

# CO<sub>2</sub> 배출량 및 흡수량을 중심으로 한 콘크리트의 친환경성능 평가에 관한 문헌적 연구

## Literature Study on the Sustainable Performance of Concrete Focus on the Amount of Discharge and Absorption of CO<sub>2</sub> Gas

이 한 승\*      유 조 형\*\*      왕 소 용\*\*\*      이 상 현\*\*      이 상 호\*\*  
Lee, Han Seung      You Jo Hyeong      Wang, Xiayong      Lee, Sang hyun      Lee, Sang Ho

### ABSTRACT

A cement which is used in construction and a concrete which is a hydration product of cement is considered anti-environmental materials because of lots of CO<sub>2</sub> emission in progress of producing and making them. But a concrete absorbs the CO<sub>2</sub> gas in atmosphere after hydration and in its lifetime. Based on Papadakis' theses, this research is carried on calculation of the CO<sub>2</sub> absorption quantity in concrete. Also, the emission of CO<sub>2</sub> was calculated by cement manufacture. As a result, It is said that the CO<sub>2</sub> which was emitted during cement manufacturing, was absorbed the 53% of emission quantity by the carbonation of concrete.

### 1. 서론

시멘트 및 콘크리트는 현대 문명 구축을 위해서는 없어서 안 되는 매우 중요한 구조재료이며, 금후, 이를 대체할 재료는 금세기 안에는 나오지 않을 것으로 예상하고 있다. 이러한, 시멘트는 석회석(CaCO<sub>3</sub>)을 소성하여 생산되므로 석회석의 환원반응에서 CO<sub>2</sub>를 발생시키나, 시멘트로 제조된 콘크리트가 오히려 대기 중의 CO<sub>2</sub>와 반응하여 상당부분의 CO<sub>2</sub>를 흡수함으로써 지구온난화 문제를 해결한다던가, 1450℃로써 소성되는 시멘트가 다이옥신을 발생시키지 않고 인간생활에서 발생하는 모든 쓰레기 및 폐기물발생 문제를 해결하는 유일한 방법이라는 것 등, 시멘트 및 콘크리트는 매우 친환경적인 재료로 새롭게 인식되고 있다. 그러나, 이에 관련된 정량적인 연구는 아직 미비한 실정이며 시멘트 및 콘크리트의 친환경성을 증명하기 위한 연구가 더욱더 필요하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 배경 하에 시멘트·콘크리트 산업에서의 CO<sub>2</sub> 배출량과 콘크리트 탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수량을 기존 문헌연구를 통하여 개산적으로 검토하는 것에 의해 시멘트·콘크리트 산업의 본질적인 CO<sub>2</sub> 배출량 및 흡수량에 대한 자료를 제공하고자 한다.

\* 정희원, 한양대학교 건축학부 친환경건축연구센터 연구조교수, 공학박사

\*\* 정희원, 한양대학교 대학원 건축환경공학과, 석사과정

\*\*\* 정희원, 한양대학교 대학원 건축환경공학과, 박사과정

## 2. 시멘트 제조에서의 CO<sub>2</sub> 배출량

시멘트 제조시에 발생하는 환경부하물질로서는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 및 분진이 있으며, 그 중에서 CO<sub>2</sub>의 원단위를 나타내면 표 1과 같다. 시멘트 제조시에 발생하는 CO<sub>2</sub>는 원료기원과 에너지기원으로 분류할 수 있으며 원료기원의 CO<sub>2</sub>는 석회석의 탈탄산량으로부터 계산될 수 있고, 에너지기원의 CO<sub>2</sub>는 화석원료와 폐기물계로 구분하여 계산할 수 있다. 또한, 폐기물계의 CO<sub>2</sub>는 폐기물을 시멘트제조 에너지 대체로서 이용하는 것으로 발생하는 것이고 다른 시설에서 소각에 의해 처분된 경우에도 CO<sub>2</sub>는 발생하기 때문에 소각불요에 따른 삭감으로서 같은 값을 부여하는 것이 타당하다고 판단된다. 한편, 소각불요에 의한 삭감에는 다른 시설에서의 소각시 배기가스 처리나 잔분의 매립처분 등에 따른 환경부하도 생각할 수 있지만 구체적인 값은 명확하지 않으므로 이들 계산은 산정하지 않는다.

표 1. CO<sub>2</sub>의 원단위 (단위: g/kg)

구분	포틀랜드시멘트	고로시멘트 B종	플라이애쉬시멘트 B종
석회석 탈탄산 기원	448.9	268.5	374.6
화석연료 연소기원	297.7	191.5	245.1
(화석기원) 폐기물등 연소기원	36.2	21.6	29.5
소각불요에 의한 삭감	▲ 36.2	▲ 21.6	▲ 29.5
합계	746.6	460.0	619.7

## 3. 레미콘제조 및 운반에서의 CO<sub>2</sub> 발생 현황

- ① 레미콘 제조시의 CO<sub>2</sub> 발생량 : 레미콘 제조시의 환경부하에 대하여 구입전력 원단위를 사용하여 산정한 결과의 예는 표 2와 같다.
- ② 레미콘 운반시의 CO<sub>2</sub> 발생량 : 레미콘 운반시의 환경부하에 대하여 콘크리트 적재량을 A공장 4.5m<sup>3</sup>, C공장 2.2m<sup>3</sup>으로 하고 운반시간을 20분으로 하여 계산한 결과를 표 3에 나타낸다.
- ③ 레미콘 사용재료 CO<sub>2</sub> 발생량 : 레미콘 사용재료 및 배합을 사용하여 CO<sub>2</sub> 배출량이 계산 가능하며, 물시멘트비 및 단위시멘트량의 평균값을 활용하여 표 4와 같이 산출할 수 있다.

표 2. 레미콘 제조시의 에너지 및 환경부하 물질 배출량 계산(예)

공장	전력 (kWh/t)		CO <sub>2</sub> 배출량 (kg-CO <sub>2</sub> /t)	
	계산	317 위원회	계산	317 위원회
A	1.91	0.64	0.78	0.26
B	0.96		37	
C	2.15		109	

표 3. 레미콘 운반시의 에너지 및 환경부하 물질 배출량 계산(예)

공장	자사 차량 운반량 (m <sup>3</sup> )	자사 차량 경유량 (L)	경유 사용량 (L/h)		CO <sub>2</sub> 배출량 (kg-CO <sub>2</sub> /h)	
			계산	317 위원회	계산	317 위원회
A	96,418	165,383	11.6	0.282	32.7	33.8
C	10,123	44,500	14.5		40.9	25.7

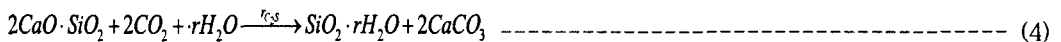
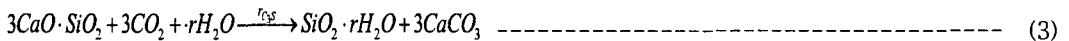
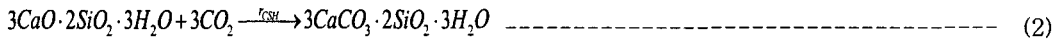
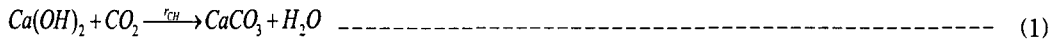
표 4. 레미콘 사용재료의 환경부하 물질 배출량 계산(예)

계산예 : 물시멘트비 60%, 단위시멘트량 300kg/m<sup>3</sup> (보통포틀랜드시멘트), 단위수량 170 kg/m<sup>3</sup>  
 잔골재(쇄사) 850 kg/m<sup>3</sup>, 굵은골재(쇄석) 1000 kg/m<sup>3</sup>, AE감수제(사용량 : 시멘트 질량의 0.25%)

$300\text{kg} \times 0.7466(\text{kg-CO}_2/\text{kg}) + 850\text{kg} \times 0.0037(\text{kg-CO}_2/\text{kg}) + 1000\text{kg} \times 0.0028(\text{kg-CO}_2/\text{kg}) + (300\text{kg} \times 0.01) \times 0.25(\text{kg-CO}_2/\text{kg}) = 223.98 + 3.15 + 2.80 + 0.75 = 230.68(\text{kg-CO}_2/\text{콘크리트 } 1\text{m}^3)$

4. 탄산화에 의한 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 소비량 계산

콘크리트 탄산화 반응은 식 1~식4로 나타낼 수 있다. 또한, 탄산화 깊이는 식 5와 같이 Papadakis 모델을 적용하여 계산할 수 있다.



$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D_c^c \cdot [\text{CO}_2]^0}{[\text{Ca(OH)}_2]^0 + 3[\text{CSH}]^0 + 3[\text{C}_3\text{S}]^0 + 2[\text{C}_2\text{S}]^0}} \sqrt{t} \text{ ----- (5)}$$

여기서,  $m_0 = [\text{Ca(OH)}_2]^0 + 3[\text{CSH}]^0 + 3[\text{C}_3\text{S}]^0 + 2[\text{C}_2\text{S}]^0$ , 콘크리트 1m<sup>3</sup>의 CO<sub>2</sub> 흡수량을 나타내며, (mol/m<sup>3</sup>), 표 5에 나타낸 바와 같이 시멘트 구성성분에서 CaO의 함유량은 전체성분의 65%를 차지한다. 또한, 콘크리트가 탄산화에 의해서 각 시멘트 수화생성물과 CO<sub>2</sub>가 콘크리트 1m<sup>3</sup>에서 흡수되는 CO<sub>2</sub> mo(mol/m<sup>3</sup>)를 식 6과 같이 계산할 수 있다.

$$m_0 = 3326 \text{ CO}_2\text{-mol/m}^3 \text{ Con} = 3326 \times 44 \times 0.001 = 146.34 \text{ CO}_2\text{-kg/m}^3 \text{ Con} \text{ ----- (6)}$$

표 5. 보통포틀랜드 시멘트내의 산화물 분포 (%)

oxide	Cement no.1
S(SiO <sub>2</sub> )	21.1
A(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.2
F(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.9
C(CaO)	65
S(SO <sub>3</sub> )	2
Rest	2.8

한편, 시멘트 킬른에서는 석회석이 열분해하여 CaO와 CO<sub>2</sub>로 분해되면서 CO<sub>2</sub>가 발생되며(RMCO<sub>2</sub>), 시멘트소성과정에서 연료에 의한 CO<sub>2</sub>가 발생된다(FDCO<sub>2</sub>).

$$\text{CO}_2 \text{ emission} \begin{cases} \text{RMCO}_2: \text{시멘트 제조 원재료에서 발생하는 CO}_2 \\ \text{FDCO}_2: \text{시멘트 소성 화석연료에서 발생하는 CO}_2 \end{cases}$$

여기서, RMCO<sub>2</sub>는 CaCO<sub>3</sub>가 열분해 하면서 발생하는 CO<sub>2</sub>로써 CaO와 CO<sub>2</sub>는 몰비가 56:44이므로 65%를 차지하는 CaO와 분해되는 CO<sub>2</sub>의 양은 0.52ton이 된다. 한편, FDCO<sub>2</sub>계산에 있어서는 양질의 1ton 석탄의 총 열량은 32.6 GJ이고 이에 따라 완전연소가 이루어 지면 2.94ton의 CO<sub>2</sub>가 발생된다. 그러나, 유효 열량은 약 석탄발열량의 60%이므로 1ton당 19.5 GJ이 발생된다. 클링커를 1ton 만드는 데는 총 1.76 GJ/ton이 들어가므로 CO<sub>2</sub>는 0.27 ton이 발생하게 된다. 따라서, 시멘트 1ton을 제조하는 데에는 RMCO<sub>2</sub>+FDCO<sub>2</sub>=0.79ton의 CO<sub>2</sub>가 발생된다. 한편, 콘크리트 1m<sup>3</sup>을 제조하는데 시멘트가 350kg/m<sup>3</sup>이 사용되었다고 하면 CO<sub>2</sub>는 276.5 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-con 이 발생하게 되며 콘크리트 1m<sup>3</sup>이 완전 탄산화가 된 경우에 약 146 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>-con의 CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>가 소비되게 된다. 그러므로, 콘크리트 1m<sup>3</sup>에서의 CO<sub>2</sub> 흡수량은 발생량의 약 53%이며, 시멘트 제조시 발생하는 CO<sub>2</sub> 절반 정도는 탄산화로 흡수되므로, 시멘트는 매우 친환경 재료라고 할 수 있다고 판단된다.

한편, 2005년도 국내 레미콘 생산량을 1억2천5백만톤으로 산정하고, 평균 시멘트 사용량을 350 kg/m<sup>3</sup>으로 계산하면, 약 4.4×10<sup>7</sup>톤의 시멘트가 사용되었으며, 이로 인한 CO<sub>2</sub> 발생량을 계산하면 3500 만 CO<sub>2</sub>-톤이 발생된 것으로 계산할 수 있다. 다만, 콘크리트 1m<sup>3</sup>가 전부 탄산화되기에는 장기간이 걸리지만 구조물 특성상 표면적이 매우 넓고 수많은 구조물이 장기간에 걸쳐 탄산화되었기 때문에 CO<sub>2</sub> 흡수량은 상당할 것으로 추정되고 금후 이에 대한 시뮬레이션 연구가 추진되어야 한다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 시멘트·콘크리트 산업에서의 CO<sub>2</sub> 배출량과 콘크리트 탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 흡수량을 기존 문헌연구를 통하여 개산적으로 검토한 결과, 시멘트 제조시에 발생하는 CO<sub>2</sub>의 약 53%를 콘크리트가 탄산화되면서 흡수하는 것으로 계산되었으며, 금후 시멘트 종류, 마감재 종류 및 Life Cycle를 통한 실 구조물에서의 CO<sub>2</sub> 수지를 시뮬레이션하는 것이 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음 (# R11-2005-056-04003-0).

## 참고문헌

1. Papadakis, Vagelis G.; Vayenas Costas G.; and Fardis, Michael N., (1991) Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. ACI Materials Journal. Mar-Apr, 186-196
2. Papadakis, Vagelis G.; Vayenas Costas G.; and Fardis, Michael N., (1991) Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. ACI Materials Journal. July-August, 186-196
3. Mehta, P.Kumar.; Monteiro, Paulo J.M. Concrete 3rd edition. 207-209.
4. Study on the evaluation of various accelerated carbonation method, Architectural institute of Japan, Journal of Structure. NO. 409. 1-10 (1990.3)