

## 탄산화에 노출된 철근콘크리트 구조물의 로그 및 정규 수명분포를 고려한 보수비용 해석

# Repair Cost Analysis for RC Structure Exposed to Carbonation Considering Log and Normal Distributions of Life Time

우상인<sup>1</sup> · 권성준<sup>1\*</sup>

Sang-In Woo<sup>1</sup> · Seung-Jun Kwon<sup>1\*</sup>

(Received August 1, 2018 / Revised September 17, 2018 / Accepted September 17, 2018)

Many researches have been carried out on carbonation, a representative deterioration in underground structure. The carbonation of RC (Reinforced Concrete) structure can cause steel corrosion through pH drop in concrete pore water. However extension of service life in RC structures can be obtained through simple surface protection. Unlike the conventional deterministic maintenance technique, probabilistic technique can consider a variation of service life but it deals with only normal distributions. In the work, life time-probability distributions considering not only normal but also log distributions are induced, and repair cost estimation technique is proposed based on the induced model. The proposed technique can evaluate the repair cost through probabilistic manner regardless of normal or log distribution from initial service life and extended service life with repair. When the extended service life through repair has log distribution, repair cost is effectively reduced. The more reasonable maintenance strategy can be set up though actual determination of life-probability distribution based on long term tests and field investigations.

**키워드** : 탄산화, 확률론적 유지관리기법, 로그분포, 정규분포, 보수비용

**Keywords** : Carbonation, Probabilistic maintenance technique, Log distribution, Normal distribution, Repair cost

## 1. 서론

높은 이산화탄소에 노출된 콘크리트 구조물은 사용기간의 증가에 따라 탄산화 깊이가 증가하고, 이로 인해 내부의 철근은 부식에 노출된다. 콘크리트는 탄산화가 진행함에 따라 중량의 증가, 공극률의 감소 및 강도 개선 등의 공학적인 장점이 있으나, 탄산화 영역에서는 pH가 10.5 이하가 되어 매립된 철근의 부식이 발생하기 쉽다(Song and Kwon 2007; Papadakis et al. 1991; Kwon et al. 2014). 현재 각국의 시방서나 지침 등에서도 염해와 마찬가지로 탄산화에 대한 내구성 설계와 유지관리를 하고 있으며, 보수재료와 피복두께의 설정은 유지관리시 중요한 인자로 요구되고 있다(JSCE 2007; CEN 2000).

탄산화에 대한 내구한계 상태 또는 유지관리 한계 상태는 사용기간에 따라 증가하는 탄산화 깊이가 피복두께에 이르는 상태로

정의하고 있다. 내구설계에 대해서는 정량적인 해석을 통한 결정론적인 평가방법뿐 아니라 확률론적인 방법도 적용되고 있으며, 피복두께와 탄산화 속도를 확률변수로 하여 목표내구수명동안 목표파괴확률에 이르지 않도록 제안하고 있다(Stewart and Mullard 2007; Na et al. 2012; Kim et al. 2014; Kwon and Na 2011).

유지관리 기법은 일반적으로 LCC(Life Cycle Cost) 평가를 포함하고 주로 결정론적인 방법이 사용되고 있다. 이러한 방법은 목표내구수명 내에서 보수재를 통해 연장된 내구수명을 단계적(Step-Function)으로 고려하는 것으로 사용기간과 이율 등의 단순한 계단식 결과를 제공한다.

최근 들어 확률론적인 유지관리 기법에 제공되고 있는데, 크게 두 가지 방법으로 분류할 수 있다. 하나는 보수비용과 각 해석 인자의 상관성을 확률적으로 고려한 모델인데, 이러한 모델에서는 열화현상을 공학적으로 모델링 하지 못하는 단점이 있다

\* Corresponding author E-mail: [jjuni98@hannam.ac.kr](mailto:jjuni98@hannam.ac.kr)

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

(Mulubrhan et al, 2014; Nasir et al, 2015; Rahman and Vanier 2004; Salem et al, 2003), 일부 해석모델에서는 NN(Neural Network) 등이 사용되기는 하지만, 열화현상 모델링을 다루지 못하며 각 변수간의 연결성을 다양한 확률변동성으로 고려하는 개념이다. 나머지는 열화모델을 기반으로 한 확률론적 유지관리 기법인데, 이러한 기법은 초기에 시공후의 내구수명과 보수에 따라 연장되는 내구수명을 확률변수로 가정하여 목표내구수명의 증가에 따라 확률론적으로 보수비용을 평가한다(TOTAL-LCC 2010). 이러한 연구는 탄산화 뿐 아니라 염해에 따른 보수비용 평가(Kwon 2017a), 확률 변동성 영향인자의 수명과 보수비에 따른 민감도 분석(Lee and Kwon 2018; Kwon 2017b), 이산화탄소 흡착량의 확률론적 평가(Jung et al, 2017) 등으로 발전하였다. 그러나 이러한 해석 기법의 큰 단점은 정규분포를 가진 내구수명만이 고려되고 있는 것이다. 실제로 내구수명에 미치는 열화인자에서는 로그분포, Gamma 분포 등 실험 또는 장기폭로 결과에 근거한 확률형태가 사용된다(Stewart and Mullard 2007; Gjory 1994; DuraCrete 2000).

본 연구에서는 기존의 정규분포확률만 고려되었던 수명-확률 분포식을 로그분포까지 고려할 수 있는 유지관리식을 제안하였다. 이를 위해 위치계수(scale parameter:  $\mu$ ) 및 형상계수(shape parameter:  $\sigma$ )를 도입하였으며, 하나의 수명축에 대하여 여러 개의 수명-확률 분포식을 도시화하였다. 본 연구에서는 MFP (Maintenance Free Period)와 로그분포 및 정규분포를 가진 수명-확률분포식이 보수비용에 미치는 영향에 대한 분석이 정량적으로 수행될 것이다.

## 2. 서로 다른 확률분포를 재료의 최적 보수시기

### 2.1 정규분포함수를 가진 수명함수의 유지관리기법

#### 2.1.1 보수기간이 목표내구수명보다 클 경우

기존의 확률론적 유지관리 연구에서는 MFP ( $T_1$ ),  $N$  회차의 보수시기 ( $T_N$ ), 그리고 연장된 수명의 변동성 (COV: Coefficient of Variation)을 고려하여 보수비용을 평가하였다(TOTAL-LCC 2010; Kwon 2017a; Lee and Kwon 2018; Kwon 2017b; Jung et al, 2017). MFP가 목표 내구수명보다 클 경우에는 보수를 필요로 하지 않으므로 식(1)과 같이 내구적 파괴확률이 구성된다 (TOTAL-LCC, 2010).

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

여기서,  $P_1$ 은 1회차의 내구적 파괴확률,  $\beta_1$ 은 1회차에 대한 정규화 상수(신뢰도 지수)로  $(T_1 - \bar{T}_1)/\sigma_1$ 으로 구성된다.  $T_1$ 과  $\bar{T}_1$ 은 1회차 보수시기와 이에 대한 평균값을 나타낸다.

#### 2.1.2 보수횟수가 1회 이상이 되는 경우

보수횟수가 1회가 되는 경우는 1회의 보수시기  $T_1$ 이 목표내구수명 ( $T_{end}$ )보다 작고 1회차 보수시기  $T_1$ 과 2회차 보수시기  $T_2$ 의 합이 목표내구수명보다 클 경우이다. 이는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, 신뢰도 지수는 식(2)와 같이 구성된다(TOTAL-LCC 2010; Lee and Kwon 2018).

$$\beta_2 = \frac{[T_1 + T_2 - (\bar{T}_1 + \bar{T}_2)]}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_i$ 는  $\bar{T}_i$ 의 표준편차이다.

또한 Fig. 1에서의  $P_2^*$ 는 식(3)와 같이 나타낼 수 있다 (TOTAL-LCC 2010; Kwon 2017a).

$$P_2^* = 1 - \int_{-\infty}^{\beta_2} f(\beta) d\beta = \int_{\beta_2}^{\infty} f(\beta) d\beta \quad (3)$$

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

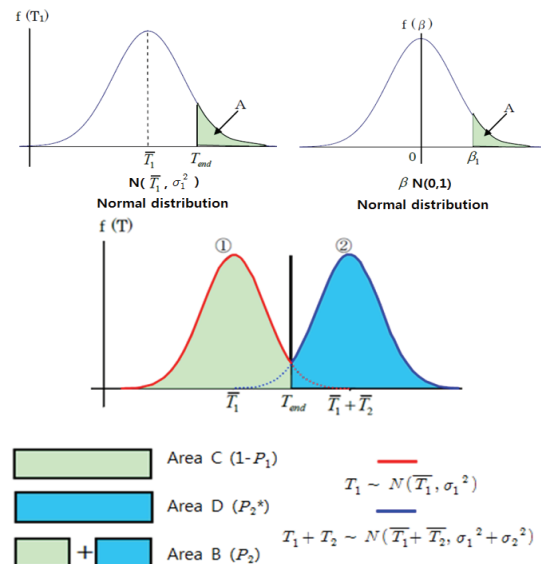


Fig. 1. Schematic diagram for probability-based repair timing evaluation(TOTAL-LCC 2010)

또한  $P_i$ 와  $P_i^*$ 는 같은 시간상에 이전의 확률  $P_{i-1}$ 을 이용하여 구현될 수 있으며 보수횟수의 증가에 따라 식(4) 및 식(5)와 같이 목표내구수명과의 관계를 정리할 수 있다. 또한 이를 일반화 시킬 경우, 보수횟수  $n$ 회 시의 확률  $P_n$ 은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_1^* = P(T_1 > T_{end}) \tag{4a}$$

$$P_1 = P_1^* \tag{4b}$$

$$P_2^* = P(T_1 + T_2 > T_{end}) \tag{5a}$$

$$P_2 = (1 - P_1)P_2^* \tag{5b}$$

.....

$$P_n = \left(1 - \sum_{k=1}^{n-1} P_k\right) \times P_n^* \tag{6}$$

또한 1회의 보수비가  $C$ 로 일정하다고 가정할 경우, 총 보수비 ( $C_{total}$ )은 식(7)과 같이 정식화 할 수 있다 (TOTAL-LCC 2010; Kwon 2017a; Lee and Kwon 2018).

$$C_{total} = \sum_{k=1}^n (k CP_k) \tag{7}$$

## 2.2 로그정규분포를 가진 수명함수의 유지관리기법

2.1절에서는 정규분포 가진 수명함수를 조합하여 확률론적 유

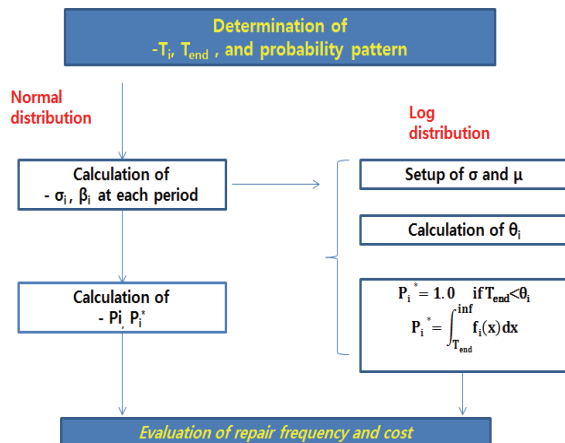


Fig. 2. Flowchart for repair cost analysis using life-probabilistic distributions

지관리 기법을 정리하였다. 본 연구에서는 정규분포 이외에 추가로 로그정규분포를 적용하였는데, O'connor와 Kleyner의 이론을 차용하였다. 본 연구에서 사용한 로그정규분포의 확률밀도함수 ( $f(t)$ )는 식(8)과 같이 나타내었다.

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t-t_0)} \exp\left[-\frac{(\ln(t-t_0)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \tag{8}$$

여기서  $\mu$ 와  $\sigma$ 는 로그정규분포의 형상과 위치를 결정하는 매개계수로, 각각  $\ln(t-t_0)$  분포의 평균과 표준편차를 의미하며,  $t_0$ 는  $t$ 의 최소값을 의미한다. 정규분포는 무한소부터 무한대까지 정의되는 반면, 로그함수가 음수값을 인자로 정의할 수 없으므로 위 로그정규분포는  $t_0$ 부터 무한대까지 정의된다.  $i$  번째 보수시점인  $T_i$ 를 고려하고 그 시작시점을  $\theta_i$ 로 정의할 경우 할 경우, 두 변수와의 관계는 식(9)과 같이 정의할 수 있다.

$$\theta_i = T_i + \exp(\mu) \tag{9}$$

정규분포와는 달리, 로그정규분포의 누적확률을 해석적으로 산정하는 것은 쉽지 않으므로 누적확률을 수치적으로 근사화 하였다. Fig. 2에서는 로그와 정규분포를 고려할 수 있는 확률론적 유지관리 비용 산출 절차를 나타내고 있다.

## 3. 수명-확률분포에 따른 보수비용 Simulation

### 3.1 탄산화 해석 및 보수비용 평가조건

본 연구에서 탄산화 깊이 평가에 대한 내용은 기존의 결과를 인용하도록 한다(Kim et al. 2014). 600ppm 이산화탄소 농도에 노출된 지하구조물은 w/c 0.45와 피복두께 44mm를 가지고 있으며, 초기 내구수명(MFP)은 탄산화 깊이와 피복두께가 같아지는 시점으로 68년에 해당하였다. 객관적 보수비용 평가를 위하여 준공이후 1회 보수시 소요되는 보수비를 이자율이 없는 100으로 고려하였으며, 정규 및 로그분포를 가진 내구수명 분포를 가정하였

Table 1. Simulation conditions for repair cost

Case	Probabilistic parameters	$T_{end}$
$T_i=68$	$\sigma: 13.6, \mu: 68$ for normal distributions	200
$T_i=40$	$\sigma: 1.0\sim 4.0$ $\mu: 1.0\sim 4.0$ for log normal distributions	

다. 해석조건은 Table 10에 나타내었다.

### 3.2 서로 다른 확률분포를 가진 보수비용 평가

#### 3.2.1 초기 내구수명이 로그분포를 가질 경우

본 절에서는 초기 내구수명, 즉 콘크리트 타설로 인한 내구수명 평균( $T_1$ )이 68년이고 로그분포를 가지며, 보수재를 사용하여 연장된 수명( $T_i$ )이 정규분포를 가질 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 3에서는 250년 동안 변화하는 수명-확률분포 구성을 나타내었는데,  $T_1$ 은 로그분포를, 보수에 따른  $T_i$ 는 정규분포를 가지는 경우에 대하여 도시한 것이다.

목표내구수명( $T_{end}$ )이 200년 일 경우 시간의 경과에 따른 보수비용을 결정론적 방법, 모두 정규분포를 가정한 경우, 초기 내구수명만 로그확률분포인 경우로 분류하여 Fig. 4에 나타내었다.

기존의 연구와 동일하게(TOTAL-LCC 2010; Kwon 2017a; Lee and Kwon 2018), 결정론적인 방법은 내구수명 또는 연장된 내구수명이 도래할 때, 계단형(Step-Function)을 가지게 되지만, 확률론적

인 보수비용을 고려하면 연속적인 보수비용 함수식을 가지게 된다. 특히 초기 내구수명( $T_1$ )이 로그함수를 가질 경우,  $\theta$ 가 60.6년(로그함수의 시작점)이 되기 전까지는 보수비가 들지 않으므로 60.6년 전까지는 보수비가 들지 않는다. 100년 이후 정규분포인 경우와 로그분포를 사용한 경우, 유지관리비 차이가 거의 없게 되는데, 이는 확률함수가 미치는 영역이 1차 보수시기인 108년에 가까워질수록 첫 번째 보수 확률분포가 지배적으로 작용하기 때문이다.

로그함수 분포에서  $\sigma$ 는 로그함수의 크기와 형태를 결정하는 매개 변수인데,  $\sigma$ 의 변화에 따라 200년간의 보수비용은 변화하게 된다. Fig. 5에서는  $\sigma$ 의 변화에 따른 확률분포의 변화를 나타내었으며, 이에 따른 보수비의 변화는 Fig. 6에 나타내었다.

$\sigma$ 가 증가하고 목표내구수명의 증가함에 따라 전체적인 보수비가 약간씩 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는  $\sigma$ 가 2.0을 초과하면서 확률분포가 초기( $T_1=68.0$ ) 이전에 집중되는 경향이 커지기 때문인데, 이는 1차 보수에 관여하는 확률의 영향이 작아짐을 의미한다.  $\sigma$ 가 1.0에서 4.0으로 증가함에 따라 200년 경과후의 보수비용은 393.2, 392.6, 368.4, 349.8, 346.7로 조금씩 감소하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2.2 보수연장 수명이 로그분포를 가질 경우

본 절에서는 시공 후 초기의 내구수명은 정규분포를 가지고 보

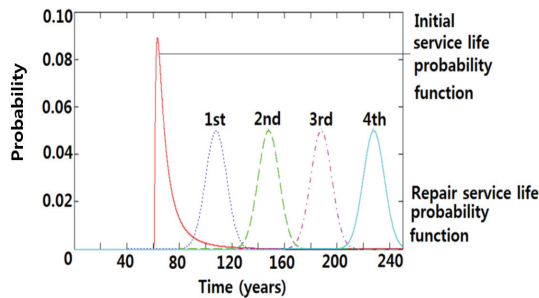


Fig. 3. Life-Probability function with intended service life (log and normal distributions)

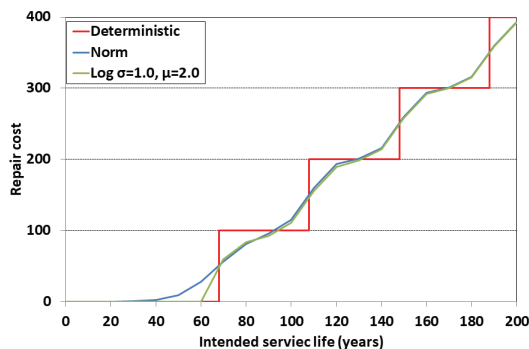


Fig. 4. Repair cost with deterministic, normal, and log distribution for 200 years

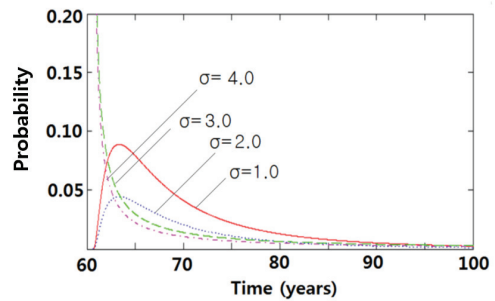


Fig. 5. Probability changes with parameter  $\sigma$

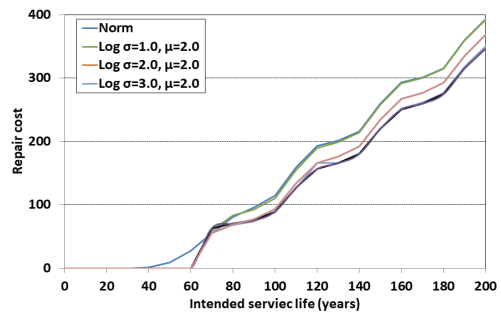


Fig. 6. Repair cost with deterministic, normal, and log distribution with varying  $\sigma$

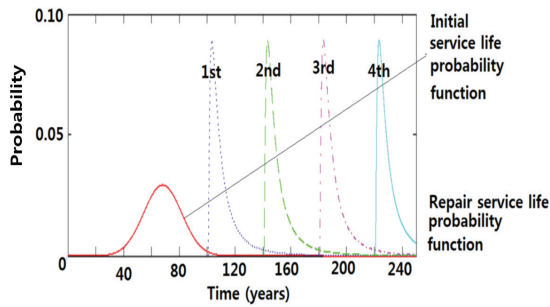


Fig. 7. Life-Probability function with intended service life (normal and log distributions)

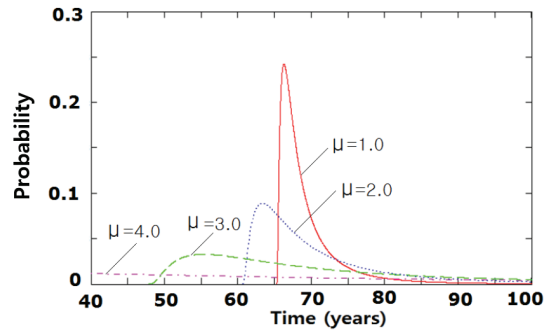


Fig. 9. Probability changes with parameter  $\mu$

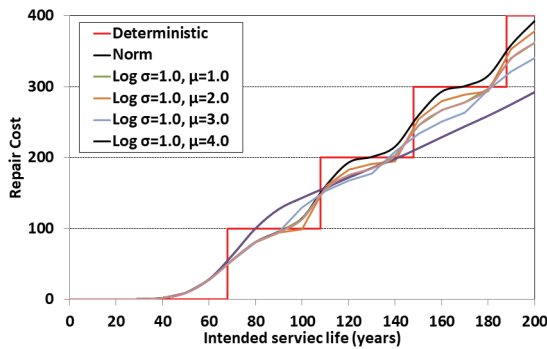


Fig. 8. Repair cost with deterministic, normal, and log distribution with varying  $\mu$

수를 통한 연장수명이 로그분포를 가지는 경우에 대하여 해석을 수행하도록 한다. 이 경우 정규분포에 대해서는 변동계수(COV) 0.2를 가지는 분포로 고정하였으며, 로그분포에 대해서는  $\sigma$ 는 1.0로,  $\mu$ 를 1.0~4.0로 변화시키면서 보수비용을 평가하였다.

Fig. 7에서는 시간축에 따른 수명-확률분포를 나타내고 있으며, Fig. 8에서는 목표내구수명에 이르는 동안의 보수비용의 변화를 나타내었다.

정규분포인 경우는 보수비가 393.6이였으나, 보수로 인한 연장된 수명이 로그분포함수를 가지고  $\mu$ 가 1.0에서 4.0으로 증가할수록 362.7, 378.6, 340.4, 292.7 수준으로 감소하였다. 결정론적 방법을 통해서 도출된 보수비는 400이였으며,  $\mu=4.0$ 인 경우, 최대 73.2% 수준으로 감소하였다.

보수로 인한 수명이 로그분포를 가질 경우 효과적으로 보수비가 감소되는데, 이는 정규분포값과 달리, 중앙값 이후 보수확률이 정규분포보다 감소하여 영향이 작아지기 때문이다.

$\mu$ 는 크기변수(scale parameter)로서 중앙값의 목표위치를 정의한다. 즉 사용된 표면보호재가 확보하는 내구수명값을 의미하며  $\mu$ 의 변화에 따른 수명-확률함수의 변화는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이  $\mu$ 값이 증가할수록 로그확률분포는 높

이가 낮아지며 넓은 분산을 가지게 되므로, 보수비가 보수시기의 평균인 108년, 148년, 188년에 도달하기 전시기에서 유지관리비 증가가 발생하게 된다. 확률론적인 해석을 수행할 경우, 결정론적인 방법에 비하여 연속적인 보수비용을 구현하면서도 합리적으로 총 보수비용을 감소시킬 수 있다. 또한 제안된 연구는 실험 또는 장기폭로를 통해 도출된 내구수명분포가 로그함수형태를 취해도 확률론적 보수비를 평가할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 결론

- 1) 본 연구에서는 기존의 정규분포함수만 고려되었던 수명-확률분포 해석에서 형상변수 및 위치변수를 고려하여 로그분포를 고려할 수 있는 수명-확률분포를 제안하였으며, 이를 이용한 보수비 산정기법을 개발하였다. 제안된 기법은 보수재 또는 초기 내구수명이 정규 또는 로그분포를 가질 경우 다양한 분포를 고려하여 보수비를 산정할 수 있는 장점이 있다.
- 2) 초기 내구수명이 로그분포를 가지고 보수에 따른 내구수명이 정규분포를 가질 경우, 확률론적 유지관리 기법을 통한 보수비의 평가는 정규-정규 분포와 큰 차이가 발생하지 않는다. 그러나 정규-로그 분포를 가진 경우, 평균값이후에 영향을 미치는 로그함수의 특성으로 인해 내구수명의 증가에 따라 큰 차이가 발생한다. 200년의 목표내구수명동안 결정론적인 방법에서는 400의 보수비가 발생하였으나, 정규분포인 경우는 393.6으로 감소하였으며, 보수시의 로그함수를 고려할 경우, 최대 73.2% 수준으로 감소하였다.
- 3) 보수재의 특성에 따라서 확보되는 수명확률 분포식은 정규분포 뿐 아니라 다른 분포를 가질 수 있다. 본 연구에서는 로그분포와 정규분포를 동시에 고려할 수 있는 보수비 산정

기법을 구축하였으며, 실험이나 실태조사를 통하여 연장된 수명확률분포의 정의가 가능할 경우, 더욱 합리적인 유지관리기법으로 발전할 수 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2015R1A5A1037548).

## References

- DuraCrete. (2000). Final Technical Report—Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures Document BE95–1347/R17, European Brite—Euram III, CUR, Netherlands.
- European Committee for Standardization (Comité Européen de Normalisation, CEN). (2000). Eurocode 1: Basis of Design and Actions on Structures, EN–1991(Comité Européen de Normalisation, CEN), Brussels, Belgium, 2000.
- Gjorv, O.E. (1994). Steel corrosion in concrete structures exposed to Norwegian marine environment, *Concrete International*, **16(4)**, 35–39.
- JSCE. (2007). Standard Specification for Concrete Structures—Materials and Construction; JSCE—Guidelines for Concrete 16, Japan Society of Civil Engineering (JSCE): Tokyo, Japan.
- Jung, S.H., Yang, H.M., Yang, K.H., Kwon, S.J. (2017). Maintenance for repaired RC column exposed to chloride attack based on probability distribution of service life, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **2018**, 1–9.
- 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)**, 1000–1009 [in Korean].
- Kwon, S.J. (2017a). Simulation on optimum repairing number of carbonated RC structure based on probabilistic approach, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(3)**, 230–238 [in Korean].
- Kwon, S.J. (2017b). Probability-based LCCO<sub>2</sub> Evaluation for underground structure with repairing timings exposed to carbonation, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **5(3)**, 239–246 [in Korean].
- Kwon, S.J., Lee, B.J., Kim, Y.Y. (2014). Concrete mix design for service life of RC structures under carbonation using genetic algorithm, *Advances in Materials Science and Engineering*, **2014**, 1–13.
- Kwon, S.J., Na, U.J. (2011). Prediction of durability for RC columns with crack and joint under carbonation based on probabilistic approach, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **5(1)**, 11–18.
- Lee, H.S., Kwon, S.J. (2018). Probabilistic analysis of repairing cost considering random variables of durability design parameters for chloride attack, *Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **22(1)**, 32–39 [in Korean].
- Mulubrhan, F., Mokhtar, A.A., Muhammad, M. (2014). Integrating reliability analysis in life cycle cost estimation of heat exchanger and pump, *Advanced Materials Research*, **903**, 408–413.
- Na, U.J., Kwon, S.J., Chaudhuri, S.R., Shinozuka, M. (2012). Stochastic model for service life prediction of RC structures exposed to carbonation using random field simulation, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **16(1)**, 133–143.
- Nasir, M., Chong, H.Y., Osman, S. (2015). Probabilistic life cycle cost model for repairable system, *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*, **78**, 1–8.
- Pack, S.W., Jung, M.S., Song, H.W., Kim, S.H., Ann, K.Y. (2010). Prediction of time dependent chloride transport in concrete structures exposed to a marine environment, *Cement Concrete Research*, **40(2)**, 302–312.
- Papadakis, V.G., Vayenas, C.G., Fardis, M.N. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, *ACI Materials Journal*, **88(2)**, 186–196.
- Rahman, S., Vanier, D.J. (2004). “Life cycle cost analysis as a decision support tool for managing municipal infrastructure,” *Proceedings of the CIB triennial, CIB 2004 Triennial Congress*, Ottawa, Canada, **2(1)**, 1–11.
- Salem, O., Abourizk, S., Ariaratnam, S. (2003). Risk-based life-cycle costing of infrastructure rehabilitation and construction alternatives, *Journal of Infrastructure Systems*, **9(1)**, 6–15.
- Song, H.W., Kwon, S.J. (2007). Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, **37(6)**, 909–915.
- Stewart, M.G., Mullard, J.A. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures, *Engineering Structures*, **29(7)**, 1457–1464.
- TOTAL–LCC. (2010). Technical Manual ver.1.1.

### 탄산화에 노출된 철근콘크리트 구조물의 로그 및 정규 수명분포를 고려한 보수비용 해석

지하구조물에 주로 발생하는 탄산화는 콘크리트 내부의 공극수의 pH감소에 따라 부식을 유발할 수 있으므로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 이산화탄소로부터 표면을 보호하는 간단한 표면 보수방법을 통하여 구조물의 내구수명의 연장이 가능하다. 기존의 결정론적 유지관리 기법과는 다르게, 확률론적 유지관리 기법에서는 내구수명의 변동성이 고려될 수 있으나 정규분포만 다루고 있다. 본 연구에서는 정규분포 이외에 로그분포를 고려할 수 있는 수명-확률분포를 유도하였으며, 이를 기초로 다양한 수명-확률분포 함수를 고려한 보수비 산정기법을 제안하였다. 제안된 기법은 초기의 내구수명 분포 또는 보수재를 통하여 연장된 내구수명 분포가 정규 또는 로그분포를 가질 경우 목표내구수명의 연장에 따라 확률론적 기법을 통하여 보수비를 평가할 수 있다. 보수를 통한 내구수명이 로그분포를 가질 경우 효과적으로 보수비를 감소시킬 수 있으며, 장기 실험 또는 실태조사를 통하여 내구수명 분포가 정의될 수 있다면 더욱 합리적인 유지관리 계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.