

탄산화 환경에 노출된 RC 지하구조물의 내구수명과 플라이애쉬 배합 특성을 고려한 탄소 배출 및 흡착 평가

CO₂ Emission and Storage Evaluation of RC Underground Structure under Carbonation Considering Service Life and Mix Conditions with Fly Ash

김성준, 문진만, 이학수, 권성준
한남대학교 건설시스템공학과

Seong-Jun Kim(loveksjun@naver.com), Jin-Man Mun(jenk1@naver.com),
Hack-Soo Lee(leehs@hnu.kr), Seung-Jun Kwon(jjuni98@hnu.kr)

요약

본 연구에서는 실제 지하구조물에 사용되었던 제원과 배합에 대하여, 자재생산단계, 운송단계, 시공단계, 탄소저장량, 보수단위 탄소배출량을 고려하여 RC 지하구조물의 탄소배출 및 흡수량을 내구수명에 따라 평가하였다. 혼화재료를 포함한 4가지 배합이 고려되었고, 마이크로 모델을 이용하여 이산화탄소 확산계수를 도출하였다. 탄산화 내구한계상태를 고려하여 탄소 배출 및 흡수량을 평가하였는데, 단위 시멘트량이 높은 배합에서 초기탄소배출량이 높게 평가되었으며, 탄산화 진행속도가 증가함에 따라 이산화탄소 저장량은 증가하였다. 또한 대기 중의 이산화탄소 농도인 실측치(600ppm)이외에 다양한 이산화탄소 농도를 고려하여 RC 지하구조물의 탄소배출 및 흡수량을 평가하였다. 이산화탄소 농도의 증가로 탄산화 진행속도가 증가함에 따라 보수횟수가 증가하여 탄소배출량이 높게 평가되었다. 사용수명동안 전체 탄소 발생량을 감소하기 위해서는 OPC사용을 통해 탄소 흡착량을 늘리는 것보다 플라이애쉬와 같은 혼화재료를 치환하여 초기 탄소배출량을 줄이는 것이 결정적이다. OPC 생산시 과다한 CO₂가 발생하고 사용중의 탄소 흡착은 피복콘크리트에 국한하여 큰 효과를 나타내지 못하기 때문이다.

■ 중심어 : RC 지하구조물 | 탄산화 | 탄소저장 | 탄소배출 | 보수 |

Abstract

In this paper, CO₂ emission and storage amount are evaluated for real RC (Reinforced Concrete) underground structure considering CO₂ amount including material manufacturing, moving, and construction, repairing timing stage regarding extended service life. Four mix proportions with mineral admixtures are prepared and CO₂ diffusion coefficient are obtained based on a micro modeling. Referred to carbonation durability limit state, CO₂ emission and storage amount are evaluated, which shows higher initial CO₂ emission is caused due to larger unit content of cement and the storage increases with more rapid carbonation velocity. Furthermore various CO₂ concentration is adopted for simulation of CO₂ evaluation including measured CO₂ concentration (600ppm). With higher concentration of CO₂ outside, carbonation velocity increases. In order to reduce CO₂ emission through entire service life, reducing initial CO₂ emission through mineral admixture like fly ash is more effective than increasing CO₂ storage through OPC since CO₂ is significantly emitted under manufacturing OPC and CO₂ storage in cover concrete of RC structure is not effective considering initial concrete amount in construction.

■ keyword : RC Underground Structure | Carbonation | CO₂ Storage | CO₂ Emission | Repair |

* 본 연구는 한국연구재단에서 지원하는 기초연구사업(NRF-286 2013R1A1A2060114)의 지원으로 수행되었습니다.

접수일자 : 2014년 09월 02일

심사완료일 : 2014년 10월 09일

수정일자 : 2014년 09월 29일

교신저자 : 권성준, e-mail : jjuni98@hannam.ac.kr

I. 서론

콘크리트는 경제적이며 내구성이 뛰어난 건설재료로 널리 사용되어 왔지만, 사용기간이 증가하면서 다양한 환경에 노출된 RC(Reinforced Concrete) 구조물은 내구성 저하가 발생하며 이는 구조적 안전성 문제로 진전된다[1]. 대도시의 콘크리트 구조물은 산성비와 상대적으로 높은 이산화탄소의 영향으로 탄산화가 심각하게 진행되고 있다[2]. 탄산화는 콘크리트 구조물에 구조적, 내구적 성능저하로 진전되지만 보수를 통하여 구조물의 내구수명을 연장하면 탄산화를 통해 이산화탄소를 콘크리트 구조물 내에 저장할 수 있다. 최근 환경영향 평가관점에서 콘크리트의 Lifecycle CO₂ 평가에 대한 요구가 증가하고 있으며[3], 콘크리트의 전과정 평가 중 콘크리트의 생산단계에서 발생하는 CO₂ 중 85%가 보통 포틀랜드 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement) 생산에 기인하므로, CO₂ 포집 및 저장이 중요하게 평가되고 있다[4].

콘크리트의 CO₂ 포집에 대한 평가는 탄산화모델 및 적용방법에 따라 많은 차이를 보이고 있는데[5], 콘크리트 구조물의 내구수명 중 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 시멘트 생산량에서 배출되는 CO₂ 양의 약 3~4%에 해당하고[6], 콘크리트 생산으로부터 배출되는 CO₂ 양의 5%를 넘지 않는 것으로 알려져 있다[7][8]. 또한 탄산화에 의한 포집보다 혼화재료를 사용하여 시멘트 사용량을 줄이려는 연구가 일반적이며 최근들어 시멘트를 사용하지 않으려는 무시멘트 경화체에 대한 연구도 진행 중이다[9-11]. 사용기간 및 내구수명에 따라 탄소 흡착 및 발생에 대한 연구는 비교적 최근에 수행되고 있는데, 김성준 등[12]은 염해에 노출된 RC 구조물의 내구수명에 따라 보수를 수행하고 이에 따라 변화하는 탄소량을 분석하여 최적배합에 대한 고려사항을 도출하였다. 또한 기존의 연구[13]에서는 콘크리트 생산시스템에 대하여 탄소량을 분석하고 자재생산에 대한 영향을 고려하였을 뿐 사용기간 동안 환경영향을 고려한 탄소 배출을 고려하지 못하였다. 양근혁과 김상철 (2013)은 이산화탄소의 포집과정에 대한 사례를 내구수명(40년) 동안 분석하였으나, 하나의 배합에 대하여 건축구조물

에 국한한 연구였다[14]. 외국의 연구[8][15]에서도 내구수명동안 이산화탄소의 CO₂ uptake에 대한 연구는 수행하였으나, 임계시점이후의 보수, 보장을 통해 내구수명의 연장을 고려한 해석은 수행되지 못하였으며, 시공단계 및 보수단계까지 고려한 연구는 매우 희박하다.

본 연구의 목적은 실제 RC 구조물에 대하여 사용 후 보 배합들을 적용하고 탄산화에 따른 내구수명에 따라 흡착되는 탄소량을 정량적으로 평가하는 것이다. 이 과정에서는 내구수명에 따라 보수를 통한 탄소량 및 흡착량이 평가되고 이산화탄소 농도 변화에 따라 변하는 내구수명 및 탄소량을 동시에 평가하였다. 이를 위해 문헌조사를 통하여 실제 RC 지하구조물의 제원을 선정하고 노출환경을 분석하였으며, 후보군 배합인 1종 및 4종 시멘트를 사용하여 플라이애쉬 치환에 따른 탄소배출량을 평가하였다. 대상 구조물은 지하구조물의 일반적인 열화환경인 탄산화를 대상으로 하였으며, 다양한 노출환경의 변동을 고려하여 보수시기에 따른 탄소량 포집 및 발생량을 산정하였다.

CO₂ 전과정 평가에서는 재료생산, 설계, 시공, 해체가 모두 포함하지만 본 논문에서는 사용중 보수시기에 따른 CO₂ 평가가 주목적이므로 설계 및 해체과정은 포함하지 않았다.

II. 탄산화 및 사용기간에 따른 탄소저장

1. 탄산화 기구

시멘트는 수화하면서 시멘트 중량의 25~30% 정도의 수산화칼슘을 생성하고[16], 이는 시멘트 수화물 전체의 pH를 결정하게 된다[17]. 생성된 수산화칼슘이 이산화탄소와 반응하면 탄산칼슘과 기타 물질로 분해되는데, [식 1]에 탄산칼슘 생성과정을 나타내었다[18].



이와 같은 공극수의 pH감소 현상을 탄산화라고 하며, 탄산화가 진행되어 내부 공극수의 pH 10.5이하가 되면

활성화상태가 되어 부식이 쉽게 발생한다[18].

2. 탄산화에 따른 탄소 흡수·저장 평가

이산화탄소의 포집 및 저장기술은 화력발전, 철강, 시멘트 산업에서 대량으로 배출되는 이산화탄소를 발생원으로부터 포집한 후 압축 수송과정을 거쳐 육상 또는 해양지중에 안전하게 저장하거나 유용한 물질로 전환하는 일련의 과정으로 포집, 수송, 저장의 기술로 구분된다[19][20]. 탄산화에 따른 탄소저장기술 뿐만 아니라 콘크리트의 이산화탄소에 대해 흡수능을 증진시켜주는 CO₂ Philic sorbents에 대한 연구는 발전소 등과 같은 대규모 고정발생원에서의 이산화탄소 저감을 위해 습식 흡수법으로 사용되고 있다[21][22].

기존의 연구에서 제시한 탄산화 및 그에 따른 CO₂ 포집량을 [식 2]와 같이 나타낼 수 있다[23].

$$U_{CO_2}(t) = a_{CO_2}(t) \cdot A_{s_f} \cdot x_c(t) \quad (2)$$

여기서, $a_{CO_2}(t)$ 는 재령 t에서 탄산화에 의해 흡수 가능한 CO₂ 양(g/mm³), A_{s_f} 는 CO₂에 노출된 콘크리트 부재의 표면적(mm²), $x_c(t)$ 는 재령 t에서의 탄산화 깊이(mm)를 나타낸다.

III. 내구수명 및 환경변화에 따른 탄소량 평가

1. 보수보강에 따른 탄소량 평가 시나리오

전술한대로 본 연구에서는 재료, 시공 및 보수에 따른 CO₂ 평가만이 수행되었다. 콘크리트를 생산하기 위한 재료입수, 반입, 콘크리트 믹싱, 시공방법 등을 고려하였으며, 탄산화 진행과 각 배합에 대한 보수시기를 고려하여 시공 후 500년까지의 탄소배출량을 산정하였다.

기존의 연구[5][7][8][23]에서는 단위 공정당 탄소 인벤토리를 이용하여 시설물의 시공, 해체, 저장 등을 고려하였으나 본 연구에서는 실제 구조물의 제원과 사용예정이던 4가지 배합을 통하여 탄소저장량 및 배출량을 평가하였다. 또한 실태조사 결과 역시 가정 사항을

아닌 실제 노출환경 자료를 이용하여 정량적인 탄소량을 평가하였다.

배합수는 현장에서 콘크리트 제조 시 반입되며, 시멘트는 15km, 굵은골재는 18km, 잔골재는 15km, 이형철근은 20km의 이동거리를 가정하였다. 또한 [그림 1]은 본 연구의 시나리오에 따른 CO₂ 평가 단계 및 가정을 나타내고 있다.

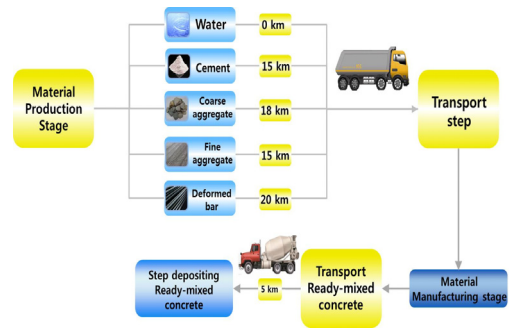


그림 1. CO₂ 평가 가정 및 단계

2. 기존의 탄소인벤토리

2.1 개요

탄소배출량 평가를 위해 자재, 자재운송, 제조, 레미콘운송, 타설 5가지 단계로 나누어 단계별 CO₂ 배출량을 산정하였다.

2.2 콘크리트 제조에 대한 인벤토리

콘크리트 자재의 CO₂ 배출량 원단위는 3개의 조사대상(LCI of KEITI, Inter Industry Analysis, JSCE)으로 분류하여 조사된 기존의 자료를 이용하였으며[24][25], 이형철근 및 골재의 CO₂ 배출원단위 또한 국토교통부 자료를 이용하여 [표 1]에 제시하였다. 콘크리트 제조단계의 경우 레미콘 제조업체가 하절기에 생산하는 콘크리트 1m³ 제조시 배출하는 CO₂량을 각 공정별 사용된 제조설비의 에너지 사용량을 이용하였으므로 [표 2]에 제시하였다[26].

표 1. 건설재료의 CO₂ 배출량[25]

Type	Unit	CO ₂ (kg-CO ₂ /ton)
G	ton	5.00×10^{-3}
S		5.00×10^{-3}
C		7.60×10^2
Fly ash		0.00
Steel		4.00×10^{-4}
W		1.96×10
AD		2.20×10^{-1}
R/G		4.00×10^{-3}

G : Gravel, S : Sand, C : Cement, Steel : Deformed bar,
W : Water, AD : Chemical admixture, R/G : Recycle aggregate

표 2. 레미콘 제조 장비 분류에 의한 CO₂ 배출량[26]

Case	Equipment	CO ₂ emission unit (kg-CO ₂ /m ³)
Material Storage	Cement silo	1.50×10^{-2}
	Aggregate silo	2.30×10^{-2}
	Fly ash silo	2.30×10^{-2}
Material conveyance	Bucket elevator	1.57×10^{-1}
	Horizontally conveyer belt	7.70×10^{-2}
	Verticality conveyer belt	1.12×10^{-1}
	Compound transfer pump	3.10×10^{-2}
	Water transfer pump	2.60×10^{-2}
Mixture	Concrete mixer	1.90×10^{-1}
etc.	Dust collector	2.20×10^{-2}
	Compressor	3.10×10^{-2}

2.3 운반 및 시공에 대한 인벤토리

자재운송 단계와 레미콘 운송단계의 경우, 기존의 연구자료[26]를 참고하여 ton 트럭의 원단위를 사용하였으며, 레미콘(6m³)의 50km 운송시 발생하는 CO₂량을 1km 운송당 발생하는 CO₂량으로 환산하여 계산하였다. 또한 자재제조 단계의 경우 공정별로 사용된 전기 에너지를 CO₂량으로 환산한 값을 사용하였는데, [표 3]에서는 이동운송방법에 따른 탄소량을, [표 4]에서는 콘크리트 제조단계에 따른 탄소량을 나타내었다. 타설단계는 1m³ 당 펌프카의 타설시 CO₂ 배출량을 이용하였으며, 펌프카가 한시간동안 사용하는 에너지량을 구동시 사용되는 연료(L)로 대체하여 CO₂량을 고려하였다. 이때의 모델을 전기모터 사용으로 가장 효율이 좋은 14000HPD 로 선택하였다. [표 5]에서는 타설을 위한 펌프카의 탄소원단위를 나타내고 있다.

표 3. 운송방법에 따른 탄소배출량[26]

Dump Truck	CO ₂ emission unit for Transportation (kg-CO ₂ /m ³)
1	2.68×10^{-1}
2.5	1.46×10^{-1}
5	9.20×10^{-2}
8	9.80×10^{-2}
18	6.30×10^{-2}
23	5.10×10^{-2}

표 4. 혼합콘크리트 제조단계에서의 CO₂ 배출량[26]

Type	CO ₂ emission unit for Transport Equipment(kg-CO ₂ /m ³)
Ready-mixed concrete truck (6.0 m ³)	5.33×10^{-1}

표 5. 펌프카 타설로 인한 탄소 원단위[26]

Type	CO ₂ emission unit(CO ₂ -kg/m ³)
	Normal Pressure
14000HPD and 100870004	1.75

IV. 보수보강을 고려한 대상구조물의 탄소량 평가

1. 구조물 제원 및 배합

본 연구에서는 탄산화를 고려한 지하구조물의 탄소 배출량을 평가하기 위해서 [그림 2]와 같은 서울시 지하철 1호선 단면을 선정하였으며, 실제로 사용하려 했던 4개의 후보 배합군을 [표 6]에 나타내었다. 1호선 구간의 지하구조물 표준단면도를 사용하였으며, 1공구 길이인 974.4m의 탄소량을 평가하였다.

2. 탄산화 예측에 따른 탄소저장

2.1 이산화탄소 확산계수

콘크리트의 확산성은 내부공극뿐 아니라 포화도에 매우 민감하게 반응한다. 기존의 모델들[27][28]에서는 공극률과 포화도의 함수식으로 확산계수가 간단히 구성되었으나, 본 연구에서는 초기재령 콘크리트 거동 모델인 Ducom FE를 이용하였다. 본 모델에 CO₂의 플럭스량은 [식 3]과 같이 나타난다.

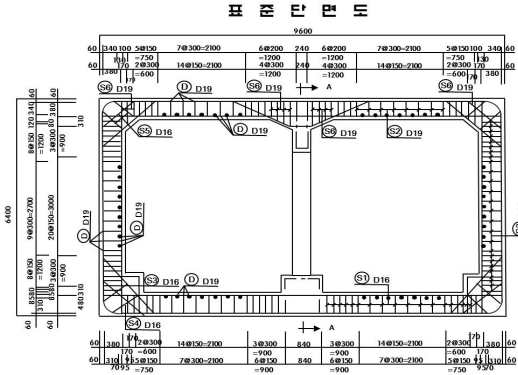


그림 2. 연구에 적용된 서울시 지하철 1호선 단면[29]

$$D_{gCO_2} = \frac{\phi}{\Omega} D_0^g \frac{(1-S)^4}{1 + l_m/2(r_m - t_m)} \quad (5b)$$

여기서, D_0^d 및 D_0^g 은 액상 및 기상의 기본확산계수로써 각각 $1.9 \times 10^{-9} [m^2/s]$ 및 $1.34 \times 10^{-5} [m^2/s]$ 의 값을 갖는다. r_m 는 불포화 공극의 평균반경[m], t_m 은 반경 r_m 의 공극 내의 흡착수층 두께[m], l_m 은 기체분자간의 자유거리[m]를 나타낸다. 또한 상평형 상수 K_{CO_2} 는 [식 6]과 같이 나타내었다[30][31].

$$K_{CO_2} = \frac{\rho_g}{\rho_d} = \frac{M_{CO_2}}{RT} \cdot H_{CO_2} \quad (6)$$

표 6. CO₂ 배출 평가에 사용한 배합 특성

Case	W/B (%)	S/A (%)	Unit(kg/m ³)							Air (%)	Slump (mm)
			B		W	S	G	AD(%)			
			C	F/A				SP	AE		
N1-FA00	45.0	44.5	364	-	164	799	1011	0.85	0.12	5.3	140
N1-FA30	45.0	44.5	255	109	164	784	993	0.85	0.15	4.7	145
N4-FA00	45.0	44.5	360	-	162	806	1020	0.80	0.12	5.0	153
N4-FA20	45.0	44.5	288	72	162	795	1007	0.80	0.15	4.9	163

W/B : Water to binder ratio, C : Cement, F/A : Fly ash, W : Water, S : Sand, G : Aggregate, AD : Chemical Admixtures, AE : Air entrainer, SP : Super plasticizer

$$J_{CO_2} = - \left(\frac{\phi D_0^d}{\Omega} \int_0^{r_c} dV \frac{\partial \rho_d}{\partial x} + \frac{\phi D_0^g}{\Omega} \int_{r_c}^{\infty} \frac{dV}{1 + N_k} \frac{\partial \rho_g}{\partial x} \right) \quad (3)$$

여기서, J_{CO_2} 는 이산화탄소의 플럭스[kg/m²s], V 는 공극 체적, Ω 는 공극의 굴곡도, D_0^d 및 D_0^g 은 액상 및 기체상의 이산화탄소 확산계수, r_c 는 수분이 포화되는 임계 공극반경[m], N_k 는 분자간의 충돌을 통해 확산하는 Knudsen diffusion 상수를 나타낸다. [식 3]의 플럭스항에 대해 부분적인 상평형을 고려하는 정수인 K_{CO_2} 를 고려하면 하나의 항인 액상의 이산화탄소로 정리할 수 있는데 이는 [식 4] 및 [식 5a, 5b]로 나타낼 수 있다[30].

$$J_{CO_2} = - (D_{dCO_2} \nabla \rho_d + D_{gCO_2} \nabla \rho_g) = - (D_{dCO_2} + D_{gCO_2} \cdot K_{CO_2}) \nabla \rho_d \quad (4)$$

$$D_{dCO_2} = \frac{\phi S^4}{\Omega} D_0^d \quad (5a)$$

여기서, M_{CO_2} 는 이산화탄소의 몰분자량(0.044[kg/mol]), H_{CO_2} 는 Henry상수 [1.45×10^8 Pa/mol at 25°C], R 는 기체상수[J/molK], T 는 절대온도[K]를 나타낸다.

2.2 확산계수를 고려한 탄산화 깊이 및 탄소저장

본 절에서는 탄산화 예측식을 통하여 각 배합에 따른 탄소저장량을 평가 하였다. 기존의 연구에서는 탄산화 깊이를 Meso-level 수준으로 [식 7]과 같이 제안하였다 [32][33].

$$d_c = \sqrt{2k_1 k_2 k_3 \Delta c} \times \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{a} t \left(\frac{t_0}{t} \right)^n} \quad (7)$$

여기서, d_c 는 탄산화 깊이(mm), k_1 는 국부적인 지역에 대한 상수, k_2 는 양생에 대한 상수, k_3 는 국부적인 물시멘트비에 대한 상수, Δc 는 이산화탄소 농도(kg/m³), D_{CO_2} 는 이산화탄소 확산계수(m²/s), a 는 이산화탄소 반응률로서 수화물의 함수로 나타내며, n 은 건조습윤반

복에 대한 상수, t_0 는 기준시간(보통 1년), t 는 존치시간을 나타낸다.

온도의 의존성확산계수 $D(T)$ 는 [식 8]과 같이 나타낼 수 있다.

$$D(T) = D_{ref} \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, D_{ref} 는 기준 확산계수, U 는 8,500 (Cal/mol.K), R 은 기체상수, T_{ref} 는 기준온도로서 298K, T 는 노출된 온도를 나타낸다.

또한, 이산화탄소 반응률을 나타내는 수화물의 함수 a 는 [식 9]와 같이 나타낼 수 있다[32].

$$a = 0.75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (9)$$

여기서, C 는 단위시멘트량(kg/m³), CaO 는 CaO 의 혼입량(%)으로서 0.65, α_H 는 수화도로서 0.85를 가정, M 은 각각 CO_2 , CaO 의 몰중량을 나타낸다.

[식 7]을 지하구조물에 적용할 경우, k_1 , k_2 , k_3 은 1.0이 되고 n 은 0이 되어 [식 10]으로 탄산화 깊이를 나타낼 수 있다[32].

$$d_c = \sqrt{\frac{2\Delta c D(T)}{a} t} \quad (10)$$

본 연구에서는 [식 10]을 이용하여 탄산화 깊이를 평가하였으며, 이산화탄소 저장식인 [식 2]를 이용하여 탄소 포집량을 평가하였다.

[표 7]에서는 실태조사결과를 통한 RC 지하구조물의 환경조건을 나타내고 있으며[29], [표 8]에서는 각 배합에 따른 이산화탄소 확산계수 값을 나타내고 있다. 600ppm을 농도로 고려하여 탄산화 깊이를 시간에 따라 [그림 3]에 나타내었다.

표 7. RC 지하구조물의 환경조건[29]

평균온도 ℃	평균습도(%)	이산화질소 (ppm/h)	이산화탄소 (ppm/h)
21.3	54.3	0.035	599.4

표 8. 각 배합에 따른 이산화탄소 확산계수

N1-FA00	5.587×10^{-8} m/sec
N1-FA30	3.352×10^{-8} m/sec
N4-FA00	5.637×10^{-8} m/sec
N4-FA20	3.065×10^{-8} m/sec

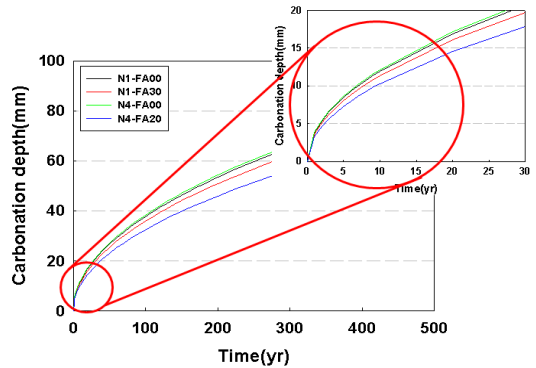


그림 3. 실태조사를 통한 배합별 탄산화 깊이(600ppm)

대상구조물의 벽체 피복두께는 44mm였으며, 100년 경과시 모든 배합에서 44mm보다 낮은 탄산화 깊이를 나타내고 있었다. N1-FA00의 경우 OPC만을 사용하여 확산계수가 크게 평가되었으나 수화물량이 많아서 탄산화 깊이가 감소하였으며, FA로 치환한 배합에서는 확산계수는 낮지만 포졸란 반응으로 수산화칼슘이 감소하므로 탄산화 저항성이 감소하였다. 1종 및 4종 시멘트 사용에 따른 탄산화 증가는 매우 작은 수준이다.

3. 실태조사를 기본으로 한 탄소량 평가

기존의 연구에서는 보수시기를 고려하여 염해환경에서의 탄소량을 평가하였는데, 자재생산단계의 탄소배출량이 가장 큰 요인으로 작용한 것으로 평가되었다 [12]. [그림 4]에서는 시공초기에 발생하는 지하구조물의 탄소배출량을 도시하였다. 지하구조물의 경우 시공시 발생하는 총 탄소배출량은 N1-FA00배합에서는 7589.37 t-CO₂, N1-FA30배합에서는 5370.30 t-CO₂, N4-FA00배합에서는 7506.92 t-CO₂, N4-FA20배합에서는 6041.09 t-CO₂로 평가되었다. 최대 총 탄소배출량은 N1-FA00배합으로 나타났다. 이는 탄소배출평가에서 N1-FA00배합의 단위시멘트양(OPC)이 가장 많기 때문이다.

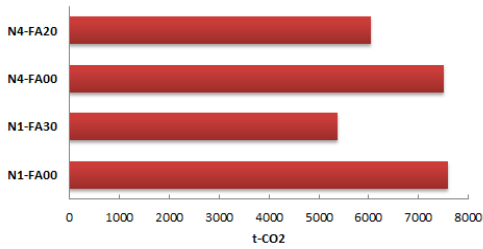


그림 4. 지하구조물 시공시 배합별 탄소배출량

대기 중의 CO₂ 농도가 600ppm일 때, 보수시기를 고려하지 않은 지하구조물의 배합별 탄소배출량 변화를 도시해보면 [그림 5]와 같다. 초기에는 시공에 따라 탄소량이 증가하지만 시간의 증가에 따라 CO₂ 흡수가 발생하여 탄소량이 감소하고 있다. 이러한 패턴은 염해에 대한 보수공법을 적용할 경우 발생하는 일정한 탄소발생량과 다른 패턴을 보인다[12]. 목표내구수명을 500년으로 가정할 때, 탄산화 진행으로 인한 배합별 탄소배출량의 감소율을 살펴보면 N1-FA00배합은 -5.57%, N1-FA30배합은 -4.96%, N4-FA00배합은 -5.55%, N4-FA20배합은 -4.46%로 N1-FA00배합이 가장 큰 것으로 나타났다.

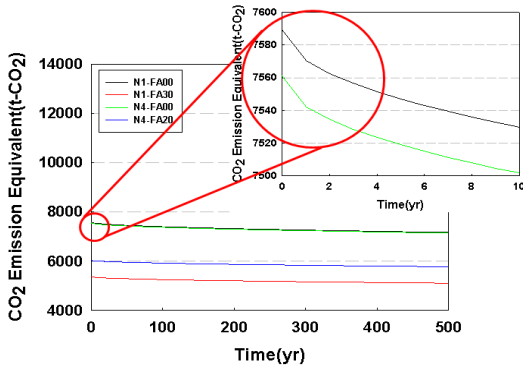


그림 5. 보수를 고려하지 않은 탄소배출량(600ppm)

4. 보수시기를 고려한 탄소량 변화

4.1 실태조사를 통한 보수시 탄소배출량 평가

본 연구에서는 탄산화 깊이가 피복두께의 위치까지 도달하는 시기를 보수시기로 정의하고, 유입농도에 따

른 배합별 보수시기 평가 결과를 [표 9]에 나타내었으며, 배합별 탄소배출량은 [그림 6]과 같다. 목표내구수명(500년)동안 보수시기를 고려한 배합별 총 탄소배출량을 평가한 결과, N1-FA00배합은 8188.99 t-CO₂, N1-FA30배합은 5868.54 t-CO₂, N4-FA00배합은 8148.66 t-CO₂, N4-FA20배합은 6330.57 t-CO₂로, N1-FA30의 배합이 5868.54 t-CO₂로 가장 낮은 것으로 평가되었다.

각 배합별 증감율을 살펴보면 N1-FA00배합은 7.32%, N1-FA30배합은 8.49%, N4-FA00배합은 7.21%, N4-FA20배합은 4.57%로 나타났으며, N4-FA20의 배합이 증가율이 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 탄산화 진행속도에 따라 보수시기 횟수가 적기 때문이다. 탄소배출량 저감을 위한 최적의 배합은 N1-FA30으로 평가되었다. 이는 혼화재료를 사용함으로써 단위 시멘트량 저감으로 인해 시공초기 및 보수시기의 탄소배출량이 다른 배합에 비해 작기 때문이다.

표 9. CO₂ 농도에 따른 배합별 보수시기

Case	Repair timing(Unit: year)			
	600ppm	1200ppm	2400ppm	4800ppm
N1-FA00	136	68	34	17
N1-FA30	150	75	36	18
N4-FA00	132	66	33	16
N4-FA20	183	92	43	21

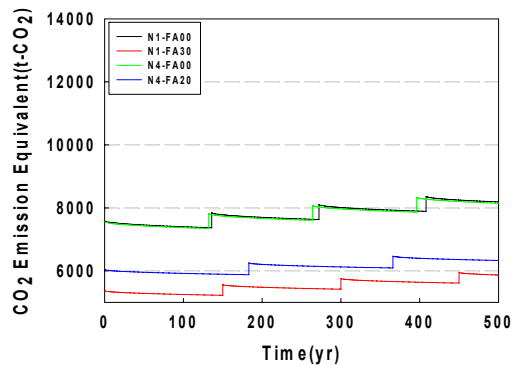


그림 6. 보수시기를 고려한 전체 CO₂ 배출량 평가 (CO₂ 농도 600 ppm)

4.2 CO₂ 변화에 따른 탄소량 평가

본 절에서는 외부 이산화탄소 농도를 1200 ppm, 2400 ppm, 4800 ppm으로 증가시켜 탄소량을 평가하였다. [그림 7a]에서 배합별 증가율을 살펴보면, N1-FA00(22.28%), N1-FA30(19.47%), N4-FA00(22.04%), N4-FA20(15.92%)로 나타났다. 배합별 증가율이 가장 큰 배합은 N1-FA00으로 나타났는데, 그 원인은 탄산화 진행속도가 증가하면서 그에 따른 보수횟수가 증가하기 때문이다. [그림 7b][그림 7c]에서 N1-FA00 배합과 N4-FA00 배합을 살펴보면, 시공초기 탄소배출량은 N1-FA00 배합이 더 높게 평가되었으나 목표내구수명동안 총 탄소배출량은 N4-FA00 배합이 더 높게 평가 되었다. 그 원인은 탄산화 진행속도가 N4-FA00 배합이 더 빠르게 평가되었으며, 그로 인해 보수횟수 증가로 인하여 총 탄소배출량이 높기 때문이다. 탄소배출량 저감에 사용되는 최적의 배합으로는 N1-FA30으로 평가되었다. 이는 FA치환으로 인해 단위 시멘트량 감소로 초기 시공시 탄소배출량이 제일 낮기 때문이다.

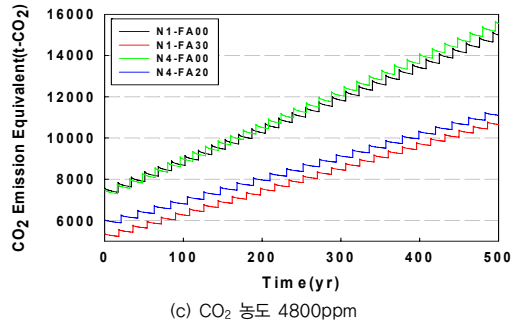
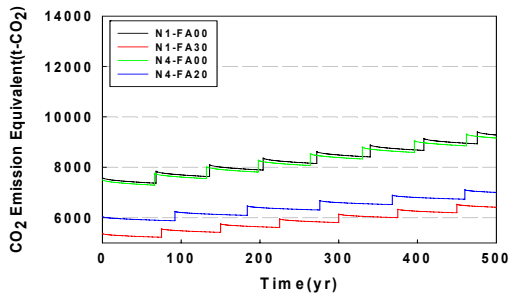
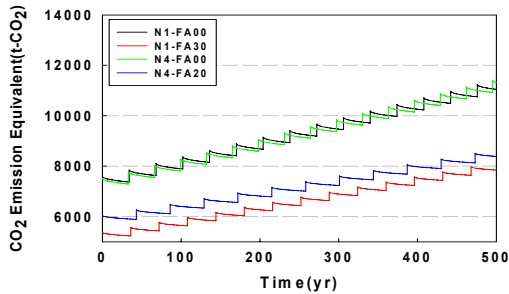


그림 7. CO₂ 농도 변화에 따른 배합별 탄소배출량

본 연구에서는 공인된 탄산화 깊이 제안식 및 흡착식, 그리고 탄소인벤토리를 고려하고 실측제원 및 환경을 기준으로 보수시기에 따른 탄소발생 및 흡착량을 평가하였다. 탄산화 깊이 및 흡착은 대부분 평균만을 고려하였으므로 국부적인 손상과 이에 따른 탄산화 변동성은 수행할 수 없다. 또한 사용기간동안 유지관리행위에 대한 탄소소비 및 탄산화 억제를 통한 탄소 흡착 등이 고려되면 좀 더 합리적인 탄소량 평가가 가능할 것이다.



(a) CO₂ 농도 1200ppm



(b) CO₂ 농도 2400ppm

V. 결론

배합 및 보수시기를 고려한 탄산화에 노출된 RC 지하구조물의 탄소배출 및 저장량 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 실제 구조물을 대상으로 목표내구수명(500년)동안 CO₂농도 600ppm에서의 탄소저장량에 대한 평가를 실시하였다. N1-FA00(422.51 t-CO₂), N1-FA30(255.45 t-CO₂), N4-FA00(419.78 t-CO₂), N4-FA20(269.23 t-CO₂)으로 평가되었다. 탄소저장량 측면에서는 N1-FA00 배합과 N4-FA00 배합이 높게 평가되었는데, 그 이유는 CO₂ 확산계수가 높게 평가됨에 따라 탄산화 진행속도가 빨라져 탄산화 깊이에 따라 CO₂ 저장량이 증가하기 때문이다.
- 2) 목표내구수명동안 보수를 고려하여 탄소저장에

따른 탄소배출량을 평가한 결과, N1-FA00배합은 7.32%, N1-FA30배합은 8.49%, N4-FA00배합은 7.21%, N4-FA20배합은 4.57%의 증가율을 나타내었다. N4-FA20의 배합의 증가율이 가장 낮았는데, 탄산화 진행속도에 따라 보수횟수가 적기 때문이다.

- 3) 본 연구를 통하여 탄소저감을 위한 최적의 배합으로 N1-FA30으로 평가되었다. 이는 탄소저장량이 다른 배합에 비하여 낮지만 초기 시공시 단위시멘트량의 감소가 지배적이기 때문이다. 즉 전체 내구수명동안 탄소량 결정은 흡착량에 따른 효과보다는 시공초기에 혼화재료를 사용하여 OPC 사용량을 줄이는 것이 결정적이며, 이는 OPC 생산시 발생하는 CO₂량이 매우 크기 때문이다.

참 고 문 헌

- [1] H. W. Song, H. J. Cho, S. S. Park, and K. J. Byun, "Early-age cracking resistance evaluation of concrete structure," *Concrete Science Engineering*, Vol.3, No.1, pp.62-72, 2001.
- [2] 권성준, 박상순, 남상혁, 조호진, "국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화 조사에 대한 연구", *한국구조물진단학회 논문집*, 제11권, 제3호, pp.116-122, 2007.
- [3] ISO 14040, *Environmental management-lifecycle assessment-principles and framework*. International Organization for Standardization, 2nd Ed., Switzerland, 2006.
- [4] K. H. Yang, J. K. Song, and K. I. Song, "Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete," *Journal of Cleaner Production*, Vol.39, No.1, pp.265-272, 2013.
- [5] K. H. Yang, E. A. Seo, and S. H. Tae, *Evaluation of CO₂ uptake of concrete owing to carbonation*, *Cement and Concrete Research*, Under Review for Publication, 2013.
- [6] J. Gajda, *Absorption of atmospheric carbon dioxide by portland cement*, PCA, R&D, Chicago, USA, 2001.
- [7] S. H. Lee, W. J. Park, and H. S. Lee, "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, pp.93-102, 2013.
- [8] C. Pade and M. Guimaraes, "The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective," *Cement and Concrete Research*, Vol.37, No.9, pp.1348-1356, 2007.
- [9] 이진우, 이상수, "3성분계 무시멘트 경화체의 양생방법에 따른 강도특성", *한국콘크리트학회논문지*, 제14권, 제4호, pp.389-396, 2014.
- [10] 원종필, 신유길, "다량의 플라이애쉬를 사용한 저장도 고유동 충전재의 내구특성에 관한 연구", *한국콘크리트학회 논문집*, 제12권, 제1호, pp.113-122, 2000.
- [11] 유성원, 이형집, "하이볼륨 플라이애쉬 철근 콘크리트 보의 휨거동 실험", *한국콘크리트학회논문지*, 제26권, 제3호, pp.323-329, 2014.
- [12] 김성준, 김영준, 권성준, "보수시기를 고려한 염해에 노출된 콘크리트 교각의 탄소량 평가", *한국건설순환자원학회 논문집*, 제2권, 제1호, pp.1-9, 2014.
- [13] 김태형, 태성호, "콘크리트 생산에 의한 CO₂ 배출량 평가 시스템 개발에 관한 연구", *한국콘크리트학회 논문집*, 제22권, 제6호, pp.787-796, 2010.
- [14] 양근혁, 김상철, "콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량의 사례연구", *한국건설순환자원학회지 논문집*, 제1권, 제2호, pp.42-48, 2013.
- [15] Björn Lagerblad, *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle- State of the art, Background Report*, Swedish Cement and Concrete Research institute, CBI, Feb., 2006.
- [16] 이경재, *실태조사자료를 이용한 탄산화 예측식*

- 의 선정에 대한 연구, 환경대학교 산업대학원 토목공학과, 석사학위논문, 2010.
- [17] 이용구, 이수철, 박철우, 고성곤, 박종건, 최신큰 크리트공학, 구미서관, 2010.
- [18] H. W. Song and S. J. Kwon, "Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure," *Cem. Concr. Res.*, Vol.37, No.6, pp.909-915, 2007.
- [19] 서치호, 이한승, "콘크리트 탄산화 메커니즘 및 제반 영향 인자", 한국콘크리트학회, pp.3-12, 2002.
- [20] 김종남, CO₂ 저장기술로 해외시장 선점하다, 탄소저감 에너지, 2009.
- [21] 심재구, 김준환, 강경룡, "Sodium Glycinate 수용액의 CO₂ 흡수특성 및 반응 메커니즘 해석", 환경공학회, 제30권, 제4호, pp.430-438, 2008.
- [22] 박효정, CO₂ philic sorbents에 의해 이산화탄소는 콘크리트 내에 포집·저장될 수 있다, 한양대학교 대학원, 건설환경공학과, 석사학위논문, pp.3-22, 2012.
- [23] K. H. Yang, E. A. Seo, and S. H. Tae, "Carbonation and CO₂ uptake of Concrete," *Environmental Impact Assessment Review*, Vol.46, No.4, pp.43-52, 2014.
- [24] JSCE-Concrete committee, Standard specification for concrete structures, 2002.
- [25] 태성호, 김태형, 박정훈, "콘크리트 전과정 CO₂ 배출량 및 경제성 최적설계 평가 시스템 개발", 콘크리트학회지, 제23권, 제6호, pp.43-47, 2011.
- [26] 김종욱, 이광수, 신성우, "콘크리트의 생산부터 현장타설까지 CO₂ 배출량 평가 방법 개발에 대한 연구", 대한건축학회논문집, 제27권, 제8호, pp.103-110, 2011.
- [27] V. G. Papadakis, C. G. Vayenas, and M. N. Fardis, "Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.8, No.2, pp.186-196, 1991.
- [28] Y. F. Houst and F. H. Wittmann, "Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste," *Cement and Concrete Research*, Vol.24, No.6, pp.1165-1176, 1994.
- [29] 서울시특별시 지하철건설본부, 지하철 구조물 내구성 확보를 위한 연구용역, pp.31-63, 1999.
- [30] J. R. Welty, C. M. Wicks, and R. E. Wilson, "Fundamental of Momentum, Heat, and Mass Transfer," John Wiley & Sons, Inc., pp.102-158, 1989.
- [31] CEB, New Approach to Durability Design, pp.51-55, 1997.
- [32] S. J. Kwon, B. J. Lee, and Y. Y. Kim, "Concrete Mix Design for Service Life of RC Structure under Carbonation Using Genetic Algorithm," *Advance in Materials Science and Engineering*, p.13, 2014.
- [33] T. Ishida and K. Maekawa, "Modeling of PH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory," *Concrete Library of JSCE*, Vol.37, No.6, pp.151-166, 2001.

저 자 소 개

김 성 준(Seong-Jun Kim)

준회원



- 2013년 2월 : 한남대학교 건설시스템공학과(공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 석사과정

<관심분야> : 투수, 염해, 탄산화, 내구성

문 진 만(Jin-Man Mun)

준회원



- 2014년 2월 : 한남대학교 건설시스템공학과(공학사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 석사과정

<관심분야> : 투수, 염해, 탄산화, 내구성

이 학 수(Hack-Soo Lee)

정회원



- 1990년 8월 : University of Michigan (공학박사)
- 1992년 8월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

<관심분야> : 구조공학, 강구조, 내진설계

권 성 준(Seung-Jun Kwon)

정회원



- 2006년 9월 : 연세대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 한남대학교 건설시스템 공학과 교수

<관심분야> : 염해, 탄산화, 마이크로 모델링, 투수