

보수시기를 고려한 염해에 노출된 콘크리트 교각의 탄소량 평가 CO₂ Evaluation of Reinforced Concrete Column Exposed to Chloride Attack Considering Repair Timing

김성준¹ · 김영준¹ · 권성준^{1*}

Seong-Jun Kim¹ · Young-Joon Kim¹ · Seung-Jun Kwon^{1*}

(Received January 17, 2014 / Revised February 25, 2014 / Accepted February 26, 2014)

In this paper, CO₂ amount is evaluated considering repairing timing and unit CO₂ amount per repair method including various stage of material manufacturing, moving, and construction. Four mix proportions with mineral admixture are considered and repairing timing/numbers are simulated based on the results from Life 365 which can handle chloride penetration. Furthermore two repair methods (simple cover concrete replacement and replacement with electro-chemical method for removing chloride content) are considered and the related CO₂ emissions are evaluated. From the study, the case with high W/B (water to binder ratio) ratio shows smaller CO₂ emission in construction stage but it increases more rapidly with increasing number of repair. CO₂ emission considering electro-chemical method greatly increases with the increasing unit CO₂ for the repairing method. The numbers of jumping step (repairing number) are evaluated to be 9 for WB37-OPC, 18 for WB50-OPC, 4 for WB40-SG, and 7 for WB47-SG respectively. RC structures with the longer maintenance free period are evaluated to be advantageous for saving CO₂ emission.

키워드 : 철근콘크리트 교각, 탄소배출량, 염해, 보수시기

Keywords : Reinforced concrete column, CO₂ emission, Chloride attack, Repairing time

1. 서론

콘크리트 구조물은 경제적이며, 고내구성인 건설재료로 오랫동안 사용되어 왔다. 사용기간이 증가하면서 다양한 환경에 노출된 RC(Reinforced Concrete) 구조물은 내구성 저하가 발생하며, 이는 구조적 안전성 문제로 진전된다. 특히 염해에 노출된 콘크리트 구조물은 초기 재령시 건조수축의 증가, 경화시 간의 단축 등의 문제를 야기하고(Song et al., 2001) 공용 중에는 내부로 유입된 염화물 이온에 의해 매립된 철근의 부식이 촉진된다(Broomfield, 1997; Park et al., 2012). 초기에는 단순한 미관의 저하에서 균열, 콘크리트 피복 탈락, 철근 단면결손과 같은 내하력 저하를 직접적으로 야기한다(Broomfield, 1997; RILEM 1994).

최근 들어 온실가스가 사회적, 공학적 문제로 대두되면서

이산화탄소 저감에 대한 연구가 집중되고 있다(Lee et al., 2010). 콘크리트는 바인더로서 시멘트를 필수적으로 포함하는데, 시멘트 1 ton 생산시 대략 0.8 ton의 CO₂가 발생하므로 시멘트 생산시 큰 환경적인 부담을 가지게 된다. 물론 산업부산물인 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag), 플라이 애쉬(FA: Fly Ash)와 같은 혼화재료를 사용하여 시멘트 사용량을 줄이고 염해저항성을 높이는 연구가 많이 진행되었다(Thomas and Bamforth, 1999; Kwon et al., 2007). 또한 공용 중 탄산화 진행을 이용하여 이산화탄소를 콘크리트 모재로 흡수하는 연구도 활발하게 진행중이다(Lee et al., 2013; Pade and Guimaraes 2007). 현재 시공과정 및 재료선별에 따른 CO₂량을 정량적으로 평가하려는 연구가 많이 진행되고 있으며, 국가별로 이를 고시하도록 하는 방안이 대두되고 있다(ISO 14040, 2006). 그러나 보수보강 및 내구성 평가

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hannam.ac.kr

¹한남대학교 건설시스템공학과 (Hannam University, Civil and Environmental Eng., Daejeon, 306-791, Korea)

를 통한 LCC(Life Cycle Cost) 개념의 접근방법은 일반화되어 있으나, 이를 직접 탄소량으로 평가하는 연구는 매우 희박하다. 또한 보수에 따른 염화물 거동을 수치적으로 평가한 연구도 있으나(Song et al., 2009), 이를 탄소량의 변화에 직접적으로 접목하지는 못하였다.

본 연구는 해안가에 노출된 RC 콘크리트 교각 8개에 대하여 염해에 대한 내구성 해석을 수행하고 배합별로 보수 및 보강에 따른 이산화탄소량을 분석하였다. 이를 위해 실제 구조물 제원인 RC교각을 이용하였으며, 4가지 물-시멘트비와 혼화재료의 치환비를 고려하여 목표내구수명동안 변화하는 탄소량을 평가하였다. 본 논문에서는 목표내구수명에서 구조물의 피복두께를 걷어내어 재타설한 경우를 보수로 정의하였으며, 철근위치에서 잔존염화물량을 걷어내기 위해 전기화학적 공정(ECM: Electrochemical Method)의 사용유무에 대한 탄소량의 변화를 추가적으로 고려하였다(Cheon et al., 2006). 또한 목표내구수명 변화에 따른 탄소량이 정량적으로 평가되었다.

2. 내구성을 고려한 보수시 탄소평가의 중요성

염해에 노출된 콘크리트는 염화물 침투로 인해 빠른 시간에 부식이 발생하며, 균열발생, 콘크리트 피복 박락 등 구조적 문제로 진전되는 것이 일반적이다. 국내외 지방서에서도 내구한계상태를 정의하여 철근위치에서 유입되는 염화물량을 제한하고 있는데, 이는 내구성 설계를 수행할 때 필수적인 공학적 변수이다(Lee et al., 2006). 많은 분야에서 탄소배출을 감소시키려는 연구가 진행되고 있는데, 국내 콘크리트 산업은 온실가스 부분에서 시멘트, 레디믹스트 콘크리트, 철근의 생산단계만 포함하더라도 국가 CO₂ 배출의 8.8%를 차지하고 있다(KCI, 2010).

Fig. 1은 최근 많은 연구에 사용되고 있는 LCCO₂ 분석을 위

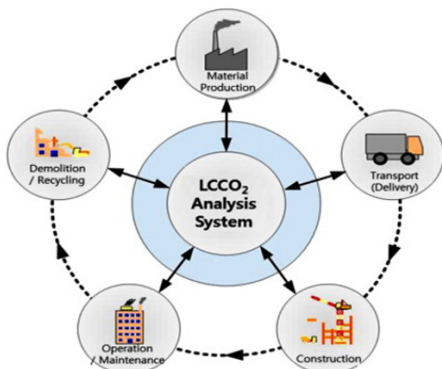


Fig. 1. LCCO₂ evaluation process [Kim et al., 2013]

한 과정을 나타낸 것이다. 건축물의 LCCO₂에 관한 연구는 1990년 말부터 최근까지 활발히 이루어지고 있다. 기존의 연구에서는 공동주택을 대상으로 건설공사에 사용되는 건축자재와 재료의 원단위를 제시하였으며(Lee and Lee, 1996; Kim and Tae, 2010), 건축물 유형, 구조형식과 전과정 단계에 따른 인벤토리 분석을 위한 원단위를 작성하고, 산업연관분석법을 이용한 건축물의 전과정 단계중 건설단계의 건축공사, 토목공사, 기계·전기설비공사를 대상으로 탄소배출량을 파악할 수 있는 방법론을 제시하였다(Kim et al., 2004a,b; Baek et al., 2011). 현재 건설 산업의 LCCO₂ 평가 기법에 관한 다양한 연구들이 진행되어 왔지만, 탄소배출원단위 산출 방법과 단계별 탄소배출량 평가 기법만을 제시해 왔다. 전과정 측면 중 운영단계에서의 RC 구조물의 염화물이온침투에 대한 내구성 평가와 이산화탄소 저감을 고려한 보수방법에 대해서는 매우 연구가 제한적이다.

본 연구는 LCCO₂ 평가보다는 염해에 대한 보수시기 및 보수시의 단위 탄소량을 고려하여 RC교각의 탄소배출량을 평가한 유지관리기법이며, 유입된 염화물량 및 보수시기를 고려하여 탄소배출량을 정량적으로 평가하였다.

3. 보수시 탄소량 평가 단계

3.1 평가방법의 개요

탄소량 평가를 위한 RC 구조물은 염해환경에 노출된 원형 교각을 대상으로 하였으며, 폭 3m, 높이 10m, 피복두께 85mm의 RC 교각을 대상으로 하였다. 정량적인 탄소량 평가를 위해 재료의 원단위, 운반거리, 레미콘, 레미콘 트럭 및 시공 장비 등의 원단위를 산정하여 평가하였다. 또한 사용재료에 있어서 보통포틀랜드시멘트를 사용한 일반 배합과 혼화재료를 사용한 배합을 이용하여 탄소배출을 평가하였다. Fig. 2에서는 탄소량 평가를 위한 RC 교각의 제원을 나타내었으며, Table 1에서는 탄소량 평가를 위한 콘크리트 배합특성을 나타내었다.

콘크리트 교각에 유입된 염화물 해석은 Life365를 이용하여 수행하였으며, 생산, 운반, 시공, 운영단계의 탄소배출량을 평가하였다. Fig. 3는 본 연구에 적용한 CO₂ 평가 흐름도이다. 물량 산출을 통해서 시공시 필요한 콘크리트량, 철근량, 시공 장비 선정 및 레미콘 출하 등을 고려하여 각각의 재료 및 시공 장비 등의 원단위를 사용하여 탄소배출량을 평가하였다.

4개의 배합에 대하여 해석방법은 두 가지로 설정하였다. 철

보수시기를 고려한 염해에 노출된 콘크리트 교각의 탄소량 평가

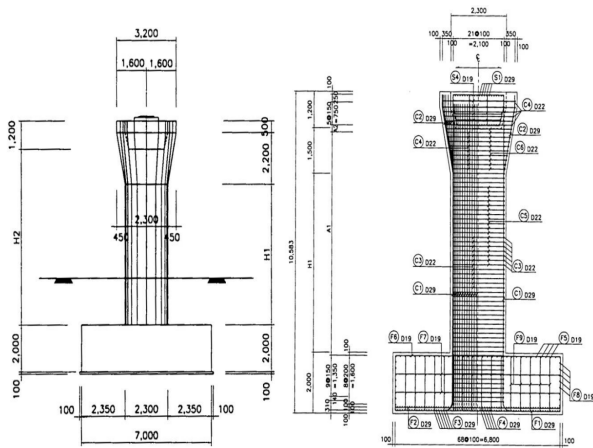


Fig. 2. RC columns for CO₂ evaluation

Table 1. Concrete mix proportions for CO₂ evaluation

Case	W/B	Unit(kg/m ³)						
		W	Binder		G	S	SP	AE
			C	SG				
WB37-OPC	0.37	168	454	-	952	767	1	0.02
WB50-OPC	0.5	188	376	-	956	814	-	-
WB40-SG	0.40	160	280	120	972	785	0.75	0.01
WB47-SG	0.47	168	250	107	956	835	0.65	0.02

WB: Water to binder ratio, W: Water, C: Ordinary Portland Cement
 SG: Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)
 G: Gravel, S: Sand, SP: Super plasticizer, AE: Air entrainer

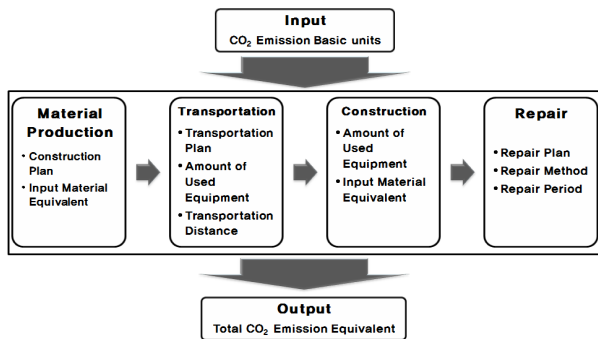


Fig. 3. CO₂ evaluation process for the study

근의 위치에서 유입된 염화물량이 1.2kg/m³의 임계염화물에 도달했을 때 콘크리트의 피복두께를 걷어내고 재타설하여 ECM을 적용하지 않았을 경우와 임계염화물량에 도달했을 때 피복두께를 걷어내고 ECM을 적용하여 잔존염화물량을 0.1kg/m³ 이하로 감소시킨 뒤 재타설 한 경우로 적용하였다. 최적의 유지관리 계획을 수립하는 것과 목표내구수명 동안 유지관리에

대한 탄소배출 저감은 밀접하게 연관되어 있다. 본 연구에 사용된 시나리오에서 산출되는 CO₂는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CO_2 = X_i + \sum_{i=1}^n X_{R_i} \quad (1)$$

여기서, CO₂는 목표내구수명동안 계산된 탄소량 [ton], X_i는 초기건설시 CO₂배출량 [ton], X_{R_i}는 보수단계에서 CO₂배출량 [ton]을 나타낸다. 정밀하게는 초기건설시, 보수시, 철거시 CO₂배출량을 고려하여 LCCO₂를 평가하여야 하지만, 본 연구에서는 목표내구수명 동안에 발생하는 초기건설 CO₂배출량과 보수와 재타설에 대한 CO₂배출량만을 고려하여 평가하였다. 철거에 대한 탄소량은 두가지 경우 동일하므로 이에 대한 CO₂배출량을 제외하였다.

3.2 Life365를 통한 염화물 해석 및 내구수명 평가

3.2.1 Life 365를 통한 염화물 해석

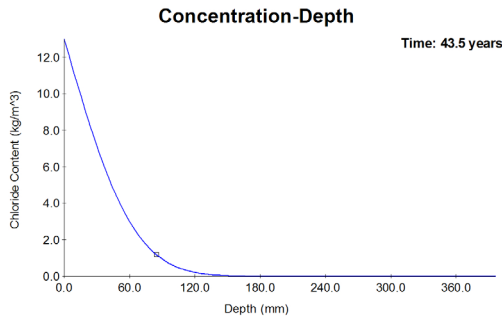
Life 365는 2차원 해석이 가능하며, Fick' 2nd Law에 기반을 두고 있는데 염화물 확산 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

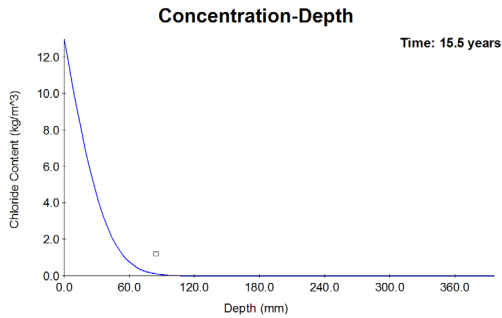
여기서, C는 콘크리트 중의 염화물이온 함유량, t는 폭로 기간, x는 콘크리트 표면에서의 거리, D는 겔보기 확산계수를 나타낸다. Life365에서는 식 (1)을 유한 차분법으로 해석할 수 있도록 고려되었으며, 확산계수의 시간의존성 및 온도 의존성을 고려할 수 있도록 설계되어 있다. 또한 표면 염화물량의 증가를 고려하여 실태조사 결과를 반영할 수 있도록 설정되어 있는데, 사용자의 자유로운 입력이 가능하다. 이 프로그램을 사용하면 장기침지 결과보다 엄격하게 해석결과가 도출되는데, 이는 28일 재령시의 확산계수를 실험시 평가되는 값보다 약간 크게 잡고 있기 때문이다. 엔지니어에게는 현재 가장 일반적으로 사용되는 프로그램이며, 철근위치에서 임계 염화물량(1.2kg/m³)에 도달했을 시간을 일반적으로 내구수명을 설정한다. Fig. 4에서는 Life365를 통한 해석결과를 나타내고 있다.

3.2.2 내구수명 평가

본 절에서는 외부 염화물량과 배합에 따른 확산계수를 이용



(a) Chloride profile for WB40-SG (ECM Repairing)



(b) Chloride profile for WB40-SG (Cover concrete replacement)

Fig. 4. Chloride profile from Life365 program

하여 염화물 해석을 수행하였다. 염화물 침투해석을 위해 초기 재령 거동과 Nernst-Einstein 식을 고려한 많은 연구가 있으나 (Kwon et al., 2007; Maekawa et al., 2003), 본 논문에서는 Life365를 이용하여 겉보기 확산계수를 고려한 염화물 확산을 분석하였다. 철근위치에 유입된 염화물량이 임계염화물량 (1.2kg/m³)에 이르는 시간까지를 내구수명으로 정의하였으며 (JSCE 2002; KCI 2004), 목표내구수명에 이르지 못할 경우 보수를 통하여 연장하도록 하였다.

식 (3)에서는 겉보기 확산계수를 이용한 염화물 확산식을 나타내고 있으며, 식 (4)에서는 시간의존성 확산계수를 나타내고 있다.

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D(t) \cdot t}} \right) \quad (3)$$

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (4)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간의존성확산계수[m²/year], t 는 시간 [year], C_0 는 표면염화물량[kg/m³], $C(x,t)$ 는 거리(x)와 시간(t)에 따른 염화물량을 나타낸다[kg/m³]. D_{ref} 와 t_{ref} 는 기준시간에서의 확산계수와 기준시간을 나타낸다. 일반적으로 t_{ref} 은 28일을 가정하며, 식 (5) 및 식 (6)은 28일 재령 확산계수와 시

Table 2. Analysis conditions for chloride penetration through Life 365

Surface chloride content	13.0kg/m ³
Temperature	Constant 15°C
Time to build up	4.0 years
Critical chloride content	1.2kg/m ³
Service life determination	1.2kg/m ³ (without ECM)
	below 0.1kg/m ³ (with ECM)

간의존성지수 (m)을 나타낸다(Thomas and Bentz, 2002),

$$D_{28} = 1 \times 10^{[-12.06 + 2.40 W/C]} \quad (5)$$

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (6)$$

여기서, W/C 는 물-시멘트비, FA , SG 는 각각 플라이 애쉬와 슬래그의 치환율을 나타내며, 플라이 애쉬인 경우 50%, 슬래그인 경우 70%를 제한값으로 한다. Table 2에서는 Life365를 이용하기 위한 해석조건을 나타내었으며, 전술한대로 내구수명을 평가할 때, 재타설 보수공법을 사용한 경우와 보수 및 ECM을 사용한 두 가지 경우로 나누어 제시하였다.

4. 배합조건 및 보수를 통한 CO₂ 평가

4.1 문헌조사를 통한 탄소 인벤토리 분석 및 탄소량 평가

4.1.1 인벤토리 분석

탄소배출량 평가를 위해 자재, 자재운송, 제조, 레미콘운송, 타설 5가지 단계로 나누어 단계별 CO₂ 배출량을 산정하였다. 콘크리트 자재의 CO₂ 배출량 원단위는 3개의 조사대상(LOI of KEM, Inter Industry Analysis, JSCE)으로 분류하여 조사된 기존의 자료 (Tae et al., 2011)를 이용하였으며 이형철근 및 순환골재의 경우 자료 국토교통부 자료를 이용하여 Table 3에 제시하였다.

자재운송 단계와 레미콘운송 단계의 경우 기존의 연구(Kim et al., 2011)의 연구 자료를 참고하여 18 ton 트럭의 원단위를 사용하였고 레미콘의 경우 레미콘(6m³)의 50 km 운송시 발생하는 CO₂량을 1 km 운송당 발생되는 양으로 환산하여 계산하였다. 또한 자재 제조 단계의 경우 공정별로 사용된 전기에너지를 CO₂량으로 환산한 값을 사용하였다. Table 4에서는 이동운송방법에 따른 탄소량을, Table 5에서는 레미콘의 운반차량에 따른 탄소량을, Table 6에서는 콘크리트 제조단계에 따른

Table 3. CO₂ emission units for constction materials (Tae et al., 2011)

Type	Unit	CO ₂ (kg-CO ₂ /ton)
G	ton	5.00×10 ⁻³
S		5.00×10 ⁻³
C		7.60×10 ²
Slag		0.00
Steel		4.00×10 ⁻⁴
W		1.96×10 ¹
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

Table 4. CO₂ emissions basic unit of the materials according to the conveyance distance (Kim et al., 2011)

Dump Truck (ton)	CO ₂ emission unit for Transportation (kg-CO ₂ /ton)
1 ton	2.68×10 ⁻¹
2.5 ton	1.46×10 ⁻¹
5 ton	9.20×10 ⁻²
8 ton	9.80×10 ⁻²
18 ton	6.30×10 ⁻²
23 ton	5.10×10 ⁻²

Table 5. Ready-mixed concrete classification for CO₂ emission rate (Kim et al., 2011)

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

탄소량을 나타낸 것이다. 타설 단계는 1m³의 콘크리트를 펌프카가 타설할 때 나오는 CO₂ 배출량을 이용하였으며, 펌프카가 한시간에 사용하는 에너지 량을 구동시 사용되는 연료(L) 사용량을 이용하여 CO₂량을 고려하였다. 이때의 모델을 전기모터 사용으로 가장 에너지 효율이 좋은 140000HPD 로 선택하였으며 교각의 높이를 고려하여 일반압력 배출 원단위를 사용하였다. Table 7에서는 타설을 위한 펌프카의 탄소원단위를 나타내고 있다.

4.1.2 탄소량 평가를 위한 시나리오

본 연구는 전과정 탄소평가가 아니며, 시공 및 보수에 따른 평가만이 수행되었다. 콘크리트를 생산하기 위한 재료입수, 반

Table 6. CO₂ emission by ready-mixed concrete manufacture equipment classification (Kim et al., 2011)

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
	Slag 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

Table 7. Actual pump car CO₂ emissions basic unit (Kim et al., 2011)

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

입, 콘크리트 믹싱, 시공 등이 고려되었는데 다음과 같은 시나리오를 기반으로 한다. 슬래그와 배합수는 현장에서 콘크리트 제조시 반입되며, 굵은골재는 18km, 잔골재는 15km, 시멘트는 15km, 이형철근은 20km의 이동거리를 가정하였다. 또한 콘크리트 제조후 레미콘을 이용하여 현장까지 타설을 위해 이동한 거리는 5km를 가정하였다.

일반적으로 레미콘의 타설시간 준비가 90분~120분 정도로 이루어지는 것을 가정하였으며, 이에 따라 콘크리트 레미콘 제조에서도 20km내의 거리에서 반입되는 것을 가정한 것이다.

Fig. 5에서는 본 연구의 시나리오에 따른 CO₂ 평가 단계 및 가정을 나타내고 있다.

배합에 따른 임계염화물량 도달시기를 Life365를 이용하여 해석하였으며, Table 8은 각 배합에 대한 ECM의 적용 유무에 따른 보수시기를 나타내었다.

4.2 ECM을 적용하지 않은 보수 CO₂ 평가

각 배합에 대해서 ECM을 적용하지 않은 경우, 즉 철근위치에서 유입된 염화물량이 0.1kg/m³ 수준일 경우의 CO₂를 평가하였다. 이중 가장 탄소량이 많이 배출된 배합조건은 200년 목포내구수명 에서 WB37-OPC(75.79 t-CO₂)이며 가장 적게 배출된 조건은 WB47-SG(39.36 t-CO₂)이다. 초기 배합당시 비교

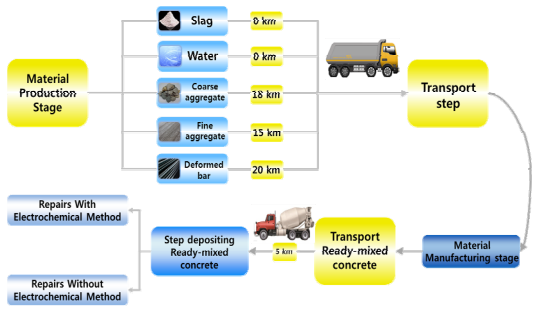


Fig. 5. Assumption and evaluation process for CO₂ with/without ECM

Table 8. Calculated repair timing (year)

Case		Repair timing (year)
Non-Electrochemical Method (Simple cover concrete replacement in the condition of 1.2kg/m ³)	WB37-OPC	8.1
	WB50-OPC	4.5
	WB40-SG	15.5
	WB47-SG	10.5
Electrochemical Method (Concrete cover replacement and ECM in the condition of 0.1kg/m ³)	WB37-OPC	20.0
	WB50-OPC	10.7
	WB40-SG	
	WB47-SG	27.5

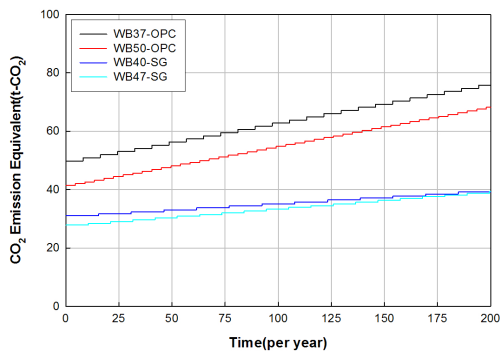
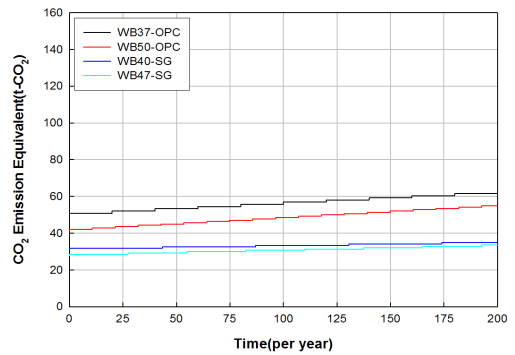


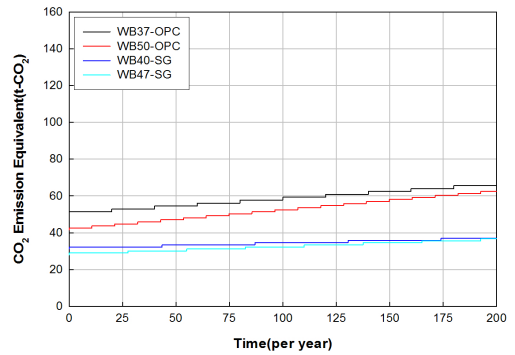
Fig. 6. Total CO₂ emission equivalent considering the repair time (without ECM)

적 슬래그 첨가량이 높은 배합조건에서 낮은 탄소 배출량을 보이는데 이는 총 배합중 시멘트 비율이 탄소량 증가에 차지하는 비중이 크기 때문이다.

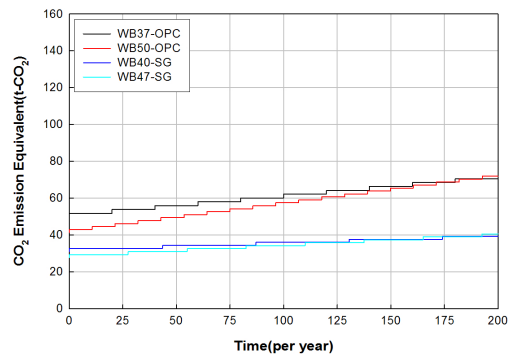
목표내구수명 내 평균 증가율을 계산해 보면 WB47-SG의 평균 증가율은 1.79 %이며 WB40-SG의 평균 증가율은 1.59 %로 초기탄소량은 WB40-SG가 높았다. 목표내구수명인 200년 이후에는 재타설 횟수가 많은 WB47-SG의 탄소량의 증가율이 높으므로 WB40-SG의 누적 탄소량 수치를 넘어설 것으로 예상된다. Fig. 6은 ECM을 사용하지 않는 조건에서의 각 배합별



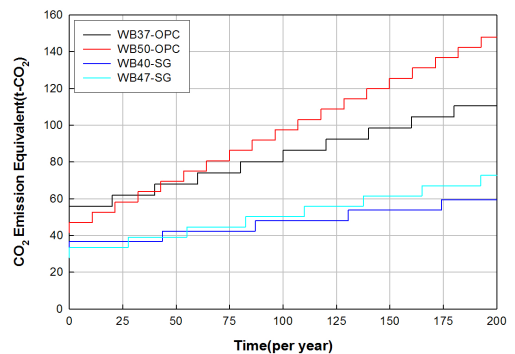
(a) 0.1 t-CO₂



(b) 0.5 t-CO₂



(c) 1 t-CO₂



(d) 5 t-CO₂

Fig. 7. CO₂ emission equivalent considering the repair time (with ECM)

보수시기를 고려한 탄소배출량을 도시하였다.

4.3 ECM을 적용한 보수 CO₂ 평가

ECM에 대한 명확한 원단위 산출이 어려우므로 공정의 원단위를 가정하여 보수시기를 고려한 총 CO₂ 배출량을 평가하였다. Fig. 7은 보수시기를 고려한 ECM 적용에 대한 배합별 총 CO₂ 배출량을 도시한 것이다. Fig. 6(a)~Fig. 6(d)의 순서로 각 배합별 ECM의 탄소배출량을 0.1 t-CO₂, 0.5 t-CO₂, 1 t-CO₂, 5 t-CO₂로 증가시켜 도시하였다. Fig. 7(a)은 WB37-OPC(62 t-CO₂) 배합이 목표내구수명에서 가장 큰 탄소배출량을 나타내었으며, 슬래그를 치환한 WB47-SG(34 t-CO₂) 배합이 가장 작은 탄소배출량을 나타내었다. Fig. 7(a)에서 Fig. 7(d)로 갈수록 탄소배출량이 증가하였으며, 물-결합재비가 클수록 총 탄소배출량이 커지는 것으로 평가되었다. 이는 철근위치에서의 임계염화물량 도달시기가 공법의 적용유무에 따라 달라지는데, 물-결합재비가 클수록 염화물 확산계수가 증가하고 이로 인해 보수횟수가 증가하기 때문이다.

Fig. 7의 결과를 분석하면 배합별로 W/B37-OPC의 경우 9번의 탄소량 증가횟수를 가지며, W/B50-OPC에서는 18번, W/B40-SG에서는 4번, W/B74-SG는 7번의 탄소량 증가횟수를 가진다. 초기 탄소량의 사용이 적어도 보수시의 탄소단위량이 많다면 목표내구수명동안에는 탄소량 사용이 많아지게 된다. 탄소량 증가횟수, 즉 maintenance free period (보수가 필요 없는 기간)이 클수록 탄소량 감소에 유리하다.

5. 결론

해안가에 노출된 RC 콘크리트 교각에 대하여 염해에 대한 내구성 해석을 수행하고 배합별로 보수보강에 따른 탄소배출량을 평가하였다. 보수시기를 고려한 염해에 노출된 콘크리트 교각의 탄소량 평가를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 건설초기의 탄소배출량이 WB37-OPC의 배합이 가장 크게 평가 되었다. 이는 자재생산단계에서 시멘트생산의 탄소배출원단위의 값이 다른 기준 원단위에 비해서 월등히 크기 때문이며, 혼화재료를 대단위 치환하여 시멘트량을 치환한다면 자재생산단계에서 탄소배출량을 저감할 수 있다.
2. 목표내구수명 200년을 기준으로 콘크리트 피복두께 제거 후 재타설만을 기준으로 LCCO₂를 평가한 결과, WB37-

OPC(75.79 t-CO₂) 배합이 가장 높은 탄소배출량을 나타내었으며, WB47-SG(39.36 t-CO₂) 배합이 가장 낮은 탄소배출량을 나타내었다. 이는 WB47-SG 배합이 보수횟수에 있어서 WB37-OPC 보다 적으며, 초기 시공시의 탄소량이 작기 때문이다.

3. 목표내구수명을 기준으로 콘크리트 피복두께 절삭 후 전기화학적 탈염소화 공정을 적용하여 재타설한 배합을 기준으로 LCCO₂를 평가한 결과, 물-결합재비가 클수록 총 탄소배출량이 증가하였다. 이는 철근위치에서의 임계염화물량 도달시기가 공법의 적용유무에 따라 달라지므로 물-결합재비가 클수록 보수횟수가 증가하기 때문이다. 보수에 따른 탄소배출원단위가 클수록 높은 물-결합재의 배합이 목표내구수명동안 탄소량이 많이 요구됨을 알 수 있다.
4. ECM과 같은 특별한 보수 및 보강공사에 대한 원단위 인벤토리가 산출된다면 정확한 목표내구수명동안 변화하는 탄소배출량을 정량적으로 평가할 수 있으며, 구체적인 보수 시기 및 방법을 제시 할 수 있다고 판단된다.
5. 기본유지관리기간(Maintenance free period)가 길수록 보수횟수가 줄어들고 이에 따라 목표내구수명동안의 탄소량이 감소된다. 즉 초기 시공시의 탄소량, 적절한 보수횟수와 보수시의 탄소량이 고려되어야 목표내구수명동안 가장 경제적이고 친환경적인 RC 구조물을 시공, 운용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-286 2013R1A1A 2060114)이며 저자는 이에 감사드립니다.

References

Back, J.H., Tae, S.H., Roh, S.J., Lee, J.H., and Shin, S.W. (2011), A study on the requisite elements of LCCO₂ evaluation system at planning stage of building, Korean journal of construction engineering and management, **12(3)**, 31-41[in Korean]

Broomfield, J.P. (1997). Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, London, E&FN, 1-15.

Cheon, H-M., An, T-S., Kim, H-S., and Han, B-K. (2006).

- Current State and Prospect of Electrochemical Techniques for Protection of Steel Corrosion in Concrete, Journal of the Korea concrete institute, **18(5)**, 16–22
- ISO 14040. (2006). Environmental Management–Lifecycle Assessment–Principles and Framework, International Organization for Standardization, 2nd Ed., Switzerland.
- JSCE–Concrete committee. (2002), Standard specification for concrete structures.
- KCI–Korea Concrete Institute. (2010), Concrete & Environment, 242 [in Korean].
- KCI–Korea Concrete Institute. (2004), Concrete standard specification – durability part [in Korean].
- Kim, J–Y., Kim S. W., and Son, J. Y. (2004a), A study on the estimation of the environmental Load Intensity of construction materials for the building LAC –Focused on the amount of energy consumption and CO₂ Emission by I/O table, Journal of the architectural institute of Korea: Planning & Design, **20(7)**, 208–215 [in Korean]
- Kim, J.Y., Lee, S.E., and Shon, J.Y. (2004b), “An Estimation of the Energy Consumption & CO₂ Emission Intensity during Building Construction,” Journal of the architectural institute of Korea : Planning & design, **20(10)**, 319–326 [in Korean].
- Kim, J.W., Lee, K.S., and Shin, S.W. (2011), A study on the development of an assesment methodology for emission from concrete manufacturing to CIP, Journal of the architectural institute of Korea: Planning & Design, **27(8)**, 103–110 [in Korean].
- Kim, S.K., Lee, S.H., Na, Y–J., and Kim, J.T. (2013), “Conceptual model for LCC–based LCCO₂ analysis of apartment buildings,” Energy and Buildings, **64(1)**, 285–291.
- Kim, T.H., and Tae, S.H. (2010), A study on the development of an evaluation system of CO₂ emission in the production of concrete, Journal of the Korea concrete institute, **22(6)**, 787–796 [in Korean].
- Kwon, S.J., Song, H.W., Byun, K.J., and Park, C.K. (2007), Analysis of chloride penetration in concrete with mineral admixtures using neural network algorithm and micro modeling, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, **27(1A)**, 117–129 [in Korean].
- Lee, H.K., Kim, H.K., and Hwang, E.A. (2010), Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber–reinforced cellular concrete, Waste Management, **30(2)**, 274–284.
- Lee, H.S.(2006). Repair LCC evaluation of RC structures through the FEM analysis of chloride ion penetration, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, **10(1)** 223–230 [in Korean].
- Lee, K–H., and Lee, K–H. (1996), The estimation of amount of energy consumption and CO₂ emission in construction activities, Journal of the Architectural Institute of Korea, **12(7)**, 197–204 [in Korean]
- Lee, S.H., Park, W.J., and Lee, H.S. (2013). Lifecycle CO₂ assessment method for concrete using CO₂ balance and suggestion to decrease LCCO₂ of concrete in South–Korean apartment. Energy and Buildings, **58(1)**, 93–102.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003), Multi–scale modeling of concrete performance, Journal of Advanced Concrete Technology, **1(2)**, 91–126.
- Pade, C., and Guimaraes, M. (2007), The CO₂ uptake of concrete in a 100 year perspective, Cement and Concrete Research, **37(9)**, 1348–1356.
- Park, S.S., Kwon, S.J., and Jung, S.H. (2012), Analysis technique for chloride penetration in cracked concrete using equivalent diffusion and permeation, Construction and Building Materials, **29(2)**, 183–192.
- RILEM (1994), Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130–CSL, E&FN, 28–52.
- Song, H–W, Cho, H.J., Park, S.S., and Byun, K.J. (2001). Early–age cracking resistance evaluation of concrete structure. Concrete Science Engineering, **3(1)**, 62–72.
- Song, H–W., Shim, H–B., Petcherdchoo, A., and Park, S–K. (2009), Service life prediction of repaired concrete structures under chloride environment using finite difference method, Cement and Concrete Composites, **31(2)**, 120–127.
- Tae, S.H., Park, J.H., and Kim, T.H. (2011), A development on the optimal design evaluation system of CO₂ emission and economical efficiency in the life cycle of concrete, Journal of the Korea concrete institute, **23(6)**, 43–47 [in Korean].
- Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B. (1999), Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, Cement and

Concrete Research, **29(4)**, 487-495.
Thomas M,D.A, and Bentz EC.(2002), Computer Program for

Predicting The Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced
Concrete Exposed to Chlorides, Life365 Manual, SFA,

보수시기를 고려한 염해에 노출된 콘크리트 교각의 탄소량 평가

본 연구에서는 탄소배출 평가기법을 이용한 자재생산단계, 운송단계, 시공단계 뿐 아니라 보수시기 및 보수단위 탄소량을 고려하여 콘크리트 교각의 탄소배출량을 평가하였다. 혼화재료를 포함한 4가지 배합이 고려되었고 Life 365를 이용하여 염화물 침투를 평가하였으며, 이에 따른 보수횟수 및 보수시기를 설정하였다. 또한 목표내구수명동안 구조물의 피복두께를 견어내어 재타설한 경우와 재타설 후 잔존염화물량을 제거하기 위한 전기화학적 공정의 사용유무에 따른 탄소배출량을 평가하였다. 평가결과 높은 물-결합재비를 가진 배합은 초기 시공단계에서의 탄소량은 상대적으로 적지만 보수횟수의 증가에 따라 탄소량이 증가하였으며, 탈염공법이 적용되는 경우 보수시의 단위 탄소량에 따라 전과정 탄소량이 크게 증가하였다. 보수횟수에 따라 탄소량의 증가가 발생하는데, W/B37-OPC의 경우 9번, W/B50-OPC에서는 18번, W/B40-SG에서는 4번, W/B74-SG는 7번으로 평가되었다. 더 긴 보수 불필요 기간을 가진 RC 구조물이 탄소량 감소에 유리함을 알 수 있다.