



콘크리트의 탄산화 관점에서 CO₂ 배출량-흡수량 평가에 관한 연구

이상현¹⁾ · 이성복²⁾ · 이한승^{3)*}

¹⁾한양대학교 건축환경공학과 ²⁾주택공사 도시재생사업단 ³⁾한양대학교 건축학부

Study on the Evaluation CO₂ Emission-Absorption of Concrete in the View of Carbonation

Sang-Hyun Lee,¹⁾ Sung-Bok Lee,²⁾ and Han-Seung Lee^{3)*}

¹⁾Dept. of Architectural Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾City restoration Agency, Korea National Housing Corporation, Sungnam 463-810, Korea

³⁾Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea

ABSTRACT A concrete is considered unfriendly-environmental material because it uses cement which emits much CO₂ during producing process. However, a concrete absorbs CO₂ through carbonation process during service life. In this paper how much concrete absorbs CO₂ through carbonation was calculated using 1) concentration of carbonatable substances in concrete, 2) carbonated volume of concrete, 3) molecular weight of CO₂ based on references and the method was proposed. CO₂ emission from producing 1m³ concrete was calculated based on CO₂ emission datum of materials used in concrete. From using these methods that calculate CO₂ emission and absorption of concrete, assessment of CO₂ emission-absorption against a real apartment was conducted by subtracting absorption CO₂ according to service life from CO₂ emission in the process of making concrete. As a result, a ratio of absorption over emission of CO₂ through concrete carbonation according to service life 40, 60, 80 years was assessed about 3.65, 4.47, 5.18%. An objective of this study is to propose how to calculate emission - absorption of CO₂ from producing and using concrete. Although the result value, emission - absorption of CO₂, is 5.18% very low when the service life of an apartment is 80years, the value can be improved by reducing emission from using blended cement such as blast furnace slag or increasing replacement ratio of cement and increasing carbonated volume of concrete from expanding service life of a building. This study may be useful when CO₂ emission - absorption of concrete is evaluated in the further study.

Keywords : concrete carbonation, CO₂

1. 서 론

최근 유엔산하 정부간기후변화협약체 (IPCC)의 4차 평가보고서에서는 지구온난화는 명백하며 그 원인은 인간 활동으로 인한 온실가스 농도 증가일 가능성이 매우 높다고 지적하고 있다.¹⁾ 현재 세계 각국에서는 전 산업부분에서 온실가스인 이산화탄소를 저감하기 위한 노력이 한창 중에 있다. 그런데 오늘날 대부분의 건축물에 사용되고 있는 콘크리트는 골재를 채움재로, 시멘트를 결합재로 사용하는 건축재료로서 시멘트 제조 시, 주 원료인 석회석의 탈탄산 과정에서 다량의 이산화탄소가 발생함에 따라, 콘크리트 재료는 반친환경적 건축재료라는 인식이 커져가고 있다. 하지만 콘크리트는 제조 과정에서 탈탄산된 이산화탄소의 일부를 사용기간 중에 대기 중으

로부터 재흡수하는 탄산화 과정이 진행된다. 또한 콘크리트의 탄산화 현상을 통한 이산화탄소 흡수량은 대기 중의 이산화탄소 농도가 증가함에 따라 더욱 많아지게 된다. 이러한 콘크리트의 탄산화 과정을 통한 이산화탄소 흡수능력에 주목하여 이를 정량적으로 평가하려는 연구 결과들이 최근 북미와 북유럽 국가들에서 발표되고 있다.^{2,3)} 그러나 탄산화를 통한 이산화탄소 흡수량 산정에 있어 아직까지 정식화된 방법이 없으며 일반적으로 사용되고 있는 식 (1)에서도 연구자들에 따라 이산화탄소와 반응하는 CaO의 비율을 다르게 가정 (Claus Pade는 75%, Gajda는 32~37% 사용)²⁾하여, 이산화탄소 흡수량의 산정 결과가 상이하다.

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ 흡수량 (kg-CO}_2\text{/m}^3 \text{ concrete)} \\ = 0.75 \times C \times \text{CaO} \times M_{\text{CO}_2} / M_{\text{CaO}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, M_i: 성분 i의 분자량, C: 1m³ 콘크리트 내 시멘트량 (kg/m³), CaO: 시멘트 클링커 내 CaO 함량 (%)이다.

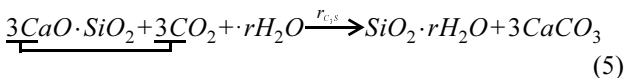
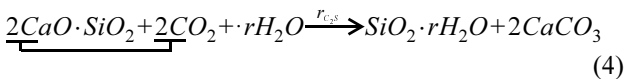
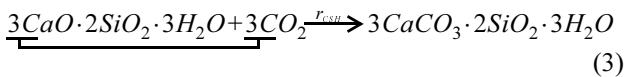
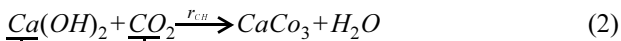
*Corresponding author E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr
Received September 16, 2008, Revised November 21, 2008
Accepted November 21, 2008

이에 본 논문에서는 기존문헌 고찰^{4,6)}을 통하여 콘크리트의 탄산화 현상을 통한 이산화탄소 흡수량의 정량적 산출방법을 새롭게 도출하였다. 그리고 단위 용적 (1 m³) 콘크리트를 생산하는데 발생하는 이산화탄소 배출량은 콘크리트 배합에 사용되는 각 재료의 이산화탄소 배출량을 참고⁷⁾하여 산출하였다. 이상의 이산화탄소 배출량 및 흡수량의 산정방법을 이용하여 현재 사용 중인 실제 아파트 건물을 대상으로 건물 생산에 사용된 콘크리트의 물량을 산출하여 사용된 콘크리트의 이산화탄소의 배출량과 대상 구조물의 사용기간에 따른 이산화탄소 흡수량을 산정하여, 사용기간에 따른 대상 구조물에 사용된 콘크리트의 이산화탄소 배출량-흡수량 평가를 목적으로 하였다.

2. 콘크리트 탄산화로 인한 CO₂ 흡수량 산정

2.1 콘크리트의 이산화탄소 흡수량 산정 개념

콘크리트의 탄산화 과정은 식 (2)와 같이 콘크리트 내 수산화칼슘과 대기로부터 흡수된 이산화탄소가 반응하여 탄산칼슘을 형성하는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제로는 콘크리트 내에서 이산화탄소와 반응하는 물질은 식 (3), (4), (5)와 같이 수산화칼슘 이외에도 CSH(3CaO·SiO₂·3H₂O), C₃S(3CaO·SiO₂), C₂S(2CaO·SiO₂) 등이 있다.



식 (2)의 좌변에서 이산화탄소의 몰농도, 그리고 반응하는 수산화칼슘의 몰농도가 같음에 주목하여, 탄산화 현상을 통하여 대기 중으로부터 콘크리트에 흡수되는 이산화탄소의 몰농도가 이산화탄소와 반응을 하는 콘크리트 내 반응물질의 몰농도와 같다는 가정하에 콘크리트 내 이

산화탄소와 반응을 하는 반응물질 (Ca(OH)₂, CSH, C₃S, C₂S)의 몰농도를 산정하여 탄산화를 통하여 콘크리트가 흡수할 수 있는 대기 중의 이산화탄소 흡수량을 예측하였다. 콘크리트 내 탄산화 가능한 물질의 몰 농도 예측 및 이산화탄소 흡수량 산정 프로세스는 Fig. 1과 같다. 시멘트의 산화물 분석 자료를 이용하여 시멘트 화합물의 조성을 예측하고,⁸⁾ 해당 시멘트의 수화반응 결과 수화생성물량 중 탄산화 가능한 물질의 시간에 따른 농도변화를 예측하여, 임의의 시간에 탄산화 가능한 물질의 몰 농도를 산정할 수 있다. 이렇게 구한 탄산화 가능한 물질들의 몰 농도의 합이 해당 콘크리트가 흡수할 수 있는 이산화탄소의 몰 농도와 같다는 가정하에 콘크리트의 사용기간에 따른 탄산화 깊이와 공기 중에 노출된 표면적을 이용하여 탄산화된 콘크리트의 체적과 이산화탄소의 분자량을 곱함으로써 최종적으로 콘크리트가 흡수할 수 있는 이산화탄소를 정량적으로 산출할 수 있다.

2.2 화합물의 조성 및 수화생성물의 몰 농도 예측

포틀랜드시멘트는 그 종류에 따라 산화물의 조성이 다르며, 1종 포틀랜드시멘트의 경우 산화물의 종류에 따른 조성비는 Table 1과 같다. 산화물 분석 결과와 식 (6)의 보그의 방정식을 이용하여 해당 시멘트의 화합물 조성을 예측할 수 있다. Table 2는 1종 보통포틀랜드시멘트의 화합물 조성이다. 1종 보통포틀랜드시멘트의 주요 화합물은 물과 결합하여 수화반응이 진행된다. 식 (7)~(12)는 주요 화합물의 수화반응을 간단히 나타낸 것으로 여기서, CH는 수산화칼슘, H는 물, C₃S₂H₃는 규산칼슘수화물, C₂S₂H₂는 석고를 나타낸다. 반응물 중 C₄AF와 C₃A는 석고의 존재유무에 따라 수화반응이 달라지며, 식 (9), (10)은 석고 존재하의 수화반응을 식 (11), (12)는 석고가

Table 1 Oxide analyses of ordinary portland cement (%)⁸⁾

Oxide	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	Reset
Cement no.1 (%)	21.1	6.2	2.9	65.0	2.0	2.8

* Bogue's equations⁹⁾ (6)

$$\text{C}_3\text{S} = 4.071\text{CaO} - 7.600\text{SiO}_2 - 6.718\text{Al}_2\text{O}_3 - 1.430\text{Fe}_2\text{O}_3 - 2.852\text{SO}_3$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.867\text{SiO}_2 - 0.7544\text{C}_3\text{S}$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.650\text{Al}_2\text{O}_3 - 1.692\text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.043\text{Fe}_2\text{O}_3$$

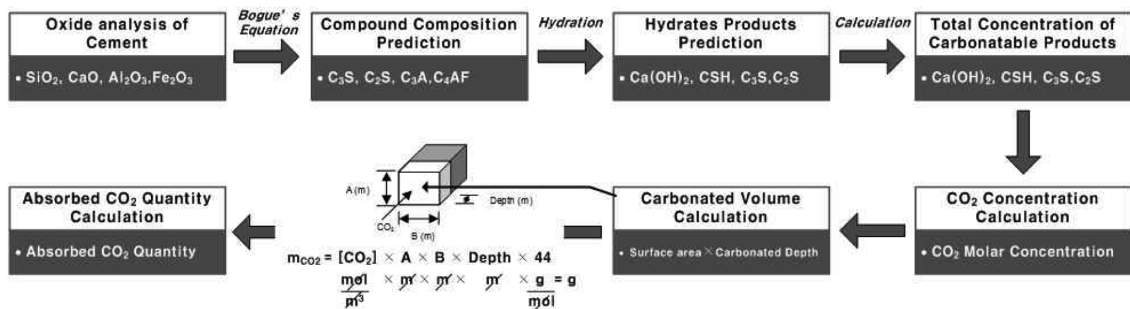
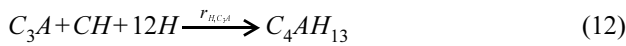
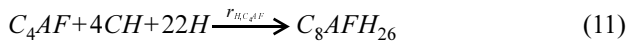
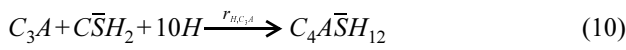
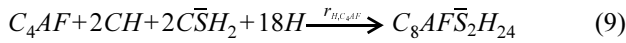
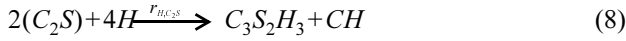
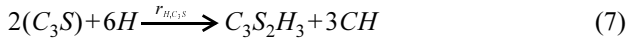


Fig. 1 Absorbed CO₂ quantity calculation process of carbonated concrete

Table 2 Compound composition of ordinary portland cement⁸⁾

Compound composition	Cement no.1 (%)
C ₃ S(3CaO·SiO ₂)	52.8
C ₂ S(2CaO·SiO ₂)	20.7
C ₃ A(3CaO·Al ₂ O ₃)	11.5
C ₄ AF(4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)	8.8

소진된 후의 수화반응을 나타낸다.



주요화합물의 초기 물 농도는 식 (13), (14)를 이용하여 산정 가능하다 ($[i]_0$ 은 화합물 ($i = C_3S, C_2S, C_4AF, C_3A$)의 초기 물 농도). 여기서 m_i 는 Table 2의 시멘트 조성물질의 성분비, m_{cl} 과 m_{gy} 는 클링커와 석고의 질량비 ($m_{gy} = 1 - m_{cl}$), ρ_c, ρ_w 는 각각 시멘트 및 물의 밀도, $w/c, a/c$ 는 콘크리트 배합의 물시멘트비, 골재시멘트비를 나타낸다. 클링커 내 각 화합물의 수화반응시간에 따른 질량비 F_i 는 Table 3의 성분 i 에 따른 수화반응 속도상수 k , 지수값 n , 분자량 데이터와 식 (15)를 이용하여 산출 가능하며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

$$[i]_0 = \frac{m_i m_{cl} \rho_c (1 - \varepsilon_{air})}{MW_i \left(1 + \frac{w}{c} \frac{\rho_c}{\rho_w} + \frac{a}{c} \frac{\rho_c}{\rho_a} \right)} \quad (13)$$

$$[\bar{C}SH_2]_0 = \frac{m_{gy} \rho_c (1 - \varepsilon_{air})}{MW_{gy} \left(1 + \frac{w}{c} \frac{\rho_c}{\rho_w} + \frac{a}{c} \frac{\rho_c}{\rho_a} \right)} \quad (14)$$

$$F_i(t) = 1 - \frac{[i]}{[i]_0} = 1 - [1 - k_{H,i} t (1 - n_i)]^{1/1-n_i} \quad (15)$$

Table 3 Parameters of constituent of ordinary portland cement⁵⁾

	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A	$\bar{C}SH_2$
Exponent n_i	2.65	3.10	3.81	2.41	-
Coefficient $k_{ni} (20^\circ C) \times 10^5 (s^{-1})$	1.17	0.16	1.00	2.46	-
Molecular weight $MW \times 10^3 (kg/mol)$	228.3	172.22	485.96	270.18	172.17

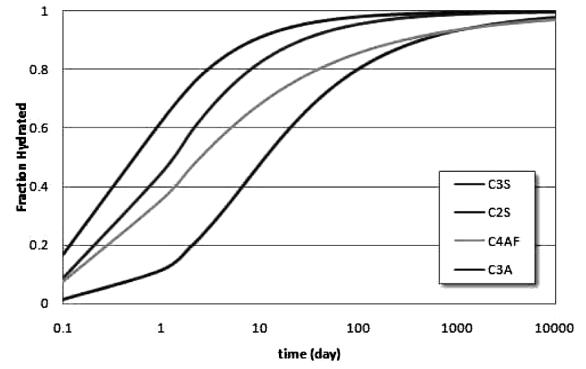


Fig. 2 Hydration speed of the four major constituents⁹⁾

식 (16)~(19)는 수화반응 결과 콘크리트 내 탄산화 가능한 물질의 물 농도를 정량적으로 산출하는 식^{4,6)}으로 식 (7)~(12)의 화학반응식에 기초한 것이다. 식 (16)의 수산화칼슘의 물 농도는 시멘트 주요 화합물 별 수화반응 시 각 화합물의 물 농도에 따른 수산화칼슘 생성물의 물 농도비의 합 및 반응에 사용된 수산화칼슘의 물 농도비의 차로 구할 수 있으며, CSH, C₃S, C₂S의 물농도 또한 식 (7)~(12)를 통해 식 (17)~(19)로 유도할 수 있고, 시간에 따른 탄산화 가능한 각 물질의 물 농도 계산결과는 Fig. 3과 같다.

$$[Ca(OH)_2] = \frac{3}{2}[C_3S]_0 F_{C_3S} + \frac{1}{2}[C_2S]_0 F_{C_2S} - 4[C_4AF]_0 F_{C_4AF} - [C_3A]_0 F_{C_3A} + [\bar{C}SH_2]_0 \quad (16)$$

$$[CSH] = \frac{1}{2}[C_3S]_0 F_{C_3S} + \frac{1}{2}[C_2S]_0 F_{C_2S} \quad (17)$$

$$[C_3S] = [C_3S]_0 (1 - F_{C_3S}) \quad (18)$$

$$[C_2S] = [C_2S]_0 (1 - F_{C_2S}) \quad (19)$$

2.3 콘크리트의 이산화탄소 흡수량 산정

Fig. 4는 이산화탄소가 대기 중에 노출된 콘크리트의

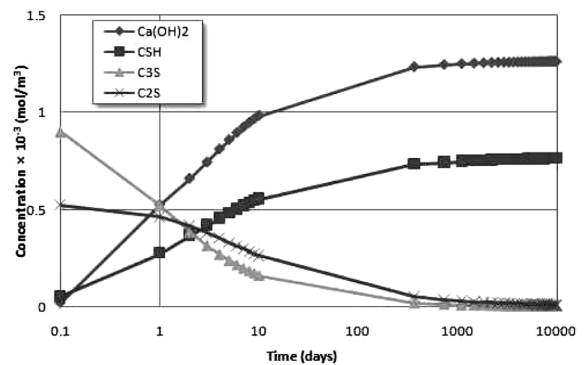


Fig. 3 Evolution with age of the molar concentration of the carbonatable constituents⁶⁾

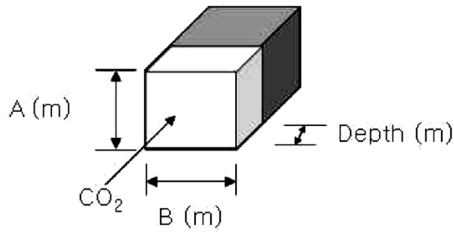


Fig. 4 Concept for calculation CO₂ absorption quantity of concrete

표면 A (m) × B (m)을 통하여 콘크리트 내부로 침투하여, 콘크리트의 표면으로부터 깊이 Depth (m)까지 콘크리트가 탄산화된 것을 나타낸다. 콘크리트의 이산화탄소 흡수량을 산정하기 위해서는 1) 탄산화된 콘크리트 체적 내 흡수 가능한 이산화탄소의 몰농도(콘크리트 내 이산화탄소와 반응하는 물질 농도의 합과 동일), 2) 콘크리트의 대기 노출면적과 탄산화 깊이, 3) 이산화탄소의 분자량 (44 g/mol)을 알면, 식 (20)을 이용하여, 탄산화된 콘크리트가 흡수한 CO₂의 정량을 산출할 수 있다.

$$m_{CO_2} = [CO_2] \times A \times B \times Depth \times 44 = g$$

$$\left(\text{단위: } \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \times \text{m} \times \text{m} \times \text{m} \times \frac{\text{g}}{\text{mol}} = \text{g}\right) \quad (20)$$

1) 탄산화 가능한 물질의 몰 농도 산정은 식 (2)~(5)에서 이산화탄소와 반응을 하는 각 수화생성물의 몰 농도 계수의 합 ([Ca(OH)₂] + 3[CSH] + 3[C₃S] + 2[C₂S] : [CO₂]) 이 콘크리트가 흡수할 수 있는 이산화탄소의 몰 농도와 같다는 가정 하에 콘크리트의 경년변화 (40, 60, 80년)에 따른 탄산화가 가능한 각 물질의 몰 농도를 산정하여, 콘크리트의 이산화탄소 흡수 몰 농도를

Table 4 Molar concentration of each carbonatable constituents and absorbable CO₂ in concrete (unit: ×1,000 mol/m³)

	Ca(OH) ₂	CSH	C ₃ S	C ₂ S	CO ₂
40years	1.261	0.763	0.002	0.009	3.576
60years	1.262	0.764	0.001	0.007	3.575
80years	1.262	0.765	0.001	0.007	3.575

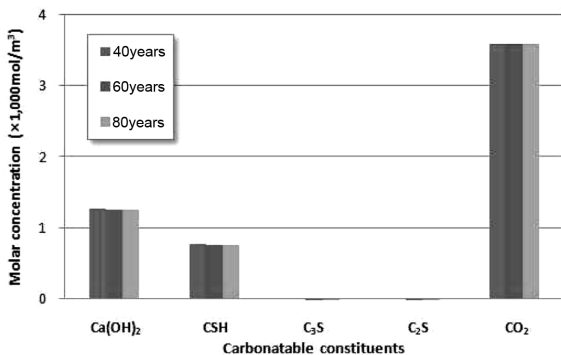


Fig. 5 Molar concentration of each carbonatable constituents and absorbable CO₂ in concrete according to time

산출하였으며, 그 결과는 Table 4 및 Fig. 5와 같다. 80년 경과 후 콘크리트 1 m³가 완전 탄산화되면 약 3,575 mol의 이산화탄소가 흡수된다.

2) 탄산화된 콘크리트의 체적산정을 위하여 콘크리트의 대기 노출면적과 시간경과에 따른 탄산화 깊이가 요구된다. 시간경과에 따른 탄산화 깊이를 계산하기 위해서는 소요시간에 대한 설정이 필요하며 본 연구에서는 40년, 60, 80년의 사용기간에 대한 콘크리트의 강도에 따른 탄산화 깊이를 산정, 이용하였다. 각 강도에 따른 탄산화 깊이 추정에는 식 (21)~(23)의 키시타니, JSCE, 고경택에 의해 제안된 식¹⁰⁾에 대해 비교한 결과 Fig. 6과 같으며, 국내의 환경조건을 고려하여 제안된 식 (23)을 사용하였으며, 그 결과는 Fig. 9 및 Table 10과 같다.

$$C = 1.72 \cdot R \cdot (w/c - 0.38) \cdot \sqrt{t} \quad (w/c \leq 60\%) \quad (21)$$

(R은 콘크리트의 탄산화 비율 (=1.2))

$$C = R \cdot (-3.57 + 9.0w/b) \cdot \sqrt{t} \quad (22)$$

(R은 환경의 영향을 나타내는 계수)
(건조한 환경: 1.6 / 습윤한 환경: 1.0)

$$C = (2.823 - 0.584 \log CO_2) \cdot (0.0303w/c - 1.0187) \cdot \sqrt{CO_2 \cdot t} \quad (23)$$

CO₂는 대기 중의 이산화탄소 농도 (=0.035)

3. 이산화탄소량의 산정 및 결과 분석

3.1 콘크리트 제조시 발생하는 CO₂ 배출량 산정

콘크리트 생산에 따른 이산화탄소 배출량은 콘크리트 배합에 사용되는 각 구성 재료의 생산시 배출되는 Table 5의 CO₂ 원단위를⁷⁾ 이용하여, 1 m³ 콘크리트 생산에 포함되는 각 구성재료의 양과 원단위의 곱의 누적으로 산정하였다. 이렇게 산출된 콘크리트의 단위 체적당 (1 m³) CO₂ 배출량을 기초로, 건물 생산에 소요된 콘크리트 총 사용량 (건물의 부피와 동일)을 고려하여, 건물의 생산과정에서 소요된 콘크리트 전체 물량에 대한 CO₂ 배출량을 산출하였다.

3.2 콘크리트의 생산 및 사용기간에 따른 CO₂ 배출량-흡수량 평가 방법론

콘크리트의 이산화탄소 배출량-흡수량 평가 방법은 단위 체적 (1 m³) 콘크리트의 생산에 따라 발생한 이산화탄소 배출량과 동일한 체적의 콘크리트 사용기간에 따른

Table 5 CO₂ emission quantity of concrete component material (unit: kg-CO₂/kg)⁷⁾

	Water	Cement	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	AE reducing water agent
kg-CO ₂ /kg	-	0.7466	0.6197	0.0037	0.0028	0.25

이산화탄소의 흡수량을 정량적으로 산출, 평가하였다. 콘크리트의 단위 부피 (1 m³) 생산당 이산화탄소 배출량 산정은 일본토목학회 자료⁷⁾를 이용하여 콘크리트 구성성분의 단위 사용량에 따른 이산화탄소 배출량 자료를 근거로 산정하였고, 사용기간에 따른 콘크리트의 이산화탄소 흡수량 산정은 Papadakis 논문^{4,6)}을 이용하여, 탄산화 가능한 물질들의 물 농도 산정과 탄화된 콘크리트의 체적, 이산화탄소의 분자량을 이용하여 임의의 사용기간에 따른 콘크리트의 이산화탄소 흡수량을 산정하였다.

3.3 아파트를 대상으로 한 사용기간 CO₂ 배출량-흡수량 평가

3.3.1 콘크리트의 CO₂ 배출량-흡수량 평가 대상 아파트 개요

본 연구에서의 평가 대상 아파트는 지상 32층, 옥탑 2층, 지하 1층으로 구성된 아파트 한 동이며, 평가한 건물의 층고는 2.9 m, 총 높이는 104.8 m이다. 건물의 수직 부재의 콘크리트 압축강도는 지하 1층~9층까지 35 MPa, 10~19층이 30 MPa, 20~26층은 27 MPa, 27~Roof는 24 MPa의 4가지로 구분되어 있다.

3.3.2 아파트에 사용된 콘크리트의 CO₂ 배출량 산정

평가 대상 구조물의 각 층별 평면은 Fig. 7과 같으며, 각 층별 콘크리트의 설계강도는 Table 6과 같다, 각 강도에 따른 콘크리트의 물량은 Figs. 7, 8의 평면도와 층고높이 (2.9 m)를 이용, Table 6과 같이 각 층별 구조체 (기둥+벽, 슬래브)의 콘크리트 부피를 계산하였다. 강도별 콘크리트 배합은 Table 7과 같으며, Table 5의 콘크리트 배합에 사용되는 CO₂ 원단위를 이용하여 강도별 콘크리트 1 m³ 생산에 대한 이산화탄소 배출량을 Table 8과 같이 산정하였다. 이를 기준으로 강도별 전체 물량에 대한 이산화탄소 배출량을 산정하였으며 그 결과는 Table 9와 같다.

3.3.3 아파트에 사용된 콘크리트의 사용기간에 따른 CO₂ 흡수량 산정

대상 구조물의 강도에 따른 사용기간별 탄산화 깊이와 층별 대기에 접한 콘크리트 표면적은 Tables 10, 11과 같으며, 강도별 대기에 면한 콘크리트의 총 표면적의 합은

Table 12와 같다. Table 12의 강도에 따른 콘크리트의 표면적과 Table 10의 사용기간에 따른 강도별 콘크리트의 탄산화 깊이를 이용하여 강도와 사용기간에 따른 탄화된 콘크리트의 체적과 흡수된 이산화탄소의 물농도를 Table 13과 같이 산정하였다. Tables 10~13의 데이터와 식 (23)을 이용하여 강도별 콘크리트의 총 사용량에 대

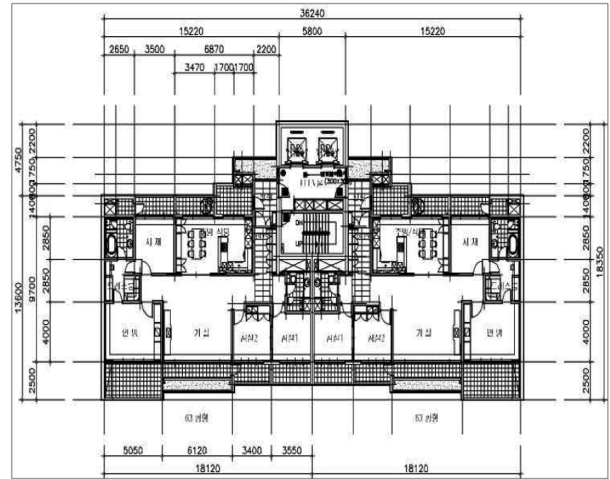


Fig. 7 Normal plane (5th~31th)

Table 6 Calculation amount of concrete according to same strength and planes (m³)

Story	Columne +wall	Slab	Total	Strength (MPa)	W/C (%)
Basement 1st	185.96	0.00	185.96	35	39
1th	220.30	84.36	304.66		
2th	248.04	79.05	327.09		
3th	181.29	47.89	229.18		
4th	180.87	468.87	649.74		
5th~9th	178.40	155.73	334.13 × 5	30	43
10th~19th	178.40	155.73	334.13 × 10		
20th~26th	178.40	155.73	334.13 × 7		
27th~31th	178.40	155.73	334.13 × 5	24	50
32th	406.02	155.73	561.75		
Roof Floor	152.90	58.27	211.17		
Penthouse 1th	191.06	33.23	224.29		
Penthouse 2th	25.61	9.19	34.80		

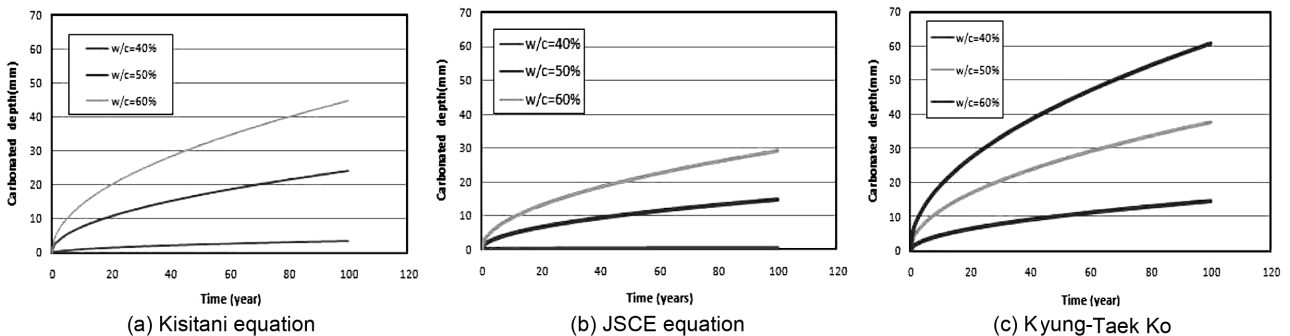


Fig. 6 Various prediction equations for carbonated depth of concrete according to strength (W/C)

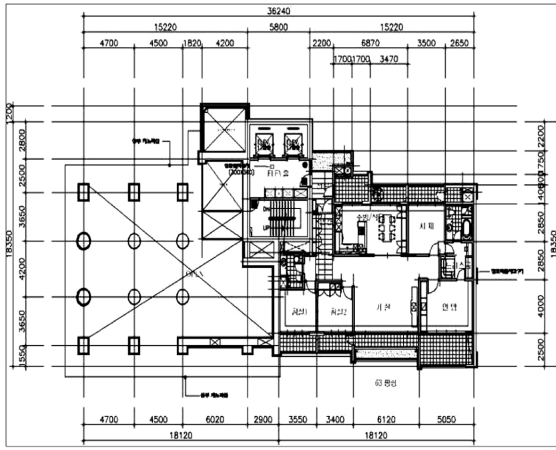


Fig. 8 1st floor plane

Table 7 Mix proportions according to strength (unit: kg)

MPa	W/C (%)	W	C	F/A	S	G	AE reducing water agent
24	50	174	304	45	848	944	2.09
27	46	175	328	49	832	934	2.64
30	43	178	348	61	797	935	3.07
35	39	179	394	69	759	926	3.7

Table 8 CO₂ emission quantity of 1 m³ concrete according to strength

MPa	W/C (%)	CO ₂ emission quantity per 1 m ³ concrete (kg-CO ₂ /m ³)
35	39	342
30	43	303
27	46	281
24	50	261

Table 9 CO₂ emission quantity of total concrete according to strength

Design strength (MPa)	CO ₂ emission quantity (kg-CO ₂)
35	1,151,610
30	1,012,414
27	657,234
24	705,394
3,526,652	

Table 10 Concrete carbonated depth according to strength in service life

Design strength (MPa)	40years	60years	80years	Unit
35	0.00784	0.0096	0.01109	m
30	0.01367	0.01674	0.01933	
27	0.01804	0.0221	0.02552	
24	0.02387	0.02924	0.03376	

하여 사용 기간에 따른 이산화탄소 흡수량을 산정할 수 있으며 그 결과는 Table 14와 같다.

3.3.4 콘크리트의 CO₂ 배출량-흡수량 평가 결과 및 향상 방안
대상 구조물 생산에 소요된 콘크리트의 물량 산출에

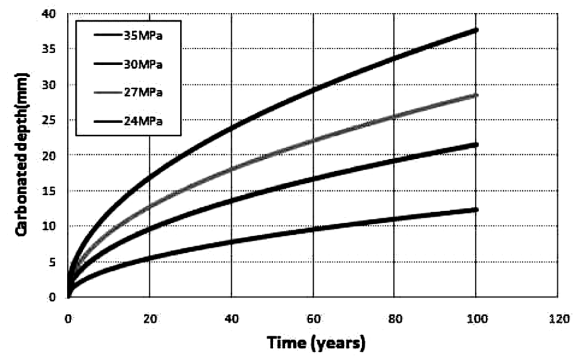


Fig. 9 Prediction equation for carbonated depth proposed by Kyung-Taek Ko

Table 11 Surface area of concrete according to strength and planes (unit:m²)

Story	Left wall	Rear wall	Right wall	Front wall	Slab	Inner wall +column	Design strength (MPa)
B 1F	0	0	0	0	596.15	947.00	35
1th	0	0	0	0	596.15	549.26	
2th	53.22	60.96	53.22	76.53	596.15	631.88	
3th	54.13	62.01	54.13	77.85	596.15	642.78	
4th	53.22	105.10	53.22	105.10	596.15	1123.98	
5th~9th	53.22	105.10	53.22	105.10	596.15	1116.44	30
10~19th	53.22	105.10	53.22	105.10	596.15	1116.44	
20~26th	53.22	105.10	53.22	105.10	596.15	1116.44	
27~31th	53.22	105.10	53.22	105.10	596.15	1116.44	24
32th	60.56	119.59	60.56	119.59	596.15	1355.05	
Pent 1th	50.32	98.08	61.63	98.08	596.15	484.91	
Pent 2th	50.32	73.37	50.32	73.37	596.15	292.32	

Table 12 Surface area according to strength

Design strength (MPa)	Surface area of outer building	Unit
35	17,830	m ²
30	20,292	
27	14,204	
24	14,386	

Table 13 CO₂ molar concentration according to strength

Design strength (MPa)	Molar concentration of CO ₂	Unit
35	3,575	mol/m ³
30	2,821	
27	2,789	
24	2,749	

Table 14 CO₂ absorption quantity according to strength in service life

	40 years	60 years	80 years	Unit
35 MPa	21,988	26,294	31,103	kg-co ₂
30 MPa	34,430	42,613	48,686	
27 MPa	31,444	38,521	44,482	
24 MPa	41,535	50,879	58,744	
Total amount	129,397	158,307	183,015	

근거하여 이산화탄소 배출량을 산정한 결과와 사용기간 40년, 60년, 80년에 따른 대상 구조물의 콘크리트가 흡수하는 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 산정한 결과는 Table 15와 같다. 이를 통해 사용기간에 따른 대상 구조물의 이산화탄소 배출량-흡수량은 Table 15와 식 (24)를 이용하여 정량적인 계산이 가능하다. 식 (25)를 사용하여 대상 구조물 생산으로 배출된 이산화탄소량에 대한 사용기간에 따른 흡수량의 비를 산출할 수 있으며 그 결과는 Table 15 및 Figs. 10, 11과 같다.

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량} - \text{흡수량} = \text{CO}_2 \text{ 배출량} - \text{CO}_2 \text{ 흡수량} \quad (24)$$

$$\text{CO}_2 \text{ 배출량 대비 흡수량} = \text{CO}_2 \text{ 흡수량} / \text{CO}_2 \text{ 배출량} \times 100 \quad (25)$$

대상 구조물을 40년 사용할 시, 이산화탄소 배출량 대비 흡수량은 3.65%였으며, 사용기간이 60년, 80년일때의 이산화탄소 배출량 대비 흡수량은 약 4.47, 5.18%로 사용기간이 길어질수록 건축물의 이산화탄소 흡수량이 증가하였다. 대상 구조물을 80년 사용할 시, 이산화탄소 배

Table 15 Assessment result of emission-absorption of CO₂

	40years	60years	80years	Unit
CO ₂ emission quantity	3,527			ton-CO ₂
CO ₂ absorption quantity	129	158	183	
Emission-absorption of CO ₂	3,398	3,369	3,344	
Ratio of absorption over emission of CO ₂	3.65	4.47	5.18	%

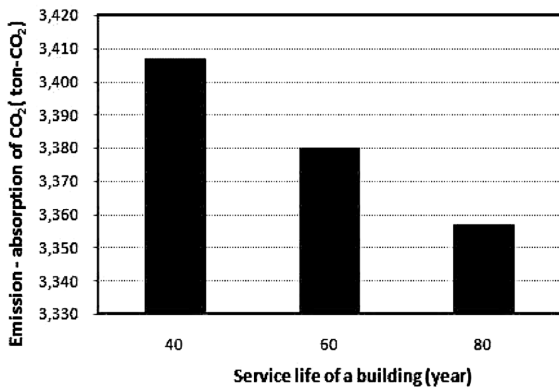


Fig. 10 Emission - absorption of CO₂ according to service life of a building

출량 대비 흡수량이 약 5.18%로 작은 수치를 나타내지만, 본 연구에서는 콘크리트 사용에 따른 이산화탄소의 배출량과 흡수량을 정량적으로 산정하는 것에 목적과 중요성을 두었다.

한편 콘크리트 사용에 따른 이산화탄소 배출량 대비 흡수량의 배출량-흡수량을 개선하기 위해서는, 콘크리트 배합에 사용되는 시멘트를 대신하여 이산화탄소 원단위가 낮은 고티올라이트나 플라이애쉬와 같은 혼화재를 치환한다면 (Table 16, Fig. 12), 배출량-흡수량을 개선할 수 있다는 연구결과가 있다.¹¹⁾ 또한 콘크리트의 이산화탄소 흡수량을 증가시키기 위하여, 구조물의 해체 후 콘크리트를 부수어 그것을 도로 포장에 사용함으로써 콘크리트가 대기와 접촉하는 표면적을 증가시켜 이산화탄소 흡수량을 크게 증가시킬 수 있다는 연구 결과도 있다.²⁾

따라서 추후 연구에서, 콘크리트가 대기와 접하는 면적을 증가시키거나, 이산화탄소와 반응을 하는 콘크리트 내 성분을 증가, 혹은 대기 중의 이산화탄소 증가량을 고려한 흡수량 산정 등이 고려된다면 콘크리트의 이산화탄소 배출량-흡수량의 정량적 수치를 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존 문헌 고찰을 통하여, 콘크리트 사용기간에 따른 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 산출하는 방법에 대하여 연구하였으며, 실제 구조물을 대상으로 이산화탄소의 배출량 및 흡수량을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

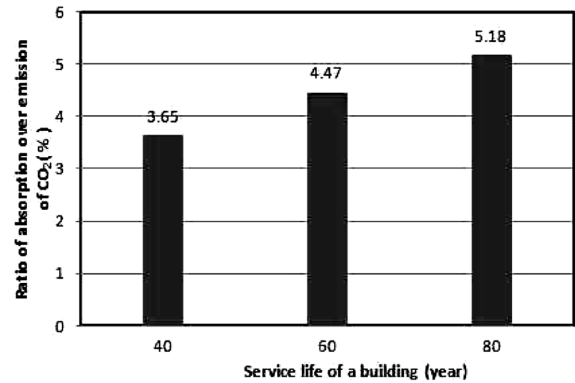


Fig. 11 Ratio of absorption over emission of CO₂ according to service life of a building

Table 16 CO₂ emission quantity of concrete containing blast furnace slag (in case of 30 MPa)

MPa	Replacement ratio (%)	CO ₂ emission quantity (kg-CO ₂ /m ³)	Unit weight (kg/m ³)						
			W	C	BS	FA	S	G	AE reducing water
30	0	304	174	304	0	45	848	944	2.09
	20	278	175	328	56	49	832	934	2.64
	40	238	178	348	84	61	797	935	3.07
	60	186	179	394	83	69	759	926	3.7
CO ₂ emission (kg-CO ₂ /m ³)		-	-	0.7466	0.46	0.6197	0.0037	0.0028	0.25

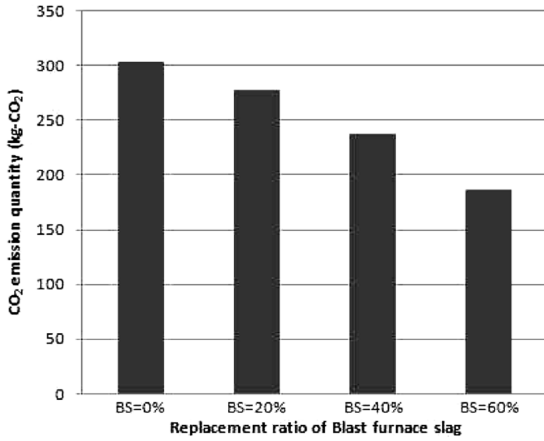


Fig. 12 CO₂ emission quantity in producing 1 m³ concrete (30 MPa)

- 1) 아파트를 대상으로 콘크리트의 대기 중 노출면적과 사용기간에 따른 탄산화 깊이, 콘크리트 내 탄산화 가능한 물질의 물 농도를 이용하여, 아파트의 사용기간에 따른 콘크리트의 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 산출할 수 있다.
- 2) 건물의 사용기간이 길어질수록 콘크리트 사용에 따른 이산화탄소 배출량 대비 흡수량을 증가시킬 수 있다.
- 3) 혼합시멘트 사용을 통한 이산화탄소 배출량 저감과 건물사용기간 증가 및 대기에 면한 콘크리트 표면적 증가에 의한 이산화탄소 흡수량 증가를 통해 콘크리트의 이산화탄소 배출량-흡수량을 개선할 수 있다.
- 4) 본 연구의 범위에서 아파트의 CO₂ 배출량 대비 흡수량 평가는 80년 사용시 약 5.18%로 평가되었다.

본 논문은 참고문헌을 바탕으로 단위 콘크리트에 대한 CO₂ 배출량 및 흡수량을 이론적으로 산출하였으며, 향후 이에 대한 실험평가를 통한 검증 및 보완이 필요하고 판단된다.

요약 콘크리트는 생산과정에서 다량의 이산화탄소를 배출하는 시멘트를 사용하기 때문에 반친환경적 재료로 인식되고 있다. 하지만 콘크리트는 사용기간 중 탄산화 과정을 통하여 대기중의 이산화탄소를 흡수한다. 이에 본 연구에서는 기존문헌 고찰을 통하여 1) 콘크리트 내 탄산화 가능한 물질의 농도, 2) 탄산화된 콘크리트의 체적, 3) 이산화탄소 분자량을 이용, 탄산화를 통한 콘크리트의 이산화탄소 흡수량의 정량적 산출 방법을 제시하였다. 또한 콘크리트 생산에 사용되는 재료들의 이산화탄소 배출량 자료를 이용하여 단위 콘크리트 생산에 따른 이산화탄소 배출량을 정량적으로 산출하였다. 이러한 콘크리트의 이산화탄소 흡수량 및 배출량의 정량적 산출방법을 이용하여 실제 사용중인 아파트 건축물 1동을 대상으로 하여 콘크리트의 생산에 따른 배출량과 사용기간에 따른 이산화탄소 흡수량을 정량적으로 산출하여 이산화탄소의 배출량-흡수량 평가를 실시하였다. 그 결과 건축물을 40, 60, 80년 사용시, 사용된 콘크리트의 이산화탄소 배출량 대 흡수량의 비율이 3.65, 4.47, 5.18%로 나타났다. 본 연구는 콘크리트 생산 및 사용에 따른 이산화탄소 배출량-흡수량의 정량적 산정방법에 연구의 목적을 두었으며 이산화탄소 배출량-흡수량 평가 결과 구조물을 80년 사용할 시 약 5.18%로 그 값이 미비하였으나 시멘트의 혼화재 치환을 증가를 통한 배출량 저감과 탄산화 체적 증가를 통한 이산화탄소 흡수량 증가를 통해 배출량-흡수량을 향상시킬 수 있으며, 향후 콘크리트의 이산화탄소 배출량-흡수량 평가에 본 연구의 방법이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트 탄산화, CO₂

감사의 글

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대 친환경건축 연구센터 (R11-2005-056-04003)와 지식경제부국제공동기술개발사업 (200900000000014)의 지원결과입니다.

참고문헌

1. Houghton, J.T., *The Scientific Basis*, Report, the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001, pp. 2~7.
2. Pade, C. and Guimaraes, M., "The CO₂ Uptake of Concrete in a 100 Year Perspective," *Cem. & Con. Res.*, Vol. 37, Issue 9, 2007, pp. 1348~1356.
3. B.Lagerblad, *Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle*, Report, State of the Art, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 2006, pp. 22~32.
4. Papadakis, Vagelis G., Fardis, Michael N., and Vayenas, Costas G., "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 4, 1991, pp. 363~373.
5. Papadakis, Vagelis G., Fardis, Michael N., and Vayenas, Costas G., "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 2, 1991, pp. 186~196.
6. Papadakis, Vagelis G., Fardis, Michael N., and Vayenas, Costas G., Hydration and Carbonation of Pozzolanic Cements, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 2, 1992, pp. 119~130.
7. 日本土木學會, 콘크리트 구조물의 환경性能照査指針(試案), 2005, 69pp.
8. Mehta, P. Kumar and Monteiro, Paulo J. M., *Concrete 3rd Edition*, McGraw-Hill, New York, 2006, pp. 207~209.
9. Bogue, R. H., "Calculation of the Compounds in Portland Cement," *Ind. Engng. Chem. Analyt. Ed.*, 1, No. 4, 1929, pp. 192~197.
10. 고경택, 김성욱, 김도겸, 조명석, 송영철, "콘크리트 중성화 진행의 예측," 한국콘크리트학회, 학술발표대회 논문집, 11권, 2호, 1999, pp. 767~770.
11. 친환경건축연구센터, 친환경건축기술, 기문당, 서울, 2007, pp. 489~495.