베이지안 기법을 이용한 해양 구조물의 내구성 평가

Durability Assessment for Structures in Marine Environment Using a Bayesian Approach

정현준* · 지광습**
Jung, Hyunjun · Zi, Goangseup

1. 서 론

최근에 콘크리트 구조물이 건설되고 있는 현장들의 건설 환경이 열악해지고 있다. 이런 환경 중 콘크리트 구조물에 있어서 해양환경 하에 건설이 될 경우에는 물리적, 화학적 부식작용에 의하여 콘크리트의 구조성능의 저하가 유발된다. 구조성능을 저하시키는 부식작용 중 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 경우에는 구조성능 저하를 일으키는 주요인으로 해수중의 염소이온, 황산염이온 및 마그네슘이온 등의 염류들이 시멘트 수화물과 반응하여 콘크리트의 열화를 발생시키는 화학적 요인을 들 수 있다. 특히, 열화인자 중 염해에 의한 콘크리트 구조성능저하가 주로 일어나게 된다. 그럼에도 불구하고 건설현장에서 해사의 사용과 제빙화학제를 사용하고 있어서 콘크리트의 염해에 대한 부식작용을 더욱 가속화 시키고 있다. 하지만 콘크리트 구조물에 기대하는 사용 수명은 상대적으로 증가하고 있어서 구조물의 파괴와 안전성에 대한 내구성 문제에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한 콘크리트 구조물의 설계시공 및 개보수에 대한 유지관리 시기의 적정한 장기예측이 필요하다.
기존의 콘크리트 구조물의 설계에 있어서 설계자들은 대부분 재료의 강도특성에 주의를 기울여 왔으나 최근에 들어서는 구조물의 수명예측을 위한 재료의 내구성에도 많은 연구를 하고 있다. 대부분의 콘크리트 구조물은 내구성을 고려한 설계에 의해서 구조성능저하에 대한 저항력을 가질 수 있었다. 하지만 콘크리트 구조물의 명시적인 사용수명의 정의 없이 일반적인 콘크리트의 건전성을 확보를 목적으로 설계 및 시공을 하고 이를 통하여 간접적으로 내구성을 보증하고 있어서 구조물이 가지는 불확실성을 고려하지 못한 문제점을 그대로 나타내고 있는 실정이다.

따라서 본 논문에서 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 대한 불확실성을 고려한 베이지안 기법을 사용하여 잔존수명을 예측하였다.

2. 확정론적 염해 내구성 분석

표면으로부터 콘크리트 내부로 침투하는 염분의 분포를 해석하기 위해 다음과 같은 Fick의 2법칙에 근거한 편미분 방정식을 사용한다 (Crank, 1975).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial X^2} \tag{1}$$

여기서, $C(x,t)$ = t시간 동안 염분이온에 노출된 표면으로부터 x만큼의 거리에 위치한 콘크리트의 염분이온 농도 (kg/m^3)이며, t = 염소이온 확산이 일어나는 시간 (second), x = 표면에서 측정된 거

* 학생회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 · 석사과정 - 발표자
** 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail: g-zi@korea.ac.kr

리 (mm), D = 염분이온 확산계수 ($\times 10^{-12} m^2/s$)이다. 초기염소이온 농도 C_0 (kg/m^3)를 영으로 하고, 확산계수의 균질성을 가정하면 일차원 문제에 대해 식(2)의 해석적인 해를 얻을 수 있다 (Crank, 1975).

$$C(x,t) = C_s\left(1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_m t}}\right)\right) \tag{2}$$

여기서, erf = 오차함수, C_S = 표면 염분이온 농도 (kg/m^3)이다. 콘크리트 재령에 따른 확산계수의 변화를 반영하기 위해 다음과 같은 실험적인 식을 사용한다.

$$D_m = \frac{D_0}{1-n}\left(\frac{t_0}{t}\right)^n, \quad (t < t_c) \tag{3}$$

$$D_m = D_0\left[1 + \frac{t_c}{t}\frac{n}{1-n}\right]\left(\frac{t_0}{t_c}\right)^n, \quad (t \geq t_c) \tag{4}$$

여기서, t_c는 염소이온 확산계수의 변화가 일어나지 않는 시점이다. D_0는 시간 t_0에서의 확산계수, 지수 n은 시간에 따른 염소이온 확산계수의 변화를 나타내는 계수이다. 그리고 식 (2)는 염소이온 확산계수 D가 상수일 때 얻어진 해석적 해이므로 엄밀한 관점에서는 식 (3)과 (4)의 변화를 가정할 때, 식 (2)를 사용할 수는 없다. 하지만 식 (3)과 (4)의 보정을 실무에서 받아들여지고 있다.

3. 베이지안 기법에 근거한 염해 내구성 분석

3.1 염해 문제에 대한 베이지안 기법

염해 문제에 대해서는 Bazant 외(1989)의 장기처짐 문제에 적용했던 베이지안 기법을 이용하여 모델 변수들이 가지는 불확실성을 고려하였다. 초기 모델변수가 가지는 불확실성으로 인한 확률을 $P'(\underline{\vartheta})$라고 하고, 계측 데이터의 추세가 고려된 불확실성 $P''(\underline{\vartheta})$의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$P''(\underline{\vartheta}) = c_1^* P(\underline{X}|\underline{\vartheta}) P'(\underline{\vartheta}) \tag{5}$$

여기서, $\underline{\vartheta}$는 모델변수, 가령 염소이온 확산계수, 시간적 의존지수, 콘크리트 피복두께 등이며, c_1^*는 전 확률 조건으로부터 결정되는 상수이다. 모델변수 $\underline{\vartheta}$일 때 계측 데이터 $\underline{X}$가 가지는 불확실성이다. 식 (5)을 확률분포함수 개념을 이용하면 연속적으로 표현할 수 있다. 즉,

$$f''(\underline{\vartheta}) = c_1^0 f(\underline{X}|\underline{\vartheta}) f'(\underline{\vartheta}) \tag{6}$$

여기서, f는 확률밀도함수를 의미하고, c_1^0는 상수이다. 변수 $\underline{\vartheta}$의 크기가 작을 경우에는 $P'(\underline{\vartheta})$에 대한 해석적인 표현이 가능하지만, 보다 복잡한 문제에 대해서는 샘플 추출을 이용한 수치적 접근이 더 유용하다. 만약 모델상수 $\underline{\vartheta}$의 확률 $P'(\underline{\vartheta})$를 등가의 확률을 가지는 구간으로 분할하면 식(2)의 $P'(\underline{\vartheta})$는 각 구간에서 미리 정해진 확률에 해당하는 상수로 바뀌게 된다. 즉,

$$f''(\underline{X}^{(k)}) = c_1 f(\underline{X}^{(k)}|\underline{\vartheta}^{(k)}) \tag{7}$$

여기서, 단조 증가하는 문제인 경우에는 즉, 하중재하가 없는 크리프, 비가역적 염해침투 등인 경우 $P(\underline{\vartheta})$는 $P(\underline{X})$와 같게 된다. 즉, k번째 구간의 모델상수의 불확실성은 부식예측의 불확실성과 같게 된다. 모니터링을 통해 계측된 부식 데이터를 X, 앞으로 예측해야 할 염화물에 의한 부식을 Y라고 하면, X_m는 시간 t_m에서 측정한 염화물 농도 (m=1, 2, 3, ⋯M)이고, Y_i 는 시간 t_i에서 예측한 염화물 농도 (i=1, 2, 3, ⋯I)이다. 초기 계측치를 이용해서 개선 전, 즉 모니터링을 통해 얻어지는 추가적인 데이터를 고려하지 않은 시간 t축을 t_i의 염화물 농도 $X^{'}$와 $Y^{'}$의 평균과 표준편차를 다음과 같이 주어진다. 앞서 언급했듯이 k개의 샘플링을 이용하였다.

$$\overline{X_m^{'}} = \frac{1}{K}\sum_k X^{'(k)}_m \;,\; \sigma_m^{'X} = \sqrt{\frac{1}{K}\sum_k (X_m^{'(k)} - \overline{X_m^{'}})^2} \tag{8}$$

$$\overline{Y_i^{'}} = \frac{1}{K}\sum_k Y_i^{'(k)} \;,\; \sigma_i^{'Y} = \sqrt{\frac{1}{K}\sum_k (Y_i^{'(k)} - \overline{Y_i^{'}})^2} \tag{9}$$

시간 t_m에서 X_m에 해당하는 염화물 농도를 계측하고, 이의 통계적 분포를 전술한 베이지안 기법을 사용한 후, 모델 예측치의 평균 $\overline{X_m^{''}}$ 과 $\overline{Y_i^{''}}$ 그리고 우도함수(likelihood function) p_k는 다음과 같다. 여기서, 우도함수의 표준편차 σ_m^X는 기존의 실험치나 측정 데이터로부터 추정해야 한다. 개선된 염화물 농도의 예측치 $\overline{X_m^{''}}$ 과 $\overline{Y_i^{''}}$ 의 표준편차 $\sigma^{''X}_m$과 $\sigma^{''Y}_i$는,

$$\sigma_m^{''X} = \sqrt{c_o\sum_k p_k\left(X_m^{''(k)} - \overline{X_m^{''}}\right)^2} \tag{10}$$

$$\sigma_i^{''Y} = \sqrt{c_o\sum_k p_k\left(Y_i^{''(k)} - \overline{Y_i^{''}}\right)^2} \tag{11}$$

이다.

3.1 염해 문제에 대한 베이지안 기법

라틴 하이퍼큐브 샘플 추출법은 입력변수 공간에서 결과 데이터를 추출할 때 골고루 추출되도록 각 입력 변수의 범위를 n개의 범위로 나눈 다음, 각 구간에서 하나씩 추출하되 중복되지 않게 랜덤하게 n개를 뽑는 방법이다. 전체적으로 콘크리트 구조물의 효율적으로 표본을 추출하기 위해서는 무작위성을 유지하면서 입력변수들의 값이 전 범위에서 가능하게 추출 되도록 함이 중요하다.

4. 염분 침투의 한계상태식

염소이온 농도가 특정치에 도달한 시점을 사용성 한계상태로 정의하고, 이때의 부식발생 확률을 계산한다. 한계상태에 대한 부식 발생 확률을 구하기 위해 다음과 같은 한계상태함수(limit state function)로 정의할 수 있다.

$$\underline{\vartheta} = \underline{\theta}[C_S, D_0, n], \quad R = r(\underline{\vartheta}), \quad S = s(\underline{\vartheta}) \tag{12}$$

$$G = R - S \tag{13}$$

여기서, R은 임계염소이온 농도(C_{cr}), 하중함수 S는 시간에 따라 변화하는 염소이온 농도며, $\underline{\theta}$는 함수를 의미한다. 하중에 저항하는 저항 성능함수 R과 하중함수 S를 모두 확률변수 함수로 표현할 수 있기 때문에 한계상태함수 G에 대해 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다. 손상확률 P_f와 신뢰성 지수 β는 다음과 같은 관계가 있다.

$$P_f = \int_{-\infty}^{0} f_G(g)\, dg \tag{14}$$

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad , \quad P_f = \Phi(-\beta) \tag{15}$$

여기서, σ_G는 G의 표준편차이고 μ_G는 G의 평균이다.

6. 적용예제

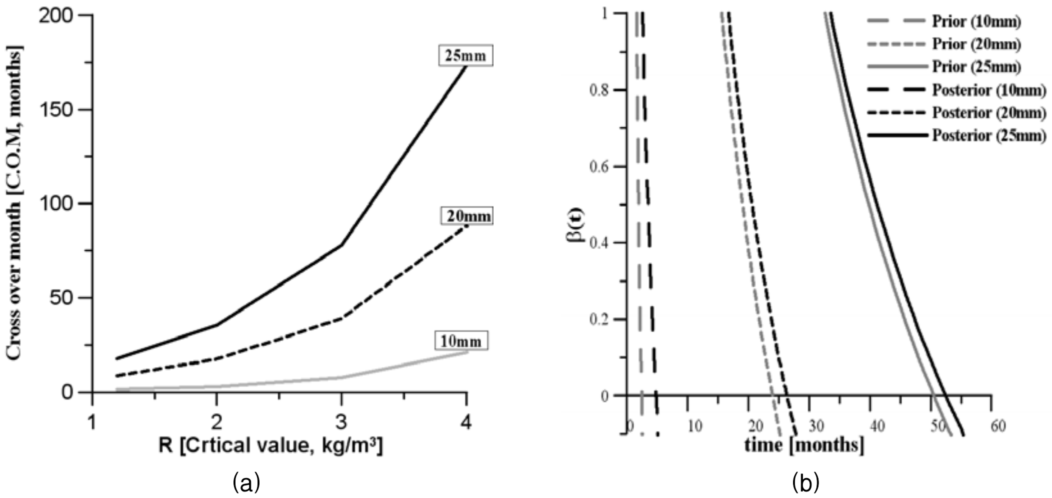

그림 1. 포르투갈의 서쪽해안인 세테나베에서 1992～1997년까지 측정한 염해 침투
(a) 각 피복두께별 C.O.M, (b) 피복두께별 신뢰성지수

7. 결 론

1) 한계상태함수에서 저항치인 R값을 정할 때 보통 철근 부동태가 일어나는 염소이온 농도 임계값인 $1.2kg/m^3$를 사용한다. 그러나 본 예제에서는 C.O.M을 이용한 그래프를 이용하여 합리적인 R값인 $2.5kg/m^3$로 정해 주었다.
2) 염해를 받는 국외의 콘크리트 구조물에 대한 조사 자료를 기반으로 확률적 내구성 평가를 한 결과는 다음과 같다. 임계염소이온 농도를 $2.5kg/m^3$로 정한 경우, 포르투갈 서쪽해안 세테나베(FO)는 피복두께가 $25mm$였을 경우에 약 4년 5개월 이후에 손상이 발생하였다.

감사의 글

본 연구은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2005년도 05 건설핵심 D11과 05 첨단융합 B01의 지원으로 이루어졌습니다.