

# 해양 콘크리트 구조물에 대한 Level II 수준에서의 염소이온침투 신뢰성 해석

## Reliability Analysis of Chloride Ion Penetration based on Level II Method for Marine Concrete Structure

한 상 훈\*

Han, Sang-Hun

### Abstract

Due to uncertainty of numerous variables in durability model, a probabilistic approach is increasing. Monte Carlo simulation (Level III method) is an easily accessible method, but requires a lot of repeated operations. This paper evaluated the effectiveness of First Order Second Moment method (Level II method), which is more convenient and time saving method than MCS, to predict the corrosion initiation in harbor concrete structure. Mean Value First Order Second Moment method (MV FOSM) and Advanced First Order Second Moment method (AFOSM) are applied to the error function solution of Fick's second law modeling chloride diffusion. Reliability index and failure probability based on MV FOSM and AFOSM are compared with the results by MCS. The comparison showed that AFOSM and MCS predict the similar reliability index and MV FOSM underestimates the probability of corrosion initiation by chloride attack. Also, the sensitivity of variables in durability model to corrosion initiation probability was evaluated on the basis of AFOSM. The results showed that AFOSM is a simple and efficient method to estimate the probability of corrosion initiation in harbor structures.

### 요 지

콘크리트 구조물의 내구성 해석 변수들의 변동성과 불확실성으로 인해 확률론적인 접근법의 사용이 증가되어 왔다. 특히, 몬테카를로시뮬레이션 방법(Level III 방법)은 접근성의 용이함으로 인해 많은 내구신뢰성 해석에 사용되어왔지만, 결과를 얻기위해서는 수 십만번의 반복계산이 필요하다. Level II 수준의 신뢰성 해석법인 일계이차모멘트법(FOSM)은 MCS법과 비교할 수 없을 정도의 짧은 시간에 신뢰도지수나 파괴확률을 계산할 수 있어, 유효성만 검증된다면 편리성과 신속성으로 인해 폭넓은 사용이 가능할 것이다. 본 연구에서는 FOSM법과 MCS법에 의한 부식확률(내구성 파괴확률)을 서로 비교하여 FOSM법의 유효성을 검증하고 각 내구성 해석변수들의 변동성이 부식확률에 미치는 영향을 검토하였다.

**Keywords :** Corrosion initiation probability, Durability, FOSM, Reliability

**핵심 용어 :** 부식확률, 내구성, 일계이차모멘트법, 신뢰도,

\* 정희원, 한국해양연구원 선임연구원

E-mail : shhan@kordi.re.kr 031-400-6345

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

항만구조물은 고부식성의 해양환경에 노출됨에 따라 육상구조물에 비해 내구성 저하가 발생할 잠재적인 요인이 크다. 이러한 항만구조물의 내구성 저하현상 중에서 가장 일반적인 것이 해수 염소이온의 콘크리트 구조물 내부로의 침투에 의한 염해이다. 염해에 대한 설계나 해석은 염소이온 확산방정식의 해인 에리함수로 표현된 식을 사용하는 방법과 유효요소법을 적용시키는 방법이 있다. 사용의 간편성과 접근의 용이성으로 인해 에리함수로 표현된 염소이온 확산식을 이용하는 것이 일반화되어 있으며 시방서에서도 이에 대한 자세한 세부사항을 제시하고 있다.<sup>(1)</sup>

최근 들어, 구조물의 설계와 해석에 기존의 하중저항계수설계법보다 수준이 높은 신뢰성 이론을 도입하는 사례가 증가하고 있으며, 콘크리트에 대한 설계기준도 고수준의 신뢰성 이론의 적용이 필요한 성능중심의 설계법으로 변환되는 추세이다. 이러한, 경향에 따라 콘크리트 구조물의 내구성 해석에서도 Level III 수준의 신뢰성 해석법인 몬테칼로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)을 적용하여 구조물을 설계하거나 해석한 사례가 증가하고 있다.<sup>(4)(8)(9)</sup> 그러나, MCS법은 하나의 해를 얻기 위해서 수십만 번의 반복계산이 필요하고, 더구나 입력변수를 바꾸면서 최적의 피복두께나 배합 등의 도출이 필요할 경우에는 수백에서 수천만 번의 반복계산이 필요하다. 한편, 대부분의 염해해석에 사용되는 해석변수들은 정규분포로 가정되어 해석이 수행되고 있으며, 사용되는 지배방정식도 에리함수로 표현된 확산방정식이 주류이다. 이러한 조건에서는 Level III 수준의 MCS법 뿐만 아니라 Level II 수준의 일계이차모멘트법(first order second moment method, FOSM)이나 이계이차모멘트법(second order second moment method, SOSM)도 충분히 신뢰할 수 있는 신뢰성 해석결과를 제공할 가능성이 많다. 또한, Level II 수준에서 항만구조물의 내구 신뢰성해석이 가능하다면 간단한 스프레드시트를 이용해서도 신뢰성 설계가 가능하므로 내구성에 대한 신뢰성 해석의 접근성과 편리성이 크게 증가될 것이다.

본 연구에서는 항만구조물의 내구성 해석 시에 사용되는 MCS 기반 신뢰성 기법의 사용성과 접근성을 개선하기 위해 Level II 수준의 신뢰성 기법의 이용 가능성을 평가하고자 한다. 이를 위해, 평균 일계이차모멘트법과 개선된 일계이차모멘트법을 이용하여 내구성 해석을 수행하고 그 결과를 MCS법과 비교한다. 또한, 내구성 해석 입력변수들의 변동성이 내구성 파괴 확률에 미치는 영향을 정량적으로 파악하고자 한다.

## 2. 신뢰성 이론 기반 내구성 해석

### 2.1 신뢰성 이론

공학문제에서 외부하중이나 재료상수와 같은 해석변수들은 특정값으로 고정되어있는 것이 아니라 일정한 기댓값을 중심으로 임의적으로 분산되어있다. 또한, 구조해석이론 자체도 여러 가정들을 포함하고 있어 결정론적인 해석방법만으로 공학문제를 해석하는 것은 어려움이 적지 않다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 많은 시방서와 구조설계기준들은 신뢰성 이론을 차용하여 Level I 수준의 하중저항계수설계법을 제시하고 있다. 그러나, 하중저항계수설계법은 해석변수들의 변동성이 사전에 정해져 있어 지역적인 특성이나 구조설계 환경변화 등의 요인을 고려하는 것은 한계가 있어 Level III나 Level II 방법의 적용이 증가하고 있다.

Level III 방법은 구조물의 파괴에 관련된 모든 확률변수의 평균, 분산, 결합확률밀도함수를 이용하여 한계상태식이 0보다 작을 확률을 구하는 것이다(기호의 설명은 6장 참조).

$$Z = R_{resistance} - L_{loading} \quad (1)$$

$$P_f = P[Z \leq 0]$$

대부분의 공학문제에서 한계상태방정식을 직접 적분하여 파괴확률을 구하는 것이 상당히 어렵기 때문에 수치적인 반복계산법인 Monte Carlo Simulation법을 일반적으로 많이 사용한다. MCS법은 입력변수들의 확률밀도함수를 이용하여 각 변수들의 확률특성이

반영된 표본집단을 생성하고 생성된 표본집단을 한계 상태방정식에 대입하여 0보다 작은 값이 계산되면 이를 파괴로 규정하여 표본집단의 개수와 파괴된 개수를 바탕으로 파괴확률을 산정하는 방법이다.

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[Z(x) \leq 0] \quad (2)$$

MCS법은 정해에 가까운 해를 얻기 위해 수십만 번의 반복계산이 필요하다. 하나의 경우에 대해서 해석을 수행한다면 적절한 방법이지만 설계 등을 위해 입력변수들의 기댓값과 분포값을 여러 경우에 대해서 계산할 필요가 있다면 각 경우들의 해를 얻기 위해서 많은 시간과 노력이 필요할 것이다.

Level II 방법은 각 확률변수들의 평균과 분산을 바탕으로해서 신뢰도지수를 계산하는 방법으로 Level III와 달리 한계상태식의 결합밀도함수를 직접 적분하거나 MCS로 표본집단을 만들 필요가 없다. Level II 방법은 일계이차모멘트법과 이계이차모멘트법으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서 사용된 일계이차모멘트법은 다시 평균 일계이차모멘트법(MV FOSM)과 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)으로 나눌 수 있다.<sup>(5)</sup>

확률변수  $X_i$ 를 가진 한계상태방정식이 선형 함수로 구성된다면 다음과 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$Z = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n \quad (3)$$

확률변수  $X_i$ 가 정규분포이므로 한계상태방정식  $Z$ 도 정규분포이다. 또한, 확률변수  $X_i$ 의 평균과 표준편차가 각각  $\mu_i$ ,  $\sigma_i$ 라면, 한계상태방정식  $Z$ 의 평균과 분산은 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$\mu_Z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \mu_i \quad (4)$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j Cov[X_i, X_j] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (5)$$

한계상태방정식이 정규분포이고 파괴확률은 한계상태방정식이 0보다 작을 확률이므로 파괴확률은 다음과

같은 식으로 계산될 수 있다.

$$P_f = P[Z \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (6)$$

한계상태방정식의 평균과 표준편차의 비는 신뢰도지수(Reliability Index,  $\beta$ )라고 정의할 수 있다.

한계상태식이 선형적이지 않고 비선형인 경우에는 방정식을 선형식으로 변환해야 일계이차모멘트법이 적용될 수 있다. 각 확률변수의 평균에서 한계상태식을 Taylor 전개를 하여 일차항까지 고려하면 비선형 한계상태방정식을 선형으로 변화시킬 수 있다.

$$Z(X) \approx g(\mu) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{\mu} (X_i - \mu_i) \quad (7)$$

선형화된 한계상태식의 평균과 분산은 다음 식으로 표현될 수 있으며 파괴확률과 신뢰도지수도 식(5)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mu_Z = Z(\mu) \quad (8)$$

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{\mu} \frac{\partial Z}{\partial X_j} \Big|_{\mu} \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (9)$$

한계상태식의 확률변수들의 평균점에서 Taylor 전개를 이용하여 일차항(first order)까지만을 고려하여 한계상태방정식을 선형화한 후에, 평균에 대한 확률밀도함수의 이차(second-order) 모멘트인 분산을 고려하여 신뢰도지수나 파괴확률을 산정하는 것을 평균 일계이차모멘트법(Mean Value First-Order Second-Moment method, MV FOSM)라고 부른다.

평균 일계이차모멘트법은 평균점에서의 Taylor 전개를 이용하여 비선형 한계상태식을 선형화함에 따라, 동일한 역확현상에 대해 한계상태방정식을 다른 식으로 표현하면 파괴확률이 달라진다. 이러한 불변성의 결여현상이 평균 일계이차모멘트법의 가장 큰 단점인데 이러한 단점을 해결한 것이 개선된 일계이차모멘트법이다. 개선된 일계이차모멘트법은 파괴확률의 산정을

위하여 주어진 확률변수와 한계상태식을 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수의 공간에서 표현되도록 변환한 다음, 원점으로부터 가장 가까운 직선 거리에 위치한 한계상태식상의 점을 계산하고 그 직선 거리를 신뢰도지수로 취하고 이를 이용하여 파괴확률을 계산할 수 있다. 이 때, 신뢰도 지수의 산정을 위해 구해진 한계상태식상의 점은 한계상태식상에 존재하는 점 중에서 가장 파괴확률이 높은 점으로 Most Probable Failure Point or Design Point(MPFP)라고 불린다.

정규분포 확률변수는 정규분포의 평균  $\mu_i$ , 표준편차  $\sigma_i$ , 표준정규분포 확률변수  $u_i$ 로 표현되고 이 정규분포 확률변수를 한계상태방정식에 대입하고 비선형인 한계상태방정식을 MPFP에서 Taylor 전개하여 1차항까지 고려하면 다음과 같은 표준정규분포의 한계상태방정식을 얻을 수 있다.

$$u_i = \frac{(x_i - \mu_i)}{\sigma_i} \quad (10)$$

$$z(u) \approx \sum_{i=1}^n \frac{\partial z}{\partial u_i} \bigg|_{u_i^*} (u_i - u_i^*) \quad (11)$$

신뢰도지수는 기하학적으로 원점에서 가장 가까운 파괴경계면 상의 점(MPFP)까지의 거리이므로 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$\beta = - \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial z}{\partial u_i} \bigg|_{u_i^*} u_i^* \right) / \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial z}{\partial u_i} \bigg|_{u_i^*} \right)^2} \quad (12)$$

Hasofer와 Lind는 개선된 일계이차모멘트법의 MPFP는 신뢰도지수가 최적화되는 과정으로 고려하여 다음과 같은 단계별 변수값을 계산하는 방법을 제시하였다.<sup>(6)</sup>

$$u^{k+1} = \frac{P_u^{kT} u^k - z(u^k)}{P_u^{kT} P_u^k} P_u^k \quad (13)$$

$$P_u^k = \left\{ \frac{\partial Z}{\partial u_1}, \frac{\partial Z}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial Z}{\partial u_n} \right\}^T \quad \text{at } u = u^k \quad (14)$$

신뢰도지수는 다음과 같다.

$$\beta = \sqrt{u^{*T} u^*} = - \frac{P_u^{*T} u^*}{\sqrt{P_u^{*T} P_u^*}} \quad (15)$$

신뢰도지수에 각 확률변수가 미치는 영향을 계량화할 수 있는 척도로서 민감도값이 사용되는데 그 값은 다음과 같은 형태이다.

$$\alpha = - \frac{P_u^{*T}}{\sqrt{P_u^{*T} P_u^*}} \quad (16)$$

## 2.2 내구성 해석

항만구조물의 염해를 평가하는 일반적인 방법은 염소이온의 침투해석을 수행해서, 철근 위치에서의 염소이온농도와 부식염소이온농도를 비교하여 침투에 의한 염소이온농도가 부식염소이온농도보다 클 경우에 철근이 부식되고 이 시점부터 구조물은 염해에 대한 저항성을 완전히 상실했다고 판단하는 것이다. 이러한 해석을 위해서는 염소이온의 침투 해석이 필요하고 다음과 같은 Fick의 확산 제2법칙을 이용하여 침투현상을 모델링한다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \left[ \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] = D_d \nabla^2 C \quad (17)$$

일반적인 염소이온 침투에 대한 해석은 1차원 방향성 고려되고 또한, 확산시간동안의 평균적 특성치를 가지는 확산계수를 이용하여 해석을 수행하면 식(17)의 해로 에리함수로 구성된 다음과 같은 방정식을 도출할 수 있다.

$$C = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] \quad (18)$$

식(18)에서 표면염소이온농도와 피복두께는 시방서에서 제시된 값이나 설계 또는 계측값을 사용할 수 있

지만 확산계수는 콘크리트 특성에 따른 모델식이 필요하다. 염화물이온의 확산계수는 여러 모델식이 있지만 본 논문에서는 일반적으로 널리 사용되는 ACI의 Life 365의 모델식을 사용하기로 한다. Life 365의 모델식에서 재령 28일된 콘크리트의 확산계수와 재령보정계수는 다음과 같이 제시하고 있다.<sup>(7)</sup>

$$\overline{D_{28}} = \frac{D_{28}}{1-n} = 10^{-12.06+2.4w/cm} \quad (19)$$

$$D(t) = \overline{D_{28}} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^n \quad (t < t_c) \quad (20)$$

$$D(t) = \overline{D_{28}} \left( \frac{t_{28}}{t_c} \right)^n \quad (t > t_c)$$

$$n = 0.2 + 0.4 \left( \frac{\%FA}{50} + \frac{\%SG}{70} \right) \quad (21)$$

식(18)의 확산계수는 Life 365에 의한 순간확산계수가 아니라 재령 t까지의 평균적인 의미의 확산계수이다. 이러한 확산계수를 구하기 위해서는 Life 365의 모델을 다음과 같이 변환시키는 것이 필요하다.

$$D_d = \overline{D_{28}} \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^n \quad t < t_c \quad (22)$$

$$D_d = \overline{D_{28}} \left[ (1-n) + n \frac{t_c}{t} \right] \left( \frac{t_{28}}{t_c} \right)^n \quad t > t_c \quad (23)$$

### 3. FOSM법에 의한 염해 해석

#### 3.1 염해 해석에 일계이차모멘트법의 적용

염해에 의한 파괴는 철근부식이 발생하는 부식염소이온농도와 철근위치에서의 염소이온농도를 비교하여 부식유무에 따라 파괴를 판정하므로 다음과 같은 한계상태방정식을 구성할 수 있다.

$$Z(C_d, C_o, x, D_d) = C_d - C_o \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] \quad (24)$$

이러한 한계상태방정식에 평균 일계이차모멘트법을 적용하기 위해서는 비선형 형태인 한계상태방정식을 선형화하는 것이 필요하다. 확률변수  $C_d$ ,  $C_o$ ,  $x$ ,  $D_d$ 의 평균값에서 Taylor 전개를 수행하고 전개된 식의 1차항까지를 고려하여 정리하면 다음과 같은 선형한계상태방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z(C_d, C_o, x, D_d) &\approx \left. \frac{\partial Z}{\partial C_d} \right|_{mean} C_d + \left. \frac{\partial Z}{\partial C_o} \right|_{mean} C_o \\ &+ \left. \frac{\partial Z}{\partial x} \right|_{mean} x + \left. \frac{\partial Z}{\partial D_d} \right|_{mean} D_d \\ &+ C_{d,\mu} - C_{o,\mu} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x_\mu}{2\sqrt{D_{d,\mu} t}} \right) \right] - C_{d,\mu} \left. \frac{\partial Z}{\partial C_d} \right|_{mean} \\ &- C_{o,\mu} \left. \frac{\partial Z}{\partial C_o} \right|_{mean} - x_\mu \left. \frac{\partial Z}{\partial x} \right|_{mean} - D_{d,\mu} \left. \frac{\partial Z}{\partial D_d} \right|_{mean} \end{aligned} \quad (25)$$

한계상태방정식이 선형화되었으므로 식(8)과 (9)를 이용하여 평균과 표준편차를 구할 수 있고 이렇게 계산된 평균과 표준편차를 이용하면 신뢰도지수를 구할 수 있고 내구성 파괴확률도 식(6)을 이용하면 쉽게 계산할 수 있다.

한편, 개선된 일계이차모멘트법을 적용하기 위해서는 정규분포로 되어있는 한계상태 염해방정식을 다음과 같은 변환식을 적용하여 표준정규분포식으로 변환시켜야 한다.

$$C_d = C_{d,\mu} (1 + C_{d,cov} u_{C_d}) \quad (26)$$

$$C_o = C_{o,\mu} (1 + C_{o,cov} u_{C_o}) \quad (27)$$

$$x = x_{,\mu} (1 + x_{,cov} u_x) \quad (28)$$

$$D_d = D_{d,\mu} (1 + D_{d,cov} u_{D_d}) \quad (29)$$

Hasofer와 Lind가 제안한 식들을 이용하면 개선된 일계이차모멘트법의 적용을 위한 MPFP와 신뢰도 지수를 쉽게 구할 수 있다. 식(11)의 한계상태방정식의 미분값은 다음의 식(30)~(33)으로 구할 수 있고, 이 값들을 이용하여 식(10)에서 변수값들을 계산할 수 있다. 식(12)로 계산된 신뢰도 지수는 반복과정을 통해 정해에 수렴하게 된다.

$$\frac{\partial Z}{\partial u_{C_d}} = \frac{\partial Z}{\partial C_d} \frac{\partial C_d}{\partial u_{C_d}} = C_{d,\mu} C_{d,cov} \quad (30)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial u_{C_o}} = \frac{\partial Z}{\partial C_o} \frac{\partial C_o}{\partial u_{C_o}} = - \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_d t}} \right) \right] C_{o,\mu} C_{o,cov} \quad (31)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial u_x} = \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial u_x} = \left( C_o \frac{1}{\sqrt{\pi D_d t}} e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}}\right)^2} \right) x_{,\mu} x_{,cov} \quad (32)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial u_{D_d}} = \frac{\partial Z}{\partial D_d} \frac{\partial D_d}{\partial u_{D_d}} = \left( -\frac{C_o x}{2\sqrt{\pi t}} e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{D_d t}}\right)^2} \right) D_{d,\mu}^{-1.5} D_{d,cov} \quad (33)$$

### 3.2 FOSM법의 유효성

일계이차모멘트법들의 유효성을 검증하기 위해서 일계이차모멘트법에 의해서 계산된 부식확률과 Monte Calo Simulation에 의해 구한 부식확률을 비교하고자 한다. 해석에 필요한 한계상태방정식의 4가지 변수는 다음과 같고 확률분포는 정규분포로 가정한다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{aligned} C_d &= 1.2 \text{kg/m}^3 (\text{표준시방서 기준}), C_{d,cov} = 0.1 \\ C_o &= 13 \text{kg/m}^3 (\text{비말대 조건}), C_{o,cov} = 0.1 \\ x &= 5 \sim 12 \text{cm}, x_{,cov} = 0.1 \\ D_d &= 0.2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}, D_{d,cov} = 0.1 \end{aligned}$$

먼저 개선된 일계이차모멘트법은 MPFP를 찾기 위해서 수차례의 계산반복이 필요한데 이러한 반복계산은 계산시간의 증가로 이어질 수 있으므로 반복연산의 횟수를 파악하는 것이 필요하다. 피복두께가 7cm일 때의 반복에 따른 신뢰도지수를 재령 30년, 65년, 100년에서 구해보면 Fig. 1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 반복횟수 8회 미만에서 신뢰도지수는 특정값에 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이, MCS에 의한 결과와 개선된 일계이차모멘트법에 의한 부식확률은 잘 일치하고 최대 오차는 0.1% 미만이다. 즉, 개선된 일계이차모멘트법은 염해에 대한 부식확률이나 신뢰도지수의 산정에 충분한 합리성을 가지고 적용될 수 있음을 알 수 있다. 평균 일계이차모멘트법의 결과와 MCS의 결과는 부식확률 50% 이하의 영역에서 5~10%의 오차

를 나타내고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 부식확률의 계산은 부식확률이 50% 이하인 영역에서 계산되므로 개선된 일계이차모멘트법은 충분한 정확성을 가진 염해에 대한 신뢰성 해석범임을 확인할 수 있다. 또한, MCS법은 수만 번의 반복계산이 필요하지만 개선된 일계이차모멘트법은 10회 미만의 반복계산으로 정해에 가까운 값을 제시하므로 MCS법보다 편리성과 신속성이 크다는 사실을 알 수 있다.

결론적으로 염해의 신뢰성 해석시에 평균 일계이차모멘트법을 적용하는 것은 염해식의 비선형성으로 인해 오차가 발생될 가능성이 크지만 개선된 일계이차모멘트법은 거의 MCS와 같은 결과를 제시한다. 따라서, 개선된 일계이차모멘트법으로 염해에 대한 신뢰성 해석을 수행하면 MCS보다 편리하고 신속하게 신뢰도지수나 부식확률을 계산할 수 있다.

### 4. 해석 변수들의 변동성과 부식확률 변화

개선된 일계이차모멘트법을 이용하면 해석변수들의 평균값과 변동성의 변화에 따른 신뢰도지수(또는 부식확률)의 변화를 MCS법보다는 손쉽게 계산할 수 있다. 또한, 식(16)을 사용하면 각 변수들이 신뢰도지수에 미치는 민감도를 정량적으로 계산할 수 있다. 민감도가 계산되면 일반적으로 콘크리트 표준시방서 등의 하중저항계수설계법에서 사용되는 저항감소계수와 하중증가계수를 구할 수 있는데, 본 연구에서는 앞 절의 FOSM법의 유효성 고찰에서 사용된 한계염소이온농도, 표면염소이온 농도, 염소이온 확산계수에 대한 값과 피복두께 8cm인 경우의 각 변수들의 민감도를 계산하고 이를 바탕으로 신뢰도지수가 1.28(부식확률 10%)일 때의 각 변수들의 부분안전계수를 산출해 보았다(Fig. 3). 변동계수가 증가하면 변동성이 증가하므로 같은 신뢰도지수를 얻기 위해 한계염소이온농도와 피복두께에 대한 부분안전계수는 감소하고 표면염소이온농도와 염소이온 확산계수의 부분안전계수는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 증가한다. 변동계수의 변화에 따라 계수의 변화율이 가장 큰 것은 피복두께이다. 즉, 피복두께의 변동성에 따라 신뢰도지수의 변화율이 가장 크고 표면염소이온 농도의 변동성이 신뢰도

지수에 미치는 영향이 가장 작다. 그러나, 염해 평가식에 사용되는 4가지 변수들의 변동계수는 제반 여건에 따라서 달라지므로 이를 감안하여 감소계수나 증가계수를 선택할 필요가 있다.

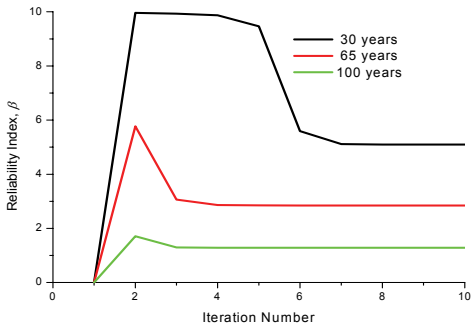


Fig. 1 AFOSM법의 수렴속도

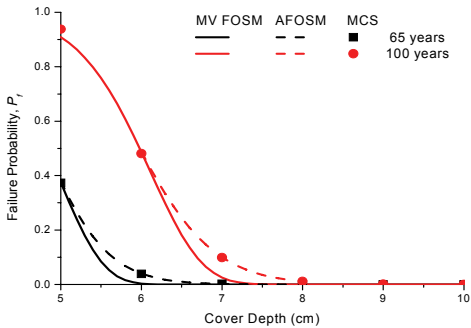


Fig. 2 FOSM과 MCS법의 비교

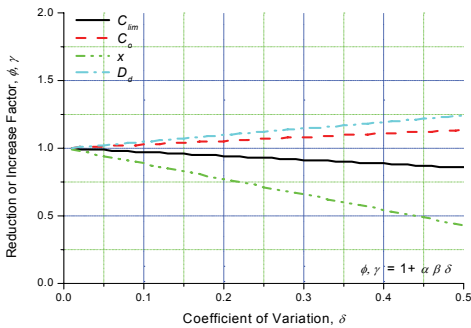
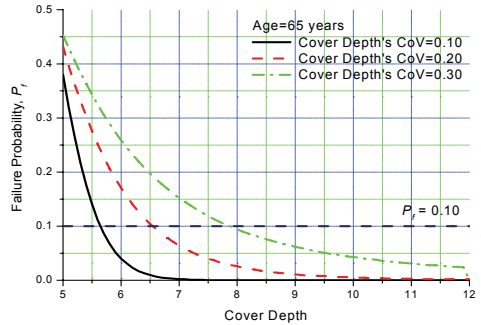


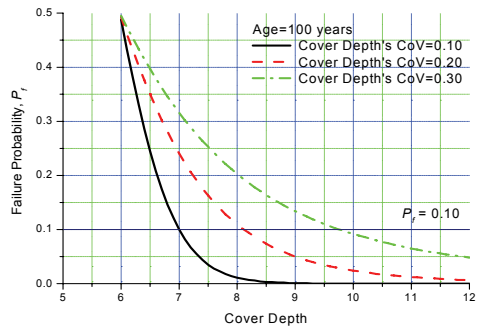
Fig. 3 변동계수에 따른 내구성 변수들의 부분안전계수

#### 4.1 피복두께

현장의 항만구조물을 점검하면 철근부식이 일어나 피복이 탈락한 지점을 관찰할 수 있는데, 이러한 내구성 파괴 영역들의 공통점 중의 하나가 설계 피복두께에 비해 얇은 철근 피복을 가지고 있다는 점이다. 즉, 염해에 의한 내구성 파괴의 많은 부분이 시공상의 부주의로 특정부분의 피복두께가 설계치보다 작게 구조물이 만들어 지거나 피복두께가 적절하게 설계되지 못해서 나타난다. 이러한 피복두께의 변동성에 따른 신뢰도지수의 변화를 개선된 일레이차모멘트법을 바탕으로 고찰하였다. 앞 절의 FOSM법의 유효성 고찰에서 사용된 한계염소이온농도( $1.2\text{kg/m}^3$ , 변동계수=0.1), 표면염소이온농도( $13\text{kg/m}^3$ , 변동계수=0.1), 염소이온 확산계수( $2 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ , 변동계수=0.1)에 대한 평균값과 변동계수를 사용하고 피복두께를 5~12cm로



(a) 재령 65년



(b) 재령 100년

Fig. 4 피복두께에 따른 부식확률 변화

변화시키고 피복두께의 변동계수가 0.1에서 0.3으로 증가할 때의 부식확률을 구하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 변동계수가 0.1에서 0.3으로 증가하면 부식확률을 10%이하로 유지하기 위해서 피복두께가 재령 65년에서는 5.6cm에서 7.9cm로, 재령 100년에서는 7.0cm에서 9.8cm로 증가해야 함을 알 수 있다. 즉, 변동계수의 증가에 따라 필요 피복두께가 급격히 증가하므로 내구성 설계에서 피복두께를 산정하는 것도 중요하지만 시공관리를 통한 피복두께의 시공오차를 줄이는 것도 매우 중요함을 확인할 수 있다. 피복두께의 변동성에 대한 데이터가 축적된다면 국내의 현장특성에 적합한 피복두께의 부분안전계수를 본 모델을 통해 손쉽게 추출할 수 있고, 시공관리 능력이 향상됨에 따라 이러한 부분안전계수를 주기적으로 최적화할 수 있을 것이다.

#### 4.2 염소이온 확산계수

피복두께와 함께 염해를 방지할 수 있는 가장 중요한 요인이 염소이온 확산계수의 감소를 통한 이온침투의 제어이다. 앞의 식(19)에서 (21)에 언급된 바와 같이 염소이온확산계수는 물-시멘트비, 혼화재량, 재령 등의 함수이고 이러한 값들의 변동에 따라 확산계수값도 변화한다. 또한, 확산계수의 측정법에 따라 확산계수의 변동성도 크다. 이러한 측면을 종합하면 염소이온 확산계수는 다른 변수들보다 큰 값의 변동계수를 가질 가능성이 있다. 따라서, 본 논문에서는 염소이온 확산계수의 변동성이 0.1에서 0.6로 증가할 때의 부식확률의 변화를 고찰하였다. 한계염소이온농도( $1.2\text{kg/m}^3$ ), 표면염소이온농도( $13\text{kg/m}^3$ ), 피복두께(7cm 또는 8cm)는 앞 절의 값들을 이용하고 이 값들의 변동계수는 0.1로 고정하였다. 염소이온 확산계수가  $1 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 과  $10 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 사이에서 변화할 때의 부식확률변화는 Fig. 6과 같다.

그림에 나타난 바와 같이 변동성이 증가하면 부식확률을 0.1보다 작게 유지하기 위해서 염소이온 확산계수가 작아져야 함을 알 수 있다. 재령 65년에서 피복두께가 8cm이고 변동계수가 0.1인 경우에는  $4.0 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 의 염소이온 확산계수로 부식확률 10%를

담보할 수 있지만 변동계수가 0.6으로 증가하면  $2.8 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$ 의 염소이온 확산계수가 필요함을 알 수 있다. Fig. 5의 확산계수 변화도를 이용하면 물-결합재비 35%일 때에는 플라에에서 대체율이 40%, 물

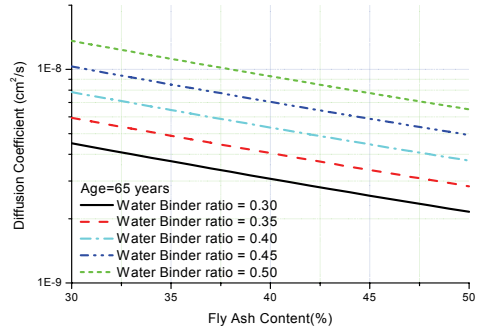
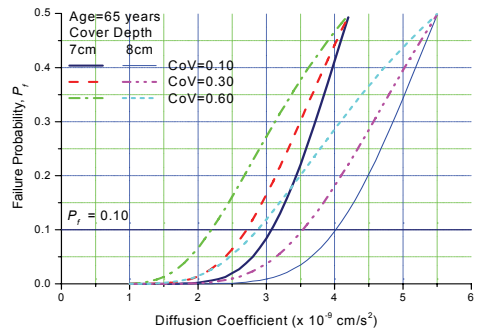
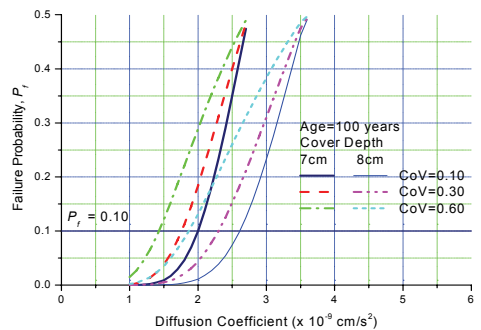


Fig. 5 물-결합재비와 플라에아쉬 치환율에 따른 염소이온 확산계수



(a) 재령 65년



(b) 재령 100년

Fig. 6 확산계수에 따른 파괴확률 변화



-결합재비가 40%일 때에는 플라이애쉬 대체율이 50% 정도이면 변동계수가 0.1이고 피복두께가 8cm인 구조물의 부식확률을 10% 이내로 제어할 수 있지만 변동계수가 0.6으로 증가하면 물-결합재비가 35%일 때에는 플라이애쉬 대체율을 50%로 증가시키거나 물-결합재비가 40%인 경우에는 내염도장 등을 도입해야 한다. 재령 100년인 경우에는 부식확률을 10%미만을 유지하기 위해서 재령 65년보다 작은 염소이온 확산계수가 필요함을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 그러나, 변동계수의 변화에 따른 부식확률의 변화는 재령 65년보다 작은 것을 확인할 수 있다.

### 4.3 임계염소이온 농도

임계염소이온 농도는 피복두께와 염소이온 확산계수와는 달리 설계자가 변경할 수 있는 여지가 작다. 일반적으로 시방서나 설계기준에서 제시된 값들을 주로 사용하는데, 콘크리트 표준시방서에서는 외부 폭로 시험에 의한 부식임계염소이온농도를  $1.2\text{kg/m}^3$ 으로 제시하고 있다. 이 값은 수 백개의 실험데이터를 바탕으로 염소이온농도에 따른 부식확률밀도함수를 구하고 90%이상의 확률로 부식이 발생하지 않는 염소이온농도를 선정하여 계산된 것이다.<sup>(2)</sup> 이러한 계산에 사용된 데이터들의 평균과 변동계수는  $3.96\text{kg/m}^3$ 과 0.61이다. 이러한 실험결과와 시방서에서 제시한 임계염소이온농도가 0.1의 변동계수를 가진다고 가정했을 때의 부식확률을 비교해 보았다. 표면염소이온농도 ( $13\text{kg/m}^3$ , 변동계수=0.1)와 염소이온 확산계수

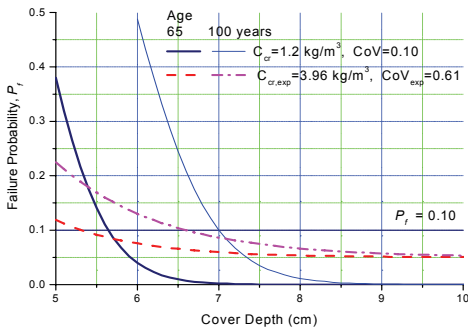
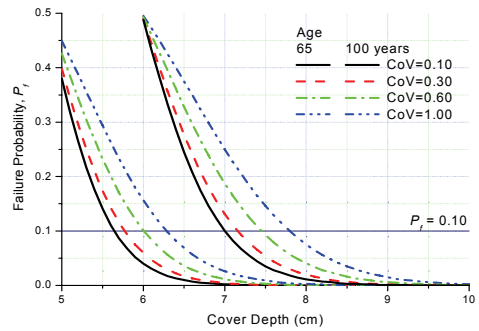
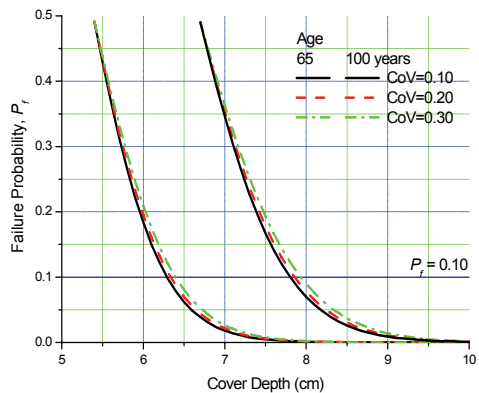


Fig. 7 임계염소이온농도에 따른 부식확률 변화

( $2 \times 10^{-9}\text{cm}^2/\text{s}$  변동계수=0.1)는 앞 절의 값들을 사용하고 피복두께를 5~10cm(변동계수=0.1)로 변화시키면서 부식확률의 변화를 고찰해 보았다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 실험값을 바탕으로한 임계염소이온농도에 의한 필요 피복두께는 시방서에서 제시한 값을 사용한 것보다 0.4~0.5cm 작다. 실험데이터가 확보된다면 이러한 값들을 이용해서 목표파괴확률을 위한 피복두께를 선정하는 것이 신뢰성 설계에서는 더 합리적인 방법이 될 수 있다. 표준시방서에 제시된  $1.2\text{kg/m}^3$ 의 값에 변동계수를 도입하면 대부분의 경우 보수적인 피복두께 설계가 됨으로 이를 사용해도 큰 무리가 없지만 실험치의 임계염소이온농도를 사용해서 피복두께를



(a) 시방서(표면염소이온농도= $13.0\text{kg/m}^3$ )



(b) 실험치(표면염소이온농도= $20.0\text{kg/m}^3$ )

Fig. 8 간만에에 대한 실험치와 시방서의 표면염소이온농도에 따른 부식확률 변화

0.5 cm 정도 줄일 수 있다면 경제적인 설계가 될 것으로 판단된다.

#### 4.4 표면염소이온농도

표면염소이온농도도 임계염소이온농도와 같이 대부분 시방서에 제시된 값을 사용하고 있다. 현재 한국의 콘크리트 표준시방서에 제시하고 있는 표면염소이온농도는 일본 시방서의 기준을 차용하고 있다. 최근에 국내 토목구조물의 표면염소이온농도에 대한 연구결과들이 조금씩 발표되고 있다.<sup>(3)</sup> 최근 국내 연구에 따르면, 서해와 남해의 간만대 구간을 제외한 대부분의 영역에서 시방서에서 제시한 표면염소이온농도보다 작은 실험값이 관측되었고 서해와 남해의 간만대에서는 큰 조수간만차이로 인해 염소이온의 표면축적이 커서 10~32.5kg/m<sup>3</sup>의 표면염소이온농도가 관측되었다고 발표되었다. 또한, 측정된 최대표면염소이온농도의 값이 32.5kg/m<sup>3</sup>정도이지만 이러한 실험값은 그 개수가 매우 작고 대부분 10~22.5kg/m<sup>3</sup>사이로 분포하였다. 그러나, 현재에 발표된 관측된 값들의 개수가 작아서 통계학적으로 유의미한 변동계수를 추정하기는 현재까지 어려운 상태이다. 국내의 연구결과를 종합해 보면, 서해와 남해안의 간만대를 제외한 영역에서는 콘크리트 표준시방서에서 제시하고 있는 표면염소이온농도가 사용될 수 있으며, 그 변동계수도 작을 것으로 예측된다. 그러나, 서해와 남해안의 간만대에서는 표준시방서보다 큰 염소이온의 축적이 발생할 가능성이 크므로 새로운 표면염소이온농도를 사용하거나 기존 표면염소이온농도를 사용하더라도 큰 변동계수를 사용할 필요가 있을 것으로 생각된다. 이러한 표면염소이온에 대한 현장계측결과를 고려하여, 앞 절에서 사용된 임계염소이온농도(1.2kg/m<sup>3</sup>, 변동계수=0.1), 염소이온 확산계수(2×10<sup>-9</sup>cm<sup>2</sup>/s, 변동계수=0.1), 피복두께(5~10 cm, 변동계수=0.1)를 이용하여 표준시방서의 비말대 조건의 표면염소이온농도인 13.0kg/m<sup>3</sup>일 때와 간만대에서의 측정값으로 제안된 표면염소이온농도인 20.0kg/m<sup>3</sup>일 때의 변동계수에 따른 부식확률변화를 고찰 하였다. 간만대를 제외한 다른 영역에서는 통상적으로 사용되는 표면염소이온농도의 변동계수

0.1로 해석을 하는 것이 합리적이지만 간만대 구간에서는 이러한 값의 변화가 필요하다. Fig. 8(a)에 나타난 바와 같이 간만대 구간에서 실험값을 사용하면 일반적인 변동계수 0.1을 적용할 때, 10%의 부식확률을 유지하기 위해 재령 100년에서 7.8cm의 피복두께가 필요하다. 반면에, 표준시방서의 비말대 구간에서의 표면염소이온농도를 사용하면 재령 100년에서 변동계수 0.1일 때에는 7cm, 변동계수가 1.0일 때에는 7.8cm의 피복두께가 필요함을 알 수 있다. 즉, 실험에 의한 간만대의 표면염소이온농도를 사용하는 경우와 유사한 해석결과를 얻기 위해서 표준시방서의 표면염소이온농도를 사용할 때에는 변동계수를 1.0정도로 크게 높일 필요가 있음을 알 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 항만구조물의 내구성 해석 시에 사용되는 MCS 기반 신뢰성 기법의 사용성과 접근성을 개선하기 위해 Level II 수준의 평균 일계이차모멘트법(MV FOSM)과 개선된 일계이차모멘트법(AFOSM)을 이용하여 내구성 해석을 수행하고 그 결과를 MCS 법과 비교하였다. MCS에 의한 결과와 개선된 일계이차모멘트법에 의한 부식확률은 잘 일치하고 그 오차는 0.1%미만으로 개선된 일계이차모멘트법은 염해에 대한 부식확률이나 신뢰도지수의 산정에 충분한 합리성을 가지고 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 평균 일계이차모멘트법의 결과와 MCS의 결과는 부식확률 50%이하의 영역에서 5~10%의 오차를 나타내어 평균 일계이차모멘트법은 MCS를 대체할 수준의 정확성을 가지고 있지 않았다. 염해해석의 4가지 변수들에 대한 변동성에 따른 부식확률을 고찰하였으며, 이에 따르면 피복두께의 변동성이 부식확률에 가장 큰 영향을 미치고 그 다음으로는 확산계수로 파악되었다. 임계염소이온농도와 표면염소이온농도의 실험치를 이용하여 부식확률을 계산하면 좀 더 합리적인 해석이 이루어질 수 있음을 고찰하였다. 또한, 본 연구의 결과를 이용하면 축적된 데이터를 이용하여 하중저항계수법 기반으로 된 시방서의 부분안전계수를 작은 노력으로 합리적인 수준으로 최적화시킬 수 있음을 제시하였다.

## 6. 기호(Notation)

$C$  : 염소이온 농도  
 $C_d$  : 부식염소이온농도  
 $C_{d,\mu}$  : 부식염소이온농도의 평균  
 $C_{d,ox}$  : 부식염소이온농도의 변동계수  
 $C_o$  : 표면 염화물 농도  
 $C_{o,\mu}$  : 표면 염화물 농도의 평균  
 $C_{o,ox}$  : 표면 염화물 농도의 변동계수  
 $D(t)$  : 재령  $t$ 에서의 순간염소이온 확산계수  
 $D_d$  : 염소이온 확산계수  
 $D_{d,\mu}$  : 염소이온 확산계수의 평균  
 $D_{d,ox}$  : 염소이온 확산계수의 변동계수  
 $D_{28}$  : 재령 28일의 염소이온 확산계수 ( $m^2/s$ )  
 $\overline{D_{28}}$  : 재령 28까지의 평균 염소이온 확산계수 ( $m^2/s$ )  
 $I(Z \leq 0)$  :  $Z$ 값 0보다 작으면 1, 크면 0인 함수  
 $L$  : 하중함수  
 $N$  : 표본집단개수  
 $P_f$  : 파괴확률(부식확률)  
 $R$  : 저항함수  
 $t_{28}$  : 재령 28일  
 $t$  : 재령  
 $t_c$  : 재령에 따른 순간확산계수 변화 한계 시점  
 $u_i$  : 표준정규분포 확률변수  
 $u^*$  : MPFP의 좌표  
 $w/cm$  : 물-결합재 비  
 $x$  : 피복두께  
 $X_i$  : 확률변수  
 $Z$  : 한계상태방정식  
 $\beta$  : 신뢰도지수  
 $\mu$  :  $X_i$ 의 평균  
 $\rho_{ij}$  :  $X_i$ 와  $X_j$ 의 상관계수  
 $\sigma$  :  $X_i$ 의 표준편차  
 $\%FA$  : 결합재에 대한 플라이애쉬 양 (%)  
 $\%SG$  : 결합재에 대한 고로슬래그 양 (%)

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업의 사회기반시설물평가중점연구단(ISARC)의 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부제정, "콘크리트 표준시방서 해설", 한국콘크리트학회, 2003.
2. Otsuki, N., Nishida, T., Madlangbayan, M. S., "한계염화물이온함유량에 관한 각종 고찰", 한일 콘크리트 내구성평가기술 세미나, 2008, pp. 212-238.
3. 정해문, 안태송, 이병덕, "국내 서남해안의 콘크리트 표면염화물량 산정에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술대회, 2005, pp. 173-176.
4. 김지상, 정상화, 김주형, 이광명, 배수호, "염해를 받는 구조물의 확률론적 내구성 해석", 한국콘크리트학회 논문집, 제18권 2호, 2006, pp. 239-248.
5. 양영순, 서용석, 이재욱, "구조 신뢰성 공학", 서울대학교출판부, 1999.
6. Hasofer, A. M., Lind, L. C., "Exact and invariant second moment code format", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. 1, 1974, pp. 111-121.
7. Thomas, M.D.A. Bentz, E.C., Life-365 Manual, 2000.
8. Val, D. V., Stewart, M. G., "Life\_cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments", Structural Safety, Vol. 25, 2003, pp. 343-362.
9. Val, D. V., Trapper, D. V., "Probabilistic evaluation of initiation time of chloride-induced corrosion," Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93, 2008, pp. 364-372.

(접수일자 : 2008년 5월 20일)  
 (심사완료일자 : 2008년 8월 25일)