



베이지안 기법을 이용한 해양 RC 구조물의 염해에 대한 LCC 모델 개발

정현준¹⁾ · 박흥민²⁾ · 공정식^{3)*} · 지광습³⁾ · 김규선¹⁾

¹⁾한국시설안전공단 ²⁾(주)아이엠기술단 ³⁾고려대학교 건축사회환경공학과

Development of a Successive LCC Model for Marine RC Structures Exposed to Chloride Attack on the Basis of Bayesian Approach

Hyun-Jun Jung,¹⁾ Heung-Min Park,²⁾ Jung-Sik Kong,^{3)*} Goang-Seup Zi,³⁾ and Gyu-Seon Kim¹⁾

¹⁾Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Goyang 411-758, Korea

²⁾Infra Asset Management Corporation, Seoul 138-818, Korea

³⁾Dept. of Civil & Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

ABSTRACT A new life-cycle cost (LCC) evaluation scheme for marine reinforced concrete structures is proposed. In this method, unlike the conventional life-cycle cost evaluation performed during the design process, the life-cycle cost is updated successively whenever new information of the chloride penetration is available. This updating is performed based on the Bayesian approach. For important structures, information required for this new method can be obtained without any difficulties because it is a common element of various types of monitoring systems. Using the new method, the life-cycle maintenance cost of structures can be estimated with a good precision.

Keywords : LCC, chloride penetration, bayesian approach, monitoring

1. 서 론

해양 환경에 건설되는 RC 구조물은 시간이 경과함에 따라 콘크리트 내부로 염소이온의 침투 및 확산이 발생하게 된다. 침투된 염소이온이 철근 깊이까지 확산을 하게 되면 철근에 부식이 발생하게 되며 콘크리트의 균열 발생 원인이 된다. 이러한 균열발생 원인으로 인해 염해 환경에 노출되어 있는 RC 구조물의 내구성능이 저하되게 되고, 결국은 콘크리트 피복의 박리 박락에 따른 구조물 파괴가 일어나게 된다. 따라서 콘크리트의 성능을 저하시키는 열화인자에 대한 설계 및 열화 메커니즘을 고려하여 구조물의 내구성을 향상시키는 설계를 해야 한다.¹⁾ 특히, 열화원인이 염해인 경우에는 심각한 구조물 파괴를 초래할 수 있다. 그러므로 구조물의 공용년수 동안에 대단위의 유지보수를 하지 않는 방법으로 설계단계에서 생애주기비용 (LCC)를 고려한 내구설계 등이 시행된다. 그러나 설계단계에서 고려한 유지관리 설계는 실 구조물이 운용되면서 여러 가지 환경적 요인과 시공적인 문제로 인하여 시간이 지남에 따라 초반에 설계되었던 생애주기비용 설계와는 다소 차이가 발생하게 된다. 일

반적으로 해양 구조물을 파괴하는 열화 조건 중에 염해의 경우, 구조물의 물리적인 수명은 철근 위치에서 임계 염소이온농도를 넘었을 경우 파괴되었다고 판단하게 된다. 실제 목표 수명을 갖지 못하더라도 열화 되는 시점을 적시에 예측하여 열화된 구조물을 유지·보수할 수 있어야 최소 비용으로 목표 내구수명을 다 할 수 있게 최대효과를 누릴 수 있다. 따라서 열화된 구조물의 내구성을 향상시키기 위하여 적정한 시기에 유지관리활동이 필요하며, 이 시기를 정확히 예측하는 것이 시설물의 안정성과 비용효율적인 면에서 매우 중요하다.

본 연구에서 제시하는 기법은 지속적으로 모니터링 데이터가 축적되는 실구조물의 경우 유용한 기법이라고 판단되며, 설계단계에서 가지는 여러 변수를 통계적 기법을 이용하여 상당부분 제거할 수 있을 것으로 판단된다.²⁾ 본 논문에서는 모니터링이 이루어지는 실구조물의 모델 변수가 가지는 불확실성을 합리적으로 고려하기 위해서 베이지안 기법을 선택하였고, 해양환경에 노출된 RC 구조물에 설계단계에 예측했던 생애주기비용과 설계 이후 베이지안 기법을 이용하여 불확실성을 고려하여 예측한 생애주기비용을 비교 및 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장은 전반적인 해양 RC 구조물의 열화 메커니즘 및 유지관리의 필요성, 본 논문의 적용성 등을 기술하였고, 제 2장은 베이지안 기법을 이용한 해양 RC 구조물 염해 내구성 예측을 기

*Corresponding author E-mail : jskong@korea.ac.kr

Received February 9, 2009, Revised March 20, 2009

Accepted March 26, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

술하였다. 제 3장~5장은 제 2장에서 연구한 염해내구성 예측을 통한 해양 RC 구조물의 생애주기비용 모델 제안 및 염해에 의한 생애주기비용 산정예시를 기술하였다. 제 6장은 본 논문의 결론이다.

2. 베이지안 기법을 이용한 해양 RC 구조물 염해 내구성 예측

2.1 해양 RC 구조물의 일차원 해석 모델

콘크리트 내부의 염화물량은 철근부식에 직접적으로 관여하는 자유 염소이온과 고정 염소이온으로 나눌 수 있다. 이 두 염소이온은 평형상태를 이루며 존재한다. 자유 염소이온은 철근 부식에 영향을 끼치는 직접적인 원인이다. 그러나 고정 염소이온은 해리가 발생되지 않는 한 철근 부식에 직접적으로 관여하지 않는다. 고정 염소이온은 일반적인 환경 속에서 해리되지 않지만 해안가와 같이 염분에 노출된 환경 속에서 내부의 고정 염소이온이 해리되어 자유 염소이온으로 변하게 된다. 또한 이러한 환경속의 구조물은 표면 습도가 높으므로 탄산화에 대한 영향이 작으므로 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물은 탄산화에 대한 영향을 고려하지 않고, 해저에서는 콘크리트 내부와 외부가 포화 되어있다고 가정한다. 논문의 적용 대상 구조물은 해양환경에 건설된 콘크리트 구조물이기 때문에 콘크리트 구조물 표면에서부터 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온의 해석을 위해서 Fick의 두번째 법칙을 이용하였다.³⁾

염소이온의 질량보존법칙에 의해 다음 식 (1)이 만족되어야 한다.

$$\frac{\partial C(X,t)}{\partial t} + \nabla \cdot J = I_{chloride} \quad (1)$$

여기서, $C(X,t)$ 는 시간 t 일 때, 콘크리트 내부 위치 X 의 염소이온 농도 (kg/m^3)이며, 염소이온 농도 (kg/m^3)이며, t 는 염소이온 확산이 일어나는 시간 (second), X 는 표면에서 측정된 거리 (mm), ∇ 는 미분 연산자이다. J 는 염소이온의 유속이고, $I_{chloride}$ 는 염소이온의 2차 단위텐서이다. 유속 J 는 Fick의 첫 번째 법칙으로 다음 식 (2)와 같다.

$$J = -D \cdot \nabla C \quad (2)$$

여기서, D 는 겔보기 염소이온 확산계수 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)이다. D 가 균질하고 등방성인 경우, 식 (1)과 (2)를 다음 식 (3)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C(X,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(X,t)}{\partial X^2} \quad (3)$$

여기서, $I_{chloride}$ 는 해석의 단순화를 위해 무시 하였다. 염소이온 확산계수 D_m 이 상수인 경우, 식 (3)의 해석적 해를 다음 식 (4)와 같이 표현하고 있다.

$$C(X,t) = C_s \left\{ 1 - \text{erf} \left(\frac{X}{2\sqrt{D_m t}} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서, erf 는 오차함수이고, C_s 는 표면 염소이온 농도 (kg/m^3)이다. 실험적인 식 (5)과 (6)을 사용하여 콘크리트 재령에 따른 확산계수 변화를 반영하였다. 위의 식 (4)에서 염소이온 확산계수 D_m 이 상수일 때 식 (2)를 통해 해석적인 해를 구할 수 있다. 하지만 실제로는 식 (5)과 (6)의 변화가 발생된다고 가정한다면, 식 (2)를 사용할 수 없다. 그러나 대부분의 실무와 연구에서 식 (5)와 (6)의 보정 값을 사용하고 있다.

$$D_m = \frac{D_0}{1-n} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n, (t < t_c) \quad (5)$$

$$D_m = D_0 \left[1 + \frac{t_c}{t} \frac{n}{1-n} \right] \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^n, (t \geq t_c) \quad (6)$$

여기서, t_c 는 염소이온 확산계수의 변화가 일어나지 않는 시점이고, 본 논문에서는 기존의 연구⁴⁾와 마찬가지로 30년으로 정하였다. t_0 는 콘크리트 재령인 28일로 정하였다. 그리고 D_0 는 시간 t_0 에서의 확산계수, 지수 n 은 시간의 존성 지수이다.

현재 일차원 모델 해석기법은 겔보기 확산계수를 이용하고 있고 염화물 분포를 예측하는 기법이 많이 수행되고 있는 반면, 확산 및 침투에 대한 염화물 이동 모델링이 시간 및 공간에서 연성적으로 해석되어야 함에도 불구하고 염화물 분포 및 이동에 대해서 모델링하는데 어려움이 있기 때문에 상기와 같이 염화물 이동 모델을 겔보기 형식으로 해석한다.⁵⁾

2.2 염해 내구성 분석

2.2.1 베이지안 기법

확률론적인 해석을 통한 모델을 정확하게 결정하기 위해서는 확률변수에 대한 충분한 데이터가 필요하다. 확률변수는 표준정규분포를 통한 통계적인 방법을 통하여 구해진 것이기 때문이다. 사전예측치는 통계적이고 결정론적인 방법에 의해 계산되지만 사후예측치를 계산할 때는 해석모델과 주변 조건 및 계측자료, 재료의 특성이 가지는 불확실성을 고려하여 사후예측치를 나타내야 한다.

본 논문에서는 Bazant 등⁶⁾이 장기처짐 문제에 적용하였던 베이지안 기법을 염해 예측 모델에 적용하여 LCC 설계에 이용하였다. 베이지안 기법을 이용한 염해 예측 모델은 구조물에 대한 모니터링 데이터가 필요하다. 초기 모델변수가 가지는 불확실성으로 인한 확률을 $P'(\underline{g})$ 라

고 하고, 계측 데이터의 추세가 고려된 불확실성에 대한 확률을 $P''(\underline{g})$ 로 표현한다. 이 두 확률 사이에는 베이스 이론에 의해서 다음 식 (7)과 같은 관계가 성립한다.⁷⁾

$$P''(\underline{g}) = c_1^* P(X|\underline{g})P'(\underline{g}) \quad (7)$$

여기서, $\underline{g}$ 는 모델변수이다. 본 논문에서는 초기 염소이온 확산계수 (D_0), 시간의존성 지수 (n), 표면 염소이온 농도 (C_s)를 모델변수로 사용하였다. c_1^* 은 전 확률 조건으로부터 결정되는 상수이다. $P(X|\underline{g})$ 는 모델변수 $\underline{g}$ 을 가질 때 계측 데이터 X 가 가지는 불확실성이다.

$$P(\underline{g}) = P(X) \quad (8)$$

단조 증가하는 문제인 경우 즉, 하중재하가 없는 크리프, 비가역적 염해침투 등인 경우 식 (8)이 성립된다. 즉, K 번째 구간의 모델상수의 불확실성은 부식예측의 불확실성과 같다.

2.2.2 라틴 하이퍼큐브 추출법을 이용한 예측치

라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법⁸⁾은 모델변수 공간에서 결과 데이터를 추출할 때, 골고루 추출되도록 각 모델변수의 범위를 동일한 확률의 K 개의 범위로 나눈 다음, 각 구간에서 하나씩 추출하되 중복되지 않도록 무작위로 K 개를 추출하는 방법이다. N 개의 모델변수 $\underline{g}$ 에 대해서 K 개의 값을 추출할 때는 원하는 수 K 개 배열을 형성한 후, 이중 하나의 배열에서만 중복되지 않도록 추출하는 방법이며, 그 결과로 모델변수 $\underline{g}$ 에 대한 $K \times N$ 의 행렬이 만들어진다. 라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법은 많은 수의 파라미터를 분석하는데 유용하며, 적은 모의실험을 수행하면서도 실험점들이 모델변수 영역에 골고루 분포되는 공간을 채우게 되는 특성을 가지고 있다.

모니터링을 통해 계측된 시간 t_m 에서 염소이온 농도 ($=1, 2, 3, \dots, M$)를 X_m 이라 하면, 초기 계측치를 이용해서 개선 전, 즉 모니터링을 통해 얻어지는 추가적인 데이터를 고려하지 않은 염화물 농도 X' 의 평균 $\bar{X}'$ 과 표준편차 $\sigma_m'^X$ 는 다음 식 (9)와 같다. 이 때, 등가의 확률을 가지는 구간을 k 개로 나누었다.

$$\bar{X}'_m = \frac{1}{K} \sum_k X_m'^{(k)}, \sigma_m'^X = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_k (X_m'^{(k)} - \bar{X}'_m)^2} \quad (9)$$

여기서, $\bar{X}'_m, \sigma_m'^X$ 는 각각 시간 t_m 의 함수이다. 시간 t_m 에서 X_m 에 해당하는 염화물 농도를 계측한 후에는 우도함수 (likelihood function) P_k 를 다음 식 (10)과 같이 구한다.

$$P_k = \exp \left[-\sum_m \frac{1}{2} \left(\frac{X_m - X_m'^{(k)}}{\sigma_m'^X} \right)^2 \right] \quad (10)$$

여기서, 우도함수의 표준편차 $\sigma_m'^X$ 는 기존의 실험치나 측

정 데이터로부터 추정해야 한다. 모델 예측치의 평균 $\bar{X}_m''$ 는 통계적 분포를 전술한 베이지안 기법을 사용하여 다음 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\bar{X}_m'' = \sum_k P''(X_m^{(k)})X_m'^{(k)} = c_o \sum_k p_k X_m'^{(k)} \quad (11)$$

개선된 염화물 농도의 평균 예측치 $\bar{X}_m''$ 의 표준편차 $\sigma_m''^X$ 는,

$$\sigma_m''^X = \sqrt{c_o \sum_k p_k (X_m''^{(k)} - \bar{X}_m'')^2} \quad (12)$$

이다.

2.3 해양 RC 구조물의 한계상태식

콘크리트 내부로 염분이온이 침투·확산하게 되면 시간이 지남에 따라 콘크리트 내부에 염소이온이 고착화하게 된다. 고착화된 염소이온은 축적되며, 철근 깊이의 염소이온이 일정 농도 이상이 되면 철근에 부동태 피막이 파괴된다. 혹은, 염소이온이 철근 주위를 침투하게 되면 상대적으로 낮은 pH에서도 부동태의 피막이 파괴되기도 한다. 이러한 피막 파괴현상은 철근의 부식을 야기하고 구조물의 내구성능을 저하하는 요인이 된다. 염소이온 농도가 특정치에 도달하여 철근 부식을 유발하는 시점을 사용성 한계상태로 정의하고, 이때의 부식발생 확률을 계산한다. 한계상태에 대한 부식 발생 확률을 구하기 위해 다음 식 (13)과 (14)와 같은 한계상태함수 (limit state function)로 정의하였다.

$$\underline{g} = \underline{g}(C_s, D_0, n), R = r(\underline{g}), S = s(\underline{g}) \quad (13)$$

$$G = R - S \quad (14)$$

여기서, R 은 임계 염소이온 농도 (C_{cr}), 하중함수 S 는 시간에 따라 변화하는 염소이온 농도며, $\underline{g}$ 는 함수를 의미한다. 한계상태함수 G 는 손상확률 P_f 로 나타낼 수 있다. 손상확률 P_f 보다 실무에서는 신뢰성 지수 β 를 이용하여 부식발생 확률을 나타낸다. 손상확률 P_f 와 신뢰성 지수 β 는 다음 식 (16)과 같은 관계가 있다.

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_G(g) dg \quad (15)$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G}, P_f = \Phi(-\beta) \quad (16)$$

여기서, $f_G(g)$ 는 확률밀도함수이고, σ_G 는 G 의 표준편차이며, μ_G 는 G 의 평균이다.

2.4 보수보강 시기 해석결과

본 논문은 내구성 문제의 설계변수 (design parameter)로 초기 염소이온 확산계수 D_0 와 시간의존성 지수 n , 표면 염소이온 농도 C_s 를 사용하였다. 또한, 라틴 하이퍼큐브 샘플 수는 18개 세트로 고정하였으며,²⁾ 만약, 다른 샘플 수를 추출할 때는 유사랜덤으로 계산하도록 하였다. 사전확률분포는 문헌⁴⁾을 참고해서 설계변수의 값을 정하였다. 그런데 이때 사용한 설계변수 값은 본 예제 구조물의 데이터와는 분명한 차이를 가지고 있다. 그래서 사전예측치 (prior distribution)는 현장에서 측정한 2개의 데이터로 보정하여 사후예측치 (posterior distribution)를 산정하였다. Costa 등^{9,10)}은 RC 구조물일 경우 ENV 1992-1-1¹¹⁾는 최소피복두께에 대한 규정을 40 mm 보다 크게 바뀌어야 한다고 기술하였다. 하지만 ENV 1992-1-1¹¹⁾의 최소피복두께는 40 mm로 규정되어 있다. 따라서 RC 구조물인 Dock 20은 건설이 될 당시의 규정인 BSI code의 규정을 따랐을 것으로 가정하고 본 논문에는 베이저안 기법을 적용할 때 피복두께를 40 mm로 두고 해석하였다.

Table 1은 Dock 20에서 측정한 염해 침투 데이터이다. 본 예제에서는 측정 데이터를 Dock 20이라 칭한다. 사전예측치를 구하기 위한 초기 설계변수의 데이터 값은 Table 2에 있는 값들을 사용하였다.

Fig. 1의 연한 선은 사전예측치 (prior distribution)이고, 진한 선은 본 기법을 통해 얻은 사후예측치 (posterior distribution)이다. 본 논문에 적용한 예제의 콘크리트 염소이온 임계치는 단위시멘트량이 300 kg/m^3 인 콘크리트에 대해서 시멘트 중량 대비 0.4%에 해당하는 1.2 kg/m^3 로 보았을 때 베이저안 기법의 적용유무에 따른 한계상태함수의 평균값과 신뢰성 지수의 차이는 다음 Figs. 2, 3과 같다.

Fig. 2를 보면 철근 위치의 염소이온 농도가 임계치에 도달하는 시기에 대한 사전예측치 (prior distribution)와 사후예측치 (posterior distribution)가 약 40개월 정도 차이를 보인다. 신뢰성 지수의 그래프인 Fig. 3에서도 마찬가지로 염소이온 임계치가 본 논문에 사용된 값보다 작거나 큰 값을 사용한다면, 한계상태함수의 평균값과 신뢰성 지수가 달라지면, 예측되는 잔존수명 값 또한 달라진다.

Table 1 Measured data in the field, Dock 20

C_x		Time (months)	
Type	Depth (mm)	36	48
Dock 20	40	0.300	0.384

Table 2 Variables for prior-estimation, Dock 20

Design parameters		Prior-estimation (mean, standard deviation)
Dock 20	$D_0 (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$	$N(6, 1.2)$
	n	$N(0.4, 0.08)$
	$C_s (\text{kg/m}^3)$	$N(9, 1.8)$

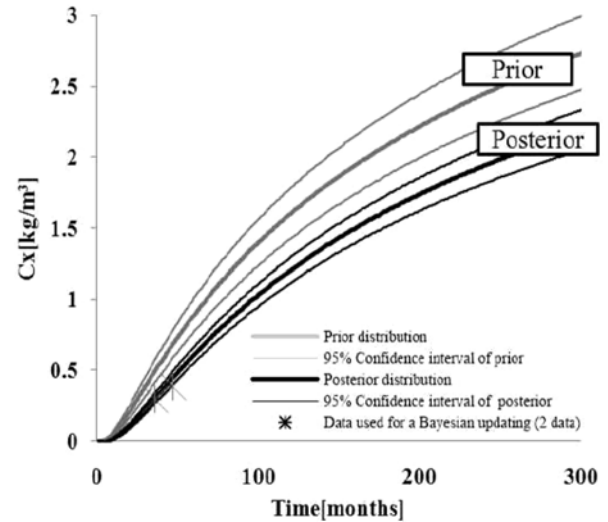


Fig. 1 The change of chloride concentration measured at 40 mm distance from the surface

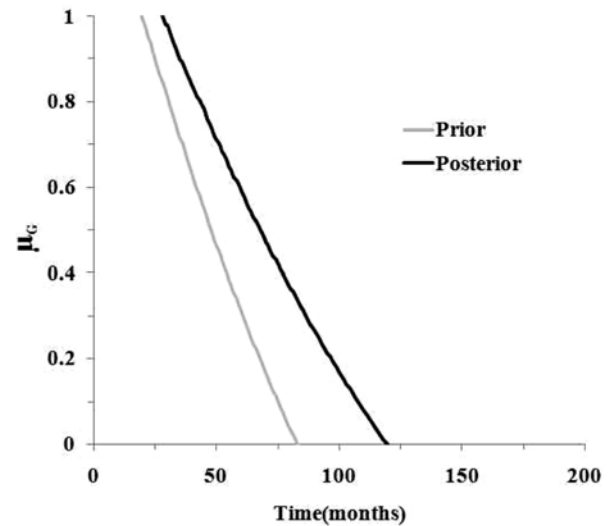


Fig. 2 The change of mean value for limit state function

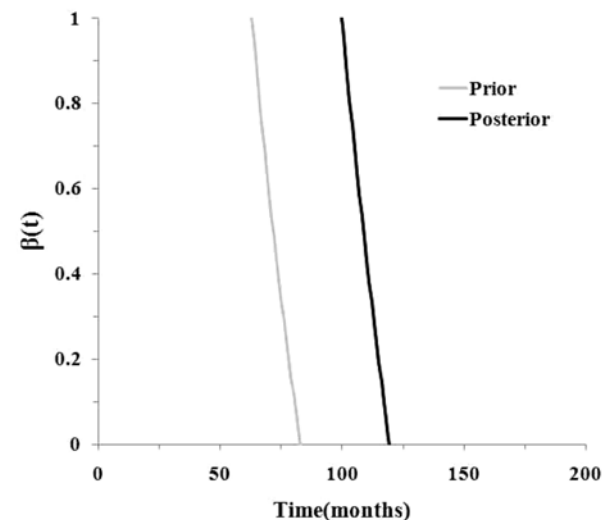


Fig. 3 The change of reliability index for limit state function

3. 염해 내구성 해석 및 생애주기분석 시나리오

Fig. 4는 염해 내구성 해석 및 생애주기비용 분석 절차 시나리오에 대한 순서를 단계별로 나타낸다. 생애주기비용 시나리오는 총 4단계의 과정으로 구성된다. 1단계에서 염해 해석 모델을 적용하고 2단계에서는 보수보강 시기에 대해서 베이지안 기법을 적용한다. 3단계에서 보수보강 시기를 결정한 후, 마지막 단계인 4단계에서 보수 보강시기에 대한 베이지안 업데이트의 전과 후의 결과를 비교하여, 이에 대한 생애주기비용 결과를 도출한다.

4. 해양구조물의 생애주기비용 모델 제안

4.1 해양구조물의 생애주기비용 분석 개요

생애주기비용은 시설물의 경제성 평가를 수행하기 위한 주요 수단으로서 구조물의 생애주기기간동안 고려해야 할 구조물의 중요한 기능 및 거동과 관련된 비용 분석 기법이다.

일반적으로 실무에서 활용되고 있는 생애주기비용 분석 모델은 설계단계에서의 생애주기비용 분석으로 기본계획 또는 기본설계 단계에서의 비용-효율적인 대안 선정 시 사용되며, 이렇게 선정된 대안으로 효율적인 예산수립 및 집행을 가능하게 해주는 기법이다. 유지관리 단계에서는 생애주기비용 분석을 통하여 최적유지관리 계획 수립과 최적보강설계에 적용할 수 있다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 Dock 20은 포르투갈의 서쪽해안인 세테나베라는 강어귀가 있는 부두에 위치해 있다. Dock 20에 있는 패널이 위치한 곳을 4년간 모니터링한 결과, 22번에 걸쳐 반복적인 침수가 발생한 해양구조물로서 생애주기비용 평가 중 특히 유지관리비용의 예측을 위하여 유지관리 조치 주기의 업데이트 전과 후의 주기를 시설물에 적용하여 비교함으로써 실질적인 비용관리 계획을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

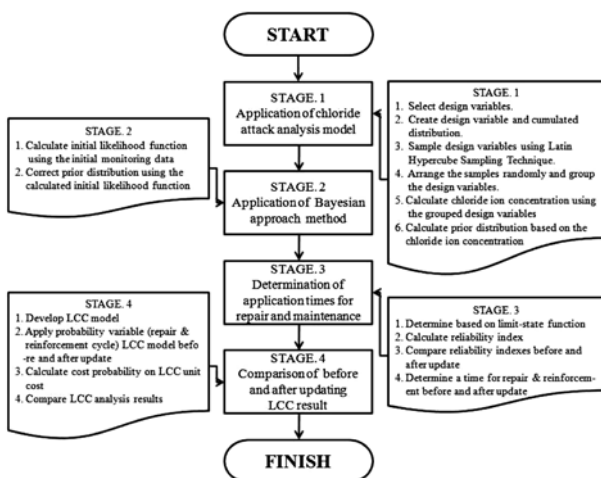


Fig. 4 Analysis procedure of durability against chloride attack and life-cycle cost

생애주기비용 분석 모델로는 확정적 모델과 확률적 모델이 있다. 최근 실무에서는 확정적 방법으로 생애주기비용 분석을 실시하는 경우가 대부분이나, 실질적인 생애주기비용 분석을 위해서는 사용 환경, 보수·보강이력과 관련된 많은 불확실성을 어떻게 합리적으로 처리하는가가 관건이라 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 불확실성 문제를 합리적으로 처리할 수 있는 확률적 방법(probabilistic approach)을 적용한다.

확률적 방법은 생애주기비용 분석을 위한 입력 변수의 확률적 특성치인 분포형태, 최확기대치, 변동성 등에 대한 입력데이터를 가지고 시뮬레이션기법(simulation technique)을 이용하여 생애주기비용 분석을 수행하는 방법이다. 이러한 확률적 방법은 확정적 방법과 비교할 때, 비용 항목이 발생 가능한 전체 범위에 컴퓨터 시뮬레이션 도구를 활용할 수 있기 때문에 광범위한 민감도 분석이 필요없는 합리적이며 과학적인 방법으로서 FHWA(Walls III & Smith, 1998)에서 추천하고 있다

4.2 해양구조물의 생애주기분석 모델

콘크리트 구조물이 내구성을 잃어가는 과정에서 적정시기에 유지보수를 할 경우 내구성을 회복하여 경제적으로 구조물 활용이 가능하나, 적정시기를 놓칠 경우 열화작용은 사용연한이 지날수록 가속화되어 대규모 공법을 적용해야 하거나 구조물을 교체해야 하는 시점에 이르게 된다.

본 연구에서 제시하는 생애주기비용 산정 모델은 베이지안 기법을 고려한 보수주기 업데이트를 통하여 최적의 구조물 보수시점을 예측할 수 있으며 이를 통해 막대한 비용과 시간을 절약할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 확률적인 생애주기비용 분석모델은 다음 식 (17)과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 5와 같은 생애주기비용분석 모델이 개발된다.

$$E[C_{TOT}(X, n_k)] = C_{INI} + \sum_{k=1}^N \frac{1}{(1+q)^{n_k}} \{E[C_{MAI}(X, n_k)]\} + \frac{1}{(1+q)^N} C_{DIS} \quad (17)$$

여기서, C_{TOT} 는 총생애주기비용 (life cycle cost)이고, C_{INI} 는 초기비용 (initial cost)이며, C_{MAI} 는 베이지안 기법을 이용하여 주기를 업데이트한 유지관리비용 (maintenance cost by Bayesian updating)이다. C_{DIS} 는 건설폐기처리비용 (salvage cost)이고, q 는 할인율 (discount rate)이며, n 은 경비지출년 (year of expenditure)이고, N 은 생애주기년 (life cycle year)이다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 베이지안 기법을 활용하여 생애주기비용 산정에 있어서의 보수 및 보강주기에 관한 입력변수의 확률적 특성치를 고려하였다. 그리고 염소이온 임계치가 1.2 kg/m^3 에 도달할

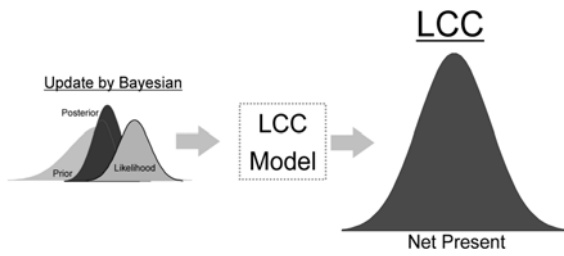


Fig. 5 Outline of probabilistic LCC analysis in consideration of uncertainty of repair cycle

경우를 보수 및 보강시점으로 판단하고 보수 및 보강을 시행하는 것으로 생애주기비용 산정을 수행하였다.

만약 충분한 통계 데이터가 있는 경우 그 확률분포와 변동성을 그대로 적용할 수 있지만, 기존의 생애주기비용 산정의 경우자료가 부족한 경우에는 전문가의 의견을 가지고 주관적인 확률 특성치를 통해 평가를 수행하였다. 이와 같이 생애주기비용 분석 시 예상되는 불확실성에 대해 전문가의 판단으로 수행하는 경우에는 전문가의 견해 차이로 인해 발생될 수 있는 위험요소가 있다는 결론을 가지고 있다.

본 연구에서 제시하고 있는 업데이트된 조치주기를 고려한 확률적 생애주기비용 분석방법은 생애주기비용 분석 시 예상되는 조치주기의 불확실성을 베이지안 기법을 통하여 업데이트된 확률분포의 형태, 즉 발생분포 및 누적분포의 형태로 가시화함으로써 비용 및 위험요소에 대한 보다 정확한 예측을 통하여 실질적인 비용계획 수립에 매우 유리한 방법이다. 그리고 베이지안 업데이트 전과 후의 조치주기로 생애주기비용을 비교하여 경제적인 유지관리활동이 이루어지도록 하고, 또한 구조물 환경에 따른 정확한 생애주기비용 변화를 예측할 수 있게 한다.

5. 생애주기비용 산정예시

5.1 생애주기비용 산정을 위한 입력변수 및 가정사항

본 연구에서는 생애주기비용 산정을 위한 비용항목으로 BSI CODE¹¹⁾에 따라 콘크리트 피복두께를 40 mm로 하였고 대상시설물로는 포르투갈의 서쪽해안인 세테나베라는 강어귀가 있는 부두에 위치한 Dock 20이다. 생애주기비용산정시 초기비용의 경우는 동일하며 해체폐기비용은 고려하지 않았다. 발생하는 유지관리비용만을 비교 분석하였고 이때 고려한 변수는 구조물의 표면염화물량, 초기 염소이온 확산계수, 콘크리트 피복두께, 확산계수의 시간 의존성 지수이다.

Table 3은 KCI(2004)에서 규정하고 있는 내구성 단계별 목표 내구 수명에 관해서 정의하고 있다. 철근콘크리트 구조물의 목표 내구수명은 “구조체 및 부재에 대규모 보수를 필요로 하지 않고 철근부식이나 콘크리트의 중대한 재료적 성능저하가 생기지 않는 것이 예정되는 기간”으로 정의할 수 있고, “철근의 부식이 시작되는 시

Table 3 Durability by target service life of the domestic concrete structures

Durability	Description	Target service life
1st level	Structure that requires an extremely high level of durability	100 years
2nd level	Structure that requires a high level of durability	65 years
3rd level	Structure that requires a low level of durability	30 years

기”를 수명으로 산정하는 경우가 많다. 또한, 콘크리트 내부로 철근의 부식이 진행되고 있고, 콘크리트 표면에는 전혀 열화의 징후가 없는 기간을 보수시점으로 정의하였다.¹²⁾

5.2 대상 구조물의 적용항목 및 보수보강 공법

염해에 의한 콘크리트 구조물의 보수보강 공법으로는 일반적으로 크게 단면 보강+표면 피복, 연속 섬유 접착, 전기 방식, 재알칼리화+표면 피복, 탈염+표면 피복, 해체, 갱신, 표면 피복 (예방), 전기 방식 (예방) 공법 등이 있다.

본 연구에서는 염해에 의한 콘크리트 구조물의 대표적인 보수 방법인 철근부식 보수 시스템공법을 적용하여 생애주기비용을 산정하였다. 철근부식 보수 시스템공법은 염해 철근 부식된 콘크리트를 파괴 후 열화원인 치료 및 단면복구시스템 (두께 50 mm, 폭 100 mm)을 적용하는 공법으로, 열화원인의 화학적 치료 및 콘크리트의 표면강화를 시행하는 공법이다. 보수면적은 1 m²이고 단가는 248,673원/m² (2001년 건교부 표준품셈 적용)을 적용하였다.

5.3 생애주기비용 산정

본 연구에서 생애주기비용은 불확실성 평가를 위해 확률적 생애주기비용 방법을 선정하여 적용하였다. 유지관리 조치주기 재산정을 위하여서는 베이지안 기법을 선택하였고, 해양환경에 노출된 RC 구조물의 설계단계에서 예측했던 유지관리 조치주기를 고려한 생애주기비용과 설계이후 베이지안 기법을 이용하여 유지관리 조치주기의 불확실성을 고려하여 예측한 생애주기비용을 비교 및 분석하였다. 확률분석은 일반적으로 확률적 LCC분석시 사용되는 몬테카를로 시뮬레이션 (MCS)기법을 활용하였다. Figs. 6과 7에서 보이는 바와 같이 유지관리 조치주기의 업데이트 후의 생애주기비용은 업데이트전의 생애주기비용보다 업데이트를 통하여 변수의 불확정성이 감소하였다. 결과적으로 염소이온 임계치에 도달하는 주기는 업데이트 전에는 82개월이고 베이지안 업데이트 후에는 120개월로 산정되었다. 즉, 불확실성을 고려할 경우 설계단계에서 예측한 결과보다 조치주기가 길어지므로 조치횟수가 감소하여 생애주기 비용이 감소된다.

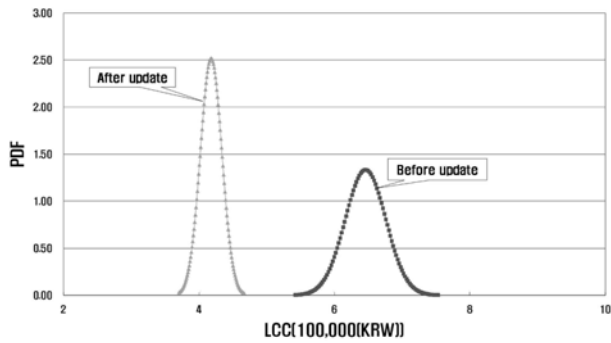


Fig. 6 Existing and improved LCC probability graphs (PDF)

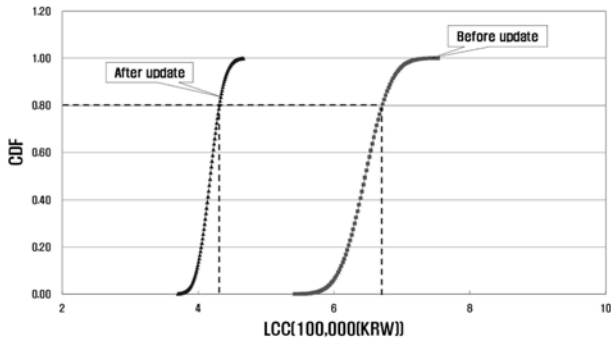


Fig. 7 Existing and improved LCC probability graphs (CDF)

Fig. 8은 베이지안 업데이트 전과 후의 대상시설물의 생애주기간 성능변화 곡선이다.

Table 4는 업데이트 전과 후의 조치주기를 비교하였는데 베이지안 업데이트 전후의 조치주기 차이는 약 38개월이 발생되었고 주기의 표준편차 또한 19% 감소되어 불확실성이 감소되었음을 알 수 있다. Table 5에서 이러

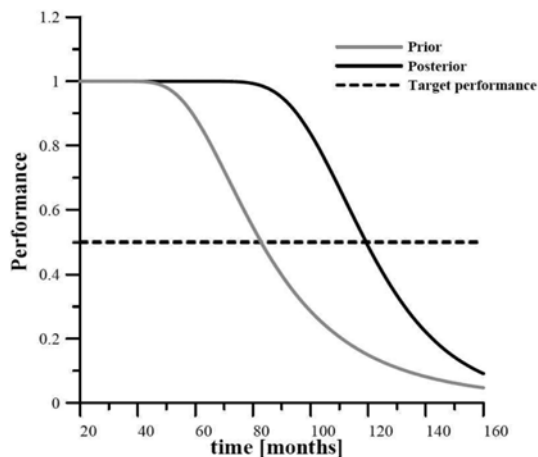


Fig. 8 LCP model

Table 4 Comparison of intervention interval between before and after updating according to Bayesian

	Before updating	After updating
Mean value	82 months	120 months
Standard deviation	0.389	0.316

Table 5 Comparison of LCC results

	Category	Cost
Before update	Initial cost	-
	Maintenance cost	KRW 645,810
After update	Initial cost	-
	Maintenance cost	KRW 430,361

한 차이에 따른 비용변화를 산정하였다. Table 5의 결과, 조치 단위 면적당 약 215,449원의 실질적인 생애주기비용의 차익이 발생됨을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 생애주기비용 (LCC) 산정변수를 DB와 입력자료를 통하여 평균적인 수치를 적용하여 산정하여 온 기존 생애주기비용 산정 모델과 달리 주요 변수의 환경적, 구조적 요인을 고려하고 확률적 분석을 통해 좀 더 실질적인 적용을 위한 모델을 개발하였다.
- 2) 해양 콘크리트 구조물의 내구성 저하를 베이지안 기법을 통해 예측하여 정량적으로 최적의 보수보강시기를 결정할 수 있었고 이를 생애주기비용 모델에 적용 함으로써 해양 콘크리트 구조물 생애주기비용의 업데이트 전후로 발생된 비용의 차이를 비교할 수 있다.
- 3) 본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 생애주기비용을 비교한 결과, 업데이트 전과 후에 보수주기의 표준편차가 19% 감소되어 불확실성이 감소되었음을 알 수 있다
- 4) 본 생애주기비용 개발 모델은 정확한 보수보강시기를 예측함으로써 적절한 보수보강시기에 구조물의 성능을 확보할 수 있다. 이를 통해서 구조물의 유지관리로 발생하는 막대한 비용과 시간을 절약할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설핵심기술연구개발사업 04 핵심기술 C02와 06 건설핵심 D20의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Boulfiza, M., Sakai, K., and Banthia, N., et al., "Prediction of Chloride Ions Ingress in Uncracked and Cracked Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 1, 2003, pp. 38-48.
2. 정현준, 지광습, 공정식, 강진구, "베이지안 기법을 이

- 용한 염해 콘크리트구조물의 내구성 예측,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 77~88.
3. Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*, Oxford University Press, 1975, pp. 48~73.
 4. 김지상, 정상화, 김주형, 이광명, 배수호, “염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 2호, 2006, pp. 239~248.
 5. 윤인석, “시멘트 수화 특성 및 탄산화를 고려한 콘크리트의 임계염소이온량에 대한 해석 기법,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, 2007, pp. 367~375.
 6. Bazant, Z. P. and Kim, J. K., “Segmental Box Girder-Deflection Probability and Bayesian Updating,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 115, No. 10, 1989, pp. 2528~2547.
 7. Ang, A. H. S. and Tang, W. H., “Probability Concepts in Engineering Planning and Design,” *Basic Principles. John Wiley and Sons*, Vol. 1, 1975, pp. 329~359.
 8. Mckay, M. D., Beckman, R. T., and Conover, W. J., “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis Output from a Computer Code,” *Technometrics*, Vol. 21, 1979, pp. 239~245.
 9. Costa, A. and Appleton, J., “Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment-Part I: Main Parameters Affecting Chloride Penetration,” *Materials and Structures*, Vol. 32, No. 218, 1999, pp. 252~259.
 10. Costa, A. and Appleton, J., “Chloride Penetration into Concrete in Marine Environment-Part II: Prediction of Long Term Chloride Penetration,” *Materials and Structures*, Vol. 32, No. 219, 1999, pp. 354~359.
 11. ENV 1992-1-1 : Eurocode 2, Design of Concrete Structures, Part 1-1 : General Rules and Rules for Buildings, 2004, pp. 49~52.
 12. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2004, 300 pp.

요 약 본 논문은 해양 RC 구조물의 새로운 생애주기비용 (LCC) 평가 모델을 제시한다. 이 모델 방법은, 기존의 LCC 평가 모델과 달리, 구조물을 설계하는 동안 추가적인 염화물 침투의 새로운 데이터가 있을 때 계속적으로 생애주기비용을 업데이트 할 수 있다. 이는 베이지안 기법을 통하여 이루어진다. 일반적인 중요 구조물에서는 각 부재에 대한 다양한 모니터링 시스템을 이용하기 때문에 어려움 없이 베이지안 기법에 필요한 데이터를 얻을 수 있다. 베이지안 기법을 사용하여 구조물의 생애유지 관리비용을 높은 정밀도로 예측할 수 있다.

핵심용어 : 생애주기비용, 염소이온 침투, 베이지안 기법, 모니터링