

염해-내구성 설계 변수에 변동성에 따른 확률론적 보수비용 산정 분석

이한승¹, 권성준^{2*}

Probabilistic Analysis of Repairing Cost Considering Random Variables of Durability Design Parameters for Chloride Attack

Han-Seung Lee¹, Seung-Jun Kwon^{2*}

Abstract: Repairing timing and the extended service life with repairing are very important for cost estimation during operation. Conventionally used model for repair cost shows a step-shaped cost elevation without consideration of variability of extended service life due to repairing. In the work, RC(Reinforced Concrete) Column is considered for probabilistic evaluation of repairing number and cost. Two mix proportions are prepared and chloride behavior is evaluated with quantitative exterior conditions. The repairing frequency and cost are investigated with varying service life and the extended service life with repairing which were derived from the chloride behavior analysis. The effect of COV(Coefficient of Variation) on repairing frequency is small but the 1st repairing timing is shown to be major parameter. The probabilistic model for repairing cost is capable of reducing the number of repairing with changing the intended service life unlike deterministic model of repairing cost since it can provide continuous repair cost with time.

Keywords: Probabilistic model for repairing cost, Repair frequency, Service life, Chloride attack, COV

1. 서 론

콘크리트 구조물의 장수명화가 중요해짐에 따라 내구성 문제와 이에 따른 유지관리의 중요성이 증가하고 있다. 해안가에 노출된 콘크리트 구조물은 염화물 이온의 침투에 노출되어 있으며, 콘크리트 내부로 침투된 이온은 철근부식을 촉진시킨다. 매립된 철근부식은 콘크리트 표면 미관의 손상으로 시작하지만, 균열 폭 발생과 같은 사용성의 저하로 진전되고 피복 콘크리트의 박락과 내하력의 저하로 진행되는 것이 일반적이다(AI-Amoudi et al., 2009; Broomfield, 1997). 이로 인해 국내외의 많은 연구에서 내구성 설계의 관심이 증가되고 있으며, 대부분의 국가에서는 내구성 설계 및 이를 고려한 설계 사양이 제안되고 있다(JSCE, 2007; KCI, 2012; EN, 1991, 2000). 최근에는 구조물의 설계단계에서 해체에 이르기까지 LCCA(Life Cycle Cost Analysis) 기법이 제안되고 있으며, 이러한 기법들은 합리적이고 경제적인 구조물의 시공을 유도하

고 있다. 이러한 LCC 기법은 각 단계에서의 발생 비용을 합하여 고려하는 결정론적 방법에 근거하고 있다. 최근 들어 확률론적이 모델이 도입되고 있지만, 보수시기에 따른 영향을 고려하기 보다는 Cost 요소에 집중되어 실질적인 열화모델 및 내구성 문제와 연계시키기 어려운 수준이다. 확률론적인 LCC 평가에서는 주로 통계자료 및 분포에 근거한 수치해석을 수행하거나(Martinez, 2001), MCS(Monte Carlo Simulation)을 이용하여 대상 구조물의 필요 Cost 요소에 근거한 평가를 수행하는 수준이다(Mulubrhan et al., 2014).

기존의 연구에서 아스팔트 및 콘크리트의 노후화에 대하여 성능저하를 가정하여 30년~100년 경과할 경우 LCC를 확률론적으로 평가하였으나 전체 비용에 대한 보수비의 산정일 뿐 내구성에 대한 해석결과와 연계한 보수시기 및 보수비용에 대해서는 명확한 결과를 제공하지 못하였다(Salem et al., 2003; Swei et al., 2013; Chan et al., 2008). 이는 기존의 LCC 모델은 특정 열화모델을 고려하지 않고 투자, 운용, 유지관리, fault 및 해체비용을 고려하고 각 요소간의 연계성을 확률로 다루기 때문이다(Nasir et al., 2015; Bian et al., 2014). 또한 ANN(Artificial Neural Network), FL(Fuzzy Logic System), ANFIS(Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System) 등의 새로운 수치해석 기법이 적용되고 있으나(Flintsch and Chen, 2004; Rahman and Vanier, 2004; Barringer, 1997), 전체 LCC

¹정희원, 한양대학교 건축공학과, 교수

²정희원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

평가에 사용되는 기법에 초점이 맞춰져 있으며, 공학적인 모델링에 근거한 합리적 보수 시점의 평가에 대해서는 확률론적인 해석기법이 제안되지 못하고 있다.

내구성 관점에서 보수비용의 평가를 고려하기 위해서는 설계제원, 배합, 노출환경, 열화해석 지배방정식 등이 구성되어야 하고 목표내구수명의 설정 및 한계상태 평가가 필요하다. Life365와 같은 프로그램에서는 표면염화물로부터 유입되는 염화물 침투 해석을 수행하고(Thomas and Bamforth, 1999; Thomas and Bentz, 2002), 내구수명이 도래했을 경우 이율을 고려하여 보수비용을 산정하고 있다. 이러한 방법은 결정론적인 방법이며, 단순히 내구수명이후의 보수 비용의 산정을 반복하여 나타내는 것이다(Thomas and Bentz, 2002).

본 연구에서는 내구수명 및 보수시의 비용만을 가정하여 확률론적인 기법을 적용하였으며 각 설계변수의 변동성에 따른 보수시기 및 비용의 변화를 분석하도록 한다. 이를 위해 지배적인 열화환경을 염해로 정의하고 보수를 통해 확보되는 내구수명을 확률변수로 가정하여 보수비용을 평가하였다. 기존의 결정론적인 모델에서는 대상구조물이 내구수명에 도래할 경우, 보수비용이 그 시점을 기준으로 계단식으로 증가하지만, 확률론적인 모델을 적용할 경우, 연속함수의 형태로 보수비용이 평가되어 합리적인 보수시기 및 비용을 평가할 수 있다.

2. 확률론적 보수비용 모델의 기본 이론

2.1 개요

본 논문에서 이용한 보수비용 모델은 일본 TOTAL-LCC 프로그램 구성요소중 보수비용 산정에 대한 모델을 이용하였으며(TOTAL-LCC, 2010), 이 모델은 N 회차의 보수시기(T_N)와 공용연수(T_{end})에 대한 확률분포를 정규분포로 가정하여 이론을 전개하였다.

2.2 Maintenance free(무보수기간) 기간이 목표내구수명보다 클 경우

보수를 필요로 하지 않는 기간(Maintenance free period)이 목표내구수명보다 클 경우는 보수를 수행하지 않아도 된다. 그러므로 특별한 보수를 필요로 하지 않는 경우의 조건은 식 (1)과 같이 1회차의 보수시기 T_1 이 목표내구수명(T_{end})보다 클 경우이다(TOTAL-LCC, 2010).

$$T_1 \geq T_{end} \quad (1)$$

여기서, T_1 은 1회차의 보수시기, T_{end} 은 초기의 목표내구수명(사용하려는 공용연수)을 나타낸다. \bar{T}_1 을 1회차 보수시기의 평균값으로 정의하면 정규화 상수(신뢰도지수, β)는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\beta = \frac{(T_1 - \bar{T}_1)}{\sigma_1} \quad (2)$$

여기서, σ_1 는 1회차 보수시기에서의 \bar{T}_1 의 표준편차를 나타내고 이 경우 1회차의 내구적 파괴확률(P_1)은 식 (3)과 같이 구성할 수 있다.

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

2.3 무보수 기간을 초과하여 보수회수가 1회 인 경우

보수회수가 1회가 되는 조건은 1회의 보수시기 T_1 이 목표내구수명 T_{end} 보다 작고 1회차 보수시기 T_1 과 2회차 보수시기 T_2 의 합이 T_{end} 보다 클 경우이다. 이는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, 신뢰도 지수는 식 (4)와 같이 구성할 수 있다(TOTAL-LCC, 2010).

$$\beta = \frac{[t_2 - (\bar{T}_1 + \bar{T}_2)]}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (4)$$

여기서, σ_i 는 T_i 의 표준편차를 나타내며, t_2 는 $T_1 + T_2$ 와 같다. 또한 확률 P_2^* 는 식 (5)와 같이 정식화 할 수 있다.

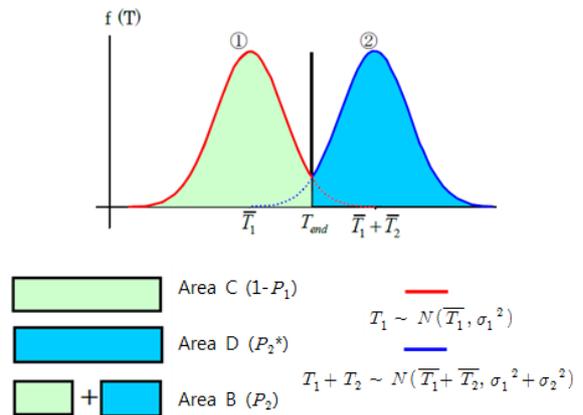


Fig. 1 Probability distribution in the case of $T_1 \leq T_{end}$ and $T_1 + T_2 \geq T_{end}$

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

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

그러므로 보수회수가 1회인 경우의 파괴확률(P_2)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(TOTAL-LCC, 2010).

$$P_2 = (1 - P_1) \times P_2^* \quad (6)$$

2.4 T_i 의 증가에 따른 파괴확률의 정식화

이상과 같이 보수회수 n 회 시의 확률 P_n 은 식 (7)과 같으며, 1회의 보수비가 C 로 일정하다고 가정할 경우, 총 보수비 (C_{total})은 식 (8)과 같이 정식화 할 수 있다.

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

$$C_{total} = \sum_{k=1}^n (k C P_k) \quad (8)$$

3. 설계인자의 변동성에 따른 확률론적 보수시기 및 비용변화 분석

3.1 열화조건 및 해석 변수 구성

본 절에서는 염화물 해석 프로그램인 Life365를 사용하여 내구수명 및 보수시기를 평가하였다. 대상 구조물은 염해환경에 노출된 RC(Reinforced Concrete) 교각을 대상으로 하였다. Fig. 2에서는 해석대상 구조물의 제원을 나타내고 있으며, Table 1에서는 염화물 침투 해석을 위한 배합표를 나타내고 있다.

배합은 OPC를 사용한 37% 물-시멘트비 배합과 슬래그를 치환한 40% 물-결합재비 배합의 두 경우를 고려하여 평가하였다. 두가지 배합은 실제 구조물에 사용할 정도의 배합이며, 기존의 연구에서 차용하여 해석을 수행하였다(Kim et al., 2014). 시간의존성 결보기 확산계수를 고려한 염화물 침투를 평가하였으며, 철근위치에 유입된 염화물량이 임계염화물량 (1.2kg/m^3)에 이르는 시간까지를 첫 번째 보수시기(T_1)로 정의하였다. 또한 보수재를 사용한 경우, 염화물 침투시간이 증가되는데, 이는 사용재료의 종류에 따라 크게 변화한다. 본 연구에서는 동일한 품질의 콘크리트로 타설하여 염화물이 0.1kg/m^3 의 수준으로 침투할 경우를 보수시기로 가정하여 보

수시기를 평가하였다. 이는 T_1 보다 의도적으로 연장된 T_2 를 가정하여 다양한 보수 관련 해석을 하기 위함이다. 보수재의 시험을 통하여 내구수명을 평가하고 연장된 내구수명의 확률변수를 고려하는 연구는 이후 수행하도록 한다. 식 (9)에서는 결보기 확산계수를 이용한 염화물 확산식을 나타내고 있으며, 식 (10)에서는 시간에 따라 감소하는 염화물 확산계수식을 나타내고 있다.

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D(t) \cdot t}}\right) \quad (9)$$

$$D(t) = D_{ref} \cdot \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (10)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간의존성 확산계수(m^2/year), t 는 시간(year), C_0 는 표면염화물량(kg/m^3), $C(x,t)$ 는 거리(x)와 시간(t)에 따른 염화물량을 나타낸다. D_{ref} 와 t_{ref} 는 기준시간에서의 확산계수와 기준시간을 나타낸다. 일반적으로 t_{ref} 은 28일을 가정한다(Thomas and Bentz, 2002). 기준 확산계수와 시간의존성 지수(m)은 식 (11) 및 식 (12)에 나타내었다.

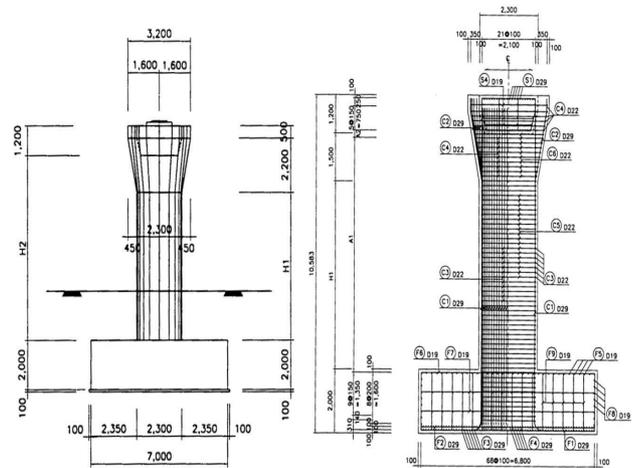


Fig. 2 Target RC structure for chloride penetration analysis

Table 1 Concrete mix proportions for chloride penetration analysis

Case	W/B	Unit(kg/m^3)						
		W	Binder		G	S	SP	AE
			C	SG				
OPC 37	0.37	168	454	-	952	767	1	0.02
SG 40	0.40	160	280	120	972	785	0.75	0.01

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

$$D_{28} = 1 \times 10^{[-12.06 + 2.40 W/C]} \quad (11)$$

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (12)$$

여기서, W/C 는 물-시멘트비, FA , SG 는 각각 플라이애쉬와 슬래그의 치환율을 나타내며, 플라이애쉬인 경우 50%, 슬래그인 경우 70%를 제한 값으로 하고 있다.

Table 2에서는 염화물 침투를 위한 해석조건을 나타내었으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 피복두께는 일반적인 교각의 피복두께 수준이며, 임계 염화물량은 시방서에서 제안하는 값을 기준으로 하였다.

목표 내구수명(공용연수)를 80년으로 가정했을 경우, 두 가지 배합에 따른 보수비용은 결정론적 모델을 고려했을 경우 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 비교를 위하여 보수비용은 일정하게 100으로 가정하였다. SG 40의 경우 물-결합재비가 OPC

Table 2 Analysis conditions for chloride penetration for repairing model

Surface chloride content	13.0 kg/m ³
Temperature	Constant 15°C
Time to build up	4.0 years
Cover depth	85 mm
Critical chloride content	1.2 kg/m ³
Service life determination	1.2 kg/m ³ for initial condition
	0.1 kg/m ³ for repairing condition

Table 3 Results for calculation of maintenance free period and repair period(year)

Case	Repair timing(year)	
Maintenance free period	OPC 37	8.1
	SG 40	15.5
Repairing period	OPC 37	20.0
	SG 40	43.5

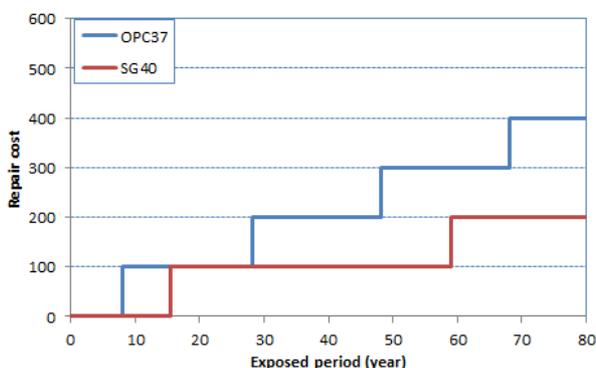


Fig. 3 Repairing number and required budget for each mix conditions

37보다 높더라도, 40%의 높은 치환율을 가지고 있으므로 높은 내구수명이 평가되었다. 슬래그를 사용한 콘크리트는 공극구조 감소 및 염화물 흡착량의 증가를 통하여 확산계수가 크게 감소하게 되는데, 많은 선행연구에서 염해에 대한 저항성을 확인할 수 있다(Lee and Kwon, 2012; Alonso et al., 2002; Song et al., 2006).

3.2 확률론적 보수비용 모델의 해석 조건 및 결정론 모델과 비교

3.2.1 확률론적 모델의 기본 해석조건

확률론적 보수비용 모델의 적용을 위하여 Table 4와 같이 해석조건을 가정하였으며, 이러한 조건을 고려했을 경우 보수비용은 Fig. 4와 같이 변화하게 된다. Fig. 4(a)에서는 OPC 37에 대한 결과를, Fig. 4(b)에서는 SG 40에 대한 결과를 나타낸다. Table 4에서 COV는 0.25로 가정하였는데, 일반적으로 피복두께는 0.15~0.23, 열화속도는 0.15~0.21 수준을 가진다. 본 연구에서는 0.25로 COV를 가정하였으며, 이 값을 변화시키면서 해석을 수행하였다(Kwon and Na, 2011; Kwon et al., 2009).

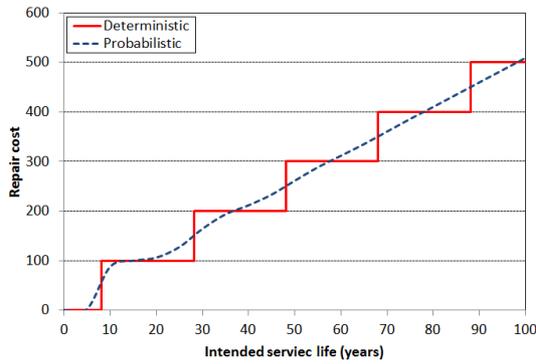
Fig. 4(a)와 (b)에서 알 수 있듯이, 확률론적인 보수 모델을 적용할 경우, 연속적으로 보수비용이 평가된다. OPC 37인 경우 100년간 5.09번의 보수회수를, SG 40의 경우 2.43번의 보수회수를 가지게 된다. 확률론적인 모델을 이용할 경우, 목표 내구수명을 조절하거나 보수재의 목표 내구수명을 조절하여 경제적인 유지관리 비용을 설정할 수 있다. OPC 37의 경우, 88~95년 사이의 목표내구수명을 가정할 경우, SG 40에서 59~75년 사이의 목표내구수명을 가정할 경우, 결정론적인 방법보다 1회 낮은 보수비를 산정할 수 있다.

Fig. 5에서는 50년이 경과할 경우를 대표적으로 선정하여 해석변수 결과를 각 배합별로 도시하였다.

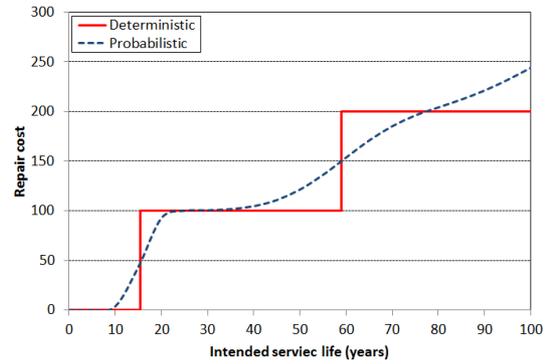
Fig. 4 및 Fig. 5를 같이 비교하면, SG 40의 경우 50년 경과 시 보수회수는 1회로 고정되고, OPC 37의 경우는 3회로 고정되고 있음을 알 수 있으며 이는 Fig. 5(b)의 확률분포의 평균값

Table 4 Analysis condition for repairing budget for each case

Cases	OPC 37	SG 40
Intended service life(years)	100	100
1st repairing period(years)	8.1	15.5
COV for 1st repairing	0.2	0.2
Additional repairing period(years)	20.0	43.5
COV over 1st repairing	0.25	0.25
Repairing budget: 100(constant)		
Calculation interval: 5 years		

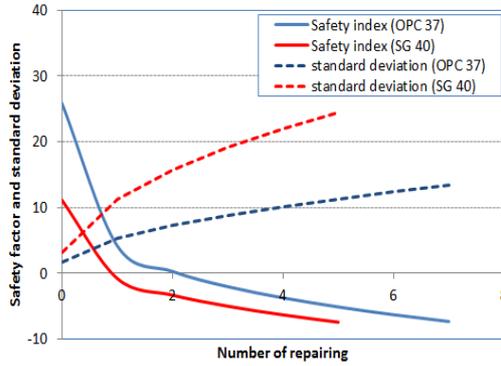


(a) Repairing cost for OPC 37

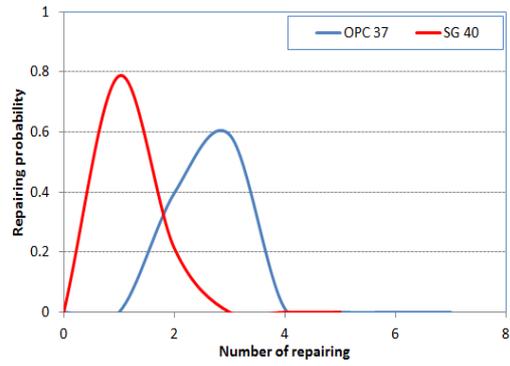


(b) Repairing cost for SG 40

Fig. 4 Comparison of repairing budget model between deterministic and probabilistic model

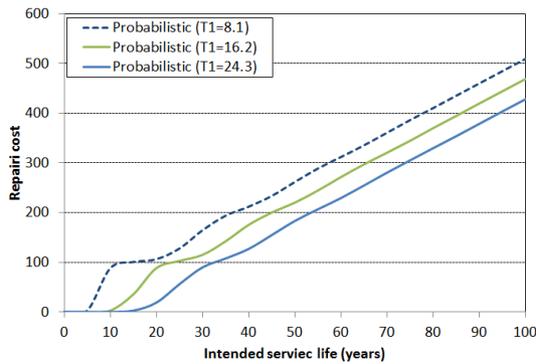


(a) Safety index and standard deviations

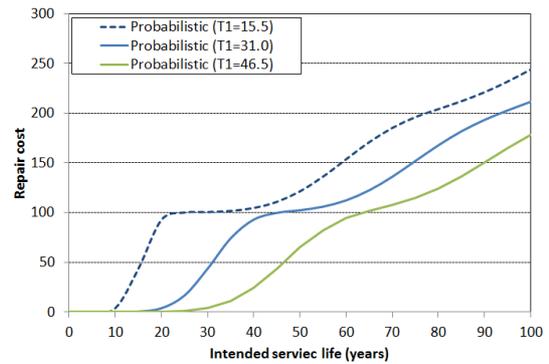


(b) Repairing probability

Fig. 5 Random variable properties of OPC 37 and SG 40 on T_{end} of 50 years



(a) Repairing cost for OPC 37



(b) Repairing cost for SG 40

Fig. 6 Simulation results for extended maintenance free period

임을 일 수 있다. 또한 SG 40의 경우, T_1 과 T_2 의 차이가 크므로 높은 표준편차의 합을 가지고 있으며, 이에 따라 낮은 신뢰도 지수를 가지고 있음을 알 수 있다. OPC 37의 경우 SG 40보다 높은 신뢰도 지수와 낮은 표준편차 합을 가지고 있다.

3.2.2 유지관리가 필요 없는 기간의 연장 (T_1)

본 절에서는 각 배합에 대하여 유지관리가 필요 없는 기간,

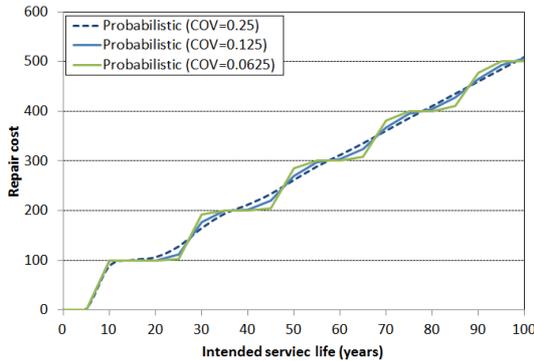
즉 첫 번째 T_1 보수를 수행할 시간까지의 기간을 2배 및 4배로 증가시켜 각각의 해석을 수행하였다. Fig. 6(a)에서는 OPC 37의 해석을 나타내고 있으며, Fig. 6(b)에서는 SG 40의 해석결과를 나타내고 있다.

OPC 37인 경우 100년간 5.09번의 보수회수를 가졌으나, T_1 이 2배 및 4배로 연장됨에 따라 4.68번 및 4.28번으로 감소하였다. 또한 SG 40의 경우 2.43번의 보수회수를 초기 조건에

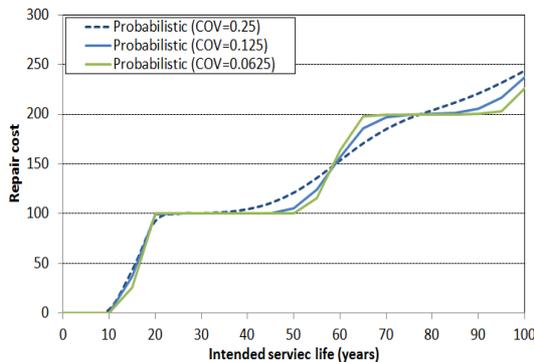
서 가졌으나, T_1 의 증가에 따라 2.11번, 1.78번으로 보수회수가 감소하였다. 초기의 maintenance free period의 연장은 SG 40 배합과 같이 보수회수가 적은 경우 매우 유리하게 적용됨을 알 수 있다.

3.2.3 보수재의 확률 변동성에 대한 영향

초기조건에서는 T_1 까지의 변동계수를 0.20, T_2 이상의 변동계수를 0.25로 가정하여 해석을 수행하였다. 초기 콘크리트의 시공 및 보수재의 품질이 변화할 경우 변동성(평균 및 표준



(a) Repairing cost for OPC37



(b) Repairing cost for SG40

Fig. 7 Simulation results for varying COV

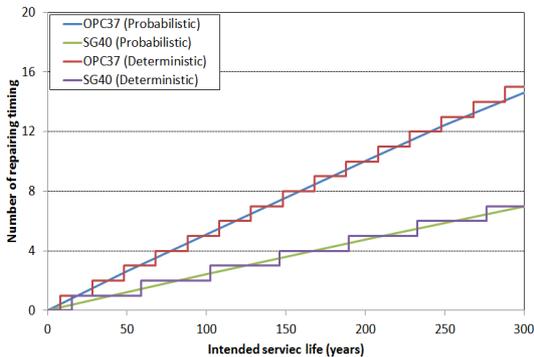


Fig. 8 Numbers of repairing timing with extension of intended service life

편차)가 증가하게 된다. OPC 37 배합의 경우, 100년 경과후의 보수회수는 5.09회(COV: 0.25), 5.06회(COV: 0.125), 그리고 5.00회(COV: 0.0625)로 COV의 감소에 따라 약간의 감소를 나타내었다. 보수회수의 변화는 큰 차이는 없었으나, COV가 낮을수록 결정론적인 보수비 평가와 근접한 경향을 나타내었다. SG 40 배합의 경우에도 COV가 감소함에 따라 2.43회에서, 2.37회, 2.26회로 보수회수는 약간 감소하였으며, 변동계수가 낮아질수록 계단식(결정론방법)의 보수비용을 산정하였다.

Fig. 7에서는 변동계수의 변화에 따른 보수비 산정의 변화를 나타내고 있다.

또한 목표내구수명을 최대 300년까지 변화시키면서 OPC 47 및 SG 40의 보수회수 및 보수비의 변화를 분석하면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

확률분포에 따라 다르게 평가되지만, 임의의 보수기간(T_i)의 40% 영역에서 확률론에 의한 보수비용이 결정론에 의한 비용과 동일하게 평가되므로 이를 고려한 목표내구수명의 설정은 보수회수의 감소를 유도할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 해안가에 노출된 RC 구조물을 대상으로 염해 침투해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 확률론적 보수회수 및 보수비용을 산정하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 확률론적 유지관리기법을 사용할 경우 결정론적 기법과는 다르게 보수비용을 연속적으로 유도할 수 있으며, 보수재를 통하여 확보되는 내구수명의 변동성이 고려된다면 합리적인 유지관리기법으로 사용될 수 있다. 또한 본 논문에서는 공용연수 및 보수시기의 분포를 정규분포로만 가정하였으나 이러한 기법은 보수재가 확보하는 내구수명의 확률분포를 고려하는 것이 바람직하다.
- 2) 보통 콘크리트(OPC 37) 및 슬래그 40% 치환 콘크리트(SG 40)을 기준으로 염해 침투 해석을 수행하였으며, 초기의 보수가 필요 없는 기간(T_1)과 보수이후의 내구수명을 평가하며, 확률론적인 보수시기 및 보수비용을 평가하였다. OPC 37인 경우 100년간 5.09번의 보수회수를, SG40의 경우 2.43번의 보수회수를 가지게 되며, 보수재의 내구수명을 조절함으로써 결정론적인 보수모델보다 효과적인 보수비용을 산정할 수 있다.
- 3) 유지관리가 필요 없는 초기의 기간(T_1 : Maintenance free period)의 증가는 구조물의 보수회수 변동에 중요한 인자이다. OPC 37인 경우 100년간 5.09번의 보수회수를 가졌

으나, T_1 이 2배 및 4배로 연장됨에 따라 4.68번과 4.28번으로 감소하였다. 또한 SG 40의 경우 2.43번의 보수회수에서 T_1 의 증가에 따라 2.11번, 1.78번으로 보수회수가 감소함을 알 수 있다. 특히 SG 40 배합과 같이 보수회수가 적은 경우 초기 T_1 의 증가는 매우 효과적임을 알 수 있다.

- 4) 보수를 통한 내구수명 또는 초기 공용조건에서 사용기간에 대한 변동계수 변화는 보수회수의 변화에 큰 영향을 못 미친다. 염화물 해석을 통하여 변화하는 사용기간의 변동성 평가는 중요하지만, 변동성이 적을수록 결정론적인 해석에 근접하게 된다.

감사의 글

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

References

Al-Amoudi, O. S. B., Al-Kutti, W. A., Ahmad, S., and Maslehuddin, M. (2009), Correlation between compressive strength and certain durability indices of plain and blended cement concretes, *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 672-676.

Alonso, C., Castellote, M., and Andrade, C. (2002), Chloride Threshold Dependence of Pitting Potential of Reinforcements, *Electrochimica Acta*, 47(21), 3469-3481.

Barringer, H. P. and Weber, D. P. (1997), Life cycle cost & reliability for process equipment, *8th Annual Energy Week Conference and Exhibition*, American Petroleum Institute, Houston, Texas, 1-22.

Bian, J., Sun, X., Wang, M., Zheng, H., and Xing, H. (2014), Probabilistic Analysis of Life Cycle Cost for Power Transformer, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2(4), 489-494.

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

Chan, A., Keoleian, G., and Gabler, E. (2008), Evaluation of Life-Cycle Cost Analysis Practices Used by the Michigan Department of Transportation, *Journal of Transportation Engineering*, 134(6), 236-245.

EN 1911 (2000), Eurocode 1 - Basis of Design and Actions on Structures.

Flintsch, G. W. and Chen, C. (2004), Soft computing applications in infrastructure management, *Journal of Infrastructure Systems*, 10(4), 157-166.

JSCE (2007), Standard Specification and Guidelines, Japan Society of Civil Engineers.

KCI (2012), Concrete Standard Specification -Durability Part, Korea Concrete Institute.

Kim, S.-J., Kim, Y.-J., and Kwon, S.-J. (2014), CO₂ Evaluation of Reinforced Concrete Column Exposed to Chloride Attack Considering Repair Timing, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2(1), 1-9.

Kwon, S.-J. and Na, U. J. (2011), Prediction of curability for RC column with crack and joint under carbonation based on probabilistic approach, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 5(1), 11-18.

Kwon, S.-J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S. H. (2009), Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion, *Structural Safety*, 31(1), 75-83.

Lee, S. H. and Kwon, S. J. (2012), Experimental study on the relationship between time-dependent chloride diffusion coefficient and compressive strength, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(6), 715-726.

Martinez, L. H. (2001), A neuro-fuzzy decision support system for risk analysis of revenue-dependent infrastructure projects, Ph.D. dissertation, West Lafayette, Purdue University, Department of Civil Engineering.

Mulubrhan, F., Mokhtar, A. A., and Muhammad, M. (2014), Integrating Reliability Analysis in Life Cycle Cost Estimation of Heat Exchanger and Pump, *Advanced Materials Research*, 903, 408-413.

Nasir, M., Chong, H. Y., and Osman, S. (2015), Probabilistic Life Cycle Cost Model for Repairable System, *IOP Conference series: Materials Science and Engineering*, 78(2015), 1- 8.

Rahman, S. and Vanier, D. J. (2004), Life cycle cost analysis as a decision support tool for managing municipal infrastructure, *Proceedings of the CIB triennial*, CIB 2005 Triennial Congress, Toronto, Canada, 1-11.

Salem, O., Abourizk, S., and 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., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S. J. (2006), Service life prediction of concrete structures under marine environment considering coupled deterioration, *Journal of Restoration Building and Monuments*, 12(4), 265-284.

Swei, O., Gregory, J., and Kricahin, R. (2013), Probabilistic Characterization of Uncertain Inputs in the Life-Cycle Cost Analysis of Pavements, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2366, 71-77.

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, E. C. (2002), Life-365TM Service Life Prediction ModelTM and Computer program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, SFA, 2-28.

TOTAL-LCC (2010), Technical Manual, ver.1.1.

Received : 05/31/2017

Revised : 10/23/2017

Accepted : 10/31/2017

요 지 : 염해에 따라 발생하는 보수시기와 보수로 유지되는 내구수명은 보수비용 평가에 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 사용하는 결정론적 보수비용 평가는 사용기간의 연장에 따라 계단식으로 증가하게 되며, 보수로 인해 변동되는 내구수명의 변화를 고려하지 못한다. 본 연구에서는 확률론적인 보수시기 및 비용을 평가하기 위해, 염해에 노출된 콘크리트 교각을 선정하였다. 두 가지 배합과 염화물에 노출된 외부 환경조건을 고려하여 염화물 거동을 평가하였으며, 노출된 내구수명과 수명에 대한 확률변수를 변화시키면서 보수시기 및 비용 변화를 분석하였다. 변동계수의 변화에 따른 보수회수는 큰 차이가 발생하지 않았으나, 초기의 내구수명 연장이 구조물의 보수시기 및 비용에 큰 영향을 미치고 있었다. 또한 확률론적 보수비용 산정 모델은 결정론적 모델과 다르게 연속적인 보수비용이 평가되므로 목표내구수명에 따라 보수회수를 감소시킬 수 있는 효과적인 기법임을 규명되었다.

핵심용어 : 확률 보수용 모델, 보수 빈도, 내구수명, 염해, 변동계수
