

확률론을 고려한 탄산화된 RC 구조물의 최적 보수시기 해석

Simulation on Optimum Repairing Number of Carbonated RC Structure Based on Probabilistic Approach

권성준^{1*}

Seung-Jun Kwon^{1*}

(Received June 19, 2017 / Revised August 22, 2017 / Accepted August 22, 2017)

Carbonation is a representative deterioration for underground structure, which causes additional repair for service life. This study proposes a simplified equation for optimum repair timing without complicated probability calculation, considering initial and repair conditions. For the work, initial service life, extended service life through repair, and their COVs(Coefficient of Variation) are considered, and the periods which can reduce number of repair are evaluated. Assuming the two service lives to be independent, the repair timings are derived from 10 to 50 years based on the probabilistic method, and the regression analysis technique for optimum repairing timing is proposed. Decreasing COV has insignificant effect on reducing repairing number but shows a governing effect on changes in probability near the critical repairing stage. The extension of service life through repairing is evaluated to be a critical parameter for reducing repairing number. The proposed technique can be efficiently used for maintenance strategy with actual COV of initial and additional service life due to repairing.

키워드 : 확률론적 유지관리, 최적 보수시기, 내구수명, 탄산화

Keywords : Probability based maintenance, Optimum repair timing, Service life, Carbonation

1. 서론

1990년대 이후 도심지의 이산화탄소의 증가 및 지하구조물의 증가로 인해 탄산화에 내구성 문제가 증가하고 있다(CEB 1997; Izumi et al. 1986). 탄산화는 외부의 이산화탄소가 내부로 유입되면서 공극수의 pH가 낮아지고 이로 인해 매립된 철근이 부식하는 지하 구조물의 대표적인 열화현상이다(Izumi et al. 1986). 각국에서는 일반적으로 구조물의 사회적, 공학적 중요도에 따라서 목표 내구수명을 설정하고 있으며, 탄산화에 대한 유지관리를 통하여 사용수명을 연장하고 있다(JSCE 2007; CEN 2004).

일반적으로 탄산화에 대한 보수시기 평가에 대한 연구는 결정론적인 방법을 이용한다. 이러한 방법은 탄산화 깊이에 대한 정량적인 지배방정식을 필요로 하며, 내구한계 상태를 정의하여 목표 내구수명동안 소요 성능을 유지하는 것을 기본으로 한다(CEB 1997;

Izumi et al. 1986). 탄산화에 대한 지배방정식은 1900년대부터 장기폭로자료를 기반으로 한 반경험적 공식들이 주로 사용되었으나(Izumi et al. 1986), 1990년대 이후, 공극률, 수화도, 수산화칼슘 생성, 탄산화 반응을 등 초기재령 거동 모델링과 물리-화학적 연성모델을 이용하여 발전되어 왔다(Ishida et al. 1998; Song and Kwon 2007; Papadakis et al. 1991; Kwon et al. 2014). 일반적으로 탄산화에 대한 내구한계 상태는 목표내구수명동안 사용기간 증가에 따라 증가하는 탄산화 깊이가 피복두께에 이르지 않도록 제어하는 것이며, 이러한 개념은 보수시기의 산정과 보수 재료의 선정에 핵심적인 요소이다.

확률론적인 탄산화 해석 및 평가기법은 주로 내구설계에 적용되어 왔으며, 이는 설계변수인 피복두께, 설계배합인자, 환경적인 요소(온도, 습도, 이산화탄소 농도) 등을 고려하여 목표내구수명동안 목표내구성 확률을 만족하도록 유도한다. 이러한 확률론적 평

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

¹한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

가기법은 시간-공간적 특성을 고려한 변동성(Spatial Variability)이 용하여 탄산화에 따른 열화 면적 평가 및 수명연장기술에 적용되었다(Stewart and Mullard 2007; Vesikari 1988; Kwon and Na 2011).

초기의 시공 상태를 고려하여 유지관리가 필요 없는 기간, 즉 Maintenance free period 개념은 1990년대부터 도입되어 왔는데, 이 기간의 변화는 내구수명 변화에 핵심적인 요소이다.

LCC(Life Cycle Cost) 평가에서도 확률론적인 수치해석 기법이 이용되지만, 전체 금액에 대한 보수비의 산정을 확률론적으로 평가할 뿐 보수횟수에 대한 정보를 제공하지 못하고 있다(Mulubrhan et al. 2014; Nasir et al. 2015; Rahman and Vanier 2004; Salem et al. 2003). 이는 탄산화와 같은 특정한 열화인자를 공학적으로 접근하지 못하고 시스템 내에서 요소간의 연계성을 확률로 다루기 때문이다.

최근들어 LCCO₂(Life Cycle CO₂)의 중요성이 대두되고 있는데, 이는 전생애주기동안 발생하는 비용뿐 아니라, 탄소 발생량을 평가하여 환경부하를 저감시키려는 평가기법이다. 제안된 확률론적 기법은 보수횟수를 줄일 수 있으며, 관련된 시공비 및 탄소량을 절감할 수 있다(TOTAL-LCC 2010). 현재 수준으로는 좌우극한을 이용한 정규분포 함수를 가정하고 있기에 이론적으로 최적 보수시기를 평가할 수 없으므로 수치해석을 통하여 최적의 보수시기를 도출하도록 한다.

본 연구에서는 탄산화에 노출된 RC(Reinforced Concrete) 구조물을 대상으로 설계인자에 대한 확률론적 수치해석을 수행하였으며, 최적의 보수시기를 해석결과로부터 도출하였다. 시뮬레이션 결과로부터 초기 시공된 조건의 내구수명과 보수재로 연장된 내구수명결과를 이용하여 최적화된 보수횟수를 도출할 수 있는 식을 제안하였다. 제안된 기법은 구조물의 중요도에 따라 목표내구수명이 설정될 경우, 초기 시공조건에 따른 최적의 보수시기를 도출하는데 효과적인 기법으로 사용할 수 있다고 판단된다.

2. 확률론을 고려한 최적 보수시기 평가

기존의 확률론적 보수시기 및 비용 연구에서는 유지관리가 필요 없는 기간(T_1), N 회차의 보수시기(T_N), 그리고 확보된 내구수명의 변동성(COV: Coefficient of Variation)을 고려하여 보수 비용을 평가하였다(TOTAL-LCC 2010; Kwon 2017). 보수를 필요로 하지 않는 기간에 대해서는 보수 횟수는 0이 되며, 경계조건은 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

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

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

$\overline{T_1}$ 을 1회 보수시기의 평균값으로 정의하면 표준화 변수(β)와 보수를 수행하지 않아도 되는 확률(P_1)은 식 (2) 및 (3)에 나타낼 수 있다(TOTAL-LCC 2010; Kwon 2017).

$$\beta = \frac{(T_{end} - \overline{T_1})}{\sigma_1} \quad (2)$$

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

여기서, σ_1 는 1회차 보수시기에서의 $\overline{T_1}$ 의 표준편차를 나타낸다.

보수회수가 1회가 되는 조건은 T_1 이 목표내구수명(T_{end})보다 작고 1회차 보수시기인 T_2 와 T_1 합이 T_{end} 보다 클 경우로서, 이 경우 표준화 변수는 식 (4)와 같이 구성할 수 있다. 또한 T_1 과 T_2 의 합이 $\overline{T_1}$ 보다 클 경우의 확률(P_2^*)은 식 (5)와 같이 구성할 수 있다(TOTAL-LCC 2010).

$$\beta = \frac{(T_{end} - (\overline{T_1} + \overline{T_2}))}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (4)$$

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

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

여기서, σ_i 는 T_i 의 표준편차를 나타내며, 보수회수가 1회인 경우의 파괴확률 (P_2)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 일반화된 n 회의 보수확률 P_n 은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다(TOTAL-LCC 2010).

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

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

1회의 보수비용 C 을 고정한 경우의 해석결과는 Fig. 10에 도시되

어 있으며, 확률론적 보수시기 도출에 대한 절차 및 개념은 Fig. 2에 정리하였다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 확률론적인 방법으로 도출한 보수비용은 연속적인 함수의 형태로 나타나는데, 30년에서 50년 사이에서 보수시기를 결정론적인 방법에 비하여 1회 줄일 수 있는 장점이 있다(TOTAL-LCC 2010).

T_1 (30년) 및 T_2 (50년)의 확률분포를 정규분포로 가정하였으므로, 각각의 평균이 계산되는 지점인 30년과 둘의 합인 80년에서는 파괴확률 50%에 해당하는 지점을 지나게 된다. 이론적으로 정규분포함수를 좌우 극한에서 정리하면 $\sqrt{\pi}$ 에 비례하는 상수로 정의할 수 있으나, 식 (3) 및 (5)와 같이 신뢰도 지수를 적분영역에 포함하고 있는 경우 이론적으로 도출하기에 한계가 있다.

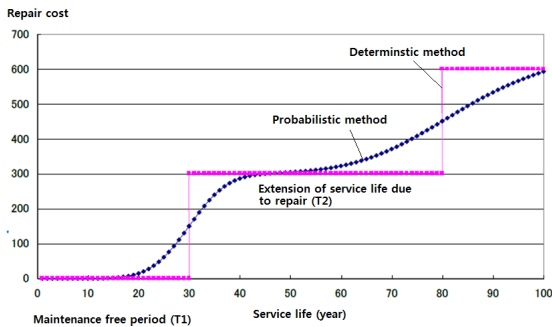


Fig. 1. Representative simulation results(deterministic and probabilistic method)(TOTAL-LCC 2010)

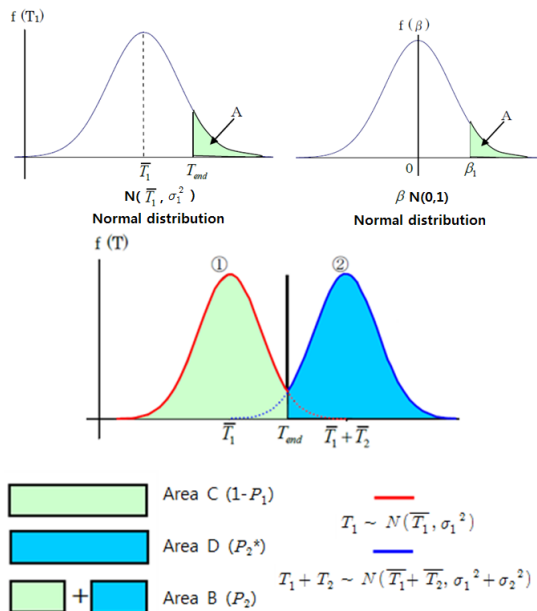


Fig. 2. Schematic diagram for probability-based repair

3. 최적 보수시기 결정을 위한 해석조건 및 Simulation

3.1 보수 시기 도출을 위한 해석 Simulation

3.1.1 변동계수의 영향

변동계수가 최적의 보수시기에 미치는 영향을 분석하기 위해, T_1 및 T_2 을 모두 20년으로 가정하고 변동계수를 0.1에서 0.4로 증가시키면서 해석을 수행하였다. 보수비용을 쉽게 이해하기 위해 1회당 보수비용은 100으로 가정하였으며, 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

COV가 증가할수록 확률론적인 방법은 점차 선형의 형태를 가지는데, T_1 및 T_2 의 표준편차가 증가하므로 임계 평균값에 접근하기 전에 파괴확률이 꾸준히 커지기 때문이다. COV가 감소할 경우, T_1 및 T_2 에 해당하는 내구수명은 평균에 매우 근접한 값을 가지므로 첫 번째 내구수명에 도달하는 20년 근처와 40년 근처에서 뚜렷한 보수횟수의 증가를 나타내게 된다. 또한 COV가 0으로 수렴할 경우는 결정론적인 보수비용과 같은 결과를 가지게 된다. 수치해석적인 오차를 고려하면 28~29년에 확률론적인 보수시기가 1회를 초과하게 된다. 이를 식 (8)을 고려하면 T_2 가 시작한 이후 어느 시점에서 최적의 보수시기가 규정해지는지 알 수 있다.

$$k = (T_a - T_1) / T_2 \times 100 \tag{8}$$

k 는 T_2 기간에 대한 보수시기의 비율, T_a 는 첫 번째 보수시기가 시작되는 시점, T_2 는 첫번째 보수를 통해 연장된 내구수명을 나타낸다. 식(8)을 이용하면, k 는 T_2 의 40.0~42.5% 수준으로 평가된다.

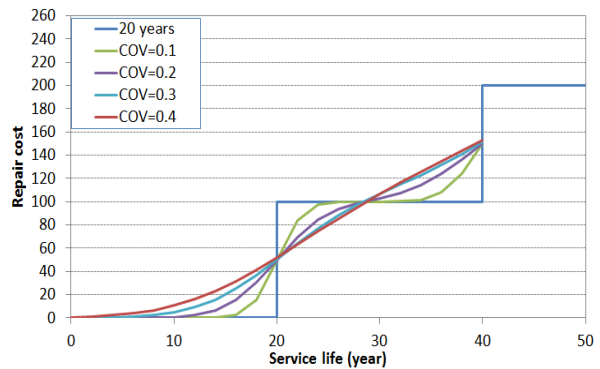


Fig. 3. Simulation results with varying COV

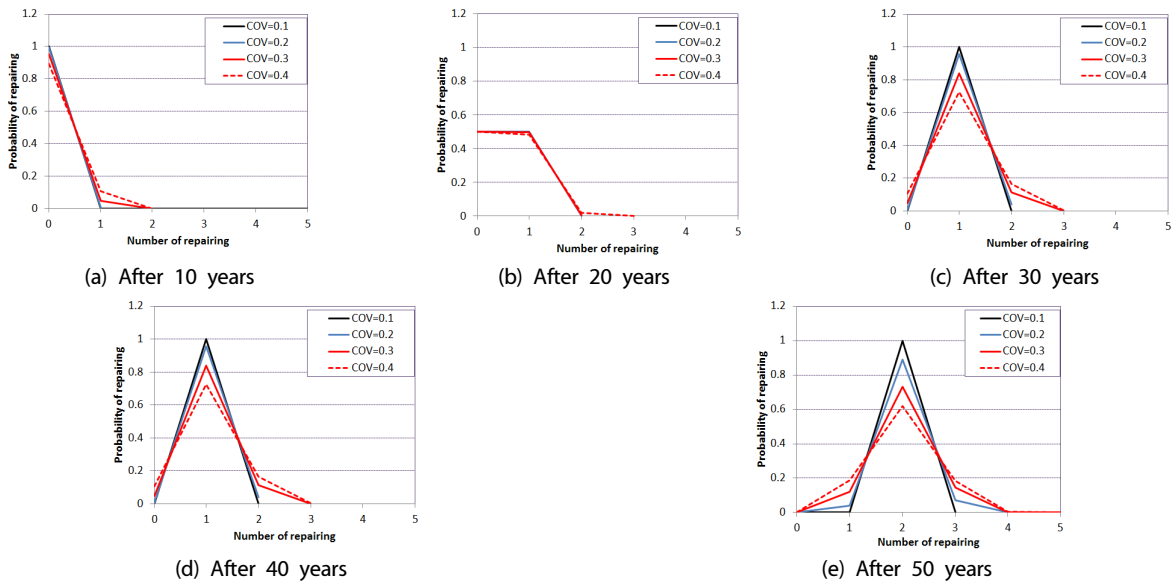


Fig. 4. Changes in repairing probability with service life

3.1.2 변동계수의 변화에 따른 보수확률의 변화

본 절에서는 10년에서 50년까지 10년 단위로 경과시점을 고정하고 변동계수의 변화에 따른 보수 확률변화를 분석하도록 한다. Fig. 4에서는 사용기간에 따른 보수횟수에 대한 확률분포를 나타내고 있다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 사용수명이 시간이 증가할수록 보수회수를 나타내는 확률분포가 우측으로 이동하고 있으며, 분산이 큰 경우는 (COV=0.4) 1~5회까지 보수할 수 있는 폭은 커지지만, 평균에서의 확률이 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 보수재가 확보할 수 있는 내구수명과 이에 따른 변동계수의 설정은 실질적인 유지관리 계획 수립 시 중요함을 알 수 있다.

3.2 초기 내구수명 (T_1) 및 보수 후 인한 내구수명 (T_2) 변화에 따른 영향 평가

3.2.1 Maintenance free period가 10년인 경우

COV를 0.2로 고정하고 T_1 을 10년으로 T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 도출되는 최적의 보수시점을 평가하였다. 2년 단위로 1회의 보수시점을 평가하고 2회의 보수비용의 중앙값(150)에 도달할 때 까지 해석을 수행하였다.

Fig. 5에서는 T_1 이 10년 일 경우 보수비용의 변화를, Fig. 6에서는 T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 평가되는 k 를 도시하였다. T_2 가 증가할수록 비율 k 는 41.5%, 31.2%, 25.7%, 20.0%, 16.0%

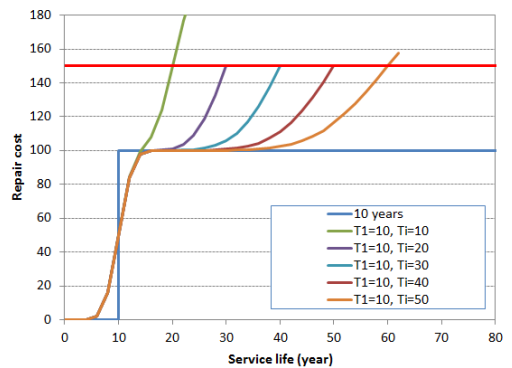


Fig. 5. Simulation results on optimum repair number with $T_1=10$ years

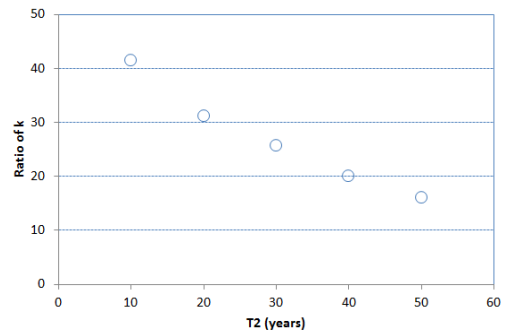


Fig. 6. Changes in k with extension of T_2 ($T_1=10$)

로 감소하였다. 중앙값(150)에 도달하는 시점은 T_1 값과 T_1 과 T_2 의 합의 50% 시점($T_1 + (T_1 + T_2)/2$)과 동일하게 된다.

3.2.2 Maintenance free period가 20년인 경우

동일하게 고정된 0.2의 COV를 사용하고, T_1 을 20으로, T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 최적의 보수시점을 평가하였다. Fig. 7에서는 T_1 이 10년 일 경우 보수비용의 변화를, Fig. 8에서는 T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 평가되는 k 를 도시하였다.

T_2 가 10년에서 50년으로 증가할수록 k 는 48.8%, 41.6%, 36.1%, 31.1%, 26.9%로 감소하였으며, 선형적인 관계가 관측되었다.

3.2.3 Maintenance free period가 30년인 경우

T_1 을 30으로 비교적 길게 가정하였으며, T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 보수시점을 평가하였다. Fig. 9에서는 T_1 이 30년 일 경우 보수비용의 변화를, Fig. 10에서는 T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 평가되는 k 를 도시하였다. T_2 가 10년에서 50년으로 증가할수록 k 는 53.0%, 46.1%, 41.6%, 37.7%, 34.2%로 감소하였으며, 선형적인 관계가 관측되었다. T_2 가 증가할수록 k 값의 비율이 증가하고 있는데, 이는 보수재로 확보되는 내구수명이 증가하는

만큼 결정론적 방법으로 평가되는 기간과의 차이가 크게 발생한다.

3.2.4 Maintenance free period가 40년인 경우

동일한 COV를 사용하고, T_1 을 40으로 비교적 길게 가정하였으며, T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 보수시점을 평가하였다. Fig. 11에서는 T_1 이 40년 일 경우 보수비용의 변화를, Fig. 12에서는 T_2 에 따른 k 를 도시하였다. T_2 가 증가할수록 비율은 56.7%, 48.7%, 44.8%, 41.6%, 38.6%로 감소하였다.

3.2.5 Maintenance free period가 50년인 경우

0.2의 COV를 사용하고, T_1 을 50으로 최대한 길게 가정하였으며, T_2 를 10~50년으로 변화시키면서 보수시점을 평가하였다. Fig. 13에서는 T_1 이 50년 일 경우 보수비용의 변화를, Fig. 14에서는 T_2 에 따른 k 를 도시하였다. T_2 가 증가할수록 비율은 59.9%, 51.0%, 47.0%, 44.1%, 41.6%로 선형적으로 감소하였다.

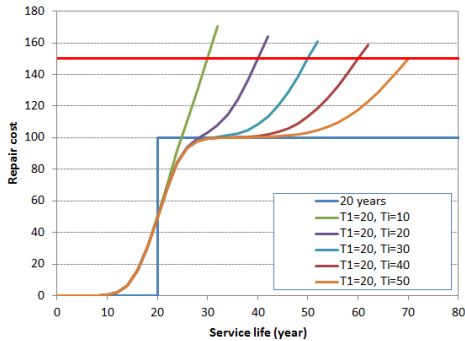


Fig. 7. Simulation results on optimum repair number with $T_1=20$ years

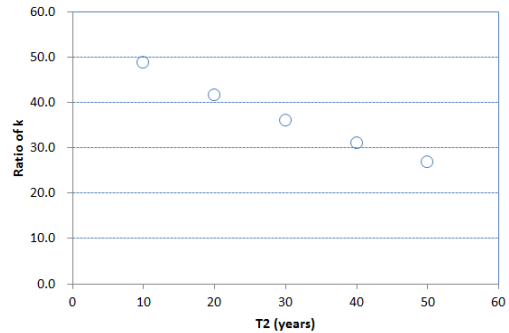


Fig. 8. Changes in k with extension of T_2 ($T_1=20$)

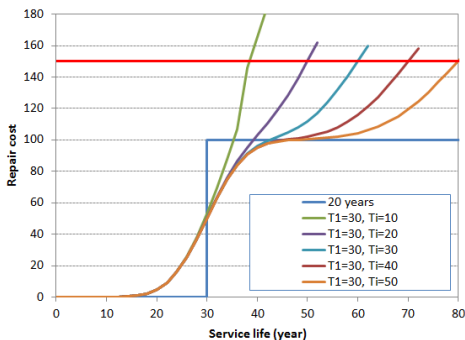


Fig. 9. Simulation results on optimum repair number with $T_1=30$ years

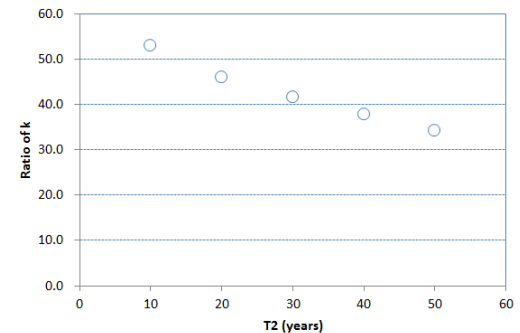


Fig. 10. Changes in k with extension of T_2 ($T_1=30$)

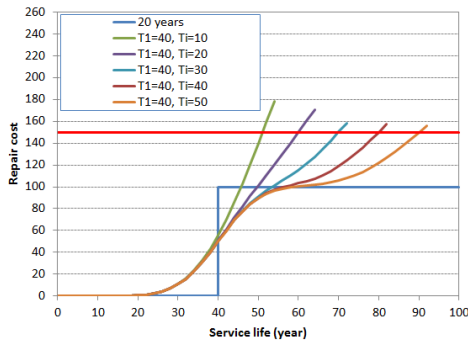


Fig. 11. Simulation results on optimum repair number with $T_1=40$ years

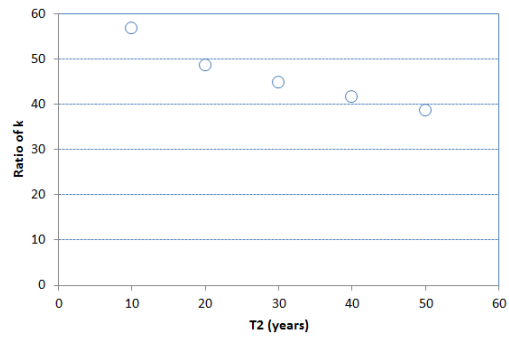


Fig. 12. Changes in k with extension of T_2 ($T_1=40$)

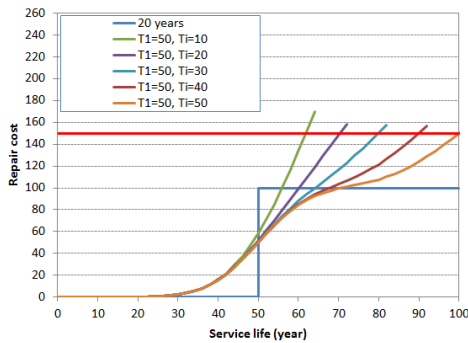


Fig. 13. Simulation results on optimum repair number with $T_1=50$ years

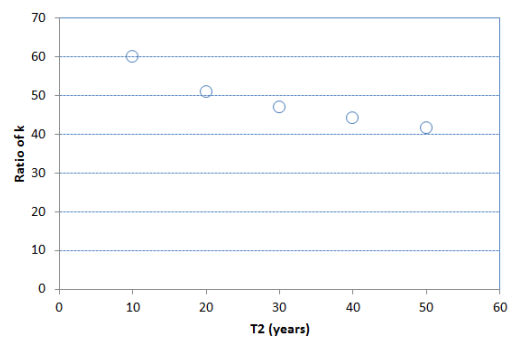


Fig. 14. Changes in k with extension of T_2 ($T_1=50$)

3.3 보수재료로 인한 내구수명 증가와 k 값의 변화 분석

본 절에서는 초기 내구수명 (T_1)과 보수재료로 인한 내구수명 (T_2)가 10년에서 50년까지 변화할 때의 k 값의 변화를 종합적으로 분석하도록 한다. 초기 내구수명 (T_1)이 10년에서 50년으로 증가할 때, 보수횟수를 줄일 수 있는 최대 기간을 도시하면 Fig. 15와 같이 도시할 수 있다. T_1 이 작을 경우는 큰 차이가 발생하지 않지만, T_1 과 T_2 의 합이 증가할수록 보수시기를 줄일 수 있는 기간이 증가한다. 3.1절의 k 값 결과를 하나로 도시하면 Fig. 16과 같다. 초기의 내구수명이 T_1 이 작고 보수에 의한 내구수명 T_2 가 클 경우 k 의 비율은 현저하게 감소한다. 이는 T_2 와 T_1 의 차이가 크더라도 T_1 에 의한 내구적 파괴확률 영향이 지배적이기 때문이므로 초기 시공에 따른 T_1 을 충분히 연장해야 효과적으로 보수횟수를 줄일 수 있다. 또한 T_1 , T_2 그리고 이에 따라 최대한 보수횟수를 줄일 수 있는 기간 T_o 의 관계는 Fig. 17과 같이 contour로 나타낼 수 있다.

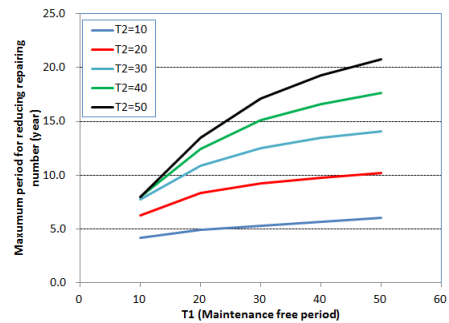


Fig. 15. Maximum service life for reducing repairing number

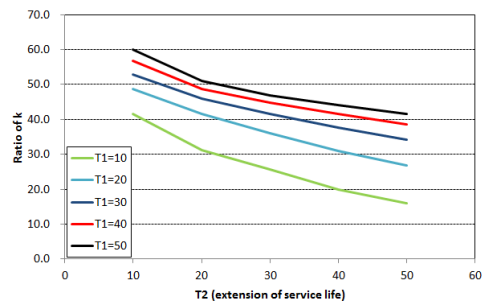


Fig. 16. Changes in k with varying additional service life(T_2)

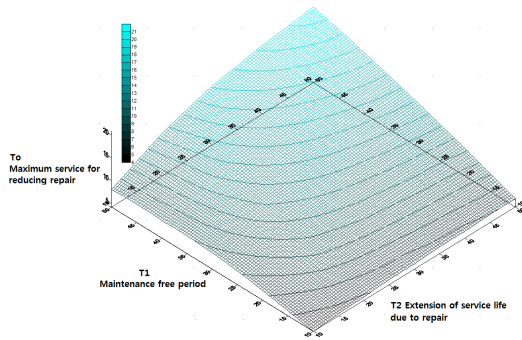


Fig. 17. Contour for T_1, T_2 and T_o

4. 회귀분석을 통한 최적 보수시기 제안

본 절에서는 T_1 이 10년에서 50년까지 변화하면서 도출된 최적 보수기간(T_o)에 대하여 회귀분석을 수행하고 이를 함수화 하도록 한다. Figs. 15 및 16의 결과에서 알 수 있듯이 초기 내구수명에 대하여 T_o 가 비선형적으로 증가하므로 식(9)과 같이 기본식을 제안하였다.

$$T_o(t) = at^b \tag{9}$$

여기서 $T_o(t)$ 는 수명의 증가에 따른 최적 보수 함수식이며, a 및 b 는 회귀분석 상수이다. 식(9)를 이용하면 최적보수식의 결과는 Fig. 18과 같이 도시할 수 있으며, 모든 경우의 결정계수(R^2)는 0.98이상을 만족하였다.

다음 단계로 식 (9)의 상수인 a 및 b 에 대하여 회귀분석을 수행하도록 하는데, T_1 와 T_2 가 독립적인 상수라는 가정을 가진다. T_1 의 증가에 따른 각 상수의 변화는 Fig. 19와 같으며 식 (10) 및 (11)과 같이 회귀분석을 수행하였다.

$$a = 3.564e^{-\frac{1}{2}(\frac{T_2 - m}{23.51})^2} \tag{10}$$

$$b = 0.1304 + \frac{8.140 T_2}{1000} \tag{11}$$

식 (10)에서 a 는 T_2 의 평균값인 m 을 가지는 가우스 함수로 가정 하였으며, b 는 T_2 의 증가에 따른 선형 회귀분석 함수로 구현하였다. 식 (10) 및 (11)를 식 (9)에 고려하면 최종적으로 보수시기를 줄일 수 있는 식 (12)을 제안할 수 있으며, 그 결과를 Fig. 20에 도시하였다.

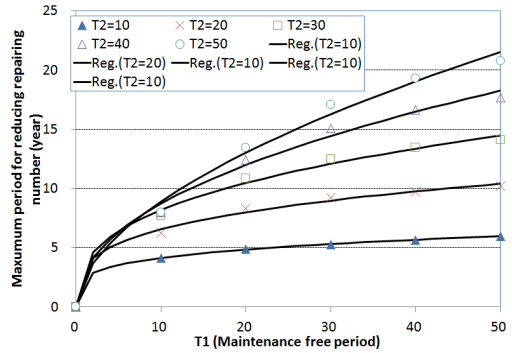


Fig. 18. Comparison with simulation and regression results

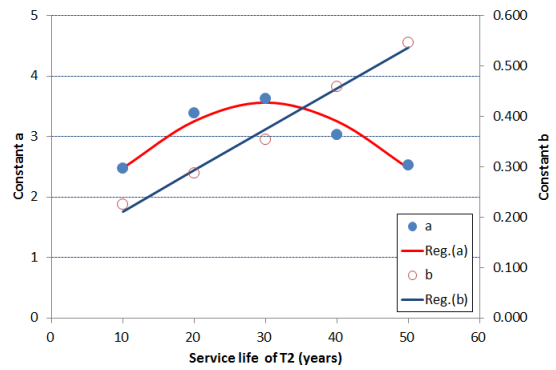


Fig. 19. Regression analysis for constant a and b

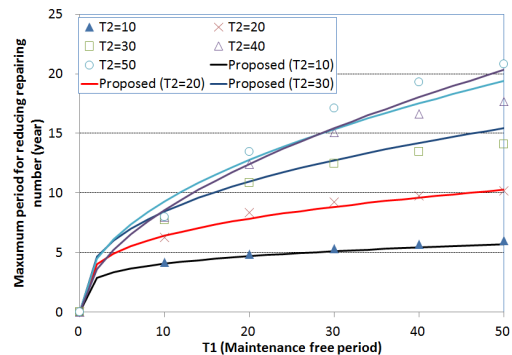


Fig. 20. Results of the proposed technique for repairing timings

$$T_o(t) = 3.564e^{-\frac{1}{2}(\frac{T_2 - m}{23.51})^2} \times T_1^{(0.1304 + \frac{8.140 T_2}{1000})} \tag{12}$$

Fig. 20의 결과 중 T_2 가 40년에서 해석 값과의 차이가 상대적으로 크게 발생하였는데, 이는 수치해석상의 결과를 회귀 분석하여 제안한 식에서 발생된 오차이다. 전반적으로 복잡한 확률 해석 없이 간단한 식으로 최적의 보수횟수를 만족하는 기간을 도출하고 있음을 보여준다. 본 연구에서는 각 단계에서 확보되는 내구수명

을 정규분포의 함수로만 가정하였으므로 실제로 적용되는 보수재의 특성을 고려한 최적 확률분포함수의 제시가 필요하다.

5. 결론

본 연구의 범위내에서 확률론을 고려한 탄산화된 RC 구조물의 최적 보수시기 해석을 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 결정론적인 방법과 다르게 확률론적인 보수시기 평가를 수행할 경우, 1회의 보수시기를 감축할 수 있다. 초기의 내구수명 (T_1) 및 보수재로 인한 내구수명 (T_2)의 변동계수가 증가할수록 확률론적인 방법은 점차 선형의 형태를 가지는데, T_1 및 T_2 의 표준편차가 증가하므로 임계 평균값에 접근하기 전에 파괴확률이 증가하기 때문이다.
2. T_1 과 T_2 를 10년에서 50년으로 각각 변화시키면서 최적의 보수시기를 평가한 결과, T_2 의 증가에 따라 최적의 보수시기를 선정할 수 있는 기간이 뚜렷하게 증가하였다. T_1 이 가장 작은 10년 일 경우, T_2 가 10년에서 50년으로 연장됨에 따라 4.2년에서 8.0년으로 최적의 보수시기가 연장되었으며, T_1 이 50년 일 경우, T_2 가 동일하게 연장됨에 따라 5.9년에서 20.8년으로 크게 연장되었다.
3. T_1 과 T_2 를 독립적으로 가정하고 해석결과에 따른 회귀분석을 수행하여 확률해석을 수행하지 않더라도 보수횟수를 1회 줄일 수 있는 식을 제안하였다. 제안된 식은 초기 시공조건에서의 내구수명 (T_1)과 보수재를 통한 내구수명 (T_2)로 구성되어 있으므로 실험 등을 통하여 수명에 대한 확률변동성이 정의된다면 효과적으로 사용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A-1037548).

References

CEB. (1997). New Approach to Durability Design, CEB Bulletin **238**, 96–102.
 CEN. (2004). EN-1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structure, European Committee for Standardization, Brussels,

Belgium.
 Ishida, T., Chaube, R.P., Kishi, T., Maekawa, K. (1998). Modeling of pore content in concrete under generic drying wetting conditions, Concrete Library of JSCE, **31(564)**, 275–287.
 Izumi, I., Kita, D., Maeda, H. (1986). Carbonation, Kibodang Publication, Japan, 35–88.
 JSCE. (2007). Standard Specifications and Guidelines.
 Kwon, S.J. (2017). Probabilistic analysis of repairing cost considering random variables of durability design parameters for chloride attack, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Submitted.
 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(653753)**, 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.
 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.
 Nasir, M., Chong, H.Y., Osman, S. (2015). Probabilistic life cycle cost model for repairable system, IOP Conference series: Materials Science and Engineering, **78(2015)**, 1–8.
 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 2005 Triennial Congress, Toronto, Canada, 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 Structure*, **29(7)**, 1457-1464.

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

Vesikari, E. (1988). Service Life of Concrete Structures with regard to Corrosion of Reinforcement, Technical Reports 533, Technical Report Center of Finland, Finland, 29-128.

확률론을 고려한 탄산화된 RC 구조물의 최적 보수시기 해석

탄산화는 지하구조물에서 발생하는 대표적인 열화현상으로 내구성 문제를 야기하며, 이는 보수를 통하여 사용성능을 확보해야 한다. 본 연구는 확률론적인 방법을 고려하여 최적의 보수시기를 도출하며 초기 및 보수조건을 고려하여 복잡한 확률 해석 없이 최적의 보수시기 도출식을 제안하는 것이다. 이를 위해 초기시공에 따른 내구수명, 보수를 통해 연장된 내구수명, 그리고 각각의 변동성을 고려하여 보수횟수를 감소시킬 수 있는 기간을 평가하였다. 각각의 기간을 독립적으로 가정하여 10~50년간의 해석을 수행하였으며, 최적의 보수시기를 평가할 수 있는 식을 회귀분석을 통해 제안하였다. 변동계수의 변화는 보수횟수를 줄이는 데 큰 영향을 주지 못하지만 임계시점에서의 확률변화에 큰 영향을 주었다. 또한 보수재를 통한 내구수명의 증가는 보수횟수를 줄이는 데 큰 역할을 하였다. 제안된 식은 정량적인 수명의 변동성을 정의한다면 효과적인 유지관리 기법으로 사용될 수 있다.