



콘크리트 배합설계를 고려한 구조물의 전과정 CO₂평가 모델

양근혁^{1)*} · 서은아²⁾

¹⁾경기대학교 플랜트·건축공학과 ²⁾경기대학교 건축공학과

A Model for Lifecycle CO₂ Assessment of Building Structures Considering the Mixture Proportions of Concrete

Keun-Hyeok Yang^{1)*} and Eun-A Seo²⁾

¹⁾Dept. of Plant-Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Seoul 120-702, Korea

ABSTRACT The present study proposes a phased model to assess the lifecycle CO₂ amount of concrete structures. The considered system boundary is from cradle to recycling, which includes constituent material, transportation, batching and mixing in ready-mixed concrete plant, use and demolition of structure, and crushing and recycling of demolished concrete. The CO₂ uptake of concrete by carbonation during lifetime (40 years) of a structure and the recycling life (20 years) after demolition is estimated using a simple approach generalized to predict the carbonation depth from the surfaces of concrete element and recycled aggregates. Based on the proposed phased model, a performance evaluation table is realized to straightforwardly examine the lifecycle CO₂ amount of concrete structures. The proposed model demonstrates that the contribution of ordinary portland cement (OPC) to lifecycle CO₂ emission of the concrete structure occupies approximately 85%. Furthermore, the CO₂ uptake is estimated to be approximately 15~18% of the lifecycle CO₂ emissions of concrete structures, which corresponds to be 19~22% of the emissions from OPC production. Overall, the proposed CO₂ performance table is expected to be practically useful as a guideline to determine the CO₂ emission or uptake at each phase of concrete structures.

Keywords : lifecycle CO₂, emission, uptake, concrete structure, performance table

1. 서 론

지구온난화에 따른 이산화탄소(CO₂) 배출량의 감축을 위한 세계적 공감대의 형성과 함께 콘크리트 산업 및 건설산업에서도 저탄소 기술이 중요하게 고려되고 있다. 일반적으로 제품의 CO₂ 배출량은 원료채취에서부터 폐기 및 재활용 단계를 고려한 전과정 평가를 요구하고 있다.¹⁾ 이에 따라 IgCC²⁾와 같이 환경을 고려한 기준들에서도 ISO 14040¹⁾에 따라 건축물의 전과정 CO₂ 배출량 평가를 요구하고 있다. 하지만 건축물의 전과정 CO₂ 배출량 평가를 위해서는 방대한 전과정 목록(lifecycle inventory, LCI) 데이터베이스(DB)가 필요하며, 특히 시공 및 해체 과정에서 사용장비들의 다양성도 고려해야만 하는 어려움이 있다. 이에 따라 콘크리트 구조물에서 CO₂ 평가는

주로 원료채취에서부터 콘크리트 생산단계까지의 시스템 경계에서 고려되고 있다.

한편, 최근의 CBI(Swedish Cement and Concrete Institute)³⁾를 중심으로 한 북유럽의 각 콘크리트 연구기관들은 콘크리트 생산단계까지만 고려할 경우 콘크리트의 CO₂ 배출량은 과대평가되며, 구조물의 사용단계 및 재활용 단계에서 탄산화에 의한 CO₂ 포집을 함께 고려할 필요가 있음을 주장하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 Pade and Guimaraes⁴⁾는 시멘트 소성과정에서 배출되는 CO₂는 구조물의 100년 생애주기를 고려할 경우 콘크리트의 탄산화에 의해 대부분 포집될 수 있음을 제시하였다. 하지만 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집양은 탄산화 모델, 콘크리트 노출환경 및 콘크리트 재활용 시나리오에 중요한 영향을 받는다.⁵⁾ 따라서 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가는 구조물 생산을 위한 각 단계별에서 지역환경 및 일반적 사용 장비 등을 고려한 합리적인 모델들의 정립이 우선 필요하다.

이 연구에서는 국내의 기후환경, LCI DB, 구조물 내구년수 및 건설환경을 고려하여 콘크리트 구조물의 전과정

*Corresponding author E-mail : yangkh@kgu.ac.kr

Received November 25, 2013, Revised January 23, 2014,

Accepted January 23, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

CO₂ 평가절차를 제시하였다. 전과정 평가를 위한 시스템 경계는 원료채취에서부터 해체 및 재활용 단계까지로서 재료, 운송, 생산, 시공, 구조물 사용 및 해체, 폐콘크리트의 파쇄 및 재활용 단계들을 포함한다. 구조물 해체 후의 재활용 시나리오는 2012년도의 국내 측정값⁶⁾을 이용하였다. 제시된 절차의 일반적 적용을 위하여 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가를 위한 성능평가표를 제시하였다. 또한 성능평가표를 이용하여 아파트 기준층의 내벽과 외벽에서 콘크리트 배합조건(동일강도에서 고로슬래그 및 플라이애쉬 치환의 영향)에 따른 각 단계에서의 CO₂ 배출 및 포집량을 비교하였다.

2. 전과정 CO₂ 평가 절차

콘크리트의 주문과 생산에서 이용되는 단위를 고려하여 이 평가에서 설정된 콘크리트의 기능단위는 1 m³이다. 시스템 경계는 Fig. 1과 같이 콘크리트 구성요소들인 원재료들의 채취(요람)에서부터 해체 및 재활용단계로서 구성재료, 운반, 콘크리트 생산과 타설, 구조물 사용과 해체, 해체된 콘크리트의 파쇄 및 재활용 등으로부터의 CO₂ 배출을 고려하였다. 콘크리트 배합에 대한 데이터 품질로서 시간적 경계는 2012년이며, 지역적 경계는 서울 중심의 한국이다. 콘크리트 배합, 시공 및 해체에 대한 기술적 경계는 표준기(3~5월, 9~11월)이다. 구조물의 시공 시 거푸집 공사 및 철근공사는 무시하였으며, 단지 장비를 활용한 콘크리트 타설 만을 고려하였다. 구조물의 사용 중에는 냉·난방, 조명, 조리 등에 의한 에너지 소비에 따른 CO₂ 배출량은 무시하고 단지 탄산화에 의한 CO₂ 포집만을 고려하였다. 또한 구조물의 노후 및 열화에 의한 보수·보강공사도 무시하였다. 따라서 콘크리트만의 영향을 고려한 시스템 경계에서의 구조물 전과정

CO₂ 양(C_{total})은 개별 적산법에 의해 다음 식을 이용하여 산정될 수 있다.

$$C_{total} = C_M + C_T + C_P + C_C + C_S + C_D + C_B + C_R \quad (1)$$

여기서, C_M , C_T , C_P , C_C , C_S , C_D , C_B 및 C_R 는 각각 재료, 운송, 콘크리트 생산, 타설, 구조물 사용, 해체, 폐콘크리트의 파쇄 및 재활용 단계에서의 CO₂ 양이다.

2.1 시스템 경계에서 각 단계별 평가방법

2.1.1 재료단계

콘크리트 구성요소들(시멘트계 재료, 골재, 물 및 혼화제)에 의한 CO₂ 배출양(C_M)은 다음 식으로 산정된다.

$$C_M = \sum_{i=1}^n (W_i \times CO_{2(i)LCI}) \quad (2)$$

여기서, i 는 콘크리트 생산을 위해 이용된 각 재료들이며, n 은 이들 재료들의 수이며, W_i 와 $CO_{2(i)LCI}$ 는 각각 재료 i 의 단위용적질량(kg/m³)과 CO₂ 배출 원단위(CO₂-kg/kg)이다. 재료단계에서의 시스템 경계는 원료채취에서부터 가공·제조 후 출품되는 출구(gate)까지이다.

2.1.2 운송단계

운송단계에서의 CO₂ 배출양에 대한 시스템 경계는 다음과 같이 고려될 수 있다. 콘크리트 구성재료들의 출구에서부터 레미콘공장까지; 생산된 콘크리트의 레미콘 공장으로부터 현장까지; 구조물 해체 후 폐콘크리트의 현장에서부터 파쇄공장까지; 재생골재들의 파쇄공장에서부터 각 재활용처까지이다. 따라서 운송단계에서의 CO₂ 배출양(C_T)은 다음 식으로부터 산정된다.

$$C_T = \sum_{i=1}^n (W_i \times D_i \times CO_{2(i)LCI_{TR}}) + D_B \times CO_{2LCI_{TR-con}} + W_D \times D_D \times CO_{2LCI_{TR}} + \sum_{j=1}^m (W_R(j) \times D_R(j) \times CO_{2(j)LCI_{TR}}) \quad (3)$$

여기서, D_i 는 재료 i 의 출구에서 레미콘 공장까지의 운반 거리(km)이며, $CO_{2(i)LCI_{TR}}$ 은 재료 i 의 운송수단의 CO₂ 원단위(CO₂-kg/km·kg)이며, D_B 는 레미콘 공장에서 시공 현장까지의 운반거리(km)이며, $CO_{2(i)LCI_{TR-con}}$ 은 레미콘 차량의 CO₂ 원단위 (CO₂-kg/km·m³)이며, W_D 는 해체한 폐 콘크리트의 무게이며(kg/m³), D_D 는 건축물 현장에서 폐콘크리트 파쇄공장까지의 거리(km)이며, j 는 재활용처를 의미하며, $W_R(j)$ 는 재활용 골재의 각 적용 시나리오 j 에 대한 무게(kg/m³)이며, $D_R(j)$ 는 파쇄공장에서 각 재활용처까지의 거리(km)이며, $CO_{2(j)LCI_{TR}}$ 은 재활용 골재 j 의 운송

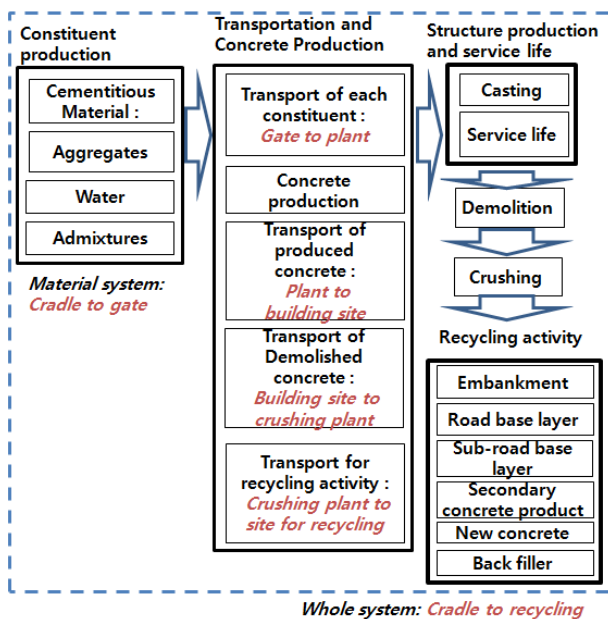


Fig. 1 Schematic identification of concrete lifecycle

수단의 CO₂ 원단위(CO₂-kg/km·kg)이다. 운송수단에 대한 정확한 정보가 없을 시, 시멘트계 재료는 23 톤 용량의 벌포카를, 골재 및 해체한 콘크리트와 재활용 골재는 15 톤 트럭을, 생산된 콘크리트는 6 m³ 용량의 레미콘 트럭의 수단을 기본으로 적용할 수 있다.

2.1.3 콘크리트 생산단계

콘크리트 제조공정은 각 재료들의 하역, 저장, 계량, 혼합기로의 운반 및 혼합 등의 5공정으로 구분될 수 있다. 5가지 공정에서 대표적으로 사용되는 기계설비는 콘크리트 구성재료의 저장을 위한 사일로와 재료운반을 위한 컨베이어벨트 설비, 콘크리트 믹서이다. 따라서, 콘크리트 생산단계에서의 CO₂ 배출양(C_p)은 각 공정에서의 기계설비로부터 소비되는 에너지양으로부터 산정될 수 있다. 국내의 레미콘 공장에 대한 자료조사로부터 콘크리트 1 m³ 를 생산하기 위해 소비되는 에너지원으로부터 환산된 CO₂ 원단위는 약 0.71 CO₂-kg/m³로 평가된다.⁷⁾

2.1.4 콘크리트 타설단계

콘크리트 타설에 의한 CO₂ 배출양(C_t)은 사용되는 기계장비에 대한 유류 및 전기사용량의 총합으로 산출될 수 있다. 타설 시 사용되는 기계장비는 콘크리트 펌프차와 진동기를 고려할 수 있다. 에너지원이 경유인 펌프차는 붐 길이에 따라 CO₂ 원단위가 차이가 있는데, 붐 길이가 28m인 경우 CO₂ 원단위는 3.06 CO₂-kg/m³ 이며, 붐 길이가 52m인 경우 그 값은 6.2 CO₂-kg/m³이다.⁸⁾ 진동기는 에너지원이 전기로서 콘크리트 1 m³의 진동을 위한 시간을 5분으로 가정하면, 진동기의 CO₂ 원단위는 0.18 CO₂-kg/m³으로 평가될 수 있다.⁸⁾

2.1.5 사용단계

구조물 운영을 위한 에너지원 및 그 소비량은 구조물 기능과 외장재 및 단열재 등에 의해 상당한 차이를 보이며, 이들에 대한 데이터 구축도 아직 미미한 편이다. 따라서 구조물 사용단계에서의 CO₂ 배출양(C_s)은 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집만을 고려하였다. 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집 평가방법은 3장에 자세히 나타내었다. 구조물 사용수명은 법인세법 시행규칙⁹⁾의 건축물 기준내용연수에 따라 40년으로 가정한다.

2.1.6 해체 단계

구조물 해체단계에서의 CO₂ 배출양(C_d)은 해체방식(대형기계식, 발파식)에 따른 해체장비의 유류 및 전력소비량을 이용하여 산정될 수 있다. 해체장비는 압쇄기, 유압식 백호, 대형브레이크 및 살수차 등이 고려될 수 있다. 이들 장비들의 소비 에너지로부터 콘크리트 해체를 위한 CO₂ 원단위는 6.61 CO₂-kg/m³로 평가될 수 있다.¹⁰⁾

Table 1 Recycling details of demolished concrete in Korea

Recycling field	Recycled aggregates					
	Road base	Sub-road base	Embank -ment	Back filler	New concrete	Secondary concrete product
Portion (%)	10	33	31	17	4	5
$d_{a,max1}^{(1)}$ (mm)	40				20	5
$d_a^{(2)}$ (mm)	25				15	2.5

⁽¹⁾ $d_{a,max}$ is maximum size of recycled aggregates (concrete crusher-run).

⁽²⁾Mean size of recycled aggregates is obtained from particle distribution curve of each $d_{a,max}$.

2.1.7 재활용을 위한 파쇄단계

해체된 콘크리트 구조물은 중간처리업체에서 크러셔를 이용하여 파쇄 됨을 가정하였다. 중간처리업체에서의 고정식 크러셔는 시간당 200톤의 폐콘크리트를 파쇄하며, 이때의 전력소모량을 고려하여 산정된 CO₂ 배출양(C_B)은 11.41 CO₂-kg/m³이다.¹⁰⁾

2.1.8 재활용 단계

구조물의 철거 후 재활용 단계에서는 각 재활용 공정에서 이용되는 장비들의 다양성 및 새 콘크리트에 재활용될 경우 운송, 생산, 사용, 해체 및 폐기 등에 의한 CO₂ 배출양을 반복 산정해야 하는 어려움이 있기 때문에 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집양만을 고려하였다. 재활용 단계에서 CO₂ 포집양은 각 재활용 분야에서 재생골재의 표면적에 의해 큰 영향을 받는다. 따라서 콘크리트 재활용에 대한 상세정보는 CO₂ 포집양 평가에서 매우 중요하다. 2012년 국내에서 철거된 폐콘크리트의 재활용 상세를 Table 1에 나타내었다. 콘크리트 구조물의 철거 후 콘크리트 2차 제품 또는 새 콘크리트 생산을 위한 순환 골재로 재활용되는 경우 탄산화 기간은 2개월(일반적인 야적기간)로 가정하였다. 재활용 수명은 법인세법 시행규칙⁹⁾의 토조 및 블록조 기준내용연수에 따라 20년으로 한다.

2.2 LCI 데이터베이스

이 연구에서 고려된 Fig. 1의 시스템에서 각 재료 및 운반에 대한 LCI는 기본적으로 국내 데이터¹¹⁾를 이용하였다. 혼화재 및 골재와 같은 국내 LCI 데이터가 아직 마련되지 않은 재료들에 대해서는 European Commission¹²⁾에서 제공하는 값을 참고하였다. 콘크리트 생산, 타설, 해체 및 파쇄단계의 경우 사용장비들에 대한 LCI DB가 아직 마련되지 않았기 때문에 2012년도에 제시된 사용장비들의 에너지소비원으로부터 CO₂ 배출계수를 환산하였다.

3. 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량

콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 원료채취 또는 제조·가공 등과 같은 물리적 공정보다는 재료의 화학적 특성에 관계되므로 LCI와 같은 객관적인 자료의 구축이 힘들다. 따라서 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량을 합리적으로 평가하기 위해서는 재령에 따른 탄산화 깊이를 가능하면 정확하게 예측할 수 있는 모델정립이 중요하다. CO₂ 포집량은 건축물의 사용단계 및 재활용 단계 중에 평가되는 것이므로 탄산화 깊이 예측모델에서 환경적 요소 및 콘크리트 노출조건 등도 중요하게 다루어져야 한다.

재령 t (일)에서 탄산화에 의한 콘크리트 CO₂ 포집량 (U_{CO_2})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{CO_2}(t) = a_{CO_2}(t) \cdot A_{sf} \cdot x_c(t) \quad (g) \quad (4)$$

여기서, $a_{CO_2}(t)$ 는 재령 t 에서 탄산화에 의해 흡수가능한 CO₂ 양(g/cm³)이며, A_{sf} 는 CO₂에 노출된 콘크리트 부재의 표면적(cm²)이며, $x_c(t)$ 는 재령 t 에서의 탄산화 깊이(cm)이다.

3.1 흡수가능한 CO₂ 양

시멘트 페이스트의 구성광물 및 수화생성물 중에서 탄산화 가능 요소의 몰농도에 따라 결정되는 $a_{CO_2}(t)$ 는 다음 식에 의해 산정될 수 있다.⁴⁾

$$a_{CO_2}(t) = \alpha_h(t) \cdot M_{CO_2}(t) \cdot M_{CO_2} \times 10^{-6} \quad (g/cm^3) \quad (5)$$

여기서, $\alpha_h(t)$ 는 재령 t 에서 시멘트 페이스트의 수화도이며, $M_{CO_2}(t)$ 는 재령 t 에서 콘크리트 단위체적당 페이스트의 탄산화 가능요소의 몰농도(mol/cm³)이며, M_{CO_2} (=44 g/mol)는 CO₂의 몰 질량이다. Papadakis et al.¹³⁾은 수화물의 화학적반응에 기반하여 완전수화 상태에서 $M_{CO_2}(t)$ 를 결정하기 위한 수학적 모델을 제시하였다. Papadakis et al.의 모델을 이용하여 산정한 $M_{CO_2}(t)$ 를 Fig. 2에 나타내었다. 탄산화 가능요소들의 몰농도는 시멘트 주요 성분들의 몰 질량으로부터 산정되므로 $M_{CO_2}(t)$ 의 값은 단위시멘트 양에 의해 가장 큰 영향을 받았다. 한편, $M_{CO_2}(t)$ 의 값은 재령의 증가와 함께 점차 감소하는데 재령 1년 이후에는 거의 일정한 값으로 수렴하였다. 콘크리트 구조물의 사용수명(40년)에서 시멘트 콘크리트에 대한 다양한 배합들¹⁴⁾로부터 산정한 $M_{CO_2}(t)$ 의 최종값과 단위시멘트 양의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 따라서 $M_{CO_2}(t)$ 는 다음 식에 의해 단순히 산정될 수 있다.

$$M_{CO_2}(t) = 8.06C \quad (\times 10^{-6} \text{ mol/cm}^3) \quad (6)$$

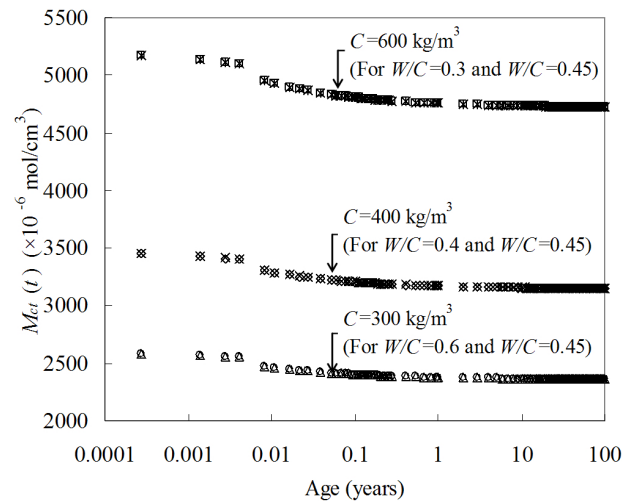


Fig. 2 Molar concentrations of carbonatable constituents according to age

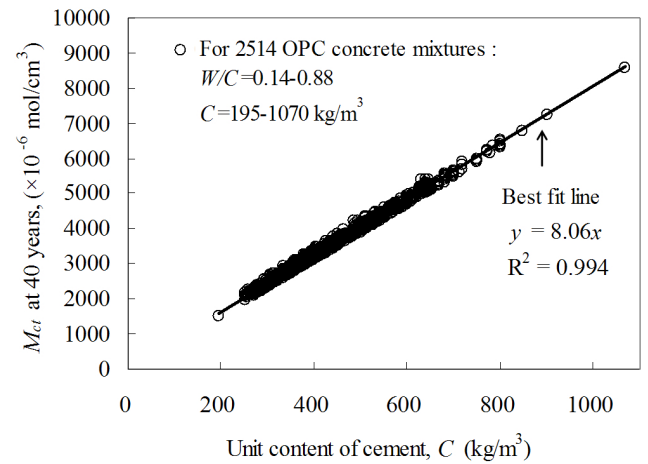


Fig. 3 Generalization of the molar concentration of carbonatable constituents

일반적인 분말도를 갖는 시멘트는 재령 100년 후에도 완전히 수화하지 않는다. 재령에 따른 시멘트의 수화도는 극한 수화도(α_∞)에 수렴하는 포물선 형태를 보인다. Yang et al.⁵⁾은 Cha¹⁵⁾의 실험 결과를 기반으로 $\alpha_h(t)$ 를 다음과 같이 물-시멘트비(W/C)의 함수로 모델링하였다.

$$\alpha_h(t) = \frac{t}{2.0+t} \alpha_\infty \quad (7)$$

$$\alpha_\infty = \frac{1.031 W/C}{0.194 + W/C} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터 콘크리트 구조물의 사용수명(40년)에서 $\alpha_h(t)$ 의 값과 α_∞ 값의 차이는 무시할만큼 작다.

3.2 탄산화 깊이 및 CO₂ 확산계수

일반적으로 콘크리트의 탄산화깊이 $x_c(t)$ 는 탄산화속도와 시간의 함수로서 다음과 같이 일반화된다.

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}(t)}{a_{CO_2}(t)} \cdot C_{CO_2} \cdot t} \quad (9)$$

여기서, $D_{CO_2}(t)$ 는 재령 t 에서 CO_2 확산계수(cm^2/day)이며, C_{CO_2} 는 콘크리트 면에서 CO_2 질량농도(g/cm^3)이다. CO_2 의 부피농도(ppm)는 이상기체이론을 이용하여 질량농도로 환산된다. 콘크리트에서 CO_2 확산속도는 재료특성(물-시멘트비, 시멘트 수화도, 공극크기 분포와 포화도) 뿐만 아니라 콘크리트의 노출조건(상대습도, 온도, 콘크리트 표면 마감상태)에 의해서도 영향을 받는다. 또한 Pommer and Pade¹⁶⁾에 의해 제시된 바와 같이 혼화재(supplementary cementitious materials, SCM)도 CO_2 확산속도에 중요한 영향을 미친다. 콘크리트 표면 마감재는 탄산가스의 침투를 차단시켜 탄산화 속도를 늦춘다.¹⁷⁾ 이러한 영향들을 고려하여 Yang et al.은 $D_{CO_2}(t)$ 를 다음과 같이 모델링하였다.

$$D_{CO_2}(t) = 136.6\beta_s\beta_f\beta_h(a/C)[\epsilon_p(t)]^2 \quad (10)$$

여기서, β_s 는 혼화재 치환에 대한 보정계수(Table 2¹⁶⁾)이며, β_f 는 마감재에 대한 보정계수(Table 3¹⁷⁾)이며, $\beta_h = (1 - RH/100)^{0.6}$ 는 상대습도에 대한 보정계수¹⁸⁾이다. 여기서 RH 는 상대습도(%)이며, a/C 는 골재-시멘트 질량 비이며, $\epsilon_p(t)$ 는 재령 t 에서 시멘트 페이스트의 공극률이다. 시멘트 페이스트의 공극은 수화도와 탄산화의 진행으로 인해 재령증가와 함께 감소하지만, 재령 100일 이후의 감소기율은 0에 가깝다.¹⁸⁾ 물-시멘트비에 따른 시멘트 페이스트의 공극분포에 대한 Jung¹⁸⁾의 실험 결과를 바탕으로 Yang et al.은 $\epsilon_p(t)$ 를 다음과 같이 제시하였다.

$$\epsilon_p(t) = \frac{0.1 + 2.62(W/C)^{4.2}}{1.5t \cdot (W/C)^2} t \quad (11)$$

Table 2 Correction factor (β_s) for the substitution of supplementary cementitious materials (SCMs)

Type	Substitution level of SCMs (%)					
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	60-80
FA	1.05	1.05	1.10	1.10	-	-
GGBS	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30
SF	1.05	1.10	-	-	-	-

Note) FA: fly ash, GGBS: ground granulated blast-furnace slag, SF: silica fume

Table 3 Correction factor (β_f) for the finishing materials on concrete surface

Finishing condition	Indoor area							Outdoor area			
	No finishing	Plaster	Mortar + plaster	Mortar	Mortar + paint	Tile	Paint	No finishing	Mortar	Paint	Tile
Value	1.0	0.79	0.41	0.29	0.15	0.21	0.57	1.0	0.28	0.8	0.7

3.3 재활용 단계에서 콘크리트 재생골재의 표면적

CO_2 에 노출된 콘크리트 표면적은 해체 전의 부재에서 보다는 파쇄된 콘크리트 재생골재에서 상당히 증가한다. Yang et al.은 파쇄된 콘크리트 재생골재의 모든 표면적은 탄산화 가능요소로서 간주될 수 있음을 보였다. 이에 따라 구조물의 해체 후 재활용 단계에서 탄산화 가능 면적은 다음과 같이 이상화하여 나타낼 수 있다.

$$A_{sf-re} = \frac{\pi \cdot H \cdot L \cdot (D - 2x_c)}{d_a} \quad (12)$$

여기서, H , L 및 D 는 각각 파쇄 전 콘크리트 부재의 높이, 길이 및 깊이이며, d_a 는 파쇄된 콘크리트 재생골재를 완전 구형으로 가정하였을 때 평균 입도의 직경이다. 콘크리트의 재활용 단계에서 탄산화 가능면적 및 d_a 는 Table 1에 나타난 각 재활용 시나리오의 상세를 따른다.

재활용 단계에서 탄산화는 개별 파쇄된 콘크리트 재생골재의 페이스트에서만 발생한다. 파쇄된 콘크리트는 콘크리트 덩어리 형태로 성토 및 뒷채움재 분야에서, 그리고 순환골재 형태로 새 콘크리트 제조를 위한 분야에서 재활용된다. 따라서 각 재활용 분야에서 최대 탄산화 깊이는 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$x_c(t) \leq \frac{d_a - d_{agg}}{2} \quad \text{for concrete lump} \quad (13a)$$

$$x_c(t) \leq t_p \quad \text{for recycled aggregates} \quad (13b)$$

여기서, d_{agg} 는 원 콘크리트 생산을 위해 사용된 천연골재의 평균직경이며, t_p 는 순환골재에서 탄산화 가능한 페이스트의 평균 두께이다. 순환골재에 부착된 페이스트의 두께는 기하학적 풀이로부터 다음과 같이 근사적으로 구할 수 있다.

$$t_p = \sqrt[3]{\frac{\rho_a}{\rho_c} \left(\frac{d_a}{2}\right)^3 \cdot p_w + \left(\frac{d_a}{2}\right) - \frac{d_a}{2}} \quad (14)$$

여기서, ρ_a 와 ρ_c 는 각각 골재와 시멘트의 밀도이며, p_w 는 시멘트 페이스트와 골재의 비이다. 2012년 한국에서 생산되는 순환골재의 p_w 는 d_a 가 20 mm와 2.5 mm일 때 각각 0.25와 0.27로 평가되었다.⁵⁾

3.4 지표면 아래에서의 CO₂ 확산계수 및 농도

Lee¹⁹⁾는 땅속에서 CO₂의 확산계수는 대기중에 비해 평균 65% 수준으로 있음을 보였다. 한편, 땅속에서의 CO₂ 농도는 유기물질들의 부패로 인해 지표면으로부터 그 깊이가 증가할수록 증가한다. 한국에서 측정된 땅속의 CO₂ 농도는 그 깊이가 50 mm, 100 mm, 200 mm에서 지표면 대비 각각 9%, 18%, 27% 증가하였다.¹⁹⁾ 따라서 구조물의 사용 중 흡과 접하는 부재의 표면 및 땅속으로 재활용되는 재활용골재(콘크리트 덩어리 포함)들의 표면에서 탄

산화 깊이의 산정은 대기 중 CO₂ 확산계수의 65%와 적용 깊이에 따라 증가된 CO₂ 농도를 적용하였다. 단, 땅속 깊이에 따른 CO₂ 농도의 증가비율에 대한 객관적인 자료의 부족으로 땅속 깊이가 200 mm 이상에서는 CO₂ 농도 증가율을 27%로 일정하게 있음을 고려하였다. 또한 땅속에서의 CO₂ 확산계수 및 농도는 수분포화도 및 온도에 따라 변할 수 있지만, 이에 대한 객관적인 자료의 부족으로 이들의 영향은 고려하지 않았다.

3.5 CO₂ 포집평가 절차 및 검증

위에서 설명한 콘크리트 구조물의 사용단계 및 재활용 단계에서 CO₂ 포집량의 평가에 대한 절차를 Fig. 4에 요약하였다. 콘크리트 구조물의 사용단계 및 재활용 단계에서 CO₂ 포집량은 탄산화 깊이에 의해 결정된다. 위에서 제시된 절차로부터 예측된 탄산화 깊이와 권성준 등²⁰⁾에 의해 제공된 실험 결과를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. Lee et al.²¹⁾ 및 Pade and Guimaraes⁴⁾에 의해 제시된 모델들로부터 산정한 예측값도 동일 그림에 함께 나타내었다. Pade and Guimaraes의 모델은 마감재가 없는 외벽의 탄산화 깊이를 다소 과소평가하는 반면, 타일마감한 내벽의 탄산화 깊이를 과대평가하는 경향을 보였다. Lee et al.의 모델에 의한 예측값은 전체적으로 측정값보다 낮았다. 한편, 식 (9)에 의한 예측값은 벽체 마감재와 관계없이 측정값과 잘 일치하는 경향을 보였다. 따라서 콘크리트의 탄산화 깊이는 제안모델에 의해 비교적 정확하게 예측할 수 있으며, 이는 Fig. 4에 나타난 절차를 이용하여 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량을 합리적으로 평가할 수 있음을 의미한다.

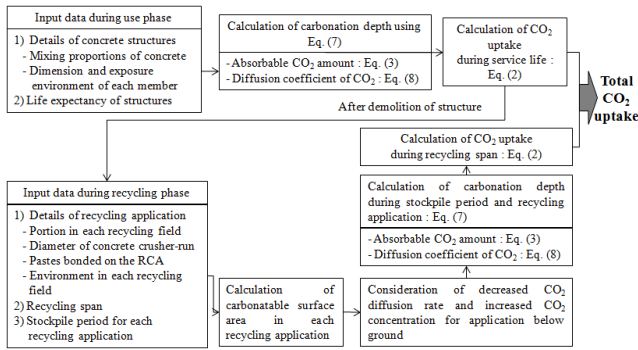
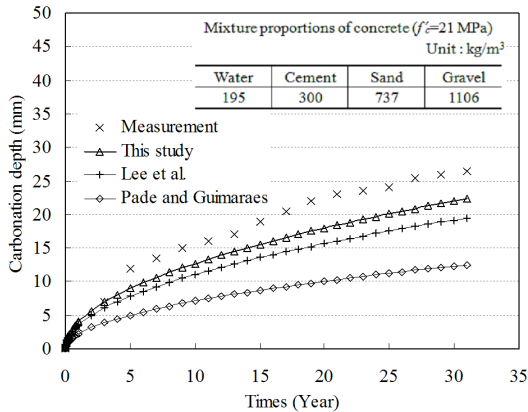
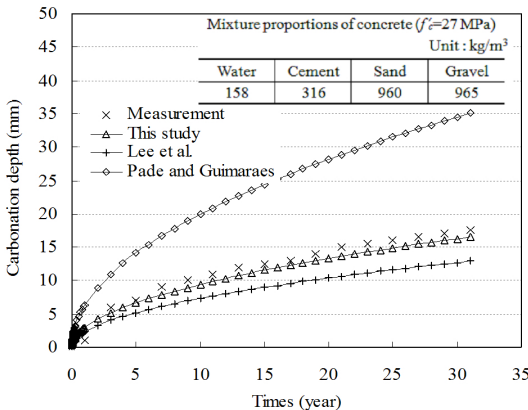


Fig. 4 Schematic procedure for CO₂ uptake assessment of concrete during use and recycling phases



(a) For outdoor wall without finishing material



(b) For indoor wall with tile finishing

Fig. 5 Comparisons of predicted and measured carbonation depths of concrete

4. 사례분석

콘크리트 구조물 전체의 전과정 CO₂ 평가는 각 부재들에서 콘크리트 배합조건 및 노출환경 등을 고려하여 산정한 값들의 개별적산법에 의한다. 따라서 Fig. 1에 나타난 콘크리트 전과정 CO₂ 평가 절차의 적용 예는 동일 조건의 부재에서 기능단위(1m³)에 대해 분석하는 것이 이해를 도울 수 있다. 전과정 CO₂ 평가사례에서는 Fig. 6에

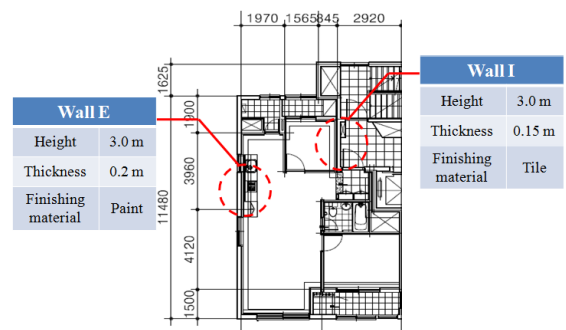


Fig. 6 Details of walls selected for lifecycle CO₂ assessment in the typical floor of apartment building

Table 4 Performance evaluation table for lifecycle CO₂ assessment of concrete structures (typical example for wall I)

Material phase											
Functional unit (FU): m ³		Concrete constituent			Transportation (gate to ready-mixed concrete plant)						
		A	B	C = A · B	D	E	F = A · D · E				
Item	Unit	kg/FU	CO ₂ -kg/kg	CO ₂ -kg/FU	Distance (km)	CO ₂ -kg/kg·km	CO ₂ -kg/FU				
		OPC	348	9.31E-01	3.24E+02	277	5.18E-05	4.99E+00			
	Sand	867	2.34E-03	2.03E+00	47	6.30E-05	2.57E+00				
	Coarse	923	3.23E-03	2.98E+00	37.6	6.30E-05	2.19E+00				
	Water	179	1.12E-04	2.00E-02	-	-	-				
		Sum		329.02	Sum		9.75				
Production (Fresh concrete) phase											
Unit		Batching and mixing			Transportation (plant to construction site)						
		A	B	C = A · B	D	E	F = A · D · E				
Item	Unit	FU	CO ₂ -kg/m ³	CO ₂ -kg/m ³	km	CO ₂ -kg/m ³ ·k m	CO ₂ -kg/FU				
	Facilities	1m ³	0.71	0.71	50	5.01E-02	2.51				
Casting phase											
Unit		A	B	C = A · B							
		FU	CO ₂ -kg/m ³	CO ₂ -kg/m ³							
Pump car	1 m ³		6.2	6.2	-						
Vibrator			0.18	0.18							
		Sum		6.38							
Use phase of structure											
A	B	C	D	E	F	G = D · E · F					
Service life	Type	Finishing material	Exposed surface area (m ²)	<i>a_{CO2}</i> (g/cm ³)	<i>x_c</i> (cm)	CO ₂ uptake (kg/m ³)					
40 years	Indoor wall	Tile	13.32	0.09	1.87	-23.1					
Demolition and crushing phases											
Unit		Concrete			Transportation (building site to crushing plant)						
		A	B	C = A · B	D	E	F	G = D · E · F			
Item	Unit	FU	CO ₂ -kg/m ³	CO ₂ -kg/m ³	kg	km	CO ₂ -kg/ kg·km	CO ₂ -kg/FU			
	Demolition	1 m ³	6.61	6.61	2300	50	6.30E-05	7.25			
Crushing	11.41		11.41	-							
		Sum					18.02				
Recycling phase											
A	B	C	D	E	F	G	H = E · F · G	Transportation (crushing plant to application site)			
								I	J	K	L = I · J · K
Life	Activity	Portion (%)	<i>d_a</i> (mm)	Exposed surface area (m ²)	<i>a_{CO2}</i> (g/cm ³)	<i>x_c</i> (cm)	CO ₂ uptake (kg/m ³)	kg	km	CO ₂ -kg/ kg·km	CO ₂ -kg/FU
20 years	Embankment	31	25	32.1	0.10	0.5	-13.46	713	50	6.30E-05	2.25
	Road base layer	10	20	12.9		0.25	-2.71	230			0.72
	Sub load base layer	33	25	34.2		0.5	-14.33	759			2.39
	Secondary product	5	2.5	51.8		0.55	-0.38	115			0.36
	New concrete	4	15	6.9		0.55	-0.26	92			0.29
	Back filler	17	25	17.6		0.5	-7.38	391			1.23
		Sum				-38.52	Sum				7.24
Total = 319.2 CO ₂ -kg/m ³ [= 380.8(Emission due to concrete) - 61.62 (Uptake due to carbonation)]											

나타낸 아파트 건물의 기준층에서 마감조건이 다른 외벽(wall E)과 내벽(wall I)을 대상으로 콘크리트 배합조건에 따른 전과정 CO₂ 배출량을 비교하였다. CO₂ 농도는 서울에서 측정한 데이터²¹⁾를 참고로 실외에서는 300 ppm, 실내에서는 2000 ppm을 고려하였다.

4.1 전과정 CO₂ 평가 산정 예

콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가에 대한 예를 Fig. 6의 내벽(wall I)을 대상으로 Table 4에 자세히 나타내었다. 콘크리트 설계강도는 24 MPa로서 이에 대한 배합표는 인천 남동구에 위치하는 R 레미콘사에서 제공하는 것을 이용하였다(Table 5). 재료단계에서 A열은 콘크리트 배합표를 D열은 각 재료의 운송거리를 E열은 각 재료의 운송수단의 CO₂ 원단위이다. 각 재료의 운송거리는 재료 출구(시멘트는 전남담양, 굽은골재와 잔골재는 각각 경기도 광주와 인천, 혼화제는 평택)에서부터 레미콘공장(인천 남동구)까지의 거리이다. 생산된 콘크리트의 운반거리는 1시간 이내의 운반시간을 고려하여 50 km로 가정하였다. 타설단계에서 콘크리트 투입은 붐 길이가 52 m인 콘크리트 펌프차 이용을 가정하였다. 사용단계에서는 콘크리트 기능단위에 대하여 부재의 노출면적(D열)을 계산하고, 흡수가능한 CO₂ 양(E열)은 식 (3)에 의해, 탄산화깊이(F열)는 식 (9)를 이용하여 산정한다. 구조물 해체 후 파쇄단계에서는 구조물 현장에서부터 파쇄 공장까지의 거리를 50 km(D열)로 가정하였다. 재활용단계에서 재활용 시나리오(B열) 및 그에 따른 적용비율(C열)과 재생골재 직경(D열)은 Table 1에 따라 결정하였다. 파쇄공장에서 재활용처까지의 거리는 재활용 시나리오에 관계없이 모두 50 km(I열)로 가정하였으며, 운송 시 무게(H열)는 재료단계에서 나타난 배합표로부터 산정된 콘크리트 단위용적 질량을 재활용 비율에 따라 산정하였다. 운송단계에서 이용되는 수단들은 2.1.2절에 나타난 기본차량을 적용하였다.

콘크리트 구조물의 전과정 평가를 위해 고려된 각 단계에서의 CO₂ 배출 양은 재료단계에서 324 kg/m³, 해체 및 파쇄단계에서 18 kg/m³, 운송단계에서 26.8 kg/m³로 산정

Table 5 Mixture proportions of concrete with different SCMs ($f_{ck}=24$ MPa)

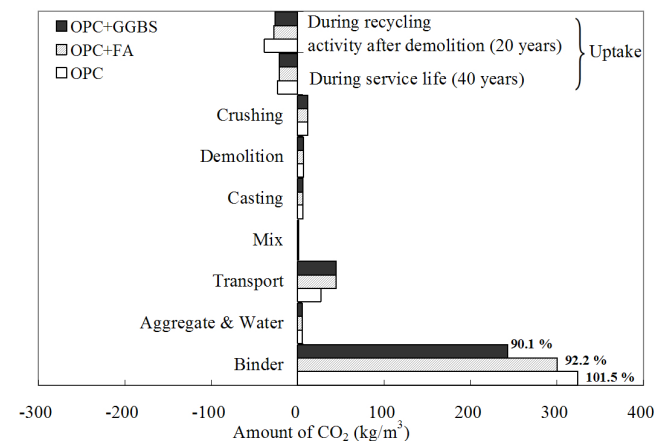
Binder type	Unit weight (kg/m ³)					
	Water	OPC	GGBS	FA	Sand	Gravel
OPC	179	348	-	-	867	923
OPC+GGBS	179	261	87 (25%)	-	865	921
OPC+FA	179	322	-	36 (10%)	837	923

Note) Figures in parenthesis refer to the substitution level of SCMs

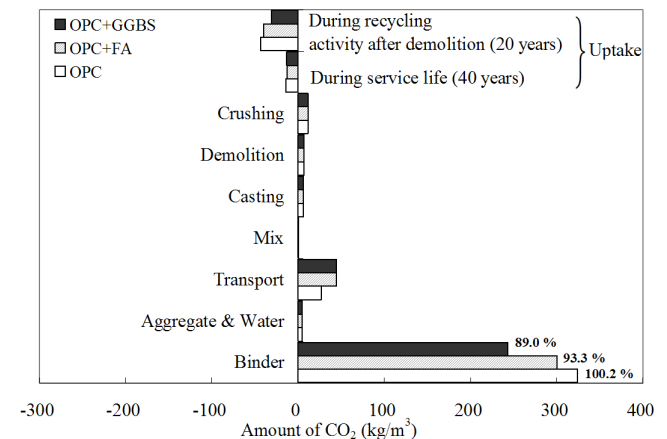
되었다. 반면 구조물 사용단계와 재활용단계에서 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 각각 -23.1 kg/m³와 -38.5 kg/m³로 산정되었는데, 여기서 (-)부호는 CO₂ 포집을 의미한다. 결국, CO₂ 배출과 포집을 모두 고려하였을 때 wall I의 전과정 CO₂ 양은 319.2 kg/m³로 평가될 수 있었다. 전과정 CO₂ 배출량에 대한 보통포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement, OPC)의 기여분은 약 85%로서 콘크리트 구조물의 CO₂ 저감을 위해서 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 OPC의 사용량 저감임을 알 수 있다. 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 전체 CO₂ 배출량의 약 16%이었으며, OPC 생산으로부터 배출된 CO₂ 양에 대해서는 약 18.8%로 평가되었다.

4.2 콘크리트 배합조건에 따른 전과정 CO₂ 양

고로슬래그(ground granulated blast-furnace slag, GGBS) 및 플라이애쉬(fly ash, FA)가 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이들이 치환된 콘크리트를 사용하였을 경우 Wall E와 Wall I의 전과정 CO₂ 양의 비교를 Fig. 7에 나타내었다. 콘크리트 부재의 전과정 CO₂ 양에 대한 결합재로부터 배출된 CO₂ 비율을



(a) Wall I (indoor environment)



(b) Wall E (outdoor environment)

Fig. 7 Effect of the substitution of SCMs on lifecycle CO₂ assessment of concrete walls

동일그룹에 나타내었다. 고로슬래그 또는 플라이애쉬가 치환된 콘크리트는 OPC 콘크리트와 동일한 압축강도에서 R사의 레미콘 공장에서 사용하는 배합표를 이용하였다(Table 5). 콘크리트 전과정 CO₂ 양에 미치는 요인은 결합재가 가장 크며, 두 번째 큰 요인은 운송이었다. 결합재가 콘크리트 전과정 CO₂ 양에 대한 기여는 내벽과 외벽에 관계없이 GGBS가 25% 치환되었을 경우에 가장 낮게 나타났다(OPC 콘크리트 대비 약 7% 감소). 반면 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집은 내벽보다는 외벽에서 약간 컸는데, GGBS가 25% 치환되었을 경우가 OPC 또는 FA가 10% 치환된 경우에 비해 CO₂ 포집양도 다소 낮았다. 하지만 GGBS 또는 FA 치환에 따른 탄산화에 의한 CO₂ 포집양의 감소는 이 재료들의 OPC 치환에 따른 CO₂ 배출양 감소에 비해 현저히 낮았다. 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집양은 전과정 CO₂ 배출양의 약 15~18% 범위에 있으며, 이는 OPC 생산으로부터 배출된 CO₂ 양의 약 19~22%에 해당된다.

5. 결 론

콘크리트 구조물의 환경을 고려한 설계 및 시공에 중요하게 이용될 수 있는 전과정 CO₂ 평가에 대한 단계적 모델을 제시하였다. 고려된 시스템 경계는 원료채취에서부터 해체 및 재활용 단계까지로서 재료, 운송, 생산, 시공, 구조물 사용 및 해체, 폐콘크리트의 파쇄 및 재활용 단계들을 포함한다. 기후환경, LCI DB, 구조물 내구년수 및 구조물 해체 후의 재활용 시나리오는 2012년도의 국내 측정값을 이용하였다. 또한 구조물의 사용 및 해체 후 재활용단계에서 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집양을 평가하기 위한 탄산화 모델을 제시하였다. 제시된 탄산화 깊이 모델은 마감재에 관계없이 실험 결과와 잘 일치함으로서 CO₂ 포집 평가를 위해 합리적으로 이용될 수 있음을 보였다. 이 연구에서 제시된 절차의 일반적 적용을 위하여 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가를 위한 성능평가표를 제시하였다. CO₂ 성능평가표를 이용하여 아파트 내벽과 외벽에서의 CO₂ 배출 및 포집양에 대한 사례를 분석하였다. 하지만 콘크리트 생산, 타설 및 해체 단계에서의 공정과 그에 따른 사용장비들의 에너지원에 의한 CO₂ 배출계수는 시대적, 지역적 상황에 따라 다를 수 있다. 이에 따라 이 연구의 사례분석 결과는 건축물 규모 및 위치에 따라 다소 변화될 수 있다. 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가모델의 기초모델 제시 및 아파트를 대상으로 한 사례연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전과정 CO₂ 배출양에 대한 OPC의 기여비율은 약 85% 수준이다.
- 2) GGBS 또는 FA 치환에 따른 콘크리트의 CO₂ 배출양 및 포집양은 감소하는데, 배출양의 감소가 포집양의 감소에 비해 현저히 높다. 이에 따라 GGBS 또

는 FA의 치환은 콘크리트의 CO₂ 저감에 매우 효율적이다.

- 3) 구조물의 사용연한(40년)과 해체 후 재활용 연한(20년) 동안 산정된 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집양은 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 양의 약 15~18% 범위에 있는데, 이는 OPC 생산으로부터 배출된 CO₂ 양의 약 19~22%에 해당된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호:11기술표준화10-1)에 의해 수행되었습니다.

References

1. ISO, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*, ISO 14040, International Standardisation Organisation (ISO), 2006, 28 pp.
2. IGCC Public Comment Hearing Committee, *International Green Construction Code*, International Code Council, INC, 2010, pp. 1-95.
3. CBI, *Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle-State of the Art*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 2005, 47 pp.
4. Pade, C. and Guimaraes, M., "The CO₂ Uptake of Concrete in a 100 Year Perspective," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 9, 2007, pp. 1348-1356.
5. Yang, K. H., Seo, E. A., and Tae, S. H., "Carbonation and CO₂ Uptake of Concrete," *Environmental Impact Assessment Review*, Accepted for Publication, Vol. 46, No. 1, 2014, pp. 43-52.
6. Kim, J. M., *Technology Development Trend and Recycling of Recycled Aggregates*, Korea Institute for Advancement Technology, 2012, pp. 1-9.
7. Kim, T. H. and Tea, S. H., "A Study on the Development of an Evaluation System of CO₂ Emission in the Production of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 787-796.
8. Han, S. W., "A Study on Carbon Dioxide Emission of Input Resources according to Construction Method in Construction Phase," MSc Dissertation, University of Seoul, 2011, 73 pp.
9. Ministry of Strategy and Finance, *Implementing Regulations in Corporate Tax Act*, 2013.
10. Korea Concrete Institute, *Estimation of Carbon Dioxide Assessment and Environment Impact of Concrete Structure*, Kimoon dang Publishing Company, 2013, pp. 141-153.
11. Korea LCI Database Information Network, www.edp.or.kr. (Access on December 31, 2013)
12. European reference Life-Cycle Database Information Network, http://elcd.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/. (Access on December 31, 2013)
13. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N.,

- “Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 2, 1991, pp. 186-196.
14. Yang, K. H. and Moon, J. H., “Design of Supplementary Cementitious Materials and Unit Content of Binder for Reducing CO₂ Emission of Concrete,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 5, 2012, pp. 597-604.
 15. Cha, S. W., “Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hygral Stresses in Hardening Concrete,” PhD Dissertation, Seoul National University, South Korea, 1999, pp. 30-36.
 16. Pommer, K. and Pade, C., “Guidelines-Uptake of Carbon Dioxide in the Lifecycle Inventory of Concrete,” Nordic Innovation Centre Project, Danish Technological Institute, 2005, 45 pp.
 17. Oshida, F., Izumi, I., and Kasami, H., “Effects of Cement Type, Mixture Proportion and Curing Condition on Carbonation of Concrete,” Summary of Technical Paper, Architectural Institute of Japan, 1985, pp. 111-114.
 18. Jung, S. H., “Diffusivity of Carbon Dioxide and Carbonation in Concrete through Development of Gas Diffusion Measuring System,” PhD Dissertation, Seoul National University, South Korea, 2003, pp. 7-19.
 19. Lee, D. H., “USN-Based Measurement of Greenhouse Environment and Prediction of CO₂ Emission from Soil,” PhD Dissertation, Sungkyunkwan University, South Korea, 2009, pp. 78-84.
 20. Kwon, S. J., Park, S. S., and Nam, S. H., “A Suggestion for Carbonation Prediction Using Domestic Field Survey Data of Carbonation,” *Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 11, No. 5, 2007, pp. 81-87.
 21. Lee, S. H., Park, W. J., and Lee, H. S., “Lifecycle CO₂ Assessment Method for Concrete Using CO₂ Balance and Suggestion to Decrease LCCO₂ of Concrete in South-Korean Apartment,” *Energy and Buildings*, Vol. 58, 2013, pp. 93-102.

요 약 이 연구는 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가를 위한 단계적 모델을 제시하였다. 고려된 시스템 경계는 원료채취에서부터 재활용까지로서, 구성재료, 운송, 레미콘 공장에서의 계량 및 배합, 구조물의 사용 및 해체, 폐콘크리트의 파쇄 및 재활용까지를 포함한다. 구조물의 운영(40년) 및 재활용(20년) 단계에서 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 탄산화 깊이를 예측하기 위해 제시된 모델로부터 산정하였다. 제시된 CO₂ 평가모델에 기반하여 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 양을 직접적으로 평가할 수 있는 성능평가표를 구체화하였다. 제시된 성능평가표를 이용한 사례분석 결과 보통포틀랜드 시멘트(OPC)가 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 양에 미치는 기여비율은 약 85%이었다. 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 양에 약 15~18%로 평가되었는데, 이는 OPC 생산으로부터 배출된 양의 약 19~22%에 해당된다. 결국, 제시된 CO₂ 성능평가표는 콘크리트 구조물의 각 단계에서 CO₂ 배출 또는 포집을 쉽게 결정할 수 있는 가이드라인으로서 설계 또는 시공 시 효율적으로 이용될 수 있다.

핵심용어 : 전과정 CO₂, 배출, 포집, 콘크리트 구조물, 성능평가표