Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 22, No. 4, pp. 595~603, August, 2010
DOI 10.4334/JKCI.2010.22.4.595

신뢰성이론에 기반한 해양환경 콘크리트의 내구수명 평가

김기현[1] · 차수원[2]*

[1]서울대학교 건설환경종합연구소 [2]울산대학교 건설환경공학부

Reliability-Based Service Life Estimation of Concrete in Marine Environment

Ki-Hyun Kim[1] and Soo-Won Cha[2]*

[1]Integrated Research Institute of Construction and Environment, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
[2]Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT Monte-Carlo simulation technique is often used in order to predict service life of concrete structure subjected to chloride penetration in marine environment based on probability theory. Monte-Carlo simulation method, however, the method gives different results every time that the simulation is run. On the other hand, moment method, which is frequently used in reliability analysis, needs negligible computational cost compared with simulation technique and gives a constant result for the same problem. Thus, in this study, moment method was applied to the calculation of corrosion-initiation probability. For this purpose, computer programs to calculate failure probabilities are developed using first-order second moment (FOSM) and second-order second moment (SOSM) methods, respectively. From the analysis examples with the developed programs, SOSM was found to give a more accurate result than FOSM does. The sensitivity analysis has shown that the factor affecting the corrosion-initiation probability the most was the cover depth, and the corrosion-initiation probability was influenced more by its coefficient of variation than its mean value.

Keywords : Monte-Carlo simulation, moment method, corrosion-initiation probability, FOSM, SOSM

1. 서 론

해양환경에 건설되는 콘크리트 구조물이 크게 늘어나는 등 최근 토목구조물이 대형화, 장대화되고 있는 추세이며, 구조물의 중요성과 경제성을 고려할 때 내구수명 확보가 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 열악한 환경조건에 놓인 콘크리트의 내구성에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 해양환경에 있는 콘크리트에 대한 내구성 문제 가운데 염소이온침투에 의한 철근부식이 가장 중요한 것으로 인식되고 있다.[1-4] 콘크리트로 침투한 염소이온이 철근 표면에 일정량 이상 축적되면 알칼리 상태 하에서도 철근 표면의 부동태피막을 파괴할 수 있고 결국 철근의 부식이 시작되므로 해양환경 콘크리트 구조물 설계와 시공에 각별한 주의가 요구되고 있다.

이에 따라 해상교량과 같은 대형 토목구조물의 콘크리트 구조체에 대해서는 설계부터 염해에 대하여 내구수명을 확보하기 위해 염소이온 침투해석을 수행하고 있다. 신설 콘크리트 구조물의 염소이온 침투에 대한 내구수명 예측 및 내구성설계를 위해 현재까지 주로 사용되어 온 방법은 오차함수를 사용한 확산방정식의 해석해를 이용하는 것이었다. 이는 일정한 표면 염소이온 농도에 대하여 철근 위치에서의 염소이온 농도가 부동태피막을 파괴하여 철근 부식이 시작되는 농도, 즉 임계농도에 도달할 때까지의 시간을 내구수명으로 정하는 것이다. 여기에 경험적으로 결정된 안전계수를 사용하여 염소이온 침투에 대한 내구성설계를 수행하는데, 이러한 방법은 해석에 고려되는 변수들이 일정한 값을 가진다는 가정에 기초하는 결정론적 방법이라 할 수 있다.

그러나 실제 물리현상의 기술에 사용되는 변수들은 고정된 값이 아니라 불확실성을 가지고 있으며, 염소이온 침투해석에 관련되는 변수들도 평균값 등 대표값을 중심으로 분산되어 있는 통계특성을 가지고 있다. 최근 염소이온에 대한 콘크리트 내구수명 예측과 내구성설계에서도 이러한 변동성을 고려하기 위해 확률이론을 도입하려는 시도가 이루어지고 있다. 이 방법은 먼저 부식개시 여부에 대한 판단이 가능한 한계상태식을 세우고, 목표 내구수명 동안 콘크리트 구조물에 부식이 개시될 확률 또는 부식이 일어나지 않을 신뢰도지수를 산정한 후, 부

*Corresponding author E-mail : chasw@ulsan.ac.kr
Received April 15, 2010, Revised June 3, 2010,
Accepted June 29, 2010
ⓒ2010 by Korea Concrete Institute

식개시확률이 목표확률 이내에 있는지를 확인하는 것이다. 이 때 부식개시확률 또는 부식방지 신뢰도지수를 평가하기 위해 주로 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation, MCS) 기법 및 이의 변형된 기법들이 많이 사용되고 있다.[5-7] 몬테카를로 시뮬레이션 기법은 염소이온 침투에 관계되는 변수들을 각 통계특성을 고려하여 샘플링 한 후, 이를 한계상태식에 대입하여 부식개시 여부를 판단한다. 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 부식개시확률 산정에는 매우 많은 회수의 추출이 필요하여 연산시간이 오래 걸리며, 매번 시뮬레이션 마다 서로 다른 부식개시확률을 주는 단점이 있다.

이에 비해 구조물의 안전성 판단에 많이 사용되고 있는 신뢰성 해석기법인 모멘트법(moment method)은 시뮬레이션 기법에 비해 매우 짧은 계산시간으로도 부식개시확률 산정이 가능하고, 해석 마다 동일한 결과를 주는 장점이 있다. 따라서 이 연구에서는 모멘트법을 염소이온 침투에 대한 내구수명 예측에 적용하고자 한다. 이를 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법, 일계이차 모멘트법과 이계이차 모멘트법에 의한 부식개시확률 산정 프로그램을 각각 개발하고, 이들을 사용한 예제 해석 결과의 분석을 통하여 염소이온 침투에 대한 내구성설계를 위한 각 방법의 적절성을 검토하였다. 그리고 각 확률변수의 통계특성값이 부식개시확률에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 모멘트법에 의한 신뢰도지수 산정

2.1 신뢰도지수

신뢰도지수의 개념을 설정하기 위해 다음과 같이 하중과 저항의 두 성분에 의해 구조물의 안전성이 판단되는 간단한 경우를 고려해 보자.

하중성분 Q와 저항성분 R이 각각 정규분포 확률변수일 때 다음으로 정의되는 g를 안전여유(safety margin) 또는 신뢰도(reliability)라 한다.

$$g = R - Q \tag{1}$$

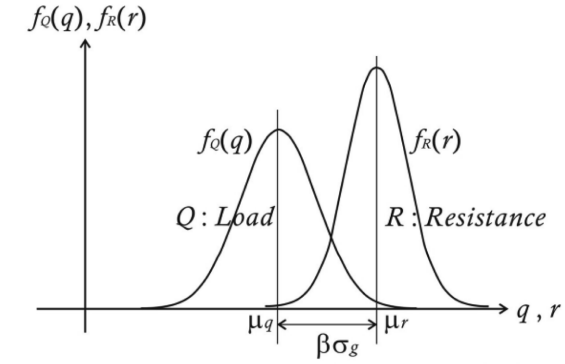
Fig. 1에서와 같이 새로운 확률변수 g도 역시 정규분포 확률변수이며 g의 평균과 분산은 각각 다음 식으로 주어진다.

$$\mu_g = \mu_R - \mu_Q \tag{2}$$

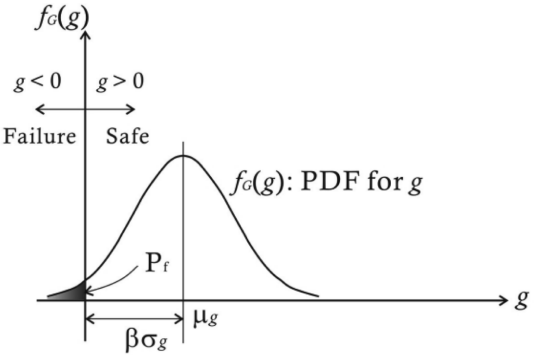
$$\sigma_g = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \tag{3}$$

여기서 μ_R, σ_R은 저항성분의 평균과 표준편차, μ_Q, σ_Q는 하중성분의 평균과 표준편차, μ_g, σ_g는 안전여유의 평균과 표준편차이다.

Fig. 1의 빗금친 부분이 파괴확률이며, 확률분포 g의 평균 μ_g를 표준편차 σ_g로 나눈값을 신뢰도지수 또는 부식방지 신뢰도지수라 한다.



(a) Probability distribution of R and Q



(b) Probability distribution of G

Fig. 1 Safety concept and reliability index

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \tag{4}$$

신뢰도지수와 파괴확률은 다음의 관계에 있다.

$$P_f = \Phi(-\beta) = \Phi\left(-\frac{\mu_g}{\sigma_g}\right) \tag{5}$$

여기서 $\Phi(\ )$는 표준정규 확률밀도함수이다.

2.2 모멘트법에 의한 신뢰도지수 산정 프로그램 개발

염소이온 침투해석에 사용되는 오차함수 해석해는 식(1)과 같은 간단한 형태가 아니며, 확률변수의 개수도 많으므로 파괴확률을 간단히 구할 수 없다. 따라서 파괴확률을 수치적으로 구해야 한다. 일계이차 모멘트법(first-order second moment, FOSM)을 적용하기 위한 절차로는 먼저 한계상태식에 사용되는 상관된 변수들은 비상관된 변수로 변환하고 비정규 확률변수를 등가의 정규분포로 치환한 후, 서로 통계적으로 독립인 표준정규분포 확률변수의 공간에서 한계상태식을 표현한다. 표준정규분포 확률변수 공간의 원점에서 한계상태식까지의 가장 가까운 직선거리가 신뢰도지수(reliability index)이며, 특히 신뢰도지수의 산정에 사용된 한계상태식 상의 점을 MPFP(most probable failure point) 또는 DP(design point)라 한다. 이 때 원점과 한계상태식 사이의 최단거리를 구하는 위해 MPFP를 찾는 것은 최적화 과정과 같고 반복계산을

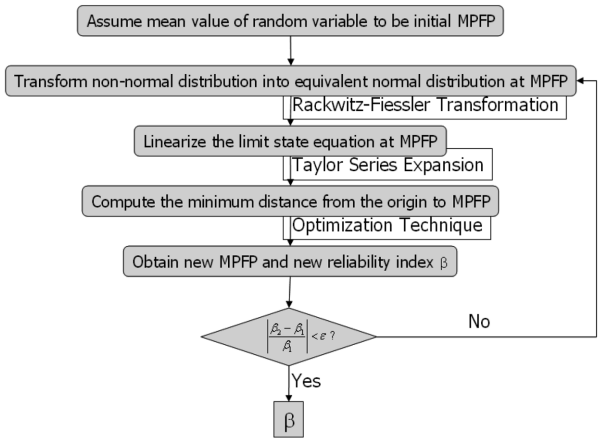


Fig. 2 Algorithm of FOSM

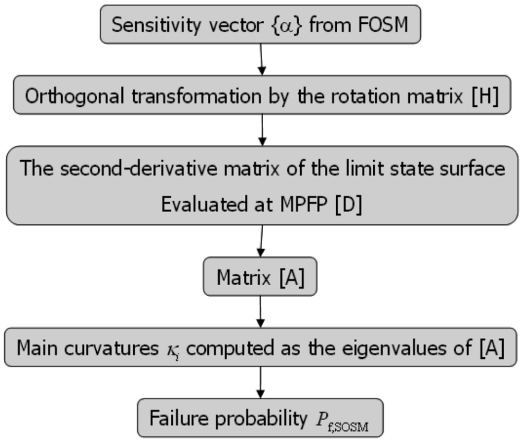


Fig. 3 Algorithm of SOSM

수행해야 한다. FOSM의 주요 과정을 나타내면 Fig. 2와 같다.

실제로 많은 물리현상은 비선형인 경우가 많으며, 특히 오차함수를 사용한 염소이온 침투 해석해는 비선형함수이다. 또 원래공간에서의 한계상태방정식이 선형이라도 한계상태방정식에 나타나는 확률변수가 비정규분포이면 표준정규분포 확률변수의 공간에서 비선형 한계상태식이 된다. 따라서 정확한 파괴확률을 산정하기 위해서는 한계상태함수의 비선형성을 고려해야 하지만, FOSM은 한계상태식을 MPFP에서 테일러 전개하여 선형근사식만 사용하므로 한계상태식의 곡률특성을 고려할 수 없다.[8,9)]

FOSM에 비하여 정확한 파괴확률을 구하기 위하여 MPFP에서 한계상태방정식의 곡률을 고려하는 이계이차모멘트법(second-order second moment, SOSM)을 이용할 수 있다. SOSM은 먼저 FOSM으로 MPFP와 신뢰도지수를 결정하고 난 후, MPFP 근처에서 한계상태식의 곡률특성을 고려하여 신뢰도지수를 수정한다. 여기서 곡률이란 n개의 확률변수로 한계상태식이 이루어져 있을 때 n번째 확률변수를 y축, $i\,(i=1,2,\cdots,n-1)$ 번째 확률변수를 x축으로 표현할 때의 $(n-1)$개의 주곡률들을 말한다. 주곡률 k_i를 구하는 과정은 다음과 같다. 한계상태식을 MPFP에서 테일러 전개로 이차항까지 표현할 때, MPFP에서의 이계편미분행렬을 D, 이차항까지 표현된 한계상태식의 n번째 열이 민감도 벡터의 방향과 동일하게 되도록 하는 직교변환 행열을 H라 할 때, 주곡률은 식 (8)로 정의되는 행렬의 고유치와 같다.

$$A = \frac{H^T D H}{|\nabla g(u^*)|} \tag{8}$$

여기서 $\nabla g(u^*)$는 MPFP u^*에서의 한계상태방정식의 기울기벡터이다.

이렇게 구한 MPFP 근처에서의 곡률특성을 고려하여 신뢰도지수를 구하는 방법에는 식 (6)의 Breitung의 파괴확률 근사공식과 식 (7)의 Tvedt의 파괴확률 근사공식을 사용할 수 있다.[8)]

$$P_{f,B} \approx \Phi(-\beta)\prod_{i=1}^{n-1}(1+\beta k_i)^{-1/2} \tag{6}$$

여기서 $P_{f,B}$는 Breitung의 파괴확률, n은 확률변수의 개수, k_i는 각 확률변수의 MPFP에서의 주곡률, β는 FOSM에서 구한 신뢰도지수이다.

$$P_{f,T} \approx A_1 + A_2 + A_3 \tag{7a}$$

$$A_1 = \Phi(-\beta)\prod_{i=1}^{n-1}(1+\beta k_i)^{-1/2} \tag{7b}$$

$$A_2 = \{\beta\Phi(-\beta) - \phi(\beta)\} \times \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^{n-1}(1+\beta k_i)^{-1/2} \\ -\prod_{i=1}^{n-1}(1+(\beta+1)k_i)^{-1/2} \end{bmatrix} \tag{7c}$$

$$A_3 = (\beta+1) \times \{\beta\Phi(-\beta) - \phi(\beta)\} \times \begin{bmatrix} \prod_{i=1}^{n-1}(1+\beta k_i)^{-1/2} \\ -Re\prod_{i=1}^{n-1}(1+(\beta+i)k_i)^{-1/2} \end{bmatrix} \tag{7d}$$

여기서 $P_{f,T}$는 Tvedt의 파괴확률, i는 허수단위이며, Fig. 3은 SOSM의 주요과정을 나타낸 것이다.

이 연구에서는 이상에서 언급한 FOSM 및 SOSM의 알고리즘에 따라 신뢰도지수 산정 프로그램을 각각 개발하였다. 임의의 명시적 한계상태방정식에 대하여 신뢰도지수 산정이 가능하도록 하였으며 각 확률변수의 평균, 표준편차, 확률분포 형태를 입력값으로 한다. 확률변수 간에 상관관계가 있는 경우 및 확률변수가 비정규분포인 경우에도 신뢰도지수를 구할 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

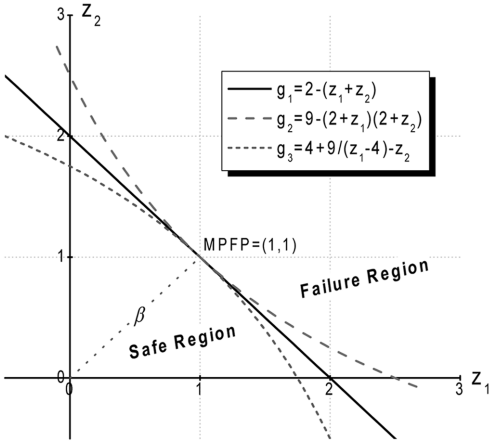


Fig. 4 Graphical representation of limit state equations in uncorrelated standard normal space

다음 예제에서 선형 또는 비선형 한계상태방정식에 대하여 FOSM과 SOSM을 각각 적용해 보고, 그 신뢰도지수 산정 결과를 확률밀도함수의 적분에 의한 정해와 비교하여 개발된 프로그램의 적절성을 검토하였다.

2.3 한계상태식의 곡률특성을 고려한 신뢰도지수산정

FOSM은 한계상태식을 MPFP에서 선형근사하므로 한계상태식의 비선형성에 따른 파괴확률의 차이를 고려하지 못하므로, 곡률특성을 고려하여 더 정확한 파괴확률을 구하기 위하여 SOSM을 적용한다. 이를 확인하기 위하여 다음의 예제해석에서는 평균이 2, 표준편차가 1인 두 정규분포 확률변수 x_1, x_2에 대하여 다음과 같은 세 가지의 한계상태방정식에 대한 신뢰도지수 또는 파괴확률을 산정하였다.

$$g_1 = 6-(x_1+x_2) \tag{9a}$$

$$g_2 = 9-x_1\times x_2 \tag{10a}$$

$$g_3 = 6+\frac{9}{x_1-6}-x_2 \tag{11a}$$

각 한계상태방정식을 서로 독립인 표준정규분포 확률변수의 공간에서 표현하면 Fig. 4와 같으며 이 공간에서 표현된 한계상태식은 각각 다음과 같다.

$$g_1 = 6-(z_1+2+z_2+2) = 2-(z_1+z_2) \tag{9b}$$

$$g_2 = 9-(z_1+2)\times(z_2+2) \tag{10b}$$

$$g_3 = 4+\frac{9}{z_1-4}-z_2 \tag{11b}$$

여기서 $z_1 = (x_1-2)/1$, $z_2 = (x_2-2)/1$ 이다.

Table 1 Reliability index

Analysis method		β		
		g_1	g_2	g_3
FOSM		1.4142	1.4142	1.4142
SOSM	Breitung	1.4142	1.4900	1.3028
	Tvedt	1.4142	1.5153	1.2679
Analytic integration		1.4142	1.5117	1.2850

Table 2 Failure probabilities

Analysis method		P_f (%)		
		g_1	g_2	g_3
FOSM		7.8650	7.8650	7.8650
SOSM	Breitung	7.8650	6.8107	9.6321
	Tvedt	7.8650	6.4850	10.211
Analytic integration		7.8650	6.5301	9.9390

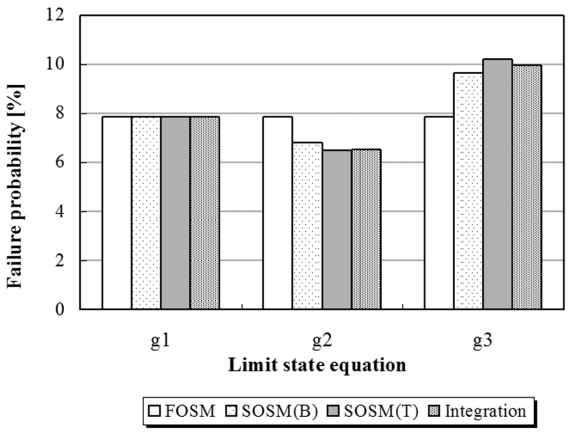


Fig. 5 Comparison of failure probabilities of Table 2

표준정규 확률변수의 공간에서 MPFP의 좌표가 (1, 1)이므로 FOSM에 의하면 세 한계상태방정식의 신뢰도지수는 $\beta_{FOSM} = \sqrt{1^2+1^2} \approx 1.4142$ 로 모두 같다. 그러나 Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 파괴영역이 같지 않으므로 파괴확률은 각각 다르고, 한계상태식이 비선형인 경우는 파괴확률의 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 SOSM으로 MPFP에서의 한계상태방정식의 곡률특성을 고려하여 신뢰도지수와 파괴확률을 구하였으며, 이 예제에서와 같이 한계상태방정식이 비교적 간단한 경우 확률밀도함수를 해석적으로 적분하여 구한 결과와 비교하여 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

한계상태방정식이 선형인 g_1의 경우 FOSM, SOSM 모두 같은 결과를 보인다. 그러나 한계상태식이 비선형인 g_2와 g_3의 경우는 FOSM의 결과는 해석으로 구한 결과와 큰 차이를 보이며 이 경우는 SOSM의 결과 중 특히 Tvedt의 파괴확률 근사식이 더욱 좋은 결과를 줌을 Fig. 5로부터 알 수 있다.

Table 3 Analytic solutions and limit state equations for probabilistic life estimation

	Analytic solution	Limit state equation
$t < t_c$	$C(x,t) = C_i + (C_o - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{D_o}{1-n}\left(\frac{t_o}{t}\right)^n t}}\right)\right]$ (13)	$g = C_{cr} - C_i - (C_o - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{D_o}{1-n}\left(\frac{t_o}{t}\right)^n t}}\right)\right]$ (15)
$t \geq t_c$	$C = C_i + (C_o - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_o\left(\frac{t_o}{t_c}\right)^n\left[1+\frac{n}{1-n}\left(\frac{t_c}{t}\right)\right]t}}\right)\right]$ (14)	$g = C_{cr} - C_i - (C_o - C_i)\left[1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{D_o\left(\frac{t_o}{t}\right)^n\left[1+\frac{n}{1-n}\left(\frac{t_c}{t}\right)\right]t}}\right)\right]$ (16)

3. 염소이온 침투에 대한 모멘트법의 적용

신설 콘크리트 구조물의 내구수명 예측과 내구성설계를 수행하는 경우나 기존 콘크리트 구조물의 잔존내구수명 예측을 위해서 염소이온 침투해석이 필요하다. 이 때 피복두께, 환경조건, 염소이온 확산계수 등의 주요변수는 고정된 값이 아니라 변동성을 보인다. 따라서 주요변수를 확률변수로 취급하여 신뢰성이론을 적용하여 내구수명을 산정해야 한다. 이 장에서는 예제를 통하여 신뢰성해석 중 염소이온 침투해석에 적합한 모멘트법에 대하여 알아본다.

3.1 한계상태방정식

염소이온이 콘크리트 내부로 침투하여 철근에 염소이온이 축적되고 이 축적량이 임계농도에 이르러 부식이 시작되는 시기를 개시기(initiation period), 부식이 진행되고 부식생성물의 팽창압에 의해 피복에 균열이 발생하는 시기를 진전기(propagation period)라 한다. 일반적으로 진전기는 개시기에 비하여 매우 짧기 때문에 이 연구에서는 부식 개시기를 수명으로 정의한다. 즉, 염소이온 침투에 대한 한계상태는 철근 표면에 염소이온이 임계량까지 축적되어 부식이 개시되는 상태이며, 이에 대응하는 확률을 부식개시확률로 정의한다.

모멘트법을 적용하기 위해서는 한계상태를 수학적으로 모델링해야 하며 이는 다음의 과정을 고려한다. 재령에 따른 염소이온 확산계수의 감소현상을 반영하기 위하여 식 (12)와 같은 지수함수 형태의 확산계수 모델을 사용한다.

$$D_a(t) = D_o\left(\frac{t_o}{t}\right)^n \tag{12}$$

여기서 D_o는 기준 확산계수, t_o는 기준 확산계수에 대응하는 기준 시기, t는 시간, n은 재령의 효과를 나타내는 재령계수이다.

내구수명 예측을 위해 일반적으로 사용되는 오차함수를 사용한 확산방정식의 해석해는 식 (13)과 같다. 여기서, x는 거리, C는 시간 t에서 깊이 x의 염소이온농도, C_i와 C_o는 각각 초기염소이온농도와 외부염소이온 농도이고, $erf(\ )$는 오차함수이다. 한편, 재령이 어느 정도 지나고 나면 확산계수는 더 이상 감소하지 않고 일정해 지는데, 확산계수가 일정해지는 시기를 t_c라 할 때 t_c 이후의 염소이온 침투깊이는 식 (14)로 구분된다.

식 (13)과 (14)에 나타난 변수 중 t, t_o, t_c를 제외한 모든 변수가 불확실성을 가지고 있으며, 이 식들에 대응되는 한계상태방정식은 각각 식 (15)와 (16)과 같다. 특히 100년 또는 그 이상의 내구수명을 요하는 해상교량과 같은 구조물의 경우 부식개시확률 산정시 콘크리트 구조물의 사용년수에 따라 염화물 노출개시 후 30년까지는 식 (15)를 사용하고 그 이후에는 식 (16)을 사용해야 한다.

3.2 Schiessl의 해석과의 비교

Schiessl[10]은 염소이온 침투에 대한 신뢰도평가를 위해 임계농도에 해당하는 침투깊이가 피복두께에 이르는 상태를 한계상태로 설정하여 다음과 같은 한계상태식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} g &= x_c - x(t) \\ &= x_c - 2C_{(Crit)}\sqrt{k_t D_{RCM,0} k_e k_c \left(\frac{t_o}{t}\right)^n t} \end{aligned} \tag{17}$$

$$C_{(Crit)} = erf^{-1}\left(1 - \frac{C_{Crit}}{C_{SN}}\right) \tag{18}$$

여기서 C_{Crit}은 임계농도, C_{SN}은 표면농도, x_c는 피복두께, $D_{RCM,0}$는 이송시험에 의한 기준확산계수, k_t는 이송시험에 의한 확산계수를 오차함수 해석해에 사용하는 겉보기 확산계수로 변환하기 위한 상수, k_e는 환경계수, k_c는 양생계수, n은 재령계수, t_o는 기준확산계수에 대응하는 기준시기이다.

Schiessl[10]의 접근은 DuraCrete 방법[11]에서의 탄산화에 대한 설계방정식과 같이 침투깊이에 대한 함수로 한계상태식을 통일하려는 시도로 판단된다. 그러나 모멘트법을 적용하는 경우 식 (18)은 미분값이 무한대가 되어 수치적으로 오류를 일으키는 경우가 존재하므로, 실제로 식 (17)의 신뢰도지수를 산정하기 위해서는 식 (18)의 확률분포를 먼저 구하여 사용하거나 또는 오차함수 역함수의

Table 4 Basic inputs for example of section 3.2

Input variable	Mean	Standard deviation	Type of distribution
C_{Crit} (%)	0.70	0.10	normal
C_{SN} (%)	4.00	0.50	normal
x_c (mm)	50.95	4.23	normal
k_t (−)	0.85	0.20	normal
$D_{RCM,0}$ (m^2/sec)	4.75×10^{-12}	0.71×10^{-12}	normal
k_e (−)	1.00	0.10	normal
k_c (−)	1.00	0.10	normal
n (−)	0.60	0.07	normal
t_o (day)	28	-	fixed
t (year)	100	-	fixed

Table 5 Reliability index of example of section 3.2

Analysis method		β
FOSM		2.2570
SOSM	Breitung	2.3019
	Tvedt	2.3092
MCS		2.3078

Table 6 Failure probabilities of example of section 3.2

Analysis method		P_f (%)
FOSM		1.2006
SOSM	Breitung	1.0670
	Tvedt	1.0467
MCS		1.0505

미분을 계산하는 등 식 (17)과 (18)을 동시에 다룰 수 있는 전용툴이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 식 (15) 및 (16)에서와 같이 염소이온 농도 비교를 기본형태로 하는 DuraCrete 방법[11]의 염소이온 침투에 대한 한계상태방정식을 적용하였다.

$$g = C_{Crit} - C_{SN} \times \left[1 - erf\left(\frac{x_c}{2\sqrt{D_0 k_e k_c \left(\frac{t_o}{t}\right)^n t}} \right) \right] \quad (19)$$

$$D_0 = k_t D_{RCM,0} \quad (20)$$

여기서 Schiessl[10]에서와 같이 이송시험에 의한 확산계수를 오차함수를 사용한 해석해에 사용할 수 있는 확산계수로 변환하기 위하여 식 (20)의 관계를 적용하였고, 확률변수들의 평균과 분산, 확률분포종류는 Table 4와 같이 Schiessl[10]의 값을 사용하였다. Tables 5와 6은 예제의 해석 결과를 보인 것으로, SOSM결과가 백만회 추출의 MCS 결과에 가장 근접함을 알 수 있다. Schiessl[10]은 동일한 문제에 대하여 신뢰도지수를 2.2로 산정하였다.

Table 7 Basic inputs for example of section 3.3

Input variable	Mean	Coefficient of variation	Type of distribution
C_{cr} (kg/m^3)	1.2	0.2	normal
C_o (kg/m^3)	9	0.1	normal
C_i (kg/m^3)	0	-	fixed
x (mm)	80	0.1	normal
D_o (m^2/sec)	1×10^{-12}	0.2	normal
n (−)	0.2	0.1	normal
t_o (day)	28	-	fixed
t_c (year)	30	-	fixed
t (year)	100	-	fixed

이 예제에서 살펴본 바와 같이 염소이온 침투문제에 대한 확률해석에서는 SOSM에 의한 Tvedt의 파괴확률과 신뢰도지수의 산정이 정확한 결과를 보여 줌을 알 수 있다.

3.3 예제를 통한 FOSM과 SOSM의 비교

이 절에서는 식 (16)에 대하여 Table 7에 나타낸 확률변수 가운데 일부 또는 전체들의 변동성을 고려하는 각 경우에 대하여, FOSM과 SOSM에 의한 신뢰도지수 및 부식개시확률 해석결과를 백만회 추출의 MCS 결과와 비교해 보고 그 특성을 분석하였다.

Case A와 Casse B에서는 선형 및 비선형 한계상태방정식이 되도록 하는 확률변수를 선택하여 FOSM과 SOSM에 의한 신뢰도지수 해석결과를 비교하였다. Case C~F는 확률변수의 개수가 점차 늘어남에 따라 신뢰도지수 해석결과를 나타낸 것이다.

Case A 확률변수: C_{cr}, C_o

확률변수가 임계농도와 표면농도인 경우는 한계상태식 식 (16)이 선형이므로 FOSM과 SOSM의 신뢰도지수가 모두 2.0068로 동일하다(Tables 8, 9).

Case B 확률변수: x, D_o

확률변수가 피복두께와 기준확산계수인 경우는 비선형 한계상태식이 되므로 FOSM 결과와 SOSM 결과가 차이를 보이며, SOSM의 경우 Tvedt 공식의 결과가 더 정확함을 알 수 있다(Tables 8, 9).

Case C~F

Case C~F은 다음과 같이 확률변수의 개수가 늘어나는 경우이며, Tables 8과 9에 나타낸 것과 같이 확률변수가 늘어남에 따라 신뢰도지수는 점차 작아진다. 역시 Tvedt의 공식을 사용한 SOSM의 결과가 더 정확하다.

- Case C 확률변수: C_{cr}, D_o
- Case D 확률변수: C_{cr}, C_o, D_o

Table 8 Reliability index of example of section 3.3

Analysis method		β					
		A	B	C	D	E	F
FOSM		2.0068	1.1545	1.3999	1.3519	1.0115	0.9558
SOSM	Breitung	2.0068	1.1659	1.4043	1.3645	1.0162	0.9603
	Tvedt	2.0068	1.1708	1.4057	1.3688	1.0186	0.9628
MCS		2.0067	1.1707	1.4060	1.3693	1.0184	0.9625

Table 9 Failure probabilities of example of section 3.3

Analysis method		P_f (%)					
		A	B	C	D	E	F
FOSM		2.2384	12.416	8.0769	8.8200	15.589	16.958
SOSM	Breitung	2.2384	12.183	8.0118	8.6203	15.477	16.847
	Tvedt	2.2384	12.084	7.9907	8.5524	15.419	16.782
MCS		2.2391	12.086	7.9862	8.5453	15.424	16.790

Table 10 Basic inputs for sensitivity check

Input variable	Mean	Coefficient of variation	Type of distribution
C_{cr} (kg/m^3)	1.2	0.1	normal
C_o (kg/m^3)	9	0.1	normal
C_i (kg/m^3)	0	-	fixed
x (mm)	80	0.1	normal
D_o (m^2/sec)	1×10^{-12}	0.1	normal
n (–)	0.2	0.1	normal
t_o (day)	28	-	fixed
t_c (year)	30	-	fixed
t (year)	100	-	fixed

- Case E 확률변수: C_{cr}, C_o, x, D_o
- Case F 확률변수: C_{cr}, C_o, x, D_o, n

이상의 예제들에서 살펴본 바와 같이 염소이온 침투문제에 대한 확률해석에는 SOSM에 의한 Tvedt의 파괴확률과 신뢰도지수의 산정이 필요한 것으로 판단된다.

4 확률해석의 주요 영향인자 분석

4.1 개요

이 장에서는 염소이온 침투에 의한 콘크리트 내 철근의 부식개시확률에 미치는 각 확률변수의 영향을 분석하였다. 이를 위하여 각 확률변수의 평균값이 변하는 경우와 확률변수의 변동계수가 변하는 경우에 대하여 부식개시확률과 신뢰도지수를 SOSM 방법으로 구하고 각 인자의 평균 또는 변동계수가 해석 결과에 미치는 영향을 비교하였다.

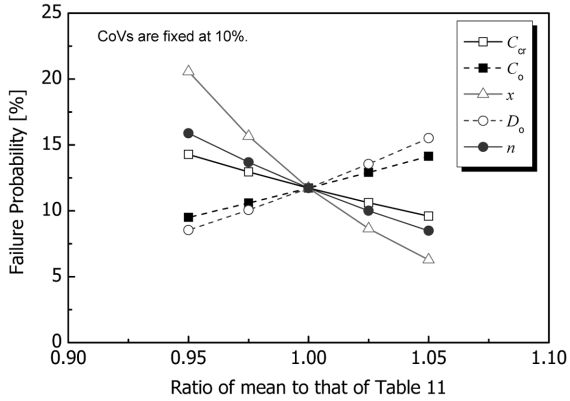


Fig. 6 Failure probability according to mean

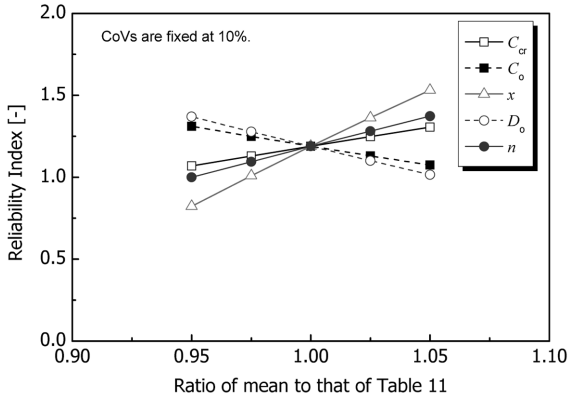


Fig. 7 Reliability index according to mean

4.2 평균값이 변하는 경우

식 (16)의 한계상태식에 대하여 모든 확률변수의 변동계수는 10%로 고정하고, 각 확률변수의 평균이 Table 10에 나타낸 값의 0.95배에서 1.05배까지 변하는 경우 100년 시점에서의 부식개시확률의 변화를 구하였다. 이렇게 구한 부식개시확률과 신뢰도지수의 변화를 Figs. 6과 7에 각각 나타내었다.

평균값이 변화할 때 부식개시확률 및 신뢰도지수에 가장 큰 영향을 주는 인자는 피복두께이며 그 다음으로 기준확산계수와 재령계수가 비슷한 영향을 미치고, 마지막으로 임계농도와 표면농도가 비슷한 영향을 미친다.

$[x > D_o \approx n > C_{cr} \approx C_o]$

4.3 변동계수가 변하는 경우

이 절에서는 확률변수의 평균값은 일정하고 확률변수의 변동계수가 변하는 경우에 대하여 고찰하였다. 확률변들의 평균값은 Table 10의 값으로 고정하였다. Schiessl[10]이 사용한 입력값인 Table 4를 보면 대부분의 확률변수의 변동성은 10~17% 범위에 있다. 또 DuraCrete[11]에서도 확률분포함수 형태가 정규분포와 유사한 확률변수들의 변동성을 살펴보면 위와 같은 범위에 있다. 이를 참고하여 각 확률변수의 변동계수가 0%에서 20%까지 변함에

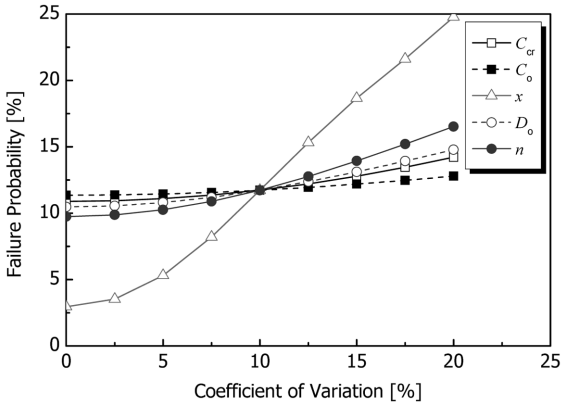


Fig. 8 Failure probability according to change of CoV

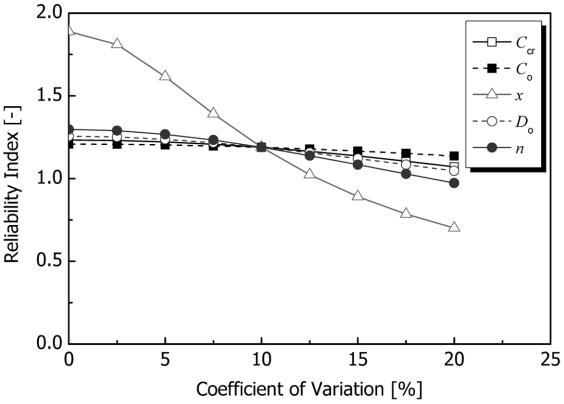


Fig. 9 Reliability index according to change of CoV

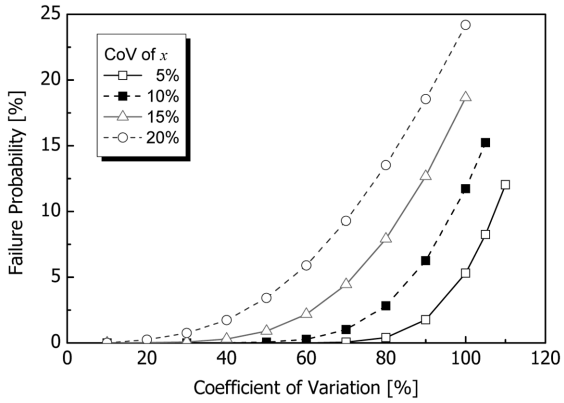


Fig. 10 Failure probability with respect to CoV of cover depth x

따라 부식개시확률과 신뢰도지수의 변화를 계산하여 그 결과를 Figs. 8과 9에 각각 나타내었다.

피복두께의 변동성이 결과에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 다음으로 재령계수, 기준확산계수, 임계농도, 표면농도의 순으로 나타났다.

$$[x > n > D_o > C_{cr} > C_o]$$

특히 피복두께의 경우, 평균값이 변하는 경우 보다 변동계수가 변하는 경우의 영향이 다른 확률변수에 비하여 매우 큰 것을 알 수 있다. Figs. 10과 11은 변동성의 영향 큰 순서의 두 확률변수인 피복두께와 재령계수에 대

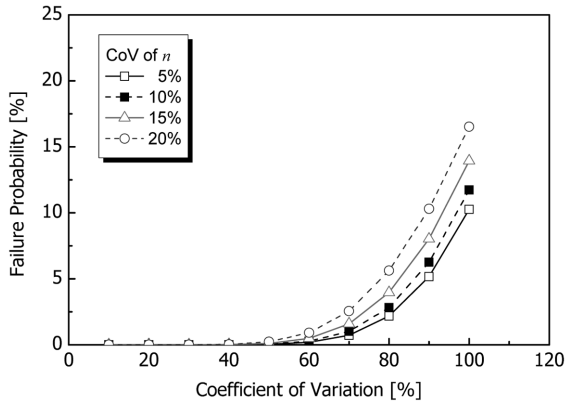


Fig. 11 Failure probability with respect to CoV of age coefficient n

하여 시간에 따른 부식개시확률의 변화를 변동계수별로 나타낸 것이며, 여기서도 피복두께의 변동성의 영향이 다른 확률변수의 영향 보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

이상에서 콘크리트 구조물의 내구수명 확보를 위해서는 건설현장에서의 피복두께 관리가 매우 중요함을 알 수 있다. 다음으로 재령계수와 기준확산계수는 콘크리트의 배합에 의해 결정되는 확률변수로서 목표내구수명을 확보하기 위해서는 적절한 재료의 선택과 배합설계가 필요하다. 마지막으로 임계농도와 표면농도는 배합특성에 의해서도 결정되지만 환경의 영향에 많은 영향을 받으므로 실제 콘크리트 구조물의 건설되는 환경을 고려한 확률특성을 결정하는 것이 중요하다.

5. 결 론

이 연구에서는 신뢰성공학의 모멘트법을 적용하여 염소이온 침투에 의한 콘크리트 내 철근의 부식개시확률 산정을 수행하였다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 신뢰성이론에 자주 사용되는 FOSM과 SOSM 방법으로 모든 명시적 한계상태방정식에 대한 신뢰도지수를 산정할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였다.
2) 염소이온 침투에 의한 부식개시확률 산정에서 몬테카를로 시뮬레이션 방법의 한계를 극복하기 위하여, 개발된 FOSM과 SOSM을 적용하였다.
3) 염소이온 침투에 대한 한계상태방정식은 비선형함수이므로 SOSM을 사용해야 더 정확한 부식개시확률 산정이 가능함을 확인하였다.
4) 각 확률변수의 평균값의 변화가 부식개시확률에 미치는 영향을 크기순으로 나열하면 다음과 같다.
   피복두께 > 기준확산계수 ≈ 재령계수 > 임계농도 ≈ 표면농도.
5) 각 확률변수의 변동성이 부식개시확률에 미치는 영향을 크기순으로 나열하면 다음과 같다.
   피복두께 > 재령계수 > 기준확산계수 > 임계농도 > 표면농도.
6) 피복두께의 변동계수 변화의 영향이 평균값 변화 보

다 더욱 현저함을 보였으며, 피복두께의 변동성 관리가 매우 중요함을 확인하였다.

이 연구에서는 확률이론에 기반한 콘크리트 구조물의 부식개시확률 산정방법에 대한 비교를 수행하였다. 여기서 한계상태방정식은 기존에 사용되던 확산방정식의 해석해를 이용하거나 DuraCrete에 적용된 형태를 이용하였으며, 한계상태방정식에 나타나는 각 확률변수의 확률특성치는 기존 연구결과에 사용된 것과 유사한 범위의 값을 사용하였다. 향후 염소이온 침투에 대한 내구성설계가 성능기반설계로 발전하기 위해서는 적절한 형태의 한계상태방정식이 설정되어야 하고, 각 확률변수의 실제 확률특성치에 대한 연구 및 목표부식개시확률 설정이 선행되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업 (08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Maage, M., Helland, S. P., E., Vennesland, Ø., and Carlsen, J., “Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment,” *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp. 602~608.
2. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete, Microstructure, Properties, and Materials,* McGraw Hill, New York, 2006, pp. 176~183.
3. Sandberg, P., *Chloride Initiated Reinforcement Corrosion in Marine Concrete*, Tech. Rep. No. TVBM-1015, Lund University, Lund, Sweden, 1998, pp. 2~7.
4. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Prentice Hall, Essex, England, 1995, pp. 563~569.
5. 김지상, 정상화, 김주형, 이광명, 배수호, “염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 2호, 2006, pp. 239~248.
6. 권성준, 박상순, 나웅진, “확률론적 해석을 통한 염해에 노출된 균열부 콘크리트 구조물의 내구수명 평가,” 대한토목학회 논문집, 27권, 6A호, 2007, pp. 881~890.
7. 정현준, 지광습, 공정식, 강진구, “베이지안 기법을 이용한 염해 콘크리트구조물의 내구성 예측,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 77~88.
8. 양영순, 서용석, 이재옥, 구조 신뢰성 공학, 서울대학교 출판부, 2002, pp. 95~110.
9. Haldar, A. and Mahadevan, S., *Reliability Assessment Using Stochastic Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, New York, 2000, pp. 86~93.
10. Schiessl, P., “New Approach to Service Life Design of Concrete Structure,” *Asian Journal of Civil Engineering* (*Building and Housing*), Vol. 6, No. 5, 2005, pp. 393~407.
11. *DuraCrete Final Technical Report*, The European Union, BriteEuRam III, 2000, pp. 44~50.

요 약 염소이온 침투를 받는 해양환경 콘크리트의 확률기반 내구수명 예측을 위해 몬테카를로 시뮬레이션 방법이 많이 사용된다. 그러나 몬테카를로 시뮬레이션 방법은 해석에 매우 긴 시간이 소요되며 해석결과도 매번 다른 결과를 준다. 이에 비해 신뢰성해석에 자주 사용되는 모멘트법은 계산에 소요되는 시간의 거의 없고, 동일문제에 대해서는 항상 동일한 결과를 주는 장점이 있다. 이에 이 연구에서는 신뢰성이론의 모멘트법을 염소이온 침투에 대한 부식개시확률 산정에 적용하였다. 이를 위해 먼저 일계이차 모멘트법과 이계이차 모멘트법에 의한 파괴확률 산정 프로그램을 개발하였다. 개발된 해석 프로그램들을 사용한 예제해석을 통하여 일계이차 모멘트법에 비하여 이계이차 모멘트법이 더 정확한 부식개시확률 산정결과를 줌을 확인하였다. 또 부식개시확률에 미치는 각 확률변수의 영향을 평가하는 민감도 해석을 수행하였으며, 가장 큰 영향인자는 피복두께로 나타났다. 특히 피복두께의 변동계수 변화에 의한 영향이 평균값 변화에 의한 영향 보다 더욱 현저함을 확인하였다.

핵심용어 : 몬테카를로 시뮬레이션, 모멘트법, 부식개시확률, 일계이차 모멘트법, 이계이차 모멘트법