

지속가능 콘크리트 현황 및 미래

The Development Status and the Future Research Trend of Sustainable Concrete



이한승*
Han-Seung Lee



신성우*
Sung-Woo Shin



태성호*
Sung-Ho Tae

1. 서 언

현재 전 세계는 개발을 지속하면서도 생태적 수용능력을 확대하기 위하여 경제적 측면, 사회적 측면, 환경적 측면을 동시에 고려하는 지속가능개발의 개념에 근거하여 저탄소, 녹색성장으로 산업을 전면 개편하고 있다. 특히 선진국들은 자원에너지 확보와 병행, 자원이용-환경오염 최소화를 국가경쟁력의 원천으로 인식, 녹색산업-녹색기술을 새로운 성장엔진으로 하여 국력을 집중(green race)하고 있으며, 우리나라는 ‘녹색기술(green technology)’ 개발을 국가 경제의 새로운 성장 패러다임으로 설정하여 녹색기술, 그린에너지, 지속가능 산업에 막대한 R&D 비용을 투자하고 있다. 이러한 움직임은 건설기술에도 접목되어 지구온난화의 주범인 이산화탄소(CO₂)를 저감하면서도 삶의 질 향상을 목표로 첨단기술과 융합한 신소재 및 신공법 개발에 온 힘을 쏟고 있다. 또한, 최근 미국 국가정보위원회(NIC: national intelligence council)에서 발표된 보고서에서 2025년까지 다양한 분야에서 미국의 국가 경쟁력에 영향을 미칠 수 있는 6대 와해성 기술(disruptive technology)분야를 선정하여 발표하였는데, 이 중에서도 에너지 저장소재, 바이오 연료, 청정 석탄기술 등 지구환경을 지속가능한 개발을 목표로 하는 것에 초점을 맞추고 6T 기술 등과 접목한 융합연구(convergence)를 추진하고 있다.

이렇듯 전 세계는 지속가능개발, 친환경, 녹색산업 등을 키워드로 하여 산업을 재편하고 있으며 연구개발에 온 힘을 쏟고 있다. 이러한 측면에서 건설 산업의 쌀인 콘크리트는 과연 미래에 어떤 모습으로 이러한 지속가능개발

시대에 중추적인 역할을 할 것 인가? 또한, 어떠한 종류의 콘크리트가 지속가능한 미래를 충족시킬 꿈의 콘크리트가 될 것 인가? 이러한 의문에 대하여 필자는 본 고에서 지속가능성과 친환경성을 견인할 미래 콘크리트에 대하여 개괄함과 동시에 이를 실현하기 위한 연구방향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 지속가능성에 초점을 맞춘 꿈의 콘크리트

지금까지 시멘트-콘크리트의 대량사용은 지구환경과의 조화를 이루기 어려운 점만 부각되었으나 근간의 시멘트-콘크리트 기술 진보에 따라 환경 분야에의 개선점들이 높이 평가되고 있다. 이러한 시멘트-콘크리트 산업관련 환경 분야의 주요테마<그림 1>는 ① 구조체 장수명화 기술, ② 구조물 환경조화 기술, ③ 지구환경부하 저감 기술, ④ 극한환경 구조물 축조기술 등으로 대별되며 <표 1>에 그 개요를 나타내었다.

이와 같이 시멘트-콘크리트산업에 있어서의 지속가능성은 과

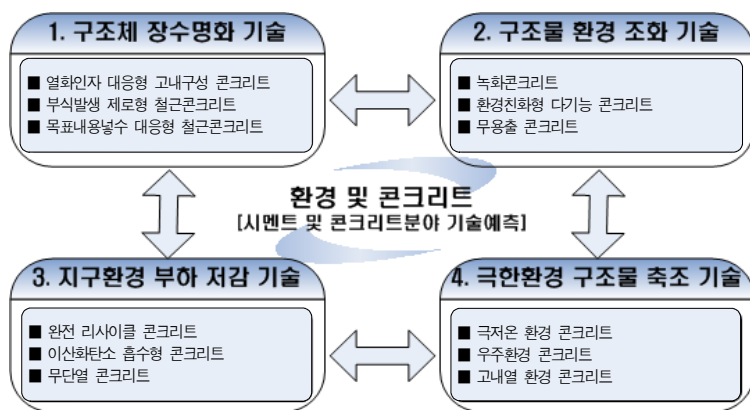


그림 1. 지속가능 시멘트-콘크리트기술 사례

* 정회원, 한양대학교 건축학부 교수
ercleehs@hanyang.ac.kr

표 1. 지속가능 시멘트-콘크리트 개발 과제 예

Needs	Issue	시멘트-콘크리트의 지속가능 관점 개발 과제
1. 구조체 장수명화 기술	구조물 내구성능 확보 기술	1-1. 각종 열화인자에 대응한 고내구성 콘크리트 제조 및 평가기술 확립 1-2. 철근콘크리트 구조물에 철근부식이 발생하지 않는 기술 개발 1-3. 목표내용연수 대응형 철근콘크리트 구조물의 내구성 설계 수법 개발
2. 구조물 환경조화 기술	친환경 콘크리트 기술	2-1. 녹화 콘크리트 기술적용 확립 2-2. 환경친화형 다기능 콘크리트 기술 실용화 2-3. 무용출 콘크리트가 개발
3. 지구 환경부하 저감 기술	환경부하 저감 콘크리트 기술	3-1. 완전 리사이클 콘크리트 개발 3-2. 이산화탄소 흡수형 콘크리트 개발 3-3. 무단열 콘크리트 개발
4. 극한환경 구조물 축조 기술	극저·고내열 콘크리트 및 우주환경 콘크리트	4-1. 극저온 환경 콘크리트 기술 개발 4-2. 우주환경 콘크리트 기술 개발 4-3. 고내열 콘크리트 기술 개발

학적·공학적 접근에 의한 기술혁신만이 미래를 보장할 수 있는 것은 명확한 일이며, 시멘트-콘크리트 기술의 개발은 구조체 장수명화 기술, 구조물 환경조화 기술, 지구환경 부하저감 기술, 환경대응 구조물 기술 등을 종합하여 발전해야 한다고 판단된다. 이하에 지속가능성을 실현하기 위한 꿈의 콘크리트를 간략하게 소개하면 다음과 같다.

2.1 광합성형 지속가능콘크리트(CO₂ 대량흡수 콘크리트)

시멘트를 제조할 때 발생하는 CO₂는 기후변화협약의 채택과 더불어 새로운 환경문제로 대두되고 있고 시멘트 1kg을 제조할 때 각국의 연구결과에 따라 다르지만 약 0.85 kg - CO₂/kg 정도

가 발생한다고만 인식되고 있으며, 시멘트 산업에서 CO₂ 수지 계산의 문제점은 시멘트 제조과정에서 발생하는 CO₂에만 국한되어 있다는 점이다. 즉 발생원만 산정되고 시멘트의 산업부산물이나 폐연료의 재활용에 따른 CO₂ 감소분이나 고로 슬래그 및 플라이 애쉬 등의 혼합시멘트의 사용에 따른 수지율은 전혀 고려하지 않고 있다. 시멘트는 레디믹스트콘크리트로 제조되어 콘크리트 구조물을 형성하는데 콘크리트 구조물은 콘크리트를 구성하는 수화생성물이 CO₂를 흡착하여 탄산화하며, 또한 구조물의 사용기간이 길어질수록 탄산화 깊이도 증가하여 흡착하는 양도 많아진다<그림 2>. 하지만 시멘트 산업에서의 CO₂ 수지계산은 생산된 시멘트가 구조물을 생성하여 다시 대기 중의 CO₂를 화학적으로 흡착하는 탄산화에 대해서는 전혀 고려하지 않고 있다.

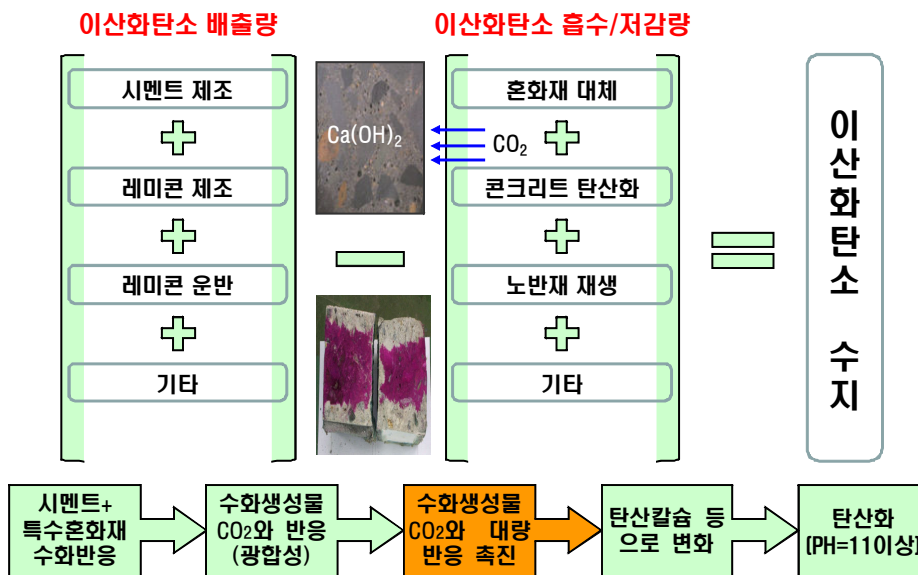


그림 2. 시멘트콘크리트의 이산화탄소 수지 산정 흐름

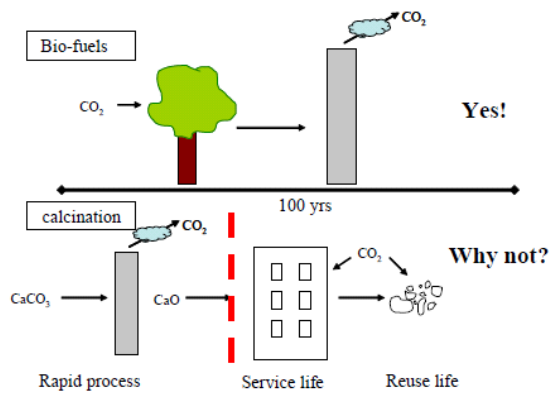


그림 3. 시멘트콘크리트의 CO₂흡수(광합성) 효과 개념

따라서 시멘트-콘크리트산업에 있어서 CO₂를 대량흡수하면서도 중성화되지 않아 철근의 부식발생이 없다던가 하는 꿈의 광합성 콘크리트를 제조하는 것이 가능하다면 CO₂에 의한 지구온난화 문제를 시멘트-콘크리트산업에서 상당부분 해결할 수 있는 지속가능한 콘크리트의 개발과 사용이 가능하다고 판단된다<그림 3>.

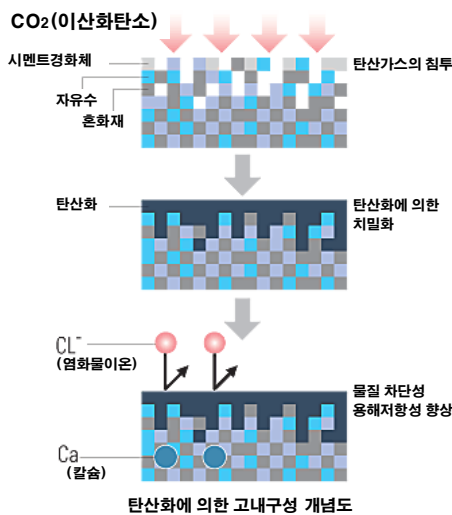
2.2 1만년 초내구성형 지속가능 콘크리트

최근 중국 서안시의 교외에 있는 대지완 유적에서 고대 로마의 것과 유사한 약 5천년전의 콘크리트가 발굴되었다고 하며, 그것도 원형을 거의 유지한 상태로, 이 놀라운 내구성의 비밀은 콘크리트의 탄산화반응으로 파악되고 있다. 현대 콘크리트의 수명은 약 100년, 건설공사에 사용되고 있는 일반적인 콘크리트는 지하수에 장기간 노출되면 표면에서 칼슘성분이 용출되어 열화가 진행된다고 알려져 있으며, 이 때문에 구조물의 유지보수가 필요하다. 그러나 중국에서 발굴된 콘크리트의 많은 것은 탄산칼슘의 작용으로 표면이 대리석처럼 매끄럽고 물 등에 의한 내부의 침식을 방지했다고 한다.

이 원리를 응용하여 일본의 건설회사는 신개념 콘크리트 (EIEN: 영원이라는 뜻)를 개발하였으며, EIEN은 콘크리트에 특수재료를 혼합시켜 표면을 탄산이온과 반응시키는 것으로 매우 치밀한 콘크리트 표면을 만드는 것이다. 이 매끄러운 표면이 지하수나 염분의 침투를 방지하고 콘크리트의 내구성을 향상시키는 것이다<그림 4>.

한편 그 추정수명은 1만년으로 가혹한 환경에 놓인 교각이나 지하구조물 등의 보수회수를 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 알칼리도가 낮은 중서에 가깝기 때문에 자연환경에 친하고 생물과의 공존에도 적합하다고 한다. 특히 EIEN에서 1만년 수명을 추정할 수 있었던 것은 중국의 발굴조사에서 얻어진 고대 콘크리트를 비롯해 오랜 기간 경과한 콘크리트에서 데이터를 수집하여 해석하는 수법이 확립되었기 때문이다. 이것에 의해 높은 정밀도로 단기간에 1만년 예상되는 모습을 파악할 수 있게 되었다.

우리가 잘 알고 있는 일반적인 콘크리트 역사는 200년에 지나지 않고 금회의 해석수법이 확립되기까지 수명 1만년은 미지의 세계였다. 그러나 이 성과에 의해 콘크리트 내구성을 추적하는 길이 한순간에 열렸다. 이름대로 EIEN(영원)의 사회 인프라가



- 5000년전 중국에서 제조된 콘크리트의 고내구성 검토
- <EIEN>은 콘크리트에 특수 혼화재를 혼합하여 표면을 탄산이온과 반응시켜 고내구성 피막을 형성 수분, 염소이온, 탄산가스 이온 침투를 억제 고내구성을 실현
- 촉진 실험결과, 10000년의 수명을 가지고, 보수회수를 극단으로 감소시키며, 표면은 거의 중성으로 친환경적이며, 생물과 공존 환경 제공

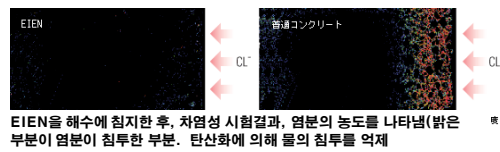


그림 4. 1만년 내구수명의 지속가능 품의 콘크리트 개념 및 적용 사례³⁾

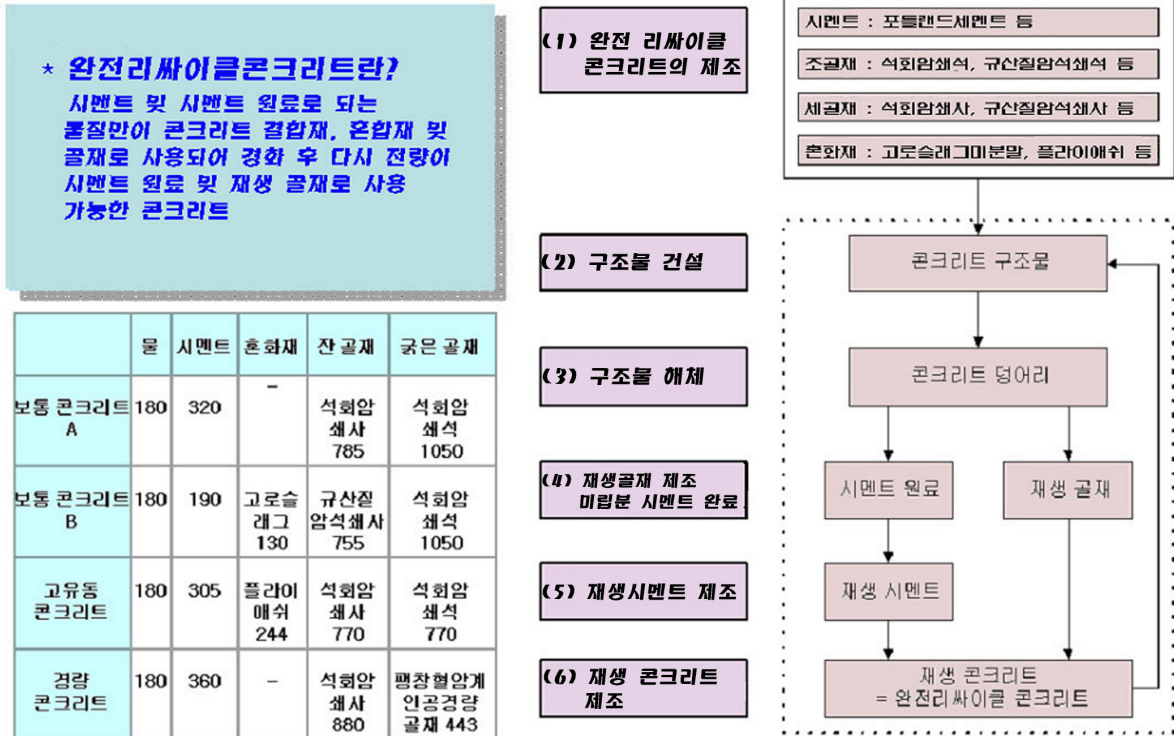


그림 5. 완전리사이클콘크리트의 배합표 및 Material Flow

탄생할 날도 그다지 멀지 않았다고 판단된다.

2.3 완전 리사이클형 지속가능 콘크리트⁷⁾

완전 리사이클 콘크리트는 일본 동경대학 건축학전공 건축재료 및 시공연구실의 토모사와 후미노리(友澤史紀)교수에 의하여 처음으로 제안된 것으로 '시멘트 및 시멘트 원료로 되는 물질만이 콘크리트의 결합재, 혼합재 및 골재로서 사용되어 경화후 다시 전량이 시멘트 원료 및 재생골재로서 사용 가능한 콘크리트'를 말한다. <그림 5>에 나타낸 바와 같이 완전 리사이클 콘크리트의 재료적 흐름은 폐쇄된 체계로 구성되며, 완전 리사이클 콘크리트에 사용할 수 있는 재료는 <표 2>와 같다. 이들 재료를 적절히 조합하는 것에 의해 <표 2>와 같은 여러 가지 완전 리사이클

콘크리트를 제조하는 것이 가능하며, 가장 단순한 조합으로서는 석회암을 원재료로 한 쇄석과 쇄사를 굵은 골재와 잔 골재로 사용한 경우이다. 또한 종래의 콘크리트를 완전 리사이클 콘크리트로 순차적으로 바꾸어 가는 경우, 장래 콘크리트의 자원환경 문제는 해결되리라고 판단되며 현재 이러한 콘크리트는 실험단계를 넘어 일부 실용화 단계에 접어들고 있다. 이에 따라 국내에서의 골재부족 문제를 고려하면 완전 리사이클 개념을 도입한 신개념의 지속가능 콘크리트에 관한 연구가 요청된다고 하겠다.

2.4 환경배려형 지속가능 콘크리트

기존 콘크리트는 건조물의 안전성을 중시하는 한편, 자연환경에 대하여는 반드시 충분한 배려가 있다고 말하기는 어렵다. 그

표 2. 완전 리사이클 콘크리트에 사용 가능한 재료

분 체	시멘트, 고로 슬래그 미분말, 플라이 애쉬, 실리카질 분말, 실리카 폼, 석회석 미분말
잔 골재	석회석 쇄사, 규산질 암석 쇄사, 규사, 고로 슬래그 잔골재, 팽창 혈암계 인공 경량 잔골재, 플라이 애쉬 소성 잔 골재, 동슬래그 쇄사, 웨로니켈 슬래그 잔 골재
굵은 골재	석회석 쇄석, 규산질 암석의 쇄석 또는 자갈, 점판암의 쇄석 또는 자갈, 고로 슬래그 굵은 골재, 팽창 혈암계 인공경량 굵은 골재, 플라이 애쉬 소성 굵은 골재

러나 자연의 섭리를 잘 파악하고 환경에 적응한 지속가능한 콘크리트의 개발이 급속하게 진전되고 있다. 최근에 흠에 근접한 Wet 콘크리트는 흠과 동등한 흡수, 보수, 증발산을 갖추고 있으며, 보통 콘크리트 배합재료에 식물섬유를 첨가하여 흡수, 보수, 증발산, 포관작용이 있다. 더욱이 Wet 콘크리트의 기능을 발전시킨 소프트 콘크리트는 Wet 콘크리트를 초경량화시킨 것으로 현재는 건물의 옥상에서 시험적으로 사용되고 있으며, 표면에 도료를 칠하면 물의 증발산을 방지하여 빌딩내의 온도 상승을 억제하는 효과가 있다. 또한 뒷면에 바르면 보수성을 발휘하여 옥상에서 우수의 낙하를 늦게 하는 효과가 있다. 한편 골재의 입경을 종래형의 포러스 콘크리트의 2~4배로 하는 것으로 콘크리트내부에 통상의 약 2배 크기의 포러스(구멍, 공극)의 생성된다. 내부 공극을 증가시키는 장점은 2가지로 우선 식재의 생육에 적합한 흠을 공극에 충전시킬 수 있다는 것이다. 공극 내에서 부식한 흠은 비옥한 토양으로 되고 더욱이 콘크리트에서 용출된 알칼리성분의 영향을 받아 생태계에도 우수하다. 다른 하나는 공극이 크면 식물의 뿌리를 길게 하기 쉽고 식생의 정착에 도움이 된다. 더욱이 지렁이 등의 토양 동물이 생식할 수 있어 안전한 환경이 만들어지게 된다. 한편 지금까지의 콘크리트 호안은 생물에 있어 살기 쉬운 장소는 아니었다. 요철이 없고 하얗기 때문에 빛 반사가 강하고 은신 장소도 없는 균일한 호안은 생물의 생활공간을 소실시켰다. 게 혹은 개구리 패널은 호안이나 벽면에 사는 생물을 대상으로 개발된 것으로 돌 쌓기의 기능을 재현한 패널에는

게와 개구리가 좋아하는 요철이나 몸을 숨기는 줄눈, 빛 반사를 억제하는 색조, 그리고 동면을 위한 뒷 공간 통로구멍이 있다. 게와 개구리는 식물연쇄의 매우 필요한 동물로 그들에게 안전한 생활공간을 콘크리트 패널로 제공한 결과, 호안 및 육지지역의 식생연쇄를 수복하고 다양한 생물을 불러 모았다(그림 6).

3. 지속가능 꿈의 콘크리트 연구 방향

3.1 전생애 콘크리트 성능평가(life cycle concrete) 시스템 구축

필자는 콘크리트를 전공하는 연구자로서 보다 깊이 있는 지속가능한 연구를 위하여 시멘트공학의 도움이 절실히 요청된다. 예를 들면 시멘트 입도분포 측정, 시멘트 미소 수화열 측정, 시멘트 화합물 정량분석, 공극구조 측정 등은 <그림 7>에 나타난 바와 같이 콘크리트가 태어나서부터 소멸되기까지의 Multi-Scale Modeling of Concrete Performance의 이론을 과학적-공학적으로 검증하는데 필수 불가결하다. 그러나 콘크리트 연구자에게 고가의 분석장치를 구입할 여유가 없는 반면에 시멘트 관련분야에서는 이러한 고가 장비를 이미 갖추고 있으므로 시멘트 연구자 및 콘크리트 연구자가 공동연구협업체를 구성하여 보다 근본적인 연구를 추진하고 이를 현장에 적용한다면 시멘트-콘크리트 분야의 연구는 지속적으로 발전될 것으로 판단되며, 관련 분



식물섬유를 첨가한 소프트콘크리트 표면은 흠에 가깝고 한손으로 들을 수 있을 정도로 경량인 것이 특징임.

(단면 비교), 종래의 포러스콘크리트(오른쪽)와 비교하면, 환경배려형(왼쪽)의 공극(녹색 부분) 크기는 확연히 큼

Wet 콘크리트를 초경량화 한 소프트콘크리트는 빌딩의 옥상에서 온도를 낮추는 패널로서 시험적용 되고 있음

패널의 표면은 요철이 많이 있어, 게나 개구리 등이 서식하기 쉬운 환경을 제공하고 있음

그림 6. 환경배려형 지속가능 콘크리트의 개발 및 적용 사례⁹⁾

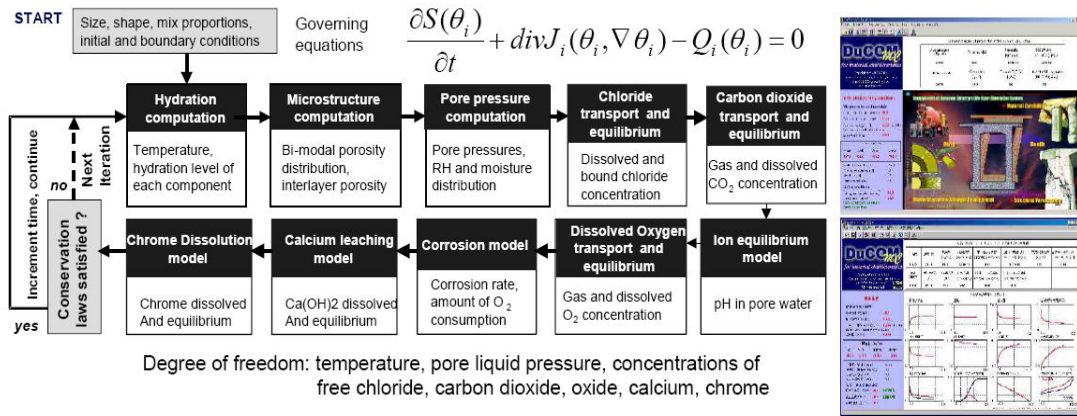


그림 7. 시멘트-콘크리트의 생애주기적 Multi-Scale Modeling 연구 사례¹⁰⁾

야의 지속가능성을 위한 성장 동력 분야를 찾아낼 수 있을 것이라 생각하고 있다. 특히 시멘트산업이 제조와 판매로써 모든 역할을 다 했다는 것은 지속가능성을 추구하는 콘크리트 구조물에 있어서는 근본적인 해결책을 제공하고 있지 못하므로 콘크리트 구조물의 생애주기적 관점에서 상호협조가 무엇보다도 중요하다고 판단된다. 최근의 시멘트-콘크리트산업을 둘러싼 환경문제는 생애주기 관점에서 시멘트-콘크리트 본질의 메커니즘을 정확히 평가하고 예측하는 과학적-공학적인 연구를 통하여 명쾌한 답을 줄 수 있다고 판단되어 이에 관한 연구가 절실히 요청된다고 하겠다.

3.2 6T기술과 접목한 신개념 콘크리트 개발

최근에 이른바 6T기술(NT/BT/IT/ET/ST/CT)이 눈부신 발전을 거듭하고 있는 동안 건축분야는 아직 기존의 기술과 방식에 의지하고 있는 것이 실정이다. 특히 우리나라가 두각을 나타내는 NT, BT, IT 등을 시멘트-콘크리트분야에 접목시켜 지속가능한 신개념의 구조재, 마감재개발 등 고성능/고기능 건축재료의 개발과 이를 통한 환경부하 제로를 구현하는 공생형 건축기술의 실현은 요원한 일만은 아닌 것이다. 현재 국내에서는 NT/BT를 융합한 건설마감재 개발을 위하여 국토해양부 과제인 건설기술

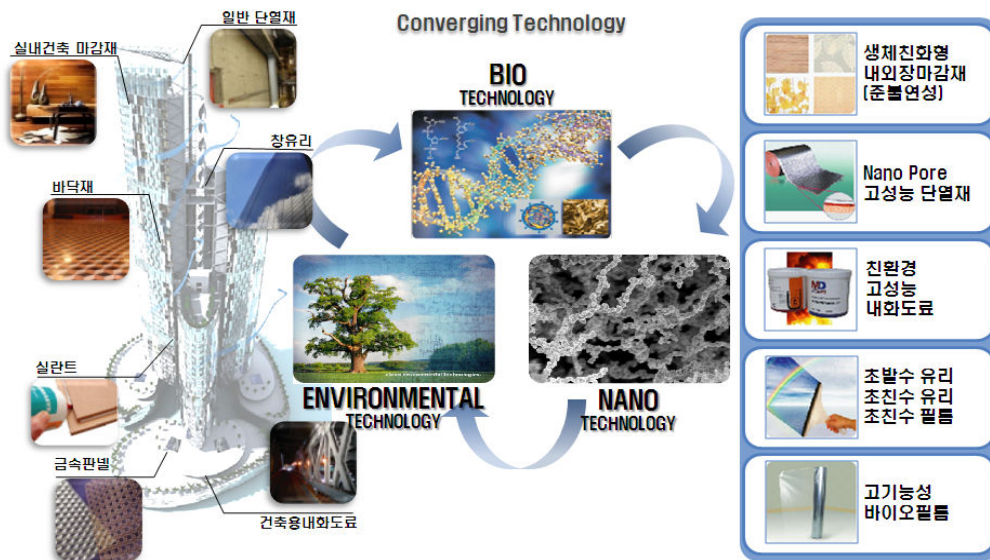


그림 8. 『바이오/나노 기술을 활용한 자연친화적 건설 신마감재 개발』 사업단 개요¹¹⁾

혁신사업 『바이오/나노 기술을 활용한 자연친화적 건설 신마감재 개발』이 출범하여 활동하고 있다. 사업단에서는 기존의 건축 마감재의 재료성능 한계를 극복하기 위하여 바이오기술(BT), 환경기술(ET) 및 나노기술(NT)을 융합한 친환경 건축마감재 개발을 목적으로 하여 BT와 NT기술을 활용한 건축마감재의 원천 기술 개발과 대량생산체제 구축, 나아가 이들 마감재를 실제 건축물(test-bed)에 적용하여 소재 레벨, 제품 레벨, 주택 레벨에서의 친환경성능 평가를 통하여 신규개발 마감재의 완전 실용화를 도모하고자 하였다. 동 연구단은 국내 건축마감재산업의 지속 가능한 개발시스템 구축, 건축 산업 국제경쟁력 제고 및 국민 삶의 질 향상을 기대할 수 있다고 판단되며 주요 연구 내용은 <그림 8>과 같다. 따라서 시멘트콘크리트분야도 이와 같이 6T기술을 접목한 지속가능 한 꿈의 콘크리트 연구개발이 진행되어야 하겠다.

4. 결 언

콘크리트는 미래의 지속가능개발 시대에서 과연 어떤 모습으로 중추적인 역할을 할 것 인가? 또한 어떤 종류의 콘크리트가 지속 가능한 미래를 충족시킬 꿈의 콘크리트가 될 것 인가?라는 질문에 대하여 지속가능성과 친환경성을 견인할 미래 콘크리트에 대하여 개발함과 동시에 이를 실현하기 위한 연구방향에 대하여 고찰하였다. 지속가능 콘크리트는 구조체 장수명화 기술, 구조물 환경조화 기술, 지구환경부하저감 기술, 극한환경 구조물 축조기술에 사용되기 위하여 이산화탄소 대량흡수 콘크리트, 1만년 초고 내구성 콘크리트, 완전 리사이클 콘크리트, 환경배려형 콘크리트 등으로 개발되어 적용될 것이다. 또한 이러한 지속가능 콘크리트를 구축하기 위해서는 시멘트 콘크리트를 전생애적 관점에서 평가하는 시스템의 구축 중요성과 함께 6T기술을 접목한 신개념의 시멘트 콘크리트 개발이 그 견인역할을 할 것으로 예측된다. □

참고문헌

1. 이산화탄소 저감 및 처리기술 워크샵 자료집, 2003년 이산화탄소 저감 및 처리기술 개발 사업단.
2. 콘크리트 코리아 연구단, '고성능다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술' 중간보고서, 건설핵심기술연구개발사업 제1차년도 중간보고서, 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 2007.
3. 한국콘크리트학회, '시멘트 및 콘크리트 기술 예측', 한국양회공업협회, 2006. 3.
4. 이한승, 강인석, 정해문, 안태송, '중성화 예측 및 LCC 평가를 통한 콘크리트 구조물의 최적 보수공법 선정', 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집. Vol.17, No.2. 2005.11 pp.511 ~ 514.
5. 한국콘크리트학회, 21세기 콘크리트 기술, 2001. 5.
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트학회지(특집 신기능 콘크리트), Vol. 10, No.6, 1998. 12.
7. 友澤史紀, 野口貴文, 完全リサイクルコンクリート, 콘크리트工學, Vol.35, No.7, 1997. 7, pp.57 ~ 60.
8. (社)日本コンクリート工學協會, 新機能高性能に挑戦するコンクリート, 콘크리트工學, Vol.36, No.1, 1998. 1.
9. 일본 가지마건설기술연구소 홈페이지, 2009. 2.
10. Koichi Maekawa, 'Multi-Scale Modeling of Concrete Performance - Intergrated material and Structural Mechanics', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003. 7.
11. 「바이오/나노 기술을 활용한 자연친화적 건설 신마감재 개발 사업단」 보고서, 2008.9.

담당 편집위원 :
권기주(한국전력공사 전력연구원) kyeunkjoo@kepco.co.kr

<http://www.kci.or.kr>

KOREA CONCRETE INSTITUTE