

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()

최종보고서

나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술개발 사업

2019. 12.

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

〈 목 차 〉

제1장 사업개요	1
제1절 사업의 정의 및 범위	1
1. 사업의 정의	1
2. 사업의 범위	2
제2절 추진배경 및 필요성	5
1. 구조재료의 중요성	5
2. 구조재료 개발의 필요성	10
제2장 국내외 정책·시장동향	27
제1절 국내외 정책동향	27
1. 국외 정책동향	27
2. 국내 정책동향	31
제2절 국내외 시장 동향 분석	42
1. 시장의 정의 및 분류	42
2. 시장 동향 및 트렌드	45
3. 국내외 시장동향 및 전망	47
제3장 국내 R&D 역량분석	61
제1절 국내투자 현황 및 성과	61
1. 국내 건설재료 R&D 투자현황	61
2. 국내 R&D 성과 현황 분석	64
제2절 하이퍼 나노 콘크리트 관련 기술수준 분석	71
1. 기술수준 분석 개요	71
2. 분야별 기술수준 분석	71
제3절 국내외 논문 및 특허 동향 분석	80
1. 논문 동향 분석	80
2. 특허 동향 분석	87
제4절 국내 R&D 인프라 현황 분석	95
1. 연구인력 인프라	95
2. 연구 인프라	100
3. 연구 장비 및 실험시설 인프라	114

제4장 사업 기본방향 및 추진전략 129

제1절 사업 기본방향 129

1. SWOT 분석 129

2. SWOT 전략 137

제2절 사업 비전 및 목표 138

1. 사업의 논리모형 138

2. 사업의 비전과 목표 146

3. 사업 비전 및 목표 147

제3절 사업 추진전략 151

1. 기존 성과연계를 통한 효율성 강화 151

2. 도전적 목표설정을 통한 기술혁신 선도 151

3. 성능평가/실증 연계를 통한 현장 적용성 확대 152

제5장 세부기술 개발계획 157

제1절 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술개발 157

1. 기술개발 배경 및 필요성 157

2. 기술개발 개요 166

3. 국내외 기술개발 동향 174

4. 세부개발 내용 183

제2절 나노 소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술개발 202

1. 기술개발 배경 및 필요성 202

2. 기술개발 개요 216

3. 국내외 기술개발 동향 220

4. 세부개발 내용 233

제3절 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발 253

1. 기술개발 배경 및 필요성 253

2. 기술개발 개요 274

3. 국내외 기술개발 동향 279

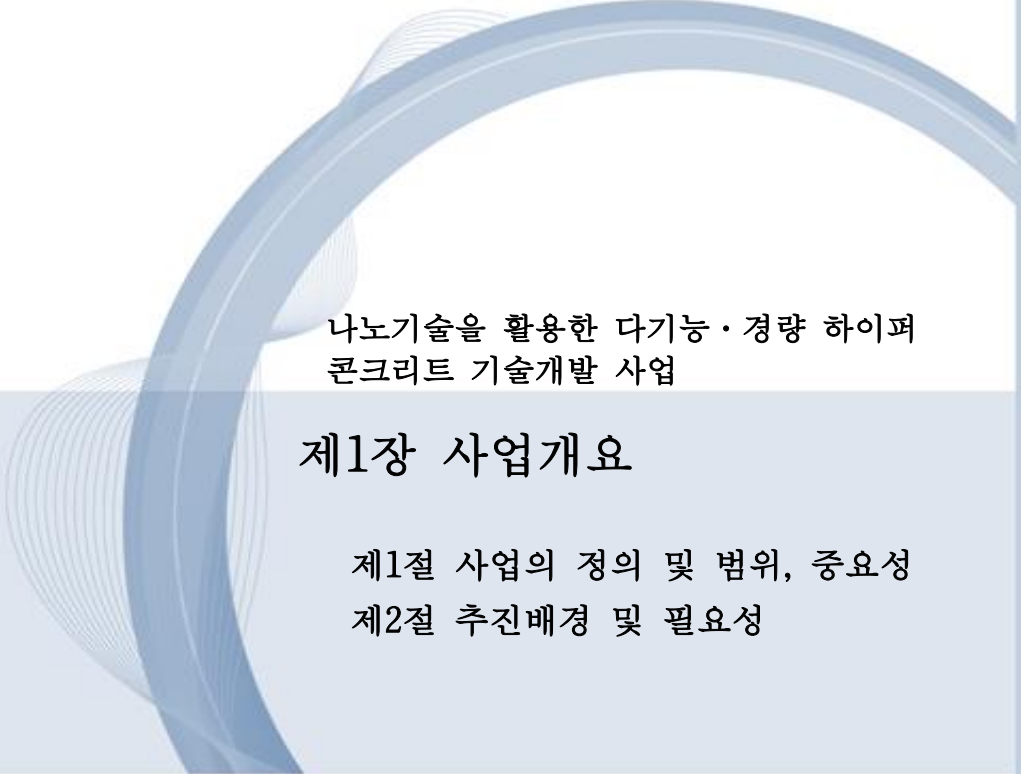
4. 세부개발 내용 309

제6장 사업운영 계획 339

제1절 사업추진체계 및 역할분담 339

1. 사업 추진체계 339

2. 사업주체간 역할분담	340
3. 사업관리 체계 및 프로세스	342
제2절 예산·인력 투입계획	343
1. 투자 계획 및 소요 인력	343
제7장 타당성 분석 및 기대효과	347
제1절 기술적 타당성 분석	347
1. 기술개발계획의 적절성	347
2. 기존 기술과 차별성 및 연계방안	348
제2절 정책적 타당성 분석	353
1. 정책의 일관성 및 추진체계	353
2. 사업 추진상의 위험요인	368
3. 사업수행 위험요인 및 대응방안	370
제3절 경제적 타당성 분석	371
1. 분석개요	371
2. 비용편익분석 전제조건	375
3. 편익추정	379
제4절 기대효과	385
1. 기술적 기대효과	385
2. 경제적 기대효과	385
3. 사회문화적 기대효과	388
제8장 세부분야별 RFP	391
제1절 총괄 RFP	391
제2절 1세부 RFP	400
제3절 2세부 RFP	408
제4절 3세부 RFP	417
제9장 참고문헌	426



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼
콘크리트 기술개발 사업

제1장 사업개요

제1절 사업의 정의 및 범위, 중요성

제2절 추진배경 및 필요성

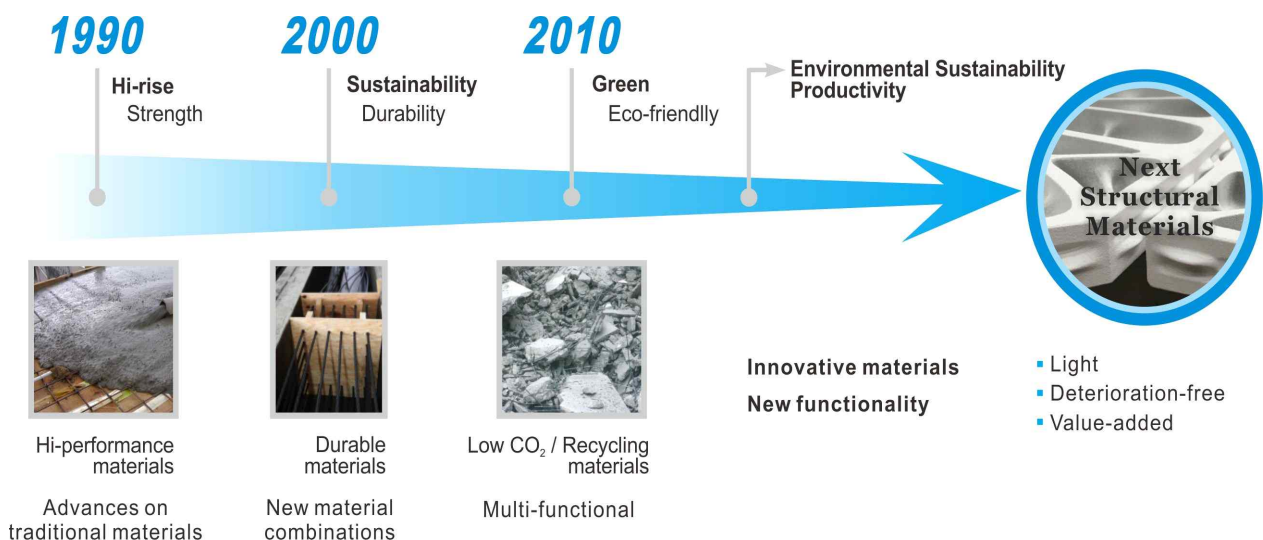
제1장 사업개요

제1절 사업의 정의 및 범위

1. 사업의 정의

■ (정의) 초경량, 유지관리ZERO 철근콘크리트 구조물 구현을 위하여 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발을 통하여 성능이 획기적으로 향상되고 다양한 기능을 가지는 차세대 구조재료 개발을 위한 응용연구개발사업임

- 첨단기술 활용 : 구조재료의 획기적 성능 향상 및 다양한 기능 부여를 위하여 나노 기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 개발로 타 산업분야 및 첨단 신소재 및 관련 제조 기술을 활용하는 것을 의미함
- 차세대 구조재료 : 가벼우면서 강도가 높은, 열화의 원인을 근본적으로 차단하는, 마감재료의 기능을 대신하는 등의 기존 구조재료의 성능을 획기적으로 뛰어넘으며 다양한 기능을 가지는 구조재료를 의미함
- 본 사업은 구조재료 중에서도 가장 대중적인 콘크리트를 대상으로 그 성능 및 기능을 획기적으로 향상시키고자 함



〈그림 I -1〉 구조재료 변천사 및 차세대 구조재료 개요

- (콘크리트) 나노 소재 융복합을 통한 고내구, 초경량·고강도 및 기능성(고내화, 고단열, 고감쇠) 콘크리트를 개발하고자 함

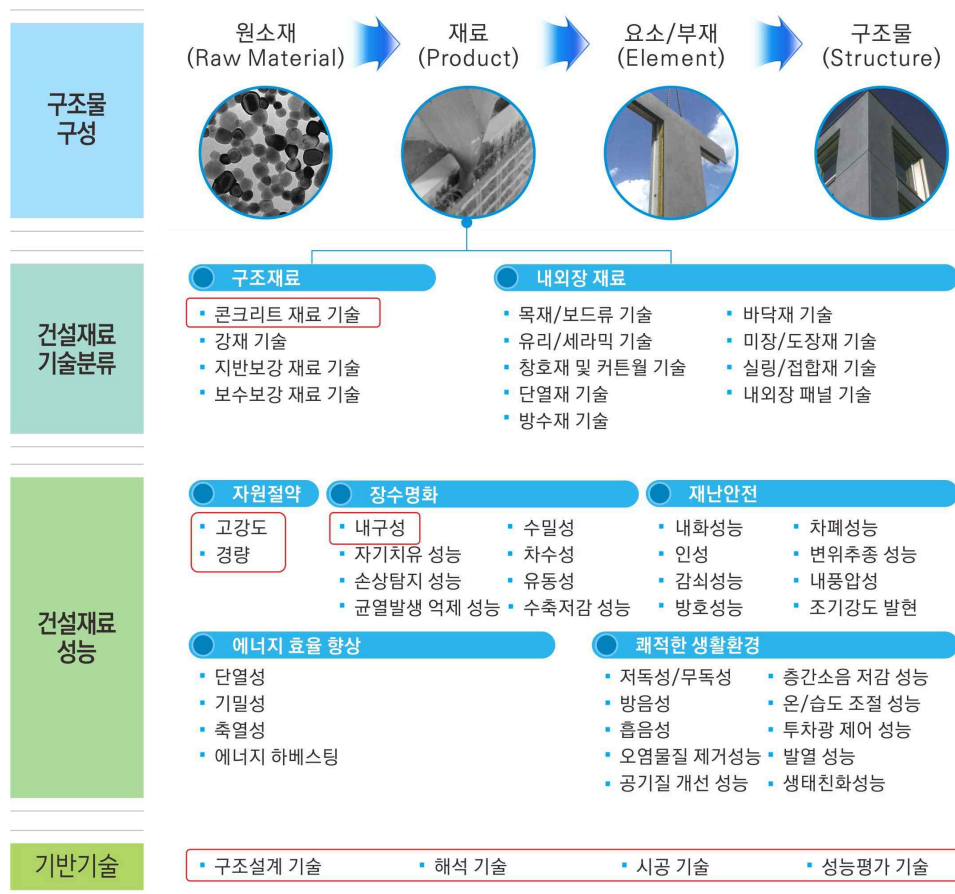
※ 철근콘크리트 구조는 콘크리트의 약한 인장력을 철근이 견디는 구조로 뛰어난 성능과 경제성으로 국내 주요 시설물의 약 70%를 차지하고 있으며, 교량의 경우 2016년 현재 전체의 78%가 철근콘크리트 교량임 (RC교(53%) 및 PCS교(25%) 합산)

2. 사업의 범위

■ (범위) 건설재료 중 철근콘크리트 구조를 구성하는 구조재료와 이의 경량, 고강도, 내구성, 내화성능 등의 성능·기능 및 개발 재료의 건설산업 적용을 위한 성능평가, 설계·시공, 유해성 평가 등의 제반기술을 개발범위로 함

● 건설재료 기술 : 구조재료 중 콘크리트 재료 기술

- 기술분류체계 상 콘크리트 재료 기술 중 나노/바이오 복합 재료 기술에 해당함



〈그림 I -2〉 사업의 범위 (※ 빨간색 네모칸으로 표시된 부분이 본 사업의 범위)

- 건설재료 성능 기술 : 경량, 고강도, 내구성, 내화성능, 감쇠성능, 단열성, 층간소음저감 성능
 - 기술분류체계 상, 고강도, 경량, 내구성, 내화성능, 인성, 감쇠성능, 단열성, 층간소음저감 성능에 해당하며, 고강도, 경량, 내구성, 내화성능은 주요 대상 성능이며, 인성, 감쇠성능, 단열성, 층간소음저감 성능은 2차적 대상 성능임

- 제반기술 : 건설재료의 건설산업 적용을 위하여 필요한 재료, 부재 및 구조물 성능 평가 기술, 구조 해석 및 설계 기술, 시공기술, 인체 및 환경 유해성 평가 기술

■ 철근콘크리트 구조의 인력의존적이고 무겁고 부식되기 쉬운 특성으로 시공, 유지 관리, 설계 등 건설산업 주요 과정에서 철근콘크리트 적용에 따른 한계점이 드러나고 있는 실정임

- 국내 건설산업은 현재 성장한계에 직면에 있으며, 이에 따라 건설산업의 생산성 향상을 위하여 정부에서는 건설자동화 실현에 노력하고 있으나, 철근콘크리트 구조의 고중량, 인력작업 및 현장시공 필요 등의 특성으로 진정한 건설자동화 구현에 어려움이 존재함

※ 스마트 건설자동화의 주요 내용 : 인프라 BIM을 활용한 가상 시공 → 3D 프린터를 활용한 건설 부재 공장 모듈화 제작 → AI 탑재 다기능 건설로봇에 의한 현장 조립 (제6차 건설 기술진흥기본계획(2018~2022))

- 재료의 경량·고강도화, 로봇 등으로도 시공이 가능할 정도의 취급용이성 확보 등이 필요함

- 철근콘크리트 구조물의 부식 등 열화로 인하여 막대한 유지보수 비용과 안전사고 발생 위험이 증가함에 따라 첨단기술 도입에 의한 선제적 유지관리 실현을 위하여 노력하고 있으나, 이는 근본적인 대책이 될 수 없음

- 철근콘크리트 구조물의 내구수명은 염해, 중성화 등으로 인한 철근 부식 등으로 50년으로 간주되고 있음

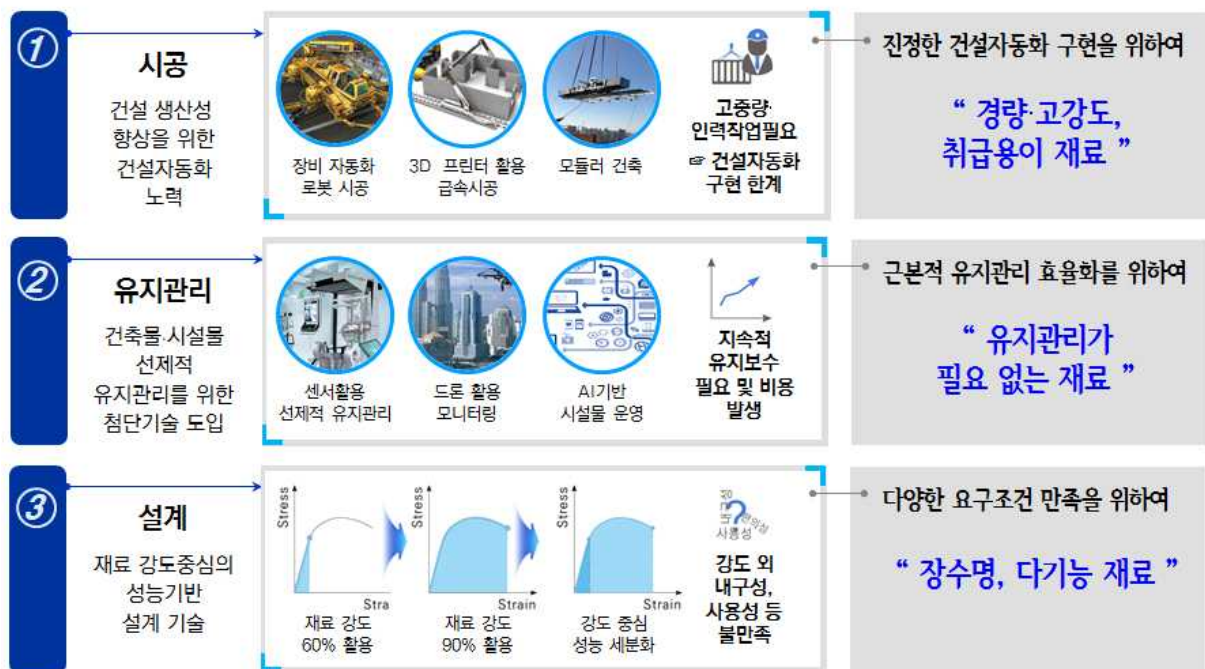
※ 미국에서는 준공 후 25~40년이 경과한 교량이 붕괴되는 사고가 발생함에 따라 준공 후 30년을 고령화로 간주 (1983.6월 코네티컷주 Mianus River 교량 붕괴(1968년 준공), 1987년 뉴욕주 Thruway 교량 붕괴(1954년 준공), 2007년 8월 미네소타주 Minnesota 교량 붕괴(1967년 준공) 등)

- 근본적인 유지관리 효율화를 위해서는 주변 환경에 의하여 열화가 발생하지 않아 유지관리가 필요 없는 재료 개발이 필요함

- 현재 설계 기준은 재료 강도의 90% 가까이 활용 가능하며, 강도 중심으로 성능이 세분화 되어 있으나, 재료 강도 이외의 내구성 등 다양한 요구조건을 만족하지 못하고 있음

- 구조물의 안전과 관련하여 재료의 강도는 상대적으로 명확하게 규정되어 있으며, 이를 바탕으로 구조물의 사용성, 안전성 등의 성능을 세분화한 설계가 이루어지고 있음
- 반면에, 주변 환경에 영향을 받는 내구성, 거주 환경 등과 관련 있는 사용성 등에 대해서는 재료의 성능이 확실하게 확보되지 않아 설계 기준이 미흡한 실정임
- 재료의 장수명화 및 생활환경 관련 다양한 요구조건을 충족할 수 있도록 재료에 기능 부여가 필요함

인력의존적이며 무겁고 부식되기 쉬운 철근콘크리트



〈그림 1-4〉 철근콘크리트 재료의 한계 및 건설산업 혁신을 위한 개발방향

제2절 추진배경 및 필요성

1. 구조재료의 중요성

■ 과거부터 현재까지 새로운 구조재료 개발에 따라 건설산업과 사회의 모습이 변화하고 발전되었음

- 건설재료, 특히 구조물의 뼈대를 형성하는 구조재료가 개발되고, 새로운 구조재료를 적용한 구조물의 해석 기술, 구조설계 기술, 시공 기술 등이 순차적으로 개발됨에 따라 구조물의 형상이 변화하고, 구조물이 고층화·대형화되었으며, 이에 따라, 도시, 산업, 생활 등 사회의 모습이 변화하고 발전하였음
- 오늘날 대부분의 산업은 건설산업과 수평적으로 연결되어 있으며, 인간 생활의 90% 이상은 구조물에서 이루어지고 있음
- 1700년대 강재 교량의 등장에 따른 대량 운송이 가능해지면서 산업혁명이 가속화되고 산업 전반에 걸친 비약적 기술 발전이 이루어짐
- 1900년대 초반 본격적으로 철근콘크리트 구조물이 등장으로 기존의 조적조 및 강구조의 구조적 한계를 극복한 합리적인 공간의 구축 및 기능 확장이 가능해지면서 현재 도시의 모습이 형성되기 시작함



<그림 I-5> 건설재료 및 관련 건설기술의 변천

■ 구조재료의 개발에 따른 해석·설계 및 시공 기술 개발로 구조물의 초고층화·대형화가 실현된 반면에, 지속적으로 사회적 및 환경적 문제를 야기하였으며, 이는 건설재료에 의하여 해결이 가능함

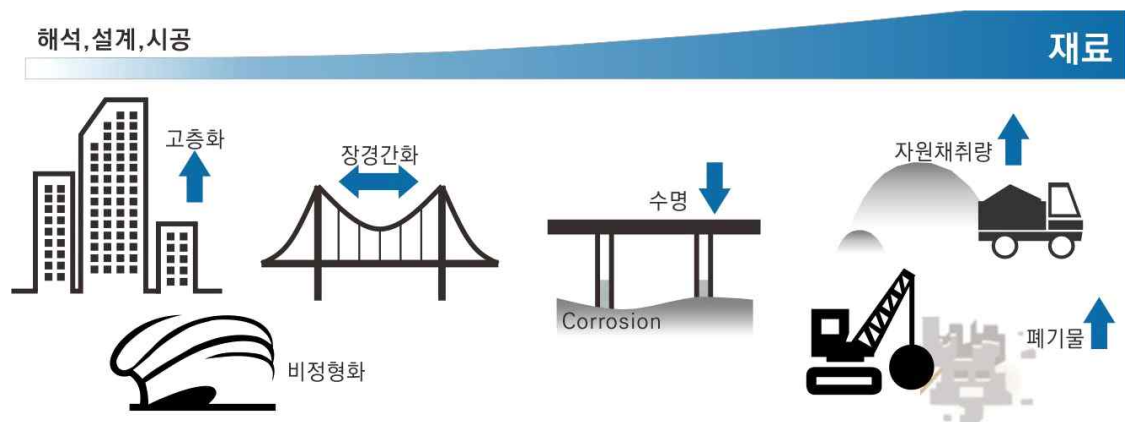
● 특히, 철근·콘크리트 재료 개발에 따른 해석 및 시공 기술 개발과 구조설계기준 제정을 통하여 오늘날과 같은 구조물의 초고층화/대형화가 이루어짐

- 1900년대 초 철근콘크리트 구조가 형성된 이후, 해석, 설계 및 시공 기술 발달과 부분적 콘크리트 재료 성능 향상으로 초고층 건축물, 초장대 교량 등이 가능해 짐
- 현재, 해석, 설계, 시공 기술 개발은 어느 정도 완성단계에 이른 상태로, 1900년대 초반 본격적인 철근콘크리트 구조물의 등장으로 현재 도시 모습이 형성되기 시작하여, 크게 변화하지 않았음

〈표 1-1〉 구조재료 개발에 따른 해석, 설계 및 시공 기술 발전 과정

년도	주요 사항	비고
1800년대	· 원형철근 제조	-
1824 (재료)	· 포틀랜드 시멘트 특허 출원	· 무거운 석재를 현장에 운반하는 것보다 자갈과 모래 등으로 현장에서 석재와 같은 재료를 만드는 것이 유리한 것에 착안하여 콘크리트 개발 · 목재, 석재, 흙벽돌 등 자연재료 및 콘크리트는 인장에 취약
1855 (구조형식)	· 철망으로 보강한 콘크리트 보트, 철망으로 보강한 콘크리트 화분 등 철망보강 콘크리트 등장	· 철근콘크리트의 초기 형태로 인장에 취약한 콘크리트를 철망으로 보강한 형태
1875	· 철근콘크리트(RC)조 건축물 건설	· 교회(프랑스) 등
1887 (해석)	· RC 보의 이론적 해석 발표	· 콘크리트-압축, 철근-인장에 의한 단면해석 이론 등장
1880년대 후반	· (미국) 이형철근 처음으로 고안	· 콘크리트와의 부착성 향상
19세기 말 (시공)	· RC조 건축물 시공 본격화	· 본격적으로 RC조 형식의 건축물 시공
1900년대 초	· 콘크리트 배합비 및 강도 연구 · 물시멘트비 이론 등 정립	· 콘크리트 현장타설에 따른 품질 확보를 위한 시공기준 정립
1902년 (설계기준)	· (영국) RC 구조설계기준 제정	-
1906년	· (미국) 샌프란시스코 지진 : 이형철근이 내진성능이 뛰어남을 확인	· (일본) 1923년 관동대지진 당시 이형철근 배근 건축물의 피해로 상당기간 이형철근 사용 제한 → 이후 이형철근의 문제가 아닌 정착 등의 문제가 있었던 것으로 파악
1960~70년대	· (일본) 감수제 개발 → 콘크리트 고강도화	· 혼화제 등의 개발을 통하여 콘크리트 성능 향상 도모
1980년대	· (일본) 고유동 콘크리트 개발	· 1990년대 초고층 건축물 건설 가능

- 한편, 철근콘크리트 구조물 건설에 따라 주변 환경 영향에 따른 구조물의 수명 단축 및 이로 인한 폐기물 발생, 건설 전과정에서의 자원사용, 오염물질 배출 등으로 인한 환경부하 등의 문제가 지속적으로 제기되고 있음
- 이는 해석, 설계, 시공 등으로 해결이 어려운 것으로 재료적 측면에서의 해결방안 제시가 필요함
- ※ 특히, 설계, 시공이 제대로 된 구조물이더라도 주변 환경 영향으로 구조물의 수명이 목표 수명보다 단축될 수 있음
- ※ 이로 인하여, 해체에 따른 폐기물 발생과 새로운 구조물 건설에 따른 천연자원 채취 및 에너지, 물 등의 소비와 오염물질 배출 등이 증가하게 되며, 이는 궁극적으로 해석·설계, 시공이 아닌 건설재료와 밀접한 관련이 있는 부분임



〈그림 I -6〉 구조재료와 관련된 사회, 환경적 문제

■ 글로벌 건설산업의 미래를 위하여 건설산업의 낮은 생산성 향상을 위한 건설산업의 혁신 필요성이 대두되었으며, 건설산업 혁신의 상당부분은 성능·기능이 향상된 건설재료에 의하여 달성 가능함

- World Economic Forum(WEF)에서는 건설산업의 미래를 위하여 건설산업의 낮은 생산성 향상을 위한 건설산업 변화의 필요성과 이를 위한 관련 주체의 변화 방향을 제시함

* 출처 : Shaping the Future of Construction : A Breakthrough in Mindset and Technology, World Economic Forum, WEF, 2016

- 미국 건설산업의 노동 생산성은 1964년 ~ 2012년 동안 -0.4%로 마이너스 성장률을 보이고 있으며, 건설산업의 생산성 1% 향상을 통하여 연간 1,000억 달러의 사회비용 절감 효과를 기대할 수 있는 것으로 조사됨
- 한편, 건설재료에 대해서는, 건설산업 혁신을 위하여 새로운 소재 활용 및 새로운

기능이 부여된 첨단 건설재료의 필요성을 제시함

※ 제품 혁신의 70%는 새로운 혹은 향상된 재료에 의함

- 또한, 건설산업을 새롭게 디자인하기 위하여, 6개 건설산업의 도전분야 및 목표 제시하고 있으며, 이는 모두 건설재료와 밀접한 관련을 가짐

* 출처 : Shaping the Future of Construction : Insights to redesign the industry, World Economic Forum, 2017

- (Sustainability) 이산화탄소 및 폐기물 배출 저감과 관련된 것으로 이산화탄소 및 폐기물을 배출하지 않는 것을 목표로 제시함

※ 탄소콘크리트로의 재료 변경을 통하여 이산화탄소 배출량을 50% 저감할 수 있음 (Carbon Composite Concrete Project(C3 Project), 독일)

- (Disaster Resilience) 사회기반 시설물과 건축물의 기후변화 및 자연재해 대응력 강화에 관한 것으로 재난 대응 시간 30% 단축을 목표로 제시함

※ 지구 온난화 등으로 지구 온도가 2℃ 증가함에 따라 콘크리트 구조물의 부식율은 15% 증가하는 것으로 나타남 (Xiaoming Wang et al., Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia, Climate Change, 69(1), 2005.)

- (Life Cycle Performance) 생애주기 비용 저감과 재사용을 위한 디자인에 관한 것으로 생애주기 비용 33% 저감을 목표로 제시함

※ (미국) CFRP 교량의 생애주기비용은 철골 교량의 38%에 불과한 것으로 나타남 (New generation of sustainable CFRP prestressed concrete highway bridges, Ohio bridge design conference presentation, 2014.)

- (Project Delivery) 공사기간과 예산의 확실성, 건설시공 생산성 향상에 관한 것으로 프로젝트 리스크, 비용 및 시간의 50% 저감을 목표로 제시함

※ 현재, 철근콘크리트 공사는 철근 조립과 콘크리트 타설 등의 어려움으로 시공 생산성을 저해하고 있음

- (Affordability) 고품질, 적정가격의 사회기반 시설물과 주택에 관련된 것으로 현재 비용 20%에서의 스마트 솔루션 개발을 목표로 제시함

- (Flexibility/Liveability/Well-being) 사용자의 웰빙을 향상시키는 사회기반 시설물과 건축물 건설과 관련된 것으로 가용성, 활용성 40% 향상 및 인간 중심의 건설을 목표로 제시함

※ 전세계 천연자원의 50% 가까이를 건설재료 생산에 사용하는 것으로 나타남 (Shaping the Future of Construction : A Breakthrough in Mindset and Technology, World Economic Forum, 2016)



〈그림 I -7〉 WEF에 의한 건설산업 혁신 과제 및 목표

2. 구조재료 개발의 필요성

2.1 건설산업 성장한계 극복 및 기술혁신을 위해 신개념 구조재료 필요

■ 국내 건설산업의 제한된 내수시장 중심의 성장과 해외 수주 실적 부진으로 인해 성장한계에 직면한 상황으로 새로운 돌파구 마련을 위한 기술혁신이 필요한 상황임

- 국내 건설산업의 생산성은 1.3달러로 벨기에, 네덜란드, 영국 등 주요 선진국 대비 매우 낮은 수준을 보임
 - 미국, 중국, 일본 등 건설업 규모가 큰 세계 41개국의 생산성을 분석한 결과, 한국은 19위로 상위권 국가의 3분의 1~4분의 1수준
 - 한국 건설업의 노동시간당 부가가치는 13달러로 벨기에(48달러), 네덜란드(42달러), 영국(41달러), 스페인(41달러) 등 유럽 선진국의 3분의 1도 되지 않음



* 출처 : 맥킨지 글로벌 연구소(2017)

<그림 I-8> 국내 건설산업 생산성 추이와 국가별 건설산업 생산성

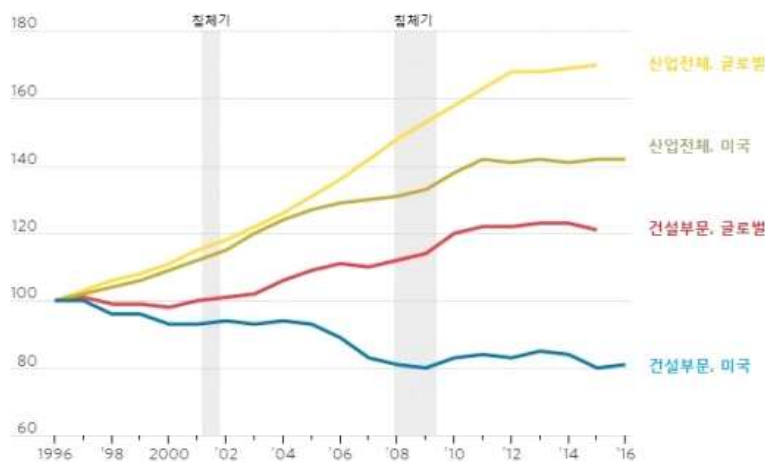
- 국내 선도 건설업체들이 지난 2013~2016년 해외 프로젝트에서 대규모 손실을 기록한 주요 원인 중 현지에서의 낮은 생산성으로 인한 손실이 큼
- 위와 같이 국내 건설산업이 타 산업 또는 선진국 대비 낮은 수준의 생산성을 보이는 이유는 민간에서 기술개발보다는 물량 중심의 수주를 통한 이익창출에 집중하고 있기 때문인것으로 나타남
- 전문가들의 대다수는 현재, 국내의 대규모 및 대기업의 건설사들을 비판하였으며, 민간기업의 이익창출이라는 이념보다는 기술개발에 초점을 두는 것이 타당하다고 함

- 특히, 민간기업은 초기비용 부담과 인센티브 부족으로 기술개발에 소극적으로 시행하며, 대기업은 기술로 평가하지 않는 발주제도로 기술개발에 무관심한 것으로 나타남

■ **국내 선도 건설업체들이 2013~2016년 해외 프로젝트에서 대규모 손실을 기록한 주요 원인은 현지에서의 낮은 생산성 때문임**

- 건설산업의 대부분은 저임금, 저생산성의 단순노동자에 의존하고 있어 기술개발이 아닌 이익창출에 초점을 두고 있음
 - 건설비용 증가, 공사기간 증가, 최저임금 증가로 인하여, 건설업의 수익성이 감소하며, 이를 통한 기술개발보다는 이익을 추구할 수밖에 없는 상황임
- 또한, 정부에서 설정한 각종 규제는 생산성을 높이기 기술혁신을 촉진하기 보다는 단기간에 많은 이익을 창출하기 위한 투입자본의 감소에 집중되어 있는 상황으로 민간의 R&D 유도할 대안이 부재한 상황임
- 현재 건설산업 가치사슬 단계에서 생산성을 혁신적으로 개선하기 위해서는 설계, 시공, 유지관리 단계 보다는 산업 가치사슬상 근본이 되는 재료의 혁신이 필요한 상황임

노동 생산성 비교(건설부문vs산업전체, 미국vs글로벌)

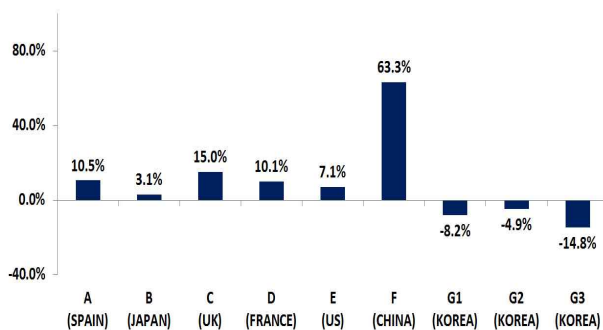


* 출처 : INSIDE(2017), 건설업 생산성은 왜 유난히 낮은걸까?

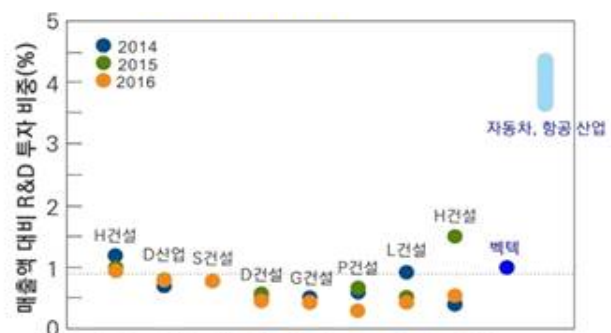
〈그림 I -9〉 노동 생산성 비교(건설부문vs산업전체, 미국vs글로벌)

- 상황으로 민간 주도의 R&D 활동에 한계가 존재함현재, 국내 건설기업들은 선진국 대비 상대적으로 낮은 수준의 R&D 투자 비중을 보이고 있어 민간 주도적 R&D 투자를 통한 기술력 강화에는 한계가 있는 상황임

- 국내 건설기업의 R&D 투자액(2016년)은 전년 대비 2015년 1조 3,000억원에서 8,100 억원대로 40% 가까이 급감하였음
- 국내기업과 해외기업의 투자비율을 조사한 결과, 현저한 차이를 보이고 있음
 - 스페인의 A기업 10.5%, 일본의 B기업 3.1%, 영국의 C기업 15.0%, 프랑스의 D기업 은 10.1%, 미국의 E기업은 7.1%, 중국의 F기업은 63.3%로 조사되었으며, 국내 기 업은 -8.2%, -4.9%, -14.8%로 조사되었음
- 국내기업의 매출액 대비 2014~2016년까지의 투자비율을 세부적으로 조사한 결과, 매출액 대비 R&D 투자 비중이 전체적으로 2% 이하인 것으로 조사되었음



국내 R&D 투자비율



국내 기업별 R&D 투자비율

* 출처 : EU Score Board 2016, Global Top 2500 Companies R&D

<그림 I -10> R&D 투자비율

- 위와 같이 성장한계에 직면한 건설산업의 혁신적인 변화를 위해서는 지속적인 R&D 활동을 통한 기술력 강화가 필요하며, 특히 산업의 근간이 되는 재료의 혁신을 통한 생산성 향상이 최선의 대안으로 제시
- 건설산업은 반영구적, 제한된 수요창출, 극히 높은 안전성 요구 등의 산업 특성에 따라 타 산업 대비 상대적은 기술변화 주기가 느리며, 도시민의 안전성과 직결되는 문제가 있어 새로운 기술에 대한 수용성이 매우 낮음
- 특히, 새로운 설계, 공법, 장비 등의 개발과 달리 산업의 근간이 되는 건설재료의 개발은 실제 현장적용을 위한 다양한 법제도적인 규제와 기준 등을 충족해야 하는

2.2 건설산업 지속가능성 확보를 위한 혁신적 구조재료 개발 필요

■ 건설산업은 지속가능한 발전과 상충되는 대표적인 환경오염 주도적인 산업으로 가치사슬 전 단계에서 심각한 환경오염 및 기후변화를 초래하고 있음

- 세계적인 산업화·도시화로 인한 천연자원 고갈, 지구온난화로 인한 기후변화 등 심각한 환경문제 해소를 위한 대안으로 지속가능한 발전이 대두
- 지속가능한 발전을 위한 핵심요소는 한정된 자원의 적절한 소비, 사용된 자원의 재활용, 환경위해 요소 배출의 최소화 등으로 집약할 수 있으나, 건설산업은 이와 상충되는 대표적인 산업임
- 인류가 발전한 이후 건설산업은 인간의 생존 및 생활, 삶의 질 향상 등을 위해 안전성·효율성·경제성을 산업의 핵심가치로 인식함에 따라 건설산업 가치사슬 전 단계에서 심각한 환경부하를 유발

〈표 I -2〉 건축행위 단계별 환경부하

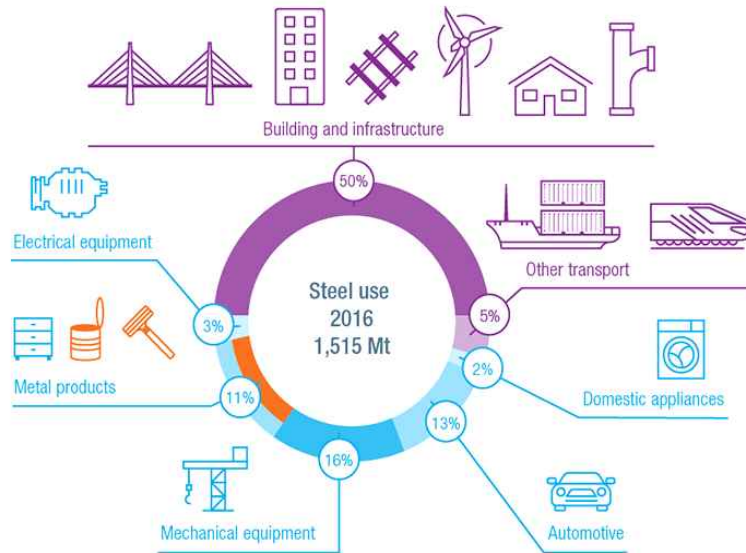
건축행위		환경부하 내용
건설단계	기획	- 개발로 인한 녹지, 산림 등의 훼손
	설계	- 의장, 구조, 설비, 방화, 재료, 경관
	시공	- 시공법, 구조, 마감, 설비, 재료운반, 건설기계, 현장사용에너지, 폐기물 처리
운용		- 설비, 에너지, 물, 실내공기, 폐기물 처리, 외부환경
개·보수		- 계획, 구조, 마감, 설비, 재료, 시공법
해체		- 비산먼지, 소음, 폐기물

* 출처 : 대한건설정책연구원(2016), 전문건설업 업종별 재료시장 기초 연구

■ 건설산업은 대표적인 자원소비형 산업으로써 건축구조물의 80% 이상을 차지하는 철근·콘크리트 제조를 위해 막대한 천연자원을 소비하고 있는 상황임

- 전세계 철강소비 현황을 살펴보면 건설·인프라 분야의 소비량이 50% 이상을 차지하고 있으며, 지속적인 인구증가와 중국·중동 지역 등의 건설수요 증가로 지속적인 수요 증가를 예상하고 있음
- 2050년까지 세계인구가 27억명으로 증가될 것으로 전망되고 있을 뿐만 아니라 급격한 도시화에 따라 건설수요는 급격하게 증가할 것으로 전망

- UNEP(2013)에 따르면 ' 70년대에서 ' 10년대까지 건축재료 소비는 13.4배 증가함에 따라 지속적인 인구증가에 따른 건설수요 증가는 자원고갈 문제에 직면할 것으로 예상하고 있음

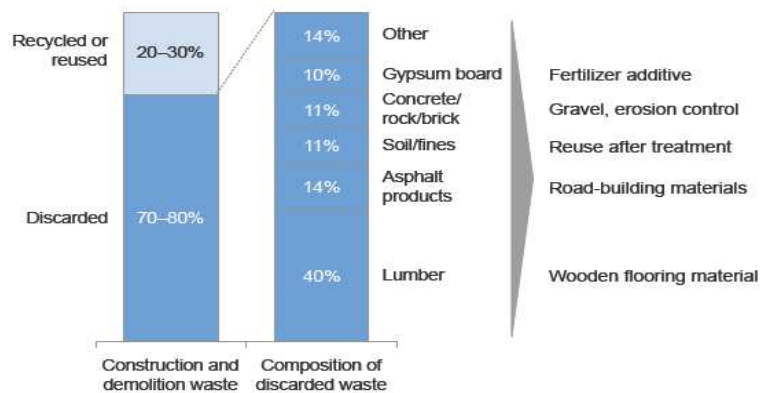


* 출처 : Worldsteel Association(2017)

<그림 I -11> 산업분야별 철강소비 현황/비중

■ 또한, 건축·구조물은 일반 소비재화 대비 내구수명 이후 및 기술의 진보 또는 환경변화 등에 따라 기능상의 결함이 발견되는 경우 철거·해체되면, 이 과정에서 대량의 폐기물이 발생하고 있음

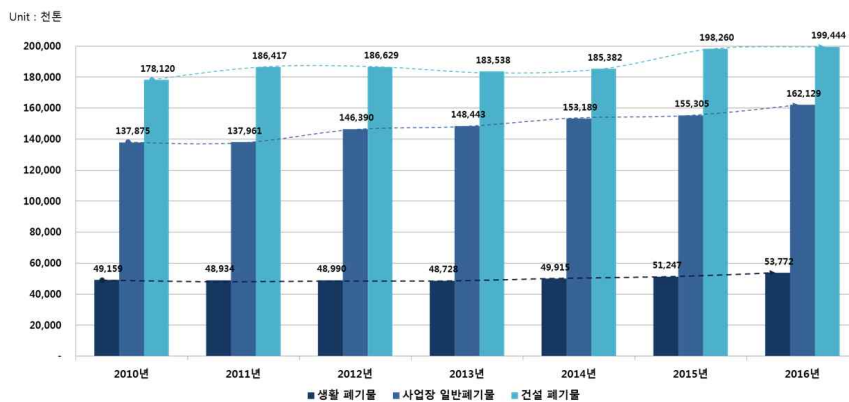
- 미국, 유럽, 일본 등 주요 선진국은 산업화·도시화 과정에서 건설된 국가 인프라 시설 및 건축시설의 노후화가 빠르게 진행되고 있으며, 노후화된 건축·구조물의 철거 과정에서 발생하는 폐기물의 처리가 사회적 이슈로 급부상
- 세계경제포럼(2017년)에 따르면 건축구조물 신규건설 및 철거과정에서 발생하는 전체 폐기물 중 20~30% 미만의 폐기물이 재사용·활용 되고 있으며, 70% 이상이 폐기처리에 따라 막대한 자원손실 및 환경오염의 유발하고 있는 상황임
 - 미국의 경우, 전체 폐기물 발생량 중 건설·철거 과정에서 발생하는 폐기물이 40% 이상으로 매우 높은 비중을 차지하고 있어, 노후화된 건물의 효율적·체계적 관리를 통한 내구수명 연장을 도모
 - 유럽의 경우, 폐기물의 발생이 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 이에 따른 다양한 정책 및 규제를 시행하고 있는 상황이며, 유럽에서 가장 많은 건설 폐기물이 발생하는 스페인의 경우 순환자원을 활용한 구조재료 개발을 추진 중



* 출처 : Ellen MacArthur Foundation; World Economic Forum; The Boston Consulting Group

〈그림 I -12〉 건설 폐기물 재사용 비중

- 한편, 국내 폐기물 발생량은 2016년 기준 국내 폐기물 발생량 중 건설분야에서 발생하는 폐기물은 404천톤으로 전체 발생량 대비 49.0%의 높은 수준을 보이고 있으며, 건설폐기물 발생량은 2010년 178천톤에서 2016년 199천톤으로 지속적으로 증가



* 출처 : 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황

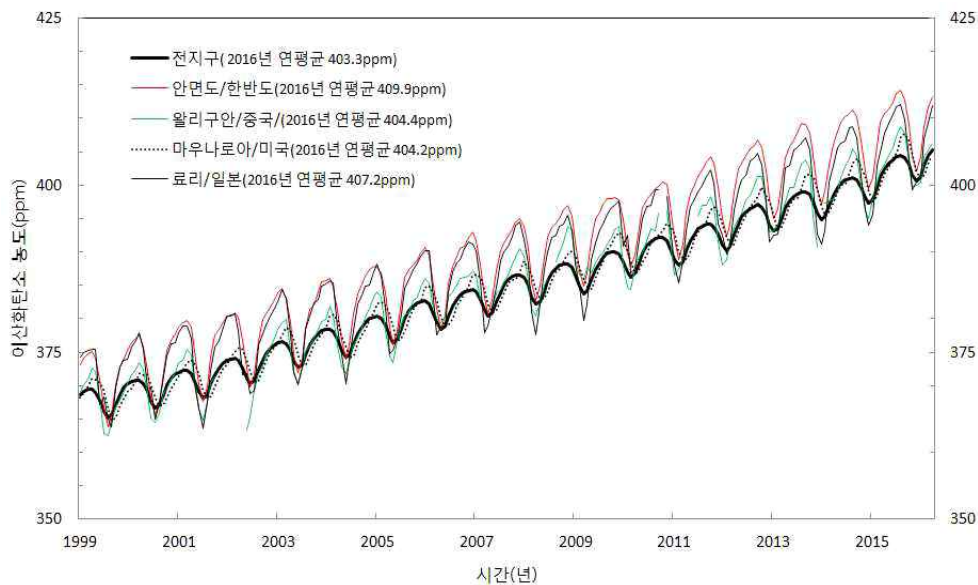
〈그림 I -13〉 국내 건설폐기물 발생량 및 비중

- **건설산업의 환경부하 행위를 최소화하기 위해서는 건설재료의 친환경성 강화와 함께 내구수명 연장을 통한 신규건설 행위 및 철거 행위를 최소화하는 것이 필요함**
- 즉, 건축물, 건설 구조물 등의 사용 중 결함을 최소화하여 내구수명을 반영구적으로 개선할 경우 철거과정에서 발생하는 다량의 폐기물을 최소화할 수 있을 것으로 전망
- 또한, 건설재료의 지속가능성 확보를 통해 신규 자원 소비를 최소화하여 신규건설 행위에서 환경부하를 최소화할 수 있을 것으로 예상됨

2.3 건설 구조재료의 기후변화 대응 · 적응력 강화

■ 20세기 이후 급격한 산업화 · 도시화 과정에서 화석연료 사용증가, 환경오염 등으로 지구 온난화, 태풍 · 폭우 발생빈도 증가, 해수면 상승 등 기후변화를 초래

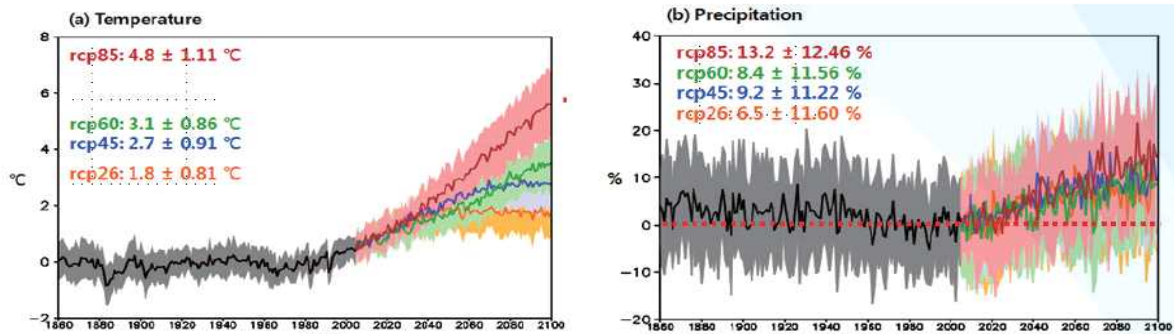
- 기후변화의 발생원인을 다양한 부분에서 찾을 수 있으나, 주로 산업혁명 이후 화석 연료 사용의 증가로 대기 중 온실가스가 급속히 증가되어 발생한 온실효과로 인한 지구온난화가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타남
- 세계기상기구(WMO)에 따르면 2016년 전지구 이산화탄소 연평균 농도가 403.3ppm을 기록하여 전년 대비 3.3ppm으로 대폭 증가하였으며, 산업화 이전(1750년) 대비 45% 증가한 것으로 보고됨
- 우리나라는 2016년 이산화탄소 농도가 409.9ppm으로 전년 대비 2.9ppm 증가하였으며, 지난 10년간 연평균 2.3ppm으로 전 지구와 유사한 수준을 기록



* 출처 : 기상청(2017)

〈그림 I -14〉 이산화탄소 농도 변화 추세

- 한편, 이산화탄소 농도 증가로 인한 온실효과의 가속화로 인해 우리나라는 지난 100년 동안 평균 지상기온이 1.8 °C 상승하여 전주기 평균(0.85 °C)를 초과한 것으로 나타남
- IPCC(2013)의 시나리오에 따르면 2100년 우리나라의 지상기온이 1.8~4.8° C상승할 것으로 전망하고 있으며, 강수량도 6.5~13.2% 증가할 것으로 전망하고 있음



* 출처 : 국토교통부 · K Water(2018), “기후변화에 따른 물 순환의 변화”, 물과 미래

〈그림 1-15〉 우리나라 지상기온 및 강수량 변화 예측

- 위와 같이 이산화탄소 농도 증가로 인한 지구온난화는 자연재해 발생 빈도 증가, 해수면 상승, 온습도 증가 등 다양한 자연환경적인 변화를 유발하고 있어 인간활동 패턴의 변화, 산업패러다임의 변화에 영향을 미치고 있음

■ 한편, 건설산업은 환경오염 및 기후변화를 초래하는 산업일 뿐만 아니라 기후변화로 인한 영향력이 매우 큰 산업으로 기후변화 대응·적응력 강화가 요구

- 기후변화로 인한 온·습도 증가, 폭우·태풍 발생빈도 증가, 해수면 상승에 따른 염해 등은 건축·구조물의 안전성에 심각한 문제를 초래할 것으로 분석됨
- 최근 기후변화로 인한 폭우, 태풍 및 허리케인, 온습도의 급격한 변화 등의 기상변화는 건축물, 교량 등의 사회기반시설의 손상과 노후화를 촉진시키고 있어 사회적 문제로 인식되고 있음

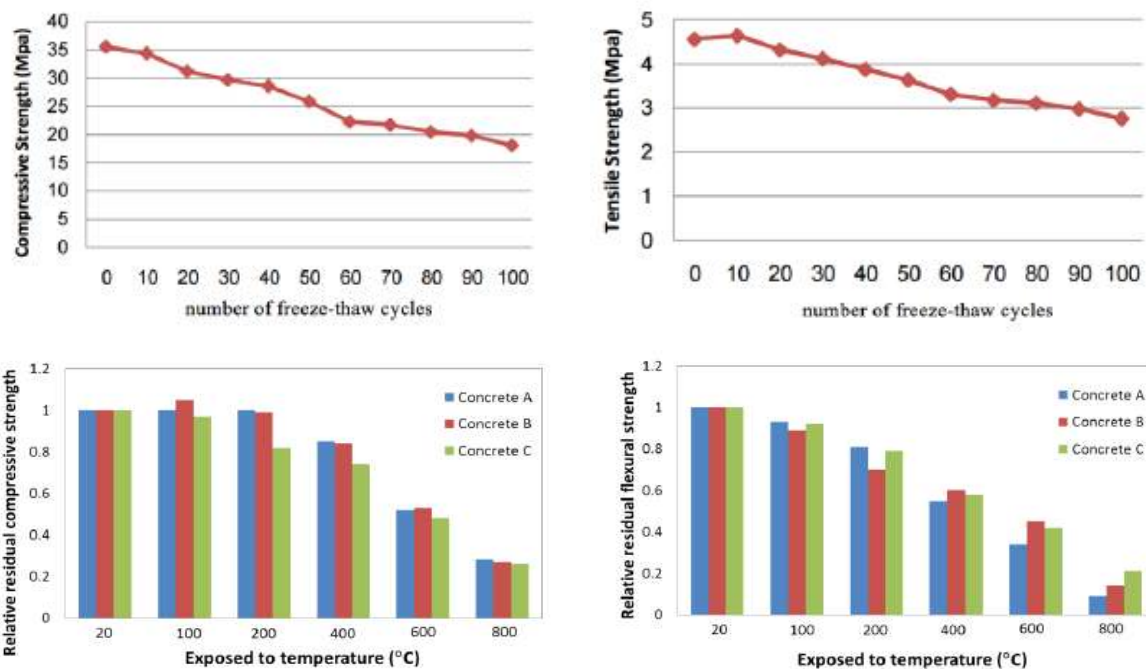
〈표 1-3〉 건축 구조물의 기후변화 영향

구분	기후변화 영향
건축물 구조문제	- 풍하중의 증가와 폭풍피해 증가 - 지리적 특성에 따른 토양 수축활동 변화
재료의 내구성	- 온습도 상승에 따른 금속재료의 부식 - 목재의 부식 및 해충피해 - 철근콘크리트의 부식, 습기피해, 황산염의 영향, 알카실리카 반응 등의 문제로 내구성 저하
내부환경 및 에너지 사용	- 건물표면의 액화와 곰팡이 문제 - 실내온도, 실내오염, 에너지 소비 증가

* 출처 : Climate Change(2012)

- 특히, 대표적인 건설구조재료인 철근 콘크리트는 이산화탄소 농도 증가로 인한 산화작용 촉진, 온습도 상승에 따른 황산염/오염물질 증가, 염화물로 인한 부식 등 내구성에 심각한 문제가 발생할 우려가 있음

- 이산화탄소의 농도 증가는 구조재료의 염화현상을 촉진하고 철근 콘크리트 구조재료의 부식과 손상을 유발함
 - 온도의 상승은 구조물의 부식과 손상을 유발하며 습도의 변화는 염화현상과 부식현상을 촉진할 수 있음
- 최근 기후변화에 따른 기상변화가 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 분석한 연구(2018) 결과를 살펴보면 극한기온(온도변화 주기)에 노출빈도, 온도의 급격한 상승이 콘크리트 내구성에 심각한 영향을 미치는 것으로 분석됨



* 출처 : Climate(2018)

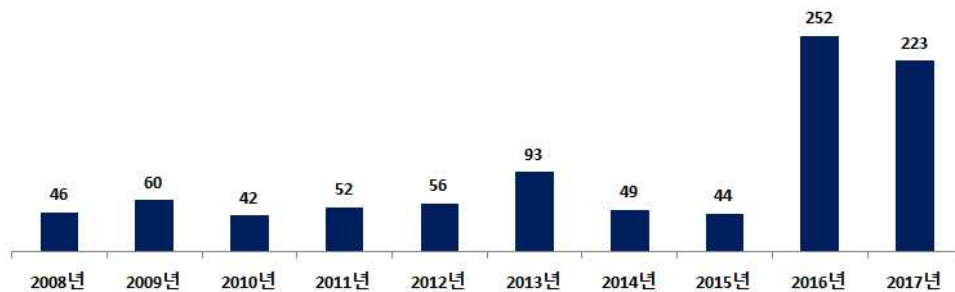
〈그림 I -16〉 온도변화에 따른 콘크리트 성능 변화

- 최근 기후변화에 따른 기상변화가 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 분석한 연구(2018) 결과를 살펴보면 극한기온(온도변화 주기)에 노출빈도, 온도의 급격한 상승이 콘크리트 내구성에 심각한 영향을 미치는 것으로 분석됨
- 건축물과 건설 구조물의 사용중 결함을 최소화하여 안전성·안정성을 강화하고 장수명화하기 위해서는 기후변화 요인에 적응력이 강한 신개념 건설재료 개발이 필요함

2.4 사회적 문제 해결을 위한 새로운 혁신적 구조재료 개발 필요

■ 자연재해 피해는 전 세계적으로 증가하고 있으며, 이에 따른 방재 건축 재료 사용을 통한 안전성 확보에 대한 관심이 높아지고 있는 추세임

- 우리나라는 환태평양 지진대에 위치하는 주변국보다 지진으로부터 비교적 안전한 지역으로 인식되었으나, 최근 지진발생 강도 증가에 따른 내진 및 내화 재료 사용의 중요성이 부각됨
- ‘16년 4월 일본의 구마모토 지진에 이어 9월에 경주에서도 지진과 여진이 계속되고 있는 등 자연재해에 대한 국민의 불안감이 커지고 있는 상황임



* 출처 : 통계청(국가지표체계)

〈그림 I-17〉 우리나라 최근 지진발생 빈도

- 또한, 도시 인구의 과밀화 심화와 건축 기술의 발달로 고층화와 특수 지형 건축이 가능해짐에 따라 피해의 대형화 가능성이 높아질 것으로 예상함
- 우리나라에서 본격적인 지진관측을 실시한 이후 최근 10년간 지진발생 빈도(연평균 47.8회)가 급격히 증가하고 있으며, 2013년 지진발생 횟수는 93회로 역대 최고 수치를 기록함



포항



경주

* 출처 : 동아사이언스(2018), “포항지진, 지열발전 자극으로 유발가능성” ... 논문 2편 ‘사이언스’ 게재
수원일보(2016), 경주지진, 어마어마한 피해 현장 ‘골목길, 벽, 붕괴·가정집 TV 박살’ 충격!

〈그림 I-18〉 우리나라 최근 지진사례

- 특히, 경주지진(2016.9.12.)과 포항지진(2017.11.15.)이 국내 역대 발생진지 중 규모면에서

각각 5.8도와 5.4도로 1·2위를 차지하고 있어 지진발생에 대한 사회적 불안감이 크게 증가하고 있는 상황임

- 이에 따라 지진발생시 피해를 최소화하기 위해서 설계기법 및 시공기술 뿐만 아니라 지진으로부터 안전성 확보가 가능한 새로운 건설재료 개발이 필요함

■ 건축 구조물의 대형화·고층화에 따라 화재 발생 시 대규모 인명피해를 야기할 수 있어 건설재료 내화성능 확보에 대한 수요가 증대됨

- 최근 대규모 인명피해 및 재산피해를 야기한 대형 화재 참사(제천 스포츠 센터, 서울 종로5가 여관, 경남 밀양 세종병원 등)의 원인으로 화재에 취약한 공법과 재료의 사용 등의 주요 원인으로 파악됨



제천 스포츠센터



서울 종로5가 여관



경남 밀양 세종병원

* 출처 : 경향신문(2017), 제천 스포츠센터 큰불...29명 사망
한국일보(2018), “왜 투숙 거부해” ...종로 여관 불지러 5명 사망
매일경제(2018), 밀양 세종병원 화재 사망자 계속 늘어날 듯... “대형 참사”

<그림 I -19> 대형화재 참사

- 소방청 통계자료에 따르면 건축 구조물의 화재로 인한 재산피해 규모는 2008년 200 억원에서 2017년 5,080억원으로 크게 증가하였으며, 인명피해는 연평균 300명 정도의 사망자가 발생함



* 출처 : 통계청(국가지표체계)

<그림 I -20> 건축물 화재피해 규모 및 사례



브라질 화재



의정부 화재



프랑스 다중 화재



화재로 인한 폭렬

* 출처 : EPOCH TIMES(2018), 브라질 국립 박물관 대형 화재...2000만 유물 90% 손실
매일건설신문(2015), 의정부화재... '드라이비트' 가 문제
(주)패널총판(2017), 가연성 단열재를 포함하는 외부 벽 조립의 위험
충북넷(2009), 한천구 교수 "초고층건물 안전이 우선이죠"

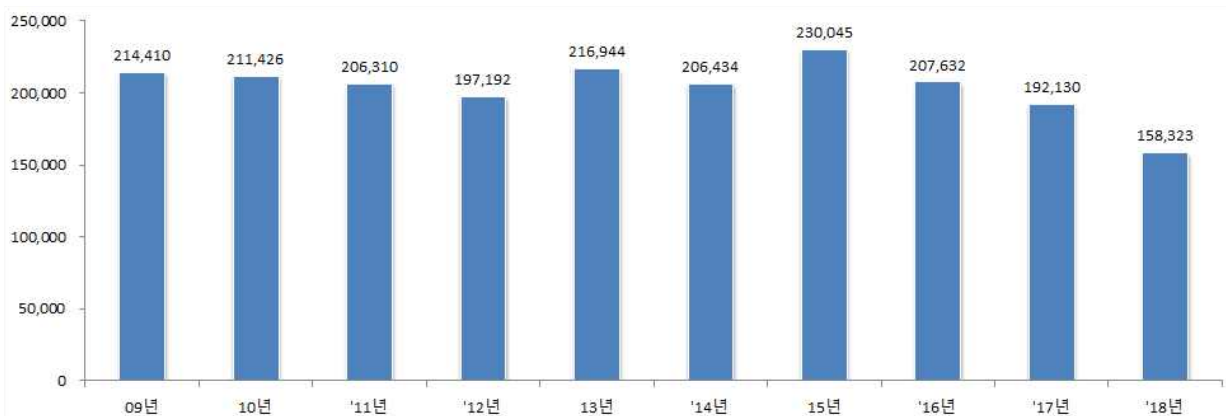
〈그림 I -21〉 대형 화재 사례

- 대형시설물 및 초고층 건축물의 경우 화재가 발생할 경우 대규모 인명·재산 피해를 야기할 수 있어 높은 수준의 내화성이 필요하나 대표적 구조재료인 콘크리트는 500~600° C에서 강도가 상온에서의 강대 대비 50% 수준으로 감소함
- 특히, 대형시설물 및 초고층 건축물에 사용되는 고강도 콘크리트는 화재 시 일반 콘크리트 대비 심각한 성능 저하를 초래할 수 있어 화재에 대한 위험성이 더욱 큰 것으로 보고됨
- 공동주택 및 다세대 주택의 이웃 간 층간소음에 관한 분쟁은 지속적으로 증가하고 있어 이에 따른 특화설계 확보와 건설재료(구조재료)의 기술개발이 요구됨
- 공동주택 및 다세대주택에서 발생하는 층간소음 분쟁으로 이웃 간의 갈등이 극도로 심화되는 등 층간소음 문제가 사회적인 이슈로 제기됨
 - 2013년 전체 신규주택 수요 중에서 아파트 등 공동주택이 차지하는 비중이 89.9%로 압도적인 수준(국토연구원, 2013)이며, 국민의 88%가 층간소음에 관한 스트레스를 받고 있는 실정(국민권익위원회, 2013)함
- 층간소음 저감에 따른 기술개발(첨단 구조재료 개발)을 통하여 인권보장, 국민의 안전성 확보, 건강 영향에 따른 확보가 절실히 필요

■ 최근, 주요선진국은 도로, 철도, 교량 등 사회기반 시설이 상당수가 노후화되어 시설물들의 붕괴사고가 빈번히 일어나고 있으며, 노후화된 시설물들에 대한 사회적 이슈로 나타나고 있음

● 노후화된 인프라의 급증에도 불구하고 적절한 대처 및 예산감소(SOC 예산)로 인해 인프라 안전성이 위협되고 있음

- 2015년을 23조 0,045억원을 기점으로 2018년 15조 8,323억원으로 감소됨에 따라 노후화된 인프라가 급증하고 있지만, 예산감소로 인하여 국민의 안전성이 위협되고 있음



* 출처 : 국토교통과학기술진흥원 내부자료

〈그림 1-22〉 최근, 10년간 SOC 예산 추이

● 해외에서는 1980년 이후에 준공한 25~40년 경과된 시설물이 붕괴되는 사례가 빈번히 발생하면서 국민의 안전을 위협하기 시작함

- '83년 코네티컷주 Mianus River 교량붕괴('68년 준공), '87년 뉴욕주 Thruway 교량 붕괴('54년 준공), '07년 미네소타주 Minnesota 교량 붕괴('67년 준공), '10년 여주 한국 교량 붕괴('69년 준공)됨

● 우리나라도 30년 이상 노후 기반 시설물이 '08년 말 기준 건축물을 제외한 1, 2종 기반 시설물 중 8.4%에서 '14년 3월 기준 9.5%로 증가하고, 1990년대 토목 시설물 급증에 따라 '20년 이후 30년 이상된 시설물의 증가세가 매우 빨라질 전망이므로, 이에 '24년에 준공 후 30년경과 1, 2종 기반 시설물이 현재 대비 2배 이상 급증해 그 비중 21.6%에 달할 것으로 전망됨

● 이로인해 막대한 유지관리 비용의 지출이 필요한 상황이나 SOC 예산의 지속적인 감소추세로 인해 적시·적소에 유지관리가 이루어지지 않을 경우 해외와 같은 대규모 붕괴사고가 발생할 우려가 존재함



Ponte Morandi(이탈리아) 교량 붕괴



Lecco(이탈리아) 교량 붕괴



Adriatic(이탈리아) 교량 붕괴



Minnesota(미국) 교량 붕괴



세종(한국) 교량 붕괴



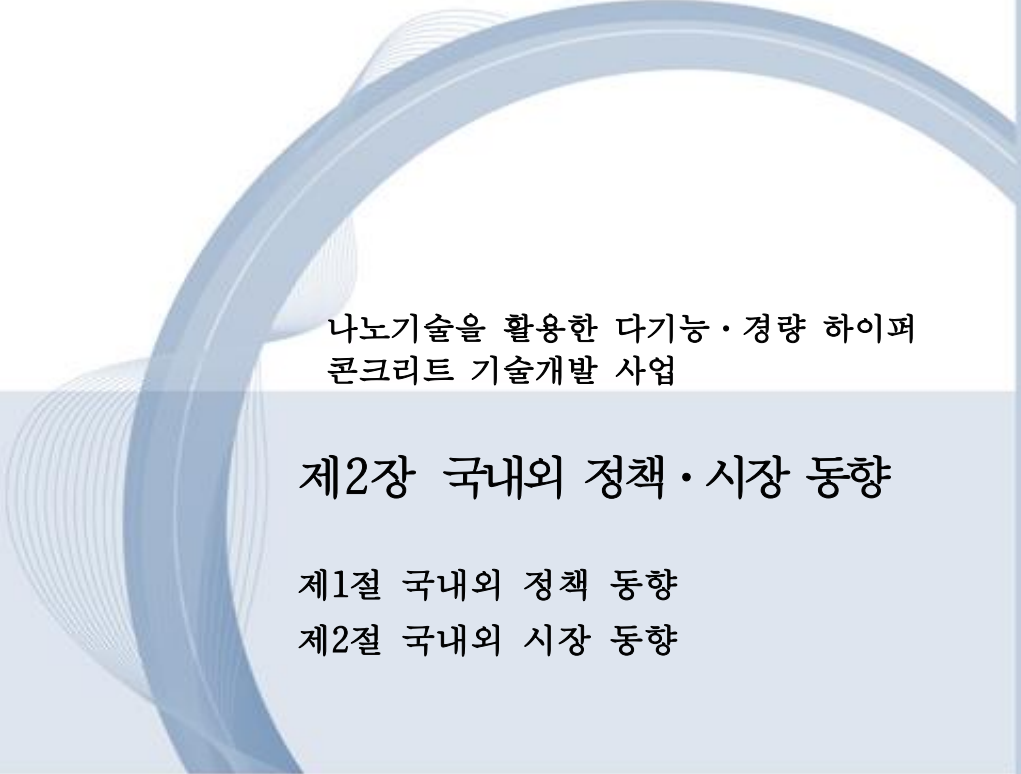
여주(한국) 교량 붕괴

* 출처 : 이현숙(2018), SOC와 ICT 융합을 통한 인프라 노후화 대책
도시방재연구원(2018)
시사뉴스(2010)
중도일보(2018), 세종 폭우에 교량 3개 '폭삭' ...노후교량 안전 빨간불

〈그림 I-23〉 노후교량 붕괴사고 사례

■ 노후시설물의 보강을 위한 고강도/고내구성에 따른 첨단건설재료 기술개발(첨단 구조재료 개발)을 통하여 사회적 이슈 해결, 국민의 안전성 확보가 절실히 필요함

- 강도/고내구성에 따른 첨단건설재료 기술개발(첨단 구조재료 개발)을 통하여 사회적 이슈 해결, 국민의 안전성 확보가 절실히 필요함
- 또한, 최근, 사회적 이슈인 화재, 지진, 층간소음, 붕괴(SOC 예산감소)로 인한 인명 피해 및 재산피해를 최소화할 수 있는 내진·내화성, 차단·흡음성, 고강도·고내구성에 따른 혁신적 건설재료 개발 필요



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼
콘크리트 기술개발 사업

제2장 국내외 정책·시장 동향

제1절 국내외 정책 동향

제2절 국내외 시장 동향

제2장 국내외 정책 · 시장동향

제1절 국내외 정책동향

1. 국외 정책동향

1.1 미 국

- 미국은 저성장 시대로 진입했고, 정부의 재정 여력도 해를 거듭하며 낮아짐에 따라 공사비 절감과 첨단기술 적용을 통한 유지비 절감 등의 정책 추진
- 건설산업을 6대 국가전략산업으로 선정하여, 유지관리 비용과 공해 등을 50% 이상 감소하는 것을 국가 건설목표로 설정하여 추진
- 연방고속도로청(FHWA)은 IBRD(Innovative Bridge Research and Deployment) 사업을 통하여 교량의 건설 및 유지관리 비용 감소를 추진
 - 구조물의 유지관리 및 생애주기 비용을 감소시키기 위하여 자기치유 콘크리트와 같은 고성능 재료 기술개발에 초점
- 에너지부(DOE)는 Building America 사업을 통하여 건축물의 에너지 효율향상을 위한 단열소재 연구 등을 지원
 - 시공비를 증가시키지 않으면서 70% 이상 에너지 소비를 절감시킬 수 있는 기술의 연구개발을 위해 노력
- Executive Order 13514를 통하여 ‘20년까지 미국 전역의 주거부문, ’ 30년까지 모든 연방정부 건물, ‘50년까지 상업용 건물을 제로에너지빌딩화 계획 발표
- 미래 신소재 개발을 위한 인프라 구축 및 연구개발방법론에 집중하여,
 - 개발기간 단축 및 비용 절감(Materials Innovation Platform, ‘14)
- National Nano-technology Initiative(NNI) 수립을 통해 부처 간 협력체계를 구축하고, 지속적인 나노기술 R&D 예산 투자를 통해 제품화 강화를 적극 추진해옴
 - 현재는 신소재 개발을 위한 인프라 구축 및 연구개발방법론에 중점을 두고 개발기간 단축 및 비용 축소에 집중하고 있음

- 정책과제로는 National Nano-technology Initiative(NNI2), Materials Genome Initiative(MGI)를 추진 중임
- (주요 연구개발 프로젝트) 클린에너지, 반도체 및 나노일렉트로닉스

1.2 유럽연합(EU)

■ 유럽은 정책적 지원을 통한 조기 글로벌 경쟁력 확보를 위하여 지속가능한 건설, 바이오, 자원재활용 등의 분야를 선도하기 위해 노력

- 미래 건설시장 선점을 위해 첨단기술 활용 건설재료 분야 중장기 전략으로 NANO-futures 로드맵을 ‘12년에 수립
 - 고내구성·고생산성 SOC, 친환경·고성능 CO2 저감 건설재료 등 폴리머 섬유를 활용한 경량/다기능 건설재료를 위한 전략 수립
 - AMANAC(Advance Material & Nanotechnology Cluster)은 모든 고급 재료와 나노기술 프로젝트의 협력 플랫폼으로 EU의 지원을 받아 첨단 건설재료 개발을 추진
 - 기능성, 친환경, 고성능 첨단 건설재료 개발 프로젝트의 상호 협력 및 시너지 효과를 위해 첨단재료와 나노기술의 클러스터 구축을 지원
 - 유럽의 12개 기관이 참여하여 ‘Self-healing materials for prolonged lifetime’이라는 주제로 HealCON 프로젝트(’13~’17)를 진행
 - 유럽은 자기치유 콘크리트 분야에서 앞선 기술을 보유하고 있으며 독일 Fraunhofer UMSICHT 중심으로 12개 기관*이 참여하여 자기치유 관련 협업 네트워크를 구축
- ※ Ghent University, Avecom, TU Delft, Acciona, TUM, TTI, VTT, COWI, DTI, CEINNMAT, Devan and Fescon
- 환경, 에너지, 자원 개발 및 재활용에 대한 연구도 활발히 진행되고 있으며, 폐기물 재활용, 건축물 친환경/에너지절감 분야에 대한 다양한 기술개발을 추진
 - 프랑스, 영국, 덴마크 등은 시멘트 사용량을 줄이기 위해 ‘Eco-Serve Network’를 결성하였으며, 기후협약에 따라 프랑스 시멘트 회사들은 ‘20년까지 시멘트 사용량을 20% 감축키로 선언
 - 영국은 ‘13년 자국 건설산업의 SWOT을 분석하고, 중장기 건설 산업의 실천 목표와 전략을 제안한 ‘건설산업 2025’를 발표

- 주요 비전 및 목표와 주요 전략을 수립하였으며, 저탄소 녹색건설 수출 주도, 온실가스 저감, 기술적으로 진일보한 스마트 산업 등 환경문제 해결과 기술 혁신을 통한 글로벌 경쟁력 제고
- 독일은 미래 지속가능한 산업(에너지, 교통, 건강, 환경, 사회인프라 등)을 위한 실용적 소재개발(Von Material zur Innovation, '15)

1.3 일 본

■ 일본은 시공현장의 안전성 확보, 지구 온난화, 글로벌 경쟁력 확보, 빈번한 자연재해 등을 해결하기 위해 신기술·신공법 등의 건설기술 개발 정책 추진

- 일본은 동일본 대지진, 후쿠시마 원전사고 발생 이후 당초 수립한 제4기 과학기술 기본계획(2011~2015)을 전면 재검토
 - 일본뿐만 아니라 세계각지에서 일어나는 지진 및 원전사고에 대한 급격한 환경변화를 반영하기 위해, 기존에 수립 중이던 계획을 수정
- 일본 정부는 '14년 6월 '방재백서안' 을 공표하였으며, 주요 내용은 향후 발생 가능성이 있는 대지진에 대비해 주택 내진화와 피난체제에 대한 사전대책 마련으로 피해를 대폭 줄일 것을 강조
- 제3차 과학기술 기본계획을 바탕으로 'Innovation25' 라는 장기 전략을 추진 중이며 ' 장수명을 위한 고강도 재료 및 자기치유 관련 기술 ', ' 사회 및 국민의 안전을 제공하기 위한 센싱 모니터링 ' 등의 내용을 포함
 - '20년에는 모든 신축 공공건물, ' 30년에는 모든 신축 민간건물이 제로에너지빌딩을 달성하도록 목표를 제시하였으며, '14년부터 일정 규모이상의 건물에 대해 에너지절약기준 의무화를 통한 건축물에 대한 에너지성능기준을 도입
- 일본은 20여 년의 경제 장기 침체를 극복하기 위하여 아베노믹스 정책을 추진하고 있으며 여기에 포함된 주요 건설 정책은 동일본 대지진 복구 등 재정 정책 지원과 새로운 성장 전략의 일환인 기반 환경 정비를 포괄
 - 인구 감소와 고령화, 인프라 노후화 등이 내부 환경과 국제 경쟁력 강화라는 외부 환경에 대응하고자 하며, 이를 위한 노후 인프라에 대한 집중적인 선투자를 통한 재고 인프라 및 주택의 효율성 극대화를 추진
- 또한, 도쿄는 '2020년의 도쿄' 계획을 수립하여 도시방재력 향상, 기후변화에 따

른 에너지 정책 강화 등을 목표로 추진

- 각 연도별 정책방향과 주요 시책, 중점 시책 등을 제시하고, 목표 실현 및 실효성 확보를 위한 3년 후의 도달목표 및 3개년 연차별 사업계획을 명시
- 제5차 과학기술기본계획('15), 新원소전략 프로젝트('12~'21)을 통해 사회·경제 수요 및 환경 변화에 대비한 수요대응형 소재개발
- 나노기술의 융합화를 통한 신산업 창출 및 산업경쟁력 강화를 위해 산·학·연·관 협력에 지속적인 관심을 두고 있음
- 주요 연구개발 프로젝트:
 - ① 데이터구동형물질 및 재료개발(Material·Informatics)/ ② 축전지/ ③ 파워 일렉트로닉스/ ④ 구조재료/ ⑤ 원소전략/ ⑥ 인공광합성, CO2 자원화

1.4 중 국

- 개혁개방 이후 빠른 경제성장으로 경제와 사회를 크게 발전시켜 왔으나, 이로 인한 과도한 에너지 소비와 심각한 환경파괴에 따른 대책으로 친환경 사회 건설을 정부 주요 정책 목표로 설정
- 중국은 ‘제12차 과학기술발전 5개년 계획(‘11년~’15년)’을 통하여 신소재 개발 및 지속가능한 건설기술 개발을 추진
- 기능성 스마트신소재, 복합소재, 나노소재, 저비용재활용 등의 기술 개발을 통한 기술 혁신 방안 제시
- ‘에너지발전전략 행동계획(‘14년~’20년)’을 통해 도시 내 건축물 중 50%이상의 녹색 건축화 계획을 추진
- 녹색건축물 평가등급제 도입, 녹색건축물 설계 기준 마련을 통해 건축물 에너지 절감 및 에너지 효율성 제고
- 또한, ‘녹색 건축 행동 방안’을 통하여 에너지 자원 절약과 환경보호를 위한 도시 신축 건물에 엄격하고 강제적인 에너지 절약 기준을 적용
- 공공건물의 에너지 절약 관리 강화, 녹색 건축 관련 기술 연구 개발 및 보급, 녹색 건설재료 개발, 건축 산업화 추진, 건축 폐기물 자원화 이용 등을 추진
- 한편, 중국 지진국은 세계적으로 이슈가 되는 지진 방지대책으로 ‘중화인민공화국 지진방지재해감소법’을 기초로 건축물 건설에 앞서 지진 안전성 평가를 실시

- 건축물 건설시 사전 지진 안전성 평가를 실시하여 건설여부를 결정하고 내진성능에 대한 인증을 제도화

● 주요 연구개발 프로젝트:

- ① 특수금속 기능소재, 고성능 구조재료/ ② 기능성 고분자소재, 특수 무기비금속소재/ ③ 선진 복합소재, 초전도 나노소재, 그래핀

2. 국내 정책동향

2.1 상위계획 및 정책

■ 과학기술정보통신부(장관 유영민, 이하 ‘과기정통부’)는 『제4차 과학기술기본계획(‘18~‘22)』을 통해 과학기술관계부처와 공동으로 4차 산업혁명 핵심기술과 13대 혁신성장동력을 육성하고 국민 생활과 밀접한 분야의 연구개발(R&D)을 강화

- 중점과학기술로 건설·교통분야의 지능형 건물관리기술, 친환경 다기능 건설재료 기술, 지속가능한 인프라 구조물 건설기술을 선정
- 2018년 정부연구개발투자 방향 및 기준에서는 미래유망 건설·교통 시스템 구축 및 운영 분야 투자를 강화하고 시설물 유지관리 기술 개선에 투자 지속과 미래 산업 수요 대응 소재 및 시장선도 나노·소재 핵심 기술 개발 설정

■ 과학기술정보통신부는 ‘4차 산업혁명 경쟁의 원동력이 미래소재’라는 인식 하에 미래사회 대응을 위해 ‘미래소재 원천기술 확보전략’을 마련 중에 있음

※ 미래소재란 미래 신산업 창출과 혁신기술 개발의 기반이 되는 소재, 인공지능, 빅데이터, IoT, 헬스케어, 환경·에너지, 안전분야 등 4차 산업혁명과 미래사회의 핵심영역을 뒷받침할 원천소재

- 우리나라는 소재·부품특별법이 제정된 ‘01년부터 소재 응용·개발 연구에 집중 투자하여 소재산업의 기술경쟁력을 강화하여 왔으나, 기초·원천연구에는 투자가 미흡하여 일부 핵심 첨단소재는 여전히 외국기술에 의존하고 있는 실정임
- 산학연의 100여명 소재 전문가 그룹은 4차 산업혁명과 미래사회 변화에 따른 초연결, 초고령, 지속가능 환경, 안전 등 4대 메가트렌트에 핵심적으로 필요한 30대 미래소재를 도출
- 그 중 건설재료와 관련하여 지진, 원전가동·폐기 시 안전확보, 급작스런 정전 및 사회 재난 발생 시 효율적 대응을 위한 소재로 극한환경 자가치유 고신뢰성 소재 도출

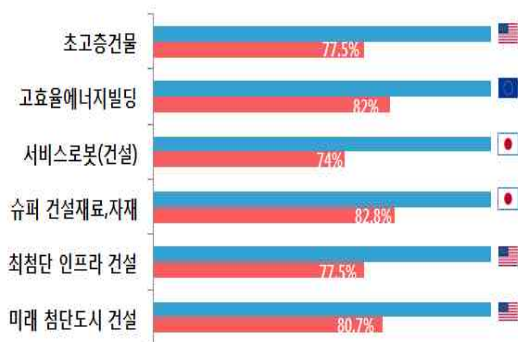
〈표 II-1〉 구조재료 관련 30대 미래소재 기술 중

4대이슈	12대 중분류	30대 미래소재	기술개요	활용분야
④ 안전한 사회를 위한 안전 소재 (6개)	[12] 재난대비 자가복원 치유소재	㉔ 극한환경 자가치유 고신뢰성 소재	인장외력 작용 시 팽창하여 지각변동에 유연하게 대응할 수 있는 소재	건축, 토목, 해양플랜트 등 구조안전 강화에 적용

■ 『제9차 경제관계장관회의』에서 ‘건설산업 혁신방안’을 수립하여 상정

- 플랜트 분야(누적수주의 58%)의 기업 경쟁력은 높으나, 첨단 인프라, 초고층빌딩 등 주요기술은 Global Top 대비 70~80% 수준

- 건설자동화 등 4차 산업혁명 대응을 위한 R&D 투자도 매우 저조



〈그림 II-1〉 Global Top 대비 주요 기술수준

* 출처 : 『제9차 경제관계장관회의』 자료, 2018



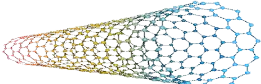
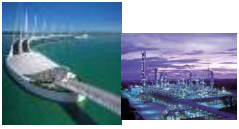
〈그림 II-2〉 업종별 R&D 투자규모(매출액 대비)

- R&D 강화, 스마트 인프라 등 기술로 승부하는 건설시장의 확대를 통해 건설산업을 낡은 전통산업에서 혁신친화적 산업으로 전환하고자 함

As-Is	To-Be
◆ 생산성 OECD 하위 3위(18.7달러) ◆ 소산업 중 R&D 투자 최하위(0.2%) ◆ 해외수주 최근 3년간 56% 감소	◆ 노동생산성 40% 향상 ◆ 매출 대비 R&D투자 1%로 확대 ◆ 2천억\$ 이상 수주달성('18 ~ '22)

- 그 중 스마트 건설기술 활성화를 통해 건설자동화, 스마트 유지관리 등 첨단 건설 기술 개발에 ‘27년까지 약 1조원을 투자(예비타당성 추진)하여 핵심기술 보급

〈표 II-2〉 스마트 건설재료 R&D 사업(안)

구 분	주요 기술	투자비용 및 기대효과
 건설 자동화	- BIM 플랫폼 구축 - 건설자동화 로봇 적용 - 공장형 시공(모듈러, 가상시공) * 건설자동화 로드맵 수립('18.7)	- 약 2,000억원('20~'27) - 건설 생산성의 획기적 제고 및 안전사고 예방
 스마트 유지관리	- IoT, 빅데이터 기반 최적의 유지보수 기술 개발 - 시설물 내부손상 탐지 및 수명 자동 예측 기술 개발	- 약 1,400억원('20~'26) - 선제적 시설물 관리로 인명피해·사회적비용 ↓
 스마트 건설재료	- 고분자 탄소재료를 활용한 철근 대체재 개발 - 나노소재를 이용한 고내구성 콘크리트 개발	- 약 1,600억원('20~'26) - 구조물의 내진성능과 내구성·강도·유연성 ↑ → 비용절감, 재해피해 경감
 메가스트럭처 + 플랜트	- 초장대교량, 부유식(floating) 해저터널, 인공섬 기술 개발 - 극한지 자원화 플랜트, 바이오 매스 및 지하복합 플랜트 기술	- 약 5,100억원('20~'25) - 해외수요가 높은 공종의 집중개발로 원천기술 및 글로벌 경쟁력 확보

■ 『6차 건설기술진흥기본계획('18~'22)』은 “Smart Construction 2025” (2025년까지 BIM, AI 적용한 건설자동화 기술개발 “을 비전으로 제시

- 4차 산업혁명에 대응하는 기술개발·신산업 육성 전략 중 기술개발 분야의 스마트 건설기술을 통한 생산성 향상 중점추진과제 내용으로 Maintenance Free 건설재료를 제시하고 있음
- 2018년도 국토교통과학기술 연구개발사업 시행계획 중 건설기술연구개발사업, 도시건축연구사업, 국토교통기술지역거점센터 사업 등을 통해 개별적 수준의 재료관련 과제가 추진 중에 있어 전체를 포괄하면서 집중화된 기술개발사업 추진 필요

■ 정부는 저탄소 녹색성장 정책 시행과 이에 따른 온실가스 배출량을 ‘20년 기준 배출전망치 대비 30% 탄소 배출량 감축 목표를 세우고 있으며 이를 달성하기 위한 범정부적 탄소 배출량 저감 기술의 개발 필요성이 대두

- ‘09년 녹색성장 국가 전략의 비전으로 ’ 20년까지 세계 7대, ‘50년까지 세계 5대 녹색강국 진입을 목표로 설정
- 시멘트 사용량을 획기적으로 줄일 수 있는 친환경 콘크리트 개발을 통하여 국가 온실가스 배출량 감소에 크게 이바지할 것으로 기대

■ 국내에서는 건축물 에너지 효율성 및 건축물 첨단화에 따라 다양한 지원제도 시행으로 기술의 선진국 대비 격차 해소와 기술 고도화를 유도

- 정부는 에너지 소비 감소, 건물 수명을 늘리기 위해 수직 증축 및 그린 리모델링 제도*를 추진

※ 리모델링 시 에너지 성능 개선 공사비를 은행에서 저리로 대출받고, 공사완료 후 절감되는 냉·난방비로 대출금을 장기간에 걸쳐 상환하도록 하는 제도

- 국토교통부는 친환경 및 고기능 건축물에 대해 녹색건축 인증제도와 지능형건축물 인증을 통하여 체계적인 기술발전 및 인증제도를 시행
- 산업통상자원부는 신재생에너지설비의 보급을 장려하기 위한 신재생설비 인증제도를 시행
- 국토교통부와 산업통상자원부는 건물 에너지 효율등급 인증제도 시행을 통하여 에너지 효율성이 높은 건물의 확산을 장려

■ SOC* 신규투자 감소 및 유지관리 투자 급증에 따른 시설물 고령화 대비 효율적 유지관리의 필요성 증대에 따라 정부는 시설물 유지관리 3차 기본계획 발표

※ 사회간접자본(Social Overhead Capital)은 도로, 항만, 철도 등 경제활동을 원활하게 하기 위해 꼭 필요한 사회기반시설

- 안전한 시설물(Safe), 환경 파괴없이 지속가능한 시설물(Sustainable), 스마트한 시설물(Smart)을 3대 목표로 설정
- 안전 예산 관리 체계의 전면 개편 및 안전 예산을 12.4조원에서 14.6조원으로 대폭 확대(17.9% 증가)

- 학교, 재해 취약시설물 안전 점검 후 보수/보강 : 1.4조원 → 2.0조원

※ 학교시설 보수/보강 : 0.2조원 → 0.6조원(300% 증액)

- 기존 SOC시설의 위험요인 제거 등 안전시설에 대한 투자 강화

- 도로 성능 개선 : 0.8조원 → 1.3조원

- 노후 철도 및 도시철도의 성능개선 : 0.6조원 → 0.9조원

■ 또한, 국토교통부는 ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’을 공포하여 건축구조물,

항만, 도로, 교량 등 결합이 있는 시설물에 대한 보수보강을 실시토록 개정

- ‘14년 1월 17일 시행되었으며, 이에 따른 노후 시설물 등의 유지보수 및 보강이 이슈화되어 관심이 집중
- 선진국의 유지관리 투자비중, 신규 건설 규모 전망 등에 기초하여 안전 및 유지관리 수요를 전망하고 있는 추세이며, 추후 국내 건설 정책은 신규 건축물 신설보다 기존의 시설물 유지에 집중
- ‘15년부터 국토교통부 건설기술연구사업을 통해 ‘자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발’을 지원

※ 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, 생애주기 이산화탄소 배출량 30% 감소 목표

■ 최근 찾아진 지진, 호우 등의 재해재난 피해 증가에 따른 ‘15년 침수위험지구의 침수방지시설 설치, 고층건축물의 피난시설과 대피공간의 표시방법 등 건축물 안전에 관한 규정을 신설 및 개정

- 건축물의 대지, 형태 등을 고려하여 건축물의 유지관리, 안전, 구조 등에 대한 내용을 규정
- 국민안전처는 ‘16년도 재해예방사업 추진을 위해 1,037개소에 1조 2,835억 원을 투입하여 노후 시설 및 위험 구간 보수·보강

■ ‘16년 9월 20일 국토교통부는 9월 12일 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진 등의 국내외 발생한 지진 관련 건축물의 구조 안전을 강화하는 내용을 포함한 건축법령 개정을 발표

- 주요 개정 사항으로는 내진설계 의무 대상 변경, 기존건축물 내진 보강 유도 방안, 건축물 내진능력 기준과 같은 안전 기준 등을 제시
- 현재 우리나라 건축물 등의 공공시설물 내진율은 상당히 저조한 수준이며, ‘15년 12월말을 기준으로 기존 공공시설물의 내진율은 45.6% 수준으로 이에 대한 대책 마련이 시급
- 내진보강 기본계획에 따른 재정투자 집행 실적 또한 미흡한 실정으로 ‘11년부터 ‘14년까지 투입된 예산의 연평균 수치는 약 1,330억 원에 불과

〈표 II-3〉 1단계 내진보강 기본계획 예산 및 재정투자 실적

(단위: 억 원)

구 분	2011	2012	2013	2014	2015	연평균
예산	1,071	7,027	7,676	7,157	7,320	6,050
재정투자	1,585	1,783	961	989	-	1,330

* 출처 : 2단계(2016~2020) 기존 공공시설물 내진보강 기본계획('15)

2.2 분야별 유관계획 및 정책

가. 시설물 안전관리에 관한 특별법

■ 「시설물 특별법」은 시설물의 안전점검과 적정한 유지관리를 통하여 재해와 재난을 예방하고 시설물의 효용을 증진시킴으로써 공중(公衆)의 안전을 확보하고 나아가 국민의 복리증진에 기여를 목적으로 함

- 시설물의 안전성을 확보하고 기능을 유지하여 자연재해로 인한 피해를 방지하기 위해 준공 또는 사용승인을 받은 후 20년이 경과한 시설물 중 안전점검 및 정밀안전진단지침에 따라 정기적으로 정밀안전진단 실시를 포함하고 있음
- 재해 및 재난 예방과 시설물의 안전성 확보 등을 위하여 정밀안전진단을 실시하며 내진성능평가를 포함하고 있음
- 법적 근거를 마련하여 지속적·안정적으로 시설물을 관리하며 지속적으로 발생하고 있는 안전사고를 예방할 수 있도록 지향하고 있음
- 「시설물 특별법」은 시설물 정밀안전 및 내진성능에 대응 할 수 있도록 건설에 대한 고강도·고기능을 통한 관리를 지향하고 있음

나. 국가안전관리기본계획

■ 국가안전관리기본계획은 각종 재난 및 사고로부터 국민의 생명·신체·재산을 보호하기 위하여 국가의 재난 및 안전관리의 기본방향을 설정하는 최상위 계획임

- 도시화·인구집중, 고령화, 기후변화, 신종감염병의 창궐 등 재난 환경 변화에 대응하여 국가가 국민을 재난 및 안전사고로부터 보호하기 위함

■ 국가안전관리기본계획은 안전한 나라, 행복한 국민이라는 비전을 설정함

- 안전이 생활화된 국민, 안전이 체질화된 사회, 안전이 우선시되는 국가정책이라는

목표를 통하여, 5대 전략, 19개 세부추진과제를 설정함

〈표 II-4〉 국가안전관리기본계획 내 구조재료 관련 추진과제

4대 전략		세부 추진과제
전략 4.	재난안전 예방 인프라 확충	4-1. 예방을 통한 연속성 확보
		5-7. 제조·건설·서비스업 사업장 등 산업현장 안전관리
전략 5.	분야별 안전관리	5-8. 시설물 안전관리 강화
		5-9. 대형교통(도로·철도·항공) 안전관리

다. 제4차 시설물 안전 및 유지관리 기본계획

■ ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’ 제3조 제1항의 규정에 의하여 「제4차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획(2018-2022)」을 수립함

- 제3차 기본계획이 종료되면서 향후 5년(2018-2022년) 新 정부와 함께 할 시설물 안전·유지관리 제도·정책 로드맵과 기술발전 청사진 제시가 포함되어 있음

■ 종전과 다른 새로운 환경변화가 전망되므로, 이에 적극 대응할 필요성이 대두되어 ‘미래요구 대응을 위한 지속가능한 시설물 안전관리 기반 구축’을 비전으로 설정함

- 4대 목표로 안전하고 오래 사용하는 시설물, 스마트한 시설물, 경제 활성화에 보탬이 되는 시설물, 국민이 믿을 수 있는 시설물 등을 제시함
- 또한, 비전 달성을 위한 4대 전략으로는 시설물 노후화 대비 선제적 관리체계 정착, 4차 산업혁명 기술 활용 시설물 안전·유지관리 고도화, 융·보합을 통한 미래 대비 산업발전 기반 조성, 국민 소통형 시설물 안전·유지관리 서비스 지향 등을 제시함
- 추진과제 중 시설물 노후화를 대비한 안전 및 유지관리, 첨단기술에 관한 내용이 내포되어 있음

〈표 II-5〉 시설물 안전 및 유지관리 기본계획 내 구조재료 관련 추진과제

4대 전략		세부 추진과제
전략 1.	시설물 노후화 대비 선제적 관리체계 정착	1-2. 성능 중심 유지관리의 안정적 정착 및 지속적 확대
		1-5. 설계·시공 및 유지관리 정보의 통합 및 환류체계 구축
전략 2.	4차 산업혁명 기술을 활용한 시설물 안전 및 유지관리 고도화	2-3. 시설물 안전 및 유지관리 차세대 핵심기술 확보
		2-4. 첨단기술 테스트베드 및 성능 검증 체계 구축

2.3 연구개발 관련 정책

가. 제4차 과학기술기본계획('18~'22)

■ 과학기술기본계획은 과학기술 기본법에 따라 5년마다 수립하는 법정 중장기 계획이자 과학기술분야 최상위 계획임

- 향후 5년 간 과학기술 발전에 관한 중·장기 정책목표와 정책의 기본방향, 산업·인력·지역 등 과학기술혁신과 관련된 분야별 정책의 추진방향, 현 정부의 주요 정책기조 등을 담고 있음

■ 과학기술로 국민 삶의 질을 높이고 인류사회 발전에 기여하는 비전을 설정하여 기본계획을 수립함

- 이 중 스마트 건설재료와 직접적으로 연관성이 높은 분야는 깨끗하고 편리한 생활환경 구축으로 기후변화 대응력 강화 및 생활공간 편의성 향상 과제 등이 있음
 - (기후변화 및 신기후체제 대응으로 지속가능성 확보) Non-CO2 온실가스 저감기술
 - (생활공간 편의성 향상) 슈퍼건설재료 및 재료기술

〈표 II-6〉 제4차 과학기술 기본계획 내 구조재료 관련 추진과제

4대 전략	19개 분야	78개 추진과제	구성기술(스마트 건설재료 연관성)
과학기술로 모두가 행복한 삶 구현	안심하고 살 수 있는 안전한 사회 구현	재난현장 지원·대응을 위한 스마트 재난안전관리 시스템 확보	- 노후 및 신설 도시 인프라의 지진 취약성 진단
			- 내진보강기술 개발 및 예방적 유지관리 시스템 개발
	쾌적하고 편안한 생활환경 조성	기후변화 및 신기후체제 대응으로 지속가능성 확보	- 메탄 아산화질소, 불화가스 저감 등 비이산화탄소계 온실가스 저감기술 개발
		쾌적하고 청정한 생활환경 구현	- 쓰레기, 폐기물, 하·폐수의 처리·재활용·자원화 기술고도화
		편리하고 살기 좋은 스마트시티 구축	- 효율적 에너지 관리가 가능한 지능형 건물관리기술 및 스마트홈 기술 개발

나. 제6차 건설기술진흥 기본계획('18~'22)

■ 2025년까지 스마트 건설자동화 등 4차 산업혁명에 대응하는 기술을 개발하는 중장기 계획을 담은 건설기술정책 로드맵 『제6차 건설기술진흥 기본계획』을 수립

● 'Smart Construction 2025'을 비전으로 4차 산업혁명에 대응하는 기술개발·신산업 육성, 글로벌 시장 경쟁력 강화를 위한 제도 개선 등 2개 전략, 10개 중점추진과제 추진

- (스마트 관리체계) 4차 산업혁명기술을 활용하는 '스마트 건설기술' 개발 등으로 시스템·장비 기반의 안전체계 구축 및 활용 촉진
- (제도적 근거마련) 현장관리 시 IoT, 드론 등 4차 산업혁명 첨단 기술이 활용될 수 있도록 비용 반영 근거 마련
- (IoT 기반 스마트 유지관리) IoT 기반 계측센서, 드론 등 첨단 유지관리 기술을 개발하여 시설물 이상을 신속 검지·대응('19~'23)

※ 스마트센서 등은 산자부와 협업하여 기술개발 추진

- (지하시설물 관리 기술 개발) 지하시설물을 비개착 방식으로 건설하고 유지·관리할 수 있는 장비 기술 개발로 국민 편의 증진('19~'25)
- (Maintenance Free 건설재료) 구조물 상태를 진단하고 스스로 치유가 가능한 건설 재료를 개발하여 시설물 유지관리 효율화

〈표 II-7〉 『제6차 건설기술진흥 기본계획』 2개 전략, 10개 중점추진 분야

전략 I		4차 산업혁명에 대응하는 기술개발·신산업 육성	
분 야		중점 추진 과제	
기술개발		① 스마트 건설기술을 통한 생산성 향상	
		② 해외 수요 대응형 건설기술 개발	
고부가 산업 육성		③ 분야 간 융·복합을 통한 경쟁력 강화	
		④ 건설 Big Data 유통을 통한 신산업 육성	
건설 안전 강화		⑤ 건설의 안전·환경 관리	
전략 II		글로벌 시장 경쟁력 강화를 위한 제도 개선	
분 야		중점 추진 과제	
산업 개편·육성		① Eng.의 역량 강화 및 해외진출 지원	
		② 국제 기준에 부합 하는 제도 구축	
건설인력·교육		③ 글로벌 기준에 맞는 경력 관리체계 구축	
		④ 국제경쟁력을 갖춘 기술인력 육성	
기준·제도		⑤ 기술력 중심의 발주심의 강화	

다. 제4차 소재·부품발전 기본계획('17~'21)

■ 『제4차 소재·부품발전 기본계획』을 통해 소재·부품 정책을 소주기 기업활동에 있어 4차 산업혁명 지원형으로 전환하여, ①4차 산업혁명 관련 新산업 육성, ② 주력산업 고도화를 뒷받침

● (소재) 부품 또는 완제품 기능을 좌우하는 핵심 물질로 5대 소재로 구분

품목명	비중('14 생산액)	주요 제품	주요기업('15 매출액)
① 제1차 금속	40.7%(107조원)	철강, 알루미늄, 마그네슘	포스코 (25.6조) 현대제철(14.5조)
② 화합물 및 화학	36.2%(95.4조원)	합성수지, 합성고무, 의약품질	롯데케미칼(8.5조) 금호석유화학(3.2조)
③ 고무 및 플라스틱	15.0%(39.6조원)	타이어, 합성피혁, 플라스틱	한국타이어(3.4조) 에스케이씨(1.8조)
④ 섬유제품	4.1% (10.7조원)	직물, 화학섬유, 특수사	효성(8.0조) 코오롱인더스트리(3.4조)
⑤ 비금속광물	3.9% (10.3조원)	세라믹, 산업유리, 탄소섬유	쌍용양회(1.4조) 조선내화(0.5조)

〈그림 II-3〉 5대 소재 생산액 및 주요제품

● (부품) 모듈 및 완제품의 구성요소로 7대 부품으로 구분

품목명	비중('14 생산액)	주요 제품	주요기업('15 매출액)
① 전자부품	36.5%(146조원)	반도체, 액정표시장치, 통신기기	엘지디스플레이(25.9조) 삼성전기(5.3조)
② 수송기계부품	24.9%(99.7조원)	자동차부품, 항공기부품, 철도부품	현대모비스(19.1조) 만도(3.1조)
③ 일반기계부품	14.3%(57.3조원)	공조·건설기계, 내연기관, 금형	두산인프라코어(3.5조) 한온시스템즈(2.3조)
④ 전기기기부품	14.2%(56.9조원)	축전지, 전동기, 전기신호장치	엘지화학 (17.3조) 삼성에스디아이(6.7조)
⑤ 조립금속제품	7.6%(30.3조원)	열처리, 볼트, 너트, 절삭가공	태양금속공업(0.4조) 진합(0.3조)
⑥ 정밀기기부품	2.1%(8.4조원)	정밀측정·시험기기, 의료정밀기기	에스엔티모티브(0.9조) 케이씨텍(0.3조)
⑦ 컴퓨터 및 사무기기	0.4%(1.6조원)	컴퓨터 입력·출력 장치, 사무용 기기	대우루컴즈(0.1조) 에이텍시스템(0.1조)

〈그림 II-4〉 7대 부품 생산액 및 주요제품

라. 2018년도 나노기술발전시행계획

■ 과학기술정보통신부(장관 유영민)는 나노기술 분야에 6,693억 원을 투자한다는 내용의 '2018년도 나노기술발전시행계획'을 발표

- 나노기술발전시행계획에는 10개 부처와 11개 정부출연연구기관에서 수행하는 연구 개발(5,720억 원), 인프라(527억 원), 인력양성(446억 원) 등이 포함
- 과기부는 우선 나노기술 기초분야 연구 지원 확대, 나노기술 투자 체계화, 나노분야 산학연 협력 강화를 통해 국가 나노기술 경쟁력을 확보할 예정
 - 특히 나노소자·나노시스템 기술 실현, 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷과 융·복합화가 가능한 스마트소재를 개발할 계획
 - 산업화 촉진을 위한 핵심기술 개발과 기술 사업화를 지원하고 나노 인프라 강화
- 과기부, 산업부, 환경부 등에서는 산업에 미치는 파급효과가 크고 기술 성숙도가 높은 ▲3D 나노전자소자, ▲IoT적용 환경·식품 나노센서, ▲기능성 나노섬유, ▲탈귀금속 촉매용·탈희유원소 산업용 나노소재, ▲저에너지 수처리 시스템 등 7대 전략분야와 그래핀과 환경 분야 나노기술 등 유망기술 산업화 등을 추진

제2절 국내외 시장 동향 분석

1. 시장의 정의 및 분류

■ 건설재료의 분류

- 건설재료의 범위와 유형은 크게 구조재 시장과 마감재 시장으로 구분할 수 있음(Cliffs, 1987)
 - 구조재는 건물의 하중을 감당하고, 건축물의 성능과 안전을 좌우하는 중요한 구성 요소로 내강성, 비축성, 불연성, 내열성 등이 우수해야 하며 품질에 대한 신뢰도 높아야 함
 - 마감재는 하중과 관계없이 주로 피복 및 치장을 목적으로 건물의 내·외부에 마감되는 재료로서 용도별로 외장재, 내장재, 지붕재, 바닥재, 창호재, 방수재, 배선재, 전기 및 조명기구, 냉·난방기기 등으로 구분할 수 있음
- 건설재료는 구조재, 철강·비철재, 내·외장재, 도료, 창호재, 방수·보온단열재, 전기설비재, 기타재, 시약 등으로 구분이 가능함(주택 건축재료 백과, 2005)

〈표 II-8〉 건설재료 재료별 분류

분류	소분류
구조재료	골재, 시멘트, 혼화재 조적, 지붕재, 콘크리트 가공제품, 말뚝, 구조용 목재
내·외장재	합판, 내외장 패널 바닥재, 미장재, 지류
창호재	창 및 문, 창호 부재료, 창호용 실링재, 유리
급배수 및 위생설비	밸브류, 이음관, 급배수, 냉난방관, 위생설비 보일러, 펌프 등
기타재료	접합·접착제, 가설재, 부품류, 금속재료
철강·비철 재료	강재, 판재, 선재 및 봉강용접봉, 구조용강판, 볼트 너트류, 주철·주물·주강 등
도료	바탕도료, 방청도료 표면도료, 희석제
방수·보온 단열재	아스팔트, 방수재, 보온·단열재, 흡음재
전기설비 재료	전선, 선로용품 등기구류, 배선, 전기기구
시약	시약·시험기구

* 출처 : 대한건설정책연구원(2016), 전문건설업 업종별 자재시장 기초 연구

■ 또한, 건설재료를 건설공사 공종별로 살펴보면, 건축재료, 토목재료, 기계설비재료, 전기통신재료 등으로 구분할 수 있음

〈표 II -9〉 건설재료 주요재료 분류

분류	소분류
봉강	이형철근, 원형봉강, 평강, 각강 등
형강	ㄱ형강, ㄷ형강, I형강, H형강, T형강 등
강판	열연강판, 내연강판, 아연도강판, 갈바륨강판, 규소강판, 석도강판, 피복강판 등
강관	구조용 강관 등
특수강재	스테인레스강판, 스테인레스봉, 앵글, 강관, 와이어로프, 강선, 특수강, 주철품, 주강품 등
선재제품	철선, 강선, 철못, 와이어 로프 등
비철제품	동제품, 연제품, 알루미늄제품, 합금주물 등
볼트·너트	육각볼트, 앵커볼트, 행거볼트, 인서트, 너트 등
철망	용접철망, 스테인레스망, 각종철망, 철망태 등
골재·시멘트·레미콘	모래·자갈, 시멘트, 레미콘, 모르타르 등
콘크리트혼화재	콘크리트혼화재, 콘크리트보강섬유, 탄소섬유보강재 등
목재	원목, 각재, 판재, 합성목재 등
접착제	접착제 등
가설재	강관비계, 조립식틀비계, 강관서포트, 복공판, 잭서포트 등

* 출처 : 대한건설정책연구원(2016), 전문건설업 업종별 재료시장 기초 연구

〈표 II -10〉 건축공사 주요재료 품목

분류	소분류
벽돌·블럭	시멘트벽돌, 특수벽돌, 점토벽돌, 경량단열벽돌블럭, 자연석 전통블럭, 압출성형시멘트판, 조립식 PC판 등
석재·타일	대리석복합타일, 테라조, 화강석, 대리석, 내장타일, 외장타일, 바닥타일, 석재타일, 특수타일 등
미장방수	아스팔트방수재, 벤토나이트방수재, 시트방수재, 에폭시방수재, 뽕칠재, 단열피복재, 균열보수재 등
지붕·유리	슬레이트, 점토기와, 골함석, PVC골판, 유리단열필름, 판유리, 복층유리, 유리블럭 등
철물	도어록, 도어크로저, 플로어, 경첩, 창호철물, 핸드레일 등
창호재	자동문, 회전문, 방화문·판넬, 특수문, 알루미늄샤시, 플라스틱창, 목재문, 셔터 등
내외장재	금속내외장재, 법랑판넬, 알루미늄복합판넬, 불연내장마감판, 금속천정재, PVC천장판, 기타천장판, 석면시멘트판, 흡음재 등
단열재	폴리에스터단열재, 온돌판넬, 발포폴리스틸렌, 미네랄울보온재, 유리섬유보온재, 폴리우레탄보드 발포보온재 등
바닥재	콜크바닥재, 이중바닥재, 비닐타일, 금소마루판, 목재마루판 등
실내장식재	벽지, 인테리어필름, 블라인드, 커튼 등
조립식건물	칸막이, 조립식판넬, 샌드위치판넬 등
도료	수성페인트, 유성페인트, 애나멜페인트, 락카, 우레탄도료, 아크릴도료, 에폭시도료, 기타합성수지도료, 도료충전재 등

* 출처 : 대한건설정책연구원(2016), 전문건설업 업종별 재료시장 기초 연구

〈표 II-11〉 토목공사 주요재료 품목

분류	소분류
도로포장재	아스팔트석분, 아스팔트콘크리트, 투수성아스팔트콘크리트, 도로포장용보수재, 신축이음채움재, 흙포장 등
도로용블럭	콘크리트경계블럭, 합성수지경계블럭, 보도용콘크리트판, 점토보도블럭, 화강석경계블럭, 워시패턴타일, 잔디블럭 등
도로시설물	측구수로관, 토목용소형구조물, 맨홀, 콘크리트맨홀, PE그레이팅, 스틸그레이팅 등
도로안전용품	도로용페인트, 시선유도표지판, 도로표지병, 도로안내표지판, 도로안전용판, 철도/궤도용품 등
토목용관	원심력철근콘크리트판, 유공관, 추진관, 수밀벨트, 플룸관, 사면방호공, 토목용조립식배수로, 콘크리트흙관 등
수로용재	굴격형배수구, 철근콘크리트수로관, 조립식개거수로·암거수로, 조립식PC암거, 이중벽철판매입이형관 등
교량·하천·항만재	돌망태, 교량용PC제품, 교량용이음재, 교량용난간, 수문, 권양기, 제진기, 영구앵커, 교량용품 등
토목용말뚝	전기저항용접강관파일, 에폭시폴리에틸렌피복강관말뚝, 스위트파일, PHC파일, 콘크리트말뚝, 측량용말뚝, 기재료 등
토목용블럭	축대용콘크리트블럭, 도경용블럭, 토목용법면보호블럭, 옹벽시스템, 도로포장용보강재, 연약지반성토목용블럭 등
산업용화약	산업용화약, 무진동파쇄재, 발파기 등
토양안정재	토목섬유, 지수판, 조립식PC암거, 흙막이판넬 등
조경	조경수목, 산림조형, 잔디·인조잔디, 인공토양, 토양개량재, 온실용재, 조경시스템, 시설원예기재료 등
울타리	콘크리트조경울타리, 헨스, 알루미늄헨스 등

* 출처 : 대한건설정책연구원(2016), 전문건설업 업종별 재료시장 기초 연구

〈표 II-12〉 토목공사 주요재료 품목

분류	소분류
기계설비재	배관재, 밸브, 계기류·배수기구, 펌프·셀, 보일러, 탱크 연료가·방열기, 냉·난방기기, 건조기기, 덕트기구, 위생기구 등
전기통신재	전선·케이블, 전선접속재, 전선관로재, 전력기기, 배선기기, 배선기구, 조명기구, 전주·가선철물·절연재, 전광·신호장치, 유무선통신기기·방송음향기기, 비상경보기기

* 출처 : 대한건설정책연구원(2016), 전문건설업 업종별 재료시장 기초 연구

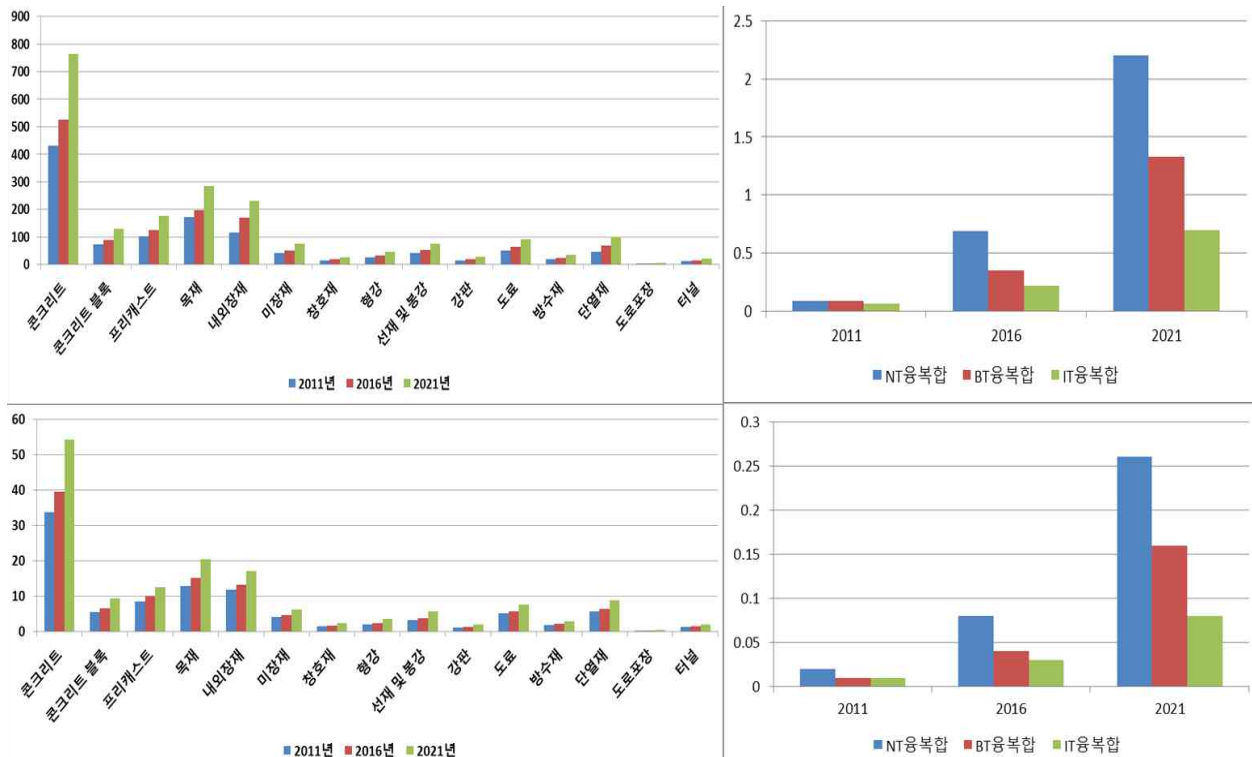
2. 시장 동향 및 트렌드

■ 해외 및 국내 건설재료별 시장은 평균 5%의 성장을 보일 것으로 전망되고 있으며, NT, BT, IT 융복합 건설재료 시장은 규모는 작으나 평균 29.8% 이상의 높은 성장률을 보임

● 해외와 국내 모두 NT, BT

● , IT 융복합 건설재료 시장이 빠르게 성장하고 있는 것으로 나타나며, 아직 시장 형성이 되지 않은 분야에 대한 선택과 집중으로 해당 시장 선점 및 시장경쟁력 우위 차지 가능할 것으로 전망함

- 현재는 콘크리트 시장이 가장 큰 규모를 차지하고 있으며, 향후 NT, BT, IT 융복합 건설재료 시장이 급성장 할 것으로 전망함
- 융복합 시장은 아직 시장형성 초기 단계로 규모가 미미하여 시장 진입 및 성장이 타 재료 대비 용이할 것으로 보이며, 향후 NT, BT, IT 융복합 시장을 국내에서 선도하기 위한 정부차원의 지원이 필요함



* 출처 : Big Blue Banyan('17)

<그림 II -5> 국내(아래)의 건설재료별 시장 규모 비교

<표 II -13> 국내의 건설재료별 시장 현황 및 전망

단위 : 백만 달러

구분		2011	2016	2021	CAGR
콘크리트	해외	431.10	526.65	765.09	5.9%
	국내	33.85	39.50	54.32	4.8%
콘크리트 블록	해외	72.94	89.00	129.29	5.9%
	국내	5.61	6.68	9.44	5.3%
프리캐스트	해외	102.26	124.77	177.09	5.6%
	국내	8.49	10.11	12.57	4.0%
목재	해외	173.26	196.25	285.10	5.1%
	국내	12.95	15.11	20.53	4.7%
내외장재	해외	115.35	170.83	230.93	7.2%
	국내	11.82	13.32	17.09	3.8%
미장재	해외	42.24	51.60	74.96	5.9%
	국내	4.17	4.70	6.30	4.2%
창호재	해외	15.02	18.40	26.73	5.9%
	국내	1.45	1.64	2.33	4.9%
형강	해외	26.36	32.20	46.78	5.9%
	국내	2.04	2.38	3.56	5.7%
선재 및 봉강	해외	42.81	52.30	75.98	5.9%
	국내	3.32	3.87	5.77	5.7%
강판	해외	15.31	18.70	27.17	5.9%
	국내	1.19	1.38	2.06	5.6%
도료	해외	51.77	63.24	91.87	5.9%
	국내	5.11	5.75	7.72	4.2%
방수재	해외	19.33	23.61	34.30	5.9%
	국내	1.91	2.15	2.88	4.2%
단열재	해외	46.59	69.00	100.24	8.0%
	국내	5.76	6.49	8.92	4.5%
도로포장	해외	2.72	3.32	4.83	5.9%
	국내	0.24	0.28	0.39	5.0%
터널	해외	11.84	14.47	20.35	5.6%
	국내	1.34	1.56	2.08	4.5%
NT융복합	해외	0.09	0.69	2.20	37.7%
	국내	0.02	0.08	0.26	29.2%
BT융복합	해외	0.09	0.35	1.33	30.9%
	국내	0.01	0.04	0.16	32.0%
IT융복합	해외	0.07	0.22	0.70	25.9%
	국내	0.01	0.03	0.08	23.1%

* 출처 : Big Blue Banyan('17)

3. 국내외 시장동향 및 전망

3.1 건설재료 시장동향 및 전망

■ 2014년 기준 건설재료 7개 세부분야에 대한 세계 무역규모는 4,330억 원 달러에 이르고 있음

- 미국의 건축재료 수출기업들은 2015년 기준으로 건축재료에 대해 미국 이외지역의 수입 수요인 3,770억 달러 규모의 시장 잠재력을 확보하고 있음
- 2009년 시장규모에서 5년간 평균 규모로 계산하면 연평균 성장률은 7.8%의 규모를 나타냄

〈표 II-14〉 세계 건축재료 수입국 순위

단위 : 억 달러, %

구분		순위									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
건축재료	국가 (규모)	미국 (600)	중국 (430)	독일 (300)	일본 (220)	프랑스 (180)	영국 (180)	캐나다 (140)	이탈리아 (120)	멕시코 (120)	대한민국 (100)
	CAGR	10.7	14.8	7.7	7.1	2.1	8.4	7.1	1.6	11.3	6.0
냉동공조	국가 (규모)	미국 (270)	독일 (140)	중국 (140)	일본 (80)	멕시코 (70)	프랑스 (70)	영국 (70)	캐나다 (60)	러시아 (50)	이탈리아 (50)
	CAGR	11.5	7.2	5.9	8.9	13.1	3.2	6.7	7.4	15.0	1.8
조명재료	국가 (규모)	미국 (108)	독일 (50)	프랑스 (30)	영국 (20)	중국 (20)	캐나다 (20)	멕시코 (16)	네덜란드 (16)	일본 (15)	이탈리아 (14)
	CAGR	12.2	9.2	2.1	8.9	-3.1	7.7	10.5	7.9	9.1	5.2
배관재료	국가 (규모)	미국 (36)	독일 (22)	프랑스 (16)	영국 (14)	이탈리아 (8.97)	중국 (8.55)	캐나다 (8.19)	멕시코 (8.05)	러시아 (7.79)	일본 (7.76)
	CAGR	7.1	8.1	3.4	4.7	1.8	1.8	5.2	4.6	9.2	12.8
목재료	국가 (규모)	중국 (220)	미국 (160)	일본 (110)	독일 (70)	영국 (50)	프랑스 (40)	이탈리아 (40)	캐나다 (40)	네덜란드 (30)	대한민국 (30)
	CAGR	26.9	10.6	6.0	7.9	14.0	0.5	0.2	6.7	3.9	8.3
단열재료	국가 (규모)	미국 (7.66)	독일 (6.18)	중국 (5.71)	프랑스 (4.88)	캐나다 (3.67)	멕시코 (3.46)	영국 (2.86)	이탈리아 (2.52)	벨기에 (2.09)	러시아 (2.05)
	CAGR	11.4	6.5	13.5	1.7	9.5	16.7	6.5	1.9	1.0	16.4
창호 및 문	국가 (규모)	미국 (21)	독일 (11)	영국 (9.26)	프랑스 (8.74)	일본 (7.95)	스위스 (7.35)	캐나다 (5.87)	오스트리아 (4.37)	러시아 (4.28)	덴마크 (4.15)
	CAGR	3.9	11.0	4.1	1.1	3.5	9.0	6.1	5.7	7.0	1.5
건설유리	국가 (규모)	중국 (37)	홍콩 (12)	대한민국 (8.78)	미국 (6.21)	캐나다 (4.65)	독일 (4.25)	프랑스 (3.86)	말레이시아 (2.74)	폴란드 (2.70)	벨기에 (2.69)
	CAGR	51.0	59.0	-7.5	8.3	7.1	-2.9	-0.7	8.7	1.6	3.3

* 출처 : 국토교통과학기술진흥원(2016), 건축재료와 관련된 전 세계의 최상위 시장 보고서

가. 철강재

■ 2018년 세계 철강수요는 성장기조가 유지될것으로 전망하며, WSA는 2018년 세계 철강재 소비량이 전년 (2017년) 대비 1.6% 증가한 16.5억톤으로 예상됨

- 2017년 중 부동산 경기 호조 및 인프라 투자 확대 등에 힘입어 양호한 성장세를 보인 중국 수요가 2018년에는 정부의 환경통제, 강화, 경제구조 리밸런싱 정책 등의 영향으로 정체될 전망이다
- 그러나 세계경제 회복에 힘입어 중국을 제외한 신흥국의 소비가 강화되고, 선진국 또한 일정 수준의 성장을 나타내면서 이를 보완할 것으로 예상됨
- 지역별로는 신흥국 비중이 높은 기타 유럽, CIS, 중남미, 아프리카, 중동에서 높은 수준의 수요신장이 예상함

〈표 II -15〉 세계 철강재 소비량

단위 : 백만 톤, %

분류		철강재 명목 소비량			CAGR		
		2016	2017	2018	2016	2017	2018
세계		1,515.9	1,622.1	1,648.1	1.0	7.0	1.6
	선진국	398.8	408.1	412.0	0.0	2.3	0.9
	중국	681.1	765.7	765.7	1.3	12.4	0.0
	신흥국	436.0	448.2	470.4	1.5	2.8	4.9
	ASEAN*	74.1	77.7	83.0	13.9	4.8	6.8
	MENA	72.6	72.6	75.8	-0.5	0.0	4.5
세계 (중국 제외)	EU	158.2	162.1	164.3	2.8	2.5	1.4
	기타 유럽	40.5	40.1	42.2	1.2	-1.0	5.2
	CIS	49.4	51.1	53.0	-2.7	3.6	3.8
	북미	132.2	138.7	140.4	-1.5	4.9	1.2
	중남미	39.4	40.4	42.3	-13.5	2.5	4.7
	아프리카	37.6	37.0	38.2	-2.7	-1.6	3.3
	중동	53.1	53.9	56.5	-1.4	1.5	4.8
	아시아, 오세아니아	1,005.4	1,009.8	1,111.1	2.2	9.3	1.1

* ASEAN : 인도네시아, 말레이시아, 필리핀, 태국, 베트남

* 출처 : 2018년 Industry Credit outlook(2017), 2018년 산업전망-철강

나. 시멘트

■ 세계 시멘트 수요는 2010년 33.12억 톤에서 2020년 43.7억 톤으로 연평균 2.81%의 성장세를 보일 것으로 전망함

- 세계 시멘트 시장 수요 중 중국과 인도의 시장 규모가 각각 2,160백만 톤, 242백만 톤으로 각각 세계 시장의 57.8%, 6.5%를 일본은 2%로 형성하고 있음
- 세계 시멘트 시장은 2010년 2,338.6억 달러, 2011년 3,167.9억 달러, 2012년 3,303.4억 달러, 2013년 3,418.7억 달러, 2014년 3,520.0억 달러, 2016년 3,786.3억 달러로 완만한 증가세를 나타내며 2020년에는 4,555.4억 달러로 성장할 것으로 전망됨

〈표 II-16〉 시멘트 소비 수요의 세계 시장 규모 및 전망

단위 : 억 톤, 억 달러, %

구분		2010	2011	2012	2013	2014	2016	2020	CAGR
세계	물량	33.12	35.85	37.36	38.41	39.49	40.60	43.70	2.81%
	금액	2,338.6	3,167.9	3,303.4	3,418.7	3,520.0	3,786.3	4,555.4	

* 출처 : 한국시멘트연감(2017)을 토대로 필자가 재구성

다. 아스팔트 콘크리트

■ 세계 아스팔트 시장 규모는 2016년 1억 2,311만 m/t으로 2021년 1억 1,562만 m/t으로 연평균 4.12% 성장할 것으로 예상됨

- 2016년 기준으로 세계 도로 아스팔트 시장점유율이 가장 높았으며, 2016년 2,535만 달러의 매출을 올리고, 2021년에는 3,209,010만 달러의 수익을 낼 것으로 추산되어 2016~2021년까지 연평균 4.83%의 수익을 낼 것으로 예상됨

〈표 II-17〉 아스팔트 콘크리트의 세계 시장 규모 및 전망

단위 : m/t

구분	2016	2017	2018	2019	2020	2021	CAGR
규모	123.11	127.70	132.72	138.23	144.15	150.62	4.12%
전년대비 상승률	-	3.73%	3.93%	4.15%	4.28%	4.49%	

* 출처 : TechNavio-Infiniti Research Ltd.(2017), Global Asphalt Market 2017-2021

3.2 첨단건설재료 시장동향 및 전망

가. 자가치유 재료

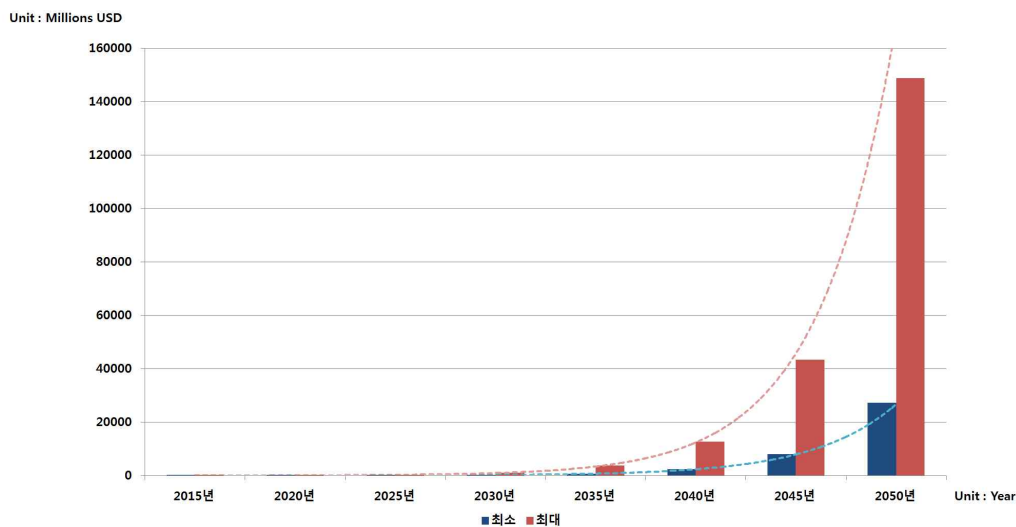
■ Future Markets, Inc.(2017)에서는 ‘15년~‘25년까지 세계 자가치유 물질 및 재료를 위한 세계시장을 추정한 결과를 발표함

- 2015년 최소 5백만 달러, 최대 15백만 달러, 2027년에는 최소 93.2백만 달러, 최대 509.2백만 달러로 추산됨
- Future Markets, Inc.(2017)의 추산한 데이터 값을 토대로 2050년까지 시장을 추산한 결과 2050년에는 최소 27,242.39백만 달러, 최대 148,839.33백만 달러로 추산됨

〈표 II-18〉 자가치유 세계시장 전망

단위 : 백만 달러

년도	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	CAGR (‘15-‘50)
최소	5.00	20.00	60.00	195.45	61.58	2,307.52	7,928.58	27,242.39	27%
최대	15.00	60.00	32.00	1,067.87	3,669.17	12,607.18	43,317.95	148,839.33	25%



* 출처 : Future Markets, Inc.(2017)를 토대로 필자가 재구성

〈그림 II-6〉 자가치유 세계시장 전망 그래프

■ 유럽시장에서 자가치유 물질 중 중합체, 코팅제, 콘크리트가 시장점유율 상위 3개에 해당되며, 그 중 자가치유 콘크리트 비중이 43%로 가장 높음

- 유럽 전체 자가치유물질 시장의 규모는 2015년 기준 2,970만 달러이며, 자가치유 코팅제는 25%, 자가치유 중합체는 9%의 시장점유율을 보임

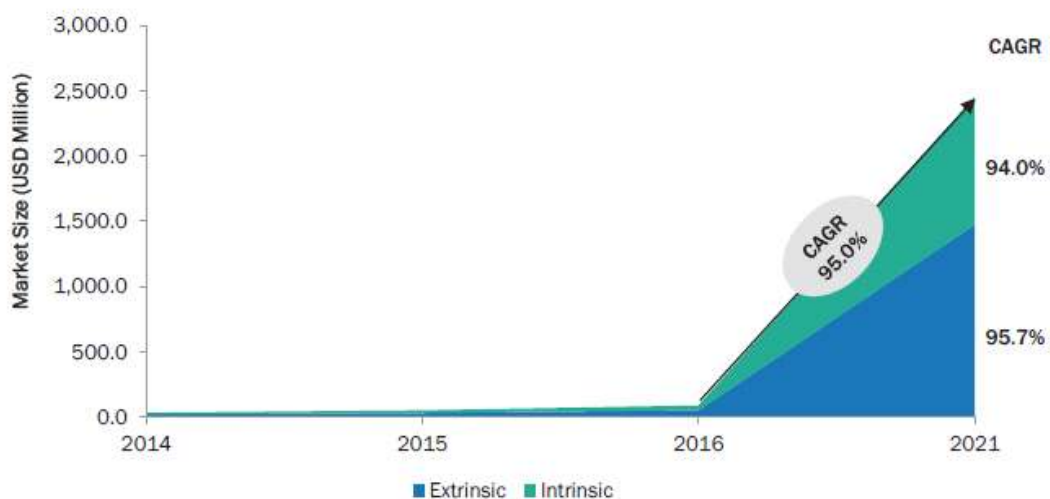
- 유럽의 자가치유 물질 시장의 상위 3개국은 독일, 프랑스, 네덜란드로 조사함



* 출처 : Press Releases, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

<그림 II-7> 유럽의 자가치유 물질 시장

- 사회기반 시설물뿐만 아니라 사회적 중요도가 높으면서 유지보수가 어려운 구조물(원전구조물, 터널, 지하구조물 등)의 유지관리 중요성이 증대됨
- 콘크리트 내구성 향상 및 유지관리 중요성이 점차 증가 됨에 따라 균열 자가치유 기술이 대안으로 부각됨

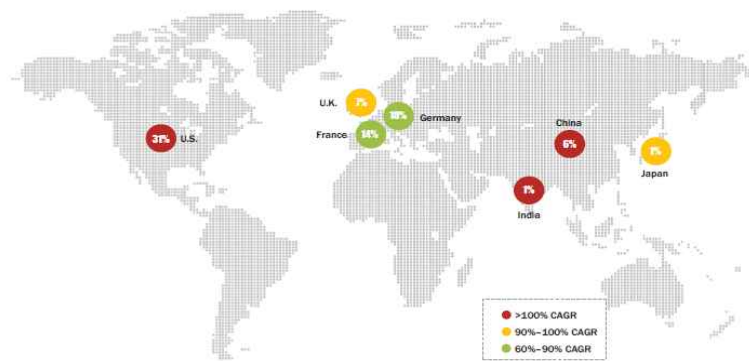


* 출처 : Press Releases, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

<그림 II-8> 재료별 자가치유 물질 시장 성장

- 자가치유 물질 시장의 연평균 성장률은 미국, 중국, 인도 등에서 높게 나타나며, 자가치유 물질 시장 점유율은 미국과 유럽이 높게 나타남

- 미국, 중국, 인도에서는 자가치유 물질 시장의 연평균 성장률이 100% 이상으로 나타나 향후 지속적인 성장이 예측되며, 영국과 미국은 90~100%의 성장률을 보임
- 2015년 자가치유 물질 시장점유율은 미국(31%)이 가장 높으며 다음으로 독일(18%), 프랑스(14%) 순으로 나타남

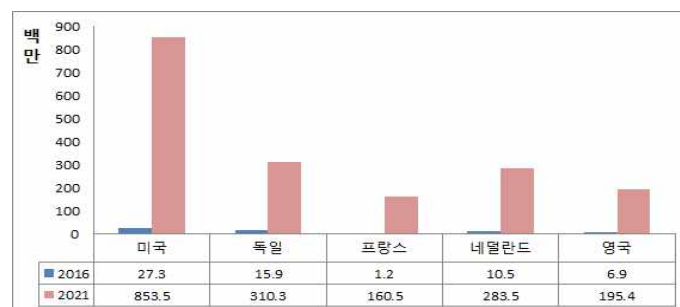


* 출처 : Press Releases, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

〈그림 II -9〉 유럽의 자가치유 물질 시장점유율

■ 2016년 기준 자가치유 물질 시장 주요 5개국은 미국, 독일, 프랑스, 네덜란드, 영국으로 조사됨

- 2016년 자가치유 물질 시장규모는 미국(2,730만 달러)이 가장 크며, 영국(690만 달러)이 가장 작은 것으로 조사됨
- 2021년 자가치유 물질 시장규모는 미국(85,350만 달러)이 가장 크며, 프랑스(16,050만 달러)가 가장 작을 것으로 예상됨



* 출처 : Press Releases, Expert Interviews, and MarketsandMarkets Analysis

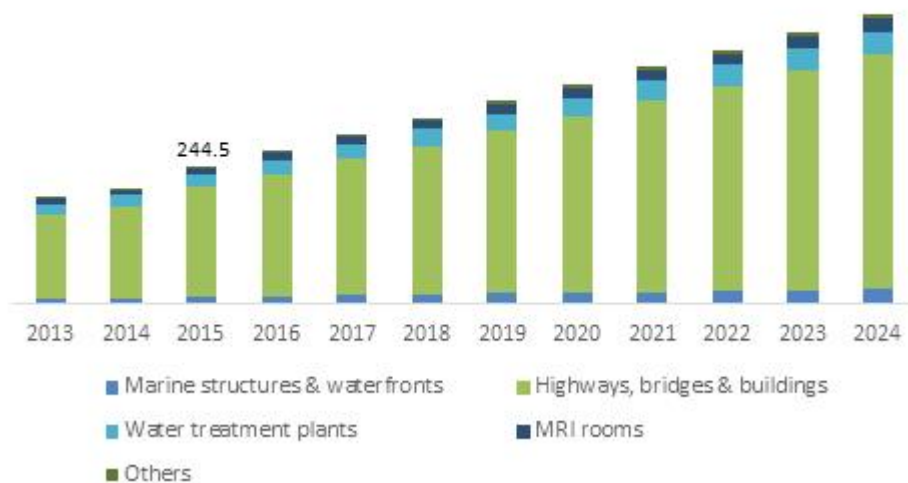
〈그림 II -10〉 주요 5개국의 자가치유 물질 시장

나. FRP 보강철근(FRP-rebar)

■ Global Market Insights, Inc.의 연구보고서에 따르면 FRP 보강철근 시장 규모는 2024년까지 12억 5천만 달러를 초과할 것으로 예상함

- 고속도로, 교량 및 건물의 잠재적 전망과 FRP 철근을 생산하는 공장들이 점차적으로 많아져 FRP 리바 시장의 성장을 촉진할 것으로 예상함
 - 기능적으로 부족한 구조물에 대한 리노베이션 프로젝트가 증가하면서 시장의 제품수요가 증가하였고, 열 및 전기 전열과 결합된 비수식성, 경량화, 내구성 강화에 대한 동향은 산업성장을 촉진하는 중요한 요인으로 조사되었음
 - 갑판·레일, 바닥 슬래브, 기둥, 주차장, 벽 등 건설시장의 성장은 FRP 보강 철근의 수요를 촉진시킬것으로 전망함
- 고속도로, 교량 및 건물의 FRP 철근 시장은 2015년 4억 6천만 달러 이상으로 평가되고 있으며, 글로벌 건설 산업의 확장과 더불어 생산 시설의 증가, 인프라 개발로 인해 지속적으로 성장할 것으로 전망함
 - 특히, 북미 지역의 교량 복구시 제품 사용에 대한 규제 준수가 수요를 유발 할것으로 예상함

U.S. FRP Rebar Market Size, By Application, (USD Million), 2013-2024



* 출처 : Global Market Insights(2015)

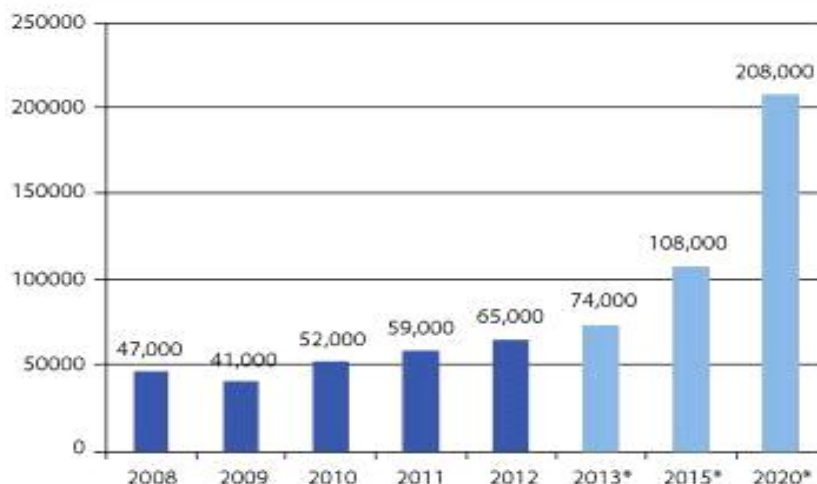
<그림 II-11> FRP rebar 시장 규모 전망

■ 미국 Reinforced Plastic magazine 의 조사에 따르면, 2008년 FRP에 대한 전 세계적인 수요는 47,000 톤 이었으며 2020년 208,000 톤까지 증가할 것으로 예상함

- 미국의 경우, 1997년 10월 FHWA가 유럽과 일본의 복합재료 교량 적용현황을 파악하는 연구를 수행하였음
- 1998년~2001년까지 FHWA의 IBRC(Innovative Bridge Research and Construction) 프로그램에서 175개 프로젝트를 지원하는 것 중에 84개가 FRP 관련 사업으로 계획되어 약 50% 정도의 연구가 FRP 활용연구에 집중되어 있었음

■ 산업별 FRP의 소비동향을 1996~1998년까지 살펴보면 아래와 같으며 건설관련 소비가 상당히 많음을 확인할 수 있음

(단위 : 톤)

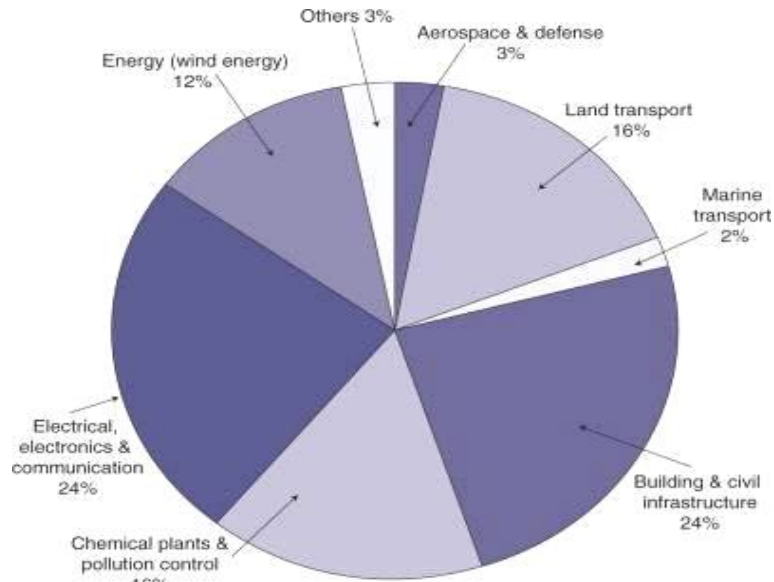


* 출처 : 국토교통과학기술진흥원(2017), FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발 최종보고서

<그림 II-12> FRP rebar에 대한 전 세계의 수요량

■ 독일 탄소섬유협회 Carbon Composites e. V. (CCeV)의 2012년 연간 보고서에 따르면, 2011년 탄소섬유 화합물 수요는 약 3만 7000톤 이었으며 2012년에는 약 4만 2000톤, 2015년 수요는 7만 3000톤에 달할 것으로 예상함

- 탄소섬유강화 플라스틱 시장 매출은 2009년부터 2015년 까지 140억 유로로 현재의 2배 이상이 될 것으로 예상하였음
- 인도의 경우, 2007년 FRP의 총 생산량 125,000 톤 중 약 24%를 빌딩 및 토목시설물에 적용하였음



* 출처 : 국토교통과학기술진흥원(2017), FRP와 UHPC 복합구조를 이용한 일방향 철근콘크리트 슬라브의 휨/전단 보강방법 및 설계기법 개발 최종보고서

〈그림 II-13〉 분야별 FRP의 적용

다. 나노 복합재 시장 동향

■ 나노기술 제품의 세계시장 규모는 2013년도 229억 달러, 2014년도 260억 달러, 2019년도 642억 달러 규모로 성장이 예상되며, 향후 시장이 확대될 것으로 전망됨

● 나노기술 제품 중 나노소재에 대한 세계 시장규모는 나노기술 관련 매출액에서 가장 큰 부분을 차지하며, 나노소재 세계시장 규모는 2014년 206억 달러에서 2019년 527억 달러 규모로 성장할 것으로 예측되고, 연평균 성장률은 약 20.7%로 추산됨

〈표 II-19〉 세계 나노기술 제품 시장 규모(2013~2019)

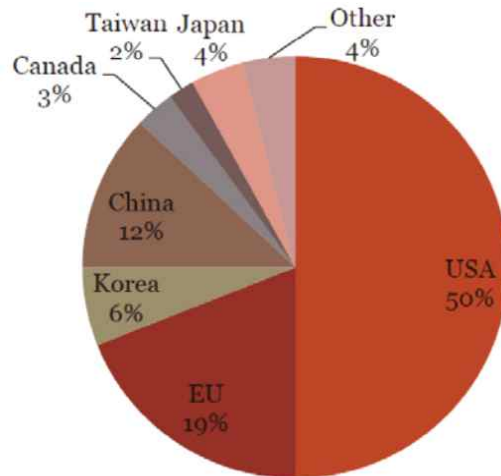
단위 : 백만 달러, %

Type	2013	2014	2019	CAGR(2014~2019)
Nanomaterials	18,0803.20	20,593.70	52,711.70	20.7
Nanotools	4,815.00	5,324.80	11,291.50	16.2
Nanodevices	39	42.5	183.4	34
Total	22,934.20	25,961.00	64,186.60	19.8

* 출처 : 유선희(2016), 나노기술과 나노소재의 시장동향

■ 나노소재 수요는 북미 지역이 가장 크며, 아시아 지역이 가장 빠르게 성장하고 있음

- 중국, 한국, 대만, 인도 등에서 활발한 연구개발 투자가 이루어져, 향후 아시아 지역이 나노소재 시장 성장을 주도할 것으로 예상됨
- 2010년 나노소재 시장 중 미국이 전 세계 50% 시장을 차지하고, 중국 12%,서유럽 10%, 한국 6%, 일본 4%, 캐나다 3%, 대만 2%를 차지함



* 출처 : Future Market, Inc.(2011)

<그림 II-14> 국가별 나노소재 생산 (2010년 기준)

■ 나노소재 시장은 전자, 건강치료, 에너지, 건설 등과 같은 새로운 응용분야에서 높은 수요가 전망됨

- 건설 분야에서 사용되는 나노소재 수요는 2011년 6천만 달러에서 2021년 10억 달러로 16배 이상 증가할 것으로 예상되며, 연평균 성장률은 25.89%로 높은 수준임

<표 II-20> 세계 나노소재 및 건설용 나노소재 시장 수요 규모

단위 : 백만 달러, %

구분	2001	2006	2011	2016	2021	CAGR
전자	92	290	710	1,970	4,400	21.33
건강치료	190	390	670	1,500	3,700	16.00
에너지	1	17	145	500	2,000	46.24
건설	10	33	60	200	1,000	25.89
기타	47	160	445	1,330	4,400	25.48
합계	340	890	2,030	5,500	15,500	21.04

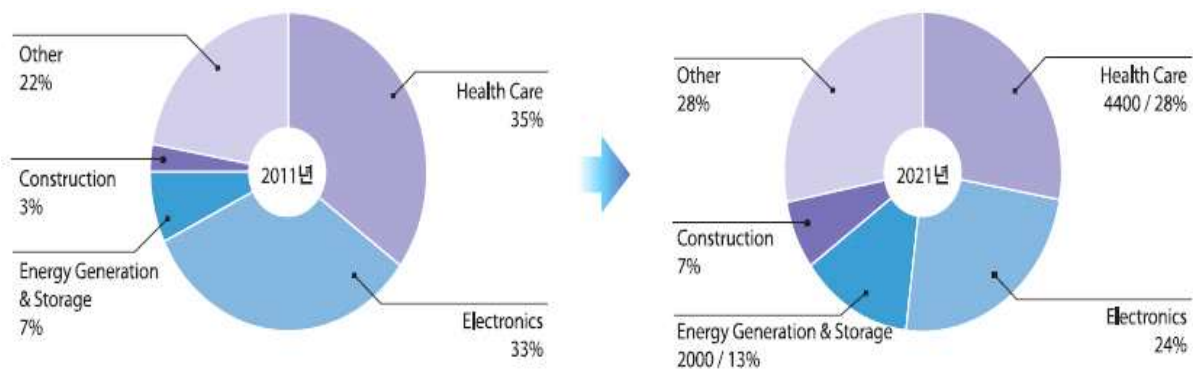
* 출처 : The Freedonia Group. Inc.(2012)

● 건설 분야에서의 나노기술 활용은 증대되고 있으며, 다양화하고 있는 실정임

- 건설 분야에서 나노 소재가 적용된 분야*는 개념적 단계에서 사업화 단계까지 다양함

※ (나노소재 적용 건설분야)콘크리트 성능향상, 구조물 건전성 모니터링, 표면 항균 물질, 자기 표면 세정, 단열용 실리카 에어로젤 등

■ 건설 분야 시장은 전체 분야에 응용되는 나노소재 중 2001년에는 2.9%, 2006년에는 3.7%, 2011년에는 3%, 2016년에는 2.6%, 2021년에는 7%를 차지하였으며 그 비중도 높아질 전망이다



* 출처 : The Freedonia Group. Inc.(2012)

<그림 II-15> 건설용 나노 소재의 비중 변화

<표 II-21> 지역별 건설용 나노소재 시장규모

단위 : 백만 달러, %

구분	2001	2006	2011	2016	2021
United States	2	11	22	60	270
Other Americas	0	0	1	5	30
Western Europe	4	11	16	40	140
China	0	11	16	40	140
Japan	3	6	10	30	145
Other Asia/Pacific	1	3	2	13	85
Eastern Europe	0	0	1	6	30
Africa/Mideast	0	0	1	4	10

* 출처 : The Freedonia Group. Inc.(2012)

■ 국내 시장 건설분야의 성장률은 에너지 분야 다음으로 높고, 2021년에는 그 시장 규모가 약 600억원에 이를 것으로 전망됨

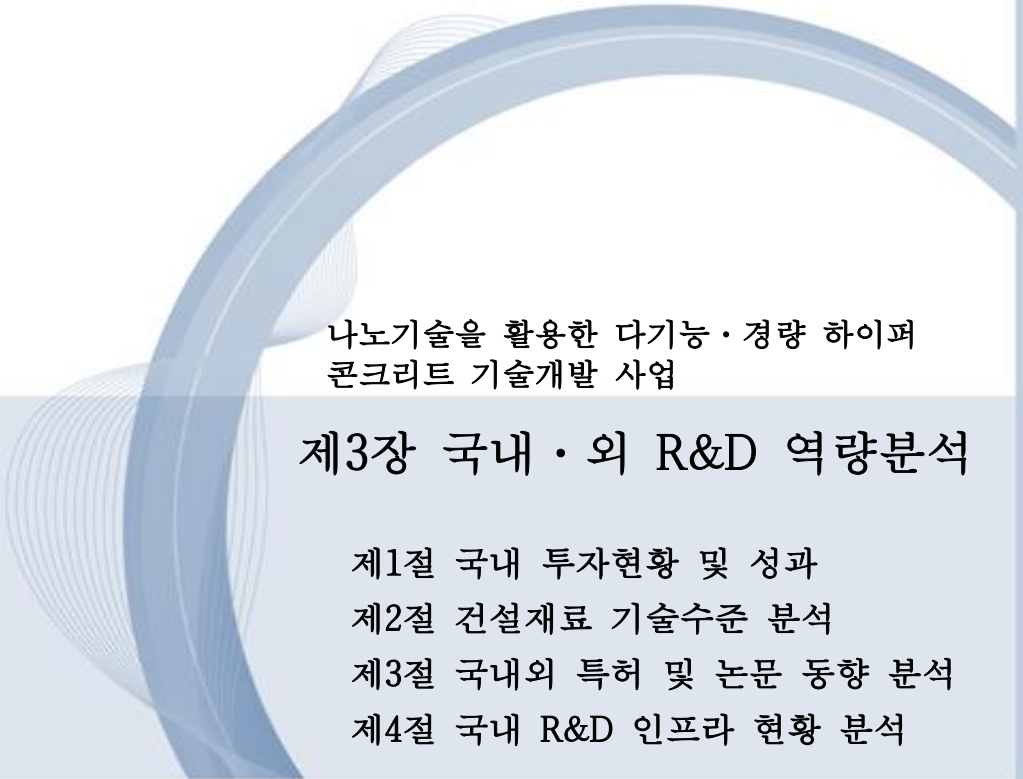
- Futuer Market inc(2011)에 따르면 국내 시장은 Othe Asia/Pacific 지역 시장의 절반 (50%)을 전 세계 시장의 6%를 차지한다고 추정할 수 있음

〈표 II -22〉 지역별 건설용 나노소재 시장규모

단위 : 억 원

구분	2001	2006	2011	2016	2021
전자	55	174	426	1,182	2,640
건강치료	114	234	402	900	2,220
에너지	1	10	87	300	1,200
건설	6	20	36	120	600
기타	28	96	267	798	2,640
합계	204	534	1,218	3,300	9,300

* 출처 : Future Market Inc(2011)



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼
콘크리트 기술개발 사업

제3장 국내·외 R&D 역량분석

제1절 국내 투자현황 및 성과

제2절 건설재료 기술수준 분석

제3절 국내외 특허 및 논문 동향 분석

제4절 국내 R&D 인프라 현황 분석

제3장 국내 R&D 역량분석

제1절 국내투자 현황 및 성과

1. 국내 건설재료 R&D 투자현황

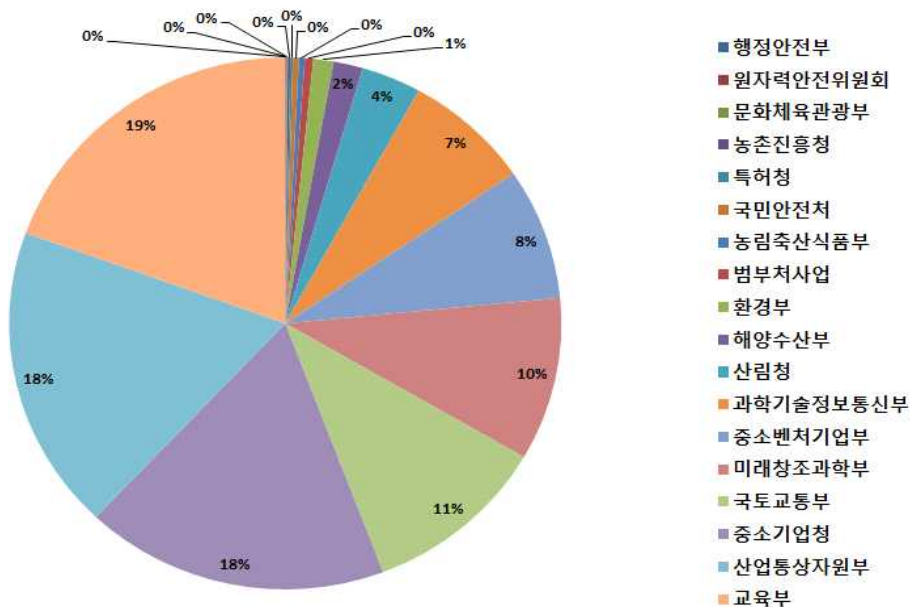
■ 국내 건설재료 관련 사업의 투자 및 성과현황 분석을 위해 2014~2018년 정부 R&D 투자 동향 분석

- 기존 사업의 성과분석을 위해 KISTEP에 과제정보를 요청하여 건설재료와 연관성이 있는 과제를 분류하였으며, 최종 2,028건(2014~2018)의 과제정보 데이터를 분석
- 2014~2018년 정부 R&D로 지원된 과제 중 건설재료 분야로 범위를 제한하고 각각의 기술분류에 따라 구분하여 최종 2,028건의 분석대상 과제를 도출

■ 전부처의 국가연구개발 사업 중 건설재료 분야 R&D 사업건수는 2014~2018년 동안 총 2,028건으로 집계

- (과제수) 부처별 ‘건설재료’ 분야 R&D에 대한 비중을 분석하면 교육부 395건, 산업통상자원부 375건, 중소기업청 361건, 국토교통부 220건, 미래창조과학부 201건, 중소벤처기업부 162건, 과학기술정보통신부 151건, 산림청 71건 등으로 나타남

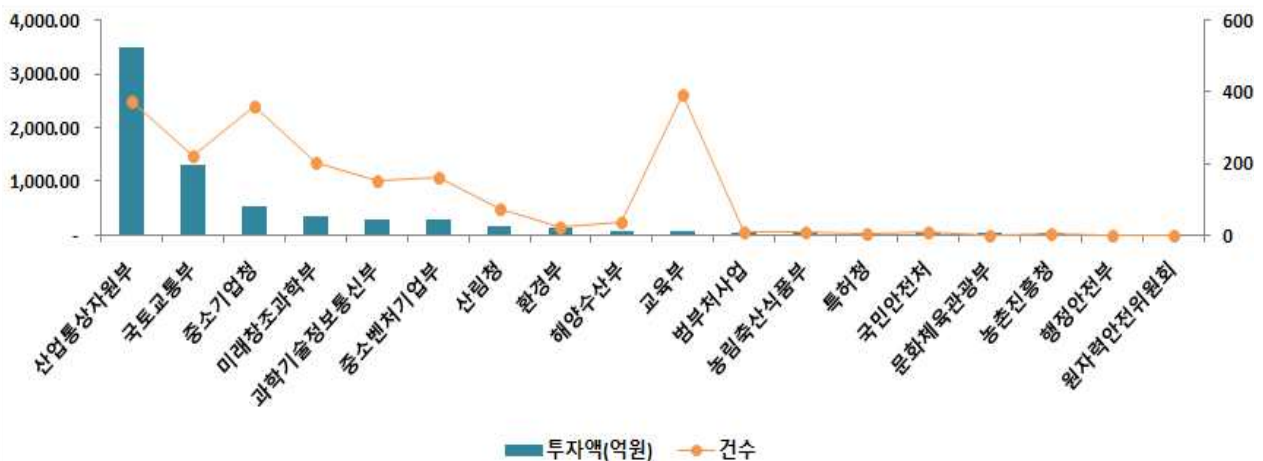
(단위: %)



<그림 III-1> 최근 5년간(2014~2018) 부처별 건설재료 R&D투자 현황

- (투자금액) 건설재료 관련 투자 규모는 총 5,729.9억원 수준이며, 산업통상자원부 3,512.3억원, 중소기업청 543.1억원, 미래창조과학부 337.9억원, 국토교통부 307.5억원 등이 높게 나타남

〈표 III-1〉 최근 5년간(2014~2018) 국내 건설재료 R&D 현황



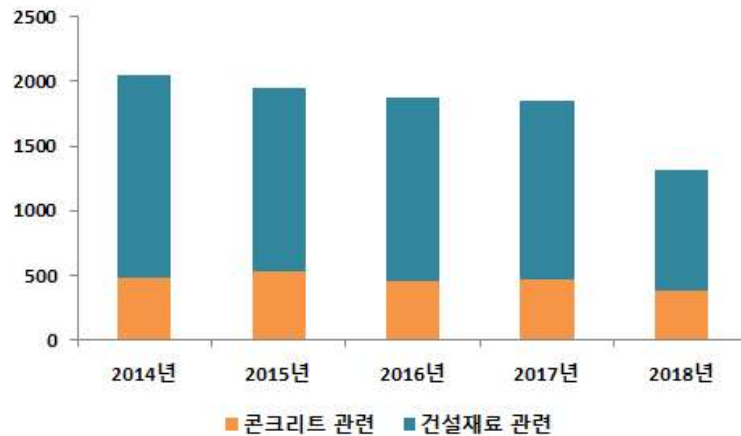
(단위 : 억원, 건수)

구분	투자액	과제수
산업통상자원부	3,512.33	375
국토교통부	1,307.49	220
중소기업청	543.13	361
미래창조과학부	336.87	201
과학기술정보통신부	296.89	151
중소벤처기업부	277.09	162
산림청	151.00	71
환경부	127.67	24
해양수산부	61.61	35
교육부	58.77	395
범부처사업	42.62	10
농림축산식품부	6.72	7
특허청	3.00	3
국민안전처	2.00	7
문화체육관광부	2.00	1
농촌진흥청	0.70	3
행정안전부	0.00	1
원자력안전위원회	0.00	1

■ 건설재료 관련 투자액은 매년 감소추세를 보이고 있으며, 콘크리트 분야에 대한 투자는 전체 예산 대비 약 25% 수준

- 2014~2018년 건설재료 관련 투자액은 6,729.8억원으로 연평균 성장률 $\Delta 3.89$ 를 기록하였으며, 콘크리트 관련 투자액은 2,316.0으로 연평균 $\Delta 4.86$ 의 성장률을 나타냄

〈표 III-2〉 최근 5년간(2014~2018) 건설재료 R&D 투자액 대비 콘크리트 관련 투자액



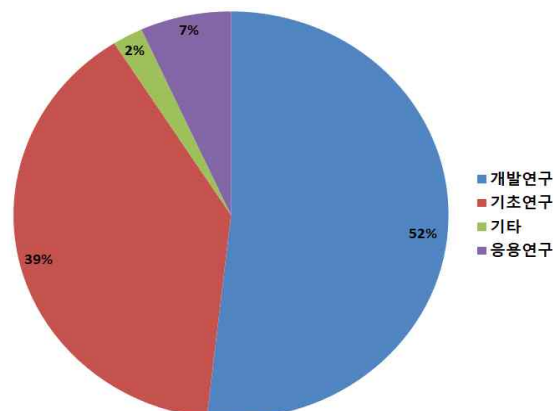
(단위 : 억원, 건수)

구분	2014	2015	2016	2017	2018	합계	CAGR
콘크리트 관련	479.4	537.2	456.1	463.4	379.9	2,316.0	$\Delta 4.86$
건설재료 관련	1,569.3	1,417.7	1,423.9	1,388.9	930.0	6,729.8	$\Delta 3.89$

- (연구단계별) 전 부처의 건축재료 연구과제(2014~2018) 2,028건 중 개발연구는 1050건, 기초연구 795건, 응용연구 137건, 기타 46건 등으로 확인

- 총 연구개발 사업 중 개발연구의 비중이 전체의 51.8%에 육박함에 따라 대부분의 R&D 투자가 개발연구에 집중화되어 있는 것을 알 수 있음

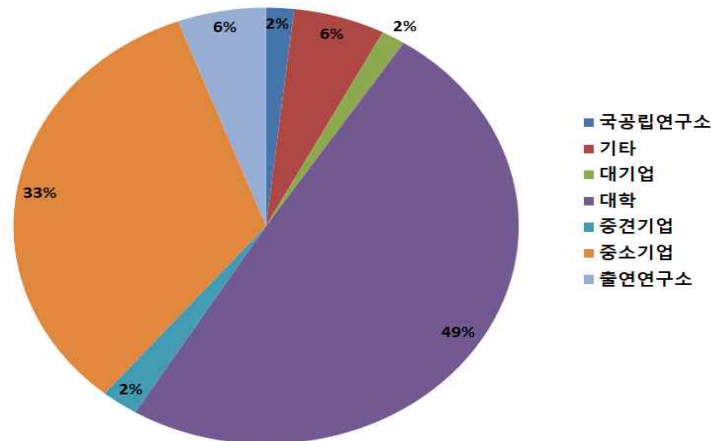
(단위: %)



〈그림 III-2〉 최근 5년간(2014~2018) 연구단계별 건설재료 분야 R&D 투자 현황

- (연구수행주체별) 전 부처의 건설재료 분야 연구개발의 연구수행 주체별로 분석을 실시한 결과, 대학 1,004건으로 가장 많았으며, 중소기업 675건, 기타 119건, 출연연구소 115건의 연구를 수행하고 있는 것으로 나타남

(단위: %)



〈그림 Ⅲ-3〉 최근 5년간(2014~2018) 연구수행주체별 건설재료 분야 R&D 투자 현황

2. 국내 R&D 성과 현황 분석

2.1 과학적 성과분석

- 최근 3년간(2014~2016) 국내 건설재료 R&D에서 SCI(E)급 학술지에 게재된 논문 성과는 총 590건으로 연평균 76.03%씩 증가하는 추세에 있음
- 2016년도 SCI(E)급 학술지에 게재된 논문 성과는 직전년도 대비 대폭 증가하였으며, 최근 3년간의 추이를 볼 때 양적으로 증가하고 있는 추세
- SCI(E)급 논문 건수는 111건(2014년) → 327건(2016년)으로 연평균 76.03% 증가하여 과학적 성과의 효율성을 확인

〈표 Ⅲ-3〉 논문성과(2014~2016년)

(단위 : 건수, %)

구분		2014	2015	2016	합계	CAGR
SCI 논문	건수	111	152	327	590	76.03%
	정부출연금 10억원 당	1.3	0.9	2.3	1.5	△4.76

- 한편, 건설재료 분야의 과학적 성과(논문)에 대한 투입 효류성 분석 결과(정부출연금 10억원 당 SCI(E) 논문 건수)는 2.3건(2016년) 및 연평균 76.03% 증가하고 있으며, 국가 R&D사업(2016년)의 약 1.2배의 높은 성과를 창출

〈표 Ⅲ-4〉 정부출연금 당 SCI 논문 건수

(단위 : 건수, %)

구분	건설재료 R&D	국가R&D 전체
정부출연금 10억원 당 SCI 논문 건수	2.3	1.97

- 분야별 논문성과를 살펴보면, 콘크리트 313건으로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 다음으로 유리/세라믹 181건, 목재/보드류 31건순으로 확인

〈표 Ⅲ-5〉 최근 3년간(2014~2016년) 국내 건설재료 소재별 R&D 논문 성과 현황

구분		2014년	2015년	2016년	합계
SCI급 논문	강재	1	5	4	10
	내외장패널	1	1	1	3
	단열재	1	6	2	9
	목재/보드류	3	15	13	31
	미장/도장재	0	3	0	3
	바닥재	0	2	3	5
	방수재	0	0	1	1
	보수보강	0	0	2	2
	실링/접합재	2	2	12	16
	유리/세라믹	33	37	111	181
	지반보강	0	0	1	1
	창호재 및 커튼월	5	6	4	15
	콘크리트	65	75	173	313
	합계	111	152	327	590

■ 부처별 논문성과를 살펴보면 미래창조과학부가 301건으로 가장 많으며, 산업통상자원부 108건, 교육부가 79건 순으로 조사됨

- 부처별 2014년~2016년 조사한 결과, 해양수산부, 환경부를 제외한 전부처는 매년 증가하고 있는 추세로 분석됨

〈표 III-6〉 부처별 국내 건설재료 R&D 논문 성과 현황

구분		2014년	2015년	2016년	합계
SCI급 논문	교육부	16	31	32	79
	국토교통부	10	21	35	66
	미래창조과학부	52	57	192	301
	범부처 사업	0	5	0	5
	산림청	3	7	13	23
	산업통상자원부	26	30	52	108
	해양수산부	3	1	1	5
	환경부	1	0	2	3
	합계	111	152	327	590

2.2 기술적 성과분석

■ 최근 3년간(2014~2016) 국내 건설재료 R&D에서 특허 출원 및 등록 성과는 총 773건으로 등록 279건, 출원 494건임

- 특허 등록 및 출원은 2014년에서 2015년에는 증가하였지만 2016년 162건으로 대폭 감소 하였음

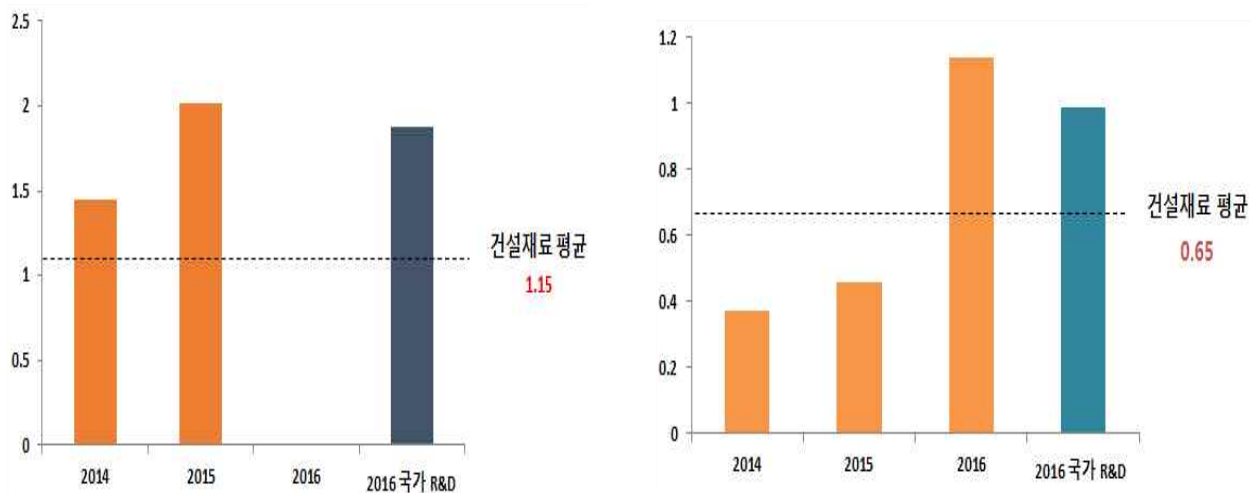
〈표 III-7〉 특허성과(2014~2016년)

(단위 : 건수, %)

구분		2014	2015	2016	합계
특허	출원	207	287	-	494
	등록	52	65	162	279
	합계	259	352	162	773
정부출연금 10억 원당	출원	1.45	2.02	-	-
	등록	0.37	0.46	1.14	-
	합계	1.82	2.47	1.14	-

* 분석시점 2016년 특허출원 DB 확보가 불가하여 제외하고 분석을 수행

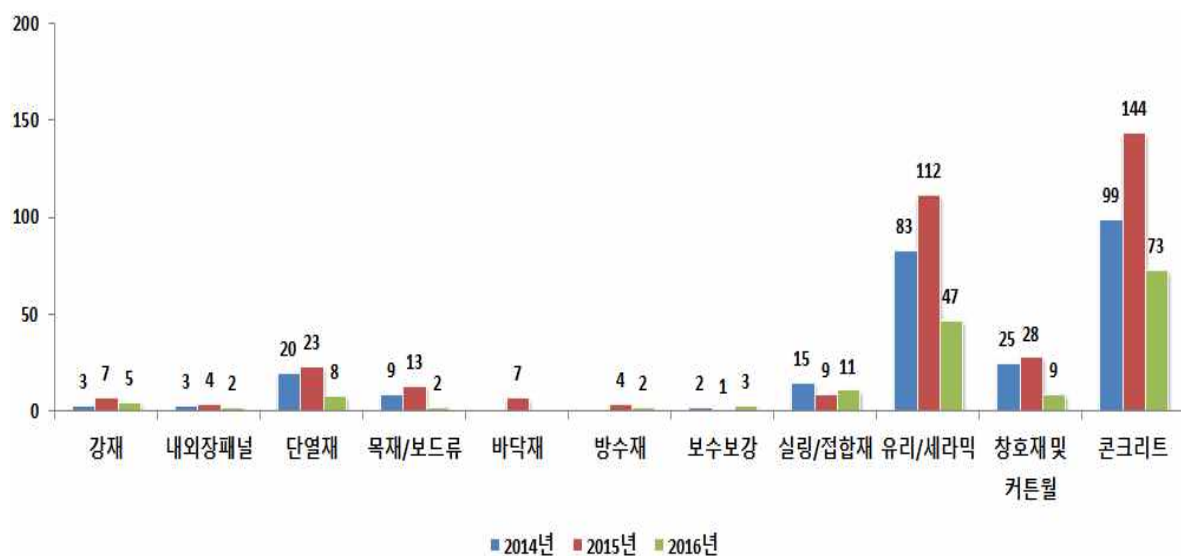
- 정부출연금 10억원 당 특허출원 성과는 3개년(2014~2016) 평균 1.15건으로 이는 국가 R&D 사업 성과(1.80건, 2016년) 대비 미비한 수준
- 정부출연금 10억원당 특허등록 성과는 최근 3개년 평균 0.65건으로 이는 국가 R&D 사업 성과(0.99건, 2016년) 대비 미비한 수준이지만 2016년 기준 건설재료 관련성과가 크게 증가한 것으로 나타남



〈그림 III-4〉 정부출연금 10억원 당 특허(출원:좌, 등록:우) 성과 현황

- 건설재료 분야별 특허성과 창출 현황을 살펴보면 콘크리트, 유리/세라믹 등의 분야를 중심으로 특허출원/등록이 활발하게 나타나고 있음

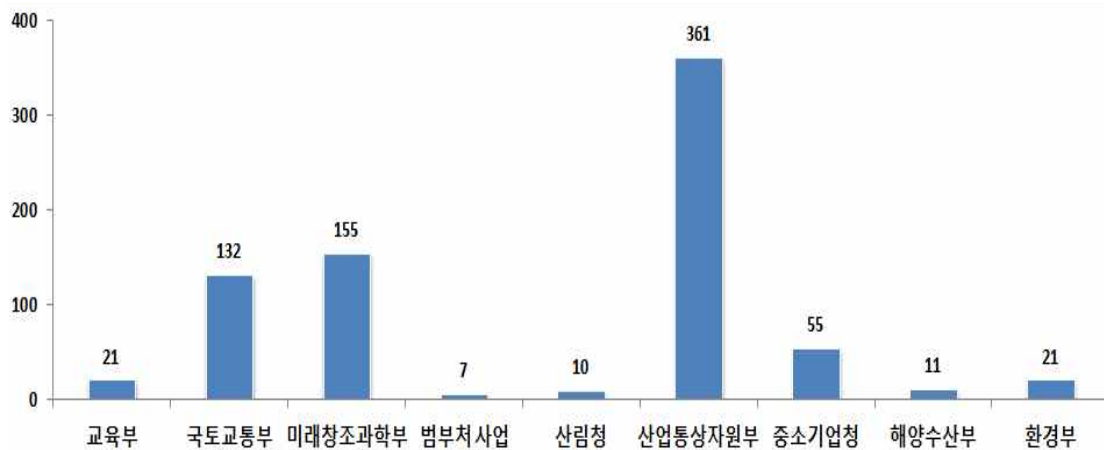
(단위 : 건수)



〈그림 III-5〉 최근 3년간(2014~2016년) 국내 건설재료 소재별 R&D 특허 성과 현황

- 부처별 특허 성과를 살펴보면 국토부가 산업통상자원부가 361건으로 가장 많으며, 미래창조과학부 155건 국토교통부 132건 순으로 나타남
- 특허 등록의 경우 산업통상자원부 112건, 국토교통부 61건, 미래창조과학부 58건이며, 출원의 경우 산업통상자원부 249건, 미래창조과학부 97건, 국토교통부 71건으로 나타남

(단위 : 건수)



<그림 III-6> 부처별 국내 건설재료 R&D 특허성과 현황

2.3 경제/사회적 성과분석

- (사업화 매출액) 건설재료 분야 사업의 2016년 매출액은 967.4억 원을 기록, 정부 출연금 10억원당 사업화 건수, 매출액은 국토교통 R&D 사업성과 대비 우수
- 건설재료 관련 사업화 성과(2016년 기준)는 135건으로 나타났으며, 전체 사업화 매출액은 967.4억원으로 사업화 성과 1건 당 약 7.2억원의 성과가 발생함
- 한편, 국토교통 R&D 사업화 성과는(2016년 기준) 220건으로 총 사업화 매출액은 2,919억원이며, 사업화 성과 1건 당 13.3억원의 성과가 발생함
- 국토교통 R&D 전사업에 대한 사업화 성과와 건설재료 분야 사업화 성과를 비교한 결과 양적 성과창출 현황은 건설재료 분야가 상대적으로 낮게 나타나고 있으나, 성과의 효율성(투입 10억원 대비) 측면에서는 건설재료 분야가 높게 나타남
- 즉, 정부출연금 투입 10억원 대비 성과는 건설재료 분야가 0.9건으로 국토교통(0.5건) 대비 높게 나타났으며, 사업화 매출액 규모도 6.8억원으로 국토교통 평균(6.5억원) 대비 높게 나타남

〈표 III-8〉 2016년 국토교통 R&D와 건설재료 관련 사업 비교

(단위 : 억원, 건수)

구분	국토교통 R&D	건설재료 관련 사업
사업화 건수	220	135
사업화 매출액	2,919.1	967.4
사업화 1건당 매출액	13.3	7.2
정부출연금	4,458.3	1,423.9
정부출연금 10억원 당 사업화 건수	0.5	0.9
정부출연금 10억원 당 사업화 매출액	6.5	6.8

* NTIS 국가연구개발정보 개방확대 방안('16.8)에 준하여 사업화 성과는 2016년 성과부터 공개되어 확인이 가능하기 때문에 본 보고서에서는 2016년 사업화 성과를 대상으로 분석진행

** 출처 : KISTEP(2017), 2016년 국가연구개발사업 성과보고서

- (기술분류별) 2016년 매출액은 주로 유리/세라믹 분야에서 발생했으며, 약 65% 비중을 차지하였고 창호재 및 커튼월, 강재 순으로 매출액이 발생함

〈표 III-9〉 2016년 사업화 매출액 성과

(단위 : 억원, 건수)

구분	매출액	비율
유리/세라믹	637.1	65.86%
창호재 및 커튼월	173.5	17.94%
강재	63.7	6.59%
바닥재	32.1	3.32%
단열재	25.1	2.59%
콘크리트	16.7	1.73%
실링/접합재	12.0	1.24%
보수보강	4.5	0.47%
내외장패널	2.0	0.21%
방수재	0.4	0.04%
목재/보드류	0.2	0.02%
미장/도장재	0	0.00%
합계	967.3	100.00%

2.4 국내 R&D 성과 현황 시사점

- 논문의 양적 성과를 분석한 결과, SCI(E)급 학술지에 게재된 논문이 연평균 76.03%로 증가하고 있고 있어 건설재료와 관련된 과학적 성과가 활발히 진행
 - 정부출연금 10억원당 SCI(E) 논문 건수를 분석한 결과, 국가 R&D 사업의 약 1.2배 높은 성과를 창출하여 과학적 성과의 효율성을 확인하였으며, 질 높은 성과 창출
 - 부처별 논문성과는 미래창조과학부가 301건으로 가장 많은 성과를 배출하고 있으며, 국토교통부는 66건으로 건설재료와 관련된 논문 성과를 창출하기 위한 격려가 필요
- 기술적 성과를 분석한 결과, 2014~2016년 기준 특허성과로는 출원 494건, 등록 279건으로 총 773건의 특허를 창출
 - 2014년 259건, 2015년 352건, 2016년 162건으로 2015년에 건설재료와 관련된 특허 성과가 가장 활발히 진행된 것으로 판단
 - 건설재료 소재별 특허는 콘크리트가 가장 많이 창출되었으며 등록 121건, 출원 195건으로 총 316건을 배출
 - 성과평가 정책방향으로 인해 국가 R&D 사업에서 창출되는 특허출원·등록 건수는 점진적으로 감소하고 있는 추세임에도 불구하고 건설재료 R&D의 정략적 특허 성과 중 등록 성과는 증가추세를 나타내 유관분야 핵심기술 개발 및 기술 경쟁력 확보에 기여
- 경제/사회적 성과를 분석한 결과, 건설재료 분야의 양적 성과는 국토교통 R&D 대비 상대적으로 저조한 수준이나, 투입 효율성 측면에서는 높게 나타남
 - 정부출연금 투입 10억원 대비 성과는 건설재료 분야가 0.9건으로 국토교통(0.5건) 대비 높게 나타났으며, 사업화 매출액 규모도 6.8억원으로 국토교통 평균(6.5억원) 대비 높게 나타남
 - 즉, 건설재료 분야에 대한 연구성과 창출 및 활용 측면에서 높은 성과를 창출하고 있어 투입 대비 효율성 확보에 용이할 것으로 예상됨

제2절 하이퍼 나노 콘크리트 관련 기술수준 분석

1. 기술수준 분석 개요¹⁾

■ 『제3차 과학기술기본계획(‘13~‘17)』상의 120개 국가전략기술 중 하이퍼 나노 콘크리트와 관련 있는 기술 분야의 기술수준 평가결과 조사

- 논문·특허 및 기술동향 분석, 델파이 조사 결과를 바탕으로 기술수준 및 기술격차 심층 분석, 기술수준 향상을 위한 제언 등 10대 분야별 종합분석 결과 조사
- 120개 국가전략기술 전체를 종합한 우리나라의 전반적인 기술수준은 최고기술국(미국) 대비 78.6%

※ EU 및 일본은 선도그룹이며, 우리나라와 중국은 추격그룹

- 미국은 기초연구와 응용·개발연구 모두 최고 수준이며, 우리나라는 기초연구 수준(77.6%)이 응용·개발연구 수준(79.6%) 보다 다소 낮음

2. 분야별 기술수준 분석

2.1 첨단소재(기능성 유기소재)

■ 저분자 화합물 및 고분자 유기화합물의 물리/화학적 구조 제어를 통해 기존의 유기 재료에서 구현하지 못한 신기능을 가진 유기 소재를 개발하는 기술

가. 2016년 주요국 기술수준 및 격차

1) 최고기술국 대비 주요국 기술수준 및 격차

■ 우리나라의 전반적인 기술수준은 최고기술국(미국) 대비 78.0%

- 국가별 기술수준은 미국(100.0%) > 일본(98.1%) > EU(94.0%) > 한국(78.0%) > 중국(74.9%) 순

1) 120개 국가전략기술 중 콘크리트 연관 기술을 대상으로 기술수준을 분석함

〈표 III-10〉 첨단소재(기능성 유기소재) 주요국 기술수준 및 격차

국가	기초연구 수준·격차			응용·개발연구 수준·격차			기술수준·격차		
	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)
한국	추격	75.4	3.6	선도	80.5	3.0	추격	78.0	3.3
중국	추격	73.8	4.0	추격	75.9	4.2	추격	74.9	4.1
일본	선도	96.6	0.7	선도	99.6	0.3	선도	98.1	0.5
EU	선도	94.0	1.1	선도	93.9	1.1	선도	94.0	1.1
미국	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0

나. 기술수준 및 격차변화(2014~2016)

1) 최고기술국 대비 국가별 기술수준 변동

■ 우리나라 기술수준은 2014년 78.3%에서 2016년 78.0%로 0.3% 감소

- 2014년과 2016년의 첨단소재(기능성 유기소재)기술 전체의 최고기술국은 모두 미국
- 최고기술국 대비 기술수준은 중국(6.1%), 일본(2.9%), EU(1.1%) 순으로 증가했으며, 한국은 0.3% 감소

〈표 III-11〉 첨단소재(기능성 유기소재) 국가별 기술수준 변동

국가	기초연구 수준(%)			응용·개발연구 수준(%)			기술수준(%)		
	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)
한국	76.4	75.4	-1.0	80.1	80.5	0.4	78.3	78.0	-0.3
중국	66.6	73.8	7.2	70.9	95.9	5.0	68.8	74.9	6.1
일본	94.3	96.6	2.3	96.1	99.6	3.5	95.2	98.1	2.9
EU	93.0	94.0	1.0	92.7	93.9	1.2	92.9	94.0	1.1
미국	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0

2) 최고기술국 대비 국가별 기술격차 변동

■ 우리나라 최고기술국 대비 기술격차는 2014년 3.2년에서 2016년 3.3으로 0.1년 증가

- 최고기술국 대비 기술격차는 일본(0.4년), 중국(0.3년), EU(0.2년) 순으로 감소했으며, 한국만 0.1년 증가

〈표 Ⅲ-12〉 첨단소재(기능성 유기소재) 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
한국	3.5	3.6	0.1	2.9	3.0	0.1	3.2	3.3	0.1
중국	4.6	4.0	-0.6	4.2	4.2	0.0	4.4	4.1	-0.3
일본	0.9	0.7	-0.2	0.8	0.3	-0.5	0.9	0.5	-0.4
EU	1.2	1.1	-0.1	1.3	1.1	-0.2	1.3	1.1	-0.2
미국	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

3) 한국 대비 국가별 기술격차 변동

■ 주요국 대비 기술격차는 2014년과 비교하여 對미국은 0.1년 증가, 對EU는 0.3년 증가, 對일본은 0.5년 증가하였으며, 對중국의 경우 중국이 0.4년 따라잡음

〈표 Ⅲ-13〉 첨단소재(기능성 유기소재) 한국 대비 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
중국	1.1	0.4	-0.7	1.3	1.2	-0.1	1.2	0.8	-0.4
일본	-2.6	-2.9	-0.3	-2.1	-2.7	-0.6	-2.3	-2.8	-0.5
EU	-2.3	-2.5	-0.2	-1.6	-1.9	-0.3	-1.9	-2.2	-0.3
미국	-3.5	-3.6	-0.1	-2.9	-3.0	-0.1	-3.2	-3.3	-0.1

2.2 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)

■ 자연 동·식물로부터 얻어지는 재료를 직접적으로 이용하거나 응용·모방하여 고성능 친환경 소재를 개발하는 기술

가. 2016년 주요국 기술수준 및 격차

■ 최고기술국 대비 주요국 기술수준 및 격차

● 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)분야 우리나라의 전반적인 기술수준은 최고기술국(미국) 대비 79.5%

- 국가별 기술수준은 미국(100.0%) > EU(95.9%) > 일본(94.9%) > 한국(79.5%) > 중국(74.1%) 순

〈표 Ⅲ-14〉 첨단 소재기술(친환경 바이오소재) 주요국 기술수준 및 격차

국가	기초연구 수준·격차			응용·개발연구 수준·격차			기술수준·격차		
	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)
한국	추격	79.2	4.0	추격	79.8	3.9	추격	79.5	3.9
중국	추격	74.7	4.8	추격	73.5	4.3	추격	74.1	4.5
일본	선도	94.8	1.0	선도	95.0	0.8	선도	94.9	0.9
EU	선도	96.0	0.9	선도	95.8	0.9	선도	95.9	0.9
미국	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0

나. 기술수준 및 격차변화(2014~2016)

■ 최고기술국 대비 국가별 기술수준 변동

- 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)의 우리나라 기술수준은 2014년 75.3%에서 2016년 79.5%로 4.2% 증가
- 2014년과 2016년의 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)기술 전체의 최고기술국은 미국

〈표 Ⅲ-15〉 첨단 소재기술(친환경 바이오소재) 국가별 기술수준 변동

국가	기초연구 수준(%)			응용·개발연구 수준(%)			기술수준(%)		
	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)
한국	76.8	79.2	2.4	73.8	79.8	6.0	75.3	79.5	4.2
중국	72.7	74.7	2.0	72.7	73.5	0.8	72.7	74.1	1.4
일본	92.7	94.8	2.1	94.8	95.0	0.2	93.8	94.9	1.1
EU	95.7	96.0	0.3	95.2	95.8	0.6	95.5	95.9	0.4
미국	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0

■ 최고기술국 대비 국가별 기술격차 변동

- 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)분야 최고기술국 대비 기술격차는 2014년 4.5년에서 3.9년으로 0.6년 감소
- 최고기술국 대비 기술격차는 중국(0.5년)과 EU(0.5년), 일본(0.9년) 순으로 감소하였으며, 한국은 0.6년 감소

〈표 Ⅲ-16〉 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)분야 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
한국	4.5	4.0	-0.5	4.5	9.9	-0.6	4.5	3.9	-0.6
중국	5.5	4.8	-0.7	4.4	4.3	-0.1	5.0	4.5	-0.5
일본	1.8	1.0	-0.8	1.8	0.8	-1.0	1.8	0.9	-0.9
EU	1.3	0.9	-0.4	1.5	0.9	-0.6	1.4	0.9	-0.5
미국	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

■ 한국 대비 국가별 기술격차 변동

- 주요국 대비 기술격차는 2014년과 비교하여 對미국(0.6년), 對EU(0.1년), 對중국(0.1년)과는 벌어졌으며, 對일본과의 격차만 0.3년 감소

〈표 Ⅲ-17〉 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)분야 한국 대비 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
중국	1.0	0.8	-0.2	-0.1	0.4	0.5	0.5	0.6	0.1
일본	-2.7	-3.0	-0.3	-2.7	-3.1	-0.4	-2.7	-3.0	-0.3
EU	-3.2	-3.1	0.1	-3.0	-3.0	0.0	-3.1	-3.0	0.1
미국	-4.5	-4.0	0.5	-4.5	-3.9	0.6	-4.5	-3.9	0.6

2.3 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)

- 기존 무기 소재 혹은 탄소계 나노소재를 기반으로 하여 소재의 구조, 결합, 조성 등을 제어함으로써 소재의 고성능화, 다기능화 및 환경친화성을 부여하는 기술

가. 2016년 주요국 기술수준 및 격차

■ 최고기술국 대비 주요국 기술수준 및 격차

- 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 우리나라의 전반적인 기술수준은 최고기술국(미국) 대비 80.1%
 - 국가별 기술수준은 미국(100.0%) > 일본(96.3%) > EU(93.8%) > 한국(80.1%) > 중국(75.3%) 순

〈표 Ⅲ-18〉 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 주요국 기술수준 및 격차

국가	기초연구 수준·격차			응용·개발연구 수준·격차			기술수준·격차		
	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)
한국	추격	79.4	3.6	선도	80.8	3.2	선도	80.1	3.4
중국	추격	74.1	4.3	추격	76.4	3.8	추격	75.3	4.1
일본	선도	95.7	0.8	선도	96.8	0.7	선도	96.3	0.7
EU	선도	93.8	1.2	선도	93.7	1.2	선도	93.8	1.2
미국	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0

나. 기술수준 및 격차변화(2014~2016)

■ 최고기술국 대비 국가별 기술수준 변동

- 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 우리나라 기술수준은 2014년 78.2%에서 2016년 80.1%로 1.9% 증가
- 2014년과 2016년 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 최고기술국은 미국

〈표 Ⅲ-19〉 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 국가별 기술수준 변동

국가	기초연구 수준(%)			응용·개발연구 수준(%)			기술수준(%)		
	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)
한국	77.1	79.4	2.3	79.2	80.8	1.6	78.2	80.1	1.9
중국	69.1	74.1	5.0	71.7	76.4	4.7	70.4	75.3	4.9
일본	94.7	95.7	1.0	94.4	96.8	2.4	94.6	96.3	1.7
EU	93.3	93.8	0.5	93.2	93.7	0.5	93.3	93.8	0.5
미국	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0

■ 최고기술국 대비 국가별 기술격차 변동

- 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 최고기술국 대비 우리나라와의 기술격차는 2014년 3.5년에서 2016년 3.4년으로 0.1년 감소
- 최고기술국 대비 기술격차는 중국(0.6년), 일본(0.4년), 한국(0.1년) 순으로 감소했으며, EU(0.0년)는 변동이 없었음

〈표 III-20〉 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
한국	3.6	3.6	0.0	3.4	3.2	-0.2	3.5	3.4	-0.1
중국	4.8	4.3	-0.5	4.5	3.8	-0.7	4.7	4.1	-0.6
일본	1.2	0.8	-0.4	0.9	0.7	-0.2	1.1	0.7	-0.4
EU	1.3	1.2	-0.1	1.1	1.2	0.1	1.2	1.2	0.0
미국	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

■ 한국 대비 국가별 기술격차 변동

- 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 주요국 대비 기술격차는 2014년과 비교하여 對미국, 對EU과의 기술격차는 0.1년 감소하였으며, 對중국과는 0.5년, 對일본과의 격차는 0.3년 증가

〈표 III-21〉 첨단 소재기술(나노구조제어 무기·탄소소재)분야 한국 대비 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
중국	1.2	0.7	-0.5	1.1	0.6	-0.5	1.2	0.7	-0.5
일본	-2.4	-2.8	-0.4	-2.5	-2.5	0.0	-2.4	-2.7	-0.3
EU	-2.3	-2.4	-0.1	-2.3	-2.0	0.3	-2.3	-2.2	0.1
미국	-3.6	-3.6	0.0	-3.4	-3.2	0.2	-3.5	-3.4	0.1

2.4 슈퍼 건설재료 및 자재기술

- IT, BT, ET 기술과 건설재료 기술을 융합하여 일반환경은 물론 극한환경(극지, 사막, 지진, 충돌, 폭압 등)의 고층빌딩, 교량, 도로, 해양 구조물 등을 효율적, 경제적으로 구축할 수 있을 뿐만 아니라 제조단계부터 사용수명까지 CO2 등 유해물질 저감과 극한 성능의 발현 등이 가능한 친환경 미래형 슈퍼 건설재료 및 자재(부재)를 개발하고 이를 활용하는 기술

가. 2016년 주요국 기술수준 및 격차

■ 최고기술국 대비 주요국 기술수준 및 격차

- 슈퍼 건설재료 및 자재기술의 전반적인 기술수준은 최고기술국(일본) 대비 82.8%
 - 국가별 기술수준은 일본(100.0%) > 미국(98.9%) > EU(97.5%) > 한국(82.8%) > 중국(73.0%) 순

〈표 III-22〉 슈퍼 건설재료 및 자재기술분야 주요국 기술수준 및 격차

국가	기초연구 수준·격차			응용·개발연구 수준·격차			기술수준·격차		
	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)	그룹	수준(%)	격차(년)
한국	선도	81.0	5.2	선도	84.5	4.0	선도	82.8	4.6
중국	추격	71.8	7.8	추격	74.2	6.9	추격	73.0	7.3
일본	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0	최고	100.0	0.0
EU	선도	97.2	0.8	선도	97.8	0.4	선도	97.5	0.6
미국	선도	98.7	0.5	선도	99.0	0.3	선도	98.9	0.4

나. 기술수준 및 격차변화(2014~2016)

■ 최고기술국 대비 국가별 기술수준 변동

- 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 우리나라 기술수준은 2014년 82.9%에서 2016년 82.8%로 0.1% 감소
 - 2014년과 2016년의 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 최고기술보유국은 모두 일본
 - 최고기술국 대비 기술수준은 미국(0.6%), 중국(2.1%) 순으로 감소했으며, EU와 한국은 각각 0.3%, 0.1% 증가

〈표 III-23〉 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 국가별 기술수준 변동

국가	기초연구 수준(%)			응용·개발연구 수준(%)			기술수준(%)		
	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)	2014년	2016년	증감(%)
한국	82.2	81.0	-1.2	83.5	84.5	1.0	82.9	82.8	-0.1
중국	69.5	71.8	2.3	72.3	74.2	1.9	70.9	73.0	2.1
일본	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	0.0
EU	97.8	97.2	-0.6	97.7	97.8	0.1	97.8	97.5	-0.3
미국	98.3	98.7	0.4	98.3	99.0	0.7	98.3	98.9	0.6

■ 최고기술국 대비 국가별 기술격차 변동

- 우리나라의 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 최고기술국 대비 기술격차는 2014년 4.6년에서 2016년 4.6년으로 변동 없음
- 최고기술국 대비 기술격차는 EU(0.5년), 중국(0.4년), 미국(0.3년) 순으로 감소했으며, 한국만 변동 없음

〈표 III-24〉 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
한국	5.0	5.2	0.2	4.2	4.0	-0.2	4.6	4.6	0.0
중국	7.7	7.8	0.1	7.7	6.9	-0.8	7.7	7.3	-0.4
일본	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
EU	1.1	0.8	-0.3	1.0	0.4	-0.6	1.1	0.6	-0.5
미국	0.7	0.5	-0.2	0.7	0.3	-0.4	0.7	0.4	-0.3

■ 한국 대비 국가별 기술격차 변동

- 주요국 대비 기술격차는 2014년과 비교하여 對미국과는 0.3년, 對EU과는 0.5년 증가하였으며, 對중국과는 0.4년으로 감소하였음

〈표 III-25〉 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 한국 대비 국가별 기술격차 변동

국가	기초연구 격차(년)			응용·개발연구 격차(년)			기술격차(년)		
	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)	2014년	2016년	증감(년)
중국	2.7	2.6	-0.1	3.5	2.8	-0.6	3.1	2.7	-0.4
일본	-5.0	-5.2	-0.2	-4.2	-4.0	0.2	-4.6	-4.6	0.0
EU	-3.9	-4.4	-0.5	-3.2	-3.6	-0.4	-3.5	-4.0	-0.5
미국	-4.3	-4.7	-0.4	-3.5	-3.7	-0.2	-3.9	-4.2	-0.3

제3절 국내외 논문 및 특허 동향 분석

1. 논문 동향 분석

1.1 분석 배경 및 목적

■ 동 사업의 기술범위에 해당하는 콘크리트 재료에 대한 논문현황 및 논문지수 등에 따른 연구개발 활동현황을 조사

- 하이퍼 나노 콘크리트 관련 기술분야의 논문데이터를 다각도로 정량화, 지표화한 내용으로 주요 국가별로 결과가 제시됨에 따라, 해당 사업기술의 주요 선진 국가 대비 국내의 수준을 가늠하는데 활용

1.2 분석 범위

■ 본 논문동향조사는 2011년부터 2015년까지 게재된 한국, 미국, 일본 및 유럽의 논문을 대상으로 분석

〈표 III-26〉 검색 DB 및 검색범위

자료 구분	국가	내용	분석구간	검색범위
게재된 논문	한국	SCOPUS	2011.01 ~ 2015.12	게재된 논문 전체문서
	미국	SCOPUS		게재된 논문 전체문서
	일본	SCOPUS		게재된 논문 전체문서
	유럽	SCOPUS		게재된 논문 전체문서

■ 본 논문동향조사 분석에서는 첨단기술을 활용한 스마트 건설재료 연구개발사업 기획시 제출된 중분류 및 소분류 기술 체계를 기준으로 정량분석 및 지표분석을 실시

〈표 III-27〉 분석대상 기술분류

대분류	중분류
콘크리트재료기술	시멘트 복합재료기술
	자원순화형재료기술
	무시멘트 콘크리트기술
	나노/바이오 복합재료기술
	아스팔트 콘크리트기술

1.3 분석지표 개요

가. 양적 측면

■ 논문 활동도

- 특정 국가의 해당 기술분야에서 얼마나 많은 논문이 게재되었는지를 양적으로 측정하는 지표로서, 논문활동도가 높을수록 논문 게재수가 양적으로 많다는 것을 의미

■ 논문 집중도

- 특정 국가의 상위기술분야 논문 게재 중에서 해당 기술분야의 논문 게재가 차지하는 비중을 측정하는 지표로서, 논문집중도가 높을수록 특정 국가의 논문게재가 해당 기술분야에 집중되어 있다는 것을 의미

나. 질적 측면

■ 인용도 지수

- 특정 논문저자의 문헌들이 인용되는 회수의 평균값으로, 이 값이 클수록 주요 문헌 또는 원천문헌을 많이 가지고 있다는 것을 의미함

■ 영향력 지수

- 해당기술의 질적 수준을 측정하는 지수임. 영향력 지수가 1이면 평균인용 빈도임을 나타내고, 2이면 평균보다 2배 높은 빈도로 인용됨을 나타냄

■ 기술력 지수

- 기술력 지수가 클수록 해당 국가(또는 연구주체)의 기술력이 높음을 의미함

※ 기술의 질적 수준과 양적 수준을 함께 고려한 수치

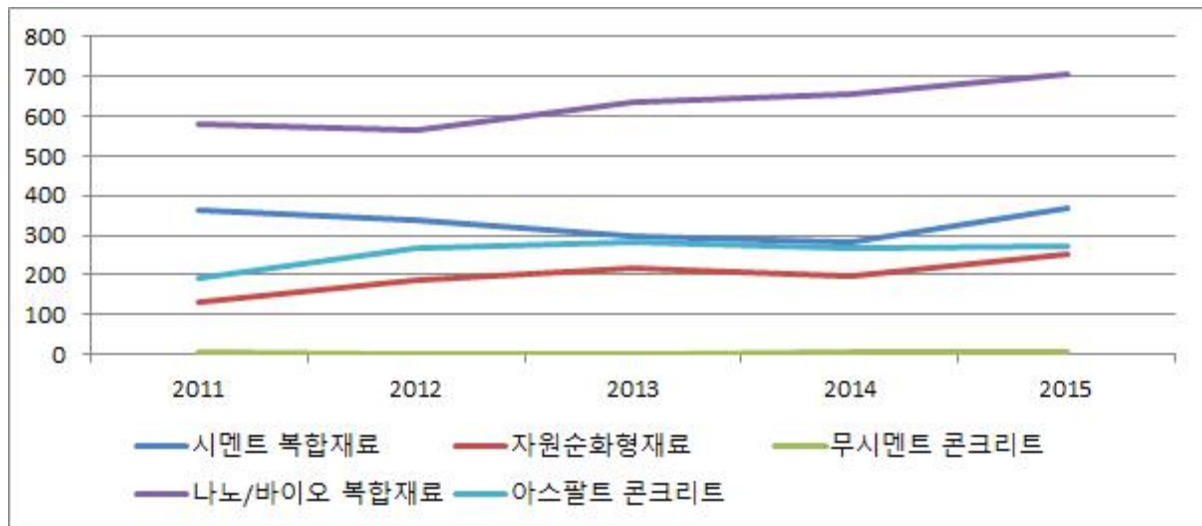
〈표 III-28〉 논문 분석 지표

구분	지표	의미	정의
양적 측면	건수	논문 활동	각 연도별 동향 파악
	논문 활동도	논문 게재 정도를 양적으로 측정	$\text{논문활동도}_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^{nt} T_{ij}}$ (T_{ij}는 i기술에 대한 j국가의 논문게재수, nt는 전체 국가 수)
	논문 집중도	해당 기술분야의 논문 게재가 차지하는 비중	$\text{논문집중도}_{ij} = \frac{(T_{ij} / \sum_{j=1}^{nt} T_{ij})}{(\sum_{i=1}^{mt} T_{ij} / \sum_{i=1}^{mt} \sum_{j=1}^{nt} T_{ij})}$ (T_{ij}는 i기술에 대한 j국가의 논문수, nt는 전체 국가 수, mt는 전체 기술 수)
질적 측면	인용도 지수	인용도지수 $\propto$ 영향력	인용도 지수 = $\frac{\text{피인용건수}}{\text{논문건수}}$
	영향력 지수	상대적 영향력	영향력 지수 = $\frac{\frac{\text{기술의 해당 피인용 수}}{\text{기술의 해당 논문 수}}}{\frac{\text{기술의 해당 분류별 피인용 수}}{\text{기술의 해당 분류별 총논문수}}}$
	기술력 지수	기술력	기술력 지수 = 영향력 지수 $\times$ 기술이 차지하는 논문수

1.4 논문동향 분석 결과

가. 연도별 논문 동향

- 콘크리트 재료 기술의 논문 발표 동향을 살펴보면 나노/바이오 복합재료의 논문 발표 건수가 다른 세부 기술들에 비해 많으며, 무시멘트 콘크리트의 논문 발표는 매우 저조한 것으로 나타남



〈그림 III-7〉 콘크리트 재료 세부 기술별 논문 발표 동향

나. 주요 국가별 논문 동향

- 조사기간(2011년~2015년)동안 주요 국가들의 콘크리트 재료 기술의 논문 발표 건수는 증가하는 추세로 나타남

〈표 III-29〉 콘크리트 재료 주요 국가별 논문 동향

구분	2011	2012	2013	2014	2015	합계
미국	466	508	483	503	606	2,566
일본	115	111	100	78	105	509
한국	98	105	132	156	144	635
EU	591	639	723	667	751	3,371
합계	1,270	1,363	1,438	1,404	1,606	7,081

다. 활동도 및 집중도

■ 콘크리트 재료는 시멘트 복합재료, 자원순환형 재료, 무시멘트 콘크리트, 나노/바이오 복합재료, 아스팔트 콘크리트로 조사됨

- 시멘트 복합재료에서 논문 활동도는 미국(0.40)이 가장 높았으며, 집중도는 한국(1.77)이 가장 높은 것으로 분석되었고, 논문활동도와 집중도를 같이 확인했을 경우, 한국(1.93)이 가장 높은 것으로 분석됨
- 자원순환형 재료에서 논문 활동도는 미국(0.22)이 가장 높았으며, 집중도는 EU(1.24)이 가장 높은 것으로 분석되었고, 논문활동도와 집중도를 같이 확인했을 경우, EU(1.84)이 가장 높은 것으로 분석됨
- 무시멘트 콘크리트 재료에서 논문 활동도는 한국(0.58)이 가장 높았으며, 집중도도 한국(6.98)이 가장 높은 것으로 분석되었고, 논문활동도와 집중도를 같이 확인 했을 경우, 한국(7.56)이 가장 높은 것으로 분석됨
- 나노/바이오 복합재료에서 논문 활동도는 EU(0.56)이 가장 높았으며, 집중도도 EU(1.17)이 가장 높은 것으로 분석되었고, 논문활동도와 집중도를 같이 확인 했을 경우, EU(1.72)이 가장 높은 것으로 분석됨
- 아스팔트 콘크리트재료에서 논문 활동도는 미국(0.59)이 가장 높았으며, 집중도도 미국(1.64)이 가장 높은 것으로 분석되었고, 논문활동도와 집중도를 같이 확인 했을 경우, 미국(2.23)이 가장 높은 것으로 분석됨

〈표 III-30〉 콘크리트 재료 국가별 논문활동도 및 집중도

구분			'11	'12	'13	'14	'15	총괄
시멘트 복합재료	미국	활동도	0.34	0.48	0.38	0.43	0.39	0.40
		집중도	0.93	1.29	1.12	1.19	1.03	1.11
	일본	활동도	0.08	0.08	0.09	0.07	0.10	0.08
		집중도	0.91	0.98	1.26	1.28	1.49	1.18
	한국	활동도	0.10	0.14	0.18	0.21	0.18	0.16
		집중도	1.29	1.79	1.91	1.85	1.99	1.77
	EU	활동도	0.48	0.30	0.36	0.30	0.34	0.36
		집중도	1.02	0.64	0.72	0.63	0.72	0.75

구분			'11	'12	'13	'14	'15	총괄
자원순환형 재료	미국	활동도	0.26	0.24	0.19	0.17	0.22	0.22
		집중도	0.71	0.66	0.56	0.47	0.59	0.60
	일본	활동도	0.16	0.10	0.07	0.07	0.06	0.09
		집중도	1.78	1.24	0.98	1.20	0.90	1.22
	한국	활동도	0.08	0.09	0.12	0.13	0.08	0.10
		집중도	1.00	1.10	1.29	1.15	0.92	1.09
	EU	활동도	0.50	0.57	0.63	0.64	0.63	0.59
		집중도	1.07	1.21	1.24	1.34	1.36	1.24
무시멘트 콘크리트	미국	활동도	0.00	0.33	0.00	0.50	0.00	0.17
		집중도	0.00	0.89	0.00	1.40	0.00	0.46
	일본	활동도	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		집중도	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	한국	활동도	1.00	0.67	0.50	0.25	0.50	0.58
		집중도	12.96	8.65	5.45	2.25	5.58	6.98
	EU	활동도	0.00	0.00	0.50	0.25	0.50	0.25
		집중도	0.00	0.00	0.99	0.53	1.07	0.52
나노/바이오 복합재료	미국	활동도	0.32	0.27	0.25	0.29	0.34	0.29
		집중도	0.87	0.73	0.75	0.82	0.90	0.81
	일본	활동도	0.10	0.11	0.09	0.06	0.07	0.09
		집중도	1.14	1.31	1.29	1.13	1.10	1.19
	한국	활동도	0.06	0.04	0.06	0.09	0.06	0.06
		집중도	0.73	0.58	0.68	0.77	0.70	0.69
	EU	활동도	0.52	0.58	0.59	0.56	0.53	0.56
		집중도	1.12	1.23	1.18	1.18	1.13	1.17
아스팔트 콘크리트	미국	활동도	0.64	0.53	0.60	0.58	0.61	0.59
		집중도	1.75	1.43	1.78	1.62	1.62	1.64
	일본	활동도	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
		집중도	0.12	0.10	0.04	0.08	0.06	0.08
	한국	활동도	0.07	0.06	0.05	0.06	0.04	0.06
		집중도	0.95	0.72	0.50	0.54	0.45	0.63
	EU	활동도	0.26	0.39	0.35	0.34	0.34	0.34
		집중도	0.57	0.84	0.69	0.72	0.72	0.71

라. 인용도, 영향력, 기술력 지수

〈표 Ⅲ-31〉 콘크리트 재료 인용도, 영향력, 기술력 지수

구분		미국	일본	한국	EU
시멘트 복합재료	인용도	23.14	6.55	5.22	15.61
	영향력	1.83	0.52	0.41	1.24
	기술력	1,215.70	72.09	107.11	729.58
자원순환형 재료	인용도	16.55	3.57	4.54	10.27
	영향력	1.31	0.28	0.36	0.81
	기술력	276.73	23.45	35.25	483.43
무시멘트 콘크리트	인용도	9.00	0.00	25.00	7.25
	영향력	0.71	0.00	1.98	0.57
	기술력	2.14	0.00	21.79	2.30
나노/ 바이오 복합재료	인용도	34.24	22.35	13.02	30.47
	영향력	2.71	1.77	1.03	2.41
	기술력	2,528.44	476.30	204.16	4,209.98
아스팔트 콘크리트	인용도	13.10	12.94	11.65	13.93
	영향력	1.04	1.03	0.92	1.10
	기술력	785.83	18.46	63.70	484.54

2. 특허 동향 분석

2.1 분석 범위

- 90년 1월부터 2017년 4월까지 한국, 미국, 일본 및 유럽 특허청에 출원 공개 및 등록된 특허를 대상으로 분석을 실시함

〈표 III-32〉 검색 DB 및 검색범위

자료 구분	국가	내용	분석구간	검색범위
공개/등록 특허 (공개 등록일 기준)	한국	WIPS	1990.01 ~ 2017.04	특허 공개/등록 전체문서
	미국	WIPS		특허 공개/등록 전체문서
	일본	WIPS		특허 공개/등록 전체문서
	유럽	WIPS		특허 공개/등록 전체문서

- 건설 재료의 기술분류체계 상의 2차 및 3차 기술에 해당하는 건설재료 기술을 대상으로 분석 실시함

2.2 분석지표 개요

가. 기술수준

1) 양적 지표

- 한국, 미국, 일본 및 유럽 특허청에 출원된 특허를 대상으로 활동도 및 집중도 평가를 실시함

2) 질적 지표

- 미국등록특허를 대상으로 기술수준을 측정하는 인용도지수(CPP), 영향력지수(PII), 기술력지수(TS)로 평가를 실시함

〈표 III-33〉 기술수준 지표 설명

지 표		설 명
양적 지표	활동도 (AI, Activity Index)	$II_{ij} = \frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^{nt} T_{ij}}$ T_{ij} : i 기술에 대한 j 국가의 출원 공개 특허 수, nt : 전체 국가 수

지 표		설 명
	집중도 (II, Intensity Index)	$II_{ij} = \frac{(T_{ij} / \sum_{j=1}^{nt} T_{ij})}{(\sum_{i=1}^{nt} T_{ij} / \sum_{i=1}^{nt} \sum_{j=1}^{nt} T_{ij})}$ T_{ij} : i 기술에 대한 j 국가의 출원 공개 특허 수, nt : 전체 국가 수, mt : 전체 기술 수
질적 지표	인용도지수 (CPP, Cites Per Patent)	CPP = 등록특허의 피인용횟수 / 등록특허 건수 ■ 특정 등록특허가 다른 특허들에 의해 인용된 횟수 ■ CPP 값이 클수록 질적 수준이 높은 핵심특허 또는 원천특허를 많이 보유하고 있을 가능성이 높음을 시사
	특허영향지수 (PII, Patent Impact Index)	PII = 분석대상 주체의 CPP / 전체 CPP ■ 특허의 피인용 횟수를 특정 기술분야 내에서 상대적인 값으로 전환시킨 지수 ■ 평균적인 기술 수준과 대비하여 분석대상의 기술 수준을 측정하며, PII가 1이면 해당 국가 또는 기업의 질적 수준이 평균 수준이고, 1이상일 경우는 질적 수준이 평균보다 높음을 의미
	기술력지수 (TS, Technology Strength)	TS = 특허건수 × 영향력지수(PII) ■ 특허활동의 질적 수준과 함께 양적인 측면을 고려가 가능한 지수 ■ TS가 클수록 해당 출원국가의 특허가 질적 및 양적으로 높은 기술력을 가지고 있음을 의미 ■ TS를 통해 어느 국가가 질적으로 우수하고 많은 특허를 출원하였는지에 대한 기술력 판단 가능 ■ 출원연도를 구간별로 나누어 기술력의 변화를 분석하여 기술력 변화추이를 살펴볼 수 있으므로, 과거부터 계속하여 기술력이 높은 국가와 최근 들어 기술력이 급성장하고 있는 국가에 대한 파악 가능

3) 시장진입 경쟁수준

■ 집중율 지표 및 허핀달-허쉬만 지표로 평가

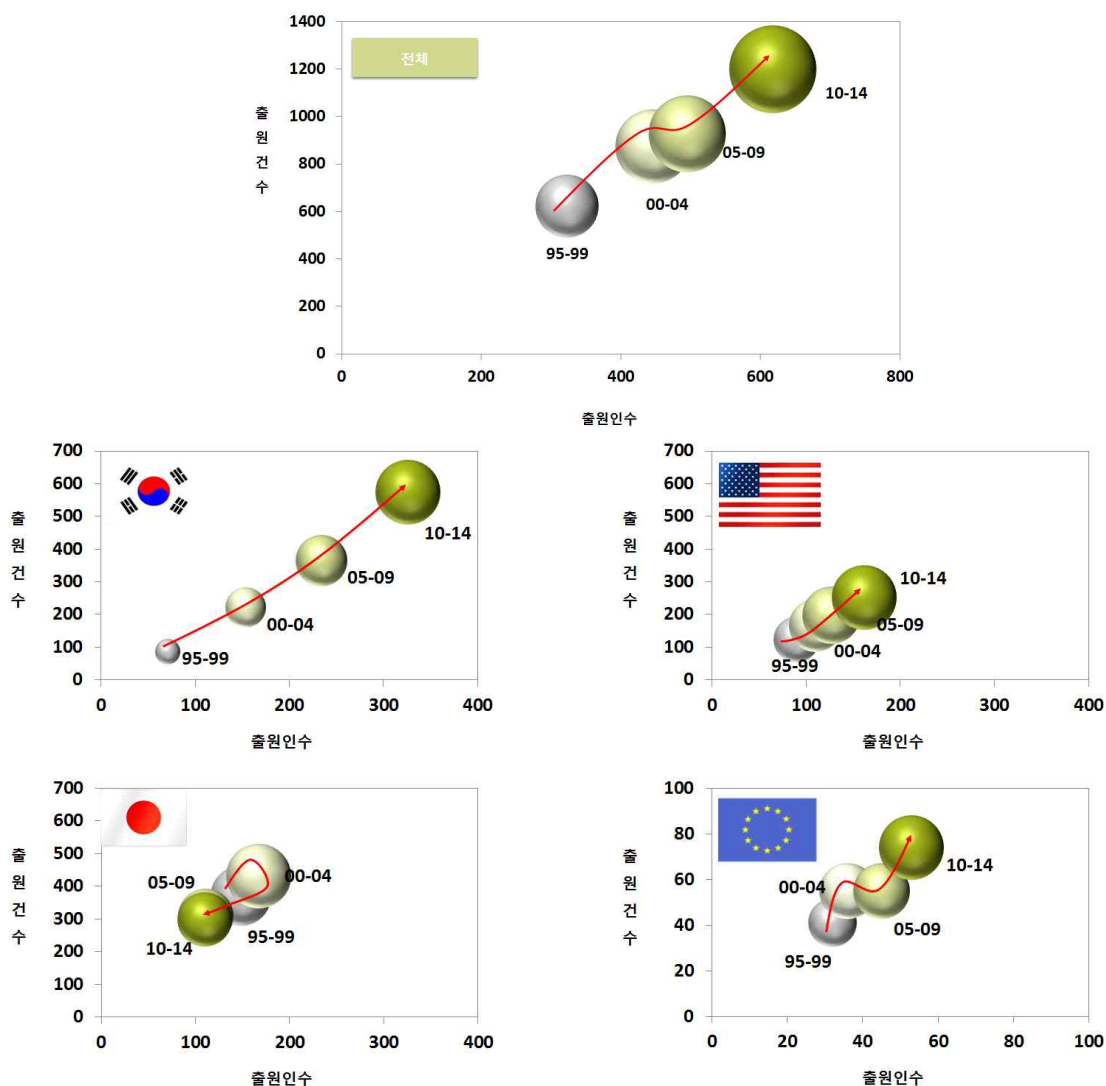
〈표 III-34〉 시장진입 경쟁수준 지표 설명

지 표	설 명
허핀달-허쉬만 지수 (HHI, Herfindahl-Herschman Index)	$HHI = \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad [S_i = \frac{(n\text{번째 출원인의 출원수})}{(A\text{기술분야의 전체출원수})}]$ ■ A 기술분야에 50개의 출원인이 존재하며 전체 1000건의 특허 출원이 있다고 가정할 때, A 기술분야에 있어서의 허핀달-허쉬만 지수는 상기 S_i^2의 총합을 의미 ■ HHI 범위에 따라 시장진입 가능성 판단 가능 - 0 ~ 100 미만 : 완전 자유경쟁 시장 - 100 ~ 1,000 : 집중화 정도가 거의 없는 시장 - 1,000 ~ 1,800 : 경쟁적 시장 - 1,800 ~ 4,000 : 과점적 시장 - 4,000 이상 : 독점적 시장

2.3 특허동향 분석 결과

가. 기술성장단계

- 포트폴리오로 나타난 콘크리트 재료 기술의 전체 특허 기술 위치는 1구간(1995년~1999년)부터 4구간(2010년~2014년)까지 출원 건수 및 출원인 수가 증가하는 전형적인 성장기 단계로 분석됨
- 포트폴리오로 나타난 콘크리트 재료 기술의 한국특허 기술위치 역시 1구간(1995년~1999년)부터 4구간(2010년~2014년)까지 출원 건수 및 출원인 수가 증가하는 전형적인 성장기 단계로 분석됨

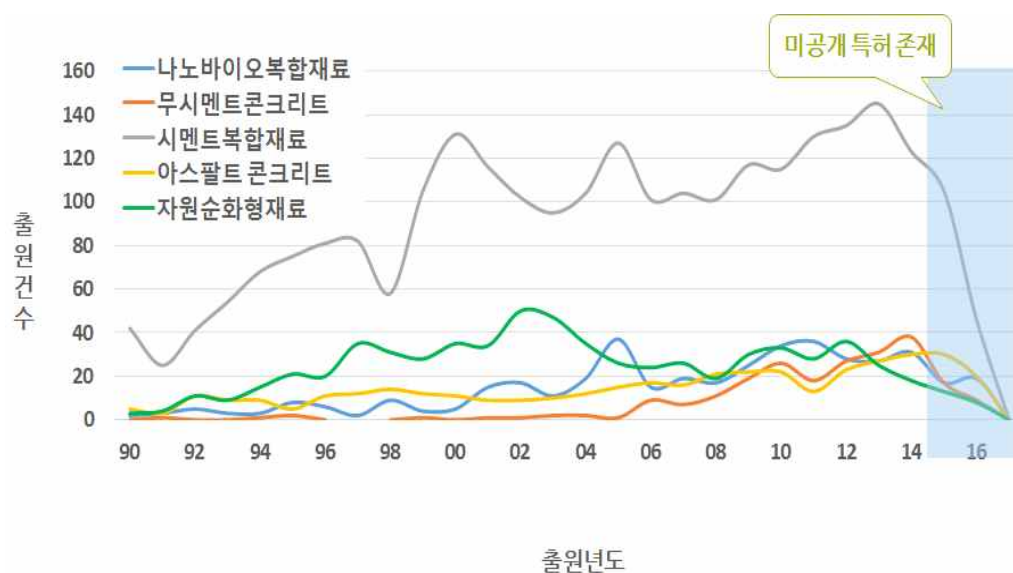


〈그림 III-8〉 전체 및 주요시장국의 콘크리트 재료 기술 관련 기술성장단계

- 포트폴리오로 나타난 콘크리트 재료 기술의 미국특허 기술위치도 1구간(1995년~1999년)부터 4구간(2010년~2014년)까지 출원건수 및 출원인수가 증가하는 전형적인 성장기 단계로 분석됨
- 포트폴리오로 나타난 콘크리트 재료 기술의 일본특허 기술위치는 1구간(1995년~1999년)부터 4구간(2010년~2014년)까지 출원 건수와 출원인의 수가 점차적으로 감소하는 것으로 나타났으며, 이는, 일본은 다른 국가에 비해 1990년대에 관련된 특허를 상당히 많이 출원하고, 2000년대 이후 건설재료 관련 특허 출원이 감소하였기 때문인 것으로 판단됨
- 포트폴리오로 나타난 콘크리트 재료 기술의 유럽특허 기술위치도 1구간(1995년~1999년)부터 4구간(2010년~2014년)까지 출원 건수 및 출원인 수가 증가하는 전형적인 성장기 단계로 분석됨

나. 연도별 특허출원 동향

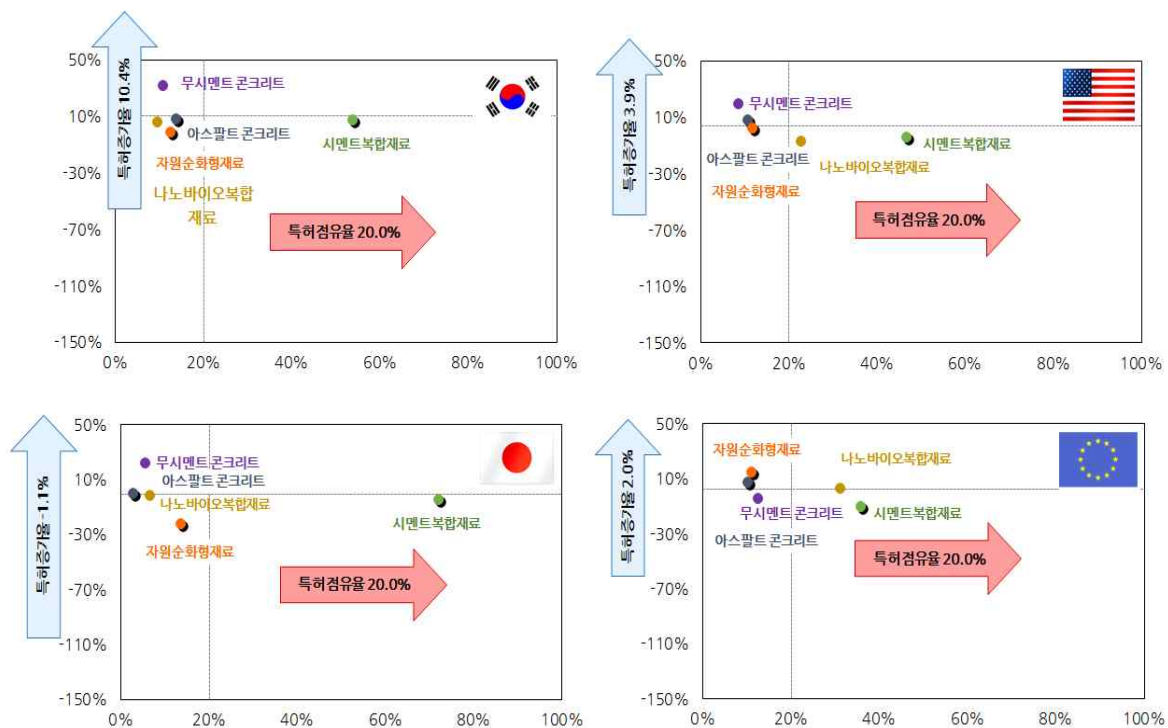
- 시멘트 복합재료 기술이 가장 활발한 특허출원 건수를 나타내고 있으며, 특히 1990년대 후반부터 최근까지 계속적으로 증가하여 타 기술분야에 비하여 압도적으로 많은 특허출원 건수를 나타내고 있음.
- 그 외 세부기술들은 증가와 감소를 반복하면서 어느 정도 출원 건수를 유지하고 있는 것으로 나타남



<그림 Ⅲ-9> 콘크리트 재료 세부기술의 연도별 출원동향

다. 특허점유율 및 증가율

- 한국, 미국, 일본에서 무시멘트 콘크리트 기술이 최근 들어 특허 출원이 활발한 것으로 나타나며, 모든 국가에서 시멘트 복합재료 기술이 최근 들어 특허 출원이 감소하고 있는 것으로 나타남
- 유럽에서는 자원순환형 재료 및 포장재료(아스팔트 콘크리트) 기술이 최근에 특허 출원이 활발한 것으로 나타남



* X축 : 100%/기술분야 개수, Y축: 분석구간의 연평균 증가율의 기하평균값

* 분석의미 : 1사분면- 지속적으로 특허출원이 활발, 2사분면- 최근 특허출원이 활발, 3사분면- 초창기(도입기) 기술, 4사분면- 최근 특허출원이 감소추세

〈그림 III-10〉 콘크리트 재료 세부기술별 주요시장국의 특허점유율 및 증가율

라. 기술수준 분석

- 전체 분석구간에서는 시멘트 복합재료 기술 및 자원순환형 재료 기술은 일본의 특허출원 건수가, 무시멘트 콘크리트 기술 및 포장재료 기술은 한국의 특허출원 건수가 나노/바이오 복합재료 기술은 미국의 특허출원 건수가 가장 많은 것으로 나타난 반면에, 최근 10년간에는 모든 세부기술에서 한국의 특허출원 건수가 가장 많은 것으로 나타남

- 주요시장국별 특허출원 집중도의 경우, 전체 분석구간 및 최근 10년간 동일하게 한국은 포장재료 기술의 집중도가, 미국 및 유럽은 나노/바이오 복합재료 기술의 집중도가, 일본은 시멘트 복합재료 기술의 집중도가 높은 것으로 나타남

〈표 III-35〉 콘크리트 재료 세부기술별 주요시장국의 기술수준 양적지표

세부기술			시멘트 복합재료 기술	자원순환형 재료 기술	무시멘트 콘크리트 기술	나노/바이오 복합재료 기술	포장재료 기술
전체 분석 구간	활 동 도	한국	0.28	0.36	0.53	0.32	0.56
		미국	0.18	0.19	0.21	0.37	0.24
		일본	0.49	0.38	0.18	0.19	0.14
		유럽	0.05	0.07	0.08	0.12	0.05
	집 중 도	한국	0.82	1.05	1.52	0.91	1.63
		미국	0.88	0.92	1.02	1.80	1.19
		일본	1.28	0.99	0.48	0.50	0.37
		유럽	0.73	1.07	1.21	1.88	0.76
최근 10년 간	활 동 도	한국	0.45	0.45	0.55	0.37	0.64
		미국	0.17	0.21	0.19	0.34	0.23
		일본	0.35	0.28	0.18	0.14	0.08
		유럽	0.04	0.06	0.08	0.19	0.06
	집 중 도	한국	1.00	1.01	1.23	0.83	1.43
		미국	0.72	0.87	0.81	1.43	0.96
		일본	1.44	1.17	0.76	0.57	0.32
		유럽	0.48	0.78	1.03	2.04	0.77

※ 최근 10년간 : 2006년 ~ 2015년의 10년간을 의미함

- 전체 분석구간 및 최근 10년간 모든 세부기술에서 미국의 등록특허수가 가장 많은 것으로 나타났으며, PII는 유럽이 가장 높은 것으로 나타났으나, TS는 등록특허수가 가장 많은 미국이 가장 높은 것으로 나타남
- 한국의 경우, 시멘트 복합재료 기술, 자원순환형 재료 기술, 포장재료 기술에 대하여 최근 10년간 적은 수의 미국등록특허가 존재하며, 이 중에서 자원순환형 재료 기술만이 질적 및 기술력 수준 분석이 가능한 것으로 나타났으며, 해당 등록특허의 질적 수준은 평균 이상이나 기술력 수준은 낮은 것으로 나타남

〈표 III-36〉 콘크리트 재료 세부기술별 주요시장국의 기술수준 질적지표

세부기술			시멘트 복합재료 기술	자원순환형 재료 기술	무시멘트 콘크리트 기술	나노/바이오 복합재료 기술	포장재료 기술
전체 분석 구간	미국 등록 특허 수	한국	2	2	-	-	1
		미국	162	47	17	68	47
		일본	48	6	-	8	7
		유럽	84	13	6	20	4
	PII	한국	-	0.55	-	-	-
		미국	3.34	4.86	6.05	5.70	6.27
		일본	1.60	1.25	-	4.03	10.03
		유럽	15.46	20.33	25.56	18.68	8.98
	TS	한국	-	1.10	-	-	-
		미국	541.33	228.48	102.85	387.58	294.65
		일본	76.77	7.50	-	32.25	70.19
		유럽	156.75	24.92	25.56	50.23	8.98
최근 10년 간	미국 등록 특허 수	한국	2	2	-	-	1
		미국	68	18	16	41	17
		일본	18	1	-	2	-
		유럽	33	2	4	15	3
	PII	한국	-	6.16	-	-	-
		미국	5.14	16.69	12.17	3.55	5.84
		일본	5.38	14.77	-	2.04	-
		유럽	25.60	2.46	21.11	26.91	16.55
	TS	한국	-	12.31	-	-	-
		미국	349.82	300.36	194.66	145.55	99.28
		일본	96.78	14.77	-	4.08	-
		유럽	127.85	2.46	21.11	54.63	16.55

마. 시장진입 경쟁수준 분석

- 시멘트 복합재료 기술과 자원순환형 재료 기술의 경우, 한국은 전체 분석구간과 최근 10년간 완전 자유경쟁 시장, 미국, 일본, 유럽은 전체 분석구간과 최근 10년간 집중화 정도가 거의 없는 시장으로 나타나 시장진입 용이도가 높은 것으로 판단됨
- 무시멘트 콘크리트 기술의 경우, 한국, 미국, 일본은 전체 분석구간과 최근 10년간 집중화 정도가 거의 없는 시장, 유럽은 전체 분석구간과 최근 10년간 경쟁적 시장으로 나타나 시장진입 용이도가 높은 것으로 판단됨
- 나노/바이오 복합재료 기술의 경우, 모든 국가에서 전체 분석구간과 최근 10년간 집중화 정도가 거의 없는 시장으로 나타나 시장진입 용이도가 높은 것으로 판단됨

- 포장재료 기술의 경우, 한국, 미국, 유럽은 전체 분석구간과 최근 10년간 집중화 정도가 거의 없는 시장, 일본은 전체 분석구간은 집중화 정도가 거의 없는 시장, 최근 10년간 경쟁적 시장으로 나타나 시장진입 용이도가 높은 것으로 판단됨

〈표 Ⅲ-37〉 콘크리트 재료 세부기술별 주요시장국의 시장진입 경쟁수준

세부기술			시멘트 복합재료 기술	자원순환형 재료 기술	무시멘트 콘크리트 기술	나노/바이오 복합재료 기술	포장재료 기술
전체 분석 구간	HHI	한국	72.85	79.37	412.24	126.26	117.19
		미국	115.37	114.56	502.49	209.98	215.75
		일본	776.62	641.10	624.63	277.20	286.24
		유럽	261.09	258.04	1481.48	347.63	800.00
최근 10년 간	HHI	한국	63.93	126.38	310.00	204.03	148.43
		미국	147.39	236.69	457.06	209.54	381.94
		일본	437.44	520.52	688.71	414.20	1015.63
		유럽	264.65	714.29	1796.88	362.50	887.57

제4절 국내 R&D 인프라 현황 분석

1. 연구인력 인프라

1.1 조사개요

가. 조사대상

■ 「OECD의 “연구개발활동조사시행지침(Proposed Standard Practice for Surveys of Research and Experimental Development : FRASCATI MANUAL)”에 의한 자연과학(이학), 공학 및 기술, 의학 및 농학분야

■ 공학 및 기술 분야의 토목·건축, 전기·전자·통신·정보공학, 기계·항공·원자력, 화학공학, 금속·재료·섬유, 의공학, 환경·자원·조선·해양, 환경바이오기술, 산업바이오기술, 나노기술 등으로 분류하여 조사

나. 조사대상 기관

■ 공공연구기관

- 국·공립 연구기관
- 정부출연 및 지방자치단체 출연 연구기관
- 기타 비영리법인 연구기관

■ 2년 이상의 교육과정을 보유하고 있는 대학

■ 연구소 및 연구전담부서 보유 기업한 기업체(정부투자·재투자기관 포함)

1.2 연구인력 인프라 분석

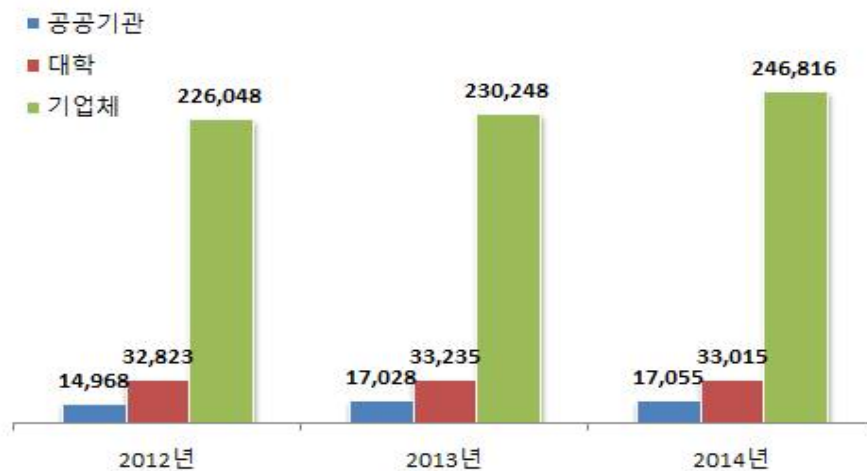
■ 하이퍼 나노 콘크리트 관련 연구 인력 인프라 현황은 전체 공학 및 기술 분야 대비 2012년 6.67%, 2013년 6.74%, 2014년 7.19%로 증가추세임

- 국내 「OECD의 “연구개발활동조사시행지침 (FRASCATI MANUAL)에 의한 공학 및 기술 분야의 국내 연구 인력의 공학 및 기술 분야의 연구 인력 현황에 대하여 학위수여현황(박사, 석사, 학사)을 기준으로 구분하여 살펴본 결과 전체 연구 인력은 797,454 명으로 집계됨

- 전체 연구 인력 인프라 중 박사는 115,413명으로 15% 석사과정은 248,698명으로 31%로 석사과정 이상의 전문 인력은 364,111명인 46%로 조사됨
- 국내 주체별 연구원 수 비중을 2012~2014년 조사한 결과 기업체가 82.59%로 가장 높은 수준을 보임
- 공공연구기관 5.76%, 대학 11.65%, 기업체 82.59%로 공공연구기관 및 대학의 연구 인력 인프라가 기업체의 연구 인력에 비해 부족한 실정임

〈표 III-38〉 국내 주체별 연구원 인력현황

구분	2012년		2013년		2014년	
	인력 수(명)	비중(%)	인력 수(명)	비중(%)	인력 수(명)	비중(%)
공공기관	14,968	5.46	17,028	6.07	17,055	5.75
대학	32,823	11.99	33,235	11.85	33,015	11.12
기업체	226,048	82.55	230,248	82.08	246,816	83.13
계	273,839	100.00	280,511	100.00	296,886	100.00

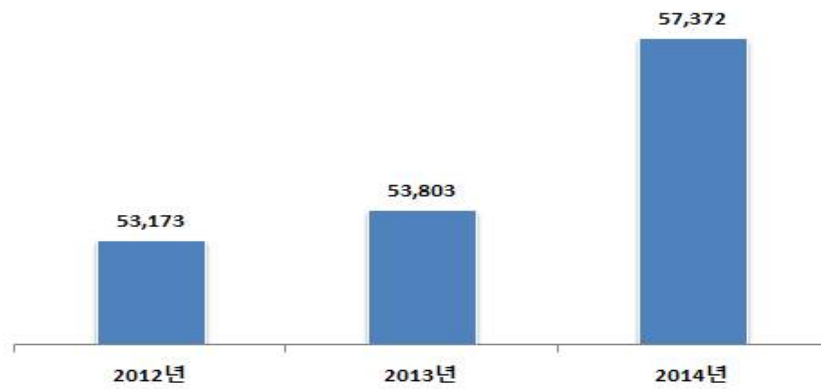


〈그림 III-11〉 국내·외 주체별 연구 인력현황

- 하이퍼 나노 콘크리트 분야(토목·건축, 화학공학, 금속재료 섬유, 나노기술로 분류)의 연구 인력의 분야별 학위별 연구 인력은 매년 증가하는 추세임

〈표 III-39〉 국내 스마트 건설재료 관련 공학분야 연구인력

구분	(단위: 명)		
	2012년	2013년	2014년
스마트 건설재료 관련 공학분야 (토목·건축, 화학공학, 금속재료 섬유, 나노기술)	53,173	53,803	57,372



〈그림 Ⅲ-12〉 국내 공학 및 기술분야 연구인력현황

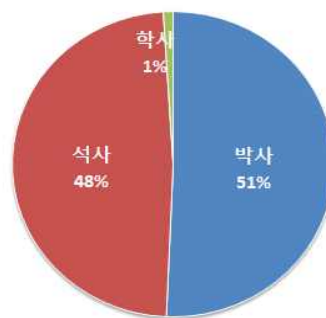
- 2014년 기준 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야(토목·건축, 화학공학, 금속재료 섬유, 나노기술로 분류)의 공공기관, 대학, 기업 연구인력

〈표 Ⅲ-40〉 2014년 국내 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야 연구인력

구분	하이퍼 나노 콘크리트 분야					
	박사(명)	비율(%)	석사(명)	비율(%)	학사(명)	비율(%)
공공기관	2,395	10.9	1,527	7.4	375	1.5
대학	4,904	22.4	4,677	22.5	95	0.4
기업	14,595	66.7	14,550	70.1	23,929	98.1
계	21,894	100.0	20,754	100.0	24,399	100.0



〈그림 Ⅲ-13〉
공공기관
연구인력 현황



〈그림 Ⅲ-14〉
대학
연구인력 현황



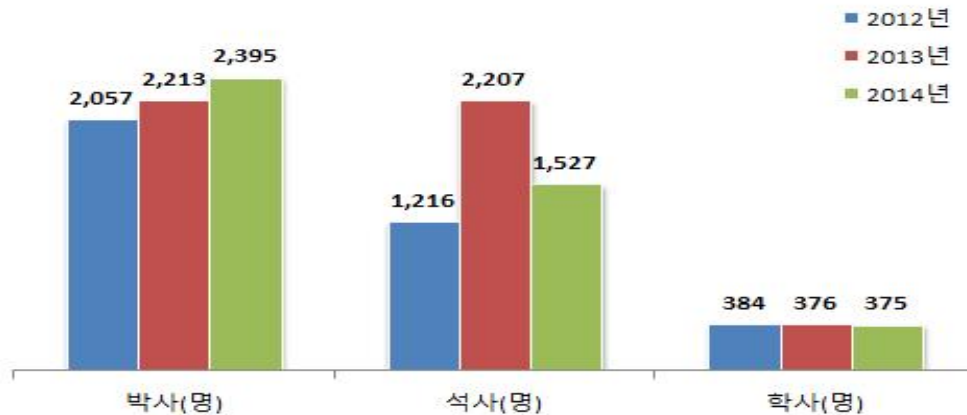
〈그림 Ⅲ-15〉
기업
연구인력 현황

- 공공기관에 종사하는 연구인력 중 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야(토목·건축, 화학공학, 금속재료 섬유, 나노기술로 분류)의 연구 인력의 박사급 연구인력의 비중은 52.27%으로 나타남

- 학위별 연구원 수 비중은 박사 52.27%, 석사 38.82%, 학사 8.9%로 나타남

〈표 Ⅲ-41〉 국내 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공공기관 연구인력

구분	하이퍼 나노 콘크리트 분야		
	박사(명)	석사(명)	학사(명)
2012년	2,057	1,216	384
2013년	2,213	2,207	376
2014년	2,395	1,527	375
계	6,665	4,950	1,135
비중(%)	52.27	38.82	8.90

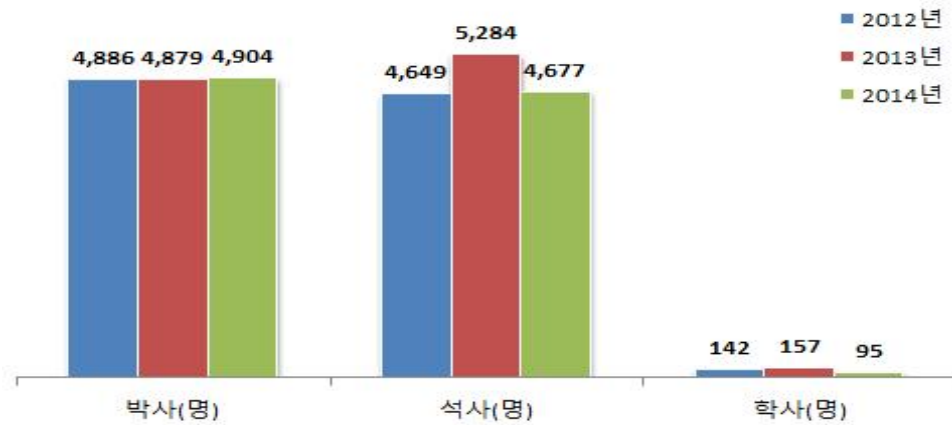


〈그림 Ⅲ-16〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 분야 공공기관 학위별 연구인력

- 대학에 종사하는 연구인력 중 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야(토목·건축, 화학공학, 금속재료 섬유, 나노기술로 분류)의 연구 인력의 박사급 연구인력 및 석사급 연구 인력의 비중은 98.68%로 나타남
- 학위별 연구원 수 비중은 박사 49.43%, 석사 49.23%, 학사 1.32%로 나타남

〈표 Ⅲ-42〉 국내 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야 대학 연구인력

구분	하이퍼 나노 콘크리트 분야		
	박사(명)	석사(명)	학사(명)
2012년	4,886	4,649	142
2013년	4,879	5,284	157
2014년	4,904	4,677	95
계	14,669	14,610	394
비중(%)	49.44	49.24	1.33

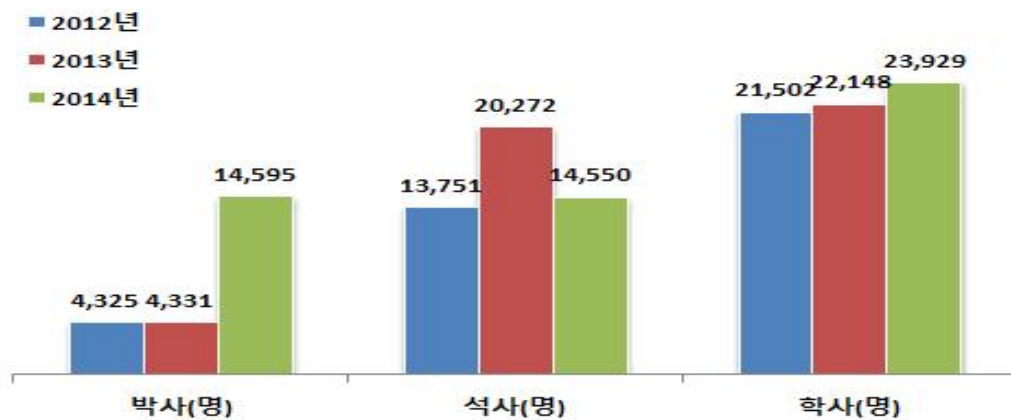


〈그림 III-17〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 분야 대학 학위별 연구인력

- 기업에 종사하는 연구인력 중 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야(토목·건축, 화학공학, 금속재료 섬유, 나노기술로 분류)의 연구 인력의 석사급 연구인력 및 학사급 연구 인력의 비중은 83.32%로 나타남
- 학위별 연구원 수 비중은 박사 16.68%, 석사 34.84%, 학사 48.48%로 나타남

〈표 III-43〉 국내 하이퍼 나노 콘크리트 관련 공학 분야 기업 연구인력

구분	하이퍼 나노 콘크리트 관련 분야		
	박사(명)	석사(명)	학사(명)
2012년	4,325	13,751	21,502
2013년	4,331	20,272	22,148
2014년	14,595	14,550	23,929
계	23,351	48,573	67,579
비중(%)	16.68	34.84	48.48



〈그림 III-18〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 분야 기업체 학위별 연구인력

2. 연구 인프라

2.1 대학 및 대학원 현황

가. 대학

■ 국내 대학 재료, 신소재, 금속, 토목, 환경, 안전, 방재 학과 현황 조사 결과 전국 16개 지역의 97개 대학에서 하이퍼 나노 콘크리트 관련 전공이 설치·운영되고 있는 것으로 조사

● 하이퍼 나노 콘크리트와 연관성이 높은 재료, 신소재, 금속, 건축, 토목, 환경, 안전, 방재 선정

〈표 III-44〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 대학 및 전공

지역	대학명	관련학과
서울	광운대학교	전자재료공학과, 환경공학과
	서경대학교	나노융합공학과, 토목건축공학과
	서울대학교	바이오시스템학과, 건축학부 건축공학전공, 재료공학부, 건설환경공학부
	건국대학교	융합신소재공학과, 환경공학과
	경희대학교	환경신소재공학과, 정보전자신소재공학과, 건축공학과
	광운대학교	건축공학과
	고려대학교	신소재공학부, 환경시스템공학과
	국민대학교	신소재공학부, 건설시스템공학부
	동국대학교	안전공학과, 융합에너지신소재공학과, 건축공학부, 건설환경공학과
	서울과학기술대학교	신소재공학과, 건축학부 건축공학전공, 건설시스템공학과, 안전공학과
	서울시립대학교	신소재공학과, 토목공학과, 환경공학부
	세종대학교	나노신소재공학과, 건축공학부, 건설환경공학과
	연세대학교	신소재공학전공, 건축공학부, 토목환경공학전공
	한양대학교	신소재공학부, 건축공학부, 건설환경공학과, 재료화학공학과
부산	부경대학교	재료공학과, 신소재시스템공학과, 금속공학과, 건축공학과, 토목공학과, 환경공학과, 안전공학과, 소방공학과
	동명대학교	건축공학과
	경성대학교	신소재공학과
	부산대학교	재료공학부, 바이오소재과학과
	부산가톨릭대학교	환경공학과
	한국해양대학교	해양공간건축학부, 건설공학과, 환경공학과

지역	대학명	관련학과
강원	원주대학교	신소재금속공학과, 나노응용공학과, 신소재공학과, 토목공학과
	강원대학교	재료금속공학과, 건축공학전공, 건축시스템공학과, 토목공학과, 환경공학과, 소방방재학과
	한라대학교	신소재화학공학과, 토목공학과
	한림대학교	융합신소재공학과
	경동대학교	건축공학과
	가톨릭관동대학교	토목공학과
	상지대학교	건설시스템공학과, 환경공학과
전남	순천대학교	신소재공학과, 토목공학과, 환경공학과
	목포대학교	환경공학과
	동신대학교	건축공학과, 토목공학과
	전남대학교	해양토목공학과, 환경시스템공학과
	한려대학교	건설방재공학과
경남	경상대학교	나노신소재공학부, 해양토목공학과, 해양환경공학과
	경남대학교	나노신소재공학과, 토목공학과, 도시환경공학과, 소방방재공학과
	경남과학기술대학교	환경공학과
	인제대학교	나노융합공학부, 신소재프로세스공학과
	창원대학교	신소재공학부
	창신대학교	소방방재공학과
	한국국제대학교	소방방재학과
경북	금오공과대학교	신소재공학부
	안동대학교	금속신소재공학전공, 응용신소재공학전공, 영남대학교
	영남대학교	신소재공학부
	포항공과대학교	신소재공학과
	경일대학교	건축학부 건축공학전공
	대구대학교	건축공학과
	동양대학교	건축소방행정학과
	안동대학교	건축공학과, 토목공학과
	영남대학교	건설시스템공학과
	경일대학교	건설시스템공학과, 소방방재학과
	김천대학교	소방학과
대구	경북대학교	신소재공학부, 건축공학전공, 건설방재공학부, 토목공학과, 환경공학과
	계명대학교	신소재공학부, 건축공학전공, 토목공학과
	대구대학교	환경공학과
	대구한의대학교	방재안전관리전공, 소방방재환경전공
대전	대전대학교	신소재공학과, 건축공학과, 토목공학과, 환경공학과
	배재대학교	나노고분자재료공학과, 신소재공학과, 건설환경철도공학과
	우송대학교	건축공학과, 철도건설시스템학부, 소방방재학과
	충남대학교	신소재공학과, 건축공학과, 토목공학과, 환경공학과
	한남대학교	건축공학전공
	한밭대학교	신소재공학과, 건축공학과, 건설환경공학과
울산	울산대학교	첨단신소재공학과, 건축공학부, 건설환경공학부

지역	대학명	관련학과
인천	인천대학교	신소재공학과, 건설환경공학과
	인하대학교	신소재공학과, 건축공학과, 사회인프라공학과, 환경공학과
전북	군산대학교	신소재공학과, 토목공학과, 안전공학과
	전북대학교	신소재공학부전자재료공학전공, 건축공학과, 지역건설공학과, 토목공학과, 금속시스템공학전공, 환경공학과
	전주대학교	건축공학과, 토목환경공학과, 소방안전공학과
	원광대학교	토목환경공학과
	우석대학교	소방안전학과
충북	충북대학교	신소재공학과, 건축공학과, 지역건설공학과, 토목공학과, 환경공학과, 안전공학과
	세명대학교	건축공학과, 토목공학과
	유원대학교	건축공학과
	서원대학교	환경공학과
	청주대학교	건축공학과, 토목공학과, 환경공학과
제주	제주국제대학교	토목공학과, 소방방재학과
	제주대학교	토목공학과, 환경공학과
충남	공주대학교	신소재공학부, 건축공학전공, 건설환경공학부, 환경공학과
	상명대학교	건설시스템공학과
	중부대학교	토목공학과
	청운대학교	토목환경공학과
	남서울대학교	건축공학과
	청운대학교	건축공학과
	선문대학교	신소재공학과
	호서대학교	건축토목환경공학부
경기	경기대학교	신소재공학과, 건축공학과, 토목공학과, 환경공학과
	가천대학교	건축공학과, 토목환경공학과
	경동대학교	토목공학과
	대진대학교	신소재공학과, 건설시스템공학과
	아주대학교	신소재공학과, 건설시스템공학과
	단국대학교	신소재공학과, 건축공학과, 토목공학과
	한경대학교	토목안전환경공학과
	협성대학교	건축공학과
	한국산업기술대학교	신소재공학과
세종	홍익대학교	재료공학부, 건축공학부
광주	조선대학교	재료공학과, 토목공학과, 환경공학과
	광주대학교	토목공학과
	호남대학교	토목환경공학과
	전남대학교	신소재공학부, 토목공학과

* 출처: KCUE대학입학정보(<http://univ.kcue.or.kr>)

나. 대학 부설연구기관

■ 하이퍼 나노 콘크리트 분야에 대한 연구가 가능한 수도권 내 대학교 부설연구기관을 조사

〈표 III-45〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 대학 부설연구기관

대학	센터명	연구분야
서울대학교	신소재 공동 연구소	기존 소재의 결점을 보완하고 우수한 특성이 부여된 신고분자, 신 금속, 뉴세라믹스, 복합재료 및 반도체재료로 구성되는 고부가가치의 재료 연구
고려대학교	첨단소재 부품개발연구소	최첨단 과학기술의 개발과 관련 재료 및 부품의 개발/ 신소재 및 소재 공정 기술의 개발과 시스템 연구
	초대형 구조기술연구소	구조물의 설계와 기술개발의 향상을 위한 설계 구조 시공 재료 등 재료분야의 연구
	나노 기술연구소	나노 융합계란 금속/반도체성 나노튜브, 강자성/비자성 나노 구조, 유기/무기분자, 나노선/나노입자, DNA/단백질 등 광범위한 형태와 성질을 갖는 나노구조들의 기능적 복합체 연구
연세대학교	패턴 집적형 능동 폴리머 소재센터	능동형 폴리머 소재를 활용한 신규 패턴공정 기술개발
한양대학교	세라믹 연구소	첨단 압전 재료 소재 개발, 첨단제조공정의 기술개발 연구
성균관대학교	나노소재 기반휴먼 인터페이스융합센터	나노기반 고감도 터치/광센서 센서 소재 및 소자 연구
	자기치유 친환경 콘크리트 연구센터	콘크리트 균열의 자기치유 기술, 친환경 콘크리트, 자기치유 성능평가 분야의 미래 선도 기술 개발 연구
단국대학교	초고층빌딩 연구 개발센터	초고층 건축물은 최첨단 공학기술과 하이테크(High-tech) 등의 요소를 소화할 수 있는 설계, 구조, 신 재료, 경제적 시공기술 연구
국민대학교	구조 안전 연구소	신소재의 건설 분야 적용기법 개발 및 구조물의 안전 및 내구성에 관한 연구
	나노과학 기술연구소	나노 소자, 나노 소재, 나노 기계 및 시스템, 그리고 나노 측정 등의 기초 기술 연구
인하대학교	고분자연구소	엔지니어링 플라스틱, 복합재료, 초고강도 고분자 재료의 기초 및 응용 연구와 관련, 외부 연구 수행
	나노 정밀 화학 융합 산업기술개발 지원센터	나노기술(NT)에 의해 정밀화학소재의 기능성이 혁신적으로 보강, 증진된 나노정밀화학소재를 적용 연구수행
	소재연구소	소재분야를 중심으로 기초 연구개발 및 소재의 활용방안 연구
부산대학교	하이브리드 소재 솔루션국가핵심연구센터	하이브리드기능성 소재는 현 소재의 특성을 고도화하고 복합 기능화 하는 원천 소재기술이며, 이러한 첨단소재를 혁신적인 가공기법 연구

다. 연구실

■ 대학 연구실 현황조사 결과 하이퍼 나노 콘크리트 관련 연구실은 서울대, 고려대, 연세대 등 국내 대표적인 대학(국립, 공립, 사립 포함)을 기준으로 조사

〈표 III-46〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 전공 연구실

대학	연구실	연구실 소개	주요연구성과
서울대학교	고성능구조공학	고성능콘크리트, 프리스트레스트 콘크리트, 포스트텐션콘크리트, 합성콘크리트, 섬유보강콘크리트 그리고 친환경콘크리트 등을 활용한 다양한 구조의 설계 및 신 재료 적용에 관한 연구를 수행	외부Prestressed강철막대를 사용하여 연속 콘크리트 보의 전단 강화
	GRL 친환경 에너지 나노소재	고분자 물질의 합성-구조-성질의 상관성을 규명하는 연구에서부터 다성분계 고분자계 및 생체고분자에 대한 이론과 컴퓨터 시뮬레이션 연구	태양광 흡수를 위한 낮은 에너지 밴드갭 전도성 고분자의 설계 및 합성
	Nano & Smart Composite Materials	나노 및 스마트 복합 소재의 적용에 관한 연구를 수행	탄소나노섬유의제조방법및이로부터형성된제조방법
	나노구조형 에코,에너지재료	차세대 에너지 동력원 신소재인 신개념 청정 에너지재료에 대한 연구와 개발	유기화제가 제거된 박리형 클레이 나노 미립자-고분자 복합 재료의 분석방법
	세라믹금속복합재료	내화물 재료 관련 연구	탄소 함량이 (Ti0.7W0.3) C-Ni 서멧의 미세 구조 및 특성에 미치는 영향
	Smart Structures & Design	축소 시스템 분석, 복합 구조 해석, 형상 기억 합금 분석, 나노 연속체 기술 연구	구조물의 탄성 거동 예측 나노 입자의 크기효과와 체적분율 효과를 동시 고려한 나노복합재의 멀티스케일 브리징 해석기법에 관한 연구
고려대학교	에너지재료	기후변화 대비, 고효율 에너지 저장/변환 시스템에 적용 가능한 다양한 재료와 공정기술을 개발 및 연구	MnS/카본나노튜브 복합체의 합성과 리튬 전기화학적 거동
	합성구조	고강도강의구조성능등의고성능 건축재료에기반을둔구조엔지니어링연구	하이브리드 비좌굴가새를 이용한 고층건물의 사용성 평가
	고성능 콘크리트 및 FRP 구조	고장력 철근을 활용한 구조부재의 휨 및 전단특성, 스트럿 타이 모델을 적용한 전단해석 연구	강섬유 및 FRP sheet로 보강한 2방향 RC 슬래브의 고속 충격 저항성능에 대한 해석적 평가

대학	연구실	연구실 소개	주요연구성과
연세대학교	콘크리트 구조공학	콘크리트재료 및 구조분야와 공학 분야, 특수분야로 구성 콘크리트재료 및 구조분야에서 황토 및 재활용 PET 섬유등과 같은 친환경 재료와 target-oriented된 재료개발을 바탕으로 한 구조성능평가 및 적용과 신교량 system의 개발 등을 중심으로 연구	친환경 및 저에너지 소모재료 개발과 폭발, 충돌 및 극한하중을 대비한 구조시스템 개발
성균관대학교	스마트구조 및 건설 IT	스마트 건설 IT 연구소의 연구 초점. 건설-IT 융합 설계 컨셉에 대한 강조와 함께 스마트 센서, 토목 및 건축 시스템, 정보 기술 융합을 통합 새로운 건설재료 신기술을 개발	초고층 빌딩 고속 승강기 추락 사고 예방을 위한 마그네틱 센싱 기반의 재난 대응형 안전진단 시스템 개발
카이스트	건설재료	공학재료의 정확한 특성파악을 위한 새로운 특성예측모델 개발 및 첨단 복합재료를 활용한 사회 기반구조물의 거동해석 등의 연구	섬유보강 경량기포콘크리트 및 전자파제어 콘크리트 개발
UNIST	다기능재료	정량시험법에 기초한 다기능 재료의 나노기술/ 나노다공성 금 기반 에너지 소재기술	다기능 재료로 사용할 수 있는 기초기술 개발
한양대학교	첨단융합구조	나노 건설재료 및 융합기술 연구	진보나노건설재료 연구 건설 관련 진보융합기술 연구
	지능형 건설기술	첨단 복합재료를 활용한 신기술 연구	엠보텍을 이용한 방수 신공법 연구

* 출처:기계·건설공학연구정보센터,건설공학(건축,토목)전공관련연구실(2017)

2.2 연구기관 현황

가. 하이퍼 나노 콘크리트 연구개발을 위한 국내의 연구기관

〈표 III-47〉 하이퍼 나노 콘크리트 관련 연구기관 및 연구분야

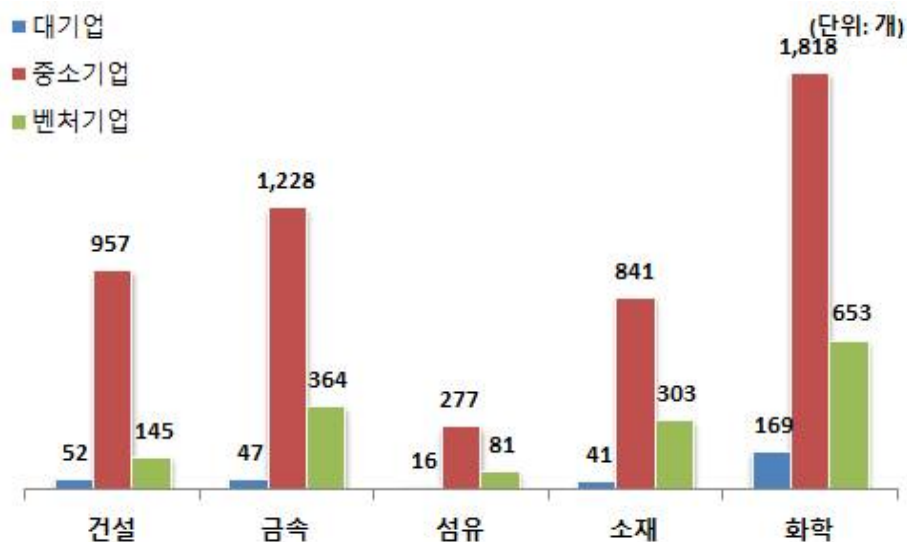
구분	기관명	기관소개	관련 사업 분야
공공기관 (정부출연 연구기관)	한국건설 기술연구원	구조·도로·지반·수자원·건설 환경·건축·화재 설비 연구, 건설 품질 관리 및 인증, 디지털 건설 정보 구축 및 보급 등의 활동을 통해 건설 기술을 종합적으로 개발하는 정부출연기관	- 고성능 건설자재 기술 연구개발 - 건설공사 및 건설 기자재의 품질 인증, 검사 및 시험
	한국생산 기술연구원	기술 경쟁력 강화 및 미래시장 선정을 위해 꼭 필요한 뿌리산업기술, 청정생산시스템기술, 융·복합생산기술 및 핵심원천기술 개발 및 실용화 기술 지원 정부출연기관	- 주조, 금형, 소성가공, 용접, 열처리, 표면처리 6대 뿌리기술은 원료를 소재로, 소재를 부품으로 가공하는데 꼭 필요한 핵심 공정기술 개발
	고등기술 연구원	청정소재공정팀, 융합소재공정팀 및 기능소재연구팀으로 구성되어 있으며, 금속/세라믹 등 유무기 소재와 에너지/환경 분야에 요구되는 부품 소재, 그리고 유가자원의 재활용 공정 및 소재화를 연구 정부출연기관	- 비철금속과 세라믹, 이차전지, 구조용 기능재료 및 유기물 재활용 기술과 함께 청정생산 및 지속가능 생산기술을 기반으로 한 실증화 및 사업화 연구
	재료 연구소	재료연구소는 소재기술과 관련한 분야의 연구개발, 시험평가, 기술지원 종합적으로 수행하여 국가기술혁신을 선도하고 산업발전에 기여하기 위해 설립된 소재전문 정부 출연기관	- 다양한 합금 설계 및 핵심 소재 부품 개발 - 구조/기능 금속 및 스마트 복합재 연구
기타기관	나노 종합기술원	인프라 역량강화를 위한 공정고도화 사업, 나노 오픈이노베이션 협력 사업, 선행공정 플랫폼 기술 연구 개발 지원 사업, 전문인력양성사업 등 다양한 지원 사업을 통해 나노분야 연구	- 나노융합 신산업 창출을 위한 공정·응용 연구개발 지원 - 나노기술관련 연구개발 시설 장비의 공동·활용 지원
	포항산업 과학연구원	금속소재, ES소재, 소재이용, 티타늄상용화, 니켈제련, 연료전지, 전지소재신공정, 신제련, 리튬추출 소재기술개발 연구	- 재료·공정연구소는 경량금속소재, 배터리소재 그리고 티타늄 등의 항공우주소재까지 미래산업의 주축이 되는 소재기술개발

2.3 산업체(기업체) 현황

가. 하이퍼 나노 콘크리트 관련 연구지원이 가능한 국내 산업체 기술연구소

■ 하이퍼 나노 콘크리트 관련 산업 분야 관련 연구지원 가능 기업을 업종 및 기업유형 따라 도출

● 한국 산업 기술 진흥 협회 연구소·전담부서 검색 (건설, 금속, 소재, 화학)



<그림 III-19> 스마트 건설재료 연구지원 가능 주요기업 현황

■ 하이퍼 나노 콘크리트 연구지원 가능 주요 기업 현황을 보면 중소기업이 5,121개로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 벤처기업이 1,546개로 뒤를 잇고 있음

● 중소기업의 업종별 비중을 살펴보면 화학(35.5%), 금속(24.0%), 건설(18.7%), 소재(16.4%), 섬유(5.4%) 순

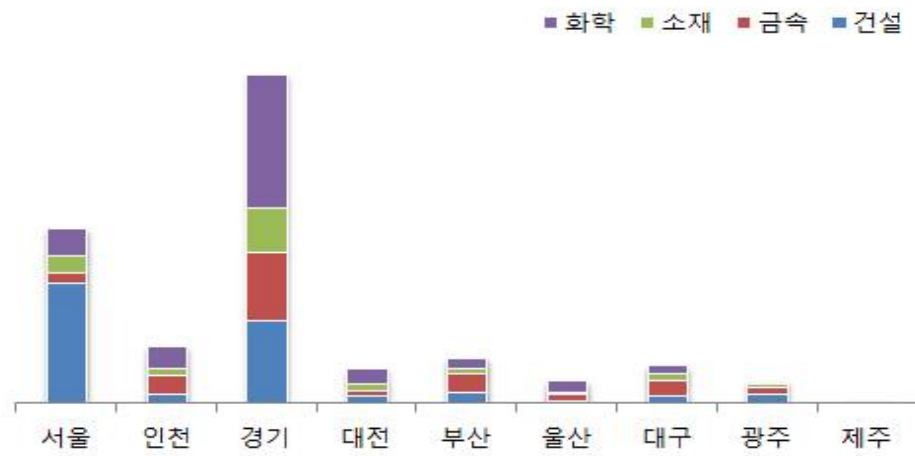
● 새로운 건설재료를 개발하기 위해서 섬유분야에 대한 지원이 필요해 보임

〈표 Ⅲ-48〉 하이퍼 나노 콘크리트 연구지원 가능 주요 기업 현황

구분	대기업(개)	중소기업(개)	벤처기업(개)
건설	52	957	145
금속	47	1228	364
섬유	16	277	81
소재	41	841	303
화학	169	1818	653
계	325	5,121	1,546

〈표 Ⅲ-49〉 하이퍼 나노 콘크리트 연구지원 가능 기업 지역별 현황

구분	건설(개)	금속(개)	소재(개)	화학(개)	전체(개)
서울특별시	912	71	132	203	1,318
인천광역시	75	133	59	162	429
경기도	629	508	336	1,007	2,480
대전광역시	64	35	45	123	267
세종특별자치시	8	6	9	21	44
충청남도	35	107	69	181	392
충청북도	68	59	66	220	413
강원도	37	9	20	41	107
부산광역시	88	136	45	79	348
울산광역시	27	46	15	86	174
경상남도	70	213	67	140	490
대구광역시	59	123	48	59	289
경상북도	55	174	77	128	434
광주광역시	69	56	23	18	166
전라남도	49	39	29	54	171
전라북도	77	56	35	75	243
제주특별자치도	14	0	0	7	21
기타	0	0	0	6	6



〈그림 Ⅲ-20〉 스마트 건설재료 관련 분야 기업의 지역별 현황

■ 산업체(기업체) 중 하이퍼 나노 콘크리트 관련 연구지원이 가능한 기업을 업종별로 분류 (건설, 금속, 소재, 화학)하여 기업부설연구소를 보유한 기업 조사

〈표 III-50〉 업종별 연구지원 가능 주요 기업(건설)

업종	기업명	연구소명	기업명	연구소명
건설	계룡건설산업(주)	(주)기술연구소	에스에이치공사	에스에이치공사 도시연구소
	극동건설(주)	극동건설 기술연구소	이수건설(주)	이수건설 (주) 기술연구소
	금호산업(주)	(주)건설기술 연구소	(주)이테크건설	(주)이테크건설 기술연구소
	대림산업(주)	용인기술개발원	지에스건설(주)	지에스건설(주) 기술연구소
	대림산업(주)	서울기술개발원	(주)케이씨씨건설	KCC건설기술연구소
	(주)대우건설	(주)대우건설 기술연구원	코오롱글로벌(주)	코오롱글로벌 R&BD CENTER
	대우조선해양건설(주)	대우조선해양건설 (주)건설기술연구소	(주)태영건설	(주)태영건설 기술연구소
	동부건설(주)	동부건설(주) 기술연구소	(주)포스코건설	(주)포스코건설 R&D CENTER
	동아건설산업(주)	동아건설산업(주) 기술연구소		(주)포스코건설 R&D CENTER
	(주)동아지질	(주)동아지질 기술연구소		포스코엔지니어링 부설 기술연구소
	두산건설(주)	두산건설(주) 기술연구소	(주)한국가스 기술공사	(주)한국가스기술 공사 기술연구소
	롯데건설(주)	롯데건설(주) 기술연구원	(주)한라	(주)한라기술연구소
	벽산건설(주)	벽산건설(주) 기술연구소	한신공영(주)	한신공영 (주)기술연구소
	벽산엔지니어링(주)	벽산엔지니어링 기술개발연구소	(주)한화건설	(주)한화건설 환경연구소
	삼보이엔씨(주)	삼보이엔씨(주) 기술연구소	현대건설(주)	현대건설 (주) 연구개발본부
	삼환기업(주)	삼환건설기술연구소	현대산업개발(주)	현대산업개발 (주)기술연구소
	(주)성도이엔지	(주)성도이엔지 기업부설연구소	현대알루미늄(주)	현대알루미늄 (주) 기술연구소
	신동아건설(주)	신동아건설 (주) 기술연구소	화성산업(주)	화성산업 기술연구소
	신세계건설(주)	신세계건설 (주) 기술연구소	쌍용건설(주)	쌍용건설기술연구소

〈표 III-51〉 업종별 연구지원 가능 주요 기업(금속)

업종	기업명	연구소명	기업명	연구소명
금속	희성피엠텍(주)	희성피엠텍(주) 기술연구소	(주)알루코	(주)알루코 연구소
	가온전선(주)	가온전선(주) 기술연구소	(주)에스제이엠	에스제이엠 기술연구소
	강산건설(주)	강산건설(주) 기술개발연구소	(주)영풍1	영풍 기술연구소
	(주)고강알루미늄	(주)고강알루미늄 기술연구소	(주)오리엔탈정공	(주)오리엔탈정공 기술연구소
	고려아연(주)	고려아연(주) 기술연구소	(주)와이지-원	(주)와이지-원 충주기술연구소
	고려제강(주)	고려제강(주) 중앙기술연구소	(주)와이지-원	(주)와이지-원 중앙기술연구소
	(주)남선알미늄	남선알미늄 기술연구소	우진일렉트로나이트(주)	우진일렉트로나이트 (주)기술연구소
	(주)남선알미늄	(주)남선알미늄 자동차사업부문 기술연구소	이화다이아몬드공업(주)	이화다이아몬드공업 기술연구소
	남양금속(주)	남양금속(주) 기술연구소	인지컨트롤스(주)	인지컨트롤스(주) 부설연구소
	(유)대구텍	R&D CENTER	자일대우버스(주)	자일대우버스(주) 기술연구소
	(주)대유글로벌	(주)대유글로벌 기술연구소	(주)진합	(주)진합 기술연구소
	(주)대유신소재	(주)대유플러스 부설연구소	(주)칼링크	(주)칼링크 R&D CENTER
	(주)대유신소재	(주)대유신소재 기술연구소	(주)태평양금속	(주)태평양금속 기술연구소
	동국제강(주)	동국제강(주)중앙 기술연구소	(주)풍산홀딩스	(주)풍산홀딩스 기술연구소
	동부제철(주)	동부제철(주) 기술연구소	한국철강(주)	한국철강(주) 에너지연구소
	롯데알미늄(주)	롯데기공 연구소	한라스택폴(주)	한라스택폴(주)R&D Center
	롯데알미늄(주)	롯데알미늄(주)연구소	현대종합금속(주)	현대종합금속 기술연구소
	(주)세아베스틸	(주)세아베스틸 기술연구소	(주)휴스틸	(주)휴스틸 기술연구소
	(주)세아에샵	(주)세아에샵 용접기술연구소	희성금속(주)	희성금속(주)연구소

〈표 III-52〉 분야별 연구지원 가능 주요 기업(소재)

업종	기업명	연구소명	기업명	연구소명
소재	대림비앤코(주)	대림비앤코(주) CREATIVE본부	코닝정밀소재(주)	코닝정밀소재(주) 제조기술센터
	도레이배터리세퍼레이터필름 한국(유)	도레이배터리세퍼레이터필름 한국(유) 기술연구소	코닝정밀소재(주)	코닝정밀소재(주) 연구소
	동우화인켐(주)	동우화인켐(주)연구기술 본부 R&D CENTER	코리아오토글라스(주)	KAC 기술연구소
	동화기업(주)	동화기업(주) R&D 센터	(주)코오롱인더스트리(주)	코오롱 중앙기술원(구미)
	두모전자(주)	두모전자주식회사 기업부설연구소	(주)코오롱인더스트리(주)	코오롱인더스트리 (주)중앙기술원
	디케이아즈텍(주)	디케이아즈텍 부설연구소	(주)코오롱인더스트리(주)	코오롱 중앙기술원(용인)
	삼광글라스(주)	삼광글라스(주) SG연구소	(주)포스코캠텍	(주)포스코캠텍 기술연구소
	삼박엘에프티(주)	삼박엘에프티(주) 기술연구소	포스하이알(주)	포스하이알(주) 기술연구소
	삼성코닝어드밴스드 글라스(유)	삼성코닝어드밴스드 글라스(유) 연구소	(주)풍산	(주)풍산 소재기술연구원
	성신양회(주)	성신양회(주) 기술연구소	(주)풍산	(주)풍산 기술연구원
	(주)세아창원특수강	(주)세아창원특수강 기술연구소	(주)풍산	(주)풍산 기술연구소
	쌍용양회공업(주)	쌍용 기술연구소	(주)피앤티	(주)피앤티 중앙연구소
	아세아시멘트(주)	아세아시멘트(주) 기술연구소	한국다우코닝(주)	한국다우코닝 기술연구소
	아이에스동서(주)	아이에스동서(주) 신소재연구소	한국유리공업(주)	한국유리 기술연구소
	아이에스동서(주)	아이에스동서(주) 기술연구소	(주)한국카본	(주)한국카본 연구소
	아이에스동서(주)	아이에스동서(주) INUS 사업총괄 기술연구소	한라엔컴(ENCOM) (주)	한라엔컴(ENCOM) (주) R&D Center
	일진다이아몬드(주)	일진 산업기술연구소	한일시멘트(주)	한일시멘트 (주)테크니컬센터
	(주)제네웰	(주)제네웰 연구소	(주)화인테크	(주)화인테크 기업부설연구소
	조선내화(주)	조선내화(주) 기업부설연구소	GS이엠(주)	GS이엠 (주)기술연구소

〈표 III -53〉 업종별 연구지원 가능 주요 기업(화학)

업종	기업명	연구소명	기업명	연구소명
화학	금호석유화학(주)	금호석유화학(주) 중앙연구소	엘지엠에이(주)	엘지엠에이(주) 기술연구소
	(주)엘지화학	엘지화학 기술연구원	(주)엘지화학	(주)엘지화학 기초소재연구소(여수)
	강남제비스코(주)	강남제비스코 기술연구소	(주)에스코	(주)에스코 기술연구소
	강남화성(주)	강남화성(주) 기술연구소	(주)케이씨씨	(주)케이씨씨 울산기술연구소
	금호미쓰이화학(주)	금호미쓰이화학 응용연구소	(주)케이씨씨	(주)케이씨씨 전주기술연구소
	(주)단석산업	(주)단석산업 부설 기술연구소	(주)케이씨씨	(주)케이씨씨 중앙연구소 여주분소
	(주)대명화학	(주)대명화학 부설연구소	(주)케이씨씨	(주)케이씨씨 중앙연구소
	대성산업가스(주)	대성 초저온연구소	(주)케이씨씨	(주)케이씨씨 대죽기술연구소
	대웅바이오(주)	대웅바이오(주) 연구소	지에스칼텍스(주)	지에스칼텍스(주) 중앙기술연구소
	대한유화(주)	대한유화 기술연구소	한미정밀화학(주)	한미정밀화학 부설연구소
	도레이첨단소재(주)	도레이첨단소재(주)기술 연구소	(주)한화	(주)한화 항공우주연구소
	도레이첨단소재(주)	도레이첨단소재(주)첨단 재료연구센터	(주)한화	(주)한화 종합연구소
	동양시멘트(주)	동양시멘트(주) 기술연구소	(주)한화	(주)한화 종합연구소/판교
	(주)디티알	(주)디티알 기술연구소	(주)한화	(주)한화 신관해중연구센터
	롯데정밀화학(주)	롯데정밀화학(주) R&D센터 인천연구소	(주)한화	(주)한화/기계 중앙연구소
	(주)롯데첨단소재	(주)롯데첨단소재 여수연구소	(주)한화	(주)한화 마닝서비스기술 연구소(MSTI)
	(주)롯데첨단소재	롯데첨단소재(주) 기업부설연구소	한화첨단소재(주)	한화첨단소재(주) 경량복합소재연구소
	에스케이씨(SK)(주)	에스케이씨(SK)(주)첨단 기술중앙연구소	한화케미칼(주)	한화케미칼 (주)중앙연구소
	에스케이케미칼(주)	에스케이케미칼(주) 울산연구소	현대EP(주)	현대EP (주)기술연구소

3. 연구 장비 및 실험시설 인프라

3.1 국내 연구장비 인프라

가. 연구 장비 분류별 구축현황

〈표 III-54〉 연구 장비 분류별 구축현황

연구 장비 분류	연구장비수(점)	비율(%)
광학/전자 영상장비	10,809	28.53
화합물 전처리/분석장비	6,526	17.22
기계 가공 시험장비	10,534	27.8
전기/전자 장비	5,117	13.5
데이터 처리장치	2,353	6.21
물리적 측정장치	2,554	6.74

* 출처 : 2015년도 국가연구시설장비 조사분석 보고서

나. 연구 장비 지역별 구축현황

〈표 III-55〉 연구 장비 지역별 구축현황

광역경제권	지역	금액(억원)	비율(%)
수도권	서울	501	4.1
	인천	998	7.2
	경기	701	5.8
충청권	대전	1,626	11.4
	충남	159	1.3
	충북	332	2.7
	세종	8	0.1
호남권	광주	293	2.4
	전남	439	3.3
	전북	511	3.2
대경권	대구	682	5.3
	경북	4,617	35.1
동남권	부산	168	1.2
	울산	418	3.2
	경남	560	4.6
강원권	강원	74	8.5
제주권	제주	33	0.6
합계		12,120	100



* 출처 : 2015년도 국가연구시설장비 조사분석 보고서

3.2 국내 연구 실험시설 인프라

가. 하이퍼 나노 콘크리트 관련된 국내 실험기관

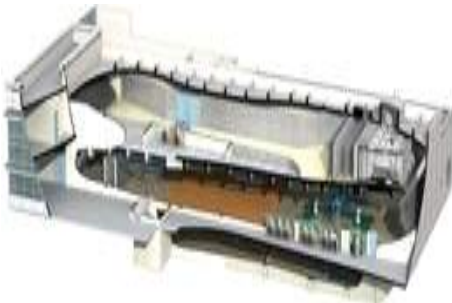
〈표 III-56〉 연구 실험시설 구축현황

운영기관	실험시설명	장소
서울대학교	극한상태 구조특성 실험시설	서울
전북대	대형풍동실험센터	전북 전주
한국토지주택연구원	생활밀착형 주택성능품질 실험시설	세종시
한국건설기술연구원	기상환경 재현도로성능평가실험시설	경기도 연천
명지대	하이브리드 구조실험센터	경기도 용인
한국건설환경시험연구원	기후변화 대응 다환경 실험시설	충북 진천
KAIST	지오센트리퓨지실험센터	대전
부산대학교	지진방재연구센터	경남양산
계명대	첨단건설재료실험센터	대구
한국건설환경시험연구원	종합화재시험동, 건축열환경시험동, 종합음환경 시험동	충북청원
한국건설기술연구원	도로연구소, 구조융합연구소, 건축도시연구소, 화재안전연구소,	경기도고양
전남산업 진흥원	나노바이오 연구센터	전남
전북나노기술집적센터	전북나노기술집적센터	전북전주시
나노융합기술원	나노융합기술원	경상북도 포항
대전광역시	대전테크노파크	대전
대구광역시	대구테크노파크	대구
울산광역시	울산테크노파크	울산
한국나노기술원	한국나노기술원	경기도 수원시
나노종합기술원	나노종합기술원	대전유성구

■ 극한상태 구조특성 실험시설

구분	내 용
위치/운영기관	서울특별시 관악구 / 서울대학교
규모	부지면적 : 5,194 m ²
주요실험시설	자유낙하실험시설, 초고속충돌실험시설, 고속충돌실험시설, 중속충돌실험시설, 급속재하 실험시설, 극한온도 실험시설
주요활용분야	- 극한상태 성능의 향상을 위한 새로운 재료의 개발 - 해석이론 및 설계기준의 정립 - 효율적인 구조시스템의 개발
실험시설	

■ 대형풍동실험센터

구분	내 용
위치/운영기관	전라북도 전주시 / 전북대학교
규모	부지면적 : 4,443m ²
주요실험시설	대형풍동 저속시험부, 대형풍동 고속시험부, 소형풍동
주요활용분야	- 초고층 주상복합 건물의 내풍 안정성 평가 풍동실험 - 남서해안 지역의 해상 교량에 대한 내풍 안정성 확보를 위한 풍동실험 - 지하철 등과 같은 지하구조물 환기/배기, 유독 물질 확산, 환경 오염 물질 확산 등과 같은 방재분야 검토 풍동실험 - 도시의 오염물질 확산, 국부지형의 영향평가 (직경 8km 도시공간의 축소 시험) 교량 및 산업설비 내풍 안전성 평가
실험시설	

■ 생활밀착형 주택성능품질 실험시설

구분	내 용
위치/운영기관	세종특별자치시 / 토지주택연구원
규모	부지면적 : 19,685㎡
주요 실험시설	소형챔버 실험실, 대형챔버 실험실, 흡착·흡방습 실험실, 정밀분석 실험실, 미생물 실험실, 냄새 실험실, 환기성능 실험실, 결로실험실, 실증 공동주택, 바닥충격음 실험실, 급배수소음 실험실, 외부소음 실험실, 기류발생 및 제어실, 모니터링실등
주요활용분야	- 층간소음 및 생활소음에 대한 성능평가 - 주택성능품질(공기환경 및 결로)과 관련된 요소기술 성능 평가 - 실물크기의 단위세대를 대상으로 환기 성능 및 외피 기밀성능평가
실험시설	

■ 기상환경 재현도로성능평가실험시설

구분	내 용
위치/운영기관	경기도 연천군 / 한국건설기술연구원
규모	부지면적 : 692,334㎡
주요실험시설	포장가속설비, 실내외 포장가속 실험시설, 강우/강설 실험시설, 안개/야간 실험시설, 평지부 충돌 실험시설, 성토부 충돌 실험시설
주요활용분야	- 도로안전시설의 성능 규격 기준 검토 및 기준 정립 - 도로안전시설에 대한 설치기준 및 정책 수립 지원 - 도로시설물에 대한 개발 촉진 및 인증 시험 - 첨단 기술을 접목하여 다양한 첨단 차량 성능 평가 - 교통사고 원인 분석 및 개선 대책 수립 지원
실험시설	

■ 하이브리드 구조실험센터

구분	내 용
위치/운영기관	경기도 용인시 / 명지대학교
규모	부지면적 : 1,678m ²
주요실험시설	대형 구조실험동, 소형구조실험동, 연구동 반력구조물, 로딩프레임, 유압가력기, 만능재료시험기
주요활용분야	- 금속재료 인장분야 국제공인시험기관(KOLAS) - 건설 분야 및 철강, 조선, 원자력, 기계분야 등 다양한 분야의 구조실험 - 하이브리드실험 및 연구 - 구조실험관련 컨설팅
실험시설	

■ 기후변화 대응 다환경 실험시설

구분	내 용
위치/운영기관	충청북도 진천군 / 한국건설생활환경시험연구원
규모	부지면적 : 9,369m ²
주요실험시설	대/중/소 기후환경 실험시설, 120m 개방형 고층타워 실험시설, 특정성능평가실험시설 등
주요활용분야	- 건축물 내외장재/에너지효율 성능평가 - 건축물 규모 건축환경 성능평가 - 신재생에너지 실험평가 - 건축물 배관/덕트 설비 성능평가 - 고성능콘크리트 압송 성능평가 - 인공기후 시뮬레이션
실험시설	

지오센트리퓨지실험센터

구분	내 용
위치/운영기관	대전광역시 유성구 / KAIST
규모	부지면적 : 9,369m ²
주요실험시설	지오센트리퓨지 챔버, 모델제작실, 지오센트리퓨지 제어실, 지오센트리퓨지, 4자유도-인플라이트로봇, 진동대
주요활용분야	- 인위적으로 중력가속도를 부여함으로써 실제 지반의 축적 및 응력상태 재현 - 지반심도 100m 이상에 상응하는 응력상태 모사가능 - 센트리퓨지 구동 중 지진 및 동적하중 시뮬레이션 - 지하공간 굴착 및 시공기술 (4자유도-인플라이트 로봇) - 간척사업 침하예측 및 연약지반 개량 실험
실험시설	

지진방재연구센터

구분	내 용
위치/운영기관	경상남도 양산시 / 부산대학교
규모	부지면적 : 10,200m ²
주요실험시설	고정식 6DOF 진동대, 이동식 3DOF 진동대, 액추에이터(500kN,1,000kN), 반력 프레임, Dynamic UTM, 공진주/ 비틀전단 시험기, 반복단순전단 시험기, 토조박스
주요활용분야	- 진동 분야 국제공인시험기관(KOLAS) - 원자력 발전소, 장대교량, 초고층 건물, LNG저장탱크 등의 내진 안전성 검토 - 교량구조물의 실시간 내진실험 - 초고층 건축물의 실시간 내진실험 - 지반액상화 실시간 내진실험 - 원전기기 및 위험산업기기의 내진성능 검증실험 - 조선, 기계, 전기, 전자, 철도부품 진동내구성 실험 - 자연재해 저감기술 개발을 위한 내진성능 실험
실험시설	

■ 첨단건설재료실험센터

구분	내 용
위치/운영기관	대구광역시 달서구 / 계명대학교
규모	부지면적 : 6,600m ²
주요실험시설	대형재료실험실, 미세구조분석실, 콘크리트/암석실험실, 장기거동실험실, 센서/비파괴실험실, 강재/복합재료실험실, 구조실험실, 대형구조재료시험기, 압축시험기, 피로시험기, 항온항습기, 크리프시험기, 동해용해시험기
주요활용분야	- 금속, 시멘트, 골재, 건설 및 전자재 관련 분야 국제공인시험기관(KOLAS) - 실물크기의 구조재료시험, 구조부재 및 콘크리트, 암석포장재료의 성능평가 - 강재와 복합재료의 구조성능평가, 건설재료의 온도 및 환경적 영향평가 - 첨단 건설재료의 미세구조분석, 광섬유센터와 건설재료의 비파괴 시험
실험시설	

■ 한국건설환경시험연구원

구분	내 용
위치/운영기관	충북청원 / 한국건설생활시험연구원
주요실험시설	종합 화재 시험동 방화문, 방화셔터, 승강기 방화문 등의 내화시험, 방화문, 방화셔터, 승강기 방화문 등의 내화시험, 건축물 내부 마감 재료의 난연 성능, 바닥재의 화재안전 평가, 건축용 복합 패널의 화재안전평가 건축 열 환경 시험동 바닥 난방 성능 평가실, 종합 내구 성능 평가실, 열 환경 성능 평가실, 친환경 성능 평가실 종합음환경 시험동 차음성능시험실, 잔향실, 물성시험실
주요활용분야	- 건축자재, 토목 관련 제품, 생활·환경, 물류, 의료기기, 녹색산업 등 대한 시험·평가·인증과 연구 개발 등을 효율적으로 수행하고, 국내산업의 기술고도화
실험시설	  

실험시설

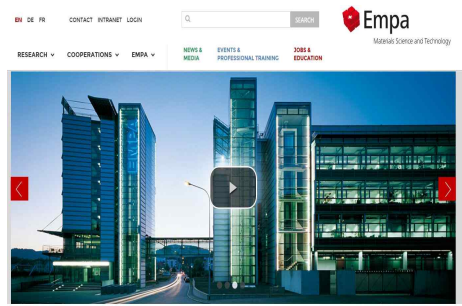
3.3 해외 연구 장비 및 실험시설 인프라

가. 유럽

■ 스위스 연방 재료 과학 기술연구소(EMPA)

구분	내 용
개요	재료과학기술개발을 위한 국가연구기관으로 과학과 기술 분야의 연구, 기술보급 및 정보의 배포 등 기능을 수행하는 과학 기술연구개발 기관
중점 연구분야	- Nanostructured Materials, Sustainable Built Environment - Natural Resources & Pollutants, Energy
장비시설	3D bioplotter, X-ray(CT, XRD, SAXS, XPCI 등), Image Analysis Platform(acronym epA), Microscopy(EDS, ESEM, WDS, AFM, SEM, STM등), spectroscopy, Universal testing machine, Hardness test instrument, Clean Room(Maskless UV lithography system, Electron beam lithography system 등), agitators, Compression & Tensile testing machines, Creep testing machine 등

* 출처: <https://www.empa.ch/web/empa>



■ 독일 연방물질 연구소 (BAM)

구분	내 용
개요	MPA/CTR 기계적.화학적 재료시험을 위한 연방연구소(BAM)로서 기계적.화학적 재료 시험을 위한 공적 재료시험과제의 역할 수행기관
중점 연구분야	화학 및 재료공학의 안전성과 신뢰성의 지속적인 발전 기준방법 및 물질제공을 포함하는 재료 및 공장의 물리.화학적 검사 안전기준 및 한계치의 결정과 같은 법적 규제의 개발관련 공동업무 재료공학 및 화학에 대해서 연방정부, 경제, 국내외 기관에게 안전상담
장비시설	Metallography laboratory, 2 scanning electron microscopes(EDX, EBSD), microscope(STEM, scanning ultrasonic), Corrosion test facilities, microprobe, Servohydraulic and electromechanical/ tension/torsion test machines, Microtension/ pressure test facilities, Laboratory X-ray facilities, Smelting and sintering facilities, ultrasonic spectrometer, gas pycnometer, dilatometer, profilometer, spectrometer 등

* 출처: <https://www.bam.de/Navigat ion/DE/Home/home.html>



독일 막스 플랑크 연구소 (Max-Planck)

구분	내 용
개요	막스-플랑크-연구소는 기초과학 연구분야를 위한 연구소입니다. 막스-플랑크연구소는 생물학과 자연과학뿐만 아니라 의학 및 예술과 인문학에 이르는 광범위한 분야의 연구
중점 연구분야	나노 기술 전략을 통한, 기후, 에너지, 환경, 이동성, 통신 등 사회적으로 중요한 분야에서 공학 연구개발
장비시설	maging platforms, fire tunnels, laser platforms, test beds(mechanical test beds, rotating machines, tribology), wave basins and towing tanks, solar furnaces, the French National Network of Large Technological Facilities



* 출처: <https://www.mpg.de/en>

프랑스 국립과학연구센터 (CNRS)

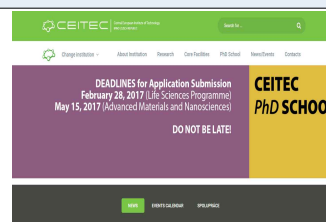
구분	내 용
개요	CNRS는 프랑스의 중요 다학제적 연구기관으로 사회과학기술 분야의 지식을 발전시키고 사회, 경제 및 문화적 영향을 미치는 모든 연구에 대한 집합적 연구를 수행하는 기관
중점 연구분야	수학, 물리, 정보통신기술과학, 핵물리, 우주지구과학, 화학, 생명과학, 인문사회과학, 환경과학, 공학과학을 포함하는 모든 과학기술사회분야
장비시설	supersonic and hypersonic wind tunnels, anechoic chambers for acoustics and electromagnetic compatibility(EMC), imaging platforms, fire tunnels, laser platforms, test beds(mechanical test beds, rotating machines, tribology), wave basins and towing tanks, solar furnaces, the French National Network of Large Technological Facilities



* 출처: <http://www.cnrs.fr/index.php>

체코 중앙유럽과학연구소 (CEITEC)

구분	내 용
개요	CEITEC은 생명과학, 신소재, 기술을 개발하는 과학 센터로 기초응용에 대한 전반적인 연구를 수행
중점 연구분야	고급 나노기술·마이크로기술, 신소재, 구조생물학, 식물 유전체학·단백질체학, 분자의학, 뇌·정신 분야 연구, 분자 수의학
장비시설	Biomolecular characterization and interaction(Analytical ultracentrifugation, Circular dichroism spectroscopy 등), Biomolecular crystalization(Automated storage and visual inspection, Robotics for protein crystallization 등), X-ray Diffraction and Bio-SAXS Core Facility, Nanobiotechnology Core Facility(microscopy, goniometer 등), Spectrometer, Electron microscope(SEM/FIB), Electrophoretic Chamber 등



* 출처: <https://www.ceitec.eu/>

나. 아시아

■ 물질재료 연구소 (NIMS)

구분	내 용
개요	미래를 위한 재료연구라는 주제와 함께 재료는 유기 / 고분자 재료 및 무기 재료와 같은 두 가지 주요 범주로 분류되며, 무기 재료는 금속과 세라믹 연구 수행
중점 연구분야	탄소복합재료, 저온 초전도 와이어 재료, 녹색 재활용 프로세스
장비시설	Materials Manufacturing and Engineering Station(vacuum induction furnace, melting furnace, rolling&swaging machine 등), Materials Analysis Station (Spectrometer 등), Transmission Electron Microscopy Station(electron microscope, Dual Beam system 등), Synchrotron X-ray Station(Spectrometer, diffractometer 등), High Magnetic Field Station(Magnet, NMR 등), Micro-structural Characterization Platform(Microscope, X-ray CT 등), Nano-fabrication Platform(Evaporator, sputtering&lithography system 등), Molecules and Materials Synthesis Platform(LC/MS/MS, spectropolarimeter 등), Battery Research Platform(Super-Dry Room, Compact SEM, FTIR 등)



* 출처: <http://www.nims.go.jp/eng/>

● 방재과학기술 연구소 (NIED)

구분	내 용
개요	방재 과학기술 수준의 향상을 도모하기 위하여 방재 과학기술에 관한 기초 연구 및 기반 연구 개발 등의 업무를 수행
중점 연구분야	재해 모니터링과 예측 연구, 재해 경감 연구, 재해 예방 통합 연구
장비시설	Large-scale earthquake simulator, Large-scale rainfall simulator, Cryospheric environment simulator, 3D Full-scale earthquake testing facility

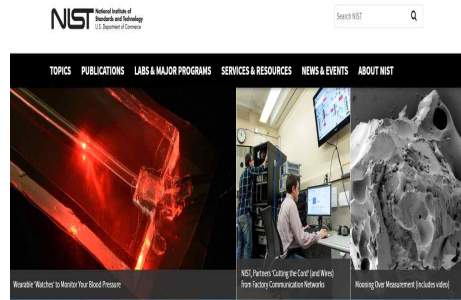


* 출처: <http://www.bosai.go.jp/e/>

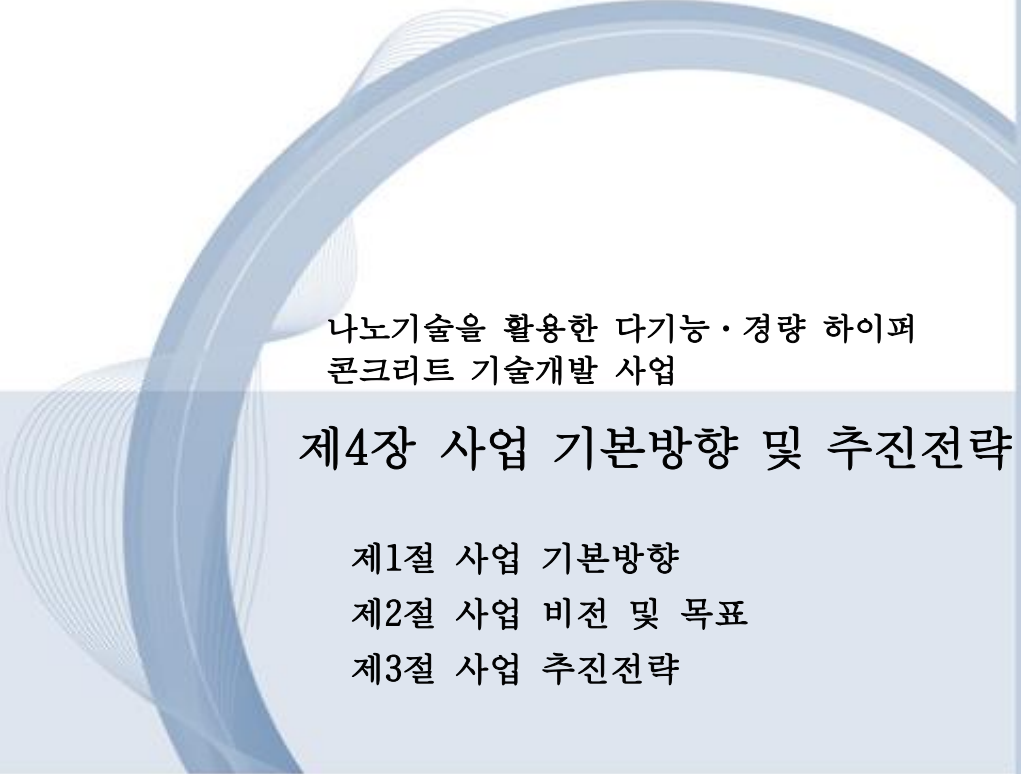
다. 미국

■ 국립표준기술 연구소

구분	내 용
개요	건설 분야의 품질과 생산성 높이기 위한 연구와 화재, 지진, 바람 등의 재해로 인한 인명·재산 손실을 줄이기 위한 연구 수행
중점 연구분야	나노기술 개발에 필요한 기본적 측정방법, 기구 및 표준에 대한 연구 재료의 측정 및 표준에 대한 기반연구. 특히 세라믹, 폴리머, 금속, 중성자특성 및 재료 신뢰성에 관한 뛰어난 기술은 마이크로일렉트로닉스, 자동차, 미국의 제조 능력을 향상시키기 위한 측정방법 및 표준 연구
장비시설	3D Atom Probe Tomography, Electron Microscope(FIB/SEM 등), Spectrometer, BMD transfer radiometer, Dynamic Light Scattering, Electron Microprobe, Centrifuge, EUV Detector Radiometry Beamline, spectroscopic ellipsometer, Glossmeter, Local Electrode Atom Probe Tomography, Microcalorimeter Detector, radiometer, Milling&Grinding&Polishing System, Profilometer, Evaporator, Etcher, Coater, Flip Chip Bonder, Aligner 등



* 출처: <https://www.nist.gov/>



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼
콘크리트 기술개발 사업

제4장 사업 기본방향 및 추진전략

제1절 사업 기본방향

제2절 사업 비전 및 목표

제3절 사업 추진전략

제4장 사업 기본방향 및 추진전략

제1절 사업 기본방향

1. SWOT 분석

1.1 강점 (Strength)

■ 고성능 구조재료 개발 관련 연구개발 경험을 보유하고 있음

- 초장대교량 사업단, 초고층빌딩 시공기술 연구단, 자기치유형 친환경 콘크리트 기술 개발, 압축강도 80~180MPa급 맞춤형 SUPER Concrete 재료 및 구조물 기술 개발 등 지속적인 연구 수행을 통하여 고성능 건설재료 기술개발 노하우를 축적하였음
- 슈퍼 건설재료 및 자재기술의 기술수준은 기초연구는 81.0%, 응용·개발연구는 84.5%로 선두그룹에 속하는 것으로 나타남 (자료: KISTEP, 2016년 기술수준평가, 2017)

■ 분산공유형 건설연구인프라 등 건설재료의 성능평가를 위한 다양한 실증 인프라를 보유하고 있음

- 분산공유형 건설연구인프라, 출연연, 기타 연구기관의 다양한 실험인프라가 존재함
- 슈퍼 건설재료 및 자재기술 관련 인프라 구축 수준은 기초연구가 83.8%, 응용·개발연구가 82.7%로 기술수준대비 상대적으로 인프라 구축 수준이 높음 자료: KISTEP, 2016년 기술수준평가, 2017)

■ 첨단소재 관련 산업 육성에 대한 정부의 적극적·지속적 투자로 세계 수준의 첨단소재 응용 기술을 확보하였음

- 첨단 소재기술의 응용·개발연구 수준은 79.8~80.8%로 선두그룹에 속함
- 나노·소재분야는 2014년 대비 기술수준이 가장 큰 폭으로 증가(2.8%p)하였음

〈표 IV-1〉 2016년 첨단 소재기술의 기초 및 응용·개발연구 수준

국가전략기술명	기초연구 수준		응용·개발연구 수준	
	기술 수준그룹	기술수준(%)	기술 수준그룹	기술수준(%)
93. 첨단 소재기술(기능성 유기소재)	추격	75.4	선도	80.5
94. 첨단 소재기술(친환경 바이오소재)	추격	79.2	추격	79.8
95. 첨단 소재기술(나노구조 제어 무가·탄소 소재)	추격	79.4	선도	80.8

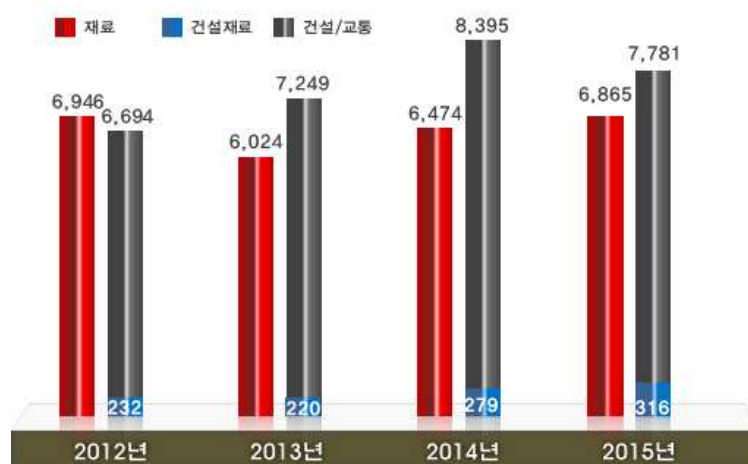
* 출처 : KISTEP, 2016년 기술수준평가, 2017

1.2 약점 (Weakness)

■ 구조재료 관련 정부 R&D의 투자규모는 미미한 수준임

- 구조재료 관련 정부 R&D 투자규모는 최근 4년간 꾸준히 증가하였으나, 건설교통 분야 및 소재 분야 대비 미미한 수준임
- '15년 기준 건설재료 관련 R&D 투자비는 건설교통 분야 대비 4.06%, 소재 분야 대비 4.60%에 불과함

(단위 : 억원)



* 출처 : NTIS

〈그림 IV-1〉 건설교통 및 재료 분야 대비 건설재료 분야 R&D 투자 현황

■ 정부 R&D 투자는 전통적 건설재료 기술개발에 편중되어 있음

- 콘크리트 재료 기술에 대한 투자 비중이 전체의 절반 가까이를 차지하며, 이 중 시멘트 복합재료 기술에 대한 투자 비중이 전체의 1/4 이상 차지하고 있음
- 국외에서는 첨단소재를 활용한 다양한 건설재료 기술 개발에 주로 투자하고 있는 것으로 나타남

■ 개별 기술단위의 소규모·단기 성과 위주의 건설재료 기술개발을 추진함

- 건설재료 특성 상 대규모·장기 투자가 필요하나 건설재료 기술개발은 대부분 소규모, 단발성 과제로 추진됨
- 건축 및 토목 시설물 구성기술 중 하나로 건설재료 기술개발을 추진함에 따라 과제별 연계성이 부족하고 유사·중복성이 발생함

〈표 IV-2〉 주요 콘크리트 관련 연구개발 과제와 개발 건설재료 성능

과제명	콘크리트	강재
초장대교량 사업단	■ 초저발열 콘크리트	■ 800MPa급 강재
초고층빌딩 시공기술 연구단	■ 100MPa급 콘크리트	■ 800MPa급 강재
압축강도 80~180MPa급 맞춤형 SUPER Concrete 재료 및 구조물 기술 개발	■ 100~200MPa급 강섬유보강 콘크리트 ■ 40~120MPa급 섬유보강 콘크리트	

■ 고성능 구조재료 분야 전문 연구인력이 부족한 실정임

- 슈퍼 구조재료 및 소재기술 관련 중소기업 제외 연구주체별 기술수준은 선도그룹으로 높은 편이나, 연구인력 부족으로 논문 및 특허 점유율이 낮은 것으로 분석됨

〈표 IV-3〉 슈퍼 건설재료 및 자재기술 분야 연구주체별 기술수준

대기업		대중소		연구계		학계	
기술수준 그룹	기술수준 (%)	기술수준 그룹	기술수준 (%)	기술수준 그룹	기술수준 (%)	기술수준 그룹	기술수준 (%)
선도	85.3	추격	72.0	선도	87.7	선도	80.5

* 출처 : KISTEP, 2016년 기술수준평가, 2017

■ 국내 건설경기 침체에 따라 건설재료 관련 민간 기술개발 투자가 위축되고 있는 실정임

- 일부 대기업을 제외하고 대부분의 건설재료 관련 중견·중소기업의 기술개발은 정부 R&D에 의존하고 있음
 - '15년 현재 건설재료 관련 업체의 기술개발 투자는 일부 대기업 및 중견기업을 중심으로 이루어졌으며, 매출액 대비 비중은 평균 1% 수준에 불과함
 - 포스코의 경우, 2015년 매출액 대비 1.98%인 507,023 백만원을 R&D에 투자하였으며, 포스코를 제외한 철강, 내·외장 재료, 도료 관련 대기업 및 중견기업의 매출액 대비 R&D 비중은 평균 1.37%이며, R&D 투자 금액은 평균 19,795 백만원임
 - 시멘트 관련 중견기업의 2015년 매출액 대비 R&D 투자비중은 평균 0.30%로, R&D 투자금액은 평균 2,148 백만원임
- 국내 건설재료 제품의 대부분은 기술개발이 아닌 해외 제품 수입에 의존하고 있어 기술의 해외의존도가 높은 편임

■ 건설구조 재료 관련 업체가 영세하여 기술개발 능력이 부족한 실정임

- 건설 구조재료 관련 업체의 대다수는 중소기업이며, 슈퍼 건설재료 및 자재기술 관련 중소기업의 기술수준은 72.0%로 연구주체 중에서 가장 낮음 (자료: KISTEP, 2016년 기술수준평가, 2017)

■ 첨단소재 융·복합 건설 구조재료 기술수준은 선진국 대비 상대적으로 낮은 것으로 나타남

- 나노소재 활용 콘크리트 기술은 최고 기술선진국 대비 약 70%의 기술수준임
- 탄소소재 활용 철근 기술은 최고 기술선진국 대비 약 73%의 기술수준임

1.3 기회 요인 (Opportunity)

■ 시설물 안전에 대한 국민의 지속적인 관심 및 요구가 증가하고 있음

- 사회안전에 대한 인식도(통계청, 2년마다 조사, 13세 이상 인구 대상) 조사에 따르면 건축물 및 시설물 안전에 대한 불만족율은 증가하고 있는 추세임

※ 비교적 불안 및 불안 응답률이 '12년 21.3% → '14년 51.3% → '16년 33.8%로 증가

■ 건설산업의 생산성 향상과 혁신을 위한 건설산업 변화 요구가 증대하고 있음

- 건설산업은 사회적, 환경적 및 경제적으로 매우 중요한 산업으로 건설산업의 작은 발전도 사회적, 환경적, 경제적으로 큰 영향을 미칠 수 있음
 - (사회적) 건설비용 1% 절감은 1,000억 달러의 사회비용 저감 효과를 유발할 수 있음
 - (경제적) 노후 시설물 급증에 따라 유지보수 비용이 증가하고 있는 실정임
 - (환경적) 건설산업은 천연자원 및 에너지 대량 사용, 이산화탄소 등 오염물질 배출, 건설폐기물 배출 등 환경부하가 큰 산업임

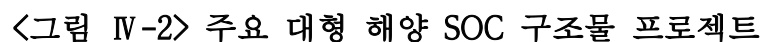
■ 건설산업의 한계 극복 및 도약을 위하여 첨단기술 융·복합을 통한 건설산업 혁신에 대한 필요성이 증가하고 있음

- 기존 경험중심의 노동집약적 건설산업은 성장 한계에 봉착하였으며, 글로벌 경쟁력이 저하되고 있는 실정임
- 첨단기술 융·복합에 의한 혁신적 건설재료 개발은 건설산업 혁신을 위한 가장 유용한 수단임 (출처 : World Economic Forum, Shaping the Future of Construction, '16.3)

- 나노, 바이오, IT 융·복합 건설재료 시장은 시장형성 초기 단계로 규모는 작으나 평균 29.8% 이상의 높은 성장률을 보임

건설재료	시장 구분	시장규모(백만 달러)			CAGR
		2011	2016	2021	
나노 융·복합 건설재료	해외	0.09	0.69	2.20	37.7%
	국내	0.02	0.08	0.26	29.2%
바이오 융·복합 건설재료	해외	0.09	0.35	1.33	30.9%
	국내	0.01	0.04	0.16	32.0%
IT 융·복합 건설재료	해외	0.07	0.22	0.70	25.9%
	국내	0.01	0.03	0.08	23.1%

■ 대형 해양 SOC 구조물 관련 해외 건설시장 수요가 확대되고 있는 추세임



● 제3차 과학기술기본계획의 국가전략기술 “슈퍼 건설재료 및 자재기술”에 이어 제4차 과학기술기본계획의 국가전략기술 중의 하나로 다음의 “기술선도형 건설재료 기술”이 선정됨

- NT/BT 융합 고성능 건설재료, 탄소섬유복합체 활용 한계극복형 구조재료, 3D 프린팅용 차세대 건설재료, 에너지 효율 향상을 위한 능동형 건설재료, 소음/진동/공기질 제어형 스마트 건설재료, 퍼펙트 리사이클형 (Closed Loop) 건설재료

■ 시설물 안전 및 유지관리에 대한 정부 정책이 강화되고 있는 추세임

- (제4차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획) 노후 시설물의 급증 및 예산 부족과 시설안전에 대한 국민 불안감 증가에 따라 안전하고 오래 사용 가능한 시설물을 주요 목표로 설정함
- 호우, 지진 등 재난에 대한 건축물 안전규정 신설 및 개정함

1.4 위협 요인 (Threat)

■ 사회기반 시설물의 노후화 대비 재정투입이 감소될 전망이다

- 준공년도 30년 이상 노후 사회기반 시설물의 비중이 증가하고 있는 반면에 사회기반 시설물의 유지관리 및 신규 투자 관련 재정 투입은 감소가 전망됨
- ‘16.12월 기준, SOC 시설물 26,930개소 중에서 30년 이상 경과한 시설물은 2,774개소로 약 10.3%에 해당하며, 30년 이상 경과 시설물의 비율은 10년 후에는 21.4%, 20년 후에는 44.4%로 급증 것으로 전망됨

〈표 IV-5〉 SOC 시설물 노후화 추세 전망

구분		1996년	2006년	2016년	2026년 (10년 후)	2036년 (20년 후)
공공 30년 이상	수량(개)	7,518	17,674	26,930	35,120	39,817
	수량(개)	671	1,267	2,744	7,518	17,674
	비율(%)	8.93	7.17	10.30	21.41	44.39

* 출처 : 제4차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획

- 국가 재정운용계획(‘16~’ 20) 상 SOC 분야 재정투입은 향후 5년간 평균 6%대로 감소할 것으로 전망됨(‘16년 23.7조원 ⇒ ’ 20년 18.5조원)

〈표 IV-6〉 국가 분야별 재정운용계획

구분	‘16	‘17	‘18	‘19	‘20	‘16~’20 연평균
총지출	386.4 (2.9)	400.7 (3.7)	414.3 (3.4)	428.4 (3.4)	443.0 (3.4)	3.5
1. 보건·복지·고용	123.4	130.0	135.8	141.6	147.7	4.6
2. 교육	53.2	56.4	58.8	61.0	63.4	4.5

구분	'16	'17	'18	'19	'20	'16~'20 연평균
3. 문화·체육·관광	6.6	7.1	8.1	8.4	8.6	6.8
4. 환경	6.9	6.9	6.8	6.7	6.7	△0.6
5. R&D	19.1	19.4	19.7	19.9	20.2	1.5
6. 산업·중소기업·에너지	16.3	15.9	15.7	15.4	15.2	△1.7
7. SOC	23.7	21.8	20.3	19.3	18.5	△6.0
8. 농림·수산·식품	19.4	19.5	19.4	19.3	19.3	△0.2
9. 국방	38.8	40.3	41.8	43.2	44.7	3.6
10. 외교·통일	4.7	4.6	4.7	4.9	5.0	1.7
11. 공공질서·안전	17.5	18.0	18.7	19.4	20.1	3.5
12. 일반·지방행정	59.5	63.9	66.9	69.6	73.5	5.4

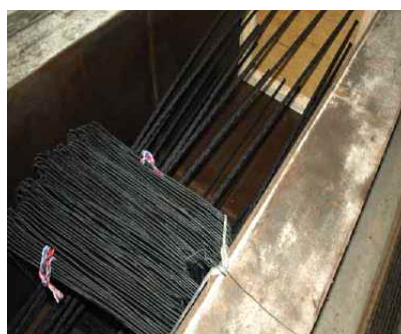
* 출처 : 2016~2020년 국가재정운용계획, 대한민국정부

■ 기술선도국의 첨단소재 융·복합 건설재료 관련 기술개발 활성화 및 이에 따른 기술종속 심화가 우려됨

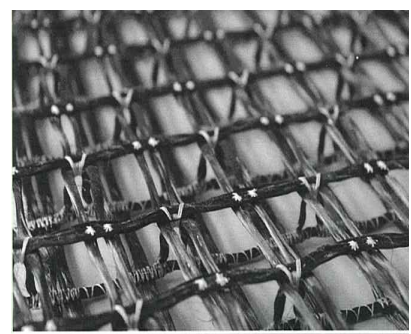
- 선도국에서는 2010년대 초반부터 사회기반 시설물의 장수명화를 위하여 FRP 등 첨단소재를 활용한 건설재료 개발에 노력하고 있음
- (미국) 교량의 부식을 근본적으로 차단하고 100년 이상의 수명을 확보하기 위하여 FRP 재료를 교량에 적용하고 있음
- (일본) FRP 텐던 개발 및 이를 활용한 교량의 개발 등 세계 최고수준의 연구개발 및 상용화 실적을 보유하고 있음
- (독일) CFRP의 콘크리트 구조물 적용을 위한 대규모 연구개발 프로젝트를 실시하고 있음



GFRP 보강근(미국)



CFRP 텐던(일본)



CFRP 그리드(독일)

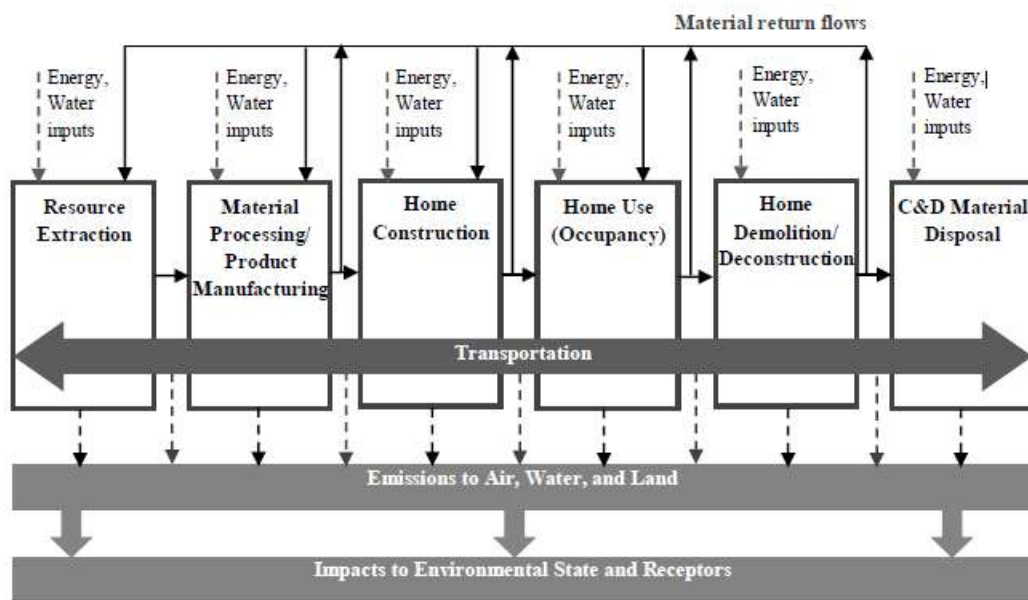
<그림 IV-3> 주요 국외 개발 FRP 제품

■ 고성능·고가인 첨단소재를 건설분야에 활용하기 위해서는 경제성 확보가 필수적임

- 나노소재, 탄소소재 등 첨단소재는 고가임에도 고성능을 요하는 항공우주, 전기전자 등의 산업분야 적용이 활발한 편임
- 건설산업은 상대적으로 성능대비 경제성이 중요한 산업으로 고가의 첨단소재를 적용한 기술개발이 상대적으로 부족한 실정
- 고성능·고가의 첨단소재 활용 건설재료의 경제성 확보 어려움에 따른 기술개발 부족 및 상용화 어려움

■ 건설산업은 세계적으로 가장 많은 자원과 에너지를 소비하는 동시에 오염물질을 다량 배출하는 산업임

- 건설재료 생산을 위하여 재생불가능 자원의 약 50%, 세계경제자원의 40%를 건설산업에서 소비하고 있음
- 건물, 도로, 교량 등 시설물의 생애주기 동안 25 ~ 40%의 에너지 소비 및 약 40 ~ 50%의 이산화탄소를 배출함
- 시설물 건설 및 해체에 따른 건설폐기물은 전체 고형폐기물의 절반 가까이 차지함



<그림 IV-4> 건설산업 밸류체인에 따른 환경영향 (Adapted from EPA (2009))

2. SWOT 전략

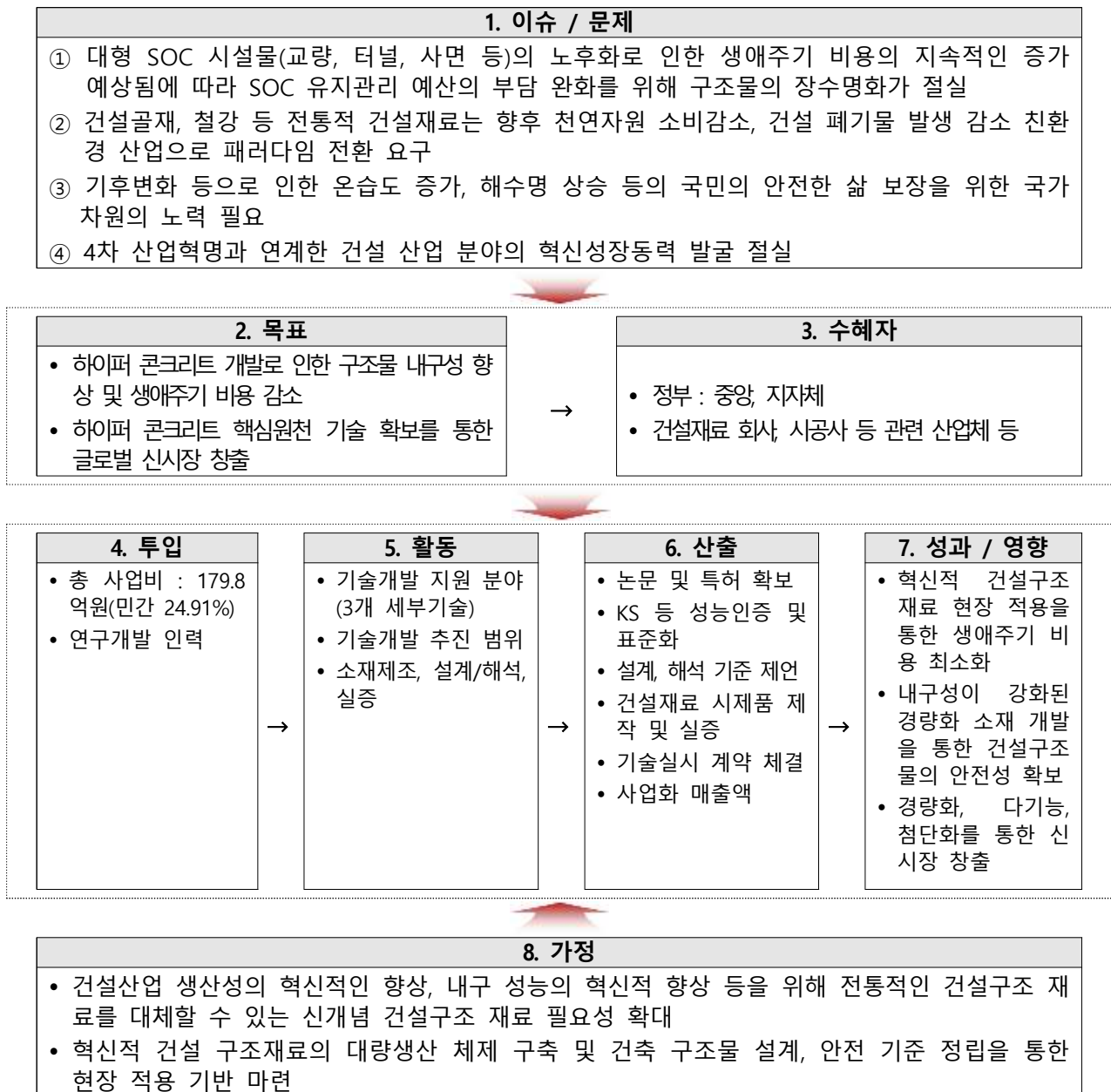
	Strength	Weakness	
Opportunity	■ 시설물 안전 확보 및 효과적 유지관리를 위하여 안전 실증 포함 건설재료 기술 개발 필요 ■ 세계 수준의 첨단소재 응용기술 및 풍부한 고성능 건설재료 연구개발 경험을 토대로 건설산업의 한계를 극복할 수 있는 건설재료 개발 필요 ■ 글로벌 첨단기술 융·복합 건설재료 시장 선점을 위하여 첨단소재 응용기술 활용 고성능 건설재료 개발 필요 ■ 건설산업의 해외 건설시장 수주 확대를 위하여 첨단기술 융·복합을 통한 대형 해양 SOC 구조물 적합 건설재료 개발 필요 ■ 글로벌 기술선도를 위하여 세계 수준의 첨단소재 응용 기술 활용 건설재료 기술 개발 투자 확대 필요	SO 전략	WO 전략
Threat	■ 첨단소재 활용 고성능·고효율 건설재료 개발을 통하여 노후 시설물의 유지보수 비용 최소화 ■ 세계 수준의 첨단소재 응용기술 및 풍부한 고성능 건설재료 연구개발 경험을 토대로 글로벌 첨단기술 융·복합 건설재료 기술경쟁력 확보 ■ 세계 수준의 첨단소재 응용기술을 활용한 경제적 첨단소재 개발 ■ 첨단소재 응용 기술 적용을 통한 건설재료의 획기적 성능향상으로 건설재료에 의한 환경부하 저감 ■ 안전성 등의 성능평가 포함 건설재료 개발을 통하여 건설재료 도입 및 활용에 따른 신뢰성 확보	ST 전략	WT 전략
		■ 전통적 건설재료에서 첨단기술 융·복합 건설재료로의 정부 R&D의 투자 변화 필요 ■ 글로벌 기술경쟁력 확보 및 시장선점을 위하여 정부주도의 대규모 종합 첨단기술 융·복합 건설재료 개발 필요 ■ 첨단기술 융·복합 건설재료 관련 중장기적 투자를 통한 고성능 건설재료 분야 연구인력 양성 및 확보	
		■ 정부주도의 대규모 종합 첨단기술 융·복합 건설재료 개발을 통한 글로벌 첨단기술 융·복합 건설재료 기술경쟁력 확보 ■ 전통적 건설재료에서 첨단기술 융·복합 건설재료 개발로의 정부 투자 전환을 통하여 노후 시설물 유지보수 비용 최소화를 위한 경제적, 고효율 유지보수재료 개발 필요 ■ 첨단기술 융·복합 건설재료 관련 산·학·연 클러스터 구축을 통한 부족한 전문 인력 문제 해결 및 첨단기술 융·복합 건설재료 관련 기술개발의 시너지 효과 창출	

제2절 사업 비전 및 목표

1. 사업의 논리모형

1.1 논리모형 설정

- 동 사업의 구성요소 및 연관관계 등을 포함하여 사업 추진을 위한 이슈/문제 정의와 사업목표, 수혜자 등의 명확화를 위한 사업논리모형을 제시



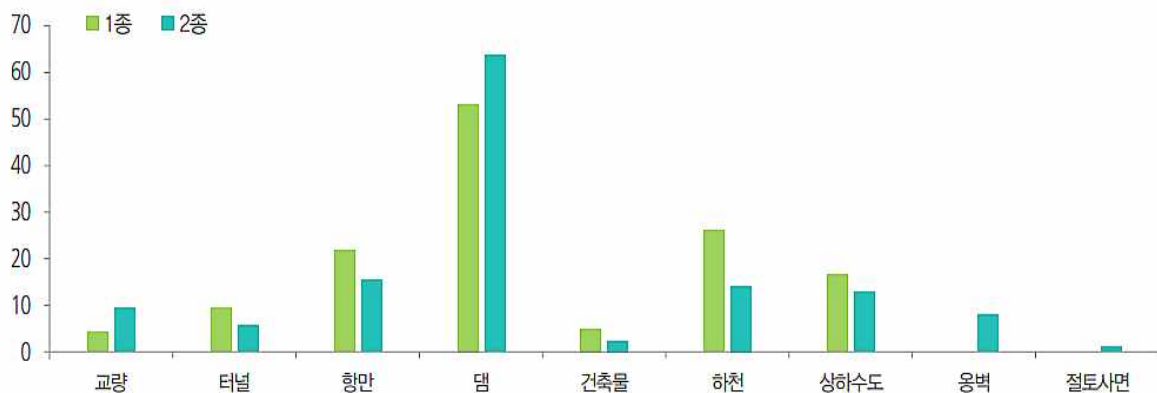
〈그림 IV-5〉 사업의 논리모형 설정

1.2 사업의 문제 정의

가. SOC 유지관리 예산의 지속적 감소 전망

■ 대형 SOC 시설물(교량, 터널, 사면 등)의 노후화로 인한 생애주기 비용의 지속적인 증가 예상

- 한국은 1970년대부터 주요 인프라 시설이 집중적으로 공급되어, 현재 준공 후 30년 이상 경과된 시설이 급증
- 2015년 12월 기준 교량, 터널, 항만, 댐, 건축물, 하천, 상하수도, 옹벽, 절토사면 등 주요 9가지 인프라 71,109개 가운데 30년을 초과한 시설은 2,862개
 - 1종 시설물 8,175개 중 30년이 넘는 시설은 568개로 노후화율은 6.9%이며, 2종 시설물 62,934개 중 30년이 넘는 시설은 2,294개로 노후화율은 3.6%



* 출처 : 김예성(2017), 도시 인프라 시설의 노후 현황과 정책과제

〈그림 IV-6〉 주요 인프라 시설의 노후화율

- 인프라의 안전 및 성능유지관리를 위해 지속적인 대책 방안이 필요하며, 사후관리에서 사전예방으로 비상대응에서 일상관리로 인프라 관리의 패러다임 변화가 필요

■ SOC 유지관리 예산의 부담 완화를 위해 구조물의 장수명화가 절실함

- 산업화에 필요한 SOC 시설이 부족한 1950년대와 1960년대 초기에는 건설 및 확충이 되어 중요했으며, 1970년대부터 지역균형 개발, 생활환경 개선 및 환경보호 등과 같이 사회 정책적 가치가 더욱 강조
- 2013년도부터 2020년까지 SOC 예산을 산정 및 추이한 결과, 지속적으로 SOC예산이 감소하는 것을 알 수 있음

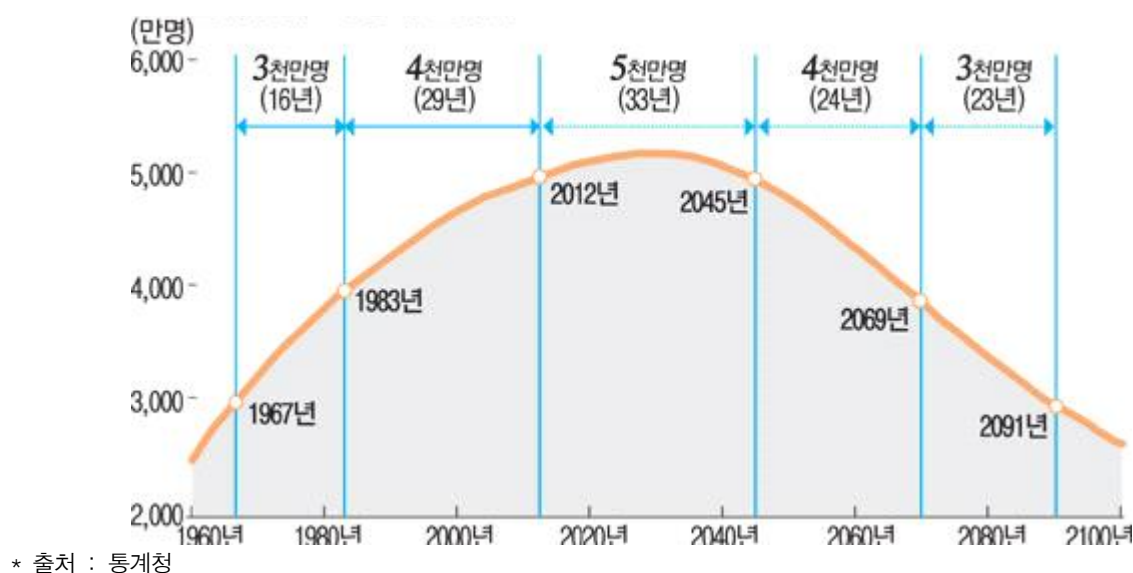
단위 : 조원



* 출처 : 기획재정부

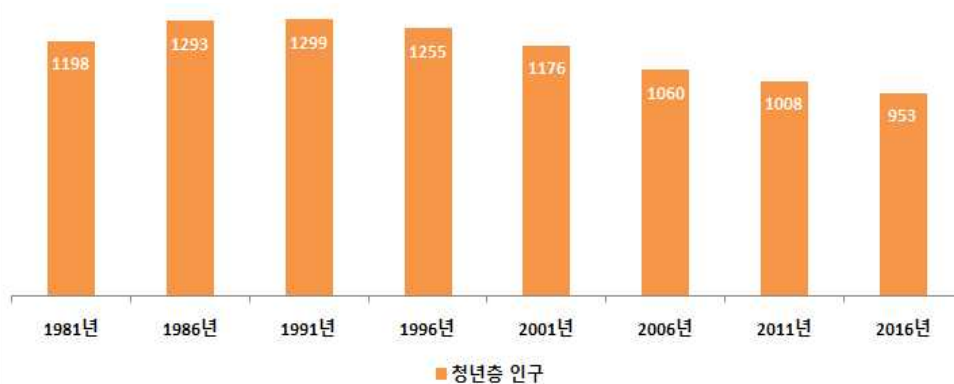
<그림 IV-7> SOC 예산 추이

- SOC 예산이 감소됨에 따라 유지관리에 따른 예산의 부담 완화를 위해 구조물의 장수명화가 선택제가 아닌 필수적으로 바뀌는 것으로 예상
- 인구감소에 따른 유지보수 인력 부족과 노후시설물 증가에 따른 구조물의 장수명화를 통한 유지보수 소요 감소가 필요한 시점
- 국내 인구는 2030년까지 증가한 이후 지속적으로 인구가 감소할 것으로 전망되며, 지속적으로 노인층 인구는 증가할 것이며, 유지보수에 따른 인력인 청년층은 감소할 것으로 전망



<그림 IV-8> 대한민국 인구 추이

(단위 : 만명)



* 출처 : 통계청

<그림 IV-9> 대한민국 청년층 인구 현황

- 청년층 인구가 감소함에 따라 인력부족, 임금상승으로 유지보수 예산을 통한 장수명화 구조물의 개발이 필수적으로 예상

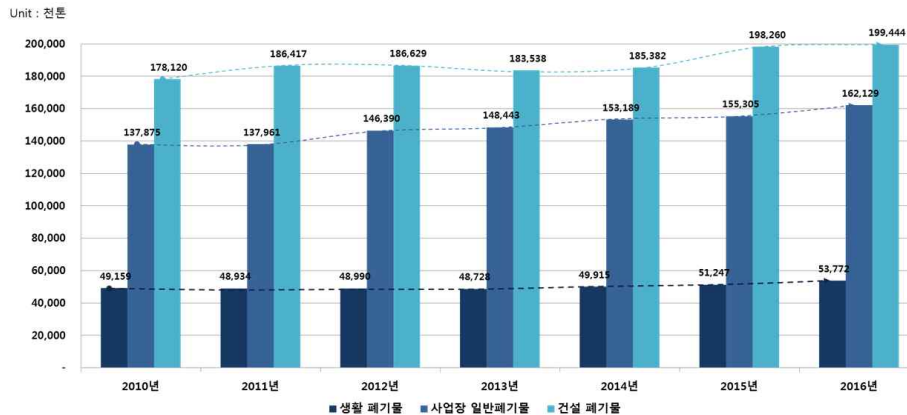
나. 친환경 산업으로 패러다임 전환 요구

■ 환경부하를 고려하지 못했던 현재의 건설산업은 세계적으로 친환경 산업으로 체질 개선이 요구

- 대표적인 환경오염의 주도적인 산업의 건설산업은 각종 폐기물로 인해 환경오염 및 기후변화를 초래하여, 심각한 환경문제 해소를 위한 대안으로 친환경 산업의 체질 개선이 요구
- 건축구조물의 80% 이상을 차지하는 철근·콘크리트 제조를 위해 막대한 천연자원을 소비하고 있으며 인구증가에 따른 건설수요 증가는 자원고갈 문제에 직면할 것으로 예상

■ 건설골재, 철강 등 전통적 건설재료는 향후 천연자원 소비감소, 건설폐기물 발생 감소 등을 위한 첨단 소재로 변화가 필요

- 건축물 기능상의 결합에 따른 철거 및 해체의; 가정에서 대량의 폐기물들이 발생하고 있으며, 이러한 폐기물의 재활용에 따른 용도 대책이 시급한 실정
- 2010년부터 2016년까지 건설폐기물은 지속적으로 증가하고 있는 추세이며, 한정된 자원의 적절한 소비, 환경을 오염시키는 요소의 최소화 등이 요구



* 출처 : 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황

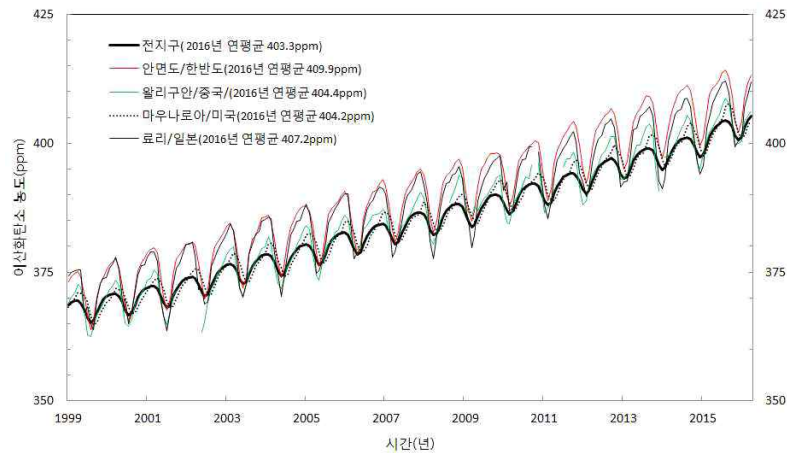
<그림 IV-10> 국내 건설폐기물 발생량 및 비중

■ 한정된 자원, 건설폐기물에 따른 환경오염, 기후변화에 따른 구조물의 노후화 및 부식화에 대한 친환경 산업으로의 패러다임 전환은 필수적이며, 강력한 제제 및 친환경적인 인센티브가 필요

다. 국민의 안전한 삶 보장을 위한 국가 차원의 노력 필요

■ 기후변화 등으로 인한 온습도 증가, 해수면 상승 등의 환경변화에도 성능을 유지할 수 있는 신규 건설재료는 물론 이산화탄소 배출 저감 소재의 개발 요구

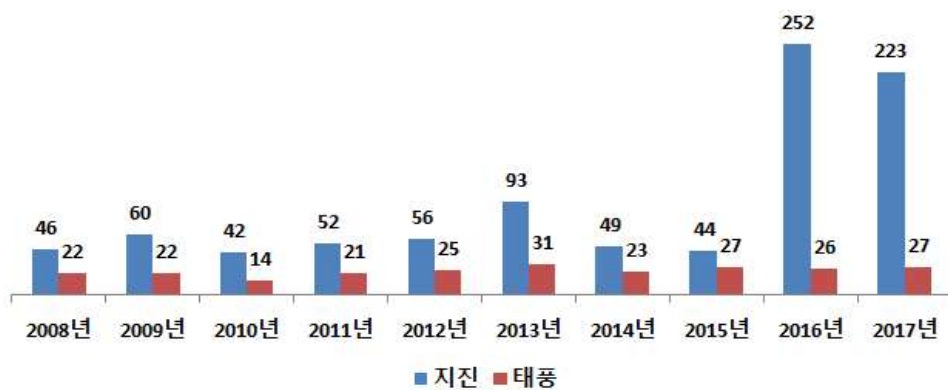
- 20세기 이후 대도시화 및 산업화로 인한 천연자원사용에 따른 각종 연료 증가, 환경오염 등으로 온습도 증가, 해수면 상승 등 기후변화를 초래
- 세계기상기구(WMO)에 따르면 2016년 전 지구 이산화탄소 연평균 농도가 403.3ppm을 기록하여 전년 대비 3.3ppm으로 대폭증가
 - 최근, 한국은 이산화탄소 농도가 409.9ppm으로 조사되었으며, 전년 대비 2.9ppm 증가하였으며, 지난 10년간 연평균 2.3ppm으로 증가
 - 이 상태로 2100년에 이르면 한국의 지상 기온이 1.8~4.8° C까지 상승할 것으로 전망하며, 강수량도 6.5~13.2% 증가 전망(IPCC, 2013)
- 최근, 이산화탄소 농도 증가로 인한 온실효과의 가속화로 우리나라는 지난 100년 동안 평균 지상 기온 1.8° C 상승하여 평균 (0.85° C)를 초과한 것으로 조사됨



* 출처 : 기상청(2017)

〈그림 IV-11〉 이산화탄소 농도변화 추세

- 태풍, 폭우, 지진 등의 자연재해 발생빈도 증가에 따라 내구성을 유지할 수 있는 대형 구조물, 초고층 건축물 등에 최적화된 첨단 건설소재의 개발 필요성 증대
- 최근, 대규모 인명피해 및 자산피해와 기후변화로 인한 태풍, 폭우 및 지진 등 지속적으로 자연재해 발생빈도 증가
- 2008년부터 2017년까지 지진 및 태풍의 발생빈도 현황은 지속적으로 증가하고 있는 것으로 조사됨



* 출처 : 통계청

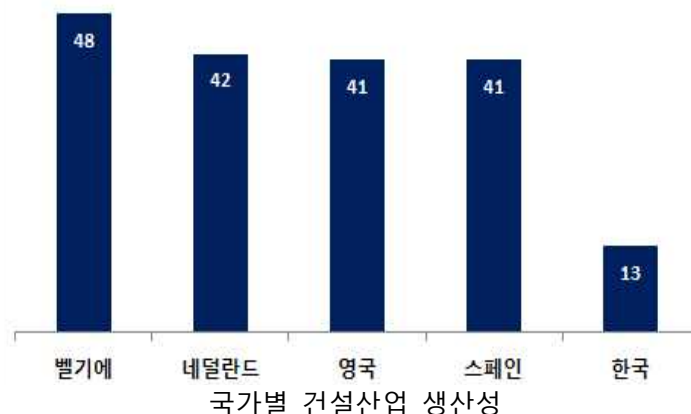
〈그림 IV-12〉 지진 및 태풍 빈도(2008~2017년)

라. 4차 산업혁명과 연계한 건설산업 분야의 혁신성장동력 발굴 절실

■ 관련 산업의 지속가능성 확보, 생산성 향상 등 혁신적 변화의 필요성 확대

- 건설산업에서의 제4차 산업혁명은 공동주택이나 도시, 도로 등의 스마트화를 추진하는 성격을 가지고 있으며, 모듈러, BIM, 3D 스캐너, 3D 프린터 등의 생산 자동화 이슈를 통한 혁신적 변화가 필요
 - U-City, 스마트시티, 스마트홈 등의 대표적인 제4차 산업혁명의 건설기술은 첨단 ICT 설비들의 도입으로 지속적인 혁신이 이루어져 왔음
 - 그러나, 수주를 통한 수익 이외의 사업성의 비즈니스 생태계 구축은 등한시되었고, 이러한 관점에서 기술개발은 지속적으로 감퇴하고 있는 실정
 - 또한, 수많은 제도적 규제에 의해 융합과 창의성을 전제로 하는 제 4차 산업혁명의 발전을 저해하는 요소들을 극복해야 하는 과제 또한 무시할 수 없는 상황
 - 건설기업 관점에서 보면 기존의 수주산업 차원을 벗어나는 새로운 비즈니스를 염두에 두어야 하면, 혁신적인 기술개발의 필요성이 확대
- 국내 건설산업의 생산성(1.3달러)의 해외 선진국(벨기에 48달러, 네덜란드 42달러, 영국 41달러, 스페인 41달러)에 비해 매우 낮은 수준으로 조사됨
- 선진국에 비해 낮은 수준의 건설산업 생산성을 보이는 이유는 민간에서 물량 중심의 수주를 통한 이익창출에 집중하고 있기 때문

단위 : 달러

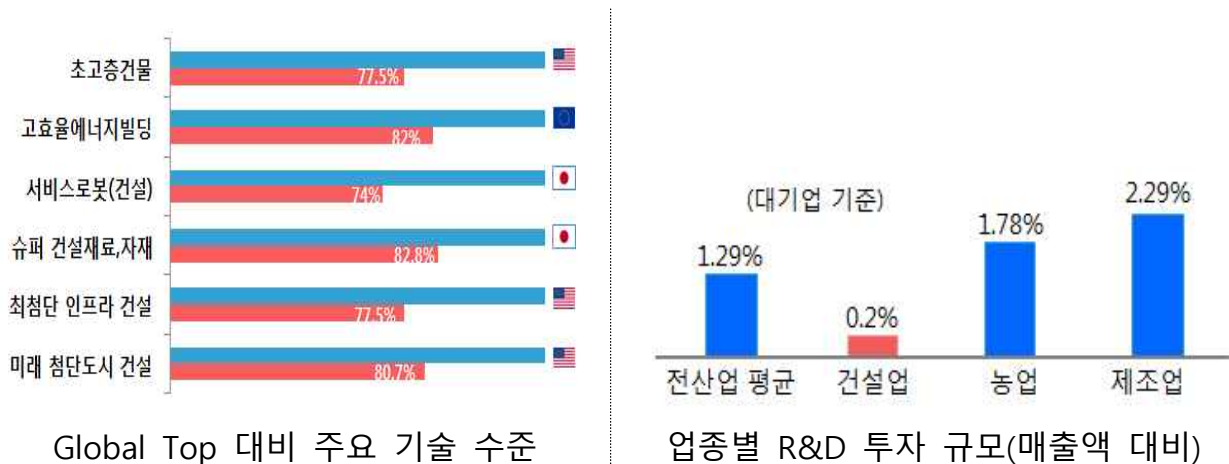


* 출처 : 맥킨지 글로벌 연구소(2017)

〈그림 IV-13〉 국내 건설산업 생산성 추이와 국가별 건설산업 생산성

■ 건설소재의 경량화, 복합 기능화 등을 통한 생산성 향상이 반드시 필요

- 플랜트 분야의 기업 경쟁력은 높으나, 첨단인프라, 초고층 빌딩 등 주요 기술은 Global Top 대비 70~80%의 수준
- 또한, 건설자동화 등 4차 산업혁명 대응을 위한 R&D 투자는 건설산업 이외의 투자 비율대비 현저하게 저조한 상황



* 출처 : 관계부처 합동(2018), 건설산업 혁신방안 - 건설기술 · 생산구조 · 시장질서 · 일자리 혁신 -

<그림 IV-14> 기술 수준 및 업종별 R&D 투자 규모

- 기획, 설계, 시공, 운영 등 다양한 건설프로젝트 중 지나친 시공 편중으로 설계, PM, CM의 역량이 극히 취약
- 최근, 철근콘크리트의 내구성 저하라는 문제점이 나타나 강재를 이용한 구조물의 건설이 이루어지고 있지만, 강재 또한 산화작용으로 인한 내구성이 저하라는 문제점이 나타났고, 이러한 문제점을 복합신소재의 요구 증가
 - 복합신소재(나노 복합재, 자가치유 콘크리트 등)를 통한 요구가 증가하고 있지만, 구조개발에 따른 기술력은 미비한 상태
 - 복합신소재를 통한 국내 건설산업의 생산성 향상 효과를 예상하고 있으며, 이러한 기술개발은 해외수주와 연관되어 경제적인 효과 예상
- 기술개발을 통한 건설소재의 경량화, 복합기능화 등을 통한 건설산업의 생산성 향상이 필수적이라 예상
- 이러한 관점에서 건설구조의 개편을 통한 기술개발을 기반으로 건설산업의 생산성 향상이 필요한 것으로 예상

2. 사업의 비전과 목표

- 본 사업은 첨단기술을 활용하여 기존 구조재료 대비 획기적으로 성능이 개선된 신개념 구조재료 개발을 목적으로 하고 있으며, 이를 통해 정체되어 있는 건설 산업의 활성화와 혁신적 체제 개편을 도모

비전	콘크리트 재료의 획기적 성능개선을 통한 건설재료산업의 지속가능성 확보	
사업 목표	나노기술 활용 기존 콘크리트 대비 내구성 2배 증가, 중량 40% 이상 감소된 경량·고강도 콘크리트 개발 ■ 기존 대비 내구성 2배 증가(100년 → 200년)되고, 중량이 40%이상 감소(2.3t/m³ → 1.6t/m³)된 80MPa 고강도 콘크리트	
성과 목표 및 지표	■ 국내논문게재(건) : 26 ■ 국제논문게재(건) : 28 ■ 국내 특허출원(건) : 27 ■ 국내 특허등록(건) : 18 ■ 해외 특허출원(건) : 2	■ 시제품 제작 및 실증(건) : 3 ■ 설계, 해석 기준 제언(건) : 2
전략	① 기존 성과 연계를 통한 예산 투자의 효율성 강화 ② 글로벌 기술경쟁력 강화 및 신시장 창출을 위한 도전적 목표설정 ③ 현장적용 및 신시장 창출을 위한 실증/성능평가 강화	
투입 규모	정부 주도의 중·장기 제원 투입 ■ 사업기간 : 2020 ~ 2023 (총 4년) ■ 총사업비 : 179.8억 원 (정부 135억 원, 민간 44.8억 원)	
기대 효과	■ 나노 기술이 접목된 첨단 건설재료 기술 개발을 통해 국내외 원천기술 확보 및 해외시장 선점 기반 마련 ■ 노후시설물의 유지·보수 비용 절감을 위한 최적의 대안으로 시설물의 획기적 내구수명 확보 가능 ■ R&D 연구를 통한 핵심기술 개발로 건설분야 전반에 걸쳐 새로운 고부가가치 기술 혁신 유도 가능	

〈그림 IV-15〉 사업 비전 및 목표

3. 사업 비전 및 목표

3.1 사업의 비전

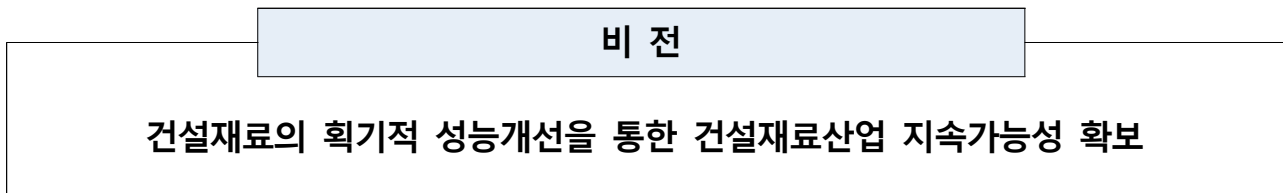
- 사업의 비전은 일반적으로 조직이 추구하는 바람직한 중장기적 미래상(What to be)을 의미하며, R&D 부문에서는 성공적인 연구개발 추진에 따른 결과로 기대되는 중장기적 관점에서의 사업 효과를 나타낼 수 있어야 함
- 사업의 고유임무(Mission)와 비전설정은 사업에 참여하는 주체들에게 분명한 목표의식과 의미를 부여하고, 사업 추진의 전략적 방향성과 사업 관리를 위한 행동기준을 제공한다는 측면에서 의의를 지님



* 출처 : 재정사업 성과지표개발 매뉴얼(2012.1, 기획재정부)

〈그림 IV-16〉 성과관리 구성요소

- 이러한 미션 달성을 통한신규 국가연구개발사업으로서 동 사업의 고유 임무(Mission)는 ‘건설산업의 혁신적 변화를 위해 내구성, 내진성, 내화성 등 구조물의 기능을 혁신적으로 변화시킬 수 있는 첨단건설재료를 개발하는 것’임
- 첨단기술을 활용한 스마트 건설재료 연구개발 사업의 종료시점에 기대하는 바람직한 미래상, 즉 사업의 비전을 아래와 같이 정의함



■ 비전 수립 방법

- 본 사업의 비전은 국가정책 및 상위계획의 방향성과 국내 건설산업의 현재 및 미래를 고려하여 도전적이나 실천 가능성이 높은 비전을 제시
- 공공기술 및 산업기술이 혼합된 본 사업의 특성을 고려하여 기술개발 추진에 따른 두 가지 목적을 제시함
 - (공공기술개발) 외부환경에 의한 건설재료의 열화를 근본적으로 차단할 수 있는 건설재료 개발을 통하여 사회기반 시설물 등 구조물의 유지보수를 최소화하는 장수명화 및 이를 통한 건설산업에 의한 환경파괴 방지 및 보전 실현
 - (산업기술개발) 첨단기술을 활용한 차세대 건설재료 개발을 통한 국내 건설산업의 활성화 및 체제 개편 실현

■ 비전 수립 틀 설계

수립과정	주요 내용	수행 방법
비전 설계	· 비전 정의 규명 · 비전 구성요소 파악	· 관련 문헌 조사
기존 비전 분석	· 국내·외 유사 비전 분석 · 기존 국토부 비전분석	· 국내·외 사례 조사
비전 수립	· 비전 설계 및 검토	· 브레인 스토밍
목표 수립	· 비전 연계 목표 설정 · 정량적 목표 제시	· 브레인 스토밍

■ 국가정책 및 상위계획과 연계성 강화

- 국가정책 및 상위계획의 방향성과 일관성을 유지할 수 있는 비전을 수립하기 위해 건설재료 관련 정책 및 계획의 종합적 분석 실시
- 국가정책 및 상위계획 비전 검토를 통한 핵심 키워드 도출 및 첨단기술을 활용한 건설재료 개발에 따른 달성 가능한 비전 설정
- (주요 키워드) 국민행복, 행복사회, 자립사회, 지속발전, 친환경, 안전 등

〈표 IV-7〉 국가정책 및 상위계획과 비전

국가정책 및 상위계획	비전
제4차 과학기술기본계획	창조적 과학기술로 여는 희망의 시대
제6차 건설기술진흥기본계획	"Smart Construction 2025" 2025년까지 BIM, AI 적용한 건설자동화 기술 개발
제3차 시설물 안전 및 유지관리 기본계획	시설안전의 Blue화를 통한 행복사회 구현
제4차 소재·부품발전 기본계획	'25년까지 100대 세계최고기술 확보를 통한, 4대 소재·부품 수출 강국 도약
제4차 과학기술기본계획	과학기술로 국민 삶의 질을 높이고 인류사회 발전에 기여
2018년도 나노기술발전시행계획	나노기술 경쟁력 향상으로 사람중심 4차 산업혁명 실현 촉진

■ 건설산업의 현재 문제 해결 및 미래상 반영

- 현재 국내 건설산업은 수요 포화상태 및 성장 한계에 따른 정체기에 접어든 상태이며, 해외 수주 또한 저조한 실정으로 첨단기술을 활용한 차세대 건설재료 개발을 통하여 침체되어 있는 국내 건설산업을 활성화하고 나아가 건설산업의 혁신적 체제 개편을 통한 글로벌 경쟁력을 강화할 수 있도록 비전 설정
- 건설재료는 설계, 시공 등 건설산업 관련 기술을 선도하는 것으로 새로운 건설재료 개발을 통하여 미래 건설산업의 선도가 가능함

3.2 사업목표

목 표

나노기술 활용 기존 콘크리트 대비 내구성 2배 증가, 중량 40% 이상 감소된 경량·고강도 콘크리트 개발

- 기존 대비 내구성 2배 증가(100년 → 200년)되고, 중량이 40%이상 감소($2.3\text{t/m}^3 \rightarrow 1.6\text{t/m}^3$)된 80MPa 고강도 콘크리트

- 본 사업은 첨단기술을 활용하여 외부 환경에 의한 열화원인을 근본적으로 해결하거나 차단함으로써 기존 건설재료 대비 획기적인 수명을 가지는 새로운 구조재료 개발을 목적으로 하고 있음
- 외부환경(열화, 균열)으로 인한 콘크리트의 수명저하 문제를 해결하기 위하여 나노소재를 활용한 외부환경에 관한 문제를 근본적으로 차단함으로써 품질 저하가 되지 않는 콘크리트 개발을 목표
- 사업목적 달성을 위한 성과물로 인한 목표는 ‘첨단건설재료 개발을 통한 구조물의 글로벌 신시장 창출’로 설정
- (글로벌 신시장 창출) 국내 현장적용을 통한 기술고도화 및 국내 실증실적 기반 해외시장 진출을 통한 글로벌 시장 선도

제3절 사업 추진전략

1. 기존 성과연계를 통한 효율성 강화

- 기존의 콘크리트 구조재료를 대체하기 위한 혁신적 구조재료 개발을 위해 나노소재 기술의 융복합을 위해 선행 연구성과의 연계가 필요
 - 나노소재는 기존 소재의 성능을 혁신적으로 개선시킬 수 있는 첨단신소재로 주목받고 있으며, 항공/자동차 산업분야의 혁신적 변화를 초래하고 있음
 - 우주항공 산업은 우수한 내열성, 연료비용 감소, 속도향상 등을 위한 산업적 수요에 따라 복합소재 활용을 50% 수준까지 확대하였으며
 - 따라서, 나노소재 관련 원천 기반기술 개발 성과 및 타 산업분야 응용기술을 연계하여 건설 구조재료 분야에 적용하기 위한 성과연계 전략을 수립
- 나노소재는 높은 기술집약도가 요구되는 분야로 재료, 전자, 에너지, 우주항공, 의학, 건설 등 산업 전반에 응용이 가능하고 높은 경제적 파급성을 가지고 있음
 - 최근 나노소재 복합재는 전자, 건강치료, 에너지 건설 등 새로운 응용분야에서 높은 수요증가가 예상되고 있는 상황임
 - 한편, 건설분야에서 나노기술의 활용은 크게 증가하고 있으나, 나노기술 적용분야 별로 개념적인 단계에서 사업화 단계까지 다양함

〈표 IV-8〉 기존 기술(성과) 연계방안

구분	연계기술
기존 나노소재 기술	- 나노소재 분산기술 및 배향기술 - 나노소재 점성 제어기술, 수화반응 제어기술 - 최적 충전 기술, 공극 제어기술, 건설용 나노소재 제조기술

2. 도전적 목표설정을 통한 기술혁신 선도

- 건설산업 혁신 및 미래 신성장동력으로 주목받고 있는 신소재를 활용한 첨단건설재료 개발을 위한 국가간 경쟁이 심화됨에 따라 글로벌 경쟁력 강화를 위해 세계 최고 수준의 기술개발 목표를 설정
 - 나노소재를 활용한 콘크리트의 내구수명 향상, 밀도 절감, 압축강도 향상 등의 최적 성

능수준 달성을 위해 세계 최고 수준의 기술개발 목표를 제시

- 또한, 기존의 철근콘크리트 구조재료를 대체할 수 있는 차세대 구조재료의 다양한 기능성을 통해 사회적 문제 해결에 기여할 수 있음

- 나노기술을 활용하여 철근 콘크리트 구조물의 낮은 생산성과 환경요인에 의한 열화에 따른 내구수명 저하, 시설물 유지관리비 절감 등 사회적 문제 해소 가능

■ 즉, 기존 전통적인 철근콘크리트 및 기 개발된 기능성 구조재료의 성능수준 대비 세계 최고 수준의 기술개발 목표를 설정함으로써 건설산업 혁신을 도모

- 경량·고강도 콘크리트 재료 개발을 통한 구조물의 반영구화 및 생산성 향상을 위해 밀도, 압축강도 등의 최고 수준의 목표를 설정

〈표 IV-9〉 혁신적 목표설정

구분	성능	현재수준	목표수준
하이퍼 나노 콘크리트 개발	내구수명	100년	200년
	밀도	2.3t/m ³	1.6t/m ³
	압축강도	80MPa	80MPa

3. 성능평가/실증 연계를 통한 현장 적용성 확대

■ 첨단기술을 활용하여 개발된 신개념 구조재료의 현장 적용성 강화 및 신시장 창출을 위해서는 기술개발과 뿐만 아니라 성능평가 및 현장실증이 필수적임

- 나노기술을 활용한 구조재료 개발을 위해서는 건설분야에 적합한 소재의 제조기술부터 구조재료 활용을 위한 응용기술, 안전성 평가를 위해 인체영향 평가 등의 기술개발부터 시제품의 성능평가 및 현장실증이 필요

- 따라서, 원소재의 확보 → 재료개발 → 해석/설계 → 건설시공 → 유지관리 → 해체 등 건설산업 벨류체인을 고려한 기술개발 전략을 수립

■ 즉 사업의 성과물에 대한 활용도를 높이기 위하여 첨단기술을 활용한 원소재의 확보, 재료개발, 시공 등의 건설산업 벨류체인을 종합적으로 고려하여 사업체계를 구축

- (원소재 확보) 구조재료 개발을 위한 소재확보를 위해 벌크 나노소재 제조기술, 나노혼화재 분산기술, 수화최적화 기술, 세멘트 복합체 구조 제어기술 등을 개발

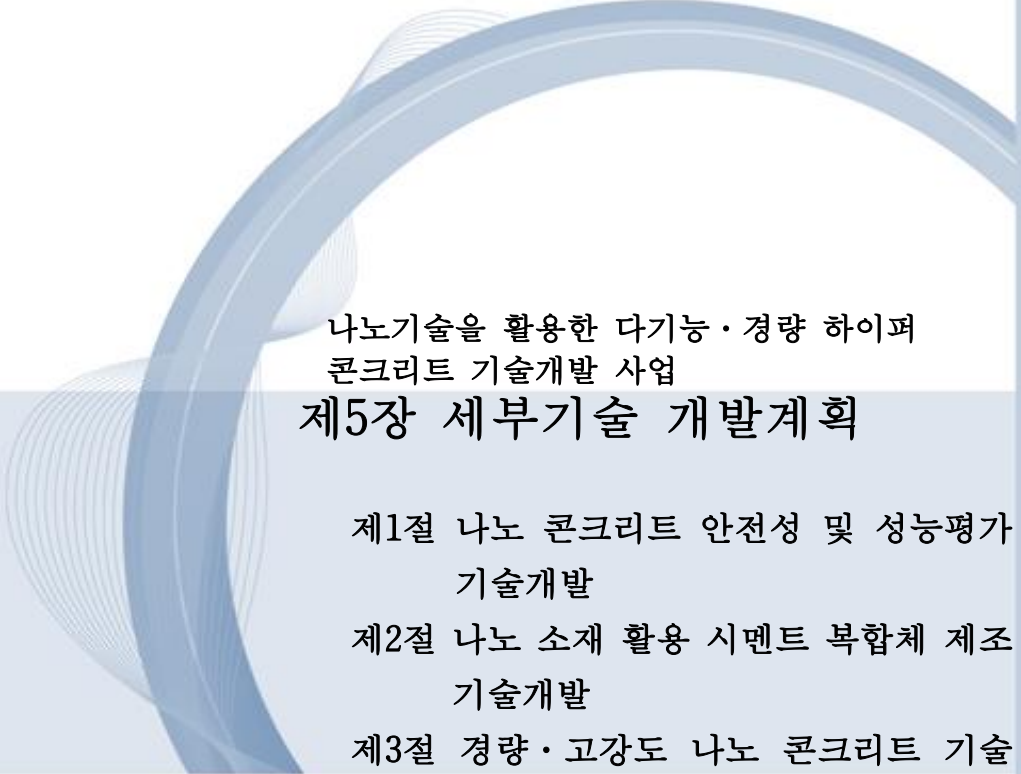
- (재료개발) 첨단건설재료 개발을 위한 하이퍼 라이트콘, 하이퍼 듀라콘 등의 기술을 개발
- (구조해석/설계 기술) 나노콘크리트 관련 재료 모델, 구조설계 기술 등을 개발
- (환경 및 인체영향) 나노소재 환경 및 인체 영향 평가 기술, 인체 및 환경 유해성 평가기술을 개발
- (시공기술) 다양한 기능성 구조재료의 시공기술 및 구조설계 적용 기술 등을 개발



<그림 IV-17> 건설산업 밸류체인과 기술개발 전략

■ 다만, 동 사업은 첨단건설 구조재료 개발을 위한 핵심기술 확보 및 기술고도화를 목적으로 하고 있으며, 사업기간 및 예산이 제한적으로 설정되어 있는 2단계 사업(후속사업)을 통한 현장실증 및 성능평가를 중점적으로 추진 예정

- (1단계: 본 사업) 나노 콘크리트의 국산화를 위한 기술을 확보
 - 나노 콘크리트에 대한 원천기술 및 글로벌 경쟁력 확보
- (2단계 : 후속사업) 나노 콘크리트에 대한 새로운 구조형식의 구조물 건설을 위한 기술고도화
 - 나노 콘크리트의 성능 및 기능 고도화, 나노 콘크리트의 결합에 의한 새로운 구조형식의 건설산업 적용성 확대를 위한 상호영향 평가, 소규모 구조물(보도교, 저층 건축물 등) 건설을 통한 기술 실증 실시



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼
콘크리트 기술개발 사업

제5장 세부기술 개발계획

제1절 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가
기술개발

제2절 나노 소재 활용 시멘트 복합체 제조
기술개발

제3절 경량·고강도 나노 콘크리트 기술

제5장 세부기술 개발계획

제1절 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술개발

1. 기술개발 배경 및 필요성

1.1 현황 및 문제점

■ 건설업에서의 나노 기술의 위치

- 현재 건설산업에서 나노 기술은 개념적 아이디어 단계로부터 상용화 단계에 이르기까지 폭 넓게 전개되어 있음
- 건설산업에서의 나노 기술 활용과 관련된 대중적 인지도는 매우 미약한 상황이며, 이는 나노 기술에 대한 현황 파악과 미래 예측이 제대로 이루어지지 않고 있기 때문임
 - 나노 기술은 구조물을 빠르고 저렴하며 안전하게 건설하려는 클라이언트를 설득해야 하는 건설산업 관계자에게 있어 복잡하고 높은 비용 및 안전하지 못한 기술로 인지되고 있는 실정임

■ 기존 콘크리트 기술로의 나노 기술 적용에 따른 기술적 문제

- 기존 콘크리트에 대한 성능 개선 및 기능 추가를 목적으로 나노 기술을 적용할 경우, 나노 소재 활용에 따른 환경 및 인체 영향에 대한 문제가 발생하게 됨.
 - 현 시점에서는 콘크리트를 구성하는 원재료 생산 분야부터 구조물 사용 완료 후 철거, 건설폐기물 처리에 이르기까지 모든 부분에 대한 나노 소재가 환경 및 인체에 미치는 영향에 대한 정보가 제공되고 있지 않음
 - 콘크리트는 제조 후 화학적 반응을 통해 경화되는 것이 특징으로, 나노 소재를 콘크리트에 적용할 경우 경화된 콘크리트 내에서 나노물질이 유출되는 메커니즘에 대한 정보 또한 전무한 실정임

■ 나노 기술 활용에 따른 환경 및 인체 문제 대두

- 나노 기술에 대한 긍정적인 기대에도 불구하고, 나노 기술 적용에 따른 안전관련 사회적 수용성 문제가 국내외에서 이슈화 되고 있는 실정임
 - 나노 기술의 빠른 발전으로 많은 분야에서 나노 소재의 활용이 급속도로 증가하고 있으며, 동시에 나노물질의 불확실성과 복잡성 및 노출 가능성으로 인해 나노물질이

인체 및 환경에 미치는 위해성에 대한 우려가 급증하고 있음

- 나노 소재의 활용은 근로자, 소비자, 환경에 대한 잠재적인 악영향을 내포하고 있으나 기초연구 부족으로 나노 소재에 대한 위험성을 완벽하게 평가하는 것은 불가능하며, 나노물질 노출 수준과 노출 제한치 도입 및 적용이 이루어지지 않고 있음
 - 나노 기술이 건설업에서 바람직한 방향으로 수용되기 위해서는 나노 소재 활용에 따른 환경 및 인체 영향에 대해 객관적이고 과학적인 평가·검토가 뒷받침되어야 하고, 이를 위해 사회적·윤리적으로 책임질 수 있는 연구개발이 필요한 실정임
- 나노 소재는 작은 크기와 함께 상대적으로 큰 비표면적을 가진 속성으로 인한 잠재적 위험성과 기초연구에 대한 부족, 위해 평가 제도의 미비에 따른 불확실성 등은 국내외적으로 나노 기술을 활용한 제품의 안전성 논란을 지속적으로 야기할 것으로 예상됨
- 나노 소재의 침투성(access), 반응성(reactivity)이 새로운 독성 위험을 유발할 수 있으며, 큰 입자에 비해 인체에 대한 침투성이 훨씬 큰 생물학적 이용가능성(bioavailability)으로 인해 개별 세포, 조직, 장기로의 흡수 증대가 초래됨
 - 지름 20nm의 나노입자(폴리테트라플루오로에틸렌, PTFE)를 쥐에게 15분 동안 호흡하게 한 결과, 4시간 이내에 죽음에 이르렀으나, 이를 6배 이상 크게한 결과, 쥐가 지속적으로 살아있음에 따라 입자 크기에 따라 독성이 발생할 수 있음을 확인함
 - 화장품의 경우, 인체에 전혀 해롭지 않은 원재료로 구성되나 나노 크기로 가공되는 과정에서 인체에 위해한 물질로 바뀔 수 있다는 인식이 국제적으로 확산되고 있음



*자료 : [심층취재] 은나노, 뇌·간 등 신체장기 침투, MBC (2013.9)

<그림 V-1> 나노 소재의 생물학적 영향 사례

- 나노 소재의 환경, 보건, 안전성에 대한 문제는 최근 선진국 등을 중심으로 정치적인 이슈로써 부각되고 있으며, 나노 기술과 관련된 환경 · 보건 · 안전성 영향에 관한 연구지원이 크게 증가하고 있는 추세임
- 2000년 중반 이후, 미국, 일본, 유럽연합(EU) 등 선진 각국은 기존 국가나노 기술 개발계획의 재검토 또는 신전략 수립을 통해 나노 기술의 사회 영향 문제를 핵심 분야로 선정함
- 2006년 미국 하원은 “나노 기술의 환경 및 사회영향에 관한 청문회, 정부는 무엇을 하고 있는가?” 라는 주제로 청문회를 개최하고, 나노 기술의 환경보건안전(EHS) 분야에 대한 부처 간 연구우선분야의 설정 및 조정 기능이 극히 미비하다는 평가를 내림
- 국제협력기구인 OECD WPMN과 국제표준화 기구인 ISO/TC 229에서는 나노물질에 대한 안전성 평가기준을 마련하고자 범국가적으로 노력을 기울이고 있으며, 나노 제품에 대한 안전성 규제방안을 논의 중임
- 특히, OECD WPMN에서는 2013년부터 나노물질에 대한 규제적 가이드라인을 제정 중이며, 13개 대표적 나노물질(C60, SWCNTs, MWCNTs, Au, Ag, Fe, TiO₂, Al₂O₃, Ce₂O₃, ZnO, SiO₂, dendrimers, nanoclays)의 59항목과 관련된 종말점에 대해 세계 각국에서 연구한 결과를 취합하여 나노물질의 안전성 여부를 판단하고자 노력하고 있음

<표 V -1> OECD 권장 나노물질 특성평가 항목

Endpoints of physicochemical properties
1. 응결/응집 (agglomeration / aggregation) 2. 수용성/분산성 (water solubility / dispersability) 3. 결정상 (crystalline phase) 4. 불순물 함유도 (dustiness) 5. 결정상의 크기 (crystallite size) 6. 대표적 전자현미경 이미지 (representative EM pictures) 7. 입도분포 (particle size distribution) 8. 비표면적 (specific surface area) 9. 표면전하 (zeta potential) 10. 표면화학 반응성 (surface chemistry) 11. 광촉매 활성 (photocatalytic activity) 12. 기공 밀도 (pore density) 13. 기공성 (porosity) 14. 옥탄올-물 분배계수 (octanol-water partition coefficient) 15. 산화환원전위 (redox potential) 16. 라디칼 형성도 (radical formation potential)

*자료 : 나노 안전성 연구에 대한 필요성 및 연구 방향, 권혁상 외 1인, 화학세계 (2013.3)

- 세계 나노융합시장은 연평균 18% 수준으로 성장, 2020년에는 약 2.5조달러 규모에 이를 것으로 전망되며, 국내 기업의 세계시장 점유율은 4.5% 정도로 나노 기업 수 및 제품 수가 증가하는 등 산업의 외연이 확장되는 추세이나, 나노 안전성 등 사회적 수용성 문제에 대한 기반이 취약한 실정임
- 국내 시장에 다양한 나노 기술 응용제품이 유통되는 상황에서 소비자들은 나노 기술에 따른 기술 혁신 효과에 대한 기대와 함께 잠재적 위해성에 대한 우려를 가지고 있으나, 전 세계적으로 나노물질의 유해성을 명확히 판단해 줄 수 있는 주체가 없는 상황임
- 실생활에 활용되는 CNTs의 경우, 나노물질의 상반된 연구 결과가 보고되고 있으며, 이에 대한 정확한 평가를 위해 표준화된 물리·화학적 나노특성 분석 및 독성평가 기술 확보가 요구되는 실정임
- 나노 기술 관련 세계 시장이 향후 10년 이내에 급성장할 것이라는 전망이나, 안전성이 확보되지 않으면 산업 자체가 존폐 위기에 직면할 수 있음

〈표 V -2〉 나노물질에 대한 상반된 독성평가 연구 결과

나노 안전성 관련 부정적 보고	나노 안전성 관련 긍정적 보고
2003년 듀폰사 폐조직에 CNT 주입, 15% 즉사 2003년 NASA CNT가 서로 뭉쳐 폐조직 손상 2004년 듀크대 C60 어류 뇌 치명적 보고 2006년 텍사스대 혈액순환계 잔류 (간) 2007년 혈액암 유발 가능성 보고	2006년 쥐 정맥에 CNT 주입, 체내 축적 안됨 2006년 토끼 혈액에 CNT 주입, 단백질 변화 없음 2006년 CNT 세포독성이 실험적 오류에 기인함 2007년 CNT 독성이 금속촉매 불순물에 기인함 2007년 CNT 독성이 ROS 불순물에 기인함

*자료 : 나노 안전성 연구에 대한 필요성 및 연구 방향, 권혁상 외 1인, 화학세계 (2013.3)

■ 기존 콘크리트 비파괴 검사의 기술적 문제

- 콘크리트는 시간의 경과에 따라 내구성이 저하되므로 성능 평가가 매우 중요하며, 이를 위한 비파괴 성능평가 기술이 필수적으로 요구됨
- 기존 콘크리트에 적용하는 비파괴 성능평가 방법은 적용 목적에 따라 콘크리트 강도 추정을 목적으로 하는 평가 방법과 콘크리트 내부 상태를 조사하기 위한 평가 방법 두 가지로 대별됨.
- 현재 상용되는 콘크리트 성능평가 방법은 콘크리트 재료, 구조물, 평가 시 외부 환경과 작업자의 숙련도에 따라 평가 결과가 상이하게 되어 주관적인 해석이 이루어질 우려가 있음²

- 나노 소재를 활용한 콘크리트에 대하여 파괴 성능평가를 실시할 경우, 나노 소재의 특성 상 안전상의 우려가 있을 수 있으므로 비파괴 성능평가가 반드시 필요하며, 정밀한 성능을 평가하기 위해서는 신뢰성 높은 비파괴 검사법이 요구됨.



반전지 정전위 기법



슈미트 리바운드 검사 기법



전기저항 측정 방법

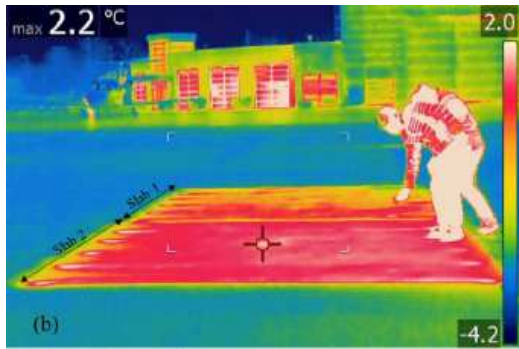
〈그림 V-2〉 콘크리트 비파괴 성능평가 방법

■ 나노 콘크리트 내부의 나노 소재 분산성 측정을 위한 비파괴 평가 방법의 개발 필요

- 나노 콘크리트의 경우, 콘크리트 내 나노 소재의 분산 정도가 콘크리트의 성질에 지대한 영향을 미치므로, 나노 콘크리트 내 나노 소재의 분산성 확보 및 확인은 필요불가결함
- 기존 연구되고 있는 나노 소재의 분산성을 평가하는 방법으로는 SEM, TEM 등의 이미지 분석 방법과 XRD 등의 화학적 분석 방법이 대표적이나, 이와 같은 평가 방법은 나노 콘크리트의 파괴를 동반하는 것이 특징임
- 나노 콘크리트의 성능 평가 시, 나노 소재의 유출 및 비산을 방지하기 위해 비파괴 성능 평가 방법을 활용하여 나노 콘크리트 내 나노 소재의 분산성을 평가하는 방법은 전무한 실정임

■ 나노 소재 특성에 따른 나노 콘크리트의 비파괴 손상 검지 기술 개발 필요

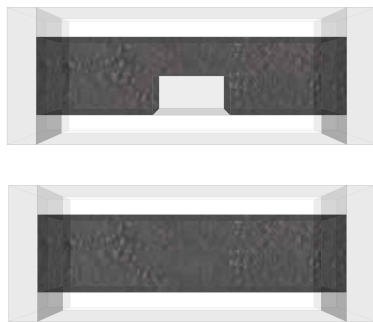
- 최근 콘크리트의 기능 다양화 및 성능 향상을 위하여 다양한 나노 소재를 콘크리트에 혼입하는 연구가 주목을 받고 있음
- Alizera 등(2018)은 나노 소재의 열적 특성에 주목하여 미국 Des Moines 국제공항 활주로에 나노 소재를 혼입한 콘크리트를 시공하였으며, 활주로의 외기온이 -4.2°C 일 때, 나노 콘크리트가 시공된 모든 활주로에서 상온의 온도가 기록되는 것을 확인함



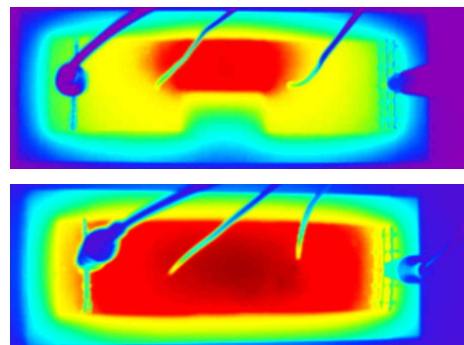
출처 : Development of Carbon Fiber-modified Electrically Conductive Concrete for Implementation in Des Moines International Airport

<그림 V -3> 나노 콘크리트 발열 슬래브를 시공한 Des Moines 국제 공항

- 콘크리트에 탄소계, 금속계 등과 같은 높은 전도성을 가진 나노 소재를 혼입할 경우, 나노 소재 특성으로 인해 콘크리트의 도체 성질을 향상시킬 수 있으며, 이를 활용함으로써 콘크리트 구조물의 결함 위치 측정이 가능함
- 뛰어난 전기적 특성을 가진 일부 나노 소재를 콘크리트에 혼입할 경우, 콘크리트 내 전류 흐름이 개선되는 것이 특징이며, 나노 콘크리트에 전류를 흘려보냄으로써 콘크리트 단면 공극을 따라 상이한 발열 양상이 나타나게 되어 콘크리트 내 균열 검지가 가능함



실험체의 단면도

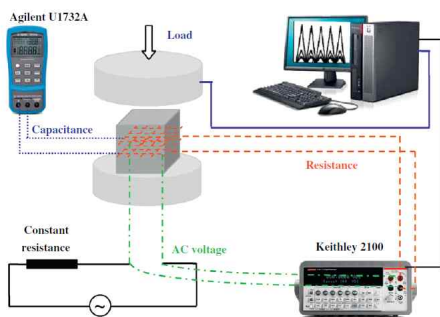


실험체의 열화상 이미지

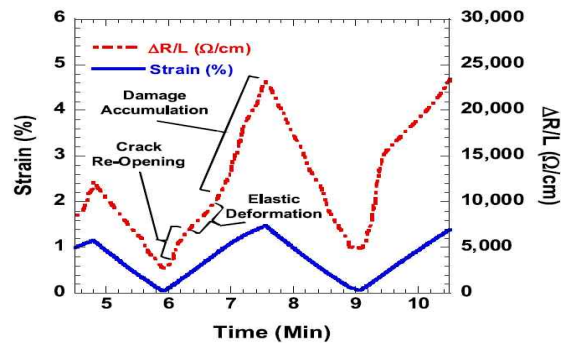
출처 : Lee, H., Kang, D., Kim, J., Choi, K., and Chung, W. (2019) "Void detection of cementitious grout composite using single-walled and multi-walled carbon nanotubes," Cement and Concrete Composites, Vol. 95, pp. 237-246.

<그림 V -4> 나노 콘크리트의 단면 공극에 따라 변화하는 발열 양상

- 또한 전기적 특성이 높은 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체의 경우, 외부에 가해지는 압력을 전기적 성능으로 변화시키는 압전 성능 또한 가지게 되어, 이를 활용함으로써 나노 콘크리트를 활용한 구조체의 변형률 등 손상 정도 파악이 가능함



압전 성능을 활용한 나노 시멘트 복합체



나노 시멘트 복합 센서를 활용한 균열 측정

<그림 V-5> 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 압전 성능을 활용한 결함 측정

1.2 기술개발 필요성

- 건설 시장으로의 나노 기술 적용에 따른 신뢰도 확보 및 나노 소재를 혼입한 콘크리트의 고부가가치화를 위해 나노 콘크리트에 대한 환경 및 인체 영향 평가와 나노 콘크리트의 성능평가 기술 개발 및 지침/가이드라인의 개발이 필요함
 - 우리나라의 나노 기술 연구개발 정책은 2001년 “나노 기술종합발전계획”을 수립하여 법정 부차원에서 본격적으로 추진되었으며, 현재 제4기 나노 기술종합발전계획이 추진 중에 있음
 - 미래창조과학부, 산업통상자원부 등 10개 부처의 유기적 협조 하에 산업화 촉진 핵심기술확보, 나노융합 확산 인프라 강화, 전략적 나노기초연구 추진, 국가 나노 기술 투자의 체계화, 나노안전 관리체계 확보 등 12개 주요과제를 수립하여 나노 산업을 지원·육성하는 중임
 - 제4기 나노 기술종합발전계획에서는 나노 기술의 안전성에 대한 문제를 12개 주요과제 중 하나로 선정하고 나노산업의 발전을 위한 제도화를 추진하고 있음
 - 나노안전성 관련 체계적 연구를 위해 나노물질 특성과 독성평가에 적합한 표준측정 기술개발 및 국제공인 평가 기술 확보·보급을 추진함과 동시에, 국제 표준화를 주도하기 위한 공동연구체계를 구축함
- ※ 유럽과 공동연구를 진행하고, 스위스와 공동연구센터를 운영
- 나노안전 규제 대응을 위한 기업지원체계를 구축하여 가상(virtual) 조직 형태의 나노 제품평가 지원센터를 운영하고 국내기업의 해외시장 진출을 위한 현지 거점 센터를 구축함
- ※ 성능(전자부품연 등 전문연구소, 나노랩), 안전성(GLP인증기관, 나노안전 기술지원센터) 평

가기관을 연결하여 기업지원 서비스를 제공 운영

- 표준측정기술을 활용하여 나노 소재 특성 DB 구축(2017 ~), 나노제품 DB 구축(2016~), 독성 DB, 환경평가 DB와 통합제공(2017 ~)을 계획하고 추진하고 있음

※ 나노물질의 잠재적 위해성으로부터 국민 건강과 생태계를 보호하고, 나노산업 발전 지원을 위한 제2차 나노안전관리 종합계획(2017 ~ 2021) 수립(* 16년)

- 제2차 나노안전관리 종합계획에서는 나노 안전관리 제도 선진화 및 안전성 평가 본격화를 목표로 3개분야 7개 추진과제를 설정하고 진행하고 있음

- 제1차 계획으로 확보된 나노안전 관련 기초자료 및 기술을 기반으로 2차 계획에서는 표준화된 나노물질 안전성평가기법 마련을 통한 나노안전관리 제도화 및 유통되는 나노물질 및 함유제품의 실효성 있는 안전관리 제도 도입을 추진하고 있음

- 나노 기술개발촉진법(19조)과 나노 기술개발촉진법시행령(17조)에서는 “나노 기술 영향평가”를 명시화하여 나노 기술의 사회적 영향에 대한 평가를 법률적으로 보장하고, 관련 연구가 진행되고 있음

※ “제19조(나노 기술 영향평가) 정부는 대통령령으로 정하는 바에 따라 나노 기술의 발전과 산업화가 경제·사회·문화·윤리 및 환경에 미치는 영향 등을 미리 평가하고 그 결과를 정책에 반영하여야 한다.”

※ “제17조(나노 기술 영향평가의 범위 및 절차) ①과학기술정보통신부장관은 법 제19조의 규정에 따른 나노 기술 영향평가를 위하여 관계중앙행정기관의 장과 협의하여 시행계획을 세우고, 나노 기술 관련 법인·단체 또는 기관으로 하여금 이를 실시하게 할 수 있다.”

- 나노 기술 독성/환경 검사 평가 및 기준 마련을 위하여 식품의약품안전처, 환경부, 국립환경과학원, 기술표준원, 표준연구원 등에서 지속적으로 연구가 진행되고 있으며, 관련 부처간 협력연계체제를 구축하며, 관련 법규 및 제도의 정비가 추진되고 있는 실정임

- 국외의 경우, 2007년 유럽의 신화학물질 규제 제도 도입 이후, 나노물질을 포함한 글로벌 화학물질규제에 대한 수위는 지속적으로 높아지고 있으며, 나노물질의 안전성 확립 및 나노안전 규제에 대한 대응 필요성이 높아지고 있는 상황임

- 유럽에서는 나노안전성 연구개발(NANoREG)을 통해 안전관리에 과학적 근거를 마련하고 있으며, 미국은 환경-보건-안전(EHS) 협력연구에 박차를 가하는 중임

※ NANoREG(2013. 3 ~ 2017. 2, 총 750억원): EU에서 나노물질의 규제적 관리를 위한 과학적 근거를 마련하고자 추진한 연구과제로 유럽, 한국 등 15개국이 참여하여 협력연구 추진

- 2005년에는 ISO(국제표준화기구) 산하의 나노 기술 표준화 기술위원회(ISO/TC 229)가 설치되고, 경제협력개발기구(OECD)에는 제로나노물질 작업반이 신설되는 등 각국이 나노물질의 안전성 확보를 위해 협력하고 있는 중임.
- 국내의 경우, 2014년부터 나노안전성기술 지원센터가 운영되고 있으며, 국제적으로 공인된 신뢰성 있는 나노안전 평가기준 마련을 위해 EU, 스위스, 미국, 중국 등과 협력 연구 추진 중임.
- 본격적으로 나노 기술에 초점을 맞춘 기술영향평가 사업은 2005년부터 시행되었으며, 과학기술기획평가원이 총괄하는 나노 기술 영향평가 사업은 산업경제 전문분과와 사회문화 분과로 추진체계를 구성하여 나노 기술의 산업적 측면과 사회적 측면을 조사 연구함
 - 과학혁신본부 내에 나노 기술을 체계적으로 총괄 조정할 수 있는 나노심의관 제도의 설치, 나노 기술 연구개발 투자규모 증대, 장기투자 시스템 강화, 나노 기술력 평가 시스템 구축, 나노랩 센터의 적극적 활용, 국방연구비 중 나노 기술에 대한 투자비용 증대 등을 제안함
 - 최종적으로 나노 관련 국가연구개발비 중 일정 비율을 할당하여 나노 기술의 안전성 연구, 나노의 사회문화적 연구, 나노 기술의 대중 이해 연구 등 나노 기술을 위한 기반연구 수행, 대국민 교육 및 커뮤니케이션 채널확보, 나노과학기술의 오용방지를 위한 제도적 장치 마련이 필요함을 촉구함
- 건설산업에서의 나노 기술 활용은 보다 높은 재료 성능과 새로운 기능 확보, 고부가가치화가 가능한 새로운 성장 동력원으로써 기대를 받고 있으나, 환경 및 인체에 대한 영향과 관련된 충분한 검토가 이루어지지 않을 경우, 나노 기술에 대한 신뢰는 얻기 힘든 상황임
 - 영국 산업안전보건협회(IOSH)는 건설산업에서 건설 및 철거 시 발생할 수 있는 나노물질에 대한 영향을 기존 문헌조사와 업계 관계자의 인터뷰 등을 통해 연구 보고서를 작성·공개하였으며, 나노 기술을 활용하기에 앞서 지침이 필요함을 강조하고 있음
 - 국내에서는 이전부터 건설산업 특히 콘크리트 분야에서 일부 활용하고자 노력을 기울이고 있으나, 활용할 수 있는 나노 소재와 구체적인 사용 범위 및 방법, 사용에 따른 인체 및 영향평가 관련 지침, 기준 등은 전무한 실정임.
- 나노 콘크리트의 성능은 콘크리트 내 나노 소재의 분산 정도에 많은 영향을 받음

며, 나노 콘크리트의 손상에 따른 콘크리트 내 나노 소재의 환경 및 인체로 영향을 미치는 정도에 대한 간접적 평가를 위해서도 나노 소재의 분산 정도의 파악은 필수적임

- 나노 콘크리트 내부 나노 소재의 분산성 평가 관련 연구의 대부분은 시편 일부를 파괴·채취하여 SEM, FE-SEM, TEM 등의 이미지로 분산성을 확인하는 연구임
- 나노 콘크리트 내 나노 소재의 분산성을 정량적으로 분석하기 위해 사용하는 방법으로는 X-선 회절분석법(XRD), 열 분석법(FT-IR), 라만 분광 분석법 등이나 이 또한 비파괴 방법이라고 하기는 어려움
- 나노 콘크리트 성능 평가 시, 나노 소재의 유출 및 비산 방지를 고려한 비파괴 검사에 의한 콘크리트 내 나노 소재 분산성 평가 방법은 전무한 실정임
- 높은 전도성을 가진 나노 소재를 콘크리트에 활용할 경우, 콘크리트 구조물의 비파괴 손상 검지가 가능하나, 이와 관련된 기술 정립은 아직 이루어지지 않은 실정임
- 높은 전기적 특성을 가진 나노 소재를 콘크리트에 혼입함으로써 콘크리트의 전도성이 향상되어 이를 적용한 구조물에 발생한 열화, 균열, 공극 등 손상 검지가 가능함

2. 기술개발 개요

2.1 기술개발 정의

- 본 기술은 나노 콘크리트의 안전성을 확보하기 위한 전과정 환경 및 인체 영향 평가 기술을 개발하고, 이와 함께 나노 콘크리트의 비파괴 성능평가 기술을 개발하는 것임
- 본 기술은 나노 소재를 혼입한 콘크리트의 안전성을 확보하기 위한 기반기술로 나노 콘크리트의 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술 및 인체영향 평가 기술, 비파괴 성능평가 기술을 개발하는 것임
- [나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가 기술] 나노 소재를 활용한 나노 콘크리트의 환경 안전성을 확보하기 위한 나노 콘크리트의 환경유해성 평가 기술 및 지침/가이드라인 개발
- 최근 지구온난화 및 기타 환경 파괴가 심해지면서 지속 가능한 개발을 전제로 환경 규제가 전 세계적으로 강화되고 있는 추세

- 환경규제 평가를 위하여 다양한 산업분야에서는 이에 대한 평가 수단으로 LCA를 활용하고 있음
- ※ 환경규제에 앞서 ISO(International Organization for Standardization)와 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 환경부하 발생에 따른 환경영향 파악을 위해 전과정 평가(Life Cycle Assessment; 이하 LCA)를 제시함
- 나노 기술의 경우, 오염물질의 검출, 예방, 제거와 같은 직접적 응용과 정화·산업 공정의 설계 및 친환경 제품의 제조 등 간접적인 응용을 통하여 환경개선에 활용될 잠재성을 지니고 있음
- 나노 소재 활용 제품들의 증가에 따른 환경영향 평가에 대한 중요도가 높아짐에 따라, EPA는 환경보호를 극대화할 수 있는 나노 기술의 진보 방안을 고려
- 또한, 환경에 유입된 나노물질에 대한 정부의 환경 프로그램과 이에 관한 연구 수요, 정책수립 등 다양한 접근법을 고려하고 있음

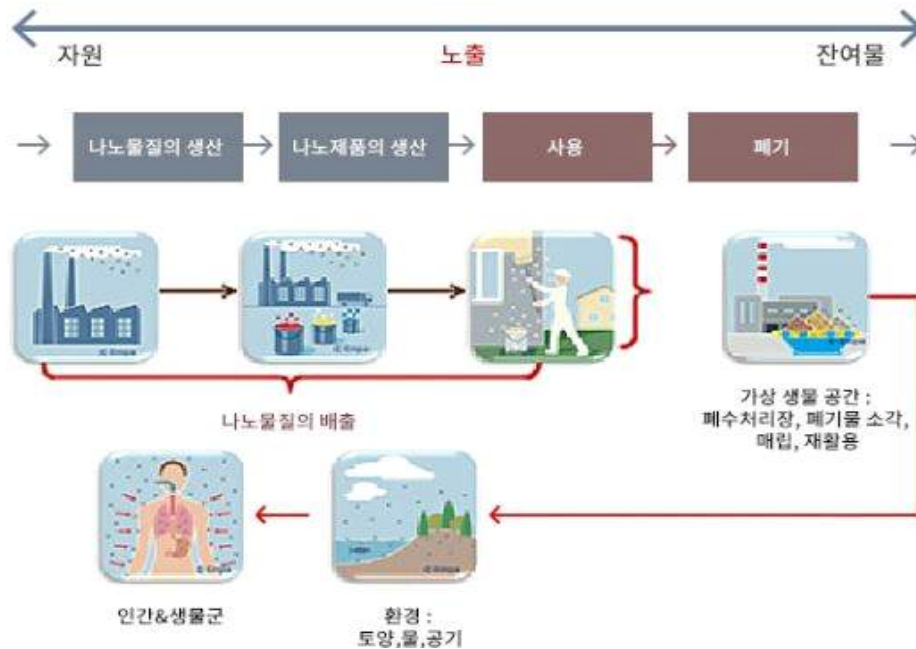


〈그림 V-13〉 전 환경 영향 평가 기술(LCA)의 개념

- [나노 콘크리트 인체영향 평가 기술] 나노 소재를 활용한 나노 콘크리트의 인체 안

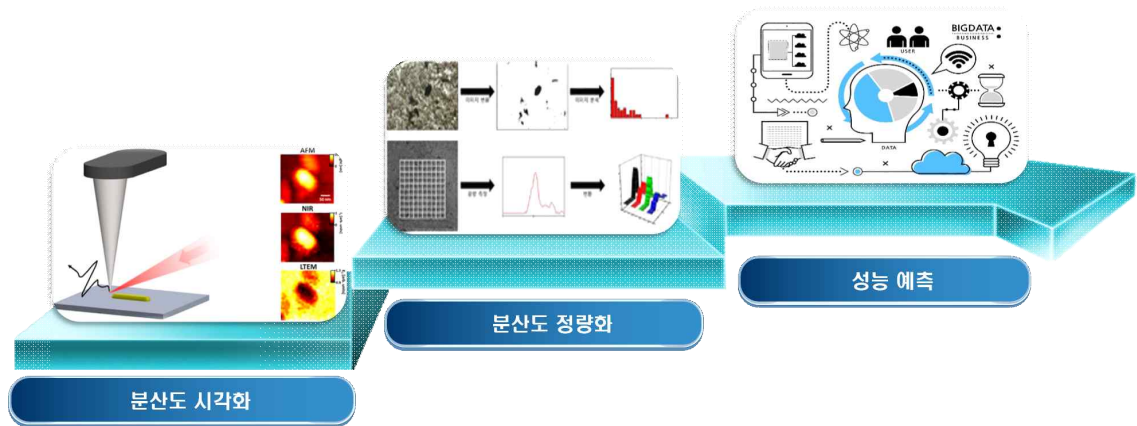
전성을 확보하기 위한 나노 콘크리트의 인체유해성 평가 기술 및 지침/가이드라인 개발

- 나노 소재의 활용이 최근 증가함에 따라, 환경 매질에서 나노 소재의 존재는 비례적으로 증가하는 추세이고, 결과적으로 인체에 노출된다는 논리가 기정사실화 되어가고 있음
- 나노 소재 활용 환경기술은 토양, 물, 대기, 연소 배출과 같은 다양한 환경 매질 내에 현존하는 화학적으로 복잡한 혼합물과 반응성이 높고, 의도적으로 제조된 나노물질의 직접적인 연관성과 관련된 인체 건강 문제는 알려져 있지 않은 실정임
- 나노 소재나 관련 혼합물에 대한 잠재적 인체 노출은 나노 소재의 제조, 사용, 재활용하는 과정에서 나타나는 노동자에 대한 노출, 작업 현장에서 제품의 제조, 사용, 재활용 및 폐기하는 과정 상 유출로 인해 나타나는 일반인에 대한 노출, 나노 소재가 포함된 상업적 제품을 사용하는 동안 나타나는 일반인에 대한 직접 노출을 포함함
- 나노 소재 및 관련 제품에 대한 잠재적 노출원, 노출 경로, 노출 과정 등에 대한 확인 후, 근로자의 노출을 최소화 할 수 있는 방법 논의 및 노출 예측이 가능한 도구 및 모델 설정이 필요함.
- 나노 소재의 인체 노출과 관련하여 과학적인 기작 연구는 많이 이뤄지고 있으며, 대부분 노출 경로 중 주로 흡입에 초점을 두고 있으나, 나노 물질의 사용 범위를 고려할 때 피부, 안구, 구강과 같은 다른 노출 경로에 대한 고려도 필요함.
- 또한 나노 소재에 대한 노출은 외부 기작이 흡착이나 다른 형태로 신체 외부에 화학적으로 접촉될 때부터 화학 물질과 신진 대사가 되는 물질이 표적 조직까지 이동 할 때까지 이루어지는 일련의 과정도 고려해야 함.
- 나노물질은 같은 성분의 더 큰 입자에 비해 물이나 지상의 유기체에 미치는 영향이 다르며, 나노물질의 독성 평가는 매우 복잡하고 여러 인자가 작용되어, 전하, 면적, 반응성과 같은 표면성질과 크기, 모양과 같은 다양한 물리화학적 성질에 잠재적으로 영향을 받는 것이 특징임.



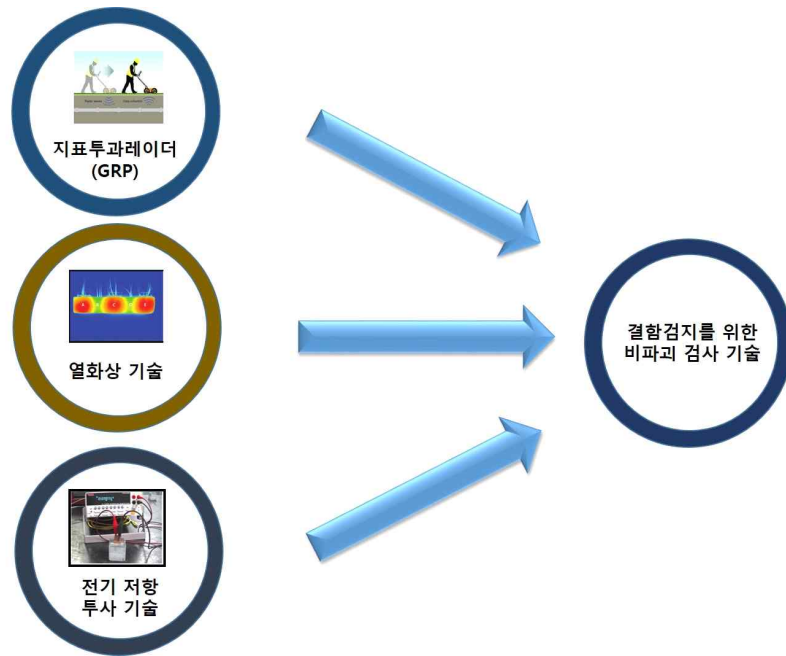
〈그림 II-14〉 나노 소재의 인체 영향 프로세스 예시

- [나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술 개발] 나노 콘크리트의 콘크리트 내부 나노 소재 분산성 평가 및 손상 검출을 위한 비파괴 검지 기술 개발
 - 나노재료의 경우 기존 재료에서 찾아 볼 수 없었던 뛰어난 기계적 물성, 높은 전도성을 보유하고 있지만, 낮은 분산성, 높은 점도로 인해 균일 분산의 중요성이 증가하고 있는 실정임
 - 나노 콘크리트 내부의 나노 소재 분산성에 대한 정량적인 평가 방법과 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이며, 대부분 TEM(Transmission Electron Microscope) 및 SEM(Scanning Electron Microscope) 등과 같은 전자현미경 이미지 분석에 의한 주관적인 평가를 실시하고 있으나, 이러한 평가 방법은 국부적 영역에 대한 정성적인 결과를 보여주는데 한계가 있음
 - 나노 소재의 균일 분산이 경량 고강도 나노 콘크리트의 핵심기술임을 고려할 때, 나노 콘크리트의 나노 소재 종류 별 기초 광학물성 측정 후 균일 분산을 위한 시각화 기술과 이를 이용한 나노 소재 분산성 평가 기술 개발은 반드시 필요함
 - 나노 소재의 특성을 이용하여 분산성을 평가하려는 연구가 최근 많이 이뤄지고 있으며, 본 연구가 비파괴 검사에 초점을 맞춘 것을 고려할 때 나노 물질의 여러 특성 중 광학적·전기적 특성에 중점을 두어야 함



〈그림 II-15〉 나노 소재의 분산성 평가 및 성능예측 프로세스 예시

- 콘크리트를 사용한 구조물은 시간이 경과함에 따라 열화, 결함 등의 발생으로 내구성이 저하되므로 안전 성능평가에 대한 중요성이 최근 대두되고 있으며, 이를 위해 결함 검지 비파괴 성능평가 방법이 일반적으로 활용되고 있음
- 일반적으로 콘크리트 결함을 검지하는 비파괴 성능평가 방법은 재료, 구조물, 평가시 외부 환경, 작업자 숙련도 등의 영향으로 신뢰성에 한계를 가지고 있으며, 신뢰성 높은 결함 검지를 위한 비파괴 성능평가 방법의 개발이 필요한 실정임
- 최근, 다양한 열적·전기적 성능을 가진 나노 소재를 활용한 새로운 건설재료의 개발이 검토되고 있으며, 이에 따라 나노 소재와의 융합을 기반으로 콘크리트의 다양한 성능에 대한 연구가 증가하는 추세임.



〈그림 II-16〉 나노 콘크리트 결함검지를 위한 비파괴 검사 프로세스 예시

2.2 기술개발 목표

- 본 기술은 단기적으로는 나노 콘크리트 개발에 있어 기반이 되는 환경 및 인체 유해성 평가 기술과 비파괴 검지 기술을 확보하고, 장기적으로는 나노 콘크리트의 실용화 및 해외시장 진출을 위한 지침/가이드라인을 제시하는 것을 목표로 함
- 나노 콘크리트의 실용화를 위한 환경 및 인체 영향 평가 기술 개발을 통하여 나노 콘크리트 사용에 따른 사용자의 안전성과 신뢰성 확보
- 나노 콘크리트의 콘크리트 내 나노 소재 분산성 평가 기술 및 열화, 손상 등 비파괴 검지 기술 개발 등 비파괴 성능평가 기술 개발을 통한 선도적인 원천기술 확보

개발기술	기술개발방향	성능 목표
나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술	- 콘크리트용 나노 소재에 대한 환경거동 및 노출 평가 모델 개발 - 나노 콘크리트용 각종 나노소재별 환경영향 물질목록 (Life Cycle Inventory Database; 이하 LCI DB) 개발 - LCI DB 기반 나노 콘크리트 LCA 분석 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 대한 환경유해성 및 환경영향 평가 지침/가이드라인(안) 개발	- 환경거동 및 노출 평가 모델 - LCI DB 구축 - 전과정 환경영향평가 지침/가이드라인(안)
나노 콘크리트 인체영향 평가 기술	- 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정 시 나노물질의 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발 - 나노 콘크리트에 대한 나노물질의 검출/분석 및 인체영향 민감도 평가기법 개발 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 따른 나노물질의 인체유해성 및 인체영향 평가 지침/ 가이드라인(안) 개발	- 인체 노출 모델 - 인체영향 민감도 평가기법 - 지침/가이드라인(안)
나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술	- 전자기파 활용 콘크리트 내 나노 소재 3차원 시각화 기술 개발 - 나노 소재 3차원 시각화 정보 활용 나노 소재 분산성 평가 모델 개발 - 콘크리트 내 나노 소재 분산성 시각화 및 평가 가이드라인(안) 개발	- 콘크리트 내 나노 소재 3차원 시각화 기법 - 분해능 20μm 이하 - 나노 소재 분산성 평가 모델 - 콘크리트 내 나노 소재 시각화 및 분산성 평가 가이드라인(안)
	- 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 기술 개발 - 나노 콘크리트 검지 결함과 역학적 특성 관계 모델 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 평가 지침(안) 개발	- 비파괴 결함 검지 기법 - 체적대비 결함검출 신뢰도 85% 이상 - 비파괴 결함 평가 모델 - 결함 검지 평가 지침(안)

2.3 관련재료 기술의 차별성

■ 기존 기술과 각 요소기술의 차별성은 다음과 같이 요약할 수 있음

기술명	구분	본 기술	기존기술	차별성
나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술	환경거동 및 노출평가 모델	평가모델	없음	▪ 나노 콘크리트 제조 및 사용에 따른 나노소재의 환경 노출에 대한 평가 모델 제시
	LCI DB	DB	없음	▪ 나노 콘크리트용 각종 나노소재 별 환경 영향 물질목록 구축
	전과정 환경영향평가 지침/가이드라인(안)	지침/가이드라인(안)	없음	▪ 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가를 위한 평가 지침/가이드라인(안) 확보
나노 콘크리트 인체영향 평가 기술	인체 노출 모델	노출모델	없음	▪ 나노 콘크리트 제조 및 사용에 따른 인체 노출에 대한 모델 제시
	민감도 평가 기법	평가기법	없음	▪ 나노 콘크리트에 대한 나노물질의 검출/ 분석 및 인체영향 민감도 평가기법 제시
	인체영향 평가 지침/가이드라인(안)	지침/가이드라인(안)	없음	▪ 나노 콘크리트 인체영향 평가를 위한 평가 지침/가이드라인(안) 확보
나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술	시각화 기법	20 μ m 이하 분해능	30 μ m 이하 분해능	▪ 전자기파 활용 20 μ m 이하 분해능을 가진 콘크리트 내 나노소재 3차원 시각화 기술 개발
	분산성 평가 모델	평가모델	없음	▪ 나노 소재 3차원 시각화 정보 활용 나노 소재 분산성 평가 모델 개발
	가이드라인(안)	가이드라인(안)	없음	▪ 나노 콘크리트 내 나노소재 분산성 평가를 위한 평가 가이드라인(안) 확보
	결함 검지 기법	체적대비 결함검출 신뢰도 85% 이상	체적대비 결함검출 신뢰도 80% 이상	체적대비 결함검출 신뢰도 85% 이상인 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 기술 개발
	결함 평가 모델	평가모델	없음	▪ 나노 콘크리트 검지 결함과 역학적 특성 관계 모델 개발
	지침(안)	지침(안)	없음	▪ 나노 콘크리트 비파괴 성능평가를 위한 결함 검지 평가 지침(안) 확보

3. 국내외 기술개발 동향

3.1 해외동향

가. 관련 기술 현황

1) 최근 연구 동향

- 나노물질의 활용에 따른 환경 및 인체영향에 대한 연구는 다수 보고되고 있으며, 대부분 나노물질 노출에 따른 위해성에 초점이 맞추어져 있음
 - Aschberger et al.,(2011)은 유럽 REACH에서 규정한 화학물질의 위해성 평가 방법을 통한 나노물질 평가의 적절성을 알아보기 위해 4가지 종류의 나노물질(nano-Ag, nano-ZnO, nano-TiO₂, 탄소기반 나노물질)에 대해 기존 문헌자료를 이용하여 환경 및 인체 건강에 대한 위해성을 평가함
 - Maynard and Aitken (2007)은 나노물질의 인체 노출 잠재성이 가장 큰 경우는 원료 나노물질을 대량으로 다루는 산업체에서의 작업 과정일 것임을 보고함
 - Powers et al.,(2006)은 나노물질에 의한 독성 영향의 원인을 밝히기 위해 생물환경 안 · 밖에서의 물질의 특성에 대한 자세한 이해가 필요하다고 보고함
 - Thomas K. et al.,(2006)은 제조된 나노입자에 의한 건강 영향은 제조, 사용, 폐기, 회수, 비의도적인 유출에 의하여 발생되거나 화장품 또는 다른 의학적인 용도에 의해 발생될 수 있음을 보고함
- 나노물질과 환경 및 인체 사이의 상호 작용에 대한 복잡성을 풀어줄 방법으로 유망한 방법으로 전주기를 통한 접근법이 제시되고 있음
 - Savolainen et al.,(2010)은 제조 나노물질의 위해성 평가는 일반 화학물질과 유사하게 (1) 유해성 확인(hazard identification), (2) 유해성 특성(hazard characterization), (3) 노출 평가(exposure assessment), (4) 위험 특정(risk characterization) 의 네 단계로 구성됨을 보고함
 - 듀폰사 (DuPont, 2007)는 6단계로 구성된 나노물질의 위해성 평가 체계를 제안한 바 있으며, 이는 Savolainen의 설명과 유사하나, 연구 · 개발을 통해 새롭게 발표된 정보를 반영하여 반복적인 위해성 평가를 수행할 수 있도록 한다는 특징이 있음
- EU에서는 나노물질에 대한 안전성을 검토하기 위하여 대규모 프로젝트를 실시하고, 나노물질이 환경 및 생태계에 미치는 영향을 규명하고 있음

- NanoMILE (Engineered nanomaterial mechanisms of interactions with living systems and the environment) 프로젝트를 통하여 나노 물질의 완전한 생애주기 동안의 생태계 및 환경에 대한 상호작용 메커니즘을 규명하고, 안전 분류 프레임워크를 개발함
- DANA2.0 (Data and Knowledge on Nanomaterials) 프로젝트는 나노물질이 인간과 환경에 미치는 영향에 대한 관련 프로젝트를 수행하고 이에 대한 정보를 대중에게 제공함
- NANoREG (A common European approach to the regulatory testing of Manufactured Nanomaterials) 프로젝트는 나노물질의 위험성 평가도구와 의사결정 수단을 개발하고 나노물질 규제에 대한 유럽식 접근법을 제시함
- 나노 소재 중 하나인 CNTs의 분산특성을 분석하기 위해 전자기파를 이용한 분석방법이 제시되고 있음
 - Dadrasnia, E and Lamela, H. (2011)는 0.1~2 THz의 주파수 범위에서 THz 시간영역 분광법을 활용하여 SWCNTs의 광학 및 전기적 특성을 분석함
 - Jeon, T. I et al.,(2001)는 낮은 THz 주파수에서 3 THz 주파수까지 THz 시간영역 분광법을 활용하여 SWCNTs 및 MWCNTs의 분산을 측정함
 - Dadrasnia, E and Horacio (2012) 는 최대 6THz의 주파수 범위에서 시간 영역 분광법을 활용하여 나노 복합 필름의 전기 전도성과 분산방법에 대하여 연구함
- 나노 소재 특성을 이용하여 분산성을 정량적으로 평가하려는 연구가 진행되고 있음
 - Zhou, Y et al.,(2009)는 Photo Micrographic Method에 의해 두 cleavage 간의 거리를 측정하여 통계 분석 방법을 통해 CNTs 분산을 평가함
 - Kim, S. H et al.,(2009)는 주사열량 분석법(DSC)을 이용해 경화반응 시 발생하는 발열량 차이를 분석하여 이와 CNTs 분산성의 관계를 제시함
 - Salzmänn, C. G et al.,(2007)는 라만 분광법(Raman spectroscopy)을 이용해 서로 다른 분산제를 사용하여 제조된 SWCNTs 수용액의 분산을 평가함
 - Tyson, B. M et al.,(2011) 는 두 입자간의 자유 공간 (free-path spacing)을 측정하여 입자간의 거리를 통해 CNF의 분산성을 정량적으로 평가함
 - Smith et al.,(2019)는 X-ray micro-computed tomography(CT) 활용 Graphene 기반 재료의 분산도를 평가함

2) 관련 기술 보유 주체(기업, 연구기관 등) 현황

- 국제적으로 OECD(경제협력개발기구), ISO(국제표준화기구), IEC(국제전기기술위원회)를 중심으로 안전성 평가 및 국제 표준화 작업이 추진 중이며, UN 차원의 국제적 화학물질관리전략(SAICM)과 관련하여 2006년부터 3년 주기로 SAICM에 관한 국가 이행현황 점검 및 평가 등의 기능을 수행하는 화학물질관리 국제회의(ICCM)에서 나노 기술 및 제조나노물질에 관한 정책 이슈를 논의함
- ISO는 나노 기술 분야의 국제표준화 추진을 위해 229번째 전문위원회(ISO/TC229)를 신성하고, 2005년 제1회 전문위원회 총회를 개최하여 나노 기술 개발 이용의 촉진 및 사회 이해촉진 기여를 목적으로 국제표준화 활동을 개시함
- OECD는 국가간 교류 활동을 통해 나노 기술 영향에 대한 문제 해결과, 나노물질의 다양한 특징에 대한 표준화를 위한 연구를 진행 중임
- IEC는 미세전자기계시스템(MEMS) 분야에서 나노측정기술을 국제표준 기술로 정형화하기 위한 연구 활동을 진행 중임.
- 선진 각국에서는 나노 기술 관련 계획 및 부처를 신설하여 환경 및 인체영향에 대한 검토·연구를 수행 중임

〈표 V-6〉 세계 선도기술 보유 주체 현황

기관명	주요 내용
EPA (미국)	- 나노 기술의 환경 보건적 영향평가를 위해 적극적으로 참여 중 - STAR(Science to Achieve Results) 프로그램 등을 통해 나노물질의 위해성 파악을 위한 연구를 진행 중임
DG SANCO of EC (EU)	- 나노 기술 물질로 인한 인간과 환경에 잠재적 유해성, 노출 및 위험성 조사를 실시
AIST (일본)	- 나노 기술의 사회적 영향문제 및 안전성 평가 프로젝트 진행
NEDO (일본)	- 공업 나노입자 특성연구방법 개발, 유해성 평가방법 개발, 유해성 평가 및 적정 관리방안 구축 등 수행

- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술과 관련하여 다음의 연구기관들이 세계 선도 기술을 보유하고 있음

〈표 V-1〉 세계 선도기술 보유 주체 현황

기관명	주요 내용
NIST (미국)	▪ 나노 소재, 나노 기술에 대한 표준 물성 평가 기술 개발 ▪ 3차원 원소이미징 구면수차보정 투과전자현미경 구축 ▪ 주사프로브 현미경 나노역학 기술 개발 ▪ 나노 복합 재료의 측정 방법론 개발
ORNL (미국)	▪ 나노 소재 및 나노구조 분석 ▪ 구면수차보정 투과전자현미경 구축 ▪ 나노 소재를 이미지화하는 나노 측정기술 개발
Max Plank Institute (독일)	▪ 나노 소재 물성평가 기술 개발 ▪ 3차원 나노구조 측정기술 개발
National Institute of Material Science (일본)	▪ 나노 소재 물성평가 기술 개발 ▪ 나노구조 시뮬레이션 기술 개발
Kavil Institute of Nanoscience (네덜란드)	▪ 실시간 나노현상 관찰기술 개발 ▪ 3차원 나노구조 해석기술 개발

나. 관련 지재권 확보 현황

- 국외의 경우, 나노 콘크리트를 대상으로 하는 환경 및 인체영향 평가에 대한 특허는 검색되지 않음
 - 평가 기술은 공공의 성격을 가지고 있으므로 지재권 부여 대상이 되지 않음
- 나노 콘크리트를 대상으로 하는 비파괴 성능평가 기술과 관련된 지재권은 다음과 같음

〈표 V-1〉 국내외 관련 기술 특허 현황

특허(등록/출원) 번호	제목	출원인/국가	내용
CN 102495135	Pressure measurement and crack detection sensor based on nano carbon black and piezoelectric ceramic composite cement	Dalian University of Technology / 중국	▪ 나노 재료 세라믹 시멘트 복합재료를 이용하여 압력에 따른 손상 위치와 균열을 검측하는 기술
US 20160266086	CEMENT INTEGRITY SENSORS AND METHODS OF MANUFACTURE AND USE THEREOF	MICROMEM APPLIED SENSOR TECHNOLOGIES INC. /미국	▪ Nano-Electro-Mechanical System (NEMS)와 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)를 이용한 센서를 활용하여 구조 성능과 거동을 계측하는 기술

1) 기술개발 적용(활용) 사례

다. 기술개발 적용 사례

- 나노 콘크리트에 대한 별도의 환경 및 인체영향 평가에 대한 체계적인 연구 결과가 보고된 바 없음
- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가를 통한 콘크리트 내 나노 소재 분산성 평가 및 결합 검지 기술에 대한 기술개발 적용 사례는 보고된 바 없음

3.2 국내 동향

가. 관련 기술 현황

1) 최근 연구 동향

- 나노물질과 관련하여 식품의약품안전처, 환경부, 국립환경과학원, 산업통상자원부 등에서 환경 및 인체 유해성과 함께 나노물질의 독성에 대한 프로젝트가 진행됨
 - 정자영 등 (식품의약품안전평가원, 2015)은 나노물질 독성평가지험법 개발 탐색 연구를 통해 나노물질이 인체에 미치는 독성에 대하여 검토하고 평가시험법을 개발함
 - 조완섭 등 (동아대학교, 2013)은 대표 나노물질(TiO_2 , ZnO)을 대상으로 위해분석 방법을 연구하고 파일럿 스터디를 통해 나노물질 위해분석법 및 활용 방안을 제시함
 - 홍용석 등 (한국환경정책평가연구원, 2011)은 나노물질의 위해성 평가, 국내외 규제 동향, 관리방안을 중심으로 나노물질의 안전관리를 위한 제도화 방안에 대하여 보고함
 - 이종협 등 (서울대학교, 2010)은 나노물질의 모니터링 기법 개발 및 표준화, 나노물질 LCA 기법 개발, 위해성 평가 가이드라인 제시 등을 통하여 나노물질의 환경 노출·영향평가 및 관리 기술 확보에 대하여 보고함
- 건설재료와 관련하여 대부분 환경영향 평가에 대한 연구만 진행되었으며, 대표적인 연구는 다음과 같음
 - 양근혁 등(경기대학교, 2014)은 콘크리트 혼화제로 활용되는 고로슬래그가 콘크리트의 전과정에 미치는 환경영향에 대하여 정량적으로 평가하기 위한 분석과 함께 평가방법을 보고함
 - 김낙현 등(한양대학교, 2016)은 건축재료와 관련하여 LCI DB 기반의 공동주택 부위별 환경영향 평가 프로그램을 개발하고 이에 대한 적용을 검토함

- 고명진 등(인천대학교, 2015)은 주상복합 건물에 투입되는 건축자재와 관련하여 LCI DB를 구축하고 이를 검토함
- 최두성 등(청운대학교, 2013)은 건설 폐기단계에서 발생하는 CO₂량을 분석하고 이를 건설재료의 LCI DB 구축에 검토함
- 전자기파 활용 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 분석 연구가 진행되었으며, 대표적인 연구는 다음과 같음
 - 장진석 등(한국표준과학연구원, 2010)은 소형 CW Sub-THz을 이용한 Imaging시스템을 개발하고 3차원 비파괴 검사를 실시함
 - 김현영 등(철도기술연구원, 2016)은 탄소계열 나노 소재인 다중벽 탄소나노튜브와 그래핀옥사이드가 혼입된 시멘트를 테라헤르츠(THz) 전자기파 투과시험을 통하여 굴절률과 흡수율을 측정함
- 탄소계열 나노 소재의 분산성을 정량적으로 평가하려는 연구가 진행되고 있음
 - 윤도경 등 (성균관대학교, 2006)은 라만 스펙트럼을 통하여 개별화된 탄소나노튜브의 분산 정도를 평가하고, 흡광 스펙트럼을 이용하여 탄소나노튜브의 개별적인 분산 여부를 판단함
 - 이상복 등(한국기계연구원, 2010)은 Beer-Lambert식을 이용하여 탄소나노튜브가 첨가된 고분자 나노복합재료의 정량적 분산성을 평가함

2) 관련 기술 보유 주체(기업, 연구기관 등) 현황

- 국내의 나노 기술 관련 계획에서는 나노 소재의 안전성 평가에 초점을 맞추어 각 기관별로 환경 및 인체영향에 대한 검토·연구를 수행 중임.

주요 기관명	주요 내용
국립독성연구원	- 나노물질 독성기반 연구 사업 수행
환경부 화학물질과	- 나노물질의 안전관리를 위한 로드맵 수립
환경부 환경보건정책과	- 환경융합신기술개발사업 내 친환경 위해요소 안전관리 기술개발 대분야를 설정하고 구체적인 사업화 진행을 추진함
한국산업기술평가관리원	- 나노안전성 플랫폼 기술개발 사업을 통한 나노물질 안전성 평가·인증시스템 및 안전성 향상 설계기술 확보
나노안전성기술지원센터	- 나노물질의 특성과 생체영향에 대한 표준 측정기술의 개발, 표준물질의 개발 및 보급, 국제표준체계 확립 등을 추진

- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술과 관련하여 다음의 연구기관들이 관련 기술을 보유하고 있음

〈표 V-1〉 비파괴 성능평가 기술 보유 주체 현황

기관명	주요 내용
한국표준과학기술연구원	- 투과전자현미경을 이용한 나노입자의 분포 측정 방법 연구
한국비파괴검사협회	- 나노물질의 비파괴 검사 방법 연구

나. 관련 지재권 확보 현황

■ 지재권 확보 현황

- 국내의 경우, 나노 콘크리트를 대상으로 하는 환경 및 인체영향 평가에 대한 특허는 검색되지 않음
 - 환경 및 인체영향 평가 기술은 공공의 성격을 가지고 있으므로 지재권 부여 대상이 되지 않음
- 나노 콘크리트를 대상으로 하는 비파괴 성능평가 기술과 관련된 지재권은 다음과 같음

〈표 V-1〉 국내 관련 기술 특허 현황

특허(등록/출원) 번호	제목	출원인	내용
10-2019-0074425	전도성 모르타르를 이용한 콘크리트 내 균열 감지방법 및 장치	조선대학교	▪ 나노재료를 혼입한 전도성 모르타르를 활용한 콘크리트 내 균열 감지 기술
10-2013-0045030	전기적 성능을 갖는 시멘트 페이스트의 제조방법과 이 제조방법에 의해 제조된 시멘트 페이스트를 이용한 시멘트 구조물 제조방법	한국과학기술원	▪ 나노재료와 시멘트 페이스트의 복합체 제조 방법과 전기저항을 이용한 외부응력 감지 기술

다. 기술개발 적용(활용) 사례

■ 기술개발 적용 사례

- 나노 콘크리트에 대한 별도의 환경 및 인체영향 평가에 대한 체계적인 연구 결과가 보고된 바 없음
- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가를 통한 콘크리트 내 나노 소재 분산성 평가 및 결함 감지 기술에 대한 기술개발 적용 사례는 보고된 바 없음

라. 국외 및 국내 기술 수준 비교

■ 기술수준, TRL단계, 기술성숙도

- 나노 콘크리트가 미치는 환경 및 인체에 대한 영향의 메커니즘과 평가 체계를 연구한 사례는 없음.
- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가를 통한 콘크리트 내 나노 소재 분산성 평가 및 결합점지 기술에 대한 기술은 국내외 모두 기초 원천 단계에 있음

1) 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA)기술의 기반 구축

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	나노 콘크리트에 대한 전과정 환경영향평가가 전 세계적으로 진행된 바 없음	나노 콘크리트에 대한 전과정 환경영향평가가 전 세계적으로 진행된 바 없음
TRL단계	TRL3	TRL2
기술성숙도	실험단계	기초 연구단계
주요 성능	나노 콘크리트의 환경 영향평가	나노 콘크리트의 환경 영향평가

2) 나노 콘크리트 인체영향 민감도 평가 기술의 기반 구축

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	나노 콘크리트에 대한 인체영향평가가 전 세계적으로 진행된 바 없음	나노 콘크리트에 대한 인체영향평가가 전 세계적으로 진행된 바 없음
TRL단계	TRL3	TRL2
기술성숙도	실험단계	기초 연구단계
주요 성능	나노 콘크리트의 인체 영향 민감도 평가	나노 콘크리트의 인체 영향 민감도 평가

3) 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술 개발

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	나노 콘크리트의 분산성 및 결합 검출 등을 위한 비파괴 성능평가 기술 개발은 원천기술 개발 수준임	나노 콘크리트의 분산성 및 결합 검출 등을 위한 비파괴 성능평가 기술 개발은 원천기술 개발 수준임
TRL단계	TRL3	TRL2
기술성숙도	기초 연구단계	기초 연구단계
주요 성능	나노 콘크리트 내 나노 소재 분산성 비파괴 평가, 나노 콘크리트 비파괴 결합 평가	나노 콘크리트 내 나노 소재 분산성 비파괴 평가, 나노 콘크리트 비파괴 결합 평가

■ 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술의 주요 국가별 기술수준 및 기술격차 평균을 통해 건설 구조재용 나노 소재 활용 기술의 국내외 기술수준 비교

- 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술의 최고기술수준 보유국은 유럽인 것으로 나타나 총괄 최고 기술수준을 유럽으로 설정하고 미국, 일본, 중국, 한국의 기술수준을 비교
 - 2017년 기준 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술 관련 최고 기술수준 보유국은 미국으로 100%, EU는 92.0%, 일본은 93.8%, 한국은 66.5%, 중국은 59.7%로 분석
 - 또한 최고 기술수준 보유국 미국을 중심으로 EU는 0.8년, 일본은 1.1년, 한국은 4.2년, 중국은 5.8년의 기술격차를 보이는 것으로 분석
- 국내 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술의 기술수준 및 격차 모두 EU, 미국, 일본의 뒤를 쫓고 있으며, 중국을 앞서나가고 있는 것으로 분석
 - 우리나라와 최고 기술수준국인 미국과의 기술격차 추세는 확대 중인 것으로 분석



〈그림 V-17〉 국내외 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술수준 비교

- 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술이 도달 할 수 있는 이론적 상한치(최상의 발전상태, 궁극의 기술수준)를 100%로 했을 때, 현재(2017년) 및 5년 뒤(2022년)의 기술수준 비교
 - 2017년 기준, 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술의 최고기술국은 미국으로 73.1%이며, EU는 72.0%, 일본은 72.0%, 한국은 48.6%, 중국은 43.6%로 분석
 - 2017년 기준, 이론적 상한치에 이르기까지 필요한 기술개발 소요시간은 미국은 8.1년, EU는 9.0년, 일본은 9.3년, 한국은 12.4년, 중국은 14.0년으로 분석
 - 5년 뒤인 2022년에 나노 소재 기반 노블 콘크리트 기술의 기술수준은 미국이

74.5%, EU은 72.0%, 일본은 72.0%, 한국은 62.7%, 중국은 50.0%로 예상



〈그림 V-18〉 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술의 최고 기술수준 대비 국내외 기술수준 및 격차 비교

- 나노 소재 환경 및 인체영향 평가 기술의 국내 발전 단계는 기술이 개발되고 있는 개발기로 분석되며, 국외 발전단계는 신기술이 본격적으로 시장에 처음 진입하는 단계인 도입기와 신기술이 본격적으로 상용화되는 단계인 성장기 사이에 위치한 것으로 분석

4. 세부개발 내용

4.1 개발내용별 한계점 및 기술개발 방향

- 다양한 나노 소재의 개발과 함께 나노융합산업의 발전으로 나노물질에 대한 환경과 보건 및 안전성에 대한 문제가 주요 사회적·정치적 관점으로 대두되고 있는 실정임
 - 나노 기술의 특성 상 나노물질의 인체 및 환경 노출의 유해성에 대하여 불확실한 부분은 있으나 나노물질의 잠재적 위험성에 대한 의문점과 관심은 선진각국을 중심으로 증가하고 있음
- 전 세계적으로 나노물질의 유해성에 대한 명확한 판단기준을 확립하지 못하고 있는 실정임
 - 주요 선진국을 중심으로 나노물질의 유해성과 관리 방법에 대한 과학적 접근법 마련에 관심이 증가하고 있으나, 어느 국가도 정부 차원의 나노 안전성 판단이 가능하지 않아 현재는 예방적 차원의 안전조치를 위한 수준의 규제가 진행되고 있음
- 특히 건설산업 분야의 나노 기술 도입은 타 산업분야 대비 상대적으로 저조한 편으로 나노 소재 활용에 따른 건설재료의 안전성 검토에 대한 연구조차 전무한 실정임.
- 나노 콘크리트 개발을 위해 나노 소재 활용에 따른 나노 콘크리트의 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술과 인체 영향 평가 기술에 대한 종합적인 개발은 필수 불가결함

- 나노 소재 콘크리트 내부의 나노 소재 분산성 평가는 콘크리트의 성능 평가뿐만 아니라 나노 소재의 환경 및 인체 영향 평가를 위하여 필요하나, 비파괴 방식에 의한 분산성 평가 기술의 검토는 매우 미흡한 실정임
- 콘크리트에 전도성을 부여하여 콘크리트 내 결함과 같은 이상을 검지하는 기술은 일부 시도된 바 있으나, 다양한 나노 소재를 대상으로 체계적인 검토 사례는 없었으며, 나노 콘크리트의 건전성 평가 및 나노 소재의 외부 유출을 방지하기 위해 나노재료 특성에 입각한 비파괴 성능평가 기법의 개발이 절실함

개발내용	한계점	기술개발방향
나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술	- 나노 콘크리트를 대상으로 전과정 환경영향 평가를 적용한 바 없음 - 특정 제품의 전과정 영향평가는 이와 관련된 LCI DB와 함께 평가하므로, 기초 데이터가 반드시 필요하며, 국내에서는 26개 건축자재에 대해서만 LCI DB가 구축되어 있는 실정임	- 콘크리트용 나노 소재에 대한 환경거동 및 노출 평가 모델 개발 - 나노 콘크리트용 각종 나노소재에 대한 환경영향 물질목록 (LCI DB) 개발 - LCI DB 기반 나노 콘크리트 LCA 분석 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 대한 환경유해성 및 환경영향 평가 지침/가이드라인(안) 개발
나노 콘크리트 인체영향 평가 기술	- 나노 콘크리트를 대상으로 인체영향 민감도 평가를 수행한 바 없음	- 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정 시 나노물질의 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발 - 나노 콘크리트에 대한 나노물질의 검출/분석 및 인체영향 민감도 평가 기법 개발 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 따른 나노물질의 인체유해성 및 인체영향 평가 지침/ 가이드라인(안) 개발
나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술	- 콘크리트 내 나노 소재에 대한 분산성을 비파괴 성능평가 기법으로 시각화하는 기술은 개발된 바 없음 - 콘크리트에 전도성을 부여하여 결함을 검지하는 기술은 일부 시도되었으나 체계적으로 다양한 나노 소재를 대상으로 체계적인 적용사례는 없음	- 전자기파 활용 콘크리트 내 나노 소재 3차원 시각화 기술 개발 - 나노 소재 3차원 시각화 정보 활용 나노 소재 분산성 평가 모델 개발 - 콘크리트 내 나노 소재 분산성 시각화 및 평가 가이드라인(안) 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 기술 개발 - 나노 콘크리트 검지 결함과 역학적 특성 관계 모델 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 평가 지침(안) 개발

4.2 개발내용별 개발목표 및 주요내용

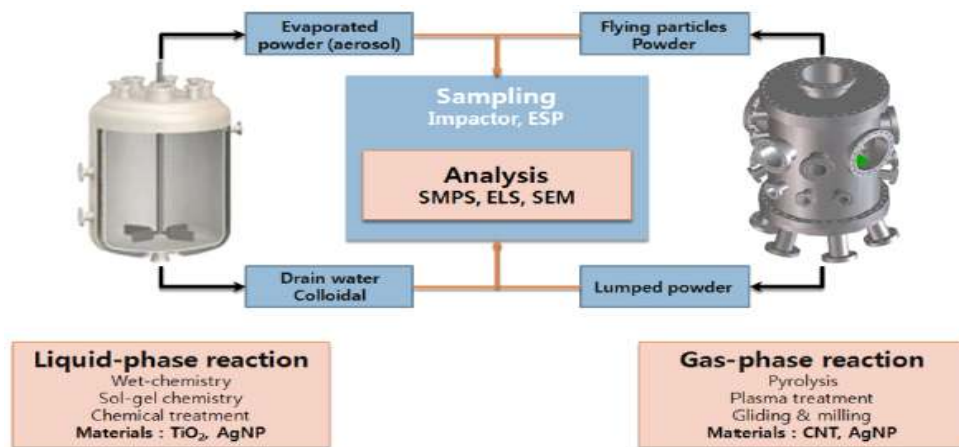
가. 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가 기술 개발

■ 기술개요

- 본 기술은 나노 콘크리트의 실용화를 위해 나노 소재를 혼입한 나노 콘크리트의 전과정 환경영향 평가(LCA)기술 기반 구축 및 원천기술을 확보하는 것을 목표로 함
 - 나노 콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델 개발
 - 나노 콘크리트용 각종 나노소재에 대한 환경영향 물질목록(LCI DB) 개발
 - LCI DB 기반 나노 콘크리트 LCA 분석 및 모델 개발
 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 대한 환경영향 평가 지침/가이드라인(안) 개발
- 나노 콘크리트의 환경유해성 및 영향을 확인하기 위한 환경거동 및 노출 평가 모델 개발 및 각종 나노소재 LCI DB 구축을 통하여 나노 콘크리트 전 과정에 대한 환경영향 평가가 가능하도록 하기 위한 기술임

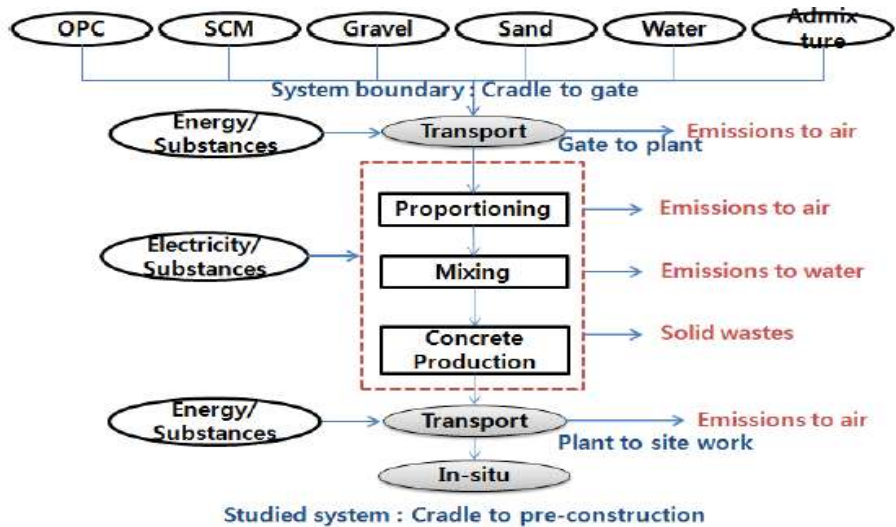
■ 기술 개발의 필요성

- 나노물질의 주변 환경거동 및 노출에 대한 검토는 다수 이루어져 있으나, 건설 산업 중 나노 콘크리트 제조와 관련된 나노물질의 환경거동 및 노출 검토는 전무한 상황임
 - 나노입자가 대기로 노출되는 사례는 주로 작업장에서의 노출과 환경 중으로의 노출로 구분되며, 후자는 광화학 반응을 유발할 수 있으므로 추가적인 물성 변화가 야기됨
 - 대기 노출의 경우, 배경 입자와의 결합 이외에는 노출된 입자 성상의 변화가 적고 시료 채취가 용이하여 입자 분석이 용이하나, 수계로의 노출은 이미 존재하는 다양한 유기물과 염 등과 반영하여 성상 및 형상이 변하므로 시료 채취 후에도 입자의 물성 분석에 어려움이 따름
- ※ 콘크리트 제조 시 나노 소재 혼합 과정에서 일정량의 나노 소재가 대기로 유출되는 것을 완전히 차단하는 것은 어려운 일이며, 레미콘 제조 후 폐기물 세척 시 수계로의 노출 또한 발생할 수 있어 이에 대한 검토가 필요함

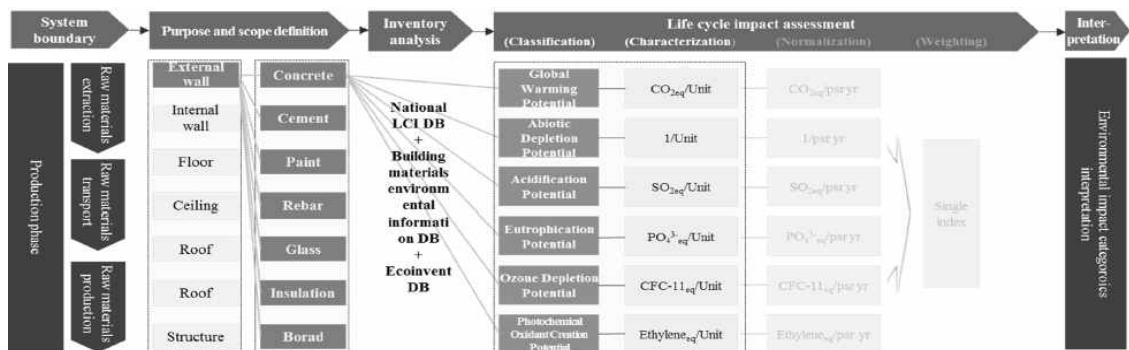


〈그림 V-19〉 나노 소재로 인한 대기 및 수질 오염 모니터링 체계

- 건설산업 중 나노 콘크리트의 전과정에 걸친 환경영향 평가를 위한 평가기법 및 모델은 전무한 상황임
 - 본 연구에서 LCA 수립 목적은 나노 소재의 콘크리트 배합에 따른 환경영향 크기를 평가하고 정량화하는 것임
 - ※ 통상 지구온난화, 자원 소모, 산성화, 부영양화, 오존층 영향, 광화학적 산화물생성 6가지 환경영향 범주별 기준물질 및 영향지수에 근거하여 건설재료의 환경영향을 산정함.
 - 건설재료에 대한 LCA 수립을 위해서는 LCI DB가 필요하며 우리나라에서는 국토교통부, 산업통상자원부, 환경부가 해당 DB를 구축하고 있으나, 현재 LCI DB는 총 403개로 이 중 건설재료는 26개에 불과함
 - LCI DB는 제품 1단위(기능단위 당)의 생산에 필요한 원자재의 채취 및 소재/부품 가공, 수송, 제품사용, 폐기(제품 시스템 전과정)까지의 제품 시스템으로 투입되는 자원(환경에서 채취한 자원, 에너지, 광물 포함)의 양과 제품 시스템에서 환경으로 버려지는 배출물(대기, 수계)과 폐기물의 발생량을 목록화한 데이터로서, 제품에 대한 전과정 영향평가를 수행하는데 반드시 필요한 기초데이터로 활용됨
 - 국내 LCI DB는 건설재료에 대해 그 수가 충분하지 않기 때문에 통상 연구자들은 일본(일본토목학회), 스위스(ecoinvent) 등 해외 LCI DB의 자료를 참고하나, LCI DB는 지역별로 상이하므로 해외 자료 사용 시 LCA 평가의 정확도가 떨어질 수 있으며, 나노 콘크리트에 대한 자료는 전무한 실정임
- 나노 콘크리트 LCA를 수행하기 위해 국내 환경영향 특성을 고려한 맞춤형 LCI DB의 개발이 필요한 실정임



〈그림 V-20〉 시스템 경계를 고려한 콘크리트 공정 흐름도의 예시



〈그림 V-21〉 환경영향 평가 프로세스



〈그림 V-22〉 LCI DB 개발 절차

■ 기술 개발내용

● 나노 콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델 개발

- OECD TG 기반 독성 시험법 적용 환경 유해성 평가 결과 보고서 작성
 - ※ 나노 물질의 예상 노출 경로를 고려하여 수생태 독성 battery test 시험종인 어류, 조류, 물벼룩 및 토양 독성 등 시험 선정
 - ※ OECD 가이드라인이 적용된 생태독성 등 환경 유해성평가 GLP 보고서 포함
- 나노 콘크리트 환경 노출 평가 모델 개발
 - ※ 입자 거동 주요 과정(흡착, 응결, 침착 등), 매체 내 물리화학적 거동 과정, 생물학적/무생물학적 분해 과정 등 검토

● 나노 콘크리트용 각종 나노소재에 대한 환경영향 물질목록(LCI DB) 구축

- 나노 콘크리트 전과정(Life Cycle) 분석
 - ※ 나노 콘크리트 생산에 필요한 원자재의 채취 및 소재/부품가공, 수송, 제품사용, 폐기까지의 제품 시스템 전 과정을 분석
- LCA의 첫 단계인 나노 콘크리트용 각종 나노소재의 환경영향 물질 목록(LCI DB) 개발
 - ※ 제품 시스템 전과정에서 투입되는 자원 (환경에서 채취한 자원, 에너지, 광물 포함)의 양과 제품시스템에서 환경으로 버려지는 배출물 (대기, 수계 등)과 폐기물 발생량 목록화

● LCI DB 기반 나노 콘크리트 LCA 분석

- LCI DB를 활용한 나노 콘크리트의 LCA 분석 및 평가
 - ※ 나노 콘크리트용 각종 나노소재별 LCI DB 활용 6가지 환경영향범주별 기준물질 및 영향 지수에 근거하여 건축 재료의 환경영향 산정

● 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 대한 환경영향 평가 지침/가이드라인(안) 개발

- 나노 콘크리트 실용화를 위한 전과정에 대한 환경유해성 및 환경영향 평가 지침/가이드라인(안) 수립

● (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

- 본 연구 주제는 핵심 성능을 정량적으로 언급하기가 어려움에 따라 개발 기술의 유무를 다음과 같이 제시함.

요소기술	성능지표	최고스펙		개발 목표 스펙
		국내	해외	
환경거동 및 노출 평가 모델	노출시나리오 별 환경 노출 평가	기존 일반콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델	기존 일반콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델	나노 콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델
LCI DB	6개 영향범주 등 모사	기존 일반콘크리트 관련 LCI DB	기존 일반콘크리트 관련 LCI DB	나노 콘크리트용 각종 나노소재별 LCI
LCA 모델	환경부하 모사	기존 일반콘크리트 관련 LCA 모델	기존 일반콘크리트 관련 LCA 모델	나노 콘크리트 LCA 모델
환경영향 평가 기준 수립	환경영향 평가 지침(안)	타 분야 환경영향 평가 모델	타 분야 환경영향 평가 모델	나노 콘크리트 환경영향 평가 지침(안)

나. 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 개발

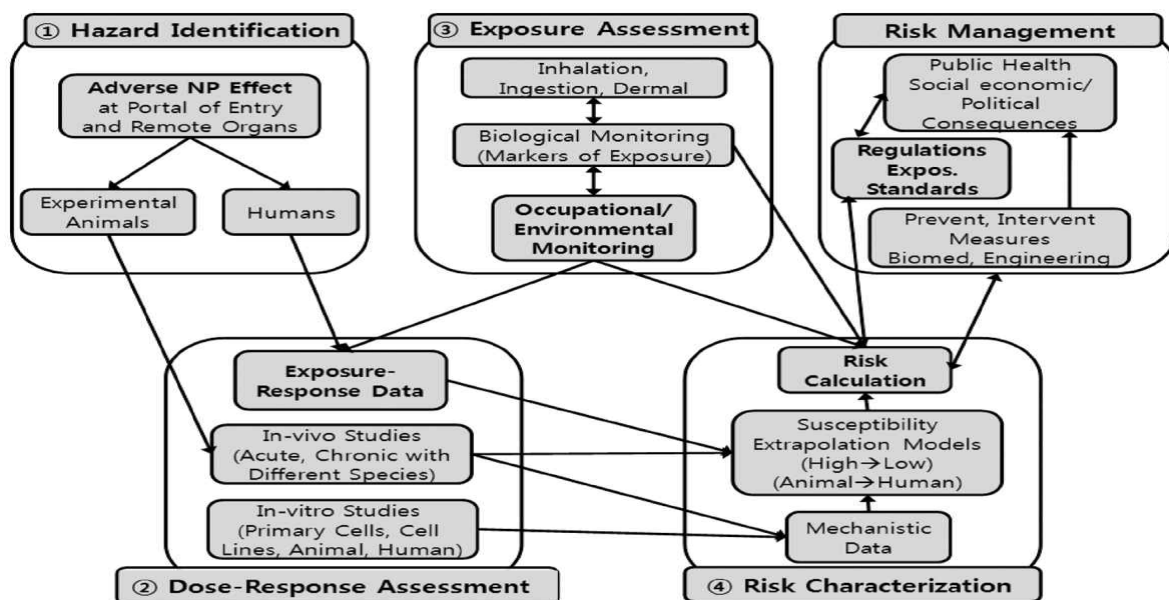
■ 기술개요

- 본 기술은 나노 콘크리트의 실용화를 위해 나노 소재를 혼입한 나노 콘크리트의 인체 영향 민감도 평가 기술 기반 구축 및 원천기술을 확보하는 것을 목표로 함
 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정 시 나노물질의 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발
 - 나노 콘크리트에 대한 인체 유해성 평가
 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 따른 인체유해성 지침/ 가이드라인(안) 개발
- 나노 콘크리트의 인체유해성 및 영향을 확인하기 위한 나노 콘크리트 전과정 나노물질 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발, 나노 콘크리트에 대한 나노물질 검출 평가 및 분석 을 통하여 나노 콘크리트 전 과정에 대한 인체영향 민감도 평가가 가능하도록 하기 위한 기술임

■ 기술 개발의 필요성

- 세계적으로 나노 소재의 인체에 대한 위해성이 환경 문제의 주요 이슈로 부각되고 있으며, 나노 소재의 위해성 관리를 위한 인체독성자료와 독성평가기법이 확립되지 않아 대책 마련이 시급한 실정임
- 특히 건설 산업에서 활용되는 나노 소재의 인체영향에 대한 문제가 해결되지 않는다면 나노 콘크리트 기술의 실용화와 제품에 대한 신뢰도에 문제가 발생하게 됨

- 나노 기술은 사회 전반에 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상됨에 따라 향후 나노 기술의 활용은 더욱 확산될 것으로 전망되나, 나노 소재와 그 부산물이 인체에 미칠 잠재적인 악영향에 대한 가능성은 높아지고 있음
- 나노 기술의 인체 유해성 평가에 대한 연구를 진행하기 위해 기존 문헌을 바탕으로 나노 소재에 대한 특성, 거동, 독성 정보와 나노 소재의 안전성 평가에 대해 제안된 연구 전략 등의 고찰 및 잠재적인 노출과 독성연구사례 등에 대한 검토가 필요함
- 나노 소재의 노출에 따른 유해성을 파악하고 이해하기 위해서는 나노 소재의 물리·화학적 특성의 이해와 물리적 거동을 파악하고 세포 생리화학적 생체 내 작용의 이해가 필요하며, 이를 바탕으로 인체에 미칠 수 있는 유해성에 대한 안전지침 확보는 필수 불가결함
- 일반적으로 기존 화학물질에 사용되고 있는 위해성 평가 방법은 유해성 정의, 사용량-반응 평가, 노출평가, 그리고 위해도 특성의 절차로 나누어져 평가되나, 작은 크기의 입자일수록 그 표면적이 넓어져 생체 조직에 대한 반응성과 그에 따른 독성이 증가하므로 나노 크기의 특성을 고려한 나노물질의 새로운 물리 화학적 성질과 이에 따른 독성 조사가 무엇보다도 중요함



〈그림 V-23〉 Risk assessment approach and risk management for nanomaterials

■ 기술 개발내용

- 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정 시 나노물질의 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발
 - 나노콘크리트 인체영향 평가 결과 보고서 작성
 - ※ 나노 콘크리트에 대한 stability test 및 solubility test 실시
 - ※ 나노 콘크리트에 대한 흡입, 섭취, 피부 노출 등에 대한 평가
 - ※ OECD 가이드라인이 적용된 생태독성 등 환경 유해성평가 GLP 보고서 포함
 - 나노 콘크리트 전과정에 따른 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발
 - ※ 나노 콘크리트 제조 과정 (원료 제작, 콘크리트 배합, 현장 이동 등), 사용 과정 (콘크리트 공사, 구조물 사용, 콘크리트 열화 등)에 대한 시나리오 검토
- 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 대한 인체영향 평가 지침/ 가이드라인(안) 개발
 - 나노 콘크리트에 혼입된 나노 소재의 예상 노출경로 분석
 - 나노 콘크리트를 제조하는 작업장에서의 해당 나노 소재의 노출 평가
 - 나노 콘크리트 전과정에 대한 인체유해성 평가 지침/가이드라인(안) 수립
- (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		개발목표 스펙
		국내	해외	
인체영향 평가 모델	노출시나리오 별 인체 노출 평가	타 분야 나노 소재 인체노출 평가 모델	타 분야 나노 소재 인체노출 평가 모델	나노 콘크리트 인체노출 평가 모델
인체영향 평가 기준 수립	인체영향 평가 가이드라인(안)	타 분야 인체영향 평가 모델	타 분야 인체영향 평가 모델	나노 콘크리트 환경영향 평가 기준

다. 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술 개발

■ 기술개요

- 본 기술은 나노 콘크리트의 실용화를 위해 콘크리트 내 나노 소재의 분산성 시각화 및 평가 기술, 나노 콘크리트의 결함을 검지하기 위한 비파괴 평가 기술을 개발하는 것을 목표로 함
 - 나노 콘크리트 비파괴 분산성 시각화 및 평가 기술 개발
 - 나노 콘크리트 비파괴 결함검지 및 성능 평가 기술 개발
- 나노 소재를 활용한 경량 고강도 나노 콘크리트의 건전성을 확보하기 위해 나노 콘크리트 내 나노소재의 분산성 평가를 위한 시각화 기술 개발이 요구됨
 - 건설용으로 검토되는 일부 나노 소재의 경우 기존 소재에서 찾아 볼 수 없었던 뛰어난 기계적 물성, 높은 전도성 등을 보유하고 있지만, 낮은 분산성과 높은 점도로 인해 균일 분산이 어려운 실정임
 - 나노 소재의 분산성에 대한 정량적인 평가방법과 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이며, 대부분 TEM(Transmission Electron Microscope) 및 SEM(Scanning Electron Microscope)과 같은 전자현미경 이미지 분석에 의한 국부적 영역에 대한 정성적이고 주관적인 평가가 이루어지고 있음
- 나노 콘크리트의 역학적 성능 확인 및 결함 검지를 위해 나노 소재의 특성인 전도성 등을 활용한 비파괴 기술 검사 및 지침/가이드라인(안) 개발이 필요함
 - 콘크리트를 사용한 구조물은 시간이 경과함에 따라 열화, 결함 등의 발생으로 내구성이 저하되므로 안전 성능평가에 대한 중요성이 최근 대두되고 있으며, 이를 위해 결함 검지 비파괴 성능평가 방법이 일반적으로 활용되고 있음
 - 기존 콘크리트 성능평가 기법은 콘크리트를 파괴하여 시편을 채취하고 성능을 확인하였으나, 나노 콘크리트의 경우, 파괴 시 나노 소재의 유출 및 비산이 우려되므로 나노 콘크리트의 제조 및 사용/유지관리 시 나노 콘크리트가 가진 성능평가를 위해 비파괴적인 비파괴 성능평가 기술 개발은 필요함

■ 기술 개발의 필요성

- 나노 콘크리트는 나노소재가 혼입된 콘크리트로 나노 소재가 콘크리트의 성능 향상에 기여를 하기 위해서는 콘크리트 내에 고르게 분산이 이루어져야 하나, 이를

비파괴적으로 평가할 수 있는 방법이 전무함에 따라 관련 기술의 개발이 필요함

- 나노 소재의 특성을 이용하여 분산성을 분석하려는 연구는 다수 보고되고 있으나, 대부분 파괴적인 성능평가 기술이 주를 이루고 있음
- 나노 소재의 균일 분산이 나노 콘크리트 성능 향상의 핵심 기술임을 고려할 때, 나노 소재 종류 별 기초 광학물성 측정 후 균일 분산을 위한 시각화 및 분산성 평가 기술 개발이 필요함
- 기존 콘크리트의 건전성 확인을 위한 비파괴 성능평가 방법은 비전도성인 일반 콘크리트가 주된 대상이었으나, 전도성을 지닌 나노 소재를 혼입할 경우 나노 콘크리트에 전도성이 부여됨에 따라 새로운 비파괴 성능평가 기술 개발이 가능함
- 일반적으로 콘크리트 결함을 검지하는 비파괴 성능평가 방법은 재료, 구조물, 평가시 외부 환경, 작업자 숙련도 등의 영향으로 신뢰성에 한계를 가지고 있으며, 신뢰성 높은 결함 검지를 위한 비파괴 성능평가 방법의 개발이 필요한 실정임
- 최근, 다양한 열적·전기적 성능을 가진 나노 소재를 활용한 새로운 건설재료의 개발이 검토되고 있으며, 이에 따라 나노 소재와의 융합을 기반으로 콘크리트의 다양한 성능에 대한 연구가 증가하는 추세임.

■ 기술 개발내용

● 나노 콘크리트 비파괴 나노 소재 분산성 평가 기술 개발

- 나노 소재 종류 별 기초 광학물성 측정 기술
 - ※ 흡수율(absorption coefficient), 굴절률(normal refractive index) 측정 등
- 전자기파(비접촉 방식)를 이용한 나노 콘크리트 3차원 시각화 기술
 - ※ (전자기파 방식) 흡수-반사 손실, 자기장, 전기장 등, (3차원 시각화 기술) Conjugate gradient method, 자외선 영역 흡광도 정량화 기술, 파장 영역 시각화 기술 등
- 나노 콘크리트 3차원 시각화 정보를 이용한 나노 소재 분산성 평가 기술
 - ※ 3D tomography 및 활용 나노 소재 분산성 평가 기술
 - ※ 콘크리트 유변학적 특성 활용 나노 소재 이동경로 예측 기술
- 콘크리트 내 나노 소재 분산성 시각화 및 평가 가이드라인(안) 개발

● 나노 콘크리트 비파괴 결함검지 및 성능 평가 기술 개발

- 전도성/비전도성 나노 소재 활용 비파괴 나노 콘크리트 성능 평가 기술

※ (전도성 나노 소재) 탄소나노튜브(CNT), 카본블랙(CB), 산화 그래핀(rGO) 등

※ (공극 검출 기술) 자기장, GPR, 열화상 기술 등

※ (균열 검지 기술) 전기저항, 전자기파 투사 기술 등

- 나노 콘크리트 결함 정도와 역학적 성능 상관관계 분석 기술

※ (상관관계 분석) 피에조저항효과, 열화상이미지 결함구조 분석 등

- 나노 콘크리트 비파괴 결함검지 및 성능 평가 지침(안) 개발

● (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		개발목표 스펙
		국내	해외	
나노 콘크리트 비파괴 나노 소재 분산성 평가 기술	나노 콘크리트 내 나노소재 분산성 평가	타 분야 비파괴 분산성 시각화 기술	타 분야 비파괴 분산성 시각화 기술	나노 콘크리트 비파괴 분산성 평가법
나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 평가 기술	결함/열화 비파괴 평가 지침(안)	특정 나노 소재 기반 비파괴 결함검지 기술	특정 나노 소재 기반 비파괴 결함검지 기술	다양한 나노 소재 기반 비파괴 결함검지 평가 기술

4.3 구성 기술 확보 전략

- “나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술 개발”은 크게 3가지 추진기술로 구분되며, 각 추진기술별 구성 기술 및 확보 전략은 다음과 같음.

〈표 V-7〉 핵심기술 확보 전략

과제 추진기술	핵심(구성) 기술	핵심 기술 확보 전략					
		공공 협력	민간 협력	자체 개발	해외 도입	국내 도입	기타
나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가 기술	나노 소재 특성 DB 구축	●		●			
	환경거동 및 노출 평가 모델 개발	●	○	●			
	LCI DB 구축	●		●			
	환경영향 평가 기준 수립	●		●			
나노 콘크리트 인체영향 평가 기술	인체영향 평가 모델 개발	●	○	●			
	인체영향 평가 기준 수립	●		●			
나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술	나노 콘크리트 비파괴 분산성 평가 기술 개발		○	●	○		
	나노 콘크리트 비파괴 결함검지 및 성능 평가 기술 개발		○	●	○		

●: 핵심역할, ●: 보통, ○: 부가역할

4.4 사업화 전략

- 기술 수립을 통한 나노 콘크리트 기술의 안전성 확보
 - 나노 콘크리트 기술은 고성능 및 다기능의 발휘가 가능하다는 점에서 특징이 있는 고부가가치 기술이나, 기술의 안전성이 확보되어 있지 않은 현 상황에서 건설 시공사의 입장에서는 사업화를 진행하기 어려운 구조임
 - 본 기술의 수립을 통하여 시공 이전의 설계 단계에서 이를 적용함으로써 기술의 안전성을 확보함으로써 본 기술을 사용했을 시 얻을 수 있는 장점을 부각시킴으로써 나노 콘크리트의 기술의 실용화를 앞당길 수 있음
- 기술의 규격화 및 체계화를 통한 신뢰성 확보
 - 나노 콘크리트 기술이 실용화되기 위해 필요한 사항은 기술의 신뢰성이며, 이를 확보하기 위해서는 나노 소재를 활용하기 위한 관련 기술에 대한 자세한 데이터 베이스

구축과 체계적인 규격 수립임

- 규격 선정을 위해서는 많은 연구 데이터 및 전문 분야의 의견 수렴은 필수이며, 이를 바탕으로 관련 분야 전문가 그룹을 설정하고 이후 엔지니어링-컨설팅을 추진함으로써 신뢰도를 확보할 수 있음
- 기존 콘크리트의 결함 검지를 위한 비파괴 검사는 작업자의 숙련도, 외부환경 등의 영향으로 신뢰성이 감소하지만, 나노 콘크리트의 전도성을 이용한 결함검지 비파괴 검사 기술을 통하여 높은 신뢰도가 확보될 수 있음

● 건설 나노 제품 및 기술 평가 컨설팅

- 향후 정부 및 민간기업의 나노 기술 개발 사업에서 본 연구의 경험과 노하우는 신제품에 대한 환경 및 인체영향에 대한 평가모델 개발의 벤치마킹 대상이 될 수 있을 것으로 보임
- 특히, 나노 콘크리트의 LCI DB 구축 기술, LCA 모델 개발 등은 향후 각종 나노 관련 건설재료 개발에서 선도적인 사례로 남을 것이며, 이에 대한 컨설팅 업무도 하나의 사업 분야로 자리 잡을 수 있을 것으로 예상됨

● 나노 기술 적용 건설구조물의 스마트화 기술을 위한 기반 확보

- 미래의 나노 소재를 활용한 건설 구조물의 스마트화 사업에서 본 연구의 나노 콘크리트 비파괴검사 및 성능평가 기술은 구조물의 실시간 진단 및 유지관리를 위한 프로그램 개발의 토대가 될 수 있을 것으로 판단됨
- 본 연구에서 제시할 나노 소재 분산성 평가 기법을 활용한 나노 콘크리트 성능예측 기술과 나노 콘크리트 결함 검지를 통한 성능분석 기술은 건설사업에 전반적으로 활용될 수 있을 것으로 예상됨

4.5 파급 효과

가. 시장경제적 파급 효과

- 본 기술은 재료개발에 관한 것이 아닌 개발 후 정량평가를 위한 기반 구축을 위한 것으로 이에 대한 단순 시장 경제적 효과를 평가하는 것에는 어려움이 있으나, 간접적인 경제효과로서 기술개발을 통한 수입대체 효과 발생할 것으로 전망
- 나노 콘크리트의 기술적 성장은 재료 자체의 기술 뿐 아니라 관련 설계기술의 발

전이 동시에 이루어져야 함.

- 현재 관련 소재 기술 뿐 아니라 환경 및 인체 영향성 평가에 대한 기반 기술이 부족한 상태로 제품을 실용화하기 위해서는 외국의 기준을 사용해야 하며 나아가 외국의 인증기관을 활용해야 하는 문제가 발생할 수 있음.
- 기술 개발 완료 후 해외 의존적인 기반기술의 국내 보유가 가능할 것으로 예상되며, 그 효과는 이후 당분간 지속될 것으로 예상됨.

나. 과학기술적 파급 효과

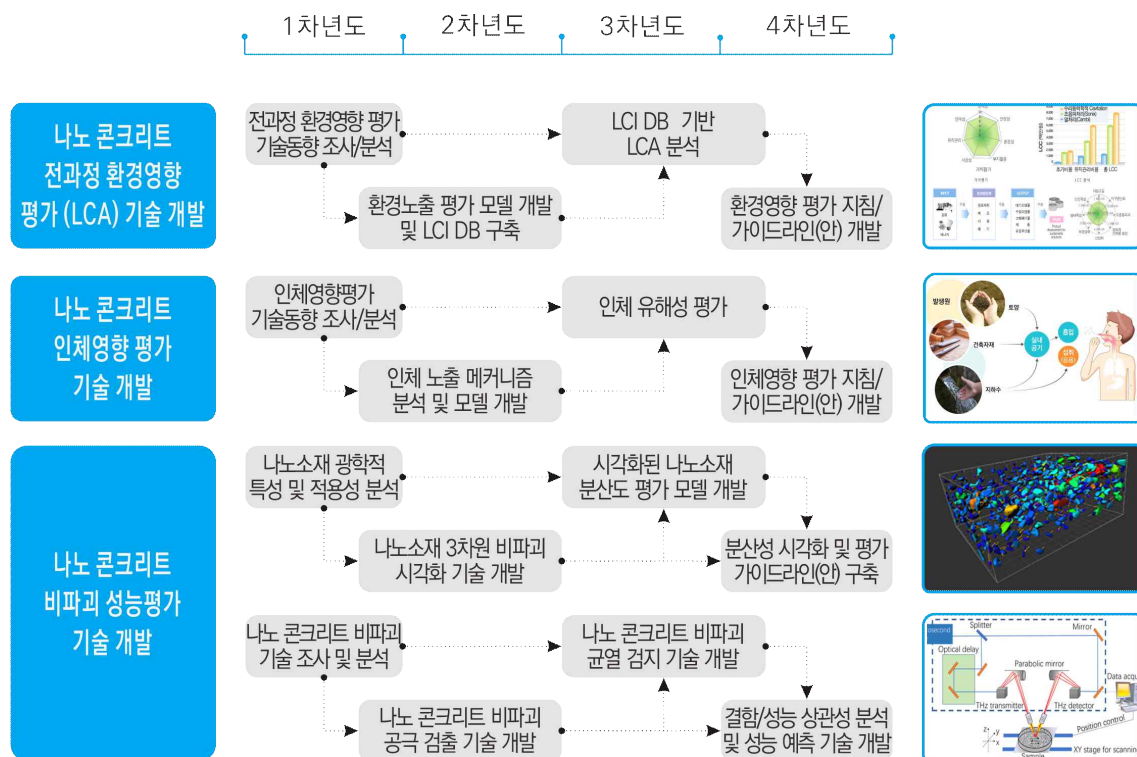
- 나노 소재의 ‘기반기술’ 개발을 통한 일반/건설소재분야 국가 R&D 및 과학기술 역량 제고
 - 우리나라의 건설 분야는 현재 세계 Top 수준의 기술이 없으므로, 본 기술 확보를 통해 세계 수준의 기술을 보유하는 건설엔지니어링 강국으로 도약 가능하고, 세계 최고기술 확보를 통한 세계적 수준의 톱 브랜드 기술 구축
 - 첨단 시멘트계 소재기술, 환경 및 인체영향 평가 기술 개발을 통해 새로운 기술 개척이 이루어짐으로써 원천기술 확보 및 톱 브랜드 창출로 국가 경쟁력 강화를 통한 국민의 자긍심 고취
 - 모방형·칸막이형 국가 R&D시스템을 창조형·개방형 R&D 시스템으로 진화시킴으로써 건설산업 분야 국가 R&D시스템을 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대

다. 사회문화적 파급 효과

- 나노제품에 대한 과학적이고 체계적인 평가 체계 구축을 통하여 나노제품에 대한 부정적이고 불안한 이미지와 인식을 불식시킬 수 있음
 - 콘크리트의 특성 상, 나노물질을 대량으로 사용하게 될 경우에 발생할 수 있는 환경영향 및 인체영향의 정도에 대한 정보가 부재하며, 동시에 콘크리트와 같은 고화체 내에서 나노물질이 유출되는 메커니즘에 대한 정보 역시 전무한 실정임
 - 나노 콘크리트의 물성, 환경 및 인체영향에 대한 평가로 제품에 대한 신뢰를 획득하는 것은 막대한 예산과 노력을 투입하여 개발한 신기술을 실제 사업화하는데 있어서 선행되어야 할 과제임

4.6 수행 로드맵

- “나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술 개발”은 ‘경량 고강도/고내구 나노 콘크리트 기술’에서 개발된 기술을 해당 산업에서 적용하는데 필요한 기반 기술임
- 향후 개발된 기술들을 통하여 나노 콘크리트 개발 초기부터 환경/인체영향 및 성능평가 기반을 구축하고 사전에 문제를 예측·보완할 수 있도록 평가모델, 모니터링 체계 구축 등이 선제적으로 이루어져야할 필요가 있음



〈그림 V-24〉 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술 수행로드맵

4.7 연차별/단계별 수행 목표 및 내용

〈표 V -8〉 연차별/단계별 수행 목표 및 내용

기 간	수행 목표	수행 내용
1차년도	- 나노 콘크리트 전과정 영향평가 (LCA) 기술의 기반 구축 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 기반 구축	- 기존 콘크리트 및 나노 콘크리트 관련 전과정 영향 평가 기술 동향 조사 및 분석 - 기존 콘크리트 및 나노 콘크리트 관련 인체영향 평가 기술 동향 조사 및 분석
	- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가를 위한 기존 기술 분석 - 나노 소재별 기초 광학 물성 분석	- 기존 콘크리트 및 나노 콘크리트 관련 비파괴 성능평가 기술 동향 조사 및 분석 - 나노콘크리트 내 나노소재 비파괴 시각화를 위한 콘크리트 내 나노소재 광학특성 인자 도출 및 신뢰성 확보
2차년도	- 나노 콘크리트 전과정 영향평가 (LCA) 기술의 기반 구축 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 기반 구축	- 나노 콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델 개발 - 나노 콘크리트용 각종 나노소재별 LCI DB 구축 - 나노 콘크리트의 나노 소재 노출 시나리오 구축
	- 전자기파 활용 나노 콘크리트 내 나노 소재 3차원 시각화 기술 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 공극 및 균열 검지 기술 개발	- 전자기파 투사기술 활용 기술 적용 나노 콘크리트 내 나노 소재 가시화를 통한 영상화 기법 개발 - 나노 콘크리트 내 공극 및 균열 검지를 위한 기술 개발 및 적합성 분석
3차년도	- 나노 콘크리트 전과정 영향평가 (LCA) 기술의 기반 구축 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 기반 구축	- 나노 콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델 개발 - 나노 소재 콘크리트의 전과정(Life Cycle) 분석 - 나노 콘크리트의 나노 소재 노출 메커니즘 분석 - 나노 콘크리트용 나노 소재 인체영향 민감도 평가
	- 나노 소재 3차원 시각화 활용 분산성 평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 결함 정도와 역학적 강도 상관관계 분석 기술 개발	- 3차원 시각화 기법 활용 나노 콘크리트 내 나노 소재 비파괴 분산성 평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 내 결함 정도와 나노 콘크리트 역학적 성능간 상관관계 분석 및 정밀도 향상 기술 개발
4차년도	- 나노 콘크리트 전과정 영향평가 (LCA) 기술의 기반 구축 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 기반 구축	- 나노 콘크리트 전과정(Life Cycle) 분석 - 나노 콘크리트 환경영향 평가 기준/가이드라인(안) 수립 - 나노 콘크리트의 나노물질 노출 모델 개발 - 나노 콘크리트용 나노물질 인체영향 민감도 평가 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 기준/가이드라인(안) 수립
	- 나노 콘크리트 내 나노 소재 분산성 정량적 평가 지침(안) - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 평가 지침(안)	- 나노 콘크리트 비파괴 나노 소재 분산성 시각화 및 평가 가이드라인(안) 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 평가 지침(안) 개발

4.8 연도별 투자 계획 및 소요 인력

■ 공공 성격의 기술 개발 내용으로 총 25.91억 원 / 4년 중 정부출연금 25.91억 원 (100%)으로 구성된 정부주도 연구로 추진함

● 연구개발비 세부내용 및 민간부담금은 실제 연구수행 주체가 결정된 이후, 참여 기업의 현황 및 연구자 제안에 따라 변경가능성 존재

〈표 V-9〉 연도별 투자계획

(단위: 억원)

		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
정부출연금		5.75	5.75	7.69	6.72	25.91
민간 부담 금	현금	-	-	-	-	-
	현물	-	-	-	-	-
합계		5.75	5.75	7.69	6.72	25.91

〈표 V-10〉 연도별 연구개발비

(단위 : 억원)

세목		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
직 접 비	직접비 소계	4.72	4.72	6.31	5.51	21.25
	인건비	2.59	2.59	3.46	3.02	11.66
	연구장비. 재료비	0.80	0.80	1.07	0.93	3.59
	연구활동비	0.63	0.63	0.85	0.74	2.85
	연구과제추진비	0.47	0.47	0.62	0.55	2.11
	연구수당	0.23	0.23	0.31	0.27	1.04
간접비		1.04	1.04	1.38	1.21	4.66
합 계		5.75	5.75	7.69	6.72	25.91

■ 총 소요인력은 각 연도별 인건비, 연구 인력 참여율, 1인당 연평균 인건비를 고려하여 결정함

- 각 연도별 인건비는 각 연도별 정부출연금의 45%로 설정함
- 연구 인력 참여율은 40%로 설정함
- 1인당 월평균 인건비는 박사급 6,338 천원, 석사급 4,860 천원, 학사급 3,249 천원으로 설정함

〈표 V-11〉 연도별 소요인력

(단위: 명)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
박사급	3	3	4	3	13
석사급	6	6	8	8	28
학사급	3	3	4	3	13
합계	12	12	16	14	54

4.9 연도별 성과목표

■ 연도별 연구목표, 연구개발비 등을 고려하여 각 연도별 성과목표를 설정함

〈표 V-12〉 연도별 성과목표

(단위: 건)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
국내논문게재	1	1	1	1	4
국제논문게재	1	1	2	2	6
국내 특허출원	1	2	2	2	7
국내 특허등록	-	-	2	2	4
해외 특허출원	-	-	-	-	-
해외 특허등록	-	-	-	-	-

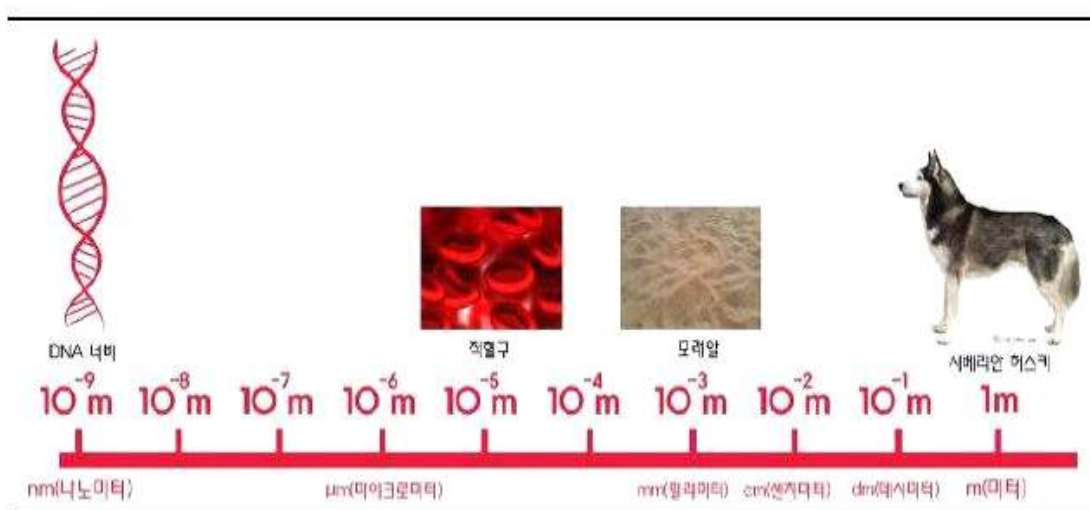
제2절 나노 소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술개발

1. 기술개발 배경 및 필요성

1.1 현황 및 문제점

■ 나노 기술의 정의

- 나노 (Nano)란 SI단위계 (국제단위계)에서 10^{-9} 를 나타내는 접두어로 난쟁이 (dwarf)라는 의미의 'nanos'에서 유래됨. 1나노미터는 (nm) 10^{-9} 미터이고, 원자 3~4개의 크기임
- 나노미터 (nm)는 1억미터의 10억분의 1로 물질 중 최소 구성단위의 원자 몇 개가 나란히 선 길이임. 일반적으로 나노 사이언스, 나노 기술에서 1나노미터에서 100나노미터 정도의 범위의 세계를 대상으로 하고 있음
- 나노기술 (Nano Technology)이란, 1나노미터에서 100나노미터의 영역에서 물질을 성장시키고, 가공 그리고 그 크기의 벌크·표면·계면의 구조나 거기서 발생하는 여러 현상을 원자·분자 레벨로 관측하고 이해하여 제어하며, 이러한 요소들을 조합하고 응용하거나, 다른 지식·기술과 조합하는 것에 의해 새로운 지식과 기능을 창출하려는 학술적·기술적 영역임

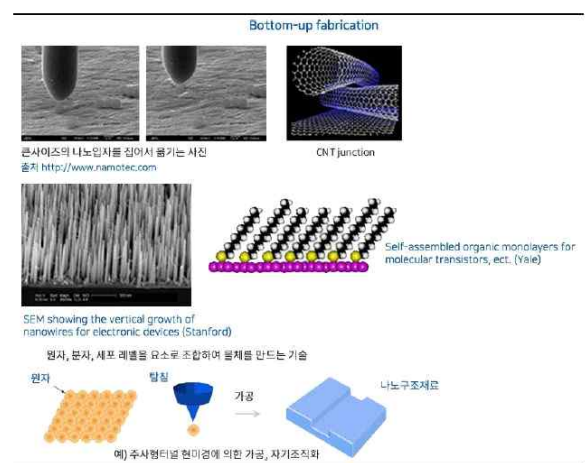
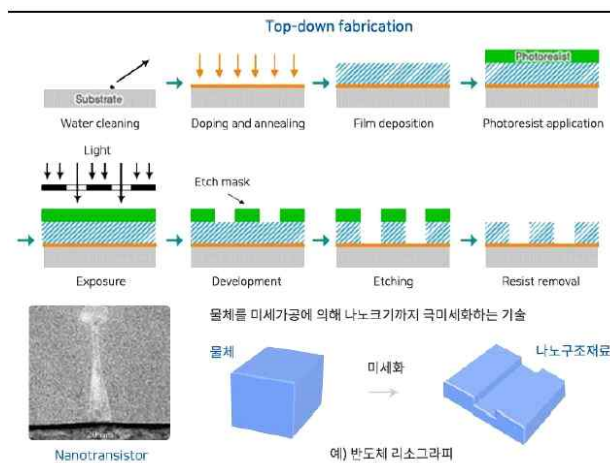


* 출처 : SK 하이닉스

<그림 V-25> 나노 (Nano), 마이크로 (micro), 밀리 (milli) 미터 크기의 재료 예시

■ 나노 소재 가공 기술은 대표적으로 Top-down 나노 가공과 Bottom-up 나노 합성으로 대별됨

- Top-down 나노 가공은 미세한 기구를 통해서 이미 제작된 대상을 나노미터 크기의 구조체로 인공적으로 형성하는 기술이며, 거시적 시스템에서 미시적 시스템으로 접근하는 방식임 (리소그래피, 전자빔 가공, FIB 가공 등)
- Bottom-up 나노 합성은 물질의 최소단위인 원자나 분자를 자유자재로 조작하여 원하는 기능, 구조체를 형성하는 기술이며, 미시적 시스템을 구성하여 거시적인 시스템으로 접근하는 방식임. (주사형 터널 현미경에 의한 가공, 자기조직화 등)



* 출처 : 나노종합기술원

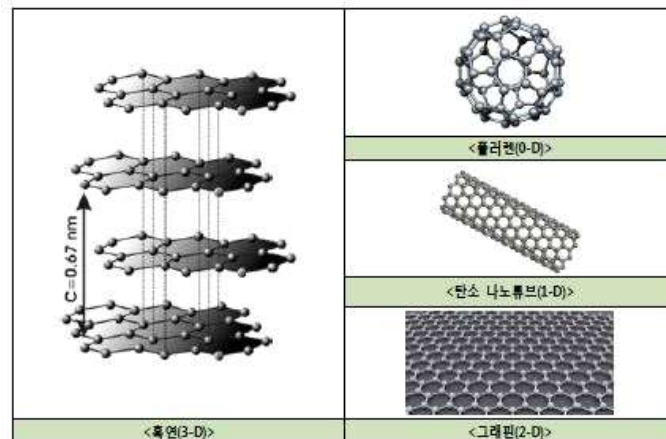
〈그림 V-2〉 Top-down 나노가공

〈그림 V-3〉 Bottom-up 나노형성

〈표 V-13〉 나노 소재 가공 기술의 접근 방식

형식	가공기술	접근법	특징
Top-Down	가공을 통해 나노미터 크기의 소재를 인공적으로 제조하는 기술	거시적 → 미시적	- 원하는 형상 및 기능을 갖춘 소재로 가공 가능 - 정밀도 확보 등을 위해 장비 및 공정 등에 고비용 필요 - 소재 제작이 간단하나, 균일한 입자를 얻기 어려움
Bottom-Up	물질 최소단위인 원자나 분자를 조작, 원하는 기능 및 크기의 소재를 제조하는 기술	미시적 → 거시적	- 원하는 크기의 나노 소재 제조 용이 - 제조 시 소요되는 공정 시간이 길어짐 - 제작방법이 복잡하나, 양질의 나노 입자를 얻을 수 있음

- Top-down 나노가공의 한계를 극복 및 보완하는 개념이 bottom-up 나노 형성이며, 2가지 프로세스의 융합 (Hybrid)도 중요함
- 나노구조의 대표적인 예로 금속과 반도체의 초미립자, 로탁세인 (rotaxane)등의 초분자, 제올라이트 등 나노 공간·빈틈을 이용한 소재, 그리고 0차원, 1차원, 2차원의 카본 나노 구조체로서 각각 C60 (풀러렌), CNT (카본나노튜브), 그래핀이 있음

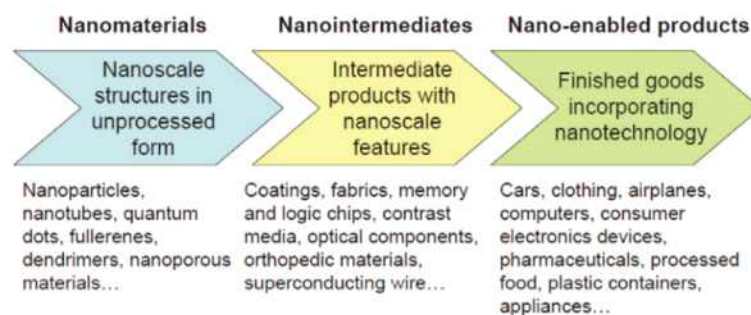


* 출처 : 2019 나노테크놀로지와 나노융합산업 기술개발 전략과 시장동향

<그림 V-4> 탄소 구조에 따른 분류

■ 나노기술의 밸류체인 단계는 다음과 같이 3단계로 구성됨

- (나노 소재 단계) 처리되지 않은 형태의 나노크기 구조의 소재
- (나노 중간물 단계) 나노크기 특징을 가진 중간 제품
- (나노기반 제품) 나노기술을 결합한 최종 제품

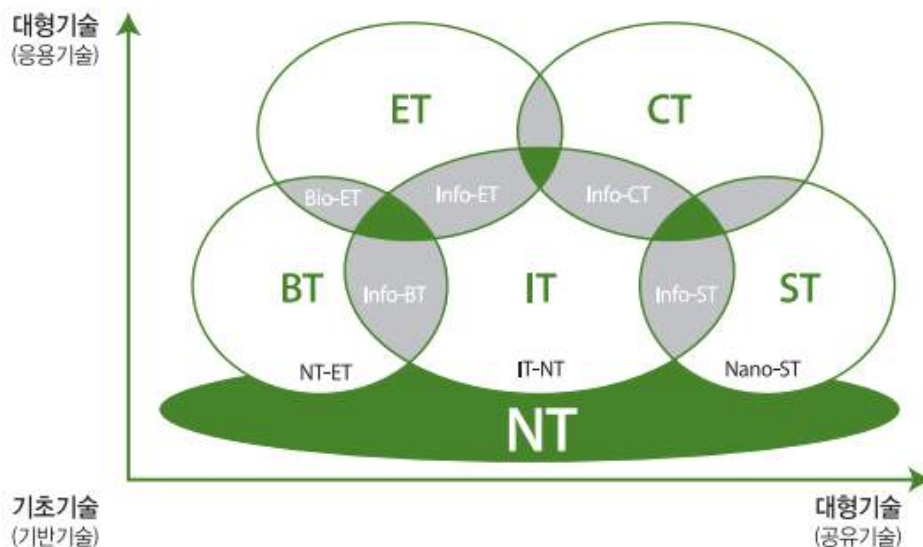


* 출처 : BCC Research (2010)

<그림 V-5> 나노기술 가치 사슬

■ 나노기술은 높은 기술집약도가 요구되는 분야로 재료, 전자, 에너지, 우주항공, 의학, 건설 등 거의 모든 산업분야에 응용이 가능하고 높은 경제적 파급성을 가지고 있는 것이 특징임

- 나노 소재는 초미세 상태에서 나노 구조체를 합성함으로써 에너지 효율의 극대화, 효과적 오염제거, 기계적 물성 향상, 다양한 기능 부여 등으로 부산물의 생성을 최소화 할 수 있어 환경 및 자연 친화성이 높은 것이 특징임
- 나노기술(NT)은 생명공학기술(BT), 정보기술(IT), 환경기술(ET), 우주항공기술(ST), 문화기술(CT) 등과의 기술 융복합을 통해, 혁신적인 소재, 부품, 시스템 구현으로 제조업의 경쟁력 강화 및 신산업 창출이 가능함



* 출처 : www.nanokorea.net

〈그림 V -6〉 나노기술과 타기술의 상호 관계

■ 나노 소재 기술은 나노미터 스케일에서 기존 재료를 제어·조합하거나, 새로운 물질구조를 합성·조합하여 물성이 현저히 향상되거나, 새로운 물성 또는 기능이 발현되는 소재 기술을 의미하며, 6T 산업 전반에 걸쳐 활용되는 소재기술을 포함함

- (나노 소재 기술) 나노 소재를 구성하는 가장 기본적인 형태로써 단독으로 쓰이거나 다른 형태의 나노 소재를 제조하는데 필요한 바탕이 되는 소재의 합성, 형상 및 특성 제어를 위한 기술
- (나노 소재 종류) 나노입자(분말), 나노선(막대, 튜브, 섬유), 나노판(박막), 나노기공 소재 및 나노벌크소재 등

■ 나노기술 제품의 세계시장 규모는 2013년도 229억 달러, 2014년도 260억 달러, 2019년도 642억 달러 규모로 성장이 예상되며, 향후 시장이 확대될 것으로 전망됨

- 나노기술 제품 중 나노 소재에 대한 세계 시장규모는 나노기술 관련 매출액에서 가장 큰 부분을 차지함
- 나노 소재 세계시장 규모는 2014년 206억 달러에서 2019년 527억 달러 규모로 성장할 것으로 예측되고, 연평균 성장률은 약 20.7%로 추산됨

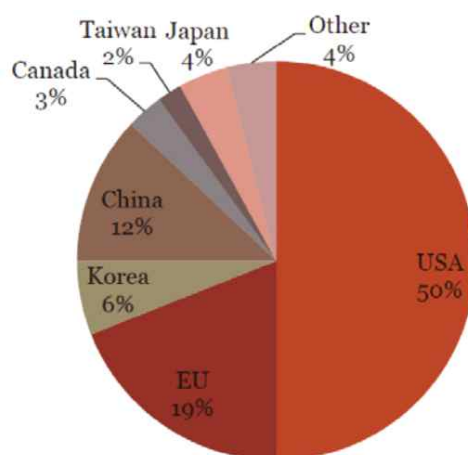
〈표 V-14〉 세계 나노기술 제품 시장 규모(2013~2019)

단위 : 백만 달러, %

Type	2013	2014	2019	CAGR(2014~2019)
Nanomaterials	18,0803.20	20,593.70	52,711.70	20.7
Nanotools	4,815.00	5,324.80	11,291.50	16.2
Nanodevices	39	42.5	183.4	34
Total	22,934.20	25,961.00	64,186.60	19.8

■ 나노 소재 수요는 북미 지역이 가장 크며, 아시아 지역이 가장 빠르게 성장하고 있음

- 중국, 한국, 대만, 인도 등에서 활발한 연구개발 투자가 이루어져, 향후 아시아 지역이 나노 소재 시장 성장을 주도할 것으로 예상됨
- 2010년 나노 소재 시장 중 미국이 전 세계 50% 시장을 차지하고, 중국 12%, 서유럽 10%, 한국 6%, 일본 4%, 캐나다 3%, 대만 2%를 차지함



* 출처 : Future Market, Inc.(2011)

〈그림 V-7〉 국가별 나노 소재 생산 (2010년 기준)

■ 나노 소재 시장은 전자, 건강치료, 에너지, 건설 등과 같은 새로운 응용분야에서 높은 수요가 전망됨

- 건설 분야에서 사용되는 나노 소재 수요는 2011년 6천만 달러에서 2021년 10억 달러로 16배 이상 증가할 것으로 예상되며, 연평균 성장률은 25.89%로 높은 수준임

〈표 V-15〉 세계 나노 소재 및 건설용 나노 소재 시장 수요 규모

단위 : 백만 달러, %

구분	2001	2006	2011	2016	2021	CAGR
전자	92	290	710	1,970	4,400	21.33
건강치료	190	390	670	1,500	3,700	16.00
에너지	1	17	145	500	2,000	46.24
건설	10	33	60	200	1,000	25.89
기타	47	160	445	1,330	4,400	25.48
합계	340	890	2,030	5,500	15,500	21.04

* 출처 : The Freedonia Group, Inc.(2012)

■ 건설 분야에서의 나노기술 활용은 증대되고 있으며, 다양화 하고 있는 실정임

- 건설 분야에서 나노 소재가 적용된 분야는 개념적 단계에서 사업화 단계까지 다양함
 - (나노 소재 적용 건설분야) 콘크리트 성능향상, 구조물 건전성 모니터링, 표면 항균 물질, 자기 표면 세정, 단열용 실리카 에어로젤 등

〈표 V-16〉 나노 소재 활용 분야 및 종류

분야	활용 부위	활용 목적	대표적 활용 나노 소재
콘크리트 성능향상	콘크리트 구조물	- 구조물 효율 및 강도, 내구성 향상 - 산업폐기물 활용, CO ₂ 감소	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , CNTs, CNFs, Graphene, CNC, CNF, Nano-Fiber, Nano-Clay, Nano-Slag, Nano-Cement 등
구조물 건전성 모니터링	콘크리트 구조물	- 구조물 센서	Nano-Polymer Film, CNTs, CNFs, Fe ₂ O ₃ 등
표면 항균 물질	건축 내장재	- 새집 증후군 완화 - 병원균 확산 제어	Ag, ZnO, Cu, Au 등
자기 표면 세정	건축 외장재	- 외장 표면 유지	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ 등
단열용 실리카 에어로젤	건축 내장재	- 건축물 단열성능 향상	Aero-gel, Polymer nano-foam 등

■ 스웨덴 및 영국의 미래조사 보고서에서는 건설산업을 나노기술의 성공적인 적용이 가능한 산업 중 하나로 지목하고 레미콘과 콘크리트 제품 분야는 10~15년 내에 나노기술에 의해 영향을 받을 것으로 예측함

- 건설산업은 대량으로 소비되는 특성, 장기간의 수명을 보장해야 함에 따른 보수적 특성이 강한 산업 분야임
- 유럽의 경우, 건설산업 종사자의 75%가 건설산업 분야와 나노기술과의 연관성을 인식하지 못한다는 연구 결과가 보고되기도 함
- 건설산업에서 혁신의 필요성은 나노기술의 활용을 불가피하게 하여, 유럽, 미국, 일본 등에서 관련 기술이 확대되고 있는 실정임
- 유럽위원회(European commission)는 나노기술이 건설분야에 큰 영향을 미칠 것으로 판단하여 ‘NANOCONEX’ 라 불리는 연구추진용 대형 투자를 실시하고, 나노기술은 토목건축기술 분야의 선진화에 중요하게 활용될 것이라 식별함
- 유럽의 ETP(European Technology Platform) 중 하나인 ‘NanoFutures’에서는 여러 산업 전반의 미래혁신을 위한 핵심 기술인 나노기술이 모든 분야에서 강력한 부가 가치를 가지고 시장 선두 주자 역할을 할 것이라 함
- 장기적인 활동 범위 내(2025년 이상)에서 2020년까지 초점을 맞춘 실행 계획을 수립하고, 교차분야 간 연구, 기술 및 혁신 문제와 관련하여 핵심기술을 도출, 운영하고 있음
- 지속 가능하고 안전한 나노기술 구현을 위한 솔루션 및 상용화에 대한 광범위한 사회·경제적 도전 과제를 도출·수행하고, 선정된 가치사슬을 중심으로 일련의 기술 및 비기술적 활동을 통해서 시장 중심의 가치사슬에 접근하는 것을 목표로 함
- 건설분야의 경우, 단기적으로 일반 강재보다 내부식성이 강하고 설치비용 및 필요 수량을 줄일 수 있는 나노 복합재료 강의 개발, 나노기술을 통해 에너지, 조명, 보안 및 인텔리전스 측면에서 획기적인 수준의 건물 내외장 복합 재료 제작을 검토함
- 장기적으로 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체를 개발하고, 시멘트 매트릭스 충전과 구조 치밀화를 통한 고강도, 빠른 수화반응 등에 대한 검토를 실시할 계획임
- 미국의 NIST는 미래 Nano Device 및 System의 성공적 개발을 위해 필수적인 나노 소재의 기계적 특성(탄성, 경도, 마찰, 밀착력, 내마모성, 프아송 비 등)의 측정 정확 구축을 위한 연구를 2001년 이후 집중적으로 수행함
- 수경성 시멘트는 경제성과 재료 확보 용이성 때문에 20세기 이후 가장 보편적인 건설재료로 활용되었으나 최근 재료적 한계로 인해 성능 개선 필요성 대두
- 콘크리트의 역학적 특성을 크게 좌우하는 시멘트 수화생성물의 성능을 개선시키기

위하여 기타 첨가제를 활용하는 다양한 연구가 시도되었으나 콘크리트의 일부 성능에 한정된 개선 효과만 획득

- 특히, 시멘트 수화조직의 단순 밀실화를 기반으로한 기존 기술방식의 성능 개선시, 시멘트 등 결합재량의 지나친 증가 및 이에 따른 콘크리트 단위중량의 증가 문제 발생
- 이에, 시멘트 사용량을 최소화 함과 동시에 콘크리트의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 방식의 적용기술 개발이 필요한 실정임
- 현재 일본과의 무역 분쟁에 따른 기초소재 기술개발의 필요성을 감안하면, 타 산업분야에서 크게 활용되고 있는 나노 소재 중 시멘트 복합체의 성능향상에 활용될 수 있는 소재를 활용하여, 기존의 기술성능을 뛰어넘는 혁신적인 건설재료의 개발이 필요한 상황임.

■ 콘크리트는 전통적인 건설 구조재로써 통계적으로 1인 당 매년 1톤의 양을 사용하고 있다고 보고되고 있으며, 그 중 시멘트는 전체 콘크리트 부피의 12% 정도를 차지함

- 시멘트는 콘크리트 사용과 관련된 전체 에너지의 92%를 소모하고, 1톤 생산 시 약 1.3톤, 연간 16억톤 이상의 CO₂를 배출함
- 건설폐기물의 2/3이 콘크리트이며, 이 중 약 5%만이 재생되고 있음
- 즉, 시멘트 생산 및 노후시설물 해체에 따른 폐기물 처리와 관련된 환경문제가 심각히 대두되고 있으며, 이에 대한 대응책의 일환으로 시멘트 사용량의 축소와 동시에 콘크리트의 고성능 및 고내구화를 통한 시설물 내구연한 증대기술이 요구됨
- 내구연한의 증대를 위한 현재의 기술 레벨은 포졸란 재료 등을 활용하여 콘크리트 내부에 존재하는 공극사이의 연속성을 감소시켜 외부로부터의 열화요인의 침투를 억제하는 방식을 활용하여 왔으나, 높은 역학적 성능을 가지는 나노 소재의 활용 등을 통하여, 콘크리트 내부의 미세균열의 발현 자체를 억제하고, 이를 통해 역학적 성능의 향상 및 내구성의 증대를 도모할 필요성이 존재함.

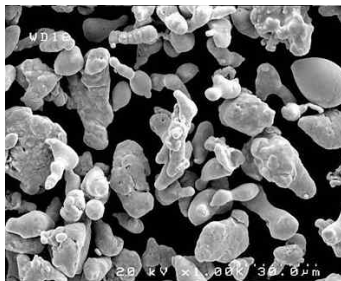
■ 시멘트 복합체에 나노기술을 접목시킴으로써 콘크리트의 고강도, 장수명화가 가능하여 시멘트 사용량 및 건설 폐기물에 대한 저감에 효과적일 것으로 예상됨

- 최근 시멘트 복합체 적용에 검토되는 주된 나노기술 소재는 실리카 폼(비정질 SiO₂), 나노실리카(Nano-silica), 산화티타늄(광촉매, TiO₂), 탄소나노튜브(CNTs), 그래핀(graphene), 티탄 나노 튜브 (TNTs) 및 소수의 고분자 나노분말 등임

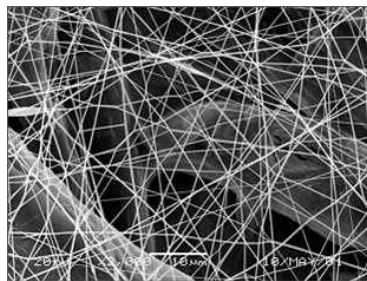
〈표 V-17〉 시멘트 복합체 적용 검토 대표적 나노 소재 및 효과

나노 소재	활용 효과
나노 산화티타늄 (Nano-TiO ₂)	- 재료의 압축 및 굽힘 강도, 콘크리트의 내마모성이 향상 - 자기 세정 및 오염물질의 광촉매 분해를 통한 환경 정화 기능 부여 가능
나노삼산화철 (Nano-Fe ₂ O ₃)	- 콘크리트의 압축 및 휨 강도를 개선하고, 자체 감지 기능 부여 가능
나노 산화알루미늄 (Nano-Al ₂ O ₃)	- 시멘트 중량의 5% 첨가로 탄성계수를 143%까지 증가시키나, 압축강도에는 제한적
나노 실리카 (Nano-Silica)	- 비정질의 실리케이트 입자로, 실리카폼보다 작은 입자를 가지며, 역학적 성능 및 내구성을 크게 향상시킬 수 있음
나노 클레이 (Nano-Clay)	- 콘크리트의 기계적 성능과 염화물 침투에 대한 저항성이 향상 - 시멘트의 압축 성질 개선을 통한 투과성과 수축성 개선 가능
나노 시멘트 (Nano-Cement)	- 빠른 양생시간 및 초기 압축강도의 증가 - 기계적, 화학적 결합에 의한 응축력을 극대화 하는 것이 가능
탄소나노튜브/섬유 (CNTs, CNFs)	- 시멘트 기반 소재의 강화제로 사용되며, 초기 수화에 영향을 주어 강한 결합을 구성
그래핀 (graphene)	- 판 형태의 구조를 가지는 소재로, 수화시멘트 입자 사이에서 미세균열의 억제 역할을 담당. 높은 비표면적 및 흡착능력에 의한 유해이온이동 저항성 등을 통해 시멘트 복합체의 내구성 향상을 도모할 수 있는 가능성 있음 - CNT와 병행 사용시 CNT의 분산도를 높이는 효과가 있음
티탄나노튜브/섬유 (TNTs, TNFs)	- 시멘트의 수화반응 속도 촉진 및 시멘트 경화체의 인장 강도 증진에 효과가 있음.
나노폴리머 (Nano-Polymer)	- 셀룰로오스 기반의 나노 소재로서, 시멘트 기반 소재의 변형능력 향상에 기여함

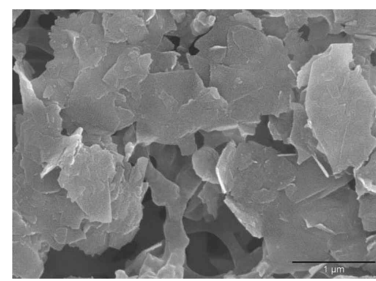
■ 시멘트 복합체에 적용되는 나노 소재는 일반적으로 구형 또는 튜브형의 나노분말 형태이며, 나노 섬유와 같은 나노선 형태, 그래핀과 같은 나노판상형태도 존재함



나노분말



나노섬유(선)



판상나노 소재

〈그림 V-8〉 시멘트 복합체에 적용되는 나노 소재의 일반적 형태

■ 기존 개발된 나노 소재를 활용한 콘크리트 적용 기술 및 시멘트의 나노화 기술 등 다양한 연구와 제품 개발이 이루어지고 있는 실정임

- 기존 합성수지계 콘크리트 보호 코팅 재료의 문제점을 보완하기 위해 시공 시 콘크리트 내부의 모세관 공극에 나노 복합 활성탄을 균질하게 침투시켜 통기성을 가지도록 함으로써 도막의 박리, 탈락, 변형 등 문제점을 해결하는 표면 처리제 활용 기술이 개발됨
- 기존 복합체 대비 우수한 강도와 역학적 특성 및 열 안전성을 부여하기 위해 프리캐스트 콘크리트 부재의 보수, 보강재로 쓰이는 폴리머 복합체에 마이크로 또는 나노입자 크기의 무기물을 분산시켜 기계적 성능을 향상시키는 보수, 보강재 기술이 개발됨
- 또한, 기존 시멘트를 원심력을 활용하여 입자간 및 용기와의 충돌을 일으켜 시멘트 입자를 작게 만드는 기계적 밀링 방법 및 화학적 합성을 이용한 나노 시멘트 제조 기술 등이 검토됨

■ 콘크리트용 나노 소재 활용 기술은 국내외 모두 기초 원천 단계로 기반 설비, 시설, 가격 경쟁력 등이 미비함에 따라 나노 콘크리트 기술 개발로의 연결이 매우 어려운 실정임

- 기존 나노 소재는 고부가가치 산업으로의 활용 편중이 심하며, 제조 단가가 고가인 관계로, 가격의 하락 없이 콘크리트 산업으로의 직접 적용은 매우 어려운 상황이며, 건설용 나노 소재 개발 또한 이루어지고 있지 않는 실정임
- 콘크리트 업계의 나노 소재 활용 기술에 대한 인식은 매우 낮은 편이며, 나노 소재 활용에 따른 안전성의 문제에 대한 우려도 존재함
- 이와 같은 기반 기술의 미비에 따른 문제점으로 인해 나노 소재를 활용한 콘크리트와 관련된 국내 기술은 기초적 단계임
- 이를 해결하기 위한 기초적 연구과정 및 기업의 설비 투자 등을 지원하여 단시간내에 나노 소재 기술이 건설분야로 진입할 수 있도록 유도할 필요가 있음

1.2 기술개발 필요성

- 건설분야에서 사용되는 나노 소재 수요는 2021년 10억 달러로, 2011년 6천만 달러 대비 17배 이상 증가할 것으로 예상되며, 증가율도 25.9%로 높은 편임
- 건설분야 시장은 전체분야 응용 나노 소재 중 2001년에는 2.9%, 2006년에는 3.7%, 2011년에는 3%를 차지하였으며, 2021년에는 7%를 차지하며 비중도 높아질 전망이다
- 건설분야의 경우, 초장대교량, 초고층건물, 대심도 터널, 해양구조물, 원자력 발전소 등의 구조물이 주변 환경으로부터 영향을 받지 않고 충분한 내구수명을 확보할 수 있도록 구조재료의 고성능화 및 고강도화를 요구하고 있음
- 국내의 콘크리트 기술은 혼화제 및 혼화제 등을 활용함으로써 기존 콘크리트의 성능을 극대화시키는 것으로 강도 향상 및 내구수명 증진 등의 효과를 얻을 수는 있으나, 주변 환경으로부터의 영향을 완전히 차단하는 것은 불가능함
- 최근 국외에서는 나노 소재를 활용하여 시멘트 매트릭스를 밀실하게 채워 콘크리트 내 공극을 최소화함으로써, 외부 환경으로부터의 영향을 완전히 차단시켜 내구성능을 획기적으로 향상시키는 연구가 진행 중임
- 국내의 나노 소재 활용 콘크리트 기술은 기초적 단계로 이는 콘크리트에 활용되는 나노 소재와 관련된 요소기술이 충분히 정립되어 있지 않음과 기존 나노 소재의 높은 단가에 따른 것임
- 나노 소재 활용 콘크리트 기술 개발을 위해 나노 소재와 콘크리트 기술 간의 정합성을 확인할 필요가 있으며, 나노 소재가 가진 성능 및 기능이 충분히 발현 가능한지를 확인할 필요가 있음
- 기존의 나노 소재를 활용하여 나노 콘크리트 기술을 개발하기 위해서는 경제성 검토와 함께 신소재 및 신기술에 대한 수습 기간의 위험성을 고려할 필요가 있으며, 건설산업에 적합한 나노 소재 개발 또한 병행되어야 함
- 나노 소재를 콘크리트 기술에 접목시키기 위해서는 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 재료 설계 및 성능 향상과 관련된 요소기술 개발이 필요함
- 나노 소재가 가진 성능 및 기능을 시멘트 복합체에서 충분히 발현시키기 위해서는 나노 소재에 대한 화학적 특성(반응성, 결합성 등), 물리적 특성(소재 크기, 기계적 성질 등)에 대한 체계적인 연구가 필요함

- 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체의 성능 향상을 위해서는 나노 소재를 시멘트에 그대로 혼입하여 배합하는 것만으로는 목표 성능을 얻을 수 없으며, 이와 관련된 요소기술 검토와 적용이 필요함
- 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체 제조 시 시멘트 복합체 내부에서의 나노 소재 분산성 확보를 위한 기술과 이를 평가하기 위한 장비 및 기법에 대한 검토는 전무한 실정이며, 이와 관련된 기준 또한 정립되어 있지 않음
- (나노 소재 분산성) 시멘트 복합체 내 나노 입자는 입자 표면의 에너지가 크고 입자간 반데르발스 힘이 작용하여 응집 현상이 발생하여 성능을 충분하게 발현하지 못하므로 나노 입자를 고르게 분포 시키는 것이 중요하며, 이를 분산성이라 함



(a) 분산 전 (b) 분산 후
 <그림 V-9> CNT의 분산성

- 나노 소재 활용 시멘트 복합체 성능 향상 연구는 국내외에서 산발적으로 이루어지고 있으나, 대부분 연구실 규모의 소규모 연구에 한정되어 있으며, 체계적인 기술 개발 및 평가법에 대한 검토는 이루어지지 않고 있음
- 국내 나노 소재 생산기반은 전기, 전자 등과 같은 고부가가치 산업에 치중되어 있어 건설용 나노 소재 생산기반은 전무함에 따라 나노 콘크리트 개발을 위해 건설용 나노 소재 개발이 필요하며, 나노 소재 가공 기술에 대한 충분한 검토와 적절한 생산기반을 구축해야 함
- 타 산업에서 활용되는 나노 소재는 높은 수준의 순도를 필요시함에 따라 가격이 매우 높은 편임
- 나노 소재의 가격 경쟁력이 우선되지 않으면 콘크리트 산업으로의 나노기술 적용은 어려워지므로 Low-Cost 건설 나노 소재 제조 기술 개발은 필수 불가결함
- 건설 분야에서 활용되는 콘크리트는 대량으로 낮은 가격에 제조·사용되므로 시장

가격의 영향에 매우 민감하므로, 건설용 나노 소재의 가격이 경제적인 필요가 있음

- 나노 소재의 제조 공정은 크게 물리적 제조법과 화학적 합성법으로 나눌 수 있고 각각의 나노 소재 제조 공정은 개발되는 대상 나노 소재에 따라 상이하며, 각각의 나노 소재 가격은 상당수 고가로 형성됨.

〈표 V-18〉 나노 소재 제조공정 분류

분류	제조공정	대상 나노 소재
물리적 제조법	가스 증발법	TiO ₂ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ , SnO ₂ , ZnO, Fe ₂ O ₃ , Fe, Ni etc
	스퍼터링법	Co, Fe, Ag, Cu etc
	진공 증발법	CdS, Co, Al etc
	기계적 합금법	ODS합금, CuZr, AuTi, FeTi, CuTi, NiAl, CuFe, Al etc
	고에너지 반응밀링	TiC, Si ₃ N ₄ /SiC, VC etc
	냉동 밀링	M50 (고속도강), AlON, FeAl etc
	아크방전법	Ni, Fe, Co
	냉동용해법	Al, Fe, Cu
화학적 합성법 (액상법)	공침법	ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ , BaTiO ₃ , CeO ₂ etc
	졸-겔법	TiO ₂ , SiO ₂ , ZrO ₂ , BaTiO ₃ , Al ₂ O ₃ , Y ₂ O ₃ etc
	수열 합성법	BaTiO ₃ , CeO ₂ , ZnO, Fe ₃ O ₄ , ZrO ₂ , BaTiO ₃ etc
	유기금속 화합물의 열분해법	Pt, Pd, Au/Pd, Au/Pt, Fe, Ni, Ag, ZrO ₂ , BaTiO ₃ etc
화학적 합성법 (기상법)	에어로졸 법	TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , SnO ₂ etc
	기상 가수분해법	TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ etc
	화학증착법	SiC, Si ₃ N ₄ , MgO, TiO ₂ etc
	화학증기증착법	ZrO ₂ , TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃ etc
기타	기계 화학적 방법	Fe, Cu, ZnO, ZrO ₂ , CeO ₂ , Al ₂ O ₃ etc

■ 현재 대부분의 건설용 나노 소재 기술이 국외 기술임을 감안한다면, 향후 국외 의존도는 더욱 높아질 것이 분명함

- 나노 소재 산업은 정밀(화학)제조업에 속하고 기술의 독점성과 원료 의존성이 매우 큰 경우가 많아 일부 다국적 기업들의 시장 지배력이 강하다는 특징이 있음
- 발전가능성이 큰 국내의 나노 소재 생산기업이 함께 발전할 수 있도록, 건설·산업계 및 학계에서의 적극적인 대응이 필요함

■ 나노 소재를 활용한 콘크리트 기술 경쟁력 강화 및 원천 기술 확보를 위해서는 건설용 나노 소재의 혁신적인 제조기술 개발은 시급한 상황임

- 건설용 나노 소재 기술은 아직 초기 시장진입 단계에 있어 정부지원이 없이 기업 스스로 신산업을 창출하는 것은 매우 어려운 실정임
- 건설용 나노 소재 시장 진입 리스크가 높아 실패 가능성이 크므로 민간 사업화를 유도하고 위험 경감을 위해서는 정부의 초기 지원이 반드시 필요함

- 건설용 나노 소재는 재료기술, 계면기술, 성형기술, 가공기술, 설계기술, 평가기술 등이 밀접하게 관련되어 있음
- 대학, 정부출연 연구기관 등과의 공동연구개발이 필수이며, 이를 개발하기 위한 인프라 및 설비 등에 대한 공동 활용 등을 통해 세계수준을 선도하는 콘크리트 재료 기술의 개발이 필요함
- 나노 소재를 활용하는 산업이 빠르게 발전하는 현재의 상황을 고려할 때, 나노 소재의 생산시설 증대 및 생산비용의 감소로 인해 궁극적으로는 건설현장에 활용 가능한 나노 소재의 등장이 멀지 않은 미래의 상황으로 대두될 것으로 예측됨.
- 따라서 나노 소재를 활용한 건설재료의 개발을 통해 미래가치의 창출에 매진하여, 건설재료 분야의 국제경쟁력을 높이고, 신 재료 개발을 통한 시장 경쟁력 강화 및 도전적 신소재 활용 기술 분야를 선도하는 국가로서의 이미지 상승을 도모해야 함.

2. 기술개발 개요

2.1 기술개발 정의

■ 본 기술은 나노기술을 활용한 경량 고강도·고내구 콘크리트 개발을 위한 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술 및 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 기술을 개발하는 것임

- 나노 콘크리트 기술의 개발에 앞서 건설용 나노 소재에 대한 신뢰성 있는 물성 데이터 확보를 위한 평가방법 표준화와 이를 통한 물성 검토 및 DB화가 필수이며, 각각의 나노 소재가 가진 성능 및 기능이 충분히 발현될 수 있도록 시멘트 복합체 내에서 고르게 분산시킬 수 있는 기술이 선행되어야 함
- 나노 소재를 활용함에 있어 시멘트 수화조직 내의 공극 분포의 안정성 문제를 해결하고 공극의 존재 하에서 나노 콘크리트의 강도 및 내구성을 극대화시키기 위한 시멘트 복합체의 수화최적화 및 수화조직 구조제어 기술 개발은 필연적임
- 일반적으로 나노 콘크리트를 제조함에 있어 주로 사용되는 나노 소재는 고른 입경을 가진 고가의 나노 소재와 달리, 경제적이고 적절한 입도 분포를 가져야 하며 콘크리트 적용 시 적절한 역학적 성능이 발현될 필요가 있으며, 시멘트 복합체용으로 적절하게 활용하기 위한 나노 소재 전처리 기술 등의 개발 또한 필요함

■ [나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술] 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 안정적인 나노 콘크리트 적용을 위해 시멘트 복합체의 수화반응과 수화조직에 대한 구조를 제어하여 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 안정적인 품질 확보와 적용성 향상을 위한 성능 향상 기술

- [나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 평가 기술] 각종 나노 소재 (CNT, Graphene, 나노폴리머, 나노산화물 등)의 시멘트 복합체 적용성 검토 및 나노 소재 특성 변화에 따른 성능향상 메커니즘 규명을 위한 계측기술 개발과 시멘트 복합체의 성능 및 신뢰성 평가방법 개발을 통한 시멘트 복합체 기준 제시
- [나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화최적화 기술] 반응성 및 비반응성 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체 수화반응/수화조직 발현 메커니즘 분석, 수화모델 개발 및 시멘트 복합체 수화최적화 기술
- [나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화조직 구조제어 기술] 나노 소재 활용 시멘트 복합체 내 수화생성물 구조제어 및 분석, 최적 충전 기술, 시멘트 복합체 점성 제

어 및 예측 기술

- [건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 기술] 개발된 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체 역학적 성능 향상 및 평가 기술
- [건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술] 나노 콘크리트의 최적화 및 실용화를 위한 경제적인 건설용 나노 소재 제조 및 대량 생산기반 조성을 위한 제조 공정 설계 기술
- [건설용 나노 소재 선정 및 건설분야 요구사항 기준 정립] 기존 연구 및 기술 동향 분석을 통한 건설 분야 요구 충족 나노 소재 검토 및 최적 나노 소재 선정, 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 품질 및 성능 요구사항 기준 정립
- [건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술] 나노 소재 제조 활성화 향상, 수율 향상, 나노 소재 균질 형상 제어 등을 통한 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술
- [건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 공정 설계] 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 개발을 위한 상세설계 수준의 제조공정 설계도 개발, 제조공정 운영 안정성 확보방안 및 기존 나노 소재 대비 생산단가 20% 이상 절감 방안 수립
- [건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산 기술 개발] 건설분야 요구충족을 위한 건설용 나노 소재의 벌크화 검토, 벌크 나노 소재 제조 및 가이드라인(안) 수립
- [건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산성 확보/평가 기술] 건설용 벌크 나노소재 분산 방안 수립 및 분산 메커니즘 분석, 분산성 향상/최적화 기술

2.2 기술개발 목표

- 본 기술은 기존 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체 재료 설계·평가 기술 등을 분석·검토하여 시멘트 복합체의 역학적 성능을 극대화하기 위한 요소 기술을 개발하고, 경제적이고 대량 생산이 가능한 건설용 나노 소재 제조 기술을 확보하는 것을 목표로 함

〈표 V-7〉 개발기술별 기술개발 방향 및 성능 목표

개발기술	기술개발방향	성능 목표
나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술	▪ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 설계를 위한 기존 문헌 및 연구 동향 분석 ▪ 나노 소재 적용 시멘트 수화물의 물리/화학적 성능 및 신뢰성 평가 기술 ▪ 각종 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체 수화 모델 개발 ▪ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화최적화 기술 ▪ 시멘트 복합체 내 수화생성물 구조제어 및 분석 기술 ▪ 나노 소재 활용 최적 충전 기술 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 향상 및 평가 기술	▪ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 특성 DB 구축 ▪ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 성능 평가 지침(안) 수립 ▪ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화 모델 수립 ▪ 나노 소재 혼입 시멘트 복합체 수화반응 제어 방법 제시 ▪ 경량 고강도 콘크리트용 시멘트 페이스트 최적 배합설계
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술	▪ 건설분야 요구조건 충족 나노 소재 선정 및 요구사항 기준 정립 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조공정 설계 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산 기술 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산성 확보/평가 기술	▪ 건설용 나노 소재 선정 및 요구사항 기준 수립 ▪ 나노 소재 수율, 균집 형상 제어 및 활성화도 향상 등 공정인자 도출 ▪ 시멘트 복합체 맞춤형 저가 나노 소재 양산 공정 설계 ▪ 기존 동일 나노 소재 대비 제품 생산단가 20% 이상 절감 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 최적화 분산 및 평가 기술 수립

2.3 관련 재료기술의 차별성

■ 기존 기술과 본 개발 기술의 차별성은 다음과 같음

- 나노 소재 활용 기술은 기초 원천단계로 기존 기술은 나노 소재를 혼입한 시멘트 물성 평가에만 국한되어 있는 실정이며, 이 또한 제한적인 실정임

〈표 V -8〉 기존 기술과 개발 기술의 비교

기술명	개발 기술	기존 기술	차별성
수화최적화 기술	▪ 각종 나노 소재 특성에 따른 시멘트 복합체로의 수화 반응 영향 검증 ▪ 나노 소재 전용 분산제에 따른 시멘트 복합체로의 수화반응 영향 검증 ▪ 반응성/비반응성 나노 소재의 입도 및 형상에 따른 시멘트 복합체의 수화반응 특성 영향 연구	▪ 나노 소재의 혼입에 따른 nucleation 효과 검증 ▪ 고성능 감수제 사용에 따른 응결 및 경화의 지연 현상 검증 ▪ 시멘트 복합체에 사용되는 고성능 감수제 및 반응성 실리카와 같은 나노 소재에 의한 수화반응 특성 연구	▪ 각종 반응성/비반응성 나노 소재 활용에 따른 시멘트 복합체 수화반응 특성 검토 ▪ 각종 나노 소재별 적용 가능 분산제에 따른 시멘트 복합체로의 수화반응 특성 검토
수화조직 구조제어 기술	▪ 나노 소재의 혼입에 따른 시멘트 복합체의 미세구조 변화 검증 ▪ 고강도/고내구성 달성을 위한 필요 최적 충전기술 연구 ▪ 경량화 달성을 위한 기포조직 제어 기술 연구	▪ 반응성 나노 소재 및 압출 방식 활용에 따른 시멘트 입자간 간격 감소 및 공극률 극소화를 통한 고강도 시멘트 복합체 제조 방법 연구	▪ 경량화 달성을 위한 인위적 기포조직 제어
점성 제어 기술	▪ 각종 나노 소재별 적정 분산제 활용에 따른 시멘트 복합체 점성 제어 기술 ▪ 재료 균질 분산을 통한 경화 후 수화조직 구조제어가 가능한 점성 제어 기술	▪ 계면활성제, 고성능 감수제, 증점제 등 활용 나노 소재 혼입 시멘트 복합체의 유변학적 성능 검토 ▪ 고성능 감수제 활용 나노 소재 분산 연구	▪ 나노 소재 분산성 확보 및 시멘트 복합체 유변학적 물성 제어 ▪ 나노 소재 물성 제어를 통한 경화 후 수화조직 구조제어 검토
최적 충전 기술	▪ Case I: 겔보기밀도 1.6 g/cm³ 이하 및 압축강도 80 MPa이상 ▪ Case II; 겔보기밀도 1.8 g/cm³ 이하 및 압축강도 100 MPa 이상 ▪ Case III; 겔보기밀도 2.0 g/cm³ 이하 및 압축강도 120 MPa 이상	▪ 경량/고강도/고내구성 콘크리트 물성 (겔보기비중 1.9 g/cm³, 압축강도 100 MPa)	▪ 최종적으로 1.6 g/cm³ 이하 및 압축강도 80 MPa 이상 만족 포틀랜드 시멘트 복합체 제조
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 기술	▪ 기존 나노 소재 대비 제품생산 단가 80% 수준 이하	▪ 일반 나노 소재 시장가	▪ 기존 나노 소재 제품 생산단가 대비 20% 이상 절감

3. 국내외 기술개발 동향

3.1 국내외 동향

가. 관련 기술 개발 및 연구 동향

■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 기술과 관련한 연구는 국내외 모두 증가 추세에 있으나, 대부분 기초적 단계에 그치고 있는 실정임

- 나노 입자는 높은 비표면적 값을 가지며, 기존의 시멘트 복합체 안에서 밀도가 높은 입자를 생성하여 우수한 필러 효과를 나타내는 것이 특징이며, 시멘트 매트릭스 시스템의 제어 및 변형을 통해 새로운 나노 스케일 구조를 제공함
- 시멘트 기술에 나노 소재 적용은 미세 공극, 다공성 및 알칼리 실리카 반응에 따른 미세구조의 열화를 제거할 수 있으며, 시멘트 수화 시스템과 반응하여 강도 및 내구성을 크게 향상시킬 수 있음
 - 시멘트 복합체의 성능 향상을 위한 나노 소재 기술은 실리카 흙을 대신하기 위한 Nano-Silica로부터 시작되었으며, 지금까지 탄소기반 나노물질(CNTs, CNFs, Graphene 등)과 산화나노 소재 (TiO_2 , ZrO_2 , SiO_2 등) 등이 함께 검토되고 있음
- 대부분의 나노 소재는 높은 소재 간 인력(Van der Waals)으로 인해 쉽게 응집되므로 시멘트 복합체 및 배합수 내에 분산을 시키기란 매우 어려우며, 응집체가 시멘트 매트릭스에 혼입될 경우 매트릭스에 결함을 발생시킬 우려가 있음
 - 응집문제 해결을 위해 나노 소재의 표면을 화학적 또는 물리적으로 개질하여 전기적 특성을 부여하여 입자 간 반발을 활용한 분산, Chemical Agent를 활용한 분산, 초음파 및 교반 등 물리력을 활용한 분산 등에 대한 연구가 이루어지고 있음
- 나노 소재의 분산성 확보와 관련된 기술은 시멘트가 가진 성능의 향상과 함께 새로운 기능의 부여가 가능하도록 하는 반드시 필요한 기반 기술이나, 관련 연구는 기초적 수준에 머물러 있음
 - 다양한 시멘트 복합체 내 나노 소재의 분산 연구 중 분산성 확보 방안 및 평가 방법에 대한 검토는 극소수에 불과한 실정임
 - 대부분 SEM, 점도, 제타전위 측정, Dynamic light scattering (DLS), Raman Spectroscopy, UV-VIS spectroscopy 등을 통한 정성적 평가 방법을 통해 분산성을 평가하고 있어, 나노 소재 활용에 따른 시멘트 복합체의 성능 향상 및 기능 부가

에 대한 검토 또한 제대로 이루어지지 않고 있음

- 섬유, 튜브 형상 및 면상 형태의 방향성을 가진 나노 소재(CNTs, CNFs)의 배향 기술은 시멘트 복합체의 성능 향상(탄성, 인장, 감쇠 등) 또는 기능 부여(열 제어, 전기 전달 등)에 큰 영향을 미치나 시멘트 복합체에 대한 연구는 전무한 실정임

- 대부분 연구는 디스플레이, 반도체 제조 등과 같은 고부가가치 사업과 관련하여 연구되고 있는 실정임

■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계와 관련된 국내외 기술 개발 및 연구동향은 다음과 같음

〈표 V-9〉 관련 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	특징
K. Gopalakrishnan et al.	초음파 활용 나노 소재 분산	■ 티타늄 프로브를 사용하여 짧은 시간의 초음파 처리(20 kHz 주파수 및 50 % 진폭 설정에서 15 분)를 통해 VCNF의 균일한 수성 분산액 (1.14 wt%)을 제조함
M. S. Konsta-Gdoutos et al.	초음파 및 계면활성제 활용 나노 소재 분산	■ 계면활성제/CNT 비 4.0, 6.25에서 초음파 처리 (500 W, 진폭 50 %, 에너지 50 %)를 사용 0.16 wt% MWCNTs의 균일한 수성 분산액을 제조함
Z. S. Metaxa et al.	계면활성제 활용 나노 소재 분산	■ 계면활성제/CNT 비 4.0에서 VCNF (시멘트 중량의 0.048)의 균일한 수성 분산액을 제조함
X. Yu and E. Kwon		■ Sodium dodecyl sulfate (SDS)가 CNT/시멘트 나노 복합체를 제조하기 위해 효과적인 음이온 계면 활성제라 하였으나, 계면활성제를 사용함으로써 계면 활성제 분자에 의한 차단으로 인해 시멘트 매트릭스 내에서 나노 물질의 연결성이 결여된다고 보고함
F. Collins et al.	시멘트 혼화제 활용 나노 소재 분산	■ 시멘트 복합체 제조 시 활용하되는 고성능 혼화제인 폴리카르복실레이트가 CNTs 의 효과적인 분산 제임을 보고함
F. Sanchez and C. Ince	실리카흙 활용 나노 소재 분산	■ 실리카 흙이 탄소나노 소재의 분산에 영향을 미침을 보고함
H. G. Lee et al.		
G. Y. Li et al.	공유결합 기능화 활용 나노 소재 분산	■ 황산과 질산(3:1) 혼합물로 CNTs 표면을 산화처리하여 카르복실과 같은 작용기를 생성하고 이를 활용한 분산법을 개발함

주체	관련기술	특징
F. Sanchez et al.		70% 질산을 활용하여 CNFs의 표면 기능화를 실시하고 이를 통한 분산법을 개발함
G. Y. Li et al.		공유결합 기능화를 통한 CNTs의 시멘트 복합체 내 분산성은 좋으나, 압저항 특성을 확보하기 위한 3차원 네트워크를 구성할 수 없음을 보고함
A. Cwirzen et al.	공유결합 기능화 및 고분자 활용 나노 소재 분산	나노 소재 표면 기능화와 고분자의 조합은 표면 기능화 또는 고분자만 사용하는 것보다 CNTs의 보다 안정된 수성 분산을 보고함
B. Han et al.	공유결합 기능화 및 계면활성제 활용 나노 소재 분산	시멘트 복합체 내 공유결합 기능화된 MWCNTs를 균질하게 분산시키기 위해 계면 활성제를 사용하는 것이 매우 효과적임을 보고함
A. G. Nasibulin et al.	시멘트 입자 활용 나노 소재 분산	시멘트 입자 위에 CNTs를 성장(아세틸렌을 주요 탄소원으로 활용)시켜 시멘트계 나노 복합체를 제조하는 기술을 개발함
P. R. Mudimela et al.	실리카 흙 입자 활용 나노 소재 분산	철염에 함침시킨 실리카 흙 위에 CNTs를 성장(아세틸렌을 주요 탄소원으로 활용)시켜 실리카흙 나노 복합체를 제조하는 기술을 개발함
Z. S. Metaxa et al.	나노 소재 분산액 대용량 생산 기술	계면활성제/MWCNTs의 중량비 4.0을 팁 소니케이터를 활용 물에 균일하게 분산시키고, 이를 스윙버킷 로터(28,000 rpm)를 사용 원심 분리한 상청액을 초음파 처리하여 재분산 시키는 방법으로 대용량 생산이 가능함을 보고함

■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 성능 향상 기술과 관련한 연구는 국내외 모두 극소수에 불과하며, 대부분 기초적인 연구에 그치고 있는 실정임

● 나노 소재는 높은 비표면적으로 인해 시멘트 복합체와 혼합될 시 일반 시멘트 복합체 대비 높은 점성이 발생하며, 항복응력 또한 증가시키므로 많은 물/바인더 비를 요구하여 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 작업 성능을 저하시킬 우려가 있음

- 나노 소재를 시멘트 복합체에 혼입할 경우, 혼입량이 증가함에 따라 시멘트 복합체의 응결시간의 변화가 생기게 되어 작업성 확보에 어려움이 발생할 수 있음
- 일반적으로 굳지 않은 시멘트 복합체에 대한 레올로지 검토는 다각도로 이루어지고 있으나, 나노 소재 활용 시멘트 복합체에 대한 점성 증가 원인 규명, 유동성

검토, 점성 평가 기법 및 매카니즘에 대한 모델링에 대한 연구는 극소수임

- 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 작업성 확보를 위한 레올로지를 정량적으로 평가하기 위한 연구 결과를 제시하거나, 관련 기술을 보유한 기관은 전무한 실정임

● 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 성능(강도, 내구성 등) 향상을 위해 시멘트 복합체 내부의 시멘트 매트릭스를 밀실하고 결함이 없는 조건으로 만들 필요가 있음

- 시멘트 복합체의 수화반응 속도의 제어, 시멘트 복합체 내 최적 충전 및 공극 제어 기술이 필요함

- 성능 향상을 위한 시멘트 매트릭스 내의 수화물에 대한 수화 순서 및 반응 속도 등에 대한 제어나 시멘트 복합체 내의 최적 충전, 공극 제어와 관련된 기술은 전무한 상황임

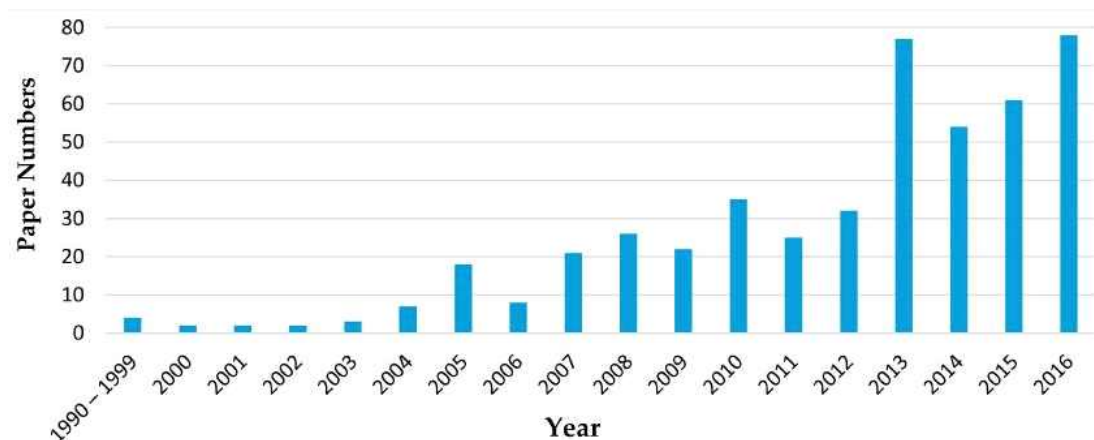
● 나노 소재 활용 시멘트 복합체에 대한 연구는 대부분 시멘트 복합체 내 나노 소재의 분산성 확보와 성능에 대한 검토가 주를 이루고 있음

■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계와 관련된 국내외 기술 개발 및 연구 동향은 다음과 같음

〈표 V -10〉 관련 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	특징
University of Tokyo	시멘트 미세구조, 계면특성 등을 고려한 재료 물성 및 적용 구조부재 성능 예측 기술	■ 수화모델 및 열적특성, 공극구조 및 이송특성 등 시간함수로 고려하여 재료 및 환경 특성변화를 고려한 구조물 성능 평가를 실시함
울산과학기술원	재료분리를 고려한 콘크리트의 레올로지 평가	■ 항복응력, 소성점도의 정량적 측정이 가능함을 보고함
Cwirzen et al.	CNT의 유동성 저하 평가	■ CNT의 첨가가 굳지 않은 시멘트 페이스트에 미치는 유변학적, 역학적 영향을 분석하고, CNT의 첨가에 따른 콘크리트의 작업성 저하를 확인함
Konsta-Gdoutos et al.	CNT의 점도증가 메커니즘 규명	■ SEM을 통한 미세구조 분석을 통해 나노 소재 활용 시멘트 페이스트의 점도 증가 메커니즘을 CNT와 같은 나노 소재의 응집에 의해 발생함을 규명함
Ferrara et al.	모르타르 항복응력 및 소성점도 예측모델 제시	■ 전산유체역학(CFD) 기법을 사용한 해석 및 현장 실험을 통해 모르타르의 항복응력과 소성점도를 예측할 수 있는 모델을 제시함

주체	관련기술	특징
Senff, L. et al.	나노 실리카의 응결특성	▪ Nano-silica 첨가량이 증가할수록 시멘트 복합체의 응결시간이 점차 줄어드는 것을 보고함
Ltifi, M. et al.		
Qing, Y. et al.		
Senff, L. et al.	나노 소재 혼합 시멘트 모르타르의 소성 손실 규명	▪ Nano-silica의 높은 비표면적으로 인해 나노 소재를 혼합한 시멘트 모르타르의 소성 손실이 발생함을 규명함
Berra, M. et al.	나노 소재 혼합 시멘트 복합체의 레올로지 연구	▪ Nano-silica 활용 시멘트 복합체의 레올로지 분석 및 물의 첨가 지연을 제안함
Kawashima, S. et al.		
T. Nochaiya et al.	시멘트/CNTs 나노 복합체의 다공성 검토	▪ 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 기계적 특성 개선을 위해 시멘트 복합체 와 시멘트 /CNTs 나노 복합체의 다공성에 대한 유의성이 있음을 보고함
F. Sanchez et al.	CNTs의 미세 구조 분석	▪ 0.5% 표면 처리된 MWCNTs가 수화생성물 사이에 50 nm 미만 크기의 기공을 형성하여 일반 시멘트 복합체보다 밀실한 미세 구조를 형성함을 보고함
M. S. Konsta-Gdoutos et al.	Nano Indentation Test를 통한 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 공극 검토	▪ Nano Indentation Test를 통해 0.08 wt% MWCNTs를 함유한 시멘트 나노 복합체가 일반 시멘트 복합체보다 다공도가 낮음을 보고함
G. Yakovlev et al.	CNTs 활용 경량기포 콘크리트의 기계적 물성 검토	▪ CNTs (0.05 질량 %)를 사용한 비오토 클레이브 발포 콘크리트의 기계적 특성 향상의 주된 원인으로 기공 벽의 침투성이 감소하고 기공 크기의 균일 성이 향상되어 구조가 안정됨을 보고함
B. W. Langan et al.	CNTs 첨가에 따른 플라이애시 시멘트의 기계적 물성 검토	▪ CNTs 첨가로 인한 미세 조직의 개선(공극 감소, 공극 균일화)과 그에 따른 플라이애시 시멘트의 기계적 성질 향상을 보고함
T. Yen et al.		
J. Zuquan et al.		



* 출처 : Guillermo, B. et. al, Nano-Inclusions Applied in Cement-Matrix Composites: A Review, Materials, 9(12), 2016

〈그림 V-10〉 나노 소재 활용 시멘트 기술 관련 문헌 현황 (Scopus)

■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 동향과 관련한 연구는 국외에서는 건설용 나노 소재가 일부 검토되어 제품화로 연결되고 있으나, 국내는 전무한 상황임

- 지금까지의 나노 소재는 균질하고 고순도의 나노 소재 제조 프로세스를 필요로 하여 생산 가격 또한 고가이므로 대량 생산 및 가격 경쟁력을 강점으로 내세우는 건설 분야에서 나노 소재를 활용하는 것은 쉽지 않은 선택임
 - (Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: A review(2017)) CNTs의 경우 나노 소재의 크기와 순도에 따라 80 \$/g ~ 1,600 \$/g 으로 가격 차이가 생기며 나노 소재 자체의 가격은 고가임을 설명하고 있음
- 건설에서 사용되는 재료(시멘트, 모래, 자갈, 혼화제 등)의 경우, 대부분 일정 입도를 가지고 있으며 순도 또한 높지 않다는 점에서 건설용 나노 소재 또한 적절한 입도 분포 및 일정 수준의 순도로 제조가 되어도 충분할 것으로 판단됨
 - (탄소나노튜브의 산업적 응용(2008)) 제조된 그대로의 SWCNT의 경우 상당량의 불순물을 함유하고 있으며, 순도는 10~95%로 평균 50% 정도이고, 순도를 높임에 따라 가격이 크게 상승함을 보고하고 있음
- 현재 건설용으로 제조되고 있는 나노 소재의 종류는 많지 않으며, 나노 소재의 물리적 특성 (입자 크기, 입도 분포, 순도 등)이 시멘트 복합체의 물성에 미치는 영향에 대한 검토 또한 전무한 실정임
- 국외에서는 나노 소재를 활용한 혼화제 또는 나노 시멘트를 개발하고 시판하고 있으며, 국내는 전무한 실정임.

- (독일 BASF 사 : Master X-Seed) 고분자 물질을 활용하여 나노 결정들이 잘 분산될 수 있는 특수 기술을 개발하고, 콘크리트 경화시간을 실온에서 절반으로 줄일 수 있는 나노 촉진제들을 개발하여 시판 중임
- (이탈리아 Italcementi 사 : TX Active Arca) TiO_2 의 광촉매 특성을 활용하여 건축물 표면에 흡착하는 오염물질을 산화시켜 제거하는 TiO_2 배합 시멘트를 개발하여 시판 중임
- (러시아 Nanotek material 사 : NANO-CEMENT) 포틀랜드 시멘트를 변형시켜 석영 모래, 석재, 산업폐기물 등을 활용한 클링커와 필러 분쇄 시 시멘트 입자 주변에 나노 두께의 고분자 화합물을 코팅한 나노시멘트를 개발하여 시판 중임

나. 관련 기술 보유 주체(기업, 연구기관 등) 현황

■ 나노 소재 활용 기술과 관련하여 다음의 연구기관들이 세계 선도기술을 보유하고 있음

〈표 V -1〉 세계 선도기술 보유 주체 현황

기관명	주요 내용
NIST (미국)	▪ 나노 소재, 나노기술에 대한 표준 물성 평가 기술 개발 ▪ 3차원 원소이미징 구면수차보정 투과전자현미경 구축 ▪ 주사프로브 현미경 나노역학 기술 개발
ORNL (미국)	▪ 나노 소재 및 나노구조 분석 ▪ 구면수차보정 투과전자현미경 구축
NNIN 소속 나노인프라	▪ 나노 소재 및 나노구조 분석장비 구축 ▪ 나노인덴테이션 장비 구축 ▪ 나노 소재 물성 평가 기술개발 지원
IBM Zurich (스위스)	▪ 원자힘 현미경 응용기술 개발 ▪ 원자수준의 나노가공기술 개발
Max Plank Institute (독일)	▪ 나노 소재 물성평가기술 개발
Franunhofer (독일)	▪ 나노 소재 물성평가기술 개발, 나노 소재 산업화 응용기술 개발 ▪ 전자현미경, 주사프로브현미경, 나노인덴테이션
National Institute of Material Science (일본)	▪ 나노 소재 물성평가기술 개발
Kavil Institute of Nanoscience (네덜란드)	▪ 실시간 나노현상 관찰기술 개발 ▪ 3차원 나노구조 해석기술 개발

다. 관련 지재권 확보 현황

〈표 V-1〉 국내외 관련 기술 특허 현황

특허(등록/출원) 번호	제목	출원인/국가	내용
US7666327	Multifunctional cementitious nanocomposite material and methods of making the same	Oceanit Laboratories, Inc./미국	나노 물질을 용매에 분산시켜 시멘트와 기계적으로 혼합을 실시하여, 시멘트 복합체의 전기 저항성을 부여하여 센서화하는 기술
US8865107	Highly concentrated nano-reinforcement suspensions for cementitious materials and method of reinforcing such materials	Northwestern University/미국	고농축 CNTs 또는 다른 나노 보강 용액을 활용한 시멘트 복합체 제조 기술
US9505659	Method for producing nano-cement, and nano-cement	Bickbau; Marsel Yanovich/러시아	나노 시멘트 조성물 및 포틀랜드 시멘트를 변형시킨 나노시멘트 제조 방법
10-1425-5360000	탄소나노튜브를 함유한 시멘트 복합재료의 제조방법	한국과학기술원/한국	시멘트에 실리카fum(Silica fume)과 탄소나노튜브 및 그래핀(Graphene)을 물과 함께 혼합하여 제조된 탄소나노튜브를 함유한 시멘트 복합재료 및 그 제조 방법
10-1132-4100000	슬래그를 이용한 나노 실리카의 제조 방법	주식회사 효석/한국	제철 및 제강공정에서 발생하는 슬래그를 출발물질로 하여 나노 사이즈의 입자 크기를 갖는 나노 실리카의 제조방법
10-1636-3760000	폴리카르본산계 공중합체 및 나노입자를 포함하는 시멘트 조성물	주식회사 엘지화학/한국	폴리카르본산계 공중합체 및 나노입자를 포함하는 시멘트 조성물에 관한 것으로서, 상세하게는, 시멘트 조성물의 첨가제로서, 폴리카르본산계 공중합체 및/또는 그것의 염과, 산화아연 및/또는 산화알루미늄 나노입자를 포함하는 것을 특징으로 하는 시멘트 조성물

라. 기술개발 적용(활용) 사례

■ 이탈리아의 Italcementi Group은 TX Active Arca 제품을 개발하여 시판 중임

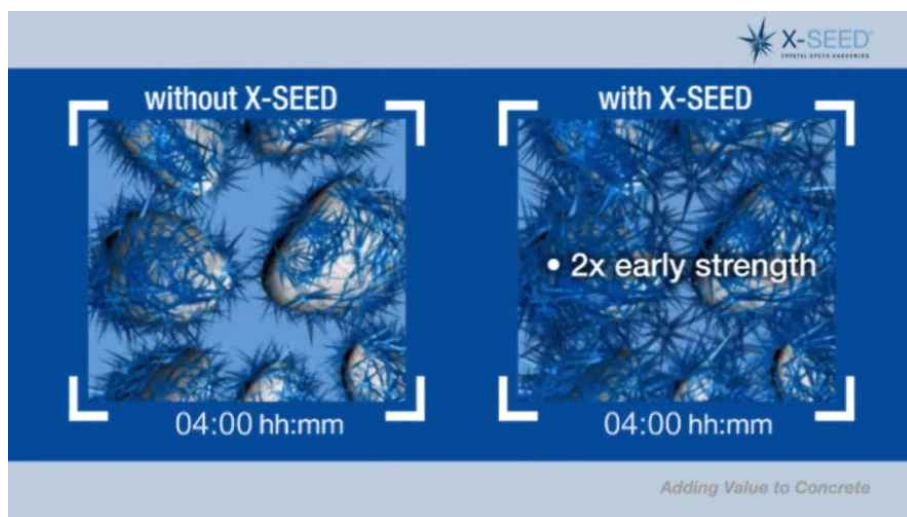
- TiO_2 를 나노화한 Nano- TiO_2 를 활용하여 공기 중의 유해한 물질을 감소시키고 건축물 표면을 보존하는 기능을 가진 시멘트임
- Nano- TiO_2 를 활용함으로써 대기 중의 질소 산화물 및 휘발성 유기 화합물과 같은 대기 오염물질의 농도를 감소시키고 자체 세척 기능을 가지고 있으며, 물리적·기계적 특성은 기존의 콘크리트와 동일한 것이 특징임



〈그림 V-11〉 광축매 시멘트를 적용한 Misericordia 교회

■ 독일의 BASF 사는 Master X-Seed 제품을 개발하여 시판 중임

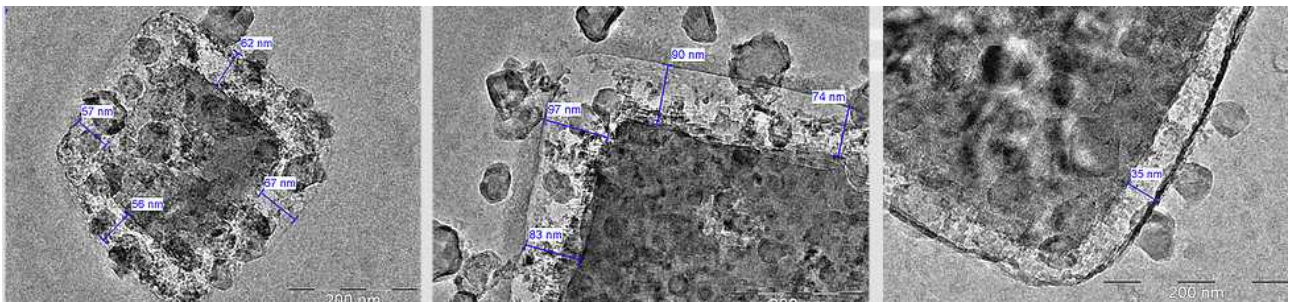
- 시멘트 입자 사이의 CSH 결정 성장을 촉진하고 포틀랜드 시멘트의 전반적인 수화를 개선하기 위해 합성적으로 생성된 결정질 칼슘 실리케이트 수화물 (CSH) 나노 입자를 활용한 콘크리트 경화 촉진용 나노 첨가제임
- 콘크리트의 경화를 촉진시켜 조기강도 성능을 2배로 높이고 장기강도에 영향을 미치지 않으며, 콘크리트 생산에 있어 생산성을 높이는 것이 특징임



〈그림 V-12〉 BASF사 Master X-Seed

■ 러시아 Nanotek Materials 사는 NANO-CEMENT 제품을 개발하여 시판 중임

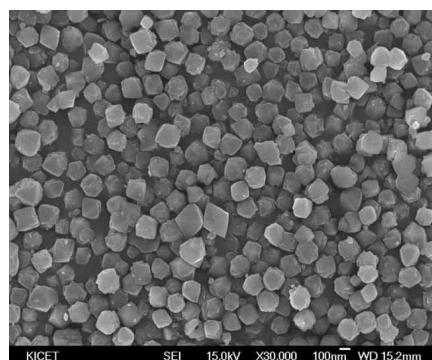
- 포틀랜드 시멘트 입자로서 석영, 모래, 석재, 슬래그 및 플라이애시 등과 같은 재료를 시멘트 원료인 클링커의 분쇄 단계에서 혼입하여 시멘트 주변에 나노 셀을 구성하는 시멘트임
- 온실가스(CO_2 , NO_2 , SO_2)의 약 65%의 감축과 산업폐기물의 재활용 및 콘크리트의 강도 증진에 도움을 주는 것이 특징임



<그림 V-13> Nanotek Material사 NANO-CEMENT

■ 국내의 경우, 한양대에서 실험실 수준에서 나노 시멘트를 제조함

- 나노 소재 제조 공법 중 기계적 밀링 방법을 이용하여 원심력과 입자 충돌을 시켜 평균 30 μm 의 시멘트 입자를 1/150 크기인 입경 200 nm로 제작된 나노 시멘트임
- 기존 콘크리트와 비교하여 콘크리트 내부 공극의 치밀화, 고성능 및 고강도가 가능하다는 것이 특징임



<그림 V-14> Nano cement

3.2 국외 및 국내 기술 수준 비교

■ 기술수준, TRL단계, 기술성숙도

- 나노 콘크리트 개발을 위한 나노 소재 활용 시멘트 복합체 관련 기술은 국내외 모두 원천 기초 단계에 있으며, 이를 위한 나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 향상 기술, 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 기술 또한 연구가 부족한 실정임

1) 시멘트 복합체 수화최적화 기술

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	70(미국)	50
TRL단계	T2	T1
기술성숙도	2단계	1단계
주요 성능	수화반응 속도 제어 성능	수화반응 속도 제어 성능

2) 시멘트 복합체 수화조직 구조제어 기술

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	80(미국)	50
TRL단계	T2	T1
기술성숙도	2단계	1단계
주요 성능	공극제어 성능	공극제어 성능

3) 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	80(미국)	60
TRL단계	T3	T2
기술성숙도	3단계	2단계
주요 성능	나노 소재 최대 입경, 순도, 생산량, 생산수율, 비표면적, 습식소재 분산안정성	나노 소재 최대 입경, 순도, 생산량, 생산수율, 비표면적, 습식소재 분산안정성

■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술의 국내외 기술수준 비교

- 주요 국가별 기술수준 및 기술격차 평균을 통해 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술의 국내외 기술수준을 검토한 결과, 최고기술수준 보유국은 미국인 것으로 나타나 총괄 최고 기술수준을 미국으로 설정하고 EU, 일본, 중국, 한국의 기술수준을 비교함

- 2017년 기준 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술 관련 최고 기술수준 보유국은 미국으로 100%, EU는 94.5%, 일본은 91.5%, 한국은 64.1%, 중국은 68.5% 수준임
- 또한 최고 기술수준 보유국 미국을 중심으로 EU는 1.0년, 일본은 1.1년, 한국은 4.9년, 중국은 4.3년의 기술격차를 보임
- 국내 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술의 기술수준 및 격차 모두 미국, EU, 일본의 뒤를 쫓고 있는 것으로 분석됨
- 우리나라와 최고 기술수준국인 미국과의 기술격차 추세는 확대 중임



<그림 V-15> 국내외 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술수준 비교

- 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술이 도달 할 수 있는 이론적 상한치(최상의 발전 상태, 궁극의 기술수준)를 100%로 했을 때, 현재(2017년) 및 5년 뒤(2022년)의 기술수준을 비교 검토함
- 2017년 기준, 건설 구조재용 나노 소재 활용 기술의 최고기술국은 미국으로 75.9%이며, EU는 73.6%, 일본은 71.8%, 한국은 50.9%, 중국은 54.5% 수준임
- 2017년 기준, 이론적 상한치에 이르기까지 필요한 기술개발 소요시간은 미국은 5.1년 EU는 5.3년, 일본은 6.0년, 한국은 8.8년, 중국은 8.6년으로 분석됨
- 5년 뒤 2022년에 건설 구조재용 나노 소재 활용 기술의 기술수준은 미국이 90.4%, EU는 89.5%, 일본은 89.0%, 한국은 76.8%, 중국은 75.9%로 예상됨



〈그림 V-16〉 건설 구조재용 나노 소재 활용 기술의 최고 기술수준 대비 국내의 기술수준 및 격차 비교

- 건설 구조재용 나노 소재 활용 기술의 국내 발전단계는 기술이 개발되고 있는 개발기로 분석되며, 국외 발전단계는 신기술이 본격적으로 시장에 처음 진입하는 단계인 도입기와 신기술이 본격적으로 상용화되는 단계인 성장기 사이에 위치한 것으로 분석됨

4. 세부개발 내용

4.1 개발내용별 한계점 및 기술개발 방향

■ 다양한 나노 소재의 개발과 함께 나노 소재의 가격 하락 및 안정화, 생산능력 확대로 자동차, 에너지, 건설 등 다양한 산업 분야로 나노 소재 기술 적용이 확대되고 있음

- 나노 소재는 물리, 화학적, 기계적, 전기적 특성 등 여러 면에서 기존 소재들의 물성과는 현저히 구별되며, 나노 소재를 적용한 재료의 물성은 나노 소재의 특성에 의해 크게 달라지나, 이에 대한 평가 기술 개발은 충분하지 않음
 - 나노 소재를 적용한 재료에 대한 평가 기술은 기존 재료 평가 기술을 활용하고 있는 실정임
 - 나노 소재 자체 물성에 대한 검토 및 나노 소재를 활용한 재료의 특성 평가 기술이 충분하지 않아 나노 소재 활용 재료 개발을 위한 나노 소재에 대한 표준 정립이 어려움
- 최근 나노 소재는 시멘트 입자보다 작고, 각 소재별 특성에 따라 다양한 성능을 구현함에 따라 이를 시멘트 복합체에 적용함으로써 다양한 성능 발현과 함께 기존 시멘트 복합체 성능을 향상시킬 수 있다는 점이 보고되고 있음
- 국내의 경우, 나노 콘크리트 개발을 위한 나노 소재 활용 시멘트 복합체 연구는 원천 기초 단계에 있으며, 나노 소재의 높은 가격, 나노 소재 활용에 대한 인식 부족, 나노 소재 활용에 따른 안전성 문제 등으로 인해 연구 저변 확대가 어려운 상황임
 - 기존 형성된 나노 소재 관련 건설재료 시장(코팅제, 보수보강제 등)에서는 국외 기업이 시장을 선점한 상황임
 - 선진 각국이 나노 소재 활용 시멘트 복합체 연구에 집중 투자를 하고 있다는 점에서, 향후 관련 기술에 대한 선진국 대비 기술 격차 발생과 나노 소재 제조 기반 미비로 나노 소재 활용 기술에 대한 국외 의존도가 더욱 높아질 수 있음
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 성능 향상 기술 개발을 통한 나노 콘크리트 원천 기술의 국산화와 함께 건설용 나노 소재 제조, 생산성 향상 및 품질 확보를 위한 제조 프로세스 구축 등에 대한 종합적인 개발이 시급함

〈표 V-1〉 기술개발 한계점 및 개발방향

개발내용	한계점	기술개발방향
나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술	▪ 나노 소재의 종류 및 형태에 따른 나노콘크리트용 시멘트 복합체의 성능 영향 평가 미흡 ▪ 건설용 나노 소재별 물리/화학적 특성 및 시멘트 복합체 물성 DB 부재 ▪ 나노재료를 이용한 시멘트 복합체 성능향상 메커니즘 규명 부재 ▪ 시멘트 복합체의 급격한 수화반응 및 과도한 수화열 발생으로 나노 콘크리트의 내구성 저하 우려 ▪ 시멘트 복합체 내 수화생성물 구조제어 기술 및 최적 충전 기술 부재에 따른 나노 콘크리트의 성능 향상 한계 ▪ 시멘트 복합체 점도특성 제어 기술 부재에 따른 나노 콘크리트 작업성 저하	▪ 나노 소재 활용 경량 고강도 시멘트 복합체 제조 가이드라인(안) 도출 ▪ 건설용 나노 소재별 물성 DB 구축 ▪ 시멘트 복합체 성능향상 메커니즘 규명 연구 ▪ 반응성/비반응성 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체 수화반응 메커니즘 분석 ▪ 화학혼화제 등을 활용한 나노 소재 활용 수화열 및 수화속도 제어 기술 개발 ▪ 시멘트 복합체 내 최적 충전 기술 ▪ 화학혼화제 등을 활용한 나노 소재 혼입 시멘트 복합체의 점성 제어 기술
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술	▪ 건설용 나노 소재 자체 생산기술 및 기반 미비 ▪ 건설용 나노 소재 제조 전용설비 및 공정 제어 기술 필요 ▪ 건설용 나노 소재 생산 및 공급량의 한계 ▪ 시멘트 복합체 적용을 위한 기존 나노 소재 생산 및 공급 단가의 고가화 ▪ 나노 소재 종류 및 크기에 따른 습식 분산 공정 미확립 ▪ 나노 소재의 높은 표면적 및 응집 특성에 따른 습식 분산성 저하 ▪ 시멘트 복합체 제조 공정 상 나노 소재의 응집 및 변질 우려	▪ 시멘트 복합체용 맞춤형 저가 나노 소재 제조 기술 ▪ 나노 콘크리트 용도별 및 형태별 맞춤형 나노 소재 제조 기술 ▪ 나노 콘크리트용 맞춤형 나노 소재 순도 및 입도 제어 기술 ▪ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 공급을 위한 제조 기반 공정 설계 ▪ 나노 소재 제조 공정 제어를 통한 생산량 및 생산수율 확보 ▪ 나노 소재별 맞춤형 습식 분산 기술 확보 ▪ 나노 소재별 습식 분산 효율 및 분산 안정성 평가 기술

4.2 개발내용별 개발목표 및 주요내용

가. 나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술 개발

■ 기술개요 및 목표

- 본 기술은 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 안정적인 나노 콘크리트 활용을 위한 각종 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체 재료 설계·평가 기술의 개발 및 건설용 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 역학적 성능 극대화를 위한 아래와 같은 요소기술 개발을 목표로 함
 - 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 평가 기술
 - 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화최적화 기술
 - 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화조직 구조제어 기술
 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 기술
- 각종 나노 소재 활용 시멘트 복합체 적용성 검토와 건설용 나노소재 선정 및 시멘트 복합체로의 적용을 위한 요소기술 개발을 통하여 시멘트 복합체의 최적 성능 확보 및 균일한 품질 구현이 가능하도록 하기 위한 기술임
- 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체의 최적 성능 확보를 위해서는 시멘트 복합체에 활용 가능한 나노 소재 선정 등 재료 설계 및 평가 기술이 필요하나, 관련된 기술은 그 수가 매우 적고 기초 단계에 머무르고 있는 실정임
 - 최근 다양한 나노 소재들이 콘크리트 기술에 도입되고 있으며, 가장 많이 보고되고 있는 나노 소재로는 나노실리카(Nano SiO₂) 나노티타늄산화물(Nano TiO₂), CNT 등이 있음. 이외에도 나노클레이(Nano Cley), 나노철(Nano Fe₂O₃), 나노탄산칼슘(Nano CaCO₃), 나노질화붕소(Nano BN), 나노알루미나(Nano Al₂O₃), Graphene, Graphene 산화물 등이 보고됨
 - 그 중 탄소계열 나노 소재의 활용은 고성능, 고기능성으로 인해 주목받고 있으나, 건설재료 내부에서의 분산성 문제가 존재하고, 건설재료와의 화학적 반응에 대한 가능성이 낮아 탄소계열 나노 소재의 역량을 100% 끌어내지 못하고 있는 상황임
 - 나노실리카 등 몇몇 나노산화물의 경우 시멘트의 수화반응과 함께 진행되어 시멘

트 복합체에 화학적인 연결고리를 가질 수 있어, 매우 높은 강도상승률 및 내구성의 향상을 도모할 수 있으나, 대부분 기계적으로 마모시켜 얻어내는 방식을 활용하기 때문에 대량생산 시 효율성의 문제가 존재함

- 나노폴리머의 경우 시멘트 복합체의 변형 능력을 향상시키는 것으로 몇몇 문헌에서 밝혀져 있으나, 이의 명확한 메커니즘은 현재 알려져 있지 않으며, 이 분야에 대한 연구는 현재까지 초기 단계임
- 또한 나노 소재를 이용한 시멘트 성능향상 연구는 나노 소재별 개별적 연구 결과에 국한되어있어 있으며, 나노 소재가 시멘트 복합체 성능향상에 미치는 영향에 대한 분석 방법은 기초단계에 머무르고 있는 실정으로, 이를 통해 나노 소재를 이용한 성능 향상 효과의 근본적인 메커니즘을 규명하기에는 한계가 있음
- 이를 극복하기 위해 나노 소재별 시멘트 복합체 성능향상 경향과 나노 소재의 물리, 화학, 광물학적 특성과의 상관관계를 파악할 수 있도록 DB 구축이 선행되어야 하며, 이를 통해 성능 및 경제성이 확보된 시멘트 복합체 재료 설계가 가능함
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 수화최적화 기술 및 구조 제어 기술은 나노 콘크리트 개발에 있어 나노 소재와 시멘트 간의 상호 작용 규명, 안정적 품질 확보와 적용성 향상 및 나노 소재 성능/기능의 충분한 발현을 위한 기술임
- 일반적인 시멘트 복합체의 수화최적화 기술에 대한 연구는 다수 이루어졌으나, 나노 소재 활용 시멘트 복합체에 대한 수화최적화 기술에 대한 연구는 미비한 상황임
- 나노 소재를 활용하는 경우, 초기 수화 반응 촉진에 따른 시멘트 복합체의 자기 수축량이 증가하는 경향이 있으며, 이를 해결하기 위해 수화최적화 기술이 필요함
- 기존 수화최적화 기술은 일반적인 시멘트 및 포졸란 재료의 수화 반응에 기초하고 있어 나노재료 혼입에 따른 복합적인 수화 반응에는 적합하지 않음
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 안정적인 나노 콘크리트 적용 및 수화최적화 기술 개발을 위해, 시멘트 입자와 나노 소재 간의 상호 작용 및 수화반응 메커니즘에 대한 분석이 필요함
- 나노 콘크리트 개발에 있어 내구성 확보를 위해 미반응성 나노 소재 활용 기술, 고성능 화학혼화제 기술 등을 활용하여 시멘트 성분에 따른 선택적 수화반응이 가능한 수화최적화 기술이 필요함
- 초고강도 콘크리트 설계에 있어 시멘트 복합체의 수화조직 구조제어에 다수 연구되

고 있으나, 나노 소재를 활용한 시멘트 복합체에 대한 연구는 미비하며, 수화조직 구조제어 기술에 대한 검토 또한 충분하지 않음

- 일반적으로 콘크리트는 강도와 내구성 증대를 위해 내부 조직을 밀실하게 할 필요가 있으며, 이를 위해서는 시멘트 복합체 내 수화조직의 구조제어를 통한 최적 충전과 함께 내부 공극량과 크기를 제어하는 것이 효과적임
- 나노 콘크리트의 충분한 강도 발현과 내구성 확보를 위해, 나노 소재 및 시멘트의 입도분포 등을 고려한 최적 충전 기술과 공극 제어 기술 등이 필요함
- 나노 콘크리트의 시공성 확보를 위해서는 나노 소재 혼입에 따른 점성 증가에 대한 제어가 필요하며, 이에 대한 검토 및 관련 기술은 그 수가 매우 적고 기초적 단계에 머무르고 있는 실정임
- 일반적인 콘크리트의 경우, 점성을 낮추고 유동성을 확보하기 위해 고성능 화학혼화제를 사용하고 있다는 점에 착안하여 나노 소재를 혼입한 콘크리트의 점성을 개선하는 연구도 보고되고 있으나, 기초적 검토 단계에 그치고 있음
- 나노 콘크리트 개발에 있어 시공성 확보는 필수 불가결하며, 이를 위해서는 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체의 점성 제어 기술 개발이 필요함

■ (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		개발 목표 스펙
		국내	국외	
나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 평가 기술	건설용 나노 소재 물리적 화학적 특성 DB화	-	-	DB 구축 1건
	나노 소재 활용 콘크리트 물성 및 역학적 특성 DB화	-	-	DB 구축 1건
	나노 소재 활용 시멘트 복합체 성능 평가 기준(안)	-	-	평가 기준(안) 1건
나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화최적화 기술	반응성/비반응성 나노 소재 혼입 시멘트 복합체 수화반응 제어	-	-	보고서 1건
	나노 소재 혼입 시멘트 복합체 수화반응 메커니즘 분석	-	-	분석보고서 1건
	나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화반응 모델	-	-	수화반응 모델 1건
나노 소재 활용 시멘트 수화조직 구조제어 기술	나노 소재 최적 혼입량 배합설계 모델	-	-	배합설계 모델 1건
	나노 소재 혼입 시멘트 복합체 점성변화 예측 모델	-	-	점성변화 예측 모델 1건
	경량 콘크리트용 시멘트 페이스트 최적 배합설계	-	-	- 겔보기밀도 1.6 g/cm ³ 이하 및 압축강도 80 MPa 이상 - 겔보기밀도 1.8 g/cm ³ 이하 및 압축강도 100 MPa 이상 - 겔보기밀도 2.0 g/cm ³ 이하 및 압축강도 120 MPa 이상 등
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 기술	벌크 나노 소재 최적 혼입량 배합설계 모델	-	-	배합설계 모델 1건
	경량 콘크리트용 시멘트 페이스트 최적 배합설계	-	-	- 겔보기밀도 1.6 g/cm ³ 이하 및 압축강도 72 MPa 이상 - 겔보기밀도 1.8 g/cm ³ 이하 및 압축강도 90 MPa 이상 - 겔보기밀도 2.0 g/cm ³ 이하 및 압축강도 108 MPa 이상 등

■ 기술 개발내용 및 범위

● 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 평가 기술

- 각종 나노 소재(탄소계, 폴리머계, 산화물계 등)의 시멘트 복합체 적용성 검토
- 나노 소재 활용 시멘트 페이스트, 모르타, 콘크리트 물성 및 역학적 특성 분석

※ 기존 연구 문헌, 특허, 기술보고서 중심의 분석 및 DB 화

- 건설용 나노 소재의 물리·화학적 특성 분석 및 DB 구축

※ (물리적 특성) 입도, 상, 응집도 등, (화학적 특성) 성분, 반응성 등

- 각종 나노 소재 적용 시멘트 복합체 물리·화학적 성능 및 평가 기술 개발

- 나노 소재 적용 시멘트 복합체 성능 평가 기준(안) 개발

※ 기존 시멘트 복합체 성능 평가 방법과의 비교를 통한 유효성 검증

● 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화최적화 기술

- 반응성 나노 소재(Nano-Silica, Nano-Slag 등)와 비반응성 나노 소재(Nano-Clay, Nano-TiO₂, CNTs, Nano-Fiber, Nano-Polymer 등)의 혼입에 따른 시멘트 복합체 수화 반응 메커니즘 분석

- 시멘트 입자와 나노 소재 간 수화 상호작용 메커니즘 분석

- 시멘트 성분별 선택적 수화 등을 통한 수화반응 속도 제어 기술 개발

※ (관련 기술) 비반응성 나노 소재 활용 기술, 고성능 화학혼화제 활용 기술 등

● 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화조직 구조제어 기술

- 시멘트 복합체 내 최적 충전 기술

※ 각종 나노 소재 및 시멘트 입자에 대한 입도 분포 분석

※ 나노 소재 및 시멘트 입자의 형상 및 채움 모델링을 등을 고려한 최적 충전 모델 개발

※ 건설용 나노 소재 혼합 조건을 통한 최적 충전 기술 개발

- 시멘트 복합체 내 공극 제어 기술

※ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 내 공극 형상 및 크기 분석

※ 반응성/비반응성 나노 소재 활용 기술, 화학혼화제 활용 기술 등을 통한 공극 제어 기술 개발

- 반응성/비반응성 나노 소재 혼입 시멘트 복합체의 유변학적 물성 분석 및 점성 제어 기술

※ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 유변학적 물성 최적화를 위한 점도 및 항복응력 물성 분석

※ 화학혼화제 활용 기술 등을 통한 시멘트 복합체 점도제어 기술 및 예측 모델 개발

※ (점도) 플레인 시멘트 복합체 기준 $100 \pm 20\%$ 레벨 수준으로 유지

※ (소성항복응력) 플레인 시멘트 복합체 기준 $100 \pm 20\%$ 레벨 수준으로 유지

※ (관련 기술) 고성능 화학혼화제 활용 기술, 나노 소재 및 시멘트 입자 표면 음전하의 입자 간 반발 분산 등을 활용한 점성 제어 기술, 나노 콘크리트용 정량적 점성 측정 평가 기법 도출 등

● 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 기술

- 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 특성 검토 및 성능 향상

※ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 내 불순물량과 시멘트 복합체 역학적 특성 관계 분석

※ 기존 나노 소재 혼입 시멘트 복합체와 유변학적 물성, 미세구조 등 비교 분석을 통한 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용성 평가

※ 기존 나노 소재 대비 겉보기 밀도 동등 이상, 압축강도 90% 이상 성능 발현

나. 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술 개발

■ 기술개요 및 목표

- 본 기술은 건설분야에서 요구되는 조건을 충족시키기 위한 Low-Cost 나노 소재 개발 및 대량 생산 기반 조성을 위한 제조 공정을 개발하는 기술임
 - 건설분야 요구 충족 나노 소재 선정 및 요구사항 기준 정립
 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술
 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조공정 설계
 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산기반 기술
 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산성 확보/평가 기술
- 나노 소재의 건설분야 활용도 향상을 위하여 시멘트 복합체용 나노 소재를 저렴하고 대량으로 생산할 수 있는 제조 공정을 확립하여 경제성과 생산성을 동시에 향상시키기 위한 기술임
- 선진 각국은 나노 소재 활용함으로써 기존 시멘트 복합체가 가진 역학적 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 가능성에 주목하여, 고부가가치 건설재료 개발 및 원천 기술 확보를 통한 해외 시장 선점을 추진하고 있음
 - 기존 활용 나노 소재(나노실리카, CNTs, 그래핀 등) 이외에도 다양한 나노 소재에 대한 검토가 이루어지고 있으며, 시멘트를 나노화하는 기술에 대한 연구개발 프로젝트 또한 진행 중임
- 국내의 경우, 건설용 나노 소재 제조 기반은 전무하고 관련 연구 또한 이루어지고 있지 않다는 점에서 현재로서는 관련 기술 및 제품에 대한 국외 의존도가 높아지고 있는 실정임
 - 나노 광촉매 기술을 활용한 자기세정 시멘트 제품의 경우, 국외 업체가 국내 관련 시장에서 주도적으로 제품 판매망을 구축하고 있는 상황임
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 나노 콘크리트 적용을 위한 기반 마련을 위해 경제적이고 대량 생산이 가능한 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 개발 및 대량 생산 기반 조성을 위한 제조 공정이 필요함

- 경량 고강도 나노 콘크리트 제조를 위한 건설용 맞춤형 나노 소재 제조 기술, 나노 소재 표면 개질 및 분산 제어 기술 등의 개발이 필요함
- 나노 소재의 건설시장 적용 확대를 위해서는 제조비용 저감, 제조수율 향상, 나노 소재 물성 기준 수립 등의 문제 해결이 필요함

● (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		개발 목표 스펙
		국내	국외	
건설분야 요구조건 충족 나노 소재 선정 및 요구사항 기준 정립	건설분야 적용 최적 나노 소재 선정	-	-	1건 이상
	건설용 나노 소재 경제성 분석	-	-	1건 이상
	건설용 나노 소재 요구사항 기준 수립	-	-	1건
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술	나노 소재 수율, 균집형상 제어 및 제조 활성화도 향상 공정 인자 도출	-	-	1건
	공정 인자별 최적 조건 및 활성도 향상 공정 조성물 조건 제시	-	-	1건
	나노 소재 제조 기반 에너지/물질수지 제시	-	-	1건
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조공정 설계	건설용 나노 소재 제조 공정 기본설계서	-	-	1건
	건설용 나노 소재 제조 공정 상세설계서	-	-	1건
	건설용 나노 소재 양산 제조 기술(안) 수립			1건
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산 기술	건설용 벌크 나노 소재 시작품	-	-	2건 이상
	건설용 벌크 나노 소재 제품사양서	-	-	1건 이상
	건설용 벌크 나노 소재 제조 가이드라인(안)	-	-	1건 이상
	건설용 벌크 나노 소재 생산단가	-	-	기존 나노 소재 대비 20% 이상 절감
	건설용 벌크 나노 소재 생산수율			기존 나노 소재 대비 70% 이상
	건설용 벌크 나노 소재 순도			60% 이상
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산성 확보/평가 기술	나노 소재 분산안정성 (-)	-	-	0.5년 이상
	분산성 평가 기법	-	-	1건 이상
	나노 소재 분산성 확보 가이드라인(안)	-	-	1건

■ 기술 개발내용 및 범위

● 건설분야 요구조건 충족 나노 소재 선정 및 요구사항 기준 정립

- 기존 기술 및 시장 동향 분석을 통한 건설분야 나노 소재 요구조건 분석

※ 기존 건설재료 및 콘크리트 관련 기술 및 시장동향 분석을 통한 건설분야 나노 소재 요구조건 도출 및 건설용 나노 소재 후보군 선정

※ 건설용 나노 소재 후보군 대상 경제성 분석을 통한 건설용 최적 나노 소재 선정 및 소재 특성 분석

- 건설용 나노 소재 요구사항 기준 수립

※ 건설용 나노 소재 적용 제품 특성 분석 및 적용 나노 소재별 요구사항 도출

※ 건설용 나노 소재 요구사항 기준(안) 수립

● 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술

- 건설용 나노 소재 생산성 향상을 위한 공정 조건 검토 및 도출

※ 나노 소재 수율, 균집 형상 제어 및 제조 활성화 향상을 위한 공정 인자 도출

※ 공정 인자별 최적 조건 및 활성화 향상을 위한 공정 조성물 조건 수립

※ 나노 소재 제조 기반 에너지/물질수지 제시

● 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조공정 설계

- 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 공정 설계 기법 개발

※ 벌크 나노 소재의 연속 자동화 생산을 위한 공정 설계

※ 생산 공정 단순화 및 용제의 재사용이 가능한 처리조·순환조 설계

※ Low-cost 벌크 나노 소재 제조를 위한 국내 공급 가능 저가 원료 활용 기술 개발

※ 생산 단가 절감을 위한 전처리 및 생산 후처리 공정 간소화

※ 벌크 나노 소재의 제조 공정 최적화를 통한 생산성 및 생산수율 안정화

- 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 대량 제조 기술 및 공정 표준화 기술

※ 시멘트 복합체 맞춤형 Low-Cost 나노 소재 양산 제조 기술(안) 수립

※ 제조 안정성, 생산량, 목표 균질성 확보 방안 수립

※ 저에너지 공정 기술 포함 공정 표준화 기술 제시

● 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산 기술

- 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 기술

※ 건설분야 요구충족 나노 소재 벌크화 검토, 시제품 개발 및 제조 가이드라인(안) 수립

※ (나노 소재 범위) CNT, 그래핀, 나노폴리머, 나노산화물 등

※ (나노 소재 형태) 나노분말(Nano-Particle, Nano-Clay, 산화나노 소재 등), 나노선(Nano-Polymer, CNF 등), 판상나노 소재(Graphene) 등

※ (생산단가 요구사항) 기존 나노 소재 대비 20% 이상 절감

※ (생산수율 요구사항) 생산 수율 70%이상

※ (나노 소재 품질 요구사항) 순도 60%이상

● 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산성 확보/평가 기술

- 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산 매커니즘 분석 및 분산성 향상 기술

※ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 분산 매커니즘 분석 및 모델링

※ (분산방안) 화학혼화제 활용 기술, 고압 분산 기술, 기계적 분산 기술 등

※ (분산 요구사항) 분산 안정성 0.5년 이상

4.3 구성 기술 확보 전략

〈표 V-1〉 핵심기술 확보 전략

과제 추진기술	핵심(구성) 기술	핵심 기술 확보 전략					
		공공 협력	민간 협력	자체 개발	국외 도입	국내 도입	기타
나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술	시멘트 복합체 재료 설계 및 평가 기술	●	●	●	○		
	시멘트 복합체 수화최적화 기술		●	●	○		
	시멘트 복합체 수화조직 구조제어 기술		●	●	○		
	건설용 벌크 나노 소재 활용 기술		●	●			
건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술	건설분야 요구조건 충족 나노 소재 선정 및 요구사항 기준 정립		●	●	○		
	건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산성 향상 기술		●	●			
	건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조공정 설계		●	●			
	건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 생산 기술		●	●			
	나노 소재 분산성 확보/평가 기술		●	●			

●: 핵심역할, ●: 보통, ○: 부가역할

4.4 사업화 전략

- 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 기술과 같이 새로이 성장하는 기술의 사업 모델은 이미 성숙된 기술, 발달된 산업, 시장을 장악하고 있는 기업이 존재하는 기존 기술들과 큰 차이가 있음
- 기술을 활용하는 주체의 범위가 명확하지 않을 뿐만 아니라 활용 주체 또는 잠재적인 활용 주체가 있다 하더라도 기술이 완전히 성숙되어 있지 않아 활용 주체가 원하는 바를 충족시켜 주기 어려운 상황임
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 기술에 대한 관심, 나노기술에 대한 인지도 상승이 반드시 시장 확대로 이어지기도 어려운 실정임

- 활용 주체가 원하는 가격, 성능, 안전성 등 복합적인 요인들을 원활하게 해결할 수 있어야만 해당 기술이 시장에 나올 수 있음
- 기존 제품(유사 제품)이 시장을 점유하고 있는 상황이라면, 기존 제품과의 경쟁이 필요하며, 시장에 공개되지 않은 기술이라면 수요자를 창출하고 지속적으로 수익을 올릴 수 있어야 함

■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 재료 기술의 사업화를 위하여 다음과 같은 관점에서 사업화 전략을 구축하고자 함

- 기존 제품에 나노기술을 적용하여 재료 성능을 개선하는 경우 시장 창출은 비교적 용이하나, 성능 향상에도 불구하고 가격이 현재 수준 혹은 그 이하여야 하며, 제품 제조 시 기존 공정 대부분 그대로 사용할 수 있어야 함
- 나노 소재 기술 시장 및 시멘트 복합체 기술 시장의 경우, 기존 공정을 활용할 수 있더라도 기업 간 원가 경쟁이 한계 시점에 도달한 환경이 아니면 새로운 기술을 채택하지 않는 것이 일반적임
- 기존 공정을 활용하여 시멘트 복합체 맞춤형 나노 소재 개발이 가능하도록 프로세스를 구축하는 것이 중요할 것으로 판단되며, 나노 소재 활용 시멘트 복합체로부터 얻을 수 있는 성능 개선에 대한 효과를 활용 주체에게 어필하는 것이 중요함
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술의 확대를 위하여, 관련 공급-수요 기업간, 가치사슬상의 기업간, 기술개발기업(기관)-수요기업간, 기술개발기업-판매기업(제조기업)간, 연구개발기관간 등 기술 제휴가 필요하며, 이를 통하여 신시장을 창출하는 것이 중요함

4.5 파급 효과(기대 효과)

가. 시장 경제적 기대효과

- 기존 건설재료의 성능적 한계를 넘어서기 위한 방안으로 나노 소재를 활용하는 기술이 주목을 받고 있어 국내외적으로 건설시장에 나노기술이 미치는 파급효과는 상당할 것으로 전망됨
- 나노 소재 활용 기술은 다양한 산업 분야에서 고부가가치 기술로 자리매김하고 있으며, 건설산업 분야에서 또한 건설재료의 고부가가치 창출을 위한 하나의 수단으로 검토되고 있음
- 국외에서는 나노 소재 활용 건설재료 산업의 성장 가능성을 예상하고 대규모 투자를 실시하고 있는 반면, 국내에서는 투자규모가 미미한 수준임

- 나노 소재 산업은 산업 사이클에 있어 성장기 단계에 속하고 있으며, 선진각국에서는 나노 소재 활용 시멘트 복합체 기술에 많은 투자를 하여 원천기술을 확보하고 시장을 개척하려는 움직임이 있음
 - 국내 건설용 나노 소재 시장은 아직 형성 전으로 관련 기술에 대한 투자가 이루어지지 않는다면, 향후 관련 기술 시장 형성 시 전량 국외 수입에 의존해야 할 것으로 판단됨
 - 국가차원의 기술개발 지원과 대규모 투자가 이루어진다면 많은 경제적 이득이 예상되며, 관련 기술에 대한 지속적인 투자와 원천 핵심 기술에 대한 경쟁력 확보는 향후 관련 기술 및 제품 수출로 이어질 것으로 예상됨
- 나노 소재 활용 시멘트 복합체는 건설산업의 핵심적인 소재로 전후방 산업의 동반 성장에 큰 기여를 할 수 있음과 동시에 추가적인 응용 분야로의 진출 및 신산업 시장 개척도 가능함

나. 과학기술적 기대효과

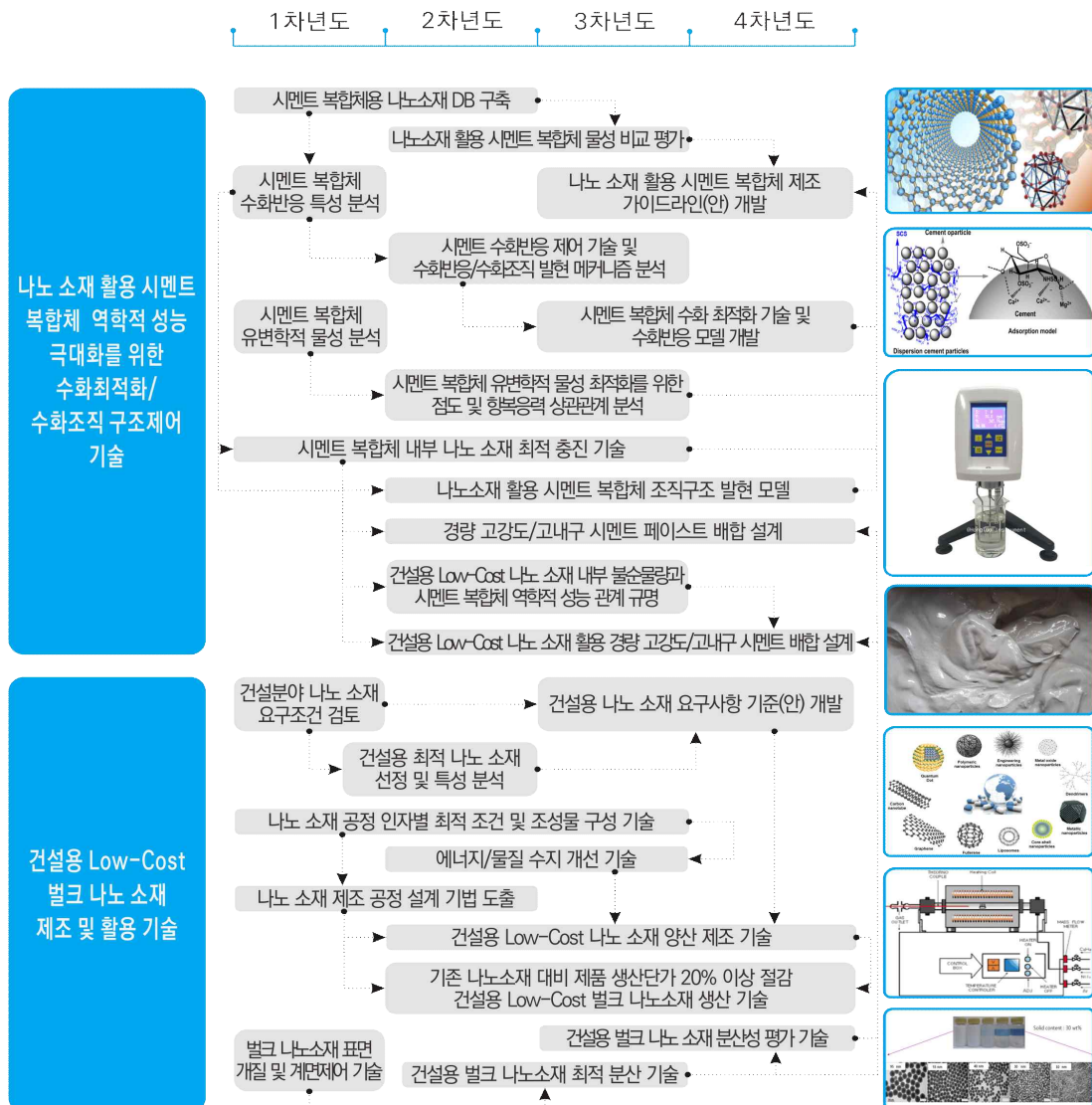
- 나노 소재 활용 기술 개발을 통한 건설재료분야 국가 R&D 역량 및 과학기술 수준 제고가 가능함
- 본 기술 확보를 통해 세계 수준의 기술을 보유하는 건설엔지니어링 강국으로 도약이 가능하며, 핵심 원천 기술 확보와 시장 개척을 통해 세계적 수준의 톱 브랜드 확보 또한 가능함
 - 첨단 시멘트계 소재기술 개발을 통해 새로운 기술 개척이 이루어짐으로써 원천기술 확보 및 톱 브랜드 창출로 국가 경쟁력 강화를 통한 국민의 자긍심이 고취됨
 - 모방형·칸막이형 국가 R&D시스템을 창조형·개방형 R&D 시스템으로 진화시킴으로써 건설산업 분야 국가 R&D시스템을 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대됨

다. 사회문화적 기대효과

- 국내외적 이슈에 대응이 가능한 국가 R&D 과제를 추진함에 따라, 국가 공익적 가치 증대에 기여할 수 있음
- 국내외 메가트렌드에 따른 사회적 이슈 및 미래 니즈에 대응하는 소재 기술을 개발함으로써 국가적 이슈 해결에 기여함
- 나노기술의 안전성 및 성공가능성에 대한 인식을 전환으로 국민 기호도 충족
- 나노 소재 활용 기술을 통한 안전·안심 사회 구축을 위한 혁신적인 신재료 개발이 가능함

4.6 수행 로드맵

- 구성기술 1은 나노 소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술로써 경량 고강도 콘크리트 제조를 위한 3 종류의 시멘트 페이스트 개발에 목표를 두고 있으며, 각각의 요소기술들은 구성기술 2 요소기술들과 연계하여 진행됨
- 구성기술 2는 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 및 활용 기술로 건설분야에서 요구되는 조건을 충족시킬 수 있는 건설용 나노 소재를 경제적이고 대량으로 생산이 가능한 제조 기술 확보를 목표로 두고 있으며, 각 요소기술의 개발 결과는 구성기술 1의 요소기술들과 연계하여 진행됨



〈그림 V-44〉 나노 소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술 로드맵

4.7 연차별/단계별 수행 목표 및 내용

〈표 V-22〉 연차별/단계별 수행 목표 및 내용

기 간	수행 목표	수행 내용
1차년도	- 나노 소재 물리/화학적 특성 DB 구축 - 시멘트 복합체 수화반응 특성 분석 - 시멘트 복합체 유변학적 물성 분석 - 시멘트 복합체 수화생성물 및 공극구조 분석	- 기존 연구 및 기술 동향을 통한 나노 소재 물리/화학적 특성 DB 구축 - 반응성/비반응성 나노 소재 활용 시멘트 복합체 수화반응 특성 분석 - 반응성/비반응성 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 유변학적 물성 분석 - 시멘트 복합체의 수화생성물 및 공극 구조 분석
	- 건설분야 요구조건 도출 및 건설용 나노 소재 후보군 선정 - 나노 소재 생산성 향상 기술 개발 - 나노 소재 제조 공정 설계 - 벌크 나노 소재 활용 기술 개발	- 기존 건설재료 및 콘크리트 관련 기술 및 시장동향 분석을 통한 건설분야 요구조건 도출 및 건설용 나노 소재 후보군 선정 - 나노 소재 생산성 향상을 위한 수율, 균집 형상 제어 및 제조 활성화 향상 공정 인자 도출 - 건설용 나노 소재 제조 공정 단계별 장치 요소 검토 및 개발 - 시멘트 복합체 맞춤형 벌크 나노 소재 표면 개질 및 계면 제어 기술 개발
2차년도	- 시멘트 복합체용 나노 소재 DB 구축 - 시멘트 복합체 수화반응 제어 방법 검토 - 시멘트 복합체 유변학적 물성 최적화를 위한 점성 기술 개발 - 시멘트 복합체 최적 충전 기술 개발 - 경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합 도출 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 시멘트 페이스트 배합 도출	- 기존 연구 및 기술 동향을 통한 시멘트 복합체용 나노 소재 List-up 및 DB 구축 - 수화열 및 수화속도 제어 등을 통한 반응성/비반응성 나노 소재 혼입 시멘트 복합체 수화반응 제어 방법 검토 - 나노 소재 활용 시멘트 복합체의 유변학적 물성 최적화를 위한 점도 및 항복응력 물성 검토 - 경량화, 강도 상승, 내구성능 확보에 최적화된 시멘트 복합체 내부 나노 소재의 충전성 분석 및 충전 기술 제시 - 경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계 도출 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계 도출
	- 건설용 최적 나노 소재 선정 - 나노 소재 생산성 향상 기술 개발 - 나노 소재 제조 공정 설계 - 나노 소재 생산 기술 개발 - 나노 소재 최적 분산 메커니즘 분석	- 건설용 나노 소재 후보군 경제성 분석을 통한 건설용 최적 나노 소재 선정 및 소재 특성 분석 - 공정 인자별 최적 조건 및 활성화 향상을 위한 공정 조성물 조건 수립 - 건설용 나노 소재의 공정 연계성 분석 및 설계 기법 제안 - 건설용 벌크 나노 소재 시작품 개발 - 건설용 벌크 나노 소재 분산을 위한 최적 메커니즘 분석 및 화학혼화제 활용 방안 수립
3차년도	- 시멘트 복합체 적용 물성 비교 평가 및 DB 구축 - 나노 소재 활용 시멘트 복합	- 건설용 나노 소재 활용 시멘트 복합체 성능 평가를 통한 물성 비교 평가 및 DB 구축 - 나노 소재 활용 시멘트 복합체 성능평가 기준 개발

기 간	수행 목표	수행 내용
	- 체 성능평가 기준(안) 제시 ■ 시멘트 복합체 수화반응/수화조직 발현 메커니즘 분석 ■ 시멘트 복합체 유변학적 물성 최적화 기술 ■ 시멘트 복합체 최적 충전 기술 ■ 경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합 도출 ■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 시멘트 페이스트 배합 도출	■ 반응성/비반응성 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체 수화반응/수화조직 발현 메커니즘 분석 ■ 나노 소재 활용 시멘트 복합체 유변학적 물성 최적화를 위한 나노 소재 물성 및 화학혼화제 활용 방안 검토 ■ 경량화, 강도 상승, 내구성능 확보를 위한 나노 소재 및 공극의 효율적 구성 방안 검토 ■ 경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계 도출 ■ Low-Cost 벌크 나노 소재 내부 불순물량이 시멘트 복합체 역학적 성능에 미치는 영향 비교 평가 ■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계 도출
	■ 건설용 나노 소재 특성 분석 및 요구사항 도출 ■ 나노 소재 생산성 향상 기술 개발 ■ 나노 소재 제조 공정 설계 ■ 나노 소재 생산 기술 개발 ■ 나노 소재 최적 분산 기술 개발	■ 건설용 나노 소재 적용 제품 특성 분석 및 적용 나노 소재별 요구사항 도출 ■ 나노 소재 제조 기반 에너지/물질수지 검토 ■ 시멘트 복합체 맞춤형 Low-Cost 나노 소재 양산 제조 기술 개발 ■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 제조 가이드라인(안) 개발 ■ 건설용 벌크 나노 소재 맞춤형 습식 분산 기술 수립
4차년도	■ 나노 소재 활용 경량 고강도/고내구 시멘트 복합체 제조 가이드라인(안) ■ 시멘트 복합체 수화최적화 기술 제안 ■ 시멘트 복합체 수화반응 모델 개발 ■ 시멘트 복합체 조직구조 발현 모델 수립 ■ 나노 소재 최적 혼입량 배합 설계(안) 제시 ■ 경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합 도출 ■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용성 평가 ■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 시멘트 페이스트 배합 도출	■ 나노 소재 활용 경량 고강도/고내구 콘크리트 제조를 위한 시멘트 복합체 제조 가이드라인 개발 ■ 반응성/비반응성 나노 소재 혼입에 따른 시멘트 복합체 수화최적화 기술 및 수화반응 모델 개발 ■ 경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 제조를 위한 나노 소재 최적 혼입량 배합설계 도출 ■ 동일계열 일반 나노 소재 활용 시멘트 복합체와 유변학적 물성, 역학적 성능, 및 미세구조 조직 비교 분석을 통한 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재의 활용성 평가 ■ 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용경량 고강도/고내구 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계 도출
	■ 건설용 나노소재 요구사항 기준(안) 수립 ■ 나노 소재 제조 공정 설계 ■ 나노 소재 생산 기술 개발 ■ 나노 소재 최적 분산 기술 개발	■ 건설용 나노 소재 요구사항 기준 개발 ■ 제조 안정성, 생산량, 목표 균질성 확보 방안 및 저에너지 공정 기술을 포함한 공정 표준화 기술 개발 ■ 기존 동일 나노 소재 대비 생산단가 20% 이상 절감 제품 개발 ■ 건설용 벌크 나노 소재 분산성 향상 및 평가 기술 개발

4.8 연도별 투자 계획 및 소요 인력

가. 연도별 투자 계획

■ 중소기업 대상사업으로 총 66.26억원 / 4년 중 정부출연금 46.27억원 (75%) 대비 민간부담금 17.98억원 (27%)으로 구성된 정부주도 사업으로 추진함

● 연구개발비 세부내용 및 민간부담금은 실제 연구수행 주체가 결정된 이후, 참여 기업의 현황 및 연구자 제안에 따라 변경가능성 존재

〈표 V-23〉 연도별 투자계획

(단위: 억원)

		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
정부출연금		11.53	11.53	12.38	10.83	46.27
민간 부담 금	현금	0.5	0.5	0.54	0.47	2.01
	현물	4.48	4.48	4.81	4.21	17.98
합계		16.51	16.51	17.73	15.51	66.26

〈표 V-24〉 연도별 연구개발비

(단위 : 억원)

세목		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
직접 비	직접비 소계	13.54	13.54	14.54	12.72	54.33
	인건비	7.43	7.43	7.98	6.98	29.82
	연구장비. 재료비	2.28	2.28	2.45	2.15	9.16
	연구활동비	1.82	1.82	1.95	1.70	7.29
	연구과제추진비	1.35	1.35	1.45	1.27	5.43
	연구수당	0.66	0.66	0.71	0.61	2.64
간접비		2.97	2.97	3.19	2.79	11.93
합 계		16.51	16.51	17.73	15.51	66.26

나. 소요 인력

■ 총 소요인력은 각 연도별 인건비, 연구 인력 참여율, 1인당 연평균 인건비를 고려하여 결정함

- 각 연도별 인건비는 각 연도별 정부출연금의 45%로 설정함
- 연구 인력 참여율은 40%로 설정함
- 1인당 월평균 인건비는 박사급 6,338 천원, 석사급 4,860 천원, 학사급 3,249 천원으로 설정함

〈표 V-25〉 연도별 소요인력

(단위: 명)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
박사급	8	8	8	6	30
석사급	15	15	17	15	62
학사급	9	9	10	9	37
합계	32	32	35	30	129

4.9 연도별 성과목표

■ 연도별 연구목표, 연구개발비 등을 고려하여 각 연도별 성과목표를 설정함

〈표 V-26〉 연도별 성과목표

(단위: 건)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
국내논문게재	2	3	3	3	11
국제논문게재	1	2	3	4	10
국내 특허출원	2	2	3	3	10
국내 특허등록	-	-	3	4	7
해외 특허출원	-	-	-	-	-
해외 특허등록	-	-	-	-	-

제3절 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발

1. 기술개발 배경 및 필요성

1.1 현황 및 문제점

■ 건설구조물의 대형화 및 비정형화에 따른 구조 부재의 경량 및 고강도 확보 요구가 증가함

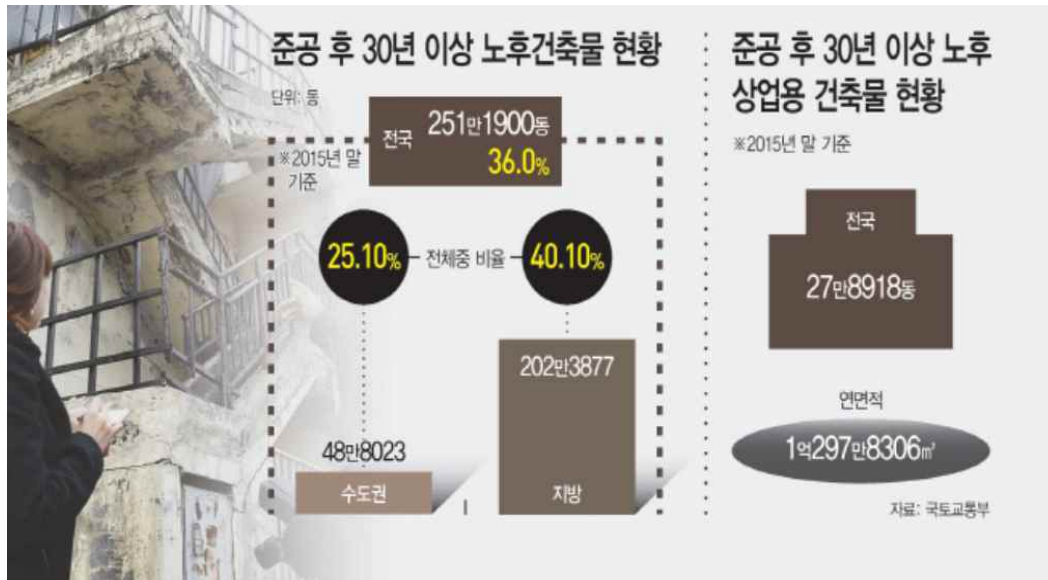
- 현대 사회는 도시의 인구집중에 따른 주거문제를 해결하기 위해 2000년대 이후 구조물이 고층화, 대형화, 비정형화 및 특수화 되고 있음
- 구조물의 고층화 및 대형화는 구조 부재 단면을 크게 함으로써 구조물 전체의 중량 및 구조물 전용 공간을 감소시키는 문제를 야기함
 - 구조물 중량의 증가는 내진성능에 중요한 영향을 미치는 밀면전단력을 증가시켜 구조적으로 불리하게 됨
 - 수직 및 수평부재의 단면 깊이 증가는 동일한 면적에서 구조물의 전용공간을 감소키는 원인이 됨
- 구조 부재의 경량 및 고강도화는 단면의 축소가 가능하며, 구조물의 자중 저감과 함께 구조물 전용 공간 증가에 기여함
 - 구조물의 경량화는 구조물의 밀면전단력을 감소시켜 지진에 대한 저항성을 향상시킬 수 있음
 - 구조 부재의 고강도화는 동일한 면적에서 휨과 압축저항성을 향상시킴으로써 부재단면을 축소할 수 있어 단위면적당 구조물의 전용공간 확보와 더불어 자중을 감소시킬 수 있는 장점이 있음
- 고층화 및 대형화에 의한 지진에 대한 저항성의 불리함과 구조물 전용 공간 감소에 대한 문제점을 해결하기 위해서는 고강도·경량 콘크리트의 기술 개발은 중요한 의미를 가짐



〈그림 V-45〉 세계 최고층 빌딩현황 (2020년 준공예정 구조물 포함)

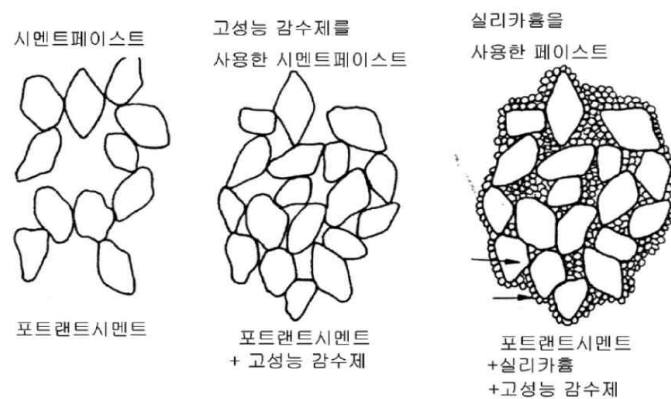
■ 구조물의 장수명화를 위한 고내구 구조 재료의 개발 요구가 증대됨

- 구조 재료인 콘크리트는 외부적·내부적 영향을 받으며, 물리적·화학적 요인에 의해 시간 경과에 따라 열화, 철근부식, 동결융해 및 염해 및 수축균열 등으로 역학적 성능이 저하됨
 - 콘크리트 역학적 성능의 저하는 구조부재의 구조적 결함으로 직결되기 때문에 구조물의 기능을 상실시키는 원인이 됨
- 국내 아파트의 수명은 22.6년, 단독주택은 32.1년, 연립주택은 18.7년으로 평균 24.5년이지만, 영국 및 미국의 구조물의 평균 수명은 각각 140년 및 103년으로 국내 구조물의 수명이 선진국에 비해 매우 짧음
 - 국내에서 재건축이 필요한 30년 이상 노후 구조물은 주거 및 상업용에서 약 279만동에 달하고 있음
 - 구조물의 재건축은 사용상의 기능 상실과 구조적 결함에 의한 심사로 결정되며, 기능상실 보다 구조적 결함을 중요한 지표로 설정하고 있음
 - 구조적 결함은 구조물의 연한에 관계없이 재구조물의 대상으로 지정할 수 있는 항목이므로 콘크리트의 내구성이 구조물의 수명을 좌우하는 매우 중요한 요소임
- 구조물의 장수명화를 위해서는 구조부재의 구조적 결함으로 직결될 수 있는 콘크리트의 내구성을 반드시 확보하여야 함



〈그림 V-1〉 국내의 노후 건축구조물 현황

- 고강도 콘크리트 제조 및 실용화 기술은 세계 각국에서 지속적으로 검토되고 있으며, 더욱 높은 성능을 구현하기 위해 지속적으로 연구가 진행되고 있음
- 고강도 콘크리트 기술은 구성 재료의 최대 성능 발현 기술과 혼화재 및 화학혼화제 활용 기술 등으로 구성되어 있음
 - 고강도 콘크리트는 고강도의 골재를 사용하고, 고성능 감수제로 물-시멘트비를 최소화하며, 시멘트 수화반응시 생성되는 수산화칼륨을 포졸란 반응에 의해 규산칼슘 수화물겔로 전환하는 반응을 촉진시킴으로써 얻을 수 있음
 - 혼화재 중 하나인 미분자입자의 실리카흄을 일반적으로 사용하여 수화반응을 촉진시켜 시멘트 페이스트의 미세조직 구조를 치밀화함으로써 고강도 콘크리트의 제조도 가능함



〈그림 V-46〉 고강도 콘크리트의 페이스트 구조

- 고강도 콘크리트는 초고층 또는 대형구조물에 적용 시 구조물 부재단면 축소 및 자중 감소가 가능하고 휨 성능 증대로 구조물의 수평변위의 감소 및 콘크리트 초기강도 증진에 따른 공기 단축 또한 기대할 수 있음
- 국내·외에서는 고강도 콘크리트의 장점을 활용하여 구조물의 수직부재에 고강도 콘크리트를 지속적으로 적용되고 있음
 - 미국의 경우, 1987년 시애틀의 트윈 유니온 스퀘어 빌딩에 130 MPa급 초고강도 콘크리트가 적용되었고, 1989년 시카고의 225 웨스트 웨커 드라이브에는 96 MPa급, 117 MPa급의 초고강도 콘크리트를 시공한 실적이 있음
 - 일본의 경우 1998년 시미즈 건설이 리버 시티 21에 100 MPa급 초고강도 콘크리트를 적용하였고, 다이세이 건설은 오차노미즈 솔라 시티에 300 MPa급 프리캐스트 기둥을 세계 최초로 적용할 계획에 있음
 - 국내는 삼성건설이 2002년 타워팰리스 3차에 80 MPa급, 2006년 목동 트라펠리스에 150 MPa급의 초고강도 콘크리트를 적용하였으며, 최근에는 국내 대형 건설사를 중심으로 초고강도 콘크리트 개발을 지속적으로 추진 중에 있음

국 외	건축물명	Twin Union Square Building	225 west wacker drive	River City 21	Park City Musashi Kosugi	Burj Khalifa	Ochanomizu Sola City
	소재지	Seattle, USA	Chicago, USA	Tokyo, Japan	Tokyo, Japan	Dubai, UAE	Tokyo, Japan
	타설년도	1987년	1989년	1998년	2005년	2009년	2012년(예정)
	최대설계강도	130MPa	117MPa	100MPa	150MPa	80MPa	300MPa
	사진						
국 내	건축물명	도곡동 타워팰리스 3차	황학동 롯데캐슬	부산 롯데월드	목동 트라펠리스	송도 더샵 퍼스트월드	청라 더샵 레이크파크
	소재지	Seoul, Korea	Seoul, Korea	Pusan, Korea	Seoul, Korea	Incheon, Korea	Incheon, Korea
	타설년도	2002년	2005년	2005년	2006년	2007년	2010년
	최대설계강도	80MPa	120MPa	120MPa	150MPa	120MPa	100MPa
	사진						

〈그림 V-47〉 국내외 고강도 콘크리트를 적용한 대표적 구조물

■ 경량 고강도 콘크리트 제조 및 실용화 기술은 국내외에서 지속적으로 이루어지고 있으나, 구조 부재로의 적용은 미미한 실정임

- 콘크리트 중량의 감소는 구조물의 자중과 밀면전단력을 감소시킴으로써 지진 저항에 대해 유리하며, 구조부재 단면의 크기를 줄여줄 수 있는 특징이 있음
 - 경량 콘크리트는 골재 자체의 단위용적중량이 낮은 경량골재를 굵은 골재와 잔골재로 사용하여 제조한 콘크리트로서 일반 콘크리트의 60~90% 수준의 자중을 가지고 있음
- 국내·외에서는 경량 고강도 콘크리트 제조를 위한 다양한 기술 개발이 이루어지고 있으나 구조물 적용에는 제한적으로 활용되고 있는 실정임
 - 현재까지 경량 콘크리트 제조를 위한 기술은 1900년대 초반부터 경량골재 제조 및 이를 활용한 콘크리트 제조 기술에 중점을 두었으며, 단위용적중량 1,500 ~ 1,950 kg/m³에서 압축강도 35 ~ 80 MPa 수준의 경량 콘크리트가 개발됨
 - 국외에서는 압축강도 35 MPa 이상의 경량 콘크리트 제조기술이 개발되었으나, 실 구조부재로 적용된 경량 콘크리트는 21 MPa ~ 35 MPa 수준에 불과하며, 수직 부재 보다는 수평부재에 제한적으로 적용되고 있는 실정임
 - 국내에서는 1990년대 이후 경량골재의 생산체계가 구축되었으나, 대부분 경량골재 제조 및 이를 이용한 콘크리트의 역학적 특성평가에 국한되어 있어 경량 고강도 콘크리트 관련 기술개발이 매우 미비한 상태임
- 경량 콘크리트 제조를 위한 경량 골재 활용 기술과 관련하여 경량골재 품질 및 적용 콘크리트에 대한 시방서와 같은 설계 기준의 부재로 경량 콘크리트 제조 및 적용은 더욱 어려운 실정임

〈표 V -27〉 인공경량골재의 주요 특성

주요 특성	중국산	독일산	일본산	국내산
원재료	점토	석탄회	세일	석탄회
최대크기 (mm)	12.4	20	19	20
절건밀도 (g/cm ³)	1.20	1.15	1.3	1.3
단위용적중량 (ton/m ³)	0.7	0.3~0.7	0.77	0.75~0.9
흡수율 (%)	17	17	14	13

〈표 V-28〉 경량 콘크리트 국외 적용사례

건물명	위치	시공연도	층수	시공부위	단위용적 중량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)
Austrailian square	호주 (Sydney)	1967	50 (184 m)	7층 이상 보, 기둥, 슬래브	1792	35
Lake point tower	미국 (Chicago)	1968	71	2~70층 슬래브	1780	21
동경도청 청사	일본 (동경)	1991	48 (243 m)	Deckplate 형 슬래브	1850	21

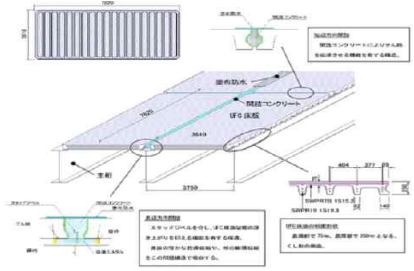
〈표 V-29〉 경량 콘크리트 국내 시공사례

건물명	위치	시공 연도	층수	시공부위	단위용적 중량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)
J-shop 빌딩	창동	-	3	슬래브	1850	35

■ 고내구 콘크리트 제조 및 실용화 기술은 혼화재 및 화학혼화제를 활용하는 기술이 대부분이며, 나노소재 적용 기술이 검토되고 있는 실정임

- 고내구 콘크리트는 표면의 균열발생을 최소화하고, 외부환경요인에 의한 화학적 침식 저항성을 향상시켜 열화 인자의 침투를 방지하는 콘크리트를 의미함
- 국내·외에서는 고내구 콘크리트를 제조하기 위해서 혼화재 및 화학혼화제를 첨가하는 기술에 중점을 두고 있음
 - 혼화재는 대부분 플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카흙과 같은 산업부산물이 활용되며, 화학혼화제는 감수제와 AE감수제가 일반적으로 사용됨
 - 플라이애쉬와 고로슬래그는 콘크리트의 수화열 저감, 장기강도 증가 및 화학적 저항성 및 알칼리 골재 반응을 억제할 수 있어 고내구 콘크리트를 제조하는데 일반적으로 사용됨
 - 국내·외에서는 플라이애쉬, 고로슬래그 및 실리카흙을 조합한 삼성분계 또는 사성분계를 이용한 콘크리트가 꾸준히 현장에 적용되고 있음

〈표 V-30〉 고내구 콘크리트의 적용사례

건물명	위치	시공연도	특징	적용모습
Jean-Bouin Stadium	파리 (프랑스)	2013	폴리프로필렌 섬유로 보강된 고내구 콘크리트 활용	
하네다 국제공항	하네다 (일본)	2010	내염해 및 고강도 콘크리트의 해상활주로 활용	
부산-거제간 고속도로	부산 (한국)	2010	무기질 혼화재 기반의 고성능 콘크리트 활용	
대불자유무 역지역 시설공사	전남 영암	2007	건조수축 저감형 유동화제와 버블시트 양생공법으로 4층바닥 슬래브에 적용	
아산탕정 트라펠리스 아파트	아산시	2013	수축저감을 위한 고성능수축저감제 기동에 일부적용	
월계동 4구역 두산위브현 장	서울시	2016	자체개발한 저가형 수축저감제를 지하주차장 슬래브에 일부적용	

건물명	위치	시공연도	특징	적용모습
광주계림동 5-3구역주택 재개발	광주시	2016	자체개발한 균열저감제를 자하주차장 슬래브에 적용	

● 콘크리트는 다양한 재료의 혼합과 화학적 반응에 의해 경화되는 재료로 이에 따른 수축이 생기고 이로 인해 균열이 발생하여 내구성이 저하하는 경우가 있음

- 국내·외에서는 콘크리트의 수축 저감을 위해 팽창제 및 수축저감제 등의 화학혼화제 첨가 기술이 주를 이루고 있으며, 팽창제와 수축저감제의 활용을 통해 초기 자기수축을 보완함으로써 장기적으로 건조수축을 감소시켜 수축을 저감시킴
- 팽창제와 수축저감제가 적용된 구조물은 콘크리트 압축강도 40 MPa 이하의 수준에서 대부분 슬래브에 일부 적용되고 있는 실정으로 자기수축 및 건조수축이 많은 고층건물의 고강도콘크리트의 구조부재에 적용된 사례는 전무한 실정임
- 균열 저감을 위하여 화학혼화제 또는 양생 방법을 통한 콘크리트의 팽창, 수축 속도를 제어하여 수화반응 상의 자기수축과 대기에서 건조수축에 의해 발생될 수 있는 균열을 최소화시키는 기술이 검토됨

● 최근에는 소재 자체의 역학적 특성이 우수한 CNTs, Nano-Graphene, Nano-silica 등 나노소재를 첨가하여 내구성을 향상시킨 콘크리트를 개발하고자 하는 움직임이 있음

- 현재까지 나노소재를 활용한 고내구 콘크리트의 연구 실적은 실험실 수준으로 현장에 적용된 사례는 없는 실정임

■ 고내구 콘크리트 제조를 위한 혼화제, 화학혼화제 첨가 및 외부 양생 기술은 한계에 도달함

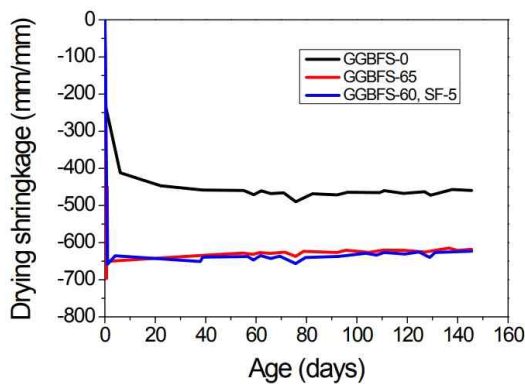
● 고내구 콘크리트 제조를 위해 혼화제를 혼입한 콘크리트는 염해, 동결융해, 중성화 및 알칼리 실리카 반응 등 모든 내구성 저하 인자에 대한 저항성을 갖는데 한계가 있음이 연구를 통해 확인됨

- 플라이애쉬와 고로슬래그를 첨가한 콘크리트는 수화열 저감, 장기강도 증가 및 화

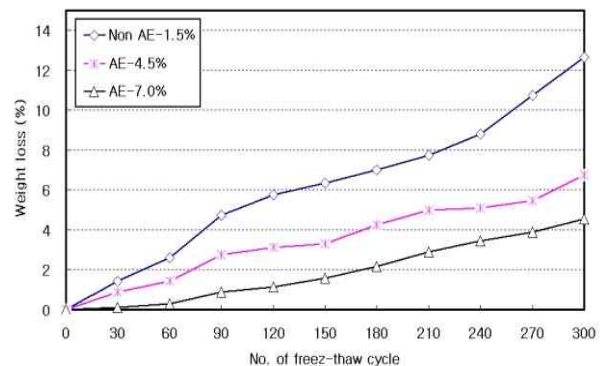
학적 저항성 및 알칼리골재반응을 억제할 수 있으나, 초기 강도의 발현이 늦어지는 문제점이 발생함

- 초기 강도발현 문제 해결을 위해 분말도를 시멘트 수준으로 제조한 혼화재의 첨가는 단면이 큰 부재에서 수화열, 자기수축 및 건조수축을 증가시켜 균열이 발생하기 쉬워짐에 따라 콘크리트의 내구성이 오히려 저하되는 원인으로 확인됨
- 시멘트량이 많은 고내구 콘크리트 배합 시 유동성 개선을 위한 AE 감수제의 첨가는 초기 강도발현을 저해하고 내부 공기량을 증가시킴으로써 동결융해에 대한 표면 열화에 원인이 되고 있음

- 혼화재 및 화학혼화재 첨가 기술로는 모든 내구성 저하인자에 대응 가능한 콘크리트 제조에 한계가 있음이 확인되어 콘크리트 내구성과 관련된 지표인 공극량과 공극형태를 제어할 수 있는 진보적인 제조 기술 및 신재료의 적용이 필요함



(a) 고로슬래그 적용에 따른 건조수축 증가



(b) 동결융해 시 AE제 사용에 따른 질량감소율 저감

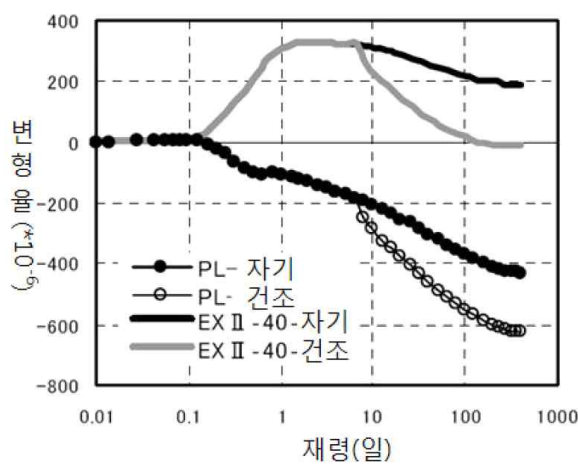
〈그림 V-48〉 혼화재 첨가기술의 내구성 확보의 한계

- 콘크리트의 수축은 콘크리트의 균열과 연결되어 내구성을 저하시키는 주요 원인으로 팽창제 또는 수축저감제를 첨가함으로써 자기수축 및 건조수축을 보완하고 있으나, 고강도 콘크리트와 관련해서는 충분한 효과를 얻지 못하는 실정임

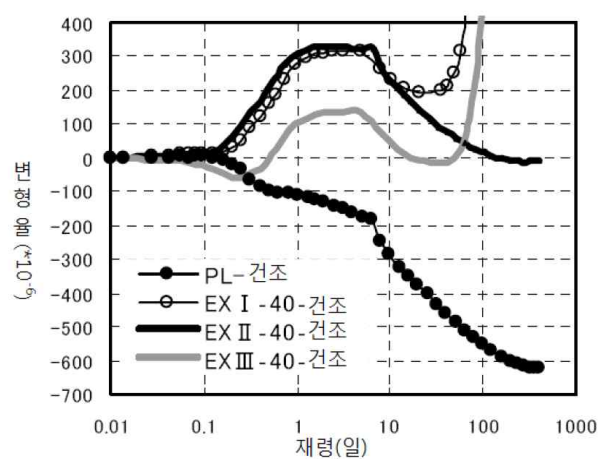
- 팽창제 첨가는 수화반응 초기에 발생하는 자기수축 보완에는 효과적이거나 과도하게 첨가 시 콘크리트가 팽창하여 균열이 발생하고, 초기 미반응 팽창제로 인해 장기재령에서 팽창이 발생하여 압축강도 및 내구성이 저하되는 원인으로 보고됨
- 낮은 물-시멘트를 갖는 고강도 콘크리트 배합에서는 높은 초기 수화반응으로 자기수축이 커짐에 따라 팽창제와 수축저감제를 과다 사용하게 되어, 장기재령에서

재팽창에 의한 균열 발생으로 내구성을 확보하지 못하는 실정임

- 양생 시 수화반응에 따라 자기수축을 감소시키기 위해 배합수의 공급을 지속적으로 유지해야 하나, 일반적으로 콘크리트의 양생은 현장타설 이후 콘크리트 표면만을 습윤상태로 유지하고 있어 콘크리트 내부의 자기수축을 개선할 수 없음
- 콘크리트의 자기수축 및 건조수축 저감을 위해 혼화제에 의한 장기재령에서 재팽창 되는 문제점을 해결하면서 콘크리트 내부에서 배합수의 공급이 지속적으로 이루어 지는 새로운 양생방법이 필요함

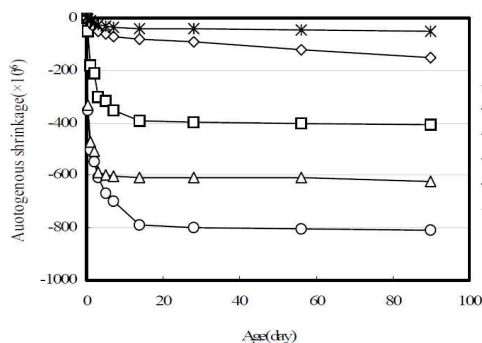


(a) 팽창제의 자기수축 및 건조수축의 저감

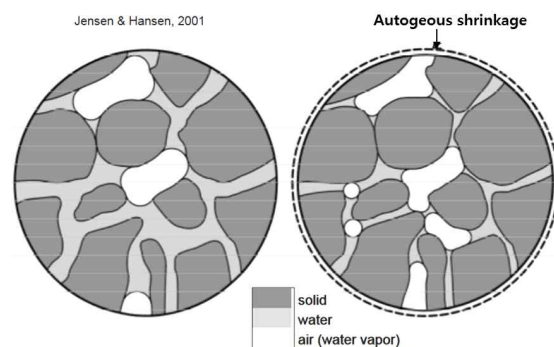


(b) 팽창제의 장기재령에서 재팽창

<그림 V-49> 팽창제 첨가기술의 수축저감과 장기재령에서 재팽창의 문제



(a) 물-시멘트에 따른 자기수축의 변화



(b) 자기수축의 원리

<그림 V-50> 콘크리트 수축의 정의

1.2 기술개발 필요성

- 콘크리트의 고강도화는 구조적 및 내구적인 문제를 가지고 있으며, 이를 해결하기 위한 새로운 재료를 활용한 콘크리트 제조 기술 개발이 필요함
- 압축강도 80 MPa 이상의 성능을 갖는 고강도 콘크리트는 구성 재료의 화학적·물리적 성능을 수화반응을 통해 극대화시켜 고강도 시멘트 매트릭스를 구성함으로써 이루어지며 구조적, 내구적인 문제점을 가지고 있음
 - 고강도 콘크리트는 물-결합재비가 매우 작고 시멘트와 미세한 입자를 갖는 혼화재를 다량으로 사용하여 초기재령에서 수화반응을 극대화시키는 것이 특징임
 - 단면이 큰 부재에 고강도 콘크리트를 적용할 경우, 수화열에 의한 내부균열과 자기수축 및 건조수축에 의한 균열 발생가능성이 높아 장기적으로 내구성이 저하하기도 함
 - 고강도 콘크리트를 사용한 구조 부재는 압축강도 향상으로 최대 내력은 상승되나 최대내력 이후 저하되는 내력의 감소기울기는 매우 급격하여 취성적 파괴 특성을 가지고 있음
- 고강도 콘크리트의 수화열 및 자기수축에 의한 균열 발생과 구조 부재의 취성적 거동은 구조물의 구조적인 문제와 직결되는 문제로, 고강도 콘크리트 구조 부재의 취성적 거동은 기존의 구조적 설계 개념만으로 구조 부재의 연성 유도가 어려움
 - 고강도 콘크리트 압축강도의 50~80 MPa 범위에서는 기존 구조적 설계 개념이 적용되고 있으나, 그 이상의 강도 범위에서는 부분적으로 적용되고 있는 실정임
 - 고강도 콘크리트를 활용한 대형단면 구조 부재 적용에 따른 구조적 및 내구적 안전성 확보의 한계를 극복하기 위해 수축저감 및 연성이 높은 신재료를 적용한 고강도 콘크리트 제조 기술 개발이 필요함

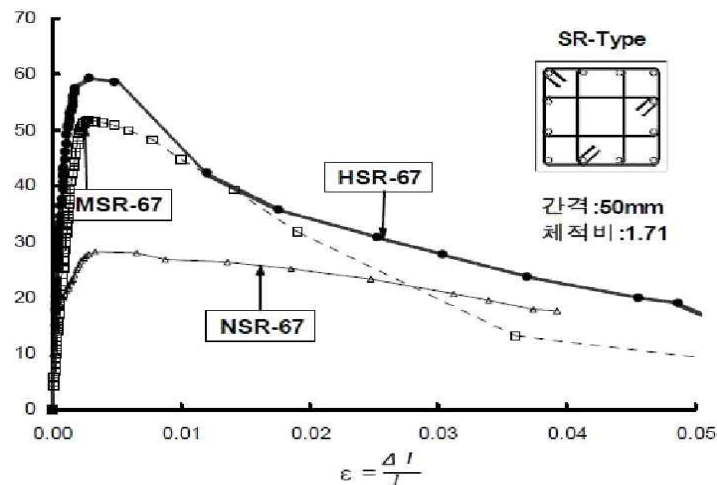


(a) 균열발생 메커니즘



(b) 균열발생 형상

〈그림 V-51〉 수화열 및 자기 및 건조수축에 의한 균열발생가능성

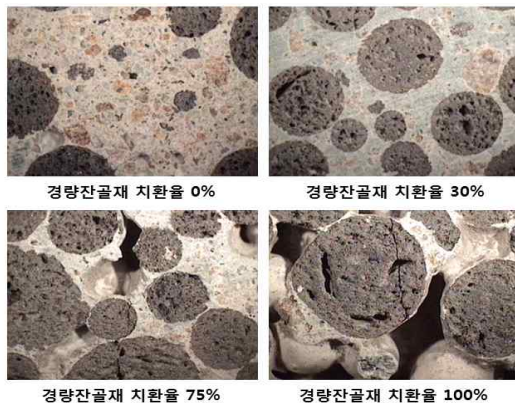


〈그림 V-52〉 콘크리트 압축강도에 따른 기둥의 응력-변형률 관계

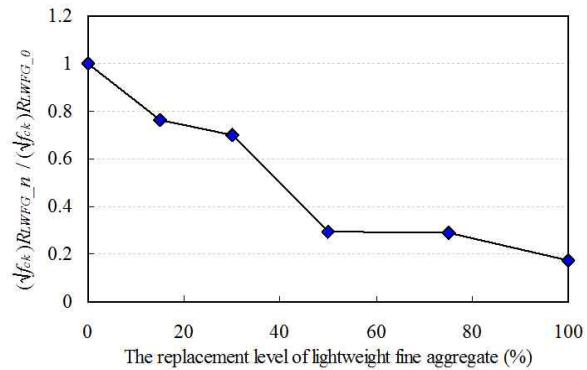
■ 경량 콘크리트의 고강도화를 위하여 구조적·내구적 및 건조수축과 관련된 문제를 반드시 해결해야 하며, 이를 위해서는 새로운 제조 기술 개발이 필요함

- 경량 콘크리트의 강도는 단위용적중량의 증가에 따라 비례하여 커지며, 경량골재의 내부공극 및 자체강도와 밀접한 관계가 있음
 - 콘크리트의 경량화를 위해서는 콘크리트의 단위용적중량을 감소시켜야 하나, 이로 인해 압축강도가 저하하는 문제점이 있음
 - 국외에서는 단위용적중량이 1,950 kg/m³에서 압축강도 80 MPa 수준의 경량 콘크리트 제조가 보고되고 있으나, 그 중량은 일반 콘크리트 보다 19% 가벼운 수준에 불과함
 - 압축강도 80 MPa 이상의 경량 콘크리트를 제조하기 위해서는 더 높은 단위용적중량이 필요함을 의미하며, 강도가 향상될수록 경량골재 사용에 따른 구조물의 자중 감소의 효과를 기대하기 어려움
- 경량 콘크리트는 경량골재 자체의 특성에 현저한 영향을 받으므로, 사용에는 충분한 검토가 필요하며 높은 압축강도를 얻기 위해서는 경량골재의 단점을 극복할 수 있는 새로운 기술이 필요함
 - 콘크리트 내의 경량골재에 관통 파괴가 발생할 경우, 골재의 저항효과가 매우 작아지며 취성적 파괴 특성이 나타남
 - 경량골재의 낮은 탄성계수 및 높은 흡수율은 콘크리트가 건조되는 경우 수축을 보완하는 능력을 감소시켜 일반 콘크리트 보다 건조수축을 증가시킴

- 경량 콘크리트는 경량골재의 취성적인 구조적 문제와 높은 건조수축으로 대부분 압축강도 21 MPa 범위에서 적용되고 있으므로 고강도 수준의 경량 콘크리트가 실제로 적용된 사례는 없는 실정임
- 경량 콘크리트의 단위용적중량을 낮추면서도 압축강도를 향상시키고, 경량골재가 가진 취성적 파괴와 높은 건축수축의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 기술이 필요함

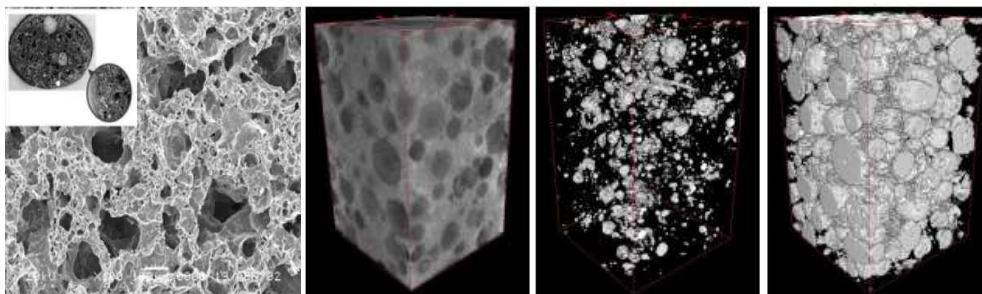


(a) 경량골재 콘크리트의 표면사진



(b) 경량잔골재 치환율과 경량 콘크리트에 대한 압축강도비의 관계

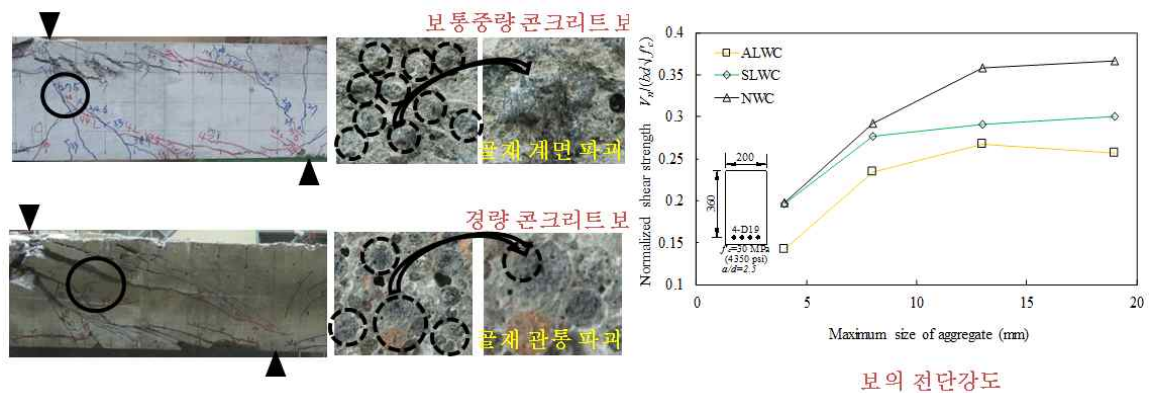
<그림 V-53> 경량골재 치환율에 따른 압축강도의 변화



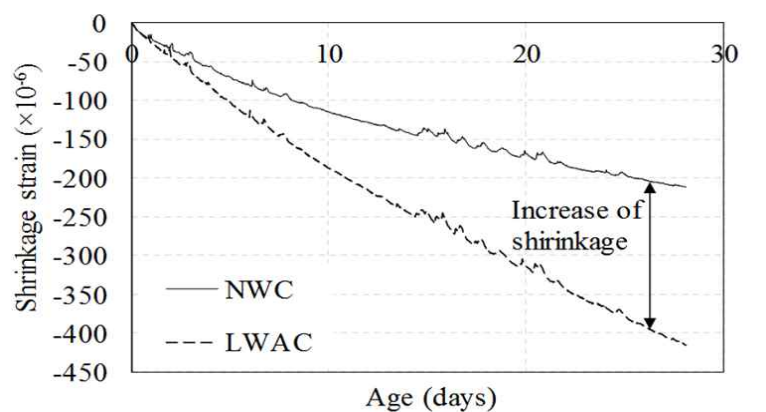
(a) 경량골재 내부 사진

(b) 경량 콘크리트 내부 공극 형상(3D)

<그림 V-54> 경량골재 내부 및 경량 콘크리트의 내부 공극 형상



〈그림 V-55〉 경량 콘크리트의 취성적 특성



(NWC : 보통중량 콘크리트, LWAC : 경량골재 콘크리트)

〈그림 V-56〉 경량 콘크리트의 건조수축의 취약성

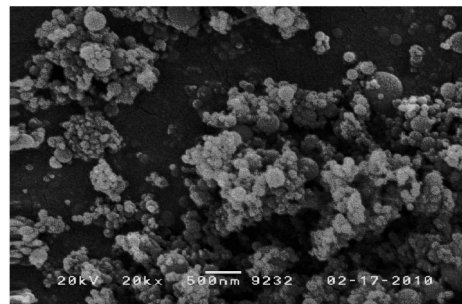
■ 나노재료 및 나노기술과의 융합은 기존의 고강도 콘크리트가 가진 많은 문제를 극복할 수 있으며, 해외 선진각국에서는 이와 관련된 기술에 많은 투자가 이루어지고 있음

- 국외에서는 기존 매크로 또는 마이크로 수준의 재료를 이용한 고강도 콘크리트의 한계성을 극복하기 위해서 나노기술을 융합한 콘크리트 제조 기술이 검토되고 있음

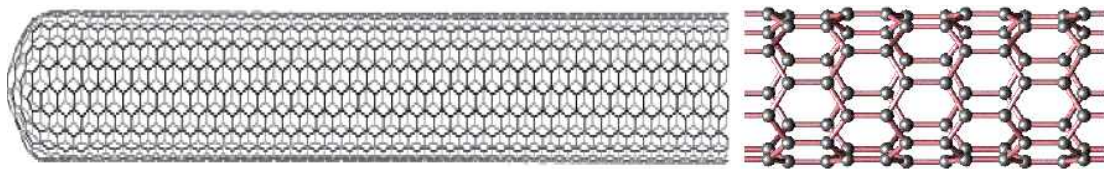
- 독일 드레스덴 대학은 ‘나노 콘크리트’의 합성어인 ‘나노크리트(Nanocrete)’ 분야에서 두각을 드러내고 있고, 미국 정부는 ‘2050 콘크리트 비전’을 만들어 차세대 콘크리트를 적극적으로 기술개발하고 있음
- 국외에서 개발된 나노기술은 콘크리트 구성 재료를 나노 스케일화한 나노시멘트, 나노실리카 및 나노슬래그 등의 첨가 기술과 재료 자체의 고탄성 성질을 보유하고 있는 탄소 재료를 나노화 한 CNTs 제조 및 적용기술 등이 있음

- 국외에서 개발된 나노기술은 콘크리트 구성 재료를 나노 스케일화한 나노시멘트, 나노실리카 및 나노슬래그 등의 첨가 기술과 재료 자체의 고탄성 성질을 보유하고 있는 탄소 재료를 나노화 한 CNTs 제조 및 적용기술 등이 있음

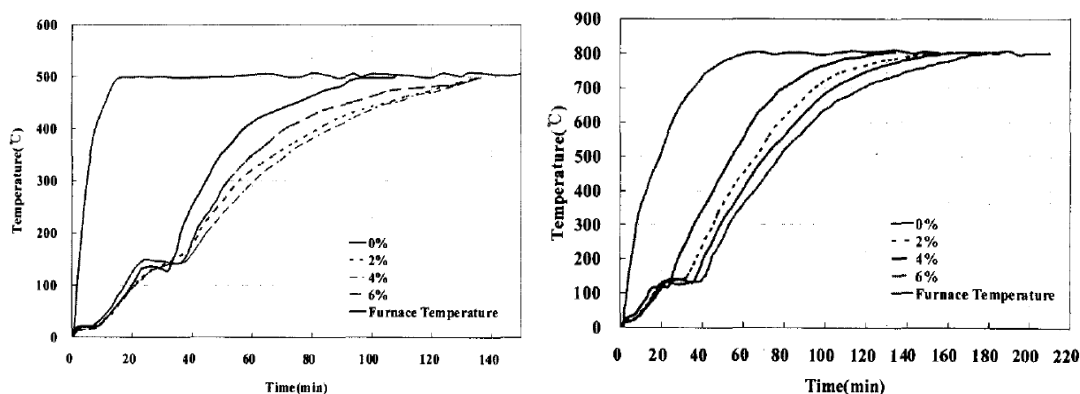
- 일반적으로 나노 콘크리트는 나노 수준의 재료를 필러로 활용함으로써 콘크리트 내부 공극이 밀실하게 충전되어 콘크리트의 강도 및 내구 성능이 크게 증가하는 효과가 보고되고 있음
- 나노 콘크리트는 재료적인 측면에서 내부로 전달되는 열의 온도가 기존 일반 콘크리트에 비해 낮으나, 고강도 콘크리트의 내화성능과 관련된 연구는 다양한 수준의 고강도 범위와 구조 부재의 적용까지는 이루어지지 않고 있는 실정임
- 콘크리트의 고강도화, 경량화, 내화안전성 및 내구성능 향상에 대한 한계성은 나노 기술과의 융합을 통해 충분히 극복할 수 있을 것으로 판단됨



〈그림 V-57〉 나노실리카 (100~200 nm)



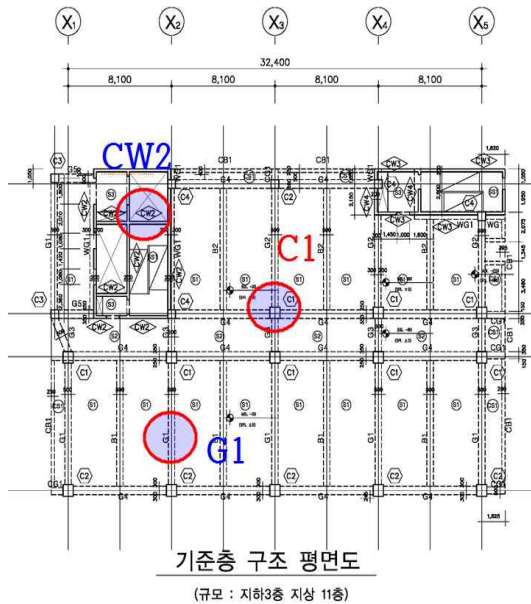
〈그림 V-58〉 카본나노튜브(CNT)



〈그림 V-59〉 나노 콘크리트의 내부 온도의 분포

■ 콘크리트의 고강도화, 경량화에 따라 구조물에 사용되는 재료량의 저감과 유효공간의 증가로 경제적 이익을 얻는 것이 가능함

- 구조 부재의 축력, 휨 및 전단 내력은 콘크리트 압축강도에 따라 달라지며, 최대 축력과 전단 내력과 같이 변형 보다는 힘에 의해 지배되는 부재에서는 그 영향의 정도가 더욱 현저함
 - 수직 부재인 기둥 및 전단벽은 압축강도가 증가하면 휨 내력 보다 최대 축력 및 전단 내력이 상승효과가 더욱 크기 때문에 단면의 크기를 크게 줄일 수 있음
 - 기둥 단면의 크기는 최대 축력만을 고려할 경우, 일반 콘크리트 기둥의 압축강도 향상에 따라 이와 비례하여 기둥 단면을 줄일 수도 있음
 - 수직 및 수평 부재의 압축응력 향상에 따른 단면의 감소는 평면상의 전용 공간을 늘려주며, 수직 공간 확보로 동일한 높이에 더 많은 층을 구성할 수 있게 함
- 구조 부재의 경량화는 전체 구조물의 중량을 줄여 내진설계에서 밀면전단력을 감소 시킴에 따라 내진설계에서 요구되는 주철근 및 전단 철근 소요량을 줄일 수 있어 전체적으로 경제성을 확보할 수 있음
 - 구조물의 고정하중은 콘크리트의 단위용적중량을 $2,300 \text{ kg/m}^3$ 에서 $1,870 \text{ kg/m}^3$ 으로 감소시킬 경우 전체 15.6%가 감소함
 - 고정하중 감소에 따른 밀면전단력 감소는 콘크리트 및 철근 물량을 기준층 기준 각각 1% 및 5% 정도로 감소시킬 수 있어 공사비 절감이 클 것으로 예상됨
 - 고강도 및 경량화를 갖는 구조 부재를 프리캐스트화 한다면 단면의 크기 및 중량이 더욱 감소하여 운반비가 경감되며, 현장 설치 시 부재 취급이 용이하게 되어 시공성이 향상되고 이는 공사비 절감으로 이어지게 됨

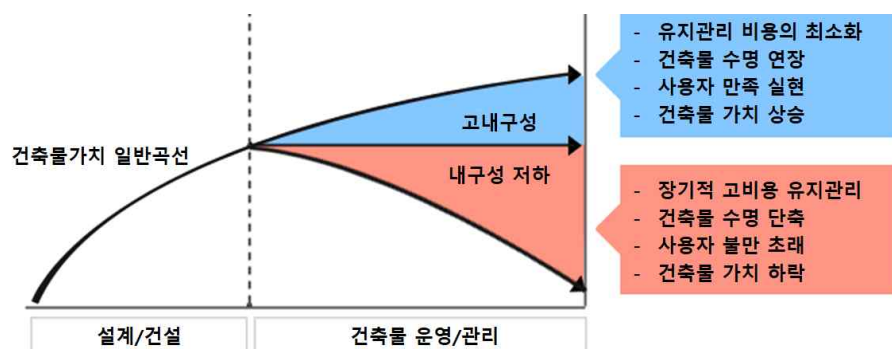


ρ_c (kN/m ²)	기둥(-3C1) : Height=3,900 mm				
	가로폭 (mm)	세로폭 (mm)	주근	띠철근	단면상세
23.00	1100	1000	46-D22	D10@150	
18.70	1000	1000	44-D22	D10@150	
15.70	1000	1000	36-D22	D10@150	

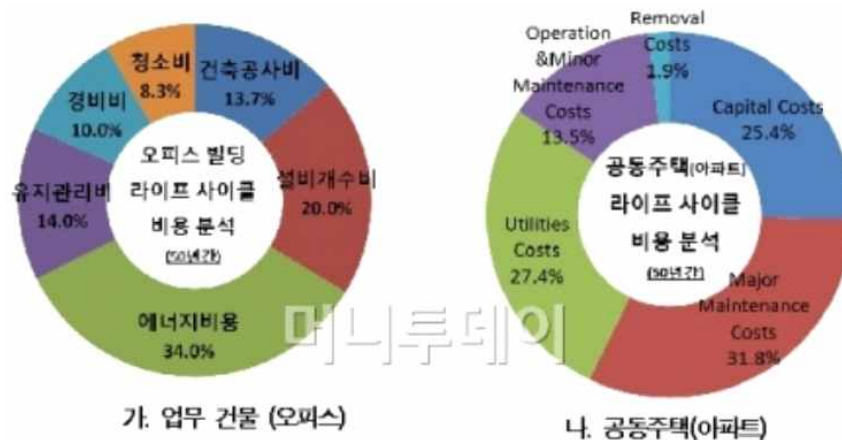
〈그림 V -60〉 자중저감소에 따른 콘크리트 및 철근물량의 감소효과

■ 고내구 콘크리트 제조 기술 확보를 통해 기존의 구조물 유지관리비 감소가 예상됨

- 최근 국내의 30년 이상 노후화된 아파트는 2022년에 200만가구가 재건축의 대상이 될 것으로 예측됨에 따라 많은 유지관리비가 발생할 것으로 예상되며, 이와 관련하여 고내구 콘크리트 기술이 사회적으로 요구되고 있는 실정임
- 콘크리트의 높은 내구성은 전체 구조물의 기능을 장기적으로 유지할 수 있어 평균 25년의 구조물의 수명을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 년수 증가에 따른 구조물 가치 저하의 속도를 늦출 수 있음
- 구조물의 보수와 관련된 고내구 콘크리트 기술은 구조물의 전 생애기간 동안 업무 건물과 공동 주택에서 각각 14%와 13.5%에 해당하는 유지관리비를 감소시킬 수 있음



〈그림 V -61〉 개보수에 따른 구조물의 가치



〈그림 V -62〉 건축생애주기비용

■ 콘크리트의 고강도화, 경량화 및 고내구성 확보는 콘크리트 제조에 따른 천연자원 소비를 크게 절감할 수 있음

- 건설산업에서 2016년 국내 콘크리트 소비량은 연간 평균적으로 1억 6천만 m³이며, 철근의 사용량은 1,100만톤으로 구조부재의 주요 재료로서 천연자원을 다량 소비하고 있음
 - 콘크리트는 석회암을 주원료로 하는 시멘트와 쇄석 및 모래 등과 같이 천연골재인 굵은 골재와 잔골재로 구성되며, 콘크리트의 골재 비율은 전체 체적대비 70%에 해당함에 따라 천연자원 소비가 심함
 - 콘크리트용 골재수요는 2016년을 기준으로 2억 2천만 m³에 달하고 있으며, 2023년에 골재자원이 고갈되는 것으로 예측됨
 - 콘크리트를 고강도화, 경량화, 고내구성을 확보함으로써 콘크리트, 철근 및 천연골재의 천연자원 소비를 직접적으로 절감하는 것이 가능함

〈표 V -31〉 건설산업의 자원 소비량

품목	단위	2015년	2016년	2017년(전망)
레미콘	천 m ³	149,400	163,900	163,000
철 근	천 ton	10,921	11,567	11,060
시멘트	천 ton	50,737	53,000	52,500
골 재	천 m ³	203,417	222,949	232,590
아스콘	천 ton	17,500	18,000	18,500

■ 콘크리트의 고강도화, 경량화 및 내구성능 확보와 관련된 국내 기준 및 사양이 강화되고 있는 실정임

- 콘크리트 구조설계기준은 무근콘크리트, 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물 설계를 위해 필요한 기술적 사항을 기술하고 콘크리트 구조물의 안전성, 사용성 및 내구성을 확보하도록 명시함
- 2012년 콘크리트 구조설계 기준 개정에서는 국내·외의 다양한 콘크리트 내구성 관련 연구 결과를 반영하고, 고강도 콘크리트 및 고강도 철근의 적용범위를 확대하여 고강도 재료와 신기술 적용이 가능하도록 함



〈그림 V-63〉 건설재료의 고강도, 내화성능 및 내구성능 확보를 위한 사양의 강화

- 구조물의 구조기준 등에 의한 관한 규칙(2017. 2. 4시행)에서는 구조물 구조부재는 변형 및 진동이 생기지 아니하도록 필요한 강성확보를 제시하고 있으며, 콘크리트에서 이에 대한 성능 확보가 필요함을 강조함
- KBC 2016에서는 내진성능을 확보하기 위한 구조물의 자중을 경감할 수 있는 기술 개발을 요구하고 있음

- 장수명 주택 건설 및 인증(2014. 12. 25시행)에서는 ‘장수명 주택’의 내구성 항목에 콘크리트의 품질을 포함하고 있으며, 구조물의 장수명화를 위해서는 콘크리트의 내구성이 필요함을 강조함
- 50 MPa급 이상의 콘크리트에 대하여 국토해양부 고시 제 2008-334호 ‘고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준’을 통해 내화성능 기준을 제시하고 있음
 - 고강도 콘크리트가 적용된 부재에 대해서 내부의 온도이력을 평가하여 (콘크리트 내부 강재의 온도 평균 538℃, 최고온도 649℃ 이하) 내화구조로 인정하고 있음

〈표 V-32〉 고강도 콘크리트 내화성능 평가기준

현상	기준				대책
	주철근 온도(℃)		수축량		
	평균	최고	변위	속도	
온도상승에 따른 철근의 내력저하	538	649	$\frac{h}{100}$	$\frac{3h}{1000}$	콘크리트 폭열저감 및 열 차단

- 향후, 콘크리트는 정부에서 요구하는 설계기준 및 관련 정책에 부합할 수 있도록 고강도화, 경량화, 내구성능 및 내화성능을 확보하기 위한 기술 개발이 필요함

■ 고강도, 고경량, 내구성능이 우수한 콘크리트 구조 부재의 프리캐스트화가 필요함

- 건설 기술력의 글로벌화를 위한 정책에서 공고한 성능으로는 건설생산성 향상, 기술 및 제품의 표준화·규격화, 자동화·시스템화 시공 기술로 인력투입 감소 및 인건비 절감이 가능한 구조 부재의 프리캐스트화에 관심이 높아지고 있음
 - 정부는 건축 부재의 프리캐스트화 기술에 대하여 인건비 절감, 공기단축 및 폐기물 감소 효과를 가져오는 녹색 건설 기술로 분류하고 있음
 - 정부는 도시형 생활주택 공급을 활성화하기 위한 정책을 추진 중에 있으며, 주택의 공사 기간과 공사비를 줄이는 방안으로 고강도·경량·고내구 프리캐스트화 방식을 적극 활용하고자 하고 있음
 - 공업화주택(건축부재의 프리캐스트화)의 일환으로 2010년에 센츄리 주택(century housing system, CHS)을 인정·고시하고, 공업화 주택 활성화 정책을 추진 중에 있음
 - 최근 기존 주택의 리모델링 활성화 정책이 추진됨에 따라 주택정책 부분에서 프리캐스트 부재의 사용에 대한 수요 증가가 예상됨

- 구조물의 구조 부재의 프리캐스트화를 통한 부재단면의 축소, 운반비 및 공사비의 절감 등을 위해서는 콘크리트의 고강도, 고경량, 내구성능 확보가 필요함

■ 나노소재 및 나노기술에 융합을 통한 첨단건설재료 관련 국가 정책의 지원이 진행 중임

- 정부는 시설물 안전 및 유지관리 기본계획에서 국민 안전 확보를 위해 시설 안전의 제도 및 정책을 선진화하고 시설물 정밀안전 및 내진성능에 대응할 수 있도록 건설재료에 대한 고강도성 및 고내구성을 지향하고 있음
- 건설기술진흥기본계획에서는 건설기술 정책, 제도 선진화 및 연구개발 촉진 등을 통해 기술 수준을 향상시키고 경쟁력 제고를 위한 법정계획으로서 친환경 및 스마트 건설기술개발을 주요 기조로 삼고 있음
- 건설교통 R&D 중장기 계획에서는 미래 환경 변화에 대응하고 녹색성장 기조에 부합하는 효과적인 투자전략을 목표로 환경부하 저감에 가능한 기술개발을 목표로 하고 있으며, 첨단건설재료로서 친환경건설재료기술, 고효율 및 고성능 건설재료 기술을 포함하고 있음
- 2020년 대한민국 산업을 이끌 미래 100대 기술과 120개 국가전략기술로 슈퍼건설재료 및 자재기술을 선정하고, 세계 선도형 초고성능(고강도 및 고내구) 콘크리트기술을 포함하고 있음

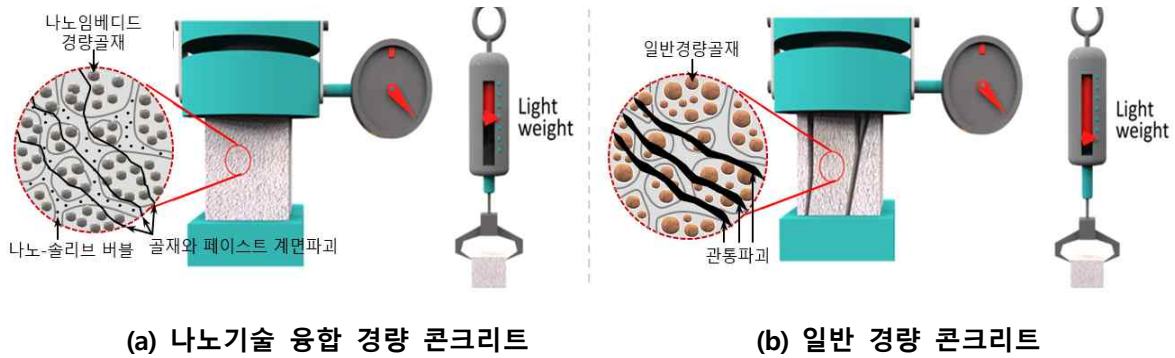


〈그림 V-64〉 국가전략 주요 기술의 내용

2. 기술개발 개요

2.1 기술개발 정의

■ 본 기술은 건설산업의 건설생산성 및 지속가능성 확보와 사회적 이슈에 대응하기 위해 나노기술을 활용하여 고강도·고내구 경량 콘크리트를 개발하는 것임



<그림 V-65> 나노소재 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 모식도

■ (나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술 개발) 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 나노 임베디드 경량골재 및 마이크로-나노 솔리드 버블 합성기술임



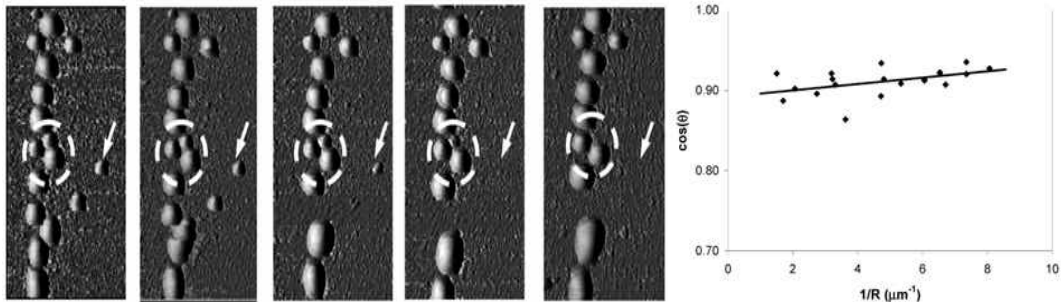
<그림 V-67> 일반 경량골재와 나노 임베디드 경량골재의 특성 비교



(a) 나노버블생성기



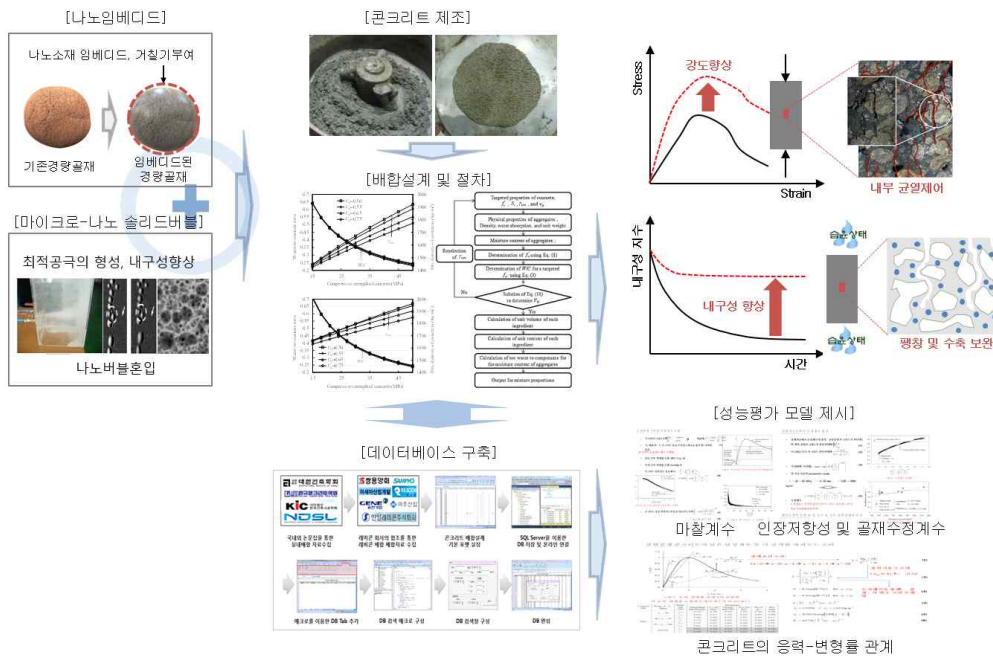
(b) 나노버블생성



(c) 연행공극 내 수분이동 특성 변화에 따른 동결융해 저항성 향상

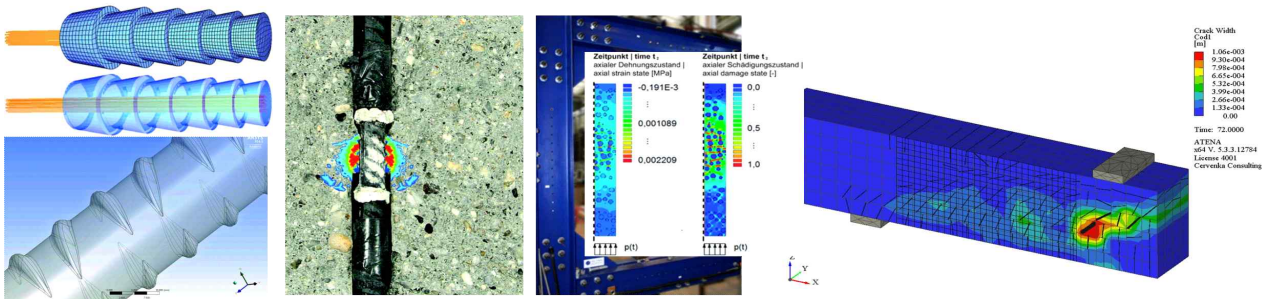
<그림 V-23> 나노 버블을 이용한 내구성 향상 기술

■ (나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 제조 기술 개발) 나노 임베디드 경량골재 및 마이크로-나노 솔리드 버블 합성기술 등을 활용한 압축강도 80 MPa 이상, 기건밀도 1.6 t/m³ 이하인 고강도·고내구·경량 콘크리트 제조 기술임



<그림 V-24> 나노기술 융합 고강도·고내구·다기능 경량콘크리트

■ (고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인 개발) 개발된 고강도·고내구 경량 콘크리트의 실용화를 위한 목적대상 구조물 적용 기술로, 개발 기술이 적용된 목적대상 구조물의 구조적 거동 평가 및 설계가이드라인 개발을 포함하고 있음



<그림 V-26> 고강도 경량 콘크리트의 부착성능 평가개념



<그림 V-27> 고강도 경량 콘크리트의 부재거동 평가

2.2 기술개발 목표

■ 본 기술의 목표는 구조 부재 적용 가능한 나노기술 활용 첨단 콘크리트의 개발이며, 나노 콘크리트의 원천기술 확보 및 실용화를 목표로 함

● 나노기술을 활용하여 기존 콘크리트 대비 내구성은 2배 증가, 중량은 40% 이상 감소된 고강도·고내구 경량 콘크리트 기술 개발임

- 기존 대비 내구성 2배 증가(100년 → 200년)되고 중량이 40%이상 감소($2.3\text{t/m}^3 \rightarrow 1.6\text{t/m}^3$)된 80 MPa 고강도 경량 콘크리트

개발기술	기술개발방향	성능 목표
나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술	- 나노임베디드를 통한 경량골재의 경량성 유지 및 강도 개선 - 나노임베디드 경량골재 표면제어를 통한 친수성 및 거칠기 부여 - 마이크로-나노 솔리드 버블의 합성 - 마이크로-나노 솔리드 버블의 분산 제어	- 나노임베디드 골재 파쇄강도: 180 kN 이상(파쇄율 10% 기준; KS F 2541) - 나노임베디드 골재 흡수율: 3.0% 이하 - 골재-시멘트 부착 평가 관련 항목 (추후 추가 예정) - 마이크로-나노 솔리드 버블 비중 0.6g/cm^3 - 마이크로-나노 솔리드 버블 분산율: 80% 이상
나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 제조 기술	- 나노 임베디드 경량골재 및 솔리드 마이크로-나노 버블 합성 기술활용 콘크리트 배합설계 모델 및 절차 정립 (배합변수고려) - 나노 임베디드 경량 콘크리트의 역학적 특성 및 비탄성변형 평가 및 설계 모델제시 - 나노 콘크리트 내부 공극수 점성 제어 기술 - 나노 콘크리트의 내구성 평가 - 수화모델 및 장기거동 시뮬레이션 기술 - 나노 콘크리트 통합열화 모사기술 - 공극 감소기술 - 다공질 재료 활용 내부양생 기술 - 미수화 재료의 수화반응 촉진을 통한 장기강도 개선 기술 - 양생조건을 고려한 압축강도 발현모델 제시 - 현장 재현성 검증을 통한 압축강도와 굳지 않은 콘크리트의 품질 유지관리 기술 개발	91일 압축강도: 80 MPa 이상 91일 기건밀도: 1.6 t/m^3 이하 - 염소이온 확산계수: 일반콘크리트 대비 10% 이하 - 상대동탄성계수: 90% 이상 $600^\circ\text{C}\cdot\text{hr}$에서 압축강도: 80 MPa 이상 - 현장배합과 실험실 배합 강도차이: 10% 이하
고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인(안)	- 고강도·고내구 경량 콘크리트 부재 성능평가 기술 - 목적대상 구조물 Mock-UP 테스트 - 나노기술을 고려한 시공 및 유지관리 지침 개발	- 고강도·경량 콘크리트 적용 목적대상물 구조 설계가이드라인(안) - 환경성 고려 나노기술 활용 고성능 콘크리트 시공 및 유지관리 지침(안)

2.3 관련재료 기술의 차별성

■ 기존 기술과 각 요소기술의 차별성은 다음과 같이 요약할 수 있음

기술명	구분		본 기술	기존기술	차별성
나노기술 활용 고강도·경 량 콘크리트 제조를 위한 요소기술	경량 골재	파쇄강도	180 kN	140 kN	▪ 나노임베디드 기술적용으로 골재의 파괴강도를 증가시키기 위해 기존 일반골재 파쇄강도 대비 1.25배 향상
		흡수율	3.0%	15%	▪ 나노임베디드 기술적용으로 콘크리트 배합시 유동성 저하의 원인인 다공성의 경량골재 흡수율을 기존 대비 80% 낮춤→시공성 및 품질 확보
	마이크로-나노 솔리드 버블 비중		0.6g/cm ³	1.2g/cm ³	▪
나노기술 활용 고강도·고 내구 경량 콘크리트 제조 기술	경량	압축강도	80 MPa	40 MPa	▪ 나노소재 활용 기존 대비 100% 강도 증진
		단위용적 중량	1.6 t/m ³	1.85 ~ 1.95 t/m ³	▪ 나노소재 활용 단위용적중량 1.6 t/m ³ 으로 저감
	내구성	염소이온 확산계수	10% 이하	15%	▪ 일반콘크리트 대비 나노기술 활용 콘크리트의 염소이온 침투 저항성을 평가하여 내구성 향상
		상대동탄 성계수	90% 이상	85%	▪ 나노기술 활용 콘크리트의 동결 융해에 대한 내구성 향상
	나노 임베디드 경량골재 및 솔리드 마이크로-나노버블 합성기술 활용 콘크리트 배합설계 모델 및 절차 정립		배합설계	없음	▪ 밀도 1.6 t/m ³ , 압축강도 80 MPa 이상의 성능을 갖는 배합설계 기술 개발
	나노 임베디드 경량골재 및 솔리드 마이크로-나노버블 합성기술 활용 콘크리트의 역학적 특성 설계모델		평가모델	없음	▪ 나노 임베디드 경량골재 및 마이크로-나노버블 합성기술 활용 콘크리트의 역학적 특성(재령별 압축강도, 탄성계수, 파괴계수, 쪼갬인장강도, 부착강도, 전단마찰강도 등)을 예측할 수 있는 설계모델 제시
고강도·고 내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이 드라인	구조물 적용기술		구조거동 및 Mock-UP 테스트	없음	▪ 밀도 1.6t/m ³ , 압축강도 80 MPa 이상의 고내구성 콘크리트 부재에 대한 구조거동 및 Mock-UP 테스트 연구결과 확보
	지침		설계 및 시공지침	없음	▪ 고강도·경량 콘크리트 설계가이드라인 및 환경성 고려 나노기술 활용 콘크리트의 시공지침 확보

3. 국내외 기술개발 동향

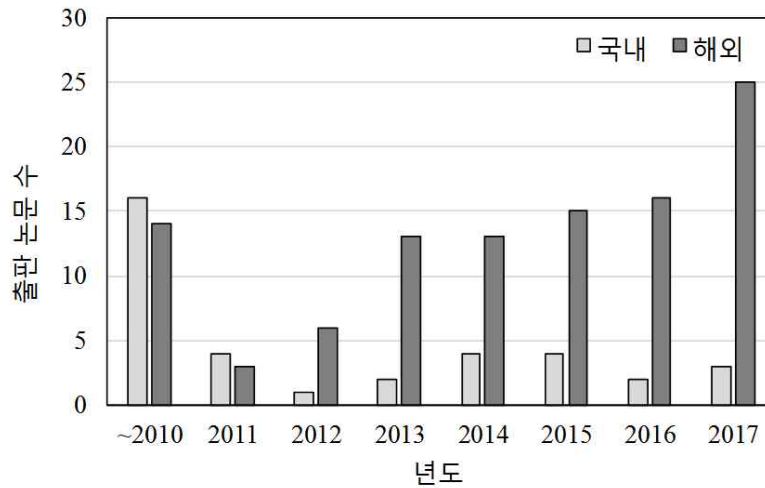
3.1 국내외 동향

가. 관련 기술 개발 및 연구 동향

■ 나노소재 활용 콘크리트 관련 국외 기술 개발 및 연구 동향은 다음과 같음

- 나노기술은 물질을 나노미터(nm) 크기 영역에서 물질을 생성, 분석하고 이를 이용한 응용 소재 및 소자 등을 제작 응용하는 기술을 통칭함
 - 나노소재를 제조 또는 합성하는 방식은 크게 2가지로 분류할 수 있으며, 크게 조성의 변화 및 결정구조 혹은 물질 구조 변경으로 구분됨
 - 응용에 기반한 크기 변화 및 2종류 이상의 물질을 합성하는 등과 같은 나노기술은 나노소재의 크기나 길이를 변화시킴에 따라 응용성의 확대를 가져오는 새로운 기술로써 주목받고 있음
- 나노소재 활용 콘크리트 기술은 미국, 유럽 등의 국가를 중심으로 2000년대 초반부터 연구되기 시작하였으며, 2010년을 기점으로 콘크리트의 성능 향상에 대한 사회적 관심이 증가함에 따라 관련 연구 및 문헌 등이 증가하고 있음
 - 기존 나노소재를 이용한 콘크리트 기술은 주로 탄소기반의 CNTs 활용에 중점을 두고 있으나, 최근에는 콘크리트의 품질향상(고강도 및 내구성 향상)과 CNTs의 대량합성 및 품질 고도화 측면에서의 기술 개발에 초점을 두고 있음
 - 나노 실리카, 개질 유황 및 슬래그와 같은 재료를 활용한 콘크리트 기술 또한 개발되고 있으며, 나노 섬유를 사용한 콘크리트의 강도 증진 및 염해저항성 개선 등의 연구도 수행되고 있음
 - 나노소재와 순환 골재를 함께 사용한 연구, 플라이애시와 같은 혼화재와의 혼합사용 연구도 진행되고 있으며, Al_2O_3 , TiO_2 및 ZrO_2 와 같은 다양한 나노소재를 혼입한 콘크리트에 대한 연구도 보고되고 있음
 - 유럽, 미국 등 선진 국가를 중심으로 고분자 폴리머 및 복합소재 등을 나노소재 활용 기술을 기반으로 적용함으로써 콘크리트의 품질 향상 기술을 개발하고 있는 실정임
- 나노소재와 관련하여 대량합성 파일럿 플랜트 설비 등 인프라 구축의 노력이 이루어지고 있으며, 이에 따른 재현성 및 일관된 품질 유지를 위한 상용화 기반을 마련 중에 있음

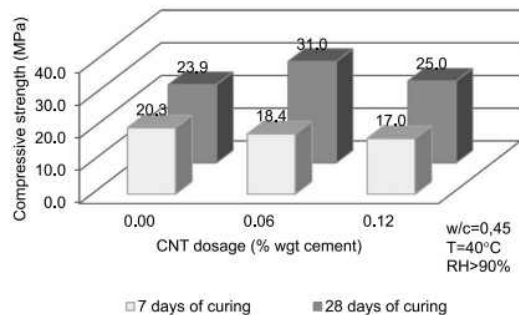
- 국내에서는 2000년대 초반부터 나노 콘크리트에 관한 연구를 시작하였으며, 콘크리트에 혼합이 가능한 나노 입자로 SiO_2 가 주성분인 Nano- SiO_2 에 대한 검토를 진행하였음

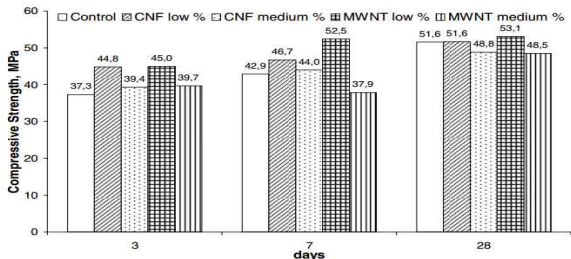
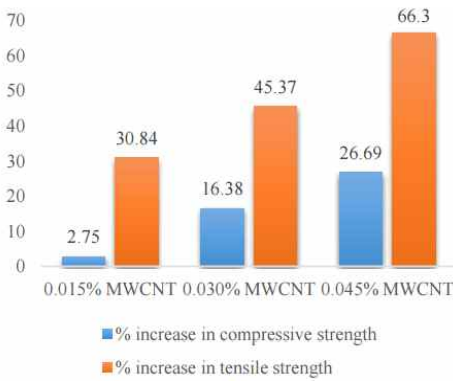


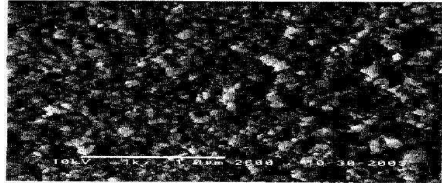
〈그림 V-74〉 국내외 나노소재 활용 콘크리트 관련 문헌현황

〈표 V-33〉 나노소재활용 콘크리트 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	내용
GO4APP	고급폴리머 응용을 위한 그래핀 산화물 연구	■ 그래핀 산화물을 이용한 고분자 재료의 기계적, 열적 및 전기적 특성으로의 응용을 모색하고 있음 ■ 제안 기술에서 제시하는 제품(GO 첨가제)를 이용하여 물리적 및 구조적 특성이 향상된 폴리머의 제작이 가능함
COMPOSKE	복합소재를 이용한 골재 생산 신기술 개발	■ 유리섬유로 보강된 골재를 활용한 기술로서 링, 격자 및 와이어네트의 구조 형태로 골재의 표면을 코팅함 ■ 유리섬유로 보강된 골재를 활용한 콘크리트는 힘 강성 개선 및 두께 감소의 효과를 나타냄
Bialystok University of Technology, Poland	CNT 혼입에 따른 시멘트의 압축강도 향상 기술	■ 초음파 처리를 이용하여 CNT의 대량 합성 시 균일한 확산 및 응집을 제어하는 효과적인 방법을 제안함 ■ 시멘트 중량 대비 0.06% 수준의 CNT를 혼합한 모르타르는 재령 28일에서 일반 시멘트 모르타르에 비해 우수한 압축강도 발현 효과를 나타냄



주체	관련기술	내용																								
Diponegoro University, Indonesia	나노시멘트 제조와 성분비에 따른 특성	- 나노소재 혼입 시멘트의 제조와 이를 활용한 시멘트 모르타르의 역학적 특성 변화를 평가함 - 나노소재 혼입 시멘트의 경우 일반 시멘트 중량의 40% 수준을 치환하여 사용할 경우 압축강도 증진의 효과를 보임																								
ACCIONA Infraestructuras, Spain	나노실리카 및 탄소나노섬유 혼입 콘크리트 특성 평가	- 나노실리카 및 탄소나노섬유를 활용한 콘크리트의 수화속도 및 강도 증진의 효과를 검증함 - 재료 자체의 주요 성분이 실리카로 이루어진 나노실리카는 포졸란 효과에 의해 장기강도 개선의 효과를 나타내었으며, 탄소나노섬유는 시멘트의 수화를 촉진시키는 효과를 나타냄  <table><caption>Compressive Strength (MPa) Data</caption><thead><tr><th>Days</th><th>Control</th><th>CNF low %</th><th>CNF medium %</th><th>MWNT low %</th><th>MWNT medium %</th></tr></thead><tbody><tr><td>3</td><td>37.3</td><td>44.8</td><td>39.4</td><td>45.0</td><td>39.7</td></tr><tr><td>7</td><td>42.9</td><td>48.7</td><td>44.0</td><td>52.5</td><td>37.9</td></tr><tr><td>28</td><td>51.6</td><td>51.6</td><td>48.8</td><td>53.1</td><td>48.5</td></tr></tbody></table>	Days	Control	CNF low %	CNF medium %	MWNT low %	MWNT medium %	3	37.3	44.8	39.4	45.0	39.7	7	42.9	48.7	44.0	52.5	37.9	28	51.6	51.6	48.8	53.1	48.5
Days	Control	CNF low %	CNF medium %	MWNT low %	MWNT medium %																					
3	37.3	44.8	39.4	45.0	39.7																					
7	42.9	48.7	44.0	52.5	37.9																					
28	51.6	51.6	48.8	53.1	48.5																					
University of Wisconsin-Milwaukee, USA	나노입자를 활용한 시멘트의 강도 증진효과 연구	나노 입자를 적용한 시멘트는 입자 표면에 형성되는 나노 레이어 및 나노그리드 등의 형성됨에 따라 강도 증진의 효과가 나타남																								
Siegen University, Germany	MWCNT를 이용한 시멘트 강도 증진 연구	- MWCNT를 혼입한 콘크리트의 강도 증진 효과를 평가함 - MWCNT를 혼합한 콘크리트는 재령 7일 및 14일에서 일반 콘크리트에 비해 압축강도 각각 7% 및 14% 증가함																								
South Asian Institute of Technology and Medicine, Sri Lanka	MWCNT의 혼합율에 따른 콘크리트 성능 향상 연구	- 기능성 MWCNT를 이용한 콘크리트의 역학적 특성을 평가함 - MWCNT를 시멘트 중량의 0.045% 첨가하여 활용한 경우 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 일반 콘크리트 대비 약 27% 증가하였으며, 인장강도의 경우 66% 수준으로 크게 증가함  <table><caption>% Increase in Strength Data</caption><thead><tr><th>MWCNT Concentration</th><th>% increase in compressive strength</th><th>% increase in tensile strength</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.015% MWCNT</td><td>2.75</td><td>30.84</td></tr><tr><td>0.030% MWCNT</td><td>16.38</td><td>45.37</td></tr><tr><td>0.045% MWCNT</td><td>26.69</td><td>66.3</td></tr></tbody></table>	MWCNT Concentration	% increase in compressive strength	% increase in tensile strength	0.015% MWCNT	2.75	30.84	0.030% MWCNT	16.38	45.37	0.045% MWCNT	26.69	66.3												
MWCNT Concentration	% increase in compressive strength	% increase in tensile strength																								
0.015% MWCNT	2.75	30.84																								
0.030% MWCNT	16.38	45.37																								
0.045% MWCNT	26.69	66.3																								

주체	관련기술	내용
Hui Li et al.	Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement	▪ Nano-SiO₂ 및 Nano-TiO₂를 첨가제로 사용한 콘크리트 내마모성 평가를 위해 일반 콘크리트와 폴리프로필렌을 포함한 콘크리트의 내마모성 실험을 수행함 ▪ 나노 입자 및 폴리프로필렌을 사용한 콘크리트의 내마모성은 보통 콘크리트에 비해 내마모성이 크게 향상되었으며, 그 정도는 나노입자를 사용한 콘크리트에서 더 큼 ▪ 나노 입자 혼입량의 증가는 콘크리트 압축강도와 내마모성을 증가시킴
A.H. Shekari and M.S. Razzaghi	Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete	▪ 나노 ZrO₂, Fe₃O₄, TiO₂ 및 Al₂O₃ 입자를 사용한 콘크리트의 물리적 특성 및 내구성을 평가함 ▪ 실험 결과 모든 나노 입자는 콘크리트의 물리적 특성과 내구성을 향상시키는데 매우 효과적이었으며, 나노 Al₂O₃ 입자는 고성능 콘크리트의 물리적 성질을 향상시키는 데 가장 효과적이었음.
조병완 등	나노 실리카 분말을 혼입한 콘크리트의 내화성능연구	▪ 나노 실리카 분말 혼입률과 실험온도를 변수로 하여 중량손실률, 내부온도 측정 및 압축강도 실험 등을 수행하였으며, 그 결과를 보통 콘크리트와 비교함 ▪ 연구 결과, 나노 입자 혼입률의 증가는 화력을 가한 후 콘크리트 중량 손실률을 감소시켰으며, 압축강도를 효과적으로 증진시킴 
고정 등	나노 개질유황 콘크리트의 역학적 특성	▪ 유황을 개질하여 저온에서 용해되며, 혼화재 개념으로 혼입된 콘크리트와 보통 포틀랜드 콘크리트의 압축강도, 인장강도 및 접착강도를 비교함 ▪ 나노 개질 유황이 첨가된 콘크리트의 압축강도는 보통 포틀랜드 콘크리트에 비해 적었으며, 접착강도는 40% 이상 증가됨
류수지 등	고강도 내화 나노-폴리머 모르타르의 수축 및 동결저항 특성	▪ 시멘트 일부를 내화재료로 치환한 고강도 내화 나노-폴리머 모르타르의 수축 및 동결저항 특성을 평가함 ▪ 나노-폴리머가 혼입된 모르타르의 소성 수축은 보통 콘크리트에 비해 현저하게 적게 나타났으며, 동결융해 저항성은 미미하게 높음   Plain 모르타르 나노-폴리머 내화모르타르

■ 경량골재 소재 및 경량골재 콘크리트 관련 기술 개발 및 연구 동향은 다음과 같음

- 경량골재와 관련하여 약 50년 전부터 구조용으로 활용할 수 있도록 품질 개선과 다양한 연구를 통하여 재료 및 구조적 특성을 평가하고 있음
 - 1940년대 유럽에서 분말 석탄재를 소성한 인공경량골재의 개발이 시작되었으며, 고품질의 경량 골재인 Leca가 덴마크에서 개발되어 영국, 독일을 비롯한 유럽 각 지역에 보급됨
 - 일본에서는 1947년 경량골재 개발 특허가 출원 된 후 전국적으로 보급·활용되기 시작되었고, 1950년대부터는 펄라이트를 이용한 고정량 인공 경량 골재의 개발을 실시하여 골재의 품질 고도화를 도모함
 - 일본은 1950년대 구조용 인공경량 콘크리트 골재(JIS A 5002)에 대한 기준이 제정되면서부터 하수도 침전물, 도시 쓰레기 잔류물, 석탄재 등 산업 부산물을 이용한 경량골재 등의 개발에 집중적으로 투자하고 있음
 - 일본에서는 경량골재의 품질 향상을 위한 방법으로 골재 표면 피복을 통한 흡수율 저감 등의 연구를 진행해 오고 있음
 - 미국, 유럽 및 일본 등 선진 국가에서는 경량 골재의 고품질화 및 콘크리트의 품질 고도화를 위한 연구를 진행하고 있으나 미미한 수준에 그치고 있음
 - 일부 신진 연구자에 의해 나노 실리카를 활용한 경량골재 코팅과 이를 이용한 콘크리트의 내구성 향상에 관한 연구가 시도되고 있으나, 이는 아직 초기단계로서 지속적인 연구가 필요한 실정임
 - 국내의 경우, 경량골재 제조에 필요한 자원의 부족과 비교적 풍부한 천연골재를 보유하고 있는 이유로 인공경량골재 생산의 필요성이 대두되지 않고 있는 실정임
 - 1990년경부터 경량 골재의 생산이 시작되고 있으나, 이를 이용한 경량 콘크리트에 관한 연구 실적 및 적용 사례는 매우 적은 실정임
- 경량골재 제조와 관련하여 천연 광물 활용 경량 골재 제조 외에 산업부산물 활용 제조 인공 경량골재 제조 등 1차원적인 단순 기초 소재 개발이 주를 이루고 있음
 - 인공 경량 골재의 제조는 제조 원료, 원재료의 분쇄 및 소성 과정 등에 따라 최종 생산품의 품질이 매우 다른 것이 특징임

- 연구자마다 제시하고 있는 최적의 제조 조건이 상이하여 콘크리트 적용 시 일정한 성능 확보에 어려움이 따름
- 경량 골재의 품질성능 향상을 위한 연구는 산업부산물을 활용한 표면 코팅 기술 등이 존재하지만, 밀도 및 흡수율 등의 품질 확보 측면에서 그 실용성이 미비함
- 경량골재와 관련된 대부분의 연구는 경량골재의 품질체계 확립 및 경량 콘크리트의 특성 정립이며, 배합조건에 따른 유동성과 압축강도 평가에 중점을 두고 진행됨
- 경량 콘크리트에 주로 사용되는 경량골재의 밀도는 천연골재와 비교하여 30% 이상 작으므로 배합 시 골재가 떠오르거나 재료 분리 현상 등이 발생하여 콘크리트의 유동성과 압축강도 등 품질이 저하될 우려가 있음
- 경량 콘크리트 품질 저하를 해결하기 위한 연구도 일부 보고되고 있으나, 배합설계 방법의 정립에 이르지 못하고 이와 관련된 연구 또한 찾아보기 어려운 실정임
- 나노소재 활용 경량 콘크리트 기술은 기존 경량 골재의 한계를 극복하고, 비용 및 효율성 측면에서 차별성을 지님

■ 경량 고강도 콘크리트 관련 기술 개발 및 연구 동향은 다음과 같음

〈표 V -34〉 관련 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	내용
Ozinga Bros.Inc (미국)	경량 골재를 사용한 콘크리트 제조 및 시공기술	■ 천연경량 골재 및 인공경량 골재를 활용한 경량 콘크리트의 제조 기술을 개발 및 보유하고, 실제 고층 건물의 슬래브 등에 적용한 다양한 사례를 보유함 ■ 팽창혈암을 이용한 경량 콘크리트의 제조 기술 (압축강도 35 MPa 및 단위용적 질량 1,760 kg/m³)
Haydite (미국)	경량골재 제조기술	■ SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 등의 성분 조성 변화를 통해 다양한 목적 환경 하에서 활용이 가능한 경량골재 제조 기술을 확립하고, 현지 레미콘 회사와의 MOU 체결을 통해 경량골재의 납품 실적을 다수 보유함
Wilson et al.	해양 플랫폼 적용을 위한 경량 고강도 콘크리트 개발	■ 해양 환경에서의 경량 콘크리트 적용성을 평가하기 위하여 압축강도 60 MPa 수준의 경량 고강도 콘크리트를 개발함 ■ 건조수축, 동결융해 저항성, 탄산화 저항성 및 염

주체	관련기술	내용
		소이온 침투저항성 평가를 통해 활용 가능성을 평가함 ▪ 결과적으로 흡수율이 높은 경량 골재 재료 특성으로 인해 일반 콘크리트 대비 낮은 내구성능을 나타냄
Sintef, NTH	경량 고강도콘크리트 및 경량 고강도콘크리트 재료	▪ Norwegian Constructor, Norcem, Elkem materials, Leca, Selmer 등 다수의 경량 콘크리트 생산 산업체와 연계하여 경량 고강도 콘크리트 재료 및 콘크리트 개발에 대한 연구를 진행함 ▪ 단위용적질량 1,950 kg/m³ 및 압축강도 80 MPa 이상인 경량 콘크리트 개발 및 역학적 특성을 규명함 ▪ 단위용적질량 1,500 kg/m³~1,950 kg/m³ 및 압축강도 35~80 MPa 수준의 경량 콘크리트를 제조함
최영준 외	EAF-dust, 점토를 이용한 인공 경량 골재 콘크리트	▪ 제철소에서 발생하는 지정 폐기물인 EAF-dust를 점토 등의 원료로 안정화시켜 제조한 인공 경량 골재 생산 및 이를 이용한 콘크리트의 성능평가를 실시함 ▪ 쇄석을 이용한 일반 콘크리트에 비해 단열성 및 건조수축특성의 개선 효과를 가짐
한양대학교	산업폐기물활용 경량 고강도콘크리트	▪ 경량 골재 콘크리트의 강도 증진을 위하여 고로슬래그, 플라이애시 및 실리카폼을 혼합한 경량 골재 콘크리트의 최적 배합을 도출함 ▪ 경량 골재의 품질특성 개선 및 향상기술이 아닌 단위 결합재량의 증가에 따른 콘크리트의 강도증진에 초점을 둠
한국국제대학교	친환경 경량골재 개발을 통한 난연성 경량 콘크리트 패널의 내장시스템 개발	▪ 산업부산물인 바텀애시(Bottom ash)의 재활용 문제 해결 및 천연골재 수급의 대안을 제시함 ▪ 바텀애시 미분말 및 유기계 결합재 등으로 이루어진 코팅재를 이용하여 경량골재의 품질안정화에 초점을 두었으며 이를 이용한 경량 콘크리트 프리캐스트 제품을 개발함
신재경	산업부산물을 활용한 인공경량골재의 개발 및 경량골재 콘크리트의 활용	▪ 폐석분 및 바텀애시를 이용한 인공경량 골재의 개발 프로세스를 제시 및 콘크리트 적용성 평가를 실시함 ▪ 순환자원 재활용을 통한 인공경량골재의 제조특성 정립 및 보통 중량 콘크리트와의 특성을 비교함
김태형 등	산업폐기물활용 경량 고강도콘크리트의 개발 및 실용화	▪ 경량 골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성 규명 및 구조용 재료로서의 사용 가능성을 평가하함 ▪ 팽창점토 기반의 경량 골재를 사용한 콘크리트의 굳지 않은 상태 및 경화상태의 특성을 비교 분석함

- 경량 고강도 콘크리트 연구는 혼화제 기술 및 경량골재 고강도화 문제 등으로 활용에 대한 한계에 직면하였으나, 국내·외에서 재료의 필요성 증가와 함께 혼화제 기술이 발전함에 따라 최근 연구가 활발해지고 있는 추세임

- 기존 경량 고강도 콘크리트 기술은 일반적으로 팽창형 인공경량골재를 이용한 경량화와 초고강도용 실리카흙을 이용한 고강도화를 동시에 고려하였음
- 현재까지 보고된 경량 고강도 콘크리트의 성능 최고 수준은 노르웨이에서 개발된 강도 80 MPa 및 밀도 1,950 kg/m³ 수준의 인공팽창혈암을 활용한 경량 고강도 콘크리트임
- 전 세계적으로 경량 콘크리트와 관련된 기술 난이도가 상이함에 따라, 성능 향상에 대한 한계를 극복하지 못하고 있는 실정임
- 경량 콘크리트의 고성능화를 위해 나노소재를 활용하는 연구도 보고되고 있으나, 현재 기술로는 대량 생산은 어려운 실정임
- 나노소재 활용 기술을 경량 콘크리트 적용에 앞서 일반적인 콘크리트에 적용하기 위한 기술 또한 검토가 필요함

〈표 V -35〉 관련 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	내용
kaar et al.	경량 및 일반골재를 적용한 고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계	■ 경량골재 및 일반 골재를 동시에 적용한 24.5 MPa ~ 86.1 MPa 수준의 고강도 콘크리트를 개발하고 고강도 콘크리트의 응력-변형률 관계를 정립함
Holm	팽창혈암골재를 사용한 고강도 콘크리트 개발	■ 팽창혈암골재를 사용한 고강도 콘크리트를 개발 하였으며, 이의 초기 및 장기강도 발현 특성을 정립함
Zhang and Gj0rv	밀도 1,900~2,000 kg/m ³ 수준의 초경량 고강도콘크리트 개발	■ 밀도 1,900~2,000 kg/m³ 수준 및 압축강도 80 MPa 수준의 초고강도·경량 콘크리트를 개발함 ■ 개발된 초고강도·경량 콘크리트에 사용된 재료의 기계적 강도, 흡수율 및 내구성을 평가하고 지연제를 활용하여 강도를 증진시키는 기술을 제시함
S.H. Ahmad	밀도 2,000 kg/m ³ 및 압축강도 37~80 MPa 수준의 경량 고강도콘크리트의 휨거동 평가	■ Expanded state를 굽은 인공경량골재를 활용한 밀도 2,000 kg/m³ 및 압축강도 37 ~ 80 MPa의 고강도·경량 콘크리트를 제작하였으며, 이를 활용한 콘크리트 부재의 휨 거동을 평가함
이행기 등	초대형 구조체 적용을 위한 초고강도·경량 건설재료 개발	■ CNT 및 실리카 폼을 혼입한 경량 고강도콘크리트를 개발함 ■ 밀도 2,000 kg/m³ 및 압축강도 70 MPa 수준의 경량 고강도 콘크리트의 제조 기술을 확보함

■ 나노소재의 콘크리트 적용을 위한 콘크리트 내 분산성 향상 관련 기술 개발 및 연구 동향은 다음과 같음

- 콘크리트의 혼화제로써 파우더 형태의 나노소재를 적용하기 위한 시도가 최근 활발하게 검토되고 있는 실정임
 - 나노소재 대부분은 입경이 10 ~ 70 nm 범위에 있으며, 충전효과와 함께 화학적 반응성을 가지고 있어 공극을 감소시키고 골재와의 계면구조를 개선하는 효과가 있음
- 나노소재를 혼화제로써 활용하기 위해서는 공극을 효과적으로 메우고 반응성 재료와의 반응을 활성화하기 위해서는 나노 입자를 고르게 분산시키는 기술이 중요함
 - 나노 입자 분산에 사용되는 가장 일반적인 방법은 초음파 분산과 같은 기계적 방법과 계면활성제를 이용한 화학적 방법임
 - 기계적 방법은 나노입자의 손상을 유발할 수 있고 물리적 작용이 끝난 이후 분산 상태가 지속되기 어려운 시간적 한계를 가지고 있으므로 계면활성제를 함께 사용하는 경우가 대부분임
 - 섬유 또는 판상 형태의 나노소재를 혼화제로써 활용한 경우에도 성능 극대화를 위해 나노소재의 분산은 중요한 것으로 보고되고 있으며, 이 또한 기계적 방법과 계면활성제를 이용한 분산 방법이 일반적임
 - 최근에는 OECD Sponsorship 프로그램에서는 나노소재의 환경적 안전성을 평가하기 위한 프로토콜을 개발함과 동시에 ZnO와 CeO₂와 같은 나노물질의 분산에 대한 프로토콜을 제시하기도 함
 - 나노소재의 분산 기술은 로테이터 또는 밀을 이용하여 나노소재에 에너지를 전달하는 기술이 대부분이며, 나노 분말을 분산시키기 위한 계면활성제 기술도 있음
 - 계면활성제 기술을 가진 기업의 대부분은 식품, 의료, 바이오, 전자 등의 산업을 중심으로 사용할 수 있는 범용성 제품을 다루고 있음
 - 콘크리트 산업에서 나노소재 분산을 목적으로 한 화학혼화제 개발은 아직 전무하나, 콘크리트용 화학혼화제에 대한 개발은 여러 전문기업을 중심으로 지속적으로 이루어지는 중임

〈표 V -36〉 관련 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	내용
US Research Nanomaterials, Inc	나노소재, 용매, 농도를 고려한 분산 노하우 주로 기계적 및 물리적 분산방법 채택	▪ 각종 나노 파우더 및 소재들에 대한 개괄적인 분산방법을 제시하고, 고유 노하우로 제조한 분산용액을 판매하고 있음
MKnano	나노입자 분산액 제조 기술 분산액 제공 및 판매	▪ 아직까지 금속계 및 산화 나노입자의 분산 용액을 제공하지 못하고, 탄소나노튜브에 대하여 다양한 용매 별로 분산용액 제공하고 있음
CarboBau	탄소나노튜브 분산기술 및 최적화, 호환성 확보 기술	▪ UHPC를 대상으로 탄소나노 강화를 통한 강도향상을 목적으로 하여, 최적 나노첨가제 도출 및 분산기법을 개발함
Active Minerals International, LLC	나노클레이를 활용한 혼화제 개발 및 판매	▪ 자기 다짐 콘크리트를 대상으로 거푸집 측압 감소 및 유동성 증진 효과를 가진 나노클레이 혼화제를 개발함
나노인텍	나노소재 분산장비 개발 및 판매	▪ 나노소재 분산장비를 중점적으로 생산하며, 주로 로 테이터 또는 밀을 이용한 기계적 분산 장치 개발에 초점을 두고 있음
케이지 케이칼(주)	폴리카복실레이트 혼화제 개발 및 판매	▪ 폴리카복실레이트를 제조하는 기술을 보유하고 있으며, 감수형과 유지형 성격에 따라 에테르형과 에스테르형으로 구분하고, 점성과 감수효과 등을 고려할 수 있음
실크로드 시앤티(주)	MPEG, VPEG 기반 혼화제 개발	▪ MPEG, VPEG 기반 혼화제를 생산하며, 감수형과 유지형 성격에 따라 MPEG형과 VPEG형 혼화제를 생산 및 판매에 중점을 두고 있음
LG화학(주)	원재료 생산	▪ 폴리카복실레이트(MPEG) 원재료를 생산하며, MPEG 계열 폴리카복실레이트의 원재료를 생산하고 있음
Kong et al.	나노실리카의 적용성	▪ 나노실리카의 경우 분산이 제대로 되지 않고 뭉침 현상이 발생할 경우, 주위의 시멘트 입자들을 밀어내어 공극을 증가시켜서 나노실리카/시멘트 복합체의 강도를 저하시키는 결과를 초래함
Najigivi et al.	나노실리카와 고성능감수제의 적용성	▪ 나노실리카를 폴리칼본산계 고성능감수제와 함께 고속회전으로 혼합해서 사용한 바 있으며, β-나프탈렌 황산과 포름알데이드를 포함하는 감수제도 분산과 작업성에 효과적이라고 보고함
Luo et al.	나노튜브의 분산성	▪ 음이온계 계면활성제, 양이온계 계면활성제, 그리고 한 가지 비이온계 계면활성제에 대해 나노튜브의 분산성을 평가한 바 있으며, 그 결과 음이온계 계면활성제 또는 음이온계와 비이온계를 혼합하여 사용한 경우가 분산에 가장 효과적인 것으로 나타냄
J. Plank et al.	고감수혼화제 및 지연제를 이용한 시멘트입자의 흡착성	▪ 고감수 혼화제와 지연제를 이용해 시멘트입자에 경쟁적 흡착을 평가한 바 있으며, 그 결과 음이온 전하 밀도가 큰 혼화제가 시멘트 입자에 대다수 흡착되는 것을 보고함

주체	관련기술	내용
H. Bessaies-Bey et al.	유기혼화제와 폴리카복실레이트의 흡착성	DLS와 TOC를 평가하여 유기 혼화제와 폴리카복실레이트의 경쟁적 흡착 평가와 이에 따른 레올로지 특성을 분석함
Makar et al.	CNT의 분산성	초음파 처리기법과 함께 에탄올을 사용할 경우 CNT 분산에 효과적이라고 보고함
Ipperico et al.	CNT의 분산성	형 아크릴 고분자 형태의 고성능 감수제를 사용할 경우 수용액 상태에서 CNT를 분산시키는 데 효과적이라고 보고함
Konsta-Gdoutos et al.	CNT의 분산성	콘크리트 또는 모르타르 제조 시 일반적으로 사용하는 일반적인 고성능 감수제를 초음파처리와 함께 적용해도 효과적으로 CNT를 분산시킬 수 있다고 보고함
Kawashima et al. Kim et al. Voigt et al.	나노클레이의 축압 저항성	나노클레이를 사용하였을 때 자기 다짐 콘크리트에서 거꾸집 축압을 효과적으로 감소시킬 수 있다고 보고함

■ 나노공극 조절 기술 관련 기술 개발 및 연구 동향은 다음과 같음

- 국내외에서 나노소재를 혼입하여 콘크리트의 공극량과 연결도가 감소하는 점에 대한 현상적 연구 결과가 보고되고 있으나, 공극 조절과 관련된 연구는 전무함
- 공극 크기에 대한 조절이 강도 및 내구성에 미치는 영향에 대한 이론적 연구결과는 다수 존재하나, 이와 관련된 기술은 정리되지 않은 실정임
- 국내에서도 콘크리트의 공극량 및 연결도 감소에 대한 현상적 연구 결과를 보고되고 있으나, 공극 조절과 관련된 연구는 전무한 실정임

〈표 V-37〉 관련 기술 개발 및 연구동향

주체	관련기술	특징
Singh et al ; CSIR (India)	시멘트계 재료에서의 나노실리카 활용에 따른 다양한 성능향상 효과 제시	- 나노실리카 사용에 따른 공극구조 및 수화생성물 변화를 입증함 - 나노실리카의 화학반응 모델과 최적화 시나리오를 제시함
Collins and Sanjayan; Maunsell Pty Ltd (Australia)	알칼리활성슬래그에 대한 공극크기와 수축간의 관계 고찰	- 라플라스 방정식에 따라 모세관압력이 공극크기에 반 비례함을 실험적으로 확인함 - 내부 공극량이 증가할 경우 수축량을 감소시킬 수 있음을 증명함
Atis et al. : Erciyes University (Turkey)	팽창성 수화물의 형성에 의한 시멘트의 수축감소 효과를 증명	팽창성수화물에 의한 공극변화 및 수축감소효과를 증명함

주체	관련기술	특징
Miled et al. : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (France)	인공공극물질(EPS)을 혼입한 시멘트 패널의 강도에 대한 예측모델 제시	크기효과를 고려한 미세역학 모델을 통해 공극의 크기가 강도에 미치는 요인에 대해 해석 및 실험적으로 검증함
Yang et al. : University of South Australia (Australia)	고체-액체 계면에서의 초미세연행공극의 안정화에 대한 가능성 검증	미세공극이 뭉쳐져 파괴되지 않고 작은 공극 크기를 유지할 수 있음을 증명함
TU Eindhoven	나노실리카를 사용한 콘크리트 미세구조 개선과 강도 및 내구성 향상	현상적 연구결과를 주로 제시하며, 공극구조 분석을 통해 정성적 상관관계 제시하였으나, 공극구조 변화의 물리적·화학적 정량적 모델을 제시하지는 못함
Hokkaido University (Japan)	마이크로버블 혼입 콘크리트 개발	- Microbubble generator 및 유지성능이 높은 혼화제를 활용해 공극의 크기가 월등히 작은 콘크리트를 개발함 - 동결융해 개선용으로 사용하였으나, 단가가 높아 실용화 되지 못함
BRIMEE Project (EU)	Nano Crystalline Cellulose Foam, Nano Crystalline Foam loaded with Bio-Resin 등 개발	나노공극을 갖는 건설재료를 개발하였으나, 재료개발 및 실용화에 중점을 두고 있는 반면, 공극제어관련 핵심기술을 보유하고 있지 않음
(주)엔비테크닉 스	나노버블 발생장치 기술보유	- 직경 1 μm 이하의 나노버블을 발생시킬 수 있는 장치기술을 보유함 - 초미세기포를 용해시켜 오존가스 등을 용해하는데 사용하였으나, 시멘트 기술에 대해서는 사용한 사례가 없음
한국건설기술연 구원	화재시 콘크리트의 폭열과 공극간 관계 확인	- 폭열에 있어서 공극구조의 변화에 대해 연구함 - 그러나 폭열 최소화를 위한 공극구조의 제시는 없음 - 폭열최소화를 위해서는 후발생형 공극형성(PP섬유 등 혼입)이 필요함을 확인함
Various researcher (계명대, 세종대 등)	다양한 혼화제를 사용한 공극량 및 공극분포 변화	- 대부분 공기연행제 개발을 위해 수행됨 - 혼화제의 종류 및 사용되는 결합재와의 상관관계에 의해 공극량 및 크기, 분포등이 결정됨을 확인함
Kim et al. : 조선대학교	결정성 수화물 유도를 통한 자기수축 감소	- 알칼리활성슬래그의 수화물 중 C-S-H 양을 감소시키고 결정성인 Portlandite 및 Thernidite 등을 증가시켜 공극 크기를 증가시킴 - 이를 통해 자기/건조수축을 감소함 - 수화도-수화물 종류-수축간의 관계에 대해 이론식을 유도함

나. 지재산 확보 현황(국내·외)

■ 특허분석 개요

- 본 기술은 나노기술을 콘크리트 제조 기술에 접목하여, 경량 고강도 콘크리트, 고내구 콘크리트, 다기능성 콘크리트를 제조하기 위한 기술의 확보를 목적으로 하고 있음
- 관련 지식재산권 확보 현황 분석에서는 본 과제 기술의 핵심 키워드를 중심으로 조사한 선행 특허 정보를 수집, 현황 파악 및 분석함으로써 선행 특허 기술을 고려한 향후 본 과제 기술의 바람직한 R&D 방향을 목적으로 함
- 본 제안 기술과 관련된 유효 특허 정보의 수집 건수는 아래와 같음
- 나노소재 및 나노 혼화제 등 나노기술을 활용한 구조물 자중을 저감하기 위한 경량 고강도 콘크리트 제조 기술은 4가지의 기술로 분류함
 - 기술 분류 A : 경량화 기술
 - 기술 분류 B : 기계적 강도 및 내구성 향상 기술
 - 기술 분류 C : 내화성 향상 기술
 - 기술 분류 D, E : 기타 기술

〈표 V-38〉 국가별 유효특허 건수

기술명	유효데이터 건수				
	한국	미국	일본	유럽	계
나노기술을 활용한 콘크리트 제조기술	38	24	12	11	85

〈표 V-39〉 기술 분류 별 유효 특허 건수

기술명	유효데이터 건수					
	A	B	C	D	E	계
나노기술을 활용한 콘크리트 제조기술	5	61	4	5	20	95

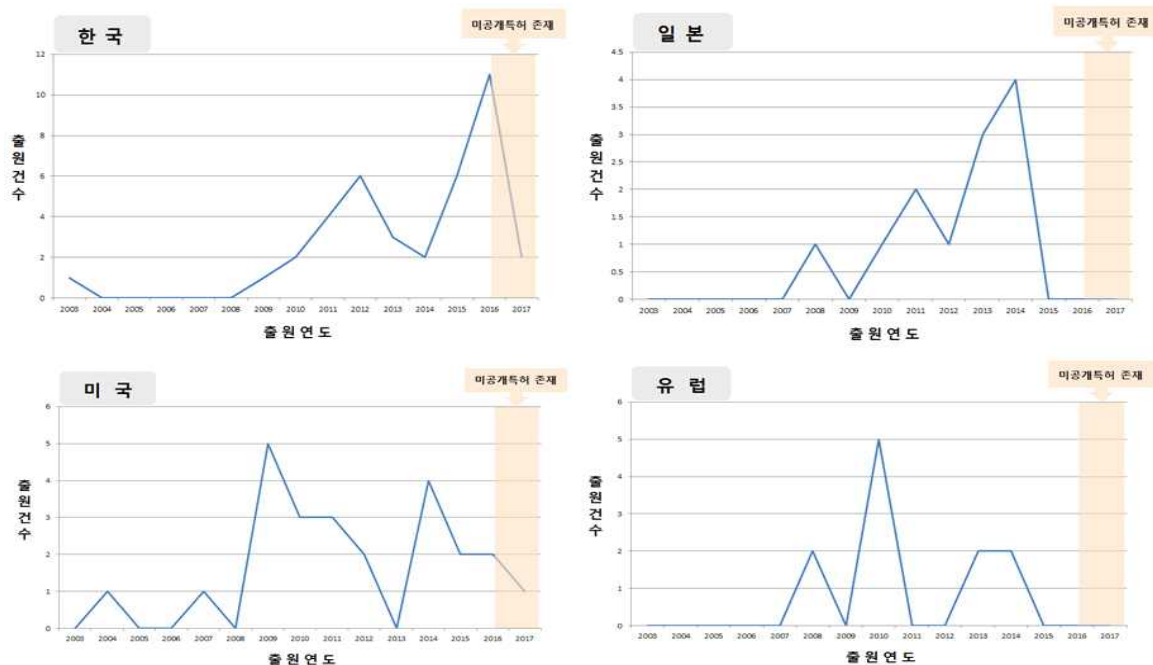
■ 연도별 출원 현황

- 나노기술을 활용한 콘크리트 제조기술 분야의 연도별 전체 특허동향을 살펴보면, 해당 기술은 2003년 최초로 특허출원이 이루어진 이후에 지속적인 증가 추세에 있음

- 나노기술 분야의 연구 개발이 두드러지지 못했던 2000년 이전에는 이를 활용한 콘크리트 제조기술 관련 특허 출원이 전혀 이루어지지 않은 것이 확인됨
- 나노기술의 발달과 함께 2000년대 이후부터 콘크리트 제조기술 분야에도 나노기술이 접목되기 시작함



〈그림 V-75〉 연도 별 전체 특허출원 건수



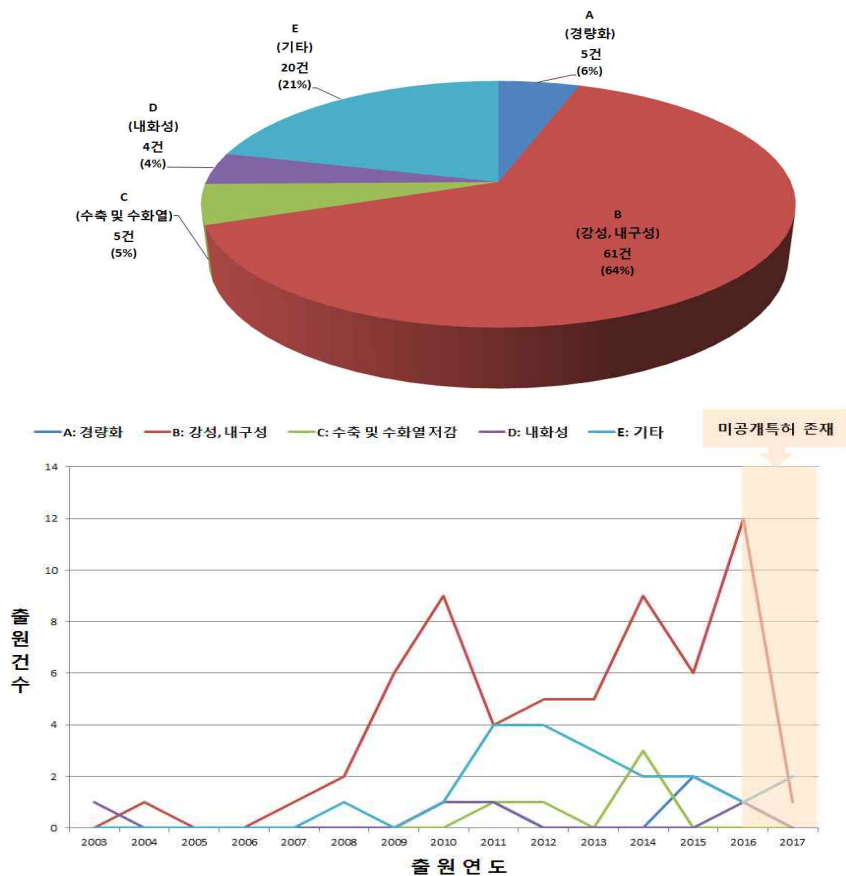
〈그림 V-76〉 출원연도에 따른 국가별 특허 건수

- 한국의 경우 2008년 이후부터 관련기술의 특허출원이 지속적으로 증가하고 있는 것을 볼 수 있음

- 일본의 경우 2008년~2014년까지 지속적인 증가를 나타냈으나 2015년 이후에는 공개된 특허문헌이 검색이 되지 않음
- 미국의 경우 2000년대 중후반부터 꾸준한 출원 건수를 나타내고 있음
- 유럽의 경우 관련 기술의 출원이 불규칙한 경향성을 나타내다가 2014년 이후에는 공개된 특허문헌이 검색이 되지 않음
- 최근 3년 이내로 그 범위를 좁혀보면, 일본 및 유럽에서는 관련 기술의 출원이 전무한 상태이며 한국과 미국에서는 앞으로도 지속적인 특허출원이 진행이 될 것으로 예상됨
 - 연도별 동향그래프에서 2016년 이후 출원이 감소하고 있는 것은 특허출원 후 1년 6개월이 경과하여야 공개되는 특허제도의 특성상, 실제 출원이 이루어졌으나 아직 공개되지 않아 특허분석 데이터 상에 포함되지 않은 결과임

■ 기술 분류별 출원 동향

- 나노기술을 활용한 콘크리트 제조기술 특허와 관련하여, 발명의 효과에 따라 다음과 같이 5가지 기술로 분류함
 - A: 경량화 관련 기술
 - B: 강성, 내구성 향상 관련 기술
 - C: 수축 또는 수화열 저감 기술
 - D: 내화성 향상 기술
 - E: 기타 기술



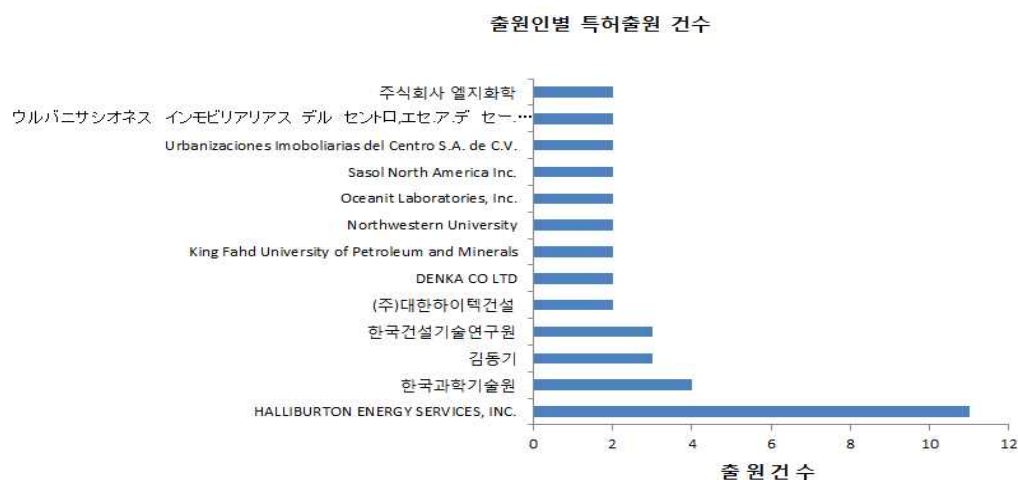
〈그림 V-77〉 출원 연도에 따른 기술 분류별 특허 출원 건수

- 나노기술을 활용한 콘크리트 제조기술 분야에서 가장 많은 비중을 차지하는 기술은 B: 강성 및 내구성 향상 관련 기술로, 2000년대 후반부터 현재에 이르기까지 지속적으로 가장 많은 출원이 이루어지고 있으며, 앞으로도 지속적으로 출원이 증가하거나 또는 적어도 현재 수준으로 유지될 가능성이 매우 높음
- A: 경량화 관련 기술, C: 수축 및 수화열 저감 기술 및 D: 내화성 관련 기술의 경우 상대적으로 그 출원 건수가 적은 것으로 확인됨
 - 콘크리트 기술 분야에서 가장 기본적으로 요구되는 특성이 강성 내지는 내구성인 점을 감안했을 때 경량화 및 수화열 저감 기술은 그 중요도가 상대적으로 낮게 인식되고 있기 때문인 것으로 판단됨
 - 경량화 및 수화열 저감 기술은 강성 및 내구성 향상 기술과 더불어 나타나는 효과로서 제시가 되는 것이 일반적이며, 경량화, 수화열 저감 및 내화성 기술 독자적인 효과만으로는 특허출원이 잘 이루어지고 있지 않음

- E: 기타 기술의 경우 전기 전도도 향상, 열 전도성 향상, 내수성 향상, 분산성 향상, 방청능 향상, 압저항 특성 구비 및 탄소가스 배출 저감 등의 기술이 포함이 됨
- 대부분 특허된 목적에 활용이 될 수 있는 건축자재를 개발하는 것과 관련된 기술들로서 앞으로도 지속적으로 출원이 이루어질 것으로 예상됨
- 결과적으로, 모든 국가에서 강성 및 내구성 향상 관련 기술(기술 분류 B)의 특허출원이 집중되고 있음을 알 수 있으며, 한국이 타 국가에 비하여 대부분의 기술 분야에서 많은 수의 특허 출원을 하고 있음
- 나노기술을 활용한 콘크리트 제조 기술 분야에서 한국이 타 국가들에 비하여 연구, 개발이 활발히 이루어지고 있음을 의미함

출원인별 출원 현황

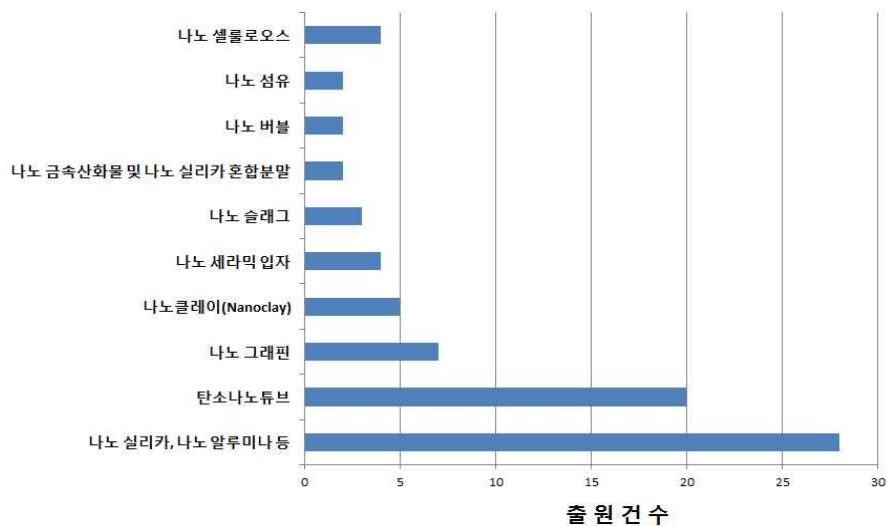
- 본 과제기술과 관련된 선행특허 중 출원수를 기준으로 선택된 상위 출원인을 살펴보면, 미국 국적의 Halliburton Energy Services, Inc.에서 가장 많은 출원을 한 것이 확인됨
- 미국과 유럽 특허의 경우 다양한 국적의 출원인이 관련 발명의 출원을 진행하고 있으나, 한국과 일본 특허의 경우 자국 출원에 집중하고 있음
- 한국 국적의 출원인은 자국 출원은 물론이고 적극적인 국외 출원을 통한 국외 시장 진입을 위한 교두보 마련이 요구됨
- 미국을 제외한 각 국의 상위 출원인들은 해당 국가의 국적을 가지고 있으므로, 타 국가의 출원인들의 시장 진입이 어려운 실정이 반영된 것으로 판단됨



〈그림 V-78〉 주요 출원인별 특허출원 건수

■ 나노소재별 출원 동향

- 다음과 같이 나노기술을 활용한 콘크리트 제조기술에서 가장 빈번하게 사용되는 나노소재는 나노 실리카, 나노 알루미나 등과 같은 무기 나노물질이며, 탄소나노튜브(CNT), 나노 그래핀과 같이 탄소유래의 나노소재 또한 자주 사용됨
- 나노소재를 콘크리트 조성물에 배합하는 것이 이외에도 고로슬래그 등과 같은 결합재 자체를 나노입자 수준으로 제조하는 기술도 출원됨
- 나노기술을 이용한 콘크리트 제조기술 분야에서는 특정 나노소재들이 집중적으로 이용이 되고 있기 때문에, 이들을 제외한 나노소재 활용 고강도·경량 콘크리트 기술 개발은 선도적인 위치를 점할 수 있을 것으로 판단됨
- 가장 빈번하게 사용되고 있는 탄소 나노튜브 및 무기 나노소재의 경우, 강성 및 내구성 향상을 위한 기술에 주로 활용이 되고 있음을 확인함



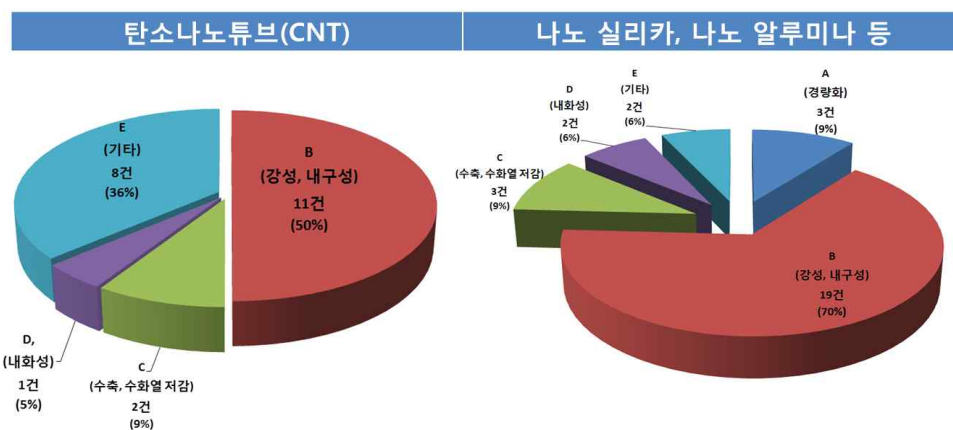
〈그림 V-79〉 나노소재 별 출원 건수

■ 기술 발전 단계

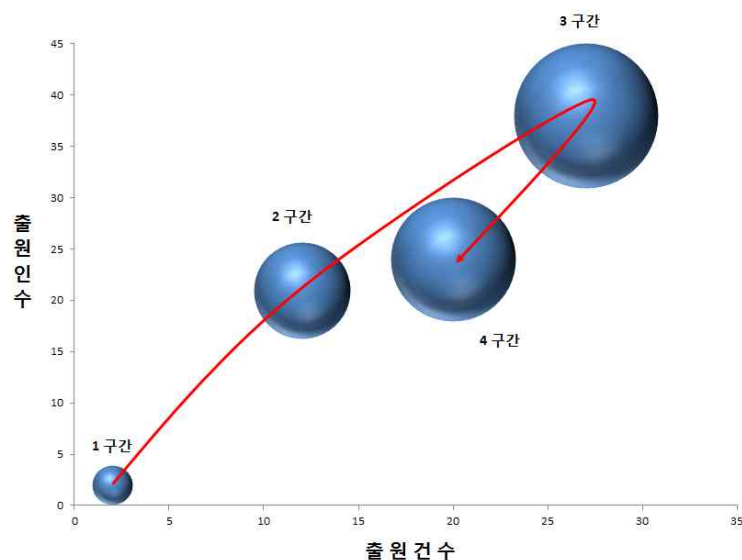
- 본 제안 기술에 대한 전체 출원을 특허 출원일을 기준으로 1구간(2003년~2006년), 2구간(2007년~2010년), 3구간(2011년~2014년), 4구간(2015년~2017년)의 4개의 구간으로 나누어 각 구간별 특허 출원인 수 및 출원 건수에 대한 상관관계를 통해 기술 성장 단계를 확인함
- 1구간은 출원인 수 및 출원 건수가 5건 내외로 적고, 본 대상 기술과 관련된 특허

출원이 처음으로 이루어진 시기이기 때문에 해당 구간은 태동기에 있다고 판단됨

- 2구간 및 3구간은 출원인과 출원건수가 모두 증가하는 성장기에 있다고 판단됨
- 최근 3년간의 구간을 나타내는 4구간의 경우 아직 공개되지 않은 문헌들로 인해 표면적으로는 성숙기 또는 쇠퇴기로 확인되나 잠재적인 출원 건수까지 모두 고려한다면 본 과제 기술은 현재 지속적인 성장기에 있다고 보는 것이 타당함



<그림 V-80> 나노소재 별 기술 분류



<그림 V-81> 제안 기술의 성장 단계

〈표 V-40〉 관련기술 특허현황

기술분류	발명의 명칭	나노소재명	효과
B	급경 고강도 무기계 폴리머 몰탈 조성물을 이용한 콘크리트 보수와 보강과 단열 방법	나노 금속산화물 및 나노실리카 혼합분말	힘강도증가, 내구성증가, 단열성증가
B	콘크리트 구조물의 보수 및 보강재 조성물 및 콘크리트 구조물의 보수 및 보강 공법	나노실리카, 에어로겔	접착력증가, 압축 및 인장강도증가, 내구성증가
B	그래핀을 함유한 기능성 시멘트 및 그 기능성 시멘트 제조방법	나노그래핀	강도개선, 내구성향상
B	그래핀부산물이 혼입된 시멘트-모르타르 복합체	나노그래핀	압축강도증가, 인장강도증가
B,D	콘크리트 구조물의 보수·보강재	탄소나노튜브	내수성, 내열성,내화성증가, 강도상승
B	급경 고강도 무기계 폴리머 모르타르 조성물 및 이를 이용한 콘크리트 보수보강 방법	나노 금속산화물 및 나노실리카 혼합분말	보수 및 보강
B	고로슬래그 미분말용 혼합제 조성물	나노실리카	압축강도증가
B	폴리카르본산계 공중합체, 산화 아연 입자, 및 글루콘산 염을 포함하는 시멘트 조성물 첨가제	산화 아연	압축강도증가, 경화속도향상
B	고로슬래그 미분말용 혼화제 조성물 및 이를 이용한 고로슬래그 시멘트 조성물	나노실리카	압축강도증가
B	금속성 팽창물질질을 포함하는 친환경 균열 저감제 조성물 및 이를 이용한 기포콘크리트 조성물 및 방통 모르타르 조성물	나노세라믹입자	내구성, 내습성, 내충격성향상
B	해조류를 이용한 초속경 혼합 시멘트 조성물 및 이를 이용한 시공방법	나노세라믹입자	강도개선, 경화속도향상
B	해조류를 포함하는 콘크리트용 혼화제 조성물	나노세라믹입자	강도개선
B	전시시설용 콘크리트 조성물 및 이를 포함하는 전시시설용 인공암의 제조방법	나노세라믹입자	강도개선, 내구성향상
E	그래핀을 함유한 전도성 발열콘크리트 및 그 발열콘크리트 제조방법	그래핀	전기전도도향상
B	친환경 무기질 마그네시아 인산염 복합체 조성물 및 그 제조방법	나노실리카	내산성향상, 내구성증가

기술분류	발명의 명칭	나노소재명	효과
B	경질실리카 및 폴리에틸렌옥사이드를 사용한 합성라텍스 개질 몰탈 및 콘크리트 조성물	라텍스	내구성향상, 기온변화에 따른 수축 및 팽창억제
B	폴리카르본산계 공중합체 및 나노입자를 포함하는 시멘트 조성물	산화 아연, 산화 알루미늄	조기강도증가, 경화지연개선
E	열전도성 시멘트 모르타르를 이용한 바닥 난방구조체 및 그 시공방법	탄소나노튜브	열전도성향상
B	나노 크기 베마이트 결정립을 함유하는 시멘트 조성물	나노알루미나	압축강도향상
B	탄소섬유 고강도 콘크리트	탄소나노튜브	압축강도, 인장강도, 휨강도향상
E	탄소나노튜브를 함유한 시멘트 복합재료의 제조방법	탄소나노튜브 나노그래핀	전기전도도향상
E	탄소나노튜브가 함유된 콘크리트 도로용 시멘트 용설체의 시공 방법	탄소나노튜브	압축강도향상, 열전도율향상
E	방수 및 방청성능이 향상된 친환경 폴리머 모르타르	나노플라이애쉬, 고로슬래그	내구성향상, 방수, 방청성능 향상
E	탄소나노튜브가 함유된 콘크리트 도로용 시멘트 용설체	탄소나노튜브	압축강도향상, 열전도율향상
B, C	CNT를 혼입한 수화열 방열 콘크리트 조성물	탄소나노튜브	인장강도향상, 수화열저감
E	탄소나노튜브를 함유한 시멘트 복합재료의 제조방법과 이 시멘트 복합재료를 이용한 탄소나노튜브-시멘트 구조체의 제조방법	탄소나노튜브	분산성향상
D	내화 압출성형 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 내화 압출성형 콘크리트 패널의 제조방법	나노섬유	내화성향상
E	나노슬래그와 알칼리 자극제를 포함하는 비소성 시멘트 모르타르 조성물	나노슬래그	이산화탄소배출감소
A,D	단열, 내수성, 내화성을 가지는 초경량 실리카 에어로겔 시멘트 몰탈의 제조방법	나노실리카, 에어로겔	경량화, 내수성, 내화성, 단열성향상
B	레이튼스 강화용 콘크리트 결합제 조성물	나노고로슬래그	압축강도향상, 휨강도향상
B	코어셀 중합반응 아크릴 폴리머가 포함된 초속경 콘크리트 조성물	나노실리카	내구성향상
D	고성능 나노소재를 이용한 피이티 재생 폴리머 콘크리트조성물 및 이의 제조방법	실리카, 알루미늄 등	내화 및 내열성향상

기술분류	발명의 명칭	나노소재명	효과
E	왕겨 및 탄소 나노 구조체로 개질된 결합재를 베이스로 하는 복합 재료	탄소나노튜브	경제성향상
B	하이브리드 나노재료로 강화된 콘크리트	탄소나노튜브	내구성향상
E	시멘트질 재료를 위한 첨가물	나노 피브릴화 셀룰로오스	시멘트질 재료의 기체혼입 안정성향상
B	시멘트 경화체 제조 방법	탄소나노튜브	강도향상
B	시멘트 경화체 제조 방법 및 시멘트 경화체	나노버블	초기강도발현향상, 동결융해저항성향상
B	탄소질 나노 필러 및 추가소제에 기초한 마스터 혼합물을 제조하기 위한 방법 및 경화 가능한 무기계에 있어서의 이 혼합물의 사용	탄소나노튜브	기계적 강도향상
B	시멘트용 혼화제, 그것을 이용한 시멘트 조성물 및 시멘트 성형체	셀룰로오스 나노섬유	강도향상
E	탄소 배출이 거의 제로의 구조 재료	나 알루미늄규산염	탄소배출 감소
E	나노 섬유 함유 모르타르 또는 콘크리트 조성물	나노섬유	보수성향상
B	시멘트 경화체의 제조 방법 및 시멘트 경화체	나노버블	초기강도발현향상, 동결융해저항성향상
B,C	나노 사이즈를 갖는 뫼마이트의 미결정을 함유하는 시멘트 배합물	나노알루미나	압축강도향상, 화학적수축감소
B	셀룰로오스 나노 섬유 함유 조성물 제조 방법 및 시멘트 성형체 제조 방법	셀룰로오스 나노섬유	나노섬유 분산성향상, 강도향상
E	NANOCLAY-ENHANCED CEMENT COMPOSITION FOR DEEP WELL TREATMENT	나노클레이(Nanoclay)	고온 및 고압에서 시공성향상
E	Nanoclay as an additive for high pressure and high temperature well cementing	나노클레이(Nanoclay)	고온 및 고압에서 시공성향상
B	CELLULOSE NANOCRYSTAL ADDITIVES AND IMPROVED CEMENTIOUS SYSTEMS	셀룰로오스 나노크리스탈	강도향상
B	Highly dispersed carbon nanotube-reinforced cement-based materials	탄소나노튜브	내구성향상
A,B	MODIFIED CEMENT COMPOSITION, PREPARATION AND APPLICATION THEREOF	나노실리카	경량성, 강성향상, 공극감소
B	Highly-dispersed carbon nanotube-reinforced cement-based materials	탄소나노튜브	내구성향상

기술분류	발명의 명칭	나노소재명	효과
B	CELLULOSE NANOCRYSTAL ADDITIVES AND IMPROVED CEMENTIOUS SYSTEMS	셀룰로오스 나노크리스탈	굴곡강도향상
E	PORTLAND CEMENT TYPE-G WITH NANOSILICA ADDITIVE FOR HIGH PRESSURE-HIGH TEMPERATURE APPLICATIONS	나노실리카	고온 및 고압에서 시공성향상
B	ALUMINA NANOFIBER REINFORCED CEMENT-BASED MATERIALS AND METHOD FOR PRODUCING SAME	알루미나나노섬유	기계적 강도향상
B,C	Cement compositions containing nano sized boehmite crystallites	나노실리카	압축강도향상, 화학적수축감소
B,C	Highly durable composite and manufacturing thereof	탄소나노튜브	내구성향상, 수축감소
A,B	Modified cement composition, preparation and application thereof	나노실리카	경량성, 강성향상, 공극감소
B	Cement Compositions Comprising Deagglomerated Inorganic Nanotubes and Associated Methods	할로이사이트나노튜브	강성 향상
B	Cement compositions and methods utilizing nano-clay	나노클레이(Nanoclay)	내산성향상, 내구성향상
B	Cement compositions comprising latex and a nano-particle	나노실리카	강성향상
B	Cement compositions and methods utilizing nano-clay	나노클레이(Nanoclay)	내산성향상, 내구성향상
B	Concrete reinforced with hybrid nanomaterials	탄소나노튜브	강성향상
E	Generation of polymer concretes incorporating carbon nanotubes	탄소나노튜브	분산성향상
B	Well treatment compositions and methods utilizing nano-particles	나노 실리카, 나노 알루미나등	강성향상
B	Multifunctional cementitious nanocomposite material and methods of making the same	탄소나노튜브	강성향상, 내구성향상
B	Well treatment compositions and methods utilizing nano-particles	나노 실리카, 나노 알루미나등	강성향상
B	Cement compositions comprising latex and a nano-particle and associated methods	나노실리카	강성향상
B	Well treatment composition and methods utilizing nano-particles	나노 실리카, 나노 알루미나등	강성향상
B	Fiber reinforced concrete/cement products and method of preparation	탄소섬유	강성향상

기술분류	발명의 명칭	나노소재명	효과
B	CONCRETE REINFORCED WITH HYBRID NANOMATERIALS	탄소나노튜브	강성향상
B	CEMENT COMPOSITION COMPRISING NANO-PLATELETS	그래핀 나노입자	인장강도향상, 투수성감소
B	WELL TREATMENT COMPOSITIONS AND METHODS UTILIZING NANO-PARTICLES	나노실리카, 나노알루미나등	압축강도향상, 인장강도향상
B	Ultra-high performance nano-modified concrete composition with borosilicate glass lamp waste powder	나노실리카	강성향상
C	Cement compositions and concrete containing nano sized boehmite crystallites	베마이트 알루미나	수축감소
B	ULTRA-HIGH-STRENGTH CONCRETE REINFORCED WITH STEEL FIBRES	나노실리카	강성향상
B	Cement compositions and methods utilizing nano-clay	나노클레이(Nanoclay)	내산성향상, 내구성향상
B	CEMENT COMPOSITIONS COMPRISING LATEX AND A NANO-PARTICLE AND ASSOCIATED METHODS	나노실리카	강성향상
B	WELL TREATMENT COMPOSITIONS AND METHODS UTILIZING NANO-PARTICLES	나노실리카, 나노알루미나등	강성향상
B	HYDRAULIC CEMENT COMPRISING ORGANOSILICON NANOPARTICLES	나노실리카	강성향상
B	WELL TREATMENT COMPOSITIONS AND METHODS UTILIZING NANO-PARTICLES	나노실리카, 나노알루미나등	강성향상

다. 기술개발 적용(활용) 사례

■ 나노소재 활용 고내화 경량 고강도 콘크리트 기술의 실제 적용 사례는 찾아보기 어려우나, 경량골재를 활용한 경량 콘크리트의 실제 적용 사례는 1900년대 초반부터 쉽게 찾아볼 수 있음

- 경량 콘크리트 적용 사례는 인공경량 골재 등의 천연 경량 골재 대체 자원의 개발 및 품질 체계 확립에 따른 실용화 사례가 있을 뿐 나노소재 등을 활용한 고경량,

고강도 및 내화성능 확보의 목적으로서 활용된 기술은 찾아 볼 수 없음

- 현재까지 개발 되어있는 천연 경량 골재 및 인공 경량 골재 등의 품질의 한계(흡수율, 입도, 골재 강도 등)를 극복하기 위한 융합기술의 개발 및 실제 적용 사례는 찾아보기 어려움
 - 국외에서는 밀도 $2,000 \text{ kg/m}^3$ 및 압축강도 79 MPa 수준의 고강도·경량 콘크리트에 관한 연구가 보고되고 있으나, 국내에서는 일부 실험실 수준에서 50 MPa 급 이상의 고강도 콘크리트 개발이 이루어지고 있음
 - 국내는 1990년대 이후 경량골재의 생산체계가 구축되기 시작하였으나, 인공경량 골재 생산 문제 등으로 경량 콘크리트 기술 개발 또한 미비한 상태이며 실제 적용 사례는 찾아보기 매우 어려움
 - 최근 산업부산물의 재활용을 통해 생산되는 인공경량 골재를 활용한 경량골재 콘크리트 등의 연구가 진행되고 있으며, 산업부산물 재활용의 환경 친화적 이점을 토대로 실제 적용성의 한계를 해결하고자 하는 노력이 시도되고 있음
- 나노소재를 활용한 기존 경량 골재 품질의 개선 및 경량 콘크리트 기술 개발은 산업 부산물의 재활용뿐만 아니라 기존 소재·제품의 부정적인 인식 개선(재료 측면에서의 품질 및 적용성)을 통해 큰 이점을 가져올 것으로 판단됨



(a) Lake point tower (chicago)



(b) Assembly hall (University of illinois)

〈그림 V-82〉 경량 콘크리트 적용 사례 모습(국외)

〈표 V -41〉 경량 콘크리트의 국내·외 적용사례

건물명	위치	시공 연도	층수	시공부위	단위용적 중량 (kg/m ³)	압축강도 (MPa)	비고
Park plaza hotel	St. Louis	1928	-	골조공사	-	-	철골물량 3백만 달러 절감효과
Oakland bay bridge	San francisco	1935	-	교량상판	-	-	교량구조
Australian square	Sydney	1967	50 (184 m)	7층 이상 보, 기둥, 슬래브	1792	35	31,000 m ³ 사용 13% 비용절감
Lake point tower	Chicago	1968	71	2~70층 슬래브	1780	21	-
One shell plaza	Houston	1969	52	전단벽, 기둥, 매트기초, 슬래브	1840	42	ALL-LWC
동경도청 청사	동경	1991	48 (243 m)	Deckplate 형 슬래브	1850	21	15,200 m ³ 사용
Heidrun floating platform	Norway	1996	-	해양구조물	2,000	79	-
리버타워	여의도	-	37	옥상정원	1850	35	10 m ³ 사용
J-shop 빌딩	창동	-	3	슬래브	1850	35	30 m ³ 사용

● 최근 나노소재 활용 콘크리트의 시뮬레이션 적용 분야와 관련하여 재료 메커니즘 규명과 장기거동 예측을 위해 활발한 연구가 진행되고 있으나, 나노소재 활용에 따른 시멘트 특성 변화가 규명되지 않아 실제 현장에서의 적용사례는 부재함

- 나노 공극 제어와 관련한 기술 개발도 최근 이루어지고 있으나 관련 실제 적용사례는 부재함
- 시멘트 기반 복합재의 거동 모델링은 대형 구조물 시공 시 매우 거시적인 수화열 분석, 염해 및 탄산화와 같은 열화해석 등 참고적으로 사용되는 수준임
- 나노물질 혼입 시멘트 복합재료 시뮬레이션의 경우도 건설소재 특유의 메커니즘 규명 및 분석이 어려운 이유로 해당 연구의 실제 적용사례는 부재함

3.2 국외 및 국내 기술 수준 비교

■ 기술수준의 비교

- 국내·외 고강도 일반 콘크리트는 현재까지 대부분 압축강도 50~80 MPa 범위에서 구조물에 적용되고 있음
 - 폭렬에 대한 취약성과 구조부재의 취성적 특성 및 내구성의 한계로 압축강도 150 MPa 이상의 콘크리트는 구조부재에 부분적으로 적용되고 있음
- 콘크리트 압축강도 측면만을 고려할 경우에 국내·외의 고강도 콘크리트 제조기술은 비슷한 수준에 있음
 - 국내에서는 200 MPa까지 고강도 콘크리트를 제조하였지만, 실제 높은 제조원가, 현장적용성, 구조적·내화적 취약성 및 내구성 평가의 한계로 실용화 단계에 못 미치고 있는 실정임
- 국외 경량·고강도콘크리트는 단위용적중량 2,000 kg/m³에서 100 MPa 수준까지 개발하였으나, 실제 구조물에 적용된 경량 콘크리트의 압축강도는 35 MPa에 불과함
 - 국내의 경우, 경량골재 수급의 어려움으로 국외의 경량골재를 이용하거나 국내의 제한된 환경에서 다소 품질이 좋지 않은 골재를 이용하여 압축강도 40 MPa까지 제조하는 기술을 개발함
 - 국내에서는 골재자체 강도의 품질에 좌우되는 콘크리트의 특성으로 고강도 영역이 아닌 압축강도 21 MPa 수준에서 적용되고 있으며, 이에 대한 실적 사례는 거의 미미한 수준임.
 - 국내·외의 경량 고강도콘크리트는 구조부재로의 적용을 위한 기술 수준은 낮은 상황이며, 구조물 적용을 위한 경량 고강도 콘크리트의 내화성능과 내구성에 대한 연구는 매우 미미한 수준임
- 나노기술은 국내·외적으로 다양한 분야에서 적용되고 있으나, 건설산업과 관련된 나노기술의 적용은 아직 미진함
 - 국외에서는 나노소재를 이용하여 내구성이 우수한 콘크리트 제조하는 단계에 머무르고 있음
 - 국내에서는 나노스케일의 결합재를 이용하여 고강도 콘크리트 제조기술에 주력을 다하고 있음

- 건설산업에서 이용되고 있는 나노기술은 콘크리트 압축강도와 내구성 측면 즉 재료적 특성을 향상시키는 연구에 집중되어 있음
- 콘크리트 특성 평가 방법은 매크로 수준에서 이루어지고 있으며, 구조부재료의 적용성에 대한 평가와 내화성능 및 현장적용에 대한 연구는 매우 미진한 실정임

■ 기술수준, TRL단계, 기술성숙도

- 나노소재를 활용한 고경량, 고강도 및 고내구 콘크리트는 국내·외적으로 이에 대한 연구가 매우 미진한 수준임

가. 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	40 (일본)	30
TRL단계	T1	T1
기술성숙도	1단계	1단계
주요 성능	일반 경량골재 제조 수준: (구조용 인공 경량골재 규격에 적합)	일반 경량골재 제조 초기 수준: (규격에 적합)

나. 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 제조 기술

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	(-) 미국	-
TRL단계	-	-
기술성숙도	1단계	1단계
주요 성능	일반 경량골재 콘크리트 수준(시공성, 단위용적중량, 압축강도, 구조부재 거동)으로서 나노기술 융합은 아직 조사되지 않음 ※ 나노소재 융합 보통콘크리트 기술은 초기 단계로 평가됨	일반 경량골재 콘크리트 성장기 수준(배합 및 재료특성 중점)

다. 고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인

구분	최고 기술 보유국	현 국내 수준
기술수준	60 (유럽)	40
TRL단계	T3	T2
기술성숙도	2단계	1단계
주요 성능	설계 및 시공지침	-

■ 건설 구조재용 나노소재 활용 기술의 국내외 기술수준 비교

- 주요 국가별 기술수준 및 기술격차 평균을 통해 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술의 국내외 기술수준을 검토한 결과, 최고기술수준 보유국은 유럽인 것으로 나타남
 - 2017년 기준 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술 관련 최고 기술수준 보유국은 미국으로 100%, EU은 95.6%, 일본은 92.6%, 한국은 63.7%, 중국은 72.0% 수준임
 - 또한 최고 기술수준 보유국 미국을 중심으로 EU는 0.4년, 일본은 1.2년, 한국은 4.8년, 중국은 4.3년의 기술격차를 보임
- 국내 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술의 기술수준 및 격차 모두 EU, 미국, 일본, 중국의 뒤를 쫓고 있는 것으로 분석됨
 - 우리나라와 최고 기술수준국인 미국과의 기술격차 추세는 확대 중임



〈그림 V -83〉 국내외 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술수준 비교

- 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술이 도달 할 수 있는 이론적 상한치(최상의 발전상태, 궁극의 기술수준)를 100%로 했을 때, 현재(2017년) 및 5년 뒤(2022년)의 기술수준을 비교 검토함
 - 2017년 기준, 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술의 최고기술국은 미국으로 76.6%이며, EU는 75.0%, 일본은 71.6%, 한국은 58.1%, 중국은 59.0% 수준임
 - 2017년 기준, 이론적 상한치에 이르기까지 필요한 기술개발 소요시간은 미국은 4.0년 EU는 4.5년, 일본은 5.3년, 한국은 8.9년, 중국은 8.0년으로 분석됨
 - 5년 뒤인 2022년에 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술의 기술수준은 미국이 92.3%, EU는 92.0%, 일본은 90.0%, 한국은 82.5%, 중국은 79.5%로 예상됨



〈그림 V-84〉 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술의 최고 기술수준 대비 국내의 기술수준 및 격차 비교

- 나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술의 국내 발전단계는 기술이 개발되고 있는 개발기로 분석되며, 국외 발전단계는 신기술이 본격적으로 시장에 처음 진입하는 단계인 도입기와 신기술이 본격적으로 상용화되는 단계인 성장기 사이에 위치한 것으로 분석됨

4. 세부개발 내용

4.1 개발내용별 한계점 및 기술개발 방향

기술 개발내용	한계점	기술개발방향
나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술	■ 경량 콘크리트 80 MPa의 성능 향상을 위한 기존 매크로 수준의 재료 적용 한계 ■ 경량골재 자체의 낮은 강도로 인한 관통 파괴로 콘크리트의 탄성계수 및 강도 저하	■ 경량골재 자체강도 향상을 위한 나노 임베디드 기법의 적용 ■ 낮은 단위용적중량에서 고강도화를 위한 나노 파이버형 고분자 등 소재 적용
	■ 골재의 둥근 입형으로 골재간, 골재-시멘트간 계면 부착력 저하로 구조부재 연성 저하 ■ 기존 나노기술의 경우, 재료 및 부재 차원의 연성능력 향상에 효과적이지 못함	■ 경량골재 자체 부착력 향상을 위한 골재 표면처리 기법 적용 ■ 골재-시멘트 간 부착력 향상을 위한 미세공극 충전 및 가교 나노소재 적용
	■ 기존 공기연행제 등을 통한 공극 형성의 경우 심각한 강도 저하가 필연적	■ 마이크로-나노 솔리드 버블을 이용한 최적 충전으로 강도를 유지하면서 콘크리트 비중 감소
	■ 마이크로-나노 솔리브 버블의 경우 비중 차이로 인해 재료분리 발생	■ 마이크로-나노 솔리드 버블의 표면 개질화를 통한 재료분리 현상 억제 및 공극 분산 제어
	■ 나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성은 일반 콘크리트 및 경량 콘크리트와 완전히 상이할 수 있음	■ 나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 배합설계 절차 제시 및 역학적 특성 평가 모델 제시 ■ 나노기술 적용 콘크리트에서 단위용적중량과 강도의 상관관계 모델 제시
나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 제조 기술	■ 나노 임베디드 경량골재의 콘크리트 배합 시 흡수능력 그리고 경화 콘크리트에서 시멘트 매트릭스와의 상호거동 등에 대한 정보 부재	■ 콘크리트에서 나노임베디드 골재의 균열저항성 및 시멘트 매트릭스와의 거동에 대한 평가 모델 제시
	■ 실내실험에서 결정된 배합표 및 역학적 특성 결과들은 실제 현장에서 배합된 콘크리트와의 차이에 대해 평가 필요	■ 나노기술 활용 콘크리트 현장품질 관리 기술 제시

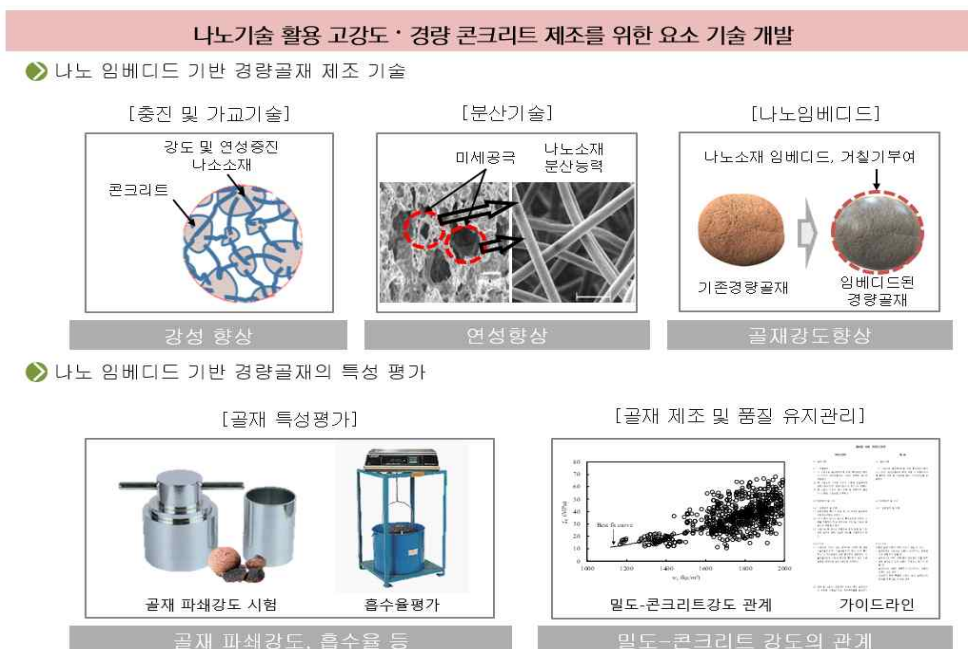
기술 개발내용	한계점	기술개발방향
	▪ 나노소재 혼입 콘크리트는 기존 콘크리트와 상이한 특성을 가지므로 나노소재의 특성을 적절히 반영한 해석 기술 필요	▪ 나노소재 혼입 콘크리트의 수화반응 모니터링 기반 사용 중 결함 발생 및 열화 해석모델 개발
	▪ 나노 수준 결합재 및 고강도 콘크리트는 초기 수화반응 촉진으로 자기수축량 증가	▪ 수축저감 최소화를 위한 콘크리트 내부양생 기술 도입
	▪ 미수화 재료로 인한 장기강도 발현이 저하될 우려	▪ 강도 감소 최소화를 위하여 장기 강도가 향상된 내부양생 재료 개발
	▪ 동결융해로 콘크리트의 내구성 및 기능성이 감소되어 유지관리 비용 추가 발생	▪ 동결융해 저항성을 향상으로 내구성 목표 달성
고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인	▪ 경량·고강도 콘크리트에 대한 구조 거동 DB 부족에 의한 경제적 설계의 어려움	▪ 고강도·고내성 경량 콘크리트에 대한 다양한 요소부재에 대한 구조거동 분석
	▪ 경량 콘크리트의 경우 일반적으로 강성부족으로 인한 과대 처짐 우려	▪ Full-scale 단위의 부재성능평가를 통한 목적구조물 적용가능성 검토
	▪ 나노소재의 인체 및 환경에 대한 유해성 문제에 대한 불확실성	▪ 기존 구조설계기준 부합화 및 목적 구조물 대상 고강도·고내성 경량 콘크리트 설계 가이드라인 도출
	▪ 초고강도 콘크리트의 작업성 확보에 대한 어려움 및 체적변화에 의한 균열 발생 가능성	▪ 실제 현장을 묘사한 Mock-UP 테스트를 통한 작업성 확보 기술 개발
	▪ 현재 건설업체의 현실을 고려하였을 경우 나노소재의 분산 및 배합특성을 제대로 구현하기 어려움	▪ 나노소재의 인체 및 주변 환경성을 고려한 고강도·고내성 경량 콘크리트의 시공 및 유지관리 지침 개발

4.2 개발내용별 개발목표 및 주요내용

가. 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술

■ 기술개요 및 목표

- 본 기술은 나노기술을 활용하여 경량·고강도 콘크리트를 제조하기 위한 요소 기술을 개발하는 것임
 - 나노 임베디드 기반 경량골재 제조 기술 개발
 - 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술 개발
- 경량·고강도 콘크리트(밀도 1.6 t/m³, 압축강도 80 MPa)를 제조하기 위한 나노임베디된 경량골재 및 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술을 개발하고자 함
 - 골재 파쇄강도: 180 kN 이상(파쇄율 10% 기준; KS F 2541)
 - 골재 흡수율: 3.0% 이하
 - 마이크로-나노 솔리드 버블: 비중 0.6g/cm³
 - 마이크로-나노 솔리드 버블 분산율: 80% 이상



<그림 V -85> 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술 개요

- 경량골재의 높은 흡수율과 낮은 파쇄 강도로 인한 낮은 역학적 특성을 보완하기 위해서는 경량골재에 나노소재를 임베디드 하는 기술과 골재표면을 제어하는 기술 개발이 필요함
 - 경량골재는 자체 강도가 매우 낮기 때문에 기존의 매크로 수준의 재료 첨가만으로는 경량골재 콘크리트의 성능향상에 한계가 있음
 - 나노소재를 이용한 경량골재 임베디드 기술은 단순한 나노소재의 첨가가 아닌 나노 크기 공극에 나노 소재를 임베디드 시킨 후 화학적으로 경화시키는 방식으로 골재의 경량성은 유지하면서 골재 정도 향상을 기대할 수 있음
 - 나노소재를 이용한 경량골재의 표면제어기술은 골재 표면에 물리적·화학적 처리 등을 통하여 시멘트와의 결합력을 부여할 수 있음
- 경량 콘크리트는 경량골재 자체의 낮은 파쇄강도와 높은 흡수율로 콘크리트의 탄성계수와 압축강도가 낮아짐에 따라 80 MPa 이상의 강도를 위해서는 시멘트 매트릭스와의 부착 향상 기술, 콘크리트 연성 거동 기술 등이 필요함
 - 경량골재는 관통파괴 최대내력 이후 내력감소가 급격하는 취성적 파괴를 유도하기 때문에 경량 고강도 콘크리트를 구조부재로 적용할 시 연성을 향상시키기 위한 방안의 검토가 필요함
 - 또한, 경량골재의 매끄러운 표면은 골재-시멘트 간의 부착력을 감소시켜 콘크리트 강도를 저하시키므로 경량골재 표면제어만으로 콘크리트의 강도를 향상시키는데 한계가 있음
 - 따라서, 콘크리트의 최대내력 이후 취성적 파괴를 방지하면서 골재-시멘트간의 부착력 향상을 위해서는 미세공극충진, 가교역할 등을 위한 나노 소재 적용이 필요함
- 콘크리트의 강도 저하를 최소화함과 동시에 비중의 획기적인 경량화를 달성하기 위해서는 골재의 경량화뿐만 아니라 마이크로-나노 버블 등의 공극 제어를 통한 매트릭스 자체의 경량화 기술 개발이 필요함
 - 기존의 공기연행제 사용으로 생성된 공극은 외력에 대한 저항성이 전혀 없어, 공기연행제 1% 사용으로 콘크리트 압축강도는 3% 정도 감소하는 것으로 알려져 있음
 - 따라서, 마이크로-나노 버블 등을 활용한 콘크리트의 공극 제어 시, 공극으로 인한 매트릭스의 강도 저하를 최소화하기 위하여 일정 수준의 강도를 갖는 마이크로-나노 버블 적용이 필요함

- 한편, 마이크로-나노 버블의 낮은 밀도로 인하여 재료분리가 발생할 수 있으므로, 재료분리 방지 방안 마련이 필요함

● (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		목표스펙
		국내	국외	
나노임베디드 기반 경량골재 제조 기술 개발	골재 파쇄강도 (kN)	140	140	180 이상
	골재 흡수율 (%)	10~20	10~20	3.0 이하
마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술 개발	마이크로-나노 솔리드 버블 비중 (g/cm^3)	1.4	1.2	0.6
	마이크로-나노솔리드 버블 분산율 (%)	20	50	80

■ 기술 개발내용 및 범위

● 나노임베디드 기반 경량골재 제조 기술 개발

- 고강도·저흡수 경량골재 제조 기술 개발

· 경량골재 나노 임베디드 기술

※ 나노소재의 경량 골재 융합을 통한 골재 강도 향상 기술

※ 나노소재 : 2세부 연계 (탄소기반 나노소재 (CNTs, CNFs 등), 산화 나노소재 (Nano-SiO₂, Nano-ZrO₂, Nano-Al₂O₃, Nano-Fe₂O₃ 등))

· 경량골재 표면제어기술 개발

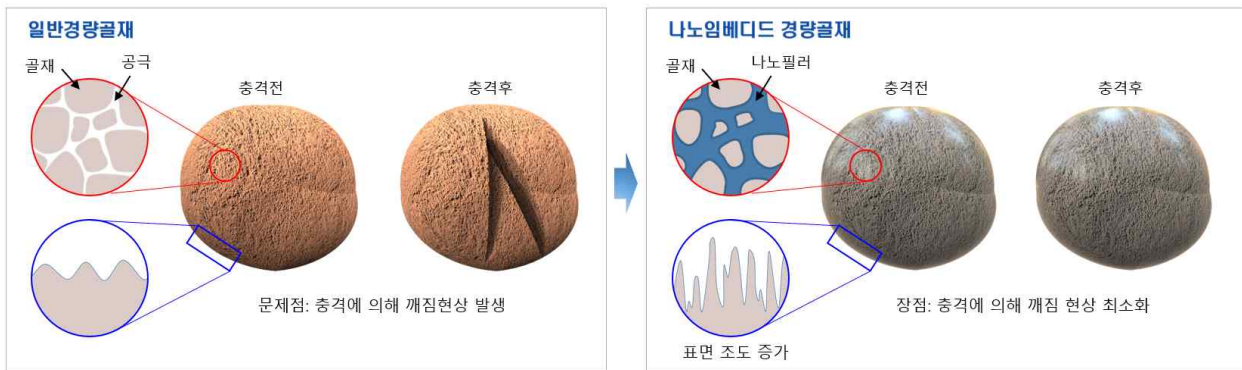
※ 경량골재 표면의 물리적, 화학적 처리 등에 의한 표면 처리 기술

- 경량골재-시멘트 간 부착력 향상 기술 개발

· 경량골재와 시멘트 간의 미세공극 충전 및 가교 나노소재 적용기술

· 경량골재 특성 평가

※ 파쇄강도, 흡수율 등



〈그림 V-87〉 나노임베디드 기반 경량골재의 개념

● 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술 개발

- 마이크로-나노 사이즈 버블 소재의 건설재료 적용성 검토

- 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술 개발

· 최적 마이크로-나노 사이즈 버블 소재 선정 및 솔리드 합성

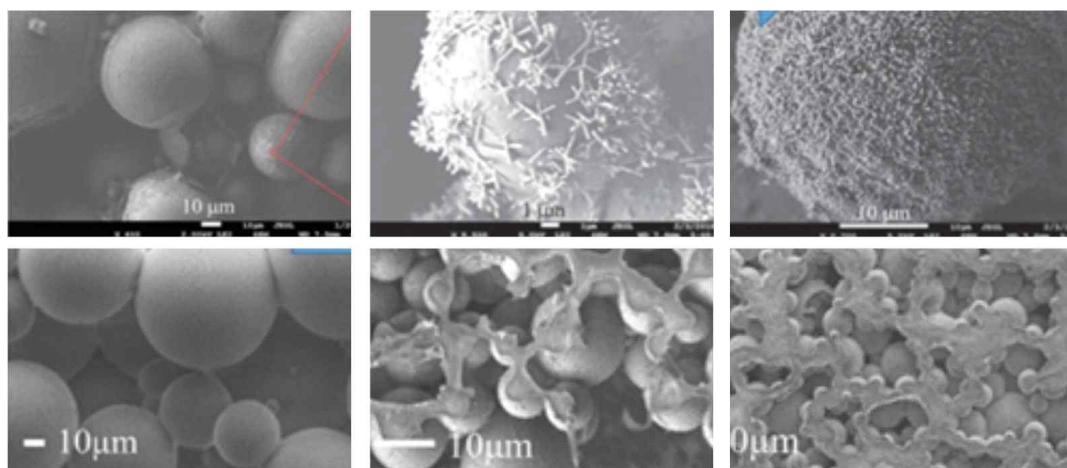
· 마이크로-나노 솔리드 버블의 재료분리 저감 기술

※ 마이크로-나노 버블의 표면 개질(결결 성장, 코팅, 브릿징 등) 및 비중 조절, 매트릭스 점성 제어 등

- 마이크로-나노 솔리드 버블 활용 매트릭스 경량화 기술 개발

※ 마이크로-나노 솔리드 버블에 의한 콘크리트의 최적 충진으로 콘크리트의 강도 저하를 최소화하는 동시에 비중을 감소시키는 기술

· 마이크로-나노 솔리드 버블과 매트릭스의 중량 및 강도 관계 분석

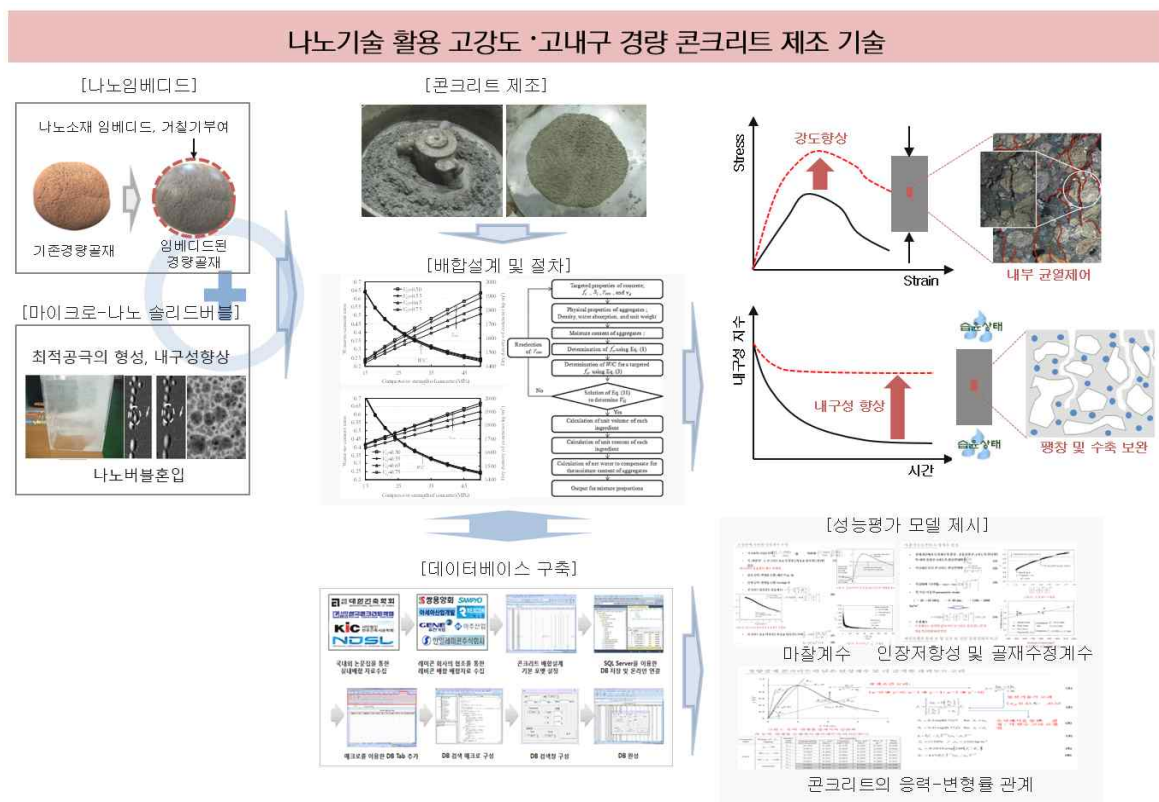


〈그림 V-89〉 마이크로-나노 솔리드 버블의 재료 특성 개선 및 버블의 합성

나. 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 제조 기술

■ 기술개요 및 목표

- 본 기술은 나노 임베디드 기반 경량골재, 마이크로-나노 솔리드 버블 등을 활용한 고강도·경량 콘크리트 및 고내구 기능성 콘크리트 제조 기술을 개발하는 것임.
- 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조 기술 개발



〈그림 V-91〉 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 배합 및 설계기술

- 개발 목표 관련 내용 추가
- 91일 압축강도: 80 MPa 이상
- 91일 기전밀도: 1.6 t/m³ 이하
- 염소이온확산계수: 일반콘크리트 대비 10% 이하
- 상대동탄성계수 90% 이상
- 600℃·hr에서 압축강도: 80 MPa 이상

- 현장배합과 실험실 배합 강도차이: 10% 이하
- 경량 콘크리트는 사용되는 골재의 흡수율과 자체강도에 의해서 굳지 않은 콘크리트의 유동성과 굳은 콘크리트의 역학적 특성이 현저히 달라지기 때문에 배합설계 절차와 역학적 특성 평가모델은 반드시 정립되어야 함
- 나노기술 적용 경량골재는 일반 경량골재와 흡수율이 다르기 때문에 배합시 콘크리트에서 골재에 의한 슬럼프 로스와 골재 부립에 의한 재료분리를 제어할 수 있는 배합방법이 필요함
- 나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 안정적인 품질확보를 위해서는 소요 목표(압축강도, 단위용적중량, 슬럼프 등)에 대한 신뢰할 수 있는 배합설계 절차가 정립되어야만 함
- 나노소재 적용 경량골재를 이용한 고강도·경량콘크리트는 골재 강도가 일반 경량골재와 보통 중량 골재 사이에 존재하기 때문에 전반적으로 균열면에서의 골재 맞물림 작용 및 인장 저항성이 다를 수 있음
- 특히 80 MPa 수준의 고강도·경량 콘크리트는 콘크리트의 높은 강도와 보통 중량골재 보다 낮은 강도의는 경량골재에 의해서 취성적인 거동이 지배적일 수 있으므로 이와 같은 역학적 특성을 평가할 수 있는 모델이 반드시 제시되어야 함
- 구조물의 열화에 따른 유지보수 비용 증가 등으로 콘크리트 구조물의 내구성 향상이 요구되며, 콘크리트의 내구성 향상을 위하여 나노소재 기반의 결합재를 활용하여 콘크리트의 표면에 불투수층을 형성함으로써 유해이온의 콘크리트 내부 유입을 원천으로 차단하는 기술 개발이 필요함
- 콘크리트 내부 공극 내에 있는 공극수는 콘크리트 열화의 주요 요인 중 하나이며, 공극수가 외부의 유해이온을 콘크리트의 내부로 끌어들이는 역할을 함으로써 콘크리트 열화가 진행되는 것이 특징임
- 나노소재 적용 결합재 활용을 통하여 콘크리트 내부의 공극수의 점도를 높여 불투수층을 형성함으로써 유해이온의 내부 침입 및 확산 방지를 기대할 수 있음
- 나노소재 혼입 콘크리트의 내구성 평가를 위해서는 수화 반응에 따른 수화모델과 이를 반영한 장기거동 특성을 반영한 기술 개발이 필요함

- 나노소재 혼입 콘크리트는 기존 재료와 다른 다양한 변수에 영향을 받게 되며, 기존 이론적 거동과 상이한 특성을 지님에 따라, 나노소재의 특성을 적절하게 반영한 해석 기술이 필요함
- 나노소재 혼입 콘크리트의 올바른 거동 해석을 위해서는 각 요소별 영향지수 산정, 나노소재 형상 등의 영향과 더불어 시멘트계 소재 고유의 수화특성 예측기술이 필수적임
- 장기간의 재료거동 예측을 위하여 시간과 온도 등의 환경적 영향을 고려한 해석기술의 도입 또한 요구되며, 검증을 통한 유효성이 입증된 균질화 및 확률적 기법을 활용하여 효율적이고 신뢰성 있는 해석기법 개발 또한 필요함
- 실내실험에서 결정된 배합표 및 역학적 특성 결과들은 실제 현장에서 배합된 콘크리트와 품질 및 역학적 특성과 차이를 보일 수 있으므로 나노기술 활용 콘크리트에 대한 현장 품질관리 기술이 반드시 필요함
- 경량골재 콘크리트의 유동성 및 강도발현은 사용되는 골재의 함수상태 및 입도분포 등에 의해 영향을 받으므로 현장여건을 고려한 골재 품질관리 체계 그리고 그에 따른 콘크리트 특성에 대한 자료가 정립되어야만 함
- 실제 현장에서의 배합은 외부환경에 의해서 콘크리트의 품질이 현저히 달라질 수 있으므로 다양한 양생조건에서 실내실험에서 결정된 배합표와 함께 현장의 재현성 검증이 필요함

● (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		개발목표스펙
		국내	국외	
나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 기술 개발	91일 압축강도 (MPa)	50	60	80
	91일 기건밀도 (t/m ³)	2.0	1.8	1.6
	염소이온확산계수 (%)	15	15	10
	상대동탄성계수 (%)	85	85	90
	600°C·hr에서 압축강도 (MPa)	50	60	80
	현장배합과 실험실 배합 강도차이 (%)	10~20	10~20	10

■ 기술 개발내용 및 범위

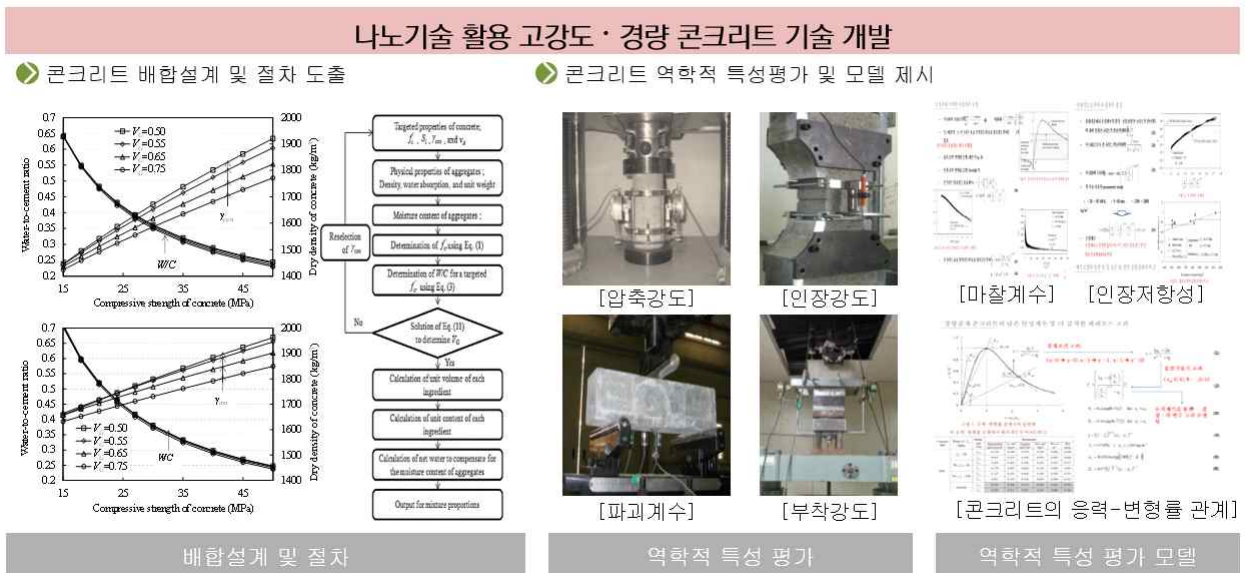
● 나노기술 활용 고강도·고내구·경량 콘크리트 기술 개발

- 고강도·경량 콘크리트 배합 설계 모델 및 절차 도출

※ 2세부, 3.1세세부 연계

- 고강도·경량 콘크리트 역학적 특성 평가 및 모델 제시

※ 압축강도와 타 특성들의 상관관계 평가



<그림 V-93> 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트의 배합 및 설계특성 평가

- 나노소재 기반 결합재 활용 고내구 콘크리트 제조 기술

※ 2세부 연계, 미세공극 내 공극수 점성 향상 등

- 콘크리트 내구성 평가 기술

나노소재 기반 결합재 활용 고내구 콘크리트 제조 기술

▶ 내구성 영향인자 및 메커니즘 분석 → 정량화

▶ 내구성 평가 및 모델 제시



〈그림 V-95〉 나노소재 결합재를 활용한 고내구 기능성 콘크리트 기술 개발

- 나노기술 활용 콘크리트 현장 품질관리 기술 개발

※ 양생조건에 따른 압축강도 발현 평가

※ 현장 재현성 검증

※ 실험실 및 현장 배합 콘크리트 특성 DB 구축

고강도·경량 콘크리트 현장 품질관리 기술

▶ 나노임베디드 골재의 현장품질 관리 및 콘크리트 현장 재현성 검증

▶ 현장배합/실내배합 데이터베이스 구축



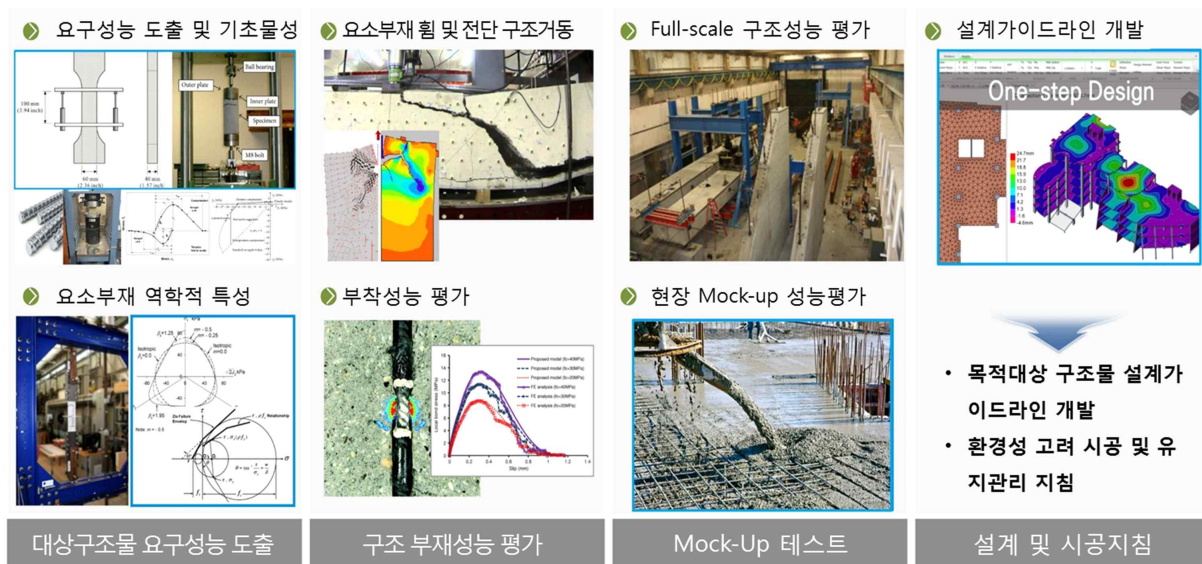
〈그림 V-97〉 나노기술 활용 콘크리트 현장 품질관리

다. 고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인

■ 기술개요 및 목표

- 본 기술은 고강도·고내구 경량 콘크리트의 실용화를 위한 기술로 목적대상 구조물의 구조적 거동 평가 및 설계가이드라인(안)을 개발하는 것임.
- 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 부재 성능평가 및 Mock-UP 테스트
- 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 시공 및 유지관리 지침 개발

요소기술 3. 고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인



<그림 V-99> 고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인의 개요

- 목적대상 구조물로의 적용을 위한 설계 및 시공 지침을 개발하고자 함.
- 고강도·경량 콘크리트 적용 목적대상물 구조 설계가이드라인(안)
- 환경성을 고려한 나노기술 활용 고성능 콘크리트 시공 및 유지관리 지침(안)
- 경량 고강도 콘크리트의 경우 일반적인 콘크리트와 다른 구조적 거동을 보이므로, 이를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 다양한 형태의 구조적 특성에 대한 연구가 선행되어야 하며, 이를 바탕으로 나노기술을 활용한 경량 고강도 콘크리트의 구조 설계 가이드라인 기술 개발이 필요함
- 일반적으로 경량 콘크리트의 경우 상대적으로 낮은 탄성계수로 인해 일반 콘크리트와 휨 및 인장거동이 상이하며 이를 고려한 설계 기법이 필요함

- 또한, 고강도·고내구 경량 콘크리트의 경우 일반 콘크리트에서 사용되는 잔골재 및 굵은 골재와는 다른 물성 및 크기의 골재를 사용하기 때문에 전체적인 구조적 거동이 달라질 수 있어, 기존의 설계 기준과의 부합성을 검토하여야 함
- 특히, 철근과 콘크리트 사이의 부착력, 콘크리트의 전단 특성 등은 골재의 영향을 크게 받게 되며 구조물에 적용을 위해서는 이를 실험적으로 규명하고 구조 설계 가이드라인을 제시할 필요가 있음
- 나노기술을 활용한 고강도·고내구 콘크리트의 경우 실제 구조물에 적용을 위한 작업성을 확보하기 어렵기 때문에, Mock-Up 테스트 등을 통한 문제 해결이 필수적으로 판단됨
- 나노소재의 경우 육안으로 그 물질을 확인하기 어려울 정도로 미세하여 호흡기 등을 통한 인체 유해성 등의 문제가 대두될 수 있으며, 이러한 점을 고려하여 나노소재를 콘크리트 혼합재료로서의 활용은 원재료의 이동, 배합, 시공 및 향후 유지관리 분야에서도 고려되어야 함
- 나노소재의 인체 유해성 등에 대한 검증데이터를 바탕으로 작업자의 안전을 위한 시공지침 등의 개발이 필수적임
- 인체 유해성뿐만 아니라, 환경에 대한 유해성 부분도 고려하여 시공지침 개발 및 향후 유지관리지침 등을 개발할 필요가 있음

● (개발목표) 요소기술별 핵심 성능 목표 제시

요소기술	성능지표	최고스펙		개발목표스펙
		국내	국외	
나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 부재 성능평가 및 Mock-UP 테스트	설계가이드라인 확보여부	-	-	설계가이드라인(안) 제시
나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 시공 및 유지관리 지침 개발	시공 및 유지관리지침 확보여부	-	-	시공 및 유지관리(안) 제시

■ 기술 개발내용 및 범위

● 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 부재 성능평가 및 Mock-UP 테스트

※ 3.1세세부 및 3.2세세부와 연계

- 목적 대상 구조물 선정 및 요구성능 도출
- 부재 구조거동 평가 및 구조기준 부합화 분석(부착, 휨 및 전단 성능, 피로거동, 기존 콘크리트 부재와의 접합부 등)
- 현장 적용성을 고려한 Mock-UP 테스트



〈그림 V-102〉 고강도·고내구 경량 콘크리트 구조거동 및 Mock-Up 테스트

● 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 시공 및 유지관리 지침 개발

- 환경성을 고려한 나노기술 활용 콘크리트 시공 지침(안) 개발

※ 1세부 전과정 환경/인체영향평가 연계

- 나노기술 활용 콘크리트 유지관리 지침(안) 개발

※ 1세부 전과정 환경/인체영향평가 연계



〈그림 V -103〉 고강도·고내구 경량 콘크리트 성과물 예시

4.3 구성 기술 확보 전략

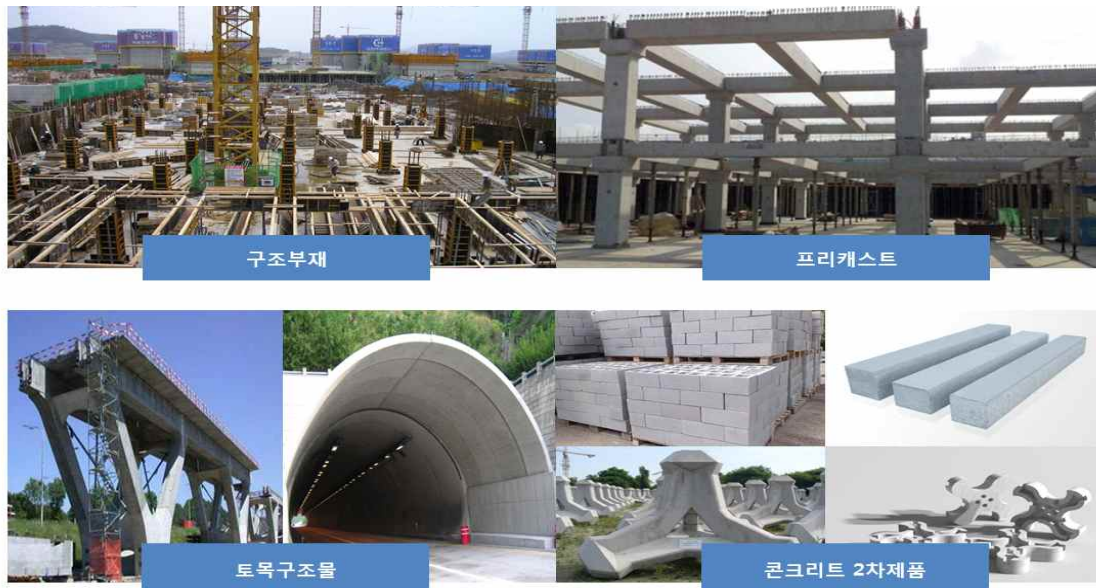
- 구성기술들은 대부분 참여기관의 자체 보유기술과 민간협력으로 핵심기술을 확보할 계획임

〈표 V-42〉 핵심 기술 확보 전략

과제 추진기술	핵심(구성) 기술	핵심 기술 확보 전략					
		공공 협력	민간 협력	자체 개발	국외 도입	국내 도입	기타
나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소기술	나노 임베디드 기반 경량골재 제조 기술 개발			●			
	마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술 개발 개발			●	●		
나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 제조 기술	나노기술 활용 고강도·고내구·경량 콘크리트 제조 기술 개발			●			
고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인	나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 부재 성능평가 및 Mock-UP 테스트			●			
	나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 시공 및 유지관리 지침 개발			●			

4.4 사업화 전략

- 나노소재 활용 첨단 콘크리트는 구조물의 자중을 경감시키고 단면의 깊이를 작게 할 수 있어 고층 구조물의 구조부재인 보, 슬래브, 기둥 및 전단벽 등 전반적으로 활용이 가능함
 - 나노소재 활용 첨단 콘크리트는 공장에서 미리 제작된 보 및 기둥, 중공기둥과 같이 프리캐스트 산업에 적용될 수 있음
- 나노소재 활용 첨단 콘크리트의 제조기술은 구조물의 구조부재 뿐만 아니라 고강도 압축강도와 고내구성을 요구하는 토목분야의 터널, 교량의 기둥과 PHC 파일 등에 적용할 수 있음
 - 기존 구조물의 강성 및 강도 보강을 위한 기둥, 전단벽 등을 신설하는 내진보강 분야에도 적용이 가능함
- 콘크리트 제조와 관련된 전반적인 산업분야에 적용 또는 응용이 가능한 것으로 판단됨
 - 나노소재 활용 첨단 콘크리트의 고강도는 구조부재가 아닌 콘크리트 2차 제품인 인터록킹 블록, 고강도블록, 고강도 경계석, 어초에도 적용이 가능하게 함
 - 전반적인 산업분야에 적용이 가능한 나노 콘크리트 제조기술은 재료의 강도, 내구성 등의 성능 및 기타 기능의 개선을 위한 이론적 원천기술 획득과 글로벌 브랜드화가 가능함
- 나노 콘크리트를 적용한 구조물의 비파괴 평가 기술 및 비파괴 검사 장비의 기술 확보, 나노 콘크리트의 비파괴 측정 결과 기반 열화 예측 시뮬레이션 개발은 기술 이전을 통한 수입구조 개선이 가능함
 - 구조부재 및 구조물 전체 어느 부분에서의 손상도 전기저항을 측정하여 손상진단 알고리즘을 통해 사용자가 그 손상도를 정량적으로 판단할 수 있는 정보를 제공할 수 있음
 - 구조물의 장수명화를 위해 요구되는 성능인 고내구성을 확보하고 예측 기술을 개발함에 따라 국가기반시설 및 구조물에 대한 사회간접비용의 저감이 가능함



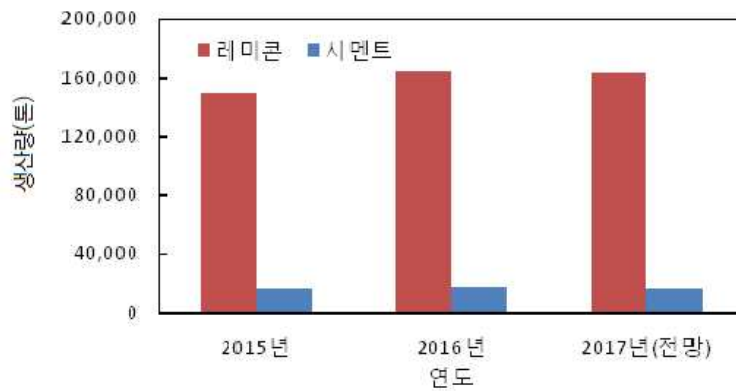
〈그림 V-104〉 본 기술의 적용분야

4.5 파급 효과(기대 효과)

가. 시장 경제적 기대효과

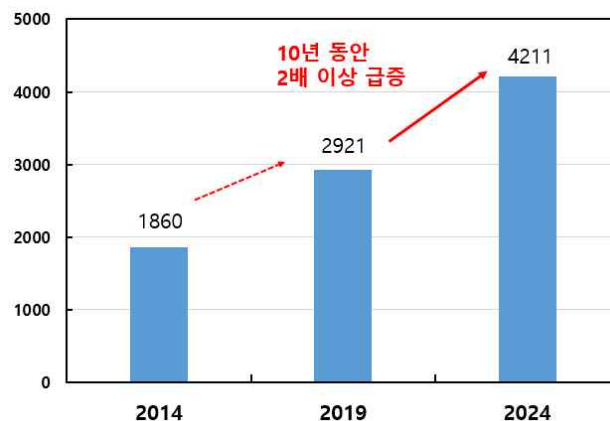
■ 국내외 건설시장의 규모가 점차 확대되는 상황에서 국제경쟁력 있는 첨단 건설, 환경 기술로 국외건설시장 적극 공략할 시점임

- 건설산업에서 2016년 국내 콘크리트 소비량(레미콘 생산량)은 연간 평균적으로 1억 6천만 m^3 로 약 16조의 시장규모임
 - 고강도 콘크리트 시장에서 2%를 본 기술로 대체가 된다면 3,200억원 수준의 시장 점유가 가능함
- 본 기술의 장점인 자중감소에 따른 밀면전단력 감소와 압축강도를 향상시켜 단면의 크기를 감소하면, 보통강도 콘크리트 기둥 보다 콘크리트의 물량을 약 10% 줄일 수 있음
 - 콘크리트 물량 10 %의 감소는 전체체적의 30%를 차지하는 시멘트의 사용량을 감소시킬 수 있으며, 이를 환산하면 약 100억원을 절감이 가능함
- 반영구적인 내화성능을 발휘할 수 있는 구조부재의 내화성능향상 기술은 내화처리 공정의 생략과 짧은 공사기간으로 별도로 수행하는 타 내화처리비 보다 경제적임



〈그림 V-105〉 연도별 레미콘 및 시멘트 생산량

- 2000년 세계 나노소재 총 시장 규모는 4억 9250만달러 2005년에는 9억 10만달러 정도로 5년간 약 12.8%의 연평균 성장률을 예상하고 있음
- 나노의 물성은 신규시장의 창출 또는 기존 시장의 완전대체가 가능하기 때문에 나노소재기술은 독점성이 강하며, 건설산업 시장에서 대단히 큰 파급성을 지님
- 2014년 대비 2024년에는 2배 이상 노후 기반시설물이 급증하여 유지보수에 투자로 인한 경제적 손실이 발생 할 것으로 전망됨
- 나노소재 개발을 통한 초고강도·고내구성 건설재료의 개발로 시공 후 유지관리에 대한 경제적 효과가 가능함



〈그림 V-106〉 30년 이상 노후 기반시설물 변화추이(한국시설안전공단)

- 나노소재 활용으로 콘크리트의 빠른 경화속도가 확보 가능하여, 높은 조기 압축강도 발현으로 거푸집 탈형 시기를 앞당길 수 있으며, 이를 통해 공사비용이 절감되는 경제적 효과를 기대할 수 있음

- 극한지역(몽골, 러시아)과 우리나라 동절기의 경우 낮은 대기 온도로 콘크리트 수화 반응이 억제되어 콘크리트 품질이 떨어지나, 나노소재 활용으로 낮은 대기온도에서도 콘크리트 타설이 가능함

■ 나노기술과 건설 기술의 접목으로 국내 건설분야의 투자 및 시장 활성화를 기대할 수 있으며, 국외 건설시장 진출 교두보 형성이 가능함

- Roco(NSF)는 2015년 전세계의 NT인력이 2백만명에 달할 것으로 전망하였으며, 시장규모는 1조 달러로 예측함
- 나노기술 분야별 비중에서는 대체적으로 소자와 소재 분야가 향후에도 지속적으로 전체시장의 80% 정도 차지할 것으로 전망되어 관련 분야의 인력수요 또한 꾸준히 증가할 것으로 전망됨
- NT분야의 빠른 성장을 반영하여 R&D에 종사하는 나노분야 인력 또한 비중이 늘어날 것으로 전망됨
- 건설 취업자는 전 산업에서 차지하는 비중이 7.0%에서 6.7%로 감소할 것으로 전망됨에 따라 나노소재 개발 및 건설분야에 확대에 의한 고용 창출 효과가 가능함

나. 과학 기술적 기대효과

■ 나노소재 활용 경량 초고강도 콘크리트와 고내구 및 수축저감 콘크리트 제조기술을 선도하고, 나노소재 활용 초고강도 콘크리트의 내화성능 향상에 대한 원천기술 확보함

- 나노소재 활용 콘크리트의 수화모델정립, 비파괴 및 통합 열화모사기술에 대한 원천기술의 확보, 폭렬에 대한 안전성 확보, 나노소재의 콘크리트의 수화반응, 강도발현 및 장기적 재료거동 평가 기술을 선도함
- 고층구조물의 초고강도부재의 내화에 대한 성능을 확보하여 재난 상황에 대응할 수 있는 안전성 확보 기술 선도함
- ISO·KS 등 기준에 적용 가능한 혁신적인 가이드라인을 제시함
- 특허권 확보 등을 통한 세계 최고수준의 기술력을 확보하여 공학기술 리더를 선도하는 역할을 담당함
- 기초연구분야부터 기술산업화분야까지의 나노소재를 활용한 건설재료의 기술력을

선점하여 산업화에 대한 글로벌 브랜드를 구축함

- 나노의 물성은 전 분야에 기술혁신을 가져옴에 따라 신규시장의 창출 또는 기존 시장의 완전대체가 가능함
- 경량골재의 역학적 성능개선을 통한 국내 경량 콘크리트 품질의 개선 및 수입에 의존하고 있는 경량골재의 대체 가능함
- 나노기술과 콘크리트 기술의 융합에 의한 전문인력 양성 및 연구 인프라 확대가 가능함
- 국내·외 유사기술이 없는 원천기술로서 건설 신재료·신기술 등 국가 건설기술 브랜드 창출에 기여함

■ **건설분야에 나노기술의 융합은 보다 우수한 첨단 건설 소재의 개발 및 기존 제품의 한계성능을 초과하는 성능향상을 구현함**

- 국외에서는 이미 NT를 건설분야에 응용하는 연구가 교량 및 도로등에 다양하게 수행되고 있지만, 국내에서는 세계적 정세 흐름의 외면으로 기술의 격차가 크게 발생함에 따라 국가 R&D 연구를 통한 역량을 구축함
- 건설분야 원천기술 개발부터 산업화에 이르는 전주기 R&D 시스템 구축 및 국내외 인력·공동 연구성과를 취합하여 공학 네트워크를 구축함
- R&D 연구를 통한 핵심 기술 및 주기적 연구를 통한 건설분야 전반에 새로운 고부가가치 기술 혁신을 유도하여 창조형·개방형 R&D 시스템으로 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대됨
- 나노소재 개발을 통한 기술력 확보는 국가 기술력의 교두보로서 국외 파급효과의 허브 역할로 확대 가능함

다. 사회문화적 기대효과

■ **첨단융합 건설기술 및 콘크리트 성능향상 기술에 대한 전문인력 양성, 전문분야 확대, 관련 기술 기반구축 효과를 얻을 수 있음**

- 나노소재학과 건설재료학의 융·복합을 통한 전문분야 확대가 가능함
- 지식의 공유 및 공동연구 확대를 통한 연구 인프라 환경 제고가 가능함
- 나노소재를 융합한 초고강도콘크리트 제조기술은 기술의 원천기술 확보로 국산기술

의 세계시장 진출의 기반구축이 가능함

■ **콘크리트의 경량 고강도화, 고내구, 다기능화를 통해 천연자원 소비가 절감됨**

- 전 세계적으로 환경규제가 강화되면서 CO₂ 저감에 관한 연구로 시멘트산업의 문제점을 지적하고 이를 해결하기 위하여 다양한 분야에서 접목하고 있음
- 나노소재 개발 및 나노기술 활용을 통하여 CO₂ 저감형 건설재료 기술 확보로 국가적 이슈 해결에 기여함
- 건설업은 한국경제를 움직이는 중추적 역할을 하는 중후장대 산업으로 인식되어 왔으며, 경기를 부양하는 역할을 수행하였지만, 3D(Difficult, Dirty, Dangerous) 직업군으로 분류되어 왔음
- 나노 분체 개발 및 나노 콘크리트 기술 개발은 R&D 연구를 통한 고인력의 활용 방안을 모색할 수 있음
- 건설분야의 이미지를 개선하고 건설분야 관련 종사업의 다양성 및 고부가가치로의 활용이 가능함

라. 타 산업으로의 파급효과

■ **글로벌 경쟁력을 갖춘 건설소재를 세계시장 선점이 가능한 글로벌 건설산업으로 창출 및 육성함으로써 미래 산업을 구조 조정할 수 있음**

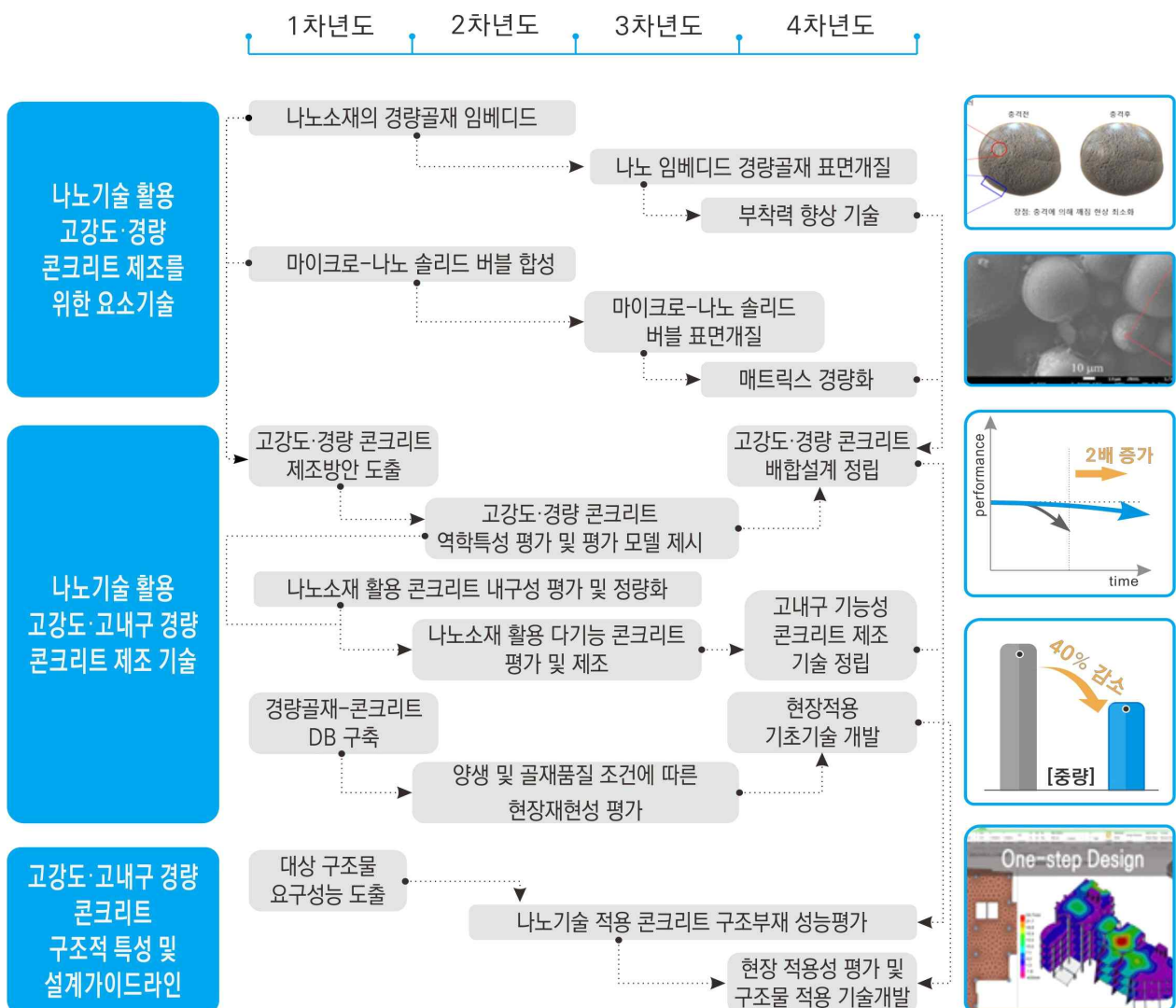
- 건설산업은 국가 기반 사업기반으로 모든 분야의 고부가가치 창출이 가능한 미래 신산업 창출이 가능한 잠재가치를 보유하고 있음
- ICT, Asset Management 등 건축·토목 분야의 한계를 극복한 연구를 통하여 건설 기반 신학문 분야의 창조적 원천·응용 연구 선점이 가능함
- 나노기술 상용화를 통한 기반사업 추진 및 나노융합 협력 확산을 통한 원천기술 상용화 및 신산업 창출 효과가 가능함
- 나노소재 및 나노화 기술은 인류의 건강한 삶 구현을 위한 실용화 기술로서 지속가능한 사회구축 및 Bio-Health friendly를 실현함

■ **건설분야의 LCC 관련 연구는 Big data를 기반으로 software개발이 가능하며 신소재를 접목한 구조물의 LCC의 접목이 가능함**

- 나노소재 및 나노기술 활용 콘크리트의 LCC 분석을 통한 환경분야의 평가가 가능함

4.6 수행 로드맵

- 구성기술 1은 나노소재를 활용한 고강도·경량 콘크리트의 개발을 위한 요소기술 개발로서 콘크리트의 경량을 유지하면서 강도 향상을 위한 나노 임베디드 경량골재 제조 기술 개발과 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술로 구성됨.
- 구성기술 2는 나노기술을 활용한 고강도·경량 콘크리트 및 내구성이 혁신적으로 향상된 고내구 기능성 콘크리트 제조 기술을 개발하는 것으로, 실제 현장 적용을 위한 콘크리트 품질관리 기술 개발을 포함함.
- 구성기술 3은 구성기술 1과 2에서 개발된 콘크리트가 적용된 구조물의 구조적 거동 평가 및 설계를 모델과 절차 정립에 중점을 둠



<그림 V-107> 본 기술의 로드맵

4.7 연차별 수행 목표 및 내용

〈표 V-43〉 연차별 수행 목표 및 내용

기 간	수행 목표	수행 내용
1차년도	경량골재의 개선특성에 적합한 나노 소재 스크리닝	- 유리질 또는 경화성 고분자 소재의 선정 - 경량골재에 임베디드 처리가 가능한 다기능 단분자 소재의 선정 - 임베디드된 경량골재의 특성 평가
	마이크로-나노 버블 소재 스크리닝	- 최적 마이크로-나노 버블 소재 선정 - 강도, 밀도 및 시멘트 매트릭스와의 적합성 평가
	나노기술 적용 경량·고강도 콘크리트 제조 방안 도출	- 배합조건에 따른 적용 나노기술과 콘크리트의 압축강도와 밀도의 관계 정립 - 배합시 재료분리 방지 방안 검토
	나노소재 결합재에 따른 내구성 평가 방법 및 영향인자 분석	- 콘크리트 내구성 평가방법 및 기준 분석 - 콘크리트 및 나노소재 기반 결합재의 내구성 영향인자 및 매퍼니즘 분석
	나노소재 결합재에 따른 기능성 요구 인자 및 매퍼니즘 분석	- 콘크리트 기능성 요구성능 도출 및 관련 평가 방법과 기준 분석 - 콘크리트 및 나노소재 기반 결합재에 따른 기능성 영향인자 및 매퍼니즘 분석
	실험실 기반의 경량골재 콘크리트 배합과 특성에 대한 데이터베이스 구축	- 경량골재 특성에 따른 콘크리트 강도 발현 관계 정립 - 인공경량골재 특성 데이터베이스화
	나노기술 적용 목적대상 구조물의 요구성능 도출	- 기존 설계 기준 분석 - 나노기술 적용 목적대상 구조물 부위별 역학적 요구성능 도출 - 나노기술 적용 목적대상 구조물 부위별 역학적 요구성능 도출
2차년도	나노소재의 경량골재 임베디드 기법 제시	- 나노 필러 소재 등의 합성 - 경량골재 최적 임베디드 기법 제시
	나노 솔리드 버블 소재 합성	- 나노 솔리드 버블의 형성 기작 분석 - 합성된 나노 솔리드 버블의 재료 특성 분석
	나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 역학적 특성 평가	- 나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 역학적 특성 평가 - 재령별 압축강도, 파괴계수, 탄성계수, 쪼갬 인장강도, 부착강도, 전단마찰강도 등
	나노소재 결합재 기반 시멘트 복합체의 내구성 평가 및 정량화	- 나노소재 결합재 시멘트 복합체의 내구성 평가 및 내구성능 향상 방안 도출 - 구성재료 배합과 내구성 관계 정량화 및 해석/예측모델 개발
	나노소재 활용 시멘트 복합체의 기능성 평가 및 정량화	- 나노소재에 따른 시멘트 복합체의 기능성 평가 및 성능 향상 방안 도출 - 구성재료 배합과 요구 기능성 관계의 정량화 및 해석/예측모델 개발 - 나노소재에 따른 시멘트 복합체의 요구 기능성과 평가 기법(안) 도출
	양생조건과 골재품질에 따른 나노 기술 적용 콘크리트 강도 영향 평가	- 성숙도 기반의 콘크리트 강도발현 모델 제시 - 현장에서 나노임베디드 골재 품질관리 기법 평가
	나노기술 적용 고강도·고내구성 경량 콘크리트의 구조부재 성능평가	- 나노기술 활용 고강도·고내구성 경량 콘크리트 요소부재 성능평가 - 압축, 인장, 부착성능

기 간	수행 목표	수행 내용
3차년도	나노 임베디드 경량골재 표면개질 기법 제시	- 콘크리트와 부착력 향상을 위한 나노 임베디드 경량골재 표면의 표면개질 기법 제시 - 나노 임베디드 경량골재 표면의 거칠기 평가 및 향상방법 제시
	마이크로-나노 솔리드 버블의 표면 개질화	재료분리 최소화를 위한 마이크로-나노 솔리드 버블 표면처리 기법 제시
	나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트역학적 특성 평가모델 제시	- 나노기술 적용 콘크리트의 역학적 특성 모델 제시 - 재령별 압축강도, 파괴계수, 탄성계수, 쏘켓인장강도, 부착강도, 전단마찰강도 등
	나노소재 결합재 기반 고강도·경량 콘크리트의 내구성 평가 및 정량화	- 나노소재 결합재 기반 고강도·경량 콘크리트의 내구성 평가 및 내구성능 향상 방안 도출 - 구성재료 배합과 내구성 관계 정량화 및 해석/예측모델 개발
	양생조건과 골재품질조건을 고려한 나노기술 적용 콘크리트의 현장 재현성 검증	- 실험실 배합과 현장배합의 유동성 및 강도발현 차이 규명 - 현장배합에서 강도와 단위용적중량 관계 평가
	나노소재 활용 고강도·고내구성 경량 콘크리트의 구조부재 성능평가	- 나노기술 활용 고강도·고내구성 경량 콘크리트 부재단위 성능평가 - 힘 및 전단거동 분석
4차년도	나노 임베디드 경량골재 표면개질 최적화	- 나노 임베디드 경량골재 표면의 표면개질 기법 최적화 - 나노 임베디드 경량골재 표면의 거칠기 부여 기법의 최적화
	마이크로-나노 솔리드 버블에 의한 매트릭스 경량화	마이크로-나노 솔리드 버블 활용 공극제어 기술 확보
	나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 배합설계 모델 및 절차 정립	나노기술 적용 콘크리트의 배합설계 모델 제시 및 목표성능 만족 최적 배합 도출
	나노기술 적용 고강도·경량 콘크리트의 최적화	최적 배합 기반 나노기술 활용 콘크리트 제작 기술 피드백 및 보완
	고내구 기능성 콘크리트 제조기술 개발 및 가이드라인 제시	- 개발 고내구 콘크리트의 기능성 평가 및 향상 보완 - 고내구 기능성 콘크리트의 설계 파라미터의 정량화 및 배합설계 절차/가이드라인 제시 - 실험 연구 데이터베이스를 이용한 고내구 기능성 콘크리트의 해석/예측모델 제시 및 검증
	나노기술 적용 콘크리트의 현장적용 기초기술 개발	- 양생 및 현장조건 고려 나노기술 적용 콘크리트 최적 배합 도출 - 나노기술 적용 콘크리트의 실내 및 현장배합 데이터베이스 구축
	- 나노기술 적용 고강도·고내구성 경량 콘크리트의 구조부재 성능평가 - 현장 적용성 평가 및 구조물 적용기술 개발	- Mock-UP 테스트를 통한 현장 적용성 평가 - 목적대상 구조물 적용 나노소재 기반 콘크리트 설계 가이드라인 개발 - 환경성 고려 나노기술 활용 콘크리트 시공 및 유지관리 지침 개발

4.8 연도별 투자 계획 및 소요 인력

가. 연도별 투자 계획

■ 중소기업 대상사업으로 총 82.28억원/4년 중 정부출연금 57.47억 원(75%) 대비 민간부담금 24.81억 원(30%)으로 구성된 정부주도 사업으로 추진함

- 연구개발비 세부내용 및 민간부담금은 실제 연구수행 주체가 결정된 이후, 참여 기업의 현황 및 연구자 제안에 따라 변경가능성 존재

〈표 V -44〉 연도별 투자계획

(단위: 억원)

		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
정부출연금		11.53	11.53	18.35	16.06	57.47
민간 부담 금	현금	0.5	0.5	0.79	0.69	2.48
	현물	4.48	4.48	7.13	6.24	22.33
합계		16.51	16.51	26.27	22.99	82.28

〈표 V -45〉 연도별 연구개발비

(단위 : 억원)

세목		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
직접 비	직접비 소계	13.54	13.54	21.52	18.85	67.45
	인건비	7.48	7.48	11.81	10.35	37.13
	연구장비. 재료비	1.65	1.65	2.65	2.30	8.25
	연구활동비	1.87	1.87	2.87	2.53	9.14
	연구과제추진비	1.98	1.98	3.20	2.76	9.92
	연구수당	0.55	0.55	0.99	0.92	3.01
간접비		2.97	2.97	4.75	4.14	14.83
합 계		16.51	16.51	26.27	22.99	82.28

나. 소요 인력

■ 총 소요인력은 각 연도별 인건비, 연구 인력 참여율, 1인당 연평균 인건비를 고려하여 결정함

- 각 연도별 인건비는 각 연도별 정부출연금의 45%로 설정함
- 연구 인력 참여율은 40%로 설정함
- 1인당 월평균 인건비는 박사급 6,220 천원, 석사급 4,768천 원, 학사급 3,188천 원으로 설정함

〈표 V-46〉 연도별 소요인력

(단위: 명)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
박사급	7	7	10	9	33
석사급	11	11	18	15	55
학사급	13	13	20	17	63
합계	31	31	48	41	151

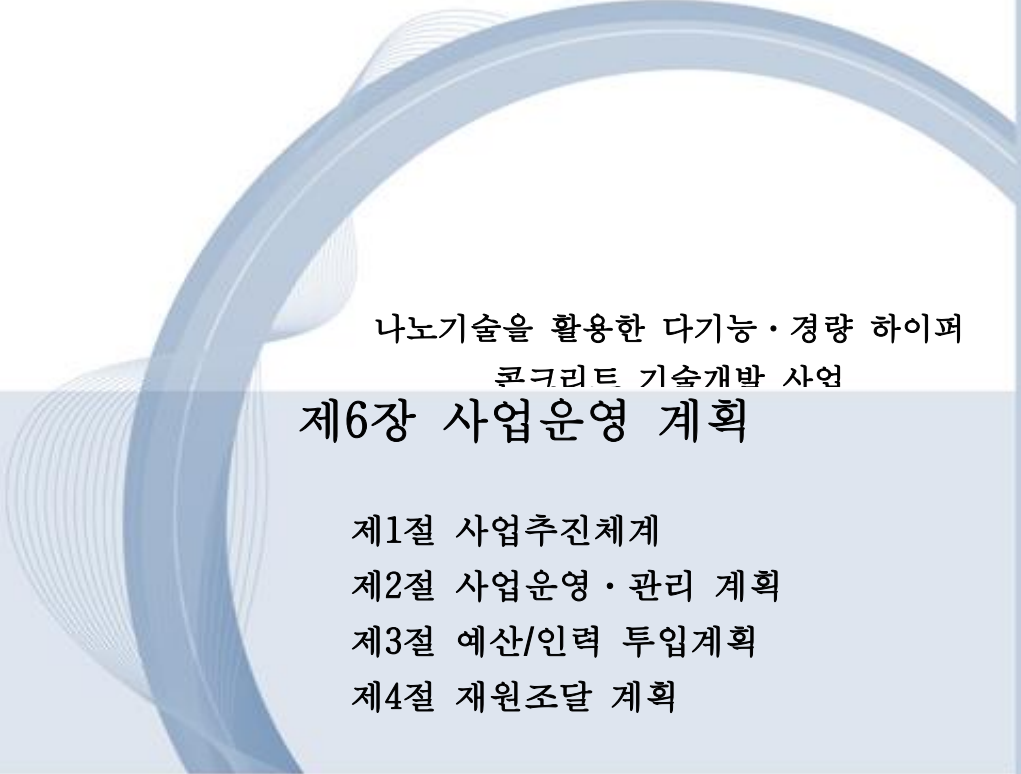
4.9 연도별 성과목표

■ 연도별 연구목표, 연구개발비 등을 고려하여 각 연도별 성과목표를 설정함

〈표 V-47〉 연도별 성과목표

(단위: 건)

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	합계
국내논문게재	2	3	3	3	11
국제논문게재	1	3	3	4	12
국내 특허출원	2	2	3	3	10
국내 특허등록	-	-	3	4	7
해외 특허출원	-	-	1	1	2
해외 특허등록	-	-	-	-	-



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼
코크리트 기술개발 사업

제6장 사업운영 계획

제1절 사업추진체계

제2절 사업운영·관리 계획

제3절 예산/인력 투입계획

제4절 재원조달 계획

제6장 사업운영 계획

제1절 사업추진체계 및 역할분담

1. 사업 추진체계

■ 사업의 전체적인 총괄은 국토교통부가 담당하며, 사업주관은 국토교통과학기술진흥원, 기술개발 사업관리는 연구단에서 관리하는 형태의 추진체계를 구성

● 각 세부기술 분야 수행의 효과성 제고 및 개별 연구그룹의 성과연계를 통한 현장적용 및 실증 강화를 위해 단일 연구단을 구성

- 객관성과 공정성 부문의 문제점 보완을 위해 심의위원회를 설치하여 사업 및 정책목표에 부합하는 총괄 운영계획 및 주요 안전에 대한 최종결정·추인



〈그림 VI-1〉 사업 추진 체계

* 주관연구책임자는 세부과제 2 또는 3 책임자도 수행 가능

2. 사업주체간 역할분담

■ 사업 목표를 위한 중점기술 분야별 역할 분담형 기술개발로 전략적 R&D 연계를 통한 대형성과 창출

● 주관부처

- (국토교통부) 사업을 주관하여 추진하는 중앙행정기관으로 사업 추진과 관련된 정책적 판단 및 의사결정, 기본계획 수립, 투자우선순위 결정, 국토정책과의 연계 및 정책적 수요 정보 제공

● 의사결정기구

- (심의위원회) 국토교통부 담당실장 및 관련부서 담당과장, 외부 산학연 민간전문가 등으로 구성되어 사업 및 정책목표에 부합하는 운영계획 및 주요 안전에 대한 최종결정 및 추인을 담당

● 전문기관

- (사업관리부서) 사업수행과정을 정기적으로 모니터링하고 선정평가, 중간 및 최종평가, 성과관리·확산, 사업비 정산 등을 수행

● 연구단

- 사업추진 권한과 책임 하에 과제기획부터 성과확산까지 총괄업무를 추진하며, 기술개발사업 사업추진을 위한 컨소시엄(연구그룹) 구성
- 연구개발계획, 유·무형의 성과물 관리, 대외협력업무, 사업화 전략수립, 대국민 홍보 등 전주기적 관리
- 연구단 과제수행에 대한 자체평가 및 사업추진방향·예산 조정에 대한 권한과 책임사업을 주관하여 수행하는 기관을 의미하며 모든 과제를 총괄 관리 및 지원하는 역할을 수행함

● 과제 주관 및 참여기관

- 국·공립 연구기관, 출연(연), 대학, 기업부설연구소, 공공기관, 조합 등 ‘국토교통부소관 연구개발사업 운영규정’ 제4조(연구개발사업 참여기관 자격)에 의한 기관

〈표 VI-1〉 추진 주체별 역할 및 기능

주체	역할 및 기능
국토교통부	- 사업총괄 부처(최상위 의사결정기관) - 사업의 추진과 관련된 정책적 판단 및 의사결정 - 사업 기본 시행계획 수립 - 사업 투자우선순위 결정 등
의사 결정기구	- 심의위원회 : 사업 및 정책 목표에 부합하는 운영 계획, 통합관리 방안 등 협의 • 예산운영, 사업추진 계획 수립 등 총괄 계획 수립 및 조정 역할 수행 • 세부추진계획 적절성 점검 • 평가위원회 최종 승인
전담기관	- 기술개발 과제 결과물의 성과연계 및 현장적용 및 실용화 성과창출 극대화를 위한 통합지원 • 사업추진 및 과제기획 방향성 설정, 사후관리 등의 총괄 운영기능을 부여함 • 기술개발 결과물의 현장적용을 위한 사업화 연계 기능 - 사업관리 실무지원 • 예산 운용계획 지원 • 선정평가, 협약체결, 중간 및 최종평가 등 사업 선정·관리 지원 • 기술이전 및 사업화 등 성과확산 지원 • 성과평가 • 사후관리
연구단	- 사업 추진계획 수립 및 사업관리 실무지원 • 예산 운영계획 및 사업 추진계획 수립 지원 • 선정평가, 협약체결, 중간 및 최종평가 등 사업 선정·관리 지원 • 기술이전 및 사업화 등 성과확산 지원 등
과제주관 및 참여기관	- 산업체 중심 산학연 컨소시엄으로 각각의 프로젝트(중점기술 분야) 수행 • 학·연의 기초기술, 유관기업의 관련기술을 통합·활용하여 원천 및 응용기술개발 수행

3. 사업관리 체계 및 프로세스

■ 연구개발사업의 최종결과물의 실용화 및 현장적용 성과 극대화를 위한 전주기적 프로세스에 기반한 성과관리 운영방안을 도입

● 계획(사업/과제 기획)

- 사업목표의 명확성, 성과계획의 합리성, 사업목표와 내용의 적합성, 유사성/중복성 검토를 통해 사업 추진의 적절성 확보
- 주요 분석 단계 : 사업목표전략 설정 → 사업 성과계획 설정 → 과제 선정

● 집행(연구개발 수행관리)

- 선정, 중간, 최종평가 및 진도관리는 「국토교통부 소관 연구개발사업 운영 규정」과 「국토교통 연구개발사업 관리지침」을 준용하여 전문기관에서 계획을 수립하고 실행
- 연구기관 선정 및 비용·인력 등의 자원배분, 연구개발 수행, 연구 수행 산출물 도출의 체계적 수행을 통해 사업 수행의 체계성 확보
- 주요 분석 단계 : 투입(Input) → 수행(Process) → 산출(Output)

● 결과(성과조사·분석·평가)

- 사업 투입 대비 산출 분석, 산업에 대한 경제적·사회적·공공적 영향력 분석, 논문/특허 등 질적 성과 및 양적 성과분석을 통해 사업수행의 효율성, 효과성 확보
- 주요 분석 단계 : 산출(Output) → 활용결과(Outcome) → 파급효과(Impact)

■ 기술수요조사, 과제기획부터 공고, 선정 및 연구수행, 사후관리까지 세부 프로세스 및 수행주체별 명확한 역할분담을 통한 R&D 전주기적 관리 프로세스 확립

- 동 사업의 중점 분야 및 세부 기술 분야의 사업규모 및 기간 등의 특성을 고려하여 연구단 과제로 설정하여 사업을 추진
- (연구단) 다수 기업이 대형 프로젝트에 참여하여 성공적인 수행을 위해 기술개발 및 사업화를 지원·관리하며 자체 진도점검 및 자체평가 등 원활한 과제추진을 위한 제반 행정사항 지원을 추진

제2절 예산·인력 투입계획

1. 투자 계획 및 소요 인력

1.1 연도별 투자 계획

■ 동 사업의 목표 달성을 위해 선정된 3개의 세부기술을 고려한 투입 계획을 수립

- 각 세부기술 분야별 기획위원회를 통해 예산을 도출하였으며, 성과 창출 정도를 고려하여 예산 규모 책정
- 각 중점분야별 예산은 총 사업비를 사전에 정한 후 배분한 것이 아니라, 각 중점분야별 세부기술의 기술로드맵 및 기술개발 내용에 따라 ‘기획위원회’의 전문가 의견수렴을 통해 세부기술별 필요 예산 규모를 추정하여 책정

〈표 VI-2〉 연도별 투자계획

(단위: 억 원)

세부기술			1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	계
1세부	정부		5.75	5.75	7.69	6.72	25.91
	민간	현금	-	-	-	-	-
		현물	-	-	-	-	-
	계		5.75	5.75	7.69	6.72	25.91
2세부	정부		11.53	11.53	12.38	10.83	46.27
	민간	현금	0.5	0.5	0.54	0.47	2.01
		현물	4.48	4.48	4.81	4.21	17.98
	계		16.51	16.51	17.73	15.51	66.26
3세부	정부		11.53	11.53	18.35	16.06	57.47
	민간	현금	0.5	0.5	0.79	0.69	2.48
		현물	4.48	4.48	7.13	6.24	22.33
	계		16.51	16.51	26.27	22.99	82.28
기획평가관리비			1.19	1.19	1.58	1.39	5.35
연구비 합계	정부		28.81	28.81	38.42	33.61	129.65
	민간		9.96	9.96	13.27	11.61	44.8
총 계(기획평가관리비 포함)			39.96	39.96	53.27	46.61	179.8

* 기획평가관리비는 1차년도인 '20년 3.96%를 적용하였으며 2차년도 이후 정부출연금 및 기획평가관리비는 예산 심의 과정에서 변경가능성 있으며 민간부담금은 참여기업 현황에 따라 변경 가능성 존재

1.2 연도별 투입인력

- 각 세부기술별 연구개발에 필요한 소요인력을 관련 분야 전문가 상세기획 내용을 반영하여 산출

〈표 VI-3〉 총 투입인력

(단위: 명)

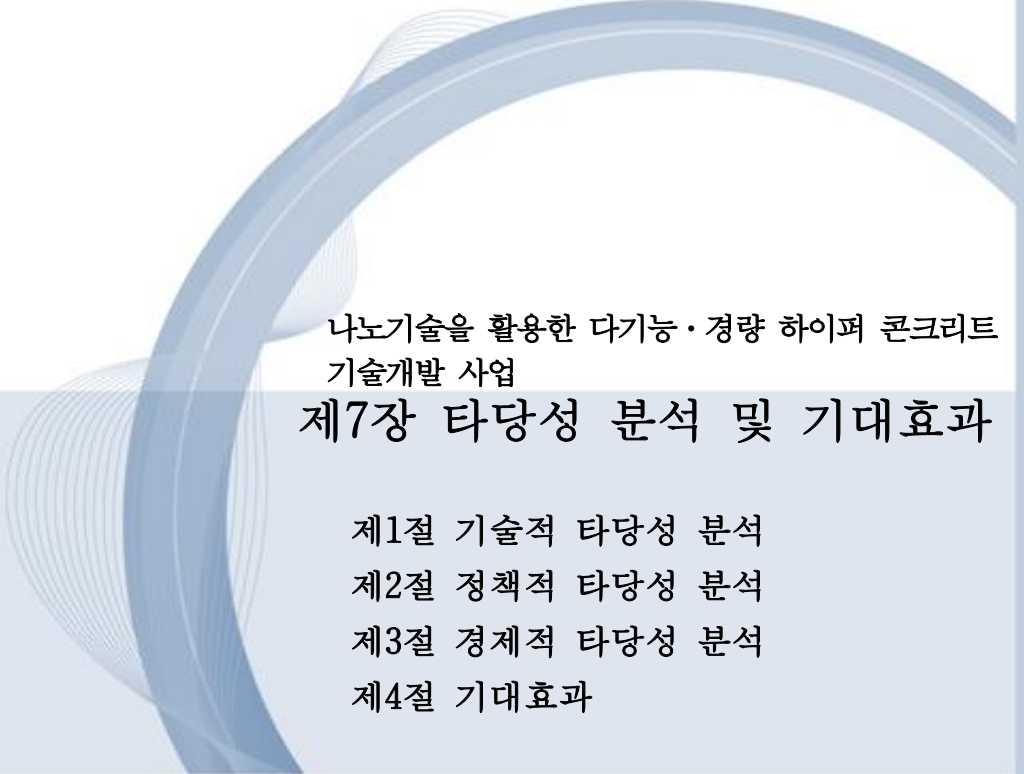
세부기술	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	계
박사급	18	18	22	18	76
석사급	32	32	43	38	145
학사급	25	25	34	29	113
계	75	75	99	85	334

- 세부기술 단위의 연구개발 투입인력은 다음과 같음

〈표 VI-4〉 1세부기술 투입인력

(단위: 명)

세부기술		1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	계
세부기술 1	박사급	3	3	4	3	13
	석사급	6	6	8	8	28
	학사급	3	3	4	3	13
	계	12	12	16	14	54
세부기술 2	박사급	8	8	8	6	30
	석사급	15	15	17	15	62
	학사급	9	9	10	9	37
	계	32	32	35	30	129
세부기술 3	박사급	7	7	10	9	33
	석사급	11	11	18	15	55
	학사급	13	13	20	17	63
	계	31	31	48	41	151
합계		75	75	99	85	334



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트
기술개발 사업

제7장 타당성 분석 및 기대효과

제1절 기술적 타당성 분석

제2절 정책적 타당성 분석

제3절 경제적 타당성 분석

제4절 기대효과

제7장 타당성 분석 및 기대효과

제1절 기술적 타당성 분석

1. 기술개발계획의 적절성

1.1 기술개발목표의 적절성

■ 본 사업의 목표

- 첨단건설재료 개발로 인한 구조물 내구성 향상 및 생애주기 비용 감소와 첨단건설재료 핵심원천 기술 확보를 통한 글로벌 신시장 창출을 목표로 설정
 - 이를 통하여 최소한의 유지보수로 구조물의 장수명화 실현 및 현재 정체되어 있는 건설산업의 활성화와 혁신적 체제 개편을 도모

■ 국민생활과 밀접한 국토교통 R&D 사업의 특성을 고려하여 사회현안 등을 해결하기 위한 공공 R&D 추진

- 1970년대~1980년대 집중 개발된 도시 인프라 시설물의 노후화에 따른 국민의 불안감이 증대됨에 따라 국민안전과 도시 경쟁력 제고를 위한 정책적 관심 증가
- 국제 사회의 온실가스 감축에 대한 요구에 따라 시설물 부문에서의 에너지 사용에 따른 온실가스 발생을 최소화하기 위한 사회적 요구 증대
- 노후 시설물 해체에 따른 다량의 건설폐기물 발생으로 인해 처분장 부족 및 폐기물 처리비용의 과다 발생, 폐기물 처리에 따른 민원 발생
- 국가정책 및 상위계획의 방향성과 국내 건설산업의 현재 및 미래를 고려하여 도전적이나 실천 가능성이 높은 비전 제시
 - ‘건설산업의 혁신 및 지속가능한 환경 발전 실현’
- 공공기술 및 산업이 혼합된 사업의 특성을 고려하여 기술개발 추진에 따른 공공기술과 산업기술개발이라는 목적 제시
- 현재 국내 건설산업은 수요 포화상태 및 성장한계에 따른 정체기에 접어든 상태이며, 해외 수주 또한 저조한 실정으로 첨단기술을 활용한 차세대 건설재료 개발 필요

- 건설산업은 재생불가능한 천연자원의 최대 소비원인 동시에 이산화탄소 등 막대한 오염물질을 배출하는 산업으로 환경에 미치는 영향이 막대함

■ 따라서, 건설산업의 혁신 및 지속가능한 환경발전 실현을 위해 나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 개발을 통한 혁신적 기술확보를 목표로 수립

1.2 사업추진전략의 적절성

■ 정책, 경제, 사회, 기술적 측면에서 국내 R&D 역량을 고려한 PEST분석을 통해 촉진요인과 저해요인을 구분하고 R&D 사업추진 전략 수립

- 시설물 안전 정책, 건설관련 연구개발 정책 목표 달성을 위해 환경부하 저감 기술, 친환경 건축재료 기술, 융복합 첨단기술 등 직·간접적 건설재료 기술 개발 필요성 확대
- 전통적 구조재료 기술 투자 편중과 선진국 대비 첨단 건설재료 분야의 낮은 기술개발 투자 비중으로 인해 기술 경쟁력 우위 확보를 위한 투자 강화 필요
- 노후 시설물의 증가와 천연자원의 고갈에 따라 국민 불안감 해소 및 건설 성장 동력 유지를 위한 기술개발에 관심 증대
- 선진국 중심으로 신소재 등을 활용한 새로운 건설재료 제조 기술을 개발함에 따라 기존 건설재료 대비 비용 절감, 성능 향상, 신기능성 확보 등이 가능해지는 추세

1.3 기술개발체계의 적절성

■ 과제 발굴 및 선정과정에서 공공성, 시장성, 기술성 측면을 고려하여 설정함으로써 객관성을 제고하였으며, 외부전문가들의 의견을 폭넓게 청취하여 선정의 투명성 및 공정성 제고

2. 기존 기술과 차별성 및 연계방안

2.1 기존 사업과의 중복성 검토

■ 기존 사업과의 중복성 검토를 위해 모든 부처의 기 지원된 사업 및 과제를 대상으로 사업목적, 지원대상, 기술분야 등에 대한 중복성을 사전에 검증함

- 초고층복합빌딩 사업단은 첨단 초고층복합빌딩 기술개발을 통한 지속가능한 수직

도시공간 창출을 목표로 하고 있음

- 동 사업의 경우 친환경의 지속가능한 수직도시공간 창출을 위한 도시계획/공간 설계/환경계획 등 삶의 질 향상기술 및 초고층복합빌딩의 거주성/사용성을 높이고 저비용의 효율적 유지관리 위한 첨단 자동화 관리기술 확보를 사업목표로 설정

〈표 VII-1〉 초고층복합빌딩 사업단과의 비교

구분	초고층복합빌딩 연구사업	다기능 경량 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발
사업목적	첨단 초고층복합빌딩 기술개발을 통한 지속가능한 수직도시공간 창출	나노물질을 활용하여 기존 콘크리트 대비 내구성 2배 증가, 중량은 40% 이상 감소된 경량·고강도 콘크리트 개발
사업기간	2009 ~ 2014 (5년 6개월)	2020 ~ 2023 (4년)
사업비	총 사업비: 1,108억 정부: 814억 민간: 294억	총 연구비: 180억 원 정부 출연금: 135억 원 민간 연구비: 49억 원
사업시행 주체	건설교통부, 한국건설교통기술평가원	국토교통부, 국토교통과학기술진흥원
사업규모	총괄과제 + 4개 핵심과제	3개 세부기술
사업내용	2핵심과제: 고성능재료 및 첨단시공 기술 1,000MPa급 강재 실용화 - 현장타설 상온양생 200MPa급 콘크리트 및 기포셀 이용 경량콘크리트 실용화 800MPa급 강재-100MPa급 콘크리트의 합성구조기술 개발 - 고성능화에 따른 중량 저감 및 시공성 극대화 - 기둥단면 25% 이상 축소로 분양면적 상승 - 해외 수주경쟁력 향상	- 나노소재 활용, 열화 및 균열 등으로 인한 수명저하 문제를 해결하기 위해 기존 대비 내구성이 2배 증가된 콘크리트 개발 - 기존 콘크리트 대비 중량이 약 40% 감소된 고강도(80MPa) 콘크리트 기술개발
차이점 및 연계방안	차이점	연계방안
	초고층복합빌딩을 구현하기 위한 고강도 강콘크리트 합성구조 기술에 집중되어 있으며, 실용화 기술에 초점이 맞추어져 있음	고강도 콘크리트 배합 및 제조 기술을 활용하여 고강도 발현 기술과 연계

- 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터는 세계 최고 수준의 하이테크 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술 개발을 통해, 지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공·유지관리 비용 최소화를 목표로 함

- 균열 등 구조물의 위험 및 열화인자에 대해 구조물 스스로 치유하는 스마트 구조물 개발을 통해 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, LCCO₂ 30%를 감소하고자 함
- 첨단 건설재료 분야 전문 연구인력 양성, 특화된 교육프로그램, 산학연 중심의 실용화 컨소시엄 운영을 통한 지속가능 구조재료 연구 인프라를 구축하고자 함

〈표 VII-2〉 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터와 비교

구분	자기치유 친환경 콘크리트 기술 개발	다기능 경량 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발
사업목적	지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공·유지관리 비용 최소화	나노물질을 활용하여 기존 콘크리트 대비 내구성 2배 증가, 중량은 40% 이상 감소된 경량·고강도 콘크리트 개발
사업기간	2015. 09. 14 ~ 2020. 02. 13 (4년 5개월)	2020 ~ 2023 (4년)
사업비	총 연구비: 185.89 억 원 정부출연금: 152.51 억 원 기업부담금과 정부 외 출연금: 33.38억 원	총 연구비: 180억 원 정부 출연금: 135억 원 민간 연구비: 49억 원
사업시행 주체	국토교통부, 국토교통과학기술진흥원	국토교통부, 국토교통과학기술진흥원
사업규모	3개의 세부과제(1총괄+2세부)	3개 세부기술
사업내용	- 세계 최고 수준의 하이테크 자기치유 기술을 접목한 친환경 콘크리트 기술 개발을 통해, 지속가능한 콘크리트 구조물의 장수명화 및 시공·유지관리 비용 최소화 - 균열 등 구조물의 위험 및 열화인자에 대해 구조물 스스로 치유하는 스마트 구조물 개발을 통해 사용수명 50% 증대, 유지관리 비용 30% 감소, LCCO₂ 30% 감소	- 나노소재 활용, 열화 및 균열 등으로 인한 수명저하 문제를 해결하기 위해 기존 대비 내구성이 2배 증가된 콘크리트 개발 - 기존 콘크리트 대비 중량이 약 40% 감소된 고강도(80MPa) 콘크리트 기술개발
차이점 및 연계방안	차이점	연계방안
	유·무기 혼합재를 활용한 자기치유 콘크리트 기술개발과 나노소재를 활용한 콘크리트 기술개발에 대한 차이점 존재	무기 혼합재 활용한 배합설계 기술과 연계

- 콘크리트 코리아 연구단의 경우 각종 건설환경에 대응할 수 있는 실용화 기술을 확보함으로써 궁극적으로는 건설재료의 장수명화, 다기능성을 통한 사회간접자본의 유지관리비 절감, 사용자 편의 및 안전성 확보를 목표로 함

- 콘크리트 관련 핵심기술인 초유동, 초고강도, 고내구성 및 다기능성의 콘크리트 개발로 건설재료의 장수명화, 다기능성을 통한 사회 간접자본의 유지관리비 절감, 사용자 편의 및 안정성 확보를 목적으로 함
- 콘크리트코리아 연구단의 경우 콘크리트 관련 핵심기술인 초유동, 초 고강도, 고내구성 및 다기능성의 콘크리트를 개발하고, 이를 바탕으로 각종 건설환경에 대응할 수 있는 실용화 기술개발에 중점을 두고 있음

〈표 VII-3〉 콘크리트코리아 연구단과의 비교

구분	콘크리트코리아	다기능 경량 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발
사업목적	• 건설재료의 장수명화, 다기능성을 통한 사회 간접자본의 유지+ 절감, 사용자 편의 및 안전성 확보	나노물질을 활용하여 기존 콘크리트 대비 내구성 2배 증가, 중량은 40% 이상 감소된 경량·고강도 콘크리트 개발
사업기간	2006. 01 ~ 2010. 12 (5년)	2020 ~ 2023 (4년)
사업비	총 연구비: 241억 원 정부지원금: 142억 원 기업부담금: 99억원	총 연구비: 180억 원 정부 출연금: 135억 원 민간 연구비: 49억 원
사업시행주체	건설교통부	국토교통부, 국토교통과학기술진흥원
사업규모	총 3개 세부과제로 구성	3개 세부기술
사업내용	• 고성능·다기능 콘크리트의 핵심 및 활용기술 • 초고성능 콘크리트를 이용한 구조부재 개발 및 실용화 • 고성능·다기능 콘크리트 설계 및 현장 시험 시공	• 나노소재 활용, 열화 및 균열 등으로 인한 수명저하 문제를 해결하기 위해 기존 대비 내구성이 2배 증가된 콘크리트 개발 • 기존 콘크리트 대비 중량이 약 40% 감소된 고강도(80MPa) 콘크리트 기술개발
차이점 및 연계방안	차이점	연계방안
	• 콘크리트 관련 핵심기술인 초유동, 초 고강도, 고내구성 및 다기능성의 콘크리트를 개발하고, 이를 바탕으로 각종 건설환경에 대응할 수 있는 실용화 기술개발에 중점을 두고 수행	고유동 확보 기술을 연계하여 사용성이 높은 경량 고강도 콘크리트 기술 개발

2.2 차별화 및 연계방안

■ 기존 연구가 ‘고강도’ 중심의 초기단계 연구였다면, 하이퍼 나노 콘크리트 기술은 ‘고성능, 다기능’을 위한 종합 연구

〈표 VII-4〉 기존 고강도 콘크리트 기술과 차별성 및 연계방안

구분	기존 고강도 콘크리트	하이퍼 나노 콘크리트	연계기술
내구성	내구수명 200년	내구수명 200년	* 나노 혼화재, 나노 클링커, 나노 포졸란, 나노 버블 기술 등
경량	밀도 1.9 t/m ³ , 압축강도 100 MPa	밀도 1.6 t/m³, 압축강도 80 MPa • 기존 기술 대비 경량화 40% 이상	* 나노 혼화재, 인공경량 골재 나노윙딩 기술 등
고강도	밀도 2.3 t/m ³ , 압축강도 180 MPa	밀도 1.6 t/m³, 압축강도 80 MPa • 기존 고강도 콘크리트 기준 부합	* 나노 혼화재 등

제2절 정책적 타당성 분석

■ 나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술개발 사업의 정책적 타당성은 1) 정책의 일관성 및 추진체계 2) 사업 추진상의 위험요인 3) 정부지원 필요성 4) 사업수행 위험요인 및 대응방안으로 검토

● 정책적 타당성 분석의 항목은 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침의 사항을 참고하여 평가

- 정책의 일관성 및 추진체계는 1) 상위계획과의 부합성 2) 사업 추진체계 및 추진의지의 하위평가 항목으로 구성하였으며,
- 사업 추진상의 위험요인은 1) 재원조달 가능성 2) 법·제도적 위험요인의 하위평가 항목으로 구성
- 정부지원 필요성은 국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정에서 제시한 항목으로 정책적 타당성 분석의 항목으로 추가 분석
- 사업수행 위험요인 및 대응방안은 정책적 타당성 분석결과, 위험요인으로 도출된 사항의 대응방안을 추가하여 제시

1. 정책의 일관성 및 추진체계

1.1 상위계획과의 부합성

■ 하이퍼 콘크리트 기술개발사업이 국가정책을 실현하기 위해 정책적 일관성을 가지고 추진될 수 있는지를 평가

● 상위계획과의 부합성은 ‘국가계획의 내용’ 과 ‘동 사업의 연구목적’ 을 비교·분석하여, 국가정책 차원에서 동 사업의 정책적 부합성을 평가

● 분석대상의 국가계획은 동 사업의 기회 목적을 고려하여, 1) 국가정책, 2) 건설정책, 3) 연구개발정책 범위로 구분하여 평가

- 예비타당성 조사 표준지침에서 제시하고 있는 국가정책은 연구개발 정책 부문에 해당
- 동 연구는 연구개발부문 국가정책 외에 현 정부의 국가정책, 건설정책 등을 추가로 분석하였으며 건설재료 연구개발사업과 관련성이 높은 국가안전정책 부문까지 폭넓게 조사

가. 국가정책

■ 국가정책 부문은 현 정부의 국가정책 기조를 담은 ‘문재인 정부 100대 국정과제’와 ‘경제혁신 3개년 계획’을 분석

- 연구개발사업 예비타당성조사의 정책적 타당성 분석대상은 연구개발사업 중장기 법정계획이 기본 분석대상
- 하지만, 현 정부 운영방향을 제시하는 공약집과 경제활성화 부문의 계획을 분석하여, 정부차원의 정책적 합의 여부를 검토

1) 문재인 정부 100대 국정과제

■ 문재인 정부는 국가비전 달성을 위한 실천전략으로서 5대 국정목표와 20대 국정전략, 100대 국정과제를 제시

- 문재인 정부는 재난현장 신속대응을 위한 통합적 재난관리체계 구축을 제시함으로써 국민의 안전사고 예방 및 재난 안전관리체계를 대응할 역량 강조
 - 노후화된 국가기반시설에 대한 안전성 확보 및 재난재해에 따른 대응 사고 예방을 위한 첨단건설재료 개발 및 유지관리 기술 적용 필수
- 도시재생뉴딜 추진과 관련해서 ‘17년까지 뉴딜 사업 추진방안 및 부처협업 TFT 구축 등 추진기반 마련, 매년 도시재생뉴딜 사업지역 선정·지원됨에 따라 도시 경쟁력 강화 및 삶의 질 개선을 위해 공공기관을 중심으로 노후주거지와 원도심 정비를 통한 도시경쟁력 제고 방향을 수립
 - 원도심, 전통산업 집적지, 재래시장 등을 새로운 산업여건에 맞추어 집약적 정비를 통한 일자리 창출, 도시경쟁력 제고 자산으로 활용하기 위해서는 기존 시설물을 최대한 유지하는 비개착 기술 필요
 - 노후화된 기존 주택을 공공기관이 매입하여 새로운 주거지역으로 재생하기 위해 거주민 증가에 대응하기 위한 첨단건설재료 적용이 효과적이라 판단
 - 구도심과 노후주거지 등을 포함하여 정비가 시급히 필요한 곳부터 우선적으로 선정하여 지역특성에 맞게 지원
- 승강기·건설·지하자원 등 부문별 위협요소 제거, IoT를 활용한 위험 예측, 감지, 분석, 대응기술 개발

〈표 VII-5〉 국가정책(문제인 정부 100대 국정과제)과의 부합성

구분	나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
국가기간교통망 공공성 강화 및 국토교통산업 경쟁력 강화	○
고부가가치 창출 미래형 신산업 발굴·육성	△
안전사고 예방 및 재난 안전관리의 국가책임체제 구축	◎
통합적 재난관리체계 구축 및 현장 즉시대응 역량 강화	○
지속가능한 국토환경 조성	◎
도시경쟁력 강화 및 삶의 질 개선을 위한 도시재생뉴딜 추진	◎

◎: 부합도 높음, ○:부합도 보통, △:부합도 낮음

2) 경제혁신 3개년 계획

■ 정부부처 간 협의를 거쳐 국가경제 활성화를 위한 ‘경제혁신 3개년 계획’ 마련

- 기초가 튼튼한 경제, 역동적인 혁신경제, 내수·수출 균형경제, 통일시대 준비 등 4대 추진전략을 제시하고, 이를 구체화하기 위해 필요한 59개 세부실행과제를 제시

■ 추진전략을 실행하기 위해 필요한 59개 세부실행과제에는 융합신산업 육성, 친환경에너지 신산업 육성 및 신시장 창출, 해외건설·플랜트 수출 고부가가치화 등 하이퍼 나노 콘크리트와 연관성이 높은 과제가 제시

- 융합신산업 육성 부문은 ‘ICT 접목 융합신산업 창출’ 과 연관성이 높으며, 사물인터넷·빅데이터 등의 경쟁력 확보를 명시
- 친환경에너지 신산업 육성·신시장 창출 부문은 친환경신산업 비즈니스 모델 창출, 과학기술과 ICT를 융합한 친환경 에너지 신기술 확산을 제시
- 해외건설·플랜트 수출 고부가가치화 부문은 해외건설·플랜트 수출 확대를 위해 신성장동력 분야를 선정하여 사업타당성 조사와 R&D 지원을 제시

〈표 VII-6〉 국가정책(경제혁신 3개년 계획)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
창조 경제 구현	과학·ICT 기술과 연계성이 높은 사업 발굴	◎
	사물인터넷, 빅데이터 등 성장동력 발굴·육성	△
	ICT 융합을 통한 신규 기술·서비스 활성화	△
	ICT 신산업 기술의 선제적 표준화	△
미래 대비 투자	신산업 추진을 위한 관련법 개정	△
	ICT와 과학기술을 활용한 친환경 에너지 신산업 비즈니스 모델 창출	◎
해외 시장 진출	해외시장 수요기반형 R&D 과제 발굴	◎

◎: 부합도 높음, ○: 부합도 보통, △: 부합도 낮음

3) 건설정책

■ 건설정책 부문은 국토해양부에서 발표한 제6차 건설기술진흥기본계획(2018-2022)을 분석하여 건설정책과 동 사업의 부합성을 검토

- 건설기술진흥기본계획은 건설기술 정책 · 제도 선진화 및 연구개발 촉진 등을 통해 기술 수준을 향상시키고 경쟁력을 제고하기 위해 수립하는 법정계획으로서 미래 건설기술정책의 방향성을 제시
- 향후 건설정책 방향과 스마트 건설재료 연구개발사업의 정책적 부합도를 분석

4) 제6차 건설기술진흥기본계획(2018-2022)

■ 5차 기본계획이 종료되면서, 향후 5년('18~'22) 現정부와 함께 할 건설기술정책 로드맵과 미래 건설기술 발전 청사진 제시 필요

- 그간 건설산업은 요소(노동·자본 등) 투입 확대에 힘입어 성장, 기술혁신을 통한 생산성 향상이 수반되지 않으면 지속성장이 불가능
- 건설기술은 건축·안전분야 등 국민복지 향상에 기여하며, 전통적인 로우테크(Low-tech) 이미지를 벗고 첨단 기술과 융합을 통하여 새롭게 도약
- 제6차 건설기술진흥기본계획에 제시한 2대 전략 중의 4차 산업혁명에 대응하는 기술개발·신산업 육성 전략은 건설재료와 연관성이 매우 높은 전략들이 제시
- 건설기술 발전의 근간이 되는 “첨단재료, 지능형시설, 프로세스, 재난 · 안전” 분야 R&D를 지속 추진

- 4차 산업혁명 기술과 건설기술의 융복합을 통해 3D건설 산업의 이미지 제고와 양질의 일자리로 전환 추진 필요
- 건설기술 발전의 근간이 되는 ‘스마트 건설기술을 통한 생산성 향상’ 중점 추진과제 R&D를 지속 추진
 - 4차 산업혁명 기술과 건설기술의 융복합을 통해 건설산업의 이미지 제고와 양질의 일자리로 전환 추진 필요
 - 인프라 투자 감소, 인프라 노후화에 대응하여 시설물의 안전을 확보하고 유지관리 비용을 절감할 수 있는 대응 기술개발 필요
 - 건설기술의 개발을 통해 저해하는 장애요소를 제거하여 적용 활성화 필요
- 현장 의존적 생산체계 한계를 극복하는 첨단건설소재를 개발하고 건설기술을 활용

〈표 VII-7〉 건설정책(건설기술진흥기본계획)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
기술개발	스마트 건설기술을 통한 생산성 향상	◎
	해외 수요 대응형 건설기술 개발	◎
고부가 산업육성	분야간 융·복합을 통한 경쟁력 강화	◎
	건설 Big Data 유통을 통한 신사업 육성	◎
건설 안전·강화	건설의 안전·환경 관리	◎
산업 개편·육성	Eng.의 역량 강화 및 해외진출 지원	◎
건설 인력·교육	글로벌기준에 맞는 경력 관리체계 구축	○
	국제경쟁력을 갖춘 기술인력 육성	◎
기준·제도	기술력 중심의 발주·심의 강화	△

◎: 부합도 높음, ○: 부합도 보통, △: 부합도 낮음

나. 연구개발정책

■ 연구개발정책 부문은 과학기술분야 최상위 중장기 계획인 ‘과학기술기본계획’ 과 ‘건설교통 R&D 중장기발전계획(2013-2017)’, ‘2018년 정부연구개발투자 방향 및 기준’을 분석하여 건설정책과 동 사업의 부합성을 검토

- 과학기술 기반 사회문제 해결 종합실천계획은 일상생활에서 발생하는 사회문제 해결을 통해 건강 · 안전 · 편의 등 삶의 질을 향상시키는 R&D로 삶의 질을 저해하는 사회문제의 주요한 원인을 밝히고 문제를 해결하기 위해 수립
- 건설교통 R&D 중장기발전계획(2013-2017)은 미래 여건변화에 대응하고 현행 과학

기술정책 및 녹색성장 기조에 부합하는 효과적인 투자 전략을 마련함으로써 R&D를 보다 선진화하기 위해 수립

- 향후 연구개발 정책방향과 스마트 건설재료 연구개발사업의 정책적 부합도를 분석

1) 제4차 과학기술기본계획

■ 과학기술기본계획에서는 과학기술로 국민 삶의 질을 높이고 인류사회 발전에 기여하는 비전을 설정하여 기본계획을 수립함

- 과학기술이 꿈꾸는 미래 세상은 풍요로운 세상, 편리한 세상, 행복한 세상, 자연과 함께하는 세상을 설정함

■ 과학기술기본계획의 추진전략으로 미래도전을 위한 과학기술역량 확충, 혁신이 활발히 일어나는 과학기술 생태계 조성, 과학기술이 선도하는 신산업·일자리 창출, 과학기술로 모두가 행복한 삶 구현 등의 추진전략을 제시함

- 추진전략을 실현하기 위한 4개 분야, 19개 중점과제, 66개 세부추진과제를 제시하였으며, 기본계획 실현을 위한 중점과학기술개발과 인력양성이라는 주제를 설정함

■ 추진전략과 추진과제를 달성하기 위한 120개 중점과학기술을 제시함

- 첨단건설재료와 직접적으로 연관성이 있는 기술은 ICT·SW, 건설·교통, 소재·나노, 재난 안전 등을 제시함

〈표 VII-8〉 연구개발정책(제4차 과학기술기본계획)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
ICT·SW	지식정보보안기술	△
건설·교통	지능형 건물관리기술	○
	친환경 다기능 건설재료 기술	◎
	지속가능한 인프라 구조물 건설기술	◎
	빅데이터 기반 국가 인프라 예방적 유지관리 기술	○
소재·나노	친환경 바이오소재 기술	○
	나노구조제어 세라믹·탄소 소재 기술	◎
	다기능 융복합 소재 기술	◎
재난안전	복합재난 스마트 예측·대응기술	◎

◎: 부합도 높음, ○: 부합도 보통, △: 부합도 낮음

2) 건설교통 R&D중장기발전계획(2013-2017)

■ 미래 여건변화에 대응하고 현행 과학기술정책 및 녹색성장 기조에 부합하는 효과적인 건설교통 R&D 투자전략 수립 필요성 대두

- 최근 기후변화, 에너지 위기 등으로 녹색기술의 중요성이 커짐에 따라, 녹색성장을 주도할 R&D 투자전략 수립 필요성 증대

- 저탄소 녹색성장 지원 Green-up 30 등을 제시한 「국토해양 R&D 발전전략」(‘10.10)수립

※ Green-up 30 : 탄소저감형 건설재료, 능동형 녹색빌딩, 에너지 절감형 물류시설 · 장비 및 운영기술 등

- 향후 5년간 중장기계획에서는 발전전략을 보다 구체화하고, 효율적인 투자전략을 수립하여 건설교통 R&D 성과창출의 극대화 도모

■ 중장기계획 비전과 추진전략에 있어서 ‘친환경 에너지 · 자원의 확보 및 효율적 이용’, ‘인간중심 사회 및 도시 구현’, ‘미래 경제가치 창출’, ‘융복합 첨단 기술 확보’, ‘위험으로부터 안전하고 편안한 사회실현’ 등의 기본 방향이 제시

- 5가지 기본방향에서 나타난 키워드(삶의 질 제고, 경제적 가치 창출, 기술첨단화, 안전사회 실현)를 반영하여 건설교통 R&D 비전을 ‘인간중심의 미래가치를 창조하는 건설교통 Smart Leader’로 선정

〈표 VII-9〉 연구개발정책(건설교통 R&D중장기발전계획)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
안전 편리 국토	인공지능 국토공간	△
	지능형 인프라 자동관리	△
다차원 공간 정보	다차원공간정보체계 활용	△
지능형인프라	SOC시설물 장수명화	◎
	선제적 사고예방 및 관리	◎

◎: 부합도 높음, ○:부합도 보통, △:부합도 낮음

3) 제4차 소재·부품발전 기본계획

■ 소재·부품발전 기본계획은 2025년까지 100대 세계최고기술 확보를 통한, 4대 소재·부품 수출 강국 도약이라는 비전을 설정함

※ 세계수출시장 순위('14) - 中(1위), 獨(2위), 美(3위), 日(4위), 韓(5위)

- 첨단 新소재·부품 기술개발·상용화, 4차 산업혁명 대응을 위한 소재·부품 인프라 구축, 소재·부품 사립의 고효율·친환경 생산체계 구축, 소재·부품 기업의 글로벌 진출역량 강화라는 전략 및 과제를 설정함
- 전체 소재·부품 대상 553개의 기술을 도출한 후 기술성, 필요성 등을 고려하여 확보가 시급한 100대 첨단 新소재·부품 기술을 선정함
 - 소재 50개(금속 13, 화학 12, 고무플라스틱 7, 섬유 6, 세라믹 12)
 - 부품 50개(전자 10, 수송 14, 기계 6, 전기 8, 조립금속 6, 정밀기기 6)
- 또한, 주요 경쟁국은 4차 산업혁명 시대 대응을 위해, 융·복합 및 첨단·고부가가치 소재·부품 개발에 국가 역량을 결집하여 지원정책을 추진함

■ 이를 통한 소재·부품정책을 쏙주기 기업활동에 있어 4차 산업혁명 지원형으로 전환하여 4차산업혁명 관련 新산업 육성, 주력산업 고도화를 뒷받침하고자 함

〈표 VII-10〉 연구개발정책(제4차 소재·부품발전 기본계획)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
첨단 新소재 기술개발 상용화	4차 산업혁명 대응 기술개발	◎
	국가전략 프로젝트	◎
	기타 기술개발	△
	소재 원천기술 개발	○
고효율·친환경 생산체계 구축	친환경 공법 개발	△

◎: 부합도 높음, ○:부합도 보통, △:부합도 낮음

4) 2018년도 나노기술발전시행계획

■ 2018년도나노기술발전시행계획은 나노기술 경쟁력 향상으로 사람 중심 4차 산업혁명 실현 촉진이라는 비전을 설정함

● 제조업 혁신 선도기술 구현, 나노기술 산업화 글로벌 리더라는 목표를 설정함

- 추진전략으로는 미래선도 나노기술 확보, 혁신성장 나노산업화 확산, 미래사회변화 대응 나노기반 확충이라는 주제를 설정함

〈표 VII-11〉 연구개발정책(제4차 소재·부품발전 기본계획)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
미래선도 나노기술 확보	미래나노기술 개발	◎
	전략적 나노기초연구 추진	◎
미래사회 변화대응 나노기반 확충	핵심 인재 성장 지원 및 일자리 창출	◎
	나노안전 관리 체계 확보	○

◎: 부합도 높음, ○:부합도 보통, △:부합도 낮음

5) 2018년 국가연구개발투자 방향 및 기준

■ 미래대비 과학기술 혁신 역량을 강화하는 가운데 경제활력과 국민행복을 창출하고 R&D 투자 효율성 개선을 위해 3대 분야 및 9대 중점투자 방향을 설정

- 자율적인 창의·도전 연구 강화, 개방·공유·협력의 연구개발 생태계 조성, 4차 산업혁명 선도를 위한 기술·시장 선점형 R&D 투자와 연관
- 국민 삶의 질 향상의 공공서비스의 스마트화·고도화 추진, 협업 중심의 재난·재해 대응체계 혁신, 중장기 경제·사회 위험요인에 선제대응에 부합

■ 기술분야별 투자방향 중 첨단건설재료와 연관성이 높은 ICT·SW분야, 건설교통 분야의 투자방향을 살펴보면 다음과 같이 제시

- ICT·SW 분야에서 제시한 SW·콘텐츠·빅데이터·사물인터넷 등 새로운 인터넷산업 육성 분야에 투자방향을 설정하고, 사물인터넷 등 전략분야에 R&D 지원
- 사회기반시설 안전성, 주거 및 교통 복지를 증진하며, 건설·교통 산업기술이 지속적으로 성장할 수 있는 R&D 중점 지원

〈표 VII-12〉 연구개발정책(국가연구개발투자 방향 및 기준)과의 부합성

구분		나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
창조경제	경제도약을 위한 먹거리창출	△
	벤처·창업 촉진	○
	중소·중견기업 기술역량 강화	○
국민행복	건강한 삶의 증진	○
	지속가능한 청정사회 구현	◎
	걱정 없는 안전사회 구축	◎
혁신역량	기초연구 및 융합연구 확대	◎
	창의적 과학기술인재 육성	○
	과학기술 혁신기반 체계구축	○

◎: 부합도 높음, ○:부합도 보통, △:부합도 낮음

다. 국가안전정책 동향

■ 국가안전정책 부문은 국가안전관리기본계획과 제4차시설물의 안전 및 유지관리 기본계획을 분석하여, 국가안전정책과 동 사업의 부합성을 검토

- 국가안전관리기본계획은 국가의 재난 및 안전관리의 기본방향을 설정하고, 재난환경 변화에 대응하여 재난 및 안전사고로부터 국민을 보호하기 위해 수립
- 시설물유지관리기본계획은 국민생활과 밀접한 관계를 갖고 있는 시설물에 대한 안전 관리를 위해 수립

1) 국가안전관리기본계획

■ 국가안전관리기본계획은 안전 선진국 실현이라는 비전 달성을 위해 안전문화, 생활 안전, 기업안전, 국가기반체계, 재난관리체계 등 5대 요소를 목표로 설정하고 9개 추진전략을 제시

- 첨단건설재료 연구개발사업과 관련하여 안전 디자인개념의 전 영역 확산, 예방중심의 국가 재난안전관리정책 추진, 기업의 안전관리 참여와 활동영역 확대, 능동적인 국가기반체계 관리, 신속·정확한 재난상황보고 체계 정립, 즉각 대응 및 긴급복구체계 확립, 미래 재난환경 변화에 적극 대응의 추진전략을 제시

〈표 VII-13〉 국가안전정책(국가안전관리기본계획)과의 부합성

구분	나노소재 활용 첨단 콘크리트 기술
안전디자인 개념의 전영역 확산	○
예방중심의 국가 재난안전관리정책 추진	○
기업의 안전관리 참여와 활용영역 확대	◎
능동적인 국가기반체계 관리	○
신속 정확한 재난상황보고 체계 확립	○
즉각 대응 및 긴급복구체계 확립	○
미래재난 환경변화에 적극 대응	◎

◎: 부합도 높음, ○:부합도 보통, △:부합도 낮음

2) 제4차 시설물 안전 및 유지관리 기본계획

■ 시설물 유지관리 기본계획은 시설물 노후화 대비 선제적 관리체계 정착, 4차 산업혁명 기술 활용 시설물 안전·유지관리 고도화, 융·복합을 통한 미래 대비 산업발전 기반 조성, 국민 소통형 시설물 안전·유지관리 서비스 지향 등을 제시함

● 시설물 미래요구에 대응하기 위한 지속적 성능개선 기반 구축에 따른 4대 전략은 각각의 추진과제로 구성됨

- 성능 중심 유지관리의 안정적 정착 및 지속적 확대, 설계·시공 및 유지관리 정보의 통합 및 환류체계 구축, 시설물 안전 및 유지관리 차세대 핵심기술 확보, 첨단기술 테스트베드 및 성능 검증 체계 구축 부문에서 첨단건설재료 연구개발 사업과 관련성이 높은 것으로 판단

라. 평가결과

■ 상위계획과의 부합성은 국가정책과 스마트 건설재료 연구개발사업의 정책적 부합성을 검토하여, 동 사업이 국가정책의 구체적 실현에 기여할 수 있고, 정책적 일관성을 가지고 추진될 수 있는지를 평가

● 상위계획은 1)국가정책 2)건설정책 3)연구개발정책의 부문으로 나누어 검토하였으며, 국가의 국정운영 정책부터 연구개발사업에 이르기까지 다양한 정책방향을 검토

■ 검토결과, 스마트 건설재료 연구개발사업의 기획은 상위계획과의 부합성이 높기 때문에, 정책적 타당성이 높은 것으로 평가

■ **첨단재료, 지능형 시설, 프로세스, 재난 · 안전 등의 정책목표를 달성하기 위한 수단으로써 스마트 건설재료 연구개발사업 기획 필요**

- 국가정책상에서 문제인 정부 100대 국정과제를 통한 고부가가치 창출 미래형 신산업 발굴 · 육성 등이 부합됨
- 경제혁신 3개년 계획에서는 해외시장 수요기반형 R&D 과제 발굴 등이 첨단건설재료 연구개발사업의 방향성에 매우 부합
- 건설정책에서는 건설기술진흥기본계획에서 제시한 기술개발의 스마트 건설기술을 통한 생산성 향상과 해외 수요 대응형 건설기술 개발이 첨단건설재료 연구개발사업의 방향성에 매우 부합
- 연구개발정책은 제 3차 과학기술기본계획에서 최첨단 인프라구조물 건설기술, 미래 첨단도시 건설기술, 기반시설 기능유지 및 복구 · 복원 기술이 첨단건설재료 연구개발사업의 방향성에 매우 부합
 - 건설교통 R&D중장기 발전계획에서는 SOC시설물 장수명화와 선제적 사고예방 및 관리가 첨단건설재료 연구개발사업의 방향성에 매우 부합
 - 2018년 정부연구개발투자 방향 및 기준에서는 경제도약을 위한 먹거리 창출, 건강한 삶의 증진, 걱정없는 안전사회 구축, 기초연구 및 융합연구 확대가 첨단건설재료 연구개발사업의 방향성에 매우 부합

- 앞의 내용을 통해 동 사업의 연구개발정책 실현이 가능할 것으로 평가

■ **안전한 국토공간 조성 · 첨단건설기술과 ICT기술 융합 · 인프라재생 등 정책목표를 달성하기 위한 실천수단으로써 첨단건설재료 연구개발사업 기획 필요**

- 국가정책상에서, 가장 큰 흐름의 국정기조는 중소기업 진흥 · ICT융합 · 첨단기술융합 · 국민안전 · 해외시장진출로써, 이는 국토라이프라인 연구개발사업의 방향성에 매우 부합
- 국토정책도 ICT융합 · 인프라재생 · 지능형인프라 · 네트워크형국토 등 첨단건설재료와 연관성이 높은 전략들을 제시하고 있기 때문에, 동 사업과의 부합성이 매우 높은 것으로 판단
- 연구개발정책은 국가연구개발사업과 국토교통연구개발사업 모두에서 ICT융합 · 네트워크기술 · 지능형인프라 · 안전관리체계를 강조하여, 동 사업을 통해 국가연구개발정책의 구체적 실현이 가능할 것으로 평가되며,

- 국가안전정책에서 제시하고 있는 이상기후 대응 안전관리 · 미래환경 대응 안전관리 · ICT기반 진단기술 · 유지관리기술 등의 전략 또한 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발 사업을 통해 실현가능한 것으로 평가

〈표 VII-14〉 상위계획과의 부합성 평가

국가과학기술기본계획 부문별 정책		부합도 낮음	부합도 높음	부합도 높음
국가 정책	부합도 높음	보통	대체로 적절	적절
	부합도 보통	대체로 부적절	보통	대체로 적절
	부합도 낮음	부적절	대체로 부적절	보통
건설 정책	부합도 높음	보통	대체로 적절	적절
	부합도 보통	대체로 부적절	보통	대체로 적절
	부합도 낮음	부적절	대체로 부적절	보통
연구 개발	부합도 높음	보통	대체로 적절	적절
	부합도 보통	대체로 부적절	보통	대체로 적절
	부합도 낮음	부적절	대체로 부적절	보통
국가 안전	부합도 높음	보통	대체로 적절	적절
	부합도 보통	대체로 부적절	보통	대체로 적절
	부합도 낮음	부적절	대체로 부적절	보통

1.2 사업 추진체제 및 추진의지

- 사업 추진체제 및 추진의지는 주관부처·사업수행기관·유관부처·유관기관 등 각 주체 간의 사업수행체제와 협조체제를 검토하고, 사업주체들의 추진의지를 평가하는 항목
- 정책목표를 달성하기 위해 사업수행체제와 역할분담의 적절성, 협조체제와 운영방안의 효율성 등을 거버넌스 관점에서 수직적·수평적 협력체제로 평가
 - 수직적 협력체제는 정책을 결정하는 정부부처, 사업을 관리하는 연구관리전문기관, 연구과제를 수행하는 연구기관 간의 정책목적 전달과 자금의 제공 및 조정체제를 평가
 - 수평적 협력체제는 사업에 참여하는 정부부처·연구기관·연구자 등 사업참여주체 간, 사업참여주체와 이해관계자 간의 네트워크 및 소통체제를 평가
- 사업 추진의지는 사업기획주체들의 사업추진의지와 사업으로 인해 영향 받는 이해관계자들의 선호도를 분석

가. 사업 추진체제

1) 수직적 협력체제

- 수직적 협력체제는 사업수행체제·사업관리체제의 관점에서 타당성을 분석하며, 실제 연구 과제를 주관하여 수행하는 연구단 체제를 별도로 분석
- 국토교통부-국토교통과학기술진흥원-연구단의 수직적 협력체제를 구성하고 적절한 역할을 분담하여, 사업수행 및 사업관리의 효율성 증대
 - (국토교통부) 최상위 의사결정기관으로서 첨단건설재료 연구개발사업 추진과 관련한 정책결정·총괄관리·투자우선순위 결정등의 업무 수행
 - (국토교통과학기술진흥원) 관리감독 및 지원기관으로서 사업추진방향과 과제기획방향 설정, 사업수행 결과물 관리, 총괄운영, 사후관리 등 업무 수행
 - (연구단) 과제를 주관하여 수행하는 기관
- 연구단은 독립성 강화를 위해 중점기술 분야별 참여기관을 구성하고, 연구개발그룹의 구성은 세부기술의 성격과 유형을 고려하여, 산·학·연 참여형태를 차별화
 - 과제 유형과 사업 기간 및 규모 등을 고려하여 1개 연구단으로 구성

- 중소·중견 기업을 주관으로 연구개발을 추진하고, 대학 및 출연연은 참여기관으로 구성하여 학·연의 기초기술적인 부분의 지원과 산의 관련기술을 통합·활용하여 원천 및 응용기술개발 수행

- 과제주관 및 참여기관은 국·공립 연구기관, 출연(연), 대학, 기업부설연구소, 공공기관, 조합 등 ‘국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제4조(연구개발사업 참여기관의 자격)에 의한 기관으로 구성

■ 과제 추진체제 및 추진 의지는 과제 참여 주체 간의 수행체제와 협조체제, 운영체제를 검토하고, 과제 참여 주체의 추진 의지를 평가

- 과제 추진체제는 역할분담의 적절성, 운영방안의 효율성 등을 거버넌스의 관점에서 수직적·수평적 협력체제를 평가
- 과제 추진의지는 과제기획 주체들의 과제추진의지와 사업으로 인해 영향 받는 이해관계자들의 선호도를 분석

■ 검토결과, 연구개발사업 기획의 추진체제는 해당사업을 추진하는데 필요한 주체들이 추진체제상에 포함되어 있고, 사업주체의 준비정도와 사업추진 의지가 높은 것으로 평가되는바, 타당성이 높다고 판단됨

- 정책결정을 위한 정부부처, 사업관리를 위한 연구관리전문기관, 연구과제를 수행할 연구단을 국토교통부-국토교통과학기술진흥원-연구단의 협력체제로 적절하게 구성
- 또한, 사업기획 연구진은 기획위원회 및 자문위원회 등 관련 분야의 외부전문가 의견을 충분히 수렴

2. 사업 추진상의 위험요인

2.1 법적·제도적 위험요인

■ 법적·제도적 위험요인은 개발기술 분야에 따라 관련 법률을 검토하여, 연구개발 사업이 관련 법·제도·규정에 부합하는지를 평가

- 1) 사업추진 근거법령의 적절성 2) 타 법령과의 충돌 가능성 3) 국가연구개발사업 절차의 누락 가능성 4) 연구개발사업 추진결과의 분쟁 가능성 여부를 중심으로 분석

가. 사업추진 근거법령의 적절성

■ 동 사업추진 근거법령은 「국토교통과학기술육성법」으로, 동법 제8조와 제9조에서는 연구개발사업의 추진과 공동연구·개발 등을 지원할 수 있다고 명시하고 있음

- 국토교통과학기술육성법은 국토교통과학기술 육성을 위한 기반을 조성하여 산업의 경쟁력을 강화함으로써 국민경제의 지속적인 발전과 국민의 삶의 질 향상에 이바지함을 목적으로 제정
- 건설기술진흥법 제8조 및 10조에서 국토교통부장관은 종합계획의 효율적 추진을 위하여 국토교통연구개발사업을 추진할 수 있으며 연구과제와 관련하여 협약을 추진할 수 있다고 명시

■ 하이퍼 나노 콘크리트 기술개발사업은 국토교통과학기술육성법에서 정하는 국토교통기술에 해당

- “국토교통과학기술“이란 미래 성장동력 창출 및 국민의 삶의 질 향상을 위하여 필요한 국토교통분야 산업의 발전에 관한 과학기술로서 관계 법령에서 정한 기술을 말함

■ 건설기술 진흥법에서 정하는 건설기술이란, 건설공사에 관한 계획부터 안전성 검토까지 포괄하고 있으며, 시설물 운영부터 철거까지 넓은 범위를 제시하고 있음

- 건설기술진흥법 제2조제2호에서 건설기술이란, 건설공사에 관한 계획·조사·설계·시공·감리·시험·평가·측량·자문·지도·품질관리·안전점검 및 안전성 검토와 시설물의 운영·검사·안전점검·정밀안전진단·유지·관리·보수·보강 및 철거와 건설공사에 필요한 물자의 구매와 조달, 건설장비의 시운전, 건설사업관리까지로 규정
- 위의 건설기술의 정의 중 건설재료는 “나. 건설공사에 필요한 물자의 구매와 조달” 부분에 해당

나. 타 법령과의 충돌 가능성

■ 건설재료 관련 법령은 아래와 같으며, 각 법률 및 제도의 건설 기준을 만족할 경우 충돌 가능성은 없는 것으로 판단

〈표 VII-15〉 건설재료 관련 법·제도와 성능 규제

관련법률·제도	제시된 건설 기준
주택법	- 주택 건설 시 에너지 고효율 설비기술 및 재료 적용 등 에너지절약형 친환경 주택 등의 건설기준 제시
건축법	- 복합재료에 대한 난연성분 분석시험, 난연성능기준, 시험수술 등 필요한 사항을 국토교통부령으로 설정
건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙	- 건축물의 외벽에는 부연재료 또는 준불연재료를 마감재료(단열재, 도장 등 코팅 재료 및 그 밖에 마감재료를 구성하는 모든 재료 포함)로 사용해야하며 외벽 마감재료를 구성하는 재료 전체를 하나로 보아 불연재료 또는 준불연재료에 해당하는 경우 마감재료 중 단열재는 난연재료로 사용
건축물의 구조 기준 등에 관한 규칙	- 건축물의 구조부재는 사용에 지장이 되는 변형이나 진동이 생기지 아니하도록 필요한 강성을 확보하여야 하며, 순간적인 파괴현상이 생기지 아니하도록 인성의 확보를 고려 - 콘크리트는 시공중 및 시공후 콘크리트의 압축강도가 5메가파스칼 이상일 때까지 콘크리트의 온도가 섭씨 2도 이상이 유지되도록 하고, 콘크리트의 응고 및 경화가 건조나 진동 등으로 인하여 영향을 받지 아니하도록 양생
콘크리트 구조 기준	- 구조용 무근콘크리트 : 최소 강도를 18Mpa로 규정
건축물의 에너지절약 설계기준	- 건축물의 에너지절약설계기준에 해당하는 단열기준을 기존 대비 약 25.8% 강화 * 기존 120mm 단열재로 시공했던 단독주택은 2016년 7월 1일부터 125mm이상 두께시공으로 30% 강화
공동주택 결로 방지를 위한 설계 기준	- 지역 및 주요 부위별 결로 방지 성능기준 제시
건강친화형 주택 설계기준	- 오염물질이 적게 방출되는 건축재료를 사용하고 환기 등을 실시하여 새집증후군 문제를 개선함으로써 거주자에게 건강하고 쾌적한 실내환경을 제공할 수 있는 주택 의무기준 제시
주택건설기준 등에 관한 규정	- 세대간 경계벽의 경우 철근콘크리트 또는 철골·철근콘크리트 두께가 20cm 이상인 것을 사용

다. 연구개발사업 추진결과의 분쟁 가능성

- 사업을 통해 얻어지는 산출물이 국제 교역재에 적용될 때의 고려사항으로써, 국가연구개발사업의 지원이 금지보조금에 해당하여 외국과 마찰이 있을지 평가
 - WTO 보조금 협정에 관한 검토로써, 보조금이란 정책당국이 특정한 정책목표를 달성하기 위하여 산업 및 기업 활동에 제공하는 각종 지원을 의미
 - 연구개발지원정책이 내용상 금지보조금에 해당하는 경우 동 협정에 따른 조치의 대상이 될 수 있음
- 나노기술을 하이퍼 나노 콘크리트 사업기획은 그 내용상 상품무역에 관련된 지원이 아니므로, 금지보조금에 따른 분쟁 가능성은 없음

〈표 VII-16〉 법적·제도적 위험요인 평가

법·제도적 위험요인	없음	일부위험	위험
사업추진 근거법령의 적절성	○		
타 법령과의 충돌 가능성	○		
국가연구개발사업 절차의 누락 가능성	○		
연구개발사업 추진결과의 분쟁 가능성	○		

3. 사업수행 위험요인 및 대응방안

- 소재분야에 있어서는 산업부와 과기정통부에서 지속적인 투자 및 연구개발을 해왔으며, 일부 사업에 건설재료 관련 연구개발 투자를 추진
 - 각각의 부처별로 연구개발이 추진됨에 따른 개발 기술간에 연계성 및 활용성 부분이 미흡한 실정
 - 각각의 개발된 기술간의 연계 및 개발된 기술의 활용도를 높여 사회적, 경제적 이슈 해결이 가능토록 하는 것이 필요
- 각각의 부처에서 추진 중인 주력 첨단 소재 및 기술을 건설재료에 적용시키기 위해 관련 주력 기술 및 지식을 공유하고 협력하여 건설 구조재료 관련 연계 및 활용 기술 개발 추진

제3절 경제적 타당성 분석

1. 분석개요

1.1 비용편익분석의 개요

가. 비용편익 분석의 개념

■ 경제성 분석은 해당 사업의 추진에 의해 국민경제 전체에서 발생이 예상되는 편익과 비용을 추정하고 이를 이용해 비용편익분석(Cost-benefit Analysis)을 이용하여 사업의 타당성을 판단

- 비용편익분석에서 이용되는 기준으로는 순현재가치(NPV, Net Present Value)/기대순 현재가치(ENPV, Expected NPV), 편익-비용 비율(B/C ratio) 등 다양한 방법이 있는데 본 분석에서는 비용-편익 비율(B/C ratio)을 이용
- 편익-비용 비율은 편익의 현재가치의 합을 비용의 현재가치의 합으로 나눈 것으로 다음과 같이 나타냄

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

- 사업의 비용, 편익은 장시간에 걸쳐 투입되거나 발생하기 때문에 할인율을 적용하여 이를 특정기간(일반적으로 현재연도)에 발생하는 것으로 환산하여 비교하게 되는데 이를 현재가치화라고 함
- 편익/비용 비율(B/C ratio)은 개별 대안사업별로 편익의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 값이 1 이상이면 경제성이 있다고 판단
- 편익/비용 비율은 특정 항목을 편익 또는 비용으로 처리하는가에 따라 값이 달라지는 단점이 있으나, 일반적인 투자심사 기준으로 사용

나. 분석 항목

■ 경제적 타당성 분석의 기본 항목으로는 총 사업비, 총비용, 편익 등으로 구분할 수 있으며, 객관화된 데이터를 기반으로 추정

- 비용은 사업기간 내 발생하는 총 사업비로 산정
- 편익은 해당 세부기술개발과제로 인해 실질적으로 혜택을 받게 되는 수요(기업, 대 국민 등)를 추정하여 편익을 추정
- 분석된 비용과 편익을 현재가치화 시켜 B/C값을 분석하고 B/C값이 1 이상일 경우 사업성이 있는 것으로 판단

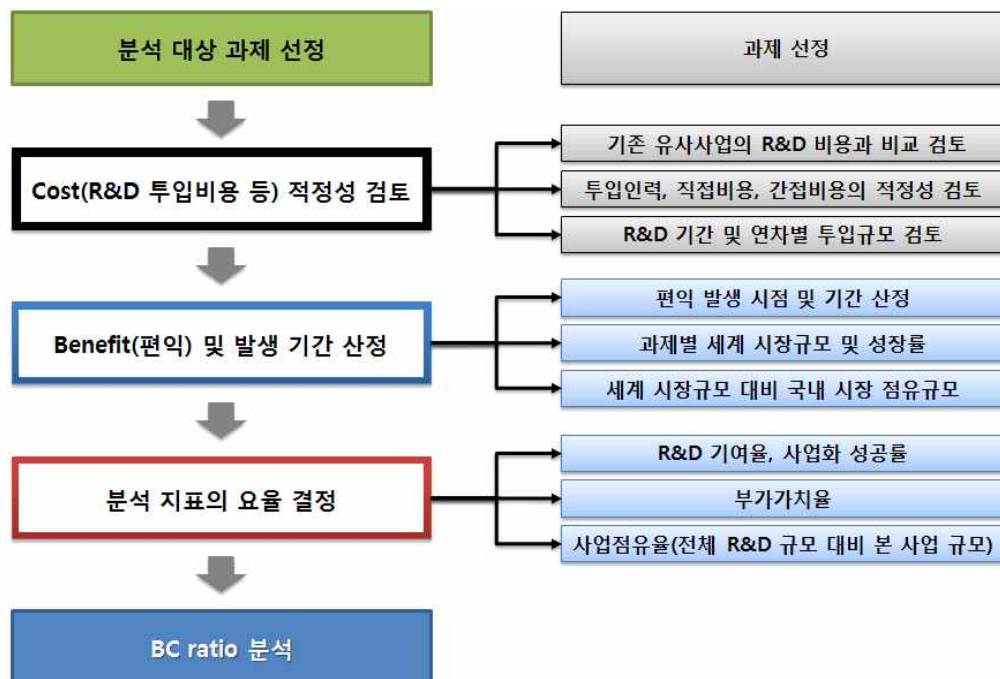
중항목	소항목		주요 검토 내용
비용 추정	연구개발	연구활동지원	· 과제규모, 연구수행주체(수, 질), 기술성숙도(기술수명주기), 연구기간, 연구개발단계, 과제특성(직접비/간접비 비중) 등
		체계개발(HW, SW)	· 용도, 사양, 중량, 복잡도, 기술적 난이도, 기존 수행경험, 기능점수 등
	연구시설·장비 구입 및 유지비	연구시설	· 용도, 면적(인원, 시설장비규모), 지형, 지질학적특성, 입지, 재료, 층수, 개조관련사항, 허가사항, 환경영향, 공공수용성, 내부체계 등
		연구장비	· 용도, 사양, 개수, 발주처(비교견적서) 등
	연구관리		· 관리인력(수, 질), 과제(평가, 관리방법, 과제규모), 등
편익 추정 ※ 시장수요접근법 ¹⁾ 가장 많이 적용	수요 추정		· 해당 연구개발을 통해 실질적으로 혜택을 받을 수요를 추정
	편익 산정		· 對 국민 경제적 편익, 연구개발 편익, 과학기술 및 산업적 응용 편익 등을 고려 - 연구개발 편익 : 핵심 기술 및 노하우, 경험 확보 → 무형적 편익 - 편익 범위 명확화 및 기준선 설정 필요 - 직접 편익과 간접 편익 고려
경제성 분석	B/C 분석		· 현재가로 환산한 비용 대비 편익의 비율이 1.0 이상이면 경제성이 있다고 판단 · 시나리오 별로 BC 분석
	E/C 분석		· 편익을 화폐가치로 환산할 수 없는 경우 비용효과분석 적용 · 비용대비 효과 값이 비교대상 사업에 비해 클 경우 사업 시행이 적절함
	사회적 할인율 설정		· 미래의 비용과 편익을 현재가치로 환산하는 데 사용하는 할인율 · 적정 사회적 할인율 5.5% 적용
	민감도 분석		· 투입 요소 변동에 따른 순현재가치의 변화 정도를 분석하기 위해 민감도 분석을 실시(할인율 ±2%, 비용/편익 ±20%) - 민감도가 클수록 위험한 사업으로 인식

〈그림 VII-1〉 주요 검토 항목

구 분	주요항목	세부 내용
편익 (Benefit)	직접 편익	- 기술개발에 따른 관련 제품의 국내외 추가 시장 창출 규모 - 관련 기업 추가 매출액 - 조건부가치측정법(CVM)에 따라 WTP(지불의사)의 측정값 - 신규 제품 혹은 서비스에 대한 추가 지불금액 의향 - 기존 시설구축비 및 임대료 등을 대체/개선했에 따른 비용 절감액 - 인명피해/재해복구 등의 사회적 비용 감소 편익, 정보제공에 따른 사회적 편익증가 - 연구기반으로 인한 비용저감효과
	간접 편익	- 타 산업으로의 경제적 파급효과 - 생산유발효과, 고용유발효과, 부가가치유발효과 등
비용 (Cost)	연구개발비	- 기술개발에 소요되는 인건비, 직/간접비, 위탁연구비 등을 포함한 전체 연구비 - 인건비 : 내부 인원 투입 부분 산정 - 직접비 : 국내외 업체 외주비, 연구장비/재료 구입비, 기타 등 - 간접비 : 해당 출연연의 간접비(교과부, 국가연구개발사업 간접비 계상기준 참고)
	시설구축비	단지조성, 센터 구축 등 시설구축비(설계비, 감리비, 측량비 등을 포함한 전체 공사비)
	운영 및 유지보수비	편익을 발생시키기 위해 지속적으로 운영/유지보수가 필요한 경우에는 편익이 발생하는 기간 동안 운영비를 산정해야 함

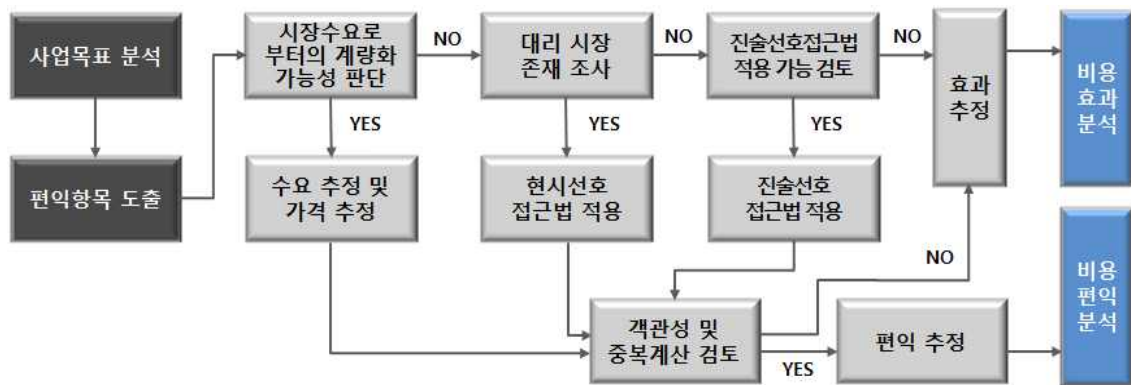
〈그림 VII-2〉 세부 편익 및 비용 항목

1.2 비용편익분석 프로세스



〈그림 VII-3〉 경제성분석 프로세스

- 분석대상 사업은 나노기술을 활용한 하이퍼 콘크리트 개발에 따른 예상성과로부터 기대되는 직접적인 경제적 편익을 분석하여 사업 전반적인 타당성 여부를 판단
- 먼저, 동 사업 수행을 위해 소요되는 총 사업비를 추정하여 기본비용으로 산정
- 다음으로, 편익발생시점과 편익발생기간 등을 설정한 후, 편익유형 및 추정방법을 결정
- 최종적으로 편익산정을 위한 분석 지표 설정 후 경제성 분석을 실시



〈그림 VII-4〉 경제적 타당성 분석 과정 개략도

■ 나노기술을 활용한 하이퍼 나노콘크리트 기술개발은 총 3개의 세부기술 분야로 구성되어 있으며, 세부기술 분야의 예상 성과물로부터 기대되는 경제적 효과를 편익 항목으로 세분화

- 동 사업의 편익분석 항목은 기존의 일반적인 콘크리트 구조재료를 대체할 수 있는 혁신적인 나노기반 콘크리트를 개발함에 따라 창출되는 신규 재료에 대한 부가가치 창출 편익과 국내 대형 SOC 시설물에 우선 적용을 통한 유지관리 비용 감소효과 등을 추정
- (부가가치 창출) 첨단기술을 활용하여 개발되는 건설재료로 인해 창출되는 부가가치 효과(관련 기술 해외수출 확대 및 응용기술 파생을 통한 시장 확대, 융복합을 통한 신규 기술시장 창출 등)를 추정
- (비용감소 편익) 공공 중심의 SOC 시설물에 적용됨에 따라 기존 구조재료 대비 내구수명이 획기적으로 개선됨에 따라 예상되는 유지관리 비용의 획기적인 개선에 따른 비용감소 편익

2. 비용편익분석 전제조건

2.1 비용편익 산정기준

■ 분석대상 기간

- 분석 대상기간은 사업이 추진되는 초기 연도인 2020년을 시작으로 편익이 발생하는 최종년도까지 설정함
- 경제성 분석기간은 사업 유형에 따라 각기 다른 기준을 적용함
- 국가연구개발사업은 기술분야에 따라 발전속도가 다른 특성을 고려하여 기술의 특허 분석을 통해 산출되는 기술수명주기를 편익 회임기간 이후부터 적용함
- 편익발생기간은 KISTEP 예타지침의 응용·개발단계의 연구개발사업 회임기간 3년, 기초원천 연구의 경우 5년으로 적용한 후, 특허데이터 분석에 기반한 기술수명주기 11~14년을 적용하여 설정함
- 즉, 사업 종료(2024년) 이후 회임기간(3년~5년) 이후 최초 편익이 발생하며, 기술수명주기 11~14년 동안 경제적 가치가 있는 것으로 가정함

■ 사회적 할인율

- 본 사업의 비용편익 분석을 위한 사회적 할인율은 기획재정부의 「예비타당성 조사 수행 총괄지침」에 따라 4.5%를 적용하여 추정

■ 편익항목

- 동 사업의 편익추정은 세부기술 분야 및 구성기술별 연구목표와 내용 등의 특성을 고려한 부가가치 창출효과로 설정하였으며, 시장수요 접근법을 적용하여 세부 편익 규모를 추정

〈표 VII-17〉 R&D사업 편익 추정방법 분류

대분류	세부분류	비고
가치창출	시장수요접근법	미래 시장 또는 수요에 의해 발생하는 부가가치 중 해당 R&D에 따른 비용을 적용
	로열티수입접근법	로열티로 인하여 발생하는 편익계산
비용감소	생산비용접근법	생산(내수, 수출)과 관련된 모든 과정에 투입되는 비용의 절감액 추정
	피해비용접근법	R&D에 따른 효과로 사회적 피해비용 절감액 추정

2.2 총 비용 추정

■ 연구개발사업 연차별 투자계획

- 첨단기술을 활용한 스마트 건설재료 연구개발사업에 대한 총 비용은 사업 초기연도인 2020년부터 사업이 종료 되는 2023년까지 투입되는 총 비용을 고려하여 산정
- 3개 세부기술에 대한 상세 사업비용은 총 179.8억 원이며, 연도별 투획은 다음과 같음

〈표 VII-18〉 세부기술별 연도별 투자계획

(단위: 억 원)

기술명	세부기술	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	계
하이퍼 나노 콘크리트 기술	1세부	5.75	5.75	7.69	6.72	25.91
	2세부	16.51	16.51	17.73	15.51	66.26
	3세부	16.51	16.51	26.27	22.99	82.28
	기획평가관리비	1.19	1.19	1.58	1.39	5.35
합계		39.96	39.96	53.27	46.61	179.8

- 연구비용의 산정은 수요조사서를 바탕으로 기술검토위원회에서 세부 기술내용 등의 조사를 통해 적정한 과제 선정과 예산을 산정하는 상향식 접근방법을 활용하였음
- 경제성 분석을 위한 총 비용은 169.8억 원이며, 이를 현재가치로 산정할 경우 151.7억 원으로 추정됨

〈표 VII-19〉 연구개발 총 비용 추정 결과

(단위: 억 원)

구 분	총 비용	현재가치
2020년	39.96	38.24
2021년	39.96	36.59
2022년	53.27	46.68
2023년	46.61	39.09
합계	179.8	160.6

* 순현재가치(NPV, Net Present Value) 산정을 위해 기획재정부, 예비타당성 조사 총괄지침에서 명시한 사회적 할인율 4.5%를 적용

2.3 편익추정 항목 및 논리구조

■ 편익항목

- 동 사업의 세부목표와 성과물의 수혜자를 중심으로 달성 가능한 편익 항목을 도출
 - (사업목표) 첨단 신소재 활용 건설구조 재료 개발을 통한 신시장 창출 및 주요 건설 구조물 내구수명 개선에 따른 유지·관리 비용 감소
 - (수혜자) 동 사업 수혜자는 관련 기업체(건설재료 제조업체, 신소재 제조업체 등)와 공공(중앙정부·지자체 등)으로 구분이 가능

〈표 VII-20〉 사업 주요 편익항목

편익항목	세부내용
부가가치 창출	- 나노기술을 활용한 시멘트 및 콘크리트 재료
비용감소 효과	- 주요 철근 콘크리트 구조물에 첨단건설 재료 적용을 통한 장수명화 → 유지·비용 감소

■ 편익추정 계산식 및 분석지표

- 편익추정 방법은 시장수요 접근법을 통한 부가가치 창출 효과와 신규 교량 건설시 첨단건설 재료 활용을 통한 내구수명 연장을 통한 유지·관리 비용감소 효과를 추정
 - 편익발생기간
 - (부가가치 창출 편익) 연구개발 성과물이 실제 현장적용을 위한 추가 소요기간(회임기간) 5년 후 특허분석을 통해 도출된 기술수명 주기 12년을 고려하여 추정
- ※ 나노기술을 활용한 건설구조 재료 기술분야의 키워드를 통한 특허분석을 통해 도출된 기술수명 주기 평균 값인 12년을 적용함

〈표 VII-21〉 중점분야별 기술수명주기

중점분야	기술수명주기
하이퍼 나노 콘크리트 기술	12년

- (유지관리 비용 감소 편익) 연구개발 성과물의 실제 현장적용을 위한 회임기간(5년)과 현장 적용된 이후 유지보수 비용이 본격적으로 발생하는 시기 10년 총 15년 후 최대 50년을 편익발생기간으로 설정
- (부가가치율) 한국은행 산업연관표의 산업분류 중 기술분야와 연관성이 높은 강선, 철근 및 봉강, 콘크리트제품, 화학섬유, 합성수지 등을 활용하여 적용
- (사업기여율) 동 사업 정부투자자와 민간투자 규모를 추정하여 동사업과 관련된 분야에 대한 전체 투자와 동 사업이 점유하는 비율을 산정
- (사회적 할인율) 예비타당성 조사 표준지침(KDI)의 4.55%를 적용

〈표 VII-22〉 핵심변수 산식 및 기본가정

구분	내용
편익유형	- 부가가치창출, 비용감소 효과 2가지로 구분
편익발생기간	- 특허분석을 통한 기술수명주기(TCT) : 13년 - 인프라 구축 사업의 편익발생 최대 기간 50년
할인율(NPV)	- 현재가치 환산 시 4.5%(KDI) 적용
사업기여율	- 동사업과 관련된 분야에 대한 전체 투자와 동 사업이 점유하는 비율 54.6%를 적용(NTIS 기반 최근 5년간 정부/민간 투자 규모 산출)
R&D 기여율	- 35.4% 적용(2013년 국가과학기술심의회 '제3차 과학기술기본계획'에서 제시)
사업화성공률	- 국토교통 R&D 과제의 최근 3년간 평균 사업화 성공률 31.6% 적용
부가가치율	- 2014년 한국은행 산업연관표 투입산출표 기초가격 통합소분류 데이터 활용

3. 편익추정

■ 편익추정 개요

- CFRP 복합재 건설재료에 대한 시장자료는 존재하난 동 사업의 성과물과 직접적으로 관련된 시장자료가 불충분하여 다양한 접근방법을 검토
- 첨단 신소재 복합재(CFRP 복합재, 나노소재 복합재) 시장 중 건설분야에 점유율에 대한 데이터는 접근이 가능하나, 기 출시된 제품은 일부 보수보강재에 국한되어 있으며, 동 사업의 성과물인 구조재료에 대한 시장자료는 불충분함
- 특히, 동 사업의 성과물은 기존에 존재하지 않는 새로운 건설 구조재료 개발을 목적으로 하고 직접적인 시장규모 추정에 한계가 있음
- 따라서, 다음과 같이 세 가지 가정을 통해 동 사업 성과물과 관련된 대리시장을 추정
 - 첫째, 동 사업의 연구성과물은 기술개발 목표로 제시한 성능목표를 모두 달성하여 기존 철근콘크리트 구조재료 대비 탁월한 성능을 발휘함
 - 둘째, 철근 콘크리트 대체재료에 대한 다수의 검증 및 실증을 통한 신뢰성과 안정성을 충분히 확보하였으며, 실제 현장 적용을 위한 기준정립이 이루어짐
 - 셋째, 새로운 건설구조재료에 대한 대량생산 체계를 기 확보하여 기존의 철근 콘크리트 구조재료 대비 가격경쟁력을 확보함
- 위와 같은 전제조건을 충족할 경우 대규모 건설 공사를 중심으로 새로운 건설구조재료의 현장 적용이 가능하며, 이에 따른 시장규모 추정은 다음과 같음
 - ① 국내 기업 건설수주 금액 추정 → ② 첨단건설 재료 적용 대상 구조물(토목/건축 분야) 선정 → ③ 총 공사비 중 재료 비중 추정

■ 편익대상 시장 추정

- 첨단건설재료 적용 대상 구조물은 도로교량·철도교량, 댐, 항만, 공항 및 초고층 아파트 등 대형 건설 구조물로 설정한 후 국내건설 기업의 공사수주 규모를 산정
- 전문건설업통계(대한전문건설협회)에 따르면 신규 토목공사(도로교량, 철도, 댐, 항만, 공항 등)의 공사수주 규모는 2006년 1조 ,799억원에서 2015년 2조 7,596억원으로 연평균 10.7% 성장세를 보이고 있음

〈표 VII-23〉 나노콘크리트 적용대상 신규건설 규모 추이

(단위 : 억원)

적용대상	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
도로교량	1,554	1,293	1,866	2,478	2,591	2,658	2,006	2,138	2,638	3,576
철도교량	152	107	140	160	146	65	166	415	279	397
댐	127	162	112	118	312	345	129	241	131	149
항만	1,134	2,224	2,541	2,398	2,981	1,985	1,745	1,900	2,248	2,449
공항	166	188	443	311	240	351	218	765	330	470
계	3,133	3,974	5,102	5,465	6,270	5,404	4,264	5,459	5,626	7,041

* 출처 : 전문건설업통계조사(대한전문건설협회)

- 또한, 유지·보수 토목공사(도로교량, 철도, 댐, 항만, 공항)과 건축공사(초고층 아파트)의 공사수주 규모는 2006년 1,969억원에서 2015년 5,482억원으로 연평균 14.0%의 높은 성장세 추세를 보임

〈표 VII-24〉 나노콘크리트 적용대상 유지보수 규모 추이

(단위 : 억원)

적용대상	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
도로교량	1,265	1,691	2,305	1,803	1,765	1,973	1,941	2,184	2,853	4,259
철도교량	95	177	196	221	79	172	486	369	501	437
댐	54	26	30	19	24	99	87	47	59	25
항만	417	335	549	482	351	421	401	398	426	464
공항	21	32	75	91	147	108	382	104	171	91
계	1,852	2,261	3,155	2,616	2,366	2,773	3,297	3,102	4,010	5,276

* 출처 : 시설물유지관리업조사(대한시설물유지관리협회)

- 위와 같이 일부 대형 건설구조물에 대한 국내기업 건설 수주 금액(신규건설 수주, 유지·보수 공사 수주) 중 건설구조 재료 적용 비중을 적용하여 국내기업의 첨단 건설 구조재료 시장규모를 추정함

- 대한건설정책연구원(2016)에 따르면 전문건설업의 재료비 사용 비중은 약 36% 수준이며, 주요 업종별로 재료비 사용 비중에 차이가 존재함
- 동 사업의 R&D 성과물 적용 대상으로 제한한 구조물의 공사유형에 해당되는 철근콘크리트 공사업의 재료비 비중은 22.38%로 나타나고 있음
- 철근콘크리트 공사업의 재료비 비중 22.38%를 적용하여 첨단건설 재료 적용 대상물의 건설재료 사용 규모(시장규모)를 추정함

〈표 VII-25〉 국내 신규·유지보수 건설시장의 건설재료 수요 추정

(단위 : 억원, %)

적용대상	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
신규(A)	3,133	3,974	5,102	5,465	6,270	5,404	4,264	5,459	5,626	7,041
유지보수(B)	1,852	2,261	3,155	2,616	2,366	2,773	3,297	3,102	4,010	5,276
국내 건설수요 (C=A+B)	4,985	6,235	8,257	8,081	8,636	8,177	7,561	8,561	9,636	12,317
건설재료 비중 (D)	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38	22.38
건설재료 수요(C×D)	1,116	1,395	1,848	1,809	1,933	1,830	1,692	1,916	2,157	2,757

■ 편익추정

- 첨단건설재료 기술 적용 대상의 신규 및 유지·보수 건설수주 금액(국내기업) 중 건설재료 사용 비중을 적용한 후 최근 10년(2006~2015년) 데이터를 기반으로 선형 추세선 분석을 통해 편익 발생기간(2029~2040년)의 미래시장 규모를 추정
- 한편, 첨단건설재료 기술확보 및 국내적용 실적을 기반으로 해외수주 실적이 사업 시행 전 대비 3~7% 증가하는 것을 가정하여 시나리오 분석을 실시함

〈표 VII-26〉 편익발생 기간 시장규모 추정

(단위 : 억 원)

연도	As-is*	To-Be		
		비관(3%)	중도(5%)	낙관(7%)
2029	4,086	4,208	4,290	4,372
2030	4,207	4,333	4,417	4,501
2031	4,328	4,458	4,545	4,631
2032	4,449	4,583	4,672	4,761
2033	4,570	4,707	4,799	4,890
2034	4,691	4,832	4,926	5,020
2035	4,813	4,957	5,053	5,149
2036	4,934	5,082	5,180	5,279
2037	5,055	5,206	5,308	5,409
2038	5,176	5,331	5,435	5,538
2039	5,297	5,456	5,562	5,668
2040	5,418	5,581	5,689	5,797

* 최근 10년 건설재료 수요 추이에 기반하여 추세선 분석을 통한 전망(기준선)

** 첨단건설재료 기술확보 및 국내실적 기반으로 해외수주 실적이 사업시행 전 대비 3~7% 증가하는 것을 가정

- 나노콘크리트 현장적용에 따른 부가가치 창출 편익 추정을 위해 분석 지표인 부가가치율, 사업화 성공률, R&D 기여율, 사업기여율, 사회적 할인율을 모두 적용하여 편익을 추정

〈표 VII-27〉 편익산정 기준 및 지표설명

구 분	기준	근거
R&D 기여율	35.4%	연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침(제2판)
사업화 성공률	31.6%	국토교통 R&D 과제 최근 3년간 사업화 성공률)
부가가치율	17.4%	철근 및 봉강, 콘크리트 제품 평균 값 17.4%
사업기여율	36.7%	콘크리트 유관과제 기준
사회적 할인율	4.5%	-
편익발생기간	12년	사업종료 이후 12년간 편익발생(회임기간 5년)

- 나노콘크리트의 부가가치 창출 편익은 중도적인 시나리오에서 약 427.7억원으로 분석되었으며, 보수적인 시나리오는 760.6억원, 낙관적인 시나리오에서는 790.1억원으로 나타남

〈표 VII-28〉 총 비용 및 편익분석 결과

(단위: 억 원, %)

연도	시장규모	R&D 기여율	사업화 성공률	부가 가치율	사업 기여율	연도별 편익(현재가치)		
						3%	5%	7%
2029	4,290	35.4	31.6	17.4	36.7	19.4	19.7	20.1
2030	4,417	35.4	31.6	17.4	36.7	19.1	19.4	19.8
2031	4,545	35.4	31.6	17.4	36.7	18.8	19.1	19.5
2032	4,672	35.4	31.6	17.4	36.7	18.5	18.8	19.2
2033	4,799	35.4	31.6	17.4	36.7	18.2	18.5	18.9
2034	4,926	35.4	31.6	17.4	36.7	17.8	18.2	18.5
2035	5,053	35.4	31.6	17.4	36.7	17.5	17.8	18.2
2036	5,180	35.4	31.6	17.4	36.7	17.2	17.5	17.8
2037	5,308	35.4	31.6	17.4	36.7	16.8	17.2	17.5
2038	5,435	35.4	31.6	17.4	36.7	16.5	16.8	17.1
2039	5,562	35.4	31.6	17.4	36.7	16.2	16.5	16.8
2040	5,689	35.4	31.6	17.4	36.7	15.8	16.1	16.4
합계	-	-	-	-	-	192.3	196.1	199.8

■ 비용편익 분석 결과

- 동 사업의 편익항목은 나노콘크리트 기술의 개발완료 후 상용화에 따른 국내 건설현장에서 실질적인 활용에 따른 부가가치 창출편익을 추정
- 먼저, 나노콘크리트 현장적용에 따른 부가가치 창출 편익은 기술개발 완료 후 회임기간 5년을 고려하여 196.1억원으로 추정
- 총 비용 대비 총 편익의 B/C Ratio는 1.29로 경제적 타당성을 확보
 - 다만, 동 분석은 나노콘크리트 현장적용 대상을 최소한으로 제한(대형 구조물에 대한 기존 재료 대체, 대형 교량(100m 이상) 대상의 유지보수 비용 감소)하여 추정
 - 따라서, 나노콘크리트 적용 대상을 대형 구조물에서 일반 건축시장으로 확대하면 총 편익은 분석결과 보다 크게 나타날 것으로 예상

〈표 VII-29〉 비용편익 분석 종합

(단위: 억 원)

편익항목		시나리오 1	시나리오 2	시나리오 3
비용편익 분석 결과	총 비용	160.6	160.6	160.6
	총 편익	192.3	196.1	199.8
	B/C Ratio	1.20	1.22	1.24

제4절 기대효과

1. 기술적 기대효과

■ 새로운 건설 구조재료 개발을 통한 건설산업 관련 국가 R&D 및 과학기술 역량 제고

- 나노소재 활용 콘크리트 기술 분야 세계 최고 수준의 원천기술 확보를 통한 글로벌 리딩
- 미래 주거 및 시설물 환경 구축을 위한 국가 전략기술 확보
 - 시설물의 획기적인 내구수명 확보를 위한 주요 건설재료 원천기술 확보 가능하며, 지속적인 유지보수가 필요한 사회기반 시설물에 적용 가능
 - 부식제로 철근대체 기술 개발을 통해 어떠한 환경에도 영향을 받지 않고 지속적으로 안전성을 확보할 수 있는 시설물 건축 가능
 - 향후 미래 주거 및 시설물에 폭넓게 응용되며, 새로운 건축물 창출과 현재 건축이 불가능한 시설물 제작에 해결책 제공
 - 미래형 주거 공간 형성 및 사회기반 시설물 구축에 필요한 건설재료 기술 확보 가능
 - 미래형 건설재료 기술 선점을 통하여 국내 건설재료 기술경쟁력 제고
- 미래 건설 환경 조성을 위한 건설재료 관련 독자기술 확보를 통해 핵심기술에 대한 지적재산권을 확보하고, 외국기술에 대한 기술수준 격차를 줄임으로써 해외 시장에서의 시장 점유율 확대

■ 첨단 건설재료 선행 개발의 선순환 체제 구축 및 신산업 창출 효과

- 장수명화 건축물 건설을 위해 필요한 첨단 건설 구조재료(콘크리트) 기술개발을 통해 관련 기술에 대한 선진국 종속화 탈피와 국내 고유기술 보유 가능
- 나노소재 활용 콘크리트 기술 개발을 통하여 신시장 개척 가능한 핵심기술 확보 가능

2. 경제적 기대효과

■ 본 사업은 2030년부터 2043년까지의 기간 동안 약 10,248.0억 원의 생산유발효과와 2,199.6억 원의 부가가치유발효과, 1,233.3명의 고용유발효과가 창출될 것으로 기대

- 생산유발계수와 부가가치유발계수는 어떤 산업부문의 최종수요가 한 단위 증가하였을 때

이를 충족하기 위하여, 각 산업부문에서 직·간접적으로 유발되는 생산액 수준과 부가가치 단위를 나타냄

- 고용유발계수는 특정 상품에 대한 최종수요가 1단위(10억 원)가 발생할 경우 해당 상품을 포함한 모든 상품에서 직·간접적으로 유발되는 피용자 수를 나타냄

〈표 VII-30〉 동 사업 관련 산업연관계수

구분	내용
생산유발계수	2.4134
부가가치유발계수	0.2146
고용유발계수	5.60명/10억 원

* 한국은행 산업연관분석(2014)에서 지정품목 연관 분류의 평균 계수값을 적용

* 연관 산업 : 119. 합성수지, 125. 도료, 133. 건축용 플라스틱 제품, 142. 산업용 유리제품, 150. 콘크리트제품, 160. 철근 및 봉강, 164. 강선, 167. 표면처리강재, 289. 건축보수

〈표 VII-31〉 경제적 파급효과

(단위: 억 원, 명)

연도	편익*	생산유발효과	부가가치유발효과	고용유발효과
2029	30.6	73.9	6.58	17
2030	31.6	76.1	6.77	18
2031	32.5	78.3	6.97	18
2032	33.4	80.5	7.16	19
2033	34.3	82.7	7.36	19
2034	35.2	84.9	7.55	20
2035	36.1	87.1	7.75	20
2036	37.0	89.3	7.94	21
2037	37.9	91.5	8.14	21
2038	38.8	93.6	8.33	22
2039	39.7	95.8	8.53	22
2040	40.6	98.0	8.72	23
합계	427.7	1,032.3	91.8	239

* 주 : 현재가치화 미고려

■ **건설재료 관련 국내 생산산업 활성화 및 고부가가치 신산업 창출을 통한 국내 건설재료 산업의 고용 창출 효과**

- 산·학·연 협력체제에 따른 고급 인력양성 및 중소/중견기업에 인력 공급 효과
- 고부가가치 신산업 창출을 통한 대규모 고용 창출 및 고급 전문 기술인력에 대한 일자리 확대 효과
- 국내 건설재료산업의 활성화 및 고부가가치 신산업 창출을 통한 국내 건설산업 및 건설재료산업의 대규모 고용 창출 효과

■ **우수 건설재료 기술개발 및 확보를 통한 수입대체 효과 발생**

- 전 세계적 환경규제 강화에 따른 건설산업의 후방산업인 건설재료 기술력 향상이 요구됨에 따라 첨단소재 융복합 기술 국산화로 선진국 환경 및 구조안전성규제기준을 만족하여 대선진국 수출 경제시장 확보 가능
 - 장수명 및 내구수명 향상 건설재료 개발 원천기술 확보를 통하여 사회기반 시설물의 획기적인 내구수명 제고 및 적용
 - 미래 건축 및 시설물 핵심 건설재료의 해외 선진국 종속에 따른 미래 건설산업의 시장 경쟁력 향상
- 신시장 창출 및 기존 건설재료의 고부가가치화를 통해 중장기적으로 국내 미래형 건설산업의 시장 창출이 크게 향상될 것으로 기대

3. 사회문화적 기대효과

■ 사회적·국가적·글로벌 이슈에 대응할 수 있는 국가적 R&D과제를 추진함으로써, 국가 공익적 가치 증대에 기여

● 시설물의 수명이 획기적으로 증가함에 따라 한정된 천연자원의 효율적 사용이 가능하고 채굴로 인한 환경 파괴 방지

- 시설물 수명이 획기적으로 증가함에 따라 장기적으로 새로운 건설 소요가 없어짐에 따라 건설 공사에 사용되는 철근, 콘크리트 사용량 감소함에 따른 천연자원 절약

※ 철근에 필요한 철광석, 콘크리트에 필요한 석회석, 골재(모래, 자갈, 돌 등) 등의 천연자원 채굴 감소

- 구조물 장수명화에 따른 철거 및 해체 소요가 필요 없어짐에 따라 건설폐기물 저감 및 폐기물 처리를 위한 매립 등에 대한 대책 수립 가능

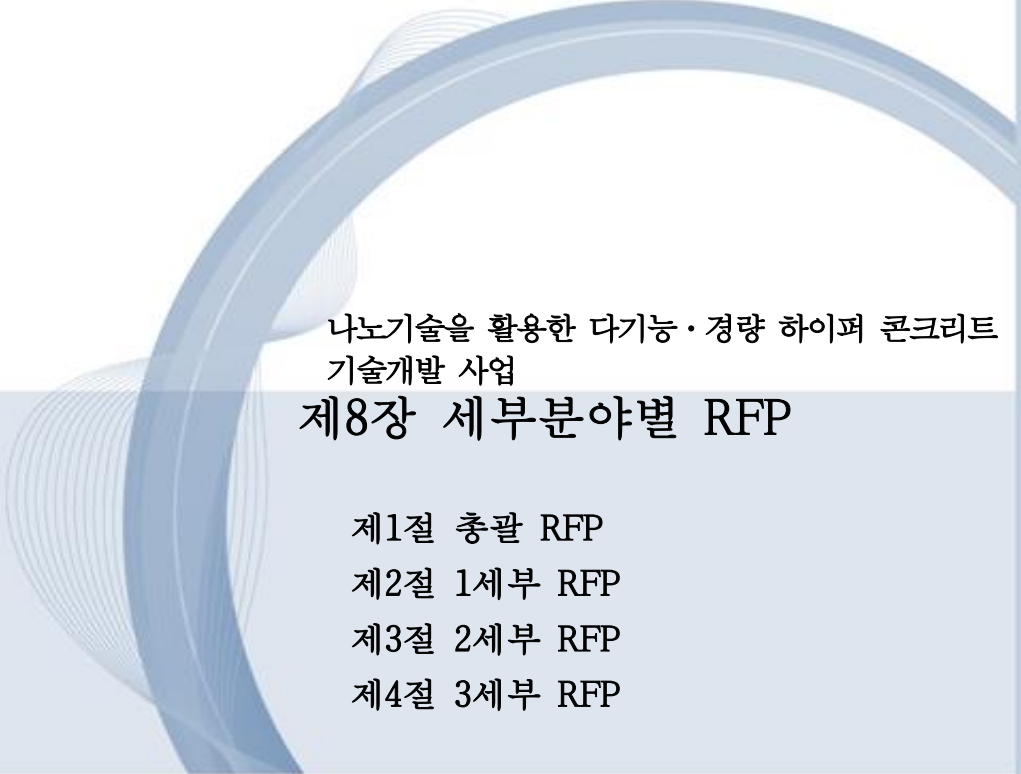
- 동 사업을 통해 개발된 재료를 사용할 경우 유지보수 소요가 줄어들어 따른 유지보수 비용을 다른 복지혜택으로 전환 가능

- 노후 시설물의 손상 등 성능 저하로 인한 안전사고 발생 위험 감소

※ 철근대체재료의 경우, 철근과 달리 녹슬지 않으며, 나노소재 활용 콘크리트의 경우 손상 발생 요인을 근본적으로 차단함에 따라 재료 열화 방지

- 재료 경량화에 따른 공사기간 단축 및 시공비 절감

-



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트
기술개발 사업

제8장 세부분야별 RFP

제1절 총괄 RFP

제2절 1세부 RFP

제3절 2세부 RFP

제4절 3세부 RFP

제8장 세부분야별 RFP

제1절 총괄 RFP

연구과제명	나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술개발(연구단 총괄)
1. 연구목표	○ 나노물질을 활용하여 기존 콘크리트 대비 내구성 증가(내구연수 200년 이상), 단위중량 감소($2.3\text{t}/\text{m}^3 \rightarrow 1.6\text{t}/\text{m}^3$) 및 고강도(80MPa 이상) 콘크리트 개발 - (1세부) 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술 개발 - (2세부) 나노소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술 개발 - (3세부) 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발
2. 연구 필요성 및 기술동향	□ 연구개발 필요성 ○ 콘크리트는 경제성과 재료확보 용이성으로 20세기 이후 가장 보편적인 건설재료로 활용됐으나 최근 재료적 한계로 인해 성능 개선 필요성이 대두됨 - 최근 전통적 건설산업에 4차 산업혁명 기술을 도입한 무인화, 자동화 시공 등 스마트 건설 기술개발이 활발하나 콘크리트 중량이 커 구현에 한계가 존재함 - 전 세계 콘크리트 시장규모는 매년 급격히 확대되고 있으며 경량·고강도 콘크리트 기술경쟁력 확보시 국내 건설재료산업에 새로운 성장 모멘텀 마련이 가능함 * 세계 시멘트 시장은 연평균 9.27%성장, '21년 5,608억 달러 시장규모 형성 전망 (Global Cement Market, 2017) ○ 재료는 원천기술 개발부터 상용화까지 장기간이 소요되고 성공 가능성은 낮으나 개발 성공시 신시장 창출 및 시장선점이 가능하여 정부지원이 필수임 - 주요선진국 및 글로벌 건설기업은 건설생산성 향상을 위해 건설재료 관련 다양한 연구를 추진 중이나 국내 기업의 연구개발 투자는 감소 중임 * '16년 국내 건설 대기업 R&D 투자 '15년 대비 40% 급감(Eu Score Board 2016, Global Top Companies R&D)

- 콘크리트는 경제적이거나 열화, 균열 등 재료적 특성으로 인해 유지보수 및 개량이 어렵고 폐기물 발생량이 많아 다양한 문제점이 발생함
 - 연간 폐기물 중 50%내외가 건설폐기물로 사회적 이슈로 부각하여 세계 각국은 구조물 수명을 획기적으로 연장하기 위한 다양한 재료를 개발 중임
 - * '16년 전체 폐기물 404천톤 중 건설폐기물 199천톤(환경부)
 - 세계적으로 산업화 시대에 다수의 시설물이 철근콘크리트를 활용하여 시공되었으나 노후화로 인한 급격한 유지보수 비용 증가가 사회문제로 대두됨
 - * 국내 도로 SOC 유지보수예산은 매년 증가추세로 '30년 6조 원을 초과할 것으로 전망 (국내 교통 인프라 유지보수 투자의 향후 변화 추이, 한국건설산업연구원, 2016)
- 경량 콘크리트의 한계 극복을 위한 첨단기술과의 융합은 차세대 스마트 건설 및 특수 인프라 구조물 기술을 선도할 수 있음
 - 기존 기술 경량골재의 낮은 강도와 강성으로 인해 경량 콘크리트의 압축강도 수준은 40 MPa 이하이며, 경량골재와 시멘트 매트릭스 경계면의 낮은 접착성은 콘크리트 열화저항성을 현저히 감소시킴
 - 경량 콘크리트의 강도 및 내구성 향상을 위해서는 시멘트 매트릭스와 경량골재들의 경량화 및 이들 재료들의 경계면에서 높은 접착성과 미세균열 제어 그리고 재료들의 적은 단위중량에서 강성과 강도를 향상시킬 수 있는 기술이 요구되는데, 나노소재 활용은 이에 대한 좋은 대안 중의 하나가 될 수 있음

□ 기술동향

○ 국내 기술동향

- 2000년대 초반부터 나노 콘크리트 관련 연구를 시작하였으며, 주요 나노 소재로는 SiO_2 가 주성분인 Nano- SiO_2 를 대상으로 함
- 나노소재의 콘크리트 융복합 관련 연구개발은 나노소재의 콘크리트에의 적용성 검토, 나노소재에 의한 콘크리트의 강도 및 성능 향상 등 기초 단계 연구가 산발적으로 추진 중임

○ 국외 기술동향

- 기존 나노소재를 이용한 콘크리트 기술은 주로 탄소기반의 CNTs 활용에 중점을 두고 있으나, 최근에는 CNTs의 대량합성 및 품질 고도화와 다양한 나노소재 활용 콘크리트의 품질향상(고강도 및 내구성 향상) 측면에서의 기술 개발에 초점을 맞추고 있음
 - * 나노 실리카, 개질 유황 및 슬래그 재료 활용한 콘크리트 기술 개발, 나노 섬유 활용 콘크리트 강도 증진 및 염해저항성 개선 연구, Al₂O₃, TiO₂ 및 ZrO₂ 등 나노소재 혼입 콘크리트 연구 등
- 유럽에서는 콘크리트에 나노소재를 적용하여 강도 및 내구성을 향상시키는 대규모의 기술개발 프로젝트가 진행 중임
 - * Nano futures(New generation cluster of ETPs operating on nanotechnology) : 나노 기술 활용 지속가능한 발전을 위한 EU 종합 계획(2013~2025, 1,905억원)
 - * NanoHeal(Nano-tailoring organo-mineral materials -Controlling strength and healing with organic molecules in mineral interfaces) : 유기미네랄 재료의 나노화를 통하여 시멘트에 의한 CO₂배출 저감을 위한 새로운 시멘트 재료 개발(2015~2018, 52억원, 노르웨이)
 - * CarboBau : CNT 활용 초고강도 콘크리트 개발 (2009~2012, 23억원, 독일)
- 일본은 경량골재를 활용하여 단위중량과 압축강도를 획기적으로 증가시킨 콘크리트를 개발하여 교량 및 고층 빌딩에 적용
 - * '02년에 단위중량 1.8t/m³, 압축강도 40MPa 콘크리트를 개발하여 센다이 북부 3경간 PSC 교량에 적용
 - * '13년 도쿄 하베노 하루카스 빌딩 상부에 1.85t/m³, 압축강도 21MPa의 경량 고강도 콘크리트를 적용하여 하층부 축력을 20% 절감
- Guggenheim Museum과 The Grenland Bridge 등의 랜드마크성 건축물과 토목 구조물에 경량 콘크리트 적용이 꾸준히 이루어지고 있으며 fib 2010은 경량 콘크리트 압축강도 등급을 절건밀도 2.0t/m³에서 80 MPa로 제시하고 있음.
 - * 최근 독일의 팡창점토 골재 제조사인 Leca-S 사에서는 1.9t/m³, 압축강도 60MPa 급의 제조 가능성을 제시함.
- 일부 실리카 활용 경량골재 코팅과 이를 이용한 콘크리트 내구성 향상관련 연구가 시도되고 있으나, 아직 초기단계로 지속적인 연구가 필요한 실정

3. 연구내용	
○ (1세부) 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술 개발 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술 개발 ○ (2세부) 나노소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술 개발 - 나노소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술 개발 * 경량·고강도·고내구성 콘크리트 제조를 위한 시멘트 복합체 수화최적화 및 미세 구조제어 포함 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노소재 제조 및 활용 기술 개발 ○ (3세부) 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발 - 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소 기술 * 임베디드 기반 경량 골재 제조 및 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 등을 포함 - 나노기술 활용 고강도·고내구·경량 콘크리트 제조 기술 - 고강도·고내구·경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계 가이드라인 * 부재 성능평가 및 Mock-UP 테스트 등을 포함	
4. 연구 추진방법	
□ 추진전략 ○ 핵심기술의 연차별 목표 및 성능 수준 등 제시 - 핵심기술 제시 및 그에 따른 연차별 목표를 수립하고, 그에 적합한 연차별 세부 추진전략 및 일정계획, 핵심성과 로드맵(TRL 반영)을 제시할 것 - 연차별 달성목표(마일스톤)를 구체적으로 제시하고 성과평가 방법을 명시할 것 - 연구 목표를 정량적으로 제시 ※ 예) 기존 대비 00% 비용절감, 00% 수준의 성능 향상, 00까지 00% 보급 등 ○ 연구내용, 개발기술, 성과물 간 연계가 표출되도록 기술개발·성과로드맵 및 연차별 성과 평가지표(안) 제시 ※ 단계별/연차별 성과 평가 지표(안)은 향후 단계/중간 평가시 참고 예정 ○ 기존에 수행되었거나 국외 및 국내에서 현재 수행 중에 있는 관련 연구개발결과의 구체적인 연계 또는 통합 활용방안을 연구계획에 포함시켜 추진	

- 타 부처 영역과 중복 우려가 있는 연구내용에 대해서는 부처 간의 협력방안 또는 공동 활용방안 등 제시
- 연구개발 성과목표·지표 등을 연구개발계획서에 구체적으로 제시
 - 연구성과물을 수요자 중심으로 구분하여 관리할 수 있도록 명시 (정책/설계사/시공사/설비업체/건축주/감리자/대국민/학술 등)
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 객관적 방안 제시
 - 연구성과의 보급으로 예상되는 기술, 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
 - 제시한 성과지표에 진흥원 관리 공통성과지표가 없거나 부족하다고 판단될 경우, 협약시 조정(추가) 가능
- ※ 과제선정 후 해당 연구책임자(기관)에 대한 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
- 정부 및 관련 기업·공사 등 기술수요처와 유기적 협조체제 구축
 - 기술수요기관의 충분한 의견수렴을 통하여 실용성 확보
 - 관련 정부부처 및 전문기관과 협의 수행
 - 관련 업계 전문가로 구성된 포럼 등을 구성하여 요구조건 파악
- 기술의 객관성 및 실효성 확보를 위하여 검증시험 등을 수행, 평가단을 구성하여, 공정하고 신뢰성이 있는 결과 도출
- 각 세부별 연계방안 제시 및 각 세부별 연구성과물은 3세부의 경량·고강도 하이퍼 콘크리트 기술 개발에 적용

□ 추진체계 연구과제 유형(연구수행체계) : 연구단과제

- 산학연 공동연구로 구성, 원천소재 개발, 평가 및 검증기관 등 풍부한 연구경험과 역량을 극대화 할 수 있는 출연(연), 대학, 관련 민간 기업체를 기술개발 주체로서 구성
- 관련 기술 및 기준 등에 대한 전문가 자문단을 구성·활용하여 연구개발의 기술·정책적 보완사항 확인 및 반영
- 관계부처 및 업계 간 유기적 협의체계 구축을 통한 의견수렴 및 교류 활성화

5. 최종성과물

□ 최종성과물

○ (1세부) 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술 개발

- 나노 소재 및 나노 콘크리트 환경영향 평가 GLP 보고서
 - * OECD 가이드라인이 적용된 생태독성 등의 환경 유해성평가 보고서
- 나노 콘크리트용 나노소재 환경거동 및 노출 평가 모델
- 나노 콘크리트용 각 소재별 LCI D/B
- 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가 지침(안)
- 나노 소재 및 나노 콘크리트 인체영향 평가 GLP 보고서
 - * OECD 가이드라인이 적용된 흡입독성 등의 인체 유해성평가 보고서
- 나노 콘크리트용 나노소재 인체노출 평가 모델
- 나노 콘크리트 인체영향 평가 지침(안)
- 콘크리트 내 나노소재 분산성 시각화 및 평가 가이드라인(안)
- 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 평가 지침(안)
 - ※ 상기 1세부 모든 성과물에는 시제품 평가 내용 반드시 포함

○ (2세부) 나노소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술 개발

- 시멘트 복합체 활용에 적합한 각종 나노소재 물성 DB 구축 (나노소재의 물리·화학적 특성, 시멘트 복합체 활용 적정성, 물성 비교 평가 DB)
- 나노소재 활용 성능평가 기준(안)
- 나노소재 활용 시멘트 복합체 수화반응 모델
- 나노소재 활용 시멘트 복합체 조직구조 발현 모델
- 나노소재 활용 경량 고강도 시멘트 복합체 제조 가이드라인(안)
- 경량·고강도·고내구성 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계(건설용 벌크 나노소재)
- 건설용 벌크 나노소재 요구사항 기준(안)
- 건설용 벌크 나노소재 생산성 향상을 위한 공정설계(안)
- 건설용 벌크 나노소재 생산을 위한 공정 표준화 기술 보고서
- 건설용 벌크 나노소재 제조 가이드라인(안)
- 생산단가 20% 이상 절감된 건설용 나노소재 시제품
 - * 생산단가 20% 절감(초기 개발단계 나노소재 생산단가 기준)
- 건설용 벌크 나노소재 활용 경제성 분석 보고서
- 건설용 벌크 나노소재 분산성 평가를 위한 가이드라인(안)

○ (3세부) 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발

- 단위중량 1.6t/m^3 이하, 80MPa 이상 고강도·고내구·경량 콘크리트 시제품

- 나노 임베디드 경량골재 시제품
- 마이크로-나노 솔리드 버블 합성기법(안)
- 마이크로-나노 솔리드 버블 적용 경량 매트릭스
- 고강도·고내구·경량 나노콘크리트 구조설계기준(안)
- 고강도·고내구·경량 나노콘크리트 시공지침(안)
- 부재 및 Mock-Up Test 성능시험 보고서
- 고강도·고내구 경량 나노콘크리트 경제성 분석 보고서

6. 활용방안 및 기대효과

○ 기술적 측면

- 우리나라의 건설 분야는 현재 세계 Top 수준의 기술이 없으므로, 본 기술 확보를 통해 세계 수준의 기술을 보유하는 건설엔지니어링 강국으로 도약 가능하고, 세계 최고기술 확보를 통한 세계적 수준의 톱 브랜드 기술 구축
- 첨단 시멘트계 소재기술, 환경 및 인체영향 평가 기술 개발을 통해 새로운 기술 개척이 이루어짐으로써 원천기술 확보 및 톱 브랜드 창출로 국가 경쟁력 강화를 통한 국민의 자긍심 고취
- 모방형·칸막이형 국가 R&D시스템을 창조형·개방형 R&D 시스템으로 진화시킴으로써 건설산업 분야 국가 R&D시스템을 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대

○ 경제·사회적 측면

- 본 기술은 재료개발에 관한 것이 아닌 개발 후 정량평가를 위한 기반 구축을 위한 것으로 이에 대한 단순 시장 경제적 효과를 평가하는 것에는 어려움이 있으나, 간접적인 경제효과로서 기술개발을 통한 수입대체 효과 발생할 것으로 전망
- 나노제품에 대한 과학적이고 체계적인 평가 체계 구축을 통하여 나노제품에 대한 부정적이고 불안한 이미지와 인식을 불식시킬 것으로 기대

7. 연구기간 및 소요예산

○ 총 연구개발기간 : 2020.04 ~ 2023.12 (3년 9개월)

- 1차년도 연구개발기간 : 2020.04. ~ 2020.12.31 (9 개월)
- 2차년도 연구개발기간 : 2021.01.01 ~ 2021.12.31 (12개월)
- 3차년도 연구개발기간 : 2022.01.01 ~ 2022.12.31 (12개월)
- 4차년도 연구개발기간 : 2023.01.01 ~ 2023.12.31. (12개월)

○ 총 정부출연금 : 13,500백만원 이내(기획평가관리비 포함)

12,965백만원 이내(기획평가관리 제외)

- 1차년도 정부출연금 : 2,881백만원 이내(기획평가관리 제외)

- ※ 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음
- ※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토교통부소관 연구개발사업 운영 규정”의 기준을 따르되, 추가 부담 가능
- ※ 연구단과제는 세부과제별로 기업부담금 비율 준수
- ※ 연구비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소 조정 가능

8. 기 타

- 본 과제의 보안등급은 “일반 과제”임
- 연구개발계획서는 과제제안요구서(RFP)에 제시된 연구내용을 참고하여 작성하되, 과제 목적달성을 위해 반드시 필요하다고 판단되는 경우에는 일부 세부내용을 가감할 수 있으나, 그 사유와 근거를 명확히 제시해야 함
- 필요시 공모된 연구과제명 외에 연구목표·내용에 대한 대표성을 가지고 타 연구과제와 차별화되면서 알기 쉬운 연구과제명으로 수정하여 제안할 수 있음
- 기 수행하였거나 현재 수행 중인 유사과제와 연구내용이 중복되지 않도록 연구개발계획서를 작성해야 함
 - ※ www.kaia.re.kr, <http://rndgate.ntis.go.kr>의 유사과제목록 참조
- 공모과제와 관련하여 기 수행되었거나 현재 수행 중인 과제의 연구개발결과물과의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구계획에 포함해야 함
- 제안된 연구내용이 타 유사과제와 연구방법이나 목표 등에서 차별화되는 경우에는 포함하여도 무방하되, 그 근거를 명확히 해야 함
 - ※ 연구개발 수행 도중 과제의 중복성이 사후에 발견되거나 연구개발목표가 다른 연구개발에 의하여 성취되어 연구개발을 계속할 필요성이 없어진 때에는 협약을 해약할 수 있음
- 연구 착수시점 현황과 개발종료 후의 대비가 가능하도록 세부과제별로 As-Is와 To-Be를 구체화·가시화하여 제시해야 함
- 연구개발계획서에 세부과제간 연구내용 및 성과의 연계/활용을 위한 전략을 제시하여야 함
 - 기획보고서에서 제시한 기술개발 TRM을 기반으로 전체 개발기술

- 과 성과물간의 유기적 연계를 파악할 수 있는 체계를 제시해야 함
 - ※ (예시) 개발기술 상호간, 성과물 상호간, 개발기술-성과물간 연계성
- 과학기술적 성과물을 포함하여 최종성과물을 구체화하여 제시해야 함
- 연구신청자는 연구개발 성과목표(성과지표/달성목표치/가중치) 및 사업수행(일정)계획과 이에 대한 관리계획 등을 연구개발계획서에 제시해야 함
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 구체적인 방안을 제시해야 함
 - ※ 과제선정 후 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
- 제시한 성과지표는 사전검토, 선정평가를 통해 조정(추가) 가능함
- 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행 실적이 있고, 과제추진 시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장제공 등)이 명확하여야 하며 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함
- 국제공동연구 또는 전문가 활용방안
 - 필요시 관련 기술 해외 선도기관과의 공동연구 추진방안 및 전문가 활용계획을 연구계획에 포함할 수 있음
- 추후 연구개발계획 등은 수정·보완될 수 있으며, 이에 따라 과제 내 특정 기술개발에 대한 추진방식 등이 변경될 수 있음
 - 본 과제의 연구기간은 추후 협약 시 변경될 수 있음
 - 전문기관은 필요시 선정된 주관기관(연구책임자)과 협의를 거쳐 연구개발계획서를 수정·보완(연구목표, 내용 및 범위 등을 구체화·명확화)할 수 있음
 - 연구추진과정에서 관련기술 환경변화에 따라 연구내용(연구비 포함)이 조정될 수 있음
- 연구성과의 실용화 및 사업화 추진계획 제시
 - 신청자는 연구성과의 실용화·사업화로 예상되는 기술의 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
 - 실용화·사업화로 예상되는 기술에 대한 기술료 납부 계획 제시

제2절 1세부

연구과제명	(1세부) 나노 콘크리트 안전성 및 성능평가 기술개발
1. 연구목표	○ (1세부) 나노 소재 적용에 따른 유해성 평가를 통해 안전한 나노콘크리트 개발 및 개발된 나노 콘크리트의 성능 평가를 위한 시험법, 기준 등을 개발
2. 연구 필요성 및 기술동향	□ 연구개발 필요성 ○ 우리나라의 나노 기술 연구개발 정책은 2001년 “나노 기술종합발전 계획”을 수립하여 법정부차원에서 본격적으로 추진하고 있으며, 제4기 나노 기술종합발전계획에서는 나노 기술의 안전성에 대한 문제를 12개 주요과제 중 하나로 선정하고 나노산업의 발전을 위한 제도화를 추진하고 있음 ○ 제2차 나노안전관리 종합계획에서는 나노 안전관리 제도 선진화 및 안전성 평가 본격화를 목표로 3개분야 7개 추진과제를 설정하고 진행하고 있음 ○ 국외의 경우, 2007년 유럽의 신화학물질 규제 제도 도입 이후, 나노 물질을 포함한 글로벌 화학물질규제에 대한 수위는 지속적으로 높아지고 있으며, 나노물질의 안전성 확립 및 나노안전 규제에 대한 대응 필요성이 높아지고 있는 상황임 ○ 건설산업에서의 나노 기술 활용은 보다 높은 재료 성능과 새로운 기능 확보, 고부가가치화가 가능한 새로운 성장 동력원으로써 기대를 받고 있으나, 환경 및 인체에 대한 영향과 관련된 충분한 검토가 이루어지지 않을 경우, 나노 기술에 대한 신뢰는 얻기 힘든 상황임 – 국내에서는 이전부터 건설산업 특히 콘크리트 분야에서 일부 활용하고자 노력을 기울이고 있으나, 활용할 수 있는 나노 소재와 구체적인 사용 범위 및 방법, 사용에 따른 인체 및 영향평가 관련 지침, 기준 등은 전무한 실정임

- 나노 콘크리트의 성능은 콘크리트 내 나노 소재의 분산 정도에 많은 영향을 받으며, 나노 콘크리트의 손상에 따른 콘크리트 내 나노 소재의 환경 및 인체로 영향을 미치는 정도에 대한 간접적 평가를 위해서도 나노 소재의 분산 정도의 파악은 필수적임
- 나노 콘크리트 성능 평가 시, 나노 소재의 유출 및 비산 방지를 고려한 비파괴 검사에 의한 콘크리트 내 나노 소재 분산성 평가 방법은 전무한 실정임
- 높은 전도성을 가진 나노 소재를 콘크리트에 활용할 경우, 콘크리트 구조물의 비파괴 손상 검지가 가능하나, 이와 관련된 기술 정립은 아직 이루어지지 않은 실정임
- 높은 전기적 특성을 가진 나노 소재를 콘크리트에 혼입함으로써 콘크리트의 전도성이 향상되어 이를 적용한 구조물에 발생한 열화, 균열, 공극 등 손상 검지가 가능함

□ 기술동향

○ 국내기술동향

- 나노 물질과 관련하여 식품의약품안전처, 환경부, 국립환경과학원, 산업통상자원부 등에서 환경 및 인체 유해성과 함께 나노 물질 독성 평가에 대한 프로젝트가 진행됨
- 건설재료와 관련하여 대부분 환경영향 평가에 국한된 연구가 보고되고 있는 실정이며, 나노 콘크리트와 관련된 연구는 전무한 실정임
- 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술과 관련하여 전자기파를 활용한 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 분석 연구가 보고되고 있으며, 일부 탄소계열 나노 소재를 활용한 나노 콘크리트에 대한 분산성 정량화 연구가 보고되고 있음

○ 해외 기술동향

- 선진국을 중심으로 나노물질의 활용에 따른 환경 및 인체영향에 대한 연구가 다수 보고되고 있으며, 대부분 나노물질 노출에 따른 위해성에 초점이 맞추어져 있음
- 나노물질과 환경 및 인체 사이의 상호 작용에 대한 복잡성을 풀어줄 방법으로 유망한 방법으로 전주기를 통한 접근법이 제시되고 있음

	- EU에서는 나노물질에 대한 안전성을 검토하기 위하여 대규모 프로젝트를 실시하고, 나노물질이 환경 및 생태계에 미치는 영향을 규명하고 있음 - 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술과 관련하여 나노 소재 중 하나인 CNTs의 분산특성을 분석하기 위해 전자기파를 이용한 분석방법이 제시되고 있음
3. 연구내용	
	○ 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술 개발 - 나노 콘크리트 환경거동 및 노출 평가 모델 개발 - 나노 콘크리트용 각종 나노소재에 대한 환경영향 물질목록(LCI DB) 구축 - LCI DB 기반 나노 콘크리트 LCA 분석 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 대한 환경영향 평가 지침/가이드라인(안) 개발 ○ 나노 콘크리트 인체영향 평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정 시 나노물질의 인체 노출 메커니즘 분석 및 모델 개발 - 나노 콘크리트 인체 유해성 평가 - 나노 콘크리트 제조 및 사용 과정에 따른 인체유해성 지침/ 가이드라인(안) 개발 ○ 나노 콘크리트 비파괴 성능평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 나노 소재 분산성 시각화 및 평가 기술 개발 - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 및 성능 평가 기술 개발
4. 연구 추진방법	
□ 추진전략	○ 핵심기술의 연차별 목표 및 성능 수준 등 제시 - 핵심기술 제시 및 그에 따른 연차별 목표를 수립하고, 그에 적합한 연차별 세부 추진전략 및 일정계획, 핵심성과 로드맵(TRL 반영)을 제시할 것 - 연차별 달성목표(마일스톤)를 구체적으로 제시하고 성과평가 방법을 명시할 것 - 연구 목표를 정량적으로 제시 ※ 예) 기존 대비 00% 비용절감, 00% 수준의 성능 향상, 00까지 00% 보급 등

- 연구내용, 개발기술, 성과물 간 연계가 표출되도록 기술개발·성과로드맵 및 연차별 성과 평가지표(안) 제시

※ 단계별/연차별 성과 평가 지표(안)은 향후 단계/중간 평가시 참고 예정

- 기존에 수행되었거나 국외 및 국내에서 현재 수행 중에 있는 관련 연구개발결과의 구체적인 연계 또는 통합 활용방안을 연구계획에 포함시켜 추진

- 타 부처 영역과 중복 우려가 있는 연구내용에 대해서는 부처 간의 협력방안 또는 공동 활용방안 등 제시

- 연구개발 성과목표·지표 등을 연구개발계획서에 구체적으로 제시

- 연구성과물을 수요자 중심으로 구분하여 관리할 수 있도록 명시 (정책/설계사/시공사/설비업체/건축주/감리자/대국민/학술 등)
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 객관적 방안 제시
 - 연구성과의 보급으로 예상되는 기술, 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
 - 제시한 성과지표에 진흥원 관리 공통성과지표가 없거나 부족하다고 판단될 경우, 협약시 조정(추가) 가능

※ 과제선정 후 해당 연구책임자(기관)에 대한 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용

- 정부 및 관련 기업·공사 등 기술수요처와 유기적 협조체제 구축

- 기술수요기관의 충분한 의견수렴을 통하여 실용성 확보
 - 관련 정부부처 및 전문기관과 협의 수행
 - 관련 업계 전문가로 구성된 포럼 등을 구성하여 요구조건 파악

- 기술의 객관성 및 실효성 확보를 위하여 검증시험 등을 수행. 평가단을 구성하여, 공정하고 신뢰성이 있는 결과 도출

- 2, 3세부와 연계 방안 제시 및 1세부 연구성과물은 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술 개발에 적용

□ 추진체계 연구과제 유형(연구수행체계) : 연구단과제

- 산학연 공동연구로 구성, 원천소재 개발, 평가 및 검증기관 등 풍부한 연구경험과 역량을 극대화 할 수 있는 출연(연), 대학, 관련 민간 기업체를 기술개발 주체로서 구성
- 관련 기술 및 기준 등에 대한 전문가 자문단을 구성·활용하여 연구 개발의 기술·정책적 보완사항 확인 및 반영
- 관계부처 및 업계 간 유기적 협의체계 구축을 통한 의견수렴 및 교류 활성화

5. 최종성과물

□ 세부과제별
최종성과물

- 나노콘크리트 전과정 환경영향 평가(LCA) 기술 개발
 - 나노콘크리트 환경영향 평가 결과 보고서
 - * OECD 가이드라인이 적용된 생태독성 등 환경 유해성평가 GLP 보고서 포함
 - 나노 콘크리트용 나노소재 환경거동 및 노출 평가 모델
 - 나노 콘크리트용 각 소재별 LCI D/B
 - 나노 콘크리트 전과정 환경영향 평가 지침(안)
- 나노콘크리트 인체영향 평가 기술 개발
 - 나노콘크리트 인체영향 평가 결과 보고서
 - * OECD 가이드라인이 적용된 흡입독성 등의 인체 유해성평가 GLP 보고서 포함
 - 나노 콘크리트용 나노소재 인체노출 평가 모델
 - 나노 콘크리트 인체영향 평가 지침(안)
- 나노콘크리트 비파괴 성능평가 기술 개발
 - 콘크리트 내 나노소재 분산성 시각화 및 평가 가이드라인(안)
 - 나노 콘크리트 비파괴 결함 검지 성능 평가 지침(안)

※ 상기 1세부 모든 성과물에는 시제품 평가 내용 반드시 포함

6. 활용방안 및 기대효과

- 기술적 측면
 - 우리나라의 건설 분야는 현재 세계 Top 수준의 기술이 없으므로, 본 기술 확보를 통해 세계 수준의 기술을 보유하는 건설엔지니어링 강국으로 도약 가능하고, 세계 최고기술 확보를 통한 세계적 수준의 톱 브랜드 기술 구축

- 첨단 시멘트계 소재기술, 환경 및 인체영향 평가 기술 개발을 통해 새로운 기술 개척이 이루어짐으로써 원천기술 확보 및 톱 브랜드 창출로 국가 경쟁력 강화를 통한 국민의 자긍심 고취
- 모방형·칸막이형 국가 R&D시스템을 창조형·개방형 R&D 시스템으로 진화 시킴으로써 건설산업 분야 국가 R&D시스템을 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대

○ 경제·사회적 측면

- 본 기술은 재료개발에 관한 것이 아닌 개발 후 정량평가를 위한 기반 구축을 위한 것으로 이에 대한 단순 시장 경제적 효과를 평가하는 것에는 어려움이 있으나, 간접적인 경제효과로서 기술개발을 통한 수입대체 효과 발생할 것으로 전망
- 나노제품에 대한 과학적이고 체계적인 평가 체계 구축을 통하여 나노제품에 대한 부정적이고 불안한 이미지와 인식을 불식시킬 것으로 기대

7. 연구기간 및 소요예산

○ 총 연구개발기간 : 2020.04 ~ 2023.12 (3년 9개월)

- 1차년도 연구개발기간 : 2020.04. ~ 2020.12.31 (9 개월)
- 2차년도 연구개발기간 : 2021.01.01 ~ 2021.12.31 (12개월)
- 3차년도 연구개발기간 : 2022.01.01 ~ 2022.12.31 (12개월)
- 4차년도 연구개발기간 : 2023.01.01 ~ 2023.12.31. (12개월)

○ 총 정부출연금 : 2,591백만원 이내 (기획평가관리비 제외)

- 1차년도 정부출연금 : 575백만원 이내 (1세부평가관리비 제외)
 - ※ 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음
 - ※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토교통부소관 연구개발사업 운영 규정”의 기준을 따르되, 추가 부담 가능
 - ※ 연구단과제는 세부과제별로 기업부담금 비율 준수
 - ※ 연구비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소 조정 가능

8. 기 타

- 본 과제의 보안등급은 “일반 과제”임
- 연구개발계획서는 과제제안요구서(RFP)에 제시된 연구내용을 참고하여 작성하되, 과제 목적달성을 위해 반드시 필요하다고 판단되는 경우에는 일부 세부내용을 가감할 수 있으나, 그 사유와 근거를 명확히 제시해야 함
- 필요시 공모된 연구과제명 외에 연구목표·내용에 대한 대표성을 가지고 타 연구과제와 차별화되면서 알기 쉬운 연구과제명으로 수정하여 제안할 수 있음
- 기 수행하였거나 현재 수행 중인 유사과제와 연구내용이 중복되지 않도록 연구개발계획서를 작성해야 함
 - ※ www.kaia.re.kr, <http://rndgate.ntis.go.kr>의 유사과제목록 참조
 - 공모과제와 관련하여 기 수행되었거나 현재 수행 중인 과제의 연구개발결과물과의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구계획에 포함해야 함
 - 제안된 연구내용이 타 유사과제와 연구방법이나 목표 등에서 차별화되는 경우에는 포함하여도 무방하되, 그 근거를 명확히 해야 함
 - ※ 연구개발 수행 도중 과제의 중복성이 사후에 발견되거나 연구개발목표가 다른 연구개발에 의하여 성취되어 연구개발을 계속할 필요성이 없어진 때에는 협약을 해약할 수 있음
- 연구 착수시점 현황과 개발종료 후의 대비가 가능하도록 세부과제별로 As-Is와 To-Be를 구체화·가시화하여 제시해야 함
- 연구개발계획서에 세부과제간 연구내용 및 성과의 연계/활용을 위한 전략을 제시하여야 함
 - 기획보고서에서 제시한 기술개발 TRM을 기반으로 전체 개발기술과 성과물간의 유기적 연계를 파악할 수 있는 체계를 제시해야 함
 - ※ (예시) 개발기술 상호간, 성과물 상호간, 개발기술-성과물간 연계성
 - 과학기술적 성과물을 포함하여 최종성과물을 구체화하여 제시해야 함
- 연구신청자는 연구개발 성과목표(성과지표/달성목표치/가중치) 및 사업수행(일정)계획과 이에 대한 관리계획 등을 연구개발계획서에 제시해야 함
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 구체

적 방안을 제시해야 함

※ 과제선정 후 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용

– 제시한 성과지표는 사전검토, 선정평가를 통해 조정(추가) 가능함

○ 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행 실적이 있고, 과제추진 시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장제공 등)이 명확하여야 하며 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함

○ 국제공동연구 또는 전문가 활용방안

– 필요시 관련 기술 해외 선도기관과의 공동연구 추진방안 및 전문가 활용계획을 연구계획에 포함할 수 있음

○ 추후 연구개발계획 등은 수정·보완될 수 있으며, 이에 따라 과제 내 특정 기술개발에 대한 추진방식 등이 변경될 수 있음

– 본 과제의 연구기간은 추후 협약 시 변경될 수 있음

– 전문기관은 필요시 선정된 주관기관(연구책임자)과 협의를 거쳐 연구개발계획서를 수정·보완(연구목표, 내용 및 범위 등을 구체화·명확화)할 수 있음

– 연구추진과정에서 관련기술 환경변화에 따라 연구내용(연구비 포함)이 조정될 수 있음

○ 추진할 과제의 기술성숙도(TRL) 범위를 설정 및 제안하고 전문기관 및 연구단과 협의하여 확정해야 함

○ 연구성과의 실용화 및 사업화 추진계획 제시

– 신청자는 연구성과의 실용화·사업화로 예상되는 기술의 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시

– 실용화·사업화로 예상되는 기술에 대한 기술료 납부 계획 제시

제3절 2세부 RFP

연구과제명	(2세부) 나노소재 활용 시멘트 복합체 제조 기술개발
1. 연구목표	○ (2세부) 건설용 나노소재를 개발·활용하여 경량·고강도·고내구 콘크리트에 적용 가능한 경제성 높은 나노 시멘트 복합체를 개발하고 수화반응 및 구조제어 등을 통해 복합체 성능을 향상
2. 연구 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발 필요성	○ 국내 나노소재 생산기반은 전기, 전자 등과 같은 고부가가치 산업에 치중되어 있어 건설용 나노소재 생산기반은 전무함 ○ 타 분야 산업에서의 나노소재 활용 사례에 따르면, 나노소재는 재료의 역학적 성능, 내구성, 및 기능성의 향상에 매우 큰 기여를 하는 것으로 나타남. 이러한 결과를 바탕으로 다양한 형태의 나노소재를 건설용 재료로 활용하고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있음 ○ 건설용으로 활용될 수 있는 나노소재의 후보 군은 탄소나노튜브 (CNT), 그래핀 (graphene), 나노폴리머, 나노산화물 등이 존재함 ○ 나노 콘크리트 개발을 위해 무기계 결합재가 가지는 화학적 특성에 적합한 건설용 나노소재 개발이 필요하며, 나노소재 가공 기술에 대한 충분한 검토와 적절한 생산기반을 구축하여 이를 해결해야 함 – 일반적으로 타 산업에서 활용되는 나노소재는 높은 수준의 사양을 필요 시 함에 따라 가격이 매우 높은 편임 – 나노소재의 가격 경쟁력이 우선되지 않으면 콘크리트 산업으로의 나노기술 적용은 어려움에 따라 Low-Cost 건설 나노소재 제조 기술 개발은 필수 불가결함 – 나노소재를 재료의 대량 소비가 가능한 건설용 재료로 활용할 경우, 관련 분야 제조업의 매출 상승에 큰 기여를 할 수 있어 우수한 경제적 효과를 기대할 수 있음

- 현재 국내의 나노소재 활용 콘크리트 기술은 기초적 단계로 이는 콘크리트에 활용되는 나노소재와 관련된 요소기술이 충분히 정립되어 있지 않음과 기존 나노소재의 높은 단가에 따른 결과임
 - 나노소재 활용 콘크리트 기술 개발을 위해 나노소재와 콘크리트 기술 간의 정합성을 확인할 필요가 있으며, 나노소재가 가진 성능 및 기능이 콘크리트에 혼입 후에도 충분히 발현 가능한지를 확인할 필요가 있음
 - 기존의 나노소재를 활용하여 나노 콘크리트 기술을 개발하기 위해서는 경제성 검토와 함께 신소재 및 신기술에 대한 수습 기간의 위험성을 고려할 필요가 있으며, 건설 산업에 적합한 나노소재 개발 또한 병행되어야 함
- 현재 대부분의 건설용 나노소재 기술이 국외 기술임을 감안한다면, 향후 국외 의존도는 더욱 높아질 것이 분명하므로, 관련 소재 기술의 확보를 위하여 국산화의 필요성이 매우 큼
 - 나노소재 산업은 정밀(화학)제조업에 속하고 기술의 독점성과 원료 의존성이 매우 큰 경우가 많아 일부 다국적 기업들의 시장 지배력이 강하다는 특징이 있음
 - 유사기술 및 유망기술을 보유한 국내 소재생산 기업의 자립 및 수출 경쟁력 확보 등을 위하여 국가 차원에서 나노소재 개발 기술을 지원할 필요성이 있음
- 나노소재를 콘크리트 기술에 접목시키기 위해서는 나노소재 활용 시멘트 복합체의 재료 설계 및 성능 향상과 관련된 요소기술 개발이 필요함
 - 나노소재가 가진 성능 및 기능을 시멘트 복합체에서 충분히 발현시키기 위해서는 나노소재에 대한 화학적 특성(반응성, 결합성 등), 물리적 특성(소재 크기, 기계적 성질 등)에 대한 체계적인 연구가 필요함

- 나노소재를 활용한 시멘트 복합체의 성능 향상을 위해서는 나노소재를 시멘트에 그대로 혼입하여 배합하는 것만으로는 목표 성능을 얻을 수 없으며, 소재의 물성변화, 화학적 특성 변화 등과 관련된 요소 기술의 검토와 적용이 필요함

□ 기술동향 ○ 국내기술동향

- 건설용 벌크 나노소재 제조 동향과 관련된 연구의 경우 국내는 전무한 상황임
- 최근, 나노소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 기술과 관련한 연구는 증가 추세에 있으나, 나노소재 활용 시멘트 복합체 성능 향상 기술과 관련한 연구는 극소수에 불과하며, 대부분 기초적 연구에 그치고 있는 실정임

○ 국외 기술동향

- 국외에서는 나노소재를 활용한 혼화제 또는 나노 시멘트를 개발하고 시판하고 있음
 - * (독일 BASF 사 : Master X-Seed) 고분자 물질을 활용하여 나노 결정들이 잘 분산될 수 있는 특수 기술을 개발하고, 콘크리트 경화시간을 실온에서 절반으로 줄일 수 있는 나노 촉진제들을 개발하여 시판 중임
 - * (이탈리아 Italcementi 사 : TX Active Arca) TiO₂의 광촉매 특성을 활용하여 건축물 표면에 흡착하는 오염물질을 산화시켜 제거하는 TiO₂ 배합 시멘트를 개발하여 시판 중임
 - * (러시아 Nanotek material 사 : NANO-CEMENT) 포틀랜드 시멘트를 변형시켜 석영 모래, 석재, 산업폐기물 등을 활용한 클링커와 필러 분쇄 시 시멘트 입자 주변에 나노 두께의 고분자 화합물을 코팅한 나노시멘트를 개발하여 시판 중임
- 최근, 나노소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 기술과 관련한 연구는 증가 추세에 있으나, 나노소재 활용 시멘트 복합체 성능 향상 기술과 관련한 연구는 극소수에 불과하며, 국내와 마찬가지로 대부분 기초적 연구에 그치고 있는 실정임
 - * 굳지 않은 시멘트 복합체에 대한 레올로지 검토는 다각도로 이루어지고 있으나, 나노소재 활용 시멘트 복합체에 대한 점성 증가 원인 규명, 유동성 검토, 점성 평가 기법 및 매카니즘에 대한 모델링에 대한 연구는 극소수임

3. 연구내용	
	○ 나노소재 활용 시멘트 복합체 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/수화조직 구조제어 기술 개발 * 경량·고강도·고내구성 콘크리트 제조를 위한 시멘트 복합체 수화최적화 및 미세 구조제어 포함 (3세부 연계) - 나노소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 평가 기술 개발 - 나노소재 활용 시멘트 복합체 수화최적화 기술 개발 - 나노소재 활용 시멘트 복합체 수화조직 구조제어 기술 개발 - 건설용 Low-Cost 벌크 나노 소재 활용 기술 ○ 건설용 Low-Cost 벌크 나노소재 제조 및 활용 기술 개발 - 건설용 나노소재 선정 및 건설분야 요구사항 기준 정립 - 건설용 맞춤형 Low-Cost 벌크 나노소재 생산성 향상 기술 - 건설용 맞춤형 Low-Cost 벌크 나노소재 제조 공정 설계 - 건설용 벌크 나노소재 생산 기술 개발 - 건설용 벌크 나노소재 분산성 확보/평가 기술 개발
4. 연구 추진방법	
□ 추진전략	○ 핵심기술의 연차별 목표 및 성능 수준 등 제시 - 핵심기술 제시 및 그에 따른 연차별 목표를 수립하고, 그에 적합한 연차별 세부 추진전략 및 일정계획, 핵심성과 로드맵(TRL 반영)을 제시할 것 - 연차별 달성목표(마일스톤)를 구체적으로 제시하고 성과평가 방법을 명시할 것 - 연구 목표를 정량적으로 제시 ※ 예) 기존 대비 00% 비용절감, 00% 수준의 성능 향상, 00까지 00% 보급 등 ○ 연구내용, 개발기술, 성과물 간 연계가 표출되도록 기술개발·성과로드맵 및 연차별 성과 평가지표(안) 제시 ※ 단계별/연차별 성과 평가 지표(안)은 향후 단계/중간 평가시 참고 예정 ○ 기존에 수행되었거나 국외 및 국내에서 현재 수행 중에 있는 관련 연구개발결과의 구체적인 연계 또는 통합 활용방안을 연구계획에 포함시켜 추진

- 타 부처 영역과 중복 우려가 있는 연구내용에 대해서는 부처 간의 협력방안 또는 공동 활용방안 등 제시
- 연구개발 성과목표·지표 등을 연구개발계획서에 구체적으로 제시
 - 연구성과물을 수요자 중심으로 구분하여 관리할 수 있도록 명시 (정책/설계사/시공사/설비업체/건축주/감리자/대국민/학술 등)
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 객관적 방안 제시
 - 연구성과의 보급으로 예상되는 기술, 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
 - 제시한 성과지표에 진흥원 관리 공통성과지표가 없거나 부족하다고 판단될 경우, 협약시 조정(추가) 가능
 - ※ 과제선정 후 해당 연구책임자(기관)에 대한 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
- 정부 및 관련 기업·공사 등 기술수요처와 유기적 협조체제 구축
 - 기술수요기관의 충분한 의견수렴을 통하여 실용성 확보
 - 관련 정부부처 및 전문기관과 협의 수행
 - 관련 업계 전문가로 구성된 포럼 등을 구성하여 요구조건 파악
- 기술의 객관성 및 실효성 확보를 위하여 검증시험 등을 수행. 평가단을 구성하여, 공정하고 신뢰성이 있는 결과 도출
- 1, 3세부와의 연계 방안 제시 및 2세부 연구성과물은 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술 개발에 적용

□ 추진체계 연구과제 유형(연구수행체계) : 연구단과제

- 산학연 공동연구로 구성, 원천소재 개발, 평가 및 검증기관 등 풍부한 연구경험과 역량을 극대화 할 수 있는 출연(연), 대학, 관련 민간 기업체를 기술개발 주체로서 구성
- 관련 기술 및 기준 등에 대한 전문가 자문단을 구성·활용하여 연구개발의 기술·정책적 보완사항 확인 및 반영
- 관계부처 및 업계 간 유기적 협의체계 구축을 통한 의견수렴 및 교류 활성화

5. 최종성과물	
세부과제별 최종성과물 ○ 나노소재 활용 시멘트 복합체 재료 설계 및 역학적 성능 극대화를 위한 수화최적화/구조제어 기술 개발 - 시멘트 복합체 활용에 적합한 각종 나노소재 물성 DB 구축 (나노소재의 물리·화학적 특성, 시멘트 복합체 활용 적정성, 물성 비교 평가 DB) - 나노소재 활용 성능평가 기준(안) - 나노소재 활용 시멘트 복합체 수화반응 모델 - 나노소재 활용 시멘트 복합체 미세조직 조직구조 발현 모델 - 나노소재 활용 경량 고강도 시멘트 복합체 제조 가이드라인(안) - 경량·고강도·고내구성 콘크리트용 시멘트 페이스트 배합설계(건설용 벌크 나노소재) ○ 건설용 Low-Cost 벌크 나노소재 제조 및 활용 기술 개발 - 건설용 벌크 나노소재 요구사항 기준(안) - 건설용 벌크 나노소재 생산성 향상을 위한 공정설계(안) - 건설용 벌크 나노소재 생산을 위한 공정 표준화 기술 보고서 - 건설용 벌크 나노소재 제조 가이드라인(안) - 생산단가 20% 이상 절감된 건설용 나노소재 시제품 * 생산단가 20% 절감(초기 개발단계 나노소재 생산단가 기준) - 건설용 벌크 나노소재 활용 경제성 분석 보고서 - 건설용 벌크 나노소재 분산성 평가를 위한 가이드라인(안)	
6. 활용방안 및 기대효과	
	○ 기술적 측면 - 우리나라의 건설 분야는 현재 세계 Top 수준의 기술이 없으므로, 본 기술 확보를 통해 세계 수준의 기술을 보유하는 건설엔지니어링 강국으로 도약 가능하고, 세계 최고기술 확보를 통한 세계적 수준의 톱 브랜드 기술 구축 - 첨단 시멘트계 소재기술, 환경 및 인체영향 평가 기술 개발을 통해 새로운 기술 개척이 이루어짐으로써 원천기술 확보 및 톱 브랜드 창출로 국가 경쟁력 강화를 통한 국민의 자긍심 고취 - 모방형·칸막이형 국가 R&D시스템을 창조형·개방형 R&D 시스템으로 진화시킴으로써 건설산업 분야 국가 R&D시스템을 한 단계 도약시킬 수 있을 것으로 기대

○ 경제·사회적 측면

- 본 기술은 재료개발에 관한 것이 아닌 개발 후 정량평가를 위한 기반 구축을 위한 것으로 이에 대한 단순 시장 경제적 효과를 평가하는 것에는 어려움이 있으나, 간접적인 경제효과로서 기술개발을 통한 수입대체 효과 발생할 것으로 전망
- 나노제품에 대한 과학적이고 체계적인 평가 체계 구축을 통하여 나노제품에 대한 부정적이고 불안한 이미지와 인식을 불식시킬 것으로 기대

7. 연구기간 및 소요예산

○ 총 연구개발기간 : 2020.04 ~ 2023.12 (3년 9개월)

- 1차년도 연구개발기간 : 2020.04. ~ 2020.12.31 (9 개월)
- 2차년도 연구개발기간 : 2021.01.01 ~ 2021.12.31 (12개월)
- 3차년도 연구개발기간 : 2022.01.01 ~ 2022.12.31 (12개월)
- 4차년도 연구개발기간 : 2023.01.01 ~ 2023.12.31. (12개월)

○ 총 정부출연금 : 4,627백만원 이내 (기획평가관리비 제외)

- 1차년도 정부출연금 : 1,153백만원 이내 (기획평가관리비 제외)

※ 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음

※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토교통부소관 연구개발사업 운영 규정”의 기준을 따르되, 추가 부담 가능

※ 연구단과제는 세부과제별로 기업부담금 비율 준수

※ 연구비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소 조정 가능

8. 기 타

○ 본 과제의 보안등급은 “일반 과제”임

○ 연구개발계획서는 과제제안요구서(RFP)에 제시된 연구내용을 참고하여 작성하되, 과제 목적달성을 위해 반드시 필요하다고 판단되는 경우에는 일부 세부내용을 가감할 수 있으나, 그 사유와 근거를 명확히 제시해야 함

○ 필요시 공모된 연구과제명 외에 연구목표·내용에 대한 대표성을 가지고 타 연구과제와 차별화되면서 알기 쉬운 연구과제명으로 수정하여 제안할 수 있음

- 기 수행하였거나 현재 수행 중인 유사과제와 연구내용이 중복되지 않도록 연구개발계획서를 작성해야 함
 - ※ www.kaia.re.kr, <http://rndgate.ntis.go.kr>의 유사과제목록 참조
 - 공모과제와 관련하여 기 수행되었거나 현재 수행 중인 과제의 연구개발결과물과의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구계획에 포함해야 함
 - 제안된 연구내용이 타 유사과제와 연구방법이나 목표 등에서 차별화되는 경우에는 포함하여도 무방하되, 그 근거를 명확히 해야 함
 - ※ 연구개발 수행 도중 과제의 중복성이 사후에 발견되거나 연구개발목표가 다른 연구개발에 의하여 성취되어 연구개발을 계속할 필요성이 없어진 때에는 협약을 해약할 수 있음
- 연구 착수시점 현황과 개발종료 후의 대비가 가능하도록 세부과제별로 As-Is와 To-Be를 구체화·가시화하여 제시해야 함
- 연구개발계획서에 세부과제간 연구내용 및 성과의 연계/활용을 위한 전략을 제시하여야 함
 - 기획보고서에서 제시한 기술개발 TRM을 기반으로 전체 개발기술과 성과물간의 유기적 연계를 파악할 수 있는 체계를 제시해야 함
 - ※ (예시) 개발기술 상호간, 성과물 상호간, 개발기술-성과물간 연계성
 - 과학기술적 성과물을 포함하여 최종성과물을 구체화하여 제시해야 함
- 연구신청자는 연구개발 성과목표(성과지표/달성목표치/가중치) 및 사업수행(일정)계획과 이에 대한 관리계획 등을 연구개발계획서에 제시해야 함
 - 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 구체적인 방안을 제시해야 함
 - ※ 과제선정 후 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
 - 제시한 성과지표는 사전검토, 선정평가를 통해 조정(추가) 가능함
- 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행 실적이 있고, 과제추진 시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장제공 등)이 명확하여야 하며 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함
- 국제공동연구 또는 전문가 활용방안
 - 필요시 관련 기술 해외 선도기관과의 공동연구 추진방안 및 전문가

활용계획을 연구계획에 포함할 수 있음

- 추후 연구개발계획 등은 수정·보완될 수 있으며, 이에 따라 과제 내 특정 기술개발에 대한 추진방식 등이 변경될 수 있음
 - 본 과제의 연구기간은 추후 협약 시 변경될 수 있음
 - 전문기관은 필요시 선정된 주관기관(연구책임자)과 협의를 거쳐 연구개발계획서를 수정·보완(연구목표, 내용 및 범위 등을 구체화·명확화)할 수 있음
 - 연구추진과정에서 관련기술 환경변화에 따라 연구내용(연구비 포함)이 조정될 수 있음
- 추진할 과제의 기술성숙도(TRL) 범위를 설정 및 제안하고 전문기관 및 연구단과 협의하여 확정해야 함
- 연구성과의 실용화 및 사업화 추진계획 제시
 - 신청자는 연구성과의 실용화·사업화로 예상되는 기술의 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
 - 실용화·사업화로 예상되는 기술에 대한 기술료 납부 계획 제시

제4절 3세부 RFP

연구과제명	(3세부) 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발
1. 연구목표	
	○ (3세부) 나노기술 적용 경량 골재 및 나노 공극 제어를 통한 단위용적중량 1.6t/m³, 압축강도 80MPa급 경량·고강도 나노 콘크리트 개발 및 성능시험
2. 연구 필요성 및 기술동향	
□ 연구개발 필요성	○ 콘크리트는 경제성과 재료확보 용이성으로 20세기 이후 가장 보편적인 건설재료로 활용됐으나 최근 재료적 한계로 인해 성능 개선 필요성이 대두됨 - 최근 전통적 건설산업에 4차 산업혁명 기술을 도입한 무인화, 자동화 시공 등 스마트 건설 기술개발이 활발하나 콘크리트 중량이 커 구현에 한계가 존재함 - 전 세계 콘크리트 시장규모는 매년 급격히 확대되고 있으며 기술경쟁력 확보시 국내 건설재료산업에 새로운 성장 모멘텀 마련이 가능함 * 세계 시멘트 시장은 연평균 9.27%성장, '21년 5,608억 달러 시장규모 형성 전망 (Global Cement Market, 2017) ○ 재료는 원천기술 개발부터 상용화까지 장기간이 소요되고 성공 가능성은 낮으나 개발 성공시 신시장 창출 및 시장선점이 가능하여 정부지원이 필수임 - 주요선진국 및 글로벌 건설기업은 건설생산성 향상을 위해 건설 재료 관련 다양한 연구를 추진 중이나 국내 기업의 연구개발 투자는 감소 중임 * '16년 국내 건설 대기업 R&D 투자 '15년 대비 40% 급감(Eu Score Board 2016, Global Top Companies R&D) ○ 콘크리트는 경제적이나 열화, 균열 등 재료적 특성으로 인해 유지 보수 및 개량이 어렵고 폐기물 발생량이 많아 다양한 문제점이 발생함 - 연간 폐기물 중 50%내외가 건설폐기물로 사회적 이슈로 부각하여 세계 각국은 구조물 수명을 획기적으로 연장하기 위한 다양한 재료를 개발 중임 * '16년 전체 폐기물 404천톤 중 건설폐기물 199천톤(환경부)

- 세계적으로 산업화 시대에 다수의 시설물이 철근콘크리트를 활용하여 시공되었으나 노후화로 인한 급격한 유지보수 비용 증가가 사회문제로 대두됨

* 국내 도로 SOC 유지보수예산은 매년 증가추세로 '30년 6조 원을 초과할 것으로 전망 (국내 교통 인프라 유지보수 투자의 향후 변화 추이, 한국건설산업연구원, 2016)

○ 경량 콘크리트의 한계 극복을 위한 첨단기술과의 융합은 차세대 스마트 건설 및 특수 인프라 구조물 기술을 선도할 수 있음

- 경량골재의 낮은 강도와 강성으로 인해 경량 콘크리트의 압축강도 수준은 40 MPa 이하이며, 경량골재와 시멘트 매트릭스 경계면의 낮은 접착성은 콘크리트 열화저항성을 현저히 감소시킴

- 경량 콘크리트의 강도 및 내구성 향상을 위해서는 시멘트 매트릭스와 경량골재들의 경량화 및 이들 재료들의 경계면에서 높은 접착성과 미세균열 제어 그리고 재료들의 적은 단위중량에서 강성과 강도를 향상시킬 수 있는 기술이 요구되는데, 나노소재 활용은 이에 대한 좋은 대안 중의 하나가 될 수 있음

□ 기술동향 ○ 국내 기술동향

- 2000년대 초반부터 나노 콘크리트 관련 연구를 시작하였으며, 주요 나노 소재로는 SiO₂가 주성분인 Nano-SiO₂를 대상으로 함
- 나노소재의 콘크리트 융복합 관련 연구개발은 나노소재의 콘크리트에의 적용성 검토, 나노소재에 의한 콘크리트의 강도 및 성능 향상 등 기초 단계 연구가 산발적으로 추진 중임

○ 국외 기술동향

- 기존 나노소재를 이용한 콘크리트 기술은 주로 탄소기반의 CNTs 활용에 중점을 두고 있으나, 최근에는 CNTs의 대량합성 및 품질 고도화와 다양한 나노소재 활용 콘크리트의 품질향상(고강도 및 내구성 향상) 측면에서의 기술 개발에 초점을 맞추고 있음
- * 나노 실리카, 개질 유황 및 슬래그 재료 활용한 콘크리트 기술 개발, 나노 섬유 활용 콘크리트 강도 증진 및 염해저항성 개선 연구, Al₂O₃, TiO₂ 및 ZrO₂ 등 나노소재 혼합 콘크리트 연구 등

- 유럽에서는 콘크리트에 나노소재를 적용하여 강도 및 내구성을 향상시키는 대규모의 기술개발 프로젝트가 진행 중임
 - * Nano futures(New generation cluster of ETPs operating on nanotechnology) : 나노 기술 활용 지속가능한 발전을 위한 EU 종합 계획(2013~2025, 1,905억원)
 - * NanoHeal(Nano-tailoring organo-mineral materials -Controlling strength and healing with organic molecules in mineral interfaces) : 유기미네랄 재료의 나노화를 통하여 시멘트에 의한 CO2배출 저감을 위한 새로운 시멘트 재료 개발(2015~2018, 52억원, 노르웨이)
 - * CarboBau : CNT 활용 초고강도 콘크리트 개발 (2009~2012, 23억원, 독일)
- 일본은 경량골재를 활용하여 단위중량과 압축강도를 획기적으로 증가시킨 콘크리트를 개발하여 교량 및 고층 빌딩에 적용
 - * '02년에 단위중량 1.8t/m³, 압축강도 40MPa 콘크리트를 개발하여 센다이 북부 3경간 PSC 교량에 적용
 - * '13년 도쿄 하베노 하루카스 빌딩 상부에 1.85t/m³, 압축강도 21MPa의 경량 고강도 콘크리트를 적용하여 하층부 축력을 20% 절감
- Guggenheim Museum과 The Grenland Bridge 등의 랜드마크성 건축물과 토목 구조물에 경량 콘크리트 적용이 꾸준히 이루어지고 있으며 fib 2010은 경량 콘크리트 압축강도 등급을 절건밀도 2.0t/m³에서 80 MPa로 제시하고 있음.
 - * 최근 독일의 팡창점토 골재 제조사인 Leca-S 사에서는 1.9t/m³, 압축강도 60MPa 급의 제조 가능성을 제시함.
- 일부 실리카 활용 경량골재 코팅과 이를 이용한 콘크리트 내구성 향상관련 연구가 시도되고 있으나, 아직 초기단계로 지속적인 연구가 필요한 실정

3. 연구내용

○ 나노기술 활용 고강도·경량 콘크리트 제조를 위한 요소 기술

- 나노임베디드 기반 경량골재 제조 기술 개발
- 마이크로-나노 솔리드 버블 합성 기술 개발

○ 나노기술 활용 고강도·고내구·경량 콘크리트 제조 기술

- 고강도·경량 콘크리트 배합 설계 모델 및 절차 도출
- 고강도·경량 콘크리트 역학적 특성 평가 및 모델 제시
- 콘크리트 내구성 평가 기술

- 나노기술 활용 콘크리트 현장 품질관리 기술 개발

○ 고강도·고내구 경량 콘크리트 구조적 특성 및 설계가이드라인

- 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 부재 성능평가 및 Mock-UP 테스트
- 나노기술 활용 고강도·고내구 경량 콘크리트 시공 및 유지관리 지침 개발
- 기존 콘크리트와 고강도·고내구 경량 콘크리트 접합부 성능평가

4. 연구 추진방법

□ 추진전략

○ 핵심기술의 연차별 목표 및 성능 수준 등 제시

- 핵심기술 제시 및 그에 따른 연차별 목표를 수립하고, 그에 적합한 연차별 세부 추진전략 및 일정계획, 핵심성과 로드맵(TRL 반영)을 제시할 것
- 연차별 달성목표(마일스톤)를 구체적으로 제시하고 성과평가 방법을 명시할 것
- 연구 목표를 정량적으로 제시

※ 예) 기존 대비 00% 비용절감, 00% 수준의 성능 향상, 00까지 00% 보급 등

○ 연구내용, 개발기술, 성과물 간 연계가 표출되도록 기술개발·성과로드맵 및 연차별 성과 평가지표(안) 제시

※ 단계별/연차별 성과 평가 지표(안)은 향후 단계/중간 평가시 참고 예정

○ 기존에 수행되었거나 국외 및 국내에서 현재 수행 중에 있는 관련 연구개발결과의 구체적인 연계 또는 통합 활용방안을 연구계획에 포함시켜 추진

- 타 부처 영역과 중복 우려가 있는 연구내용에 대해서는 부처 간의 협력방안 또는 공동 활용방안 등 제시

○ 연구개발 성과목표·지표 등을 연구개발계획서에 구체적으로 제시

- 연구성과물을 수요자 중심으로 구분하여 관리할 수 있도록 명시 (정책/설계사/시공사/설비업체/건축주/감리자/대국민/학술 등)
- 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 객관적 방안 제시
- 연구성과의 보급으로 예상되는 기술, 경제, 사회·문화적 파급효과

	및 산출근거 제시 - 제시한 성과지표에 진흥원 관리 공통성과지표가 없거나 부족하다고 판단될 경우, 협약시 조정(추가) 가능 ※ 과제선정 후 해당 연구책임자(기관)에 대한 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용 ○ 정부 및 관련 기업·공사 등 기술수요처와 유기적 협조체제 구축 - 기술수요기관의 충분한 의견수렴을 통하여 실용성 확보 - 관련 정부부처 및 전문기관과 협의 수행 - 관련 업계 전문가로 구성된 포럼 등을 구성하여 요구조건 파악 ○ 기술의 객관성 및 실효성 확보를 위하여 검증시험 등을 수행. 평가단을 구성하여, 공정하고 신뢰성이 있는 결과 도출 ○ 1,2 세부와 연계방안을 제시하고 1,2세부 성과물의 3세부의 다기능·경량 하이퍼 콘크리트 기술 개발 적용 방안을 제시
□ 추진체계	연구과제 유형(연구수행체계) : 연구단과제 ○ 산학연 공동연구로 구성, 원천소재 개발, 평가 및 검증기관 등 풍부한 연구경험과 역량을 극대화 할 수 있는 출연(연), 대학, 관련 민간 기업체를 기술개발 주체로서 구성 ○ 관련 기술 및 기준 등에 대한 전문가 자문단을 구성·활용하여 연구 개발의 기술·정책적 보완사항 확인 및 반영 ○ 관계부처 및 업계 간 유기적 협의체계 구축을 통한 의견수렴 및 교류 활성화
5. 최종성과물	
□ 세부과제별 최종성과물	○ (3세부) 경량·고강도 나노 콘크리트 기술 개발 - 기존 대비 내구성 2배 증가(100년 → 200년)되고 중량이 40%이상 감소($2.3\text{t/m}^3 \rightarrow 1.6\text{t/m}^3$)된 80MPa 고강도 콘크리트 - 나노 임베디드 경량골재 시제품 - 마이크로-나노 솔리드 버블 합성기법(안) - 마이크로-나노 솔리드 버블 적용 경량 매트릭스 - 고강도·경량 콘크리트 역학적 특성 모델 - 고강도·경량 콘크리트 배합설계기법(안)

- 나노소재 결합재 기반 시멘트 복합체 내구성능 예측 모델
- 나노소재 결합재 기반 콘크리트 내구성능 예측 모델
- 고내구 기능성 콘크리트 배합설계기법(안)
- 실험실 기반 경량골재-콘크리트 특성 DB
- 실험실 및 현장 배합 콘크리트 특성 DB
- 고강도·고내구 경량 나노콘크리트 구조설계기준(안)
- 고강도·고내구 경량 나노콘크리트 시공지침(안)
- 고강도·고내구 경량 나노콘크리트 유지관리지침(안)
- 부재 및 Mock-Up Test 성능시험 보고서
- 고강도·고내구 경량 나노콘크리트 경제성 분석 보고서

6. 활용방안 및 기대효과

○ 기술적 측면

- 나노 기술이 접목된 첨단 건설재료 기술 개발을 통해 국내외 원천기술 확보 및 해외시장 선점 기반 마련
- R&D 연구를 통한 핵심기술 개발로 건설분야 전반에 걸쳐 새로운 고부가 가치 기술 혁신 유도 가능
- 현재 추진 중인 5G, AI 융·복합 건설기술의 실질적 구현을 위한 경량·다 기능 소재를 제공함으로써 혁신기술의 성공가능성을 재고
- 현재 구조물 설계·시공시 기존 재료의 한계치까지 활용하고 있는 상황으로 재료의 개선을 통해 구조물의 성능향상 및 새로운 패러다임 제시 가능

○ 경제·사회적 측면

- 노후시설물의 유지·보수 비용 절감을 위한 최적의 대안으로 시설물의 획기적 내구수명 확보 가능
- 지진과 같은 자연재난 및 화재와 같은 사회재난으로 인한 피해증가에 따른 구조물 안전성 향상 구현

7. 연구기간 및 소요예산

○ 총 연구개발기간 : 2020.04 ~ 2023.12 (3년 9개월)

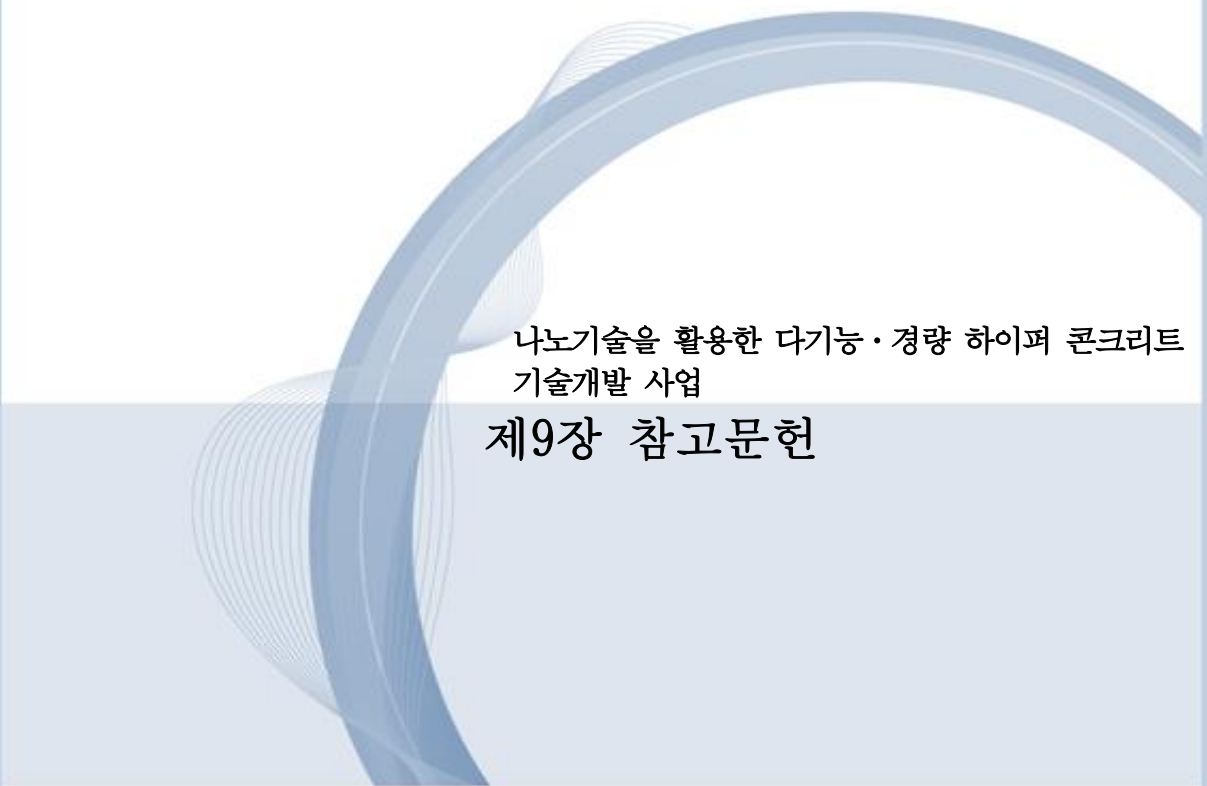
- 1차년도 연구개발기간 : 2020.04. ~ 2019.12.31 (9 개월)
- 2차년도 연구개발기간 : 2021.01.01 ~ 2021.12.31 (12개월)
- 3차년도 연구개발기간 : 2022.01.01 ~ 2022.12.31 (12개월)
- 4차년도 연구개발기간 : 2023.01.01 ~ 2023.12.31 (12개월)

- 총 정부출연금 : 5,747백만원 이내 (기획평가관리비 제외)
 - 1차년도 정부출연금 : 1,153백만원 이내 (기획평가관리비 제외)
 - ※ 정부출연금은 향후 선정평가 결과 또는 정부예산사정 등에 따라 조정될 수 있음
 - ※ 기업참여시 기업부담금은 연차별로 “국토교통부소관 연구개발사업 운영 규정”의 기준을 따르되, 추가 부담 가능
 - ※ 연구단과제는 세부과제별로 기업부담금 비율 준수
 - ※ 연구비에 대한 구체적 산정내역을 제시해야 하며, 예산산정 근거가 불명확하거나 타당성이 부족할 경우 축소 조정 가능

8. 기 타

- 본 과제의 보안등급은 “일반 과제”임
- 연구개발계획서는 과제제안요구서(RFP)에 제시된 연구내용을 참고하여 작성하되, 과제 목적달성을 위해 반드시 필요하다고 판단되는 경우에는 일부 세부내용을 가감할 수 있으나, 그 사유와 근거를 명확히 제시해야 함
- 필요시 공모된 연구과제명 외에 연구목표·내용에 대한 대표성을 가지고 타 연구과제와 차별화되면서 알기 쉬운 연구과제명으로 수정하여 제안할 수 있음
- 기 수행하였거나 현재 수행 중인 유사과제와 연구내용이 중복되지 않도록 연구개발계획서를 작성해야 함
 - ※ www.kaia.re.kr, <http://rndgate.ntis.go.kr>의 유사과제목록 참조
 - 공모과제와 관련하여 기 수행되었거나 현재 수행 중인 과제의 연구개발결과물과의 구체적인 연계·통합 및 활용방안을 연구계획에 포함해야 함
 - 제안된 연구내용이 타 유사과제와 연구방법이나 목표 등에서 차별화되는 경우에는 포함하여도 무방하되, 그 근거를 명확히 해야 함
 - ※ 연구개발 수행 도중 과제의 중복성이 사후에 발견되거나 연구개발목표가 다른 연구개발에 의하여 성취되어 연구개발을 계속할 필요성이 없어진 때에는 협약을 해약할 수 있음
- 연구 착수시점 현황과 개발종료 후의 대비가 가능하도록 세부과제별로 As-Is와 To-Be를 구체화·가시화하여 제시해야 함
- 연구개발계획서에 세부과제간 연구내용 및 성과의 연계/활용을 위한 전략을 제시하여야 함
 - 기획보고서에서 제시한 기술개발 TRM을 기반으로 전체 개발기술과

- 성과물간의 유기적 연계를 파악할 수 있는 체계를 제시해야 함
- ※ (예시) 개발기술 상호간, 성과물 상호간, 개발기술-성과물간 연계성
 - 과학기술적 성과물을 포함하여 최종성과물을 구체화하여 제시해야 함
- 연구신청자는 연구개발 성과목표(성과지표/달성목표치/가중치) 및 사업수행(일정)계획과 이에 대한 관리계획 등을 연구개발계획서에 제시해야 함
- 개발된 기술 및 성과물의 목표수준 달성도를 확인할 수 있는 구체적 방안을 제시해야 함
 - ※ 과제선정 후 진도점검·관리 및 성과평가 등의 근거자료로 활용
 - 제시한 성과지표는 사전검토, 선정평가를 통해 조정(추가) 가능함
- 참여기업은 참여하고자 하는 과제와 관련된 연구 또는 사업 수행 실적이 있고, 과제추진 시 역할(자료·기술조사 또는 제공, 시험시공 현장제공 등)이 명확하여야 하며 연구개발결과를 직접 활용하고자 하는 기업에 한함
- 국제공동연구 또는 전문가 활용방안
- 필요시 관련 기술 해외 선도기관과의 공동연구 추진방안 및 전문가 활용계획을 연구계획에 포함할 수 있음
- 추후 연구개발계획 등은 수정·보완될 수 있으며, 이에 따라 과제내 특정 기술개발에 대한 추진방식 등이 변경될 수 있음
- 본 과제의 연구기간은 추후 협약 시 변경될 수 있음
 - 전문기관은 필요시 선정된 주관기관(연구책임자)과 협의를 거쳐 연구개발계획서를 수정·보완(연구목표, 내용 및 범위 등을 구체화·명확화)할 수 있음
 - 연구추진과정에서 관련기술 환경변화에 따라 연구내용(연구비 포함)이 조정될 수 있음
- 추진할 과제의 기술성숙도(TRL) 범위를 설정 및 제안하고 전문기관 및 연구단과 협의하여 확정해야 함
- 연구성과의 실용화 및 사업화 추진계획 제시
- 신청자는 연구성과의 실용화·사업화로 예상되는 기술의 경제, 사회·문화적 파급효과 및 산출근거 제시
 - 실용화·사업화로 예상되는 기술에 대한 기술료 납부 계획 제시



나노기술을 활용한 다기능·경량 하이퍼 콘크리트
기술개발 사업

제9장 참고문헌

제9장 참고문헌

- 고명진, 전홍찬, 조균형, 최두성 (2015). 주상복합 건물의 투입자재에 대한 LCI DB 구축, 한국생활환경학회지, 22(6), 884-890.
- 고정, 홍기남, 한상훈, 박재규 (2012). 나노 개질유황 콘크리트의 역학적 특성, 한국콘크리트학회 2012년도 가을 학술대회 논문집, 841-842.
- 권혁상, 송남웅 (2013). 나노 안전성 연구에 대한 필요성 및 연구 방향, 화학세계, 2013.03. 12-17.
- 김낙현, 태성호, 김지훈, 이종건 (2016). 건축재료 LCI DB 기반의 공동주택 부위별 환경영향 평가 프로그램 개발 및 적용에 관한 연구, 한국생태환경건축학회, 16(6), 151-157.
- 김낙현, 태성호, 이광수 (2016). 건설재료 환경영향 평가를 위한 LCIA 방법론 분석에 관한 연구, 한국콘크리트학회 2016 가을 학술대회 논문집, 565-566.
- 김미숙, 최경희, 김영훈, 이종협 (2007). 나노물질의 인체 및 환경유해성에 관한 위해성평가 방안의 고찰, 청정기술, 13(3). 161-172.
- 김민, 손민정 (2015). 건설재료의 환경성 평가를 위한 LCI DB 구축, 건축시공, 15(2), 28-34.
- 김진이 (2014). 건설 산업에서 획기적인 나노 기술, <http://www.kosen21.org/>, KOSEN Expert Review, 1-12.
- 김태형, 채창우 (2016). 국내·외 LCI DB를 이용한 콘크리트의 환경부하(CO_2) 배출량 비교, 한국콘크리트학회 2016 봄 학술대회 논문집, 477-478.
- 김현영, 강동훈, 오승재, 주철민 (2016). THz 전자기파를 이용한 나노시멘트 광학물성 측정, 한국비파괴검사학회, 비파괴검사학회지, 36(5). 363-369.
- 나노융합산업연구조합 (2017). 2017 나노융합산업조사, 산업통상자원부, 조사보고서.
- 류수지, 엄아현, 홍예린, 원종필 (2017). 고강도 내화 나노-폴리머 모르타르의 수축 및 동결저항 특성, 한국콘크리트학회 2017년도 봄 학술대회 논문집, 29(1), 213-214.

- 문종욱 (2009). 친환경 경량골재 개발을 통한 난연성 경량 콘크리트 패널의 내장시스템 개발, 소방방재청, 최종보고서.
- 박종구 (2014). 나노기술과 건설산업-건축산업 포함, (재)나노융합2020사업단, 나노기술 산업동향 보고서.
- 신성우 (1999). 산업폐기물활용 고강도 경량콘크리트의 개발 및 실용화연구, 건설교통부, 최종보고서.
- 신재경 (2013). 산업부산물을 활용한 인공경량골재의 개발 및 경량골재 콘크리트의 활용, 청주대학교, 박사학위논문.
- 양근혁, 문재흠 (2012). 콘크리트CO₂ 저감을 고려한 혼화재 및 단위 결합재 양의 설계, 한국콘크리트학회 논문집, 24(5), 597-604.
- 엄하늬, 노진규, 이병천, 박수민, 이종협, 김영훈 (2012). 나노물질의 환경 매질별 노출 사례 조사, 한국화학공학회지, 50(6), 1056-1063.
- 유선희 (2016). 나노기술과 나노소재의 시장 동향, 세라미스트, 19(1). 5-11.
- 윤도경, 최재봉, 김영진, 백승현 (2006). 단일벽 탄소나노튜브의 분산도 정량적 평가, 대한기계학회 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, 11-15.
- 윤혜정 (2011). 나노물질 등 미래수요대비 위해평가 전략 및 기술개발 연구, 식품의약품안전청, 최종보고서.
- 이병태 (2014). 나노물질 함유 제품 노출평가를 위한 기반구축연구, 환경부, 최종보고서.
- 이상복, 정보화, 이진우, 이원오, 엄문광 (2011). 탄소나노튜브 첨가 고분자나복합재료의 정량적 분산도 평가, Polymer, 35(1). 60-65.
- 이종건, 태성호, 김낙현 (2016). 공동주택 그린 리모델링을 위한 외피시스템의 환경영향 DB구축에 관한 연구, 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 36(1), 351-352.
- 이정수, 장경필, 김영진, 박홍용, 권승희 (2017). 동축 레오미터를 사용한 콘크리트 유동특성 평가 시정지 영역의 효과, 한국콘크리트학회 2017년도 봄 학술대회, 29(1), 63-64.

- 이정아 (2014). 환경제조나노물질 (Environmental Engineered Nanomaterials)의 잠재적 위해성 평가기법 개발 : 독성동력학 평가 및 지질항상성에 미치는 영향 평가, 미래창조과학부, 최종보고서.
- 이종협 (2010). 나노물질의 환경노출·영향평가 및 관리 기술 확보, 환경부, 연구보고서.
- 이행기 (2011). 초대형 구조체 적용을 위한 초고강도·경량 건설재료 개발, 미래창조과학부, 최종보고서.
- 임수정 (2015). 나노기술응용제품 등 안전관리 대책 연구, 식품의약품안전청, 최종보고서.
- 장진석, 권일범, 윤동진, 서대철 (2010). 소형 CW Sub-THz 이미징 시스템을 이용한 물체의 비파괴 이미징, 한국비파괴검사학회, 비파괴검사학회지, 30(4). 352-358.
- 조병완, 박종빈, 박종화 (2005). 나노 실리카 분말을 혼입한 콘크리트의 내화성능연구, 콘크리트학회 논문집, 17(2), 247-254.
- 지광석, 하정철 (2012). 신기술의 불확실성과 소비자안전에 대한 고찰 : 나노기술을 중심으로, 한국소비자원, 소비자문제연구, 42, 1-25.
- 최영준, 장봉석, 김조웅, 김유택, 김화중 (2003). EAF-dust, 점토를 이용한 인공 경량 골재 콘크리트 개발 연구, 한국콘크리트학회 2003년도 봄 학술대회 논문집, 31-34.
- 하주현, 신용철, 이승철, Samuel Y. Paik, 김부옥, 최병순, 강동목, 백남원 (2010). 탄소나노튜브 표면 처리 실험실 종사자의 공기 중 나노입자 노출에 관한 연구, 한균환경보건학회지, 36(5), 343-350.
- 허형석, 이성태, 노재호 (2012). 칼슘알루미늄에이트계 급결재와 증점제를 사용한 그라우트의 특성 및 환경영향평가, 한국구조물진단유지관리공학회, 16(4), 122-129.
- 홍용석 (2011). 나노물질의 안전관리를 위한 제도화 방안, 환경부, 최종보고서
- 황유식 (2015). 환경 중 나노물질의 변환에 따른 유해성평가, 환경부, 최종보고서
- A. NajigiviEmail, A. Khaloo, A. Irajizad, S. A. Rashid (2013). An artificial

neural networks model for predicting permeability properties of nano silica-rice husk ash ternary blended concrete, *International J. of Concrete Structures and Materials*, 7(3), 225-238.

- A. H. Shekari, M. S. Razzaghi (2011). Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete, *Procedia Engineering*, 14, 3036-3041.
- Alireza Sassani, Halil Ceylan, Sunghwan Kim, Ali Arabzadeh, Peter C. Taylor, Kasthurirangan Gopalakrishnan (2018). Development of Carbon Fiber-modified Electrically Conductive Concrete for Implementation in Des Moines International Airport, *Case Studies in Construction Materials*, 8, 277-291.
- Alistair Gibb, Wendy Jones, Chris Goodier, Phil Bust, Mo Song, Jie Jin (2017). Nanotechnology in construction and demolition: what we know, what we don't, IOSH, Research Report.
- Andrew D. Maynard & Robert J. Aitken (2007). Assessing exposure to airborne nanomaterials: Current abilities and future requirements, *Nanotoxicology*, 1(1). 26-41.
- Andrew T. Smith, Anna Marie LaChance, Songshan Zeng, Bin Liu, Luyi Sun (2019). Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced grapheneoxide and their nanocomposites, *Nano Materials Science*, 1, 31-47.
- Aschberger K1, Micheletti C, Sokull-Klüttgen B, Christensen FM. (2011). Analysis of currently available data for characterising the risk of engineered nanomaterials to the environment and human health — Lessons learned from four case studies, *Environment International*, 37(6). 1143-1156.
- Ayşin Sev and Meltem Ezel (2014). Nanotechnology Innovations for the Sustainable Buildings of the Future, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 8(8). 886-896.
- B. B. Das and Arkadeep Mitra (2014). Nanomaterials for Construction Engineering-A Review, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2(1). 41-46.

- Bjorn Birgisson, Anal K. Mukhopadhyay, Georgene Geary, Mohammad Khan, Konstantin Sobolev (2012). Nanotechnology in Concrete Materials: A Synopsis, Transportation Research Circular E-C170, Research report.
- Bryan M. Tyson, Rashid K. Abu Al-Rub, Ardavan Yazdanbakhsh, Zachary Grasley (2011). Carbon Nanotubes and Carbon Nanofibers for Enhancing the Mechanical Properties of Nanocomposite Cementitious Materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 23(7). 1028–1035.
- C. D. Atis, C. Bilim, F. Ozcan (2002). The use of a non-standard high calcium fly ash in concrete and its response to accelerated curing, Materiales de Construction.
- Christoph G. Salzmann, Bryan T. T., Chu Gerard Tobias, Simon A. Llewellyn, Malcolm L. H. Green (2007). Quantitative assessment of carbon nanotube dispersions by Raman spectroscopy, Carbon, 45(5). 907–912.
- Cwirzen, A., Habermehl-Cwirzen, K., & Penttala, V. (2008). Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. Advances in cement research, 20(2). 65–74.
- Cwirzen, A., Penttala, V., & Vornanen, C. (2008). Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC. Cement and Concrete Research, 38(10). 1217–1226.
- Dadrasnia, E., & Lamela, H. (2012). Carbon nanostructures properties by terahertz time-domain spectroscopy analysis for nanoengineering applications. Defense + Commercial Sensing.
- D. Kong, X. Du, S. Wei, Z. Hua, Y. Yang, S.P. Shah (2012). Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cement-based materials, Constr. Build. Mater., 37, 707–715.
- Erdogan, S. T. (2005). Determination of aggregate shape properties using X-ray tomographic methods and the effect of shape on concrete rheology (Doctoral dissertation).
- Felekoğlu, B. (2014). Rheological behaviour of self-compacting

micro-concrete. *Sadhana*, 39(6). 1471-1495.

- Ferrara, L., Cremonesi, M., Tregger, N., Frangi, A., & Shah, S. P. (2012). On the identification of rheological properties of cement suspensions: Rheometry, Computational Fluid Dynamics modeling and field test measurements. *Cement and Concrete Research*, 42(8). 1134-1146.
- Ferraris, C. F., Brower, L. E., & Banfill, P. (2001). Comparison of Concrete Rheometers: International Test at LCPC (Nantes, France) in October, 2000. Gaithersburg, MD, USA: National Institute of Standards and Technology.
- F. G. Collins, J. G. Sanjayan (1999). Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate, *Cement Concrete Res.*, 29(4), 607-610.
- Foucault, S., Ascanio, G., & Tanguy, P. A. (2005). Power characteristics in coaxial mixing: Newtonian and non-Newtonian fluids. *Industrial & engineering chemistry research*, 44(14). 5036-5043.
- F. Pacheco-Torgal, Said Jalali (2011). Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials, *Construction and Building Materials*, 25(2). 582-590.
- H. Bessaies-Bey, J. Fusier, S. Harrisson, M. Destarac, S. Jouenne, N. Passade-Boupat, F. Lequeux, J.-B. d'Espinose de Lacaillerie, N. Sanson (2018). Impact of polyacrylamide adsorption on flow through porous siliceous materials: State of the art, discussion and industrial concern, *J. Colloid and Interface Science*, 531, 693-704.
- H. Lamela, E. Dadrasnia, F. Garet et al. (2011). Carbon Nanotube Terahertz Spectroscopy: Study of Absorption and Dispersion Properties of SWNT and MWNT, *Proceedings of SPIE*. 8101-8116.
- H. Li, M. Zhang, J. Ou (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement, *Wear*, 260(11-12), 1262-1266.
- Hu, J., Koleva, D. A., & Van Breugel, K. (2012). Corrosion performance of reinforced mortar in the presence of polymeric nano-aggregates:

electrochemical behavior, surface analysis, and properties of the steel/cement paste interface. *Journal of materials science*, 47(12). 4981-4995.

- IOSH Research Committee (2017). Nanotechnology in construction and demolition-Guidance for industry, IOSH, Research Particle.
- Japan Science and Technology Agency (2015). Nanotechnology and Materials R&D in Japan (2015):An Overview and Analysis, Center for Research and Development Strategy, Research report.
- Japan Science and Technology Agency (2017). Panoramic View of the Nanotechnology/Materials Research Field (2017). Center for Research and Development Strategy, Research report.
- J. M. Makar, G. W. Chan (2009). Growth of cement hydration products on single-walled carbon nanotubes, *J. of the American Ceramic Society*, 92, 1303-1310.
- J. Plank, C. Hirsch (2007). Impact of zeta potential of early cement hydration phases on super-plasticizer adsorption, *Cement Concrete Res.*.
- J. Silvestrea, N. Silvestreb, J. de Britoa (2015). Review on concrete nanotechnology, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, 1-31.
- Kim, J. H., Kwon, S. H., Kawashima, S., & Yim, H. J. (2017). Rheology of cement paste under high pressure. *Cement and Concrete Composites*, 77, 60-67.
- K. Miled, R. Le Roy, K. Sab, C. Boulay (2004). Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode, *Mechanics of Materials* 36(11), 1031-1046.
- Koehler, E. P., & Fowler, D. W. (2004). Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete.
- Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2008). Nanoimaging of highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. In *Seventh Intl. RILEM Symp. on Fiber Reinforced Concrete: Design and*

Applications, Chennai, India (pp. 125-131).

- K. Yang, X. You, J. Wang, K. Vafai (2016). Analysis of two approaches for an adiabatic boundary condition in porous media, *Int. J. Number, Heat Fluid Flow*, 26, 977-998.
- Laila Raki, James Beaudoin, Rouhollah Alizadeh, Jon Makar, Taijiro Sato (2010). Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology, *Materials*, 3, 918-942.
- Lee H., Kang D., Kim J., Choi K, Chung W. (2019). Void detection of cementitious grout composite using single-walled and multi-walled carbon nanotubes, *Cement and Concrete Composites*, 95, 237-246.
- L. P. Singh, A. Goel, S. K. Bhattacharyya, S. Ahalawat, U. Sharma, G. Mishra (2015). Effect of nanosilica on chloride permeability in cement mortar, *Adv. Cem. Res.*, 27, 399-408.
- Maekawa, K., Ishida, T., & Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(2). 91-126.
- Maekawa, K., Ishida, T., & Kishi, T. (2008). Multi-scale modeling of structural concrete. Crc Press.
- Mani.M and Dr. G. Nandini Devi (2017). Study on behaviour of nano concrete, *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science*, 6(5). 239-244.
- M. Ipperico, G. Ferro, S. Musso, J. M. Tulliani, Tagliaferro (2009). Calcestruzzo autocompattante nanorinforzato (CNTSCC): proprietà meccaniche e potenzialità, *A. Atti del 20° Convegno Nazionale del Gruppo Italiano Frattura (IGF)*, Torino, Italy, 103-112.
- M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, S. P. Shah. (2010), Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials, *Cement and Concrete Research*, 40, 1052-1059.
- M.S. Muhd Norhasri, M.S. Hamidah, A. Mohd Fadzil (2017). Applications of using nano material in concrete: A review, *Construction and Building Materials*,

133, 91-97.

- Peter J. M. Bartos (2009). Nanotechnology in construction: a roadmap for development, *Nanotechnology in Construction* 3, 15-26.
- P. H. Kaar, N. W. Hanson, H. J. Capell (1977). Stress-strain characteristics of high-strength concrete, Portland cement association, Research and Development Bulletin, RD. 051.01 D.
- Powers KW, Brown SC, Krishna VB, Wasdo SC, Moudgil BM, Roberts SM. (2006). Research strategies for safety evaluation of nanomaterials. Part VI. Characterization of nanoscale particles for toxicological evaluation. *Toxicol Sci.*, 90, 296-303.
- P. Seabrook, H. S. Wilson (1988). High strength lightweight concrete for offshore structures, *International Journal of Cement and Composites and Lightweight Concrete* 10(3).
- Roussel, N. (Ed.). (2011). *Understanding the rheology of concrete*. Elsevier.
- Savolainen K., Alenius H., Norppa H., Pylkkänen L., Tuomi T., Kasper G. (2010). Risk assessment of engineered nanomaterials and nanotechnologies—A review. *Toxicology*, 269, 92-104.
- Shah, S. P., Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Mondal, P. (2009). Nanoscale modification of cementitious materials. *Nanotechnology in Construction* 3, 125-130.
- S. H. Ahmad, R. Barker (1991). Flexural behavior of reinforced high strength light concrete beams. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(1), 69-77.
- S. Kawashima, J. Kim, S. P. Shah (2012). Study of the mechanisms underlying the fresh-state response of cementitious materials modified with nanoclays, *Constr. Build. Mater.*, 36, 749-757.
- T. A. Holm (1980). Physical properties of high strength lightweight-aggregate concrete, 2nd International Congress of Lightweight Concrete, London, 10.
- Thomas K, Aguar P, Kawasaki H, Morris J, Nakanishi J, Savage N. (2006).

Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part VIII: International efforts to develop risk-based safety evaluations for nanomaterials, *Toxicol Sci.*, 92(1). 23-32.

- T. Zhang, O. E. Gjorv (1994). An Electrochemical method for diffusivity in concrete, *Cement and Concrete Research*, 24, 1757-1602.
- Uzomaka, O. J. (1974). A concrete rheometer and its application to a rheological study of concrete mixes. *Rheologica Acta*, 13(1). 12-21.
- Y. Zhou, A Hu, M. I. Khan, W. Wu, B .Tam and M. Yavuz (2009). Recent progress in micro and nano-joining, *Journal of Physics: Conference Series* 165.
- <https://www.linkedin.com/pulse/multiscale-analysis-carbon-nanotube-reinforced-mehdi-eftekhari> (Mason, 2016)