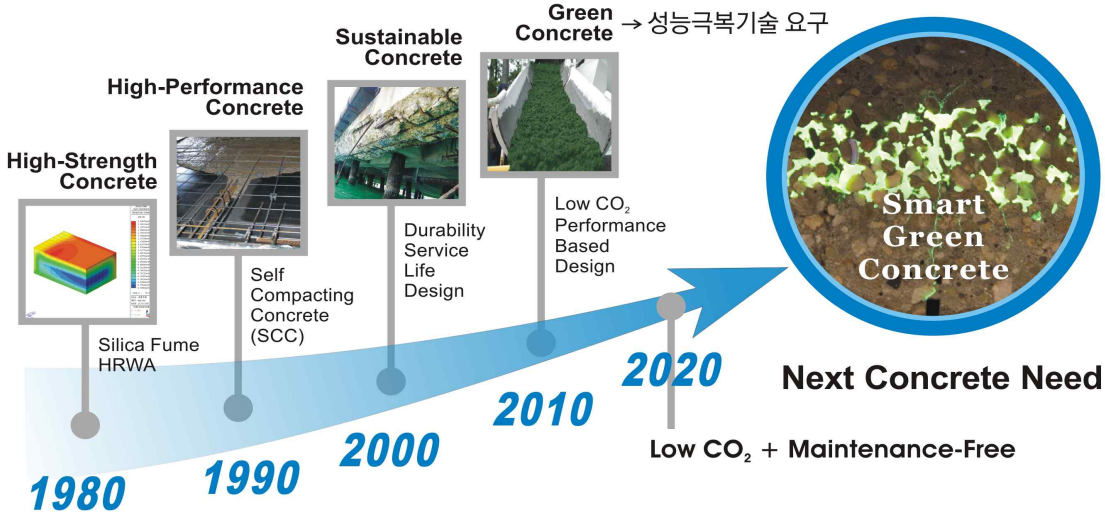
※ Meso/Macro: 외부하중(external loading)/부식(corrosion) 등에 의한 균열 발생에 의한 열화

- 기존의 균열(cracking)치유 개념의 자기치유(Self-healing) 개념을 확장하여 콘크리트의 미세조직구조 변화에 따른 손상의 치유 및 첨단기술을 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 콘크리트에 대한 맞춤형 목표성능 정립 필요



[그림 1-5] 시대별 콘크리트 기술 변천사

1.1.2 세부과제별 기술정의

▢ 사업구성

- 1세부과제 : 첨단기술 활용 자기치유 요소기술 및 성능평가
- 2세부과제 : 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발
- 3세부과제 : 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발

▢ 1세부 과제 : 첨단기술 활용 자기치유 요소기술 및 성능평가

- 정의 : 바이오, 나노 등의 첨단기술을 활용하여 균열과 같은 콘크리트의 손상을 자연적으로 치유하는 요소 기술 및 성능평가 기술임.
- 기술의 범위 :
  - 박테리아 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발
  - 마이크로캡슐 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발
    - 다기능 마이크로캡슐 활용기술, 반복적 균열 자기치유 기술
  - 자기치유 콘크리트 역학적 및 내구성능 평가
  - 자기치유형 친환경 콘크리트의 생애주기비용(LCC) 및 생애주기이산화탄소($LCCO_2$) 분석

▢ 2세부 과제 : 자기치유형 HVSCM(high volume sementitious cement materials) 콘크리트 개발

- 정의 : 무기계 혼입재 형태의 자기치유 재료를 기반으로 균열 및 성능열화에 대해 자기치유형 친환경 HVSCM 콘크리트를 개발하고자 하는 기술임.
- 기술의 범위 :
  - 시멘트계 재료의 수화반응을 이용한 자기치유형 무기계 재료개발
  - 스마트 폴리머 활용 균열치유 복합기술
  - 균열 제어형 HVSCM 콘크리트 개발
  - 성능열화 제어형 HVSCM 콘크리트 개발
  - 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용 및 실증실험

▢ 3세부 과제 : 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발

- 정의 : 시멘트를 전혀 사용하지 않은 무시멘트 콘크리트에 자기치유 기능부여를 통해 균열 및 열화성능에 대해 자기치유할 수 있는 콘크리트를 개발하고자 하는 기술임.
- 기술의 범위 :
  - 자기치유 기술기반 내열화 무시멘트 콘크리트 개발
  - 광합성 박테리아 활용 자기정화 무시멘트 콘크리트 개발
  - 자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트화 기술 개발

1.2 기술분류 및 내용

1.2.1 기술분류

▢ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발을 위한 중점 연구 분야를 다음과 같이 구성함.

[표 1-1] 기술분류

대분류		중분류	소분류
1	자기치유 요소기술 분야	콘크리트 자기치유 기술	• 미생물(박테리아) 활용 콘크리트 자기 균열 치유기술
			• 마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기 균열 치유기술
			• 섬유활용 콘크리트 자기 균열 치유기술
			• 균열 원인/종류에 따른 복합 자기 치유기술
		자기치유 기술의 콘크리트 적용기술	• 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기 치유기술
			• 구조물 보수용 균열 자기 치유기술(코팅, 침투, 단면복구 등)
			• 자기치유형 콘크리트의 성능 평가기술(역학, 내구성 등)
			• 자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술
2	자기치유형 HVSCM 콘크리트 분야	자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	• HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술
			• HVSCM 콘크리트 자기치유 속도 및 성능 향상기술
			• 자기 균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술
			• 열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술
			• 자기치유형 친환경 소재를 활용한 보수기술
		자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	• HVSCM 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술
			• 자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합 설계기술
			• 구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술
			• 자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술

3	자기치유형 무시멘트 콘크리트 분야	자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	• 자기치유형 무시멘트 바인더 제조기술
			• 친환경 알칼리 활성화제 제조기술
			• 자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술
			• 열화성능 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술
			• 자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술	• 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술
			• 자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합 설계기술
			• 자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트 제품화기술
			• 자기치유형 무시멘트 콘크리트 실증기술

1.2.2 기술내용

(1) 자기치유형 요소기술 분야

: 콘크리트 구조물에 발생한 균열 등의 손상에 대해 발생외부의 인위적 행위(작업) 없이 콘크리트 스스로 치유하는(자기치유) 기술 및 일반(고성능 포함) 콘크리트에 적용하기 위한 기술을 포함

[표 1-2] 자기치유형 요소기술 분야 중분류 기술내용

중분류	기술내용
콘크리트 자기치유 기술	• 외부의 인위적 작업 없이 콘크리트 균열 등의 손상을 스스로 치유하는 기술
자기치유 기술의 콘크리트 적용기술	• 자기치유 기술을 일반 콘크리트(고성능 콘크리트 포함)에 접목하여 활용하기 위한 기술

[표 1-3] 자기치유형 요소기술 분야 소분류 기술내용

중분류	소분류	기술내용
콘크리트 자기치유 기술	미생물(박테리아) 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	• 콘크리트 내부에서 생존 가능한 박테리아를 이용한 무기질 석출을 통해 균열을 자기치유하는 기술
	마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	• 균열 자기치유 물질을 마이크로캡슐화하여 콘크리트의 균열에 대해 자기치유하는 기술
	섬유활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	• 마이크로섬유, 중공섬유 등을 이용하여 콘크리트의 균열에 대해 자기치유하는 기술
	균열 원인/종류에 따른 복합 자기치유 기술	• 균열이 발생하는 원인 및 종류에 대해 이를 제어하기 위한 한 가지 이상의 방법을 적용한 복합 자기치유 기술
자기치유형 콘크리트 적용기술	신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술	• 기존의 일반 콘크리트(고성능 콘크리트 포함)의 신규 적용 시 자기치유 성능을 적용하는 기술
	구조물 보수용 균열 자기치유 기술(코팅, 침투, 단면복구 등)	• 자기치유 기술을 코팅, 침투 및 단면복구 등의 방법을 통해 기존 기술의 유지보수용으로 적용하는 기술
	자기치유형 콘크리트의 성능평가 기술(역학, 내구성 등)	• 자기치유형 콘크리트의 균열 등에 대한 자기치유 성능 평가 기술
	자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술	• 자기치유 기술을 고려한 콘크리트 구조물의 생애주기 비용 및 생애주기 이산화탄소 배출량 평가기술

(2) 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

: OPC의 사용량을 줄이고 시멘트 대체재료(SCM)를 대량 사용한 콘크리트(HVSCM)에 자기치유 기능부여를 통해 균열 및 열화성능에 대해 자기치유할 수 있는 기술개발과 실용화를 위한 적용기술을 포함.

[표 1-4] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 중분류 기술내용

중분류	기술내용
자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발	• OPC함량이 최소화된 친환경 HVSCM 콘크리트의 자기치유 기능 부여 및 강화 기술개발
자기치유형 HVSCM 콘크리트 설계/적용 기술	• 자기치유형 HVSCM 콘크리트의 적용성 확대를 위한 배합설계 및 현장 실증실험

[표 1-5] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 소분류 기술내용

중분류	소분류	기술내용
자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술	• 대량 SCM(고로슬래그 미분말, 플라이애시 등) 콘크리트에 적용하기 위한 균열 자기치유용 무기계재료 또는 복합재료 개발
	HVSCM 콘크리트자기치유 속도 및 성능 향상기술	• SCM의 자기치유 성능 극대화 또는 HVSCM 콘크리트의 자기치유 속도 및 성능 증진기술
	자기 균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	• 수화초기 또는 장기재령에 발생하는 균열에 대해 자연적으로 치유되는 균열제어형 HVSCM 콘크리트 제조기술
	열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	• 조기강도, 탄산화 등 HVSCM의 약점을 자기치유 기술을 도입하여 해결한 열화성능개선형 HVSCM 콘크리트 제조기술
	자기치유형 친환경 소재를 활용한 보수기술	• 기존 구조물에 적용 가능한 유지관리 비용 최소화형 자기치유형 친환경 보수재료 개발
자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	HVSCM 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	• 대상구조물의 허용 균열폭, 균열패턴, 치유속도 등을 고려한 콘크리트의 자기치유 요구성능 등급화 또는 예측기술
	자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합설계 기술	• 자기치유성능에 기반한 HVSCM 콘크리트의 배합설계 기술 (ex, 균열폭 0.5mm 제어가능 SCM 80% 대체 고강도 콘크리트)
	구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	• 대상 목적대상 구조물에 특성에 적합한 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술(수밀성, 내열화성 등)
	자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술	• 자기치유형 HVSCM 콘크리트를 적용한 구조물의 현장적용, 모니터링 등을 통한 실증실험

(3) 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야

: 시멘트를 전혀 사용하지 않은 무시멘트 콘크리트에 자기치유 기능부여를 통해 균열 및 열화성능에 대해 자기치유할 수 있는 기술개발과 실용화를 위한 적용기술을 포함

[표 1-6] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야 기술내용

중분류	기술내용
자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	• 시멘트를 전혀 사용하지 않은 무시멘트 콘크리트의 한계점 극복을 위한 자기치유 기능부여 및 강화기술
자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술	• 배합기술, 제품화 기술 등 자기치유형 무시멘트 콘크리트의 활용성을 높이기 위한 실증기술

[표 1-7] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 소분류 기술내용

중분류	소분류	기술내용
자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	자기치유형 무시멘트 바인더 제조기술	• 무시멘트 콘크리트의 손상을 자기치유하기 위한 무기계 첨가제, 혼합재료 등을 활용한 바인더 제조기술
	친환경 알칼리 활성화제 제조기술	• 친환경 무시멘트 콘크리트 제조를 위한 작업자의 안전성 등 친환경성이 강조된 고성능 알칼리 활성화제 제조 기술
	자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	• 제조 시 혹은 사용 중 발생하는 균열에 대해 자연적으로 치유되는 균열제어형 무시멘트 콘크리트 제조 기술
	열화성능 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	• 탄산화, 수축 등 무시멘트 콘크리트의 약점을 자기치유 기술을 접목하여 해결한 열화성능 개선형 무시멘트 콘크리트 제조기술
	자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술	• 기존 구조물에 적용 가능한 유지관리 비용 최소화형 무시멘트 보수재료 개발
자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술	무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	• 대상 구조물의 허용 균열폭, 균열패턴, 치유속도 등을 고려한 콘크리트의 자기치유 요구성능 등급화 또는 예측기술
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합설계 기술	• 자기치유성능에 기반한 무시멘트 콘크리트의 배합설계 기술 (ex, 균열폭 0.4mm 제어, 탄산화 50% 감소 등)
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트 제품화 기술	• 자기치유형 무시멘트 콘크리트의 활용성 증대를 위한 프리캐스트 제품화 기술(양생기법, 특수성능 부여 등)
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 실증기술	• 자기치유형 무시멘트 콘크리트를 적용한 구조물의 현장적용, 모니터링 등을 통한 실증실험

02

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

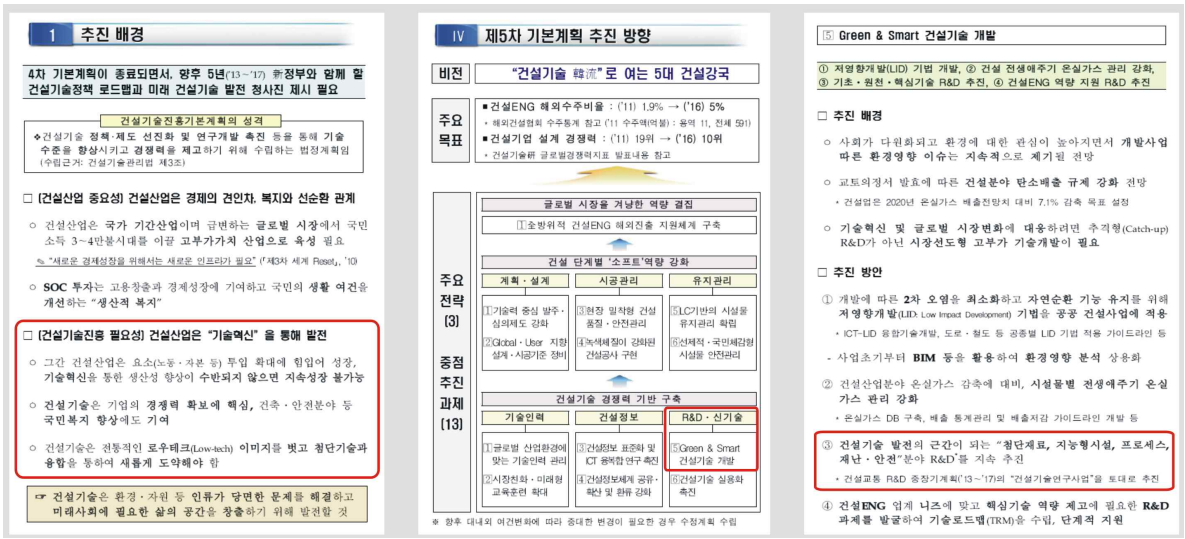
국내외 동향 및 환경 분석

2.1 국내외 정책동향

2.1.1 국내 정책동향

▢ 제5차 건설기술진흥기본계획(2013~2017, 국토교통부)

- 건설기술기본계획에서 해외건설 경쟁력 강화를 위한 건설기술 경쟁력 기반구축 분야로 R&D·신기술에서 'Green & Smart 건설기술 개발' 및 '건설기술 실용화 촉진' 등을 주요 전략으로 채택함.
- 첨단 기술을 활용한 자기치유 콘크리트 콘크리트를 개발하는 본 연구는 균열 자기치유 등의 첨단 기술을 개발하여 선진국과의 기술 격차 해소에 기여
- 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술개발은 세계 수준의 기술로 판단됨.



[그림 2-1] 제5차 건설기술진흥기본계획 개요

▢ 정부의 저탄소 녹색성장 정책과 이에 따른 온실가스 배출량을 2020년에 기준 전망(BAU:Business As Usual) 대비 30% 탄소 배출량 감축 목표를 세우고 있으며 이를 달성하기 위한 범정부적 탄소 배출량 저감 기술의 개발 필요성이 대두됨.

[그림 2-2] 녹색성장 3대전략 10대 정책

■ 정부는 2009년 녹색성장 국가 전략의 비전으로 2020년까지 세계 7대, 2050년까지 세계 5대 녹색강국 진입을 목표로 세움.

※ 국가의 주요 정책목표 중 하나로 국민의 삶의 질 제고와 환경개선을 선정함.

■ 자기치유 기능을 활용하여 친환경 콘크리트의 한계를 극복하는 기술을 개발함으로써 시멘트의 사용량을 획기적으로 줄일 수 있는 친환경 콘크리트의 실용화가 가능하며 국가 온실가스 배출량 감소에 크게 이바지할 것으로 판단됨.

▢ 사회기반시설(SOC) 건설을 담당하고 있는 국토교통부는 건설 분야 관련기술의 선진국 대비 격차 해소, 고품질 건설공사 확립 등을 추진하고 있으며, 이러한 목표를 달성하기 위해서는 기초 기술에 대한 정부의 투자를 통하여 민간 기술개발투자를 유도하는 것이 효과적임.

■ 따라서 건설 산업 분야 발전전략의 하나로서, '인간, 자연과 상생하는 인프라 건설'을 위한 환경친화형 첨단 건설기술을 실현하기 위해서는 민간개발이 아닌 정부(국토교통부)주도의 R&D 투자를 통하여 탑다운(Top_Down) 방식으로 실용화를 추진할 필요성이 있음.

▢ 국토교통부 '시설물의 안전관리에 관한 특별법'

■ 2013년 공포하여 2014년 1월 17일 시행됨에 따라 도로, 철도, 항만, 댐, 교량, 터널, 건축구조물 등 결함이 있는 시설물을 보수보강을 실시하도록 되었으며, 노후 시설물 등의 유지보수 및 보강이 이슈화되어 관심이 집중되고 있음.

■ 또한 95년 이후 안전 및 유지관리 대상인 1, 2종 시설물이 급증하기 시작하여 1995~2000년까지 11.5~18.4%, 2006년까지 10% 이상 증가하였으며, 최근의 경우 1종 시설물 7,400여개, 2종 시설물은 5만6,700여개로 20년 이상 경과한 시설물은 약 1,000여개 인 것으로 나타나 관리 대상 구조물의 수요가 증가하고 있음.

■ 한국시설공단의 시설물 관리주체 안전 및 유지관리 실태조사(2010년)에 의하면 국내의 경우 건설된 역사가 짧아 전반적으로 시설물에 대한 평가 결과가 B 등급이며, 항만 및 댐은 C등급으로 평가되고 있음.

[표 2-1] 국내 인프라 평가등급

구 분	A	B	C	D	E	평균
도로교량	654	2,119	433	28	1	B
도로터널	533	428	29			B
철도교량	255	215	70	1		B
철도터널	174	320	110			B
철도역사	170	362	17			B
항만	121	133	29			C
댐	122	202	167	19		C
하천시설	117	443	74			B
수도	304	498	61	2		B
공공하수처리	117	169	2			B

- 선진국과의 유지관리 투자비중, 시설물 스톡증가, 향후 신규 건설 규모 전망 등에 기초하여 안전 및 유지관리 수요를 전망하고 있는 추세이며, 추후 국내 건설 정책은 신규 구조물의 신설보다 기존의 시설물을 유지하는 데 집중할 것으로 발표함.
- 선진국형 저성장기로 접어들면서 2010년대 후반까지는 안전 및 유지관리 시장의 증가율이 유지되다가 2020년 이후 증가세가 확대될 것으로 예측됨에 따라 예산규모가 3배 이상 증가할 것으로 예측됨.

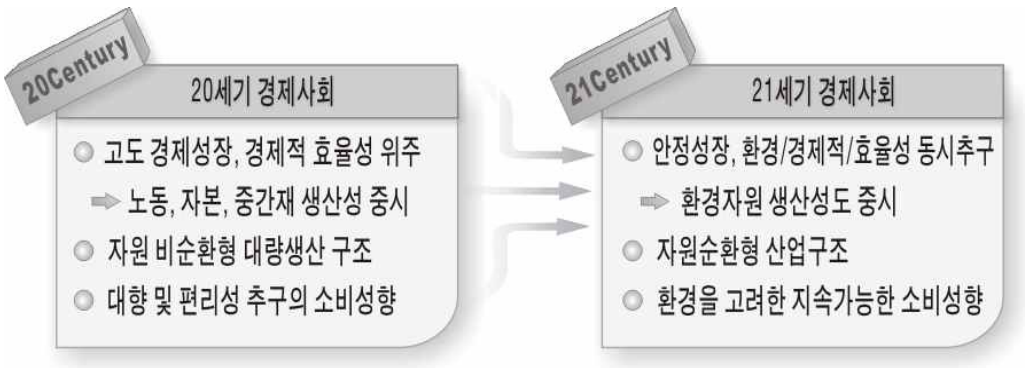
▢ 지식경제부(2012년 계획)는 일본 원전사고를 계기로 중대 사고에 대비하기 위한 안전 분야 R&D 확충과 안전성 강화 대책 후속조치를 지속적으로 추진함.

- 사회적으로 중요한 사회기반시설물에 대한 안정성 향상을 위한 유지관리 분야의 지속적인 성장이 예상됨.

▢ 국가과학기술위원회 『국가육성기술개요서』에 따르면 국과위 국가육성기술은 총 9개분야 90개 육성기술로 구성되어 있으며, 건설 · 교통 분야에는 10개의 육성기술을 포함함.

- '첨단 건설재료 · 소재 개발 기술', '신 건설생산시스템 및 에너지 · 자원 절약형 건설기술' 등이 포함됨.
- 기술 선진국을 답습하는 수준에서 세계를 선도할 수 있는 최고기술을 개발할 수 있는 R&D를 중요시하고 있음.

▢ 최근 경제·사회 패러다임의 변화로 환경·경제 효율성과 순환자원의 활용을 추구하는 자원순환형 경제·사회로 전환됨에 따라 다양한 폐기물 재활용 정책 수립



[그림 2-3] 21세기 경제사회 패러다임 변화

▢ 철강슬래그 및 석탄재 배출 사업자의 재활용 지침

- "자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률"에 의거 『철강슬래그 및 석탄재 배출 사업자의 재활용 지침』(환경부, 산업통상자원부 고시)에서 슬래그의 목표 재활용은 95%, 석탄재는 75%로 규정하여 슬래그와 석탄재의 재활용 촉진을 의무화하고 있음.

▢ 대한건설정책연구원 설문조사(2011년)에 의하면 미래사회 시설안전 주요 이슈는 안전 위험성 증대(35%), 국민 삶 중시 복지사회(19%), 기후변화(18%), 기술융 · 복합화(15%), 양극화(12%) 등으로 나타났음.

■ 기술 융복합화 기술에서 시설물의 손상 및 자기치유 기술이 부각되었음.

[표 2-2] 미래사회 시설안전 주요이슈(대한건설정책연구원 설문조사, 2011)

메가 트랜드	시설안전 이슈
안전 위험성 증대	▪ 노후화로 인한 안전관리 필요 시설물 및 사회적 불안감 증가 ▪ 환경변화에 따른 시설안전 관리체계 정비
국민 삶 중시	▪ 높은 수준의 시설물 사용성능 요구(복지사회) ▪ 자산관리를 통한 안전 · 사용성능 확보
기후변화 대응	▪ 이상기후를 선제 대응하는 시설안전 요구 증대 ▪ 저탄소 · 친환경 재료 및 신공법 개발
기술 융 · 복합화	▪ 시설물 손상 및 자기치유 기술 부각 ▪ 실시간 구조물 모니터링 기술 및 SOC 지능화
양극화 해소	▪ 노후 소규모 시설물 및 민간 시설물 안전 취약 현상 심화 ▪ 대형 안전진단업체, 유지관리업체 위주로 시장 편중

▢ 시설물의 안전도와 국민 안전 인식도와는 상당한 괴리가 있는 것으로 평가됨.

■ 안전상태 : 무사고 (지속), A, B등급(95%), D, E등급(0.06%)

※ 관리부실에 따른 종외 시설물 붕괴 : 15건('08년), 1건('09년), 59건('10년)

■ 국민 안전 인식도 : 개선되고 있으나, 여전히 낮음.

※ 불만족도 : 64.7%('97년) , 43.5%('01년), 30.1%('08년), 22.0%('10년)

▢ 지능형 안전 및 유지관리 기술격차 여전, 기술역량 부족

■ 기술격차 : 국내수준(54.2%) 세계최고(미국, 71.1%) 대비 ▽16.9% (4.3년)

■ 핵심기술 취약: 하드웨어 중심 개발, 장수명화 등 소프트웨어, 핵심장비 등 기초·원천기술 부족

※ 자료 : 국가 R&D 기술산업정보서비스, 2010년

[표 2-3] 선진국 대비 지능형 안정 및 유지관리 기술격차

국가	미국	EU	일본	한국	중국	세계 최고국 기술격차
기술수준	71.7%	70.9%	68.2%	54.2%	45.4%	4.3년

※ 국가과학기술위원회, 국가 R&D 기술산업정보서비스(2010년)

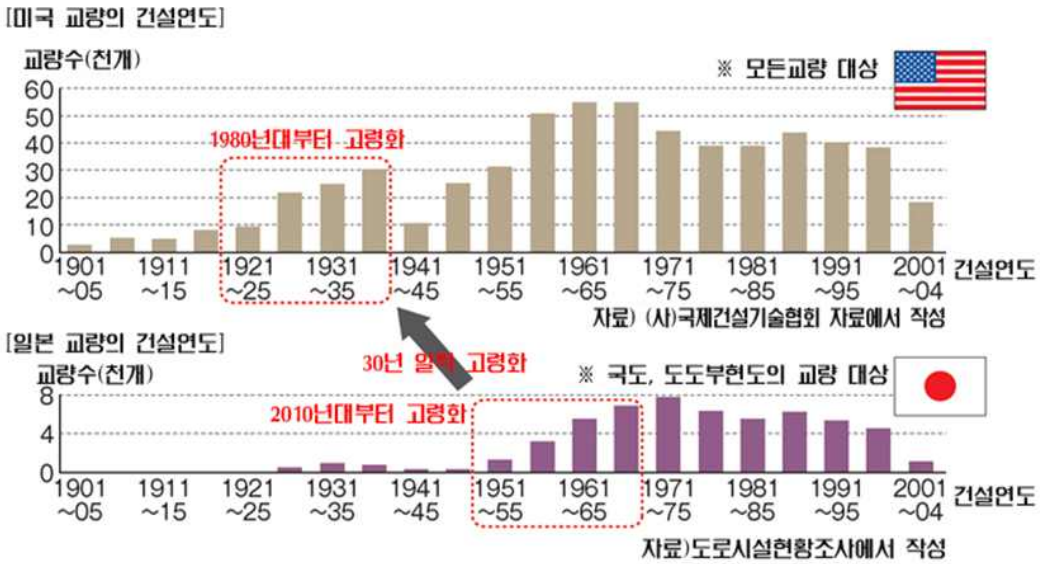
▢ 시설물 고령화 대비 효율적 유지관리의 필요성이 높아지고 있음.

■ SOC 신규투자 감소(3.5조/년 감소) 및 유지관리 투자 급증

■ SOC 고령화 시대 진입(고령화율 9%, 10년 후 20%)

■ 미국과 일본의 인프라 고령화 추세를 살펴보면 국내의 경우 2020년부터 본격적인 고령화시대가 도래될 예정임.

※ 시설물 고령화 대비 효율적인 유지관리 필요성이 대두되고 있음.

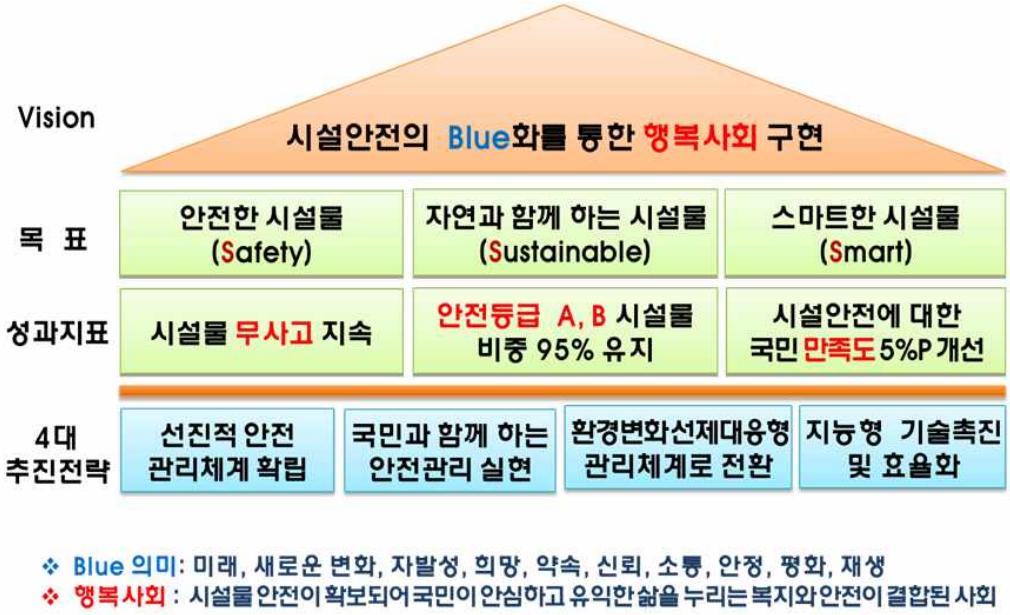


[그림 2-4] 미국과 일본의 인프라 고령화 현황

[그림 2-5] 국내 SOC 종류별 공용년수 분포

■ 시설물 유지관리 3차 기본계획을 살펴보면 시설안전의 Blue화를 통한 행복사회 구현의 비전아래 안전한 시설물(Safe), 자연과 함께 지속가능한 시설물(Sustainable), 스마트한 시설물(Smart)의 3대 목표를 설정하였음.

※ 자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발은 이러한 유지관리 기본계획에 잘 부합되는 기술로 판단됨.



❖ Blue 의미: 미래, 새로운 변화, 자발성, 희망, 약속, 신뢰, 소통, 안정, 평화, 재생
❖ 행복사회 : 시설물 안전이 확보되어 국민이 안심하고 유익한 삶을 누리는 복지와 안전이 결합된 사회

▢ 국토해양부, '시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인' 배포

■ 2011년, 2012년 2회에 걸쳐 도로, 철도, 건축물, 항만, 댐, 하천정비, 도시재생에 대한 가이드라인을 배포함.

■ 각 시설물에 대하여 계획 및 설계, 시공, 운용, 해체 및 재활용 단계별로 시설물의 특성을 고려하여 탄소배출량을 산정하는 방법을 제공해 탄소배출량을 산정하여 관리하는데 목적이 있음.

※ 시공 및 운영과정의 온실가스 발생량을 서로 비교할 수 있기 때문에 이산화탄소 저감 경쟁을 유도하여 녹색건설 관련 기술 발전에 기여할 것으로 전망됨.

※ 자기치유 콘크리트의 개발로 인하여 운용단계 평가항목인 유지보수 단계에서의 탄소배출량을 감소시킬 것으로 전망됨.

2.1.2 국외 정책동향

(1) 미국

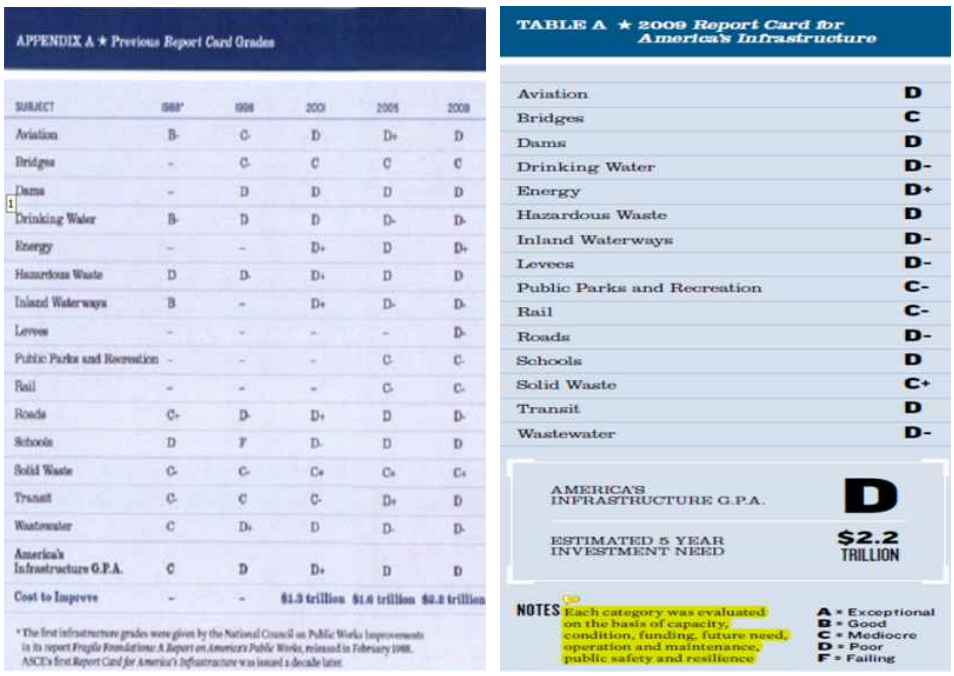
▢ 미국 오바마 정부는 미국 경제 살리기 및 고용창출을 위한 인프라사업 추진계획을 수립하고, 향후 10년간 저탄소 산업에 1,500억 달러를 투자할 계획임.

■ 건설산업을 6대 국가전략산업 중 하나로 지원하고 있으며 CMS, CERF, FIATECH와 같은 건설 IT 융합사업을 진행, 유지관리/에너지 비용 50% 감소, 생산성 30% 향상, 공해 50% 감소 등의 국가 건설목표를 설정하여 추진함.

▢ 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.

※ 미국토목학회(ASCE)에서 15개 분야의 시설물군(공항, 댐, 상수, 하수, 에너지, 유해폐기물, 고형폐기물, 수로, 제방, 공원, 철도, 도로, 교량, 학교, 운송)에 대해서 평가하였으며, 인프라 시설물의 성능, 물리적 상태, 투자(funding), 미래수요, 운영 및 보수, 공공 안전, 재해 복원력(resilience to disaster), 혁신기술 등에 대해 평가를 수행함.



APPENDIX A ★ Previous Report Card Grades

SUBJECT	1988*	1998	2001	2005	2009
Aviation	B-	C-	D	D+	D
Bridges	-	C-	C	C	C
Dams	-	D	D	D	D
Drinking Water	B-	D	D	D-	D-
Energy	-	-	D+	D	D+
Hazardous Waste	D	D-	D+	D	D
Inland Waterways	B	-	D+	D-	D-
Levees	-	-	-	-	D-
Public Parks and Recreation	-	-	-	C-	C-
Rail	-	-	-	C-	C-
Roads	C+	D-	D+	D	D-
Schools	D	F	D-	D	D
Solid Waste	C-	C-	C+	C+	C+
Transit	C-	C	C-	D+	D
Wastewater	C	D+	D	D-	D-
America's Infrastructure G.P.A.	C	D	D+	D	D
Cost to Improve	-	-	$1.3 trillion	$1.6 trillion	$2.2 trillion

*The first infrastructure grades were given by the National Council on Public Works Improvements in its report Fragile Foundations: A Report on America's Public Works, released in February 1988. ASCE's first Report Card for America's Infrastructure was issued a decade later.

TABLE A ★ 2009 Report Card for America's Infrastructure

Aviation	D
Bridges	C
Dams	D
Drinking Water	D-
Energy	D+
Hazardous Waste	D
Inland Waterways	D-
Levees	D-
Public Parks and Recreation	C-
Rail	C-
Roads	D-
Schools	D
Solid Waste	C+
Transit	D
Wastewater	D-

AMERICA'S INFRASTRUCTURE G.P.A. D

ESTIMATED 5 YEAR INVESTMENT NEED $2.2 TRILLION

NOTES Each category was evaluated on the basis of capacity, condition, funding, future need, operation and maintenance, public safety and resilience

A = Exceptional
B = Good
C = Mediocre
D = Poor
F = Failing

[그림 2-6] 미국의 인프라 평가 사례

■ 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.

▢ 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.

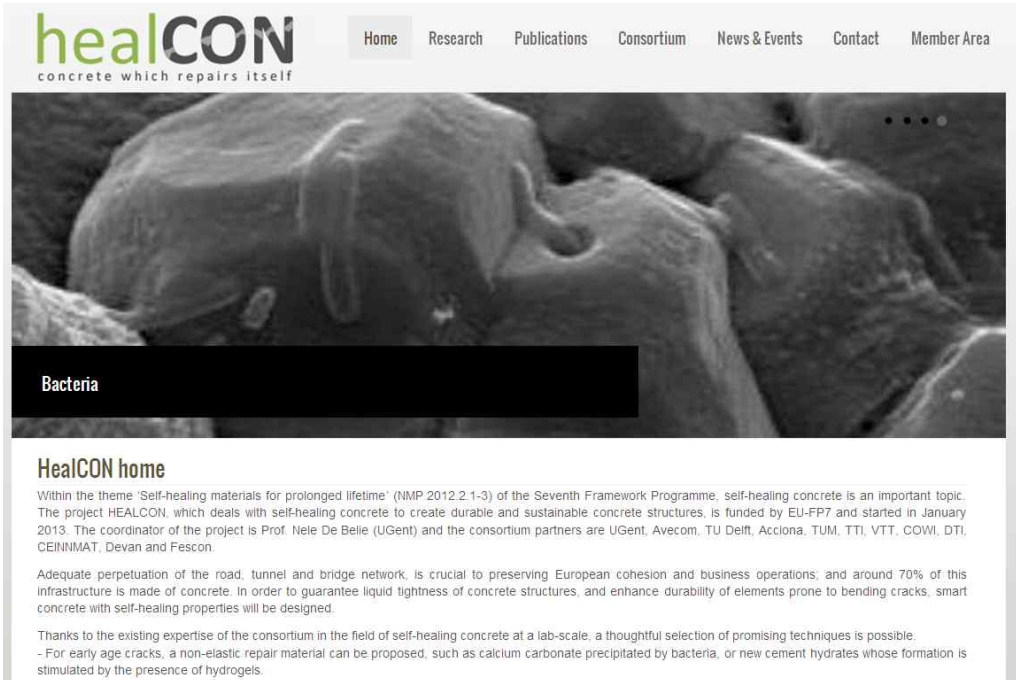
▢ 미시간대학에서는 토목공학 및 재료공학, 산업생태학, 환경경제학, 지질공학, 환경보건학 분야에 걸친 다학제적 협력 과제인 “Sustainable concrete infrastructure materials and systems-developing an integrated life cycle design framework"를 수행(2003~2008).

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

(2) 유럽

▢ EU는 ‘Self-healing materials for prolonged lifetime’라는 주제로 HealCON-Project (2013~2017)가 진행 중임.

- 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 2-7] HealCON Project 홈페이지

▢ SheMat 프로젝트는 "Training Network for Self-Healing Materials: from Concepts to Market"라는 주제로 유럽 “Marie Curie” programme에 의한 “Seventh Framework Programme” 범주에서 지원받은 Training and Research Network임.

■ 독일 Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology (UMSICHT)의 주도로 다음과 같은 기관이 참여하고 있음.

※ Partner로 8개 기관이 참여

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

※ Associated Partner로 4개 기관이 참여

: 프랑스 Arkema, 독일 BIOKON international, 네델란드 Ceratec과 KLM

[그림 2-8] SHeMat Project 홈페이지

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

[그림 2-9] SHeMat Training-school Program

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

- 2020년까지 에너지 고효율 20% 제고, 온실가스 20% 감축, 재생에너지 20% 사용
- 국가 R&D 예산의 12%를 지속가능발전 분야에 투자함.

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

- 시멘트 사용)량을 줄이기 위해 프랑스, 영국, 덴마크 등은 “Eco-Serve Network”를 결성함.
- 기후협약에 따라 프랑스의 시멘트 회사들이 2020년까지 시멘트 사용량을 20% 감축하기로 선언함.
- 선진국에서는 혼화재료는 종래의 콘크리트에서는 생각할 수 없었던 특수 성능이나 고성능을 가지는 콘크리트의 실용화에 기여하고 있음.
- 플라이애쉬를 사용한 수밀성 콘크리트 지침(영국)
- 포졸란 재료를 활용한 구조물 설계 지침(네덜란드)

▢ 영국에서는 저탄소 지속가능 교통시스템 보고서를 통해, 온실가스 감축 및 기후변화 대응 및 구조물의 장수명화를 도모하여 환경 친환적인 구조물 건설을 추진하고 있음.

- 미래 세계건설시장에 경쟁우위를 확보하기 위해 “사회기반시설 혁신전략”을 마련함.
- IT와 나노 등 첨단기술과 융합한 건설 신자재 신기술개발 계획을 수립하여, 2030년까지 2,400억 유로 투자계획을 수립함.

▢ 덴마크에서는 정부기관인 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)

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

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

(3) 일본

▢ 일본은 동일본 대지진, 후쿠시마 원전사고 발생으로 당초 수립한 제4기 과학기술 기본계획(2011~2015)을 전면 재검토하고 있음.

- 과학기술 정책을 통한 5개 지향점

※ 지진 재해로부터 부흥, 회생하여 미래의 지속적인 성장과 사회발전 실현

※ 안전하고 풍요로운 고품질의 국민 생활을 실현하는 정부

※ 대규모 자연재해 등 글로벌 문제 해결에 선도적으로 대응하는 정부

※ 정부 존립의 기반이 되는 과학기술을 유지하는 정부

※ '지식' 자산을 계획 창출하여 과학기술을 문화로 키우는 정부

▢ 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 교통혼잡 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

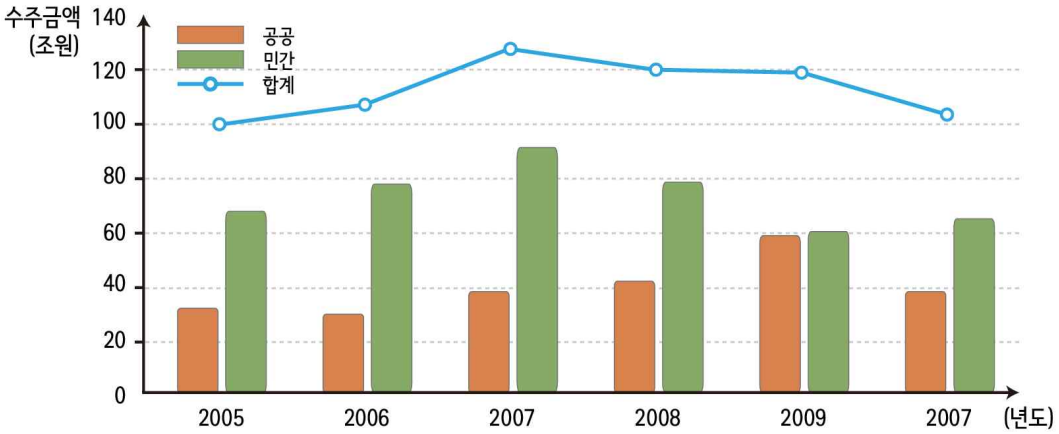
2.2 국내외 시장현황 및 전망

2.2.1 국내 시장현황

(1) 콘크리트 시장규모

▢ 국내 건설 수주 추세는 세계 금융위기가 발생한 2007년을 기점으로 점차 감소세에 있으며, 특히 경기 둔화로 인한 민간부분 수주액이 급격히 감소함.

■ 공공부분 수주는 경제위기 극복을 위한 투자증가로 2009년까지 꾸준히 증가하였으며, 민간부분이 점진적으로 회복됨에 다라 공공부분은 2010년부터 정상화되고 있음.

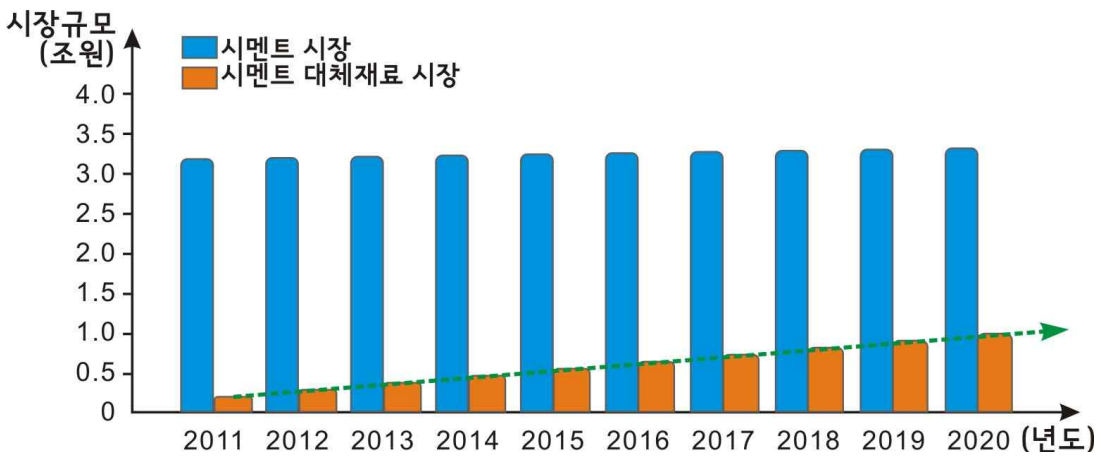


[그림 2-10] 국내 건설수주 동향(2005년 ~ 2010년)

▢ 국내 시멘트 시장규모는 약 3조 5천억원이며, 콘크리트 관련 제품군의 시장은 약 1조 9천억원, 레미콘 시장은 약 7조7천억원임.

■ 친환경 건설재료 시장은 연평균 30% 이상의 성장이 예상되며, 이에 따라 친환경재료 시장에서 시멘트 대체 기술 및 제품개발을 위한 경쟁이 치열해지고 있음.

※ 시멘트 대체재료 시장은 지속적인 성장이 예상되며 2020년도에는 시장의 약 25~30% 점유가 전망됨.



[그림 2-11] 시멘트 대체재료의 성장 전망(발명진흥회)

▢ 콘크리트 산업을 포함한 건설 산업은 전통방식에서 '지속가능 건설'이라는 새로운 방식으로의 전환점에 직면해 있으며, 환경영향을 고려한 새로운 기술 및 평가기법들의 개발이 시장에서 요구되고 있음.

▢ 국내 콘크리트 시장은 2000년도 이후 국내 레미콘 사용량은 106백만m^3 정도에서 2002년을 기점으로 약 135백만m^3 정도를 유지, 2010년 건설 경기의 둔화로 다시 106백만m^3로 급속히 둔화하였음.

■ 이는 2010년 이후 국내 주택건설 수요가 급감하고 SOC 시설물의 추진 예산이 급감하고 있음을 단적으로 나타냄.

■ 2003년 이후부터 고강도/고성능 콘크리트의 사용량이 증가하기 시작하여 이러한 특수 콘크리트의 점유 비율이 약 10%까지 향상되었음.

▢ ENR(Engineering News Record)에 의하면 세계건설시장의 규모는 7.5조달러(2008년)에 이르는 것으로 나타났으며, 이를 근거로 한국건설산업연구원의 조사에 따르면 2020년의 세계 건설시장 규모는 12.7조달러로 전망됨.

■ 세계 콘크리트 시장 규모는 일반적으로 건설시장의 40~50% 정도로써 2008년에는 3.75조달러, 2020년에는 6.35조원으로 예측됨.

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

▢ 국내 시설물 유지관리 산업 시장은 지난 1994년 성수대교가 붕괴되었던 19년 전에는 5,400억원에 불과했으나 2012년에 3조5,000억원을 기록하면서 6배 이상 증가함(이데일리, 2013.10.17).

■ 이는 건설 분야 매출액 대비 8%로 선진국과 비교하면 상당히 부족한 수준임.

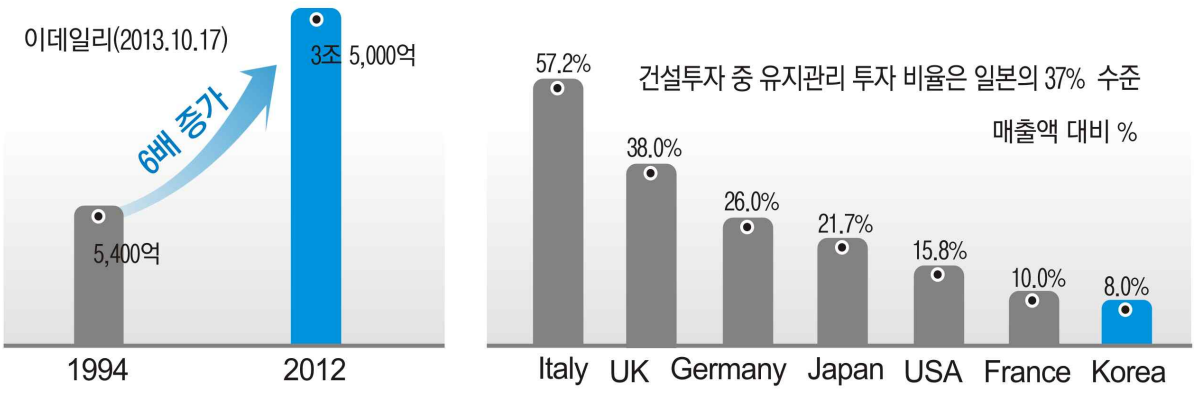
※ 이탈리아는 시설물 유지관리 투자 비중은 매출액 대비 57.2%에 달하며, 영국 38.0%, 독일 26.0%, 일본 21.7% 등의 순임.

■ 건설투자 중 유지관리 투자 비중은 일본의 약 37% 수준임.

[표 2-4] 시멘트·콘크리트 시장 및 향후 무시멘트 콘크리트 시장 규모 전망

구 분	현재의 시장규모(2011년)		예상 시장규모(2020년)*	
	시멘트 산업	콘크리트 산업	무시멘트 산업	무시멘트 /지속가능 콘크리트 산업
세 계	20억 톤	55억 m^3	2억 톤	5.5억 m^3
국 내	52백만톤 (3조9천억)	135백만m^3(9조6천억)	5.2백만톤(4천억)	13.5백만m^3(9.6천억)

* 세계 그린 건설재료 성장인 20%와 시멘트 산업 성장속도인 3%를 고려하여 향후 무시멘트 시장의 성장율을 약 10%로 가정함.



[그림 2-12] 주요국 건설투자 중 유지관리 투자 비중(2000년)

▢ 2005년 국내 친환경 건축재료 시장규모는 9,116억원임. 2003년 이후 지속적인 성장세를 보이고 있음.

■ 정부의 친환경정책에 의해 새로운 환경관련 산업이 창출되고 있으며 현재 크게 증가 추세에 있음. 이에 전생애주기 환경부하 절감 원천기술과 평가기술의 개발을 통한 시너지 효과 창출로 친환경산업의 보급 및 확대에 기여하고 이를 통한 거대 친환경 건설관련 시장 형성에 기여함.

[표 2-5] 주요 환경부하 저감형 건축재료 시장 현황

단위 : 억원

구 분	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년
고로슬래그 시멘트	1,530	1,510	1,410	1,488	1,600
페인트	474	612	1,539	1,783	1,969
벽지	19	31	47	77	84
보온단열재 및 흡음재	959	1,011	1,260	1,428	1,478
바닥장식재	647	947	1,915	2,350	2,594
벽 및 천장마감재	500	1,800	2,822	2,823	2,843
접착제	4	4	17	23	57
장식용 합성수지 쉬트	0	3	106	261	270
소계	4,133	5,918	9,116	10,233	10,895

▢ 국내 시설물 유지관리 분야는 신축 건설공사에 비해 전문기술인력이 부족한 상태로 업계에서는 지속적인 인재발굴과 유지관리 전문자격제도 도입 등 제도적 장치가 마련되어야 함.

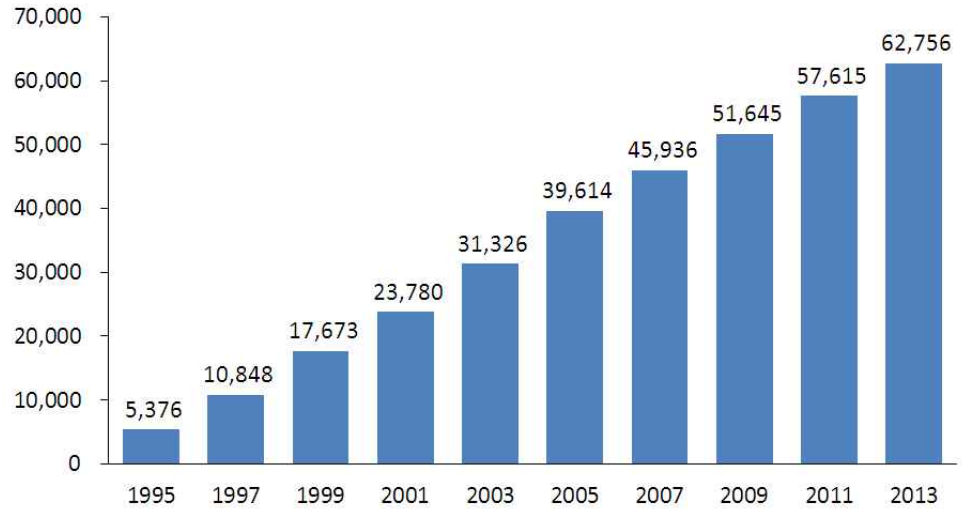
▢ 국내 사회기반시설의 현황

- 2013년 기준으로 시설물의 안전관리에 관한 특별법(시특법)에 의해 관리되는 구조물의 개수는 62,000개로 이중 민간투자 사회간접자본에 의한 것이 24,700개이다. 시설물 안전등급이 D, E급인 취약시설은 50개 정도로 파악됨.
- 시특법 대상 1, 2종 시설물은 삼풍백화점 붕괴 시점인 1995년에 비해 지속적으로 증가하여 2013년에는 12배로 큰 폭으로 상승하였음.

[표 2-6] 사회기반시설 현황 (2013년 8월 기준)

단위 : 개

구 분	전체시설물	SOC	취약시설 (D, E급)
시특법 대상	62,000 (0.9%)	24,700	50
재난관리법 특정관리	197,600 (2.8%)	8,800	1,646
일반 건축물	6,680,200 (95.3%)	-	-
기타(저수지 등)	71,600 (1.0%)	71,600	-
합계	7,012,100 (100%)	105,100	1,514



[그림 2-13] 시특법 대상 1, 2종 시설물 현황

▢ 시특법 대상(1, 2종) 시설물은 2012년 11월 기준으로 총 59,559개로, 이중 관리주체에 따라 공공이 17,755개(30%), 민간이 42,331개(70%)로 구분됨.

- 안전등급은 A, B등급이 95%를 차지하고 있으며, C등급이 4%, 그 이하가 1%임.
- 공용연수는 20년 이하가 91%를 차지하고 있으며, 10년 이하의 경우가 전체의 49%를 차지하고 있어 시설물의 유지관리를 위한 노력이 필요함.
- 시설물이 양호하게 관리되고 있으나, 특수시설 증가에 따른 지능형, 효율적 유지관리 필요

[표 2-7] 공용년수별 시설물 분포(FMS, 2012년 11월)

공용 년수	시설물계	10년 이하	11 ~ 20년	21 ~ 30년	31년 이상
수량 (%)	59,559 (100%)	29,390 (49%)	25,462 (42%)	3,329 (6%)	1,914 (4%)

▢ 안전점검 및 정밀안전진단 시장은 2007년 이후 점진적인 증가 추세를 보이고 있으며, 이는 전문기관 등록수의 증가와 경향이 유사함.

■ 2012년 시장규모는 3천5백억 정도로, 종사자 수는 8,300명으로 추정됨.

▢ 시설물 유지관리 시장은 2007년에서 2009년까지 꾸준히 증가한 후 2011년까지 정체기로 판단됨.

■ 관련 업체수는 꾸준히 증가하나 전체 계약액은 2조 8천억에서 증가하지 않고 있음(시설물 유지관리 협회 통계연보).

[표 2-8] 공용년수별 시설물 분포 (FMS, 2012년 11월)

안전점검 및 정밀안전진단 시장						
년도	2007	2008	2009	2010	2011	2012
매출액(천억)	2.7	2.8	2.9	3.2	3.4	3.5
전문기관 등록수	353	387	450	473	528	570
시설물 유지관리 시장						
계약액(천억)	18.8	22.1	28.3	28.4	29.2	
업체수	2,807	3,094	3,590	4,056	4,324	

▢ 콘크리트 구조물 유지관리관련 시장현장

■ 2004년 ISO/TC71에 유지관리에 관한 분과위원회(SC7)가 설치되었으며, 산업자원부 기술표준원이 ISO 국제기준 제정의 주도적 역할을 할 수 있는 의장국 및 간사기관으로 지정됨.

■ 2005년 건설교통부/한국콘크리트학회의 주관 하에 콘크리트 표준시방서 - 유지관리편 제정

■ 건설시장에서 건설투자수요에 따른 시설물 유지관리 비중은 2003년 26.0%에서 2007년 기준 27.3%로 유리관리 수요량이 증가하고 있으며, 중소형의 주택재고 증가뿐만 아니라 장기적인 구조물의 증가로 유지관리 투자수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.

▢ 콘크리트 보수 관련 시장현황

■ 국내 건설 투자의 8.4%인 3조 7천억원 규모가 지출된 것으로 보고되고 있으므로 콘크리트 구조물의 보수 및 유지관리 시장규모는 커질 것으로 예측됨.

[표 2-9] 국내 유지관리 시장 현황

[단위 : 10억원]

구 분	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년
건설투자수요(A)	79,037	79,037	81,196	84,176	84,985
유지관리수요(B)	20,517	21,149	21,783	22,462	23,173
비중(B/A)	26.0	26.8	26.8	26.7	27.3

[표 2-10] 국내 SOC 항목별 투자비용 현황

구 분	GDP	도로분야			철도분야			합 계		
		신규 건설	유지 관리	전 체	신규 건설	유지 관리	전 체	신규 건설	유지 관리	전 체
투자액 (조원)	1,173	5.60	2.21	7.81	4.40	0.81	5.21	10.00	3.02	13.02
GDP의 % (%)	100.00	0.48	0.19	0.67	0.38	0.07	0.44	0.85	0.26	1.11

- 구조물의 LCC개념에 따르면 신축비용의 경우 25%, 유지관리 및 보수 등의 비용이 75%를 차지함에 따라 보수에 관한 관심이 높아지고 있는 실정임.
- 국내 유지관리 예산 추이에 따르면 1994년 299억원을 기준으로 1995년 1,592억원으로 크게 증가한 이루 매년 지속적으로 증가하고 있음.

※ '07년도 기준으로 국토부가 관리하고 있는 1만1148개 고속도로 및 일반국도 교량 중 30년 이상 경과된 교량은 242개, 20~30년 교량은 628개, 10~20년 교량은 3,028개, 10년미만 교량은 7,249개교로 경과년수 10년 미만의 교량이 전체 교량의 50% 이상을 차지하고 있어, 향후 대표적 시설물 중 하나인 교량에 대한 안전 및 유지관리 수요는 더욱 급증할 것으로 예상됨.

▢ 시설물 유지관리 수요전망

- 선진국과의 유지관리 투자를 비교하고, 향후 신규건설 규모 전망 등에 기초한 연구결과를 토대로 예측한 결과 2010년 중후반까지 현재의 증가율을 유지하다가 2020년 이후에 확대될 것으로 전망됨.

2.2.2 국외 시장현황

▢ 건설교통부에 따르면 세계의 건설 재료시장의 규모는 2004년 약 2조 1천억 달러, 2009년 약 2조 7천억달러 정도로 추정하고 있음.

[표 2-11] 건설 재료 국외 시장규모 전망

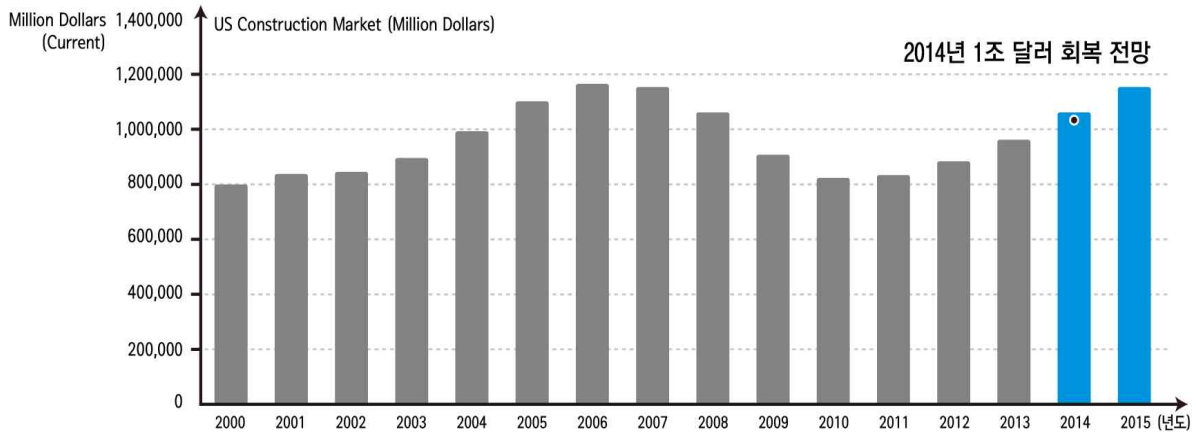
단위 : 억달러

구 분	2005년	2010년
시멘트 재료	1,124	1,332
콘크리트 혼화재료	34	51
기능성 금속재료	1,240	1,254
도료 제품	1,558	2,130
유리 제품	347	454
석고 보드	115	186
레디믹스트 콘크리트	1,932	3,013
아스팔트 콘크리트	354	497

1) 참고자료 : 한국양회공업협회 자료, 한국페인트잉크공업협동조합, 미국레미콘공업협회 자료 및 자체 조사자료

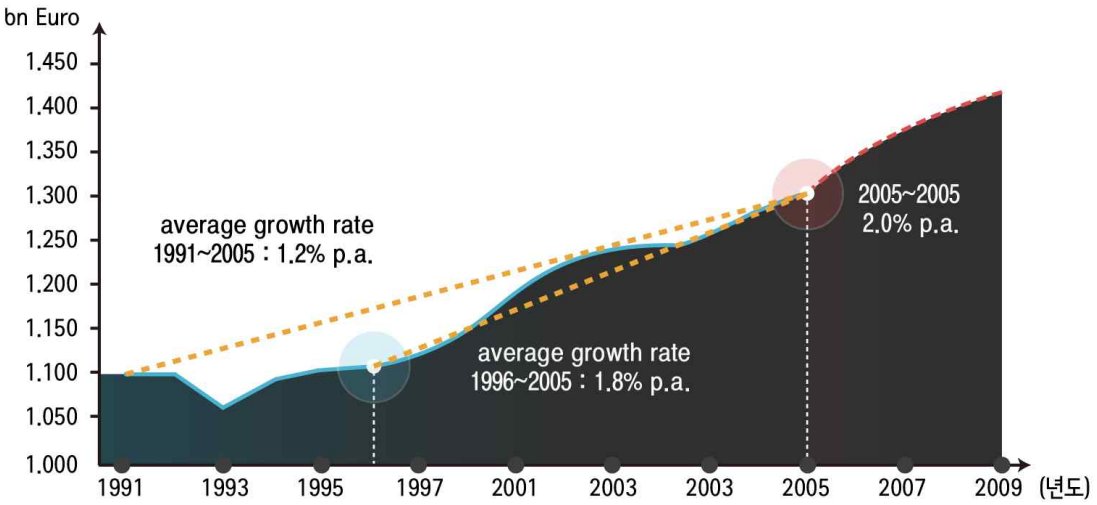
2) 2006년 이후의 시장규모는 향후 관련 시장규모는 년 5% 성장으로 가정하여 추산한 자료임.

▢ 미국은 중국에 이어 세계 두 번째로 큰 단일 건설시장으로 2011년 기준 8,350억 달러 규모로 2005년~2008년의 약 1조 달러의 시장 규모에서 경기 불황의 여파로 규모가 다소 축소되었음. 아래 그래프에 의하면 2014년에 1조 달러를 회복하는 것으로 전망됨.

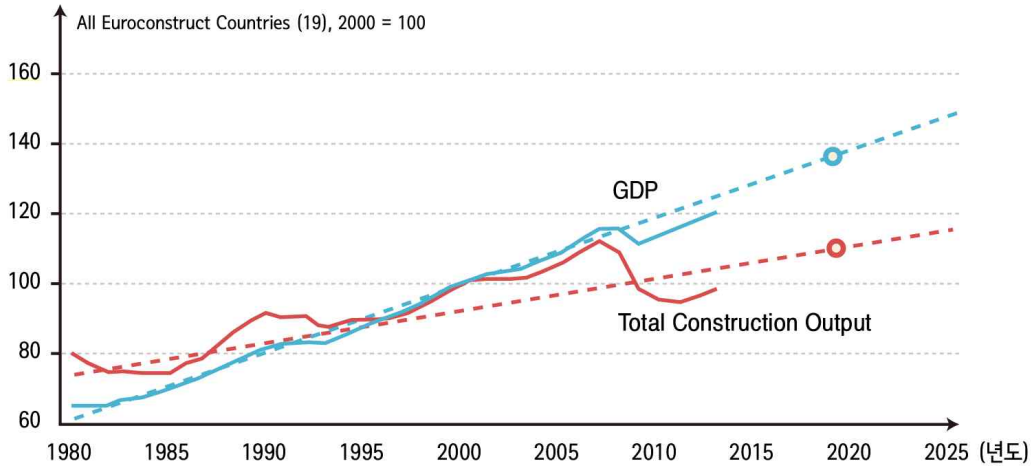


[그림 2-14] 미국 건설시장 현황 및 전망

▢ 유럽 건설시장 규모는 2005년 1조 3,100억 유로(약 1조 7,000억 달러)이었고, 2009년에는 1조 4,000억 유로(약 1조 8,200억 달러)에 이를 것으로 예측되었으나 세계 경기 침체로 마이너스 성장을 하여 2011년 현재 2000년도 수준인 1조 2,500억 유로(약 1조 6,250억 달러) 규모임.



[그림 2-15] 유럽 건설시장 현황 및 전망 (Erich Gluch*)



[그림 2-16] 유럽 건설시장 현황(2000년 기준) 및 전망 (Barbara Martins†)

▢ Global Insight의 시장전망에 따르면 2011년 해외 건설 시장 규모는 7조 68억 달러이며, 건설시장 중 콘크리트 시장 규모 비중으로 고려한 2011년도 해외 콘크리트 시장 규모는 337조 8,738억 원으로 추정됨.

■ 현재 콘크리트 시장에서 특수 콘크리트의 시장은 전체에서 5% 이내이지만, 계속하여 고품질의 콘크리트가 요구되기 때문에 이러한 시장은 꾸준히 성장할 것으로 판단됨.

▢ 그린·고성능 건설재료 시장은 급속한 성장세를 보이고 있으며, 새로운 기회를 창출하고 있음.

■ 세계적으로 급격히 변화하는 그린기술(Green Technology)과 기하급수적으로 증가하는 시

* Erich Gluch, The European Construction Market 1990-2009, The Region May-June, 2007

† Barbara Martins, etc., The European Construction Market –. forecast for 2011-2013 –. outlook to 2020

장(2020년 3,000조)으로 예상됨.

- 2005년 미국의 그린 건축재료 시장규모 211억 달러, 연평균 4.9% 성장하여 2011년 279억 달러로 성장 예상(BCC Research, "The U.S. Market for Green Building Materials")
- 일본의 친환경 상품 시장 규모는 2000년 약 300조에서 2020년 약 600조 규모로 성장할 것으로 예상하고 있으며, 폐기물 처리, 자재의 재활용, 에너지 절약 및 관리 분야가 시장의 대부분을 차지하고 있음.

▢ 일본 시멘트 업계에서는 CO_2 배출량 절감을 위해 고로시멘트(BC), 플라이애시시멘트(FAC), 석회석필러시멘트(LFC) 등의 혼합시멘트의 사용 확대를 추진

- 일본 환경성/경제산업성에서는 6% 온실가스 감축을 위한 구체적 실행대책 중 혼합시멘트의 이용확대에 따라 2010년 약 111만톤의 CO_2 절감 계획 수립

[표 2-12] 혼합시멘트 사용 확대에 따른 CO_2 절감 계획

구 분	단위	대책 후	대책 전
생산량	[천톤]	보통시멘트 51,119 혼합시멘트 16,885	보통시멘트 56,919 혼합시멘트 11,085
석회석 사용량*	[dry-천톤]	66,460	69,140
배출계수	[kg-CO_2/톤]	415	415
배출량	[만톤-CO_2]	2,758	2,869
절감효과량 (대책전-대책후)	[만톤-CO_2]	약 111	

▢ 시설물 유지관리분야 국외시장 현황

- 최근 유럽연합 및 일본은 콘크리트 구조물에 대하여 새로 건설되는 구조물의 시공에 관련된 비용보다 기존 구조물의 유지관리에 관한 비용이 기하급수적으로 증가하는 경향을 인식하여 유지관리에 관한 산업을 국제적으로 선점하기 위해 국제표준 제정 작업에 총력을 기울이고 있음.
- 한국 및 일본이 주도하고 있는 아시아-콘크리트 모델코드 제정 작업에서는 유지관리에 관한 지역표준의 중요성을 인식하여 그 기준 내에 유지관리에 관한 기준을 추가로 제정하였으며, 국제표준화하기 위한 노력을 경주하고 있음.

※ 국외 주요국의 유지관리 시장현황은 과거에서부터 문제가 인식됨에 따라 유지관리 시장이 점진적으로 증가하기 시작하여 지속적으로 증가하는 추세임.

[표 2-13] 주요국 유지관리 시장현황

[단위 : 10 억원]

구 분	1999년	2000년	2001년	2002년	2003년
미 국	71,380	75,080	84,810	88,390	90,300
일 본	46,810	50,760	55,140	59,300	66,360
중 국	14,800	20,180	24,870	33,420	44,120

[표 2-14] 국외 SOC투자비용 중 유지관리 시장현황

지역별 SOC투자비용(GDP의 %)						형태별 SOC 투자		전 체 (%)
동아시아	동유럽	라틴 아메리카	북아메리카	남아시아	남아프리카	신규 건설	유지 관리	
1.7	3.1	1.5	3.0	4.0	3.0	0.5	1.8	2.3

▢ 일본의 경우 신규건설 대비 유지관리 투자가 국내와 비교하여 3배 이상의 규모를 차지하고 있음.

■ 국외의 경우 오래된 시설물이 많기 때문에 유지관리 수요가 국내와 비교하여 더 큰 것으로 나타나지만 국내의 경우에도 시설물의 양적 증대 및 공용년수 증가와 함께 점차 유지관리 비중이 커질 것으로 예측됨.

2.3 기술동향 분석

2.3.1 관련 기술개발 동향

(1) 자기치유 콘크리트

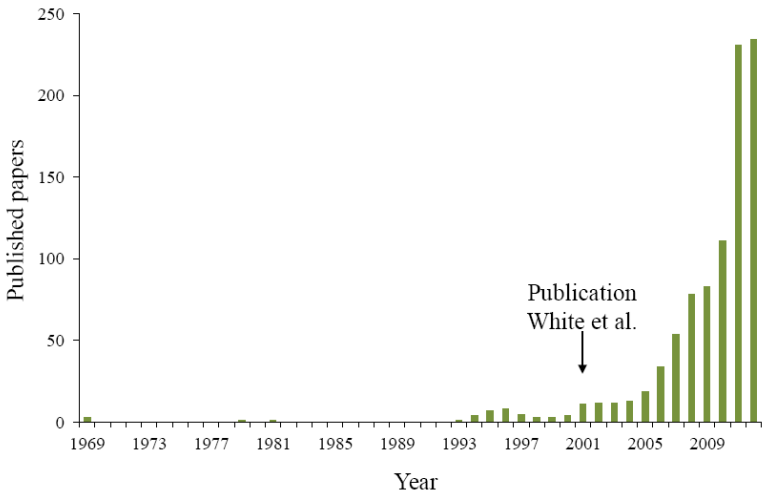
▢ 최근 건설기술은 기존 구조물의 경우 지속적인 보수 및 유지관리를 통해 구조물의 노후화 방지 및 내구수명 증대의 확보를 도모하고, 신설구조물에서는 내구설계를 적용하여 구조물의 열화인자 차단에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정임.

■ 구조물의 균열 발생은 시설물 전체에 사용성 문제를 발생하기 때문에 이를 제어할 필요성이 증대되고 있으며, 원전구조물, 해양구조물, 터널 등 보수 작업이 용이하지 않는 사회 기반시설물에 대한 안정적인 보수 공법이 필요함.

■ 최근 건설기술은 기존 구조물의 경우 지속적인 보수 및 유지관리를 통해 구조물의 노후화 방지 및 내구수명 증대의 확보를 도모하고, 신설구조물에서는 내구설계를 적용하여 구조물의 열화인자 차단에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정임.

▢ 최근 들어 균열을 저감시키거나 자기치유할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적용을 위한 연구가 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음.

■ 90년대에 자기치유 콘크리트에 대한 연구를 시작으로 2000년대에 자기치유 재료 및 이를 이용한 콘크리트 분야에 상당히 많은 논문이 발표되고 있음.



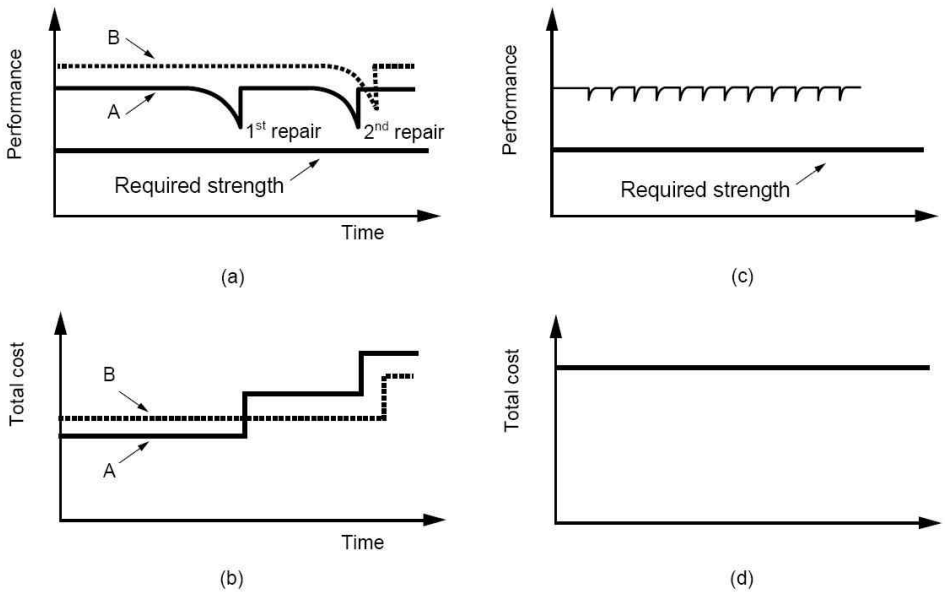
International Conference on Self Healing Materials 2011 in Bath (White *et al.,* 2001)
[그림 2-17] 자기치유 재료관련 발표 논문 추세

▢ 자기치유 콘크리트 기술은 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 약 20여 년 전에 개념이 정립되면서 시작되었으며 국내에는 2004년 이후 그 개념이 소개되어 현재는 일부 기초연구가 진행되고 있으며, 현재까지 콘크리트 응용연구는 미흡한 실정임.

▢ 자기치유 콘크리트를 구조물에 적용한다면 초기 건설비용은 다소 높아지지만 생애주기비용

관점에서 상당한 장점이 있음(Van Breugel, 2007).

- 구조물의 내구년한 동안 초기성능을 유지하여 유지관리 비용 감소 및 내구수명의 증대로 인한 보수보강비용 감소가 기대되며, 또한 추가적인 원료 절감, 시공에 따른 공해발생, 에너지소비, 이산화탄소 발생을 줄일 수 있는 친환경적인 효과의 부수적 장점이 있음.
- 초기 비용이 낮아 잦은 보수보강이 필요한 구조물의 경우(그림 (a)와 (b)) 사용수명 동안 보수횟수가 적은 구조물보다 생애주기비용이 오히려 더 증가하게 되며, 자기치유형 콘크리트 구조물의 경우(그림 (c)와 (d)) 상대적으로 초기 비용이 많이 들지만 유지보수 비용이 거의 필요하지 않아 최종적인 구조물의 생애주기비용은 감소하게 됨.



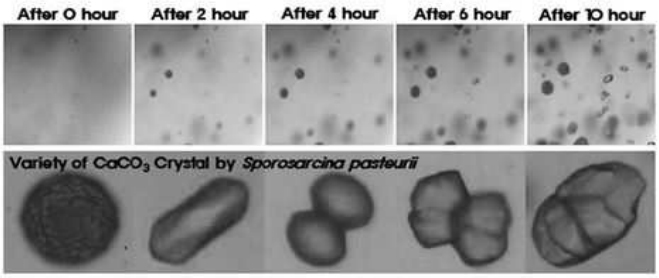
[그림 2-18] 자기치유를 고려한 Life-Cycle-Cost 모델 개념도 (Van Breugel, 2007)

▢ 현재 국내외적으로 연구되고 있는 자기치유 기술은 크게 3가지로 미생물 활용기술, 마이크로캡슐 활용기술 및 무기계 혼화재료 활용기술로 구분됨.

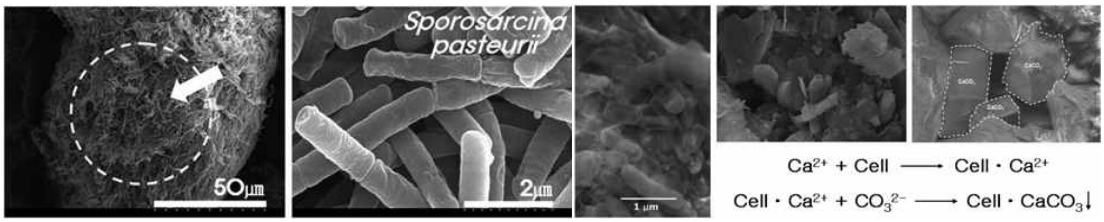
[박테리아 기술]

▢ 미생물 활용기술은 대표적으로 네덜란드 델프트 공대의 Breugel 교수 연구진에 의해 활발한 연구가 진행되고 있으며 국내에서는 경북대 김화중 교수 연구진을 중심으로 진행되고 있음.

- 미생물을 이용하여 모래의 표면에 탄산칼슘을 석출하는 기술은 지중에 매장되어 있는 석유를 효율적으로 획득하기 위해 이용되고 있는 기술에서 유래되었으며, 기본적으로 생체광물형성작용(Biomineralization)을 콘크리트 균열 보수에 활용하는 기술임.
- Sporosarcina pasteurii와 같은 미생물의 탄산칼슘 석출작용을 이용해 콘크리트에 자기치유 능력을 부여해 미세 균열 및 결함을 치유함.



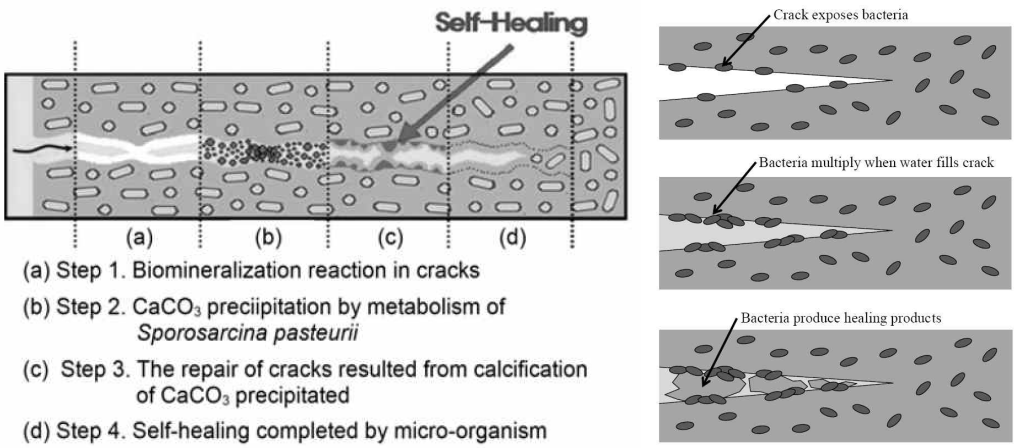
[그림 2-19] Sporosarcina pasteurii에 의한 $CaCO_3$ 결정 성장과정



[그림 2-20] 미생물을 이용한 자치치유 개념 (김화중, 2009)

[그림 2-21] 미세물을 이용한 균열 자기치유 사례 (Jonkers, 2011)

■ 탄산칼슘 석출 반응에 기여하는 미생물을 이용한 콘크리트 균열에 대한 단계별 메커니즘을 4단계로 모식화할 수 있음.

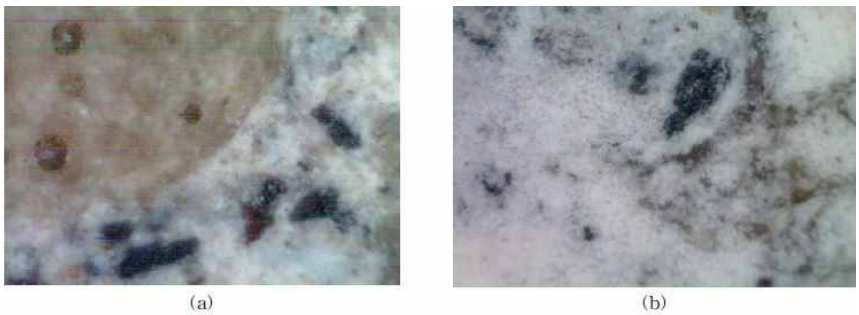


[그림 2-22] 미생물을 이용한 콘크리트 균열 치유 단계별 메커니즘 (김화중, 2009; Li, 2012)

▢ 최근 일본에서는 오존처리 시스템을 도입한 상하수 처리 시설의 고내구화를 위하여 오존의 산화분해 작용으로 인한 유기계 재료의 적용한계 및 화학물질에 대한 우려에 대응하기 위하여 미생물과 티탄공법을 융합한 자기정화용 피복공법의 검토가 진행되고 있음.

▢ 미생물 활용기술은 자연계의 유무기 복합 구조를 모방한 차세대 재료로서 각광받을 수 있지만 상대적으로 높은 pH의 콘크리트에서 활발히 활동할 수 있는 미생물 발굴 및 미생물이 보다 쉽게 미네랄(탄산칼슘 등)을 석출할 수 있는 방법을 구현하는 것이 해결해야 할 과제로 판단됨.

▢ 인산완충제를 혼입하여 수화열과 pH변화를 억제하여 미생물 성장환경을 조성한 연구도 있음. 표면 처리 기법으로 콘크리트의 표면 및 내부의 흡수율을 감소시키고, 탄산칼슘을 석출하여 미생물을 이용한 친환경 코팅기법의 가능성을 확인하기도 함.



[그림 2-23] 미생물에 의한 흡수율 감소: (a) 표면처리 전 (b) 표면처리 후

▢ 경북대 김화중 교수 연구팀에서는 미생물이 석출하는 광물을 이용해 콘크리트의 염해저항성을 증진시키는 연구를 수행함.

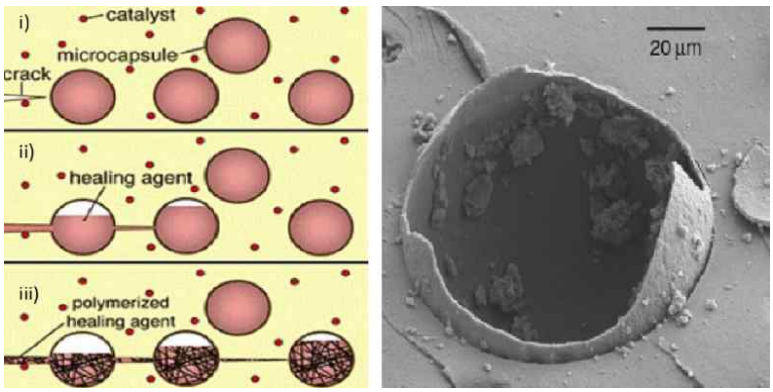
- Sporosarcina pasteurii 종외에 Calcite를 석출시키는 새로운 종류의 미생물을 발견하여 성능을 비교함(Halomonas aquamarina, Halomonas hydrothermalis 등).
- 미생물의 활동에 의한 Calcite 석출이 염해 저항성에 긍정적 영향을 미침.

[마이크로캡슐 기술]

▢ 마이크로 캡슐을 활용한 기술은 Scott White 교수(미국 일리노이 대학)가 마이크로 캡슐을 이용한 폴리머 재료의 균열 자기치유 연구를 Nature 저널에 발표하면서 관심을 갖기 시작하였으며 현재에도 활발한 연구가 진행 중임.

- 적용 원리는 코어(core)물질로서 중합성 단량체를 함유한 마이크로 캡슐을 제조하여 재료 내부에 분산시켜 균열이 발생함에 따라 캡슐이 파괴되어 중합반응을 일으켜 균열을 치유하는 방법임.
- 에폭시계 접착제를 사용하였으며, 이는 에폭시가 기계적 성질과 화학적 성질이 우수한 고분자인 동시에 점성이 낮으며 상온에서 반응이 가능함.

■ 외벽(wall)으로 균열에 반응하여 깨지기 쉬운 박벽의 고문자 캡슐 사용.

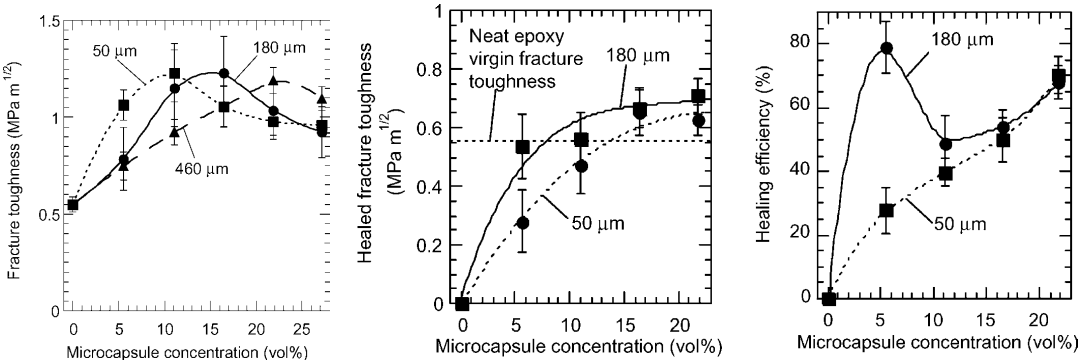


[그림 2-24] 마이크로 캡슐을 이용한 자기치유 메커니즘 (White *et al.*, 2001)

▢ 미국 Illinois 대학의 Brown *et al.* (2002)은 액상 치유제를 이용하여 일회 파손이 일어난 경우 치유 효율이 90%에 이르도록 개선하였음.

■ 요소수지 (urea-formaldehyde) 미세캡슐에 디이사이클로펜타디엔 (DCPD)을 넣고 매트릭스에 Grubbs의 루테늄 촉매를 함침시킨 에폭시를 도입하여 자기치유 고문자 복합체를 제조함.

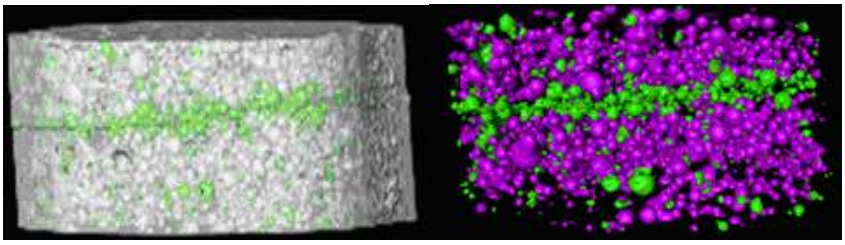
■ 에폭시에 함유된 미세캡슐의 크기와 농도에 따라 치유효과가 크게 달라짐.



[그림 2-25] 마이크로 캡슐의 역학적 자기치유 효과 (Brown *et al.*, 2004)

▢ Mookhoek *et al.* (2008)에 의하면 캡슐에 의해 균열 치유된 콘크리트 파단면을 조사한 결과 치유는 단 한번만 일어나며 치유제가 유출되어 치유가 일어나면, 그 부위에 치유제 부족 등의 단점이 있음.

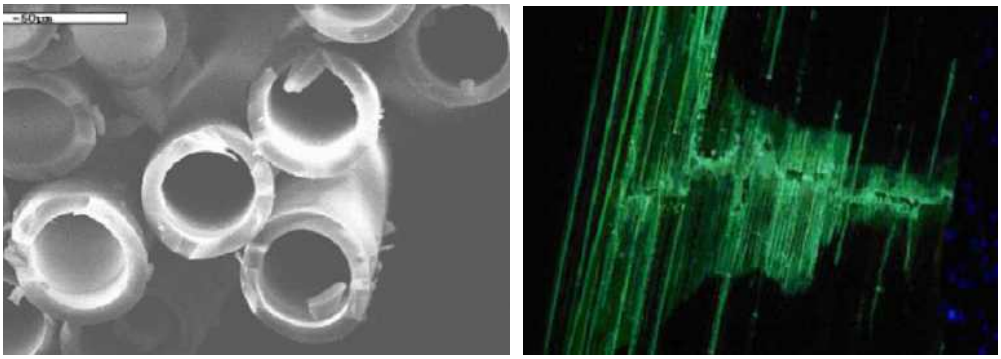
※ 즉 2액형 보수재의 반응이 치유제를 함유한 캡슐 부근에서만 일어나는 단점이 있음.



[그림 2-26] 균열 주위에 보수재 방출 후 빈캡슐이 집중된 현상 (Mookhoek *et al.*, 2004).

▢ Dry(2000), Joseph *et al.*(2007), Sun *et al.*(2011)은 Cyanoarylate(CA)를 이용하여 구형 마이크로 캡슐대신 원형 유리캡슐(Cylindrical glass capsule)을 적용하여 균열 자기치유를 실시하였으며, Li *et al.*(1998)은 다량의 PE섬유를 같이 사용하여 자기치유 효율성을 높였음.

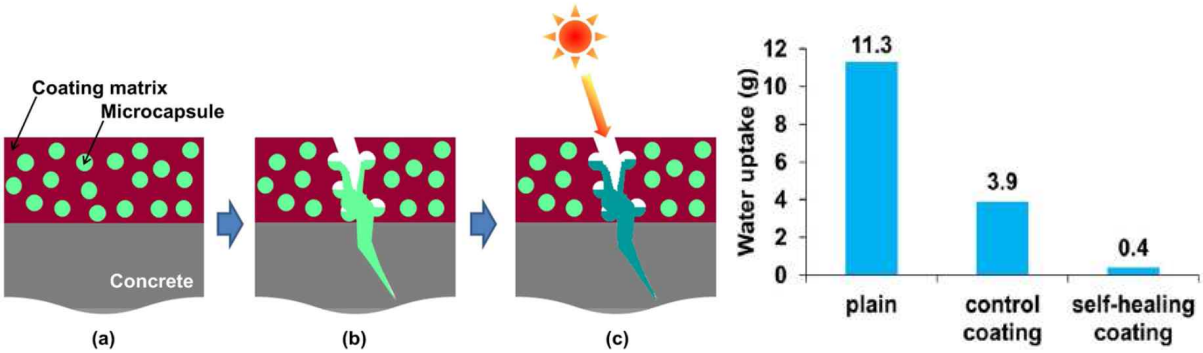
- 또한 유사한 원리로 Joseph *et al.*(2010)은 유리 튜브(glass tube)를 균열 발생위험 단면에 layer 및 grid로 설치하여 자기치유 성능을 확보함.



[그림 2-27] 중공 원형 유리섬유 및 손상 Visual enhancement (White *et al.*, 2001)

▢ 연세대학교 정찬문 교수는 한국건설생활환경시험연구원(KCL)과 공동으로 마이크로 캡슐을 활용하여 기존의 기술과는 다른 새로운 개념의 자기치유 코팅기술을 개발하였음.

- 균열치유 메커니즘은 1) 콘크리트 표면에 자기치유 코팅재를 도포한 후 균열 발생, 2) 코팅된 캡슐이 파괴되어 내부의 자기치유 재료가 균열부에 이동, 3) 특별한 촉매제 없이 태양광(UV)에 의한 Photopolymerization에 의해 경화



[그림 2-28] 마이크로 캡슐을 이용한 자기치유 메커니즘 (정찬문, 2013)

▢ Pang and Bond (2005)는 균열이나 손상이 발생한 경우 보수재료가 흘러나오는 것을 쉽게 감지할 수 있는 기능을 첨가하여 자기 진단 기능을 추가한 마이크로캡슐 활용 자기 치유 복합재료를 개발함.

▢ 원형 유리캡슐(Cylindrical glass capsule)을 적용한 경우, 균열 발생 이후에 보수재료가 완전히 빠져나오지 못하는 현상이 발견되었으며, 이에 de Rooij *et al.*(2008)은 healing agent를 coated hollow plant fibers 내부에 넣어 캡슐화하여 균열을 치료할 것을 제안함.

▢ Huang and Ye(2011)는 Na_2SiO_3 용액을 구모양의 캡슐에 넣어 자기치유를 구현하였으며, 캡슐이 파괴됨과 동시에 용액이 흘러나와 콘크리트 내부에 존재하는 $Ca(OH)_2$와 반응하여 CSH 수화물을 만들어 균열을 보수하는 원리임.

▢ Mihashi *et al.*(2000)은 균열의 치료를 위해 2액형 epoxy를 urea formaldehyde formalin (UFF) shell로 구성된 마이크로 캡슐의 내부 물질로 사용하였음.

■ 2액형 에폭시는 두 가지 재료가 방출된 후에 충분히 섞이지 않는 현상이 발생하여 충분한 경화효과가 나타나지 않는 단점이 있음.

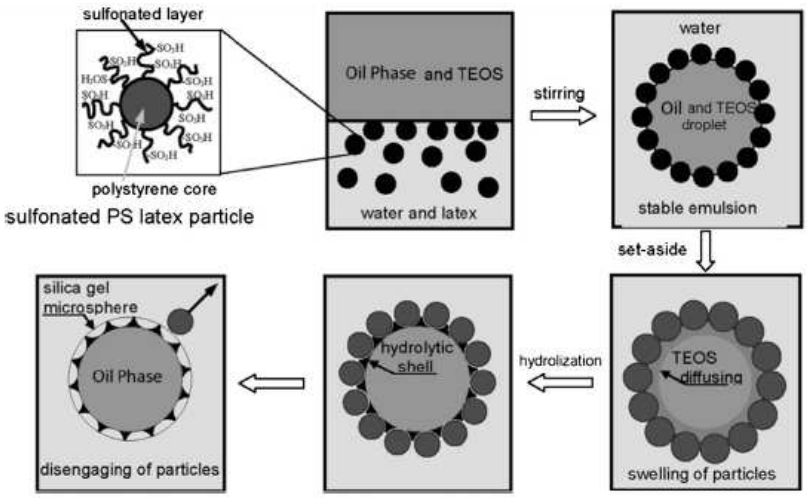
※ 에폭시의 경화작용은 상온에서도 일어나긴 하지만, 120℃의 고온에서 더 많은 역학적 장점이 있음.

▢ Kaltzakorta and Erkizia(2011)은 2액형 에폭시 수지를 보수재로 채택하였으며, 마이크로캡술의 외벽물질(wall material)을 silica 재질로 선택함.

■ 실리카 재질을 외벽물질로 마이크로캡슐에 사용할 수 있다는 결과를 보여 주었으나, 연구의 초기 단계로 그 자기 치유 효과에 대해서는 언급하지 않음.

▢ Yang *et al.*(2011)은 실리카 겔의 외벽으로 구성된 마이크로캡슐을 채용하여 보수재로는 MMA monomer와 triethylborane (TEB)를 사용하였음.

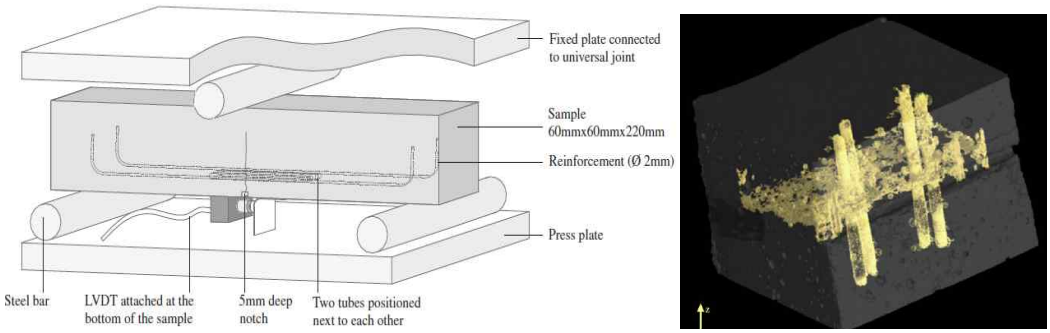
■ 모르타르에 마이크로 캡슐을 혼입하였고, 균열 후에 두 가지 성분의 보수재가 적절히 반응하여 균열면을 보수하는 결과는 보여주었음.



[그림 2-29] 실리카 겔 외벽으로 구성된 마이크로 캡슐 (Yang *et al.*, 2011)

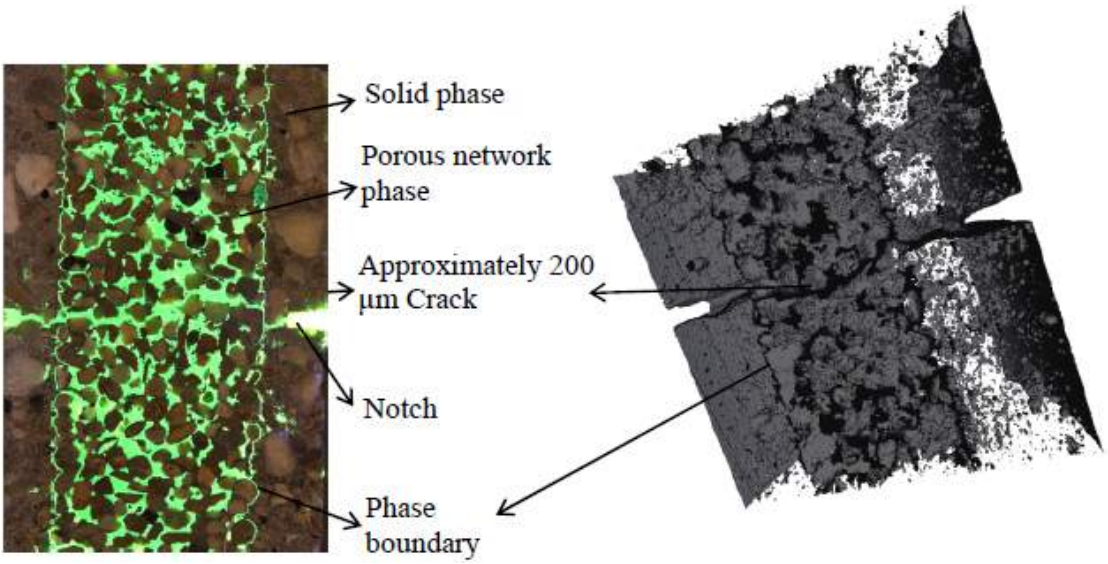
▢ Van Tittelboom *et al.*(2011)은 구형캡슐대신 두 개씩 연결된 유리 또는 세라믹 원통형 캡슐에 2액형 보수재를 충진하여 사용함.

- 2가지 성분의 보수액을 포함하는 캡슐이 인접해 있기 때문에, 보수재 두 성분의 반응도가 높아짐.
- 보수액으로는 epoxy resins, polyacrylates, polyurethane (PU) and MMA가 연구되었으며, 연구결과에 따르면 PU와 MMA를 사용한 반응이 가장 좋은 결과를 보였음.



[그림 2-30] 두개의 튜브를 가까이 위치시킨 시스템 (Van Tittleboom *et al.*, 2011)

▢ Sangadji *et al.*(2011)은 투수성이 높은 다공질 콘크리트로 만들어진 코어를 구조물 속에 매립하여 균열보수재료를 주입하는 통로로 활용하는 방법을 고안함.



[그림 2-31] 다공질 코어가 균열보수재료의 통로로 채용된 시스템(Sangadji *et al.*, 2011)

▢ 균열치유를 위한 캡슐에 사용되는 보수재료의 특성과 관련하여 Dry(1994)는 보수재료의 점도가 100 ~ 500cps 정도의 범위에서 가장 효과적인 것으로 보고함.

- 자기치유 보수재료로 자주 사용되는 CA는 10 cps 이하의 매우 낮은 점도를 가지고 있어 매크로 균열을 채우고 주변의 균열 선단의 마이크로 균열까지 치유가 가능함.

- MMA 역시 낮은 점도를 가지고 있는 보수재료 이지만, CA에 비해 느린 반응 속도를 가지고 있어, MMA는 균열 주위의 공극으로 분산되어 균열을 완전히 채우지 못하는 경향이 있음.

※ Dry and McMilan(1996)은 점도가 낮은 MMA 보수재가 균열 밖으로 흘러나오는 경향을 확인함.

▢ Van Tittelboom *et al.*(2011)은 MMA의 점성을 증가시키기 위해 poly methyl methacrylate (PMMA)를 첨가하였음.

- Epoxy 레진은 대부분 점도가 높아 균열로 침투해 들어가기에 적합하지 않아, 균열보수에는 점도를 개선하여 사용하고 있음.
- Feng *et al.*(2008)은 epoxy 수지의 점도를 조정하기 위해 희석제 화학물질 첨가하기도 함.

▢ Joseph *et al.*(2010)은 CA계 보수재료가 경화시간이 빠르기 때문에 균열이 발생과 동시에 균열을 보수하여 역학적 성능이 회복됨을 확인하였음.

- MMA나 에폭시계 폴리머 보수재료는 다소 많은 경화시간이 소요됨.

※ 에폭시계 보수재료는 균열 보수하는데 7일 정도 걸리며, 주변 온도를 60℃로 높임으로써 에폭시의 반응시간을 100분으로 단축할 수 있음.

▢ Van Tittelboom *et al.*(2011)은 팽창성이 있는 PU를 보수재로 사용하였으며, 보수재의 팽창성은 캡슐의 공극을 메우거나 보수재료가 침투하는데 도움을 줄 수 있음.

- 팽창력이 너무 클 경우 콘크리트에 인장 균열을 발생시킬 수 있으니 주의해야 하며, Sisomphon and Copuroglu (2011)는 에트린자이트 팽창에 의해 인장균열을 보고하였음.

▢ 균열폭이 일정하게 유지되는 경우가 아니고, 온도 혹은 반복하중 등에 의해서 균열폭이 변화하는 경우 보수재의 탄성이 상당히 중요한 요소임.

- 균열폭이 변화할 때 부착면이 파괴된다면 보수효과가 현저하게 낮아지기 때문에 이러한 점을 고려하여야 함.

▢ 콘크리트의 인장강도는 5MPa 보다 낮은 경우가 일반적이지만 경화한 CA의 인장강도는 20MPa이고, PMMA의 인장강도는 50~75MPa 그리고 epoxy 수지의 인장강도는 5~45MPa (Feng *et al.*, 2008) 정도임.

- 보수재료의 역할이 기존의 강도를 회복하는 것에 있다면 강성이 높은 재료를 사용하는 것이 유리하나, 보수재료의 강성이 높을 경우 부착파괴에 의해 보수된 부분이 기능을 상실할 수도 있으며, 오히려 다른 취약한 부분의 손상을 유발할 수 있음.
- Dry *et al.*(2003) 등은 탄성계수가 높은 재료를 보수재료로 사용한 경우 응력이 부재의 취약한 쪽으로 재분배되었고, 탄성계수가 낮은 재료를 사용한 경우 균열 부에 변위가 발생하였으나, 에너지 분산 측면에서는 유리한 것을 확인함.

▢ Li *et al.*(1998), Van Tittelboom and de Belie (2009) 등에 따르면 공기 경화형 CA를 사용한 경우 마이크로캡슐화 되는 과정에서 캡슐 안에 수분이나 공기 등이 같이 포함되어 보수재료가 미리 경화되어 버리는 경우가 발생함.

- 보수재료의 장기 안정성 측면에서, 두 가지 재료가 각각 다른 위치에 보관되기 때문에 2액형 보수재의 사용이 유리하며, 이때에도 각각의 보수재료의 반응성이 중요함.

▢ 자기치유 콘크리트에 사용되는 마이크로캡슐은 초기 배합 시 손상되지 않아야 하며, 경화 후 균열과 함께 파괴되어야 자기치유 성능을 발휘할 수 있음.

- 배합 시 탄력적이지만 콘크리트의 경화와 함께 취성이 되는 마이크로캡슐의 개발이 필요함 (Dry, 1994).

▢ 마이크로캡슐을 콘크리트에 혼입할 경우 강도 저하를 유발할 가능성이 있으나, Feng *et al.* (2008)의 연구에 의하면 120 μm 직경의 구형 UF 캡슐로 실험한 경우 강도저하가 발생하지 않았음.

▢ 특정 조건에서 기능을 발휘하기 위해서는 캡슐의 외벽물질은 콘크리트 또는 보수재료와 반응해서는 안됨.

- Perspex(PMMA)는 보수재료와 반응하기 때문에 외벽 재료로 부적절하였으며, PP, PU, UF, EVA, 젤라틴 등의 유기재료는 외벽재료로 적절함(Trans Diep, 2011).
- Kaltzakorta와 Erkizia(2011)는 유기계 재료 대신 실리카 캡슐을 사용하였으며, 실리카 재료가 콘크리트와 더 친화적이기 때문에 계면에서 더 나은 특성을 보일 것으로 판단함.

▢ 자기치유 효과는 내구성 측면 또는 역학적 측면의 두 가지로 살펴볼 수 있음.

- 콘크리트의 균열로 침투하는 기체나 수분의 침투를 막는다는 관점에서 자기치유는 내구성 향상에 기여할 수 있음.
- Cailleuz와 Pollet(2009), Van Tittleboom *et al.*(2011)은 유기계 보수재료를 활용한 마이크로 캡슐이 자기치유를 통해 내투수성을 회복함을 보였음.
- Yang *et al.*(2011)은 오일코어/실리카겔 외막으로 구성된 마이크로캡슐의 공기투과성을 측정하였으며, 측정결과 손상을 입더라도 약 50%의 성능을 다시 회복할 수 있음을 확인하였음.

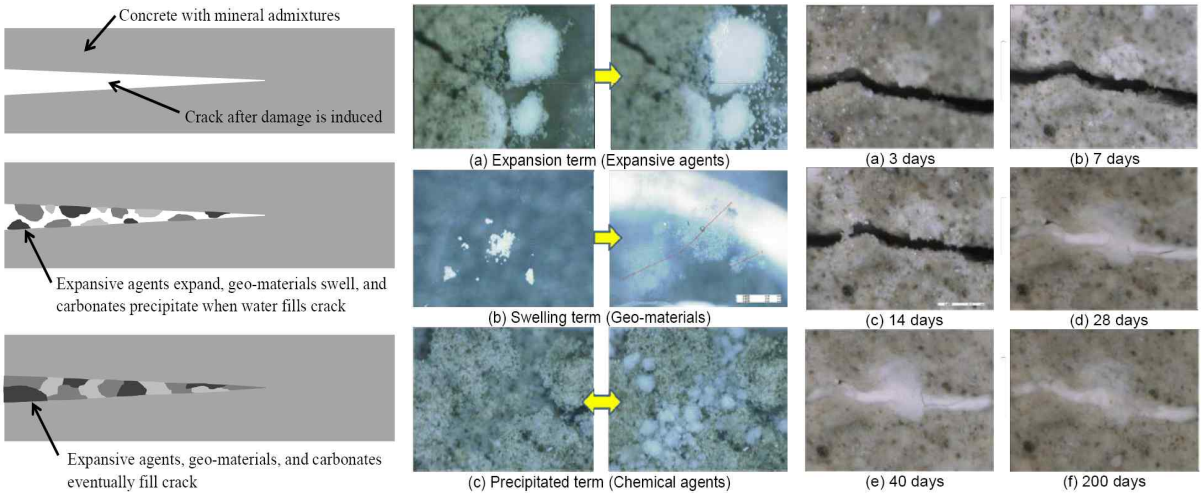
[무기계 광물질활용 기술]

▢ 동경대학교 Kish 교수팀은 시멘트 재료의 자연치유 능력을 확대하여 Expansive agent, Geo-material, Chemical agent($NaHCO_3$, Na_2CO_3, Li_2CO_3 등) 등의 무기질 혼합재료를 사용하여 콘크리트 균열부에서 Re-hydration을 촉진하여 균열을 치유하는 기술을 개발하였음.

- 2007년 동인도 철도회사에서 실제 터널공사에 성공적으로 시범적용함.

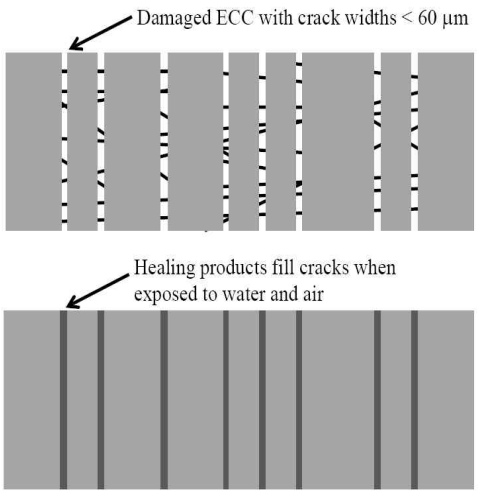
▢ Michigan 대학의 Li 교수팀은 섬유보강 콘크리트(ECC)에 대해 플라이애시 등의 포졸란 반응, 지속적인 수화반응 등을 이용하여 미세균열에 치유 성능을 확보하였음.

- 균열 폭이 100㎛ 이하의 경우 포졸란, 수화반응에 의해 시멘트계 재료 자체의 치유능력에 의해 회복이 가능함. 섬유보강 콘크리트(ECC)의 경우 외부하중에 의해 충분한 연신율을 확보하면서 균열 폭을 50㎛ 이하로 제어가 가능함.

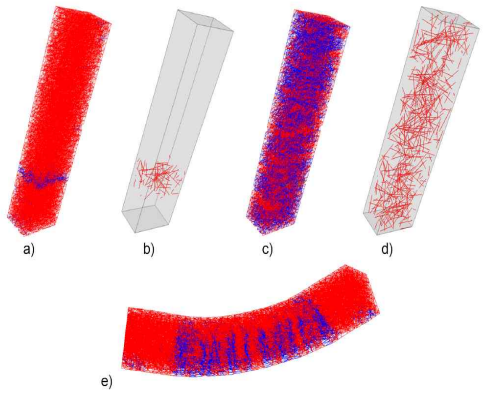


[그림 2-32] 무기질 혼합재료 활용 자기치유 (Ahn and Kishi, 2010)

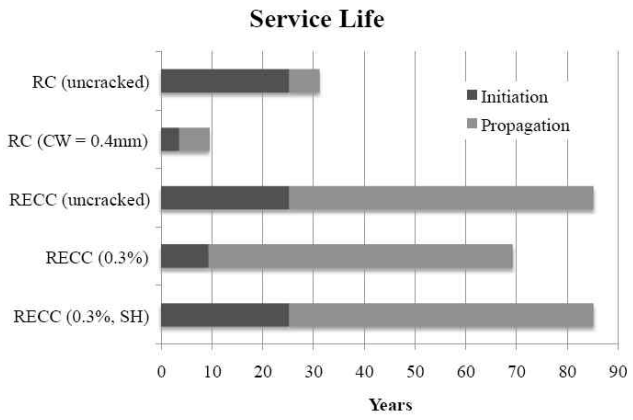
■ 또한 접착제(Ethyl cyanoacrylate)를 함유한 Brittle glass tube와 섬유를 이용한 Passive Self-Healing Engineered Cementitious Composite (PSS-ECC) 개발



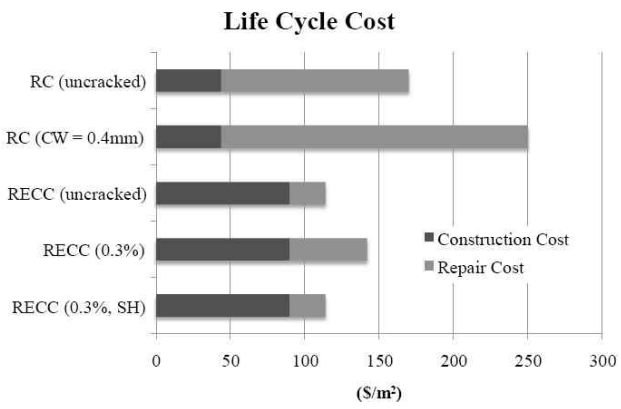
(a) Mechanism



(b) Simulations of SHCC with fiber



(c) Service Life



(d) Life Cycle Cost

[그림 2-33] ECC 활용 자기치유 (Li, 2012; Schlagen *et al.*, 2009)

[표 2-15] 자기치유 방법의 비교

구분	기술 개요	기술한계 및 추진방향
미생물 활용	▪ Bio-mineral을 만들어 내는 생체광물 형성작용(Biomineralization)을 이용 콘크리트 균열 보수 ▪ Sporsarcina Pastenrii 등의 미생물 활용 탄산칼슘을 석출하여 균열을 치유	▪ 생체광물 석출속도 증진 필요 ▪ 강알칼리 환경에서 번식 가능한 다양한 미생물 발굴 필요
마이크로캡슐 활용	▪ 콘크리트에 균열 발생 시 내부 캡슐이 파괴되면서 내부의 healing 재료가 촉매와 만나 균열을 충진	▪ 제조 비용이 높음 ▪ 콘크리트 내 분산기술 필요 ▪ 콘크리트 내부에서 장기적으로 반응할 수 있는 내구성 증진 필요
시멘트계 무기재료 활용	▪ Expansive agent / Geo-Materials / Chemical agent 등을 이용하여 시멘트계 자체의 자연치유 능력을 극대화하여 균열 치유	▪ 재료의 제한성 ▪ 치유 부위의 강도 증진 기술 필요

▢ 자기치유 콘크리트의 적용은 일반 콘크리트 구조물보다는 보수가 용이하지 않고 균열에 따른 2차 피해가 발생할 수 있는 구조물의 적용이 바람직할 것으로 판단됨.

■ 지속적인 균열피해가 발생하는 교량, 도로, 지하철, 철도시설 등과 같은 사회 인프라 구조물과 균열 누수 빈도가 잦은 지하시설물, 하수암거, 전력구, 통신구나 원전구조물, LNG 구조물, 해양구조물, 발전소 등에서의 우선적용이 바람직함.

▢ 자기치유 콘크리트 기술은 현재까지 상용화에는 기술적 한계점이 있어 연구개발이 더 필요한 분야로 판단되지만, 국내를 포함하여 미국, 유럽, 일본 등지에서 고도 성장기에 제작되어진 콘크리트 구조물의 유지보수 비용이 증가함에 따라 효율적인 보수 공법이 요망되는 시점에서 자기치유가 가능한 콘크리트는 Maintenance-Free 재료로 활용될 것으로 판단됨.

▢ Cowi는 박테리아 활용 자기치유 콘크리트를 실제 터널 공사에 적용하였음.

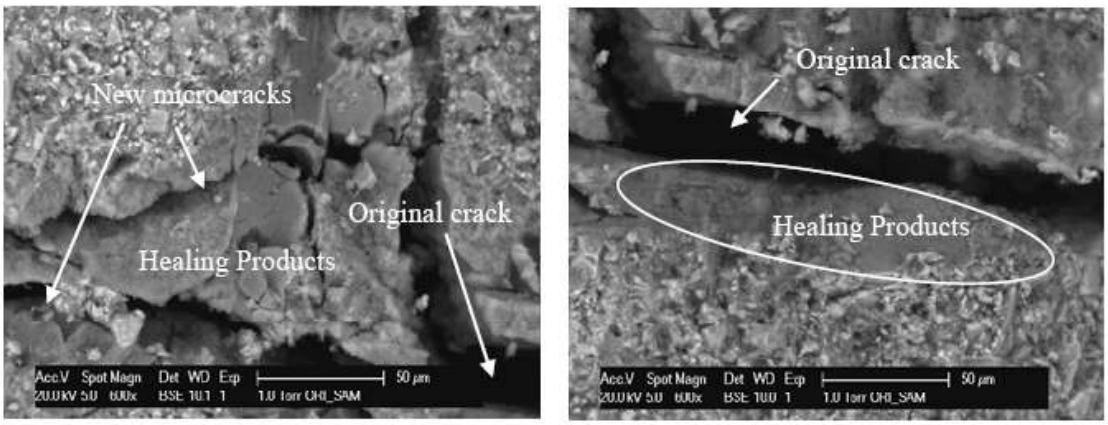
■ 이 기술은 콘크리트 내부에 limestone-producing bacteria를 활용하여 구조물의 사용수명을 증가시키고자 하였음.

■ 이 현작적용은 EU의 재정지원을 받는 healCon-project의 일환으로 수행되었으며, Cowi의 Edvardsen은 유지관리 비용을 2%까지 감축할 수 있을 것으로 주장하였음.

[그림 2-34] 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 현장적용

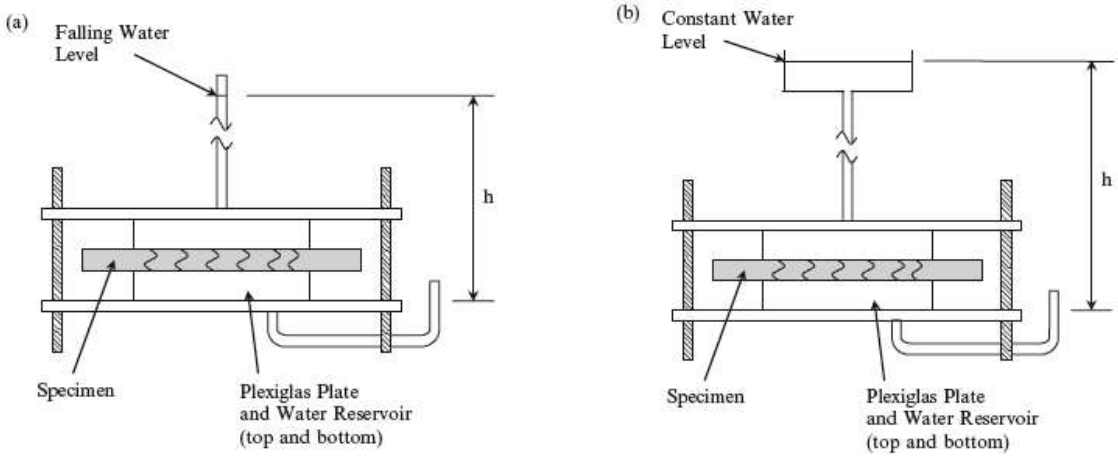
▢ 현재까지 자기치유 콘크리트에 대한 성능 평가는 대부분 (1) SEM, image analysis, X-ray 등을 통해 균열 부위에 새로운 수화물 생성 정도를 관찰(visualization)함으로써 정성적으로 판단하거나, (2) 투수성, 염소이온 확산시험 등을 통해 간접적으로 내구성(durability, crack tightening) 향상을 판단하거나, (3) 일축인장, 휨 실험 등을 통해 단편적으로 역학적 물성(mechanical properties)의 복원 정도를 평가하고 있음 (Van Tittelboom and Belie, 2013).

■ 대표적인 미세구조 분석기법으로써 환경주사 전자현미경(environmental scanning electron microscopy, ESEM)과 표면화학분석(surface chemical analysis, XEDS) 기법을 자기치유 물질의 화학적 구성요소, 특성과 형태를 분석하기 위해 사용함.



[그림 2-35] 미세구조 분석을 통한 정성적 자기치유 성능 평가 방법 (Huang and Ye, 2011)

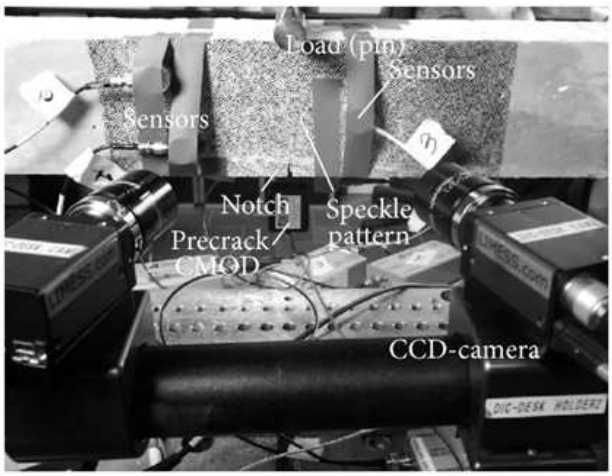
■ 내구성에 관해서는 많은 연구자들이 시간에 따른 투수계수 등의 콘크리트 물질이동 특성(transport properties)의 변화를 계측함으로써 균열치유(crack tightening) 진행 과정을 간접적으로 확인함. (a) 변수위 투수실험(falling head test) 또는 (b) 정수위 투수실험(constant head test)을 사용함.



[그림 2-36] 투수실험을 통한 자기치유 성능 평가 방법

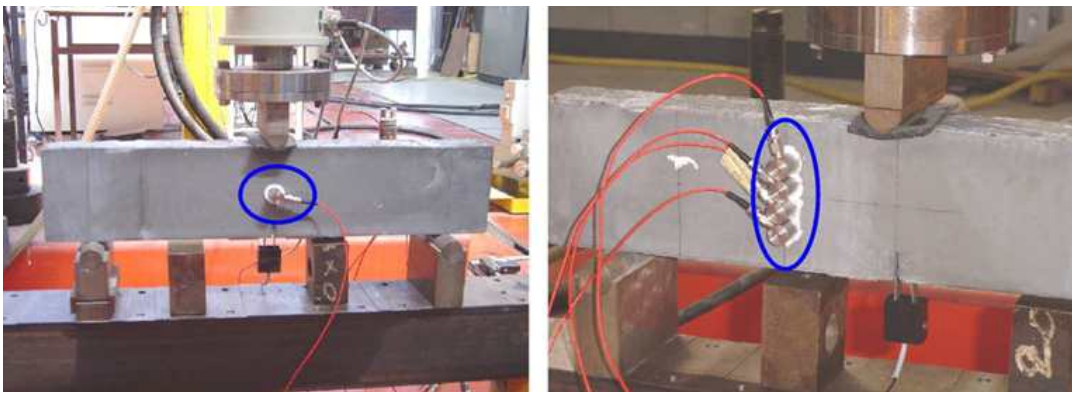
- 인장 변형경화(strain hardening) 특성을 보유한 고인성 시멘트 복합체의 경우, 통상적으로 반복적인 일축인장실험을 통해서 자기치유에 의한 역학적 물성의 회복 정도를 평가함 (Yang *et al.*, 2011). 초기 인장력을 가하여 균열을 발생시킨 후 치유 환경에 노출시킨 다음, 인장 강도, 강성, 변형률의 회복 정도를 분석함.
- 세계 각국의 여러 연구자들이 자기치유 콘크리트의 성능 복원 정도를 평가하는데 각기 다른 방법을 활용하기 때문에, 개발 중인 다양한 자기치유 콘크리트 기술들에 대한 상호 비교 평가가 어려움 (Van Tittelboom and Belie, 2013).
- 따라서 개발 중인 콘크리트의 자기치유 성능 평가를 위한 표준 실험방법 및 성능기준의 정립이 필요함.

▢ 현장적용 후 효율적 관리를 위해, 구조물의 사용중단 없이 안전진단 및 자기치유 성능 평가를 수행해야 하므로, 첨단기술을 활용한 비파괴 검사(Non-Destructive Testing) 기법 개발이 필요함.



[그림 2-37] Acoustic Emission을 통한 자기치유 성능 평가 방법 (Tsangouri *et al.*, 2013)

- 최근 들어, 자기치유 성능 평가를 위해 ultrasound, acoustic emission(AE), time reversal technique 등 초음파의 특성을 활용하는 비파괴 실험 기법들이 연구되고 있으나, 매우 기초적인 수준에 머물러 있어 균열 치유 정도를 정량적으로 평가하지 못함(Van Tittelboom *et al.*, 2012; In *et al.*, 2013; Granger *et al.*, 2009).
- 몇몇의 연구자들은 공진주파수(resonance frequency) 또는 동탄성계수(dynamic modulus) 측정법(Yang *et al.*, 2011)과 펄스반사법을 활용해 자기치유 콘크리트의 성능 평가를 시도함. 동적계수 측정법은 강성을 평가하는데 효과적이지만, 성능 복원의 직접적인 원인을 규명하기 어려움.
- 미국 미시간대학교의 Li 교수팀의 연구(Yang *et al.*, 2009, 2011)에 따르면, 비파괴 검사 중 하나인 공진주파수 분석(resonance frequency analysis)을 통해서 자기치유 콘크리트의 성능 복원에 의해 구조물의 강성이 손상 이전과 가까운 상태로 회복되는 것을 확인함.

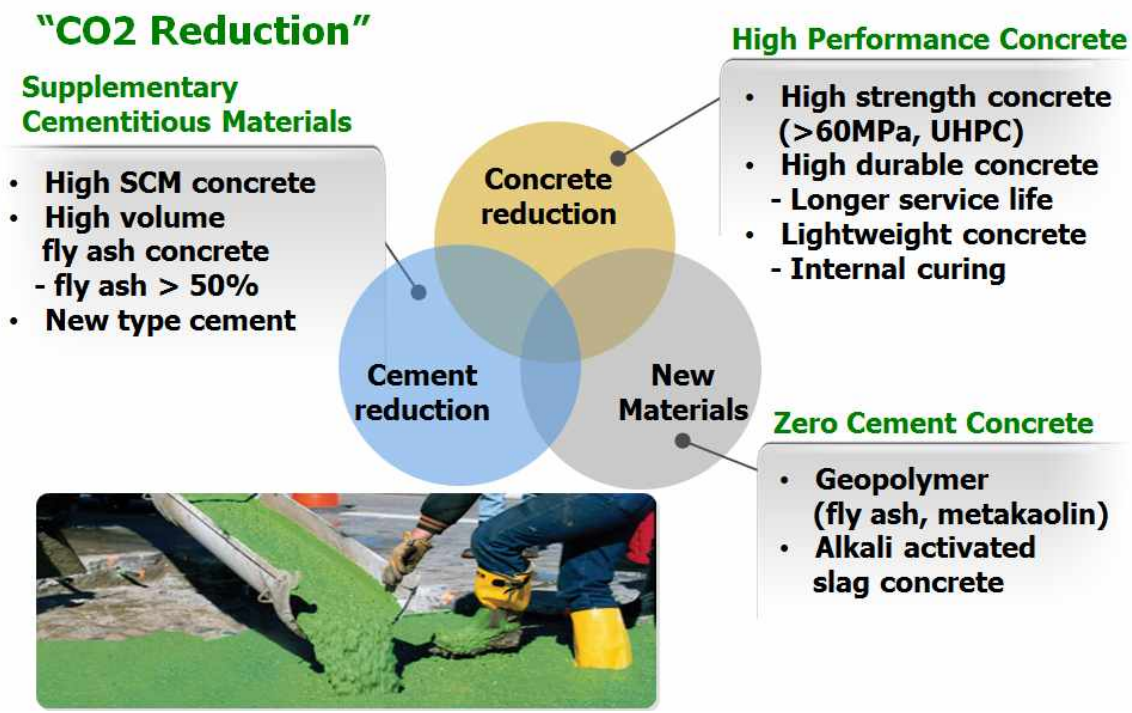


[그림 2-38] Time Reversal 기법을 통한 자기치유 성능 평가 방법 (Granger *et al.*, 2009)

(2) 친환경 콘크리트

▢ 최근 까지 온실가스 저감을 위한 친환경 콘크리트는 크게 3분야로 진행되고 있음.

- 고성능화를 통한 구조물 단면 및 유지관리 감소에 의한 콘크리트 전체 사용량 감소
- 클링커의 사용량 감소, 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등 혼합재료를 다량 사용에 의한 온실가스의 주요 요인인 시멘트의 사용량 감소
- 시멘트를 전혀 사용하지 않는 새로운 콘크리트의 사용



[그림 2-39] 친환경 콘크리트 기술분류

▢ 시멘트 제조 시 발생하는 CO_2는 우리나라 전체 CO_2 배출량의 약 7%에 해당하며, 콘크리트 제조 및 타설 까지를 고려하면 그 비율은 약 10%까지 증가함.

- 콘크리트는 1㎥ 제조 시 CO_2 배출량은 약 340kg이며, 이중 시멘트와 관련된 CO_2 배출량이 약 80% 이상으로, 시멘트 사용 저감을 위한 기술개발이 필수적으로 요구됨.

▢ 미국 및 유럽에서는 탄소저감에 대한 규제 및 환경설계법의 개발과 함께 친환경 콘크리트의 실용화가 정부 주도하에 체계적으로 이루어지고 있음.

▢ 선진국을 중심으로 CO_2 저감을 위한 혼화재료 활용이 활발하여, High volume slag 및 ash 활용기술 연구수행, 또한 건축물의 대형화, 고강도화 및 부재절감 차원에서 고강도, 고기능 콘크리트 등 특수 기능의 콘크리트 수요가 증가함.

- 특히 시멘트량 감소 및 혼화재 대량사용 기술이 시장을 선도할 것으로 예측됨.
- 향후 콘크리트 시장은 CO_2 저감과 고기능성 기술을 접목한 콘크리트 기술이 시장을 선도할 것으로 예상됨.

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

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

※ 비시멘트 콘크리트(HVSCM) : 시멘트의 사용량을 줄이고 플라이애시 및 고로슬래그 미분말 등의 콘크리트 혼화재료를 사용량을 대폭 증가시킨 콘크리트

※ 무시멘트 콘크리트 : 시멘트를 전혀 사용하지 않고 알칼리 활성화제를 통해 고로슬래그 미분말 또는 플라이애시 등의 알루미노-실리케이트 재료만을 사용하는 콘크리트

▢ 국내에서는 민간기업 및 연구소를 중심으로 기술의 홍보차원의 친환경 콘크리트 기술개발이 많이 이루어짐.

- ㈜삼표는 2013년 연구소에서 프리캐스트 콘크리트 제작 시 사용되는 시멘트의 양을 산업부산물로 50% 이상까지 대체할 수 있는 신기술을 최근 개발함.

※ 기존 프리캐스트 콘크리트 기준 강도인 28일 경과 시 측정강도(50MPa)와 비교할 때 산업부산물을 적용하고도 14시간 만에 기준 강도의 60% 수준(30MPa) 이상의 강도를 발현할 수 있는 기술임.

- 포스코 건설은 국내 최초로 70MPa 이상 고강도 콘크리트의 필수소재인 실리카퓸 등을 대체하는 배합설계기술을 적용하였음.
- 극동건설은 아주산업과 공동으로 플라이애시, 고로슬래그 미분말을 이용하여 시멘트 사용량을 기존 제품의 절반수준으로 줄인 친환경 콘크리트를 개발하였음(2012년).

※ 이산화탄소 발생 저감뿐만 아니라 압축강도증진 및 수화균열 저감에 효과적임.

※ 파주에 있는 웅진스타클래스 아파트 신축공사 현장에 적용함.

- 롯데건설은 아세아시멘트와 공동으로 시멘트의 사용량을 20~30% 감소시키고 새로운 혼화재인 '에코멘트'를 혼입한 친환경 '에코 콘크리트'를 개발하였으며, 특허 출원을 완료하였음.

※ 에코멘트는 시멘트 제조공정에서 폐기되는 높은 분말도의 미세입자와 고로슬래그 미분말을 이용하여 제조

※ 탄소배출량 감소, 품질향상 및 비용절감효과(기존 시멘트 10% 정도 강도증가 효과)

[HVSCM 콘크리트]

▢ 2008년도 콘크리트 표준시방서에서 고유동 콘크리트에 대한 규정이 신설됨에 따라 30% 이내의 Fly ash를 사용한 고유동 콘크리트에 대한 연구 및 현장적용 실적이 보고되고 있으나 30% 이상의 HVFA 고유동 콘크리트에 대한 연구는 조기강도 저하 및 점성 증가 등의 문제점이 발생하여 실용화되고 있지 않은 단계임.

■ 치환율이 높을수록 콘크리트의 조기강도가 감소하는 경향을 보이며, 이로 인해 현장 콘크리트의 공기 단축 등에 문제점이 있어 실용화가 어려운 실정으로 조기강도발현 기술의 확립은 실용화를 위한 핵심기술로 판단됨.

▢ 초기강도 개선을 위한 연구가 Dodson, Berry 외 다수의 연구자들에 의해 수행되었으며, 혼화제(Calcium chloride, Sodium gluconate)에 따라 에트린가이트 및 C-S-H 겔이 초기에 다량 생성되어 초기강도에 효과적임을 입증함.

※ 또한 초유동화제의 사용을 통한 물-결합재비의 감소를 통한 고강도화 연구도 수행되었음(Tarrun, Malhotra, Sivasundaram 외 다수).

▢ HVFAC는 1987년 캐나다 Communication Research Centre에 처음 적용된 이후 현재까지 여러 구조물에 적용되었으며, 특히 HVFAC 적용 시 클링커지수(Clinker factor)를 도입하여 시멘트 절감량을 정량화하고 이를 통한 CO_2 저감량을 수치화함으로써 친환경적인 콘크리트임을 더욱 강조하고 있음.

▢ 국내에서 고로슬래그 미분말을 대량 치환(60%~80%)한 콘크리트에 대한 연구는 포스코, 포스코 건설을 중심으로 수행되었음.

▢ 한국건설생활환경시험연구원(KCL)에서는 철도기술연구원과 공동으로 고로슬래그 미분말을 약 80%까지 치환한 고성능 콘크리트 배합기술 연구를 수행하고 있음.

※ 콘크리트 압축강도 28일 기준 80MPa 이상급

(a) CITRIS Bldg. Univ. of California, Mat foundation(2007), FA 50%

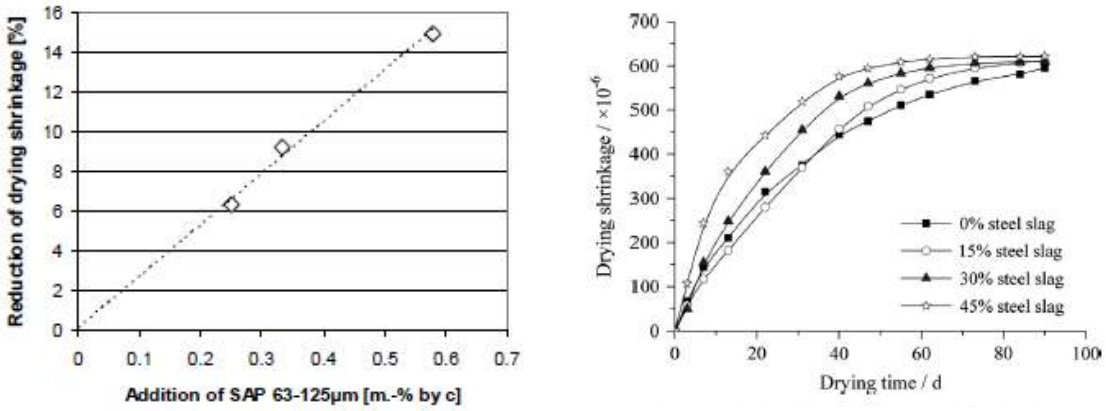
(b) Courthouse Concrete Footing, Canada, FA 50%

[그림 2-40] 친환경 콘크리트 적용 사례

▢ 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 수축 저감을 위해 Snoeck(2012)외 다수의 연구자들에 의해서 수행되었으며, SAP(super absorbent polymer), MgO-CaO, lignosulphonate, fibres 그리고 steel slag 등의 사용으로 자기수축 및 건조수축이 감소됨을 실험적으로 입증함.

▢ 고로슬래그 다량 치환 콘크리트는 조기강도 발현의 문제점으로 실제 건설현장에서 시공성 저하로 활용되지 않고 있음. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Khatib *et al.*(2005)은 알칼리 활성화제(alkali activator), 메타카올린(metakaolin) 및 ZrO_2와 같은 재료를 사용하였으며, 조기강도의 증진 및 응결시간(setting time)의 감소를 실험적으로 확인하였음.

- Nazari(2011)의 연구에 의하면 나노사이즈 크기를 갖는 ZrO_2는 수화반응 초기 C-S-H겔 및 $Ca(OH)_2$형성을 가속화시켜 조기 강도가 증진된다는 것을 입증함.
- Guneyisi(2007)는 메타카올린이 고로슬래그 다량 치환 콘크리트에 미치는 영향을 분석한 결과 조기강도 증진뿐만이 아니라, 건조수축을 줄여주는 역할을 한다는 것을 실험적으로 확인하였음.

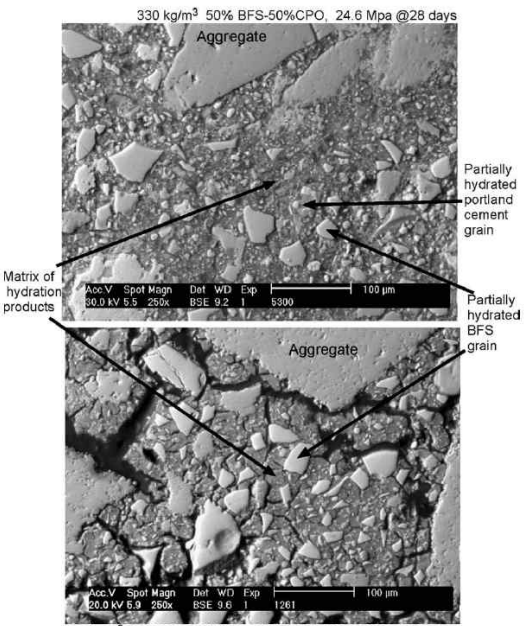


(a) SAP의 사용량에 따른 건조수축의 감소 (b) steel slag 양에 따른 건조수축의 감소

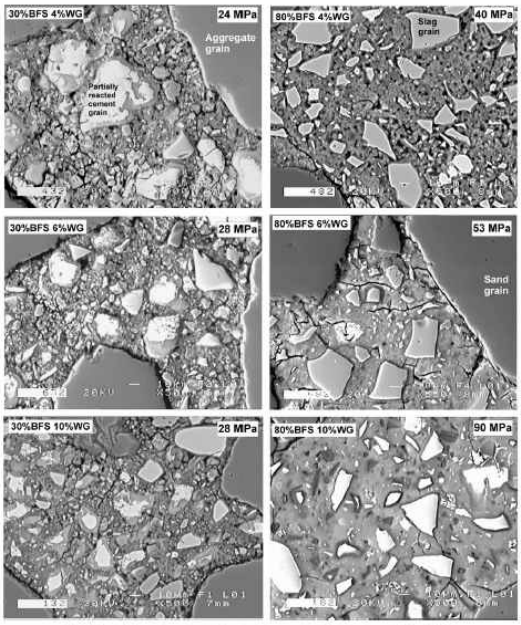
[그림 2-41] 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 건조수축 감소 효과

▢ Huang, Snoeck외 다수의 연구자들은 고로슬래그 다량 치환 콘크리트가 자기치유 효과를 나타내게 하기 위해 SAP, 포화 수산화칼슘($Ca(OH)_2$) 수용액, 마이크로섬유(microfiber) 등을 사용하였음.

- Snoeck(2012)은 고흡수율 폴리머와 마이크로섬유를 사용하여 콘크리트의 자기치유 성능에 대한 연구를 수행하였으며, SAP와 마이크로섬유를 함께 사용한 경우 자기치유 성능을 증대할 수 있는 결과를 도출하였음.
- 일부연구자는 표면강화 특수첨가제를 균열부에 주입을 해 calcium hydroxide와 함께 화학적인 반응을 통해 보호층을 생성하는 것을 실험적으로 입증하였음.



(a) Na_2O를 이용한 alkali activated blast furnace slag 콘크리트의 미세구조

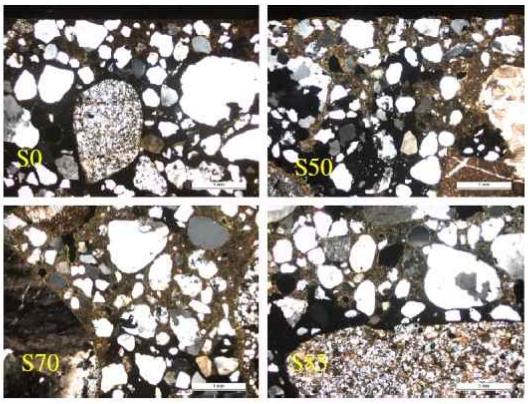


(b) 슬래그 양과 activator의 양에 따른 콘크리트의 미세 구조

[그림 2-42] 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 activator에 따른 콘크리트의 미세구조

▢ 하이볼륨 SCM 콘크리트의 탄산화 저항성능을 높이기 위해 연구자들은 여러 가지 방법(양생방법, 알칼리 활성화제, 특수첨가제 등)을 적용하였음.

- Bilim(2012)은 물유리(liquid sodium silicate)를 사용한 SiO_2/Na_2O 비율이 2인 알칼리 활성화제를 적용하여 하이볼륨 SCM 콘크리트의 탄산화 깊이를 줄였음.
- Younusu(2013)는 양생방법 및 클링커의 양을 조절하여 하이볼륨 슬래그 콘크리트의 탄산화 깊이를 줄였음.



(a) Slag양의 증가에 따른 탄산화

(b) 특수첨가제를 적용Na-MFP 용액을 이용한 scaling 감소

[그림 2-43] 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 탄산화 및 scaling 특성

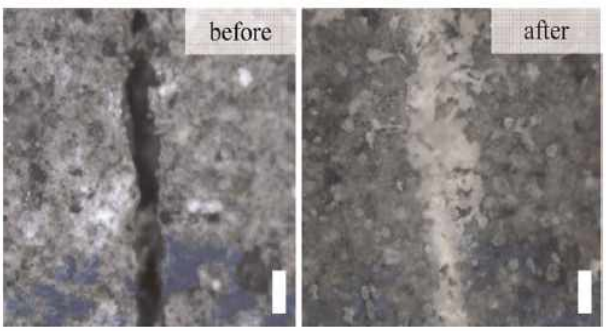
▢ Krizan, Zivica외 다수의 연구자 들은 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 물리적 특성을 개선시키기 위해 sodium hydroxide, potassium hydroxide, 그리고 sodium silicate 등의 알칼리 활성화제 및 물유리, sodium metasilicate를 사용하였음.

- Sajedi(2010)는 여러 종류의 알칼리 활성화제를 사용 조기강도 향상에 대한 연구를 수행한 결과 sodium silicate를 이용한 경우 조기강도가 가장 높게 증진되었으며, sodium hydroxide를 이용한 시편은 조기강도 증진에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났음.
- Zivica(2006)은 실리카퓸과 알칼리 활성화제를 사용 고로슬래그 다량 치환 콘크리트의 물리적 특성을 개선하였음.

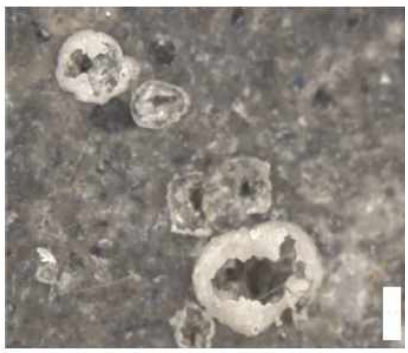
▢ 또한 하이볼륨 SCM 콘크리트에 대해 실리카퓸, polypropylene fibres 및 기타 혼화재료를 사용 철근의 부식, 탄산화 및 frost salt scaling durability 저항성을 높였음.

- Kayali and Agnes(2005)는 하이볼륨 고로슬래그 콘크리트의 철근 부식을 억제하기 위해 연구를 수행하였음.

▢ 콘크리트에 발생한 균열을 차단하는 방법으로 Belie(2012)는 SAP와 Microfibres를 복합적으로 이용한 연구를 수행하였으며, 복합적으로 사용했을 때 시멘트계 합성 재료의 자기치유에 큰 효과가 있음을 입증하였음.



(a) SAP를 첨가한 시편의 자기치유



(b) SAP 수축 후 $CaCO_3$ 생성

[그림 2-44] SAP를 이용한 자기치유 효과

- 콘크리트 균열 발생 후 수화되지 않은 시멘트 입자가 균열 사이로 들어온 물과 반응해 C-S-H의 생성 및 $CaCO_3$의 침전이 발생하게 되며 이러한 생성물들이 균열을 차단하게 됨.
- Edvardsen(1999)는 $CaCO_3$ 침전을 통한 자기치유에 대한 연구를 수행하였으며, 물의 pH에 따른 $CaCO_3$ 침전은 아래 화학식을 통해 발생하게 되는데, 이러한 자기수축치유(autogenous crack healing)가 발생하기 위해서는 3가지 조건이 충족되어야 함.

> Self-healing 3가지 조건 : Ca^{2+} 및 CO_2 이온의 존재, 습윤한 환경에 노출, 균열
>
> $8 > pH_{water}$ $\quad Ca^{2+} + CO_2 + 2OH^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O$
>
> $7 < pH_{water} < 8$ $\quad Ca^{2+} + HCO_3^- \rightarrow CaCO_3 + H^+$

※ 상기 반응에서 결정체는 수용액의 종류와 관계없이 균열의 폭과 압력에 많은 영향을 받음.

▢ Yang(2008)은 microfibres를 이용한 콘크리트의 균열 폭에 따른 자기치유에 대한 연구를 수행하였으며, microfibres를 이용한 콘크리트는 균열 폭이 큰 경우에도 자기치유효과가 있는 것을 확인하였음.

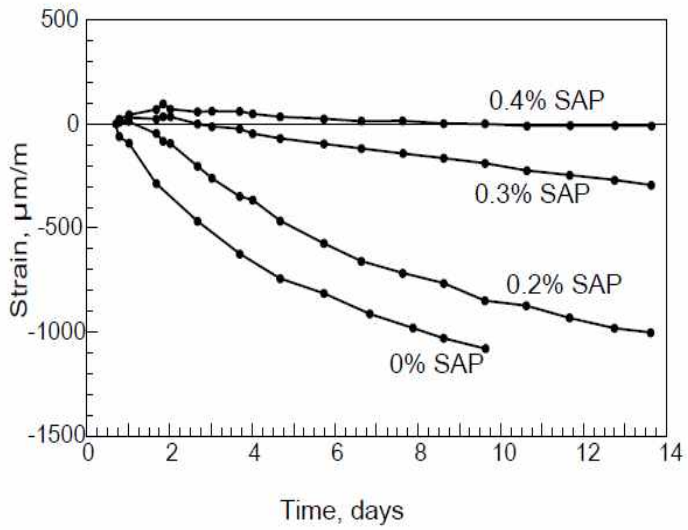
■ Kim(2011)은 SAP를 이용한 콘크리트 균열의 내부치유에 대한 연구를 수행하였으며, 그 효과를 실험적으로 규명하였음.

▢ SAP를 첨가한 콘크리트의 여러 가지 물리적 특성을 살펴보기 위해 Jensen(2013)외 여러 연구자들은 여러 가지 실험을 통해 물리적 특성을 입증하였음.

■ 일반적으로 SAP는 콘크리트 내부에 공극 생성으로 압축강도 및 인장강도가 감소를 발생시키나, w/c 비가 낮은 경우에는 SAP를 통해 축적된 물이 내부양생(internal curing)효과를 나타내고 시멘트 입자의 추가적인 수화반응이 발생함.

※ w/c 비가 높은 경우에는 SAP에 의한 추가적인 수화반응의 영향이 적기 때문에 강도 감소.

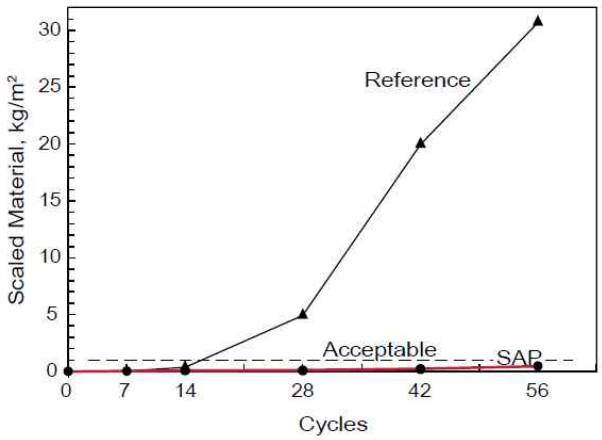
■ 시멘트 페이스트에서 SAP의 양이 증가 할수록 자기수축이 감소하게 되며, 자기수축의 감소로 인해 시멘트 페이스트 내부 구속응력이 감소하게 되며 결국 균열이 발생하지 않거나 기준 시편에 비해 적게 발생하는 결과를 나타냄.



[그림 2-45] 물-시멘트 비 0.3인 시멘트 페이스트의 SAP 함량에 따른 자기수축

■ Song(2008, 2013)은 super-absorbent resin을 콘크리트에 주입해 sulfate resistance를 향상 및 철근 부식을 감소시킬 수 있음을 실험적으로 증명하였음.

■ 시멘트가 수화되는 동안 SAP는 수축하여 가스로 채워진 공극을 생성하게 되는데, 이러한 공극이 콘크리트의 동결융해로 인한 콘크리트 파손을 줄여주는 역할을 하게 됨. SAP의 종류와 양을 조절함으로써, 경화된 콘크리트의 공기량 조절, air bubble의 size 등을 조절할 수 있음.



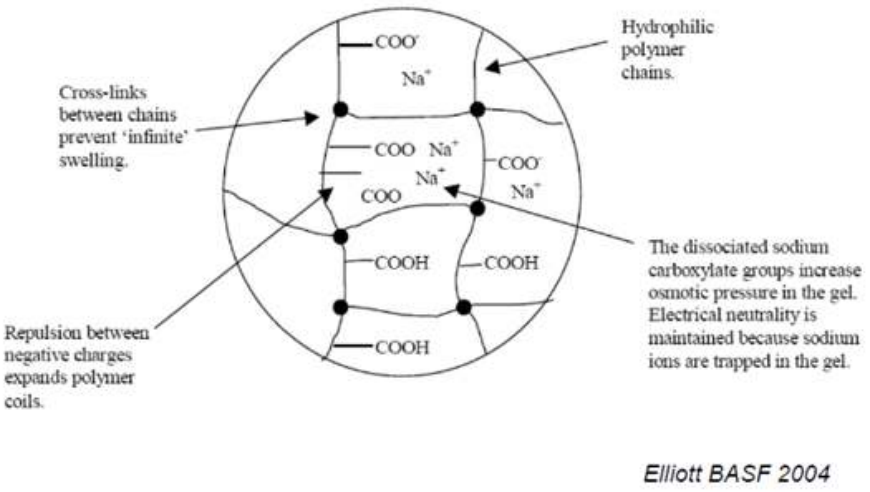
[그림 2-46] 동결융해에 의한 콘크리트의 손상

▢ SAP는 물을 흡수하는 특성이 있기 때문에 배합설계 시 추가적인 물이 없으면, fresh concrete의 rheology에 변화가 생김. 그렇기 때문에 실제 콘크리트 타설 시 요구 슬럼프를 맞추기 위한 화학혼화제의 첨가 또는 배합표의 수정이 필요함.

▢ Belie(2012)는 용액의 종류에 따른 SAP의 swelling ratio를 평가하기 위해 아래와 같은 용액을 사용하였으며, 탈 이온수(deionized water) > 수돗물(tap water) > NaOH solution > Cement slurry > seawater > HCI solution > Dynamic vapour sorption과 같은 순서대로 swelling ratio가 변하는 것을 실험적으로 입증하였음.

- SAP의 swelling ratio는 용액의 pH와 이온의 농도에 큰 영향을 받음. pH가 높을수록, 용액에 이온의 농도가 낮을수록 SAP의 swelling ratio가 증가하게 됨.

▢ SAP가 물과 만나 팽창을 하게 되는 원리는 다음과 같음. 가교결합을 통해 연결된 고분자들 사이에 Na^+와 같은 이온 분자들이 붙어 있는 형태임. 이때, Na^+와 같은 이온분자들이 물을 끌어당기며, 가교결합을 통해 연결된 고분자의 사슬이 물을 가두는 틀을 형성하게 됨.



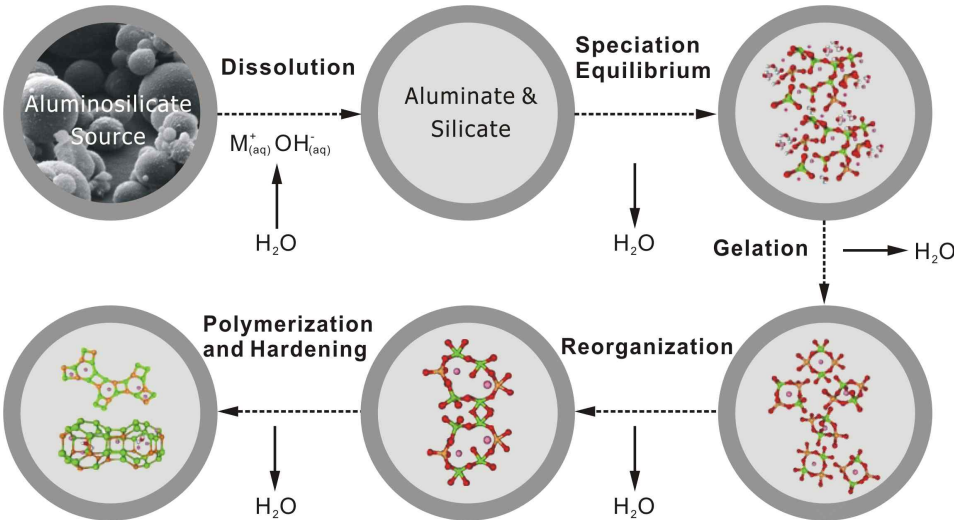
[그림 2-47] SAP의 구조 및 swelling 메커니즘

[무시멘트 콘크리트 관련 기술동향]

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

- 1980년대 중반에서 1990년 중반까지 러시아, 우크라이나 등 동유럽에서 20층 이상의 고층 빌딩에 고로슬래그 다량 사용 콘크리트를 적용한 사례가 있음.
- 2001년 미국에서는 'Vision 2030: A Vision for the U.S. Concrete Industry'에서 친환경 콘크리트를 제조하기 위한 계획을 발표하면서 본격적인 연구를 시작하였고, 호주에서는 2001년부터 'Low-Calcium Fly-Ash Based Geopolymer Concrete' 프로젝트를 시작으로 무시멘트 콘크리트 개발, 제조, 활용기술 개발에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있음.

▢ 알칼리 활성 시멘트의 뛰어난 내구성능과 환경성능으로 Krivenko(1997)는 산업분야의 다양한 방면(Transportation, Industrial, Agricultural, Residential, Mining, Oil well cement)으로의 적용 가능성을 제시하였으며 특히, 유해물질 고정화, 방사능 폐기물을 포함한 폐기물관리 분야에 활용 가능성이 높을 것으로 보고함.



[그림 2-48] 무시멘트 콘크리트의 반응 메커니즘

▢ 기존 강알칼리 계열의 자극제(Na_2SiO_3, NaOH 등)를 사용한 AAS 콘크리트는 급결 현상과 P.C. 계열의 고성능 감수제의 적용 불가로 인해 콘크리트 제조 시 유동성 확보가 문제되었지만, 전남대(2012)에서 수산화칼슘 기반의 활성화제의 조합을 통하여 AAS 콘크리트 유동성능을 개선하여 고유동 자기충전 콘크리트를 개발함.

- 하지만 슬럼프 손실 등 추가적으로 해결해야 할 문제가 있는 것으로 판단됨.

Author	Year	Significance
Feret	1939	Slags used for cement.
Purdon	1940	Alkali–slag combinations.
Glukhovsky	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements.
Glukhovsky	1965	First called "alkaline cements".
Davidovits	1979	"Geopolymer" term.
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized.
Forss	1983	F-cement (slag–alkali–superplasticizer).
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized.
Davidovits and Sawyer	1985	Patent of "Pyrament" cement.
Krivenko	1986	DSc thesis, R_2O–RO–SiO_2–H_2O.
Malolepsy and Petri	1986	Activation of synthetic melilite slags.
Malek et al.	1986	Slag cement-low level radioactive wastes forms.
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared.
Deja and Malolepsy	1989	Resistance to chlorides shown.
Kaushal et al.	1989	Adiabatic cured nuclear wastes forms from alkaline mixtures.
Roy and Langton	1989	Ancient concretes analogs.
Majundar et al.	1989	$C_{12}A_7$–slag activation.
Talling and Brandstetr	1989	Alkali-activated slag.
Wu et al.	1990	Activation of slag cement.
Roy et al.	1991	Rapid setting alkali-activated cements.
Roy and Silsbee	1992	Alkali-activated cements: an overview.
Palomo and Glasser	1992	CBC with metakaolin.
Roy and Malek	1993	Slag cement.
Glukhovsky	1994	Ancient, modern and future concretes.
Krivenko	1994	Alkaline cements.
Wang and Scivener	1995	Slag and alkali-activated microstructure.
Shi	1996	Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag.
Fernández-Jiménez and Puertas	1997	Kinetic studies of alkali-activated slag cements.
Katz	1998	Microstructure of alkali-activated fly ash.
Davidovits	1999	Chemistry of geopolymeric systems, technology.
Roy	1999	Opportunities and challenges of alkali-activated cements.
Palomo	1999	Alkali-activated fly ash – a cement for the future.
Gong and Yang	2000	Alkali-activated red mud–slag cement.
Puertas	2000	Alkali-activated fly ash/slag cement.
Bakharev	2001–2002	Alkali-activated slag concrete.
Palomo and Palacios	2003	Immobilization of hazardous wastes.
Grutzeck	2004	Zeolite formation.
Sun	2006	Sialite technology.
Duxson	2007	Geopolymer technology: the current state of the art.
Hajimohammadi, Provis and Devente	2008	One-part geopolymer.
Provis and Deventer	2009	Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications.

[그림 2-49] 알칼리 활성화 시멘트 기술동향

▢ 최근 무시멘트 콘크리트에 대한 연구는 사용원료 및 자극제의 종류에 따른 무기계 결합재의 생성 메카니즘을 규명하고 Geopolymer 시멘트, Geopolymer 콘크리트 및 고성능을 요구하는 응용제품에 대한 물리·화학적 특성을 개선하여 제품화하는데 주력하고 있음.

- Yamaguchi 대학의 Ikeda교수는 플라이애시 등의 활성 필러, 석영 및 산화철 등의 비활성 필러 그리고 소듐실리케이트 등의 활성화제를 이용하여 상온양생으로 20~30MPa 활성화 무기결합재를 개발하였으며, 활용연구에서 구조재료에 적용하기 위해 고강도화 프로세스와 습도 및 온도조절 기능을 가진 재료로 적용하기 위해 세공구조를 제어하는 기술을 개발 중임.
- 호주 Curtin 대학의 Rangan 교수팀은 플라이애시를 기반으로 하여 물유리와 수산화나트륨(NaOH)으로 구성된 활성화제를 사용하고 30~90℃의 고온양생을 거쳐 압축강도 30~70MPa 활성화 무기결합재를 개발하였고, 각종 역학적 특성, 장기거동 및 구조성능 등 다양한 성능을 평가하는 연구를 수행하였음.
- 전남대(2008)에서는 경제성과 현장 적용성을 고려하였을 때 콘크리트 압축강도 30MPa 이하로서 OH와 SiO^3의 음이온과 Na의 양이온의 혼용에 의한 고로슬래그의 활성이 적절하지만, 백화 및 빠른 탄산화 등의 문제점 해결에 대한 대안이 필요함을 제안하였음.

▢ 활성화 무기결합재를 활용한 우수한 물리적·화학적 특성으로 많은 분야에서 응용·활용되고 있음.

- 관련된 제품을 생산·판매하는 회사로는 Geopolymere, Renotechoy 등 다수의 업체가 있음.
- 지오폴리머협회(프랑스)는 화학적 안정성과 내화성 등의 특징을 이용하여 폐기물의 고화재 그리고 비행기나 자동차의 내화피복재로까지 특수 용도를 제시하고 있음.

▢ 국내의 경우 비교적 낮은 알칼리에서 상온 경화가 가능한 고로슬래그 미분말을 이용한 제품에 대한 연구가 많음.

- 하지만, AAS의 경우 초기 급결에 따른 작업성 확보, 장기 경도 및 강도 확보, 수축 및 백화 등의 내구성 문제가 해결해야 할 점으로 판단됨.
- AAS 콘크리트는 자극제인 알칼리 활성화제의 종류에 따라 강도, 강도발현 속도, 수축률, 유동성, 고성능 감수제의 적용성, 양생온도 등 다양한 특성을 나타냄
- 전남대는 고유동, PC용 고온양생 AAS 콘크리트 제품의 배합방법에 따른 맞춤형 AAS 결합재와 콘크리트 배합비를 개발하고 제품에 적용하고 있음.

▢ AAS 콘크리트의 탄산화저항성을 높이기 위해 모재료인 슬래그의 Ca/Si 비율인 염기도(basicity)를 높이는 연구가 시도됨(전남대, 2010).

- 슬래그 기반인 AAS는 자극제인 알칼리 활성화제의 종류에 따라 특성이 다양하지만, 대부분의 수화생성물은 CSH(Ⅰ)이며, 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)은 전혀 생성되지 않기 때문에 CO_2 확산에 의한 탄산화 진행이 빠르며, 탄산화 후 CSH(Ⅰ)의 구조 붕괴로 강도 저하가 발생함.
- AAS 결합재의 염기도를 높이면(Ca/Si 비율 ↑), OPC의 수화생성물과 비슷한 높은 Ca/Si 비율인 CSH(Ⅱ)의 생성을 유도하여, 탄산화 저항성능 향상과 탄산화 발생 후 강도 손실을 억제할 수 있음.
- 하지만, AAS 결합재의 염기도를 높이기 위해서는 CaO 또는 $Ca(OH)_2$의 첨가와 열처리가 필수적이기 때문에 이를 해결하기 위한 방법이 필요함.

▢ AAS 콘크리트의 표면 변색과 경도 저하 현상을 줄이기 위한 기술개발이 필요함.

- 표면 변색과 경도 저하는 탄산화의 결과로써 표면 노출에 의한 수화생성물의 조직붕괴에 의한 것임.
- OPC는 수화생성물로써 $Ca(OH)_2$가 많기 때문에 탄산화 후 조직이 치밀해지지만, AAS는 탄산화 후 흐트러진 표면으로 CO_2의 침투가 용이하여 탄산화 속도가 빠르게 진행됨.
- AAS 콘크리트의 초기 양생 시 표면의 보호 등으로 표면 수화생성물의 성숙도(maturity)를 높이면 건전하고 밀실한 표면의 보호막(shield)효과로 인해 CO_2의 내부 확산을 줄일 수 있기 때문에 표면의 변색과 경도 저하를 방지하고, 탄산화 저항성능을 향상시킬 수 있음.

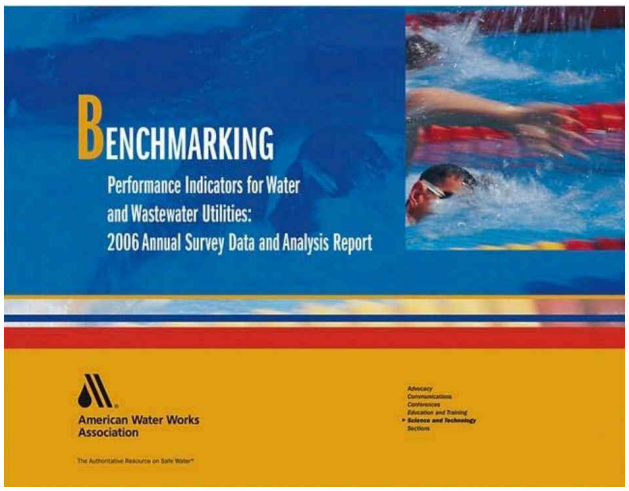
(4) 보수재료

▢ 선진국은 구조물의 장수명화와 관리의 효율성을 모색하기 위하여 환경변화에 선제 대응하는 기술을 개발하고 있는 실정임.

- 미국 AWWA(American Water Work Association)은 수자원 시설의 성능지표(Water Utility Performance Indicators)에 사용자 요구성능(고객의 불만, 상하수 비용)을 적극 반영하여 개발하였음.
- 영국의 경우 영국의 교통성, 도로공사, 철도청, 지방자치단체 연합으로 도로시설물 자산관리 가이드라인 작성 및 전산시스템을 개발하여 실무에 적용함.

※ Guidance Document for Highway Infrastructure Asset Valuation(가이드 라인), Management of

Highway Structure(시공지침) 및 Framework for Highway Asset Mgt.(지자체 매뉴얼) 등 전산화.



[그림 2-50] 미국 시설물의 사용성능 지표 개발 및 기술동향

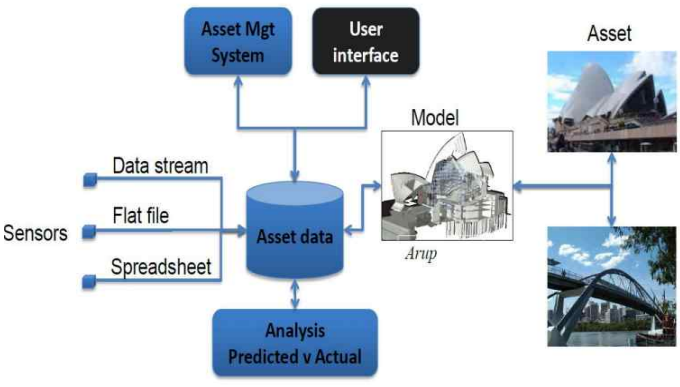
[그림 2-51] 영국의 유지보수 관리 체계 및 전산시스템

■ 호주의 경우 국립연구센터(National Research Centre)에서 BIM(Building Information Modeling) 기법과 센서에 의한 SOC 관리 시스템을 개발하여 적용하였음.

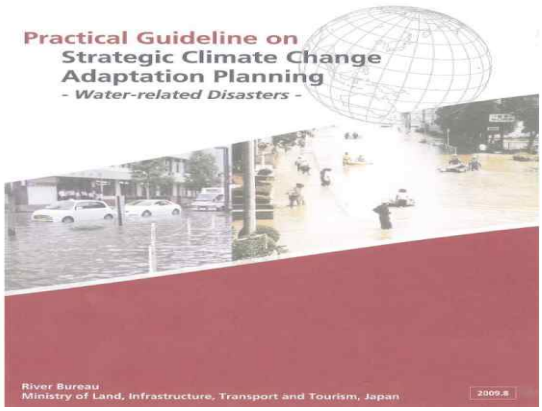
※ IDDS 모델의 개발(설계, 시공, 유지보수 및 운영 등의 통합관리 모델)하여 센서에 의하여 시설물 상태 실시간 모니터링 및 오페라 하우스에 시범적용.

■ 일본의 경우 국토교통성은 기후변화로 인한 부정적인 영향을 최소화하기 위하여 시설물 기준 및 관리 실무자 매뉴얼을 작성 및 보급하여 적용하였음.

※ 기후변화가 시설물에 미치는 파급효과와 기후변화에 대한 시설물 기준 및 관리 기준을 적용하였음.



[그림 2-52] 호주의 지능형 유지보수 시스템



[그림 2-53] 일본의 기후변화 대응 시설물 유지보수 관리시스템

▢ 국내의 경우 유지관리 및 보수관련 분야는 국가차원의 전문적인 유리관리 시스템이 없으며, 대부분 유지관리를 위한 기업차원의 보수 시스템을 통하여 운영 및 적용되고 있는 실정임.

- 시스템적 측면에서의 보수관련 기술은 다양한 재료 및 다양한 공법을 사용하여 각 특성에 맞도록 시공 및 적용되고 있으나 전체 공정 시스템 측면에서 검토할 경우 매우 비효율적인 구조를 띄고 있으며, 대부분의 보수기술은 보수 직후 효과는 매우 효과적이나 장기적 시간 경과 후 재보수가 요구되는 경우가 많음.

▢ 국내 콘크리트 표면용 코팅형 보수재료는 일반적으로 2액형 아크릴계, 에폭시계, 폴리 우레탄계, 무기질계 재료들이 주요 기반 재료로써 활용되고 있으며, 가시적인 성능과 제조단가의 경제성이 확보되는 2액형 아크릴계 기반의 콘크리트 표면용 코팅형 보호재가 주를 이루고 있음.

- 콘크리트 표면용 코팅형 보수재료는 대표적으로 방수제, 흡수방지재, 발수재 및 표면강화재 등 얇은 피막형의 메커니즘을 가진 공법과 유기계 기반 또는 무기계 기반 재료를 활용하여 보호 레이어를 형성하는 메커니즘을 가진 공법으로 구분됨.
- 대부분의 콘크리트 표면용 코팅형 보수재료로 사용되고 있는 아크릴 실리콘계 및 우레탄계는 과도한 습윤면에 적용할 경우 부착강도 저하로 인한 탈락 및 내구성 발현이 저하됨.
- 아크릴 수지계의 경우 상기의 문제점 해결을 위하여 개발되었으나 콘크리트 표면 강화 및 방수성능 부여에 한정되어 다른 열화에 대해서는 적용하기 어려운 실정임.
- 최근 친환경 제품으로 점결성 원료의 clay 페인트, 알칼리 실리케이트계 무기 코팅재, 식물성 및 동물성을 가공한 천연 도료, 기존 유기계 제품에서 결합재로 사용되는 휘발성 유기화합물을 감소시킨 에코 에멀젼 도료 등이 개발되어 사용되고 있음.
- 선진국의 경우 해양 또는 지하구조물과 같은 열악한 환경 조건하 성능이 입증된 복합재료를 활용하여 콘크리트 표면용 코팅형 보수재료에 대한 연구 수행 및 실용화하고 있는 실정임.
- 일본의 경우 내알칼리성 및 내구성이 우수한 실리콘 수지계 마무리재가 개발되어 현재 실용화 단계에 있으며, 관련 규정을 제정하여 사용하고 있음.
- 또한 침투형 코팅재를 개발하여 콘크리트의 주요 열화요인에 대하여 유효하다는 결과를 다양한 실험을 통하여 입증하였음.

▢ 일반적으로 단면복구용 보수재료는 일반 시멘트, 에폭시계, 아크릴계, 및 SBR 모르타르를 활용한 보수재료 등이 이용되고 있지만 그중에서도 에폭시계 모르타르 보수재료가 주를 이루고 있음.

- 에폭시계 수지계 보수재료 및 방법은 자체의 부착성능 및 강도가 우수한 장점이 있지만 신구콘크리트 사이에 조인트가 발생하여 국부전지에 따른 철근부식 유도할 수 있는 문제점이 있음.
- 에폭시계 수지계 보수재료는 유기계 기반 재료이기 때문에 콘크리트와의 열팽창계수 및 탄성계수의 차이와 접착면 피막형성 등으로 인한 탈락현상이 유발됨.
- 또한 내부의 수분을 외부로 배출하지 못하여 철근 부식뿐만 아니라 결로 현상을 발생시키며, 주요 내구성 저하의 원인을 근본적으로 보수가 이루어지지 못하기 때문에 내구성 향상을 기대하기 어려움.

- 최근 친환경 소재와 제품 개발이 요구되고 있으며, 구조 및 재료의 안정성과 함께 경제성이 확보된 보수재료 개발 및 공법의 연구가 활발하게 진행되고 있음.
- 선진국의 경우 해양 또는 지하구조물과 같은 열악한 환경 조건하 성능이 입증된 복합재료를 활용하여 단면복구용 보수재료에 대한 연구 수행 및 실용화하고 있는 실정임.
- 일본의 경우 방청 도포재 및 SBR계 보수재료를 혼용한 보수공법 개발 및 성능저하 요인별 규정을 제정하였으며, 폴리머 모르타르를 활용한 보수재료를 구조물 보수용으로 많이 사용하고 있음.
- 미국, 일본 및 유럽 등에서는 토목자재의 장단점을 효과적으로 상호 보완한 복합재료 개념의 보수재료 개발이 활발히 진행되고 있음.

2.3.2 특허동향 분석

(1) 자기치유 콘크리트 기술 특허동향 정량분석

▢ 조사 범위

■ 특허 검색

- FOCUST의 데이터베이스 사용
- 특허검색의 범위는 출원년도를 기준으로 최초 특허부터 현재까지 한국, 일본, 중국, 미국에서 출원된 총 102건을 대상으로 분석
- 정량분석은 등록특허와 공개특허를 모두 포함하였으며, 공개된 특허가 등록된 경우, 공개특허를 삭제하여 중복 분석을 회피함.

[표 2-16] 국가별 분석기간 및 특허건수 : 자기치유 콘크리트

국가	구분	조사 기간	자료 건수
한국	특허, 공개/등록	최초특허 ~ 2014.02.01 (출원일 기준)	21
일본	특허, 공개/등록		16
중국	특허, 공개/등록		19
미국	특허, 공개/등록		28
유럽	특허, 공개/등록		18
합계			102

▢ 기술 분야

■ 자기치유 콘크리트 관련 기술을 박테리아, 캡슐, 무기질 혼화재, 섬유 및 기타기술 등으로 구분

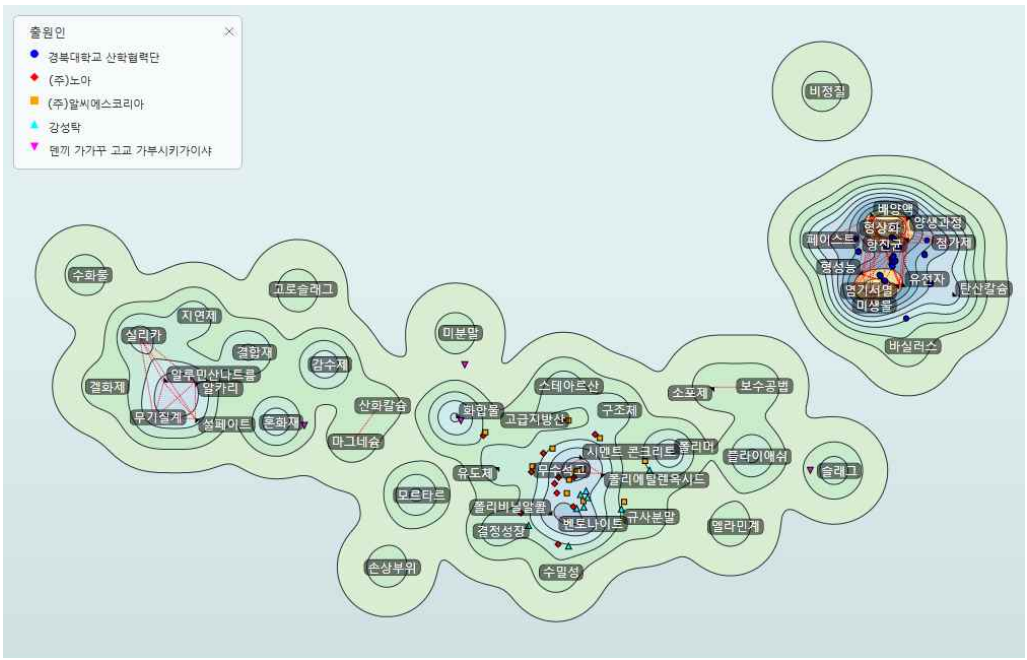
■ 주요 특허출원인별 특허 출원 동향과 기술 트렌드를 분석하고 향후 예상되는 연구분야 예측

[그림 2-54] 특허 검색 기술 분야

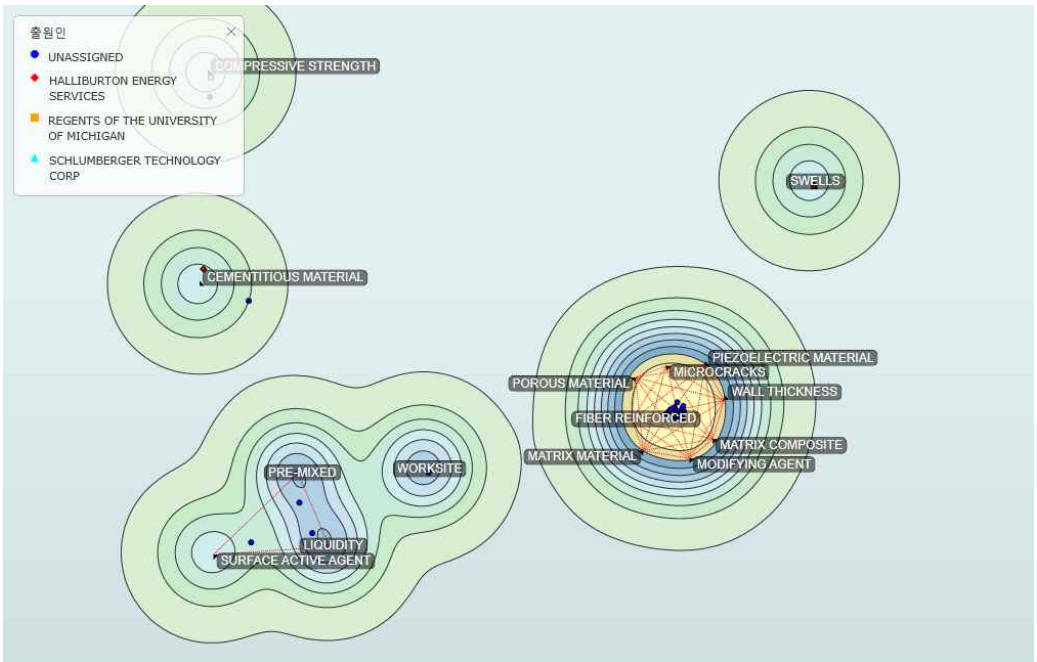
▢ 특허 분석

■ 키워드 맵

■ 특허분포도란 MicroPatent사의 특허분석 Tool인 Aureka를 이용한 분석결과로서, 전체 세부기술분야(키워드 기반)별 특허의 분포도를 한눈에 조망하는데 의미가 있음. 고도 등고선 이미지에서 고도는 문헌의 고밀도 범위(개수)를 의미하고 선의 근접성은 관련성 정도를 나타냄.



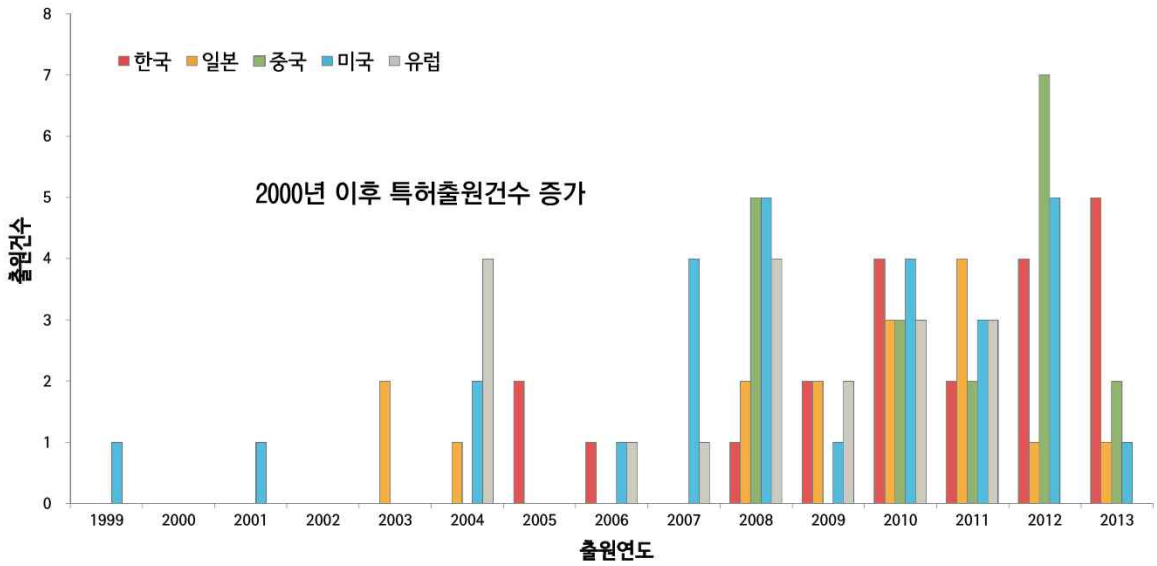
[그림 2-55] 자기치유 기술분야 키워드 맵 : 한국



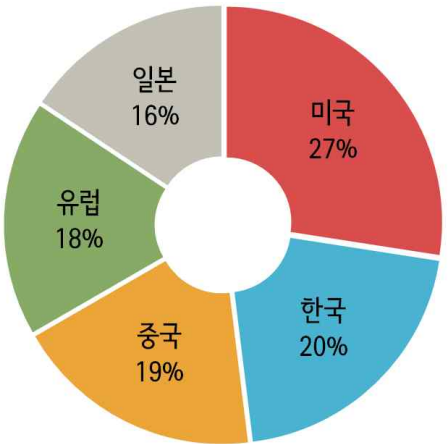
[그림 2-56] 자기치유 기술분야 키워드 맵 : 미국

▢ 국내외 연도별 출원 동향

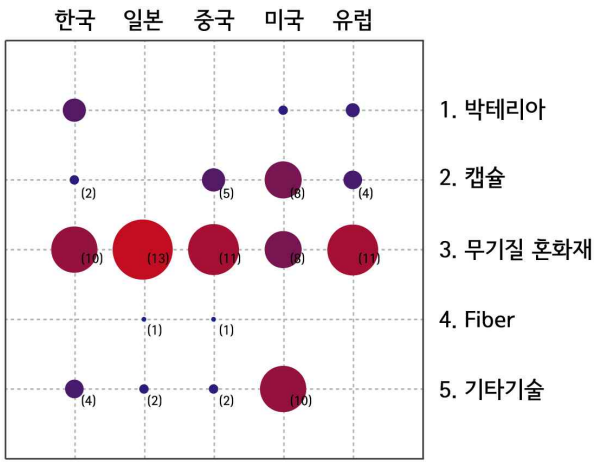
- 1999년 미국에서 관련 특허가 출원된 이후, 2000년 후반 이후 점진적으로 각 국가에서의 출원건수가 꾸준히 이루어지고 있음.
- 특허가 2008년 이후 증가되고 있어 기술 개발 초기 단계이며 새로운 기술 분야라고 볼 수 있음.
- 조사된 전체 특허에 대한 국가별 특허 점유율을 각 국가별 점유율의 차이가 크지 않음. 따라서 향후 연구개발을 통해 자기치유 분야의 세계시장의 선점이 가능할 것으로 기대됨.



[그림 2-57] 연도별 전체 출원동향



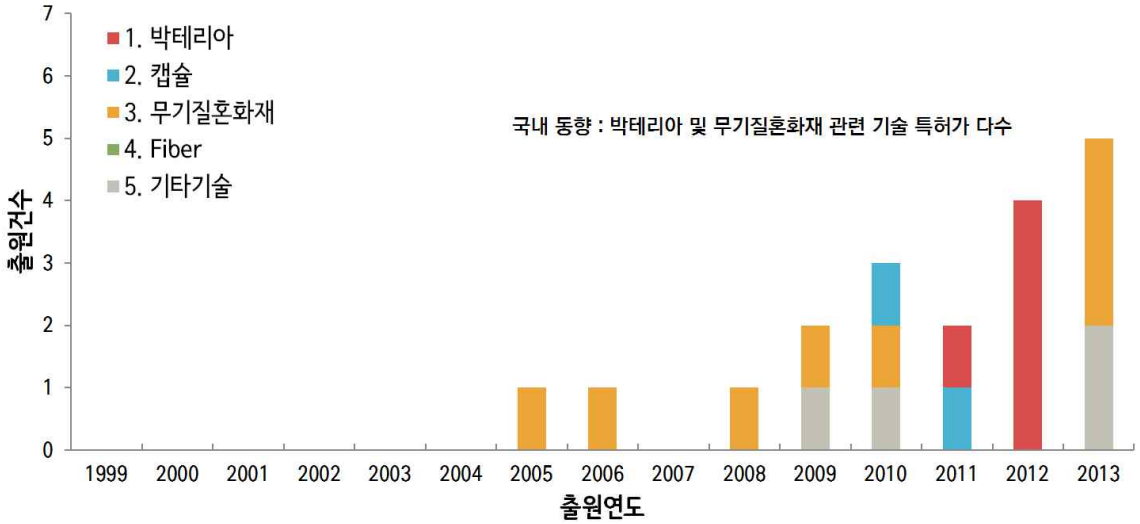
[그림 2-58] 국가별 특허 점유율



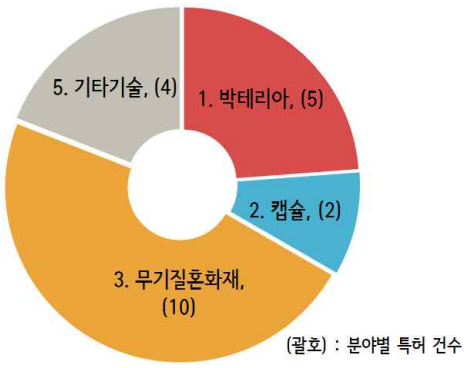
[그림 2-59] 국가별 기술분야 특허 동향

▢ 국내 출원 동향

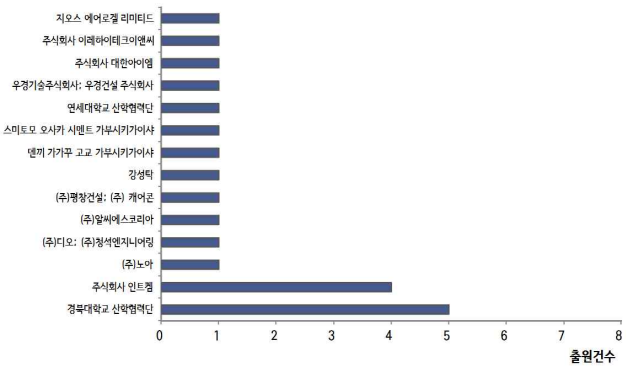
- 2005년 무기질 혼화재 관련기술의 특허 출원을 시작으로 점진적으로 증가하는 추세이며, 현재까지 총 21건의 특허가 출원됨.
- 주로 박테리아 및 무기질 혼화재 관련 기술 특허가 총 15건으로 전체의 72%를 차지하고 있음.
- 국내 출원인 분석에 따르면 (주)인트켐과 경북대학교가 주를 이룸.



[그림 2-60] 국내 특허 출원 동향



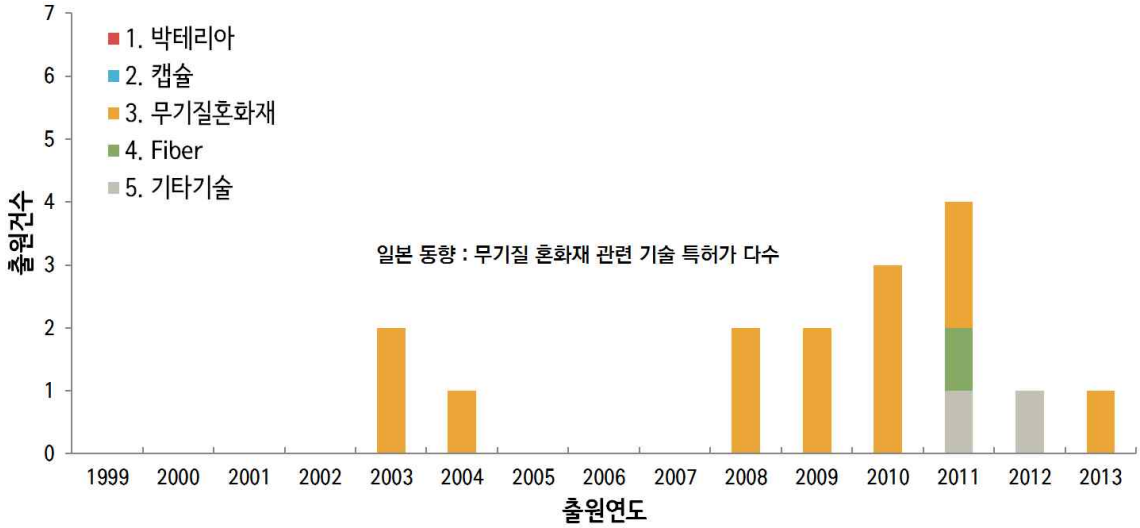
[그림 2-61] 국내 기술 분야별 특허 출원 동향



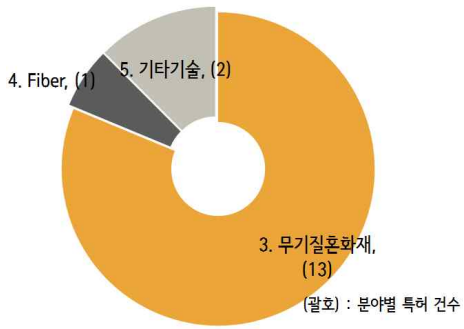
[그림 2-62] 국내 특허 출원인 분석

▢ 일본 출원 동향

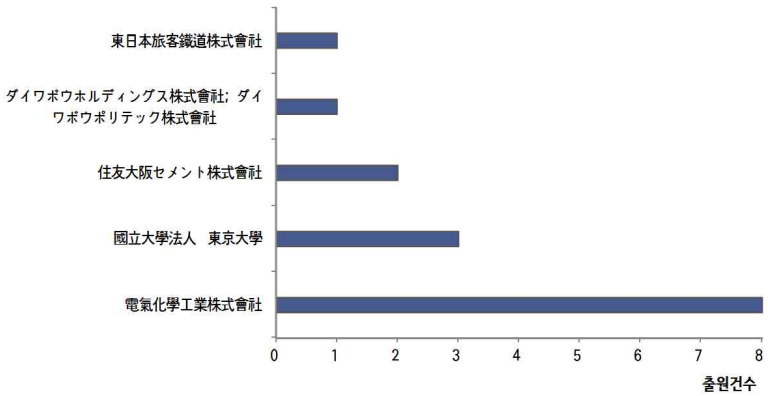
- 2003년 무기질 혼화재 관련기술의 특허 출원을 시작으로 현재까지 총 16건의 특허가 출원됨.
- 주로 무기질 혼화재 관련 기술 특허가 총 13건으로 전체의 81%로 대부분을 차지하고 있음.
- 일본 출원인 분석에 따르면 도쿄대학과 전기화학공업주식회사가 주를 이룸.



[그림 2-63] 일본 특허 출원 동향



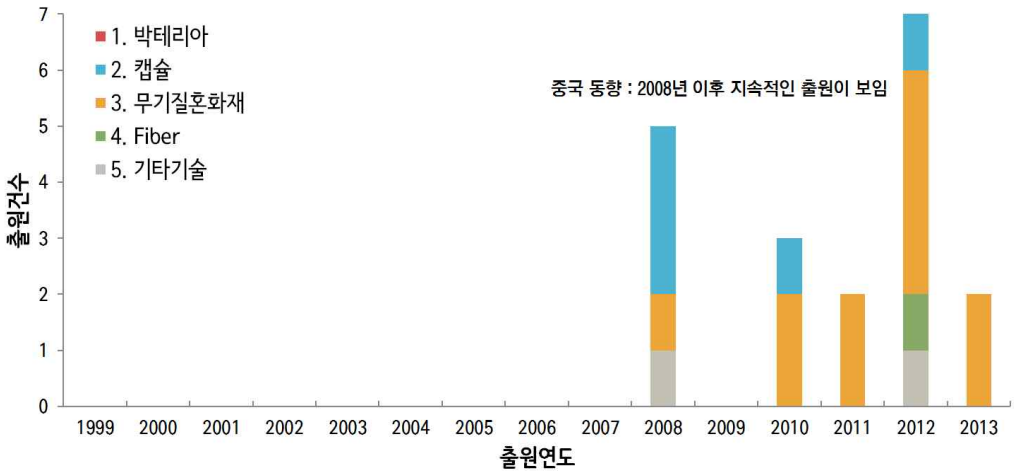
[그림 2-64] 일본 기술 분야별 특허 출원 동향



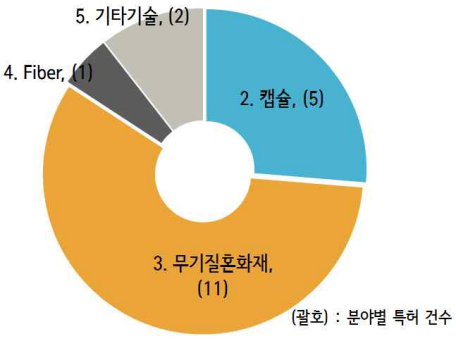
[그림 2-65] 일본 특허 출원인 분석

▢ 중국 출원 동향

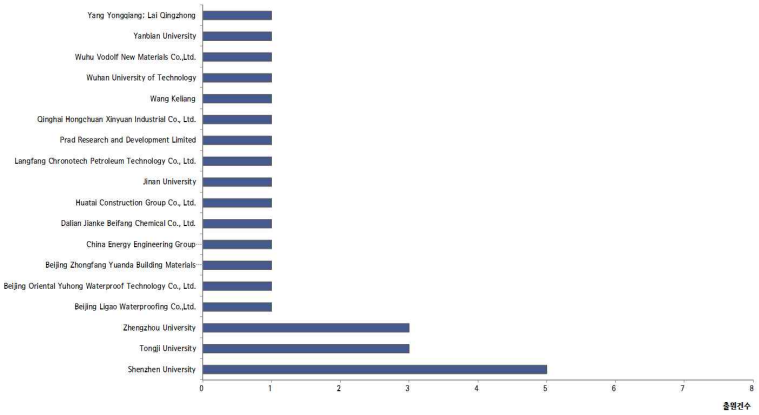
- 중국은 2008년에 관련 기술의 특허가 처음 출원되어 본 기술의 후발주자라고 할 수 있으나, 출원건수를 보면 활발한 기술 개발이 이루어지고 있는 것으로 보임.
- 주로 캡슐 및 무기질 혼화재 관련 기술 특허가 총 16건으로 전체의 84%를 차지하고 있음.
- 일본 출원인 분석에 따르면 Zhengzhou, Tongji, Shenzhen University에서 관련 기술 분야의 출원이 대부분임.



[그림 2-66] 중국 특허 출원 동향



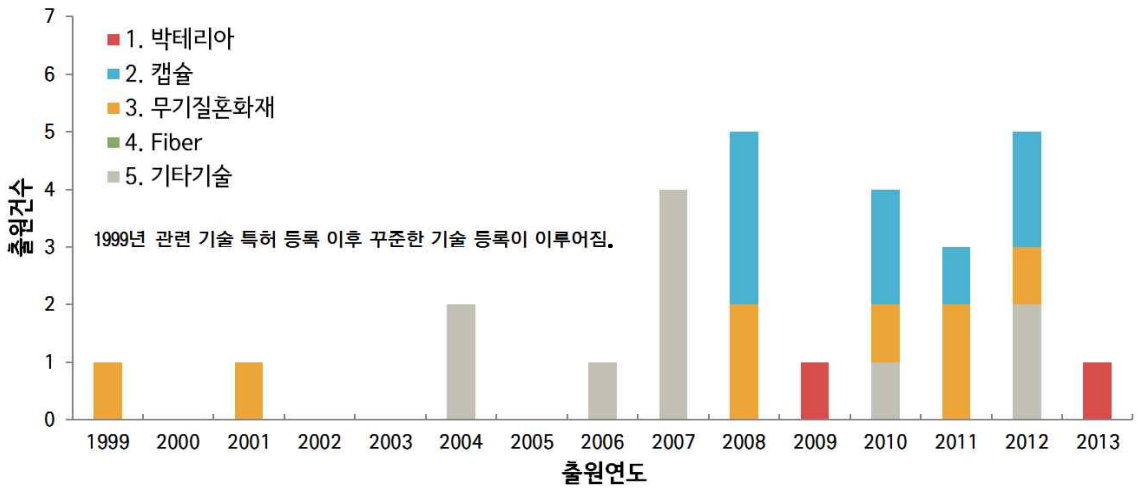
[그림 2-67] 중국 기술 분야별 특허 출원 동향



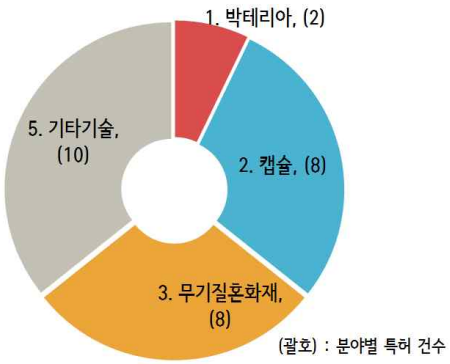
[그림 2-68] 중국 특허 출원인 분석

▢ 미국 출원 동향

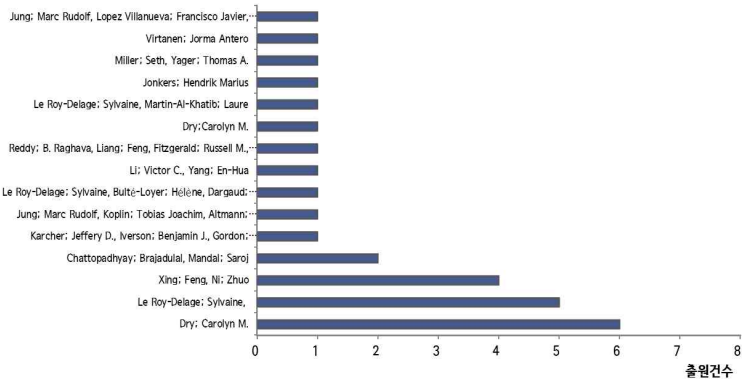
■ 미국은 상대적으로 관련 기술 개발이 타 지역에 비하여 일찍 시작된 것으로 보이며, 전반적으로 전 기술 분야에 대해 고르게 기술 개발이 이루어지고 있음.



[그림 2-69] 미국 특허 출원 동향



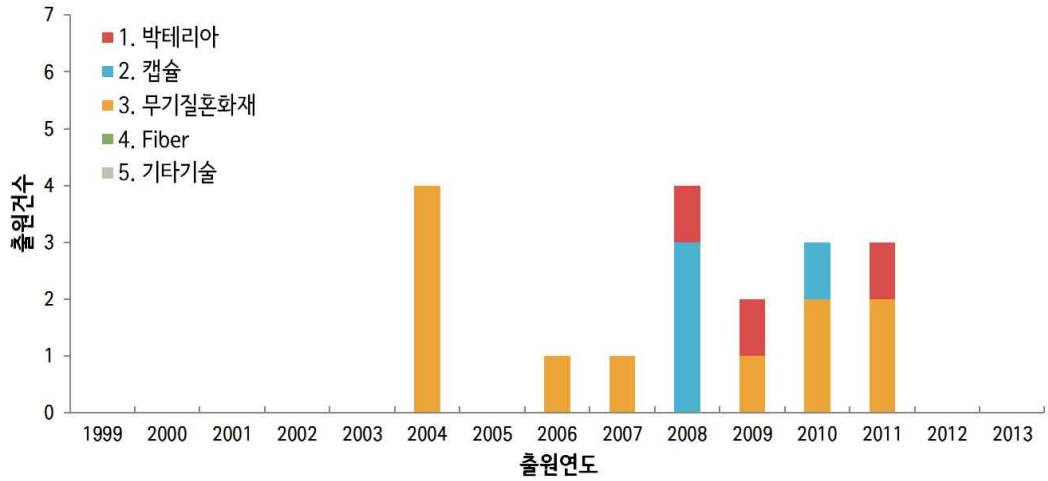
[그림 2-70] 미국 기술 분야별 특허 출원 동향



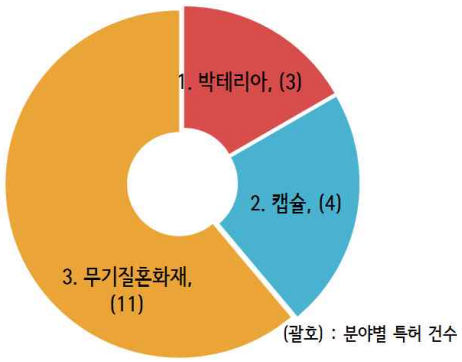
[그림 2-71] 미국 특허 출원인 분석

▢ 유럽 출원 동향

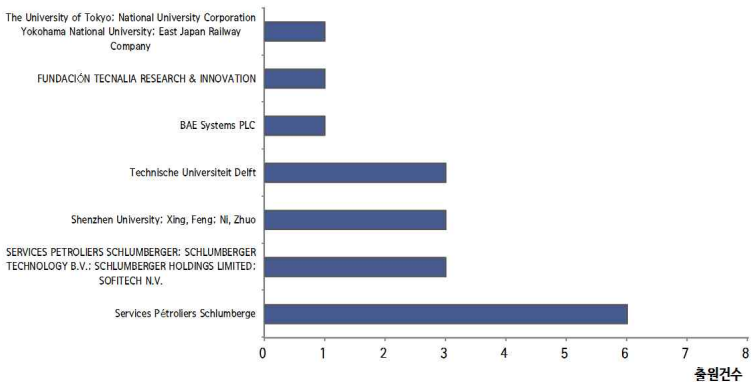
- 유럽은 2004년 이후 꾸준히 출원이 이루어지고 있으나 2011년 이후로 출원건수가 없음.
- 주로 무기질 혼화재 관련 기술 특허가 총 11건으로 전체의 61%를 차지하고 있음.
- 박테리아를 활용한 기술의 특허는 주로 TU Delft에서 대부분 출원하고 있음.



[그림 2-72] 유럽 특허 출원 동향



[그림 2-73] 유럽 기술 분야별 특허 출원 동향



[그림 2-74] 유럽 특허 출원인 분석

(2) 친환경 콘크리트 기술 특허동향 정량분석

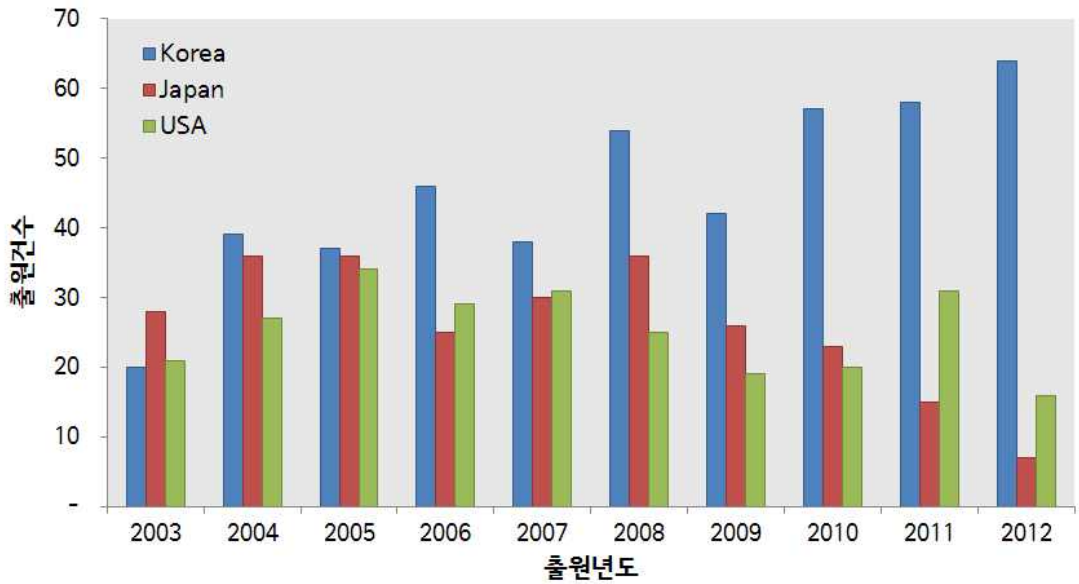
▢ SCM 콘크리트 특허동향

■ 분석기준

※ 대상 기술은 고로슬래그 미분말, 플라이애시, 석회석 미분말 등의 산업부산물 또는 비소성 천연자원 등을 활용하여 시멘트를 대체할 수 있는 결합재 및 콘크리트 배합에 관한 것임. 해당하는 기술은 슬래그 콘크리트, 플라이애시 콘크리트, 하이볼륨 슬래그 콘크리트, 하이볼륨 플라이애시 콘크리트, SCM 콘크리트, 하이볼륨 SCM, 콘크리트, 포졸란 콘크리트 등이 있음.

[표 2-17] 분석기간 및 분석대상 특허 추출 건수 : SCM 콘크리트

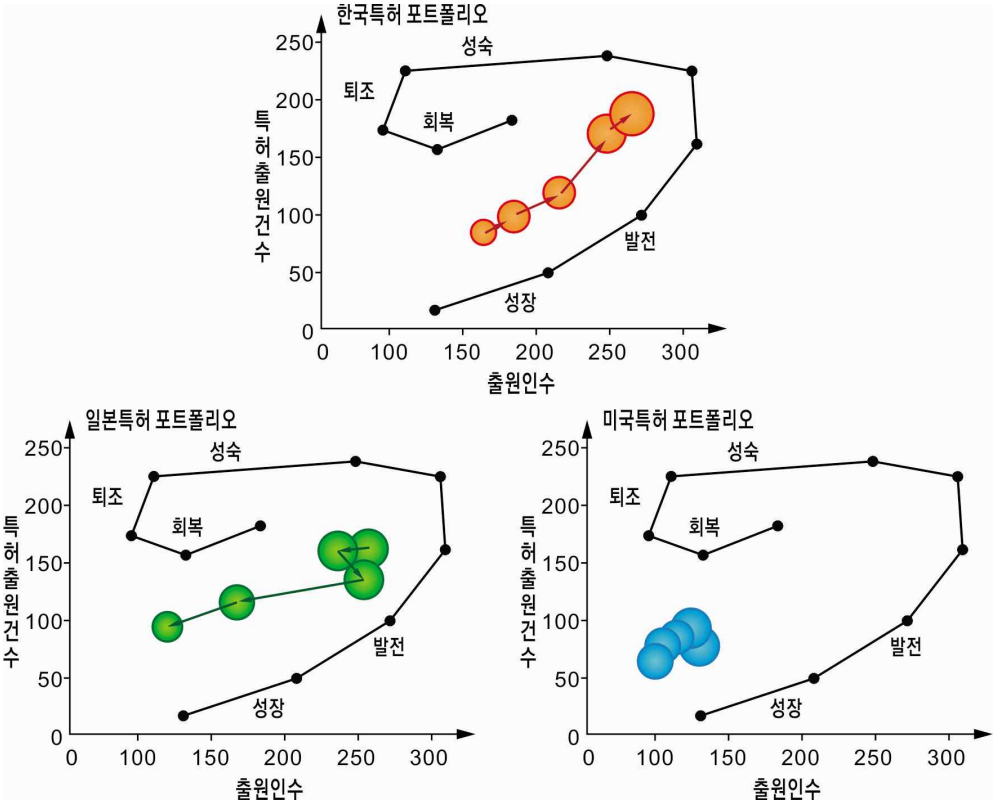
데이터 구분	국 가	전체분석기간	검색 건수	분석대상 특허 추출 건수
공개 데이터	한국	2003.01.01. ~ 2012	534	455
	일본	2003.01.01. ~ 2012	298	262
	미국	2003.01.01. ~ 2012	314	253
합 계			1146	970



[그림 2-75] SCM 콘크리트 기술의 연도별 국가별 특허 출원동향

■ SCM 콘크리트 분야의 연도별 전체 특허동향을 살펴보면, 거시적인 관점에서 한국은 점진적으로 특허출원 건수가 증가하며 특허출원 활동이 가장 활발하나, 일본은 감소하는 추세를 보이고 있음. 미국의 경우 증감이 반복되나, 2008년도 이후 특허활동이 감소하는 것으로 나타남.

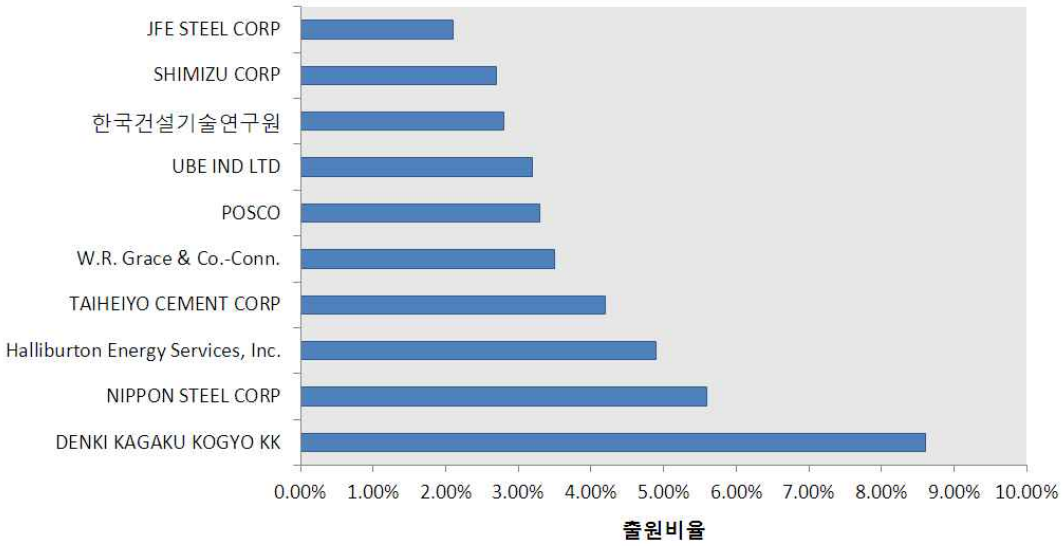
■ 한국의 경우 출원인수 및 출원건수가 증가하다 주춤하고 있어 성숙단계의 진입하고 있는 것으로 판단되며, 미국, 일본은 성숙단계에서 퇴조 단계로 진행하고 있는 것을 알 수 있음.



[그림 2-76] 주요시장국의 기술성장 단계 분석

■ 최다 출원인은 DENKI KAGAKU KOGYO KK 8.6%(88건)으로 분석되었으며, NIPPON STEEL CORP(58건, 5.6%) 등의 순으로 분석되었음.

※ 주요 출원인 대부분이 자국 내에서만 특허 활동을 진행하고 있으며, 한국의 경우 POSCO와 한국건설기술연구원이 전체 10위 안에 포함되어 있는 것으로 분석됨.



[표 2-18] SCM 기술 분야의 주요 특허출원인

▢ 무시멘트 콘크리트 특허 동향

■ 분석기준

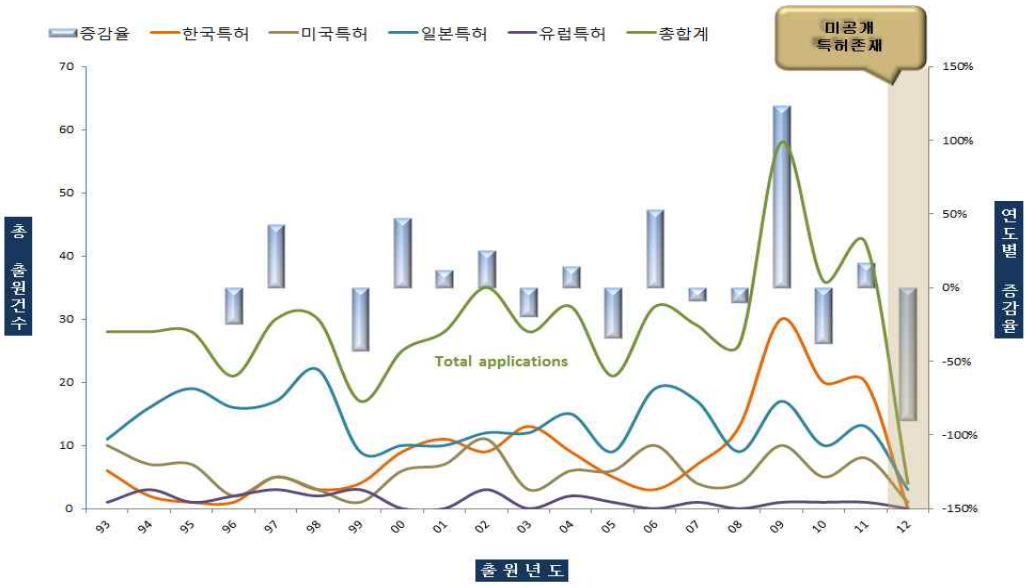
※ 대상 기술은 산업부산물을 활용하여 시멘트를 100% 대체할 수 있는 알칼리 활성 슬래그 결합재 및 콘크리트 배합 및 설계기술에 관한 것임. 따라서 대상 기술과 관련된 특허동향과 선행기술 분석을 위해서 고로슬래그를 이용한 결합재, 시멘트, 콘크리트 2차제품 등과 관련된 기술을 중점으로 조사하였고, 특허데이터베이스인 WIPS 및 KIPRIS 등을 활용하여 한국, 일본, 미국, 유럽 등의 국가를 대상으로 특허조사를 실시함.

※ 본 분석에 적용된 검색 키워드 및 검색식, 분석 범위는 다음과 같으며, 검색된 특허 총 797건에 대해서 전수검사를 통해 중복특허 또는 상용화대상기술과 연관성이 낮은 특허 등 noise 특허를 제거하여 분석에 필요한 총 612건의 유효특허를 추출하여 분석을 수행함.

[표 2-19] 분석기간 및 분석대상 특허 추출 건수 : 무시멘트 콘크리트

데이터 구분	국 가	전체분석기간	검색 건수	분석대상 특허 추출 건수
공개 데이터	한국	1993.01.01. ~ 현재	208	178
	일본	1993.01.01. ~ 현재	342	284
	유럽	1993.01.01. ~ 현재	41	28
등록 데이터	미국	1993.01.01. ~ 현재	206	122
합 계			797	612

■ 무시멘트 분야 연도별, 국가별 특허출원 동향

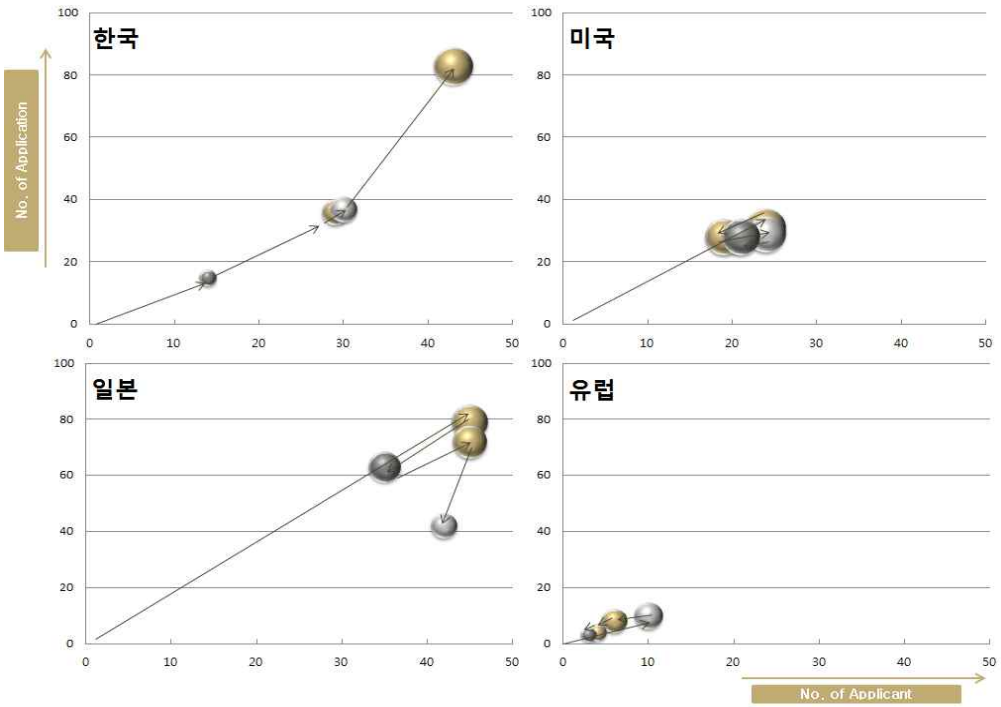


[그림 2-77] 무시멘트 기술의 연도별 국가별 특허 출원동향

■ 무시멘트 분야의 연도별 전체 특허동향을 살펴보면, 거시적인 관점에서 연도구간별로 특허출원 건수의 증감이 반복되나, 1990년 초반이후 완만한 증가세에 있다가 2009년을 최고점을 기록하여 최근 들어 특허활동이 활발히 진행되고 있는 것으로 나타남.

※ 이러한 증가세는 웰빙 열풍에 따른 친환경 건축자재에 대한 관심 및 수요가 증가한데 기인한 것으로 분석되며, 특히 한국의 경우 정부에서 그린홈 사업의 추진에 따란 시멘트를 사용하지 않는 친환경 기술에 대한 Needs가 반영된 것으로 분석됨.

■ 미국, 일본, 유럽의 경우, 연도구간별로 출원인수 및 출원건수에 증감이 반복되고 있어 성숙기 또는 쇠퇴기 단계에 있는 것으로 분석되나, 한국의 경우 모든 연도구간에서 출원인수 및 출원건수가 모두 증가하고 있어 성장기 단계에 있는 것으로 분석됨.



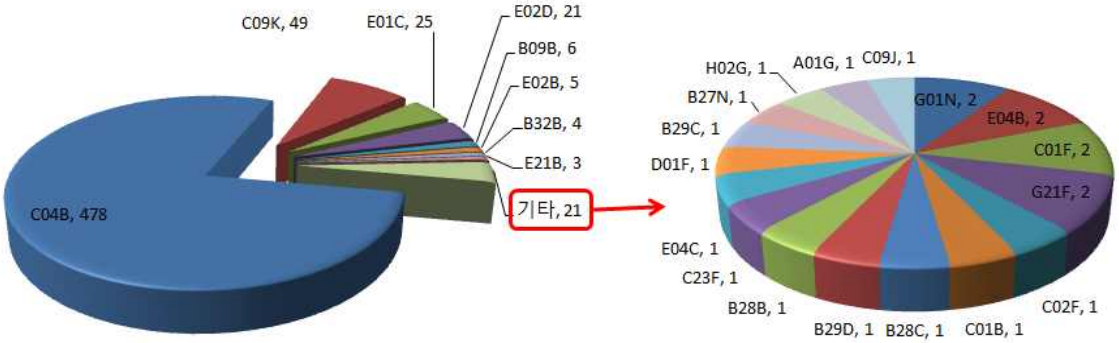
[그림 2-78] 주요시장국의 기술성장 단계 분석

■ 상용화 대상기술과 관련하여 IPC 분류 기준으로 무시멘트 분야 세부 분야별 특허출원 건수는 다음과 같음.

※ IPC 코드 C04B(시멘트; 콘크리트; 인조석; 세라믹스; 내화물, 478건, 78.1%), C09K(그 밖에 분류되지 않는 응용되는 물질, 49건, 8.0%), E01C(도로, 경기장 또는 그와 유사한 것의 건설 또는 그 표면의 시공; 건설 및 보수용 기계 또는 보조 공구(눈이나 얼음을 굳게 하기도 하고, 정지하여 도로나 유사 표면을 형성하는 것, 25건, 4.1%), E02D(기초; 굴착; 축제(특히 수공에 적합한 것, 21건, 3.4%) 등의 순으로 나타남.

[표 2-20] 무시멘트 분야의 IPC 기술 분류에 의한 특허출원 건수 및 점유율

기술 분류	주(notes)	출원 건수	점유율
C04B	석회; 마그네시아; 슬래그; 시멘트; 그 조성물, 예. 모르타르, 콘크리트 또는 유사한 건축재료; 인조석; 세라믹 (실투유리세라믹); 내화물, 천연석의 처리	478	78.1%
C09K	그 밖에 분류되지 않는 응용되는 물질 그 밖에 분류되지 않는 물질의 응용	49	8.01%
E01C	도로, 경기장 또는 그와 유사한 것의 건설 또는 그 표면의 시공; 건설 및 보수용 기계 또는 보조 공구(눈이나 얼음을 굳게 하기도 하고, 정지하여 도로나 유사 표면을 형성하는 것)	25	4.08%
E02D	기초; 굴착; 축제(특히 수공에 적합한 것); 지하 또는 수중 구조물	21	3.43%
B09B	고체 폐기물의 처리	6	0.98%
E02B	수공(선박의 리프트 ; 준설)	5	0.82%
B32B	적층체, 즉 평평하거나 평평하지 않은 형상 (예. 세포상(cellular) 또는 벌집 구조(honeycomb)) 의 층으로 조립된 제품	4	0.65%
E21B	지중 굴착, 예. 채굴정에서의 석유, 가스, 물, 용해성 또는 용융성 물질 또는 광물 현탁액의 채취	3	0.49%
기타		21	3.4%



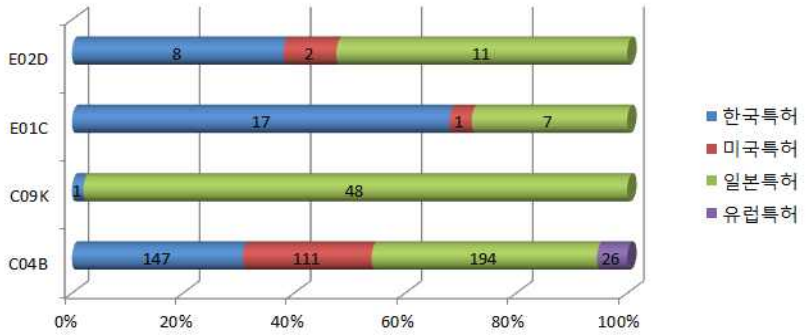
[그림 2-79] 무시멘트 분야 세부 기술별 특허 출원동향

- 무시멘트 세부 기술분야 중 20건 이상의 출원된 C04B, C09K, E01C, E02D 기술분야의 국가별 특허 출원동향을 살펴보면, 4개국 모두 무시멘트 조성물과 관련된 C04B 분야의 특허출원이 가장 활발한 것으로 나타났으며, 4개국 중 일본과 한국의 특허 활동이 가장 활발한 것으로 조사됨.
- 무시멘트 분야 주요 출원인 동향

※ 상용화 대상기술과 관련된 무시멘트 기술 분야에 10건 이상의 특허를 출원하고 있는 주요 출원인은 대부분 일본 기업으로 조사되었으며, 일본의 DENKI KAGAKU KOGYO사와 TAIHEIYO

CEMENT사가 가장 활발하게 특허활동을 하고 있는 것으로 나타났고, 한국의 경우 전남대학교에서 관련 기술 개발이 활발히 이루어지고 있는 것으로 나타남.

※ 국가별 주요출원인 동향을 살펴보면, 한국의 경우 전남대학교와 한국건설기술연구원, 일본은 DENKI KAGAKU KOGYO사와 TAIHEIYO CEMENT사, 미국은 Halliburton Energy Services사, 유럽은 DENKI KAGAKU KOGYO사가 주요출원인으로 나타났으며, 특히 일본의 DENKI KAGAKU KOGYO사는 자국뿐만 아니라 해외에도 특허출원을 하고 있음.

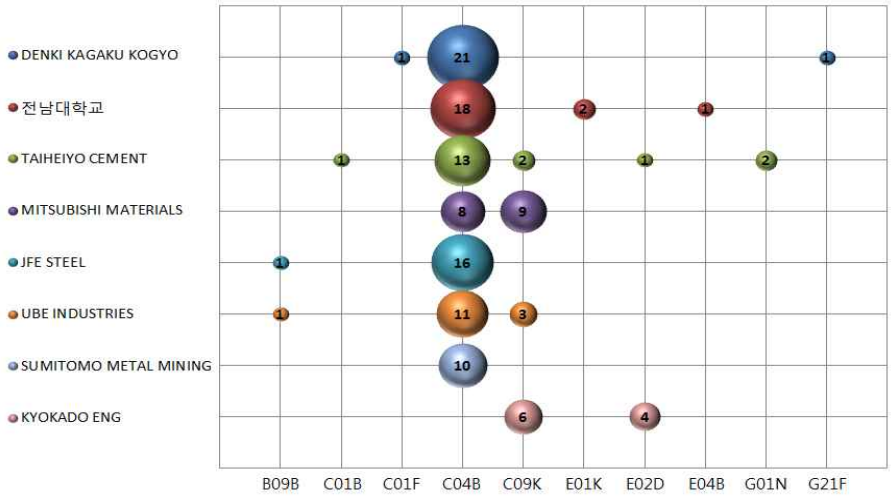


[그림 2-80] 무시멘트 기술의 세부 기술분야별 국가별 특허 출원동향

[표 2-21] 무시멘트 기술 분야의 주요 특허출원인

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

※ 한편 전 세계적으로 10건 이상의 특허를 출원한 주요 출원인에 대한 세부기술별 출원 동향을 살펴보면, 주요 출원인 대부분 C04B 분야에 특허활동을 집중하고 있는 것으로 나타남.



[그림 2-81] 세부 기술분야별 주요 특허 출원인

※ 최다 출원인으로 1위를 기록한 일본의 DENKI KAGAKU의 경우 C04B 분야에 특허출원을 집중하고 있고 이외에 C01F, G21F 분야에도 특허를 출원하고 있음.

※ 2위를 기록한 한국의 전남대학교 역시 C04B 분야에 17건의 특허를 출원하여 동 분야의 연구개발에 집중되고 있는 것으로 분석됨.

※ 이외에 일본의 MITSUBISHI MATERIALS, KYOKADO ENG 등은 C09K 분야에 특허출원이 집중되고 있어 새로운 결합재 개발에 주력하고 있는 것으로 예상됨.

※ 무시멘트 분야의 기술발전 단계를 살펴보기 위해, 특허 인용 문헌수 또는 특허 패밀리 수가 많은 특허를 추출하고, 이들 특허를 연도별로 나열하여 시계열 분석을 수행함.

※ 1990년대 초반에는 산업부산물을 시멘트 등 건축자재에 적용하고자 하는 기술이 출현한 이후 90년대 중반에는 시멘트의 물리적 특성 개선이나 신규한 시멘트 조성물에 대한 기술개발이 진행된 것으로 파악됨.

※ 1990년대 중후반에는 시멘트 제품 개선을 위한 조성물 및 2차 제품과 관련된 응용기술이 개발되기 시작하였고, 90년대 후반 및 2000년대 초반에 시멘트 제품에 친환경 개념이 도입된 것으로 분석됨.

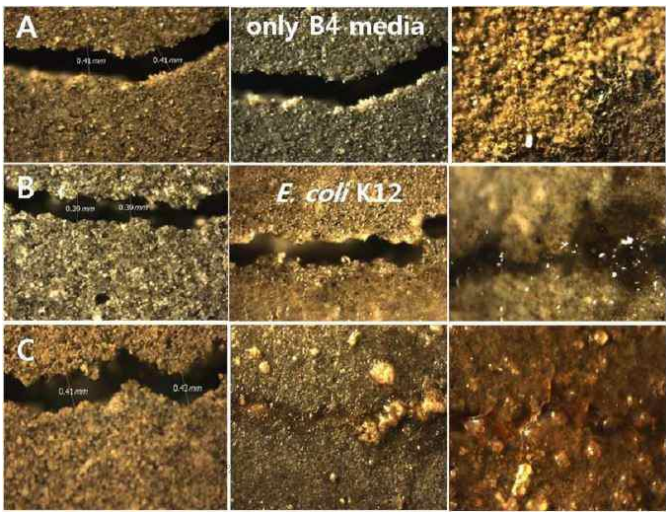
※ 2000년대 중반에는 산업 폐기물을 이용한 시멘트 제품 출시와 더불어 시멘트의 시공성 향상을 위한 조성물 개발이 진행된 것으로 파악되며, 한국 및 일본에서 기술개발이 진행된 이후에 미국에 관련 기술이 전파되는 경향을 나타냄.

※ 1990년대에도 시멘트 분야에 친환경 조성물을 응용하는 기술이 개발되었으나 주요 원료로 시멘트가 사용된 것으로 분석되지만, 2000년대 중후반에 들어서면서 시멘트를 전혀 사용하지 않는 무시멘트 또는 그린시멘트 기술이 한국을 중심으로 개발되었고, 2010년 전후에 관련 기업에서 특허출원이 진행된 점을 감안하면 2010년 전후에 무시멘트 제품이 시장에 출시된 것으로 파악됨.

(3) 국내외 핵심특허에 대한 분석

▢ 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 기술

[표 2-22] 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 기술특허

특허등록번호		출원인	특허개요 및 상세
1	2012-0199046 (2013. 06. 11)	Technische Universiteit Delft	[개요] 박테리아를 시멘트에 직접 혼합하면 시멘트의 수화로 인한 pH상승으로 인해 박테리아의 생존능력이 감소하게 되는데, 유기화합물 및 박테리아로 가득찬 다공성 입자를 개발해 위에 언급된 단점을 어느 정도 보완한 자기치유제 개발을 목적으로 함. • Bacillus pseudofirmus, Sporosarcina pasteurii, 식물성 박테리아가 사용됨. • 치유제의 성능이 길게는 수년까지 유지될 것으로 전망 • 유기화합물과 박테리아가 함께 다공질 입자에 포함되는 것이 특징
2	10-2013-0098015 (2013. 09. 04) 10-1310634 10-1310635 10-1310636 (2013. 09. 13)	경북대학교 산업협력단	[개요] 미생물의 탄산칼슘 형성 작용, 균열보수 작용 등으로 인한 균열 치유작용과 콘크리트 양생 시 미생물 배양액을 처리해 양생함으로써 내구성이 향상된 콘크리트를 제조할 수 있음. • 신규 미생물 Bacillus aryabhatti, Bacillus thuringiensis, Stenotrophomonas maltophila, Arthrobacter nicotianae을 포함하는 시멘트 페이스트 또는 콘크리트의 내구성 증진 및 균열 보수용 시멘트 첨가제 제공. • 시멘트 구조물의 균열을 구조물에서 분리 보고된 곰팡이의 증식을 박테리아를 사용해 제어하면서, 그 박테리아가 표면상에서 균열을 복구할 수 있다는 점은 국내외에서 이루어진 적이 없는 새로운 발명임. 

▢ 마이크로캡슐 활용 자기치유 콘크리트 기술

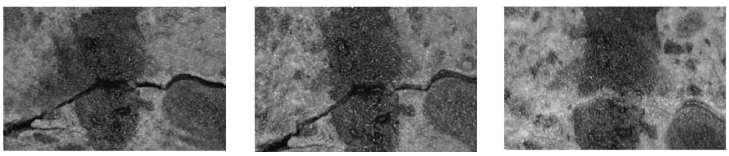
- 2000년대에 들어서 본격적인 논문게재와 특허 출원이 이루어지고 있음.
- 주로 미국과 일본의 대학, 기업에서 20여건의 특허가 출원 또는 등록되어 있음.

[표 2-23] 마이크로캡슐 활용 자기치유 콘크리트 기술특허

특허등록번호		출원인	특허개요 및 상세
1	US 2007/0282059 (2007.12.6)	Scott R. White 외 2인 (UIUC)	[개요] 복합 재료는 엘라스토머 매트릭스, 폴리머라이저를 포함하는 제 1캡슐과 폴리머라이저를 위한 활성제를 포함하는 제 2캡슐을 포함함. 복합 재료는 폴리머라이저, 폴리머라이저를 위한 상응하는 활성제 및 매트릭스 전구체를 포함하는 캡슐의 두번째 세트를 포함하는 캡슐의 제 1세트를 결합시키고 그리고 나서, 탄력측정 매트릭스를 형성하기 위해 매트릭스 전구체를 고체화함으로써 준비될 수 있음. • microencasulation 방식 • polymerizer + activator로 구성됨
2	CN 101289300 (2012.03.21)	倪卓, 邢鋒	[개요] 폴리우레탄계 고분자 microcapsule을 사용하는 자기치유 콘크리트에 대한 발명임. 폴리우레탄계 고분자 마이크로 캡슐이 콘크리트 안으로 보수재료를 투입하는 역할을 함. 콘크리트/캡슐/물 혼합비는 무게로 100: 1~15 : 15~50임. • microencasulation 방식 • 폴리우레탄계 피복, 에폭시 보수재
2	10-0957986 (2010.05.06)	정용균, 송연균 (포스코)	[개요] 강판 표면에 유기, 유/무기 수지 피막에 세륨 화합물을 평균입경 5㎛ 이하로 하는 마이크로 캡슐레이션 입자를 분산시킨 피막을 조성물로 하는 표면처리 강판제조방법 및 표면처리 강판에 관한 것임. • 금속보호용 코팅에 응용 • 캡슐이 깨지면서 흘러나온 물질이 무기화합물을 형성하면서 치유

▢ 자기치유 보수재료 관련 특허

[표 2-24] 자기치유 보수재료관련 특허(계속)

특허등록번호		출원인	특허개요 및 상세
1	10-2013-1329698 (2013.11.08.)	우경기술(주)	[개요] 자기치유 성능을 갖는 결정 성장형 복합 방수제 및 이를 이용한 콘크리트 타설방법에 관한 것으로 결정 성장형 복합 방수제의 경우 콘크리트 균열의 자가 치유 성능을 가진 것을 특징으로 하며, 이를 콘크리트 배합에 포함하여 타설하는 경우 압축강도 및 내투수성이 향상되는 것을 특징으로 함. •시멘트, 결정성 유기 화합물, 함수규산염, 포졸란재, 아미노카르복식 유도체 분말, 혼화제를 포함함. •시멘트 55.22-55.78%, 결정성 유기 화합물 15.93-16.33%, 함수규산염 5.51-5.65%, 포졸란재 16.42-16.68%, 아미노카르복실 유도체 분말 5.49-5.63%, 혼화제 0.75-0.78%를 혼합하여 제조 (중량비) •결정성 유기 화합물은 멘톨, 벤조산 및 프탈산으로 이루어짐. •함수규산염은 운모분말, 활석분말 및 카올린 분말로 이루어져 있으며, 포졸란재는 규산 백토, 고로슬래그 미분말 및 실리카퓸을 활용함. •자기치유 메커니즘은 함수규산염을 활용하여 에트린가이트의 생성 및 탄산칼슘 생성을 통한 균열 방지가 특징 
2	10-2007-0675441 (2007.01.22.)	㈜알씨에스코리아	[개요] 콘크리트 타설시 균열 등을 방지하고 수밀성을 개선하기 위하여 콘크리트와 혼합하여 사용하는 복합 방수제에 관한 것으로 타설 후 콘크리트 구조체의 내부 또는 외부의 균열 발생시 결정이 생성되어 자가 치유되는 효과가 있는 것을 특징으로 함. •시멘트, 규사, 제올라이트, 벤토나이트, 무수석고, 고급지방산 에스테르염을 혼합하는 것이 특징 •시멘트 100 중량부에 대하여 규사 20~100%, 제올라이트 20~100%, 벤토나이트 10~60%, 무수석고 5~30%, 고급지방산 에스테르염 1~30%를 포함하는 특징으로 하는 결정성장형 복합 방수제 •분말 및 수용성 폴리머를 활용하여 코팅한 펠렛 형태로 구성되어 있음. •수용성폴리머는 폴리에틸렌옥시드, 폴리비닐파이롤리돈, 셀룰로즈수지, 폴리비닐알콜, 폴리비닐아세테이트, 수용성에폭시수지, 수용성실리콘수지, 수용성우레탄수지를 활용함. •벤토나이트를 활용하여 에트린가이트 및 탄산칼슘 결정 생성

[표 2-24] 자기치유 보수재료관련 특허

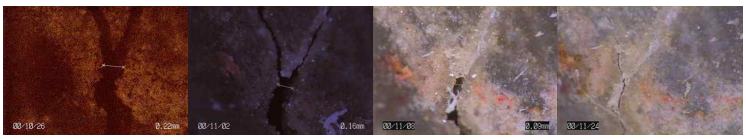
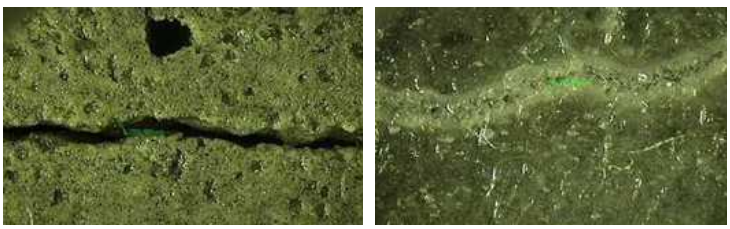
특허등록번호		출원인	특허개요 및 상세
3	10-2007-0675441 (2007.01.22.)	㈜아큐코리아	[개요] 콘크리트 구조물의 방수 방식 기능을 가지고 있는 침투형 보호코팅제 및 시공방법에 관한 것으로써 유기계 재료를 활용한 것을 특징으로 함. •결합재와 충진제, 침투성 기재, 첨가제, 안료로 혼합되어진 코팅제 •결합재로 수분산 우레탄 및 아크릴 에멀젼을 활용 •충진제로 폐도자기 분말 및 규석 분말 활용 •침투성 기재로 수용성 실란 및 변성 실리케이트 활용 •첨가제로 분산제, 소포제, 도막형성제를 활용 •결합재, 충진제, 침투성기재, 첨가제, 안료, 물(용매) 각각은 100 중량%에 대하여 결합재는 10~45%, 충진제는 20~30%, 침투성 기재는 20~30%, 변성 실리케이트는 2~4%, 첨가제 2~4%, 안료 3~6%, 물(용매) 8~16%로 구성되는 것이 특징

▢ 무기계 혼입재 활용 자기치유 콘크리트 특허

[표 2-25] 무기계 혼입재 활용 자기치유 콘크리트 특허(계속)

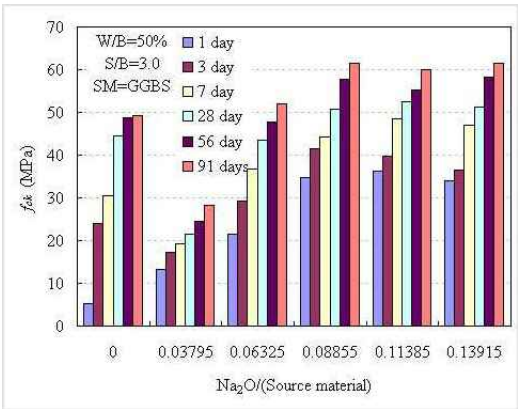
특허등록번호		출원인	특허개요 및 상세
1	10-2010-0126736 (2010.12.02)	University of Tokyo	[개요] 충분한 자기 치유성을 가짐과 동시에, 장기간에 걸쳐서 자기 치유성을 양호하게 유지하는 것이 가능한 콘크리트를 형성할 수 있는 시멘트 혼화재를 제공하는 것을 목적으로 함. •시멘트 혼화재는 팽창재와 팽윤성을 갖는 알루미나 실리케이트를 함유하는 것을 특징으로 함. •시멘트 혼화재는 시멘트와 조합하여 시멘트 조성물을 형성하며, 또한, 이 시멘트 조성물과 물과 골재를 혼합함으로써 자기 치유성이 우수한 콘크리트를 제공함. •마그네슘 실리케이트, 인산칼슘, 탄산기를 갖는 화합물를 추가로 함유

[표 2-25] 무기계 혼입재 활용 자기치유 콘크리트 특허

2	10-2012-0104179 (2012.09.20.)	(주)스미토모오사카시멘트, (주)히가시니혼료카쿠데츠도	[개요] 균열 자기치유 재료에를 주성분으로서 포함하는 조립물이며, 균열 자기 치유재료로 층상 규산염 광물(알루미노 실리케이트, 마그네슘 실리케이트), 결정성 및 비정질의 규산염 광물(알루미노 실리케이트), 인산칼슘, 탄산기를 가지는 화합물 및 광물, 리튬을 함유하는 화합물 및 광물, 마그네슘을 함유하는 화합물 및 광물, 불소를 함유하는 화합물, 포졸란 반응성을 가지는 재료, 잠재 수경성을 가지는 재료 등을 혼합하는 것을 특징으로 함. • 조립물의 입경이 0.1~15mm의 범위 • 차수재료로 규불화 화합물 또는 탄소수가 12 이상 지방산 유기화합물 사용 • 자기치유 성능향상을 위해 섬유, 감수제 사용 
3	10-2013-0018582 (2013.08.29)	(주) 인트켐	[개요] 콘크리트구조물에 균열이 발생할 경우 콘크리트 내부에 포함하고 있는 재료가 콘크리트에 침투된 물(H_2O) 및 이산화탄소(CO_2)와 반응하여 발생한 균열을 스스로 복원하고 치유(Self Healing)하는 스마트 콘크리트(Smart Concrete)에 관한 것임. • 수용성 무기질계 겔화재, 알카리 설페이트, 알루민산나트륨, 수용성 실리카를 포함하는 것을 특징 • 콘크리트 혼화재 1~10%와 시멘트 90~99%로 혼합 • 터널라이닝 콘크리트, 포장 콘크리트, 공장제조 제품용 콘크리트, 수처리 콘크리트, 원자력 발전소용 콘크리트, 해양 콘크리트 중 어느 하나로 배합되는 것을 특징으로 하는 자기치유 스마트 콘크리트 

▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 특허

[표 2-26] 자기치유형 무시멘트 콘크리트관련 특허

특허등록번호		출원인	특허개요 및 상세
1	03290348 (1991.12.20.)	DENKI KAGAKU KOGYO	[개요] 주재료로 고로슬래그, 알칼리 자극제, 에틸렌질산비닐공중합체(ethylene-vinyl acetate copolymer emulsion)를 사용하여 높은 화학저항성을 가진 폴리머 시멘트를 제조할 수 있음. • 고로슬래그의 입자크기는 3,000 cm^2/g 이상이고 5,000~8,000 cm^2/g이 적합함. • 나트륨 염이 알칼리 자극제로 적합함. • 에틸렌질산비닐공중합체(ethylene-vinyl acetate copolymer emulsion)는 10℃ 이하의 전이온도를 갖는 것이 도포막의 결합강도와 신축성에 바람직함.
2	06068055 (2000.05.30.)	Halliburton Energy Services, Inc	[개요] 슬래그 시멘트, 물, 자극제, 에폭시, 에폭시경화제로 구성된 구성물로 지하 중공부 차단벽 시공을 한다. 타설과 경화과정에서 미세균열이나 수축은 발생하지 않으며 적합한 압축강도와 인장강도를 갖고 탄성적임. • 이용방법은 지하부를 굴착하고 설명한 구성물인 슬래그 시멘트를 타설하고 에폭시를 넣어 경화시킴. • 자극제로 수화석회, 수산화나트륨, 탄산나트륨, 황산나트륨, 산화마그네슘, 포틀랜드시멘트가 사용되었고, 슬래그 시멘트 중량의 8~20%가 사용되었으며 대략 15%가 가장 적합함.
3	10-0855686 (2008.08.26.)	전남대 산학협력단	[개요] 고로슬래그, 플라이애시 및 메타카올린 등 산업부산물에 자극제인 알카리성 무기질 재료를 적정량 첨가한 무시멘트 알칼리 활성 결합재에 관한 것으로, 시멘트와 동등한 성능을 보여줌. 자극제로써 분말형의 규산나트륨과 수산화나트륨, 액상형의 물유리 및 액상형 수산화나트륨의 어느 하나 이상이고, 자극제 사용량은 모재료의 중량비 0.114 ~ 0.14임. 

2.3.3 논문동향 분석(Landmark 활용)

(1) 분석개요

▢ 조사범위 : 2000년~2013년

▢ 논문검색 : 국토교통과학기술진흥원 Landmark 활용

▢ 조사항목 : 중분류 수준에서 조사하였으며, 국가별 논문수/연도별 논문수, 주요 연구기관 및 연구자 현황, 정성적 분석 결과 등을 기술하였음.

(2) 분석목적

▢ 논문 동향조사는 논문문헌정보를 기술 분야별로 조사, 분류, 가공, 분석함으로써 과거부터 현재까지의 기술동향 및 기술수준, 주요 연구개발 주체의 연구개발 동향 등을 파악하여 본 기획의 중점추진분야 설정을 위한 객관적인 근거를 제시하기 위함.

(3) 분석절자

▢ 본 기획에서는 조사항목, 대상, 기간, 검색범위를 설정하고 분석 대상 관련 키워드(keyword) 도출 및 검색식 설정, 논문 DB(국토교통과학기술진흥원 Landmark 활용) 및 노이즈 제거를 거쳐 분석 대상을 확정하여 분석하는 절차를 따름.

(4) 자기치유형 콘크리트 논문분석 정량적 분석결과

▢ 논문 분석 키워드

■ 자기치유형 콘크리트 기술은 상당히 최신기술에 해당하기 때문에 콘크리트의 자기치유 기술을 중심으로 논문 분석을 수행하였음.

■ 논문 분석 키워드는 다음과 같이 콘크리트의 자기치유 소재 중심으로 5개의 중분류로 나누어 분석하였음.

[표 2-27] 논문 분석 키워드 (자기치유 콘크리트)

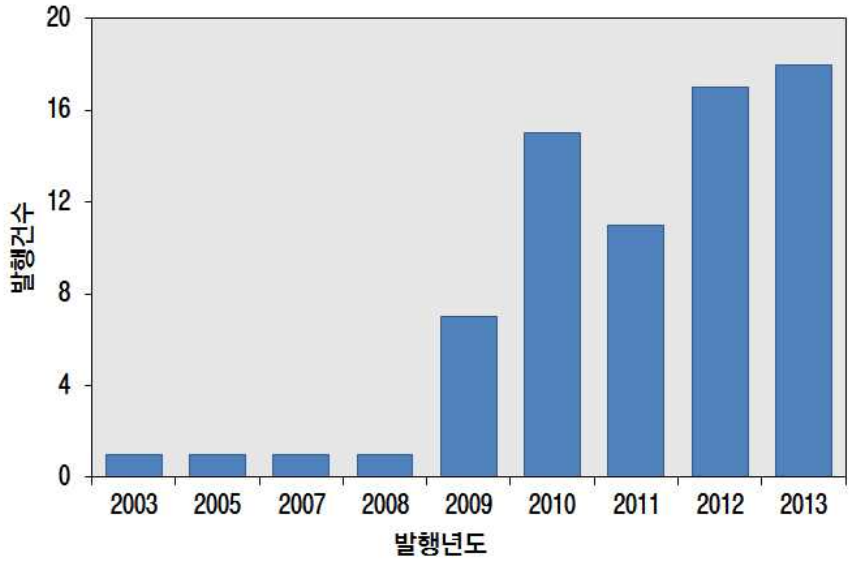
분야	중분류	검색키워드	검색 논문수
자기치유형 콘크리트	박테리아 활용기술	Bacteria, Biogenic, Microbial, Biopolymer, Bio-based, Microorganisms 등	21
	마이크로 캡슐 활용기술	Microcapsule, Capsule, Tubular 등	12
	무기질 혼합재 활용기술	Mineral admixture, Expansive, Swelling, Carbonate 등	12
	섬유 활용기술	Fiber, Micro-fiber, shape memory 등	20
	기타 소재 활용기술	-	7

▢ 자기치유형 콘크리트 분야 논문 총 72건 중에서 박테리아 활용기술이 29.2%인 21건, 마이크로 캡슐 활용기술이 16.7%인 12건, 무기질 혼화재 활용기술이 16.7%인 12건, 섬유활용기술이 27.8%인 20건 및 기타 소재를 활용한 기술이 9.7%인 7건을 차지함.

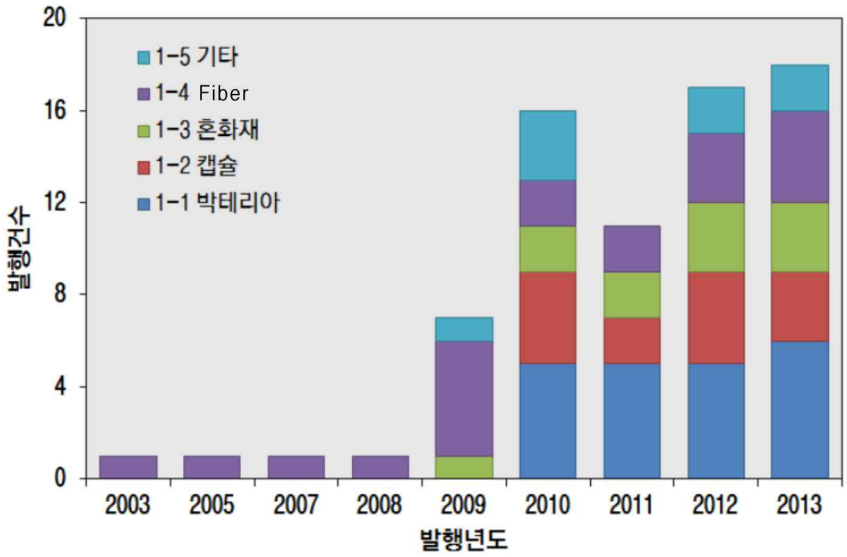
■ 박테리아 활용 및 섬유활용기술이 전체 57%로 상당히 높은 비중을 차지하고 있음.

▢ 자기치유형 콘크리트관련 논문은 2008년도까지는 년 1편 정도에 그치고 있었지만, 2009년부터 증가하여 2013년까지 꾸준히 증가하고 있는 추세임.

▢ 2008년도까지는 섬유를 활용한 논문이 대부분이었지만, 2009년부터는 박테리아, 캡슐, 무기질 혼합재 등 다양한 소재를 활용한 논문이 증가하고 있음.

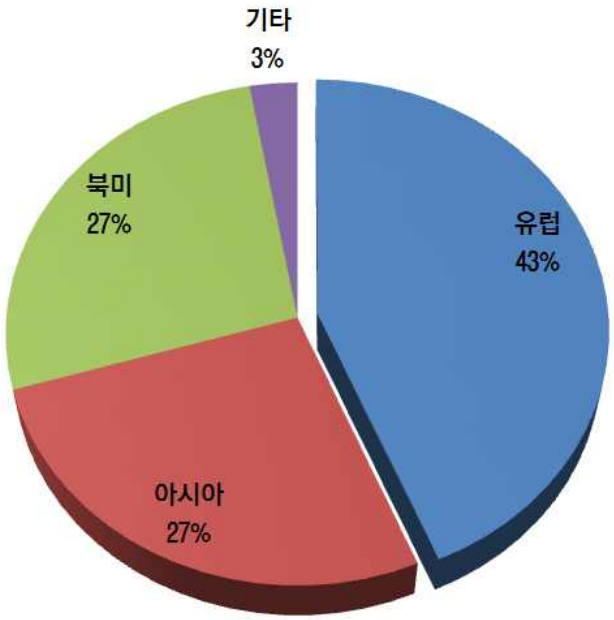


[그림 2-82] 발행년도별 자기치유 논문 발행건수



[그림 2-83] 발행년도별 자기치유 기술 분야별 논문 발행건수

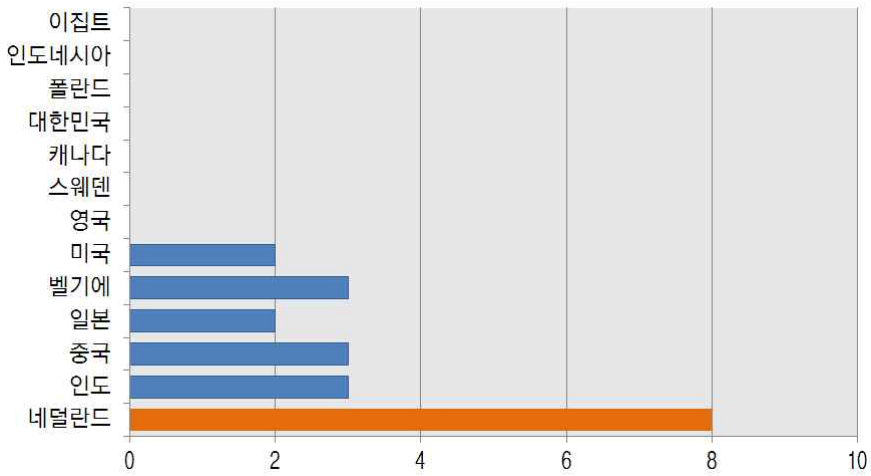
▢ 자기치유형 콘크리트 연구는 유럽에서 가장 활발하게 진행(논문건수 43%)되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 아시아와 북미가 27% 정도를 차지하고 있음.



[그림 2-84] 대륙별 자기치유 논문 발행건수

▢ 박테리아 활용기술

- 박테리아 활용 자기치유형 콘크리트에 대한 논문은 네델란드가 8개로 가장 많으며, 인도, 중국, 일본, 벨기에, 미국이 2~3개 정도임.
- 네덜란드 델프트공대에서 박테리아 활용 자기치유에 대한 논문을 가장 많이 게재하고 있음.



[그림 2-85] 박테리아 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수

■ 연구기관으로는 박테리아 활용 자기치유형 콘크리트 분야에서 네델란드 델프트 공대가 총 8건으로 가장 많았으며, 벨기에 Ghent대학, 인도 Thapar대학, 중국의 Southeast대학이 3편을 게재하였음.

※ 델프트 공대의 Microlab에서 박테리아 활용 자기치유 콘크리트에 대한 논문을 가장 많이 게재하고 있음.

[표 2-28] 주요 연구기관 및 연구자(박테리아 활용기술)

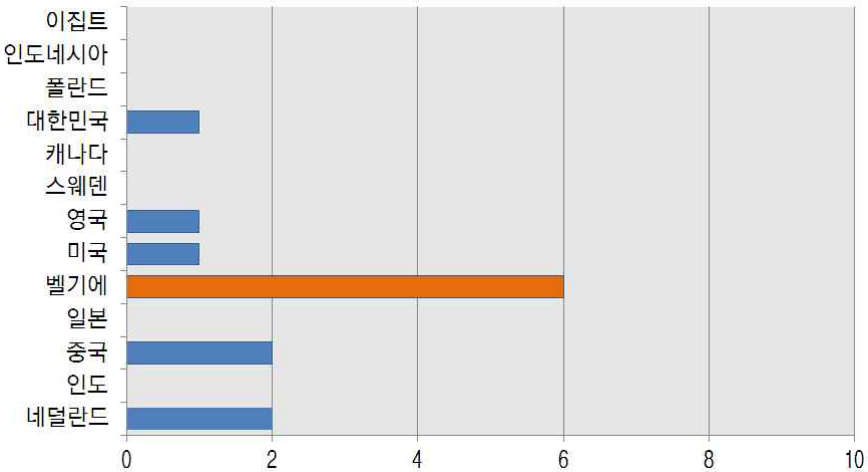
분야	중분류	주요연구자	건수
박테리아 활용 자기치유 콘크리트	Delft University (Netherlands)	Jonkers, H.M., Wiktor, V., Thijssen, A., Zemskov, S.V.	8
	Ghent University (Belgium)	De Belie, N., Wang, J.Y., Verstraete, W.	3
	Thapar University (India)	Chahal, N., Siddique, R., Patiala, Punjab, Achal, V., Mukerjee, A., Van Tittelboom, K.	3
	Southeast University (China)	Qian, C., Luo, M., Pan, Q., Li, R., Gao, L., Sun, G.	3

■ 국내에서는 경북대학교 김화중 교수팀이 2009년에 한국콘크리트학회에 게재한 논문이 박테리아 활용 자기치유 콘크리트에 관한 유일한 것으로 외국과 상대적으로 기술격차가 있음.

▢ 마이크로 캡슐 활용기술

■ 마이크로 캡슐 활용 자기치유형 콘크리트에 대한 논문은 벨기에가 6개로 가장 많으며, 미국, 네델란드, 중국, 대한민국, 영국이 1~2개 정도임.

■ 콘크리트 균열 시 캡슐을 활용한 균열 자기치유에 관한 논문이 가장 많았으며, Acoustic emission에 의한 자기치유 성능 평가논문도 게재되었음.



[그림 2-86] 마이크로 캡슐 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수

■ 마이크로 캡슐 활용 자기치유형 콘크리트 분야에서 벨기에 Ghent대학의 Magnel Laboratory for Concrete Research가 6건으로 논문 게재로 가장 많았으며, 다른 기관은 1~2건에 국한되어 있음.

※ Ghent대학 Magnel Laboratory의 Van Tittelboom K.는 콘크리트 적용분야에서 가장 활발히 연구하는 연구자로 판단됨. 마이크로캡슐을 활용한 자기치유 기술은 우주, 항공, 기계 분야에서 많이 활용되고 있는 것으로 보고됨.

■ 국내에서는 연세대학교 정찬문 교수팀과 한국건설생활환경시험연구원팀이 공동으로 UV반응형 마이크로캡슐을 활용하여 자기치유형 콘크리트 표면코팅제에 대한 논문을 2013년에 ACS Applied Materials and Interfaces에 게재하였음.

[표 2-29] 주요 연구기관 및 연구자 (마이크로 캡슐 활용기술)

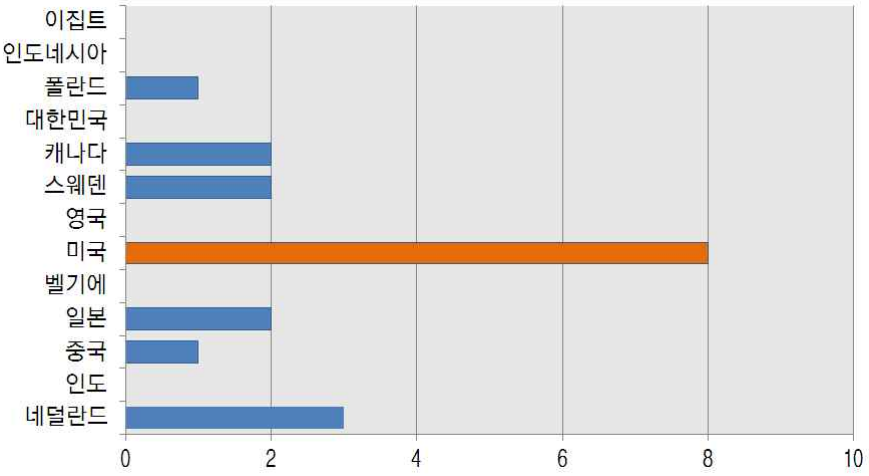
분야	중분류	주요연구자	건수
마이크로캡슐 활용 자기치유 콘크리트	Ghent University (Belgium)	Van Tittelboom, K., Dierick, M., De Belie, N., Van Loo, D., Jacobs, P.	6
	Delft University (Netherlands)	Zemskov, S.V., Jonkers, H.M., Vermolen, F.J.	2
	University of Michigan (USA)	Li, V.C., Herbert, E.	1
	Yonsei University (Korea)	Chung, C.-M., Song, Y.-K.	1

▢ 섬유 활용기술

■ 섬유활용 자기치유형 콘크리트에 대한 논문은 미국이 8개로 가장 많으며, 네덜란드 3개, 스웨덴, 캐나다, 일본이 2개 정도임.

■ 국내에서는 세종대학교 김동주(2011)가 한국콘크리트학회지에 HPFRCC의 자기치유능력 평가에 대한 논문게재가 유일함.

■ 섬유활용 자기치유형 콘크리트 분야에서 미국 Michigan대학의 Laboratory for Concrete Research가 6건의 논문 게재로 가장 많았으며, 그 다음으로 네덜란드 델프트 공대가 3개, 스웨덴의 KTH Stockholm, Tohoku 대학이 2개 정도임.



[그림 2-87] 섬유 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수

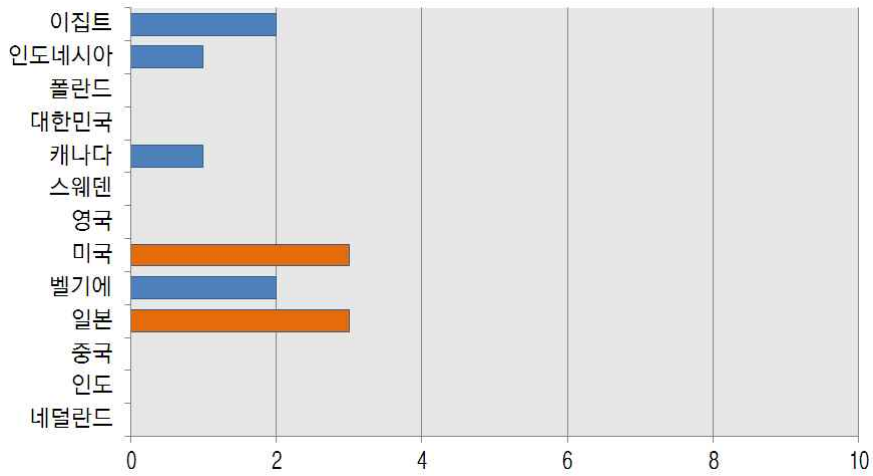
[표 2-30] 주요 연구기관 및 연구자(섬유 활용기술)

분야	중분류	주요연구자	건수
섬유 활용 자기치유 콘크리트	University of Michigan (USA)	Li, V.C., Lepech, M.D., Sahmaran, M.	6
	Delft University (Netherlands)	Garcia, A., Schlangen, E., Van De Ven, M., Van Vliet, D., Schlangen, E.	3
	KTH Stockholm (Sweden)	Garcia, A., Norambuena-Contreras, J., Partl, M.N.	2
	Tohoku University (Japan)	Homma, D., Mihashi, H., Nishiwaki, T., Koda, M., Kikuta, T.	2

▢ 무기질 광물질 활용기술

- 무기질 광물질 활용 자기치유 콘크리트에 대한 논문은 일본과 미국이 3건, 벨기에와 이집트가 2개씩 게재하였음.
- 국내에서는 동경대학교 안태호(2012년), 인트켐 황지순(2013년), 연세대학교 이창홍(2009년) 등의 연구진에 의해 한국콘크리트 학회지에 게재되었음.
- 무기계 광물질을 활용한 콘크리트 자기치유에 대한 연구기관으로는 동경대학, 미국의 Michigan 대학, 벨기에 Ghent 대학, 이집트의 Alexandria 대학이 주를 이룸.

※ 하지만 시멘트계 물질이 가지고 있는 본연의 자기치유 기능 외에 다른 혼합물 또는 첨가물에 의한 콘크리트 균열의 자기치유에 대한 논문은 일본(동경대)이 유일함.



[그림 2-88] 무기질혼합재 활용 자기치유 기술 국가별 논문건수

[표 2-31] 주요 연구기관 및 연구자(섬유 활용기술)

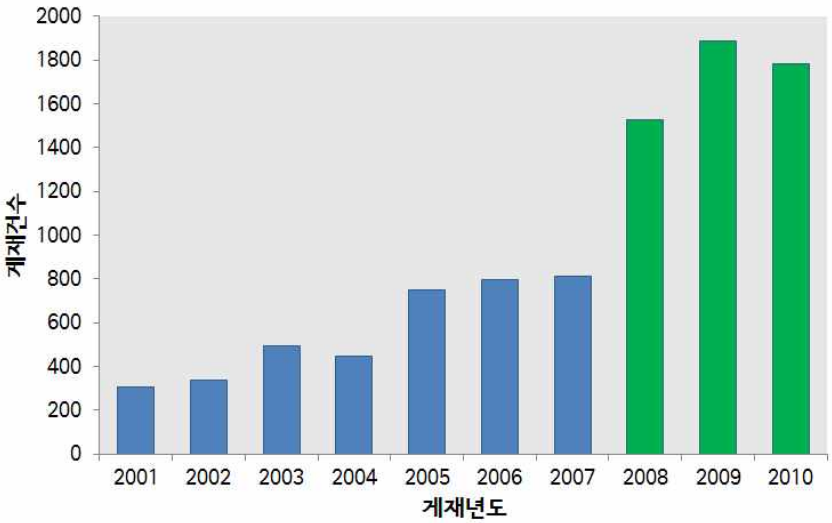
분야	중분류	주요연구자	건수
무기질 광물질 활용 자기치유 콘크리트	University of Tokyo (Japan)	Ahn, T.-H., Kishi, T., Na, S.H., Hama, Y.	2
	University of Michigan (USA)	Li, V.C., Herbert, E.N., Li, G., Xu, T.	2
	Ghent University (Belgium)	Van Tittelboom, K., De Belie, N., Huang, H., Ye, G.	2
	Alexandria University (Egypt)	Abd Elhakam A., Mohamed, A.E., Awad E.	2

(5) 친환경 콘크리트 논문의 정량적 분석결과

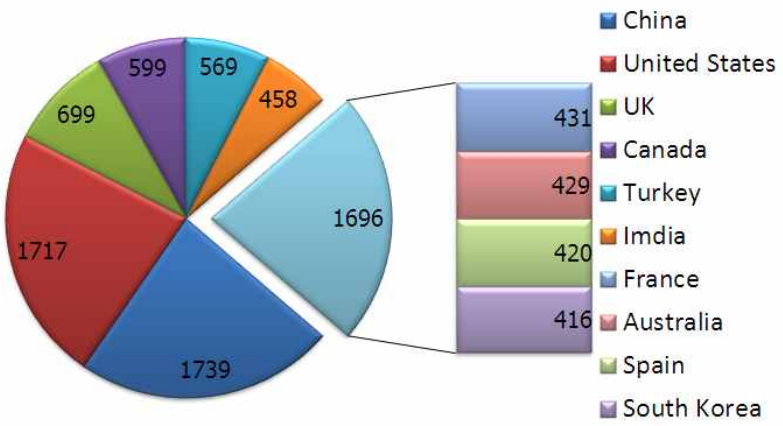
▢ 콘크리트 배합 중 시멘트를 저감하여 온실가스를 감축하는 친환경 콘크리트 기술과 관련하여 2001년부터 2010년까지 발표된 논문은 총 9,000여 편으로 기술적으로 성숙기를 지나고 있는 것으로 판단됨.

- 검색 키워드는 주제검색 'slag cement or concrete' or 'fly ash cement or concrete ' or 'scm cement or concrete'이며, 'high volume', 'blended', 'ternary' 등 시멘트를 줄이기 위한 배합에 사용되는 검색키워드로 재검색하여 논문을 검색함.
- 국가별 논문발표 동향을 살펴보면 중국과 미국이 전체 논문의 40% 이상을 차지하고 있으며, 우리나라도 400편 이상을 발표하고 있어 10위 이내에 포함되어 있음.

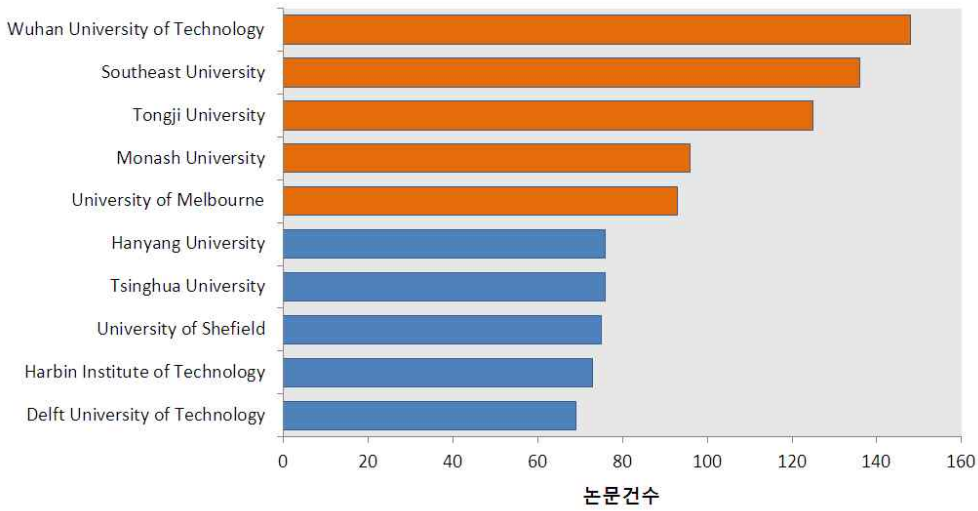
※ 기관별 논문 발표동향을 살펴보면 중국의 Wuhan University of Technologym, 미국의 South University에서 다수의 논문을 발표하였음.



[그림 2-89] 연도별 논문발표 동향



[그림 2-90] 주요국가별 논문발표 동향



[그림 2-91] 주요기관별 논문발표 동향

▢ 시멘트를 전혀 사용하지 않는 무시멘트 콘크리트 분야에 논문분석을 다음과 같이 수행함.

■ 무시멘트 분야 대분류 검색 키워드는 주제검색 'alkali activated slag' or 'alkaline activation' or 'alkali activator'이며, 해당 검색결과 내에서 아래와 같이 기술 분류 검색키워드로 재검색하여 세부분야별 논문을 검색함. (선택된 연구 분야는 chemistry, materials science, engineering, geochemistry, geology, construction building technology, environmental sciences ecology, polymer science, mineralogy임.)

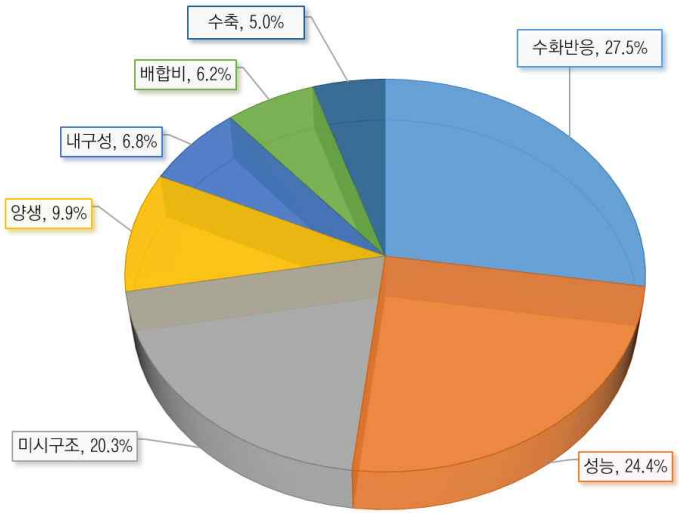
[표 2-32] 논문 분석 키워드

분야	기술 분류	검색키워드	검색 논문수
무시멘트 키워드('alkali activated slag' or 'alkaline activation' or 'alkali activator')	수화반응 (자극제/이온 등에 따른 반응 기구)	('무시멘트 검색키워드') and ('hydration' or 'mechanism')	321
	성능 (강도, 유동성 등)	('무시멘트 검색키워드') and ('strength' or 'flow' or 'workability' or 'performance')	285
	미세구조 분석 (결합 및 공극구조 등)	('무시멘트 검색키워드') and ('microstructure' or 'pore' or 'XRD' or 'FT-IR' or 'DTG')	237
	양생조건 (대기, 수중, 고온, 오토클레이브)	('무시멘트 검색키워드') and ('curing' or 'steam' or 'autoclave')	116
	수축 (자기/건조 수축)	('무시멘트 검색키워드') and ('shrinkage' or 'dry' or 'autogenous')	85
	내구성 (물리, 화학적 내구성능 검증)	('무시멘트 검색키워드') and ('durability' or 'carbonation' or 'freezing' or 'permeate')	80
	결합재 배합비 (모재료+자극제 종류 및 첨가량)	('무시멘트 검색키워드') and ('mix design' or 'dosage' or 'activator dosage')	72

※ 논분 키워드분석의 특성 상 하나의 논문이 기술 분류를 하나 이상 포함할 수 있음.

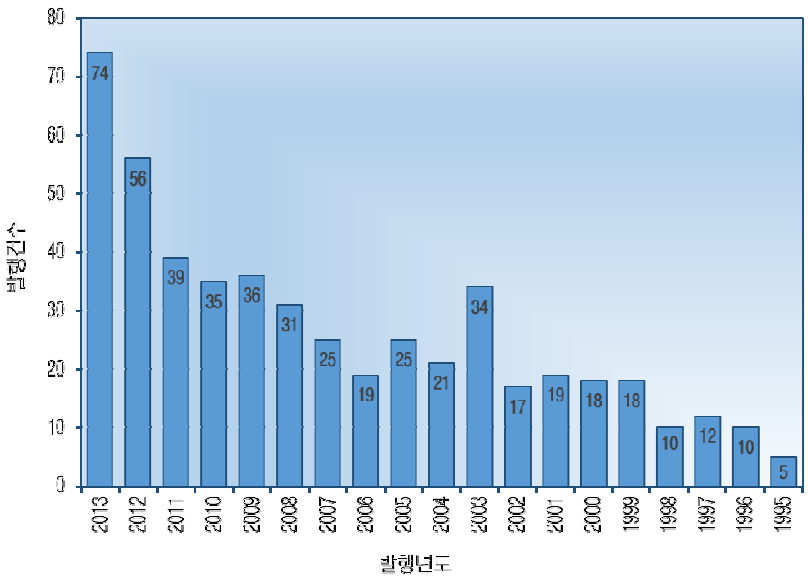
▢ 무시멘트(AAS 분야) 콘크리트 논문분석 정량적 분석 결과

■ 무시멘트 분야 중 AAS 콘크리트에 관한 논문은 1995년부터 2013년까지 검색키워드로 검색된 논문의 수는 총 504편이며, 이 중 수화반응기구 분석이 27.5%인 321건으로 가장 많고, 강도 및 유동성 등의 성능에 관한 논문이 24.4%인 285건, 미시구조 분석에 관한 논문이 20.3%인 237건, 양생방법에 따른 특성이 9.9%인 116건, 그리고 AAS 콘크리트의 내구성에 관한 논문이 6.8%인 80건을 차지함.



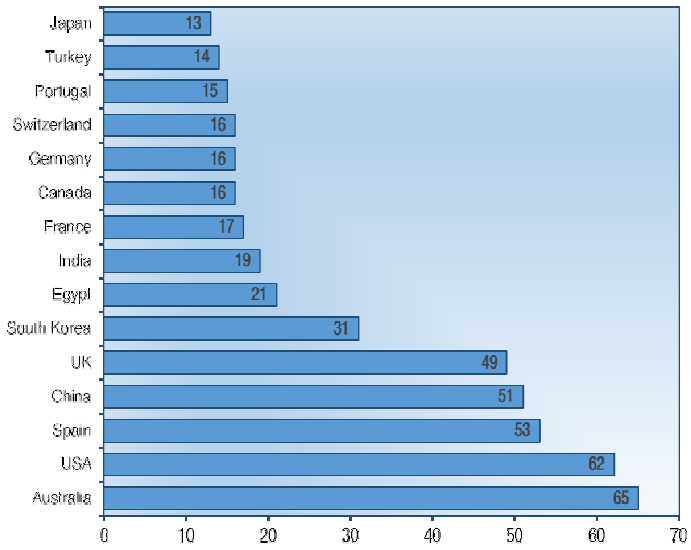
[그림 2-92] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 세부분야별 논문분포

■ 무시멘트 AAS 콘크리트에 관한 논문의 년도별 발행건수를 보면 1995년 5건에서 시작하여 꾸준히 증가함. 특히 최근 2년간인 2012년 이후부터 큰 증가폭을 보이고 있어, 세계적으로 무시멘트 AAS 기술에 대한 연구의 관심이 높아지는 것을 알 수 있음.



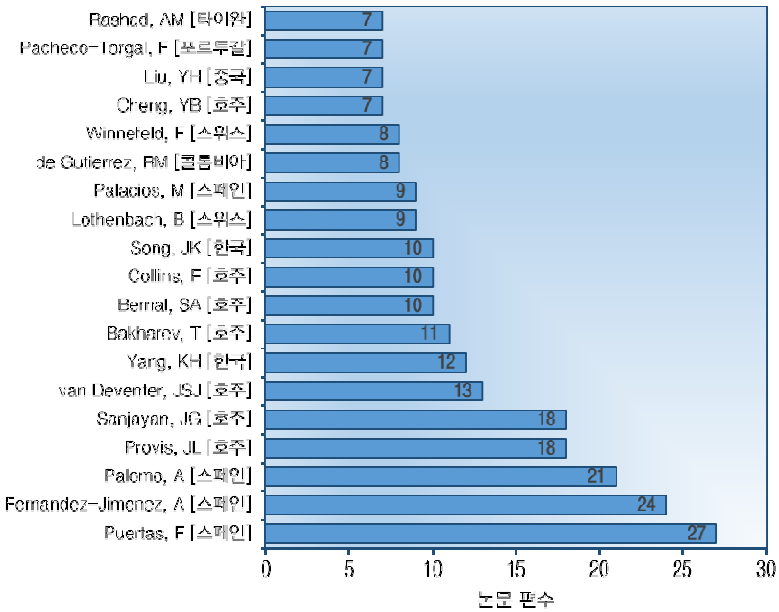
[그림 2-93] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 년도별 논문발행 현황

■ 무시멘트 AAS 콘크리트에 관한 국가별 논문 발행 현황은 호주가 65건으로 가장 많은 논문이 발표되었으며, 미국이 62건, 스페인과 중국이 각각 53, 51건, 영국이 49건이며 우리나라는 31건으로 6위를 기록함.



[그림 2-94] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 국가별 논문발행 현황

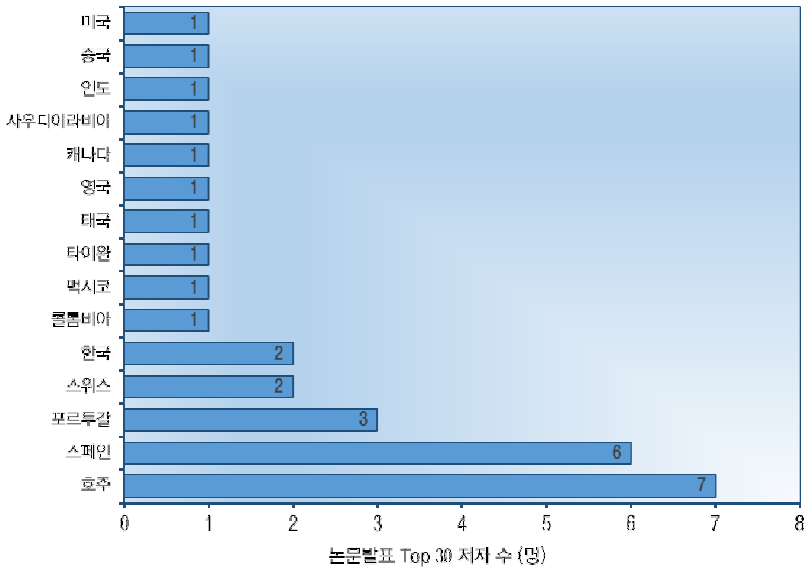
■ 무시멘트 AAS 콘크리트에 관한 저자별 논문 발행 현황은 스페인의 Puertas가 27건으로 가장 많은 논문을 발표하였으며, 1~3위 모두 스페인의 연구자가 차지함. 4~6위는 호주의 연구자가 차지하였으며, 그 뒤를 이어 한국의 양근혁 교수가 12건으로 7위를 차지함.



[그림 2-95] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 저자별 논문발행 현황

■ 무시멘트 AAS 콘크리트 분야에서 논문발표건수 상위 30위(Top-30) 저자들의 소속 국가를 분석한 결과 호주가 7명, 스페인이 6명, 스위스와 한국이 각각 2명씩을 기록함. 호주와 스페인, 포르투갈, 스위스, 한국은 특정 연구집단에서 집중적으로 해당 연구를 진행하고 있는 것으로 보임.

※ 중국과 미국, 영국은 Top-30 저자가 없음에도 국가별 전체 논문발표 수에서 상위권을 차지하고 있는 것으로 보아 여러 기관의 많은 연구자들이 연구에 참여하고 있는 것으로 판단됨.



[그림 2-96] 무시멘트(AAS) 콘크리트의 국가별 논문발표 Top-30 저자 현황

■ 무시멘트 AAS 콘크리트의 주요 연구기관은 스페인의 과학연구위원회인 Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (CSIC) (31건) 이며, 호주의 Monash 대학(27건), Melbourne 대학(24건), 한국의 전남대와 경기대(13건) 임.

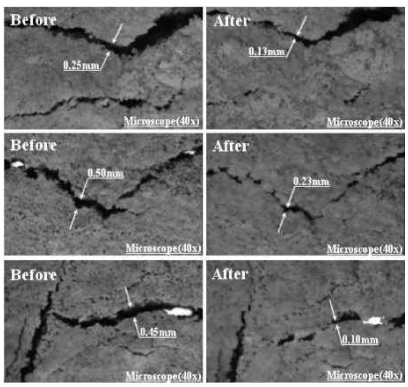
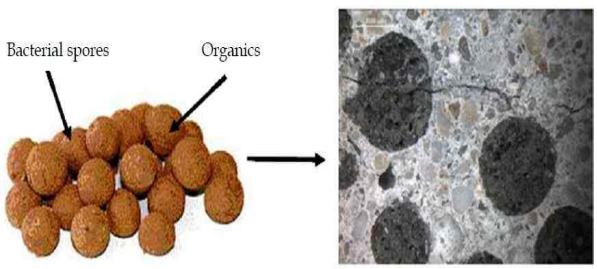
[표 2-33] 무시멘트 AAS 콘크리트분야 주요 연구기관 및 연구자

분야	중분류	주요연구자	건수
무시멘트	Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (스페인)	Puertas, F., Palacios, M., Palomo, A., Vazquez, T.	31
	Monash University (호주)	Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Collins, F., Cheng, Y.B.	27
	University of Melbourne (호주)	Van Deventer, Provis, J.G., Bernal, S.A.	24
	전남대, 경기대 (한국)	송진규, 양근혁	13

(6) 국내외 핵심논문 분석

▢ 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 기술

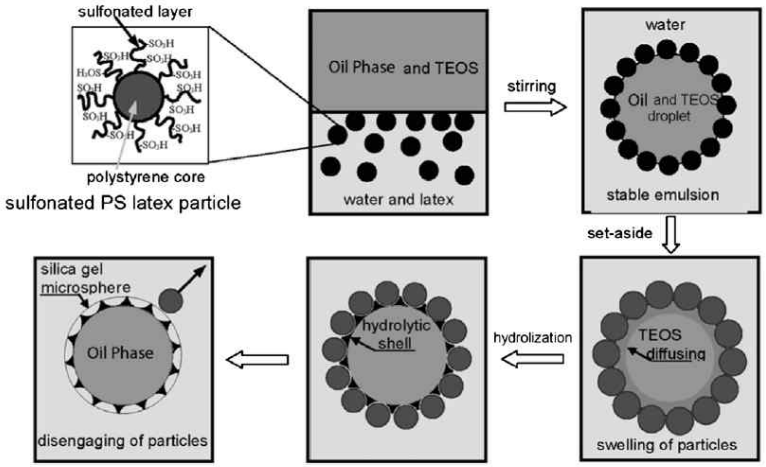
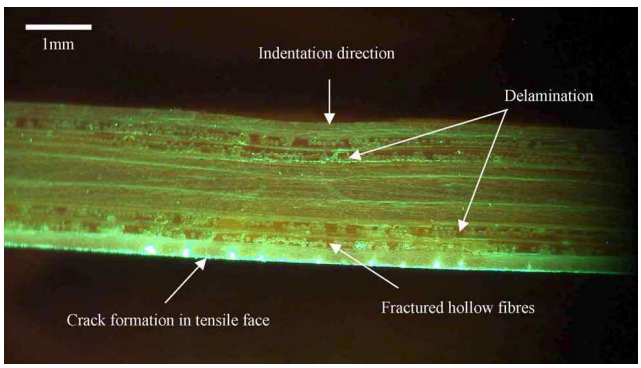
[표 2-34] 논문 분석

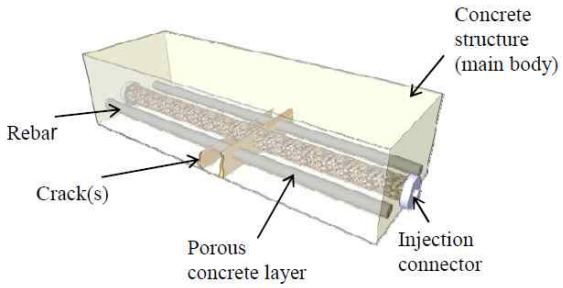
	논문제목	저자	논문개요 및 상세
1	미생물의 방해석 석출 작용을 이용한 자기보수 스마트콘크리트 개발에 관한 연구	김화중, 김사열, 박성진, 최길준, 천우영	[개요] 탄산칼슘 생성단계에서 화학적인 처리과정을 거쳐 이용하는 방법이 아닌 환경부하저감을 위한 미생물의 생체광물 형성작용(biomineralization)중 미생물의 방해석 석출 작용(Micro-biologically Induced Calcite Precipitation, MICP)을 이용하여, 화학적 처리과정시 발생되는 많은 환경적인 문제점을 해결하기 위한 차세대 스마트 콘크리트 개발 • Sporosarcina pasteurii와 콘크리트 구조물에서 검출한 미생물 4종 (Sporosarcina soil, Bacillus massiliensis, Arthrobacter crystallopoietes, Lysinibacillus fusiformis)을 추가적으로 이용하여 연구진행 • 동일한 우레아 환경에서 4종의 신규 유용미생물들의 방해석 석출 반응성을 알아보기 위해 Urea-$CaCl_2$ medium을 사용 • 미생물이 수분과 산소가 있는 곳에서 더 활동적으로 이기 때문에 균열 폭이 깊은 곳 보다는 균열 폭이 작고 얕은 곳에서 더 효과적인 것으로 확인됨. 
2	Bacteria-based self-healing concrete	Jonkers, H. M.	[개요] 구조물의 미세한 균열에 의한 염화물, 황산염 및 산과 같은 화학물질의 침투를 저하시키기 위해 박테리아를 이용한 자기치유 콘크리트를 개발하고 유기화합물로 이루어진 다공성 팽창점토입자에 대한 연구 • 기존의 연구는 박테리아 기반의 자기치유 지속 기간이 약 2개월로 제한됨. 미생물을 다공성팽창점토와 혼합하여 자기치유 기능을 확장시키는 것이 가능함.  • 박테리아를 콘크리트혼합물에 직접 첨가하는 것에 비해 다공성팽창점토로 포장하여 첨가할 때 생존율이 2개월에서 6개월 이상으로 증가

▢ 마이크로 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 관련 논문

- 2000년대에 들어서 본격적인 논문게재와 특허 출원이 이루어지고 있음.
- 세계적으로 자기치유 폴리머에 관련된 연구가 주로 수행되어 왔으며, 자기치유 캡슐 콘크리트에 대한 논문은 제한적임.

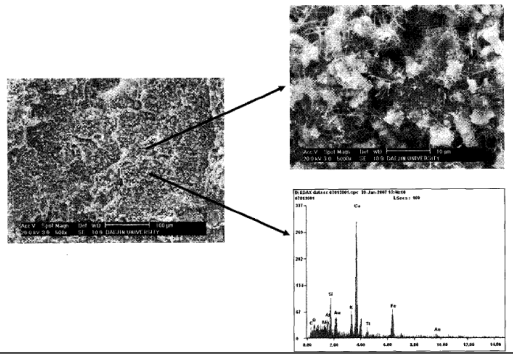
[표 2-35] 논문 분석

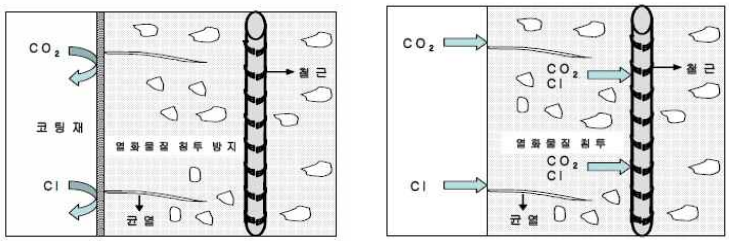
	논문제목	저자	논문개요 및 상세
1	A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules	Yang, Z., Hollar, J., He, X., Shi, X.	[개요] 실리카 겔 피막과 oil core를 가지는 마이크로 캡슐을 활용한 자기치유 모르타르 개발 • Wall: surface-sulfonated polystyrene particles + oil phase (oil/TEOS = 17/3, mol/mol) • 보수재: Methylmethacrylate(MMA) monomer • 촉매: triethylborane(TEB) • 최대 하중의 80%를 가력한 후에 자기치유 효과를 비교함.  Fig. 1. Schematic illustration of the formation of the passive smart microcapsules.
2	'Bleeding composites' damage detection and self-repair using a biomimetic approach	Pang, J.W.C., Bond, I.P.	[개요] 자기 진단 기능을 추가한 캡슐 활용 자기 치유 복합재료를 개발함. 균열이나 손상이 발생한 경우 보수재료가 흘러나오는 것을 쉽게 감지할 수 있는 기능을 첨가하여 균열의 자기 치유 뿐에 추가하여 손상을 진단하는데 도움이 되도록 함. • Capsule: Hollow glass fibers • 보수재: modified epoxy resin repair agent (MY750 Ciba-Geigy + 30%/wt acetone) • 자기진단: UV fluorescent dye penetrant (Ardrox 985) • 휨실험을 통해 자기치유 및 자기진단 효과를 비교함. 

3	Self healing of conrete structures - Novel approach using porous network concrete	Sangadji S., Schlangen, Erik	[개요] 자기치유 콘크리트는 충분한 양의 보수재료를 공급해주는 것이 치유능력과 직접적인 관계가 있음. 본 연구에서는 보수재를 공급할 수 있는 별도의 통로를 콘크리트 내부에 매입하여 이를 통해 보수재료가 공급될 수 있도록 함. • 보수재: Epoxy (Conpox Harpiks BY158), Harder (HY 2996) Fluorescent dye (powder) • 보수재 공급로 : porous concrete • 휨실험을 통해 자기치유 및 자기진단 효과를 비교함.  conceptual design and application of porous network concrete.

▢ 자기치유형 보수재료 관련 논문

[표 2-36] 자기치유형 보수재료 논문분석

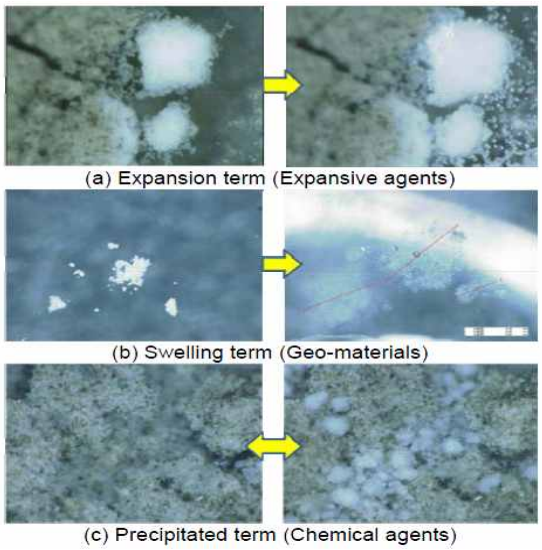
논문제목		저자	논문개요 및 상세
1	콘크리트 구조물의 균열 보수를 위한 나노 합성 무기계 보수 재료의 성능 평가	김종필 전찬기 정훈 김홍석	[개요] 균열이 발생된 콘크리트 구조물의 성능 회복 및 성능 향상을 위하여 친환경적인 나노 합성 무기계 보수 재료에 대한 연구를 수행하였으며, 나노 합성 무기계 보수 재료의 물성, 부착성능, 염소이온 투과성, 내염수성 및 미세구조 분석을 실시하였음. • 나노 소재는 밀도 1.01의 나노실리케이트 및 1.02의 나노 폴리머 바인더를 활용하였으며, 각 고형분량 2.5% 및 50%에 대하여 검토하였음. • 사용된 나노 소재는 바탕 콘크리트와의 접착력 향상을 위해 사용 • 검토결과 건습 및 습식 환경에서 충분한 접착력 확보가 가능하며, 성능향상이 가능한 것으로 나타남. • 반응메커니즘 분석을 위하여 SEM 및 EDS 촬영결과 육각판상의 수산화칼슘 및 타입III의 C-S-H겔 생성을 통하여 균열 보상이 가능한 것으로 나타났으며, 보수재료 내 Ca 및 Si가 주를 이룸. 

	논문제목	저자	논문개요 및 상세
2	콘크리트의 내구성 증진을 위한 코팅재의 성능평가	김성수 최춘식 남용혁	[개요] 콘크리트 구조물을 보호하기 위한 목적으로 무기계 기반 재료의 특징과 유기계 기반 재료의 특징을 혼합한 하이브리드 형태의 유무기계 콘크리트 코팅재에 관한 연구를 수행한 것으로 각각의 유무기 재료의 장점을 활용한 폴리머 및 시멘트계 재료를 합성한 코팅재 개발을 위하여 물리 성능 및 내구성능을 평가하였음. • 폴리머 및 시멘트계 재료를 합성한 폴리머 세라믹 합성 재료가 액상형태로써 고형분 50%로 이루어져 있는 것이 특징. • 접착강도, 균열 추종성, 흡수량, 염소이온 침투저항성, 탄산화 저항성 및 동결융해 저항성 등 성능은 각각의 평가항목에 대하여 우수한 것으로 나타났으나, 시공성 및 경제성 검토가 필요한 것으로 나타남. • 상기 특성을 가진 하이브리드 코팅재는 성능측면에서 검토할 경우 각각의 성능이 해외제품 대비 동등 이상의 성능이 나타남에 따라 수입 대체효과가 뛰어날 것으로 예측하고 있음.  (a) 콘크리트에 코팅을 실시한 경우 (b) 콘크리트에 코팅을 실시하지 않은 경우

▢ 무기계 광물질 활용 자기치유형 콘크리트 관련 논문

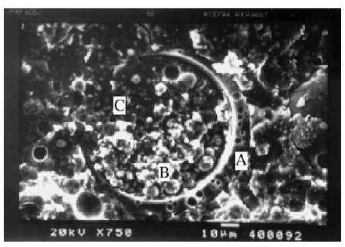
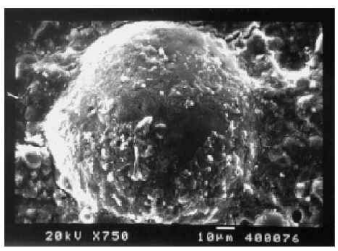
[표 2-37] 무기계 광물질 활용 자기치유 콘크리트 논문분석

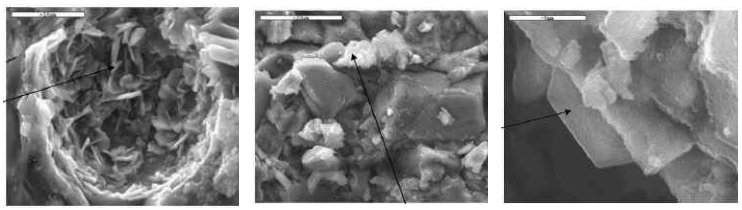
	논문제목	저자	논문개요 및 상세
1	Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures	Ahn, T-H., Kishi T.	[개요] 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 막대한 영향을 끼치는 균열을 제어하는 자기치유 콘크리트 개발에 관해 연구하였으며, 콘크리트의 자기 치유 능력을 측정하기 위해 팽창재, geo-materials 그리고 화학작용제와 같은 다양한 광물계 혼화재가 함유된 시멘트 복합체를 구성하여 콘크리트의 자기 치유 능력을 검토함. • 팽창재는 C_4A_3S, $CaSO_4$ and CaO의 세가지 광물 혼합물로 구성된 K-type CSA팽창재를 사용 • Geo-material은 주로 SiO_2, Al_2O_3, 몬모릴로나이트로 구성되며 물과 반응하여 팽윤의 특성을 가짐. • 화학작용제는 $NaHCO_3$, Na_2CO_3 and Li_2CO_3와 같은 탄산염 사용 • 균열폭 0.3mm에 대해 자기치유 효과를 보임(3일~28일).

	논문제목	저자	논문개요 및 상세
1			
2	Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation	Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., De Belie, N.	[개요] 지속적인 수화나 탄산칼슘 형성물에 의한 균열에 대해 자기치유 능력을 갖는 시멘트 복합체의 영향 분석에 관한 연구하였으며, 시멘트를 대체하여 fly ash나 slag에 의한 복합체의 발생한 균열에 대하여 자기치유 성능을 평가함. • 플라이애시, 고로슬래그 미분말과 같은 시멘트 대체재료 사용시 기존 시멘트계 재료에 비해 비해 지속적인 수화반응에 의한 자기치유 효과가 향상된 결과를 도출함. • 반면, 플라이애시와 고로슬래그 미분말과 같은 시멘트 대체재료 이용시 탄산칼슘 석출량에는 영향을 주지 않는 것으로 나타남. • 자기치유 능력은 작은 균열 폭에 대해 상당히 효과적으로 나타남.

▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 관련 논문

[표 2-38] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 논문분석

<table>
<tr><th colspan="2">논문제목</th><th>저자</th><th>논문개요 및 상세</th></tr>
<tr><td>1</td><td>High Strength slag-alkali cement
(1980)</td><td>Glukhovsky, V.D., Rostovkaya, G. S. Rumyna, G. V.</td><td>[개요] AAS결합재의 알칼리 활성화제의 화학적 특성에 따라서 6개의 그룹으로 다음과 같이 분류함. 여기서 M은 Na^+, K^+, Ca^{2+} 등의 알칼리 금속 이온을 말함.
<table><tr><th colspan="2">Alkali-Activator Classification</th></tr><tr><td>caustic alkalis</td><td>MOH</td></tr><tr><td>non-silicate weak acid salts</td><td>M_2CO_3, M_2SO_3, M_3PO_4, MF, etc</td></tr><tr><td>silicate</td><td>$M_2O{\cdot}nSiO_2$</td></tr><tr><td>aluminates</td><td>$M_2O{\cdot}nAl_2O_3$</td></tr><tr><td>aluminosilicates</td><td>$M_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}(2\sim6)SiO_2$</td></tr><tr><td>non-silicate strong acid salts</td><td>M_2SO_4</td></tr></table>• 가성 알칼리, 비규산 약산염, 규산염, 알루민산염, 알루미노 규산염, 비규산 강산염 순서임.
• NaOH, Na_2CO_3, $nSiO_2$, Na_2SO_4는 가장 많이 쓰이는 경제적인 화학물질임.</td></tr>
<tr><td>2</td><td>Mineralogical and Microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes
(2002)</td><td>Puertas, F., Fernández-Jiménez, A.</td><td>[개요] 알칼리 활성화제로 활성화된 플라이애시/슬래그 (비율이 50/50 wt.%)페이스트를 다른 온도에서 양생한 후 역학적, 광물학적 미시구조적 특징을 분석함.
• 페이스트는 플라이애시/슬래그 비율 50/50(wt..%)이고 알칼리 활성화제로는 NaOH 10M 수용액이 사용됨.
• 양생 방법은 65℃ 5시간 양생후 22℃ RH: 98%로 양생함.
• 특성을 파악하기 위해 휨강도, 압축강도, XRD, FT-IR, SEM/EDX, MAS NMR을 측정함.
• 주요 반응 물질의 평균 원소 비율은 Ca/Si~0.8, Al/Ca ~0.6, Si/Al 2-3임.
• 주요 반응물인 CSH는 Na을 포함한 구조이고 Al이 풍부함.
• 또 다른 반응물은 알칼리성 알루미나실리케이트 수화물이고 삼차원 구조를 가지고 있음.
 
  </td></tr>
</table>

논문제목		저자	논문개요 및 상세
3	Carbonation process of alkali-activated slag mortars (2005)	Puertas, F., Palacios, M., Vázquez, T.	[개요] 물유리(waterglass)와 NaOH 두 종류의 알칼리 활성화제로 제조된 모르타르와 이 모르타르에 유동화제 및 수축저감제를 첨가한 모르타르 샘플들을 촉진탄산화 챔버에서 4달과 8달 동안 CO_2에 노출시킨 후 변화를 측정함. 포틀랜드시멘트를 사용한 모르타르를 비교 대상으로 함. • 탄산화 후 압축강도, 공극률, XRD, FTIR, SEM/EDX를 측정하여 특성을 분석함. • 탄산화 속도는 알칼리 활성 슬래그가 포틀랜드시멘트를 사용한 모르타르보다 빠르게 진행됨. • 알칼리 활성화제의 종류에 관계없이 탄산화 후 CSH겔은 감소함. • 물유리를 알칼리 활성화제로 사용한 모르타르에서 탄산화 진행 후 CSH겔의 감소하였고 이는 매트릭스 응집력의 손실과 공극을 크게 하여 압축강도 감소를 발생시킴. • NaOH를 알칼리 활성화제로 사용한 모르타르에서는 탄산화 진행 후 다량의 탄산칼슘 침전물의 영향으로 총 공극량과 평균공극 크기가 감소하여 결과적으로 압축강도가 증가함. • 유동화제 및 수축저감제는 탄산화 후 모르타르특성 및 반응물에 큰 영향을 미치지 않음. 

2.3.4 기존 기술(연구)과의 차별성

(1) 유사과제 분석 및 차별화 전략

▢ 기존 연구와의 중복성 검토는 국토해양부, 지식경제부 등 정부과제를 대상으로 수행하였으며, 선행 R&D 현황을 조사하고 연구단 및 세부과제와의 중복성 및 연계방안을 검토하였음.

- 중복성 검토는 키워드, 연구개발 방향, 주요 성과물 및 연구내용에 기준하여 비교함.
- 검토 결과는 중복도, 차별성 및 연계방안으로 구분하여 기술함.
- 중복도 정도는 0(중복도 없음), 1(선후행적 관계만 존재), 2(미약한 중복), 3(중복성이 일부분 존재)로 평가함.

[표 2-39] 기존 기술과의 차별성 : 박테리아 활용 자기치유 기술

기존 연구과제		검토결과	
과제명	주요연구내용	중복도	차별성
친환경 콘크리트를 위한 가시광선 반응형 나노 광촉매와 박테리아를 이용한 고정화 기술 개발. (경북대 김화중 교수 연구팀)	▪미생물의 생체광물형성 작용을 이용한 자기치유 콘크리트 개발 연구 ▪콘크리트에 적용 가능한 새로운 미생물의 탐색 ▪미생물 콘크리트의 염해 저항성 평가	1	▪pH 변화에 따른 미생물 양산 기술을 개발해 자기치유 콘크리트의 성능 개선 ▪0.3mm 정도의 낮은 자기치유 성능을 0.5mm까지 개선하고 6개월에 머물러 있는 생존기간을 1년 이상 연장 ▪장기적인 염해 저항성능을 검증
미생물의 부산물을 이용한 콘크리트 표면처리 기법의 가능성에 관한 기초연구 (카이스트 이행기 교수 연구팀)	▪기존의 시멘트, 폴리머 수지 표면처리 기법의 환경적 유해 요인을 해결하기 위해 미생물을 이용한 표면처리 기법 개발	1	▪IR thermography 활용한 균열 수복성 평가 ▪외부 보수재로서의 기능뿐만 아니라 염해와 탄산화 같은 주변 환경의 조건에 맞춘 주입, 도포 보수재 개발
Ageing Centre - 콘크리트 열화관련 연구 (The Delft Centre for Materials)	▪구조물의 노화관련 기초 연구. ▪자기치유 물질의 개발로 인해 구조물의 노화현상을 지연 ▪Jonkers 교수를 주축으로 미생물을 이용한 자기치유재 개발	2	▪균열 폭 0.5mm 미만의 작은 균열 폭만 복구가 가능한 한계를 개선하고, 대단위 시공이 가능한 기술 확보 ▪염해에 대한 저항성을 확보하고 pH와 주변 환경을 고려해 미생물의 양산을 극대화 할 수 있는 기술 확보
Magnel Laboratory for Concrete Research, Ghent University (van Tittelboom, K., De Belie, N., Wang, J. Group)	▪박테리아를 보호하기 위해 실리카 겔, 폴리우레탄을 사용한 관이나 캡슐을 이용한 자기치유재 연구	2	▪새로운 미생물을 조사, 배양하여 국외 기술과는 차별화된 안정된 마이크로캡슐 제조기술 개발
Microbiologically-Enhanced Crack Remediation (사우스 다코타 광산기술대 - SDSMT, 방숙희교수 연구팀)	▪방해석을 석출하는 Sporosarcina pasteurii에 관한 연구	0	▪장기적인 염해 저항성과 탄산화 저항성을 가진 새로운 박테리아를 조사, 배양

[표 2-40] 기존 기술과의 차별성 : 캡슐활용 자기치유 기술

기존 연구과제		검토결과	
과제명	주요연구내용	중복도	차별성
수용성 고분자를 이용한 콘크리트용 마이크로캡슐 혼화제의 개발 ㈜캐어콘 2010, 국토해양부, 건설기술혁신사업)	콘크리트에 혼입하는 급결제, 지연제 등의 혼화제를 코어 물질로 마이크로 캡슐화하여 한중, 서중콘크리트, 매스콘크리트에 사용되는 혼화제(급결제, 촉진제, 지연제 등)의 성능 발현시기를 자유롭게 조절함으로써 콘크리트의 품질 저하를 해결하고 콘크리트 공사의 공기단축을 이룰 수 있는 충분한 물리적 강도와 내구성을 갖춘 마이크로 캡슐형 혼화제 개발	1	마이크로캡슐의 역할을 응결조절제에 한정된 연구임. 본 기획에서 제안하는 과제는 마이크로 캡슐의 역할을 균열치유를 기본으로 초기재령 거동 조절도 포함하고 있음. 따라서, 기존 연구를 바탕으로 적용 범위가 넓어진 후속과제로 볼 수 있음.
콘크리트 구조물의 균열부 자기 치유를 위한 반응성 실리콘화합물 코팅재 개발 및 그 적용성 개발 (KCL 2010, 국토해양부, 건설기술혁신사업)	0.3 mm까지 콘크리트 균열을 제어할 수 있는 self healing 코팅재 개발 - 콘크리트 균열에 대한 self healing 코팅재 성능 평가 - 콘크리트 균열에 대한 self healing 코팅재 성능 평가 방법, 품질기준 국가 표준 제정	1	본 기획에서 제안하고 있는 반복치유가 가능한 콘크리트용 자기치유 코팅제의 선행 연구 과제임. 새로이 제안되는 과제는 반복적인 균열의 손상까지 대비할 수 있는 방법을 다루고 있으므로, 적용 범위가 넓어진 후속과제 성격을 지니고 있음.
자기치유형 아스팔트 개발 (홍영근 2013, 국토해양부, 건설교통기술촉진연구사업, 수원대학교)	스마트 아스팔트의 한 종류인, 자기치유형 아스팔트를 개발함. ▪ 화학적인 방법으로, 자기치유성을 갖는 아스팔트 제조 ▪ 물리적인 방법으로, 자기치유성을 갖는 아스팔트 제조	0	아스팔트와 콘크리트는 재료의 특성 자체가 다르기 때문에 적용되는 자기치유 메카니즘도 전혀 다름. 따라서, 자기치유 아스팔트 개발 연구는 자기치유 콘크리트 연구와 거의 관련이 없다고 볼 수 있음.

[표 2-41] 기존 기술과의 차별성 : 자기치유형 보수재료 기술

기존 연구과제		검토결과	
과제명	주요연구내용	중복도	차별성
콘크리트 구조물 보호용 첨단 코팅재료 개발 및 실용화 (건설교통부 건설핵심기술연구개발사업)	▪ 적용분야별 구조물 보호용 단면복구재 및 코팅재 개발. ▪ 광촉매 등의 신소재를 개발하여 실용화하고자 하였음.	1	▪ 기존 코팅재의 제조기술을 활용한 자기치유 성능을 갖는 콘크리트 구조물 보수용 콘크리트 코팅재료 개발 및 적용기술 고도화 ▪ 각 기술에 따른 개별적인 보수 과정에 대하여 운영 및 활용 용이성 확보를 위한 국내형 유지보수 관리 시스템 확립 ▪ 전체 보수 시스템적 측면 및 향상된 보수 성능을 통하여 환경변화에 선제 대응이 가능한 방안 마련 및 지능형 시스템 적용

기존 연구과제		검토결과	
과제명	주요연구내용	중복도	차별성
크랙의 감지 및 치유 기능을 가진 고분자 소재의 개발 (교육과학기술부 지역대학우수과학자 지원사업)	▪자기 치유 기능을 가진 치유 물질의 희석제, 용매제 등 광반응성 치유 물질 개발 ▪캡슐화 기술 및 성능에 대하여 연구를 수행	1	▪기존 캡슐 및 펠렛 제조 기술을 활용 및 응용한 콘크리트 구조물 보수용 콘크리트 코팅재료 개발 및 적용기술 고도화 ▪목적 대상 맞춤형 보수성능 및 2차 균열 치유 능력 극대화가 가능한 기술 고도화 ▪마이크로 캡슐 개념에서 벗어나 매크로 캡슐을 활용한 잔골재 입도보정 및 물성향상이 가능한 기반 기술 개발

[표 2-42] 기존 기술과의 차별성 : 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술

기존 연구과제		검토결과	
과제명	주요연구내용	중복도	차별성
탄소저감형 건설재료 기술개발 연구단 (국토부/한국건설기술연구원)	▪시멘트 저감형 결합재를 이용한 50MPa 급 고성능 콘크리트 개발 ▪비소성 결합재를 활용한 CO_2저감형 콘크리트 개발	2	기존 과제는 무시멘트 또는 시멘트 저감형 결합재의 고강도 확보를 통해 CO_2 저감형 레미콘 생산을 목표로 하는 점에서 유사한 점이 있지만, 본 과제의 목적은 무시멘트 콘크리트의 자기치유성 확보 및 내구성 향상이며, 이를 위해 중합 및 이온반응 제어기술을 활용하여 무시멘트 콘크리트의 문제점인 내구성을 개선한다는 점에서 기술 고도화의 차별성이 있음.
시멘트 제로 콘크리트 개발 (지경부/한국건설기술연구원)	▪무시멘트 콘크리트용 결합재 개발 ▪무시멘트 콘크리트용 활성화제 개발 ※ 모재료로써 슬래그와 플라이애시를 이용하고 활성화제로써 고농도 액상형 알칼리제를 이용한 결합재 개발	1	무시멘트 결합재의 주요 재료로 고로슬래그를 사용한다는 점에서 중복성을 다소 보이지만, 본 과제는 시험실 수준의 기술인 액상형 활성화제를 사용하지 않고, 실용화 및 상품화가 가능한 분말형 결합재의 개발과 이온반응 제어를 통한 자기치유형 내열화 무시멘트 콘크리트의 개발이 목표임.
석탄회계 지오폴리머 콘크리트 개발 (지경부/한양대)	▪석탄회 95%와 시멘트 5%로 구성된 지오폴리머 콘크리트 제조기술 ※ 국내 플라이애시의 낮은 반응성으로 인해 상온에서 강도발현이 어려움	0	본 과제는 무시멘트 결합재를 이용한 콘크리트 제품 실용화를 위해 고온 양생이 필요한 플라이애시가 아닌, 상온에서 시멘트와 동등 이상의 성능발현이 가능한 고로슬래그 미분말과 분말형 활성화제를 이용한 자기치유형 내열화 무시멘트 콘크리트의 기술개발임.
바이오하우징 연구사업단 (과기부/전남대)	▪무독성 친환경 재료를 이용한 공법 및 시스템 구축 ※ 고로슬래그를 이용한 무시멘트 결합재 및 콘크리트 2차 제품 개발	2	기존과제는 무독성의 친환경 건설재료개발을 위해 고로슬래그를 이용한 결합재 및 콘크리트 2차 제품을 개발한다는 점에서 중복성을 보이지만, 본 과제는 무시멘트 결합재들의 특성을 고려한 맞춤형 결합재 개발 및 내구성 개선을 통해 실용화 제품군을 구조부재로까지 확장하여 현장적용이 가능한 다양한 내열화 무시멘트 콘크리트 제품군을 개발한다는 점에서 기술고도화의 차별성이 있음.

(2) 구체적인 차별성 확보방안

[박테리아 활용 자기치유 기술]

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

- 염해 환경하의 균열보수 기법을 개발하고, 탄산화 환경에서 최적화된 균열치유 및 탄산화 침투 저항성을 가진 코팅형/주입형 보수재료의 원천기술 확보
- 콘크리트 내부 pH변화에 따른 미생물 생존능력 저하를 막기 위한 장기생존 미생물 분리 및 배양기술 확보
- 외부 보수재로서만 가능성을 보였던 단점을 극복하여, 주변 환경 조건에 맞춘 주입, 도포 보수재 및 시공기술 개발

[무기계 광물질 혼합재 활용 자기치유 기술]

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

- 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등 SCM의 잠재수경성 및 포졸란 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 하여 자기치유 속도를 향상할 수 있는 기술 개발이 필요함.
- 스마트 폴리머 기술과 접목하여 기존의 무기계 광물질을 활용한 자기치유 기술의 성능 한계로 판단되는 균열 방향성, 치유속도의 단점을 해결할 수 있음.

[캡슐 활용 자기치유 기술]

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

- 6개월 정도에 머물러 있는 지속시간을 1년 이상 연장
- 0.3mm 이하의 균열 폭에만 효과가 있는 지금의 연구 기술을 개선하여 0.5mm 수준까지 개선
- 기존의 경량 콘크리트에만 적용되면 기술적 한계를 개선하여 일반콘크리트에 적용

[자기치유성능 평가기술]

▢ 균열 회복성 및 미생물과 치유된 보수부간의 정량적인 평가 기술 개발

- 초음파 및 IR Thermograpghy 기법을 활용하고, 역학/내구성능과의 정량적 평가기법 제시
- 비파괴 기법을 이용한 정량적 균열 치유 평가방법 개발

[자기치유형 보수재료 기술]

▢ 자기치유형 보수재료 활용기술 및 구조물 보수공법/시스템 기술

- 기존 자기치유 매커니즘 활용 목적 대상의 맞춤형 자기치유 성능 극대화를 위한 자기치유 코어물질 / 막두께 / 형상 / Matrix / 촉매제 제어 기술개발 및 표준화
- 종래 기술과 비교하여 구조물 결함부위의 효과적인 보수뿐만 아니라 2차 결함 발생시 자기치유 성능 부여를 통한 성능 회복 기술 부여
- 보수 초기와 동등 수준의 성능을 발휘할 수 있는 반영구적인 보수재료 개발 및 시스템화

[자기치유형 무시멘트 기술]

▢ 무시멘트 결합재를 단순히 시멘트 대체용이 아닌, 고기능성의 재료로써 개발이 필요함.

▢ 무시멘트 콘크리트의 실용화를 위한 구체적인 목표제품(Target product) 설정 필요

- 무시멘트 콘크리트의 구조부재 등의 실용화를 위해서는 성능의 재현성과 내구성 검증 및 확보를 통한 설계기준이 제정되어야 하는데, 이를 위해서는 많은 기간이 소요될 것으로 판단됨.
- 무시멘트 콘크리트의 물리화학적 내구성의 장점(OPC 대비)과 성능확보에 유리한 제품생산 방법 등을 종합적으로 고려하여 시멘트 제품의 성능을 뛰어넘는 목표제품(Target product)을 설정하고 연구를 진행하는 것이 바람직함.

▢ 자기치유형 내열화 무시멘트 콘크리트 개발을 위해 첨단기술 활용

- 기존 연구는 무시멘트(AAS) 결합재의 문제점인 높은 건조수축(균열)과 낮은 탄산화 저항성능(강도저하) 개선을 위해 화학 혼화제 적용 및 배합공법개발이 대부분이나, 이를 이용한 내구성 문제 해결은 한계가 있는 것으로 판단됨.
- AAS 결합재는 구성 성분비의 특성 상 자체 자기치유성능이 시멘트에 비해 현저히 낮음.
- 무시멘트 콘크리트의 자기치유 성능 확보 및 내구성 개선을 위해 수화생성물 조정, 미세조직 및 공극구조 개질 등의 연구가 필요하며, 이를 위해 이온반응제어 및 이온배합기술, 내부양생 기술 등 첨단기술의 활용이 바람직함.

▢ 자기치유 내열화 무시멘트 콘크리트의 품질 확보 기술 개발

- 구조부재 적용을 위해 무시멘트 콘크리트의 낮은 재현성 문제의 해결이 필요
- 모재료인 고로슬래그는 철광석 및 고로의 종류, 급랭 온도 및 시간에 따른 슬래그 원석의 유리화도, 분쇄방법, 슬래그 미분말의 대기노출 기간 등 다양한 조건에 따라 성분 및 물성이 변함.
- 무시멘트 콘크리트의 재현성 확보를 위해 반응메커니즘의 분석 및 정립과 이온반응 최적화 배합기술 개발을 통해 무시멘트 결합재 및 콘크리트의 품질 확보 기술 필요

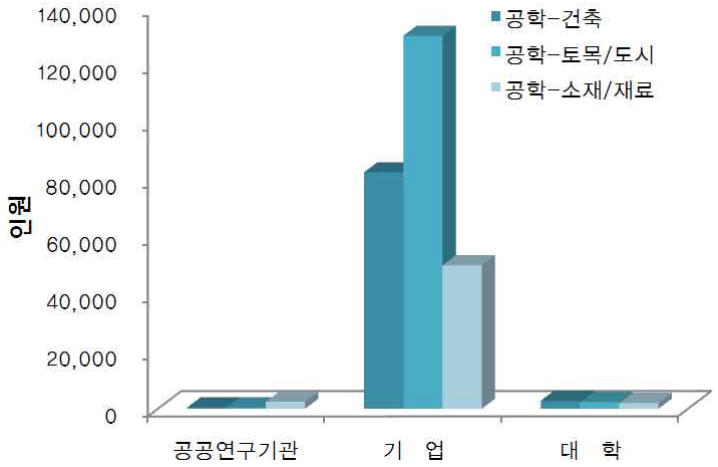
2.4 연구개발 인프라 분석

2.4.1 인프라 및 역량분석

(1) 과학 기술 인력 인프라

▢ 인력현황

■ 국내 이공계 건축, 토목/도시, 소재/재료 분야의 인력은 273,914명으로 전체 이공계 인력(1,918,703명)의 14.3%로 조사되었음. 토목/도시 분야의 기업 인력이 가장 많은 것으로 나타났으며, 공공연구기관의 건축, 토목/도시 분야의 인력이 973명으로 다소 적은 것으로 나타났음.



[그림 2-97] 주체별 인력현황(출처: 교육과학기술부, 2007 이공계인력 실태조사 보고서)

[표 2-43] 건축, 토목/도시, 소재/재료 분야의 인력현황

	공공연구기관	기 업	대 학
공학-건축	508	82,701	2,766
공학-토목/도시	465	130,447	2,377
공학-소재/재료	2,441	50,172	2,037
공학-전체	37,185	1,851,125	30,393

(출처: 교육과학기술부, 2007 이공계인력 실태조사 보고서)

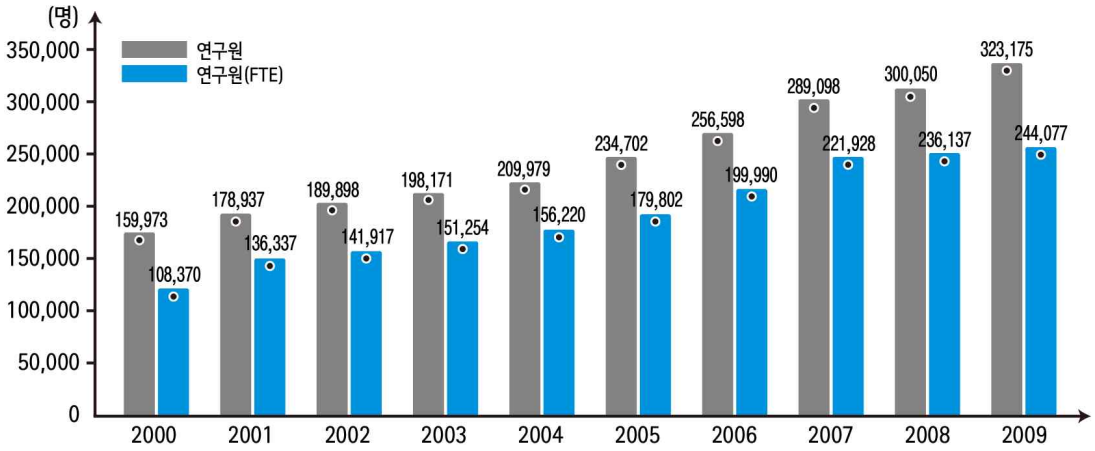
▢ 연구인력 인프라

■ 2009년 우리나라 총 연구원 수는 전년대비 23,125명(7.7%) 증가한 323,175명임

※ 연구보조원이 포함된 연구개발인력은 30,596명(7.0%) 증가한 466,824명

※ 연구참여비율을 고려한 실질 연구 참여인력은 244,077명으로 세계 7위권이며, 연구개발인력 수는 309,063명임.

※ FTE : Full-Time Equivalent : 일정기간 동안 상근으로 근무하는 한 사람을 표시하는 측정단위로서 겸직연구개발 인력수를 상근상당 연구개발 인력수로 환산하고 여기에 상근연구개발인력수를 합하여 산출



[그림 2-98] 우리나라 연구원 수 추이 (2010 연구개발 활동보고서, 교육과학기술부)

▢ 2009년 우리나라 연구원 중 공학 분야 전공자는 전체의 67.4%인 217,911명

- 다음으로 이학 분야 전공자 41,687명(12.9%), 사회과학 분야 전공자 21,265명(6.6%), 의약보건학 분야 전공자 17,227명(5.3%) 순
- 전체적인 학위별 인력구성은 학사, 석사, 박사의 순으로 나타났음. 기업체 및 대학에서는 학사의 비율이 가장 높게 나타났으며, 공공기관(연구기관)에서는 박사의 비율이 가장 높게 나타났음.

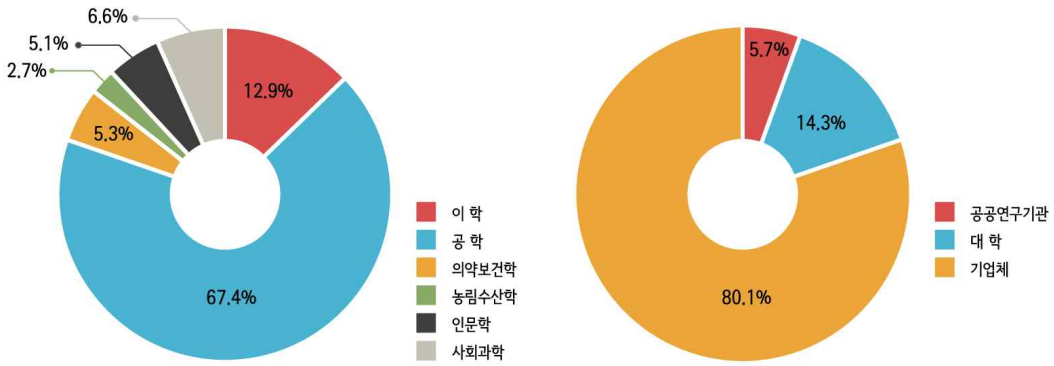
▢ 연구수행 주체별로 살펴보면, 기업체 공학 분야 전공자 비중이 82.9%로 가장 높게 나타남.

- 공공연구기관의 공학 분야 전공자 비중은 50.9%, 대학은 35.1%임.

[표 2-44] 우리나라 주체별 전공별 연구원 현황 (2009)

구 분		공공연구기관		대 학		기업체		전 체	
		연구원	비중	연구원	비중	연구원	비중	연구원	비중
과학기술분야	이 학	4,373	18.0	13,346	15.1	23,936	11.4	41,687	12.9
	공 학	12,371	50.9	31,099	35.1	174,441	82.9	217,911	67.4
	의약보건학	1,541	6.3	13,805	15.6	1,881	0.9	17,227	5.3
	농림수산학	2,419	9.9	4,005	4.5	2,289	1.1	8,713	2.7
	소 계	20,704	85.1	62,255	70.3	202,579	96.3	285,538	88.4
인문사회분야	인문학	542	2.2	11,048	12.5	4,782	2.3	16,372	5.1
	사회과학	3,072	12.6	15,251	17.2	2,942	1.4	21,265	6.6
	소 계	3,614	14.9	26,299	29.7	7,724	3.7	37,637	11.6

* 출처 : 교육과학기술부, 2010 연구개발활동조사보고서



[그림 2-99] 전공별 / 주체별 연구원 현황

(2) 콘크리트 재료/유지관리 기술인력 인프라

▢ 기술인 현황

■ 국내 토목, 건축, 환경, 화공 및 세라믹 분야의 기술사는 각각 8천6백여명(3.9%), 8천여명(3.4%), 5백여명 (3.6%), 9명(0.4%)로 타 산업의 기술사 보다 매우 부족한 상황임.

※ (%)는 각 분야의 기술자의 백분율

■ 국내의 건설분야 기술수준은 세계 10위권에 해당하지만, 관련된 기술자는 상당히 부족한 것으로 나타남.

※ 국내에 콘크리트 구조물 관련 연구를 수행하는 인력은 다수 있으나 전체적인 연구인력의 능력이 외국에 비해 다소 부족한 것으로 조사됨.

※ 국내의 연구인력의 학술적 능력과 연구개발 능력은 세계 최고 수준으로 집중적인 연구개발을 수행하게 되면 단기간에 외국 기술을 추월할 수 있을 것임.

■ 건설분야의 석 · 박사급 연구인력은 매우 많으나 특화된 건설분야 연구인력은 많지 않아 인력양성이 필요할 것으로 보임.

(3) 생산 및 시공장비 인프라

■ 산업부산물 등을 재활용한 환경부하 저감형 재료 및 자재 생산 시스템에서는 대부분 국산 장비에 의해 소화되고 있으나, 원천기술이 필요한 일부 장비의 경우 일부 외국에 의존하고 있는 실정임(대형 프레스 등).

■ 자기치유형 콘크리트 부분은 국내에서 아직 기초단계로 이에 해당하는 생산 및 시공장비 인프라는 많이 부족한 실정임.

[표 2-45] 관련분야 기술자 현황 (출처 : 한국건설인협회, 2007 기준)

구분		박사	석사	학사	전문학사	고졸	기타	합계
토목	기술사	394	2,209	5,358	286	119	250	8,616
	기사	693	5,036	46,811	4,849	1,810	9,410	68,609
	산업기사	29	638	4,305	14,455	2,160	3,605	25,192
	학력경력자	659	3,821	33,047	43,051	30,145	3,802	114,525
	경력자	2	15	214	88	672	399	1,390
	소계	1,777	11,719	89,735	62,729	34,906	17,466	218,332
건축	기술사	114	1,321	5,620	621	187	270	8,133
	기사	317	4,381	54,125	8,863	1,723	7,371	76,780
	산업기사	28	518	4,940	26,801	3,543	5,598	41,428
	학력경력자	376	4,934	36,228	49,356	17,442	2,269	110,605
	경력자	1	8	170	50	399	362	990
	소계	836	11,162	101,083	85,691	23,294	15,870	237,936
환경	기술사	33	197	257	9	1	8	505
	기사	128	867	5,793	246	39	430	7,503
	산업기사	14	106	738	1,267	125	257	2,507
	학력경력자	111	472	1,545	1,296	109	66	3,599
	경력자	0	0	6	4	6	4	20
	소계	286	1,642	8,339	2,822	280	765	14,134
계		2,917	24,639	200,124	151,545	59,242	34,120	472,587

▢ 분산공유형 건설인프라 구축사업

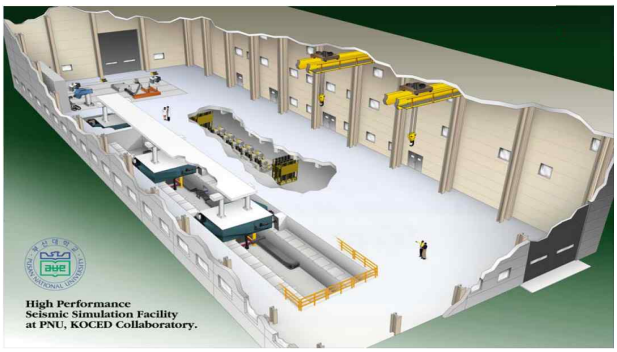
■ 국토해양부에서는 분산공유형 대형 실험시설을 전국에 분산·배치하고 초고속 정보통신망으로 공유시켜 건설R&D 인프라 강화하기 위해 다음과 같은 시험시설을 추진하고 있음.

[표 2-46] 분산공유형 건설인프라 실험시설 개요

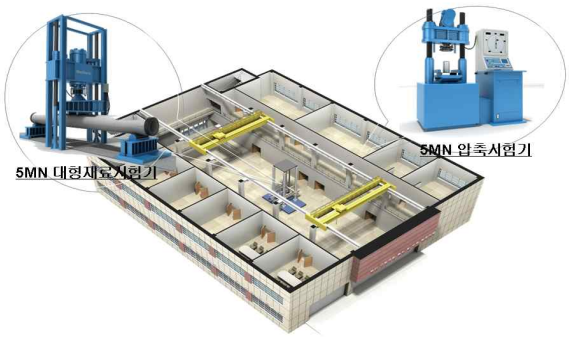
구분	시 설 개 요	소재지
하이브리드 구조 실험시설	○ 건축물, 장대 교량 등 구조 모형을 컴퓨터와 연동시켜 구조해석 - 여러 구조실험동이 있지만, 하이브리드 실험이 가능한 곳은 없음	명지대 (용인)
지오센트리퓨지 실험시설	○ 지반구조물의 모형을 고속으로 회전시켜 실제 지반의 축적 및 응력상태 재현 - 국내에 없는 진동대 및 4축 로봇의 도입으로 다양한 실험이 가능	KAIST
다지점 가진 대용량 지진모사 실험시설	○ 건축물, 장대교량 등 구조모형을 설치하여 내진 안전성 실험 - 3지점 연동으로 대형 구조물의 진동대 실험 가능	부산대 (양산)
첨단 건설재료 특성/성능 실험시설	○ 콘크리트, 강재 및 신소재 등의 재료적 성질 정밀분석, 재료파괴, 화학성분 분석 - 7개의 세분화된 실험실에 45여종의 실험장비를 구비하여 다양한 실험 가능	계명대
대형장대구조물 풍동 실험시설	○ 초고층건물, 장대교량 등 구조모형을 설치하여 내풍안정성 실험 - 폭 12m 이므로 장대교량 등에 대한 실험이 가능	전북대
해양환경 시뮬레이션 실험시설	○ 방파제 또는 부두 등 모형을 활용하여 구조물 건설에 따른 해안 파동현상 실험 - 3차원 : 국내 최대규모, 2차원 : 국제 메머드급 규모	전남대 (여수)
가상하부구조(Cyberinfrastructure, CI)	○ 데이터 저장소, 협업서비스, 가시화 도구, 고성능 컴퓨터 등으로 구성되어, 분산된 연구 장비 및 시설과 연구 공동체를 통합하여 협업 연구를 가능하게 하고, 데이터, 정보 및 지식을 공유할 수 있도록 하는 IT 기반 연구 인프라	서울대

KOCED 하이브리드 구조실험센터

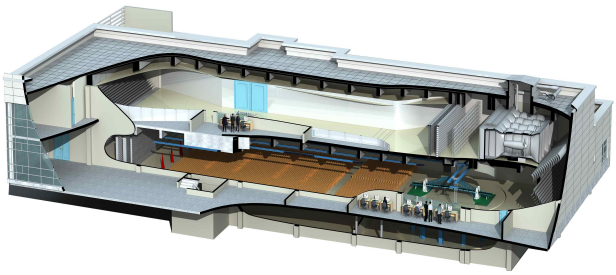
KOCED 지오센트리퓨지 실험센터



KOCED 다지점 가진 대용량 지진모사 실험센터



KOCED 첨단 건설재료 실험센터



KOCED 대형풍동 실험센터

KOCED 해양환경시뮬레이션 실험센터

[그림 2-100] 분산공유형 건설인프라 실험시설

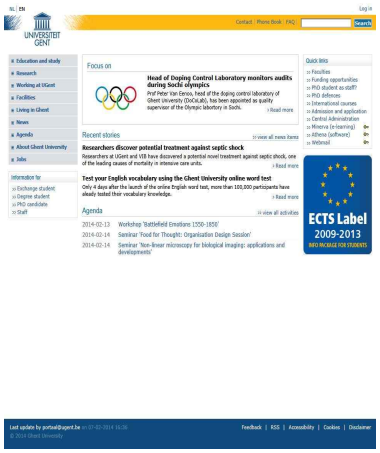
(4) 해외기관 인프라

▢ 첨단기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 연구관련 연구기관은 다양한 해외기관과의 연구협력 관계를 구축하여 필요시 공동연구를 수행할 수 있는 기반 구축이 필요함.

▢ 최근에는 단순한 기술교류 뿐만 아니라 연구과제에 직접 참여하여 공동으로 기술개발을 수행하는 사례도 증가하고 있음.

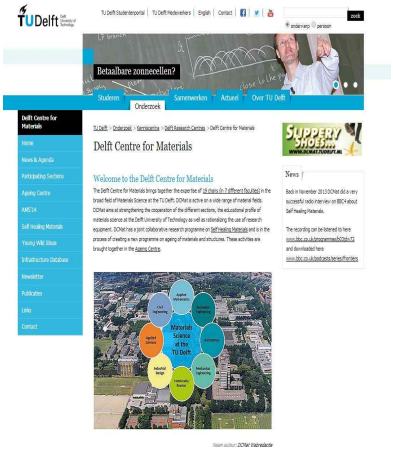
유럽	Ghent 대학 / 벨기에

- Magnel Laboratory for Concrete Research에서 25개의 연구진 운영, 콘크리트와 시멘트 재료에 대해 다양한 측면의 연구를 진행.
- 콘크리트 및 환경 분야에서 자기치유재료에 대한 개발연구를 진행하고 있음.
  - 유럽의 HealCon 프로젝트를 관장하고 있음.
- http://www.ugent.be/



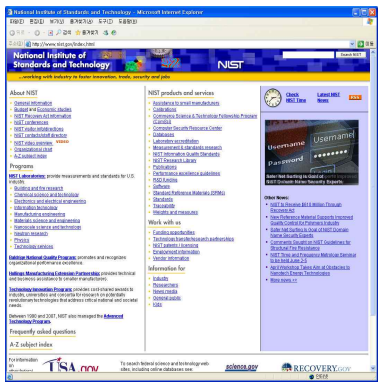
유럽	Delft 공대 / 네덜란드

- 토목과 수리분야에 있어서 세계적인 대학중 하나. 국토의 25%가 해수면보다 낮은 위치에 있는 네덜란드의 지형 특성상 많은 토목 분야의 기술이 오랜 경험을 바탕으로 이루어져 있음.
- the Delft Centre for Materials를 운영해 유럽에서 자기 치유 재료 분야의 선도적인 연구를 진행하고 있으며, 네덜란드 정부의 전폭적인 지원을 받고 있음.
- “the Ageing Centre”라는 테마를 주제로 구조물의 고령화 문제에 대한 연구를 진행하며 자기치유 재료에 대한 연구가 활발함.
- www.dcmat.tudelft.nl/



미국	Building and Fire Department, NIST

- Maryland Gaithersburg에 위치한 NIST(National Institute of Standard and Technology)에 속해 있는 연구실
- 건축과 방재산업에서의 필요성에 대한 과학적, 기술적 측정과 예측을 통해 미국의 혁신과 산업 경쟁력의 발전을 도모하기 위한 단계
- http://www.nist.gov/



미국 Lawrence Berkley National Laboratory

- 캘리포니아 대학교 버클리 캠퍼스에 자리잡고 있으며, 4천 명의 직원 가운데 800명의 학생으로 구성되어 있고 해마다 2천여명의 객원 연구원을 초청하고 있음.
- 미국 정부(에너지부)의 위임을 받아 캘리포니아대학교에서 관장하고 있으며 신소재 · 생명과학 · 에너지 효율 · 검출기 · 가속기 등에 대한 꾸준한 연구를 통해 기술과 환경에 대한 연구를 주도하고 있음.
- http://www.lbl.gov/

일본 동경대학교

- 재해에 강한 도시 시스템의 구축을 목표로 한 연구 거점이 요청되어 이화학 연구센터가 설립되어 건축구조물의 안전성의 향상을 목적으로 하고, 구조재료의 역학적 특성, 물리적 성질의 해명, 또한 이들 재료로 구성되는 구조 부재의 역학적 거동의 해명 및 내진, 내화, 내풍에 과한 기초적 연구를 학내외 공동연구를 종합적으로 실시하는 것을 목적으로 함.
- http://www.serc.titech.ac.jp/

일본 Building Research Institute

- 1946년 창립 이후 일본 유일의 건축, 주택 및 도시 관련 종합 연구소로서 국민의 안전성 및 삶의 질 향상, 지구 환경 보존을 위한 다양한 연구를 실시하고 있음.
- 목질 재생 재료의 리사이클 기술 개발
- 건축 생산에 관련된 환경측면 평가 기술 현황 조사
- 실내 공기 중 휘발성유기화합물의 저감을 위한 환기기술 개발
- http://www.kenken.go.jp/

2.4.2 기업현황

▢ 삼중씨엠텍

- 연세대 정찬문 교수 연구팀 기술 이전 준비 중
- 태양광, 자외선을 활용한 마이크로 캡슐 활용 콘크리트 균열 자기치유 기술

▢ PENETRON KOREA

- 지하구조물, 수처리 시설, 항만 교량 등 다양한 대상에 따른 콘크리트 방수기술 보유.
- 결정체 성장을 통한 균열을 제어하며, 0.3mm 이하 미세균열의 자가치유 성능을 갖는 방수 제품군을 시판 및 적용.

※ 대상 구조물에 따른 공법으로 침투도포형, 콘크리트 혼입용, 보수 모르타르, 지수 모르타르 및 강화 모르타르 공법으로 구분.

▢ ㈜인트켐

- 일본 동경대학의 자기치유 기술을 적용한 콘크리트 자기치유 보수공법(SRS : Self-healing Repairing System)을 통하여 1회 적용을 통한 재균열 억제, 모재 일체화를 특징으로 하는 보수 및 복구기술 보유
- 적용 목적에 따라 균열보수 공법 및 면/단면복구 공법으로 구분되며, 건식/습식 환경에 따른 보수공법으로 구분

※ 터널, 교량, 차수벽, 해양구조물, 지하구조물 및 수리시설 등에 적용가능하며, 국내외 적용사례 다수.

▢ 칼리코TM

- 콘크리트 구조물의 보수 및 방수기술을 보유하고 있으며, 주요 제품군으로 침투형 방수, 방수 페인트, 차수판, 신축줄눈, 램프조면판 등 다양한 분야의 기술을 보유
- 방수기술 및 공법은 침투형으로서 모체와 일체화되며, 신축성이 없고 무기계질 기반의 재료로 구성됨으로써 내구성이 우수한 것이 특징, 또한 투명색상을 유지하므로 빠른 조치가 가능한 장점이 있으며, 유사시 유색적용 가능

※ 기술적용이 최소 10년 이상의 내구성 확보가 가능하며, 3~4시간 이내의 짧은 시간내 성능확보 가능

▢ 선진국 대비 국내연구 인프라 수준

인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
	부족	다소부족	동등	우월	보다우월
전문인력	O				
기자재	O				
산학연 공동연구기반	O				
기술이전 및 거래	O				
국제기술 협력기반	O				
업계현황	O				

2.5 종합분석

2.5.1 국내외 정책동향 및 환경분석 시사점

▢ 건설기술기본계획(제5차 건설기술진흥기본계획(2003~2017, 국토교통부))에서 해외건설 경쟁력 강화를 위한 건설기술 경쟁력 기반구축 분야로 R&D·신기술에서 'Green & Smart 건설기술 개발' 및 '건설기술 실용화 촉진' 등을 주요전략으로 채택함.

- 첨단기술을 활용한 자기치유 콘크리트 콘크리트를 개발하는 본 연구는 균열 자기치유 등의 첨단 기술을 개발하여 선진국과의 기술 격차 해소에 기여.
- 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술개발은 세계 수준의 기술로 판단됨.

▢ EU는 'Self-healing materials for prolonged lifetime'라는 주제로 healCON-project (2013~2017)와 'Training Network for Self-Healing Materials: from Concepts to Market' 라는 주제로 SheMat 프로젝트가 진행 중임.

- 자기치유 콘크리트 기술을 건설분야 미래 핵심기술로 판단하여 핵심연구기관을 중심으로 주도적으로 진행 중임.
- HealCON 프로젝트 공동연구기관은 UGhent, Avecom, TU Delft, Acciona, TUM, TTI, VTT, COWI, DTI, CEINNMAT, Devan and Fescon로 기초연구부터 실용화를 위한 기업들로 구성되어 있음.
- SheMat 프로젝트는 독일 Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology (UMSICHT)의 주도로 다음과 같은 기관이 참여하고 있음.

2.5.2 국내외 시장동향 분석 시사점

▢ 국내 시설물 유지관리 산업 시장은 지난 1994년 성수대교가 붕괴되었던 19년 전에는 5,400억원에 불과했으나 2012년에 3조5,000억원을 기록하면서 6배 이상 증가함(이데일리, 2013.10.17).

- 이는 매출액의 8%로 선진국과 비교하면 상당히 부족한 수준임.

※ 이탈리아는 시설물 유지관리 투자 비중은 매출액 대비 57.2%에 달하며, 영국 38.0%, 독일 26.0%, 일본 21.7% 등의 순임.

- 건설투자 중 유지관리 투자 비중은 일본의 약 37% 수준임.

▢ 국외 주요국의 유지관리 시장현황은 과거에서부터 문제가 인식됨에 따라 유지관리 시장이 점진적으로 증가하기 시작하여 지속적으로 증가하는 추세임.

- OECD 회원국은 SOC 투자비용 중 GDP의 0.3%를 SOC의 유지관리 비용으로 투자하고 있음. (SOC투자 : GDP의 1%, 신규건설 0.7% 및 유지관리 0.3%, 서유럽 기준)
- 개발도상국은 GDP의 1.8%를 SOC의 유지관리 비용으로 투자하고 있음.

2.5.3 국내외 기술동향 분석 시사점

▢ 자기치유 콘크리트 기술은 최근 들어 균열을 저감시키거나 자기치유할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적용을 위한 연구가 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음.

- 1969년 자기치유 성능이 처음 소개되었으며, Thermoplastic과 Cross-linked system을 이용한 자기치유 개념이 1979년과 1981년에 소개되었음. 90년대에 자기치유 콘크리트에 대한 연구를 시작으로 2000년대에 자기치유 재료 및 이를 이용한 콘크리트 분야에 상당히 많은 논문이 발표되고 있음.

▢ 자기치유기술에 대한 특허분석 결과 1999년 미국에서 관련 특허가 출원된 이후, 2000년 후반 이후 점진적으로 각 국가에서의 출원건수가 꾸준히 이루어지고 있음.

- 2008년 이후 증가되고 있어 기술 개발 초기 단계이며 새로운 기술분야라고 볼 수 있음.
- 조사된 전체 특허에 대한 국가별 특허 점유율을 각 국가별 점유율의 차이가 크지 않음. 따라서 향후 연구개발을 통해 자기치유 분야의 세계시장의 선점이 가능할 것으로 기대됨.

▢ 자기치유형 콘크리트 분야 논문 총 72건 중에서 박테리아 활용기술이 29.2%인 21건, 마이크로캡슐 활용기술인 16.7%인 12건, 무기질 혼화재 활용기술이 16.7%인 12건, 섬유활용기술이 27.8%인 20건 및 기타 소재를 활용한 기술이 나머지 9.7%인 7건을 차지함.

- 박테리아 활용 및 섬유활용기술이 전체 57%로 상당히 높은 비중을 차지하고 있음.
- 자기치유형 콘크리트관련 논문은 2008년도까지는 년 1편 정도에 그치고 있었지만, 2009년부터 증가하여 2013년까지 꾸준히 증가하고 있는 추세임.
- 2008년도까지는 섬유를 활용한 논문이 대부분이었지만, 2009년부터는 박테리아, 캡슐, 무기질 혼합재 등 다양한 소재를 활용한 논문이 증가하고 있음.

▢ 무기계 광물질 기반 자기치유 기술은 다른 자기치유 요소기술과 비교하여 기술선진국과의 차이가 가장 적은 것으로 나타났으며, 집중적인 기술 및 인력투자가 이루어진다면 최단시간에 국제적 수준, 나아가 세계 최고수준으로 도약할 수 있을 것으로 판단됨.

▢ 마이크로 캡술 활용 자기 치유 기술의 핵심은 캡슐의 설계 및 제조기술, 보수 재료의 설계 및 제조기술, 그리고 이를 활용한 콘크리트의 설계 기술 등으로 분류할 수 있음.

- 국제적으로 일부 연구자에 의해 요소기술에 대한 연구가 진행되고 있는 기초적인 연구 단계로, 국내에서도 일부 연구자에 의하여 요소 기술이 연구되고 있음.

※ 자기 치유 코팅 분야는 국제적으로 선도적인 연구를 수행하고 있는 단계임.

- 아직까지 세계적으로 많은 연구 인력이 참여하고 있는 분야는 아니기 때문에 향후 집중적인 연구 지원이 뒤따른 다면 단시간 내에 국제적 연구역량을 확보하고 기술을 선도할 가능성이 높은 분야로 판단됨.

▢ 박테리아 활용 자기치유 기술은 네델란드 Delft 공대에서 기술적 노하우를 상당히 축적하고 있으며, 국내와의 기술격차가 가장 큰 분야로 국제공동연구 등의 기술협력을 통해 단기간에 기술도약을 할 수 있는 방법이 필요한 것으로 판단됨.

▢ 국외 기술 선진기관(네델란드 Delft 공대, 일본 동경대, 벨기에 Ghent 대학 등)과의 기술제휴를 통한 성능평가 장비 및 기술노하우를 조속히 확보하는 것이 바람직하며, 국토교통부의 분산공유형 대형 실험시설 중 하이브리드 구조 실험시설과 첨단 건설재료 특성/성능 실험시설과의 기술 MOU를 통해 부적한 기자재 인프라 부분을 해결할 수 있는 방안 마련이 필요함.

■ 또한 국내의 자기치유기술에 대해 기술노하우를 확보하고 있는 기업의 과제 참여 또는 협력체계 구축 방안이 필요함.

03

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

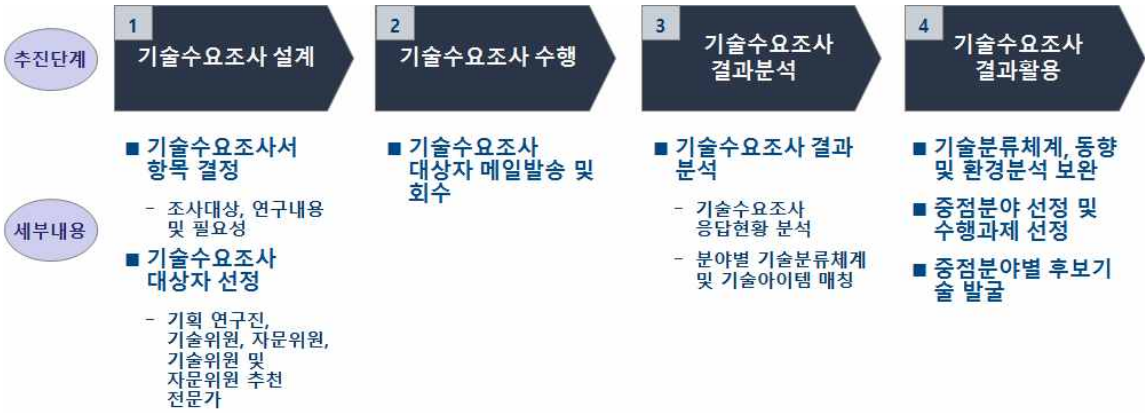
기술수요 및 예측조사

3.1 기술수요조사

3.1.1 기술수요조사의 개요

▢ 기술수요조사는 자기치유형 친환경 콘크리트기술과 관련된 산학연 전문가의 다양한 의견을 수렴하여 후보기술을 도출하기 위하여 연구진 내외부 기술전문가를 대상으로 추진됨.

- 세계적으로 도입기에 해당하는 자기치유형 친환경 콘크리트기술의 특성을 고려할 때, 유사기능을 갖춘 다양한 유망기술수요를 확인하고 시장선점을 위한 핵심기술을 선별할 필요가 있음.
- 기술수요조사 결과는 기술분류체계, 동향 및 환경분석 보완, 세부과제/세세부과제 발굴에 활용됨.



[그림 3-1] 기술수요조사 절차

▢ 기술수요조사는 내부 기획연구진, 자문위원, 내부기획연구진 추천전문가를 대상으로 '14년 1월 24일부터 2월 4일까지 진행되었으며 회신건수는 44건임.

[표 3-1] 기술수요조사 개요

구 분	내 용
조사기간	▪ 2014년 1월 24일 ~ 2월 4일
조사대상	▪ 내부 기획연구진, 기술위원, 자문위원, 그 외 추천 전문가(200명)
조사방법	▪ 이메일을 통한 설문조사
응답자수	▪ 44건

3.1.2 기술수요조사 결과

▢ 자기치유형 친환경 콘크리트 개발기획 기술수요조사 응답건수는 총 44건이며, 이중 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야가 가장 높은 비중(43%)을 차지.

■ 자기치유형 요소기술분야 응답건수는 18건으로 전체 응답건수 중 41%를 차지.

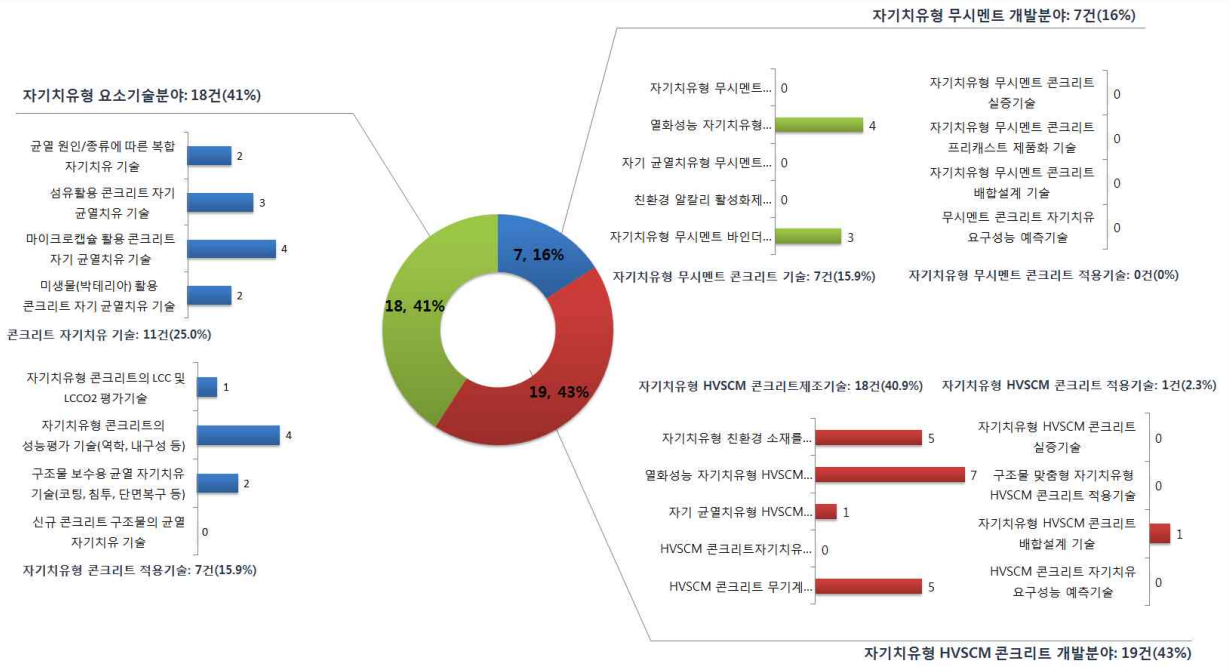
※ 콘크리트 자기치유 기술 11건(25.0%), 자기치유형 콘크리트 적용기술 7건(15.9%)

■ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 응답건수는 19건으로 전체 응답건수 중 43%를 차지.

※ 자기치유형 HVSCM 콘크리트제조기술 18건(40.9%), 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술 1건(2.3%).

■ 자기치유형 무시멘트 개발분야 응답건수는 7건으로 전체 응답건수 중 15.9%를 차지.

※ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술 7건(15.9%)



[그림 3-2] 기술수요조사 결과

3.1.3. 제안기술 리스트

▢ 자기치유형 요소기술분야

[표 3-2] 자기치유형 요소기술분야 제안기술리스트

중분류	소분류	제안기술
콘크리트 자기치유 기술	미생물(박테리아) 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	염화물 이온 및 pH 변화에 따른 미생물의 생체광물형성을 이용한 자기치유 콘크리트 개발
		환경 및 생체광물형성을 이용한 염해 및 탄산화 제어용 콘크리트 균열보수기법 개발 및 치유성 평가기법 개발
	마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	자기 치유 고성능 뿜칠모르타르 개발
		마이크로캡슐를 활용한자기치유 콘크리트 설계 기술 개발
		반복적 자기치유가 가능한 마이크로 캡슐형 콘크리트 보호코팅재의 개발
		콘크리트 특화형 마이크로 캡슐 설계 및 응용 기술 개발
	섬유활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	섬유-나노 입자 융합 다기능성 충진 소재에 의한 자기 치유형 콘크리트 개발
		보통 강도 자기치유 섬유보강 콘크리트 개발
		Hybrid형 섬유보강 콘크리트 자기 균열 치유기술
	균열 원인/종류에 따른 복합 자기치유 기술	Hybrid형 자기치유 원천 소재 및 활용기술 개발
		온도 및 누수조건을 고려한 자기치유 기술
자기치유형 콘크리트 적용기술	신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술	
	구조물 보수용 균열 자기치유 기술(코팅, 침투, 단면복구 등)	균열 보수용 속경성 자기치유 소재개발 및 평가방법 확립
		콘크리트 구조물의 열화방지를 위한 표면침투 보강제 개발
	자기치유형 콘크리트의 성능평가 기술(역학, 내구성 등)	미생물, 마이크로 캡슐, 단섬유 등을 활용한 자기치유 요소기술 성능 평가 기술
		배합비에 따른 자기치유 요소기술 성능 예측 기술 및 재료모델
		자기치유형 콘크리트에 대한 현장(in-situ) 성능 평가 기술
		자기치유 콘크리트 성능표준 및 시방서 작성 연구
	자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술	자기치유형 콘크리트 의사회/경제적 영향 분석 기술

▢ 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야

[표 3-3] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 제안기술 리스트

중분류	소분류	제안기술
자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술	HVSCM 콘크리트 적용 자기치유형 무기계 재료 및 적용기술 개발
		HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술 개발
		모르타르의 자기치유형 기술을 통해서 지하콘크리트 구조물의 균열봉합 및 방수 기술 개발
		수화 생성물의 반응성 제어를 통한 자기치유 시멘트 개발
		혼화재 활용 콘크리트 자기균열 치유기술
	HVSCM 콘크리트자기치유 속도 및 성능 향상기술	
	자기 균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	하이브리드 기술 적용 균열 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발
	열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	첨단 스마트 폴리머 활용 특수환경 HVSCM 콘크리트 개발
		체적변화 자기제어형 고성능 HVSCM 콘크리트 개발
		자연 표면 강화형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발
		하이볼륨 고성능 콘크리트 제조기술 개발
		박테리아 및 무기질 혼합재 적용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발
		CO_2 반응 자기치유형 시멘트계 재료 및 활용기술 개발
		Cl^-반응 자기치유형 시멘트계 재료 및 활용기술 개발
	자기치유형 친환경 소재를 활용한 보수기술	캡슐형 자기치유 보수재료를 활용한 성능회복 기술
		박막/피막형 자기치유 보수재료를 활용한 균열 제어 및 회복기술
		콘크리트용 하이브리드 침투형 자기치유 방수 시스템 개발
		단면 복구용 자기치유 보수재료를 활용한 균열 제어 기술
		프리캐스트 공법용 멀티기능성 자기치유 보수재료 제조 기술
자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	HVSCM 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	
	자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합설계 기술	자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합 · 시공 기술 개발
	구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	
	자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술	

▢ 자기치유형 무시멘트 개발분야

[표 3-4] 자기치유형 무시멘트 개발분야 제안기술 리스트

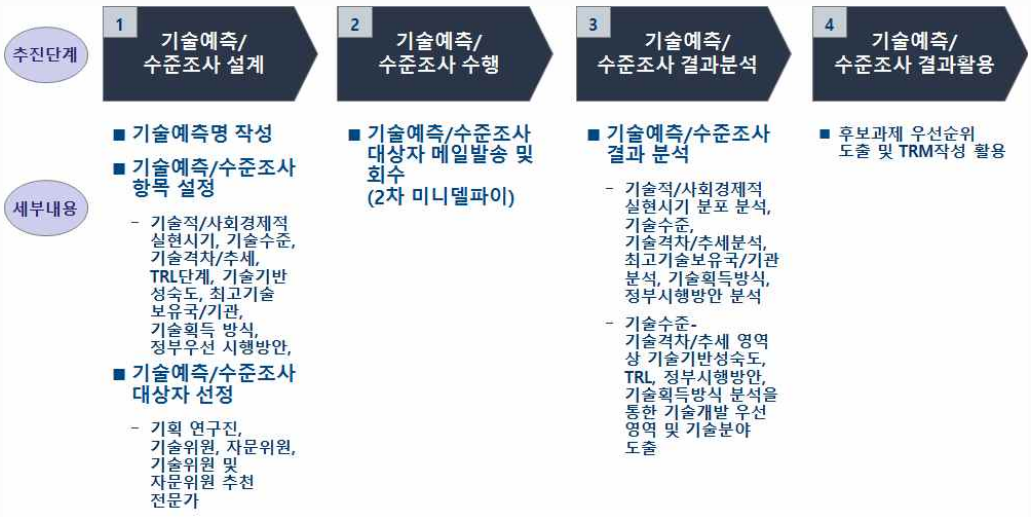
중분류	소분류	제안기술
자기치유형무시멘트 콘크리트 기술	자기치유형 무시멘트 바인더 제조기술	자기치유형 수축저감용 무시멘트 결합재 제조 기술
		자기치유 성능부여 및 탄산화 저항성능 향상을 위한 무시멘트 결합재 개발
		알칼리 활성화제 충진섬유를 이용한 균열치유 기술
	친환경 알칼리 활성화제 제조기술	
	자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	
	열화성능 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	소수성 섬유를 이용한 AAS 동결융해 저항성 향상
		탄산칼슘 석출형 미생물 활용 무시멘트 콘크리트 표면공극 충진기술
		알칼리제 함침형 경량골재를 활용한 무시멘트 콘크리트의 균열제어
		알칼리제 흡착 초흡수성 폴리머를 활용한 무시멘트 콘크리트의 균열제어
	자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술	
자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술	무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합설계 기술	
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트 제품화 기술	
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 실증기술	

3.2 기술예측/수준조사

3.2.1 기술예측/수준조사의 개요

▢ 기술분류체계별 기술분야의 국내외 기술적/사회경제적 실현시기, 기술수준 및 기술격차/격차추세 등 기술특성 변화속도를 정량적으로 평가하여 후보기술도출의 근거자료로 활용함.

- 기술예측/수준조사 결과는 동 기획연구를 통해 도출된 연구개발사업 목표, 범위 등 기술적/시간적 제약조건에 부합하는 기술개발아이템을 선별하는데 활용함.
- 기술예측/수준조사는 기술예측/수준조사서 설계, 조사수행, 결과분석, 분석결과 활용의 4단계에 걸쳐 수행됨.



[그림 3-3] 기술수준/예측조사 절차

▢ 기술예측/수준조사 항목은 기술/사회경제적 실현시기, 최고기술보유기관, 국내기술수준, 기술격차/추세, 기술기반성숙도, 연구개발단계, TRL단계, 기술획득방식, 정부우선 시행방안으로 구성됨.

- '기술적 실현시기'는 2013년 기준, 해당기술의 기술적인 문제가 해결되어 기술이 적용된 최초의 시작품 등이 실험실 수준에서 완료되는 예상시점(Single Point Time)임.
- '사회경제적 실현시기'는 2013년 기준, 해당기술의 경제성이 확보되어 기술을 적용한 제품 등이 상업화되거나 해당기술이 사회적으로 널리 활용되는 예상시점(Single Point Time)임.
- '최고기술보유기관'은 '14년 현재 시점에서 해당기술의 최고기술을 보유한 국가 및 기관임.
- '국내 기술수준'은 '14년 현재 시점에서 해당기술의 최고기술보유국 대비 국내 기술수준임.

※ 국내 기술수준 평가는 전문가의 주관적 성향에 따른 응답결과의 편차 최소화를 목적으로 기술수준 급간별 설명자료를 배포함.

[표 3-5] 기술수준 급간별 설명자료

기술수준	설명
100%	독보적 세계 최고
81% ~ 99%	기술 분야를 선도
61% ~ 80%	선진기술의 모방개량이 가능
41% ~ 60%	선진기술의 도입적용이 가능
1% ~ 40%	연구개발능력이 취약
0%	우리나라에서 관련 연구가 전혀 진행되고 있지 않음

- ‘기술격차’는 국내 기술수준이 세계최고기술에 도달하기까지 소요되는 시간(단위:년)임.
- ‘기술격차추세’는 세계 최고기술과 국내 기술수준 격차가 어떻게 변화하고 있는지를 나타내는 지표로 5점 척도로 제시함.

[표 3-6] 기술격차추세 평가기준

기술수준	설명
5	최고기술과 기술격차가 “빠르게 확대 중”
4	최고기술과 기술격차가 “확대 중”
3	최고기술과 기술격차가 “유지되고 있음”
2	최고기술과 기술격차가 “축소 중”
1	최고기술과 기술격차가 “빠르게 축소 중”

- ‘기술기반 성숙도’는 해당 기술과 관련된 국내 산업/기술 연구인력, 장비 등 인프라 수준을 나타내는 지표로 5점 척도로 제시함.

[표 3-7] 기술기반성숙도 평가기준

기술수준	설명
5	세계선도 연구인력 및 장비 등 확보
4	최고기술보유국과 동등한 수준
3	최고기술보유국보다 낮지만 자체연구개발 수행가능 인력 장비 확보
2	국내 관련 연구인력, 장비가 매우적어 해외협력연구가 필요한 수준
1	국내 관련 연구인력, 장비 인프라 전무

■ '연구개발단계'는 해당 기술의 국내외 연구개발단계를 나타내는 지표임.

[표 3-8] 연구개발단계별 정의

기술수준	설명
기초	특수한 응용 또는 사업을 직접적 목표로 하지 아니하고 자연현상 및 관찰가능한 사물에 대한 새로운 지식을 획득하기 위하여 행하여지는 이론적 또는 실험적 연구 단계
응용	기초연구의 결과 얻어진 지식을 이용하여 주로 실용적인 목적과 목표 하에 새로운 과학적 지식을 획득하기 위하여 행하여지는 독창적인 연구 단계
개발	기초연구·응용연구 및 실제 경험으로부터 얻어진 지식을 이용하여 새로운 제품 및 장치를 생산하거나, 이미 생산 또는 설치된 것을 실질적으로 개선하기 위하여 행하여지는 체계적 연구 단계

■ 'TRL(기술성숙도)'는 해당기술의 국내외 기술성숙도를 나타내는 지표임.

[표 3-9] 기술성숙도 단계별 정의

기술성숙도 단계	설명
1단계	기초이론/실험 등 기초연구가 시작되고 응용연구로 전환되기 시작하는 단계
2단계	실용목적의 아이디어, 특허 등 개념이 정립되는 단계
3단계	실험실 규모의 기본성능평가가 수행되는 단계
4단계	실험실 규모의 핵심성능평가가 수행되는 단계
5단계	확정된 시스템의 시작품 제작 및 성능평가가 수행되는 단계
6단계	파일럿 규모의 시작품 제작 및 성능평가가 수행되는 단계
7단계	신뢰성 평가 및 수요기업 평가가 이뤄지는 단계
8단계	시제품 제작 및 신기술 검증/인증/표준화가 수행되는 단계
9단계	사업화가 완료된 단계

■ '기술획득방식'은 해당 기술의 기술개발을 위해 적합한 연구 주체를 나타냄.

[표 3-10] 기술획득방식별 설명자료

구분		설명
자체 개발	민간	기술이 사업에 직접 적용될 수 있거나 민간의 역량이 우수하여 민간이 주도하는 것이 바람직함.
	정부	기술의 공공성이 강하거나 민간의 역량이 부족하고 기초 단계 연구개발이 필요하여 정부출연연구소 또는 기관을 중심으로 정부가 주도하는 것이 바람직함.
	공동	정부와 민간이 매칭펀드 또는 역할분담을 통하여 공동으로 개발을 추진하는 것이 바람직함.
기술도입 및 국제공동 연구		국내 개발 역량이 미흡하거나 해외 우수 기술의 도입을 통하여 비용을 크게 절감할 수 있어 독자적 개발보다는 국제공동개발 또는 해외 기술을 도입하는 것이 바람직함.

■ ‘정부우선시행방안’은 해당 기술의 기술적 실현을 위해 정부가 우선적으로 시행해야 할 정책임.

[표 3-11] 기술성숙도 단계별 정의

기술성숙도 단계	설명
인력양성	해당기술에 인력이 절실히 부족하여 인력양성을 위한 정책적 지원 필요
협력교류 활성화	기술의 성격상 다학제적 연구 또는 산학연 및 국제공동연구가 필요하며 협력교류 활성화를 위한 정책적 지원 필요
인프라구축	기술 개발을 위해 설비투자 등의 인프라구축이 필요
연구비 확대	기술 개발을 위해 연구개발비 확대 및 신규 투자가 필요
제도개선	규제 완화/정책 수립/법규 제정/표준화 지원 등 연구개발을 촉진하기 위한 제도의 수립 또는 개선이 필요

▢ 기술예측/수준조사는 델파이방법론을 채택하여 수행하였음

- 1차 조사기간 : 2014. 3. 5. ~ 3. 7.
- 2차 조사기간 : 2014. 3. 10. ~ 3. 11.
- 조사대상 : 내부 기획연구진, 기술위원, 그 외 추천 전문가
- 조사방법 : e-mail을 통한 2차 미니델파이 조사

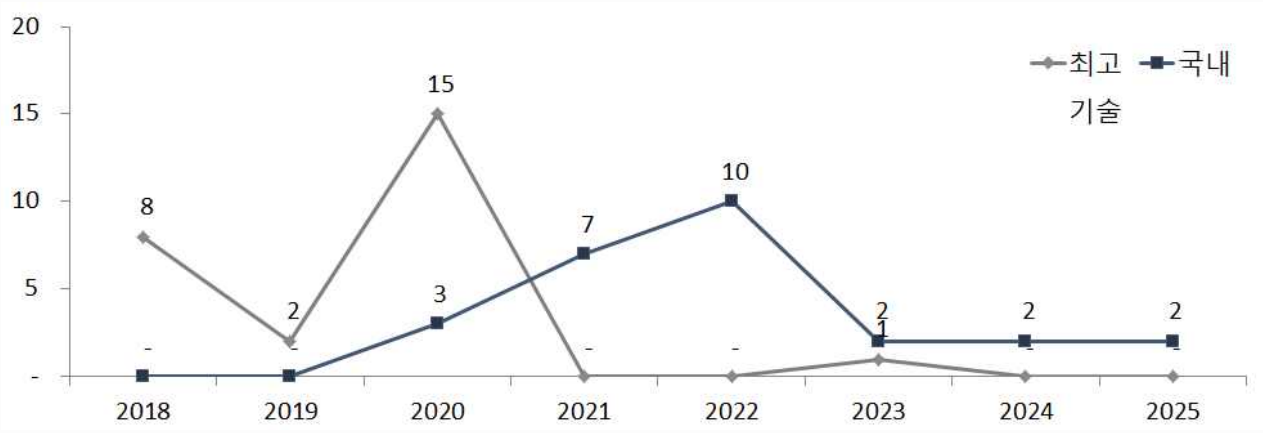
3.2.2 기술예측조사 결과

▢ 최고기술보유기관은 '23년까지 첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 기술이 기술적으로 실현될 것으로 전망됨.

- 최고기술보유기관(국가)의 기술적 실현시기는 '18년부터 '20년 사이에 집중됨.

▢ 국내의 경우, '25년까지 첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 기술이 기술적으로 실현될 것으로 전망됨.

- 국내 첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 기술의 기술적 실현시기는 '20년부터 22년사이에 집중됨.



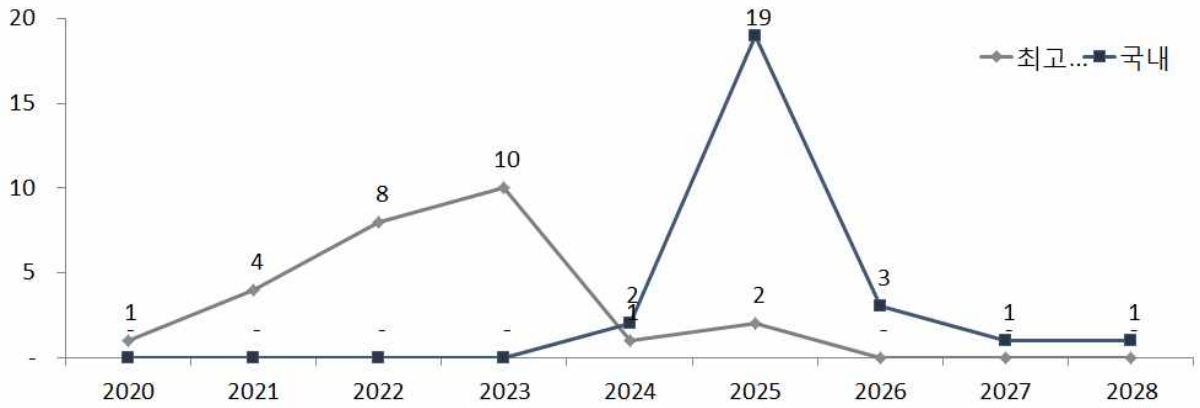
[그림 3-4] 국내외 기술적 실현시기 분포 비교

▢ 최고기술보유기관은 '25년까지 첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 기술이 사회경제적으로 실현될 것으로 전망됨.

- 최고기술보유기관(국가)의 기술적 실현시기는 '21년부터 '24년 사이에 집중됨.

▢ 국내의 경우, '28년까지 첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 기술이 기술적으로 실현될 것으로 전망됨.

- 국내 첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 기술의 기술적 실현시기는 '24년부터 '26년 사이에 집중됨.



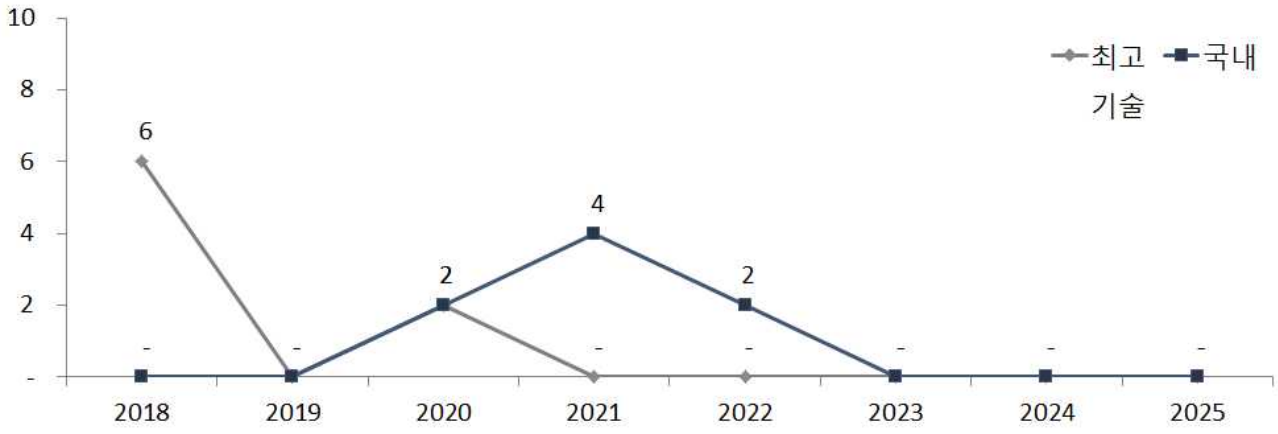
[그림 3-5] 국내외 사회경제적 실현시기 분포 비교

(1) 자기치유형 요소기술분야

▢ 최고기술보유기관의 경우, 자기치유형 요소기술분야의 기술적 실현시기가 '18년과 20년에 위치함.

■ 8개 기술분야중 6개 기술분야의 기술적 실현이 '18년에 이루어지는 것으로 조사됨.

▢ 국내의 경우, 자기치유형 요소기술분야의 기술적 실현시기가 '20년부터 '22년사이에 위치하여 최고기술보유기관과 2년의 격차가 있는 것으로 조사됨.

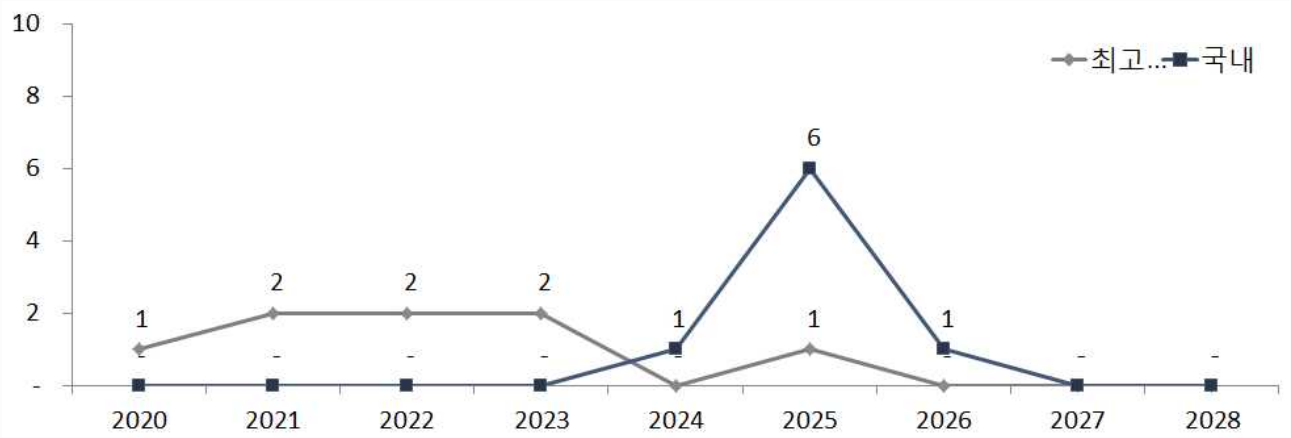


[그림 3-6] 자기치유형 요소기술분야 국내외 기술적 실현시기 분포

▢ 최고기술보유기관의 경우, 자기치유형 요소기술분야의 사회경제적실현시기는 실현시기가 '20년부터 '25년 사이에 위치함.

▢ 국내의 경우, 자기치유형 요소기술분야 기술의 사회경제적 실현시기가 '24년부터 '26년 사이에 위치하여 최고기술보유기관과 1년~5년의 격차가 있는 것으로 조사됨.

■ 국내에서는 자기치유형 요소기술분야 8개 기술 중 6개 기술의 사회경제적 실현이 '25년에 이루어지는 것으로 조사됨.



[그림 3-7] 자기치유형 요소기술분야 국내외 사회경제적 실현시기 분포

[표 3-12] 국내외 자기치유형 요소기술분야 기술의 실현시기

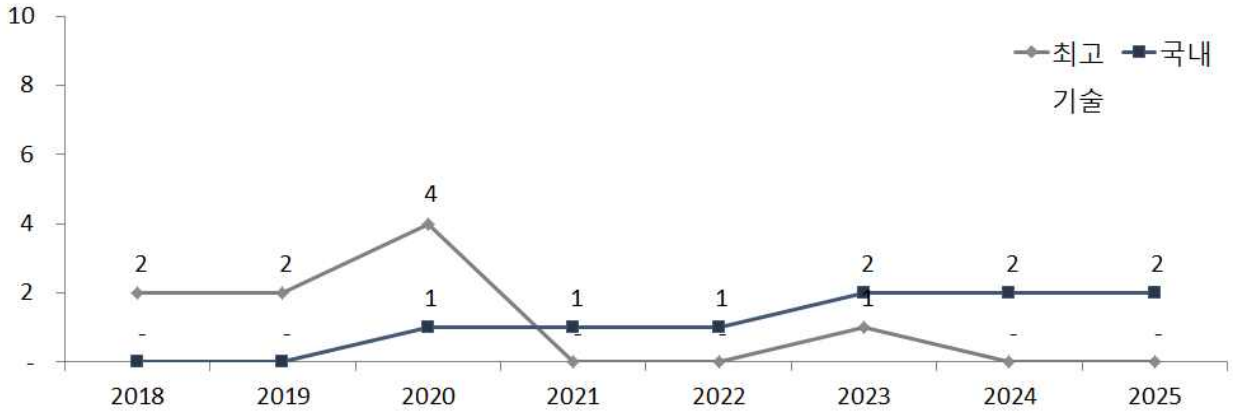
기술분류체계			기술적 실현시기		사회경제적 실현시기	
대분류	중분류	소분류명	최고 기술	국내	최고 기술	국내
자기치유형 요소기술분야	콘크리트 자기치유 기술	미생물(박테리아) 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	2018	2021	2021	2025
		마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	2018	2021	2021	2024
		섬유활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	2018	2022	2025	2026
		균열 원인/종류에 따른 복합 자기치유 기술	2020	2020	2023	2025
	자기치유형 콘크리트 적용기술	신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술	2018	2021	2020	2025
		구조물 보수용 균열 자기치유 기술(코팅, 침투, 단면복구 등)	2018	2021	2022	2025
		자기치유형 콘크리트의 성능평가 기술(역학, 내구성 등)	2018	2022	2022	2025
		자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술	2020	2020	2023	2025

(2) 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

▢ 최고기술보유기관의 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술적 실현시기가 '18년부터 '23년 사이에 위치함.

■ 9개 기술분야중 8개 기술분야의 기술적 실현이 '20년까지 이루어지는 것으로 조사됨.

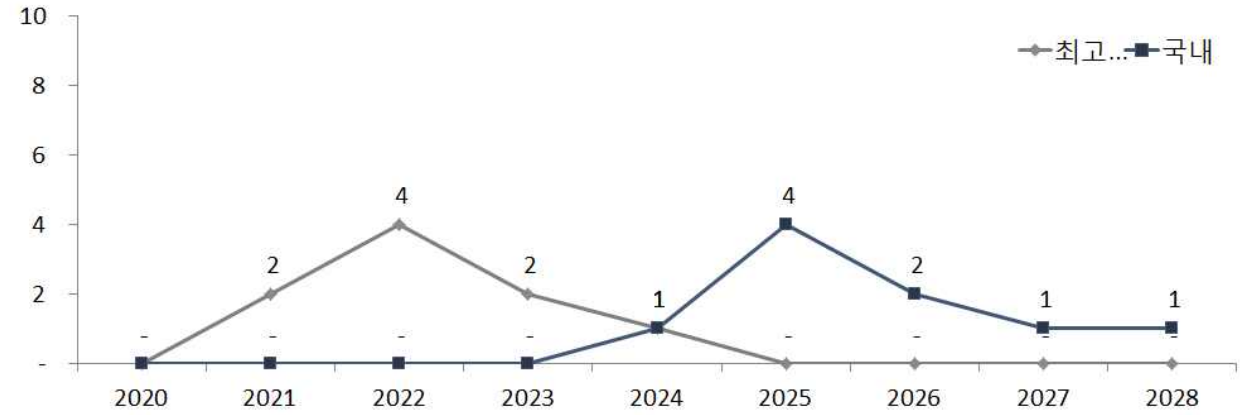
▢ 국내의 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야기술적 실현시기는 '20년부터 '25년사이에 위치하고 있음.



[그림 3-8] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 국내외 기술적 실현시기 분포

▢ 최고기술보유기관의 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 사회경제적 실현시기가 '21년부터 '24년 사이에 위치함.

▢ 국내의 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 사회경제적 실현시기가 '24년부터 '28년사이에 위치하고 있어 최고기술보유기관과 3년~5년의 격차가 있는 것으로 조사됨.



[그림 3-9] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 국내외 사회경제적 실현시기 분포

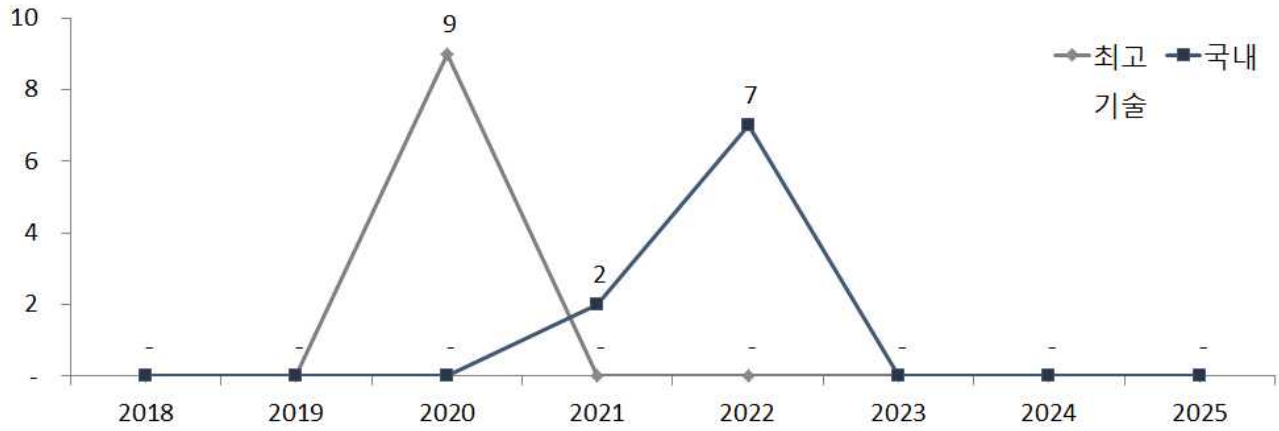
[표 3-13] 국내외 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 기술의 실현시기

기술분류체계			기술적 실현시기		사회경제적 실현시기	
대분류	중분류	소분류명	최고 기술	국내	최고 기술	국내
자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야	자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술	2020	2024	2021	2026
		HVSCM 콘크리트자기치유 속도 및 성능 향상기술	2020	2025	2023	2028
		자기 균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	2018	2023	2021	2025
		열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	2019	2024	2023	2027
	자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	자기치유형 친환경 소재를 활용한 보수기술	2020	2021	2022	2024
		HVSCM 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	2019	2023	2022	2025
		자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합설계 기술	2018	2020	2022	2025
		구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	2023	2025	2024	2025
		자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술	2020	2022	2022	2026

(3) 자기치유형 무시멘트 개발분야

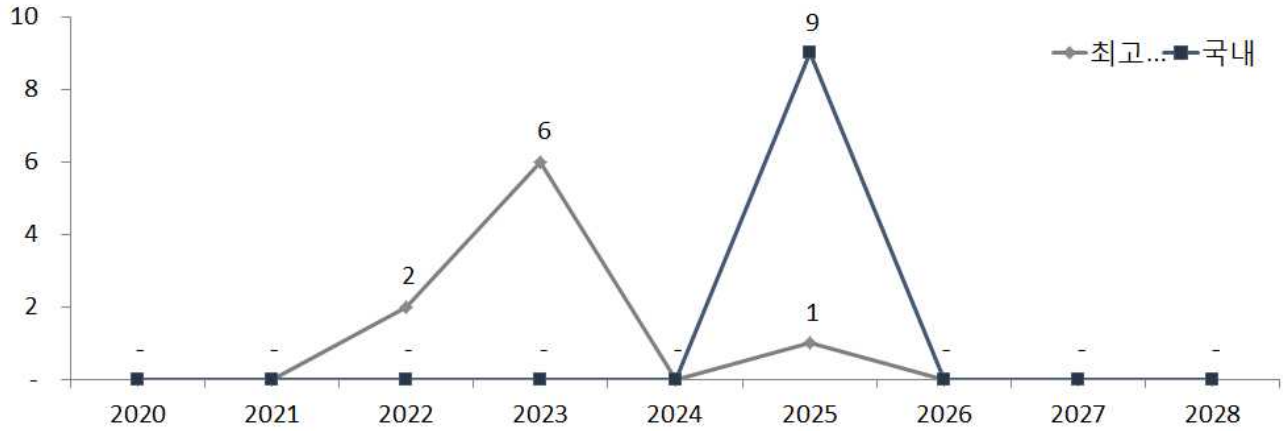
▢ 최고기술보유기관의 경우, 자기치유형 무시멘트 개발분야의 기술적 실현시기가 ‘20년에 위치함.

▢ 국내의 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술적 실현시기가 ‘21년부터 ‘22년사이에 위치하고 있어 최고기술보유기관 대비 1~2년의 격차가 있음.



[그림 3-10] 자기치유형 무시멘트 개발분야 국내외 기술적 실현시기 분포

- ▢ 최고기술보유기관의 경우, 자기치유형 무시멘트 개발분야의 사회경제적 실현시기가 '22년부터 '25년 사이에 위치함.
- ▢ 국내의 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술적 실현시기는 '25년에 위치함.



[그림 3-11] 자기치유형 무시멘트 개발분야 국내외 사회경제적 실현시기 분포

[표 3-14] 국내외 자기치유형 무시멘트 개발분야 기술의 실현시기

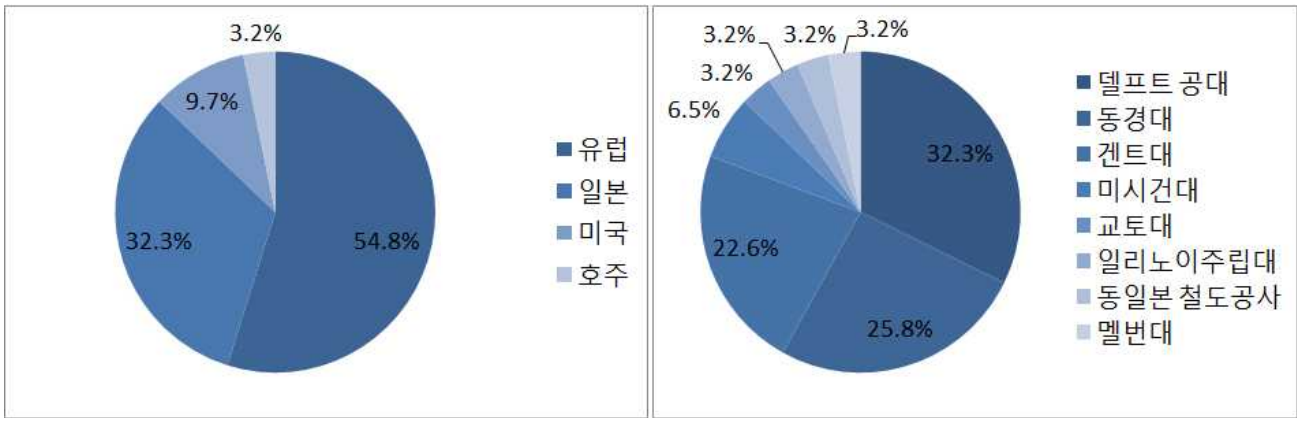
기술분류체계			기술적 실현시기		사회경제적 실현시기	
대분류	중분류	소분류명	최고 기술	국내	최고 기술	국내
자기치유형 무시멘트 개발분야	자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술	자기치유형 무시멘트 바인더 제조기술	2020	2022	2022	2025
		친환경 알칼리 활성화제 제조기술	2020	2022	2022	2025
		자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	2020	2022	2023	2025
		열화성능 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	2020	2022	2025	2025
		자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술	2020	2022	2023	2025
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술	무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	2020	2022	2023	2025
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합설계 기술	2020	2022	2023	2025
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트 제품화 기술	2020	2021	2023	2025
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 실증기술	2020	2021	2023	2025

3.2.3 기술수준조사 결과

(1) 최고기술보유기관

▢ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술관련 최고기술을 가장 많이 보유한 국가는 유럽(네덜란드, 벨기에)이며 두 번째로 보유한 국가는 일본임.

■ 최고기술보유기관 조사 결과 델프트 공대, 동경대, 겐트대 순으로 많은 최고기술을 보유한 것으로 조사됨.

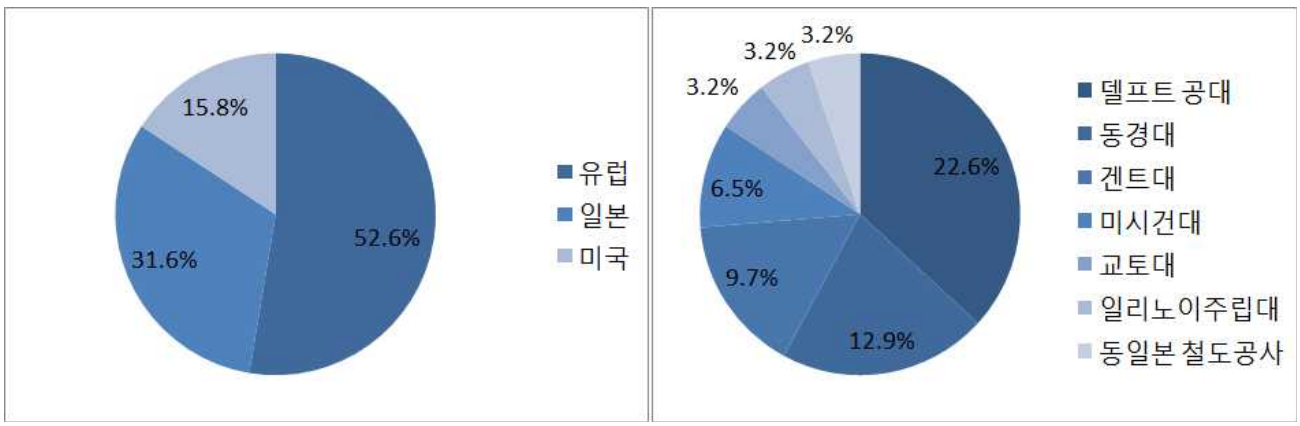


[그림 3-12] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포

① 자기치유형 요소기술분야

▢ 자기치유형 요소기술분야에서 최고기술을 가장 많이 보유한 국가는 유럽(네덜란드, 벨기에)이며 두 번째로 보유한 국가는 일본임.

■ 최고기술보유기관 조사 결과 델프트 공대, 동경대, 겐트대 순으로 많은 최고기술을 보유한 것으로 조사됨.

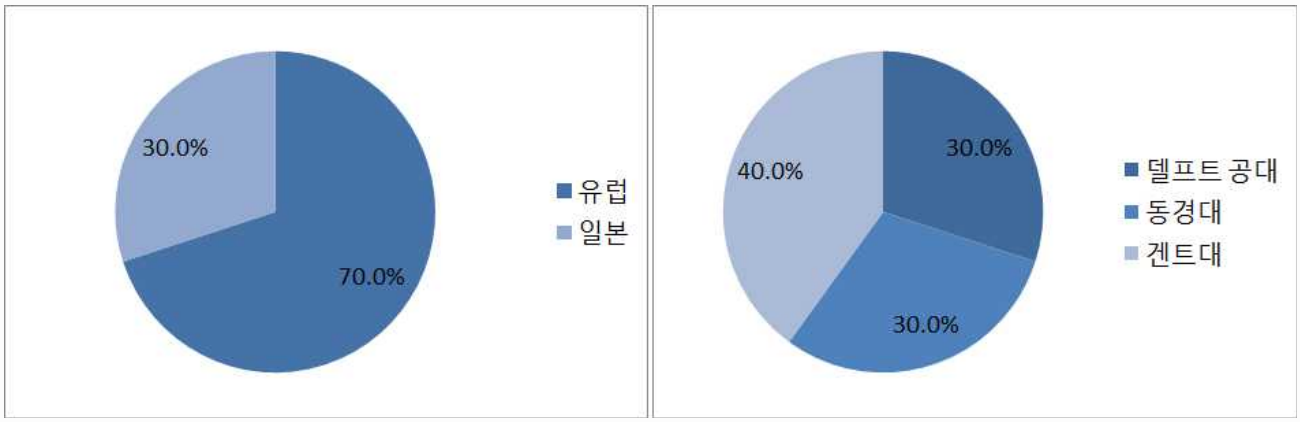


[그림 3-13] 자기치유형 요소기술분야 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포

② 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야에서 최고기술을 가장 많이 보유한 국가는 유럽(네덜란드, 벨기에)이며 두 번째로 보유한 국가는 일본임.

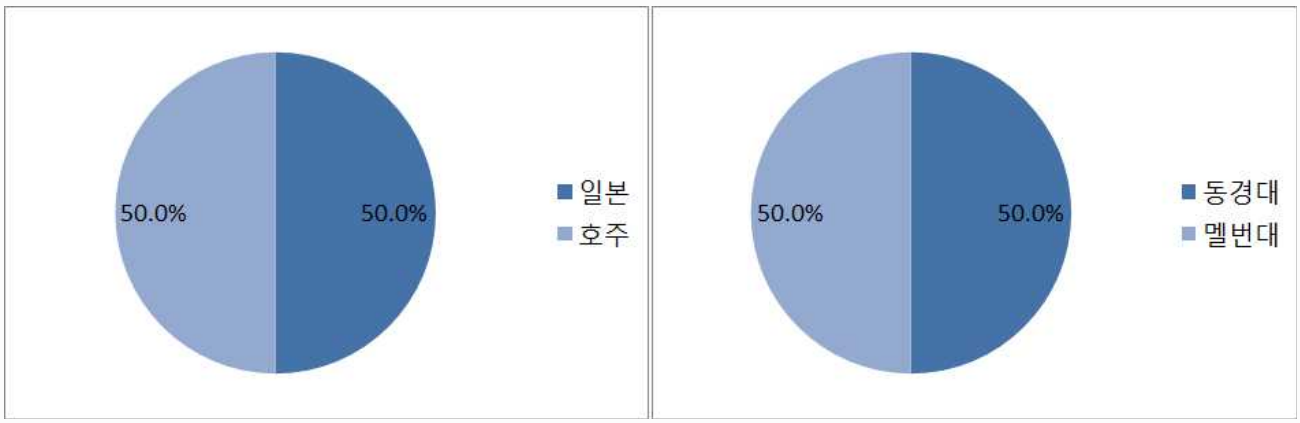
■ 최고기술보유기관 조사 결과 델프트 공대, 동경대, 겐트대 순으로 많은 최고기술을 보유한 것으로 조사됨.



[그림 3-14] 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포

③ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야

▢ 자기치유형 무시멘트 개발분야에서 최고기술을 가장 많이 보유한 국가는 일본과 호주임.



[그림 3-15] 자기치유형 무시멘트 개발분야 최고기술보유국 및 최고기술보유기관 분포

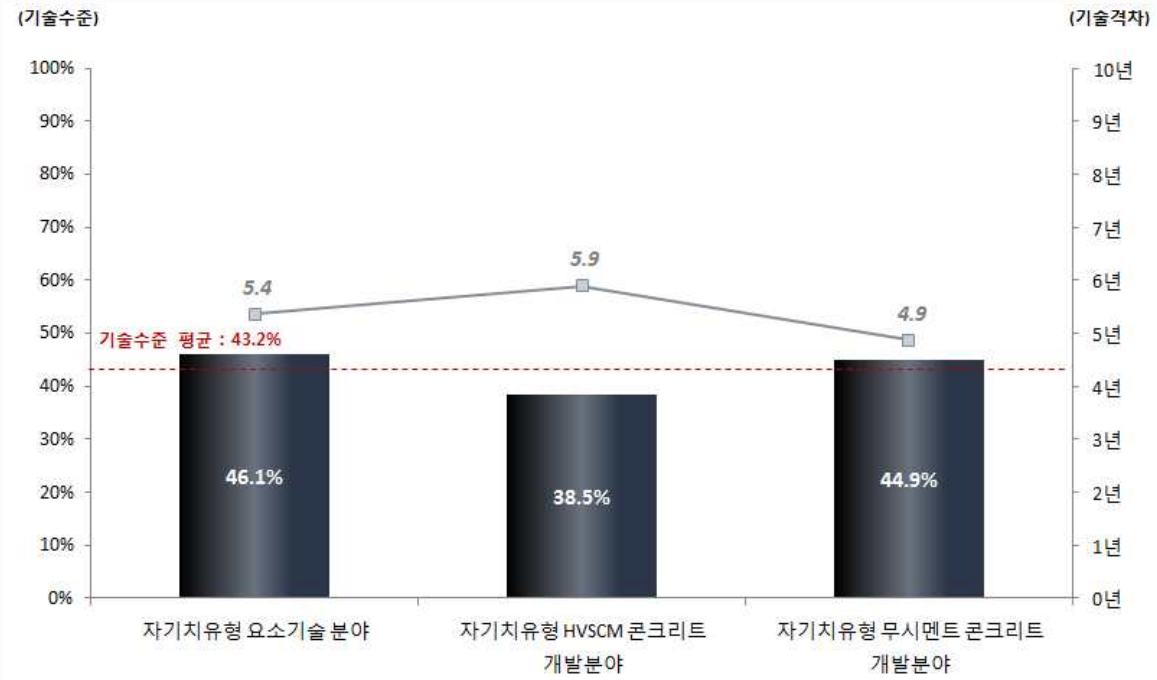
[표 3-15] 기술분류별 최고기술보유기관

대분류	중분류	소분류	최고기술
자기치유형 요소기술분야	콘크리트 자기치유 기술	미생물(박테리아) 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	델프트 공대
		마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	일리노이 주립대, 겐트대, 동경대, 쿄토대
		섬유활용 콘크리트 자기 균열치유 기술	겐트대, 미시건대, 델프트 공대
		균열 원인/종류에 따른 복합 자기치유 기술	델프트 공대
	자기치유형 콘크리트 적용기술	신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술	동경대, 델프트 공대
		구조물 보수용 균열 자기치유 기술(코팅, 침투, 단면복구 등)	동일본 철도공사, 델프트 공대, 동경대
		자기치유형 콘크리트의 성능평가 기술(역학, 내구성 등)	동경대, 미시건대, 겐트대, 델프트 공대
		자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술	델프트 공대
자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야	자기치유형 HVSCM 콘크리트제조 기술	HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술	동경대
		HVSCM 콘크리트자기치유 속도 및 성능 향상기술	겐트대, 동경대
		자기 균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	동경대
		열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술	델프트 공대
		자기치유형 친환경 소재를 활용한 보수기술	델프트 공대
	자기치유형 HVSCM 콘크리트적용 기술	HVSCM 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	겐트대
		자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합설계 기술	겐트대
		구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술	델프트 공대
		자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술	겐트대
자기치유형 무시멘트 개발분야	자기치유형 무시멘트콘크리트기술	자기치유형 무시멘트 바인더 제조기술	
		친환경 알칼리 활성화제 제조기술	동경대, 멜빈대
		자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	-
		열화성능 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술	-
		자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술	-
	자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술	무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술	-
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합설계 기술	-
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트 제품화 기술	-
		자기치유형 무시멘트 콘크리트 실증기술	-

(2) 국내 기술수준 및 국내외 기술격차

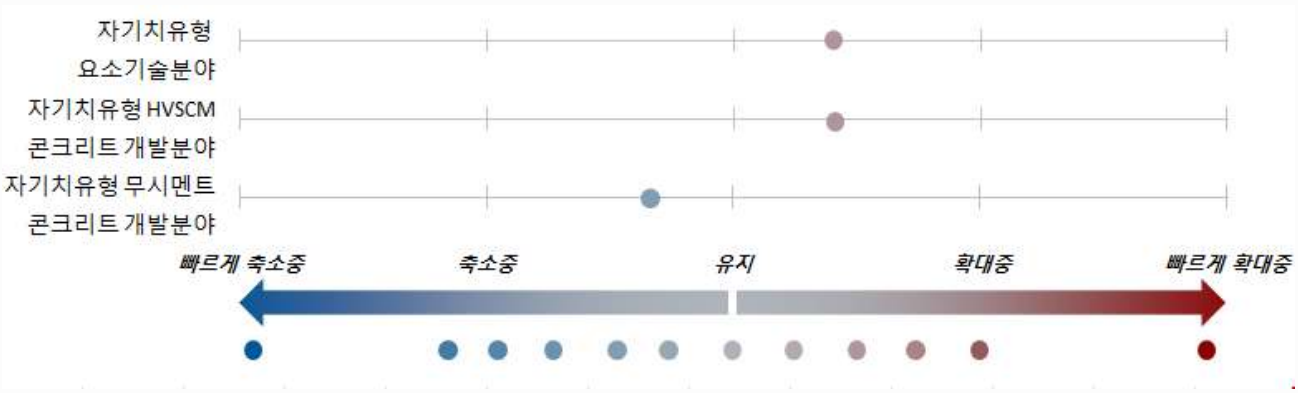
▢ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 국내 기술수준은 43.2%임.

- 자기치유형 요소기술분야 (46.1%)의 기술수준이 상대적으로 높고, 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야 (38.5%)의 기술수준은 상대적으로 낮음.
- 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야(4.9년)의 기술격차가 상대적으로 적으며, 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야(5.9년)의 기술격차는 상대적으로 큼.



[그림 3-16] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 국내 기술수준 및 기술격차

- 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야의 기술격차는 축소 중이며, 자기치유형 요소기술분야, 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야의 기술격차는 확대 중임.

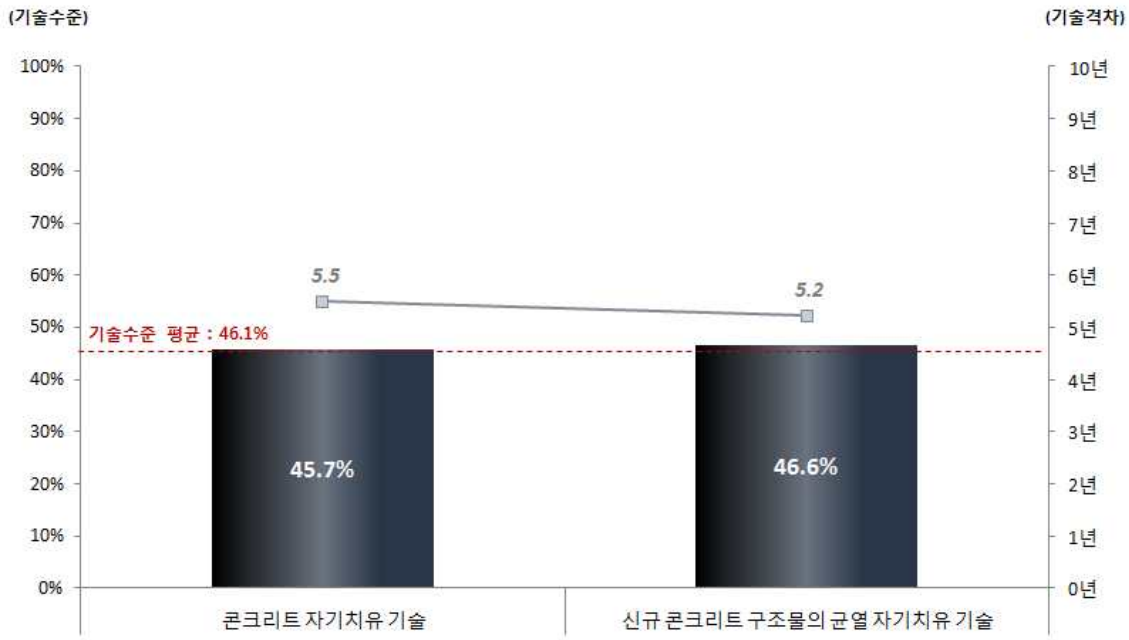


[그림 3-17] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 기술격차 추세

① 자기치유형 요소기술분야

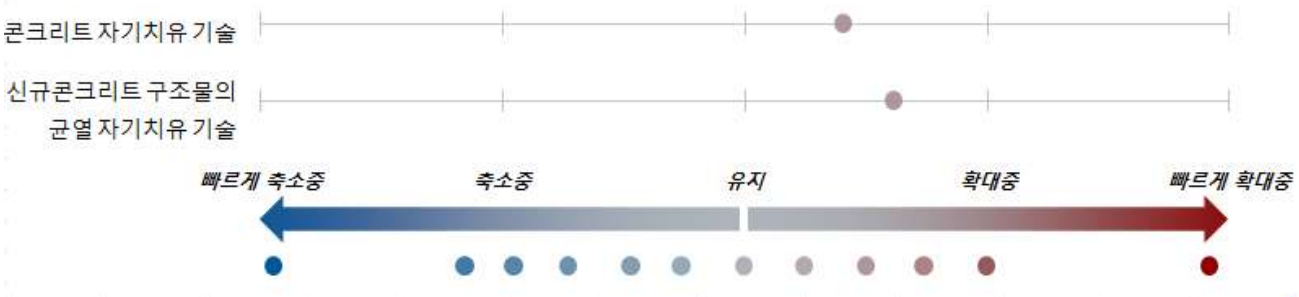
▢ 자기치유형 요소기술분야의 기술수준은 46.1%임.

■ 자기치유형 요소기술분야를 구성하는 중분류 기술의 기술수준 및 기술격차의 편차는 크지 않음.



[그림 3-18] 자기치유형 요소기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

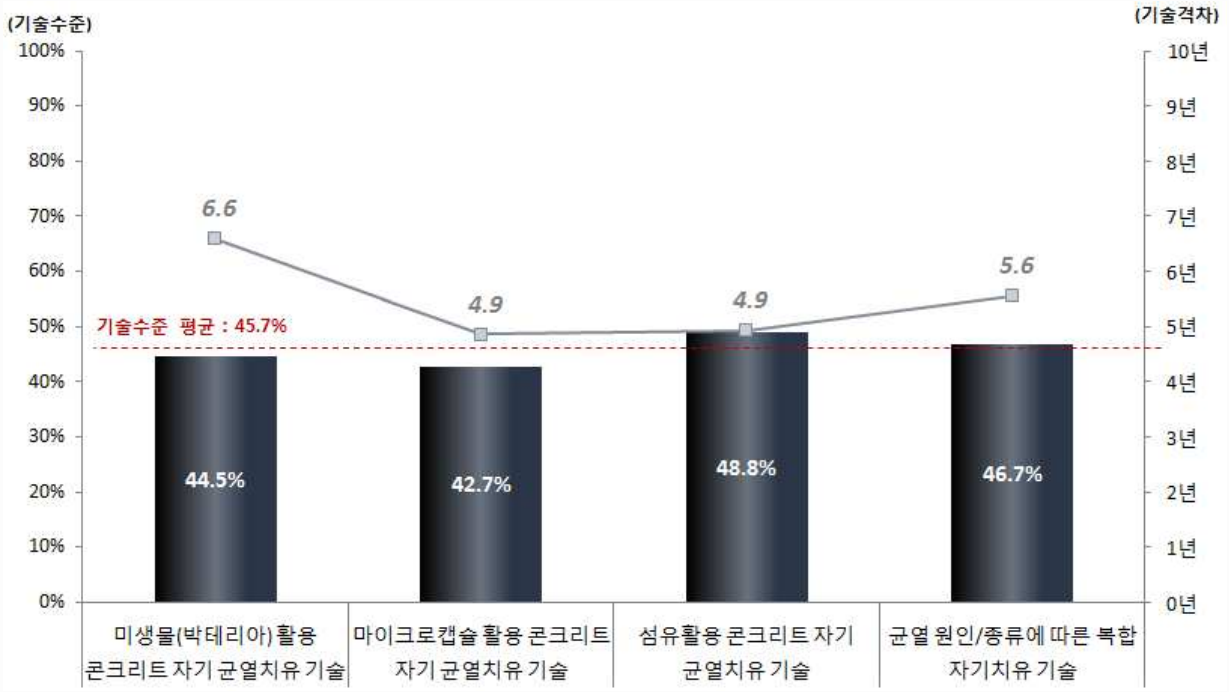
■ 자기치유형 요소기술분야의 기술격차는 전반적으로 확대추세이며, 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술이 상대적으로 더 빠르게 기술격차가 확대되고 있음.



[그림 3-19] 자기치유형 요소기술분야의 기술격차 추세

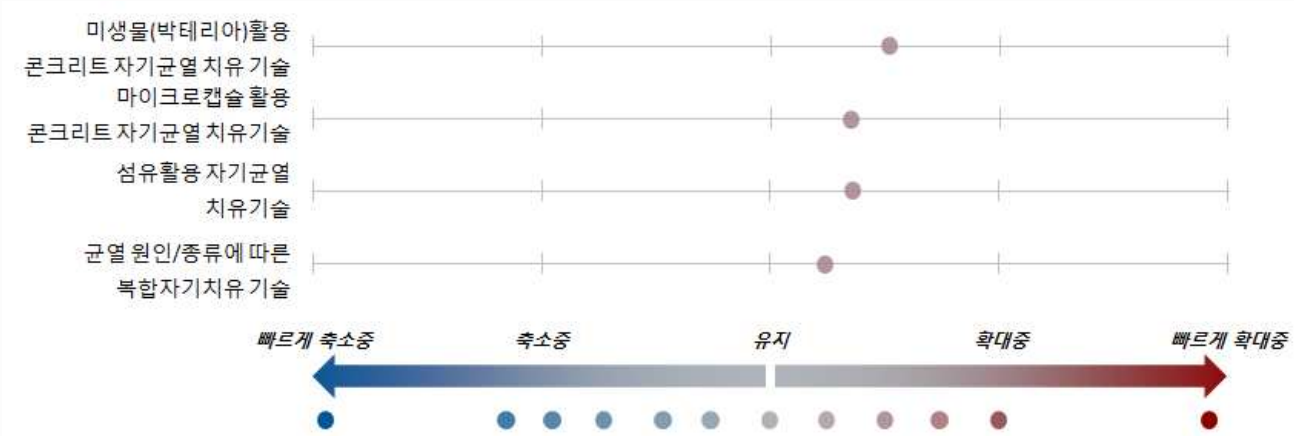
■ 콘크리트 자기치유 기술분야의 세부 기술분야별 기술수준 및 기술격차 분석 결과, 섬유활용 콘크리트 자기균열치유기술(48.8%)의 기술수준이 상대적으로 높으며, 마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기균열치유기술(42.7%)의 기술수준은 상대적으로 낮은 것으로 나타남.

※ 마이크로캡슐 활용 콘크리트 자기균열치유기술(4.9년), 섬유활용 콘크리트 자기균열 치유기술(4.9년)의 기술격차는 상대적으로 적으며, 미생물(박테리아)활용 콘크리트 자기균열치유기술(6.6)의 기술격차는 상대적으로 큼.



[그림 3-20] 콘크리트 자기치유 기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

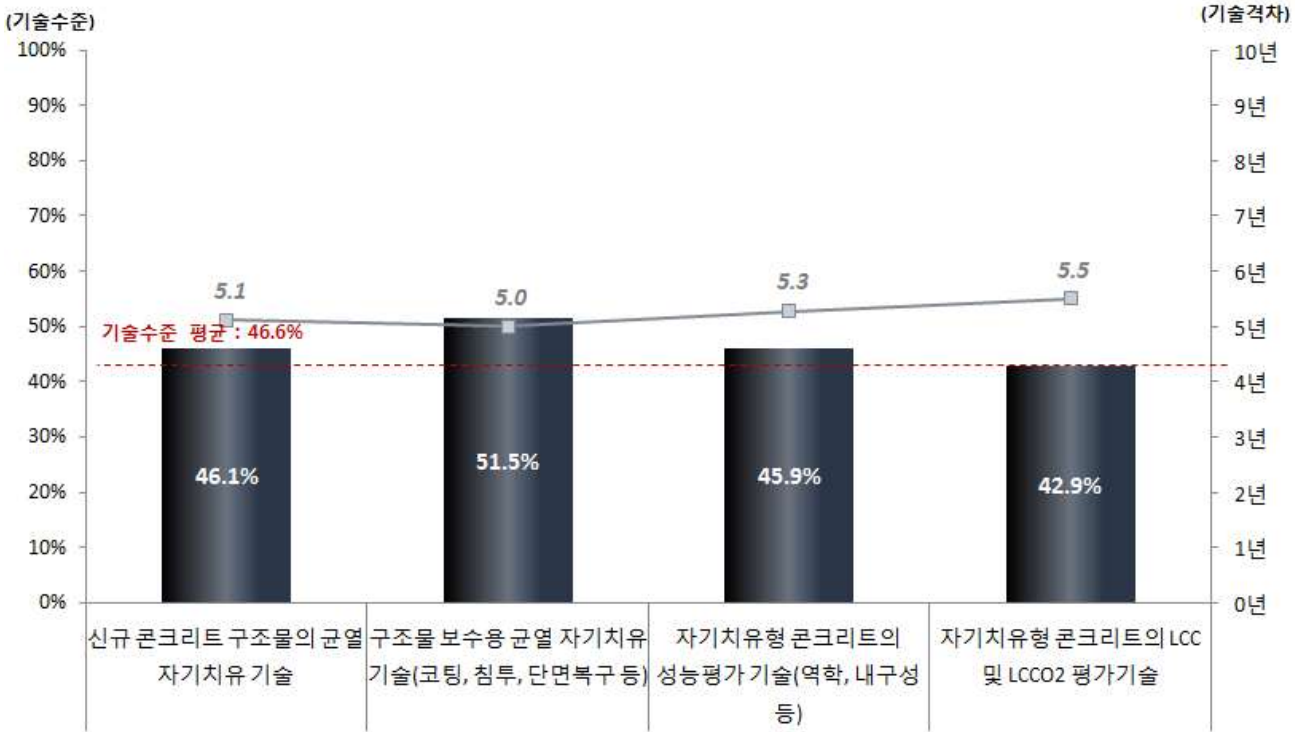
■ 콘크리트 자기치유 기술분야의 세부 기술분야별 기술격차는 전반적으로 확대 추세에 있으며, 미생물(박테리아)활용 콘크리트 자기균열치유기술의 기술격차가 상대적으로 빠르게 확대되고 있음.



[그림 3-21] 콘크리트 자기치유 기술분야의 기술격차 추세

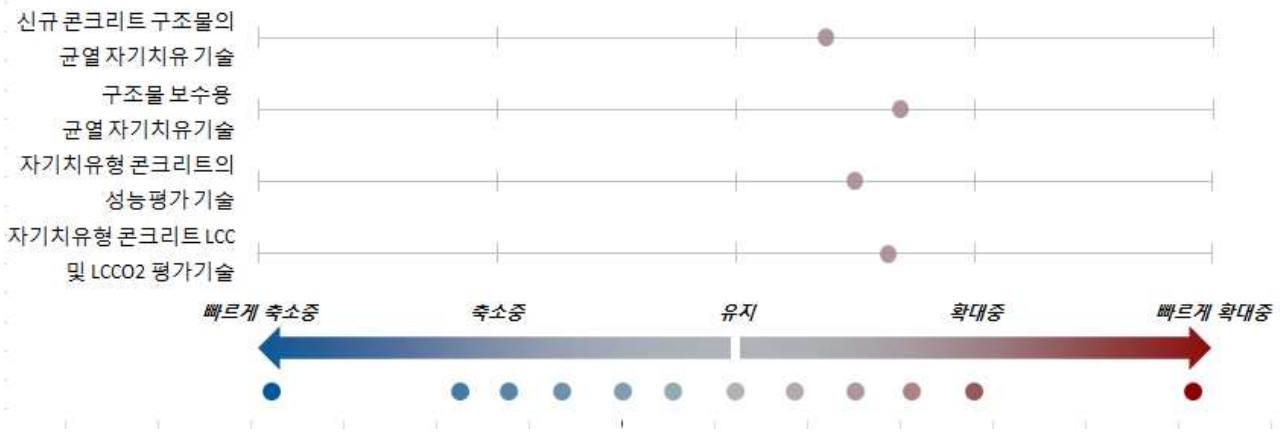
■ 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술분야의 세부 기술분야별 기술수준 및 기술격차 분석 결과, 구조물 보수용 균열 자기치유기술(코팅, 침투, 단면복구 등)의 기술수준(51.5%)이 상대적으로 높으며, 자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술의 기술수준(42.9%)은 상대적으로 낮은 것으로 나타남.

※ 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술을 구성하는 소분류 기술의 기술격차 평균은 5.2년이며, 각 기술별 편차는 크지 않음.



[그림 3-22] 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

- 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술분야의 세부 기술분야별 기술격차는 전반적으로 확대 추세이며, 구조물 보수용 균열 자기치유기술의 기술격차가 상대적으로 빠르게 확대되고 있음.

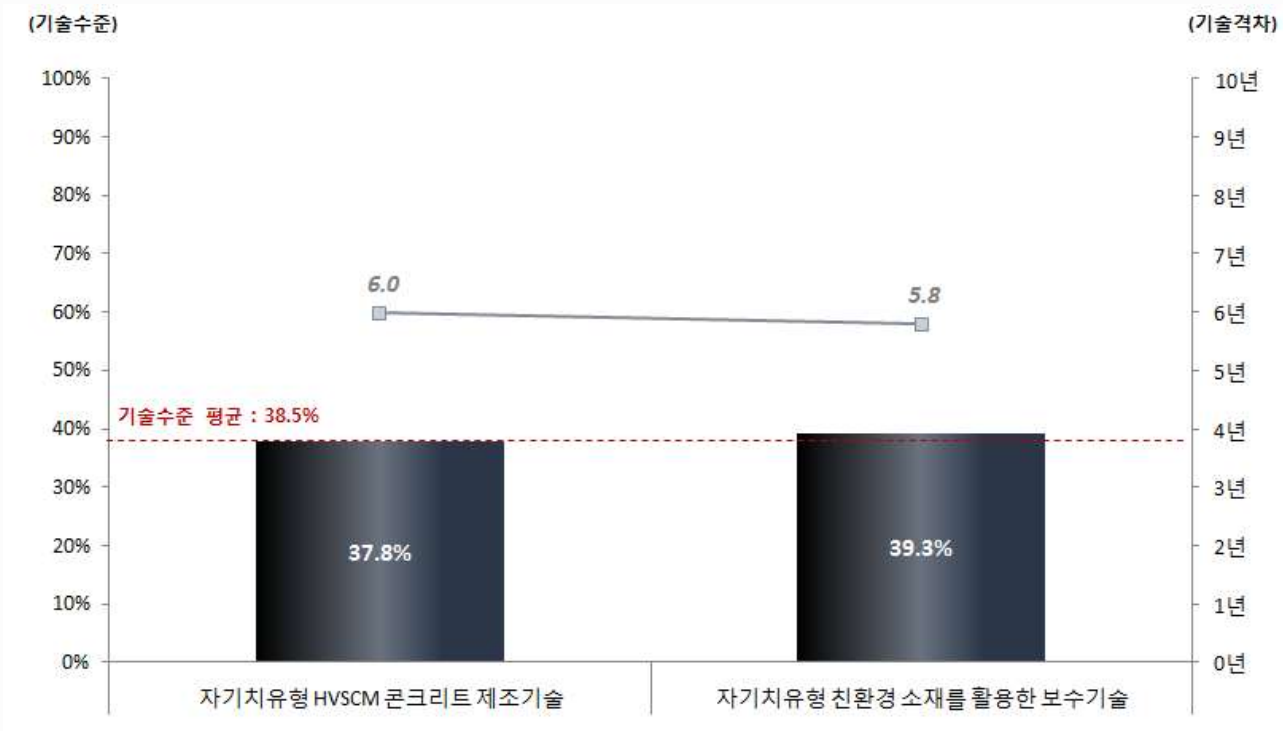


[그림 3-23] 신규 콘크리트 구조물의 균열 자기치유 기술분야의 기술격차 추세

② 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

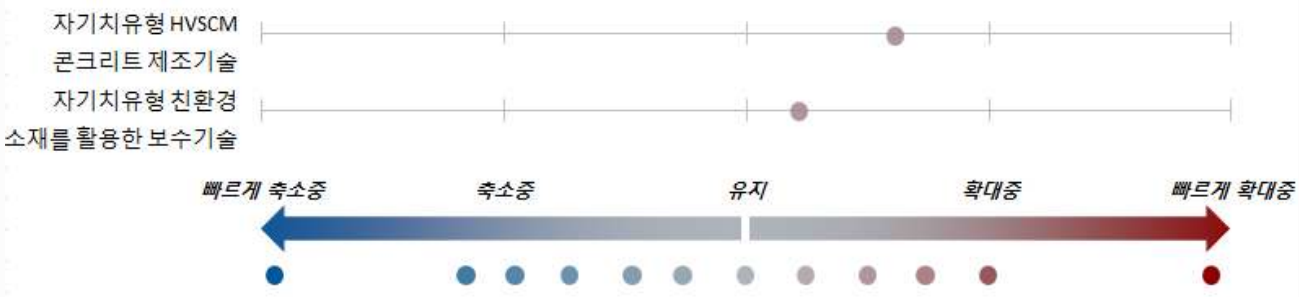
▢ 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야의 기술수준은 38.5%임.

■ 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야를 구성하는 중분류 기술의 기술수준 및 기술격차의 편차는 크지 않음.



[그림 3-24] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 국내 기술수준 및 기술격차

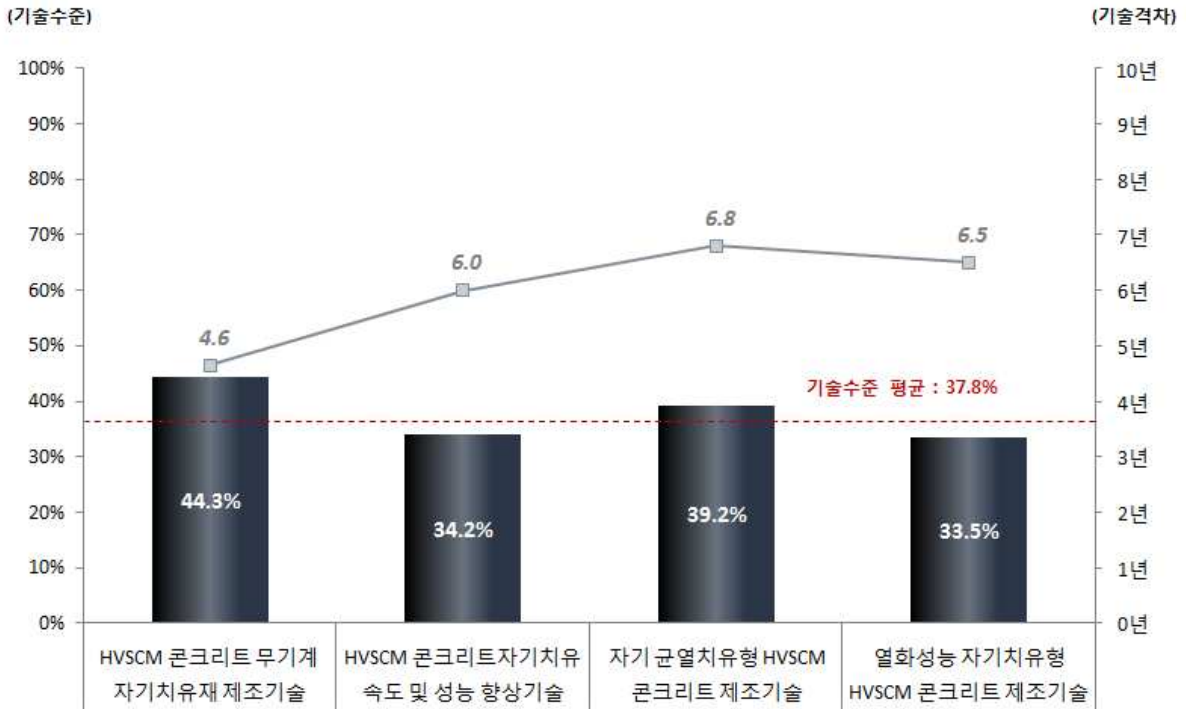
■ 자기치유형 HVSCM콘크리트 개발분야의 기술격차는 전반적으로 확대추세이며, 자기치유형 HVSCM콘크리트 제조기술이 상대적으로 더 빠르게 기술격차가 확대되고 있음.



[그림 3-25] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술격차 추세

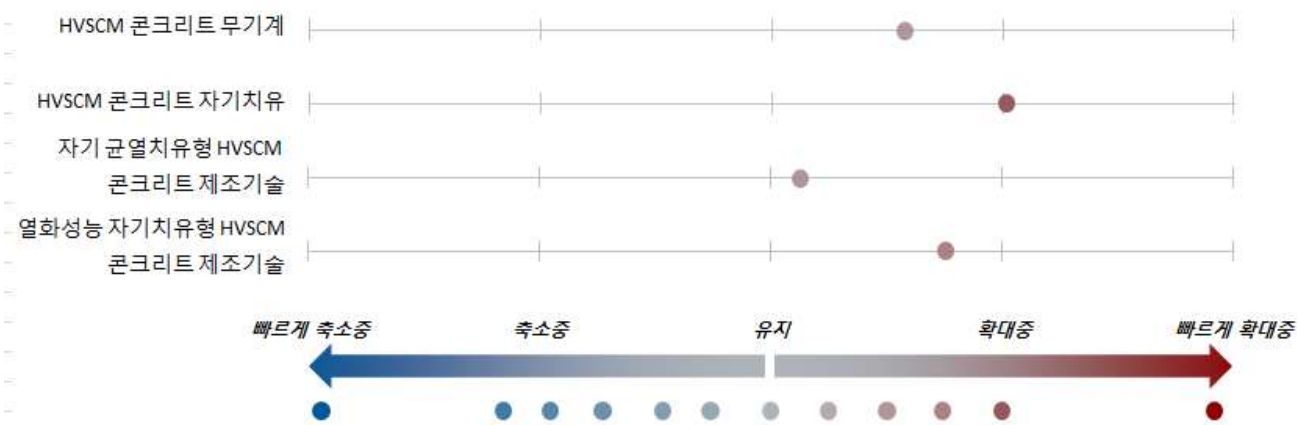
■ 자기치유형 HVSCM콘크리트 제조기술분야의 세부 기술분야별 기술수준 및 기술격차 분석 결과, HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술(44.3%)의 기술수준이 상대적으로 높으며, 열화성능 자기치유형 HVSCM콘크리트 제조기술(33.5%), HVSCM콘크리트 자기치유 속도 및 성능향상기술(34.2%)의 기술수준은 상대적으로 낮은 것으로 나타남.

※ HVSCM콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술(4.9년)의 기술격차는 상대적으로 적으며, 자기 균열치유형 HVSCM콘크리트 제조기술(6.8년)의 기술격차는 상대적으로 큼.



[그림 3-26] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

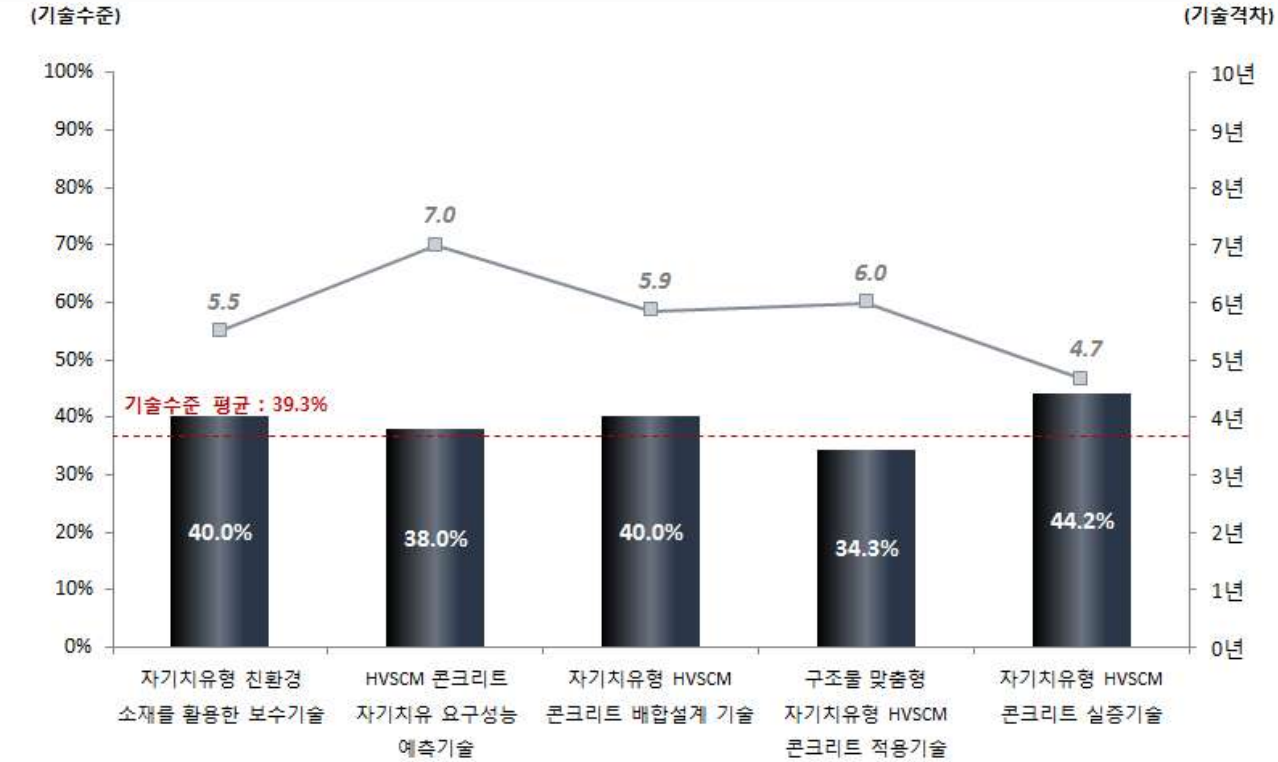
■ 자기치유형 HVSCM콘크리트 제조기술분야의 세부기술분야별 기술격차는 전반적으로 확대 추세에 있으며, HVSCM콘크리트 자기치유 속도 및 성능향상 기술의 기술격차가 상대적으로 빠르게 확대되고 있음.



[그림 3-27] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 기술격차 추세

■ 자기치유형 친환경소재를 활용한 보수기술분야의 기술분야별의 기술수준 및 기술격차분석결과, 자기치유형 HVSCM콘크리트 실증기술의 기술수준(44.2%)이 상대적으로 높으며, 구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM콘크리트 적용기술의 기술수준(34.3%)은 상대적으로 낮은 것으로 나타남.

※ 자기치유형 HVSCM콘크리트 실증기술의 기술격차(4.7년)는 상대적으로 적으며, HVSCM콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술의 기술격차(7.0년)는 상대적으로 큼.



[그림 3-28] 자기치유형 친환경소재를 활용한 보수기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

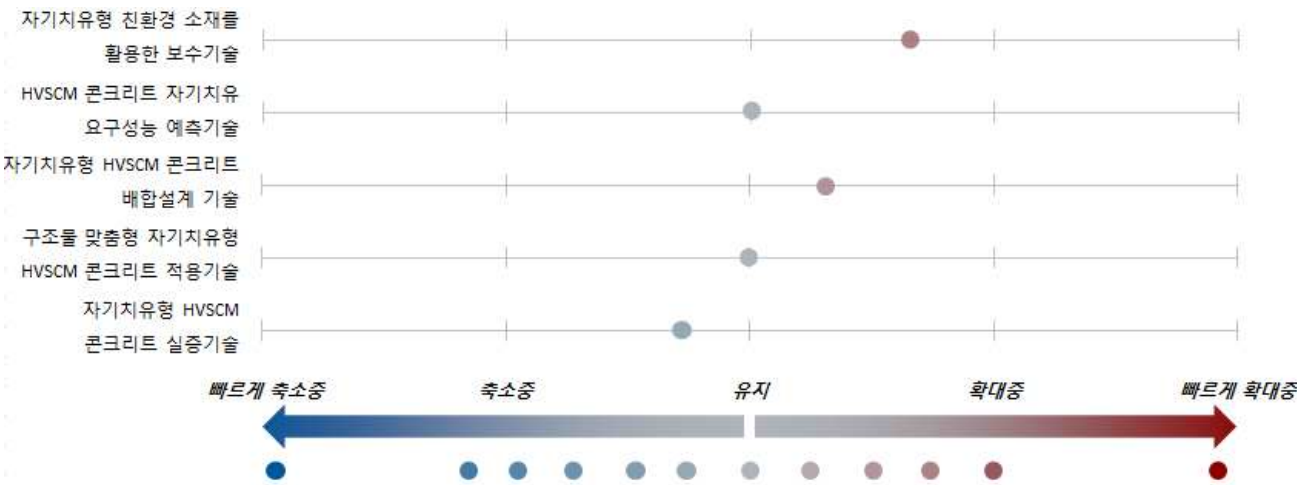
■ 자기치유형 친환경소재를 활용한 보수기술분야의 세부 기술분야별 기술격차는 전반적으로 확대 추세이며, 자기치유형 친환경 소재를 활용한 보수기술의 기술격차가 상대적으로 빠르게 확대 중이며, 자기치유형 HVSCM콘크리트 실증기술은 축소 추세에 있음.

③ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야

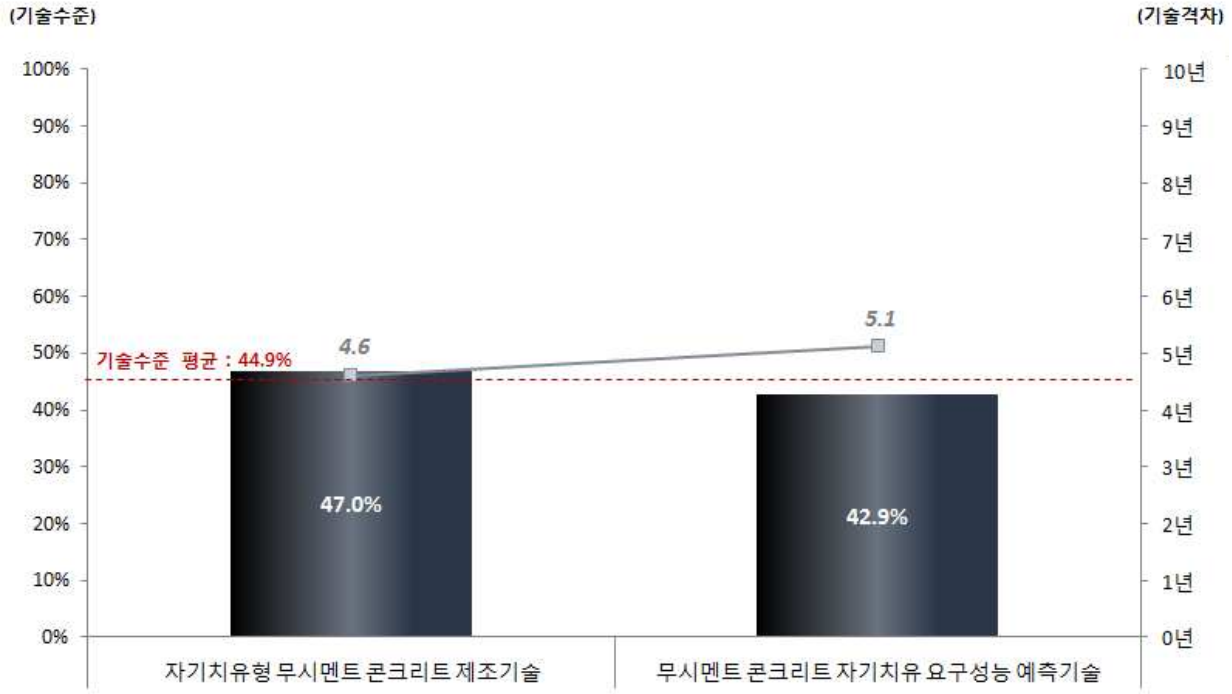
▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야의 기술수준은 44.9%임.

■ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술의 기술수준(47.0%)은 상대적으로 높으며, 무시멘크 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술의 기술수준(42.9%)은 상대적으로 낮음.

※ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야를 구성하는 중분류 기술의 기술격차는 평균 4.9년이며, 기술별 편차는 크지 않음.



[그림 3-29] 자기치유형 친환경소재를 활용한 보수기술분야의 기술격차 추세



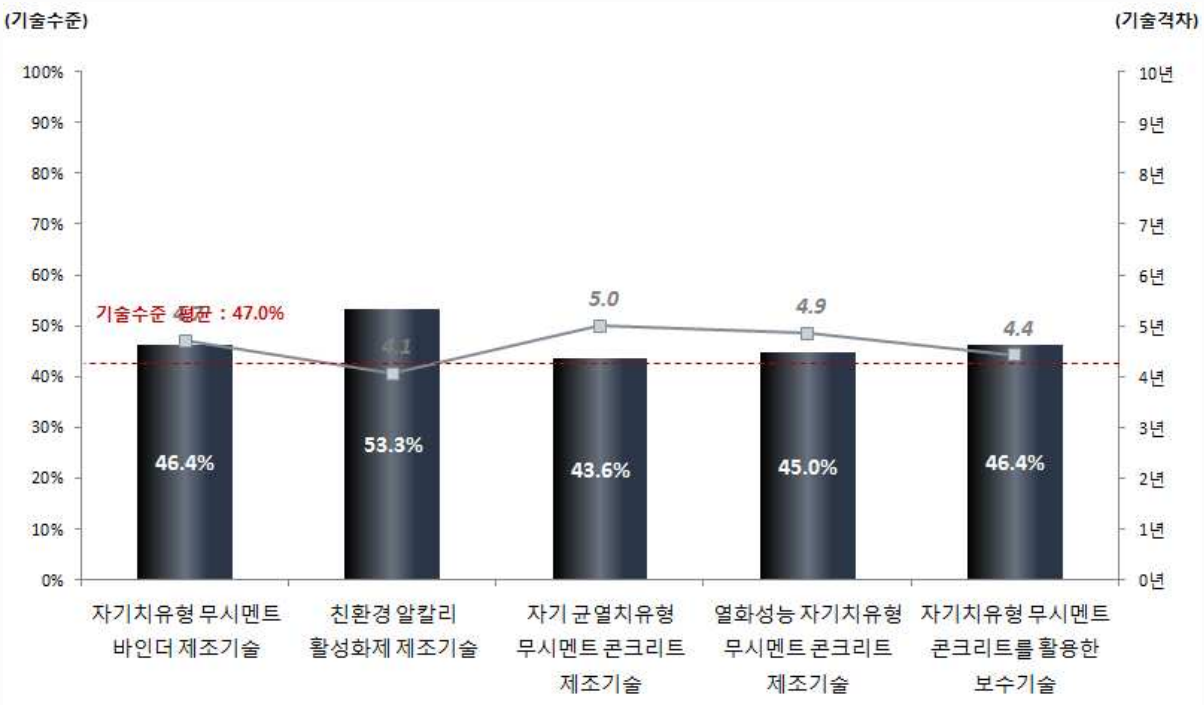
[그림 3-30] 자기치유형 무시멘트 콘크리트기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

■ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 개발분야 기술격차는 전반적으로 축소추세이며, 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술이 상대적으로 더 빠르게 기술격차가 축소되고 있음.

[그림 3-31] 자기치유형 무시멘트 콘크리트기술분야의 기술격차 추세

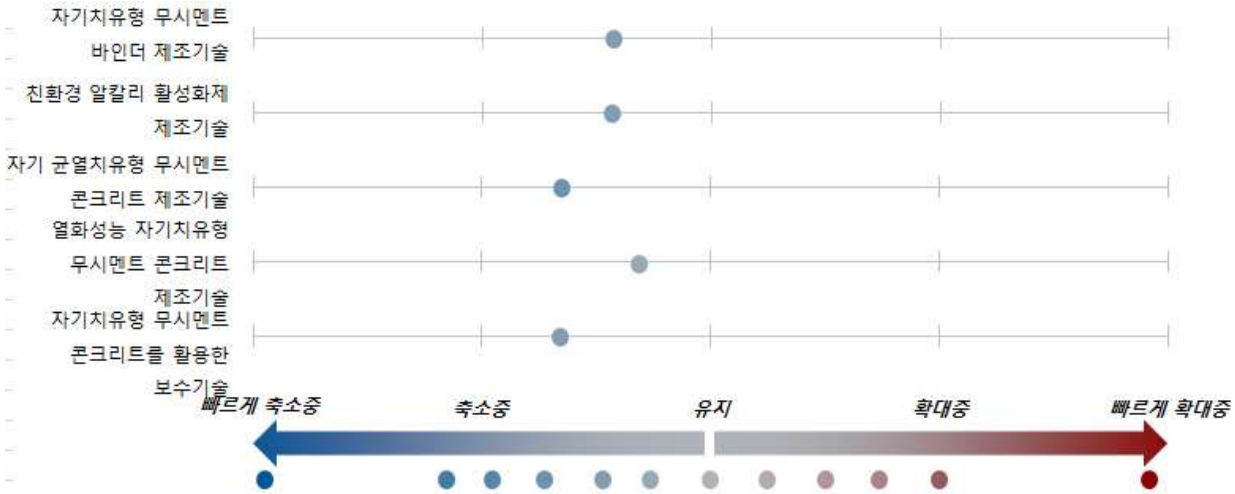
▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술분야의 세부 기술분야별 기술수준 및 기술격차 분석 결과, 친환경 알칼리 활성화제 제조기술(53.3%)의 기술수준이 상대적으로 높으며, 자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술(43.6%)의 기술수준은 상대적으로 낮은 것으로 나타남.

■ 친환경 알칼리 활성화제 제조기술(4.19년)의 기술격차는 상대적으로 적으며, 자기 균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술(5.0년)의 기술격차는 상대적으로 큼.



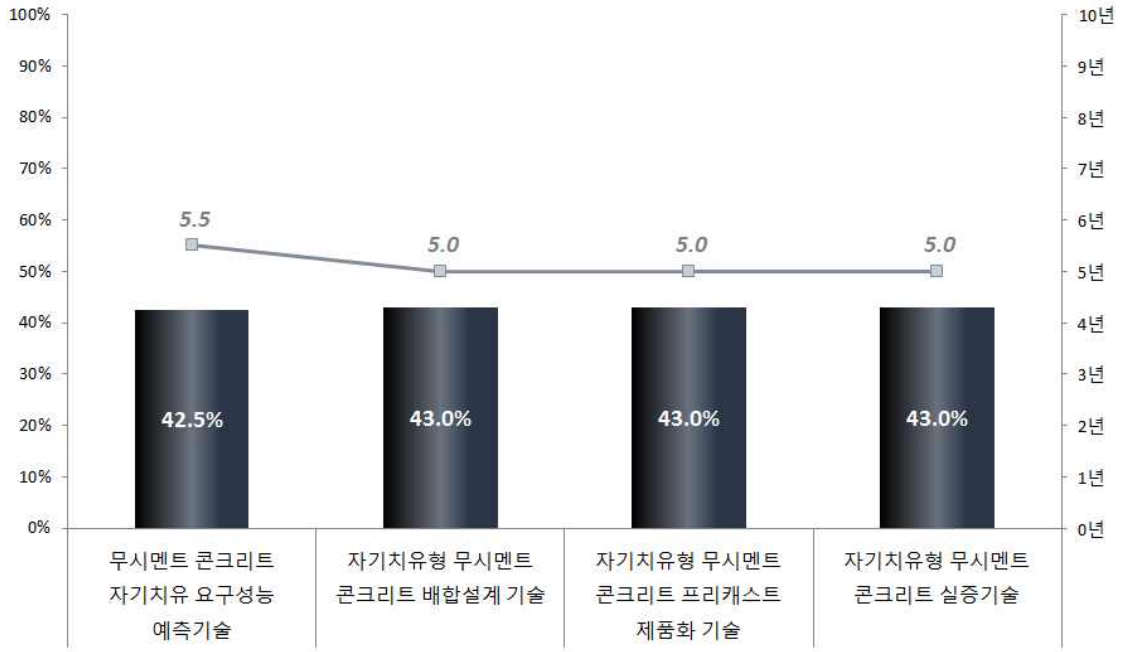
[그림 3-32] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

■ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술분야의 세부 기술분야별 기술격차는 전반적으로 축소 추세에 있음.



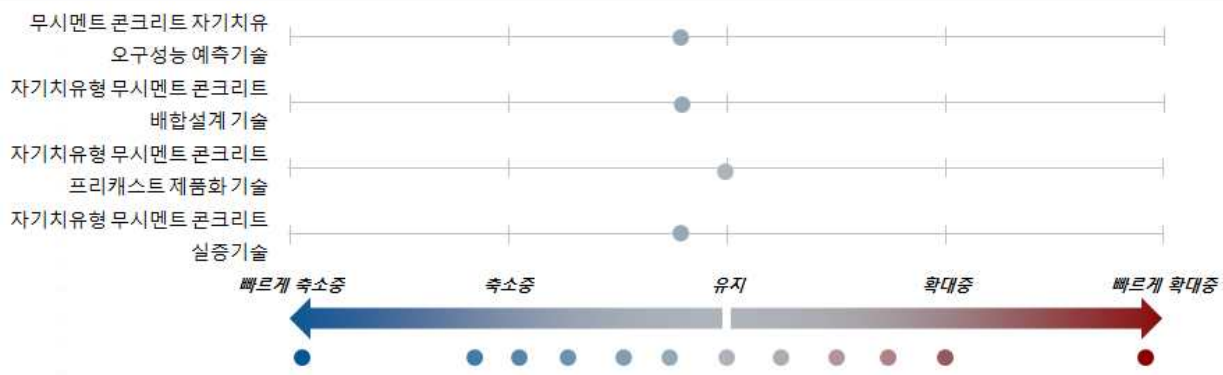
[그림 3-33] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술분야의 기술격차 추세

▢ 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야의 세부기술분야별 기술수준 및 기술격차 분석결과, 전분야 기술수준과 기술격차이 43%, 5년 수준인 것으로 나타남.



[그림 3-34] 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야의 국내 기술수준 및 기술격차

■ 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야의 세부기술별 기술격차는 전반적으로 축소 추세에 있음.



[그림 3-35] 무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야의 기술격차 추세

3.2.4 기술성숙도 조사결과

(1) 자기치유형 요소기술분야

① 콘크리트 자기치유기술분야

▢ 콘크리트 자기치유기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 확정된 시스템 내 시제품 제작이 이루어지는 단계(5)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.

[그림 3-36] 콘크리트 자기치유기술분야 기술성숙도

② 자기치유형 콘크리트 적용기술

▢ 자기치유형 콘크리트 적용기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 대부분 확정된 시스템 내 시제품 제작이 이루어지는 단계(5)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.

■ 자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술분야의 해외 기술성숙도(TRL) 단계는 실험실규모의 핵심성능평가 단계(4)로서 타분야 대비 성숙도가 낮음.

[그림 3-37] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야 기술성숙도

(2) 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

① 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야

▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 대부분 실험실 내에서 핵심성능평가가 이루어지는 단계(4)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.

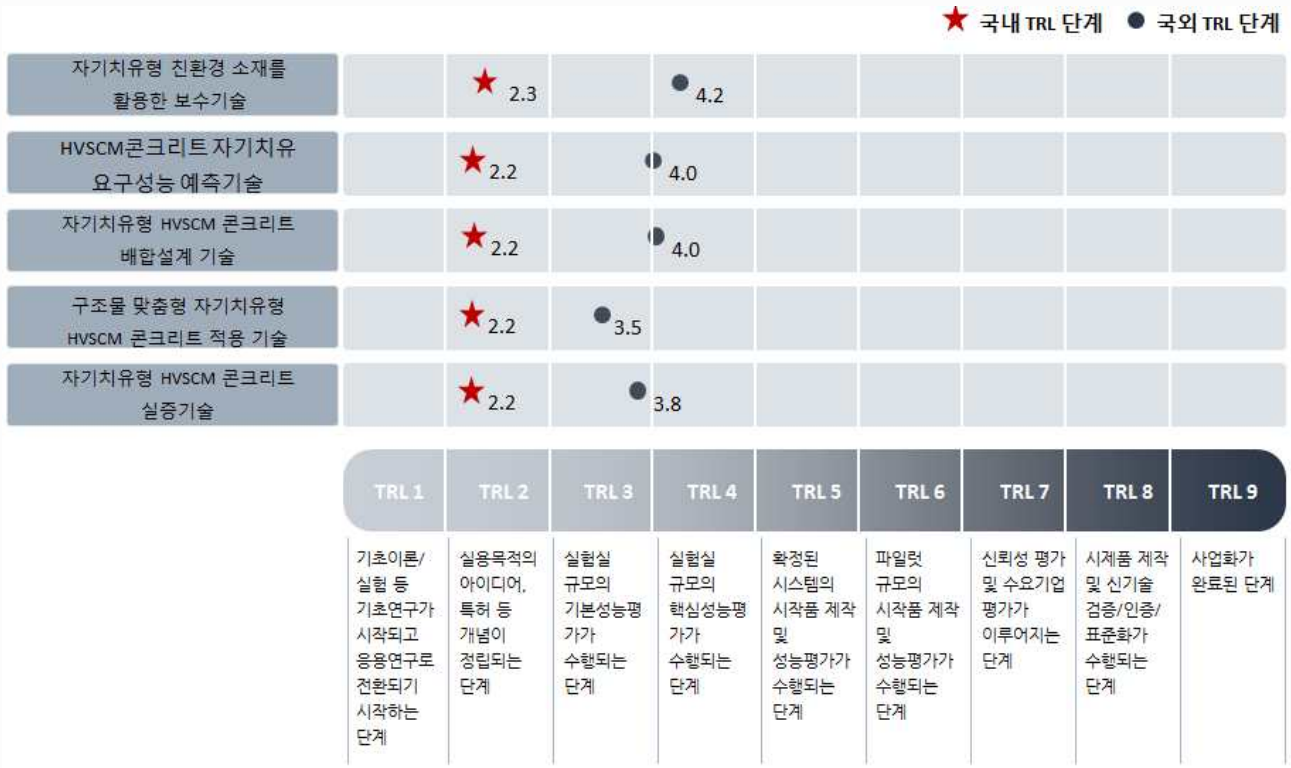
■ 열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 해외 기술성숙도(TRL) 단계는 실험실규모의 기본성능평가 단계(3)로서 타분야 대비 성숙도가 낮음.

[그림 3-38] 자기치유형 콘크리트 적용기술 기술성숙도

② 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야

▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 대부분 실험실 내에서 기본/핵심성능평가가 이루어지는 단계(3, 4)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.

■ '구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야', '자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야'의 해외 기술성숙도(TRL) 단계는 실험실규모의 기본성능평가 단계(3)로서 타분야 대비 성숙도가 낮음.



[그림 3-39] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야 기술성숙도

(3) 자기치유형 무시멘트 개발분야

① 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술

▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 대부분 실험실 내에서 핵심성능평가가 이루어지는 단계(4)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.

■ '친환경 알카리 활성화제 제조기술분야'해외/국내 기술성숙도(TRL) 단계는 각각 확정된 시스템 내에서 시작품이 제작되는 단계(5), 실험실 내에서 기본성능평가가 이루어지는 단계(3)로서 타분야 대비 성숙도가 높음.

[그림 3-40] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술 기술성숙도

② 자기치유형 무시멘트 적용기술분야

▢ 자기치유형 무시멘트 적용기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 실험실 내에서 기본/핵심성능평가가 이루어지는 단계(3, 4)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.

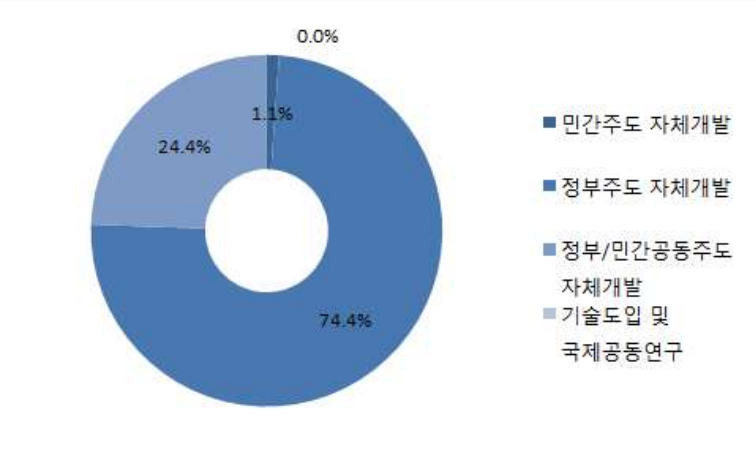
■ '무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야', '자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합설계 기술분야'해외 기술성숙도(TRL) 단계는 실험실 규모의 기본성능평가 단계(3)로서 타 분야 대비 성숙도가 낮음.

[그림 3-41] 자기치유형 무시멘트 적용기술분야 기술성숙도

3.2.5 기술의 획득방법 조사

▢ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 74.4%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발이 24.4%, 민간주도 자체개발이 1.1%인 것으로 나타났으며 기술도입 및 국제동동연구에 대한 선호도는 없었음.

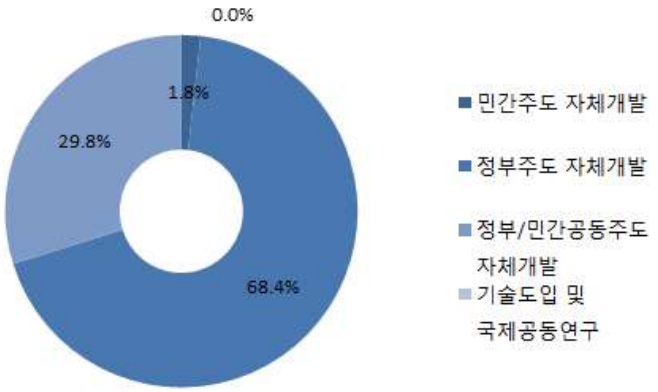


[그림 3-42] 첨단기술활용 자기치유형 친환경콘크리트 기술의 기술획득방법 선호도

(1) 자기치유형 요소기술분야

▢ 자기치유형 요소기술분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 68.4%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발이 29.8%, 민간주도 자체개발이 1.8%임.

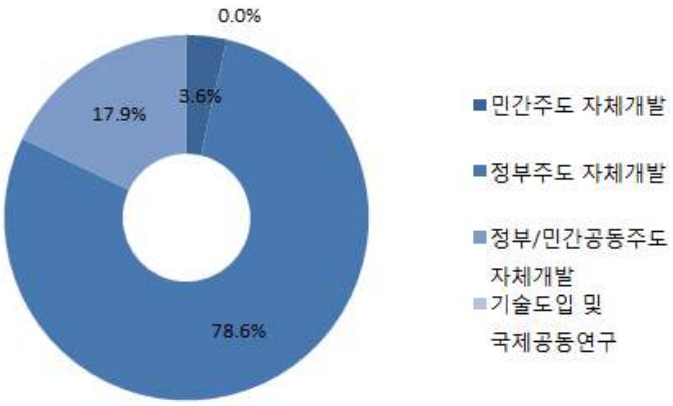


[그림 3-43] 자기치유형 요소기술분야의 기술획득방법 선호도

① 콘크리트 자기치유기술분야

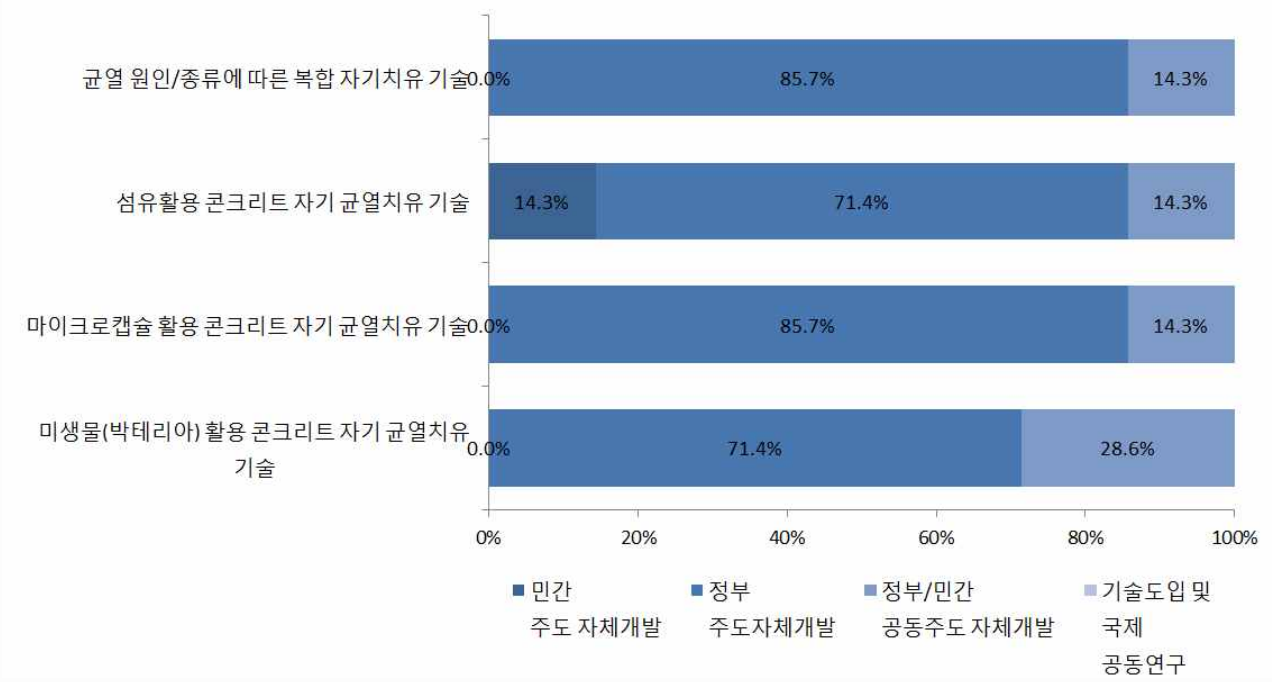
▢ 자기치유형 요소기술분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 78.8%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발이 17.9%, 민간주도 자체개발이 3.6%임.



[그림 3-44] 콘크리트 자기치유기술분야의 기술획득방법 선호도

▢ 기술획득방법을 세부기술분야로 구분할 경우, 섬유활용 콘크리트 자기균열치유기술의 민간 기술개발 선호도가 타분야 대비 높고, 미생물활용 콘크리트 자기균열치유기술의 정부/민간 공동주도 자체개발 선호도가 타분야 대비 높음.

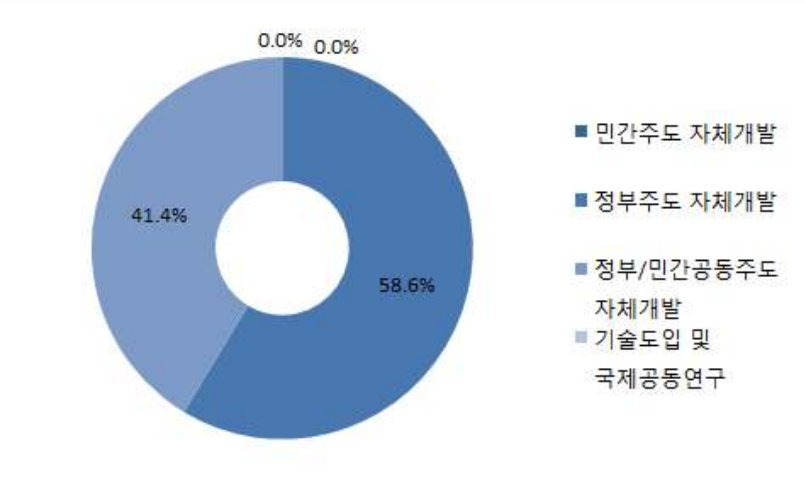


[그림 3-45] 콘크리트 자기치유기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도

② 자기치유형 콘크리트 적용기술

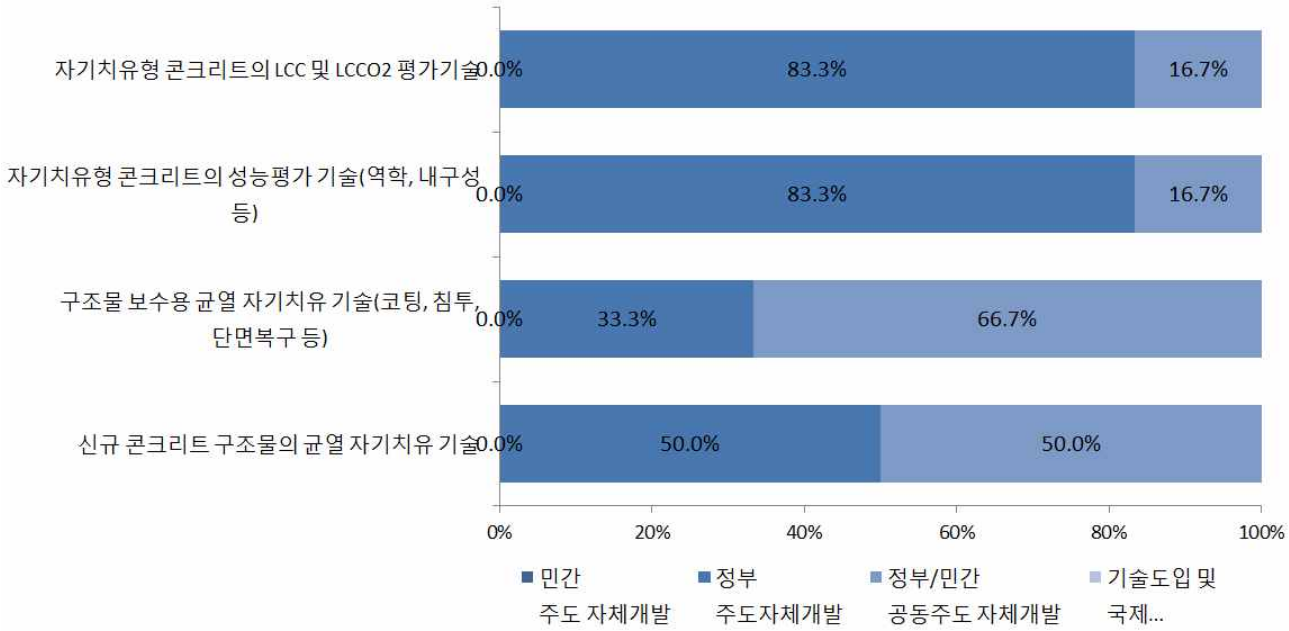
▢ 자기치유형 콘크리트 적용기술분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 58.6%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발에 대한 선호도는 41.4%임.



[그림 3-46] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야의 기술획득방법 선호도

▢ 기술획득방법을 세부기술분야로 구분할 경우, 구조물 보수용 균열 자기치유기술과 신규콘크리트 구조물의 균열자기치유기술의 정부/민간 공동주도 자체개발 선호도가 높음.

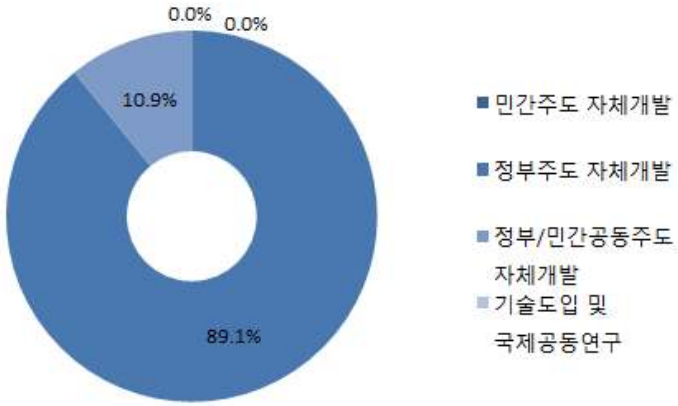


[그림 3-47] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도

(2) 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 89.1%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발 선호도가 10.9%임.

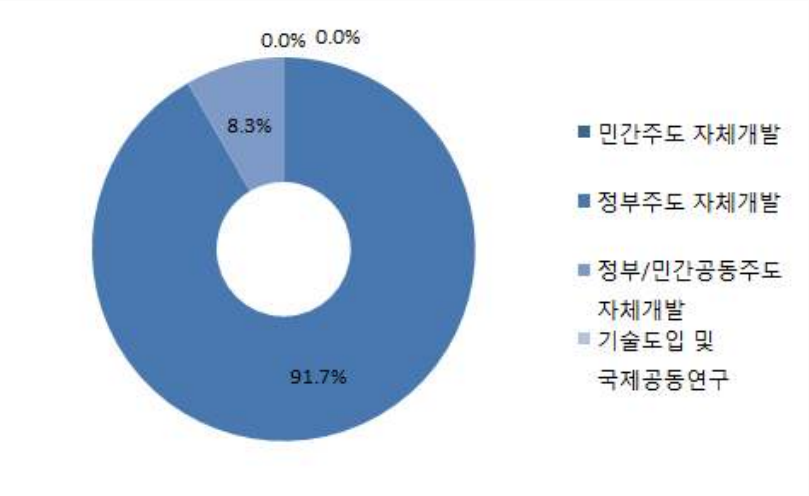


[그림 3-48] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야의
기술획득방법 선호도

① 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야

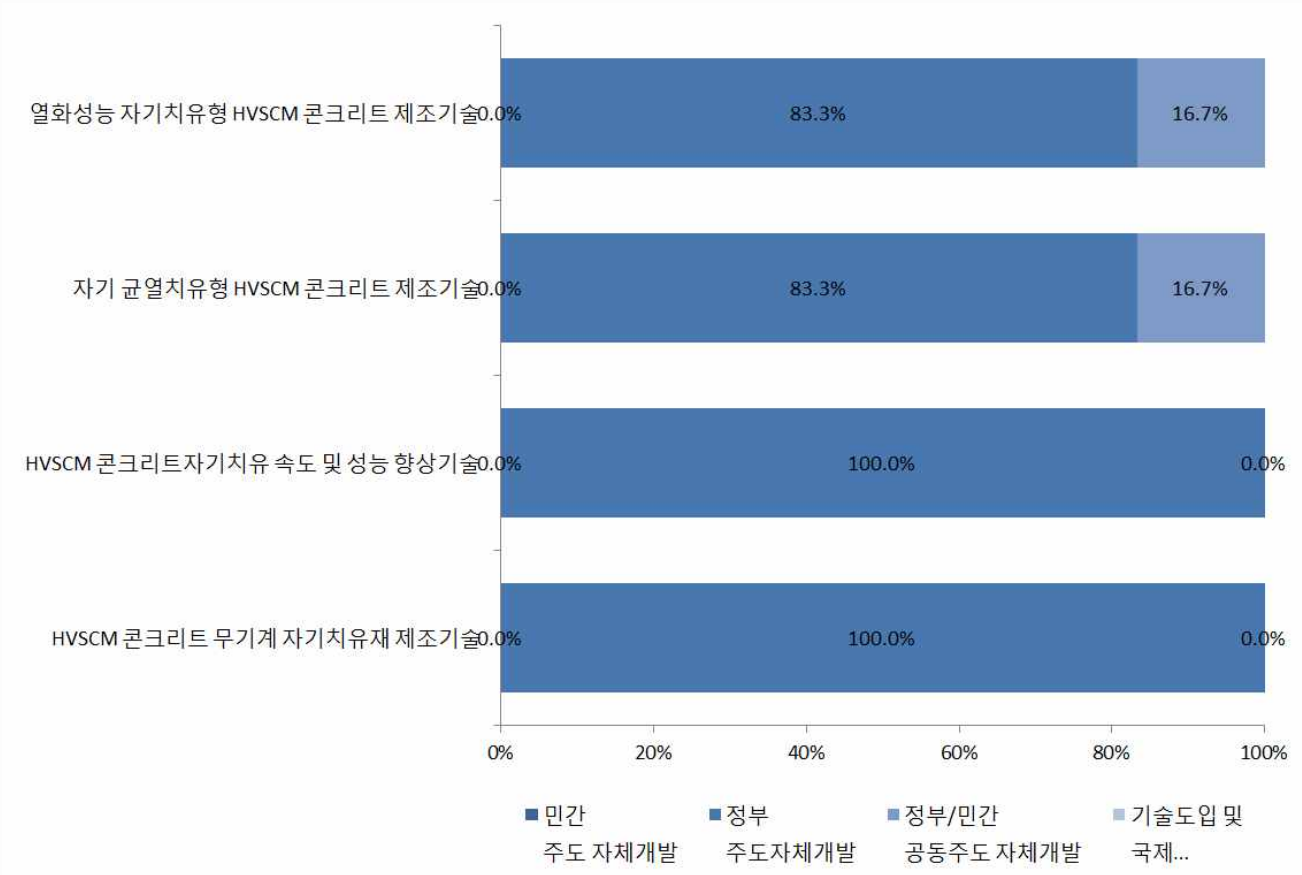
▢ 자기치유형 요소기술분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 78.8%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발이 17.9%, 민간주도 자체개발이 3.6%임.



[그림 3-49] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 기술획득방법 선호도

▢ 기술획득방법을 세부기술분야로 구분할 경우, 열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술과 자기균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술의 정부/민간 공동주도 자체개발 선호도가 16.7%임.

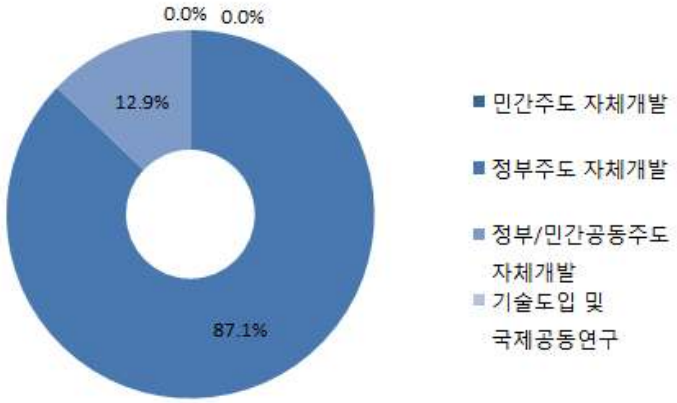


[그림 3-50] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도

② 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야

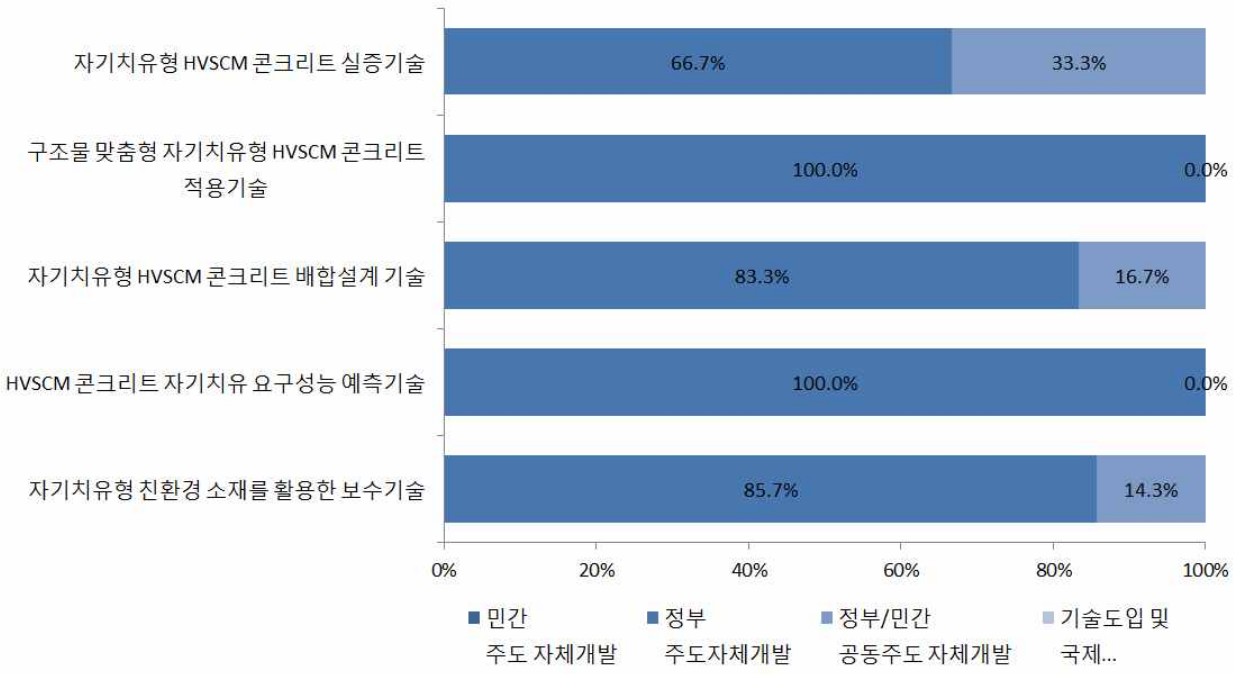
▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 87.1%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발 선호도가 12.9%임.



[그림 3-51] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야의 기술획득방법 선호도

▢ 기술획득방법을 세부기술분야로 구분할 경우, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술의 정부/민간 공동주도 자체개발 선호도가 높음.

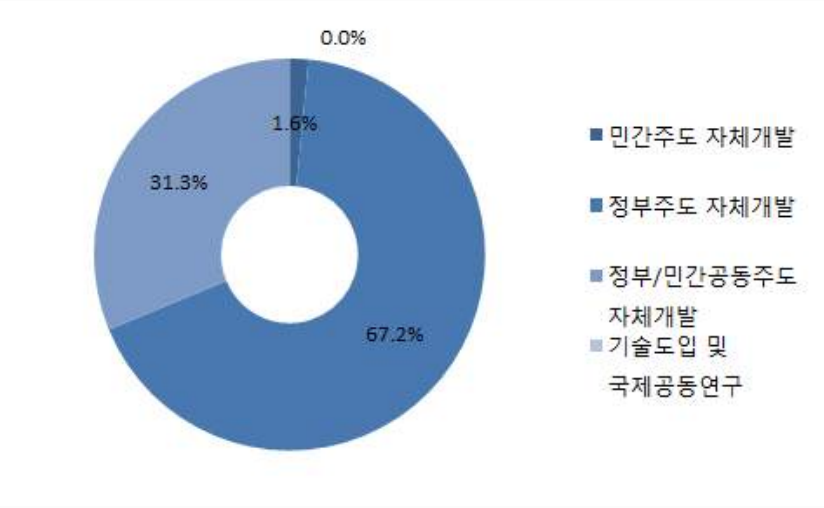


[그림 3-52] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도

(3) 자기치유형 무시멘트 개발분야

▢ 자기치유형 무시멘트 개발분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 67.2%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발이 31.3%, 민간주도 자체개발이 1.6%임.

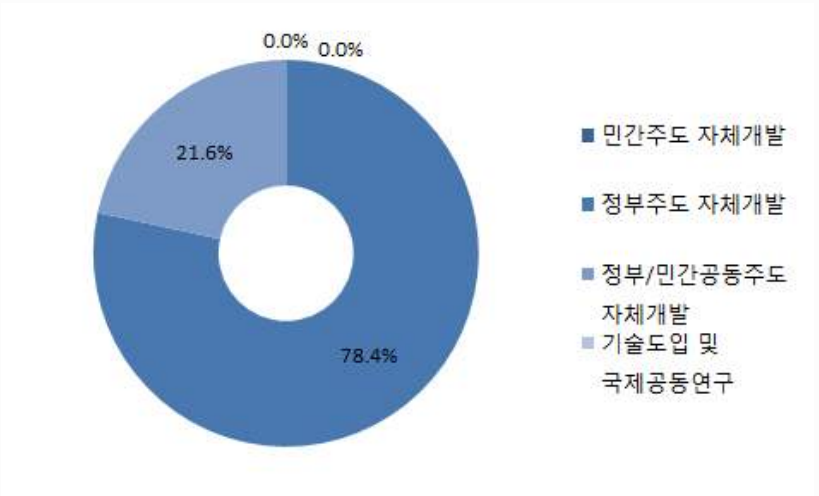


[그림 3-53] 자기치유형 무시멘트 개발분야의 기술획득방법 선호도

① 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술

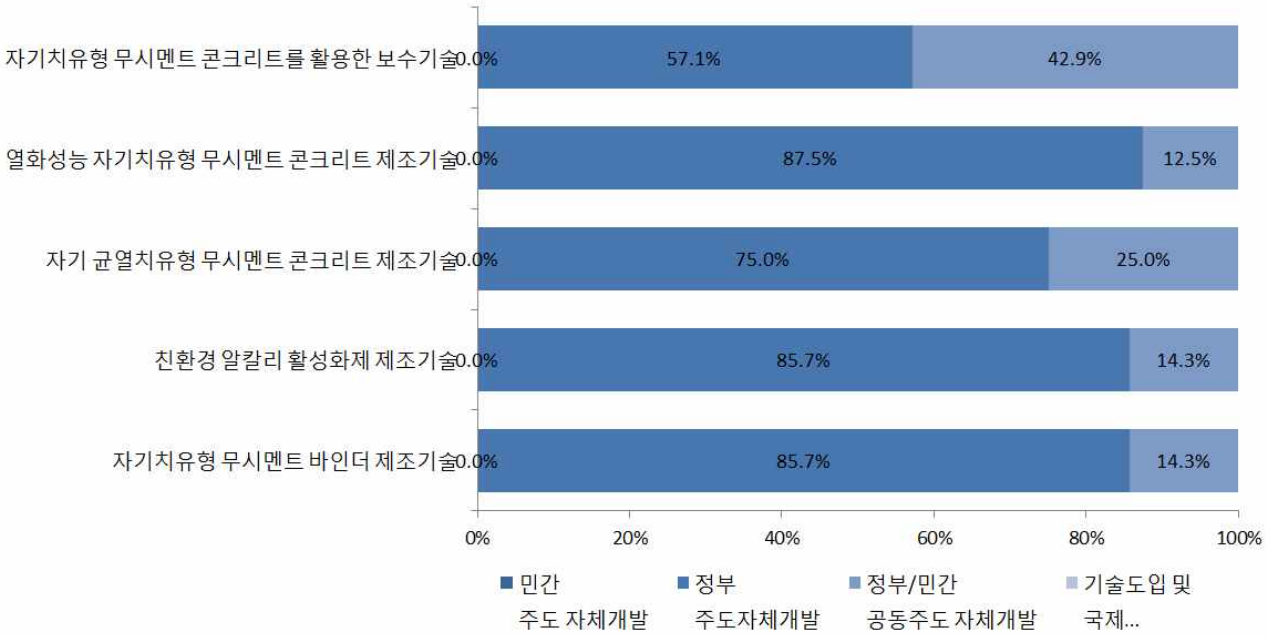
▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 78.4%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발 선호도가 21.6%임.



[그림 3-54] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술의 기술획득방법 선호도

▢ 기술획득방법을 세부기술분야로 구분할 경우, 자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술의 정부/민간 공동주도 자체개발 선호도가 높음.

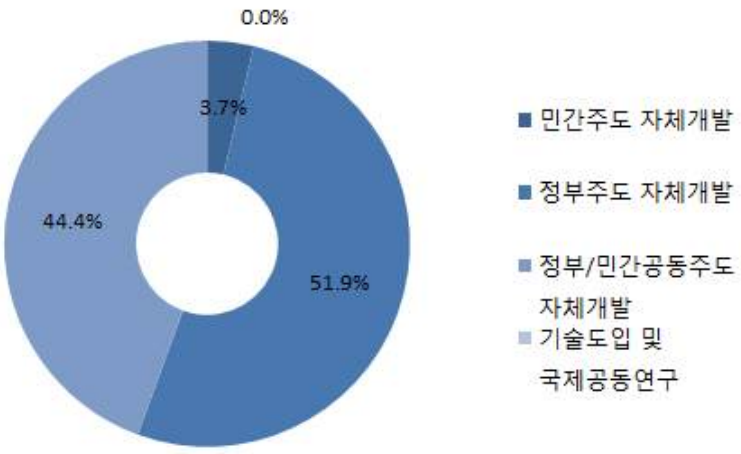


[그림 3-55] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도

② 자기치유형 무시멘트 적용기술분야

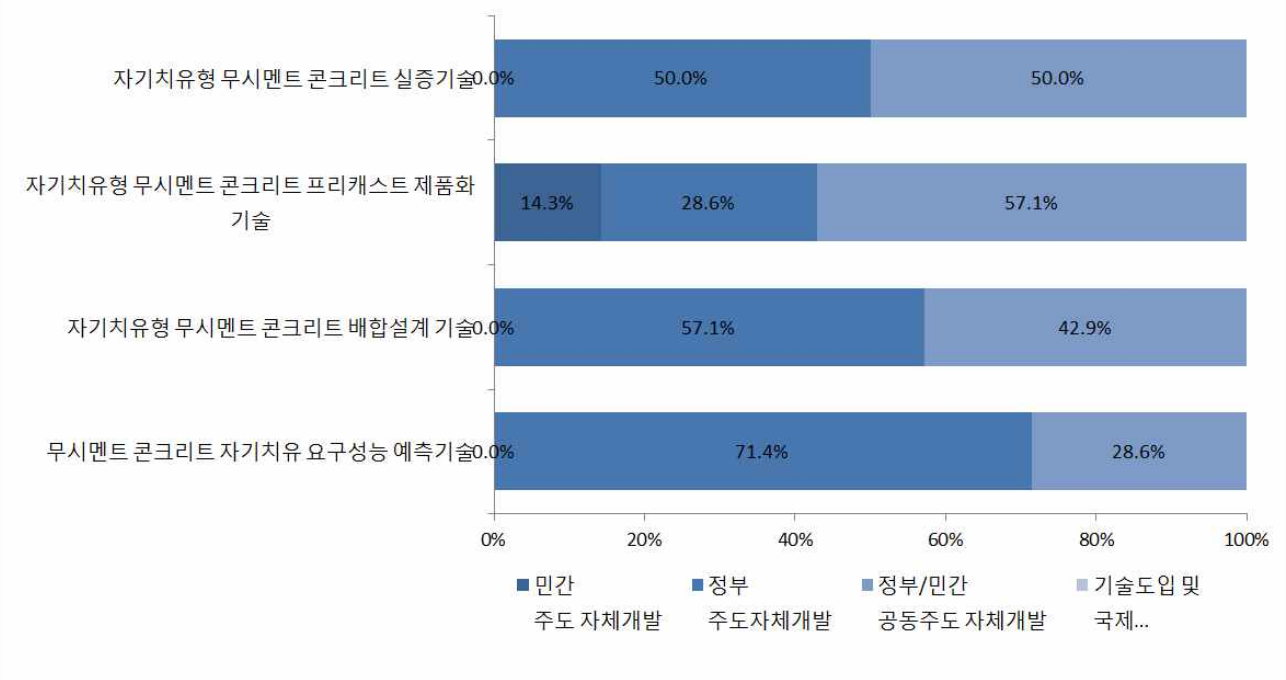
▢ 자기치유형 무시멘트 적용분야의 기술획득방법은 정부주도 자체개발추진이 적합하다는 의견이 51.9%로 가장 높음.

■ 정부/민간공동주도 자체개발이 44.4%, 민간주도 자체개발이 3.7%임.



[그림 3-56] 자기치유형 무시멘트 적용기술분야의 기술획득방법 선호도

▢ 기술획득방법을 세부기술분야로 구분할 경우, 자기치유형 무시멘트 콘크리트 프리캐스트 제품화 기술, 자기치유형 무시멘트 콘크리트 실증기술, 자기치유형 무시멘트 콘크리트 배합설계기술의 정부/민간 공동주도 자체개발 선호도가 높음.

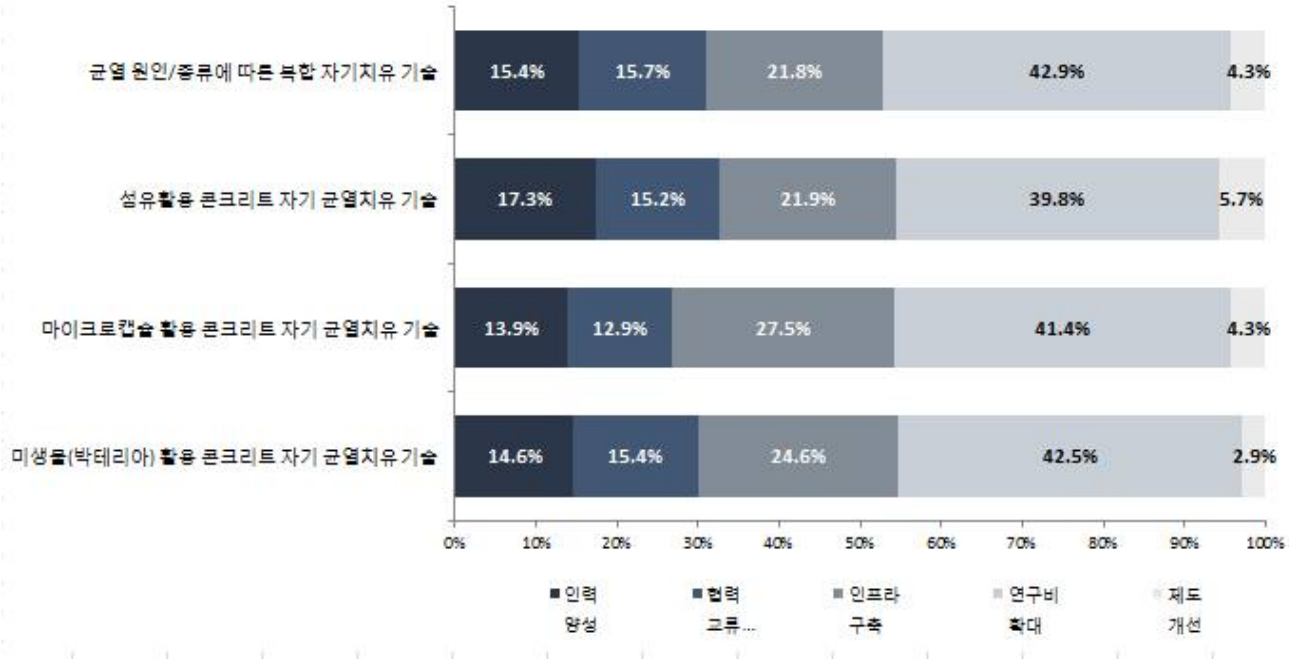


[그림 3-57] 자기치유형 무시멘트 적용기술분야 세부기술별 기술획득방법 선호도

3.2.6 정부우선 시행방안 조사결과

▢ 콘크리트 자기치유기술분야의 세부기술별 정부우선시행방안 수요조사 결과, 연구비확대가 가장 높은 비중을 차지했으며, 인프라 구축이 다음으로 높은 비중을 차지함.

■ 연구비확대 비중이 40% 수준으로 가장 높으며, '마이크로 캡슐 활용 콘크리트 자기균열치유 기술분야', 미생물(박테리아)활용 콘크리트 자기균열치유기술'분야의 경우, 인프라 구축 수요가 25% 수준으로 타분야 대비 높은 것으로 나타남.



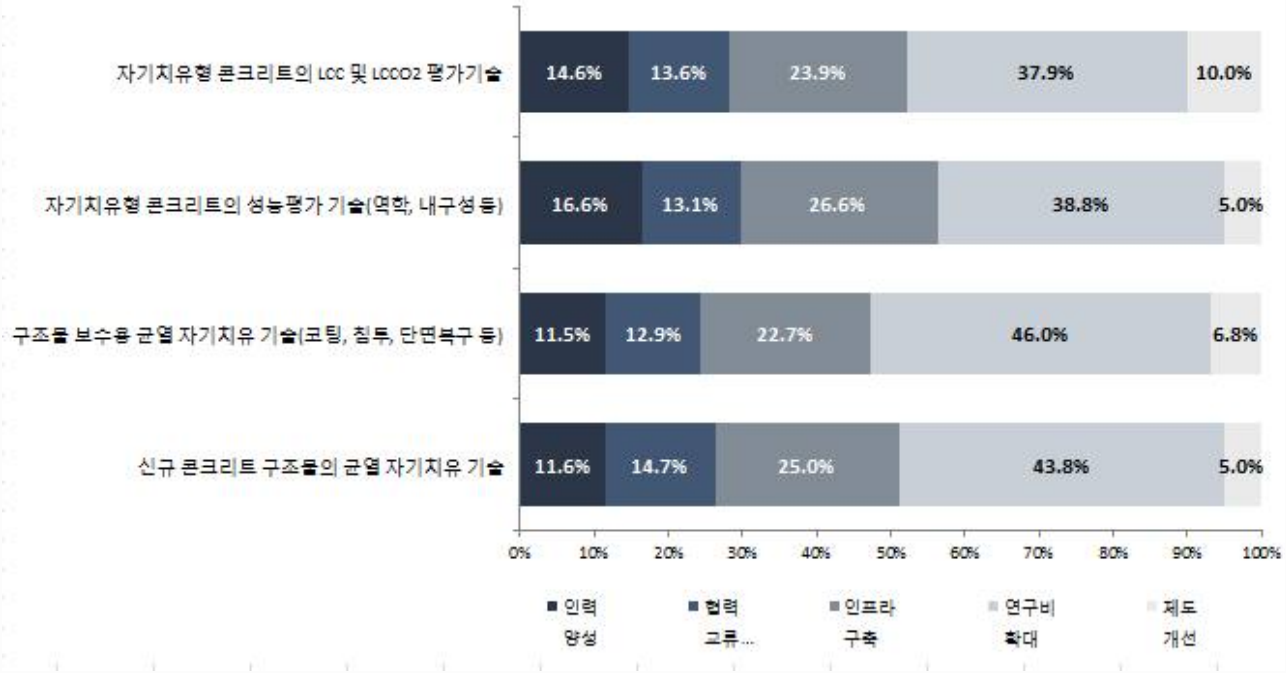
[그림 3-58] 콘크리트 자기치유 기술분야 정부우선시행방안 선호도

② 자기치유형 콘크리트 적용기술분야

▢ 자기치유형 콘크리트 적용기술분야의 세부기술별 정부우선시행방안 수요조사 결과, 연구비확대가 가장 높은 비중을 차지했으며, 인프라 구축이 다음으로 높은 비중을 차지함.

■ '구조물 모수용 균열 자기치유 기술(코팅, 침투, 단면 복구 등)분야', '신규콘크리트 구조물의 균열자기치유기술분야'의 연구비확대 비중은 45% 수준으로 타분야 대비 높음.

■ '구조물 모수용 균열 자기치유 기술(코팅, 침투, 단면 복구 등)분야'의 경우 제도개선 수요 비중이 타분야 대비 높음.



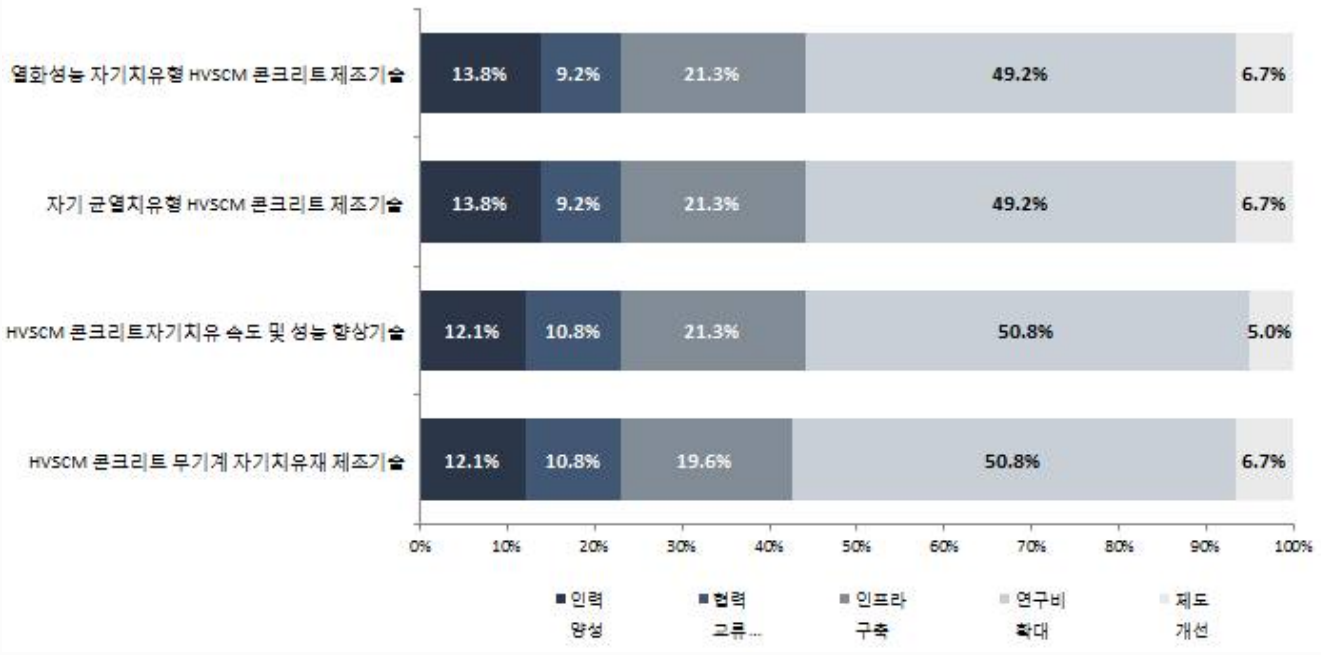
[그림 3-59] 자기치유형 콘크리트 적용기술분야 정부우선시행방안 선호도

(2) 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야

① 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야

▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 세부기술별 정부우선시행방안 수요조사 결과, 연구비확대가 가장 높은 비중을 차지했으며, 인프라 구축이 다음으로 높은 비중을 차지함.

■ 연구비확대 비중이 50% 수준으로 매우 높음.

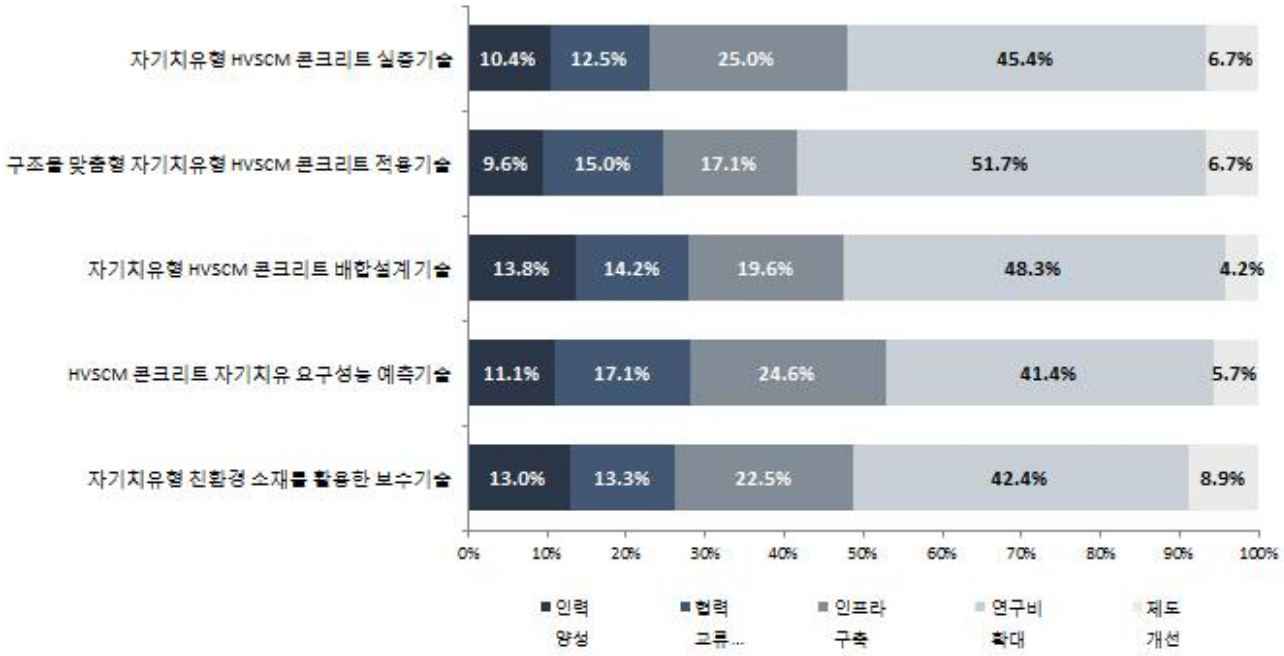


[그림 3-60] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야 정부우선시행방안 선호도

② 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야

▢ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술분야의 세부기술별 정부우선시행방안 수요조사 결과, 연구비확대가 가장 높은 비중을 차지했으며, 인프라 구축이 다음으로 높은 비중을 차지함.

- 연구비확대가 비중이 가장 높은 분야는 '구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야'임.
- 협력/교류활성화 비중의 경우 15% 수준으로 높은 비중임.



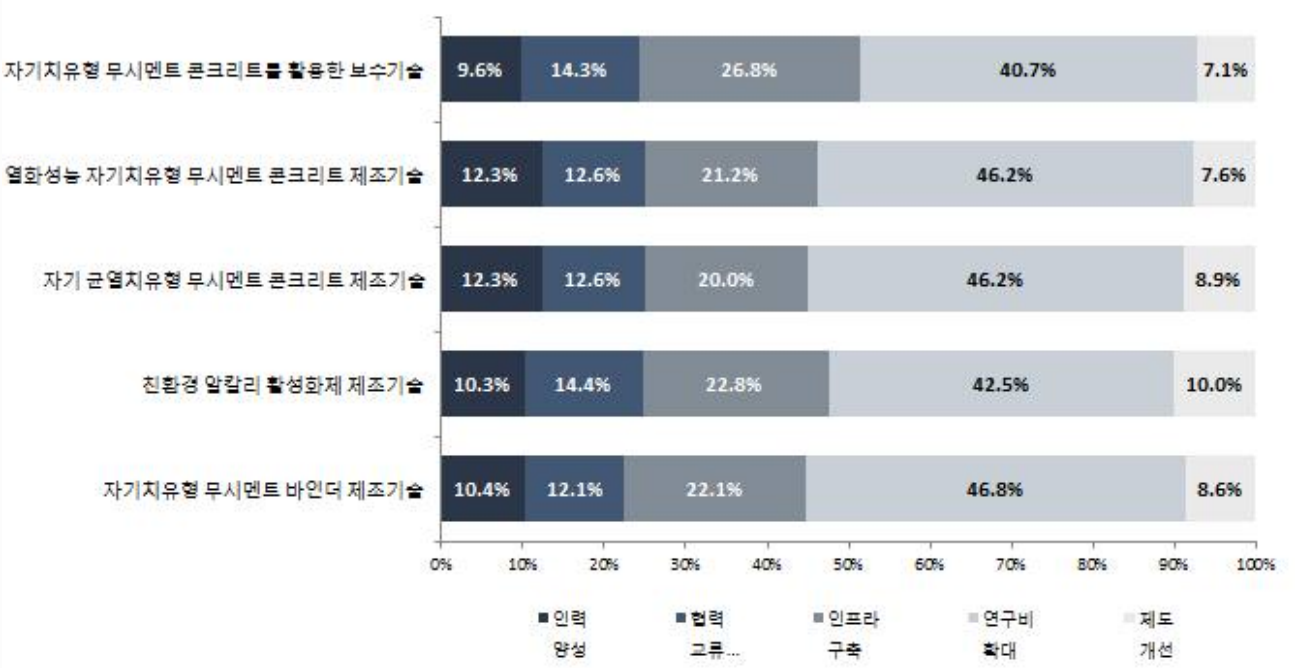
[그림 3-61] 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술분야 정부우선시행방안 선호도

(3) 자기치유형 무시멘트 개발분야

① 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야

▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야의 세부기술별 정부우선시행방안 수요조사 결과, 연구비확대가 가장 높은 비중을 차지했으며, 인프라 구축이 다음으로 높은 비중을 차지함.

■ '자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술분야'의 인프라 구축수요는 27% 수준으로 타분야 대비 높음.



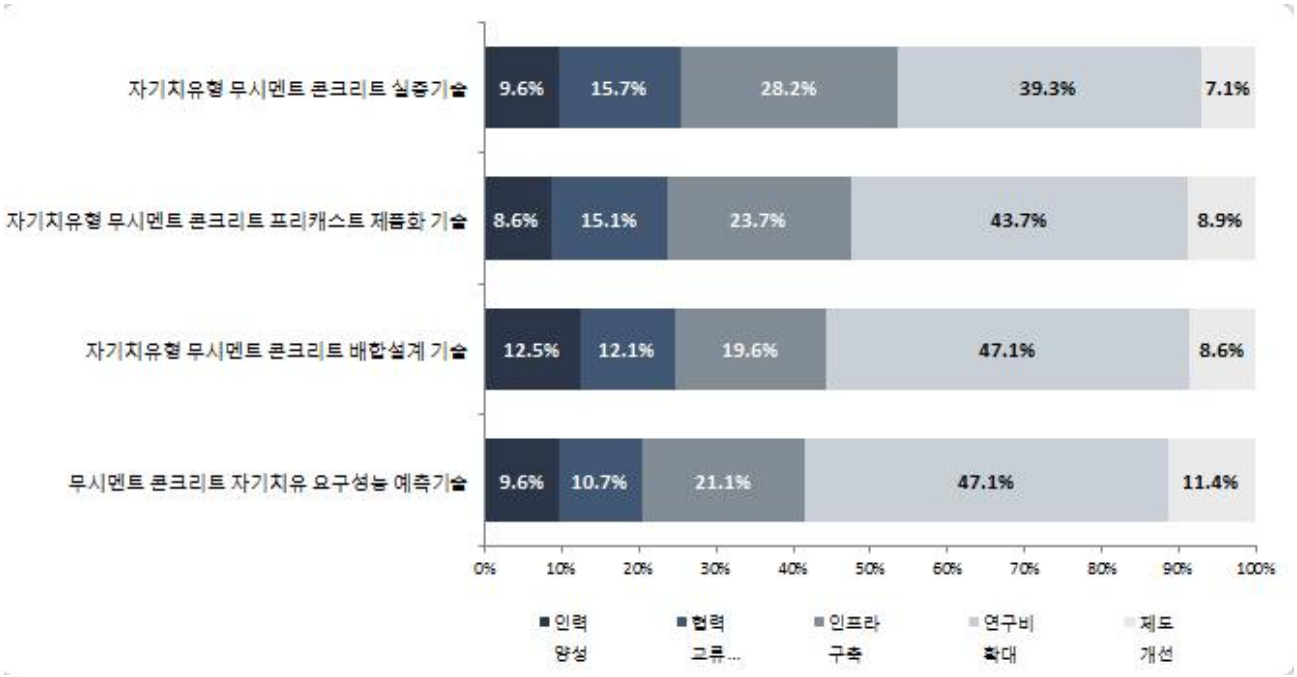
[그림 3-62] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술분야 정부우선시행방안 선호도

② 자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술

▢ 자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술분야의 세부기술별 정부우선시행방안 수요조사 결과, 연구비확대가 가장 높은 비중을 차지했으며, 인프라 구축이 다음으로 높은 비중을 차지함.

■ '자기치유형 무시멘트 실증기술분야'의 인프라 구축수요는 29% 수준으로 타분야 대비 높음.

■ '무시멘트 콘크리트 자기치유 요구성능 예측기술분야'의 제도개선 수요는 11% 수준으로 타분야 대비 높음.

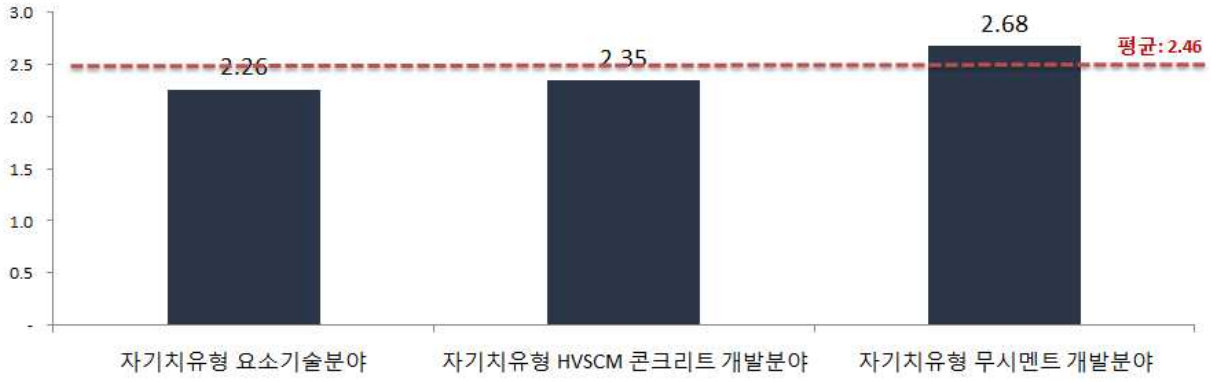


[그림 3-63] 자기치유형 무시멘트 콘크리트 적용기술 정부우선시행방안 선호도

3.2.7 기술기반 성숙도

▢ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술기반 성숙도는 2.46으로 국내 관련 연구인력이 적고 장비수준이 낮은 것으로 조사됨.

■ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 중 자기치유형 무시멘트 개발분야의 기술기반 성숙도는 전체 평균 대비 높음.

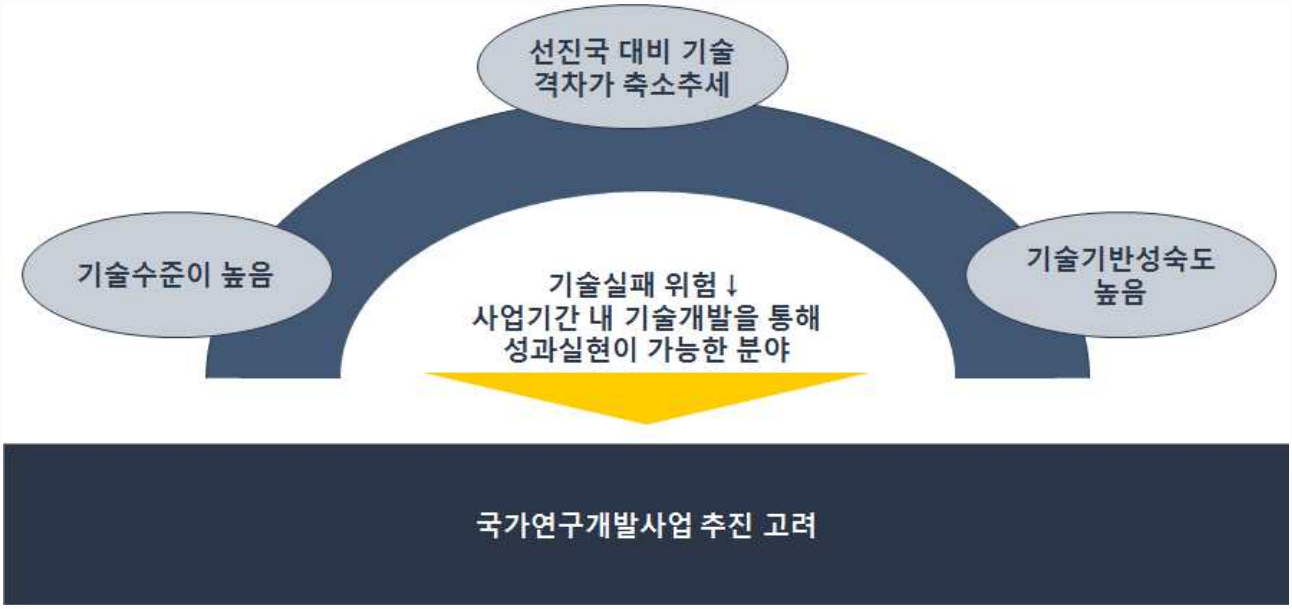


[그림 3-64] 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술기반 성숙도

3.2.8 종합분석

▢ 기술수준/예측조사 분석 결과를 기반으로 기술개발실패 위험이 낮고 사업기간내 성과실현이 가능한 기술분야에 대한 과제기획을 우선적으로 수행할 필요성이 있음.

- 타분야 대비 기술수준/기술기반 성숙도가 높고 선진국 대비 기술격차가 축소추세인 분야.



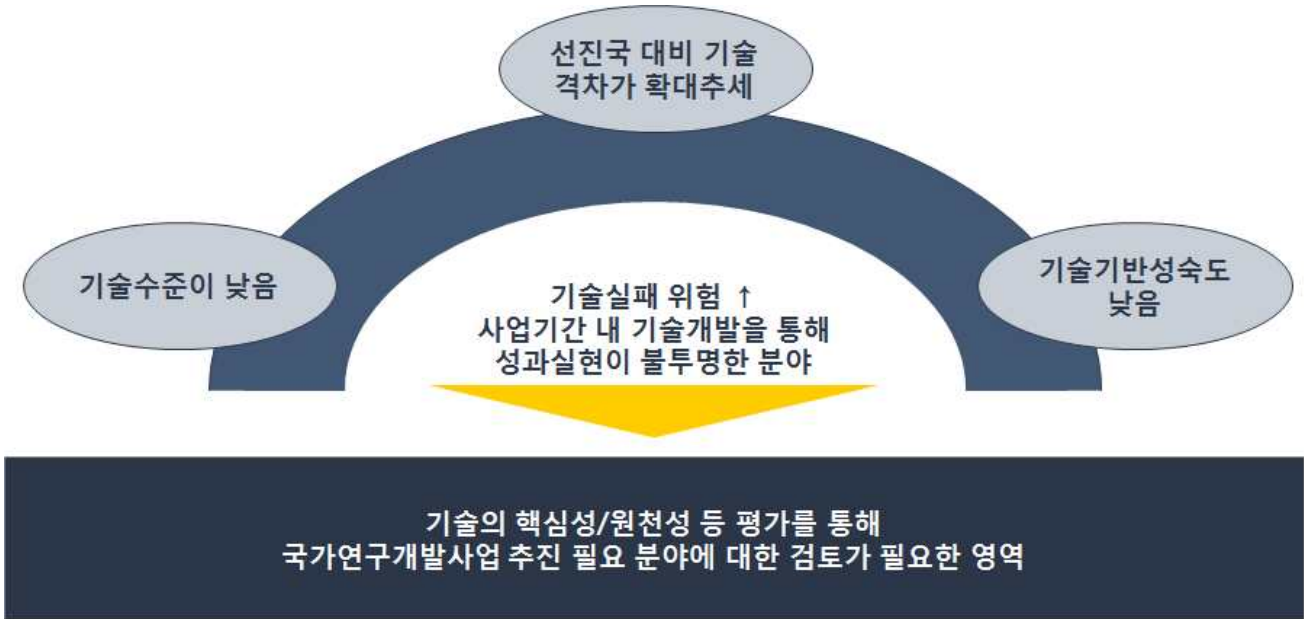
[그림 3-65] 국가연구개발사업 추진을 고려해야하는 기술개발분야 특성

▢ 해당 영역에 속하는 소분류 기술은 다음과 같음.

- 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 중 자기치유형 HVSCM 콘크리트 실증기술
- 자기치유형 무시멘트 개발분야 중 자기치유형 무시멘트 바인더 제조기술, 친환경 알카리 활성화제 제조기술, 열화성능 자기치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술, 자기균열치유형 무시멘트 콘크리트 제조기술, 자기치유형 무시멘트 콘크리트를 활용한 보수기술

▢ 기술개발실패 위험이 높고 사업기간내 성과실현이 불투명하지만 기술의 핵심성/원천성 등 우선순위 평가를 통해 국가연구개발사업 추진이 필요한 기술분야를 검토해야 함.

■ 타분야 대비 기술수준/기술기반 성숙도가 낮고 선진국 대비 기술격차가 확대추세인 분야



[그림 3-66] 기술의 핵심성/원천성 등 평가를 통해 국가연구개발사업 추진 검토가 필요한 기술개발분야 특성

▢ 해당 영역에 속하는 소분류 기술은 다음과 같음.

■ 자기치유형 요소기술분야 중 마이크로 캡슐 활용 콘크리트 자기균열치유 기술, 자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술

■ 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발분야 중, HVSCM 콘크리트 자기치유 속도 및 성능향상기술, 자기 균열치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술, 열화성능 자기치유형 HVSCM 콘크리트 제조기술, 자기치유형 치노한경 소재를 활용한 보수기술, 자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합설계 기술, 구조물 맞춤형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 적용기술

04

첨단기술활용 자기치유형
친환경 콘크리트 개발 기획

연구개발과제 구성 및 추진전략

4.1 SWOT 분석

4.1.1 내부역량 및 외부환경

▢ 국내외 시장, 산업, 정책, 기술동향을 분석한 결과, 내부적인 강점과 약점, 그리고 외부환경의 기회 및 위협 요인들을 도출하였으며 이를 정리하면 표 4-1과 같음.

[표 4-1] 내부역량과 외부환경에 대한 시사점

구분	내부/외부	강점/약점 기회/위협	내용
시장 환경	내부	강점(S)	▫ 구조물 장수명화를 위한 새로운 건설재료 요구 증대 ▫ Green 건설/재료 시장 활성화
		약점(W)	▫ 국내 건설경기 침체로 인한 투자 위축 ▫ 선진국 제품의 국내 첨단재료 시장 선점
	외부	기회(O)	▫ 유럽 등을 중심으로 유지관리 비용감소를 위한 프로젝트 시행 ▫ 타 분야 기술을 융합한 건설재료 시장의 급속한 성장세
		위협(T)	▫ 유럽, 미국, 일본 등 선진국의 막강한 건설재료 시장 지배력 ▫ 가격 경쟁력을 바탕으로 한 신흥 국가 등장
산업 동향	내부	강점(S)	▫ 건설 분야 연구개발을 위한 관련 산업 인프라 보유 ▫ 신기술 개발 및 품질향상을 위한 지속적 기술 투자 확대
		약점(W)	▫ 새로운 시장 발굴을 위한 시장정보 미흡 ▫ 건설사와 건설재료 생산업체간의 협력 시스템 미흡
	외부	기회(O)	▫ 건설분야 유지관리 산업시장의 증가세 ▫ 친환경 인증제도, 친환경 재료 수요증가에 따른 관련 산업 활성화
		위협(T)	▫ 장기적 경기 침체 우려 확산 ▫ 자본력과 기술력을 바탕으로 한 메이저 그룹의 지배력 강화
정책 방향	내부	강점(S)	▫ 해외 경쟁력 강화를 위한 스마트 건설재료에 대한 정책 강화 ▫ 저탄소 녹색성장을 위한 친환경 건설 정책 지속
		약점(W)	▫ 건설 분야 성능설계 개념 도입 부진 ▫ 신자재, 고기능성 자재 시장진입 촉진 미흡
	외부	기회(O)	▫ LCC 개념의 설계, 기반시설 안전의 중요성에 대한 인식 확대 ▫ 지속가능한 성장을 위한 Green 정책 확대 실시
		위협(T)	▫ 새로운 재료 및 기술에 대한 보수적인 정책 추진 ▫ 환경규제 강화에 따른 새로운 무역장벽 등장
기술 동향	내부	강점(S)	▫ 첨단 IT, ET, BT, NT 기술과 전통적 기술의 융복합 확산 ▫ 기존 친환경 건설재료에 대한 축적된 기술노하우
		약점(W)	▫ 첨단 건설재료 관련 핵심 원천기술의 높은 해외 의존도 ▫ 첨단기술에 대한 다학제간 기술 개발에 대한 기반 구축 미비
	외부	기회(O)	▫ 자기치유 콘크리트 재료에 대해 세계적으로 기초연구단계
		위협(T)	▫ 선진국 독자기술의 국제 표준화 추진 ▫ 후발주자의 친환경 기술 급속한 성장세

연구개발 인프라	내부	강점(S)	▫ 첨단융합기술 개발을 위한 세계적인 IT, NT 인프라 보유 ▫ 연구개발을 위한 충분한 인력/장비 인프라 확보
		약점(W)	▫ 관련 산 · 학 · 연간의 인프라 공유 미흡 ▫ 선진국 대비 첨단 건설재료에 대한 관련 R&D 프로젝트 부족
	외부	기회(O)	▫ 해외 선도 연구기관과의 협력체계 구축
		위협(T)	▫ 시설, 장비, 평가 툴 연구개발 인프라 투자 확대 ▫ 시험 및 연구시설의 집적화

4.1.2 SWOT 분석

▢ 도출된 내부역량 및 외부환경 요인을 가지고 표 4-2와 같이 SWOT 분석을 실시하였으며 이를 통하여 미래시장 대응 방안을 도출함.

[표 4-2] SWOT 분석

	SO 전략	WO 전략
대응 방안	■ 구조물 장수명화를 위한 새로운 건설재료 개발 ■ 재료분야 유지관리 비용 절감을 위한 타분야 (IT, NT, BT 등) 기술융복합 연구개발 추진 ■ 해외경쟁력 증대를 위한 콘크리트 분야 핵심 요소기술 개발 ■ 신기술 개발 및 품질향상을 위한 정부의 정책 지원 ■ 실용화 중심의 친환경 건설재료 R&D 추진 ■ 핵심기술 확보를 위한 중장기적 투자	■ 전문 연구인력 양성 프로그램 ■ 연구 인프라 투자 확대 ■ 신규 건설재료에 대한 시장진입 촉진을 위한 정부 정책 강화 ■ 자기치유 콘크리트 재료기술에 대한 원천기술 확보 전략 ■ 친환경 기술의 고부가가치화 ■ 해외 선도기관과의 MOU 또는 국제 공동연구를 통한 해당분야 기술경쟁력 강화 ■ 성능 중심 설계 기반 기술 구축
	ST 전략	WT 전략
대응 방안	■ 고기능성 친환경 건설재료 개발 ■ 첨단기술 활용 융복합화를 통한 고기능성/다기능성 건설재료 연구개발 추진 ■ Green 건설시장 진출 전략 수립 ■ 국제 표준화 활동 강화 ■ 환경규제 대응 기술 개발 ■ 인증제도 활성화 정책 수립 ■ 선진 우수 성공 사례 벤치마킹 ■ 해외 시장 진출 활성화	■ 건설사와 재료 생산업체와의 협력 강화 ■ 중소형 건설재료 업체 지원 강화 ■ 구조물 성능 기준 도입 ■ 친환경/첨단자재의 인센티브제도 시행 ■ 소재, 재료에 대한 기초 학술연구 지원 ■ 해외 진출 지원 시스템 구축 ■ 산학연 실증화 컨소시움 추진 : 첨단재료 및 친환경 건설재료 적용 확대 방안 ■ 첨단건설재료 분야 교육/인력양성 프로그램 추진

4.1.3 미래시장 대응전략

▢ SWOT분석을 통하여 도출된 대응방안을 바탕으로 표 4-3과 같이 미래시장에 대한 대응전략을 수립하였음.

[표 4-3] 미래시장 대응전략

대응전략	구체적인 방안
미래시장 선점을 위한 원천기술 개발	▪ 콘크리트 구조물 유지관리 비용감소를 위한 첨단 건설재료 연구개발 추진 : 자기치유 소재, 자기치유 시멘트 복합체, 자기치유 보수보강 재료 등 ▪ 핵심 원천기술 확보를 위한 중장기적 투자계획 수립 : 해외경쟁력 강화를 위한 연구개발의 선택과 집중 : 소재, 재료에 대한 기초 학술연구 지원 : 대표 브랜드 연구주제 선정 및 지원 ▪ 첨단기술 활용 기술 융복합 건설재료 개발 : 기능확대 및 기능추가를 위한 BT, NT, IT 등 첨단기술 활용
친환경 콘크리트 기술경쟁력 강화	▪ 친환경 콘크리트의 실용화를 위한 성능한계 극복기술 개발 : 자기치유 기술접목을 통한 성능 향상 : 새로운 개념의 콘크리트 배합 및 제조기술 개발 ▪ 친환경 콘크리트 콘크리트의 틈새시장 진출방안 수립 : 친환경 콘크리트 배합을 위한 원천기술 개발 (New 화학혼화제 등) : 성능 및 적용분야 특정화를 통한 고도 전문화 ▪ 친환경 재료에 대한 인센티브제도 시행
첨단 건설재료 인프라 구축	▪ 첨단건설재료 분야 원천기술 확보를 위한 인력양성 및 교육 프로그램 추진 : 융복합 및 친환경 건설재료 전문가 육성 프로그램 추진 : 대학 첨단건설재료 교육 커리큘럼 추진 ▪ 해외 선도기관 MOU, 국제 공동연구 추진 : 첨단 재료분야 기술도약을 위한 국제 공동연구(박테리아 활용기술 등) : 선진기술 도입을 위한 국제교류(파견근무 등) 추진 : 국제 표준화 활동 강화 ▪ 첨단 재료분야 연구 인프라 투자 확대 ▪ 인증제도 활성화 정책 수립 ▪ 기술 실용화를 위한 산학연 컨소시움 운영 : 업체 니즈반영 및 에로기술 해결을 위한 연구과제 도출 : 건설사와 건설재료 생산업체와의 협력 강화 ▪ 신기술 개발 및 품질향상을 위한 정부의 정책 지원

4.2 비전 및 목표

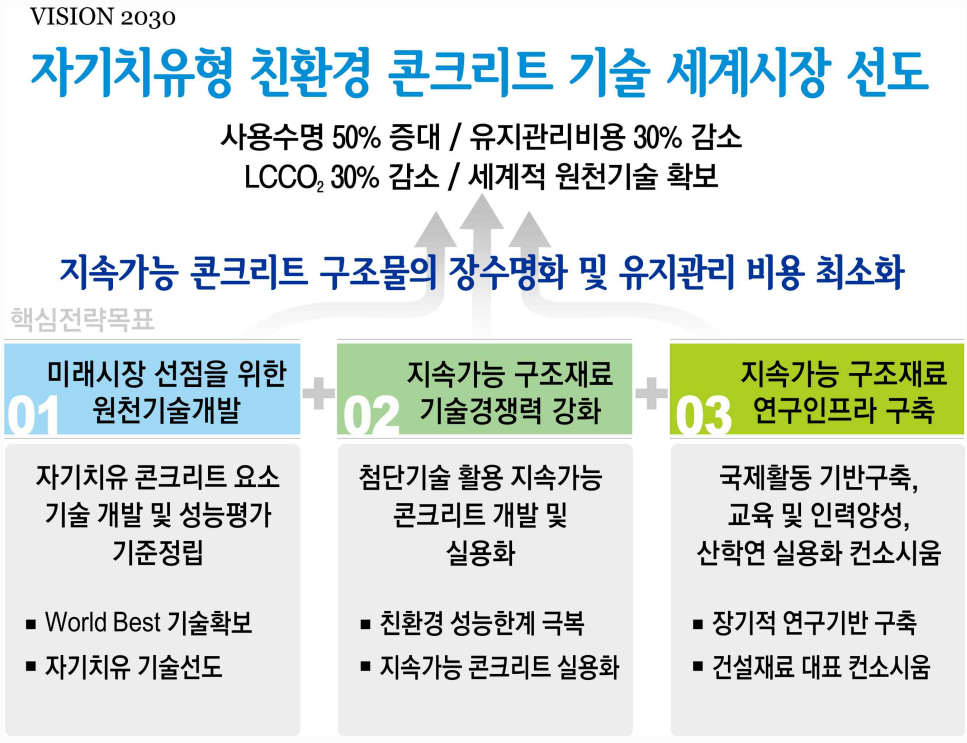
4.2.1 비전 및 목표

▢ 전문가의 의견조사와 국내의 기술 및 시장현황에 근거한 SWOT 분석을 수행하였으며, 그 결과 연구비전을 그림 4-1과 같이 설정하였음.

자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 건설분야 Low-tech 이미지 탈피, 2020년까지 선진국 수준 기술경쟁력 확보, 2030년 해외시장 선점에 기여

▢ 비전을 실현하기 위한 연구 최종목표를 다음과 같이 설정하였으며, 연구의 비전 실현 및 최종목표 달성을 위한 핵심 전략목표는 그림 4-1과 같이 3가지로 도출함.

하이테크 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공/유지관리 비용 최소화



[그림 4-1] 비전 및 핵심전략목표

※ 사용수명 50% 증대 - 친환경 소재 사용에 따른 내구성 향상(40% 정도) 및 자기치유 소재 사용에 따른 손상 감소에 따른 수명증대(10% 정도)

※ 유지관리 비용 30% 감소 - 자기치유 기술의 유지관리 시장 30%이상 점유 시 전체 유지관리 이용 30% 감소

※ $LCCO_2$ 30% 감소 - 친환경 소재 사용에 따른 구조물 제조단계에서 25%이상의 이산화탄소 감소(시멘트 사용량 25%이상 감소) 및 자기치유 기술 적용에 따른 유지관리에 소요되는 새로운 재료 5% 정도 감소

가. 미래시장 선점을 위한 원천기술 개발

- 미래 건설시장을 선점할 수 있는 자기치유(Self-healing) 콘크리트 요소기술

※ 자기치유 요소기술은 박테리아, 마이크로 캡슐, 무기계 혼합재료 등이 있음.

※ 자기치유 성능을 평가하여 기준을 정립하는 기술을 포함함.

- 세계최고기술(world best technology) 수준의 자기치유 콘크리트 분야의 원천기술 확보하여 해당 분야 기술선도를 목표로 함.

나. 지속가능 구조재료 기술경쟁력 강화

- 자기치유형 기술을 접목하여 기존 친환경 콘크리트의 성능한계를 극복, 건설 현장에서의 실용화를 목표로 함.

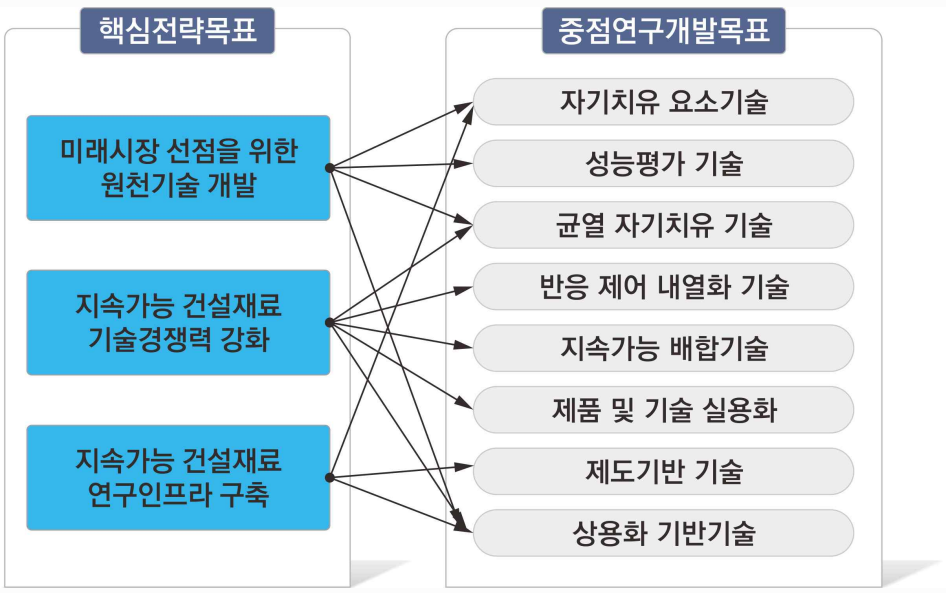
※ HVSCM, 무시멘트 콘크리트의 열화성능을 자기치유 기술을 통해 제어하는 기술을 포함함.

- 사용수명 50% 증대, 생애주기 이산화탄소 배출량 30% 감소를 통해 최종적으로 유지관리 비용 30% 감축을 목표로 함.

다. 지속가능 구조재료 연구 인프라 구축

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

▢ 연구단의 비전과 핵심전략목표를 이행하기 위해 다음과 같이 중점 연구개발 목표의 내용 및 상호관계를 다음과 같이 설정하였음.

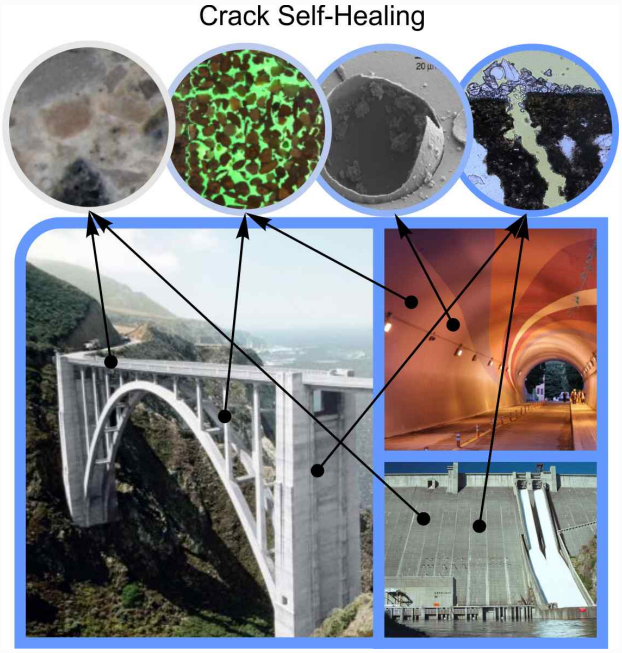


[그림 4-2] 중점 연구개발 목표

4.2.2 기술개발에 따른 미래상

(1) 현황 및 미래상

기술 개발 전 현황	
• 일반 콘크리트를 사용한 구조물은 염해/동결융해/철근부식 등의 열화인자로 인해 구조물의 공용수명이 단축되는 단점이 있음. • 구조물의 보수나 교체주기가 짧아, 시설물의 유지관리 비용이 상당히 증가하고 있어 국가 예산 낭비요인이 되고 있음. • 구조물에 발생되는 열화는 주로 균열로 나타나며, 외부 유해인자의 통로가 되어 구조물의 수명단축이 가속화됨. ※ 구조물의 균열 보수가 지속적으로 이루어져야 함.	

기술 개발 후 미래상	
• 자기치유 친환경 콘크리트 사용한 구조물은 염해/동결융해/철근부식 등의 열화인자로 인해 구조물에 균열이 발생할 수는 있지만, 구조물 스스로 균열을 치유(Self-Healing)할 수 있음. • 따라서, 콘크리트 구조물의 성능저하가 발생하지 않아 공용수명 단축 없이 지속적으로 유지됨. • 초기 건설비용은 조금 높을 것으로 판단되지만, 유지보수를 고려한 생애주기 측면을 고려하면 경제적일 것으로 판단됨. ※ 박테리아/캡슐/무기계혼합재 등 자기치유기술 적용가능	

(2) 추진전략

□ 중점추진분야는 다음과 같이 3개 분야로 설정하였음.

- 중점추진분야 1 : 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 중점추진분야 2 : 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 중점추진분야 3 : 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축

□ 미래 건설시장을 선도할 수 있는 기술개발 우선 추진

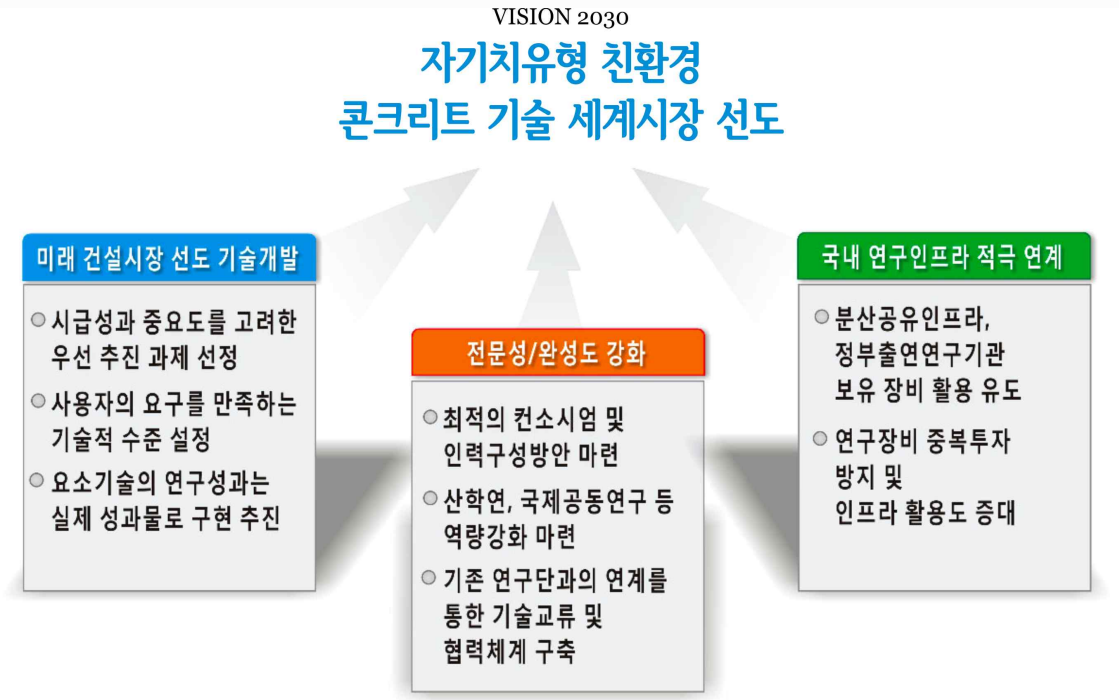
- 미래시장에서 요구하는 시급성과 중요도를 고려하여 우선 추진
- 최종 사용자의 니즈를 충족할 수 있는 기술적 수준을 설정하여 추진
- 개발된 연구성과는 정량적으로 표현 가능하도록 추진

□ 기존 국내외 선행연구 성과를 분석하여 중복성을 피하고 전문성 및 완성도 강화

- 연구 내용의 성격에 따라 추진체계 및 전략을 수립하고 필요 연구역량 분석
- 산학연 협동연구, 국제공동연구 등 역량강화 및 결집방안 마련
- 기존 연구단 및 타분야 연구와의 연계를 통한 기술교류 및 협력체계 구축

□ 국내 연구 인프라의 적극 활용 추진

- 분산공유 인프라 및 기업연구소, 정부출연 연구기관에서 보유하고 있는 시험 연구장비 인프라의 활용을 유도함으로써, 연구장비에 대한 중복투자 방지 및 기존 국책사업을 통해 구축된 인프라의 활용도를 높이는 방향으로 연구 추진



[그림 4-3] 추진전략

4.3 연구개발과제 구성

4.3.1 후보세부기술 도출

▢ 미래니즈 및 기술개발 동향, 전문가 그룹의 수요조사를 통해 후보세부기술 도출

■ 기술수요조사 결과 자기치유형 요소기술, 자기치유형 HVSCM 콘크리트, 자기치유형 무시멘트 분야의 3가지로 구분된 기술 분야별로 제안된 기술을 표 4-4와 같이 구분함.

※ 자기치유형 HVSCM(high volume SCM) 콘크리트 분야는 시멘트의 사용량을 줄이고 산업부산물 또는 비소성 천연자원을 혼합한 친환경 콘크리트로 혼합 치환율은 30~70% 정도임.

※ 자기치유형 무시멘트 콘크리트는 시멘트를 전혀 사용하지 않고 알칼리 활성화제 등을 사용하여 경화시키는 콘크리트로 주 원재료는 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등이 있음.

[표 4-4] 후보세부기술

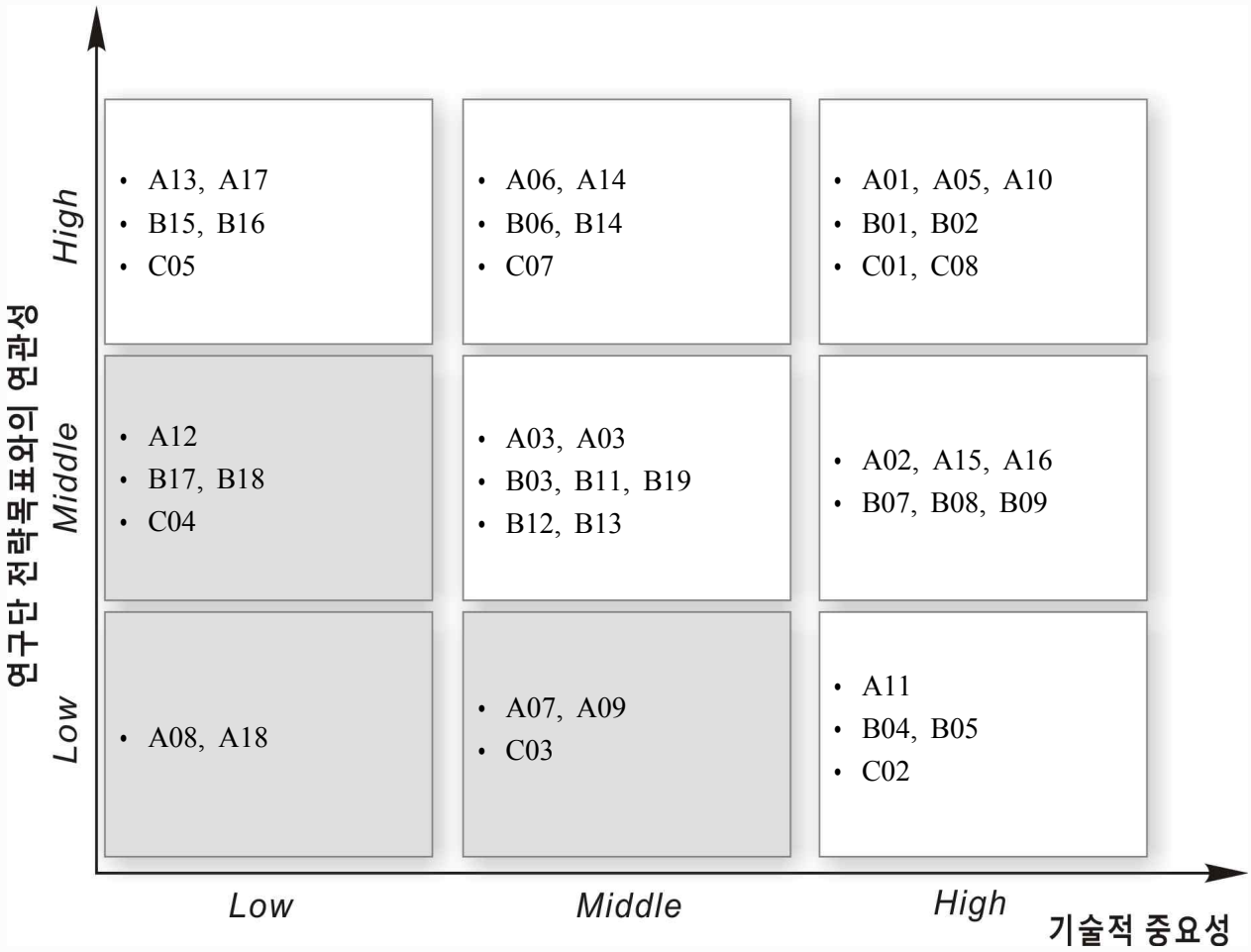
구분	제안기술	Index
자기치유 요소기술	염화물 이온 및 pH 변화에 따른 미생물의 생체광물 형성을 이용한 자기치유 콘크리트 개발	A01
	환경 및 생체광물 형성을 이용한 염해 및 탄산화 제어용 콘크리트 균열보수기법 개발 및 치유성능 평가기법 개발	A02
	자기 치유 고성능 뿜칠모르타르 개발	A03
	마이크로 캡슐을 활용한 자기치유 콘크리트 설계 기술 개발	A04
	반복적 자기치유가 가능한 마이크로 캡슐형 콘크리트 보호코팅재의 개발	A05
	콘크리트 특화형 마이크로 캡슐 설계 및 응용 기술 개발	A06
	섬유-나노 입자 융합 다기능성 충진 소재에 의한 자기 치유형 콘크리트 개발	A07
	보통 강도 자기치유 섬유보강 콘크리트 개발	A08
	Hybrid형 섬유보강 콘크리트 자기 균열 치유기술	A09
	Hybrid형 자기치유 원천 소재 및 활용기술 개발	A10
	온도 및 누수조건을 고려한 자기치유 기술	A11
	균열 보수용 속경성 자기치유 소재개발 및 평가방법 확립	A12
	콘크리트 구조물의 열화방지를 위한 표면침투 보강제 개발	A13
	미생물, 마이크로 캡슐, 단섬유 등을 활용한 자기치유 요소기술 성능 평가 기술	A14
	배합비에 따른 자기치유 요소기술 성능 예측 기술 및 재료모델	A15
	자기치유형 콘크리트에 대한 현장(in-situ) 성능 평가 기술	A16
	자기치유 콘크리트 성능표준 및 시방서 작성 연구	A17
	자기치유형 콘크리트 의사회/경제적 영향 분석 기술	A18

구분	제안기술	Index
자기치유형 HVSCM 콘크리트	HVSCM 콘크리트 적용 자기치유형 무기계 재료 및 적용기술 개발	B01
	HVSCM 콘크리트 무기계 자기치유재 제조기술 개발	B02
	모르타르의 자기치유형 기술을 통한 지하 콘크리트 구조물의 균열 봉합 및 방수 기술 개발	B03
	수화 생성물의 반응성 제어를 통한 자기치유 시멘트 개발	B04
	혼화재 활용 콘크리트 자기균열 치유기술	B05
	하이브리드 기술 적용 균열 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발	B06
	첨단 스마트 폴리머 활용 특수환경 HVSCM 콘크리트 개발	B07
	체적변화 자기제어형 고성능 HVSCM 콘크리트 개발	B08
	자연 표면 강화형 자기치유형 HVSCM 콘크리트 개발	B09
	하이볼륨 고성능 콘크리트 제조기술 개발	B10
	박테리아 및 무기질 혼합재 적용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발	B11
	CO_2 반응 자기치유형 시멘트계 재료 및 활용기술 개발	B12
	Cl^- 반응 자기치유형 시멘트계 재료 및 활용기술 개발	B13
	캡슐형 자기치유 보수재료를 활용한 성능회복 기술	B14
	박막/피막형 자기치유 보수재료를 활용한 균열 제어 및 회복기술	B15
	콘크리트용 하이브리드 침투형 자기치유 방수 시스템 개발	B16
	단면 복구용 자기치유 보수재료를 활용한 균열 제어 기술	B17
	프리캐스트 공법용 멀티기능성 자기치유 보수재료 제조 기술	B18
	자기치유형 HVSCM 콘크리트 배합·시공 기술 개발	B19
자기치유형 무시멘트 콘크리트 기술	자기치유형 수축저감용 무시멘트 결합재 제조 기술	C01
	자기치유 성능부여 및 탄산화 저항성능 향상을 위한 무시멘트 결합재 개발	C02
	알칼리 활성화제 충진 섬유를 이용한 균열치유 기술	C03
	소수성 섬유를 이용한 AAS 동결융해 저항성 향상	C04
	탄산칼슘 석출형 미생물 활용 무시멘트 콘크리트 표면공극 충진기술	C05
	알칼리제 함침형 경량골재를 활용한 무시멘트 콘크리트의 균열제어	C06
	알칼리제 흡착 초흡수성 폴리머를 활용한 무시멘트 콘크리트의 균열제어	C07
	자기코팅 박테리아 기술	C08

4.3.2 후보세부기술 1차 필터링

▢ 후보세부기술에 대한 핵심전략목표와 기술적 중요성을 상, 중, 하의 3단계로 구분하여 기획회의를 통해 평가하고, 그 결과를 그림으로 정리하였음.

▢ 9분류의 기술 중 그림에 회색으로 표시된 3분류의 기술에 대하여 기술개발의 필요성이 없는 것으로 판단하여 세부과제의 기술군 후보에서 제외시킴.



4.3.3 최종 후보세부기술 도출

▢ 1차 필터링된 후보세부기술에 대해 연차별 내용을 파악하여 기술적인 측면에서의 그룹핑(Grouping)하여 다음과 같이 최종 후보세부기술을 도출하였으며, 그에 해당하는 내용을 기술하였음.

[표 4-5] 최종 후보세부기술

최종 후보세부기술	세세부 기술내용	구분
유무기계 혼합재 활용 자기치유 요소기술	· 자기응답형(Self-Adaptive) 무기혼합재 개발 · 유무기 하이브리드(Hybrid)형 자기치유 혼합재 개발 · 중합반응 제어 무기결합재 개발	B01, B02 B04, B06 B07, A10 C01
박테리아 활용 자기치유 요소기술	· 균열 자기치유 박테리아 기술 · 자기코팅 박테리아 기술	A01, A02 C05, C08
캡슐 활용 자기치유 요소기술	· 균열 감응 동작형 캡슐 제조기술 · 반복적 균열 제어 코어재료 기술 · 매크로 캡슐 제조기술	A04, A05
자기치유 성능 평가기술	· 자기치유 성능 평가기술	A14, A15
균열 자기치유 콘크리트 개발	· 급속 균열치유 기능성 콘크리트 개발 · 유무기 복합소재 활용 자기치유 콘크리트 개발 · 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 개발 · 마이크로 캡슐 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발	A06, B11 C07
균열 자기치유 보수/코팅재 개발	· 매크로 캡슐 활용 자기치유 코팅재료 개발 · 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발 · 반복적 균열치유 마이크로 캡슐 코팅재 개발	A03, A11 B03, B14 B15, B16
지속가능 배합기술	· 무기혼합재(SCM)용 특수화학혼화제 개발 · 차세대 콘크리트 배합기술 개발	B10, B19 C01
지속가능 특수 콘크리트	· 프리캐스트용 친환경 고강도 콘크리트 개발 · 조기강도 확보형 HVSCM 콘크리트 개발 · 친환경 SCC 및 RCC 콘크리트 개발	B10, B08
반응제어 내열화 콘크리트	· 내열화 무시멘트 콘크리트 개발 · 탄산화 및 수축제어형 HVSCM 콘크리트 개발	C02, C05 B12, B13
자기 균열치유형 콘크리트 실용화	· 터널 구조물용 자기치유 콘크리트 개발 및 실용화 · 구조물 균열강성 보강 자기치유 콘크리트 개발 및 실용화 · 해상구조물용 균열 자기치유 콘크리트 개발 및 실용화	B01, B02 A01, A05 A06
자기치유 보수/코팅재료 실용화	· 균열 자기치유 방수코팅재 개발 및 실용화 · 자기코팅 콘크리트 하수관 개발 및 실용화 · 반복균열 치유 코팅재 개발 및 실용화	A13, B16 B03, B14
지속가능 특수 콘크리트 실용화	· 레미콘 현장타설 무시멘트(AAS) 콘크리트 개발 및 실용화 · 무균열 자기치유 친환경 콘크리트 개발 및 실용화	B01 B08, B09
자기치유-친환경 PC제품 실용화	· 프리캐스트 AAS 콘크리트 개발 및 실용화 · 프리캐스트 HVSCM 콘크리트 개발 및 실용화	B19, C01
자기치유형 콘크리트 상용화기반 구축	· 자기치유 성능 표준화(실내, 현장) · 자기치유 LCC/LCCO$_2$ 평가 기술	A14, A15 A16
자기치유형 친환경 콘크리트 제도기반 구축	· 자기치유형 친환경 콘크리트 구조물 성능기준(안) · 자기치유형 친환경 콘크리트 시방서	A17, B19

4.3.4 중점 추진분야

▢ 자기치유 콘크리트 기술은 건설 산업에서 새로운 성장 동력원이 될 수 있는 분야로 체계적인 마스터플랜이 필요하며, 장기·중기 계획에 대한 주요 연구내용은 다음과 같음.

- 장기계획은 향후 해외시장을 선도하기 위한 10년 이상의 건설재료 R&D 계획으로 연구센터 개념이 바람직할 것으로 판단됨.
- 중기 계획은 현재 해외 기술선전국과의 기술격차를 감안, 선택과 집중을 통해 최대의 결과를 도출할 수 있는 연구분야에 대해 최소 5년 정도의 연구단 개념으로 추진하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

(1) 장기 10년이상 계획

▢ **미래시장 선점을 위한 원천기술 개발**

- 미래 건설시장을 선점할 수 있는 자기치유(Self-healing) 콘크리트 요소기술

※ 자기치유 요소기술은 박테리아, 마이크로 캡슐, 무기계 혼합재료 등이 있음.

※ 자기치유 성능을 평가하여 기준을 정립하는 기술을 포함함.

- 세계최고기술(world best technology) 수준의 자기치유 콘크리트 분야의 원천기술을 확보하여 해당 분야 기술 선도를 목표로 함.

▢ **지속가능 건설재료 기술경쟁력 강화**

- 자기치유형 기술을 접목하여 기존 친환경 콘크리트의 성능한계를 극복, 건설 현장에서의 실용화를 목표로 함.
- 사용수명 50% 증대, 생애주기 이산화탄소 배출량 30% 감소를 통해 최종적으로 유지관리 비용 30% 감축을 목표로 함.

▢ **지속가능 건설재료 연구 인프라 구축**

- 미래시장 선점 및 세계 선도를 위한 기술개발을 위한 기반 구축을 목표로, 관련 첨단 건설재료 분야 전문 연구인력 양성, 특화된 교육프로그램, 특정 장비구축 등의 프로그램을 포함함.
- 또한 산학연을 중심으로 건설재료 분야의 실 사용자의 니즈와 이에 부합하는 연구개발 및 적용을 통해 제품 및 기술의 실용화 컨소시움을 운영함.

장기(10년이상) 기술로드맵

Plan : 2015~2024

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024

유-무기계 혼합재 활용 자기치유 요소기술
1. 자기응답형(Self-Adaptive) 무기혼합재 개발
2. 유무기 하이브리드(Hybrid)형 자기치유 혼합재 개발
3. 중합반응 제어 무기결합재 개발

박테리아활용 자기치유 요소기술
1. 균열 자기치유 박테리아 기술
2. 자기코팅 박테리아 기술

캡슐활용 자기치유 요소기술
1. 균열 감응 동작형 캡슐 제조기술
2. 반복적 균열 제어 코어재료 기술
3. 매크로 캡슐 제조기술

반응 제어형 자기치유 요소기술
1. 중합반응 제어 내열화 자기치유 기술
2. 유해이온 반응제어형 자기치유 기술

자기치유 성능평가 요소기술
1. 균열/내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술
2. LCC/LCCO$_2$ 분석 및 평가기술

균열 자기치유 콘크리트 개발
1. 급속 균열치유 기능성 콘크리트 개발
2. 유무기 복합소재 활용 자기치유 콘크리트 개발
3. 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 개발
4. 마이크로 캡슐 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발

균열 자기치유 보수/코팅재 개발
1. 매크로 캡슐 활용 자기치유 코팅재료 개발
2. 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발
3. 반복적 균열치유 마이크로캡슐 코팅재 개발

반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발
1. 반응제어형 내열화무시멘트 콘크리트
2. 유해이온 반응제어 자기치유 콘크리트

자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축
1. 자기치유 콘크리트 성능 표준화
2. 자기치유 콘크리트 시방기준

자기 균열치유형 콘크리트 현장적용 및 모니터링
1. 무균열 터널개발 – 자기치유 콘크리트 적용 및 모니터링
2. 무균열 교량상판 개발 – 균열강성 보강 자기치유 콘크리트 적용 및 모니터링
3. 해상구조물용 균열 자기치유 콘크리트 개발 및 모니터링

자기치유 보수/코팅재료 실용화
1. 균열 자기치유 방수 코팅재 개발 및 실용화
2. 자기코팅 콘크리트 하수관 개발 및 실용화
3. 반복균열 치유 코팅재 개발 및 실용화

반응 제어형 자기치유 콘크리트 제품화
1. 현장타설 / 프리캐스트 무시멘트 내열화 콘크리트 현장적용 및 제품화
2. 유해이온 반응 제어형 콘크리트 마감재료 및 구조용 재료 적용기술 실용화

자기치유형 콘크리트 사업화 기반 구축
1. 자기치유형 콘크리트 현장 적용 종합성능평가(TEST BED)
2. 자기치유형 콘크리트 법적 제도화(국토교통부 지침 등)

하이브리드 균열 자기치유 구조물 개발
1. 첨단 자기치유 터널 구조물 개발(무기계+박테리아)
2. 초고층용 무균열 건축자재 개발(캡슐+무기계)
3. 자기치유 해상터널 구조물 개발(박테리아+캡슐)
4. 자기치유 콘크리트 최적 시공방법 개발

하이브리드 반응제어 자기치유 구조물 개발
1. 무균열 내열화 친환경 콘크리트 구조물 개발
2. 특수환경 제어 콘크리트 구조물 개발(화학단지 등)

자기치유 기술 국제협력 프로그램
1. 국제 인력양생 프로그램(학생, 연구원 교류 프로그램)
2. 국제공동 연구

글로벌 표준 자기치유 기술교육 프로그램
1. 글로벌 교육 환경 구축 / 다학제간 기술 융복합 교육 환경 구축
2. 산업연계 교육 및 학술 프로그램 / 자기치유 기술 분야에 특화된 엔지니어링 양성 교육

자가진단 콘크리트 요소기술
1. 자가진단(Self Diagnosis) 센서 개발
2. 응력, 변형율, 균열 센싱기술 개발

자가진단 콘크리트 개발
1. 인장응력 자가진단 콘크리트 개발
2. 균열 자가진단 콘크리트 개발

자연모사 청색 건설재료 개발
1. 자기합성, Self-assembly binder, 자기치유형 바이오 건설재료 개발
2. EM(효모, 아미노산 등) 건설재료, 유해물질 자기정화 건설재료 개발

능동형(Active) 건설재료 기술 개발
1. 능동형 유지관리 시스템 개발(자기진단, 자기치유, 사물인터넷 기술 접목)
2. AQ(air quality) 개선 건설재료 개발, 안전성 향상(라돈 등 방사능 분해) 건설재료 개발

SUSTAINABLE

(2) 중기 5년 계획

▢ **자기치유 콘크리트 분야의 기술격차 최소화 또는 기술선도를 위한 핵심적인 중점추진분야를 다음과 같이 3개 분야로 설정하였음.**

- 세부과제 1 : 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 세부과제 2 : 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
- 세부과제 3 : 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축

▢ 세부과제 1

■ 주요내용

과제명	균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
배경 및 필요성	• 지속가능 및 친환경 콘크리트로 패러다임 변화 후 급변하는 콘크리트 재료 시장은 새로운 성능개념의 콘크리트에 대한 개발 요구가 증대되고 있으며, 이를 위해 첨단기술을 활용한 융합적인 건설재료 개발이 필요함. - 로우테크(Low-tech) 이미지 탈피 해외시장 견인을 위한 첨단기술(Bio/Nano/Eco Tech.)을 접목한 새로운 개념의 건설재료 기술전략 필요 • 자기치유 콘크리트 기술은 세계적으로 기술 초기단계로 선택과 집중을 통한 효율적인 연구개발을 통한 원천기술 확보로 기술역전 또는 기술선도가 가능할 것으로 판단됨. - 2013년도 World Economic Forum에서 자기치유 재료(self-healing materials) 기술이 10대 유망기술(emerging technologies)에 포함됨. • 고도 성장기의 사회기반 시설물뿐만 아니라 신규, 특히 사회적 중요도가 높으면서 유지보수가 어려운 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물 등)의 유지관리 중요성 증대 - 콘크리트의 내구성 향상 및 유지관리 중요성이 점차 증가됨에 따라서 균열 자기치유 기술이 그 대안으로 점차 부각되고 있음.
세부 목표	• 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발 • 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발 • 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발
주요 내용	• 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발 - 자기치유 성능 촉진 무기 혼합재 기술 개발 - 급속 자기치유 콘크리트 및 자기치유 도로 포장 콘크리트 개발 • 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발 - 광물석출 박테리아 포자 활용 및 배양기술 개발 - 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발 - 박테리아를 활용한 초기균열 자기치유 콘크리트 개발 • 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발 - 반복적 균열 제어 마이크로 캡슐 코팅재 개발 - 매크로 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발 - 마이크로 캡슐 활용 균열 자기치유 콘크리트 개발

■ 연차별 목표 및 주요내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	• 균열 자기치유 소재기술 개발	• 유 · 무기계 자기치유 성능향상 기술 개발 • 스마트 폴리머 활용 자기치유 기술 개발 • 자기치유 원료 소재 제어기술 개발 • 무기 하이브리드 자기치유 메카니즘 및 배합설계 기술 개발
2차년도	• 균열 자기치유 요소기술 개발	• 스마트 폴리머 활용 자기응답형 자기치유 재료 개발 • 하이브리드 자기치유 혼합재 공정향상 기술 개발 • 자기치유 박테리아 선정 및 치유성능 활성화 기술 개발 • 콘크리트 특화형 마이크로 캡슐 제조 기술 개발 • 보수/코팅용 매크로 캡슐 제조 기술 개발
3차년도	• 균열 자기치유 성능 최적화	• 유 · 무기 자기치유 소재 활용 성능복합화 및 최적설계 기술 개발 • 하이브리드 자기치유재 배합 최적화 및 파일롯 플랜트 제작 • 박테리아 광물석출 및 광합성 박테리아 생존률 향상 기술 개발 • 캡슐 활용 기능성 자기치유 콘크리트 기술 개발 • 보수/코팅용 매크로 캡슐 배합기술 개발
4차년도	• 요구성능 맞춤형 균열제어 자기치유 기술 개발	• 급속 균열 자기치유 기능성 콘크리트 제조 개발 • 유무기 하이브리드 도로포장 콘크리트 제조 기술 개발 • 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 배합 기술 개발 • 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 배합 및 반복적 균열치유 기술 개발 • 매크로 캡슐 활용 콘크리트 보수 코팅재 제조 기술 개발
5차년도	• 균열제어 자기치유 활용기술 개발	• 터널 적용을 위한 급속 균열 자기치유 콘크리트 개발 • 도로 포장콘크리트 개발 및 적용기술 • 초기균열 제어용 박테리아 자기치유 콘크리트 개발 • 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발 • 도로교 상판 적용 캡슐 활용 반복적 균열 자기치유 코팅재 개발 • 균열 자기강성 보강용 마이크로 캡슐 콘크리트 개발

▢ 세부과제 2

■ 주요내용

과제명	반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
배경 및 필요성	• 시멘트 사용량 감소를 통한 '친환경 콘크리트 개발'에 대한 연구가 다수 수행되었지만, 친환경 콘크리트의 성능한계로 인해 건설시장에서 외면당하는 상황으로, 기존 친환경 콘크리트 또는 고성능 콘크리트의 성능한계를 극복할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요함. ※ 콘크리트의 성능한계 : 조기강도 확보, 체적변화, 탄산화 등의 내구성 확보 • 첨단기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 기술수요 급증 - 콘크리트 성능열화는 크게 Micro/Meso/Macro 영역의 관점에서 분류할 수 있음. ※ Micro: 수화/수축/탄산화 등 미세조직구조 변화에 따른 열화 ※ Meso/Macro: 외부하중/부식 등에 의한 균열 발생에 의한 열화 - 기존의 균열(cracking)치유 개념의 자기치유(Self-healing) 개념을 확장하여 콘크리트 수화물 성분 및 미세조직의 경년 변화에 따른 손상의 치유 및 첨단기술 융합을 통하여 자기치유성능 개선을 위한 연구 개발이 필요하며, 이를 통해 기존 친환경 콘크리트 기술의 한계점 극복. ※ 시멘트 무기복합체 자기치유 기능 극대화를 통한 결함 (조기강도, 균열, 탄산화 및 수축 등) 완화 및 최소화. - 기존 구조물의 수동형 유지관리 기술에서 능동형 유지관리 기술로의 발상전환 필요. ※ 열화원인 억제 개념을 초월하여 열화원인을 능동적으로 제어(고정, 합성반응 등)하여 자기치유 성능을 부여하는 기술 필요.
세부 목표	• 중합반응 제어 무기결합재 개발 • 반응제어형 내열화 무시멘트(AAS) 콘크리트 개발 • 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발
주요 내용	• 중합반응 제어 무기결합재 및 반응제어형 무시멘트 콘크리트 개발 - 메카노케미컬 합성법 이용 중합반응 제어 자기치유형 무시멘트 결합재 개발 - 탄산화/체적수축/공극구조 개질 기술 개발 - 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 - 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 • 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발 - 이온 반응형 균열 및 공극 충진소재 기술 개발 - 유해이온 제어를 위한 반응 촉매 및 촉진화 기술 개발 - 유해이온 반응 제어형 구조용 및 마감용 시멘트 복합체 기술 개발

■ 연차별 목표 및 주요내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	• 반응제어형 자기치유 소재 개발	• 메카노케미컬 합성법 이용 염기도 제어기술 • 탄산화 제어 자기치유 무시멘트 결합재 개발
2차년도	• 반응제어형 내열화 자기치유 요소기술 개발	• 중합반응 제어 강도 증진 기술 개발 • 활성화제 조합을 통한 자기치유 성능 부여기술 • 수축 제어 자기치유 무시멘트 결합재 개발 • 유해이온 제어(고정화, 합성반응) 반응기구 분석 • 이온반응 제어 원천 소재 기술 개발 - CO_2, Chloride, Sulfate 이온 등
3차년도	• 반응제어 내열화 자기치유 성능 최적화	• 무시멘트 결합재 최적 자기치유 성능 배합기술 • 유해이온 제어를 위한 반응 최적화 배합기술 • 유해이온 고정화를 위한 반응 촉매 및 촉진화 기술 개발 - CO_2, Chloride, Sulfate 이온 등
4차년도	• 요구성능 맞춤형 반응제어 내열화 자기치유 기술 개발	• 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 - Mock-up 성능평가, 시작품 제작 • 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 • 유-무기 이온제어 혼합재 최적 배합기술 개발 - 마감재 및 구조용 콘크리트 제조 및 성능평가
5차년도	• 반응제어 내열화 자기치유 활용기술 개발	• 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발 - 배합설계, 시제품 제작 • 현장타설용 내열화 무시멘트 콘크리트 레미콘 적용 기술 개발 • 유-무기 이온제어 혼합재 현장 적용성 평가 - 마감재 및 구조용 콘크리트 Mock-up 성능평가

▢ 세부과제 3

■ 주요내용

과제명	자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축
배경 및 필요성	• 자기치유형 콘크리트 연구는 현재 세계적으로 원천기술 개발단계에 머물러 있음. • 현재 자기치유 성능에 대한 평가는 균열부위의 치유물질 생성 정도와 이를 반영한 특성에 대한 정성적인 평가에 그치고 있음. - SEM, image analysis, X-ray 등 이용 균열 부위 수화물 관찰 - 투수 실험 등을 통해 간접적으로 내구성과 휨 실험 등을 통해 단편적으로 역학적 물성 복원 정도 평가 - 자기치유 콘크리트 개발 중 다양한 자기치유 기술들의 성능 분석 및 상호비교를 위해, 성능 평가를 위한 표준 실험방법 및 성능기준의 정립이 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 자기치유 성능 모니터링이 지속적으로 요구되어 첨단기술을 활용한 비파괴 실험기법이 필요함. ※ 최근 Acoustic emission, Ultra pulse velocity, Time reversal technique 등 초음파 특성을 활용한 연구 시도 ※ 공진주파수 또는 동탄성계수를 통해 자기치유 성능 평가 시도 • 개발된 자기치유 콘크리트의 실용화를 위해서는 다소 높은 초기투자 비용에 대한 타당성을 마련하는 것이 필수적임.
세부 목표	• 균열 자기치유 성능평가 기술 개발 • 내열화 자기치유 성능평가 기술 개발 • 자기치유 콘크리트 시방기준 개발
주요 내용	• 자기치유 성능 평가 프로토콜 개발 : 자기치유 성능의 정성/정량적 평가 방법 : 자기치유 성능 표준(등급, 요구기준) 정립 • 구조모형을 활용한 자기치유 성능 검증 • 비파괴 기법활용 자기치유 성능평가 기술 개발 • 자기치유 성능평가(균열, 내열화) 실험방법 표준화(KS, ISO) • 자기치유형 콘크리트의 생애주기 비용(Life Cycle Cost, LCC), CO_2(Life Cycle CO_2, $LCCO_2$) 분석 및 설계기술 • 자기치유형 콘크리트 시방기준 개발

■ 연차별 목표 및 주요내용

연차	연구목표	연구내용
1차년도	• 역학적 특성에 대한 자기치유 성능평가 기술 개발	• 자기치유 성능 평가 프로토콜 정립 • 자기치유 성능에 따른 콘크리트 물성 분석 • 균열 자기치유 성능평가 기술 개발 - 직접인장, 파괴에너지 • 미세조직분석을 통한 균열치유 정량화 기술 개발
2차년도	• 내구적 특성에 대한 자기치유 성능평가 기술 개발	• 내열화 자기치유 성능평가 기술 개발 - 투수, 탄산화, 확산 등 • 자기치유 지속성능 평가기술 개발 - 박테리아 생존률, 치유성능 반복재현성 • 자기치유 콘크리트 LCC 분석 및 설계기술 개발
3차년도	• 자기치유 현장성능평가 기술 개발	• 구조모형을 활용한 자기치유 성능 검증 - 역학적 및 장기 내구특성 • 비파괴 기법활용 자기치유 성능평가 기술 개발 : 균열 치유 진행 분석 기술 : 역학적 물성(강도, 강성 등) 복원 분석 기술 • 자기치유 콘크리트 $LCCO_2$ 분석 및 설계기술 개발
4차년도	• 생애주기고려 자기치유 성능평가 기술 개발	• 자기치유 성능 표준(등급, 요구기준) 정립 • 자기치유 콘크리트 구조물 성능기준 정립 • 균열 자기치유 평가방법 표준화(KS, ISO)
5차년도	• 자기치유 콘크리트 시방기준 개발	• 자기치유 콘크리트 Mock-up 성능평가 • 자기치유 콘크리트 표준시방서 개발 : 제조/시공 가이드라인 • 내열화 자기치유 평가방법 표준화(KS, ISO)

(3) 기대효과

▢ 기술적 측면

- 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고 수준 기술 확보를 위한 초석 마련

※ 기술 성숙도 및 수준 : 추격 위치 → 선도적 위치(선진국과 비슷한 수준 또는 그 이상의 수준으로 발전)

- 자기치유 건설재료 개발로 경년에 따른 구조물의 혁신적 내구성능 향상 기술 개척
- 원전구조물, 터널, 지하구조물 등 유지보수가 어려운 사회기반 시설물에 대한 효율적인 유지관리 방안 도출

※ 콘크리트 구조물 사용수명 50% 증대

▢ 사회·경제적 측면

- 자기치유형 기술 개발을 통한 사회기반 시설물 유지관리 비용절감 효과 기대

※ 전체 유지관리 비용 30% 감소를 통한 국가예산 절감 효과

- 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 적용을 통한 환경 및 에너지 절감효과 기대

※ 친환경 콘크리트의 사용 및 생애주기를 고려 유지관리 물량감소를 통한 $LCCO_2$ 30% 감소 기대

- 자기치유 콘크리트의 기술 개발을 통해 건설 산업의 신성장 동력원으로 기대

※ 자기치유관련 전문인력 양성 및 취업증대 효과 예상

※ 해외건설 수주 등 건설 산업의 수출 증대

4.3.5 핵심기술요소(CTE) 도출

▢ 핵심기술요소(CTE) 후보

No.		CTE명
균열제어형 자기치유 콘크리트	후보1	• 콘크리트 강성회복
	후보2	• 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트
	후보3	• 박테리아 활용 자기치유 콘크리트
	후보4	• 캡슐 활용 자기치유 콘크리트
	후보5	• 콘크리트 보수/보강 재료
	후보6	• 박테리아 배양기술
	후보7	• 콘크리트 최적 배합설계
반응제어형 자기치유 콘크리트	후보8	• 고내구성 콘크리트
	후보9	• 중합반응 제어 무시멘트 콘크리트
	후보10	• 무시멘트 결합재
	후보11	• 유해이온 제어 콘크리트
	후보12	• 무시멘트 콘크리트 최적 배합설계
	후보13	• 이온 촉매제
자기치유 콘크리트 성능평가 및 실용화 기반 구축	후보14	• 자기치유 성능평가
	후보15	• 자기치유 콘크리트 시방기준
	후보16	• 생애주기 비용 분석 프로그램
	후보17	• 생애주기 이산화탄소 배출량 분석 프로그램

▢ 핵심기술요소(CTE) 선정

체크리스트	C1	C2	C3	C4	C5	C6	CTE 여부
후보1	○		○				
후보2	○		○		○	○	○
후보3	○		○			○	○
후보4	○		○		○	○	○
후보5	○						
후보6	○						
후보7	○						
후보8	○						
후보9	○		○		○	○	○
후보10	○						
후보11	○		○		○	○	○
후보12	○						
후보13	○		○				
후보14	○		○		○		○
후보15	○						
후보16	○						
후보17	○						
비고	반드시 충족	하나 이상 충족					

■ 체크리스트 목록

No.	항목 내용
C1	• 이 기술이 사용 요구조건, 비용, 일정 등에 직접적으로 영향을 미치는가?
C2	• 해당 기술을 개발하거나 시연하는데 중대한(실패) 위험이 예상되는가?
C3	• 해당 기술이 새롭거나 독창적인가?
C4	• 기존에 성공적으로 적용된 이후에, 이번에 개발 시 변경된 기술인가?
C5	• 해당 기술이 유사환경에서 실현되도록 재개발되는가?
C6	• 이 기술이 임의의 환경에서 작동할 것으로 기대되거나 당초의 설계의도 혹은 규정된 성능을 뛰어넘는 성능을 달성할 것으로 기대되는가?

4.3.6 기술성숙도(TRL) 단계별 목표

연구과제명	첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발			유형	재료·자재		
프레임워크		선행 단계	시제품 제작 및 시연		현장적용		제품화/실용화
마일스톤		현재 TRL	마일스톤 목표 TRL				
			1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
마일스톤 일정		‘14.05	‘15.05	‘16.05	‘17.05	‘18.05	‘19.4.30
CTE No.	기술명(유형)						
CTE 1	유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	3	4	5	5	6
CTE 2	박테리아 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	3	3	4	4	5
CTE 3	캡슐 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	2	2	3	4	4	5
CTE 4	중합반응 제어 무시멘트 콘크리트 (재료·자재)	2	2	3	3	4	5
CTE 5	유해이온 제어 콘크리트 (재료·자재)	2	2	3	3	4	5
CTE 6	자기치유 성능평가 (소프트웨어)	3	3	4	5	5	6

4.3.7 연구개발과제의 구성

▢ 중기 5년 계획에 대한 연구개발과제를 다음과 같이 구성함.

구분	과제명	우선순위
1세부	· 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발	
1-1세세부	· 유-무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발	1
구성기술1	· 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재 개발	
구성기술2	· 터널 구조물용 급속 자기치유 콘크리트 개발	
구성기술3	· 도로용 자기치유 포장 콘크리트 개발	
1-2세세부	· 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발	4
구성기술1	· 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발	
구성기술2	· 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 개발	
1-3세세부	· 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발	3
구성기술1	· 반복적 균열제어 마이크로 캡슐 코팅재 개발	
구성기술2	· 매크로 캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발	
구성기술3	· 균열 강성 회복용 마이크로 캡슐 자기치유 콘크리트 개발	
2세부	· 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발	
2-1세세부	· 중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발	5
구성기술1	· 메카노케미컬 합성이용 중합반응 제어 자기치유 결합재 개발	
구성기술2	· 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 개발	
구성기술3	· 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 개발	
2-2세세부	· 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발	6
구성기술1	· 이온 반응형 원천소재 개발	
구성기술2	· 유해이온 반응 제어형 구조용 및 마감용 시멘트 복합체 개발	
3세부	· 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축	
3-1세세부	· 자기치유 성능 평가 기술 개발	2
구성기술1	· 균열 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발	
구성기술2	· 내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발	
구성기술3	· 자기치유 콘크리트 표준화 기술 개발	
3-2세세부	· 자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축	7
구성기술1	· 자기치유형 콘크리트의 생애주기 Cost(LCC), CO_2(LCCCO_2) 분석 기술 개발	
구성기술2	· 자기치유형 콘크리트 시방기준 개발	

▢ 개발 대상 구성기술의 성능지표와 함께 연구개발에 대한 성과측정을 위한 핵심성과지표(KPI)를 도출하고, 각 KPI별 성과달성 목표가 되는 성능수준을 다음과 같이 정의함.

구 분	구성기술	성과물	정의	성과지표
1세부 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발	· 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재 개발	특허, 시제품	콘크리트 혼합재용 자기치유 복합소재 제조기술	균열폭 0.5mm 이상 자기치유
	· 터널 및 고속도로 포장용 자기치유 콘크리트 개발	특허, 시제품	터널 및 도로포장용 자기치유 콘크리트 제조 및 시공기술	균열 자기치유 속도 0.06mm/day 이상, 치유 속도 200% 향상
	· 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발	특허, 시제품	박테리아 활용 구조체 내열화 코팅제 제조기술	기존 하수관거 대비 황산염 저항성 100% 증대, 자정능력 구현
	· 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 개발	특허, 시제품	박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 제조 및 시공기술	박테리아 생존률 1년이상, 균열폭 0.4mm 이상 자기치유
	· 캡슐 활용 기능성 코팅재 개발	특허, 시제품	반복적 균열 자기치유와 다기능성을 위한 캡슐 제조 및 시공기술	반복적 균열치유 성능 200% 향상
	· 균열강성 증진 마이크로 캡슐 콘크리트 개발	특허, 시제품	균열강성 증대를 위한 캡슐 제조 및 시공기술	균열전 휨강성 100% 회복, 균열 후 인장강도 3MPa 회복
2세부 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발	· 중합반응 제어 무기결합재 개발	특허, 시제품	중합반응 제어 무기결합제 제조 기술	기존 무시멘트 콘크리트 대비 탄산화 저항성 200% 향상
	· 현장타설 무시멘트 콘크리트 개발	특허, 시제품	내열화 현장타설 무시멘트 콘크리트 제조 및 시공기술	건조수축 800μm 이하, 동결융해 저항성 85%이상
	· 유해이온 반응 제어형 콘크리트 개발	특허, 시제품, 건설신기술	유해반응 제어형 마감재 및 콘크리트 제조와 시공기술	Cl^-, CO_2 고정 소재 개발, OPC 콘크리트 대비 내염해성, 내탄산화, 내산성 100% 향상
3세부 자기치유 콘크리트 성능평가 및 실용화 기반 구축	· 균열 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발	평가시스템 및 기준(안)	자기치유 정량적 성능 실내 평가방법 및 기준	균열치유 측정 오차 10%이내
	· 내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발	평가시스템 및 기준(안)	자기치유 정량적 성능 현장 평가방법 및 기준	내열화(체적변화, 탄산화, 내약품성) 치유 측정 오차 10%이내
	· 자기치유 콘크리트 실용화 기반 구축	표준 및 시방서(안)	자기치유 콘크리트 실험방법 표준화 및 시방서	표준개발 3건 이상, 시방서(안) 2건 이상

4.3.8 과제별/연차별 기술로드맵 및 성과로드맵

(1) 총괄로드맵

☐ 기술로드맵에서 우선 수행될 분야 및 선행기술 개발 후 이루어져야 할 후속 연구분야를 구분하여 연구개발 대상을 선정하였음.

☐ 세계선도 원천기술 개발을 위해 자기치유 요소기술을 가장 먼저 수행하며, 이를 통해 기술확립 후 콘크리트로의 응용기술을 개발하여 각 분야별로 실용화 전략을 수립하고자 함.

☐ 자기치유형 콘크리트는 균열제어형과 반응제어형 자기치유 콘크리트로 구별될 수 있으며, 이를 고려하여 기술 개발을 진행할 계획임.

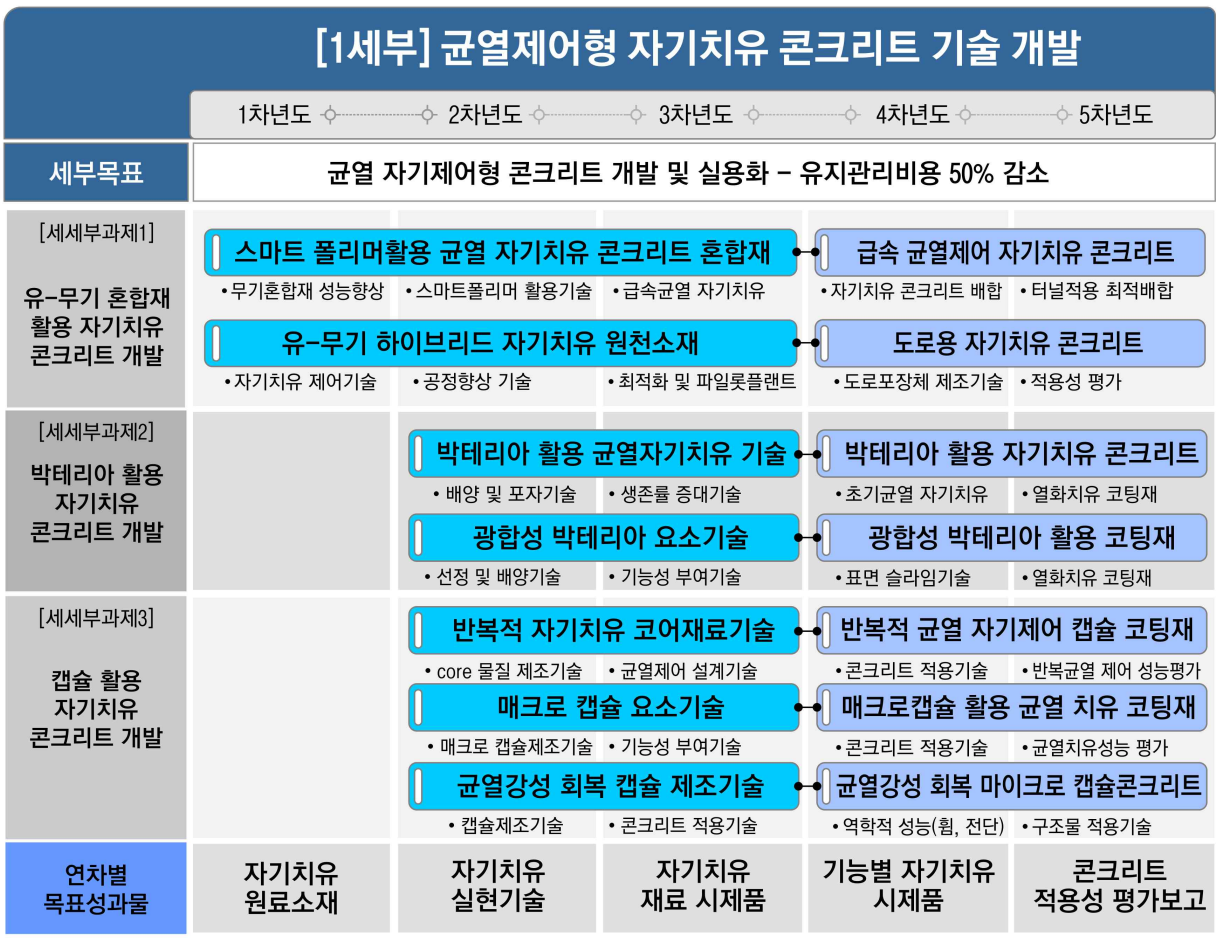
■ 궁극적으로 터널, 교량, 해상 및 지하구조물 등 유지관리가 어려운 구조물에 종합적으로 적용하여 유지관리 비용을 최소화하고자 함.

☐ 연구개발과 맞추어 이를 적용하기 위한 성능평가 표준, 제도, 시방서 등의 기반 구축도 함께 병행하여 연구 결과의 충실도를 높임.

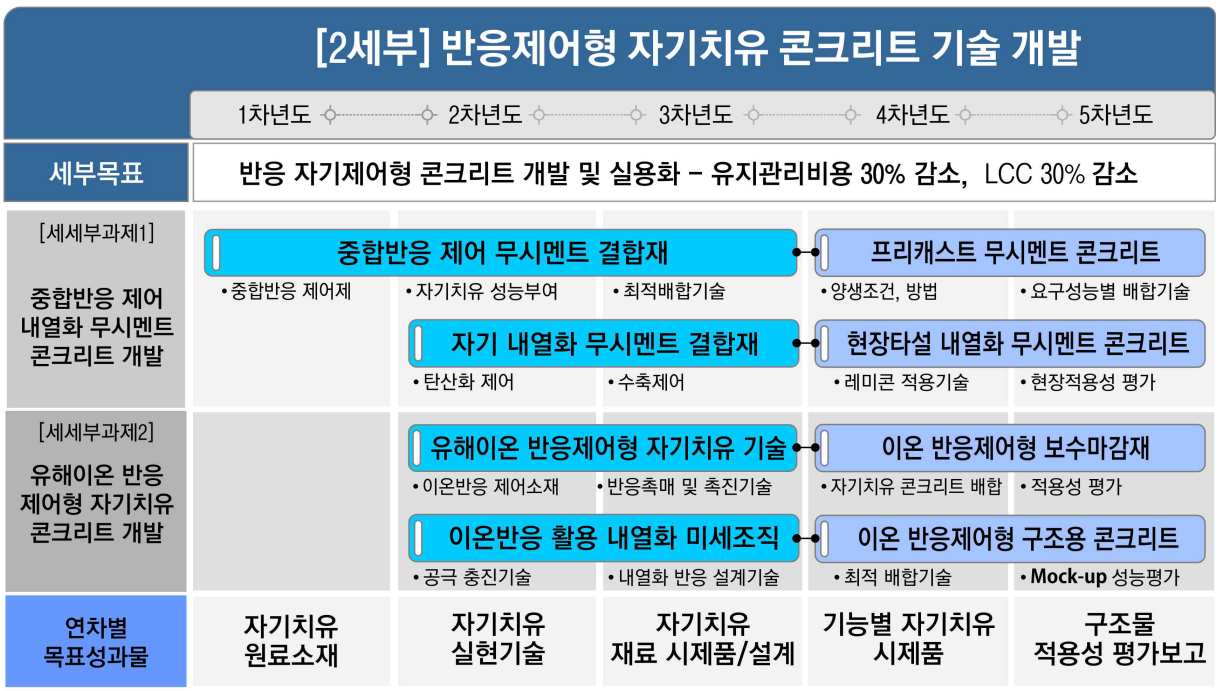
☐ 1단계(3년)의 경우 1, 2세부에서는 자기치유의 핵심기술을 개발하고, 3세부에서 이에 대한 정량적인 평가 및 표준화를 통해 상호 유기적인 기술개발을 할 수 있도록 하였음.

☐ 2단계(2년)에서 각 해당기술의 단점을 최소화하며, 장점을 최대한 살리는 방법(세세부기술별 또는 세부기술별 기술접목)으로 실제 구조물에의 적용기술 개발에 초점을 두고 있어 각 세부 및 세세부 기술에 대한 유기적 연계성이 높음.

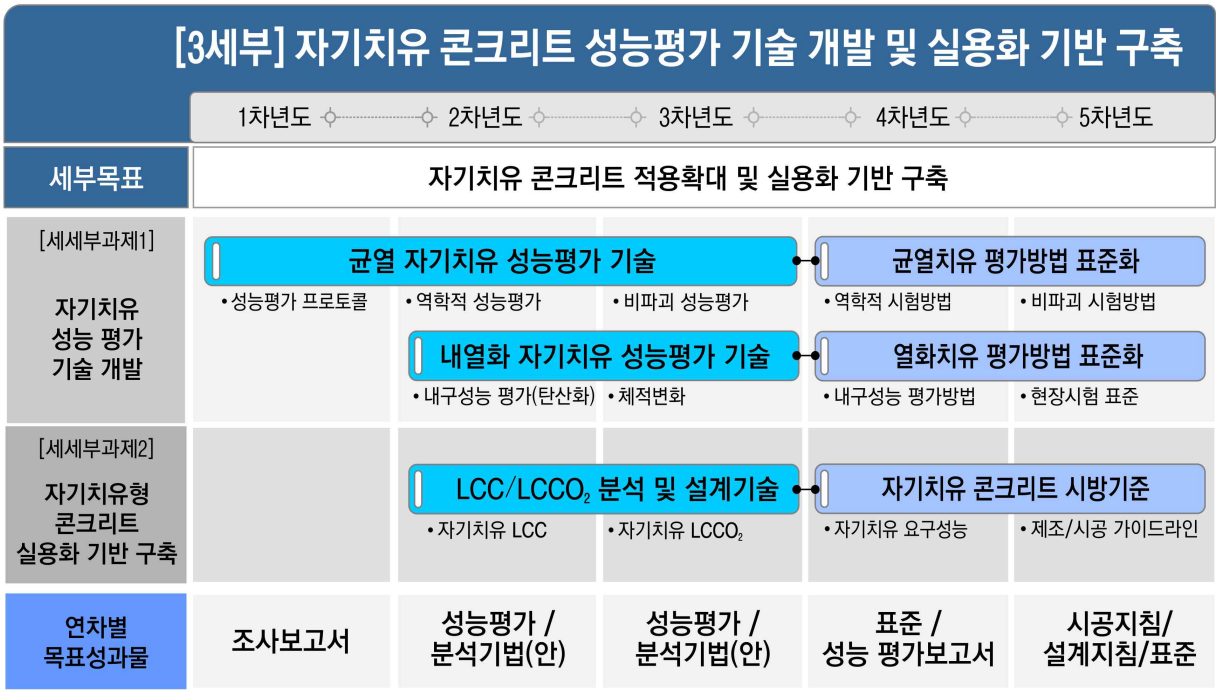
(2) 1세부


[1세부] 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
1차년도
2차년도
3차년도
4차년도
5차년도
세부목표
균열 자기제어형 콘크리트 개발 및 실용화 – 유지관리비용 50% 감소
[세세부과제1]
유-무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발
스마트 폴리머활용 균열 자기치유 콘크리트 혼합재
급속 균열제어 자기치유 콘크리트
•무기혼합재 성능향상
•스마트폴리머 활용기술
•급속균열 자기치유
•자기치유 콘크리트 배합
•터널적용 최적배합
유-무기 하이브리드 자기치유 원천소재
도로용 자기치유 콘크리트
•자기치유 제어기술
•공정향상 기술
•최적화 및 파일롯플랜트
•도로포장체 제조기술
•적용성 평가
[세세부과제2]
박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발
박테리아 활용 균열자기치유 기술
박테리아 활용 자기치유 콘크리트
• 배양 및 포자기술
• 생존률 증대기술
• 초기균열 자기치유
• 열화치유 코팅재
광합성 박테리아 요소기술
광합성 박테리아 활용 코팅재
• 선정 및 배양기술
• 기능성 부여기술
• 표면 슬라임기술
• 열화치유 코팅재
[세세부과제3]
캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발
반복적 자기치유 코어재료기술
반복적 균열 자기제어 캡슐 코팅재
• core 물질 제조기술
• 균열제어 설계기술
• 콘크리트 적용기술
• 반복균열 제어 성능평가
매크로 캡슐 요소기술
매크로캡슐 활용 균열 치유 코팅재
• 매크로 캡슐제조기술
• 기능성 부여기술
• 콘크리트 적용기술
• 균열치유성능 평가
균열강성 회복 캡슐 제조기술
균열강성 회복 마이크로 캡슐콘크리트
• 캡슐제조기술
• 콘크리트 적용기술
• 역학적 성능(휨, 전단)
• 구조물 적용기술
연차별 목표성과물
자기치유 원료소재
자기치유 실현기술
자기치유 재료 시제품
기능별 자기치유 시제품
콘크리트 적용성 평가보고

(3) 2세부


[2세부] 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
1차년도
2차년도
3차년도
4차년도
5차년도
세부목표
반응 자기제어형 콘크리트 개발 및 실용화 – 유지관리비용 30% 감소, LCC 30% 감소
[세세부과제1]
중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발
중합반응 제어 무시멘트 결합재
프리캐스트 무시멘트 콘크리트
•중합반응 제어제
•자기치유 성능부여
•최적배합기술
•양생조건, 방법
•요구성능별 배합기술
자기 내열화 무시멘트 결합재
현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트
•탄산화 제어
•수축제어
•레미콘 적용기술
•현장적용성 평가
[세세부과제2]
유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발
유해이온 반응제어형 자기치유 기술
이온 반응제어형 보수마감재
•이온반응 제어소재
•반응촉매 및 촉진기술
•자기치유 콘크리트 배합
•적용성 평가
이온반응 활용 내열화 미세조직
이온 반응제어형 구조용 콘크리트
•공극 충진기술
•내열화 반응 설계기술
•최적 배합기술
•Mock-up 성능평가
연차별 목표성과물
자기치유 원료소재
자기치유 실현기술
자기치유 재료 시제품/설계
기능별 자기치유 시제품
구조물 적용성 평가보고

(4) 3세부


[3세부] 자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축
1차년도
2차년도
3차년도
4차년도
5차년도
세부목표
자기치유 콘크리트 적용확대 및 실용화 기반 구축
[세세부과제1]
자기치유 성능 평가 기술 개발
균열 자기치유 성능평가 기술
균열치유 평가방법 표준화
• 성능평가 프로토콜
• 역학적 성능평가
• 비파괴 성능평가
• 역학적 시험방법
• 비파괴 시험방법
내열화 자기치유 성능평가 기술
열화치유 평가방법 표준화
• 내구성능 평가(탄산화)
• 체적변화
• 내구성능 평가방법
• 현장시험 표준
[세세부과제2]
자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축
LCC/LCCO2 분석 및 설계기술
자기치유 콘크리트 시방기준
• 자기치유 LCC
• 자기치유 LCCO2
• 자기치유 요구성능
• 제조/시공 가이드라인
연차별 목표성과물
조사보고서
성능평가 / 분석기법(안)
성능평가 / 분석기법(안)
표준 / 성능 평가보고서
시공지침/ 설계지침/표준

4.3.9 성과의 활용방안

▢ 각 중점 추진분야 및 세부과제별 목표 성과물의 활용방안은 다음과 같음.

중점추진분야	세세부과제	성과물	활용방안
1세부 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발	• 유-무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발	자기치유 혼합재 급속 균열 자기치유 콘크리트 자기치유 도로포장 콘크리트	• 터널, 수리구조물 등 유지보수가 힘든 콘크리트 구조물에 활용 • 도로 포장 콘크리트에 활용 • 일반 콘크리트 구조물 적용
	• 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발	자기치유 박테리아 열화성능 개선 박테리아 박테리아 자기치유 콘크리트	• 초기재령에서의 균열발생 가능성이 높은 신규 콘크리트 구조물이나, 열화성능 개선이 필요한 기존 콘크리트 구조물에 활용 가능함.
	• 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발	반복적 자기치유 캡슐 균열강성 증대 마이크로 캡슐 기능성 매크로 캡슐	• 반복적 균열이 발생할 수 있는 도로교 상판 구조물 등에 활용 • 일반 및 특수 건축구조물 • 터널, 수리구조물 등 유지보수가 힘든 콘크리트 구조물에 활용
2세부 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발	• 중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발	중합반응제어 무기결합재 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트	• 친환경 프리캐스트 제품 또는 레미콘에 활용가능성이 높음. • 높은 내열화 성능이 요구되는 콘크리트 구조물에 활용 가능성이 높음.
	• 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발	이온반응형 혼합재 이온 반응제어형 시멘트 복합체	• 신규 및 기존 철근 콘크리트 구조물에 활용 가능하며, 마감재 등의 보수재료로의 활용성이 높음. • 건축 마감재
3세부 자기치유 콘크리트 성능평가 및 실용화 기반 구축	• 자기치유 성능 평가 기술 개발	균열 자기치유 성능평가 방법 내열화 자기치유 성능평가 방법	• 자기치유 콘크리트의 재료성능 및 치유성능의 평가방법 및 기준으로 활용
	• 자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축	표준 및 시방서 자지치유 콘크리트 생애주기 비용분석 자지치유 콘크리트 생애주기 CO_2분석	• 다양한 자기치유 콘크리트의 관련기준으로 활용 및 확대 적용 가능함.

4.3.10 연구수행체계 제안

(1) 연구수행체계

▢ 본 연구의 수행은 기본적으로 연구단으로 구성, 연구단 산화의 각 세부과제별로 산 · 학 · 연 협동 연구체계를 구성하도록 함.

- 기존에 진행된 연구기반을 효과적으로 활용하기 위해 연구범위 및 방향을 세부과제간 상호 조율하고, 그에 따른 지속적인 연구개발 및 성과도출을 위해 필요에 따라 연구장비 및 인프라를 공유하는 방안을 마련토록 함.

(2) 기존 연구단과의 연계 및 활용전략

▢ 중복성이 있는 기존 국가 R&D사업 연구결과의 구체적인 활용 방안 및 연계전략 수립을 RFP에 명확히 기술

▢ 기존에 진행된 연구기반을 효과적으로 활용하기 위해 연구범위 및 방향을 상호 조율하고 그에 따른 지속적인 연구개발 및 성과도출을 위해 필요에 따라 소요비용을 공유하거나 공여하는 방안 마련

- 효과적이고 합리적인 연구개발사업의 운영
- 연구비의 중복투자를 배제하고 연구단 연구개발비 투자의 효율성 제고
- 본 사업의 궁극적인 목적달성을 위해 필수적인 실무 노하우의 축적을 위 한 기술 개발부문에 대한 집중 투자

(3) 산학연 연계전략

▢ 연구 추진의 효율성을 높이기 위해 주관기관은 산 · 학 · 연 · 관계의 협동 연구 체계를 구축하고 특히 핵심기술 전문가 양성을 위하여 체계적이고 조직적인 지원체계를 구축

▢ 기존 국책과제의 경우 학계에서 과제에 참여하여 해당분야 전문가로 양성되었던 대학원생들이 졸업을 하고 취업을 하면 전공분야와는 전혀 다른 업무를 하게 되어 전문성이 고사됨.

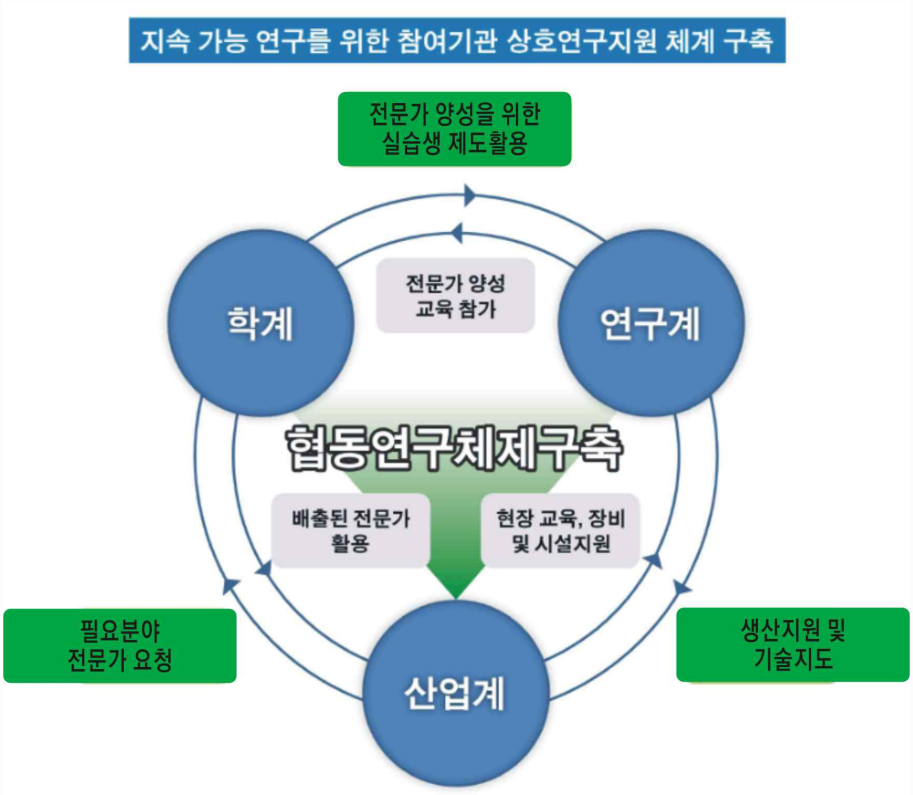
▢ 본 사업의 경우도 필요한 핵심기술 분야에 있어서는 양성된 전문가가 관련 전문분야에서 지속적으로 연구를 수행하여 해당분야 세계 최고의 전문가가 되도록 기반 조성

- 본 연구단에 참여할 주관기관은 본 사업을 통해 배출된 핵심기술의 전문가가 본 사업 완료시까지 지속적으로 관련분야 연구 활동을 할 수 있도록 산 · 학 · 연 연구지원 체계구축 계획을 제시함.

▢ 연구의 기획, 추진 및 실용화를 성공적으로 달성하기 위하여 산업계 전문 인력의 적극적인 연구 참여를 유도하기 위한 인센티브 추진

- 특히, 중소기업의 경우 본 사업단을 통해서 얻은 기술이 신기술 등을 지정 받도록 적극 지원하여야 하며 권리배분계획도 협약시 명확히 함.

- ▢ 방만한 연구단 운영을 방지하기 위하여 '세부과제 책임자'에게도 권한과 책임을 일부 위임함으로서 실무연구자의 연구효율성 증대
  - ■ '세부과제'별로 독자적인 워크샵 및 세부전략 수립
- ▢ 연구단내 세부과제간 상호 정보 교류를 위해 정기적인 발표회 및 워크샵 추진
- ▢ 동일한 목표를 갖는 세세부기술들 사이의 접근방법을 다양하게 하여 최종 연구개발 성과의 성공률과 실용화율을 높이기 위해 부분적인 경쟁체계 도입 유도
- ▢ 산·학·연 각각의 특성에 맞는 독자적 연구분야를 설정하고, 연구단을 중심으로 각각의 연구성과를 유기적으로 종합화하여 연구효율을 극대화
- ▢ 유럽의 자기치유 기술에 대한 HealCon, Shemat 연구 프로젝트를 선도하고 있는 기관(벨기에 Ghent대학, 네델란드 Delft 공대 등)과의 MOU 또는 기술협력 확보방안 마련 및 국내 자기치유 기술을 활용할 수 있는 한국도로공사, 한국수자원공사 등 국내 기술 전문기관 및 전문가 들과의 기술적 네트워크를 구축방안 마련



[그림 4-4] 산·학·연 협동연구체계 모식도

05

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

사전타당성 검토

5.1 정책적 타당성

5.1.1 국가전략의 중요성

▢ 동 연구단 개발기술은 우리나라가 '온실가스 감축' 의무를 이행하고 관련 시장을 선점하기 위한 건설분야 핵심기반기술로서 의미가 큼.

■ 우리나라의 경우, 국가 온실가스 감축목표를 2020년 배출전망치(BAU) 대비 30%를 설정하고 건설산업을 비롯한 산업전문야에서 동일한 목표달성을 위하여 다각적인 노력을 경주하고 있음.

※ 최근 발표된 박근혜정부의 경제혁신 3개년 계획에서 온실가스 감축 부담 절감을 위한 상설협의체 운영 등을 추진하는 등 배출권 거래제 대응에 취약한 중소기업 등 산업계 지원책을 제시함.

■ 건설재료는 건설산업의 인프라를 제공하는 기술분야로서 대량의 온실가스를 발생시키는 철강, 시멘트, 발전산업 분야와 밀접한 관계를 지니고 있으며 건축물의 냉난방 에너지절감 및 건설재료 제조산업을 포함하여 국가적 비중과 역할이 큼.

■ 시멘트·콘크리트 산업은 지속적 온실가스 감축이라는 국제적 니즈에 대응 필요성이 큰 분야이며 동 연구단은 시설물 전주기 온실가스 저감 비용을 기술적으로 지원할 수 있음.

※ 시멘트 산업은 우리나라 전체 온실가스 배출량의 7%, 에너지 소비량의 4%를 차지함*

※ 동 연구단은 시멘트 사용량 감소를 통한 '친환경 콘크리트 개발'에 대한 연구가 다수 수행되었지만, 친환경 콘크리트의 성능한계로 인해 건설시장에서 외면당하는 상황에서 현장 적용성 및 상업성을 갖춘 첨단 콘크리트 기술을 개발하고자 함.

▢ 동 연구단 개발기술은 스마트 유지보수 기술로서 지속가능한 사회를 구현하고 시설물 유지보수에 소요되는 사회적 비용을 획기적으로 절감하는데 기여함.

■ 건설산업은 산업구조의 고도화에 따라 초고층·초대형 복합구조물, 대형 장경간 구조물 등과 같은 첨단 콘크리트 구조물의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이에 대한 유지관리 비용도 크게 증가하고 있음.

■ 산, 황산염 등 열화인자에 노출된 오수처리장, 지하배수로, 하수처리설비 및 맨홀 등의 지하 콘크리트 구조물은 수화물의 빠른 용해로 인해 콘크리트의 부식이 급속하게 발생하므로, 사회적 유지관리 비용절감을 위한 고내구성, 고내화학성 재료에 대한 기술개발이 요구됨.

■ 동 연구단 개발기술은 자기치유 구조물 건설을 통해 시설물 부식, 균열 모니터링, 복구 등에 소요되는 비용을 절감할 수 있음.

※ 국내 여건상 총건설 투자액 대비 유지관리 사업비는 약 25%를 점유하고 있으므로, 유지관리 분야의 시장규모는 연간 약 27조원 규모로 예측됨.

▢ 동 연구단 개발기술은 신개념 콘크리트 제품 수출을 가능하게 함으로서 창조형 신시장 창출에 기여할 수 있음.

* '콘크리트와 환경', 한국콘크리트학회, 2010

- 현재까지 친환경 콘크리트에 대한 기술투자는 많이 이루어졌으나 시장을 선도하는 제품이 나오지 않고 있으며, 이는 시공성을 고려한 친환경 콘크리트의 단점을 현재까지 극복하지 못하고 있는 실정임.
- 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.
- "자기치유(self-healing) 기술"은 최근 선진국을 중심으로 연구 개발되고 있으며, 구조물 자체가 결함을 극복하는 기술로 특수구조물의 유지관리뿐만 아니라 친환경 콘크리트의 한계를 극복할 수 있는 기술로 판단됨.
- 동 연구단은 콘크리트 구조물 사용수명 50% 증대 및 유지관리 비용 30% 감소, 콘크리트 구조물 생애주기 CO_2 30% 감축이 가능하고 시장성이 확보된 자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 2020년까지 선진국 수준의 기술경쟁력을 확보하고 2030년 해외시장 선점 · 신시장 창출을 목적으로 함.
- 국내 콘크리트 재료관련 기업은 중소기업이 대부분으로서 개발기술의 국내 파급 및 국내 기업의 해외 진출 시, 창조형 해외 신시장 창출에 기여할 수 있음.

5.1.2 상위계획 부합성

(1) 정부/부처의 상위유관계획과의 부합성

▢ 동 연구단은 시장/기술 선점형 첨단 콘크리트 기술개발을 추진하여 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제('13)」, 「국가재정운용계획('13-'17)」, 「건설산업진흥기본계획('13-'17)」 방향성에 부합

- 동 연구단은 세계적으로 기초연구 및 기술도입단계에 속하는 자기치유형 친환경 콘크리트 핵심원천기술 선점을 도모하여 세계시장 선도형 성장과 미래선도 창의형 연구개발을 추진하는 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제('13)」 방향성에 부합함.*

※ 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제('13)」 국정기조는 기존 '선진국 추격형 경제성장'에서 '세계시장 선도형 성장'으로의 패러다임 변화를 포함

※ 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제('13)」는 국정목표인 '일자리 중심의 창조경제'달성을 위해 '창의와 혁신을 통한 과학기술발전'을 추진전략으로 설정하고 미래선도형 창의형 연구개발, 신산업 창출, 사업화 지원에 주력할 계획임.

※ 동 연구단은 미래시장을 선도할 수 있는 세계최고 수준의 자기치유 콘크리트 원천기술을 개발하는 것을 목표로 하고 있으며 경제성 문제로 시장적용이 미흡한 무시멘트 콘크리트 등 친환경 콘크리트 시장 창출을 도모함.

* 박근혜정부 국정비전 및 국정목표, 대통령직인수위원회, 2013

■ 동 연구단은 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 기초원천 역량 확보를 추진하고 있어 성장 잠재력 확충을 위해 창조경제의 기반이 되는 과학기술과 기초연구역량강화를 추진하는 「국가재정운용계획('13-'17)」의 방향성에 부합함.*

※ 「국가재정운용계획('13-'17)」의 R&D분야 투자방향은 성장 잠재력 확충을 위해 창조경제 기반이 되는 창조 · 융합 · 선도과학기술 및 기초연구 확대를 추진하고 있음. (기초연구 비중(%) : ('13) 36 → ('17) 40.0)

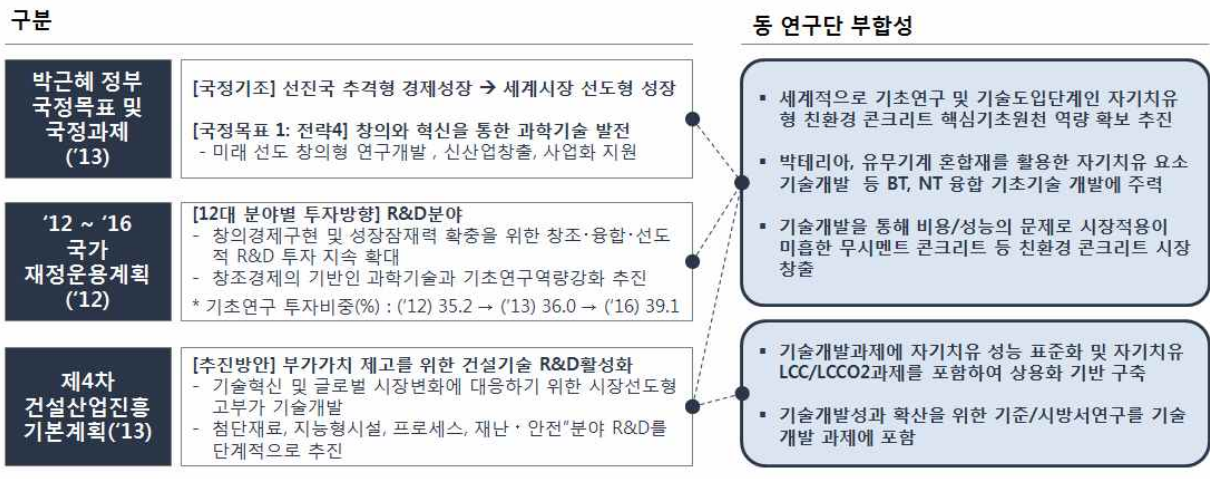
※ 동 연구단은 박테리아, 유무기계 혼합재를 활용한 자기치유 요소기술 개발 등 BT, NT 융합 기초기술 개발을 기술개발과제를 포함함.

■ 동 연구단은 건설기술의 근간인 첨단 콘크리트 재료 핵심 원천기술 및 실용화기술을 선점을 추진하여 「건설산업진흥기본계획('13-'17)」의 20개 추진방안 중'부가가치 제고를 위한 건설기술 R&D 활성화'의 방향성에 부합함.†

※ 「건설산업진흥기본계획('13-'17)」은 '건설산업의 지속발전 기반강화 '비전 달성을 위한 목표로 '건설산업 성장동력 강화'를 설정했으며 이를 위한 추진방안으로 '부가가치 제고를 위한 건설기술 R&D 활성화'를 채택함.

※ '부가가치 제고를 위한 건설기술 R&D 활성화' 추진방안은 '기술혁신 및 글로벌 시장변화에 대응하기 위한 시장선도형 고부가 기술개발' 필요성에 따라 건설기술 발전의 근간인 "첨단재료, 지능형시설, 프로세스, 재난 · 안전"분야 R&D를 단계적으로 추진하고자 함.

※ 동 연구단은 기술개발과제에 자기치유 성능 표준화 및 자기치유 $LCC/LCCO_2$ 평가기술개발과제를 포함하고 관련 기준개선/시방서연구를 수행하는 등 기술의 실용화 및 확산기반을 구축하고자 함.



[그림 5-1] 상위계획 부합성

(2) 정부/부처의 중장기 R&D계획과의 부합성

* '12-'16 국가재정운용계획, 2012

† 제4차 건설산업진흥기본계획(2013-2017), 2013

▢ 동 연구단 개발기술의 연구내용, 목적, 추진전략은 「제 3차 과학기술기본계획('13-'17)」 「건설교통기술 R&D 중장기계획('12)」 등 방향성, 연구범위에 부합됨.

■ 동 연구단 개발기술은 자기치유 콘크리트 기술의 기초원천기술 확보를 추진하며, 추진전략으로 국내외 최고기술보유기관과 협력연구 계획을 제시하고 있어 「제 3차 과학기술기본계획('13-'17)」 '중장기 · 안정적 기초연구 투자확대','기초연구 협력 활성화 및 성과확산'추진과제와 방향성 부합

※ 「제 3차 과학기술기본계획('13-'17)」의 '전략 3. 중장기 창의 역량강화'의 중점분야인 '창의적 기초연구 진흥'은 '기초연구의 세계선도 수준 진입'을 목표로 '중장기 · 안정적 기초연구 투자확대', '기초연구 협력 및 성과확산 촉진' 등을 추진과제로 채택함.

※ '중장기 · 안정적 기초연구 투자확대' 추진과제에서는 상기 국가재정운용계획과 마찬가지로 정부 R&D 예산 중 기초연구 비중 : 36%('13) → 38%('15) → 40%('17)를 목표로 설정하고 있음.

※ '기초연구협력 활성화 및 성과확산' 추진과제는 대학-공공(연)-산업체간 네트워크 구축 및 연구자 상호 파견 활성화, 기초연구부터 사업화까지 부처간 공동기획 프로그램 추진을 계획하고 있음.

※ 동 연구단은 핵심전략목표로서 "지속가능 구조재료 연구인프라 구축"을 설정하고 이를 위해 국제활동 기반구축, 교육 및 인력양성, 산학연 실용화 컨소시엄 운영 등 국내외 산학연 연구협력을 적극 추진할 계획임.

■ 동 연구단은 콘크리트 전주기 온실가스 저감에 기여하여 CCS(carbon capture storage)비용의 획기적 저감을 목적으로 하는 기초연구에 지원 강화를 추진하는 「기초연구진흥종합계획('13-'17)」의 방향성에 부합함.*

※ 「기초연구진흥종합계획('13-'17)」에서 기초연구를 통한 미래성장기반 확충을 중점추진과제로 채택하고 이의 일환으로 CCS비용의 획기적 저감을 목적으로 하는 기초연구에 지원 강화를 추진함.*

※ '기초연구를 통한 미래 성장기반 확충' 중점과제의 미래성장기반 핵심기술 확보 추진과제에서 바이오의료, 바이오에너지, 온실가스저감, 미래해양자원 확보, 해양과학조사 등 핵심기술 개발강화를 추진할 계획임.

■ 동 연구단의 개발기술은 온실가스 배출을 최소화한 친환경 무시멘트 콘크리트 기술과 시설물 유지관리 비용의 획기적 절감과 시설물 수명연장에 기여하는 자기치유 콘크리트 기술을 개발하여 콘크리트 생애주기 온실가스 배출을 저감하는 혁신적 요소기술로서 「창조경제실현을 위한 융합기술발전전략('13-'17)」의 중점기술인 '온실가스 감축 및 관리기술'에 해당함†

- 「창조경제실현을 위한 융합기술발전전략('13-'17)」의 중점기술인 '온실가스 감축 및 관리기술'에서는 향후 온실가스 처리비용의 저감을 위한 혁신적 요소기술개발에 투자를 확대할 계획임.

■ 동 연구단은 NT, BT 융합을 통한 자기치유형 콘크리트 기술개발 및 비용/성능의 문제로 시장적용이 미흡한 무시멘트 콘크리트 등 친환경 콘크리트 시장 창출을 목적으로 하고 있어

---

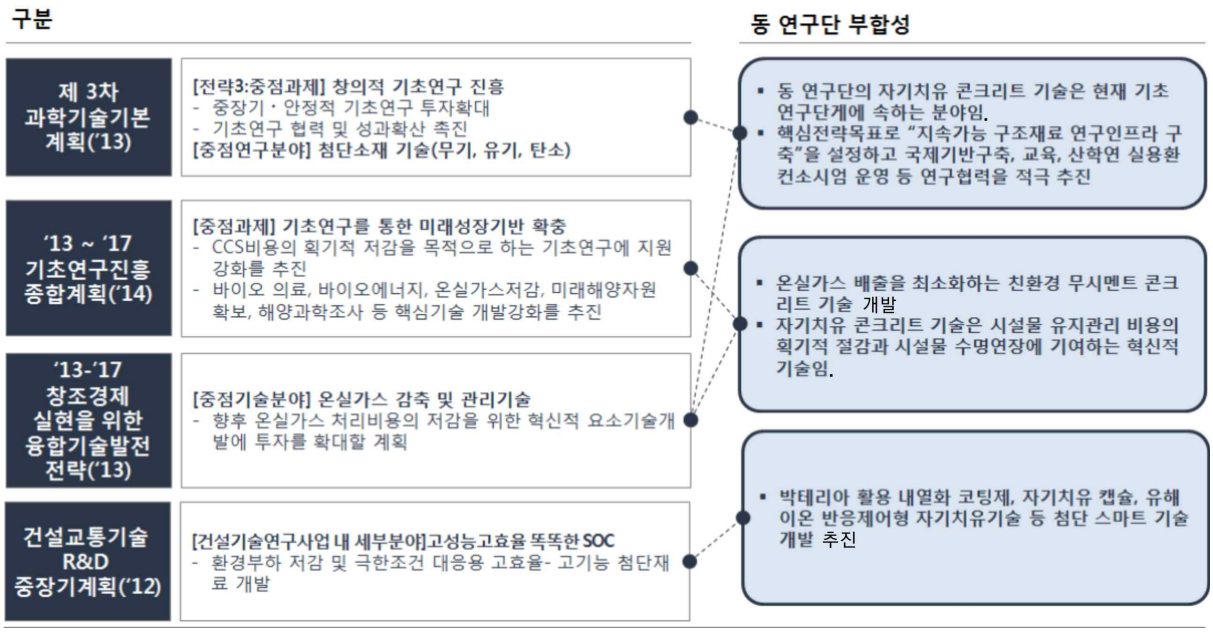
* 기초연구진흥종합계획(2013-2017), 2014년 시행계획(안), 국가과학기술심의회 심의자료, 관계부처 공동, 2014. 2. 27

† 창조경제실현을 위한 융합기술발전략(안, 2013-2017), 국가과학기술심의회 심의자료, 관계부처 공동, 2014. 2. 27

「제 3차 과학기술기본계획('13-'17)」의 '융합기술 · 제품 개발촉진', '혁신적 기술 · 제품의 수요창출'추진과제에 부합됨.

- 동 연구단의 기술개발 내용은 「제 3차 과학기술기본계획('13-'17)」의 중점 연구 분야인 '첨단소재기술(무기, 유기, 탄소)' 에 해당함.
- 동 연구단은 캡슐, 박테리아 등을 활용하는 고성능 스마트 자기치유기술개발을 추진하여「건설교통기술 R&D 중장기계획('12)」의 '건설기술연구사업'의 4대 분야 중 하나인 '고성능 · 고효율 똑똑한 SOC(Smart SOC)'에 해당함.

※ 「건설교통기술 R&D 중장기계획('12)」은 '건설기술연구사업'의 4대 영역 중 '고성능 · 고효율 똑똑한 SOC(Smart SOC)'는 '환경부하 저감 및 극한조건 대응용 고효율, 고기능 첨단재료 개발'을 추진하여 동 연구단의 기술개발 영역과 일치*



[그림 5-2] 중장기 R&D계획과의 부합성

5.1.3 정책적 추진의지

▢ 국토교통부는 동 연구단과 직접적으로 연관되는 첨단 건설재료 R&D 예산을 지속적으로 확충하고 있음.

- 국토교통부는 소재분야 지원금액을 지속적으로 증가시켜왔으며, '13년 기준 국토교통분야 R&D 지원예산 중 2.7% 수준인 소재분야 지원예산 비중을 '18년까지 4.6%로 확대할 계획임.†

* 2014년 국토교통기술 연구개발사업 시행계획, KAIA, 2014

† 소재 R&D 체계 정비(안) 최종, 국가과학기술우원회 심의 자료, 2010. 12. 9

※ 국토교통부 소재분야 R&D 지원예산은 '10년 119억원(2.1%) → '13년 179억원(2.7%) → '18년 397억원(4.6%)임.

[표 5-1] 국토부 소재분야 R&D 지원예산

연도	07년	08년	09년	10년	13년	18년
예산	108.7억원	111.3억원	153.3억원	119억원	179억원	397억원

[그림 5-3] 국토부 소재분야 R&D 지원예산 및 전체 국토교통 R&D 지원예산 중 비중

■ 국토교통부의 소재분야 R&D 예산 중, 동 연구단 개발기술과 직접적으로 관계되는 첨단건설재료 R&D 예산은 '13년 기준 129억원에서 '18년 397억원까지 확대할 예정으로 이를 통해 국토부의 동 연구단 관련 추진의지가 높은 것을 확인할 수 있음.*

※ 국토교통부 소재분야 R&D 예산은 첨단건설재료, 해양산업신소재 등 분야에 집중 지원될 계획임.

▢ 국토부 건설재료분야 R&D 목표인 '20년까지 시장창출형 신재료 확보, 시공·유지관리비를 30% 절감'을 통해 기술개발을 통한 재료분야 신시장 창출 의지를 확인 가능함.

■ 「건설교통기술 R&D 중장기계획('12)」에서 '건설기술연구사업'의 4대 영역 중 '고성능·고효율 똑똑한 SOC(Smart SOC)'분야 목표를 '2020년 시장창출형 신재료 5개 이상 확보 및 시공·유지관리비 30% 절감'으로 설정함.

* 上同

5.2 기술적 타당성

5.2.1 기술개발 계획의 적절성

(1) 기획연구 목표와 내용의 적절성

[연구목표의 구체성 분석]

▢ 본 연구단의 비전 및 목표를 구체적으로 제시함.

- 본 연구단의 비전은 “자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 건설분야 Low-tech 이미지 탈피, 2020년까지 선진국 수준 기술경쟁력 확보, 2030년 해외시장 선점에 기여”임.
- 상기 비전을 달성하기 위해 “하이테크 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술 개발을 통해 지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공/유지관리 비용 최소화”의 최종 목표를 두고 사용수명 50% 증대, 유지관리비용 30% 감소, 생애주기 CO_2 30% 감소, 세계적 수준의 원천기술 확보 등의 구체성 있는 실현목표를 설정하였음.
- 총괄목표 달성을 위해 1단계 “요소기술개발”, 2단계 “적용 및 실용화 기술개발”로 단계별로 구분하여 목표을 설정하였으며, 연차별 구체적인 달성목표를 적절하게 제시함.

▢ 총괄목표 설정은 정책, 기술, 시장동향 등의 분석결과로부터 활용되어 적절한 것으로 판단됨.

- 자기치유 재료 및 기술에 대한 현재의 기술수준과 격차를 파악하였으며, 이로부터 세계기술 수준진입 또는 기술선도를 위한 기술적 수준을 분석하여 제시하였음.
- 자기치유 기술은 세계적으로 기초연구단계로 원천기술 개발이 필요함.
- 유지관리가 어려운 터널, 원전구조물, 지하구조물 등에 유지관리비용 최소화 및 안전도 향상을 위해 관련 자기치유 콘크리트 기술개발 니즈가 상당히 높음.
- 사회기반시설물의 유지관리 비용 최소화를 위해서는 손상된 콘크리트의 강성 및 내구성을 향상시키는 균열 자기치유 기술과 반응제어를 통한 콘크리트 자체의 수명을 증대시킬 수 있는 내열화 기술이 필요함.

▢ 중점추진분야 및 세부과제는 총괄목표를 달성하기 위해 적절하게 도출되었으며, 세부과제의 연구목표 달성 시 총괄목표 달성이 가능할 것으로 판단됨.

- 중점추진분야 및 세부과제는 국내외 기술동향 조사, 논문 및 특허분석, 기술수요조사를 통하여 후보과제 pool을 구성하고 자기치유 친환경 기술관련 국내 전문가의 기술예측조사, 기술수준조사 등을 통해 객관적인 우선순위 평가를 실시하여 세부과제를 도출함.
- 총괄목표를 달성하는데 필요한 세부과제 정의 및 범위, 요소기술을 명확하게 제시하였으며, 본 과제 수행시 세부과제별 추진방법 및 전략의 보완이 필요할 것으로 판단됨.

▢ 제시된 목표달성을 위해 3개 세부과제와 세부과제별 목표를 정량적/정성적으로 제시하였음.

■ 또한 정량적 목표치를 성정하여 구체성을 높였음.

연차	1세부	2세부	3세부
1차년도	• 균열 자기치유 소재기술 개발	• 반응제어형 자기치유 소재 개발	• 역학적 특성에 대한 자기치유 성능평가기술 개발
2차년도	• 균열 자기치유 요소기술 개발	• 반응제어형 내열화 자기치유 요소기술 개발	• 내구적 특성에 대한 자기치유 성능평가기술 개발
3차년도	• 균열 자기치유 성능 최적화	• 반응제어 내열화 자기치유 성능 최적화	• 자기치유 현장성능평가기술 개발
4차년도	• 요구성능 맞춤형 균열제어 자기치유 기술개발	• 요구성능 맞춤형 반응제어 내열화 자기치유기술 개발	• 생애주기고려 자기치유 성능평가기술 개발
5차년도	• 균열제어 자기치유 활용기술 개발	• 반응제어 내열화 자기치유 활용기술 개발	• 자기치유 성능평가 표준화기술 개발

[연구내용의 논리성 및 적절성]

▢ 각 세부과제를 도출하기 위하여 국내외 경제/기술 동향, 인프라분석, 선행사업 분석을 실시하였고, 비전 및 목표 달성을 위한 연구개발 과제들로 구성되어 있음.

▢ 세부과제별 구성기술은 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 및 적용연구의 완성도 높은 연구결과를 위하여 소재, 제품, 현장적용을 포함한 연구 과제를 구성하여 연구내용의 논리성과 적절성이 높음. 또한 세부과제의 개념 및 범위를 구체적으로 제시하였으며 각 세부과제간의 연계관계에 대해 구체적으로 서술하였음.

■ 1세부과제의 구성기술은 “균열제어형 자기치유 콘크리트 기술개발”로 균열자기치유를 위한 무기질 혼합재, 박테리아, 캡슐 제조기술과 이를 활용한 콘크리트 또는 시멘트 복합체 개발을 포함함.

■ 2세부과제의 구성기술은 “반응제어형 자기치유 콘크리트 기술개발”로 재료 자체와 외부 이온과의 반응를 제어하여 내열화 콘크리트를 개발하는 것을 포함함. 또한 1세부 기술과 융합하면 시너지가 높음.

■ 3세부과제는 1, 2세부의 자기치유 기술에 대한 정량적 평가와 시방 및 기준 등의 표준화 작업을 포함함.

▢ 세부과제의 구성기술은 기술수요조사, 기술예측조사 및 전문가 자문회의 등을 통해 기술개발 필요 분야에 대해 논리적이며 타당하게 도출되었음.

■ 후보과제 도출, 중복성 검토, 우선순위 도출 등의 과정을 통해 세부과제 및 구성기술을 설정

하여 절차의 타당성을 높였음.

(2) 사업 추진전략의 적절성

[사업추진 위험요소를 고려한 추진전략 및 추진체계의 적절성]

▢ 본 기획연구의 추진전략은 외부전문가 활용, 산·학·연 협력조직체 구성 및 활용, 기술 및 시장동향 파악을 통한 요구사항 도출 등을 기반으로 수립되어 적절성이 높은 것으로 판단됨.

- 관련 분야 외부 전문가와 연구진의 네트워크 구성 추진, 외부 전문가 자문 등을 통해 기술개발의 전문성이 높아질 것으로 예상됨.
- 산·학·연 협력조직체 구성을 통해 각 분야의 의견을 수렴하는 과정을 거칠 것으로 예상됨.
- 본 연구는 자기치유 재료 및 콘크리트 개발, 활용증대를 위한 성능평가, 표준화를 위해서는 산·학·연 협력체계 구축이 필요하여 이를 위한 추진전략을 구성함.

▢ 국내외 기술 및 시장 분석을 통해 요구사항을 도출함으로써 향후 실용화 가능성이 높을 것으로 예상됨.

▢ 기술동향 분석 및 SWOT분석은 세부과제 수준에서 이루어졌으나, 연구 추진 단계에서는 보다 구체화된 분석이 필요할 것으로 판단되며 이에 따른 전략도출 프로세스를 명확히 할 필요가 있음.

[추진체계 및 절차의 적절성]

▢ 본 사업은 첨단 재료 개발과 이를 활용한 자기치유 콘크리트 개발분야, 성능평가 및 표준화 기술 개발 분야를 중점 연구 분야로 선정하고 총 3개 세부과제로 이루어진 사업으로 연구단 형태로 추진하는 것이 타당하다고 판단됨.

- 본 사업의 연구비(정부출연금 기준)는 약 160억원으로 국토교통과학기술진흥원의 연구수행 형태 구분 중 정부출연금 기준의 연구단 연구수행 형태구분에 만족함.

▢ 연구단 추진조직의 구성에 대해 상세하게 기술함.

- 본 사업은 요소기술 개발단계, 적용기술 개발단계, 실용화 단계 등 다양한 연구의 성격의 연구를 총괄해야 하므로 산학연관 간의 유연한 조직체계 및 객관적 관리가 가능한 연구기관 및 총괄 연구책임자가 필요함.
- 연구단의 총괄 운영, 지원 및 홍보를 위한 사무국을 구성하고 연구단 운영을 위한 운영위원회와 과제 평가를 위한 평가위원회를 연구단에 구성함.
- 기초응용 성격의 기술은 설계이론의 정립, 실험 등의 기술정립이 필요하므로 연구기관 또는 대학에서 주도하도록 추진함.
- 실용화 기술은 현장 적용 기술로 생산현장 또는 시공현장을 보유한 기업에서 주도하도록 추진함.

▢ 관련 부처 및 유관기관과의 지속적인 의견수렴 및 협력체계 구축

■ 관련 부처와의 지속적이고 상시적인 의견수렴 및 검증체계 구축을 통한 정책 및 제도 제안의 법제화 실현

■ 국내외 기술인프라 현황 및 연구개발 수행현황을 기반으로 과제와 관련하여 역량을 보유한 기관과의 협력 및 차별화 방안을 모색함.

▢ 본 연구단의 달성 여부를 평가하기 위한 성과지표 및 측정방법을 세부과제 수준으로 나누어 제시함.

■ 각 세부과제에서는 학술적 성과와 지식재산권을 공통지표로 설정하고 각 세부과제의 특성에 맞는 지표를 설정하여 세부목표에 부합하도록 지표를 설정하고 이에 따른 설정 근거를 제시하였음.

▢ 기대되는 성과의 활용도와 활용계획이 적절하게 설정되어 있어, 향후 본 연구단의 성과물들이 기술을 필요로 하는 현장 및 수요처에서 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 판단됨.

▢ 추후 이 연구단을 추진하는 주체가 성공적인 사업목표달성을 위해 성과관리체계의 효과적인 방안을 검토하는 것이 필요함.

(3) 기술로드맵의 우수성

▢ 본 연구단의 기술개발 로드맵은 각 세부기술의 구성기술 수준에서 연도별로 성과물이 구체적으로 제시되어 있어, 연구개발계획의 완성도 측면에서 적절한 것으로 판단됨.

■ 기술개발 로드맵은 세부과제의 목표, 세부과제의 단계별 목표, 세부과제의 단계별 목표성과물, 각 구성기술의 목표성과물로 이어져 선후관계가 명확하게 드러나도록 작성됨.

▢ 구성기술 수준의 연도별 성과물은 단계별 세부목표 및 세부과제의 성과목표를 토대로 작성되어 있음.

▢ 본 연구단의 기술개발 로드맵은 국내외 동향 및 환경분석 결과를 반영하여 도출된 세부과제를 대상으로 하고 있으므로, 기술적/경제적 측면의 분석결과를 반영한 것으로 판단됨.

▢ 본 연구단의 기술로드맵은 1단계 핵심기술 개발, 2단계 적용기술 개발로 이루어 졌으며, 각 핵심기술이 성공적으로 개발 될 수 있도록 세부 및 세세부가 구성되어 있음.

5.2.2 기술수준 및 성공가능성

(1) 보유기술수준 및 기술개발의 기대수준

▢ 본 연구단 관련분야의 선진국 대비 국내 기술수준을 파악하기 위해 특허 분석 및 기술동향분석을 수행하였고, 이를 기초자료로 활용하여 기술수준을 조사함.

■ 첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 기술의 국내 기술수준은 43.2%임.

■ 콘크리트 자기치유 기술분야의 세부 기술분야별 기술격차는 전반적으로 확대 추세에 있으며, 미

생물(박테리아)활용 콘크리트 자기균열치유기술의 기술격차가 상대적으로 빠르게 확대되고 있음.

- 콘크리트 자기치유 요소기술분야의 최고기술보유국 기술성숙도(TRL)는 확정된 시스템 내 시제품 제작이 이루어지는 단계(5)이며, 국내는 아이디어가 정립되는 단계(2)임.
- 자기치유형 콘크리트의 LCC 및 $LCCO_2$ 평가기술분야의 해외 기술성숙도(TRL) 단계는 실험실규모의 핵심성능평가 단계(4)로서 타분야 대비 성숙도가 낮음.

▢ 자기치유 기술분야의 경우 논문 및 특허 출원 분석을 통해 세계적으로 기초연구단계로 판단되며, 일부 기술만 시제품 제작 단계에 도달한 것으로 보임.

- 따라서, 연구단 형태의 집중적이고 협력적인 연구체계를 통해 5년 후 자기치유 콘크리트 기술은 선진국 수준에 도달할 것으로 보임. 일부 기술은 기술선도가 가능할 것으로 판단됨.

(2) 기술개발 역량 및 잠재력

▢ 기술개발을 위한 전문인력 보유 정도, 기술 구축정도, 연구 시설 및 설비, 기술 투자지원 등에 대하여 국내와 선진국과의 인프라 수준을 비교 분석하였음.

- 각 세부과제관련 전문 인력은 선진국 대비 부족하지만 대부분의 분야에서는 국내 연구진들로 기술개발이 가능하다고 판단됨.
- 세계 선도형 콘크리트 구조물 혁신 기술은 첨단기술(나노, 바이오, IT 기술) 분야가 융합된 것으로 국내각 대학 및 국가 연구소 등의 연구 인력들이 해당 기술 분야에 연구 개발을 하고 있음. 국내의 경우 세계적 수준의 나노, 바이오, IT 전문가 들이 상당수 있어 다학제적인 연구개발을 추진하면 상당한 시너지를 얻을 수 있을 것으로 확신함.

(3) 기술개발의 성공가능성

[기술적 위험요인]

▢ 본 사업의 성공적인 수행을 위해 새로 발생할 수 있는 기술적 위험요인에 대해 세부과제별로 서술하였음.

- 현재까지 세계적으로 관련 연구의 실용화가 성공하지 못한 가장 큰 이유는 원천기술의 확보 및 고가의 재료 사용에 따른 경제성 문제로 분석됨.
- 시설물의 유지관리 측면에서 대형 민간기업의 관심도가 낮아 기술투자 등에 의한 기술혁신에 한계가 있는 것으로 판단됨.
- 보수적인 건설풍토에 따른 신기술의 현장적용 또는 상용화의 추진이 늦어짐.
- 개발 기술을 활용하기위해 관련 설계기준 등의 제정이 필요하며 다수의 시공실적이 필요함.
- 건설분야의 바이오, 나노 전문가의 부족

▢ 정부지원 지연 및 기술 개발 지연 시 최근 급격히 변화하고 있는 건설기술에 있어 선진국과의 기술격차 증대로 인해 해외 기술의존도가 더욱 커질 것으로 판단됨.

▢ 연구개발 추진상 국내외 시장 및 기술동향의 변화에 따른 기술개발 방향에 대한 수정이 필요할 경우 국내외 형성된 기술적 네트워크를 통해 연구개발 방향 설정 및 추진체계 변경을 할 수 있는 추진전략을 확보하고 있음.

[기술개발 성공가능성]

▢ 본 기획연구의 시장진출을 위한 목표 대상물을 명확히 제시함.

▢ 기술 개발의 경제적, 기술적, 사회적 측면의 파급효과 등을 구체적으로 제시함.

- 경제적 측면에서 건설재료 분야의 신규시장 창출 및 선도가 가능함.
- 기술적 측면에서 기능성 건설자재 및 소재 생산성 향상과 적용기술개발을 통해 다양한 구조물의 활용이 가능할 것으로 기대됨.

▢ 추후 기술수준 및 역량대비 기술개발 성공가능성과 시장창출 및 진입 등 시장 경쟁력 측면에서의 성공가능성에 대한 논의가 필요함.

▢ 친환경 자기치유 콘크리트 기술은 세계적으로 초기 연구단계로 정부의 적극적인 지원과 여러 분야의 전문가들로 구성된 유기적인 연구팀 구성을 통해 기술개발이 성공적으로 완료할 수 있으며, 기술선도도 가능할 것으로 판단됨.

5.2.3 기존 사업과의 중복성

▢ 본 연구단에서 추진하는 과제는 기획과정을 통해 기존 연구와의 중복성을 검토하여 기존연구와 연계, 활용, 차별화 전략을 제시하여 중복성을 최소화한 것으로 분석됨.

- 본 연구에 대한 중복성 조사는 1차적으로 NTIS 자료 및 각 부처 R&D 계획 자료를 이용하여 중복가능성이 있는 사업과 과제들을 선별함.
- 1차 선별된 중복 가능 과제에 대해 면밀한 검토를 하였음.

▢ 첨단기술을 활용한 자기치유형 친환경 콘크리트 개발은 기존 과제와 중복성이 없는 원천기술을 확보할 수 있는 과제로 판단됨.

5.3 경제적 타당성

5.3.1 경제성 분석

▢ 경제성 분석은 '첨단기술활용 자기치유 친환경 콘크리트 개발' 사업의 가치에 대하여 분석함으로써 사업에 대한 정확한 이해에 필수적인 과정임.

- 경제성 평가는 편익-비용 비용(B/C ratio), 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR), 회수기간 등의 방법론을 통하여 사업의 경제성을 파악하는 과정을 말함.
- 예측된 시장규모를 통하여 수요, 비용단가, 할인율 등 주요 변수의 변화 등 불확실성이 경제성에 미치는 영향에 대한 분석이 필요함.

▢ 분석방법 : 비용/편익 분석(Benefit/Cost Analysis)

- B/C ratio는 분석 대상에 비용규모 대비 혜택규모의 비율로 1보다 높으면 경제성이 높은 것으로 판단함.

▢ 분석대상

- 기획 연구의 해당 시장에 대해 비용/편익 분석 결과를 도출함.

▢ 편익범위

- 본 기획연구의 기술개발에 의한 편익은 미래 시장규모 추정이 가능한 시장재화에 대한 추가 창출 부가가치이므로 시장접근법을 사용함.
- 연구개발 기간을 5년으로 하고, 실용화 기간을 3년으로 가정할 경우 연구결과물이 시장에 반영되는 시기는 2023년 이후라고 할 수 있으며, 기술개발에 의한 독점적 지위를 이용한 시장 지속년수를 5년(2023년~2027년)으로 가정함.

▢ 미래시장규모 예측

- 국내 시장 대상을 건설시장 전체보다는 시설물 유지관리 시장을 본 연구의국내 시설물 유지관리 시장을 본 연구의 진출 목표 시장으로 설정하고 해당 시장에 대한 규모를 예측한 결과 2023년 약 10조4백억, 2027년 16조9천억으로 예측됨.

[표 5-2] 국내 시설물 유지관리 시장규모 예측

구 분	시장규모(십억원)	현재가치(십억원)
2023년	10,404	6,426
2024년	11,756	6,882
2025년	13,284	7,372
2026년	15,011	7,896
2027년	16,963	8,457
합 계	67,418	37,032

국내 시설물 유지관리 시장규모(2013년 기준): 3조7천억원(대한시설물유리관리협회)
시설물 유지관리 시장 연평균 증가율 전망(건교부, 제2차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획)
- 2011년 ~ 2020년: 9~12% → 10% 적용
- 2021년 ~ 2030년: 12~15% → 13% 적용
할인율: 5.5% 적용

▢ 비용의 설정

■ 각 세부과제의 향후 5년간 예산(안)으로 정부출연금과 민간참여금의 합한 금액으로 산정함.

■ 추가적인 숨은 비용이나 후속 비용이 없기 때문에 총비용은 5년간 예산과 동일한 214억원이며 현재가치로는 약 198억원으로 계산됨.

[표 5-3] 비용추정 결과

구 분	비 용(십억원)	현재가치(십억원)
2015년	1.4	1.3
2016년	5.4	4.8
2017년	5.4	4.6
2018년	5.4	4.3
2019년	4.0	3.1
합 계	21.4	18.1

▢ 편익 산출을 위한 요소

■ R&D에 의한 부가가치의 증대를 환산하기 위하여 연구개발부문 예비타당성조사 표준지침을 기반으로 시장수요접근법을 통해 산정함.

▢ 편익(Benefit) = 미래시장규모 × 시장점유율 × 기술성공률 × 기술기여도 × 부가가치비중× R&D기여도

※ 미래 시장규모 : 국내 시설물 유지관리 시장(2023년~2027년)

※ 시장 점유율 : 2023년 10%, 2024년~2025년: 15%, 2026년~2027년: 25%로 가정

※ 기술개발성공률 : 2010년 산업기술연구회 등에 대한 국정감사 결과에 의하면 정부 연구개발(R&D)성과의 사업화 성공률이 30% 수준으로 조사되었으나, 초기 단계의 연구로 26%로 가정하였음.

※ 기술기여도 : 제품/공법에서 기술이 차지하는 비중(25%)

※ 부가가치 비중 : 한국은행의 2009년 산업연관표를 기준으로 건설업종의 40.1%를 적용함.

※ R&D 기여도 : 본 연구 과제를 통해 달성된 기술 개선 비중(10.9%)

※ 할인율 : 할인율은 10년 만기 국고채금리인 4.3%와 예비타당성조사 일반지침 기준의 5.5% 중 5.5%를 적용함.

[표 5-4] 편익추정 결과

구 분	편익(십억원)	현재가치(십억원)
2023년	3.0	1.8
2024년	5.0	2.9
2025년	5.7	3.1
2026년	10.7	5.6
2027년	12.0	6.0
합 계	36.3	19.5

[비용편익 분석 결과]

▢ 본 기획 대상 사업에 대한 비용편익 분석결과 B/C ratio가 1.08로 나타나 경제성 측면이 긍정적인 것으로 판단됨.

[표 5-5] 비용편익분석 결과

구 분	비용(현재가치)	편익(현재가치)	B/C Ratio
2023년	18.1	19.5	1.08

5.3.2 파급효과

(1) 과학기술적 파급효과 분석

▢ 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고수준 기술 확보를 위한 초석 마련

- 기술 성숙도 및 수준 : 추격 위치 → 선도적 위치(선진국과 비슷한 수준 또는 그 이상의 수준으로 발전)
- 원전구조물, 터널, 지하구조물 등 유지보수가 어려운 사회기반 시설물에 대한 효율적인 유지관리 방안 도출

▢ 콘크리트 구조물 사용수명 50% 증대

▢ 자기치유 기술은 원자로, 항공기 제조 분야 등 안전 분야의 기술적 파급효과가 높음.

(2) 사회적 파급효과 분석

▢ 자기치유형 기술 개발을 통한 사회기반 시설물 유지관리 비용절감 효과 기대

- 전체 유지관리 비용 30% 감소를 통한 국가예산 절감효과

▢ 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 적용을 통한 환경 및 에너지 절감효과 기대

- 친환경 콘크리트의 사용 및 생애주기를 고려 유지관리 물량감소를 통한 $LCCO_2$ 30% 감소 기대

▢ 자기치유 콘크리트의 기술개발을 통해 건설 산업의 신성장 동력원으로 기대

- 자기치유관련 전문인력 양성 및 취업증대 효과 예상
- 해외건설 수주 등 건설 산업의 수출 증대

(3) 예산 적정성 분석

▢ 유사사업 등과의 비교 등을 활용한 정부연구개발 투자비 규모의 적정성, 세부 사업/과제별 사업비의 적정성을 분석하였음.

- 국토해양부에서 수행한 유사사업의 연구비를 비교분석한 결과 연구기간 대비 사업비 규모는 기존의 유사한 연구단과의 연구 규모 등을 고려한다면 사업비 규모는 적정한 것으로 판단됨.
  - 탄소저감형 건설재료 기술개발 연구단(5년, 182억)
- 연구의 성공은 예산 지원 정도에 따라 결정될 수 있기 때문에 과제지원기관의 적극적인 예산 지원은 매우 중요할 것임.

▢ 각 세부과제의 구성기술별 정부지원 및 민간 예산을 연차별로 구분하여 제시함.

- 각 세부과제의 공동과제별 인건비, 직·간접비를 연차별로 구분하여 제시함.
- 인건비는 연구원을 4단계로 구분하여 참여율을 고려하여 산정함.
- 직접비는 연구장비, 재료비, 연구활동비, 연구수당으로 구분하여 산정함.

5.4 종합분석

[정책적 타당성]

▢ ‘자기치유형 친환경 콘크리트 개발’ 기술은 스마트 유지보수 기술로서 지속가능한 사회를 구현하고 시설물 유지보수에 소요되는 사회적 비용을 획기적으로 절감하는데 기여할 것으로 판단됨.

▢ 본 연구단은 시장/기술 선점형 첨단 콘크리트 기술개발을 추진하여 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제(‘13)」, 「국가재정운용계획(‘13-‘17)」, 「건설산업진흥기본계획(‘13-‘17)」 방향성에 부합함.

- 세계적으로 기초연구 및 기술도입단계에 속하는 자기치유형 친환경 콘크리트 핵심원천기술 선점을 도모하여 세계시장 선도형 성장과 미래선도 창의형 연구개발을 추진하는 「박근혜정부 국정목표 및 국정과제(‘13)」 방향성에 부합함.

▢ 기초원천 역량 확보를 추진하고 있어 창조경제의 기반이 되는 과학기술과 기초연구역량강화를 추진하는 「국가재정운용계획(‘13-‘17)」의 방향성에 부합하며, 「건설산업진흥기본계획(‘13-‘17)」 중 ‘부가가치 제고를 위한 건설기술 R&D 활성화’의 방향성에 부합함.

▢ 연구내용, 목적, 추진전략은 「제 3차 과학기술기본계획(‘13-‘17)」 「건설교통기술 R&D 중장기계획(‘12)」 등 방향성, 연구범위에 부합함.

[기술적 타당성]

▢ 본 연구단은 “자기치유형 친환경 콘크리트 기술개발을 통해 건설분야 Low-tech 이미지 탈피, 2020년까지 선진국 수준 기술경쟁력 확보, 2030년 해외시장 선점에 기여”하기 위해 사용수명 50% 증대, 유지관리비용 30% 감소, 생애주기 CO_2 30% 감소, 세계적 수준의 원천기술 확보 등의 구체성 있는 실현목표를 설정하여 이를 실현하기 위한 세부기술을 구성하였음.

- 유지관리가 어려운 사회기반시설물(터널, 원전구조물, 지하구조물 등)에 유지관리비용 최소화 및 안전도 향상을 위해 관련 자기치유 콘크리트 기술개발 니즈가 상당히 높음.
- 세부과제별 구성기술은 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 및 적용연구의 완성도 높은 연구결과를 위하여 소재, 제품, 현장적용을 포함한 연구 과제를 구성하여 연구내용의 논리성과 적절성이 높음. 또한 세부과제의 개념 및 범위가 구체적으로 서술되었으며 각 세부과제간의 연계관계에 대해 구체적으로 서술하였음.

▢ 첨단기술을 활용한 자기치유형 친환경 콘크리트 개발은 기존 과제와 중복성이 없는 원천기술을 확보할 수 있는 과제임.

[경제적 타당성]

- ▢ 본 기획 대상 사업에 대한 비용편익 분석결과 B/C ratio가 1.08로 나타나 경제성 측면이 긍정적인 것으로 판단됨.
- ▢ 자기치유형 기술 개발을 통한 사회기반 시설물 유지관리 비용절감 효과 기대되며, 기술개발을 통해 건설 산업의 신성장 동력원으로 기대됨.
- ▢ 자기치유 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고수준 기술 확보를 위한 초석 마련할 수 있는 연구임.

06

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

인력투입계획 및 소요예산 산정

6.1 연구일정에 따른 인력투입계획

▢ 세부연구과제를 수행하는데 소요되는 적정 연구인력을 산정하고, 이를 토대로 세부과제의 투입인력을 산정하여 총 소요인력 투입계획을 결정함.

6.1.1 전체사업 인력투입계획

▢ 연차별 투입 연구인력

(단위 : M/M)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합계
책임연구원급	105.0	406.3	408.5	410.9	317.6	1648.3

▢ 상세 투입연구인력

■ 총괄 투입연구인력

(단위 : M/M)

	1세부	2세부	3세부	합계
책임연구원급	770.9	394.0	483.5	1648.3

■ 세부과제별 투입인력

(단위 : M/M)

책임연구원급	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
1세부	40.3	194.9	205.6	189.7	140.4
2세부	26.0	96.4	98.8	101.2	71.6
3세부	38.6	115.1	104.2	120.0	105.6

6.2 연구 소요예산 산정

6.2.1 개요

▢ 세부과제별 상향식으로 전체사업 소요예산 산출

▢ 세부연구과제를 수행하는데 소요되는 적정 연구비를 산정하고, 이를 토대로 전체 소요 연구비를 결정함

6.2.2 전체사업 소요예산

▢ 총괄 소요예산

(단위 : 백만원)

분류	1차년도		2차년도		3차년도		4차년도		5차년도(max)		합계	
	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간	정부	민간
총괄	1,000	350	4,000	1,350	4,000	1,360	4,000	1,350	3,000	1,030	16,000	5,440
1세부	400	140	1,950	660	2,050	700	1,900	640	1,400	480	7,700	2,620
2세부	250	90	950	320	950	320	1,000	340	700	240	3,850	1,310
3세부	350	120	1,100	370	1,000	340	1,100	370	900	310	4,450	1,510

▢ 예산 항목별 소요예산

(단위 : 백만원)

예산항목	세부항목	예산항목												
		단가(월급여)	1차년도	비율(%)	2차년도	비율(%)	3차년도	비율(%)	4차년도	비율(%)	5차년도	비율(%)	소계	비율(%)
인건비	책임연구원급	6,036천원	633.8	46.9	2,452.5	45.8	2,465.6	45.8	2,480.1	46.5	1,917.3	47.6	9,949	46.4
	소계		633.8	46.9	2,452.5	45.8	2,465.6	45.8	2,480.1	46.5	1,917.3	47.6	9,949	46.4
직접비	연구장비재료비		410.0	30.4	1,660.0	31.0	1,660.0	30.9	1,591.0	29.8	1,160.0	28.8	6,481	30.2
	연구활동비		139.2	10.3	573.1	10.7	586.0	10.9	597.3	11.2	450.5	11.2	2,346	10.9
	연구수당		32.0	2.4	129.4	2.4	130.4	2.4	128.6	2.4	99.2	2.5	520	2.4
	소계		581.2	43.1	2,362.5	44.2	2,376.4	44.2	2,316.9	43.5	1,709.7	42.4	9,347	43.6
간접비			135.0	10.0	535.0	10.0	538.0	10.0	533.0	10.0	403.0	10.0	2,144	10.0
합계			1,350	100	5,350	100	5,380	100	5,330	100	4,030	100	21,440	100

6.2.3 세부과제별 소요예산

▢ 1세부 소요예산

(단위 : 백만원)

예산항목	세부항목	예산항목												
		단가(월급여)	1차년도	비율(%)	2차년도	비율(%)	3차년도	비율(%)	4차년도	비율(%)	5차년도	비율(%)	소계	비율(%)
인건비	책임연구원급	6,036천원	243.4	45.1	1,176.3	45.1	1,240.8	45.1	1,145.1	45.1	847.5	45.1	4,653	45.1
	소계		243.4	45.1	1,176.3	45.1	1,240.8	45.1	1,145.1	45.1	847.5	45.1	4,653	45.1
직접비	연구장비재료비		174.0	32.2	841.0	32.2	884.0	32.1	818.0	32.2	606.0	32.2	3,323	32.2
	연구활동비		56.6	10.5	272.7	10.4	288.2	10.5	265.9	10.5	196.5	10.5	1,080	10.5
	연구수당		12.0	2.2	59.0	2.3	62.0	2.3	57.0	2.2	42.0	2.2	232	2.2
	소계		242.6	44.9	1,172.7	44.9	1,234.2	44.9	1,140.9	44.9	844.5	44.9	4,635	44.9
간접비			54.0	10.0	261.0	10.0	275.0	10.0	254.0	10.0	188.0	10.0	1,032	10.0
합계			540	100	2,610	100	2,750	100	2,540	100	1,880	100	10,320	100.0

▢ 2세부 소요예산

(단위 : 백만원)

예산항목	세부항목	예산항목												
		단가(월급여)	1차년도	비율(%)	2차년도	비율(%)	3차년도	비율(%)	4차년도	비율(%)	5차년도	비율(%)	소계	비율(%)
인건비	책임연구원급	6,036천원	157.2	46.2	581.6	45.8	596.1	46.2	610.6	46.3	432.4	46.0	2,378	46.1
	소계		157.2	46.2	581.6	45.8	596.1	46.2	610.6	46.3	432.4	46.0	2,378	46.1
직접비	연구장비재료비		112.0	32.9	416.0	32.8	422.0	32.7	432.0	32.7	308.0	32.8	1,690	32.8
	연구활동비		28.8	8.5	116.0	9.1	112.5	8.7	114.8	8.7	84.4	9.0	456	8.8
	연구수당		8.0	2.4	29.4	2.3	30.4	2.4	30.6	2.3	21.2	2.3	120	2.3
	소계		148.8	43.8	561.4	44.2	564.9	43.8	577.4	43.7	413.6	44.0	2,266	43.9
간접비			34.0	10.0	127.0	10.0	129.0	10.0	132.0	10.0	94.0	10.0	516	10.0
합계			340	100	1,270	100	1,290	100	1,320	100	940	100	5,160	100.0

▢ 3세부 소요예산

(단위 : 백만원)

예산항목	세부항목	예산항목												
		단가(월급여)	1차년도	비율(%)	2차년도	비율(%)	3차년도	비율(%)	4차년도	비율(%)	5차년도	비율(%)	소계	비율(%)
인건비	책임연구원급	6,036천원	233.2	49.6	694.6	47.3	628.7	46.9	724.3	49.3	637.4	52.7	2,918	49.0
	소계		233.2	49.6	694.6	47.3	628.7	46.9	724.3	49.3	637.4	52.7	2,918	49.0
직접비	연구장비재료비		124.0	26.4	403.0	27.4	354.0	26.4	341.0	23.2	246.0	20.3	1,468	24.6
	연구활동비		53.8	11.4	184.4	12.5	185.3	13.8	216.7	14.7	169.6	14.0	810	13.6
	연구수당		12.0	2.6	41.0	2.8	38.0	2.8	41.0	2.8	36.0	3.0	168	2.8
	소계		189.8	40.4	628.4	42.7	577.3	43.1	598.7	40.7	451.6	37.3	2,446	41.0
간접비			47.0	10.0	147.0	10.0	134.0	10.0	147.0	10.0	121.0	10.0	596	10.0
합계			470	100	1,470	100	1,340	100	1,470	100	1,210	100	5,960	100.0

07

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

과제 제안요구서

7.1 과제 제안요구서(RFP)

7.1.1 총괄 RFP

과제명	첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발
(1) 연구개발 목표	
	■ 균열제어형 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발 ■ 균열제어형 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발 ■ 균열제어형 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발 ■ 중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발 ■ 유해이온 반응 제어형 콘크리트 개발 ■ 자기치유 성능평가 기술 개발 ■ 자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축
(2) 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발의 필요성	□ **국내환경 측면의 필요성** ■ 급격히 변화하는 건설재료 시장에서 미래형 건설 청정소재에 대한 국내 요소기술 개발 및 확보 전략이 미흡한 상태임. - 로우테크(Low-tech) 이미지를 탈피하고 해외시장 견인을 위한 첨단기술(Bio/Nano/Eco Tech.)을 접목한 새로운 개념의 건설재료기술 개발 필요 - 급변하는 콘크리트 재료 시장은 '80~'90년대 고성능 개념에서 '00~'10년대 지속가능 및 친환경 콘크리트로 패러다임 변화 후 새로운 성능개념의 콘크리트에 대한 개발요구 증대 ■ 고도성장기의 사회기반 시설물뿐만 아니라 신규, 특히 사회적 중요도가 높으면서 유지보수가 어려운 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물 등)의 유지관리 중요성 증대 - 최근 균열 등 콘크리트의 손상을 저감시키거나 자기치유(Self-healing)할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 이에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있음. - 다양한 산이나 황산염 등 열화인자에 노출된 오수처리장, 지하배수로, 하수처리설비 및 맨홀 등의 지하 콘크리트 구조물은 수화물의 빠른 용해로 인해 콘크리트의 부식이 급속하게 발생하므로, 사회적 유지관리 비용절감을 위한 고내구성, 고내화학성 재료에 대한 기술 개발이 요구되고 있음. ■ 시설물 고령화 대비 효율적 유지관리의 필요성이 높아지고 있음. - SOC 신규투자 감소(3.5조/년 감소) 및 유지관리 투자 급증 - SOC 고령화 시대 진입(고령화율 9%, 10년 후 20%) - 미국과 일본의 인프라 고령화 추세를 살펴보면 국내의 경우 2020년부터 본

격적인 고령화시대가 도래될 예정임.

※ 시설물 고령화 대비 효율적인 유지관리 필요성이 대두되고 있음.

■ 국내 시설물 유지관리 산업 시장은 지난 1994년 성수대교가 붕괴했던 19년 전에는 5,400억원에 불과했으나 2012년에 3조5,000억원을 기록하면서 6배 이상 증가함(이데일리, 2013.10.17).

- 건설분야 매출액 대비 8%로 선진국과 비교하면 상당히 부족한 수준임.

※ 이탈리아는 시설물 유지관리 투자 비중은 매출액 대비 57.2%에 달하며, 영국 38.0%, 독일 26.0%, 일본 21.7% 등의 순임.

- 건설투자 중 유지관리 투자 비중은 21.7%로 일본의 약 37% 수준임.

■ 기존의 균열 치유개념의 자기치유 개념을 확장하여 콘크리트의 미세조직구조 변화에 따른 손상의 치유 및 첨단기술을 융합을 통한 자기성능 개선을 위한 기술 개발이 필요하며, 이러한 첨단기술 활용 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 기술 수요가 급증함.

■ 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 선진국과의 기술격차 증가

- 해외 건설시장에서의 경쟁력 강화를 위한 연구·산업 인프라 구축 필요
- 자기치유형 콘크리트의 현 기술수준 : 일본 및 유럽의 약 40% 수준
- 친환경 콘크리트의 현 기술수준 : 호주 및 유럽의 약 60% 수준

■ 자기치유형 친환경 콘크리트의 원천기술기반 산업화 네트워크 취약

- 산학연 네트워크 형성 및 경쟁력 강화를 위한 인프라 관리체계 필요
- 자기치유형 친환경 콘크리트에 대한 맞춤형 목표성능 정립 필요

▢ 국외 환경 측면의 필요성

■ 미국 오바마 정부는 건설산업을 6대 국가전략산업 중 하나로 지원하고 있으며 CMS, CERF, FIATECH와 같은 건설 IT 융합사업을 진행, 유지관리/에너지 비용 50% 감소, 생산성 30% 향상, 공해 50% 감소 등의 국가 건설목표를 설정하여 추진함.

■ 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.

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

■ 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.

■ 최근 들어 균열 등 콘크리트의 손상을 저감시키거나 자기치유(Self-healing)할 수 있는 스마트 구조물의 개념이 대두되면서 실제 건설 현장에서의 적

용을 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 포함됨.
- 자기치유 콘크리트 요소기술은 세계적으로 기술 개발 초기단계로 선택과 집중을 통한 효율적인 연구개발을 통한 원천기술 확보로 기술역전 또는 기술선도가 가능할 것으로 판단됨.
- EU는 'Self-healing materials for prolonged lifetime'라는 주제로 HealCON-Project (2013~2017)를 진행 중임.
  - 벨기에 Belie 교수(UGhent)가 프로젝트의 Coordinator임.
  - 공동연구기관은 UGhent, Avecom, TU Delft, Acciona, TUM, TTI, VTT, COWI, DTI, CEINNMAT, Devan and Fescon로 기초연구기관부터 실용화를 위한 기업들로 구성되어 있음.
- SheMat 프로젝트는 "Training Network for Self-Healing Materials: from Concepts to Market"라는 주제로 유럽 "Marie Curie" programme에 의한 "Seventh Framework Programme" 범주에서 지원받은 Training and Research Network임.
  - 독일 Fraunhofer Institute for Environmental, Safety and Energy Technology(UMSICHT)의 주도로 다음과 같은 기관이 참여하고 있음.

※ Partner로 8개 기관이 참여

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

※ Associated Partner로 4개 기관이 참여

: 프랑스 Arkema, 독일 BIOKON international, 네델란드 Ceratec과 KLM

□ 기술동향

▢ 국내기술 동향

- 최근 건설기술은 기존 구조물의 경우 지속적인 보수 및 유지관리를 통해 구조물의 노후화 방지 및 내구수명 증대의 확보를 도모하고, 신설구조물에서는 내구설계를 적용하여 구조물의 열화인자 차단에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정임.
  - 구조물의 균열 발생은 시설물 전체에 사용성 문제를 발생하기 때문에 이를 제어할 필요성이 증대되고 있으며, 원전구조물, 해양구조물, 터널 등 보수작업이 용이하지 않는 사회 기반시설물에 대한 안정적인 보수공법이 필요함.
- 자기치유 콘크리트 기술은 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 약 20여 년 전에 개념의 도입과 함께 시작되었으며 국내에는 2004년 이후 그 개념이 소개되어 현재는 일부 기초연구가 진행되고 있으며, 현재까지 콘크리

트 응용연구는 미흡한 실정임.

- 현재 국내외적으로 연구되고 있는 자기치유 기술은 크게 3가지로 미생물 활용기술, 마이크로캡슐 활용기술 및 시멘트계 무기물질 석출 활용기술로 구분됨.
- 국내 미생물 활용기술은 대표적으로 경북대 김화중 교수 연구진을 중심으로 진행되고 있음.
  - 미생물이 석출하는 광물을 이용해 콘크리트의 염해저항성을 증진시키는 연구를 수행함.
  - Sporosarcina pasteurii 종외에 Calcite를 석출시키는 새로운 종류의 미생물을 발견하여 성능을 비교함.
  - 미생물의 활동에 의한 Calcite 석출이 염해 저항성에 긍정적 영향을 미침.
- 미생물 활용기술은 자연계의 유무기 복합 구조를 모방한 차세대 재료로서 각광받을 수 있지만 상대적으로 높은 pH의 콘크리트에서 활발히 활동할 수 있는 미생물 발굴 및 미생물이 보다 쉽게 미네랄(탄산칼슘 등)을 석출할 수 있는 방법을 구현하는 것이 해결해야 할 과제로 판단됨.
- 연세대학교 정찬문 교수는 한국건설생활환경시험연구원(KCL)과 공동으로 마이크로 캡슐을 활용하여 기존의 기술과는 다른 새로운 개념의 자기치유 코팅기술을 개발하였음.
  - 균열치유 메커니즘은 1) 콘크리트 표면에 자기치유 코팅재를 도포한 후 균열 발생, 2) 코팅된 캡슐이 파괴되어 내부의 자기치유 재료가 균열부에 이동, 3) 특별한 촉매제 없이 태양광(UV)에 의한 Photopolymerization에 의해 경화
- (주)케어콘에서는 수용성 폴리머를 벽재물질(wall materials)로, 콘크리트용 화학혼화제(수화 촉진제, 지연제 등)를 심물질(core materials)로 사용한 마이크로 캡슐을 제조하여 콘크리트의 수화반응을 제어하기 위한 연구를 수행하였음.
- (주)인트켐은 일본 동경대학교와 협력하여 자기치유 성능을 가진 무기계 혼합재를 이용한 콘크리트 개발 연구를 수행하였음.
- 국내에서 자기치유 기술에 대해 기초적인 자료를 확보하기 위한 연구를 수행한 바는 있으나, 기술 선진국에 비해 기술완성도가 상당히 낮아지고, 실제 적용이 가능한 연구결과를 확보하지 못한 상태임.

▢ 국외기술 동향

- 세계적으로 네델란드 델프트 공대에서 박테리아 활용 자기치유 콘크리트에 대한 연구가 가장 활발히 진행되고 있음.
  - Sporosarcina pasteurii 같은 미생물의 탄산칼슘 석출작용을 이용해 콘크리트에 자기치유 능력을 부여해 미세 균열 및 결함을 치유함.
- 네델란드 델프트 공대의 van Breugel 교수의 연구결과에 의하면, 자기치유 콘크리트를 구조물에 적용할 경우 초기 건설비용은 다소 높지만 생애주기 비용 관점에서 상당한 장점이 있는 것으로 보고되고 있음.

■ 최근 일본에서는 오존처리 시스템을 도입한 상하수 처리 시설의 고내구화를 위하여 오존의 산화분해 작용으로 인한 유기계 재료의 적용한계 및 화학물질에 대한 우려에 대응하기 위하여 미생물과 티탄공법을 융합한 자기정화용 피복공법의 검토가 진행되고 있음.

■ 마이크로 캡슐을 활용한 기술은 미국 일리노이 대학의 White 교수가 마이크로 캡슐을 이용한 폴리머 재료의 균열 자기치유 연구를 Nature 저널에 발표하면서 관심을 갖기 시작하였으며 현재에도 활발한 연구가 진행 중임.
- 적용 원리는 코어(core)물질로서 중합성 단량체를 함유한 마이크로 캡슐을 제조하여 재료 내부에 분산시켜 균열이 발생함에 따라 캡슐이 파괴되어 중합반응을 일으켜 균열을 치유하는 방법임.
- 에폭시계 접착제를 사용하였으며, 이는 에폭시가 기계적 성질과 화학적 성질이 우수한 고분자인 동시에 점성이 낮으며 상온에서 반응이 가능함.

■ Mookhoek 등의 연구결과에 따르면 캡슐에 의해 균열 치유된 콘크리트 파단면을 조사한 결과 치유는 단 한번만 일어나며 치유제가 유출되어 치유가 일어나면, 그 부위에 치유제 부족 등의 단점이 있음.

■ Dry 등의 다양한 연구자들은 Cyanoarylate(CA)를 이용하여 구형 마이크로 캡슐대신 원형 유리캡슐(Cylindrical glass capsule)을 적용하여 균열 자기치유를 실시하였으며, 다량의 PE섬유를 같이 사용하여 자기치유 효율성을 높였음.
- 유사한 원리로 Joseph 등은 유리 튜브(glass tube)를 균열 발생위험 단면에 layer 및 grid로 설치하여 자기치유 성능을 확보함.

■ 동경대학교 Kish 교수팀은 시멘트 재료의 자연치유 능력을 확대하여 Expansive agent, Geo-material, Chemical agent($NaHCO_3$, Na_2CO_3, Li_2CO_3 등) 등의 무기질 혼합재료를 사용하여 콘크리트 균열부에서 Re-hydration을 촉진하여 균열을 치유하는 기술을 개발함.
- 2007년 동인도 철도회사에서 실제 터널공사에 성공적으로 시범 적용함.

■ Michigan 대학의 Li 교수팀은 섬유보강 콘크리트(ECC)에 대해 플라이애시 등의 포졸란 반응, 지속적인 수화반응 등을 이용하여 미세균열에 치유 성능을 확보하였음.
- 균열 폭이 100㎛ 이하의 경우 포졸란, 수화반응에 의해 시멘트계 재료 자체의 치유능력에 의해 회복이 가능함. 섬유보강 콘크리트(ECC)의 경우 외부하중에 의해 충분한 연신율을 확보하면서 균열 폭을 50㎛ 이하로 제어 가능함.

■ 네델란드 델프트 공대, 벨기에 겐트 대학을 중심으로 균열제어를 위한 자기치유 기술뿐만 아니라 반응제어를 통해 탄산화, 수축 등 콘크리트의 열화성능을 향상시키는 기초연구가 수행되고 있음.

■ 세계 각국의 여러 연구자들이 자기치유 콘크리트의 성능 복원 정도를 평가하는데 각기 다른 방법을 활용하기 때문에, 개발 중인 다양한 자기치유 콘크리트 기술들에 대한 상호 비교 평가가 어려움.
- 자기치유 성능에 대한 실내 및 현장에 대한 정량적인 평가방법의 도출이 필요하며, 적용확대를 위해서는 표준화 작업이 선행되어야 함.

- 현장적용 후 효율적 관리를 위해, 구조물의 사용중단 없이 안전진단 및 자기치유 성능 평가를 수행해야 하므로, 첨단기술을 활용한 비파괴 검사(Non-Destructive Testing) 기법 개발이 필요함.

■ 자기치유 콘크리트의 적용은 일반 콘크리트 구조물보다는 보수가 용이하지 않고 균열에 따른 2차 피해가 발생할 수 있는 구조물에 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.

- 지속적인 균열피해가 발생하는 교량, 도로, 지하철, 철도시설 등과 같은 사회 인프라 구조물과 균열 누수 빈도가 잦은 지하시설물, 하수암거, 전력구, 통신구나 원전구조물, LNG 구조물, 해양구조물, 발전소 등에서의 우선 적용이 바람직함.

(3) 연구개발 내용

▢ 1세부과제 : 균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발

■ 유-무기 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발

- 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재 개발
- 터널 구조물용 급속 자기치유 콘크리트 개발
- 도로용 자기치유 포장 콘크리트 개발

■ 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발

- 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발
- 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 개발

■ 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발

- 반복적 균열제어 마이크로캡슐 코팅재 개발
- 매크로캡슐 활용 균열 자기치유 코팅재 개발
- 균열 강성 회복용 마이크로 캡슐 자기치유 콘크리트 개발

▢ 2세부과제 : 반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발

■ 중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발

- 메카노케미컬 합성이용 중합반응 제어 자기치유 결합재 개발
- 프리캐스트/현장타설 반응제어 무시멘트 콘크리트 개발

■ 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발

- 이온 반응형 균열 및 공극 충진소재 개발
- 유해이온 반응 제어형 구조용 및 마감용 시멘트 복합체 개발

▢ 3세부과제 : 자기치유 콘크리트 성능평가 및 실용화 기술 개발

■ 자기치유 성능 평가 기술 개발

- 균열 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발
- 내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발

■ 자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축

	- 자기치유 콘크리트 표준화 기술 개발 - 자기치유형 콘크리트의 생애주기 Cost(LCC), CO_2($LCCO_2$) 분석 및 설계 기술 개발 - 자기치유형 콘크리트 시방기준 개발
(4) 연구개발 추진방법	
□ 추진전략	■ 세부과제 및 세부기술과제별 연차별, 단계별 성과목표 및 성과 지표 설정 ■ 세계 최고 수준의 원천기술 확보를 위한 전략 추구 - 자기치유관련 원천소재 또는 치유성능 향상을 위한 원천기술 개발을 통한 기술 선진국 도약을 위한 전략 추구 ■ 핵심 아이디어 도출단계에서부터 지적재산권 확보 추진 ■ 성과 목표와 지표간 상호 연계성 확보 ■ 철저한 성과 검증 추진 - 연구 계획 시부터 달성이 가능한 성과목표 및 성과지표 제시 - 연구 진행 중 성과목표의 달성 및 관리방안을 정립하고 주기적인 성과 모니터링을 실시
□ 추진체계	■ 본 연구단은 기초·원천기술, 응용 및 실용화, 표준화 기술 등 다양한 성격의 연구를 총괄해야 하므로 산·학·연 간의 유연한 조직체계 및 객관적 관리가 가능한 연구기관 및 총괄 책임자가 필요함. ■ 본 연구과제는 3개의 과제로 구성되어 있으며, 추진체계는 산·학·연 공동연구를 기본으로 하며, 필요시 건설재료 분야에서 선도적 위치에 있는 해외 주요기관 및 전문가와 공동연구를 추진할 수 있음. ■ 참여 연구기관 간 협력을 통한 기술 개발 과제간 연계성 확보 및 협조 체계 구축이 필요하며, 바이오, 화학분야의 전문기관 또는 전문가들을 포함한 다학제간 연계를 통한 협동연구가 필요함.
(5) 최종성과물	
□ 주요 최종성과물	□ 1세부 과제 ■ 일반강도 및 고강도용 자기치유 성능 촉진 콘크리트 혼합재 ■ 터널 및 고속도로 포장용 자기치유 콘크리트 ■ 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 ■ 박테리아 활용 초기균열 자기치유 콘크리트 ■ 캡슐 활용 기능성 코팅재 ■ 균열강성 증진 마이크로 캡슐 콘크리트 □ 2세부과제 ■ 중합반응 제어 무기결합재

■ 이온반응 제어 원천소재

■ 프리캐스트/현장타설 무시멘트 콘크리트

■ 유해이온 반응 제어형 콘크리트

□ 3세부과제

■ 균열 자기치유 정량적 성능평가 기술

■ 내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술

■ 자기치유 콘크리트 표준화 기술

- KS(안), ISO(안), 자기치유 시방서(안)

CTE 연차별 성과목표	마일스톤 목표 TRL					평가방법
	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	
유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	4	5	5	6	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
박테리아 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	3	4	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
캡슐 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	2	3	4	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
중합반응 제어 무시멘트 콘크리트 (재료·자재)	2	3	3	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
유해이온 제어 콘크리트 (재료·자재)	2	3	3	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
자기치유 성능평가 (소프트웨어)	3	4	5	5	6	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 표준화 달성여부

(6) 연구기간 및 지원 예산

□ 전체

■ 총 연구기간 : 2015년 1월 ~ 2019년 12월(5년)

■ 연구비 예산 : 214.4억원 (정부출연금 160억원, 민간부담금 54.4억원)

(7) 기 타

7.1.2 1세부과제 RFP

과제명	균열제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발

(1) 연구개발 목표

■ 유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 개발

■ 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 개발

■ 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 개발

(2) 연구개발 필요성 및 기술동향

□ 연구개발의 필요성

□ 국내환경 측면의 필요성

■ 최근 건설기술은 기존 구조물의 경우 지속적인 보수 및 유지관리를 통해 구조물의 노후화 방지 및 내구수명 증대의 확보를 도모하고, 신설구조물에서는 내구설계를 적용하여 구조물의 열화인자 차단에 상당한 노력을 기울이고 있는 실정임.

■ 구조물의 균열 발생은 시설물 전체에 사용성과 장기적인 내구성에 문제를 발생시키기 때문에 이를 제어하기 위하여 충분한 내구성을 확보할 수 있는 적절한 구조물의 설계와 고품질 시공이 이루어지고 있음.

■ 그러나, 콘크리트의 본질적인 재료특성과 예기치 못한 시공 중 결함 및 환경 요인 등에 의하여 불가피하게 균열이 발생하는 경우가 생김. 이러한 균열은 공용 중의 유지관리를 통하여 지속적으로 보수해야 함.

■ 대부분의 콘크리트 구조물의 보수공사는 작업환경이 열악하여 사고 위험 발생 가능성이 높은 공사로서, 근본적으로 사고 예방을 위한 차원에서도 콘크리트의 내구성이 중요하게 대두됨.

■ 건축물 지하층, 주차장 등의 지하시설물이나 교량, 터널, 댐, 수처리 구조물 등의 콘크리트 구조물은 균열 및 누수에 의한 피해가 크게 발생하고 있어 보수 이외의 근본 대책이 필요로 하고 있음.

- 일반적인 유지관리로 충분하지 않은 특수 구조물과 보수 작업이 용이하지 않는 사회 기반시설물의 경우 초기 비용이 더 소요되더라도 균열에 대한 유지관리를 안정적으로 할 수 있는 보수 공법이 필요함.

■ 염해, 균열, 동결융해 등의 복합적 열화 피해가 지속적으로 발생하는 콘크리트 포장에 적용하여 지속가능하고 고내구성을 가지는 자기치유 교면 포장 콘크리트 공법 개발이 필요함.

■ 오수분뇨 및 축산폐수와 같은 부식성 환경에 노출된 콘크리트 구조물은 각종 열화현상과 화학적 침식으로 인해 내구수명이 10~20년 미만으로 유지관리 비용이 지속적으로 증가하고 있는 실정임.

■ 기존 폴리머계 코팅재료에서는 코팅막 탈락현상이 자주 발생하여 구조체 내구년 증가에 대한 효율성이 현저히 떨어짐. 또한 에폭시계 코팅재료는 장기

	사용 시 습기나 열에 의한 변형이 심각함. ■ 다양한 환경하에 노출된 콘크리트의 자기치유 기술에 대한 국가 경쟁력 제고를 위한 박테리아 활용 자기치유 원천기술 개발 및 확장이 필요함. ▢ 국외 환경 측면의 필요성 ■ 선진국에서는 이미 건설된 시회기반시설물에 대한 유지관리 비용이 꾸준히 증가함에 따라 이에 대한 대책이 꾸준히 연구되고 있음. - 선진국에서는 콘크리트의 내구성 확보가 가장 중요한 성능으로 인정받고 있는데, 유지관리에 대한 비용 및 사회적 손실이 신설 콘크리트 구조물에 대한 비용을 상회하고 있기 때문임. ■ 건설 선진국인 미국, 유럽 및 일본 등에서는 기존의 재료보다 성능이 우수한 재료를 적용하여 고품질화 고내구성을 지향하고 있으며, 이를 통하여 초기 비용은 증가되지만 수명이 연장되고 유지관리비용이 절약되므로 전체적인 생애주기비용을 감소시키려는 노력이 행해짐. ■ 이에 따라, 장수명 고내구성의 건설재료 및 구조물 개발에 대한 연구를 넘어서서, 결함이 발생하더라도 스스로 치유하여 구조물의 목표 성능과 수명을 꾸준히 유지할 수 있는 자기치유 콘크리트와 같은 신기술에 대한 연구가 수행되고 있는 실정임. ■ 외국의 첨단보수재의 무분별한 수입 및 적용에 따른 국내 자생연구의 부족 ■ 증가하는 콘크리트 구조물의 유지관리 비용 증대에 따른 경제적이고 친환경적인 균열보수 기법의 필요성 증가 ■ 1900년대 미국에서는 상·하수도시설과 같은 부식성 환경하의 콘크리트 부식 문제가 최초로 보고되었으며, 이후 각국에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음. ■ 일본의 경우에는 1980년대에 화학적 부식으로 인한 콘크리트의 내구수명 및 파손의 우려를 인식하여 콘크리트의 방식 도장 지침 개정을 시작함. 1991년 콘크리트 방식 지침(안)을 작성하였고, 이후 연구 및 시공실적 등이 활발히 이루어져 1993년과 1998년에 개정됨.
□ 기술동향	▢ 국내기술 동향 ■ 자기치유 콘크리트에 관한 연구는 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서 활발히 진행 중에 있으나, 국내에서는 아직 원천기술을 확보하지 못한 실정으로 해외 기술의 도입이나 해외기술의 확인 수준단계임. ■ 무기계 자기치유 콘크리트 관련 기술의 경우 2013년 이후 소재 제조 기술 및 적용 기술이 국내 기업에 의해 도입되어, 관련 기술 향상에 크게 기여하였지만, 기술 의존도에서 탈피할 수 있는 원천소재는 개발되고 있지 않음. ■ 국내 교면포장은 방수 기능을 부여하는 재료에 따라서 공법이 다양하게 적용되고 있음. 특히 라텍스 등의 폴리머계에 의존적으로 방수기능을 부여하고 있어 과도한 비용 상승이 야기되고 있음. ■ 국내에서는 김화중 교수팀의 생체반응을 이용한 균열보수기법에 대한 연구

가 유일하며, 박테리아를 활용한 균열보수 가능성을 제시하였음.

- 사용 활성 박테리아는 Sporosarcina Pasteurii, Halomonas aquamarina, Halomonas hydrothermalis, Bacillus massiliensis, Arthrobacter crystallopoietes, Lysinibacillus fusiformis 등이며 균열 충진성에 대한 연구성과를 제시. 또한 지반고화제 분야에도 적용하였으며 저강도용(지반 및 콘크리트)에 대해 적용가능성을 제시함.
- 박테리아 활성도를 높이기 위한 연구도 진행되었으나 실제 구조물에 적용하기 위한 연구를 진행하지 못함.

■ 다양한 환경하의 콘크리트에서 박테리아 생존환경을 조성하기 위해서는 박테리아 흡착기술이 매우 중요한데, 이에 대한 기술자료 및 관련 연구는 매우 미흡함.

■ 광합성 박테리아의 자체 작용에 의해 형성하는 슬라임 또는 캡슐 막형성(글라이코 캘릭스)기술은 기존 코팅재료의 단점을 해결하면서 콘크리트 구조체의 부식저항성 향상을 기대할 수 있지만 아직 이에 대한 검증 연구는 없음.

■ 연세대학교 정찬문 교수를 중심으로 마이크로 캡슐을 활용하여 기존의 기술과는 다른 새로운 개념의 자기치유 코팅기술을 개발하였음.

- 특별한 촉매제 없이 태양광(UV)에 의한 Photopolymerization에 의해 경화하는 보수 코팅재를 개발하여 성능평가를 완료하고 실용화 단계에 있음.

▢ 국외기술 동향

■ 자기치유 콘크리트 기술은 미국, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 약 20여 년 전에 개념이 도입되면서 시작되었으며 국내에는 2004년 이후 그 개념이 소개되어 현재는 일부 기초연구가 진행되고 있으며, 현재까지 콘크리트 응용연구는 미약한 실정임.

- 주요 자기치유 연구기관으로는 미국의 일리노이대, 미시간대학, 네덜란드의 델프트공대, 일본의 도쿄대학교이며, 세부 연구분야는 캡슐, 박테리아나 무기 광물계 활용 분야로 원천기술에 따라서 접근 방법이 상이함.

■ 일본의 경우, 2007년부터 JCI 연구위원회에서 “시멘트계 재료의 자기수복성의 평가와 그 이용방법 연구회”를 설립하여 자기치유 콘크리트의 실용적 활용 방법을 집중적으로 연구하고 있음.

■ 일본 도쿄대학교의 Kishi 교수 연구팀은 1997년부터 자기치유 특성을 연구하기 시작하였으며, 2004년부터 NEDO를 통하여 본격적인 산·학·연 실용화 연구를 시작하여 자기치유 생성물이 물에 용해되지 않고 균열폭 0.3mm까지 치유하는 사례를 보고하였음.

■ 2010년 이후에는 일본 동일본 철도공사, 요코하마대학 등과 공동으로 터널, 교량 적용을 위한 실구조물 적용시험을 진행하고 있음.

■ 콘크리트 자체 균열 자기치유 성능향상을 위한 획기적인 복합 자기치유 기술이 필요함.

- 기존 무기계 자기치유 재료는 대부분 구조물에 지수 목적으로 적용하고 있으며, 균열 방향성에 민감함.

- 반응촉매제에 의한 미반응 시멘트, SCM의 수화반응 촉진과 스마트 폴리머에 흡수된 수용액과의 지속적인 수화반응으로 인해 초기 및 장기균열 제어에 관한 기술 개발이 필요함.

■ 콘크리트 자체 균열 자기치유 성능향상을 위한 복합 자기치유 기술 필요
- 자기치유에 의한 치유가능한 균열폭 증대 및 균열 치유시간 단축 필요
(기존 치유가능한 균열폭 : 0.3mm, 균열 치유시간 : 3~28days)
- pH에 대한 스마트 폴리머의 swelling 특성변화를 이용 균열 단기 자기치유 : 무기계 재료와 스마트 폴리머의 기술의 복합화는 초기 반응성이 낮은 HVSCM의 균열을 폴리머에 의해 치유하며, 이 후 상호작용에 의해 더욱 견고한 치유가 가능함.

■ 실용화 연구로서 자기치유 성능을 활용한 구체방수 콘크리트 적용 연구가 주를 이루고 있지만, 최근에는 보수재 활용 연구나 포장용 콘크리트 적용 연구가 실용화 연구로서 진행되고 있음.

■ 스마트 폴리머 활용한 자기응답형 기술은 콘크리트 분야에서 기초단계(UGhent)로 상기의 특성을 이용하면 균열 방향성 문제 해결 및 단순 지수성능뿐만 아니라 역학적 성능향상도 기대되어 이와 관련된 상세 기술 개발이 필요함.

■ Jonkers 등의 연구에서는 미생물을 이용하여 골재를 크기별로 제조하여 콘크리트에 적용하였으나 강도 및 내구성 향상에 대한 정량적인 평가는 없는 상태임.

■ Tittelboom 연구팀은 Bacillus sphaericus를 이용하여 자기치유 기법을 개발하였는데, pH 9~10 정도의 환경에서 탄산칼슘을 석출할 수 있는 미생물을 이용한 이 연구에서는 pH 12 정도에서도 미생물이 생존할 수 있도록 규조토(diatomaceous earth)를 캐리어로 사용하는 연구를 수행하였는데, 미생물 및 규조토의 첨가는 시멘트 콘크리트에 부정적 영향은 없고, 규조토 혼입시 미생물 생존율이 70% 이상 증가됨. 또한 150 ~ 200 ㎛ 정도의 균열이 충전되는데 40일 정도 소요되는 것으로 평가되었음.

■ 현재 COWI에서는 터널구조물에 미생물을 이용한 균열보수기법 field test를 시도하였으며, 연간 100 million euro dollar에 달하는 유지관리 비용을 감소시킬 것으로 예상하고 있음.

■ 미국 및 호주를 중심으로 다양한 환경하의 노출된 콘크리트의 부식예측식 개발과 같은 대응책이 강구됨에 따라 독일, 오스트레일리아, 남아프리카 공화국 및 영국도 뒤이어 본격적인 조사연구를 수행하고 있음.

■ 미국의 경우에는 부식 현상의 정확한 규명을 위한 연구는 물론 부식방지를 위한 유기계 코팅재 개발에 많은 투자를 하고 있음.

■ 마이크로 캡슐을 활용하여 손상을 입은 재료의 성능을 복구하거나 손상을 감지해 내는 기술이 개발되고 있음. 이에 대한 연구는 미국 일리노이 대학에서 폴리머 재료의 균열 자기치유 연구를 시작한 이래, 세계 각국의 여러 연구팀에서 활발히 진행됨.

■ 마이크로 캡슐 활용 자기 치유 기술의 핵심은 캡슐의 설계 및 제조기술, 보수

재료의 설계 및 제조기술, 그리고 이를 활용한 콘크리트의 설계 기술 등으로 분류할 수 있으며, 국제적으로 일부 연구자에 의하여 요소기술에 대한 연구가 진행되고 있는 기초적인 연구 단계임.

(3) 연구개발 내용

▢ 균열 자기치유 소재기술 개발

■ 유·무기계 자기치유 성능향상 기술 개발

■ 스마트 폴리머 활용 자기치유 기술 개발

■ 자기치유 원료 소재 제어기술 개발

■ 무기 하이브리드 자기치유 메카니즘 및 배합설계 기술 개발

▢ 균열 자기치유 요소기술 개발

■ 스마트 폴리머 활용 자기응답형 자기치유 재료 개발

■ 하이브리드 자기치유 혼합재 공정향상 기술 개발

■ 자기치유 박테리아 선정 및 치유성능 활성화 기술 개발

■ 콘크리트 특화형 마이크로캡슐 제조 기술 개발

■ 보수/코팅용 매크로 캡슐 제조 기술 개발

▢ 균열 자기치유 성능 최적화

■ 유·무기 자기치유 소재 활용 성능복합화 및 최적설계 기술 개발

■ 하이브리드 자기치유재 배합 최적화 및 파일롯 플랜트 제작

■ 박테리아 광물석출 및 광합성 박테리아 생존률 향상 기술 개발

■ 캡슐 활용 기능성 자기치유 콘크리트 기술 개발

■ 보수/코팅용 매크로 캡슐 배합기술 개발

▢ 요구성능 맞춤형 균열제어 자기치유 기술 개발

■ 급속 균열 자기치유 기능성 콘크리트 제조 개발

■ 유무기 하이브리드 도로포장 콘크리트 제조 기술 개발

■ 박테리아 활용 자기치유 콘크리트 배합 기술 개발

■ 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 배합 및 반복적 균열치유 기술 개발

■ 매크로 캡슐 활용 콘크리트 보수 코팅재 제조 기술 개발

▢ 균열제어 자기치유 활용기술 개발

■ 터널 적용을 위한 급속 균열 자기치유 콘크리트 개발

■ 신규 및 보수용 도로 포장콘크리트 개발 및 적용기술

■ 초기균열 제어용 박테리아 자기치유 콘크리트 개발

■ 광합성 박테리아 활용 열화치유 코팅재 개발

■ 도로교 상판 적용 캡슐 활용 반복적 균열 자기치유 코팅재 개발

■ 균열 자기강성 보강용 마이크로 캡슐 콘크리트 개발

(4) 연구개발 추진방법

□ 추진전략	■ 세계최고 수준의 원천기술 확보를 위한 전략 추구 - 자기치유관련 원천소재 또는 치유성능 향상을 위한 원천기술 개발을 통한 기술 선진국 도약을 위한 전략 추구 ■ 미생물 교배 및 배양기술을 갖고 있는 전문기관 또는 전문가와 연계한 공동연구를 통해 자기치유 기술에 관한 원천기술 개발 ■ 캡슐 제조기술을 갖고 있는 전문기관 또는 전문가와 연계한 공동연구를 통해 자기치유 기술에 관한 원천기술 개발 ■ 성과 목표와 지표간 상호 연계성 확보 ■ 철저한 성과검증 추진 - 연구 계획 시부터 달성이 가능한 성과목표 및 성과지표 제시 - 연구 진행 중 성과목표의 달성 및 관리방안을 정립하고 주기적인 성과 모니터링을 실시
□ 추진체계	■ 본 과제의 성과물의 효과적인 성능 검증 및 적용을 위해 유기적인 연구계획을 수립하여야 하며, 이와 관련하여 본 과제 연구책임자는 연구단장 및 타 세부과제 연구책임자와의 긴밀한 협조가 요구됨. ■ 참여 연구기관 간 협력을 통한 기술 개발 과제간 연계성 확보 및 협조 체계 구축이 필요하며, 바이오, 화학분야의 전문기관 또는 전문가들을 포함한 다학제간 연계를 통한 협동연구가 필요함. - 박테리아 활용을 위한 바이오분야, 캡슐 활용을 위한 화학분야 ■ 3세부에서 개발하는 자기치유 성능평가 방법 등 타 세부와의 긴밀한 기술협력을 통한 일관성 있는 연구추진
(5) 최종성과물	
□ 주요 최종성과물	□ 1차년도 ■ 일반강도 및 고강도 자기치유 성능촉진 콘크리트 무기혼합재 ■ 스마트 폴리머 활용 자기치유 재료 ■ 유무기 하이브리드 자기치유 원천소재 ■ 유무기 하이브리드 원료소재의 자기치유 반응 제어기술 □ 2차년도 ■ 일반강도용 스마트 폴리머 활용 자기응답형 자기치유 기술 ■ 유무기 하이브리드 자기치유 혼합재 제조공정 및 시제품 ■ 열화대응형 생체광물 박테리아 선정 및 배양기술 개발 ■ 광합성 박테리아의 흡착재료 ■ 일반강도용 반복적 균열 제어 마이크로 캡슐 코어재료 ■ 균열강성 제어 마이크로 캡슐 ■ 보수/코팅용 매크로 캡슐 □ 3차년도

■ 무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 최적배합

■ 유무기 하이브리드 자기치유 혼합재 파일롯 플랜트

■ 박테리아 활용 석출극대화 기술 및 포자기술

■ 광합성 박테리아 기반의 코팅재 최적배합 방법론 및 설계 가이드라인

■ 캡슐 활용 자기치유 콘크리트 배합기술

▢ 4차년도

■ 유무기 하이브리드 자기치유 교면포장 콘크리트 제조 기술

■ 열화대응형 초기균열 제어 박테리아 활용 기술

■ 광합성 박테리아 기반 콘크리트 구조체의 코팅제품

■ 캡슐 활용 반복적 균열 자기치유 코팅재

■ 매크로캡슐 활용 콘크리트 보수 코팅재 제조 기술

▢ 5차년도

■ 유무기 하이브리드 자기치유 교면포장 콘크리트 시제품(고강도용)

■ 박테리아 기반의 콘크리트 구조체 코팅제품의 시공가이드라인

■ 초기균열 제어용 박테리아 활용 자기치유 콘크리트(일반강도용)

■ 반복적 균열치료가 가능한 마이크로 캡슐 코팅제 기술(일반강도용)

■ 균열 강성 회복 기능의 자기치유 콘크리트

■ 매크로 캡슐 활용 균열 치유 코팅재

CTE 연차별 성과목표	마일스톤 목표 TRL					평가방법
	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	
유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	4	5	5	6	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
박테리아 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	3	4	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
캡슐 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	2	3	4	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부

(6) 연구기간 및 지원 예산

□ 전체

■ 총 연구기간 : 2015년 1월 ~ 2019년 12월(5년)

■ 연구비 예산 : 103.2억원 (정부출연금 77억원, 민간부담금 26.2억원)

(7) 기 타

7.1.3 2세부과제 RFP

과제명	반응제어형 자기치유 콘크리트 기술 개발
(1) 연구개발 목표	
	■ 중합반응 제어 무시멘트 결합재 개발 ■ 중합반응 제어 내열화 무시멘트 콘크리트 개발 ■ 유해이온 반응제어형 자기치유 원천소재 개발 ■ 유해이온 반응 제어형 자기치유 콘크리트 개발
(2) 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발의 필요성	▢ 국내환경 측면의 필요성 ■ 최근 경제·사회 패러다임의 변화로 환경·경제 효율성과 순환자원의 활용을 추구하는 자원 순환형 경제·사회로 전환됨에 따라 다양한 폐기물 재활용 정책 및 설계기준(그린 시방서)들이 수립되고 있음. ■ 콘크리트 산업분야에서는 시멘트의 부정적인 환경영향(높은 CO_2 배출 및 천연자원 소비)을 최소화하기 위하여 시멘트 최소화 또는 대체 콘크리트의 연구와 투자가 증가하고 있음. ■ 시멘트 대체 또는 저감된 친환경 콘크리트를 실용화하기 위해서는 물리적/내구적 성능확보가 필수적이며, 더 나아가 유지보수 및 $LCCO_2$ 차원에서 친환경 콘크리트의 자기치유 및 자기 내열화 기술은 미래사회가 요구하는 기술임. ■ 건설 분야의 환경부하 저감 및 로우테크(Low-Tech) 이미지 개선과 급변하는 친환경 시장에서의 새로운 기회 창출을 위해 친환경 콘크리트의 자기치유 및 내열화 기술 개발 등 건설 신기술 개발은 중요한 숙제임. ■ 철근콘크리트 구조물은 외부로부터 콘크리트내로 침투하는 유해이온(CO_3^{2-}, Cl^-, SO_4^{2-} 등)에 의하여 콘크리트 및 철근이 부식하게 되어 내구성이 저하되므로 이를 근본적으로 해결하는 기술 개발 필요 ■ RC조 구조물이 유해이온에 의하여 철근이 부식된 경우에는 폐기물 발생 및 단면복구 등으로 환경문제 유발, 유한자원의 고갈 및 막대한 유지관리비용이 들기 때문에 침투하는 열화인자를 능동적으로 제어하는 선대응적 신개념 기술 개발 필요 ■ 열화원인 억제 개념을 초월하여 열화원인을 능동적으로 고정함으로서 콘크리트의 자기 치유성능을 부여하는 혁신적인 기술 개발 필요 (예: 생체 모사 기술 응용, Biomimetic Construction Materials)

	▢ 국외 환경 측면의 필요성 ■ 호주, 미국, 일본, 유럽 등을 중심으로 친환경 콘크리트 기술에 관한 논문 출판 수 및 특허등록 건수는 해마나 증가하는 추세이며, 최근 중국, 인도 등 개발도상국들의 연구 참여 또한 크게 늘어나고 있음. ■ 전 세계적으로 그린기술(Green Technology) 시장이 기하급수적으로 늘어남에 따라 친환경 건설자재 분야의 성장 또한 향후 10~20년 간 크게 늘어날 것으로 예상되고 있음. ■ 2010년 이후 플랜트건설 수출은 국가 3대 수출 산업의 하나로서 전략적으로 민·관에서 투자하고 있지만 경쟁력 있는 요소기술들이 아직 미흡하며, 특히 수출가능 지역의 지역적 재료조달 특성을 고려한 친환경 기술의 정립이 요구되고 있음. ■ 향후 국제사회의 친환경 콘크리트 시장은 큰 성장이 예상되므로, 친환경 콘크리트 분야의 신기술 확보를 통해 선진국과의 기술격차를 해소하고 국내 건설기술을 세계적인 수준으로 끌어올릴 수 있는 중요한 시기임. ■ 선진국의 콘크리트 구조물은 축조 후 50년 이상 경과된 것이 매우 많아, 이를 효율적으로 보수·보강하기 위해서는 막대한 유지관리비용이 들기 때문에 열화피해를 입은 구조물의 내구성향상, 성능평가 및 보수·보강을 위한 연구가 국가적으로 진행되고 있음(유럽: DuraCrete, 일본: 내구성향상 기술 개발, 미국 : Life-365 등). ■ 전 세계는 지구환경부하 저감을 위하여 주요 온실가스인 CO_2를 건설분야에서 획기적으로 줄이기 위하여 CO_2를 포집하고 저장하는 CCS 기술뿐만 아니라 CO_2를 적극적으로 활용하는 연구를 진행하고 있음(미국 : DOE, 일본 : RITE, 영국 : TBD 등).
□ 기술동향	▢ 국내기술 동향 ■ 시멘트 사용량을 최소로 하거나 전혀 사용하지 않는 친환경 콘크리트(SCM 시멘트와 무시멘트) 기술 개발은 국내 민간기업 및 연구소, 대학의 연구단을 중심으로 활발하게 연구가 진행되고 있음. ■ ㈜삼표, 포스코건설, 극동건설, 롯데건설 등을 중심으로 산업부산물인 고로슬래그와 플라이애시를 다량 치환하여, 시멘트의 사용량을 50~30% 수준으로 낮춘 콘크리트 배합기술들의 개발/상용화를 위한 연구를 진행하고 있음. ■ 시멘트를 전혀 사용하지 않은 무시멘트 콘크리트 기술은 전남대를 중심으로 연구가 수행되고 있으며, 실온 양생을 위해 주로 고로슬래그 단독 또는 고로슬래그와 플라이애시 혼합 결합재 제조기술의 연구를 바탕으로 콘크리트 2차제품 등에 적용한 실적이 있음. ■ SCM 시멘트 콘크리트는 조기강도 확보의 문제, 무시멘트 콘크리트는 내구성 문제 등으로 구조체 적용 및 실용화에 어려움을 겪고 있음. ■ SCM 시멘트 및 무시멘트 콘크리트의 국내 자기치유기술은 현재 전무하며,

시멘트와 반응메커니즘이 다르기 때문에 기존 시멘트 기반 콘크리트의 자기치유 기술들을 친환경 콘크리트에 적용하기 위해서는 많은 연구가 필요함.

- 우리나라 정부는 구조물의 내구성 향상을 위하여 『시설물의 안전 및 유지관리 기본계획 3차(2013~2017) 』을 수립하고, 시설물 보수·보강 분야에서 융합기술 및 첨단기술 도입을 통한 첨단 건설재료 개발 및 선진적 유지관리 기술 개발을 강조
- 한양대학교 및 중소 신기술 개발 업체에서는 CO_2 와 Cl^- 이온 고정이 가능한 유기계 및 무기계의 성분을 이용하여 RC 구조물의 보수시스템 공법을 개발하고 있음.
- 한일시멘트에서는 Cl^- 이온을 치환하여 고정하는 시멘트계 재료를 개발한 바 있으나 현장 실용화 단계에는 도달하고 있지 못함.
- 유해이온 반응제어형 자기치유 원천소재 및 이를 활용한 보수공법 개발 및 콘크리트 제조기술에 관한 연구는 거의 없음.

▢ 국외기술 동향

- 호주 및 유럽을 중심으로 슬래그를 다량 치환한 친환경 콘크리트의 실용화를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있음.
- 슬래그를 다량 치환한 콘크리트의 문제점인 조기강도 저하, 낮은 탄산화저항성능, 높은 수축률 등의 문제 해결을 위해 알칼리 자극제, 메타카올린, ZrO_2와 같은 재료를 사용하여 문제해결 가능성을 제시함.
- Huang, Snoeck외 다수의 연구자들은 고로슬래그를 대량 치환한 친환경 콘크리트에 자기치유 효과를 나타내게 하기 위해 SAP, 포화 수산화칼슘($Ca(OH)_2$) 수용액, 마이크로섬유(microfiber) 등을 사용하였음.
- 국내와 마찬가지로 무시멘트 콘크리트에 대한 자기치유기술 연구 개발은 거의 이루어지지 않고 있으며, 탄산화 저항성 및 수축률 등의 내구성 개선을 위한 연구가 주류를 이룸.
- 일본 카지마 건설은 CO_2를 흡수하는 재료를 활용한 영구거푸집을 개발한 경험을 가지고 있으며, ㈜Denka는 CO_2를 대량흡수하는 γ-CO_2를 활용한 2차제품 개발을 진행하고 있으며, 항만기술연구소를 중심으로 Cl^-이온 고정에 관한 연구를 진행 중이나 아직 실용화 단계에는 이르고 있지 않음.
- 미국 및 일본을 중심으로 선진국은 생명체가 외부로부터 체내로 유입되는 유해물질을 진단하고 자기치유를 하는 메커니즘을 활용한 생체모방기술(Biomimetic Technology)을 개발하고 있으나, 건설재료개발 및 건설분야 적용은 아직 없음.
- 유럽에서는 노르웨이 및 스웨덴을 중심으로 콘크리트내로의 CO_2 흡수 정량평가를 위한 연구를 통한 대기환경의 CO_2를 저감하는 기초적 연구를 수행하고 있음.

■ 전 세계적으로는 콘크리트내로 침투하는 유해이온을 고정화하여 내구성을 향상시키는 자기치유 개념에 관한 연구는 거의 없음.

(3) 연구개발 내용

▢ 반응제어형 자기치유 소재 개발

■ 메카노케미컬 합성법 이용 염기도 제어 기술

■ 탄산화 제어 자기치유 무시멘트 결합재 개발

■ 유해이온 제어(고정화, 합성반응) 반응기구 분석

■ 이온반응 제어 원천 소재 기술 개발

▢ 반응제어형 내열화 자기치유 요소기술 개발

■ 중합반응 제어 강도 증진 기술 개발

■ 활성화제 조합을 통한 자기치유 성능 부여기술

■ 수축 제어 자기치유 무시멘트 결합재 개발

■ 이온 반응형 균열 및 공극 충진소재 기술 개발

■ 유해이온 고정화를 무기계 첨가제 기술 개발

▢ 반응제어 내열화 자기치유 성능 최적화

■ 무시멘트 결합재 최적 자기치유 성능 배합기술

■ 무시멘트 결합재 최적 내열화 성능 배합기술

■ 유해이온 제어를 위한 반응 최적화 배합기술

■ 유해이온 고정화를 위한 유기계 첨가제 기술 개발

▢ 요구성능 맞춤형 반응제어 내열화 자기치유 기술 개발

■ 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발(Mock-up / 시작품)

■ 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 기술 개발

■ 유해이온 제어를 위한 반응 촉매 및 촉진화 기술 개발(Chloride, Sulfate 등)

■ 유/무기 이온제어 혼합재 최적 배합기술 개발

▢ 반응제어 내열화 자기치유 활용기술 개발

■ 프리캐스트 내열화 무시멘트 콘크리트 시제품 개발

■ 현장타설 내열화 무시멘트 콘크리트 레미콘 적용 기술 개발

■ 유해이온 반응 제어형 구조용 및 마감용 시멘트 복합체 기술 개발

(4) 연구개발 추진방법

□ 추진전략

■ 연구 수행 시 제품의 실용화를 고려한 안정적인 재료수급과 합리적인 설비 이용계획 수립

■ 중합반응 제어기술 확보를 위해 연구 수행 전 화학분야 전문가 집단 및 화학혼화제 회사 선별

	■ 프리캐스트 콘크리트 및 레미콘 배합은 해당분야 참여기업의 설비 이용 및 공동연구 수행 ■ 자기치유성능 평가 및 $LCCO_2$ 분석은 3세부와 연계 연구 추진 ■ 연구기간 내 장비/설비/인력 집중 및 타 세부와 실험기간중복 방지를 위해 총괄 차원에서 Mock-up/실증 시험계획 수립 ■ 자기치유 무시멘트 프리캐스트 콘크리트는 연구기간 내 목표제품을 선정하여 실용화 추진
□ 추진체계	■ 본 과제의 성과물의 효과적인 성능 검증 및 현장적용을 위해 유기적인 연구계획을 수립하여야 하며, 이와 관련하여 본 과제 연구책임자는 연구단장 및 타 세부과제 연구책임자와의 긴밀한 협조가 요구됨. ■ 본 과제의 추진체계는 산·학·연 공동연구를 기본으로 함. ■ 화학분야 전문기관 또는 전문가와 연계한 공동연구가 필요하며, 프리캐스트 콘크리트 및 레미콘 회사의 참여가 필요함. ■ Mock-up 시험체 제작 및 성능시험 평가 수행 시 시험체 규격, 시험체 제작 방법 및 평가 방법 통일을 위해 타 세부와 협업체계 구성
(5) 최종성과물	
□ 주요 최종성과물	□ 1차년도 ■ 중합반응제어 메커니즘 분석 보고서 ■ 탄산화 제어형 결합재 제조/배합 기술 □ 2차년도 ■ 자기치유($CaCO_3$ 석출)형 무시멘트 결합재 배합 기술 ■ 수축 제어형 내열화 무시멘트 결합재 제조/배합 기술 ■ 유해이온 반응제어 원천소재 및 반응효율 향상 기술 □ 3차년도 ■ 자기치유 무시멘트 콘크리트 최적배합 기술(일반강도용) ■ 탄산화제어형 내열화 무시멘트 콘크리트 최적배합 기술 ■ 수축제어형 내열화 무시멘트 콘크리트 최적배합 기술 ■ 유해이온별 자기치유 최적배합 도출 및 성능 평가 보고서 □ 4차년도 ■ 프리캐스트 내열화 자기치유 무시멘트 콘크리트 배합기술/시작품 ■ 현장타설용 내열화 자기치유 무시멘트 콘크리트 배합기술 ■ 유해이온 반응제어형 보수마감재 □ 5차년도 ■ 성능기반 프리캐스트 내열화형 자기치유 무시멘트 콘크리트 배합설계 모델/

2차제품 시제품

■ 현장타설용 내열화 무시멘트 콘크리트의 레미콘 적용 기술 개발

■ 유해이온 반응제어형 콘크리트

CTE 연차별 성과목표	마일스톤 목표 TRL					평가방법
	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	
중합반응 제어 무시멘트 콘크리트 (재료·자재)	2	3	3	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
유해이온 제어 콘크리트 (재료·자재)	2	3	3	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부

(6) 연구기간 및 지원 예산

□ 전체

■ 총 연구기간 : 2015년 1월 ~ 2019년 12월(5년)

■ 연구비 예산 : 51.6억원 (정부출연금 38.5억원, 민간부담금 13.1억원)

(7) 기 타

7.1.4 3세부과제 RFP

과제명	자기치유 콘크리트 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반 구축
(1) 연구개발 목표	
	■ 자기치유 요소기술별 특성을 고려한 성능 평가 기술 개발 - 균열 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발 - 내열화 자기치유 정량적 성능평가 기술 개발 ■ 자기치유형 콘크리트의 LCC/LCCO$_2$ 분석 및 설계기술 개발 ■ 자기치유형 콘크리트 실용화 기반 구축
(2) 연구개발 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발의 필요성	▢ 국내환경 측면의 필요성 ■ 국내 건설시장의 수요 감소에 따라 선도적 건설재료/설계/시공 기술 확보를 통한 신시장 창출의 필요성이 증가함. ■ 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 구조물의 내구성능을 저하시키는 주요 요인으로 작용하고 있음. ■ 이에 최근 콘크리트 구조물에 발생한 균열을 재료 자체적으로 복원시킬 수 있는 자기치유 콘크리트 기술이 대두되고 있음. ■ 선진국을 중심으로 자기치유 콘크리트 기술로는 마이크로 캡슐, 미생물, 섬유활용 기술 등이 제안/발표되고 있음. ■ 그러나 이와 같은 자기치유 콘크리트 기술을 적용하기 위한 성능기준, 설계 및 시공 방법 등에 대한 기준이 미비한 실정임. ▢ 국외 환경 측면의 필요성 ■ 자기치유형 콘크리트에 대한 연구는 현재까지 세계적으로 요소기술별 원천개발 단계에 머물러 있음. ■ 자기치유 성능 평가는 주로 SEM, image analysis, X-ray 등을 이용해 균열 부위에 새로운 수화물 생성 관찰을 통해 정성적으로 판단하거나, 투수성, 염소 이온확산 실험 등을 통해 간접적으로 균열치유 수준을 판단하고 있음. ■ 또한, 인장, 휨 실험 등을 통해 탄성계수, 강도 등의 단편적인 역학적 물성 복원 평가에 그치고 있음. ■ 자기치유형 콘크리트 개발을 위해서, 균열치유 및 역학적 특성 향상에 대한 자기치유 요소기술별 특성을 고려한 성능 평가 기술이 필요함. ■ 개발 중인 다양한 자기치유 요소기술들의 성능 검증, 비교를 위해서 성능평가 표준 프로토콜 및 성능기준의 정립이 필요함.

■ 자기치유형 콘크리트의 실용화를 위해서 실제 환경을 모사한 구조부재 모형실험을 통한 자기치유 기술의 성능 검증이 필요함.

■ 현장적용 후 구조물의 효율적 관리를 위해 역학적, 내구적 물성에 대한 자기치유 성능 현장평가 기법이 필요함.

■ 특히, 구조물의 사용중단 없이 안전진단 및 자기치유 성능 모니터링에 활용할 수 있는 비파괴 실험분석 기술이 필요함.

■ 건설재료 중 최대 사용량을 점유하고 있는 콘크리트의 생애주기 비용 및 생애주기 CO_2 저감의 필요성이 증가함.

■ 개발된 자기치유 콘크리트의 실용화를 위해서는 다소 높은 초기투자 비용에 대한 타당성을 입증하는 것이 필수적임.

■ 효율적인 자기치유 성능기반설계를 위해 역학적, 내구적 물성에 대한 자기치유 성능 요구수준별 적정 배합설계 기술이 필요함.

■ 자기치유형 콘크리트를 실제 구조물 설계에 적용하기 위해 배합비에 따른 역학적, 내구적 특성에 대한 재료모델이 필요함.

□ 기술동향

▢ 국내기술 동향

■ 현재까지 자기치유 콘크리트에 대한 성능 평가는 대부분 (1) SEM, image analysis, X-ray 등을 통해 균열 부위에 새로운 수화물 생성 정도를 관찰함으로써 정성적으로 판단하거나, (2) 투수성, 염소이온확산 실험 등을 통해 간접적으로 내구성 향상을 판단하거나, (3) 일축인장, 휨실험 등을 통해 단편적으로 역학적 물성의 복원 정도를 평가하고 있음.

■ 대표적 미세구조 분석기법으로 환경주사전자 현미경(environmental scanning electron microscopy, ESEM)과 표면화학분석(surface chemical analysis, XEDS) 기법을 자기치유 물질의 화학적 구성요소, 특성과 형태를 분석하기 위해 사용함.

■ 국내외적으로 균열 자기치유 성능에 대한 정량적 평가방법에 대한 연구가 부족한 상태이며, 특히 적용확대를 위한 표준화에 대한 연구는 상당히 미흡함.

■ 국내의 경우 SEM, 광학현미경 촬영 및 누수 성능평가 등의 정성적인 분석을 통해 콘크리트 균열의 자기치유 성능을 평가하고 있었으며, 균열 자기치유 성능에 대한 역학적 및 내구성능 측면에서 성능에 대한 정량적 지표로 접근한 연구는 없었으며, 현장적용된 자기치유 콘크리트에 대한 성능평가 연구는 거의 없음.

■ 콘크리트 구조물의 보수시기 및 보수재료 선정에 있어 생애주기 비용분석방법에 대한 연구가 다수 이루어 졌고, 실제 구조물의 보수/보강에 적용되고 있으나, 자기치유 성능을 고려한 비용산출 방법에 대한 연구는 이루어지고 있지 않음.

■ 기존 재료적인 측면에서의 생애주기 CO_2 분석기법은 일부 연구자들에 의해 이루어지고 있으며, 이를 통해 친환경 콘크리트의 중요성을 강조되고 있음. 하지만, 자기치유 친환경 성능에 의해 구조물의 유지보수에 사용되는 물량절감 등 재료적인 측면뿐만 아니라 전체 유지보수 시스템을 고려한 분석방법은 없음.

▢ 국외기술 동향

■ 내구성에 관해서는 많은 연구자들이 시간에 따른 투수계수 등의 콘크리트 수송 특성(transport properties)의 변화를 계측함으로써 균열치유(crack tightening) 진행 과정을 간접적으로 확인함. (a) 변수위 투수실험(falling head test) 또는 (b) 정수위 투수실험(constant head test)을 사용함.

■ 인장 변형경화(strain hardening) 특성을 보유한 고인성 시멘트 복합체의 경우, 통상적으로 반복적인 일축인장실험을 통해서 자기치유에 의한 역학적 물성의 회복 정도를 평가함. 초기 인장력을 가하여 균열을 발생시킨 후 치유 환경에 노출시킨 후 인장 강도, 강성, 변형률의 회복 정도를 분석함.

■ 세계 각국의 여러 연구자들이 자기치유 콘크리트의 성능 복원 정도를 평가하는데 각기 다른 방법을 활용하기 때문에 개발 중인 다양한 자기치유 콘크리트 기술들에 대한 상호 비교 평가가 어려움.

■ 따라서 개발 중인 콘크리트의 자기치유 성능 평가를 위한 표준 프로토콜 및 성능기준의 정립이 필요함.

■ 또한, 현장적용 후 효율적 관리를 위해 구조물의 사용중단 없이 안전진단 및 자기치유 성능 평가를 수행해야 하므로, 첨단기술을 활용한 비파괴 검사 기법 개발이 필요함.

■ 최근 들어, 자기치유 성능 평가를 위해 ultrasound, acoustic emission(AE), ultra pulse velocity(UPV), time reversal technique 등 초음파의 특성을 활용하는 비파괴 실험 기법들이 연구되고 있으나, 매우 기초적인 수준에 머물러 있어 균열 치유 정도를 정량적으로 평가하지 못함.

■ 몇몇의 연구자들은 공진주파수(resonance frequency) 또는 동탄성계수(dynamic modulus) 측정법과 펄스반사법을 활용해 자기치유 콘크리트의 성능 평가를 시도함. 동적계수 측정법은 강성을 평가하는데 효과적이지만, 성능 복원의 직접적인 원인을 규명하기 어려움.

■ 미국 미시간대학교의 Li 교수팀의 연구에 따르면, 비파괴검사 중 하나인 공진주파수 분석(resonance frequency analysis)을 통해서 자기치유 콘크리트

의 성능 복원에 의해 구조물의 강성이 손상 이전과 가까운 상태로 회복되는 것을 확인함.

(3) 연구개발 내용

▢ 균열 자기치유 성능평가 기술 개발

■ 자기치유 성능 평가 프로토콜 정립

■ 역학적 특성에 대한 자기치유 성능평가 기술 개발

■ 자기치유 성능에 따른 콘크리트 물성 분석

■ 미세조직분석을 통한 균열치유 정량화 기술 개발

▢ 내열화 자기치유 성능평가 기술 개발

■ 내열화 자기치유 특성평가 기술 개발

- 투수, 탄산화, 확산, 체적변화, 이온제어 등

■ 내열화 치유속도 및 치유용량 평가

▢ 자기치유 지속성능 평가기술 개발

■ 박테리아 생존률, 치유성능 반복재현성 등

▢ 자기치유 Mock-up 성능평가 기술 개발

■ 구조모형을 활용한 자기치유 성능 검증

- 역학적 및 장기 내구특성

■ 자기치유 비파괴 평가기술 개발

: 균열 치유 진행 분석 기술

: 역학적 물성(강도, 강성 등) 복원 분석 기술

▢ 생애주기고려 자기치유 성능평가 기술 개발

■ 자기치유 성능 표준(등급, 요구기준) 정립

■ 자기치유 콘크리트 구조물 성능기준 정립

■ 자기치유형 콘크리트의 생애주기 비용(LCC) 분석 및 설계 기술 개발

▢ 자기치유 성능평가 표준화 기술 개발

■ 자기치유 콘크리트 표준시방서 개발

■ 자기치유형 콘크리트의 생애주기 CO_2(LCCO_2) 분석 및 설계 기술 개발

■ 자기치유 성능평가 표준화(KS, ISO)

(4) 연구개발 추진방법

□ 추진전략

■ 1, 2세부 연구기관과의 긴밀한 연계를 통한 자기치유 성능평가 방법 및 표준화 전략 필요

	■ 성과 목표와 지표간 상호 연계성 확보 ■ 철저한 성과검증 추진 - 연구 계획 시부터 달성이 가능한 성과목표 및 성과지표 제시 - 연구 진행 중 성과목표의 달성 및 관리방안을 정립하고 주기적인 성과 모니터링을 실시
□ 추진체계	■ 학·연 공동연구 추진를 기본으로 하며, 법/제도 개선과 연구 성과물의 표준화 및 사업화 등을 위한 조직체계 및 인력투입 방안 제시 필요 ■ 본 과제의 성과물의 효과적인 성능 검증 및 적용을 위해 유기적인 연구계획을 수립하여야 하며, 이와 관련하여 본 과제 연구책임자는 연구단장 및 타 세부과제 연구책임자와의 긴밀한 협조가 요구됨.
(5) 최종성과물	
□ 주요 최종성과물	▢ 1차년도 ■ 자기치유 성능 실내평가용 표준 프로토콜 (실험/분석 방법, 성능등급 및 요구기준 등) ■ 역학적 특성기반 균열 자기치유 성능평가 기술 ■ 미세조직분석을 통한 균열치유 정량화 기술 ▢ 2차년도 ■ 내열화 자기치유 성능 평가 기법 - 균열 지수, 투수, 탄산화, 체적변화, 이온제어 등 ■ 자기치유 지속성능 평가기술 개발 ■ 자기치유형 콘크리트의 생애주기 비용 분석 및 설계기술 ▢ 3차년도 ■ 구조모형을 통한 자기치유 성능평가 기법 ■ 자기치유 비파괴검사(NDT) 기법 ■ 자기치유형 콘크리트의 생애주기 CO_2 분석방법 및 설계기술 ▢ 4차년도 ■ 자기치유 요구성능 기준(안) ■ 자기치유 콘크리트 구조물 성능기준(안) ■ 균열 자기치유 성능평가 방법 표준화(KS, ISO) ▢ 5차년도 ■ 자기치유 콘크리트 표준시방서(안) 개발 ■ 내열화 자기치유 성능평가 방법 표준화(KS, ISO)

CTE 연차별 성과목표	마일스톤 목표 TRL					평가방법
	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	
자기치유 성능평가 (소프트웨어)	3	4	5	5	6	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 표준화 달성여부

(6) 연구기간 및 지원 예산

□ 전체

■ 총 연구기간 : 2015년 1월 ~ 2019년 12월(5년)

■ 연구비 예산 : 59.6억원 (정부출연금 44.5억원, 민간부담금 15.1억원)

(7) 기 타

7.2 평가기준의 선정

7.2.1 평가항목

기준항목	세부 항목
연구개발목표 (10점)	최종목표 및 연차별 달성목표의 적절성 · 타당성(5점)
	성과지표 설정의 명확성 및 적정성(5점)
연구개발내용 (20점)	RFP와의 부합성(5점)
	과제목표 달성을 위한 세부과제 구성 및 상호 연계성(5점)
	연구개발 내용의 완성도 및 실현 가능성(5점)
	연차별 연구내용의 차별성 및 창의성(5점)
추진전략 및 계획 (20점)	연구 수행체계 적정성 및 연구진 전문성(5점)
	연구추진 전략의 구체성 및 타당성(5점)
	연구 인프라 및 연구지원 시스템의 적절성(5점)
	연구기간 및 연구개발비 편성의 적절성(5점)
개발기술의 실용성 및 경제성 (40점)	개발 기술의 혁신성 및 차별성(10점)
	활용 방안의 적절성 및 구체성(10점)
	개발 기술의 실용성 및 사업성(10점)
	개발 기술의 경제적 기대성과(투자 및 파급효과 등)(10점)
연구책임자의 전문성 및 관리능력 (10점)	연구 전문성 및 해당분야 실적(5점)
	연구과제 관리 및 운영 능력(5점)

※ 총점은 100점이며, 총점의 60% 미만인 경우에는 탈락함.

부합성 평가	평가위원 과반수 이상이 연구개발계획서가 과제제안요구서(RFP)와 부합되지 않는다고 판정 시 탈락 조치
중복성 평가	평가위원 과반수 이상이 기 수행되었거나, 수행중인 과제와 중복되는 것으로 판정 시 탈락 조치

(1) 연구개발 목표

▢ 사회기반 시설물의 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, $LCCO_2$ 30% 감소를 위한 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발의 최종 목표에 부합되도록 각 과제의 구성과 연차별 목표 및 최종목표를 설정하여 제시

▢ 연차별 목표 및 최종목표의 달성에 대한 정량적인 평가를 위하여 국토교통부의 'R&D 성과지표'에 따라 명확한 성과지표 설정과 평가기준 제시

(2) 연구개발 내용

- ▢ 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발과 실현을 위한 체계적이고 실천적인 과제 구성이 필요함.
- ▢ 기획과제에서 제시한 연구목표 및 기술개발 요청사항에 대하여 제안과제의 적정성, 상향된 목표 제시여부 평가
- ▢ '첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발'에 대한 '균열제어형 자기치유 콘크리트 개발', '반응제어형 자기치유 콘크리트 개발' 및 '자기치유 콘크리트의 성능평가 기술 개발 및 실용화 기반구축' 등과 같이 체계적인 과제구성여부 평가
- ▢ 최종목표 달성을 위한 각 과제간 연계 여부 및 과제간 개발사항의 중복 여부 및 차별성, 적정성 평가

(3) 추진전략 및 계획

- ▢ 연구개발 성과목표·지표체계, 실용성 검증 및 사업화 추진계획 등을 연구개발 계획서에 필히 제시하며 이를 통해 향후 과제선정 후 해당 연구책임자(기관)에 대한 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
- ▢ 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행실적이 있고, 과제추진 시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장제공 등)이 명확하여야 하며 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함.
- ▢ 지원한 기관 및 연구진은 기초/원천기술, 응용기술, 실용화기술 등 과제성격에 따른 성과물을 얻을 수 있는 기관 및 연구진 판단
- ▢ 연구개발의 성공적 수행을 위한 산, 학, 연의 연구수행기관 구성의 적정성 및 연계성
- ▢ 과제의 단계별 추진사항이 연구목표 달성을 위해 타당한가를 평가하고 연구개발 사항과 이를 위한 구체적 추진방안 수립 여부
- ▢ 과제의 목표달성을 위한 연구기간의 단계설정과 연구개발비의 적정한 편성 여부

(4) 개발기술의 실용성 및 경제성

- ▢ 기관선정의 우선순위는 자기치유 기술에 대한 원천기술을 확보할 수 있고 이를 활용한 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발로 새로운 건설시장을 개척할 수 있는 실용성을 동시에 만족할 수 있는 연구개발 계획이 수립되어 있는 지에 초점을 두어 선정함.
- ▢ 현재 기술수준과 비교하여 목표한 개발기술의 향상 정도, 기술선도국 대비 예상수준, 기술의 경쟁력 수준 등에 대하여 정성적 또는 정량적 평가 여부
- ▢ 개발되는 과제 결과는 실험실 내의 제한된 범위와 조건과는 달리 현장의 여건과 환경을 고려한 실질적이고 실현가능한 기술 여부

▢ 개발기술의 경제적 기대성과 뿐 아니라 사회적 파급효과 등에 대한 평가방안이 구체적으로 제시되어 있는지 여부

(5) 연구책임자의 전문성 및 관리능력

▢ 연구책임자는 과제 내의 세부과제 및 세세부과제 간에 유기적인 연계가 원활하게 추진되도록 할 필요가 있음.

▢ 연구책임자는 각 과제의 연구기관과의 협조체제구축은 물론 과제 내에서 진행되는 과제 관리, 대외기술협력 등 해당 사업의 원활한 추진을 위한 역할을 수행해야 함.

▢ 연구책임자는 국토해양부에서 실시하는 해당분야의 산업육성, 발전정책 및 종합계획 수립 등 관련 업무 추진 시, 기술자문 및 적극적인 업무협조 역할을 수행해야 함.

▢ 연구책임자는 본 과업의 특성 상, 유리관리 관련 정부부처 및 전문연구기관과 공고한 협력체계를 구성할 수 있는 역할을 수행해야 함.

(6) CTE 기반 평가

▢ 계획대비 제품 성능 및 개발 여부에 따른 정량적 평가 필요

- 공인시험기관을 통한 개발 제품의 정량적 물성평가 필요.
- 국가표준 및 시험평가·분석 평가의 전문가 참여 필요.

CTE 연차별 성과목표	마일스톤 목표 TRL					평가방법
	1차 년도	2차 년도	3차 년도	4차 년도	5차 년도	
유-무기계 혼합재 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	4	5	5	6	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
박테리아 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	3	3	4	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
캡슐 활용 자기치유 콘크리트 (재료·자재)	2	3	4	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
중합반응 제어 무시멘트 콘크리트 (재료·자재)	2	3	3	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
유해이온 제어 콘크리트 (재료·자재)	2	3	3	4	5	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 제품화 여부
자기치유 성능평가 (소프트웨어)	3	4	5	5	6	- CTE별 기술 개발 로드맵 충족여부 - 소프트웨어 개발 여부

7.2.2 가점 및 감점기준

(1) 가점 및 감점 기준

▢ 「국토교통기술 연구개발사업 관리지침」 제17조에 따라 과제 선정평가 시 ±5점을 넘지 않는 범위 내에서 가점 및 감점을 부여함.

▢ 가점 및 감점은 평가위원회 개최 전까지 제출된 자료를 근거로 평가위원회의 종합평가점수에 합산하되, 60점 미만인 과제에 대하여는 부여하지 않음.

(2) 기업의 연구수행 형태에 따른 가점

▢ 대기업이 주관연구기관으로서

- 중견·중소기업이 참여하지 않는 경우 : 1점
- 중견기업은 참여하고 중소기업이 참여하지 않는 경우 : 1.5점
- 중소기업이 참여하는 경우 : 2점

▢ 중견기업이 주관연구기관으로서

- 중소기업이 참여하지 않는 경우 : 1.5점
- 중소기업이 참여하는 경우 : 2점

▢ 중소기업이 주관연구기관인 경우 : 2점

▢ 기업 이외의 기관이 주관연구기관이고, 참여기업이 있는 경우 : 1점

(3) 평가결과 등에 따른 가점 및 감점

▢ 국토교통기술 연구개발사업 관리지침 제17조의 가점 및 감점 기준에 따르되, 동 지침 시행 이전에 협약 체결된 과제의 최종평가 및 추적평가 결과에 따른 가점 및 감점은 종전 지침에 의함

▢ 최종평가 결과,

- 최우수등급(상대평가 시 최상위 10%, 절대평가 시 만점의 90% 이상)인 연구개발과제의 주관 연구책임자가 새로운 연구개발과제를 신청하는 경우 최종평가 후 2년간 2점 가점
- 최하위등급(상대평가 시 하위 10%, 절대평가 시 만점의 50% 이하)인 연구개발과제의 주관연구책임자가 새로운 연구개발과제를 신청하는 경우 최종평가 후(연구개발 참여제한에 해당되는 경우에는 참여제한 기간 만료 후) 2년간 2점 감점
- 하위등급(상대평가 시 하위 30%, 절대평가 시 만점의 60% 이하)인 연구개발과제의 주관연구 책임자가 새로운 연구개발과제를 신청하는 경우 최종평가 후 2년간 선정 평가점수의 1점 감점

▢ 추적평가 결과, 최우수등급(상대평가 시 만점의 80% 이상으로서 최상위 10%, 절대평가 시 만점의 90% 이상)인 연구개발과제의 주관연구책임자가 새로운 연구개발과제를 신청하는 경

우 추적평가 후 2년간 2점 가점

(4) 기타

- ▢ 최근 3년 이내에 우수 논문(임팩트팩터 15 이상) 실적이 있는 주관연구책임자가 신규과제를 신청할 경우 가점 1점
- ▢ 최근 3년 이내에 협약한 연구개발과제로서 협약 시 보안과제로 분류된 연구개발과제의 연구책임자가 신규과제 연구책임자로 신청할 경우 가점 1점
- ▢ 최근 3년 이내에 기술실시계약을 체결하여 징수한 기술료 총액이 2천만 원 이상이거나, 같은 기간 내에 2건 이상의 기술이전 실적이 있는 연구책임자가 신규과제 주관연구책임자로 신청하는 경우 가점 1점
- ▢ 최근 3년 이내에 공동관리규정 제17조제9항에 따라 국가과학기술위원회로부터 우수한 연구성과로 포상을 받은 연구자가 신규과제 주관연구책임자로 신청하는 경우 가점 1점
- ▢ 국토해양연구개발 결과를 활용하여 최근 2년 이내에 R&D사업 연구결과로 건설·교통신기술을 받은 중소·중견기업이 관련분야의 신규 신기술 지정분야와 동일한 기술분야의 연구개발과제를 신청하는 경우 가점 1점(단, 참여기업 또는 위탁연구기관으로 참여하는 경우는 제외하고, 기술분야 분류는 전문기관의 장이 별도로 정한다.)
- ▢ 최근 2년 이내에 「저탄소 녹색성장 기본법 시행령」 제19조에 따른 녹색인증을 받은 중소·중견기업이 연구개발과제를 신청하는 경우 가점 1점
- ▢ 최근 3년 이내에 운영규정 제55조제1항 각 호의 연구부정행위를 한 경우 4점 감점
- ▢ 연구개발과제 선정 후 협약을 포기하거나, 연구수행 도중 연구를 포기한 경력이 있는 주관 또는 협동연구책임자나 기업의 경우, 향후 3년간 2점 감점
- ▢ 여성연구자가 신규과제 주관연구책임자로 참여시 가점 1점
- ▢ 최근 3년 이내에 조기성공 실적이 있는 연구자가 신규과제 주관연구책임자로 신청 시 가점 0.5점
- ▢ 「하도급거래 공정화에 관한 법률」을 최근 3년 이내에 상습적으로 위반한 기업이 연구개발과제를 신청한 경우에 그러한 위반 사실이 같은 법 제26조에 따른 공정거래위원회로부터 관계 행정기관의 장에 통보 등을 통하여 확인될 경우, 2점 감점
- ▢ 금번 공고 시 '총 연구비에 대한 연구신청기관의 연구비 부담비율에 따른 가점'은 적용하지 않음(단, 종합평가점수가 동점일 경우, 선정 우선순위 결정에 적용)

08

첨단기술활용 자기치유형 친환경 콘크리트 개발 기획

참고문헌

1. 강석희, 김동주, “HPFRCC의 균열발생 후 시간경과에 따른 자기치유능력 평가”, 한국콘크리트학회 2011년 가을 학술대회 논문집, 23권 2호, 2011, pp.735~736.
2. 길상철, 강종석, 흡착성 재료의 기술동향, 기술동향분석보고서, 2002.
3. 길영준, 전략통합형 R&D를 위한 과학적 연구방법론에 관한 연구, 과학기술정책연구원, 2002.
4. 김성수, 콘크리트 보호용 코팅재료의 성능평가에 관한 연구, 대진대학교 건설연구소, 2001.
5. 김영규, 조일형, “미생물 코팅 담체를 이용한 하수의 질소·인 제거에 관한 연구”, 한국환경보건학회지, 32권 제 1호, 2006, pp.27~35.
6. 김화중, 김성태, 박성진, 김사열, 천우영, “미생물의 생체광물형성작용을 이용한 자기치유 스마트 콘크리트 개발에 관한 기초연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 21권 4호, 2009, pp. 501~511.
7. 나승민, 성택룡, 이종관, 황민오, 윤태양, “Six Sigma 기법을 이용한 기획성 연구과제 추진 방법론”, RIST 연구논문 20권 1호, 2006, pp.19~24
8. 박영식, 구긱우, 나영수, 송승구, “미생물 고정화 담체의 물리적 특성”, 한국환경위생학회지, 7권 3호, 1998, pp.269~274.
9. 송진규 외, 고로슬래그의 고부가가치 활용제품 실용화 추진전략 수립, 전남대학교, 2012.
10. 송호면, 하수관거의 부식에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 1994.
11. 안태호, “균열 자기치유 기술의 응용을 기초로 한 혁신 균열 보수 방법의 개발”, 한국콘크리트학회 2012년 봄 학술대회 논문집, 24권 1호, 2012, pp.449~450.
12. 윤문석, 국가연구개발의 전략기획을 위한 새로운 연구기획방법론 개발, 과학기술정책연구원, 2004.
13. 이상인, 박기봉, 유병철, “콘크리트 내구성 향상을 위한 자기 치유 보호용 코팅재 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 2011년 가을 학술대회 논문집, 23권 2호, 2011, pp. 747～748.
14. 이성현, 송영진, 송명신 “균열 자가 치유에 대한 시멘트 모르타르의 삼투압 변화와 porosity의 특징”, 한국콘크리트학회 2013년 봄 학술대회 논문집, 25권 1호, 2013, pp.75~76.
15. 지식산업정보원, 녹색기술/녹색환경기술개발 시장동향과 R&D투자 전략, 2013, pp. 629.
16. 한국시멘트협회, 주요 7개구 시멘트 산업동향 보고, 2012. pp. 8.
17. 한국양회공업협회, 최근 세계시멘트 산업동향 및 전망, 2006, pp. 16.
18. 한국콘크리트학회 친환경콘크리트위원회, "콘크리크와 환경, 저탄소 녹색성장과 콘크리트의 환경영향," 사단법인 한국콘크리트학회, 2010.

19. 한국토지공사, 오수관거 자재의 적정성 검토 연구, 한국토지공사, 2004.
20. 홍석범, 김진근, 이종윤, 전홍민, “자가치유형 구체방수 콘크리트의 자가치유성능에 대한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 2009년 봄 학술대회 논문집, 21권 1호, 2009, pp.441~442.
21. Ahn, T. H., Development of self-healing concrete incorporating geo-materials : A study on its mechanism and behavior in cracked concrete, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Japan, 2008.
22. Ahn, T. H., and Kishi, T., "1st International conference on self-healing materials", Conference Review, Magazine of Korea Concrete Institute(KCI), 2007, pp. 82～85.
23. Ahn, T.H., and Kishi, T., "Crack Self-healing Behavior of Cementitious Composites Incorporating Various Mineral Admixtures", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 2, 2010, pp. 171~186.
24. Ahn, T. H., and Kishi, T., "New method as the self-healing design to repair cracks in cracked concrete", 4th international Conference on Construction Materials : Performance, Innovations and Structural Implications, Nagoya, Japan, 2009, pp. 133 9～1346.
25. Ahn, T. H., and Kishi, T., "The effect of geo-materials on the autogenous healing behavior of cracked concrete", Proceedings of 2nd ICCRRR2008, Cape Town, South Africa, 2008, pp. 235～240.
26. Berry, E. E., "Strength development of some blended cement mortars", Cement and Concrete Research, Vol. 10, 1980, pp. 1~11.
27. Davidovits, J., "Geopolymer: Chemistry & Applications", Institue Geopolymere, France, 2008.
28. Dodson, V. H., "The strength contribution of fly ash concrete - A new approach to its estimation", Proc. Syrup. on the effects of fly ash incorporation in cement and concrete, Boston, 1981, pp. 184~193.
29. Dry, C., "Three design for the internal release of sealants, adhesives and waterproofing chemical into concrete to release", Cement and Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp. 1969~1977.
30. Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., and van Deventer, J. S. J., "Geopolymer Technology: The Current State of the Art", Journal of Material Science, Vol. 42, 2007, pp. 2917~2933.

31. Femandez-Jimenez, A., Palomo, A., Vázquez, T., Vallepu, R., Terai, T., and Ikeda, K., "Alkaline Activation of Blends of Metakaolin and Calcium Aluminate", Journal of the American Ceramic Society, Vol. 91, No. 4, 2008, pp. 1231~1236.
32. Gavrilescu, M., and Macoveanu, M., "Attached-growth process engineering in waste water treatment", Bioprocess Engineering, Vol. 23, No 1, 2000, pp. 95~106.
33. Granger, S., Pijaudier-Cabot, G., Loukili, A., Marlot, D., and Lenain, J. C., "Monitoring of cracking and healing in an ultra high performance cementitious material using the time reversal technique", Cement and Concrete Research, Vol. 39, No. 4, 2009, pp. 296~302.
34. Hosoda, A., Kishi, T., Arita, H., and Takakuwa, Y., "Self Healing of Crack and Water Permeability of Expansive concrete", 1st International Conference on Self-healing Materials, Noordwijk, Holland, 2007.
35. Jonkers, H. M., "Bacteria-based self-healing concrete", Heron, Vol. 56, No.1/2, 2011, pp. 1~12.
36. Joseph, C., Jefferson, A.D., and Cantoni, M.B., "Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials", Proceedings of first international conference on self-healing materials, Noordwijk aan Zee, Netherlands, 2007.
37. Joseph, C., Jefferson, A. D., Isaacs, B., Lark, R., and Gardner, D., "Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials," Magazine of Concrete Research, Vol. 62, No. 11, 2010, pp. 831~843.
38. Kim, V. T., and Nele, D. B., "Self-Healing in Cementitious Materials - A Review", Materials, Vol. 6, 2013, pp. 2182~2217.
39. Kim, W. J., Kim, S. T., Park, S. J., Ghim, S. Y., and Chun, W. Y., "A Study on the Development of Self-Healing Smart Concrete Using Microbial Biomineralization", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 501~511. (in Korean)
40. Kishi, T., Ahn, T., Hosoda, A., Suzuki, S., and Takaoka, H., "Self-Healing Behaviour by Cementitious Recrystallisation of Cracked Concrete Incorporating Expansive Agent", 1st International Conference on Self-healing Materials, Noordwijk, Holland, 2007.
41. Krivenko, P. V., "Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability", Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Gothenburg, Sweden, 1997, pp. 6.

42. Li, V. C., and Herbert, E., "Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, 2010, pp. 207~218.
43. Luan, Y., Ishida, T., Nawa, T., and Sagawa, T., "Enhanced Model and Simulation of Hydration Process of Blast Furnace Slag in Blended Cement", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, 2012, pp. 1~13.
44. Malhotra, V. M., "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", Concrete International, Vol. 24, No. 7, 2002, pp. 22.
45. Malhotra, V. M., and Mehta, P. K., High Performance, High-Volume Fly Ash Concrete, 3rd Ed., WOC, 2010.
46. Mihashi, H., and Nishiwaki, T., "Development of Engineered Self-Healing and Self-Repairing Concrete-State-of-the-Art Report", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, 2012, pp. 170~184.
47. Okazaki, S., and Kishi, T., "Simulation of dead slow permeation of water into concrete based on non-newtonian fluid mechanics", Proceedings of EASEC-10, Thailand, 2006, pp. 327-332.
48. Ozbay, E., Sahmaran, M., Lachemi, M., and Yucel, H. E., "Self-Healing of Microcracks in High-Volume Fly-Ash-Incorportated Engineered Cementitious Composites", ACI Materials Journal, Vol. 110, No. 1, 2013, pp. 33~43.
49. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-Activated Binders: A Review," Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 7, 2008, pp. 1305~1322.
50. Park, S. J., Chun, W. Y., Kim, W. J., and Ghim, S. Y., "Application of Alkaliphilic Biofilm-Forming Bacteria to Improve Compressive Strength of Cement-Sand Mortar", Journal of Microbiology and Biotechnology, Vol. 22, No. 3, 2012, pp. 385~389.
51. Provis, J. L., and van Deventer, J.S.J., "Geopolymers: Structure, Processing, Properties, and Industrial applications", Woodhead Publishing Limited, 2009.
52. Reinhardt, H.-W., and Jooss, M., "Permeability and self-healing cracked concrete as a function of temperature and crack width", Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, pp. 981-985.
53. Sangadji, S., and Schlangen, E., "Self Healing of Concrete Structures - Novel Approach Using Porous Network Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, 2012, pp. 185-194.

54. Schlangen, E., Jonkers, H., Qian, S., and Garcia, A., "Recent advances on self healing of concrete", Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Seoul, Korea, 2010, pp. 291~298.

55. Sen, D., and Randall, C. W., “Performance of fixed film media integrated in the activated sludge reactor to enhance nitrogen removal”, Water Science and Technology, Vol. 30, No. 11, 1994, pp. 13~24.

56. Shi, C., Krivenko, P. V., and Roy, D., "Alkali-Activated Cements and Concretes", Taylor and Francis, 2006, pp. 376.

57. Soleimani, S., Isgor, O. B., and Ormeci, B., “Resistance of biofilm-covered mortars to microbiologically influenced deterioration simulated by sulfuric acid exposure”, Cement and Concrete Research, Vol. 53, 2013, pp 229~238.

58. Song, Y. K., Jo, Y. H., Lim, Y. J., Cho, S. Y., Yu, H. C., Ryu, B. C., Lee, S. I., and Chung, C. M., "Sunlight-Induced Self-Healing of a Microcapsule-Type Protective Coating," Applied Materials Interfaces, Vol. 5, 2013, pp. 1378-1384.

59. Van Breugel, K., "Is There a Market for Self-healing Cement Based Materials?", Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 18-20 April 2007, pp. 1~9.

60. Van Tittelboom, K., and De Belie N., "Self-healing in cementitious materials－A review," Materials, Vol. 6, No. 6, 2013, pp. 2182-2217.

61. Van Tittelboom, K., De Belie N., Loo, D. V., and Jacobs, P., "Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent", Cement and Concrete Composite, Vol. 33, 2011, pp.497-505.

62. Van Tittelboom, K., Gruyaert, E., Rahier, H., and De Belie, N., "Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation", Construction and Building Materials, Vol. 37, 2012, pp. 349-359.

63. Vincke, E., Wanseele, E. V., Monteny, J., Beeldens, A., Belie, B. D., Taerwe, L., Gemert, D. V., and Verstraete, W., "Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete", International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 49, No. 4, 2002, pp. 283~292.

64. Vipulanandan, C., “Film model for coated cement concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 12, 2002, pp. 1931~1936.

65. Wamada, K., Hosoda, A., Kishi, T., and Nozawa, S., "Crack Self Healing Properties of Expansive Concretes with Various Cements and admixtures", 1st International conference on self-healing Materials, Noordwijk, Holland, 2007.
66. Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L., and Pratt, P. L., “Alkali-Activated Slag Cement and Concrete: A Review of Properties and Problems”, Advanced Cement Research, Vol. 27, 1995, pp. 93~102.
67. White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., and Sriram S. R., "Autonomic healing of polymer composites," Nature, 2001.
68. Wu, M., Johannesson, B., and Geiker, M., "A review : Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing materials", Construction and Building Materials, Vol. 28, 2012, pp. 571~583.
69. Yang, K. H., and Song, J. K., "Empirical equations for the mechanical properties of $Ca(OH)_2$-based alkali-activated slag concrete", ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 4, 2012, pp. 431∼440.
70. Yang, Y., Lepech, M. D., Yang, E. H., and Li, V. C., "Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles", Cement and Concrete Research, Vol. 39, No. 5, 2009, pp. 382~390.
71. Yang, Y., Yang, E. H., Li, V. C., "Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age", Cement and Concrete Research, Vol. 41, No. 2, 2011, pp. 176~183.
72. Yang, Z., Hollar, J., He, X., and Shi, X., "A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules", Cement and Concrete Research, Vol 33, No. 4, 2011, pp. 506~512.
73. Zhong, W., and Yao, W., "Influence of damage degree on self-healing of concrete", Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 6, 2008, pp. 1137~1142.