

## 탄소저감형 콘크리트 기술 개발 현황

CO<sub>2</sub> Reduction Technology for Concrete



이한승\*  
Han-Seung Lee

### 1. 머리말

2007년 11월에 발표된 제4차 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 발표에 따르면 지난 100년(1996~2005년)간의 전 지구평균온도는 0.74°C 상승하여 폭염 발생 및 호우 발생 빈도가 심각한 수준이며, 현재 상태로 전 지구 온실가스(GHG)를 배출한다면 21세기 말에는 지금보다 지구 온도가 최대 6.4°C, 해수면은 최대 59cm 상승하고 2005년 379ppm인 CO<sub>2</sub> 농도가 2090년에는 최대 790ppm까지 증가하여 전체 생물종의 약 70%가 멸종된다고 예측하고 있다. 특히, IPCC보고서에서는 지구온난화 주범이 인위적인 온실가스 배출에 기인할 가능성이 매우 높고, 그중에서 80%를 차지하는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 저감이 매우 중요하므로 전 세계에서의 CO<sub>2</sub> 저감 연구개발 중요성을 지적하고 있다. 이에 따라 우리나라도 2010년도 4월에 발표된 『저탄소 녹색성장기본법』에 근거하여 CO<sub>2</sub> 저감에 관한 연구를 모든 학문 및 산업분야에서 범 정부적으로 추진하고 있다. 전 세계적으로 CO<sub>2</sub>를 줄이는 것은 인류생존의 선택문제가 아니라 필수문제이다.

CO<sub>2</sub> 문제를 해결하는 방법으로는 CO<sub>2</sub> 발생억제, 삭감 및 고정화 기술 개발이 있으나 산업성장파 인간 삶의 질을 저해하지 않는 방법으로는 CO<sub>2</sub> 고정화 연구개발이 가장 중요한 과제이다. 최근의 국제 연구동향은 포집된 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 저장하기 위한 연구로 전환되고 있으며, 특히 CO<sub>2</sub> 저장을 위한 지중 혹은 해양저장은 경제성 및 안전성 문제로 현재 기술적 한계에 직면하고 있어 이러한 저장방법을 창조적 방법으로 업록체 형질 전환에 의한 대규모 식목방법, 미생물을 이용한 바이오매스처리 기술 등이 연구되고 있다. 최근에는 탄산화반응을 이용하여 CO<sub>2</sub>와 알칼리토금속 이온을 반응시켜 CO<sub>2</sub>를 안정한 탄산염으로 고정화하는 방법이 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 대안으로 떠오르고 있

지만 CO<sub>2</sub> 대량 저감 및 경제성 문제 해결 관점에서의 연구가 절실히 요청되고 있다.

이러한 관점에서 본 고에서는 기존의 CO<sub>2</sub>를 저감시킬 수 있는 고전적인 방법과 함께 최근 개발되고 있는 혁신적인 기술을 소개함과 더불어 최근에 CO<sub>2</sub> 저감방안으로써 시멘트 및 콘크리트분야에서 잠재성을 가지고 있는 탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 고정화에 대하여 서술하고자 한다.

### 2. 콘크리트에서의 CO<sub>2</sub> 저감 개념

건설 산업은 천연 및 인공재료를 사용하여 설계단계, 시공단계, 사용단계를 걸쳐 해체 및 폐기단계를 거치는 순환구조를 가지고 있으며, 각 단계에서 CO<sub>2</sub>를 배출하는 특징을 가지고 있다. <그림 1>에 나타낸 것처럼 건설 산업은 전체산업에서 약 42.4%의 CO<sub>2</sub>를 발생하는 대량 CO<sub>2</sub> 발생 산업으로써 건설 산업에서의 CO<sub>2</sub> 저감이 매우 중요한 것을 알 수 있다. 또한, CO<sub>2</sub> 발생은 건축에서 주로 자재 및 운영단계에서 토목은 주로 자재 단계에서 이루어지므로 자재 생산 및 운영단계에서의 CO<sub>2</sub>를 줄이는 핵심기술의 개발이 요청된다고 할 수 있다.

특히, 건설재료 분야 중, 시멘트(약 0.8kg-CO<sub>2</sub>/kg)·콘크리트(약 340kg-CO<sub>2</sub>/ton) 분야를 예로 들면, 현재까지 CO<sub>2</sub>를 저감하는 방법으로는 시멘트 및 콘크리트의 제조 장치의 효율성 향상을 제외하면, <그림 2-(a)>와 같이 콘크리트 제조 시에

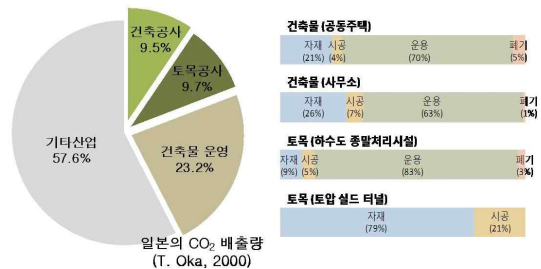


그림 1. 건축 및 토목공사에서의 CO<sub>2</sub> 배출량

\* 정희원, 한양대학교 ERICA 건축학부 부교수  
ercleehs@hanyang.ac.kr

CO<sub>2</sub> 발생 원단위가 작은 고로슬래그 미분말 등을 혼합하여 콘크리트 제조 시 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 저감시키는 CO<sub>2</sub> 저감(reduction) 기술이 대부분 적용되고 있다. 그러나 CO<sub>2</sub>를 혁신적으로 저감시키는 방법으로 <그림 2-(b)>와 같이 콘크리트 제조 시 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량에 대하여 구조물 공용기간 중에 콘크리트의 탄산화 반응에 의해 공기 중의 CO<sub>2</sub>를 대량 고정화(완전탄산화: 배출량의 약 53% 흡수, 60년 수명 아파트: 현재 기술 배출량의 5% 흡수) 시키는 건식탄산화 방법을 적용할 수 있다고 판단된다. 또한, 기존 자원공학분야에서 주로 적용하였던 광물탄산화의 개념을 건설 분야에 접목시켜 <그림 2-(c)>와 같이 시멘트, 콘크리트, 슬래그, 플라이 애쉬 등에서 대량 석출한 알칼리이온 수용액과 CO<sub>2</sub>를 탄산화 반응시켜 CO<sub>2</sub> 배출량을 상쇄하는 습식탄산화 방법에 의해 CO<sub>2</sub> 오프셋(offset) 기술을 적용할 수 있다고 판단된다.

### 3. CO<sub>2</sub> 저감형 고성능 콘크리트

#### 3.1 CO<sub>2</sub> 저감형 Super Performance 콘크리트 기술

기존의 틀을 깨고 완전히 창조적인 방법으로 고성능의 콘크리트 기술을 개발함으로써 CO<sub>2</sub>를 저감시킬 수 있다고 판단된다. <표 1>에 800 MPa까지의 시멘트계 재료의 개발을 가능케한 RPC(reactive powder concrete)기술, 4%까지의 인장변형률을 갖는 ECC(engineered cementitious composite)에 의해 철근이 필요없는 구조물 구축 기술, 경량골재를 사용하지 않고 기포제만으로 일반 골재와 함께 구조용 경량 콘크리트를 제조하는 기술, 상변화물질을 이용한 혁신적인 에너지 절감 콘크리트 기술 등이 개발되어 사용되고 있다.

#### 3.2 LCCO<sub>2</sub> 저감형 콘크리트 기술

전 세계 CO<sub>2</sub> 배출량의 약 5~7%가 시멘트 제조공정에서 나오며, 그 배출량은 약 20억 ton-CO<sub>2</sub>/year라고 한다. 따라서

표 1. CO<sub>2</sub> 저감형 Super Performance Concrete

종류	창조적 개념	제조 원리 및 특징
RPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 200 ~ 800 MPa 슈퍼 압축 강도 콘크리트를 재령 3일 ~ 28일 정도에서 실현</li> <li>• 팩킹모델 및 연쇄적인 포졸란반응 물질에 의한 콘크리트 수화물 생성 및 공극감소</li> <li>• RPC: Reactive Powder Concrete</li> </ul>	
ECC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 콘크리트에 섬유를 혼합함으로써, Multi Crack 발생에 의한 4~7%의 인장변형 실현</li> <li>• ECC: Engineered Cementitious Composite</li> </ul>	
SLC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 경량골재를 사용하지 않고 일반골재와 기포만을 혼합하여 구조용 경량 콘크리트를 제조</li> <li>• 고점성, 나노기포제 및 기포안정제로 나노기포발생 및 기포개집 방지</li> <li>• SLC: Super Light Weight Concrete</li> </ul>	
PC MC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상변화물질을 캡슐형태로 제작하여 시멘트페이스트, 모르타르, 콘크리트, 페인트 등과 혼합사용하여 에너지절약 시멘트계 재료 개발</li> <li>• PCMC: Phase Change Material Concrete</li> </ul>	

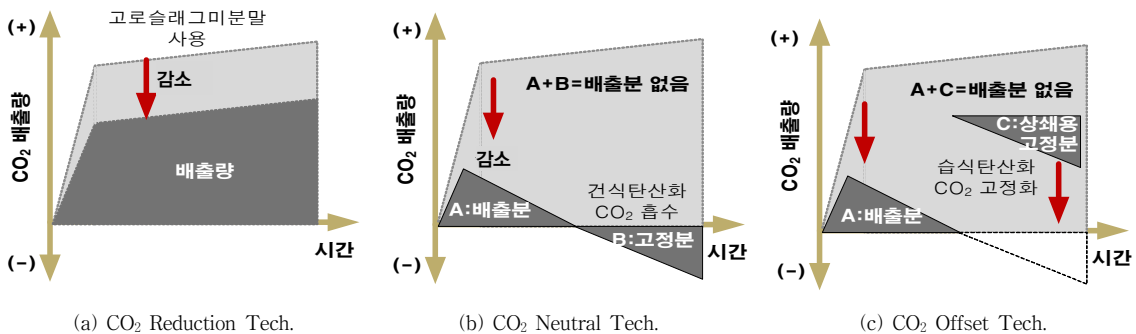


그림 2. 콘크리트 분야에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 저감 개념

시멘트산업에서 CO<sub>2</sub> 배출을 저감하기 위한 노력은 매우 중요하며 필수불가결 하다고 판단된다. CO<sub>2</sub> 저감에 있어서는 시멘트를 소재로 하는 콘크리트의 제조 및 해체까지를 고려한 LCCO<sub>2</sub>(life cycle CO<sub>2</sub>) 평가 및 기술개발이 중요하다. LCCO<sub>2</sub> 저감 시멘트·콘크리트 사례로서는 <표 2>에 나타낸 바와 같이 완전리싸이클 콘크리트, 에코시멘트, 재생시멘트, 시멘트제로 콘크리트, 저온소성시멘트, 혼합시멘트, 폐기물활용시멘트 등의 기술 등이 개발되어 현장에서 활용되고 있다.

#### 4. CO<sub>2</sub> 고정화 기술

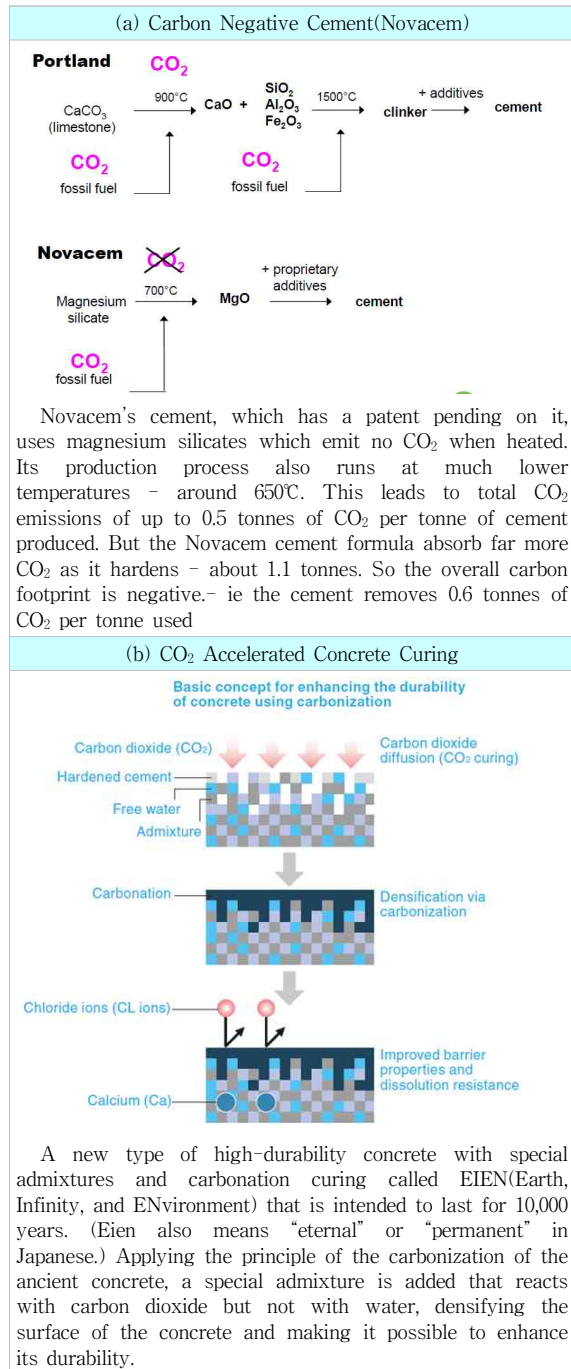
##### 4.1 건식탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 고정기술

건식탄산화방법이란, 공기 중의 CO<sub>2</sub>가 시멘트계 고체물질에 침투·확산 및 용해하여 생성된 탄산이온이 시멘트계 고체물질의 알칼리 이온과 화학반응으로 탄산염을 생성함으로써 CO<sub>2</sub>를 흡수하고 고정하는 방법을 말한다. 건설 분야에서 건식탄산화방법은 기존 철근 콘크리트구조물에서 철근부식의 주요 원인인 탄산화반응을 억제하는 연구가 대부분이며, 최근에는 탄산화반응을 역발상으로 하여 CO<sub>2</sub>를 대량 흡수하는 시멘트 제조를 미국의 MIT와 유럽의 'Novacem 회사'가 공동연구로 추진하고 있다. <표 3>의 기술 원리는 마그네슘을 주원료로 하는 시멘트 제조 시 기존 시멘트 소성온도인 1,500°C를 약 650°C까지 낮추어 소성에너지를 저감하는 방법과 함께 제조된 마그네시아 시멘트가 갖는 CO<sub>2</sub> 대량 흡수성을 이용하여 시멘트 제조시 발생하는 CO<sub>2</sub>양보다 흡수되는 CO<sub>2</sub>양이 더 많게 하는 Carbon Negative 시멘트가 대표적이다. 그러나 마그네시아 시멘트를 제조할 때에도 대량의 에너지가 소비 되어 대량의 CO<sub>2</sub> 발생이 있는 점과 아직 경제성이 확보되지 않은 단점이 지적되고 있다.

표 2. LCCO<sub>2</sub> 저감 콘크리트 기술 사례

종류	CO <sub>2</sub> 저감 개념
완전리싸이클 콘크리트	• 시멘트 및 시멘트 원료로 되는 물질만이 콘크리트의 결합재, 혼합재 및 골재로서 사용되어 경화후 다시 전량이 시멘트 원료 및 재생골재로서 사용 가능한 콘크리트
재생 시멘트	• 미분쇄한 폐콘크리트를 200°C로 예비 가열하고 700°C 분 가열을 거쳐, 여기에 이수석고 혼합하여 재생시멘트 제조
시멘트 제로 콘크리트 (Clinker Free)	• 플라이 애쉬, 고로슬래그 같은 혼합재료를 100% 사용하고 알칼리 활성화제에 의해 반응 시켜 5~40°C 상온에서 3~7일 만에 20~80 MPa 제조 및 콘크리트 제조 후 1시간 까지 유동성 확보
저온소성 시멘트	• 천연점토와 전기화학공업의 부산물로서 과잉 생산되고 있는 가성소다에 의한 새로운 시멘트 제안. 이 시멘트는 점토를 400~500°C의 가소로 비정질로 한 후, 가성소다와 반응시키는 것 만으로 CO <sub>2</sub> 발생은 극미량이며, 12시간 양생의 PC가 15 MPa인 것과 비교하여 25 MPa로 강도가 높으며 산이나 염에도 강함.

표 3. 건식탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 고정기술 사례



##### 4.2 습식탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 고정기술

습식탄산화방법이란, <그림 3>과 같이 건설재료에 대량 포함된 알칼리토금속(Ca, Mg 등)을 수용액 또는 슬러지 상태에서 CO<sub>2</sub>를 통과시켜 탄산염을 생성함으로써 CO<sub>2</sub>를 소비하고 고정

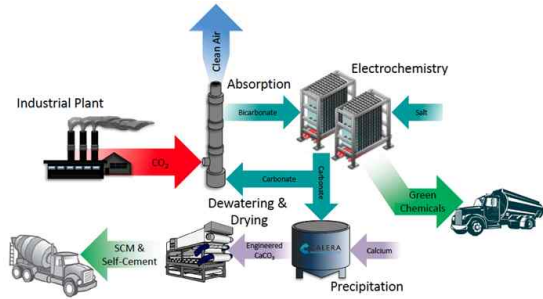


그림 3. 습식탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 고정 시스템

하는 방법을 말한다. 습식탄산화는 알칼리토금속(Ca, Mg 이온 등)을 수용액에 석출하여 CO<sub>2</sub> 가스와 반응시켜 안정한 탄산염을 생성하는 것이다. <그림 4>와 같이 주로 지질학 분야에서 광물 중에 Ca나 Mg이온을 가지고 있는 감람석, 사문석 등을 미분쇄하여 산으로 처리함으로써 Ca나 Mg를 분리하여 CO<sub>2</sub>와 반응시키는 연구가 수행되고 있으나 Ca나 Mg 이온을 대량 분리하기 위해서는 막대한 에너지 소비 및 CO<sub>2</sub> 발생이 수반되어 경제성이 없는 것이 한계점이다. 이를 해결하기 위해서 <그림

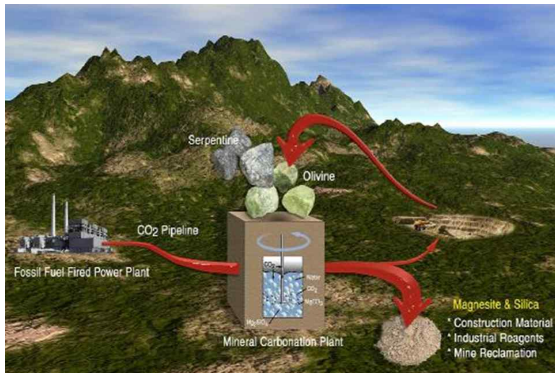


그림 4. 광물탄산화(Mineral Carbonation) 모식도

**Stony Vault**

Binding CO<sub>2</sub> in cement

1 Instead of emitting the greenhouse gas CO<sub>2</sub> through factory chimneys, a factory in Moss Landing, California, pipes it through sea water.

3 In a special drying process, which uses heat from the factory's exhaust, the mud is dried into small bricks. The carbonate can then be turned efficiently into cement.

2 The CO<sub>2</sub> dissolves in the salt water. It binds with calcium from the salt, or with magnesium, to produce carbonates. Every ton of the resulting mass of mud removes half a ton of CO<sub>2</sub>.

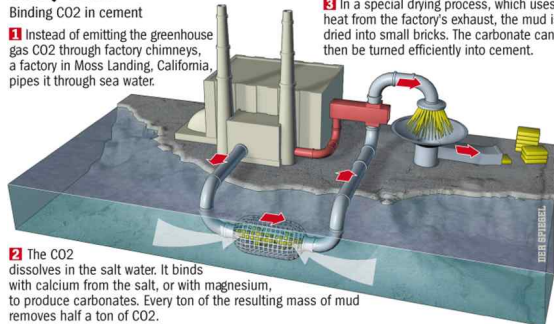


그림 5. Calera사에 의한 CO<sub>2</sub> 고정 모식도

5>와 같이 미국의 Calera 회사는 CO<sub>2</sub> 가스를 바닷물 속에 녹아있는 Ca 이온 및 Mg 이온과 반응시켜 탄산염으로 침강시켜 CO<sub>2</sub>를 고정하는 상용화 기술을 추진하고 있으나 바닷물이 알칼리도가 높지 않고 탄산염 생성 효율이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 국내에서는 2009년도부터 지질자원연구소, 포항산업과 학연구원에서 「광물탄산화법 연구」를 국책과제로 진행하고 있다.

5. 맺음말

본 고에서는 콘크리트 분야에서의 CO<sub>2</sub>를 저감시킬 수 있는 탄소저감형 콘크리트기술에 대하여 개괄적으로 기술하였다. 고성능의 콘크리트를 개발함으로써 장수명화와 내진성을 높여 구조물의 수명을 높이는 것도 콘크리트의 CO<sub>2</sub>를 줄이는 길이라고 판단된다. 또한, CO<sub>2</sub> 원단위가 적은 소재를 사용한 콘크리트의 제조가 최근 활발히 연구되어 건설현장에 적용되고 있으나 본래 콘크리트가 가지고 있는 품질성능을 저해해서는 안 된다는 기본 원칙을 확인하는 것이 중요하다. CO<sub>2</sub>에 의한 콘크리트 탄산화는 과학적인 원리로서 건식탄산화와 습식탄산화 방법이 있으나 콘크리트 구조물에서는 이미 건식탄산화가 이루어지고 있어 탄산화반응 물수를 증가시키는 새로운 시멘트계 재료의 개발이 필요하다. 습식탄산화에서는 Ca 이온이나 Mg 이온을 다량 석출하여 CO<sub>2</sub>와 신속하게 반응시킬 수 있는 메커니즘을 구축하는 것이 필요하다고 판단된다. 이와 같이 건설산업이 CO<sub>2</sub> 발생량의 약 42%를 점한다고 하더라도 상당량의 CO<sub>2</sub>를 콘크리트가 고정 또는 흡수함으로써 저탄소 건설산업 구축에 기여하는 기술개발로 자리매김할 수 있다고 판단된다. □

참고문헌

1. IPCC working group III, Carbon Dioxide Capture and Storage, Chapter 7, 2005.
2. <http://novacem.com/>.
3. <http://calera.com/index.php>.
4. 탄소저감형 건설재료 기획 보고서, 한양대학교, 국토해양부, 2011.

담당 편집위원 : 이한승(한양대학교) [ercleehs@hanyang.ac.kr](mailto:ercleehs@hanyang.ac.kr)