

# 탄산화에 노출된 지하구조물의 보수횟수에 따른 LCCO<sub>2</sub> 평가

## Probability-Based LCCO<sub>2</sub> Evaluation for Underground Structure with Repairing Timings Exposed to Carbonation

권성준<sup>1\*</sup>Seung-Jun Kwon<sup>1\*</sup>

(Received June 20, 2017 / Revised August 16, 2017 / Accepted August 28, 2017)

RC(Reinforced Concrete) structures can keep their performance during intended service life through initial service life and extension of the life through repairs. In the deterministic repairing method, cost and the related CO<sub>2</sub> emission increase with step-shaped escalation, however continuous results can be obtained through probabilistic repairing technique, and this is capable of reducing CO<sub>2</sub> emission through CO<sub>2</sub> absorption. In the work, repairing timing and CO<sub>2</sub> emission/absorption are evaluated based on the different methods like deterministic and probabilistic manner. The probabilistic technique considering CO<sub>2</sub> absorption with carbonation progress is evaluated to be very effective to reduction of CO<sub>2</sub> emission through extension of initial and additional service life due to repairs. When the variations of the service life from initial construction and repair material can be determined, the proposed technique can contribute to reduction of cost and CO<sub>2</sub> with decreasing repairing number.

**키워드 :** 확률론적 유지관리, 내구수명, 보수횟수, 탄산화, 이산화탄소 흡착

**Keywords :** Probabilistic maintenance, Sevice life, Number of repair, Carbonation, CO<sub>2</sub> absorption

### 1. 서론

콘크리트는 경제성, 재료 수급성, 내구성, 내화성 등 많은 장점을 가지고 있으므로, 오랫동안 건설재료로서 사용되어 왔다(Lee et al. 2010). 구조적 성능을 만족하더라도 지하구조물과 같이 CO<sub>2</sub> (이산화탄소)농도가 높은 환경에 노출된 콘크리트는 탄산화로 인해 매립된 철근의 부식이 발생하기 쉽다(Kwon et al. 2014; Ishida et al. 2000). 부식된 철근은 3~5%의 부식 수준에서는 부식에 따른 팽창작용(Swell effect)으로 인해 부착력이 증가하지만, 그 이후는 Slip이 크게 발생하여 RC(Reinforced Concrete) 구조물의 성립 조건을 만족하지 못하며, 구조물로 사용할 수 없다(Sadegh et al. 2015; Broomfield, 1997). 많은 시방서 및 지침에서는 탄산화에 대한 내구성 설계를 권고하고 있으며, 이러한 내구성 설계는 점차 정량적인 방법으로 발전하고 있다(ECS-European Committee for Standardization, 2004; ACI, 2008; JSCE, 2007).

지배적인 열화인자인 탄산화는 외부의 높은 이산화탄소에 의해 콘크리트 내부 공극수의 pH가 감소하여 철근이 부식되기 쉬운 상태가 되는 열화환경을 의미한다(Ishida et al. 2000; Izumi et al. 1986). 최근들어 내구성 및 장수명화에 대한 관심이 높아지면서, LCCO<sub>2</sub>에 대한 연구가 진행되고 있다. LCCO<sub>2</sub>는 일반적으로 전과정 생애주기에 따른 탄소량을 평가하는 것으로 자재생산에서 시공, 운영, 해체에 이르기까지 요구되는 전체 탄소량을 나타낸 것이다(Tae et al. 2011). 콘크리트의 주된 원료인 시멘트 클링커는 1톤을 생산할 경우, 0.80~0.85톤 정도의 CO<sub>2</sub>가 발생하는 것으로 알려져 있으며, 초기 시공에 사용되는 재료 및 시공방법에 따라 CO<sub>2</sub>량이 크게 변화한다(Yang et al. 2013; Kim et al. 2014).

탄산화는 콘크리트 구조물의 내구적 성능저하를 의미하지만, 사용 중 탄산화 반응을 위해 이산화탄소를 흡수하므로 CO<sub>2</sub>흡착 개념을 도입할 수 있다. CO<sub>2</sub>포집에 대한 연구는 사용되는 탄산화 진행 모델과 가정에 따라 차이를 보이고 있으며 기계적인 포집과

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

<sup>1</sup>한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

는 큰 차이가 있다. 탄산화에 의한 CO<sub>2</sub> 포집량은 시멘트 생산시 배출되는 CO<sub>2</sub>량의 3~4% 수준에 이르는 것으로 알려져 있으며, 콘크리트 생산으로부터 배출되는 CO<sub>2</sub>량의 5%를 넘지 않는 것으로 알려져 있다(Gajda 2001; Lee et al, 2013; Pade et al, 2007). 그러나 사용기간(목표내구수명)의 증가에 따라 보수시기가 반복되면, 탄산화에 따른 CO<sub>2</sub>의 포집량은 증가하게 된다. 기존의 결정론적인 유지관리 기법에서는 일정 보수시기가 될 경우, 단계적으로 보수에 따른 비용 및 CO<sub>2</sub>가 증가하게 되는데(Thomas et al, 2002), 확률론적인 방법을 도입할 경우, 보수에 따른 CO<sub>2</sub>양을 연속적으로 평가할 수 있다.

최근 도입되고 있는 확률론적인 유지관리 기법에서는 보수시기의 변동성과 초기 시공에 따른 유지관리기간의 변동성을 고려하여 유지관리 시점과 이에 따른 보수비를 산정하고 있다(TOTAL-LCC, 2010).

본 연구에서는 확률론적인 유지관리 개념을 고려하여, 보수에 따른 CO<sub>2</sub>량뿐 아니라 탄산화가 진행되는 기간을 고려하여 CO<sub>2</sub>흡착을 동시에 고려하였다(Kwon 2016). 초기 유지관리가 필요없는 기간(Maintenance free period:  $T_1$ )의 변동성, 보수재가 확보하는 보수기간 변동성, 목표내구수명의 증가에 따른 변동성을 고려하여 보수에 필요한 LCCO<sub>2</sub>량을 평가하였다. 제안된 확률론적 LCCO<sub>2</sub>평가 기법은 결정론적인 방법과 다르게 LCCO<sub>2</sub>를 연속적으로 평가할 수 있으므로 목표내구수명에 따른 합리적인 탄소량 계획을 수행할 수 있다. 또한 본 연구에서 수행된 CO<sub>2</sub>흡착과 확률론적 LCCO<sub>2</sub>평가 기법은 탄소량 감소에 효과적인 설계기법임을 알 수 있다.

## 2. 확률론적 LCCO<sub>2</sub> 평가기법의 개요

### 2.1 정규분포를 가정한 확률론적 보수 평가 모델

본 논문에서 이용한 확률론적 평가모델은 기존의 보수비용 산정에 사용되는 확률 모델을 기본으로 하였다. 일본 TOTAL-LCC 프로그램 구성요소중 보수비용 산정에 대한 모델을 차용하였는데(TOTAL-LCC, 2010), 이 모델에서는 유지관리가 필요없는 기간( $T_1$ )과 N 회차의 보수시기( $T_N$ )의 확률변동성을 고려하여, 내구수명의 증가에 따라 보수비용을 평가하는 기법이다.

보수를 필요로 하지 않는 기간(Maintenance free period)이 목표내구수명보다 클 경우는 1회의 보수시기가 0이 되는 조건인데, 이는 1회 차의 보수시기  $T_1$ 이 사용하려는 목표내구수명( $T_{end}$ )보다 클 경우이다. 이 조건은 식(1)과 같이 정의할 수 있다.

$$T_1 \geq T_{end} \tag{1}$$

여기서,  $T_1$ 은 1회차의 보수시기,  $T_{end}$ 은 사용하려는 목표내구수명을 나타낸다.

$\bar{T}_1$ 을 1회차 보수시기의 평균값으로 정의하면 표준화 변수인  $\beta_1$ 와 보수를 필요로 하지 않는 확률, 즉 보수를 0회 수행할 확률인  $P_1$ 은 식 (2) 및 (3)과 같이 나타낼 수 있다(TOTAL-LCC, 2010).

$$\beta_1 = \frac{(T_{end} - \bar{T}_1)}{\sigma_1} \tag{2}$$

$$P_1 = \int_{\beta_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \tag{3}$$

여기서,  $\sigma_1$ 는 1회차 보수시기에서의  $\bar{T}_1$ 의 표준편차를 나타낸다.

또한 보수회수가 1회가 되는 조건은  $T_1$ 이 목표내구수명( $T_{end}$ )보다 작고 1회 보수시기  $T_1$ 과 2회 보수시기  $T_2$ 의 합이  $T_{end}$ 보다 클 경우이다. 이 경우 표준화 변수는 식 (4)와 같이 구성할 수 있으며,  $T_1 + T_2$ 가  $\bar{T}_1$ 보다 클 확률( $P_2^*$ )은 식 (5)와 같이 구성할 수 있다(TOTAL-LCC, 2010).

$$\beta_2 = \frac{(T_{end} - (\bar{T}_1 + \bar{T}_2))}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \tag{4}$$

$$P_2^* = 1 - \int_{-\infty}^{\beta_2} f(\beta) d\beta = \int_{\beta_2}^{\infty} f(\beta) d\beta$$

$$P_2^* = \int_{\beta_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \tag{5}$$

여기서,  $\sigma_i$ 는  $T_i$ 의 표준편차를 나타낸다. 그러므로 보수회수가 1회인 경우의 확률 ( $P_2$ )은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(TOTAL-LCC, 2010).

$$P_2 = (1 - P_1) \times P_2^* \tag{6}$$

식 (3)과 식 (5)의 확률구성을 일반화하면 보수회수 n-1회 의 확률  $P_n$ 은 식 (7)과 같으며, 1회 보수시의 탄소량이  $C$ 로 일정하다고 가정할 경우, 총 탄소량( $C_T$ )은 식 (8)과 같이 정식화 할 수 있다.

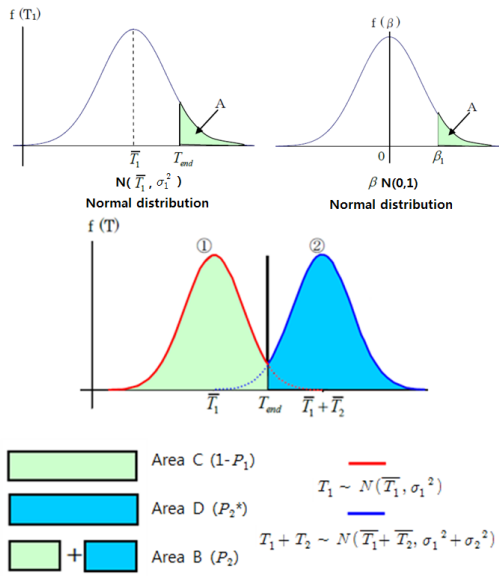


Fig. 1. Schematic diagram for probability-based LCCO<sub>2</sub> evaluation

$$P_n = \left(1 - \sum_{k=1}^{n-1} P_k\right) \times P_n^* \quad (7)$$

$$C_T = \sum_{k=1}^n (k CP_k) \quad (8)$$

시간의 경과에 따라 탄산화 깊이는 증가하게 되는데, 초기에는 빠르게 증가하는 시간 제곱근의 증가속도를 가지게 된다. 이는 초기의 CO<sub>2</sub>흡착량이 증가하고 시간에 따라 흡착량이 감소하는 것을 의미한다. 보수재의 탄산화로 인한 내구수명에 이르기까지의 의한 시간( $T_N$ )까지의 흡착량을  $\Delta C(t)_N$ 으로 가정하면 CO<sub>2</sub>흡착을 고려한 LCCO<sub>2</sub>는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.  $\Delta C(t)_N$ 는 탄산화 깊이의 식으로 고려되며, 보수가 된 상태에서 다음 보수시 까지 시간의 함수로 고려된다. 이상의 확률 해석의 개요도는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_T = \sum_{k=1}^n [k (C - \Delta C(t)_N) P_k] \quad (9)$$

## 2.2 탄산화 진행에 따른 CO<sub>2</sub> 흡착

### 2.2.1 탄산화기구

시멘트는 배합수와 수화반응을 거쳐 경화되는데, 시멘트 중량의 25~30%정도의 수산화칼슘을 생성하며, 이는 콘크리트 특유의

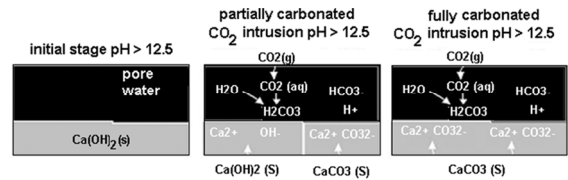
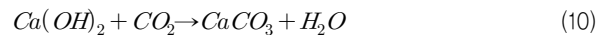


Fig. 2. Carbonation mechanism

강알칼리를 부여한다(Maekawa et al. 2009). 초기 재령의 콘크리트는 11.0 이상의 높은 pH를 가지게 되며, 철근 표면에 부동태피막을 생성시켜 부식으로부터 철근을 보호한다(Ishida et al. 2003). 그러나 외부로부터 유입된 이산화탄소로 인해, 생성된 수산화칼슘은 탄산칼슘으로 변화하는데 이러한 반응을 탄산화라 하며 탄산화 영역에서는 10.0이하로 pH는 감소하게 된다. 식 (10)에서는 탄산화 반응을 나타내고 있으며, 이 반응을 Fig. 2에서 도시하였다(Izumi et al. 1986).



### 2.2.2 탄산화에 따른 CO<sub>2</sub> 흡착 평가

CO<sub>2</sub>포집 및 저장기술은 콘크리트 산업보다 화력 플랜트 및 발전 플랜트 관련 기술에서 적극적으로 활용되고 있다. 주로 CO<sub>2</sub>대량발생원으로부터 포집, 압축, 수송, 저장, 전환 과정을 거치면서 저장하게 되는데(Seo et al. 2002; Shim et al. 2008; Park 2012), 물리적인 방법과 화학적 방법을 동시에 이용한다.

본 연구에서는 탄산화 반응에 따른 CO<sub>2</sub>포집량을 산정하는데, 본 연구에서는 식 (11)와 같은 탄산화깊이와 CO<sub>2</sub>포집량의 상관성을 사용하였다(Yang et al. 2013).

$$U_{CO_2}(t) = a_{CO_2}(t) \cdot A_{sf} \cdot x_c(t) \quad (g) \quad (11)$$

여기서,  $a_{CO_2}(t)$ 는 재령  $t$ 에서 탄산화에 의해 흡수 가능한 CO<sub>2</sub>양 ( $g/mm^3$ ),  $A_{sf}$ 는 CO<sub>2</sub>에 노출된 콘크리트 부재의 표면적( $mm^2$ ),  $x_c(t)$ 는 재령  $t$ 에서의 탄산화 깊이( $mm$ )를 나타낸다.

## 3. 보수시기 및 보수기간에 따른 LCCO<sub>2</sub> 평가

### 3.1 기존 구조물의 LCCO<sub>2</sub> 평가

탄산화에 노출된 지하구조물의 LCCO<sub>2</sub>를 평가하기 위해 기존의 탄산화 해석결과를 인용하였다(Kim et al. 2014). 기존의 연구에서

는 초기재령 거동 모델링을 이용한 이산화탄소 확산계수, 대상구조물의 노출환경을 고려한 온도의존성을 고려하였으며, CEB에서 제안하고 있는 탄산화 평가식을 사용하였는데, 이는 식 (12)와 같다 (CEB, 1997).

$$d_c = \sqrt{2k_1k_2k_3\Delta c} \times \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{a}t} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \quad (12)$$

여기서,  $d_c$ 는 탄산화 깊이(mm),  $k_1$ 는 국부적인 지역에 대한 상수,  $k_2$ 는 양생에 대한 상수,  $k_3$ 는 국부적인 물-시멘트비에 대한 상수,  $\Delta c$ 는 이산화탄소 농도(kg/m<sup>3</sup>),  $D_{CO_2}$ 는 이산화탄소 확산계수(m<sup>2</sup>/s)이다.  $a$ 는 이산화탄소 반응률,  $n$ 은 건조습윤반복에 대한 상수,  $t_0$ 는 기준시간(보통 1년),  $t$ 는 존치시간을 나타낸다.

식 (13)의  $a$ 는 탄산화가 가능한 수화물량으로서,  $C$ 는 단위시멘트 트랑(kg/m<sup>3</sup>),  $CaO$ 는 바인더내의  $CaO$ 의 혼입량(%)으로서 0.65,  $\alpha_H$ 는 수화도,  $M$ 은 각각 CO<sub>2</sub>와 CaO의 몰중량을 나타낸다.

Table 1. Exposure conditions for underground structure

Average temperature(°C)	Average R.H.(%)	Average CO <sub>2</sub> concentration (ppm: average)
21.3	54.3	599.4

Table 2. Mix proportions for the structure

W/B (%)	S/A (%)	Unit(kg/m <sup>3</sup> )						Air (%)	Slump (mm)
		C	W	S	G	AD(%)			
45.0	44.5	364	164	799	1011	0.85	0.12	5.3	140

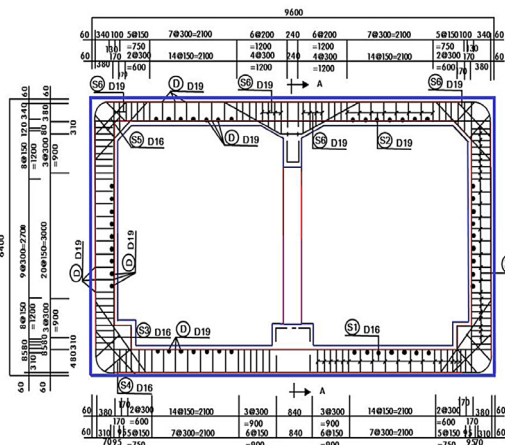


Fig. 3. RC underground structure for LCCO<sub>2</sub> evaluation

$$a = 0.75 \cdot C \cdot CaO \cdot \alpha_H \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (13)$$

대상구조물인 지하철 벽체구조의 노출환경은 Table 1과 같으며, 사용된 배합과 사용된 배합은 Table 2에 나타내었다. 대상구조물은 피복두께 44mm, 길이 974.4m를 가졌으며, 단면제원은 Fig. 3과 같다(Kwon 2016).

### 3.2 보수조건 및 횡수에 따른 LCCO<sub>2</sub> 평가

#### 3.2.1 LCCO<sub>2</sub> 해석조건

보수에 따른 확률적 LCCO<sub>2</sub>를 평가하기 위해, 기존의 문헌(Kwon 2016)과 같은 해석조건을 인용하였다. 대상구조물은 1200ppm과 같이 높은 CO<sub>2</sub>환경의 노출은 가정하였으며, 시공 및 해체에 따른 탄소량을 제외한 순수 보수에 따른 탄소량만 평가하도록 한다. Table 3에서는 보수에 따른 확률론적 LCCO<sub>2</sub>평가를 위한 조건을 정리하였다. Fig. 4에서는 CO<sub>2</sub>의 흡착을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 보수에 따른 LCCO<sub>2</sub>를 나타내었다. 모두 결정론적 방법에 의한 것으로 보수시점이 될 경우, 피복두께를 동일 배합으로 치환한 경우를 가정하여 나타낸 것이다.

Table 1의 조건을 Fig. 4에 도입하여 확률론적 LCCO<sub>2</sub>를 평가하면 Fig. 5와 같이 연속적인 함수를 구현할 수 있다.

LCCO<sub>2</sub> 평가시 확률론적인 방법을 고려하면, 연속적으로 보수

Table 3. Simulation conditions for probability-based LCCO<sub>2</sub> evaluation

$T_1$	$T_i$	Initial LCCO <sub>2</sub> (ton)	LCCO <sub>2</sub> for repairing (ton)	Service life	COV	
					$T_1$	$T_i$
68	68	7562	486.6	200	0.20	0.20

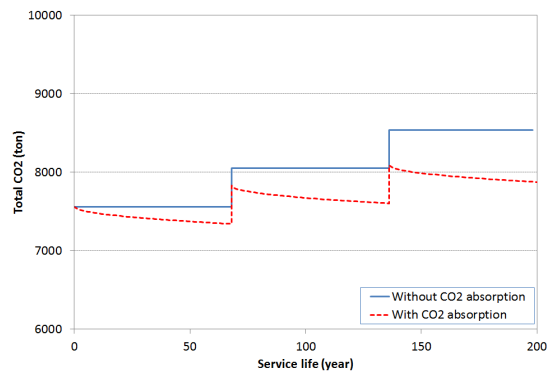


Fig. 4. LCCO<sub>2</sub> evaluation with and without CO<sub>2</sub> absorption

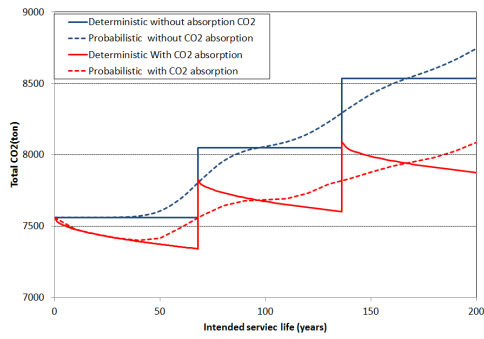


Fig. 5. Comparison of LCCO<sub>2</sub> with deterministic and probabilistic technique

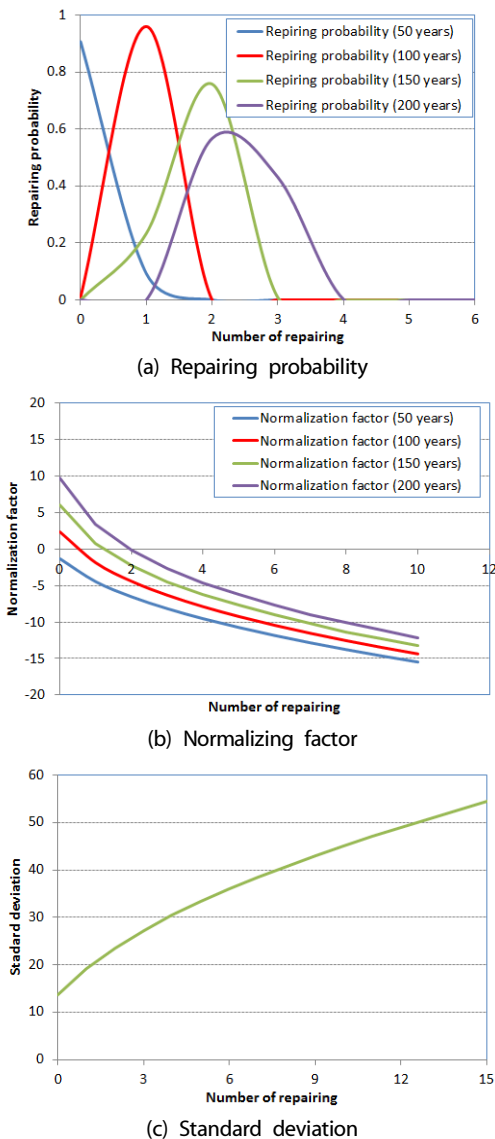


Fig. 6. Changes of repairing probability, normalizing factor, and standard deviation with extension of service life

시기에 따른 탄소량을 평가할 수 있으므로 68년~90년 또는 136년~158년 사이에서는 확률론적인 방법이 결정론적 방법보다 감소된 탄소량을 평가하고 있음을 알 수 있다.

50년, 100, 150년, 200년으로 공용연수가 증가함에 따라 변화하는 대표적인 보수횟수의 확률, 표준화 지수, 표준편차의 변화는 Fig. 6(a)~(c)에 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 보수횟수의 확률은 목표내구수명, 즉 사용하려는 공용수명이 증가할수록 평균이 0회에서 2.1회 정도로 증가하는 것으로 알 수 있으며, 이에 따라 표준화지수( $\beta_i$ ) 및 표준편차도 증가하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2.2 설계변수의 변화에 따른 LCCO<sub>2</sub>의 특성 분석

#### (1) Maintenance free period의 증가에 따른 LCCO<sub>2</sub> 평가

본 절에서는 Table 3의 해석결과를 기본으로 하여  $T_1$ 의 시점이 0.5배, 1배, 2배로 변화할 경우 탄소량 변화를 분석하도록 한다. Fig. 7에서는 해석결과를 나타내고 있는데, 초기  $T_1$ 의 증가는 매우 CO<sub>2</sub>감소에 매우 효과적인 것으로 평가되었다.  $T_1$ 의 증가는 정해진 목표내구수명 동안 보수횟수를 줄일 수 있을 뿐 아니라, CO<sub>2</sub>흡착을 초기부터 지속적으로 유지할 수 있기 때문이다. 200년 경과 후 발생된 탄소량은  $T_1$ 이 34년일 때, 8355.4ton, 68년일 때, 8087.1ton, 그리고 136년일 때, 7603.7 ton으로 크게 감소하고 있음을 알 수 있다.  $T_1$ 이 136년으로 증가할 때는 시공 초기 탄소발생량보다 오직 41.7ton 만 증가함을 알 수 있다.

#### (2) 보수재의 변동성의 영향에 따른 LCCO<sub>2</sub> 평가

본 절에서는 변동계수가 0.1, 0.2, 0.4인 경우로 분류하여 보수에 따른 LCCO<sub>2</sub>를 평가하였다. 변동계수가 작을수록 결정론적인 방법의 해석결과와 비슷해지는데, 이는 확률분포의 변동성보다는 평균에 대한 의존도가 커지기 때문이다. 변동계수가 클 경우(0.4)

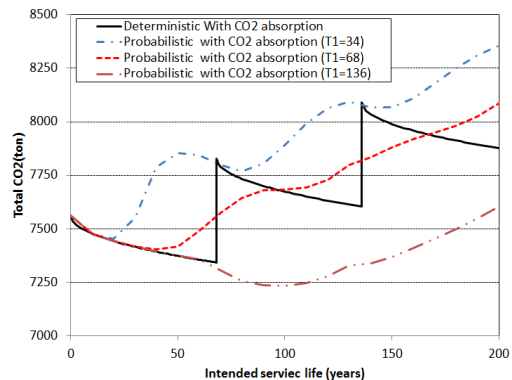


Fig. 7. LCCO<sub>2</sub> variation with extension of maintenance free period

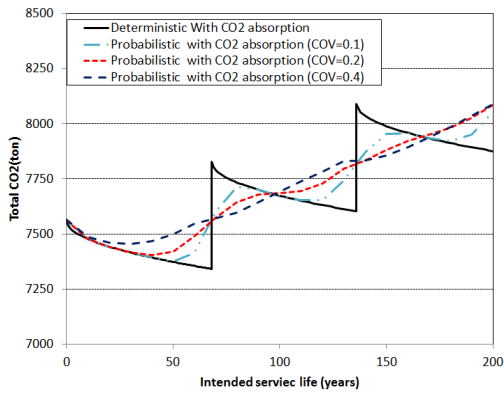


Fig. 8. LCCO<sub>2</sub> variation with changing COV(coefficient of variation)

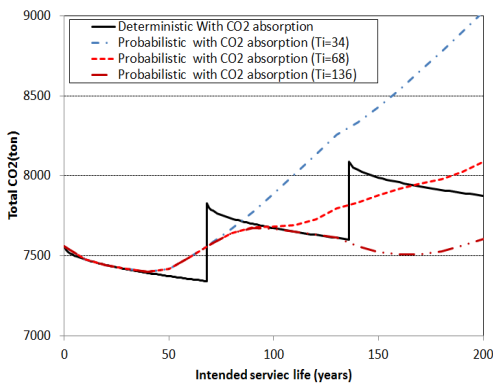


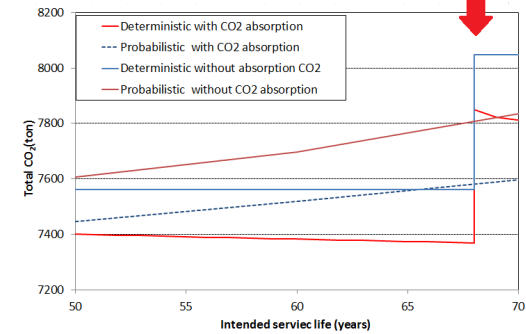
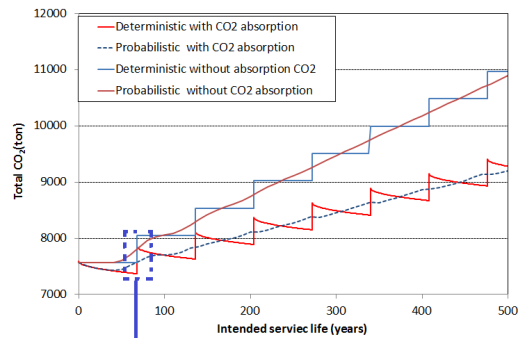
Fig. 9. LCCO<sub>2</sub> variation with extension of service life due to repair

는 단순 증가하는 함수와 비슷한 형태로 변화한다. Fig. 8에서는 COV의 변화에 따른 LCCO<sub>2</sub>의 변화를 나타내고 있는데, 정확한 LCCO<sub>2</sub>의 평가를 위해서는 실험 또는 해석을 통하여 등을 통하여 보수재의 내구수명과 표준편차를 정의할 필요가 있다.

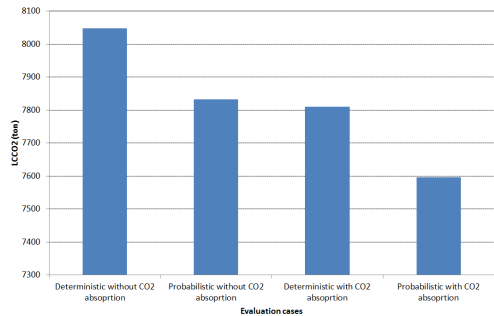
**(3) 보수재의 보수기간의 증가에 따른 LCCO<sub>2</sub>평가**

보수재를 통한 내구수명 연장은 LCCO<sub>2</sub> 평가에 지배적인 영향 인자이다. 본 절에서는  $T_1$ 은 68년으로 동일하게 가정하고  $T_i$ (보수에 의한 연장 수명)를 34년, 68년, 136년으로 가정하여 해석을 수행하였다. Fig. 9에서는 LCCO<sub>2</sub>평가 결과를 나타내고 있다.

$T_1$ 의 평균값인 68년까지는 보수가 시행되지 않으므로 동일한 해석결과가 발생하지만, 68년 이후, 즉 첫 번째 보수시기가 정해진 이후에는 큰 차이가 발생한다. 보수비의 산정과는 다르게, LCCO<sub>2</sub> 평가는 보수로 인해 확보되는 시간(보수재의 내구수명)이 증가할수록 흡착에 대한 CO<sub>2</sub>값이 커지므로 매우 효과적인 CO<sub>2</sub>저감방법이 될 수 있다. 200년 경과시, 보수재의 내구수명이 34년인 경우



(a) Changes in LCCO<sub>2</sub> with service life



(b) LCCO<sub>2</sub> evaluation at 70years of intended service life

Fig. 10. LCCO<sub>2</sub> variation with extension of intended service life

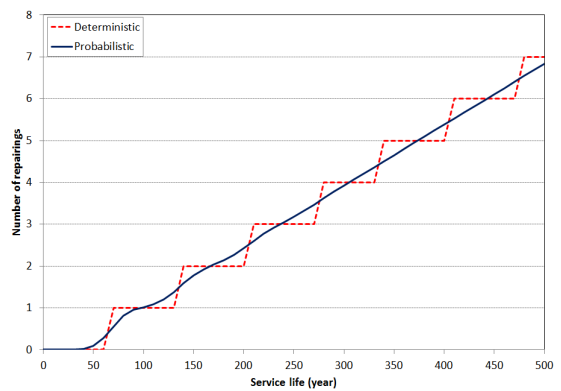


Fig. 11. Changes in number of repairing timings with extension of service life

9028ton에서 보수재의 내구수명이 4배로 증가한 136년일 경우 7603.7ton으로 크게 탄소량이 감소하였다. 이는 두 번째 보수시기가 도래할 확률이 매우 작으므로 꾸준히 CO<sub>2</sub>흡착만 발생하기 때문이다.

#### (4) 목표내구수명의 증가에 따른 보수 LCCO<sub>2</sub> 평가

본 절에서는 목표내구수명의 증가에 따른 보수 LCCO<sub>2</sub>평가를 수행하도록 하는데, 최대 500년까지 증가시키면서 LCCO<sub>2</sub>값의 변화를 분석하였다. 목표 내구수명이 증가할수록 LCCO<sub>2</sub>값의 차이는 방법론에 따라 큰 차이를 나타내었으며, 금리가 고정될 경우 일정한 패턴을 가지고 반복하게 된다. 연장된  $T_i$ 의 40% 시점까지는 확률론적인 방법을 선택할 경우, 연속적인 탄소량 식과 계단식 차이의 면적만큼 탄소량을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 예를 들어 목표내구수명을 70년으로 가정하고 CO<sub>2</sub>흡착을 고려하지 않은 경우에 대해서는 결정론적 방법은 8048ton, 확률론적 방법은 7833ton으로 평가되었다. CO<sub>2</sub>흡착을 고려하면 탄소량은 크게 감소하는데, 결정론적 방법은 7811ton, 확률론적 방법은 7597ton으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

목표내구수명 70년일 경우의 탄소량 변화를 Fig. 10에 나타내었으며, 500년 목표내구수명의 연장에 따라 확률론적 및 결정론적 방법에 따른 보수횟수의 변화를 Fig. 11에 도시하였다.

## 4. 결론

1. 탄산화에 노출된 지하구조물을 대상으로 결정론적 및 확률론적 방법을 이용하여 보수횟수 및 이에 따른 LCCO<sub>2</sub>를 분석하였다. LCCO<sub>2</sub> 평가 시 확률론적인 방법을 고려하면, 연속적으로 보수 시기에 따른 탄소량을 평가할 수 있으므로 일정한 구간에서 발생하는 소량을 감축시킬 수 있다.
2. 초기 내구수명의 증가는 정해진 목표내구수명 동안 보수횟수를 줄일 수 있을 뿐 아니라, CO<sub>2</sub>흡착을 초기부터 지속적으로 유지할 수 있으므로 탄소 저감에 매우 효과적이다. 200년 경과 후 발생된 탄소량은 초기 내구수명(Maintenance free period)이 34년일 때, 8355.4ton, 68년일 때, 8087.1ton, 그리고 136년일 때, 7603.7ton으로 크게 감소하고 있다.
3. 보수로 인해 확보되는 시간(보수재의 내구수명)이 증가할수록 CO<sub>2</sub>가 흡착되는 기간이 증가하고 양이 증가하므로 효과적인 CO<sub>2</sub>저감 방법이 될 수 있다. 200년 경과 시, 보수재의 내구수명이 34년인 경우 9028ton에서 보수재의 내구수명이 4배로 증가한 136년일 경우 크게 7603.7ton으로 감소하였다. 이는 두 번째 보수시기가 도래할 확률이 매우 작으므로 꾸준히 CO<sub>2</sub>흡착만

발생하기 때문이다.

4. 확률론적인 보수시기 및 LCCO<sub>2</sub>평가기법을 배경으로 시공초기의 내구수명 및 보수재의 내구수명의 변동성이 DB화 되어 정량적으로 평가된다면, 제안된 유지관리 기법은 보수횟수를 줄일 수 있으며 이에 따라 탄소량 저감에도 효과적으로 적용할 수 있는 기법임을 수치적으로 검증하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다.(No. 2015R1A5-A1037548).

## References

- American Concrete Institute Committee-201 (2008), Guide to Durable Concrete; ACI 201R-08; American Concrete Institute (ACI): Detroit, MI, USA.
- Broomfield, J.P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
- CEB. (1997). New Approach to Durability Design, 51-55.
- European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structure; EN-1992-1-1; European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Gajda, J. (2001). Absorption of Atmospheric Carbon Dioxide by Portland Cement, PCA, R&D, Chicago, USA.
- Ishida, T., Maekawa, K. (2000). Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory, Concrete Library of JSCE, **2000(37)**, 203-215.
- Ishida, T., Maekawa, K. (2003). "Modeling of durability performance of cementitious materials and structures based on thermohygro physics," In RILEM Proc-PRO29, Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, Paris, France, 13-14 May 2003; Naus, D.J., Ed.; RILEM Publications: Paris, France, **1**, 39-49.
- Izumi, I., Kita, D., Maeda, H. (1986). Carbonation, Kibodang Publication.
- Japan Society of Civil Engineering. (2007). Standard Specification for Concrete Structures—Design; JSCE Guidelines for Concrete

- 15; Japan Society of Civil Engineering (JSCE): Tokyo, Japan.
- Kim, S.J., Mun, J.M., Lee, H.S., Kwon, S.J. (2014) CO<sub>2</sub> emission and storage evaluation of RC underground structure under carbonation considering service life and mix conditions with fly ash, *Journal of The Korea Contents Association*, **14(12)**, 999–1009.
- Kwon, S.J. (2016). Effect of mineral admixture on CO<sub>2</sub> emissions and absorption in relation to service life and varying CO<sub>2</sub> concentrations, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, **7(3–4)**, 1–9.
- Kwon, S.J., Lee, B.J., Kim, Y.Y. (2014). Concrete mix design for service life of RC structure under carbonation using genetic algorithm, *Advance in Materials Science and Engineering*, **2014(2014)**, 1–13.
- Lee, H.K., Kim, H.K., Hwang, E.A. (2010). Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber reinforced cellular concrete, *Waste Manage*, **30**, 274–284.
- Lee, S.H., Park, W.J., Lee, H.S. (2013). Lifecycle CO<sub>2</sub> assessment method for concrete using CO<sub>2</sub> balance and suggestion to decrease LCCO<sub>2</sub> of concrete in South-Korean apartment, *Energy and Buildings*, **58**, 93–102.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2009). *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete* Taylor & Francis, London, UK, 1–645.
- Pade, C., Guimaraes M. (2007). The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective, *Cement and Concrete Research*, **37(9)**, 1348–1356.
- Park, H.J. (2012). Carbon Dioxide Can Be Captured and Stored in Concrete by CO<sub>2</sub> Philic Sorbents, Masters Thesis, Hanyang University.
- Sadegh, P.A., Chan, D., Ali, K. (2015). Corrosion protection of the reinforcing steels in chloride-laden concrete environment through epoxy/polyaniline-camphorsulfonate, *Corrosion Science*, **90**, 239–247.
- Seo, C.H., Lee, H.S. (2002). Mechanism and Effect Factors of Carbonation in Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Proceeding of Korea Concrete Institute, Research Committee Report, 3–12.
- Shim, J.G., Kim, J.H., Jang, K.R. (2008). Absorption characteristics of aqueous sodium glycinate solution with carbon dioxide and its mechanistic analysis, *Jornal of Korean Society of Environmental Engineers*, **30(4)**, 430–438.
- Tae, S.H., Park, J.H., Kim, T.H. (2011). A development on the optimal design evaluation system of CO<sub>2</sub> emission and economical efficiency in the life cycle of concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **23(6)**, 43–47.
- Thomas, M.D.A., Bentz, E.C. (2002). Computer Program for Predicting The Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, *Life365 Manual*, SFA.
- TOTAL-LCC. (2010). Technical Manual, Ver.1.1.
- Yang, K.H., Seo, E.A., Tae, S.H. (1997). Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake of concrete, *Environmental Impact Assessment Review*, **46(4)**, 43–52.
- Yang, K.H., Song, J.K., Song, K.I. (2013). Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete, *Journal of Cleaner Production*, **39(1)**, 265–272.

**탄산화에 노출된 지하구조물의 보수횟수에 따른 LCCO<sub>2</sub> 평가**

콘크리트 구조물은 목표내구수명동안 초기의 시공에 따른 내구수명과 보수를 통한 내구수명 확보를 통하여 성능을 유지한다. 결정론적인 방법에서는 내구한계에 이르면 보수횟수에 따라서 경비 및 탄소량이 계단식으로 증가하지만, 확률론적인 방법을 이용할 경우, 보수 경비와 탄소량을 연속적으로 도출할 수 있으며, CO<sub>2</sub>의 흡착을 고려할 경우, 더욱 탄소량을 감축시킬 수 있다. 본 연구에서는 탄산화에 노출된 지하구조물에 대하여 결정론 및 확률론적인 방법을 배경으로 보수시기와 사용기간에 따른 흡착/발생 CO<sub>2</sub>량을 평가하였다. 탄산화 깊이에 따른 CO<sub>2</sub>흡착을 고려한 해석은 초기시공 및 보수재의 내구수명의 증가에 따라 탄소저감에 매우 효과적임을 나타내었다. 또한 초기 시공재료 및 보수재의 내구수명 변동성을 정의할 수 있다면, 확률론적 기법에서는 보수횟수를 감소시킬 수 있으므로 경비 및 CO<sub>2</sub>저감에 효과적인 기법이 될 수 있다.