



해안 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 시간의존적 염화물침투 평가

송하원^{1)*} · 백승우¹⁾ · 안기용¹⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

Time Dependent Chloride Transport Evaluation of Concrete Structures Exposed to Marine Environment

Ha-Won Song^{1)*}, Seung-Woo Pack¹⁾, and Ki Yong Ann¹⁾

¹⁾School of Civil and Environment Engr., Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT This paper presents a model for durability evaluation of concrete structures exposed to marine environment, considering mainly a build-up of surface chloride (C_s) as well as diffusion coefficient (D) and chloride threshold level (C_{lim}). In this study, time dependency of C_s and D were extensively studied for more accurate evaluation of service life of concrete structures. An analytical solution to the Fick's second law was presented for prediction of chloride ingress for time varying C_s . For the time varying C_s , a refined model using a logarithm function for time dependent C_s was proposed by the regression analysis, and averaging integrated values of the D with time over exposed duration were calculated and then used for prediction of the chloride ingress to consider time dependency of D . Durability design was also carried out for railway concrete structures exposed to marine environment to ensure 100 years of service life by using the proposed models along with the standard specification on durability in Korea. The proposed model was verified by the so-called performance-based durability design, which is widely used in Europe. Results show that the standard specification underestimates durability performances of concrete structures exposed to marine environment, so the cover depth design using current durability evaluation in the standard specifications is very much conservative. Therefore, it is found that utilizing proposed models considering time dependent characteristics of C_s and D can evaluate service life of concrete structures in marine environment more accurately.

Keywords : durability evaluation, surface chloride concentration, chloride diffusion coefficient, chloride threshold level

1. 서 론

염소이온의 침투로 인해 콘크리트 내부 철근에 발생하는 부식은 해안 환경에 노출된 RC (reinforced concrete) 구조물에 있어서 주요한 열화 인자 중 하나이다. RC 구조물 내의 철근은 시멘트 수화작용으로부터 발생한 알칼리 산화막에 의해 부식으로부터 보호된다¹⁾. 그러나 철근 표면의 염소이온농도가 임계염소이온농도 (C_{lim})에 도달하게 되면 부동태피막이 파괴되어 철근에서 부식이 시작된다. 해수나 대기 중의 비래 염분, 제설염 등에 의해 콘크리트로 염소이온을 공급되며, 콘크리트 내부에서의 염소이온 침투는 단위시멘트량, 물-결합재비, 결합재 종류 등과 같은 콘크리트 특성에 의해 지배된다. 또한 콘크리트 구조물에서의 염소이온 침투는 구조물의 외부 염소이온농도, 환경 조건 (상대습도, 온도 등)과 같은 요인에 의해 영향을 받으며, 이는 시간의존성을 갖는다²⁾.

해안가 대기 구간의 염소이온은 간만대나 비말대와 비교하면 훨씬 낮은 속도로 침투하며, 염소이온은 해안가로부터 수 킬로미터까지 주로 바람에 의해 콘크리트 표면으로 이동하게 된다³⁾. 이러한 염소이온은 해안가 대기 구간에 있는 콘크리트 표면에 누적되어, 콘크리트 내부로 침투하게 된다. 따라서 표면염소이온농도 (C_s)는 노출 기간 및 해안가로부터의 거리에 따라 변화하게 된다. 시멘트는 수화반응이 시작되고 난 후, 28~60일 내에 약 85~90%의 수화가 진행되며, 그 후에도 계속적인 수화 진행으로 인해 콘크리트 공극 구조가 치밀해진다. 따라서 콘크리트의 염소이온 침투속도는 공극의 연결 구조를 반영하는 염소이온 확산계수 (D)의 시간에 따른 감소의 영향을 받게 된다.

Fick의 제2법칙은 확산에 의한 염소이온의 침투를 예측하는데 널리 사용되며⁴⁾, 일반적으로 C_s 와 D 를 시간에 대한 상수로 가정하여 왔다. 또한 최근 들어 시멘트 수화반응과 시간에 대한 콘크리트 공극 구조의 변화를 고려하여 C_s 와 D 의 시간의존성이 고려되고 있으며^{5,7)}, 염소이온 침투 예측을 위하여 C_s 의 시간에 대한 증가를 고

*Corresponding author E-mail : song@yonsei.ac.kr

Received December 26, 2006, Accepted July 6, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

려한 Fick의 제2법칙에 대한 닫힌 형식의 해 (closed-form solution)에 대한 연구도 진행되었다^{8,9)}. 그러나 이와 관련된 장기 실험 데이터가 부족하고 콘크리트 특성과 염소 이온의 침투간의 상관관계 구명은 매우 복잡하기 때문에, C_s 와 D 의 시간의존성을 고려하여 이를 계산하기에는 어려움이 있다.

이에 본 연구에서는 현실적인 콘크리트 구조물의 염해 내구성 평가를 위해 C_s 와 D 의 시간의존성을 고려한 염소이온 확산 모델을 제안하고자 한다. 이를 위해 시간에 대한 임의의 C_s 함수가 적용 가능한 Fick의 제2법칙의 정밀해를 구하였으며, 시간 이력을 고려한 D 식을 정밀해에 적용하여 C_s 와 D , 두 변수의 시간의존성을 고려하였다. 또한 기존의 문헌을 분석하여 콘크리트 내부의 철근부식 개시 시기를 예측할 수 있는 최적의 C_{lim} 값을 사용하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안한 모델을 이용하여 국내 해안 환경에 접해 있는 철도콘크리트 구조물에 대해 목표 내구 수명 100년을 만족하도록 내구성 설계를 수행하였으며, 그 설계 결과를 동일 구조물에 대해 기존의 콘크리트표준시방서 내구성편¹⁰⁾의 설계 결과와 비교/분석하였다.

2. 염소이온 침투 모델

2.1 기존의 염소이온 침투 모델

콘크리트 내부의 염소이온 침투는 농도 구배에 의한 확산, 모세관 흡작, 전기장 내에서 이온의 이동, 압력차로 인한 흐름 등과 같은 여러 가지 메커니즘에 의해 발생한다¹¹⁾. 이중에서 콘크리트 내 확산은 전기장의 영향이 없고 콘크리트의 공극이 안정적인 습윤상태를 유지하고 있는 경우, 염소이온 이동의 주된 메커니즘이라고 할 수 있다¹²⁾.

최근까지 C_s 의 시간의존성은 기존의 염소이온 침투 모델에서 계산의 불편함, 시간에 대해 정밀한 C_s 값 산정의 어려움 등으로 일반적으로 무시해 왔으며, 시간에 대해 일정한 상수 C_s 가 널리 사용되어 왔다. 그러나 이러한 C_s 값에 비해 좀 더 현실적인 시간의존성을 고려한 C_s 모델이 여러 연구자들에 의해 제안되었으며, Table 1에 이

러한 C_s 모델 및 이 모델로부터 도출한 Fick의 제2법칙의 해를 나열하였다.

시멘트의 수화반응은 시간에 따라 콘크리트 공극 구조의 개선, 즉 공극의 연계성을 감소시키기 때문에 콘크리트의 염소이온 확산계수는 시간에 대해 감소하게 된다. 또한 시멘트 내의 수화 생성물인 C_3A 는 프리델염을 형성하거나 염소이온과 반응하며, 콘크리트 내의 염소이온 확산을 지연시킨다. 또한 콘크리트 확산계수의 감소는 결합재와 결합재량 및 물-결합재비에 의존한다고 알려져 있다³⁾. 고로슬래그나 플라이애쉬와 같은 혼화재의 효과는 초기재령에서는 확산계수의 감소 효과가 입증되지 않았지만, 콘크리트의 장기 재령에서는 보통포틀랜드시멘트 (OPC)에 비해 재령에 따라 확산계수의 큰 감소를 보이게 되므로 확산계수의 시간의존성에 큰 영향을 주게 된다.

식 (1)에 대표적인 시간의존성을 고려한 확산계수 예측식을 나타내었다. 염소이온 침투 해석시 Fick의 제2법칙에 유한차분법을 적용하는 내구 수명 예측 프로그램인 Life-365에서 식 (1)의 확산계수를 사용하였다⁵⁾.

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (1)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간 t 에서의 확산계수, D_{ref} 는 기준 시간 t_{ref} (= 28일)에서의 확산계수, m 은 재령계수를 나타낸다.

식 (1)의 확산계수 예측 모델은 유한차분법 (FDM)과 같은 컴퓨터를 활용한 수치해석기법을 사용하지 않을 경우, 장기 수화반응에 따른 확산계수의 시간이력의 변화를 고려하지 못한다는 한계가 있다. 즉, 50년에서의 D 값은 식 (1)로부터 쉽게 계산될 수 있지만, 지난 50년 동안의 D 값의 변화 이력은 염소이온 분포를 해석하는데 있어서 무시될 수밖에 없으며, 이는 콘크리트 구조물의 내구수명 예측 시 잘못된 공학적 판단을 불러 올 수 있다.

2.2 C_s 와 D 의 시간의존성을 고려한 염소이온 침투 해석 모델

2.2.1 C_s 의 시간의존성을 고려한 Fick의 제2법칙의 정밀해

확산계수가 시간에 대해 상수라는 가정하에 Carslaw

Table 1 Various diffusion models utilizing time dependent C_s

C_s functions	Solutions to Fick's second law	References
$C_s = \text{constant}$	$C(x,t) = C_s \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$	Crank 1983 ¹³⁾
$C_s(t) = k_1 t$	$C(x,t) = k_1 t \left[\left(1 + \frac{x^2}{2Dt} \right) \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi Dt}} \right) e^{-x^2/4Dt} \right]$	Amey et al. 1998 ¹⁴⁾ Uji et al. 1990 ⁸⁾
$C_s(t) = k_2 t^{1/2}$	$C(x,t) = k_2 \sqrt{t} \left[e^{-x^2/4Dt} - \left\{ \frac{x\sqrt{x}}{2\sqrt{Dt}} \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right\} \right]$	
$C_s(t) = C_0 [1 - e^{-\gamma t}]$	$C(x,t) = C_0 \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{\frac{x^2}{4Dt}} \text{Re} [d^{-z^2} \text{erfc}(-iz)] \right]$	Kassir et al. 2002 ⁹⁾

등¹⁵⁾이 제안한 고체상의 열전도 방정식을 농도 구배로 인한 이온의 확산에 적용하여 시간에 따라 변화하는 $C_s(t)$ 를 초기 조건으로 하여, Fick의 제2법칙의 정밀해를 구하였다¹⁶⁾.

$$C(x, t) = \frac{x}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^t \left(\frac{C_s(t)}{(t-v)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4D(t-v)}} \right) dv \quad (2)$$

위의 식을 간소화하기 위하여 식 (3)의 ω 를 식 (2)에 적용한다.

$$\omega = \frac{x}{2\sqrt{D(t-v)}} \quad (3)$$

식 (3)의 ω 를 식 (2)에 대입하여 식을 간략화 하여 Fick의 제2법칙의 정밀해를 구하면 다음의 식 (4)와 같다.

$$C(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{x}{2\sqrt{D}}}^{\infty} C_s \left(t - \frac{x^2}{4Dw^2} \cdot e^{-w^2} \right) dw \quad (4)$$

2.2.2 시간의존성을 고려한 C_s 모델의 제안

Weyers 등⁷⁾이 조사한 실제 해안가의 15년간의 실험 결과에 따르면 C_s 값이 시간에 대해 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 실험 결과에 기초하여 본 연구에서는 시간의존성을 갖는 C_s 모델을 대수함수의 형태로 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$C_s(t) = \alpha[\ln(\beta t + 1)] \quad (5)$$

여기서, α 와 β 는 상수, t 는 노출기간 (년)이다.

식 (5)에서 α , β 는 실제 데이터에 대한 회귀분석을 통해 결정될 수 있으며, α 는 1.37로 결정되었고, 시간에 대한 표면염소이온농도의 상승 형태를 결정하는 계수 β 는 3.77로 결정되었다. Fig. 1에서는 Table 1에서 소개한 여러 C_s 함수 (선형함수($C_s(t) = k_1t$), 제곱근함수 ($C_s(t) = k_2t^{1/2}$), 지수함수 ($C_s(t) = C_0[1 - e^{-\gamma t}]$) 및 본 논문에서 제안한 대수함수 ($C_s(t) = \alpha[\ln(\beta t + 1)]$) 각각에 대해 실제 구조물 데이터^{7,9)}를 바탕으로 회귀 분석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2의 회귀분석계수 (R)값에서 유추할 수 있듯이, 여러 C_s 함수 중에서 선형함수와 제곱근함수는 C_s 의 시간의존성을 제대로 반영하지 못하고 있다.

지수함수 ($R^2=0.98$)와 본 연구에서 제안된 대수함수

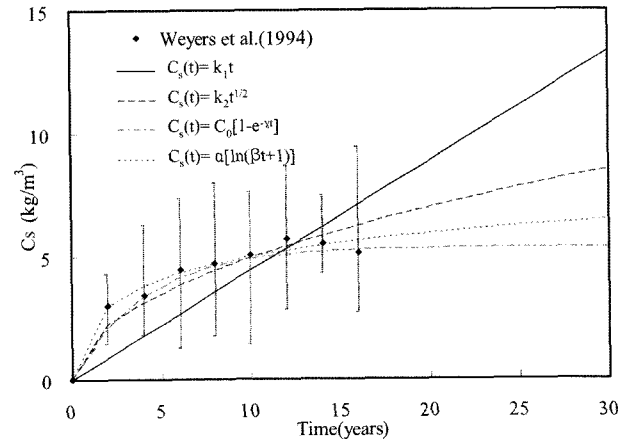


Fig. 1 Different representation for data on surface chloride

($R^2=0.99$)는 거의 동일한 R^2 값을 갖는다. 그러나 Uji 등⁸⁾에 의한 장기 실험 자료로부터, 노출 기간 15년 이상, 예를 들어 23년에서 58년까지의 해안가 대기 구간 구조물의 C_s 값은 증가함을 알 수 있으며, 지수함수로부터 계산된 C_s 값은 최대값 ($t=27$ 년)에 도달하게 되면 시간에 따라 더 이상 증가하지 않게 된다. 비록 17년 이상의 장기 데이터의 부족으로 정확도에 한계가 있지만, 위의 사실로부터 Fig. 1의 여러 함수 중에서 대수함수가 가장 정확하다고 판단된다.

한국과 일본의 내구성 관련 기준에서는 거리에 따라 C_s 값이 제시되어 있다^{10,17)}. 시방서상에 제안된 C_s 값은 대기 구간에 노출된 실제 구조물의 데이터¹⁸⁾를 분석한 결과, 콘크리트의 사용 기간 100년에 해당하는 실측값보다 더 큰 값을 보이므로, 시방서의 C_s 값을 노출 기간 100년의 C_s 값으로서 가정하여 염소이온 침투 해석을 수행하게 되면 실제 환경에 비해 안전측의 결과를 가져오게 된다. 따라서 위에서 구한 계수 β 와 표준시방서상에 제시된 C_s 값을 노출 기간 100년의 값으로 가정하여 해안가로부터 거리에 따른 α 값을 Table 3과 같이 계산할 수 있다.

Table 3 Constants α and β in refined C_s model

	Parameters	Distance from the sea (m)				
		0	100	250	500	1,000
KCl ¹⁰⁾ JSCE ¹⁶⁾	C_s (kg/m ³)	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
This study	α	1.52	0.76	0.51	0.34	0.25
	β	3.77				

Table 2 Results of regression analysis for various C_s functions (in kg/m³ unit)

C_s functions	Constants for models (Fig. 1)	Regression factors (= R^2)	References
$C_s(t) = k_1t$	$k_1 = 0.44$	0.35	Uji et al. 1990 ⁸⁾
$C_s(t) = k_2t^{1/2}$	$k_2 = 1.56$	0.90	
$C_s(t) = C_0[1 - e^{-\gamma t}]$	$C_0 = 5.34, \gamma = 0.25$	0.98	Kassir & Ghosn 2002 ⁹⁾
$C_s(t) = \alpha[\ln(\beta t + 1)]$	$\alpha = 1.37, \beta = 3.77$	0.99	This study

2.2.3 시간의존성을 고려한 염소이온 확산계수 (D)

구조물의 재령에 대한 염소이온 확산계수 (D)의 평균값 개념은 D의 시간의존성을 고려하여 Fick의 제2법칙을 해결하는데 사용된다¹⁹⁾. 확산계수의 평균값 ($D_m(t)$)은 Fig. 2와 같이 시간 t에서의 확산계수를 적분하여 시간에 대해 나눈 값으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 확산계수 평균식에 Life-365에서 제안한 시간에 대해 변화하는 확산계수 $D(t)$ ⁵⁾를 대입하여 확산계수의 시간 이력을 고려할 수 있는 식 (6)을 내구성 평가 및 설계에 적용하도록 한다²⁰⁾.

$$D_m(t) = \frac{D_R}{1-m} \left(\frac{t_R}{t}\right)^m \quad (t < t_{lim} = 30\text{년}) \quad (6a)$$

$$D_m(t) = \frac{D_R}{1-m} \left[(1-m) + m \frac{t_{lim}}{t} \right] \left(\frac{t_R}{t_{lim}}\right)^m \quad (t \geq t_{lim} = 30\text{년}) \quad (6b)$$

여기서, D_R 은 기준 시간 t_R (= 28일)에서의 확산계수이며 m 은 재령계수, t_{lim} 은 감소한계 (= 30년)를 의미한다.

기준 시간에서의 확산계수 D_R 및 재령계수 m 은 물-결합재비, 혼화재료 (실리카퓌, 고로슬래그, 플라이애쉬 등)의 치환율을 고려할 수 있는 Life-365의 모델을 참고하여 산정하였다⁵⁾.

2.3 임계염소이온농도 (C_{lim})

임계염소이온농도 (C_{lim})는 해안 환경에 접해 있는 콘크리트 구조물의 내구 수명 예측에 있어서 철근의 부식 개시 시기를 결정한다는 측면에서 중요한 설계 변수가 된다. RC 구조물의 내부 철근은 제설염이나 해수로부터 공급된 염소이온이 콘크리트 내부로 침투, 확산하여 철근 위치에서의 염소이온농도가 C_{lim} 을 초과하게 되면 부식 환경에 놓이게 된다. C_{lim} 은 콘크리트 내부로 침투한 염소이온이 철근의 부동태 피막을 파괴시키는 염소이온 농도로 정의할 수 있다²¹⁾. C_{lim} 은 자유염소이온농도, 전염소이온농도 및 수산화이온 및 염소이온 농도비 ($[Cl^-]/[OH^-]$)로써 나타낼 수 있다. 기존의 문헌에 따르면 유럽

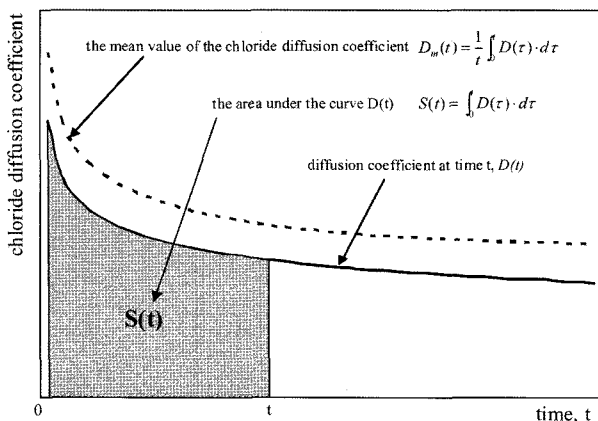


Fig. 2 The mean value of the chloride diffusion coefficient $D_m(t)$ during exposure time from 0 to t

지역 교량에서 측정된 C_{lim} 은 전염소이온농도로 표현하였을 때, 단위결합재량 대비 0.2에서 1.5%의 범위를 갖는다^{5,22,23)}. 또한 여러 다양한 부식 환경 하에서 실측 C_{lim} 값의 불확실성으로 인해 단위결합재량 대비 0.2에서 0.4%의 보수적인 값이 내구수명 예측에 사용되고 있다^{24,25)}. 일본토목학회¹⁷⁾는 C_{lim} 이 염소이온이 함유된 콘크리트의 공시체를 이용한 실내 촉진 실험 결과로부터 0.3~0.6 kg/m³이며, 실제 환경의 외부 폭로 실험 결과는 1.2~2.4 kg/m³임을 실험을 통해 보고하였으며, 현재 한국과 일본의 내구성 관련 기준^{10,17)}에서는 1.2 kg/m³이 철근의 부식 개시 시점으로서 제시되었다. 그러나 단위시멘트량은 시멘트 수화물의 부식 방지 특성을 내포하고 있으며, 철근과 콘크리트 계면에서의 구속된 염소이온으로 인한 어느 정도의 부식 위험성을 고려하여야 하므로 C_{lim} 은 단위시멘트량에 대한 전염소이온농도로서 나타내는 것이 타당하다²⁶⁾. 또한 1.2 kg/m³의 C_{lim} 값은 단위시멘트량이 300 kg/m³인 콘크리트에 대해 0.4%에 해당하며, 이는 콘크리트 구조물에 대해 최소 한계치이다. 그러므로 콘크리트 중의 임계염소이온농도는 모든 경우의 콘크리트에 대해 일괄적으로 1.2 kg/m³를 적용하기보다는 시멘트 중량 대비 0.4%가 더욱 합리적인 염해 환경의 콘크리트 구조물에 대한 내구성 평가를 가능케 할 수 있을 것이다.

3. 염해 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 내구 수명 예측

2004년 제정된 콘크리트표준시방서 내구성편¹⁰⁾에서는 콘크리트 구조물에 대하여 다양한 열화요인 (염해, 탄산화, 동해 등)에 대한 내구성 평가 절차를 규정하였다. 본 논문에서 제안한 내구성 평가 모델과 콘크리트표준시방서 모델을 이용하여 해안 환경에 있는 콘크리트 구조물에 대해 염해에 대한 내구수명을 예측하였다. Table 4와 같이, 피복두께는 50 mm와 80 mm, 물-결합재비는 0.3~0.5% 범위에서, 해안으로부터의 거리는 100 m와 250 m 각각에 대해 평가하였으며 다음의 Fig. 3에 각 해석 조건에 대한 내구 수명의 평가 결과를 나타내었다.

Table 4의 각 해석 조건에 대하여 본 논문에서 제안된 모델 및 콘크리트표준시방서 내구성편의 절차를 통해 내구 수명 평가를 수행한 결과, 모든 경우에서 제안된 모델을 통한 평가 결과가 표준시방서의 평가 결과에 비해 수명이 높게 나왔음을 알 수 있다. 이로부터 콘크리트표준시방서 내구성편이 제안된 모델에 비해 콘크리트 구조

Table 4 Conditions of a concrete structure in the marine applications

Parameters	Unit	Values
Water binder ratio (W/B)	%	30, 40 and 50
Replacement level of admixtures	%	OPC and SG 40
Cover depth (x)	mm	50 and 80
Distance from the sea	m	100 and 250

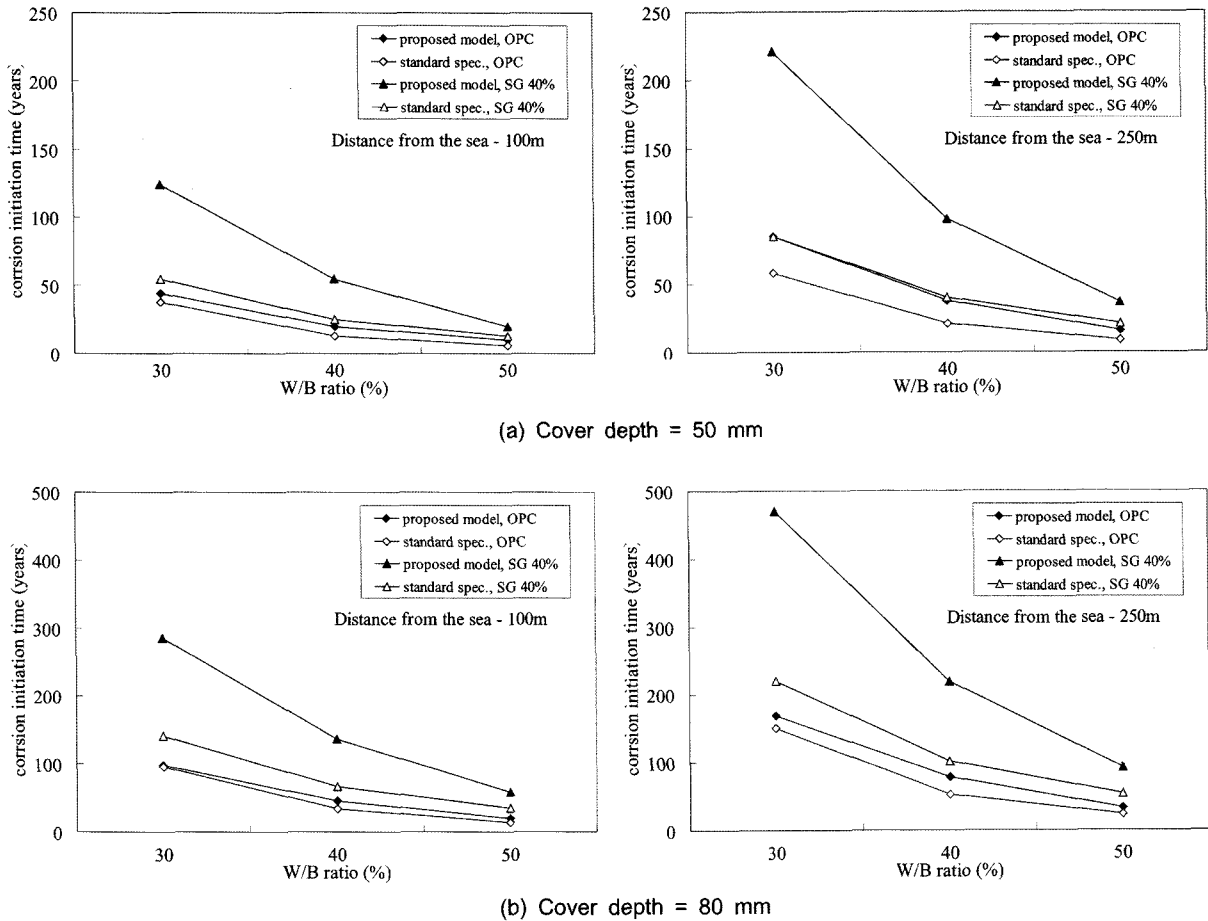


Fig. 3 Predicted corrosion initiation time

물의 염해 내구 성능을 과소평가하고 있음을 알 수 있다.

또한 콘크리트구조설계기준²⁷⁾의 최소 피복 규정은 특수 환경, 즉 해안에서 250 m 이내에 위치하는 콘크리트 구조물의 경우 벽체나 슬래브는 50 mm, 기타 부재는 80 mm 로 제시되어 있다. 해안으로부터의 거리가 100 m, 250 m 에 위치하는 피복두께 50 mm 구조물의 경우에 제안된 모델에 의해 내구 수명을 예측한 결과 고로슬래그를 혼입한 물-결합재비 30%의 경우를 제외하고는 모두 내구 수명 100년을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 피복두께 50 mm로써 고내구성을 요하는 콘크리트 구조물의 경우에는 혼화재의 첨가 및 낮은 물-결합재비의 적용이 배합설계시 고려되어야 한다고 판단된다.

피복두께 80 mm 구조물의 해석 결과로부터, 해안에서 100 m에 위치하는 경우에는 슬래그를 혼입한 모든 물-결합재비에 대해 대략적으로 내구 수명 100년을 만족하지만, 혼화재가 첨가되지 않은 OPC를 사용한 구조물은 30%의 물-결합재비를 제외하고 모두 내구 수명 100년을 만족하지 못하였다. 또한 해안으로부터 250 m에 위치하고 있는 구조물에 대한 해석 결과에서도 슬래그를 혼입하는 모든 경우에 대해 내구 수명이 100년을 초과하지만, 50% 물-결합재비의 OPC를 사용한 구조물은 약 50년 정도로 평가되었다. 그러므로 피복두께 80 mm로써 100년 이상의 고내구성을 필요로 하는 해안가의 콘크리트 구조물의 배합설계시에는 40%를 초과하는 높은 물-결합재비의 콘

크리트는 지양해야 할 필요가 있다고 판단된다.

4. 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 설계 및 검증

4.1 제안된 모델을 이용한 철도 구조물의 내구성 설계

본 절에서는 이번 연구에서 제안한 내구성 평가 모델과 기존의 콘크리트표준시방서¹⁰⁾의 모델에 대하여, 염해 환경 하에 있는 철도 콘크리트 구조물의 여러 부재 (concrete slab, PSC beam, preflex beam, substructure, retaining wall) 에 대해 내구 수명 100년을 보장할 수 있도록 내구성 설계를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4와 Tables 5, 6에 나타내었다. 단 제안 모델을 통한 내구성 설계시에 기존의 시방서¹⁰⁾와 동일한 안전율을 적용하여 설계를 수행하였다.

시방서를 통한 설계 결과로부터, OPC를 사용하는 경우 거의 모든 부재에 대해 내구성 설계로부터 도출된 설계피복두께 (x_s)가 구조 설계에 의한 피복두께 (x_{sd})보다 큰 값을 유발하였으며, 고로슬래그를 사용하는 경우에도 해안으로부터 거리 1,000 m 구간에 있는 구조물을 제외하고는 상당수가 x_{sd} 보다 큰 값이 계산되었으며, 따라서 상당수가 시공시 적용이 어렵도록 지나치게 큰 피복두께의 결과를 보여주고 있다. 그러나 제안된 모델을 사용하여 계산된 x_s 의 경우에는 슬래그 40%를 혼입한 콘크리트를 사용한 경우 해안으로부터 거리 250 m의 floor slab

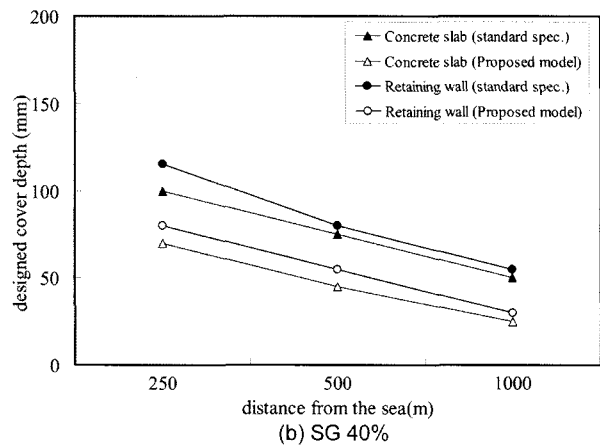
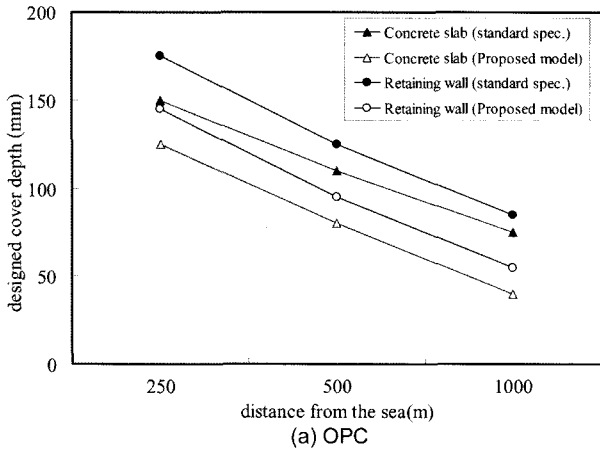


Fig. 4 Designed cover depth for 100 years of service life

와 PSC beam에 대해서만 만족하지 못했을 뿐, 나머지 구간에 대해서는 모두 x_{sd} 보다 작은 값이 나왔음을 알 수

Table 5 Designed cover depth of marine components for 100 years of service life - standard spec.

Components	W/B	Binder contents (kg/m ³)	x_{sd}^* (mm)	x_r (mm)					
				OPC			SG 40%		
				250 m	500 m	1,000 m	250 m	500 m	1,000 m
Concrete slab	0.47	369	50	150	110	75	100	75	50
PSC beam	0.377	441	40	100	70	50	75	55	40
Preflex beam	0.34	507	50	85	60	40	65	50	35
Substructure	0.47	369	100	150	110	75	100	75	50
Retaining wall	0.51	345	80	175	125	85	115	80	55

* x_{sd} values are cover depths designed by structural designer for structures

Table 6 Required cover depth of marine component for 100 years of service life - proposed model

Components	W/B	Binder contents (kg/m ³)	x_{sd}^* (mm)	x_r (mm)					
				OPC			SG 40%		
				250 m	500 m	1,000 m	250 m	500 m	1,000 m
Concrete slab	0.47	369	50	125	80	40	70	45	25
PSC beam	0.377	441	40	80	45	<< 10	45	25	<< 10
Preflex beam	0.34	507	50	65	30	<< 10	35	15	<< 10
Substructure	0.47	369	100	125	80	40	70	45	25
Retaining wall	0.51	345	80	145	95	55	80	55	30

* x_{sd} values are cover depths designed by structural designer for structures

있다. 또한 Tables 5, 6 및 Fig. 4에서 OPC 및 SG 40%의 두가지 경우에 대해 표준시방서에 의해 계산된 설계 피복두께가 제안된 모델에 의해 얻어진 값보다 더 큰 피복두께를 요구하였다. 이러한 설계 결과의 차이는 기존의 시방서가 D와 C_s의 시간의존성을 고려하지 못하므로 염소이온 침투에 대한 구조물의 염해 내구성능을 과소평가하였기 때문이라고 판단할 수 있다.

4.2 설계 결과의 검증

콘크리트 구조물의 염해 내구성 설계 방법은 그 설계 수준에 따라 사양 설계, 결정론적 설계, 확률론적 설계의 3가지로 분류할 수 있다. 특히 확률론에 근거한 내구성 설계는 최근 내구성에 관한 ISO 국제 규격 제정에 기본으로 적용되어 성능 중심의 설계에 가장 근접한 방법으로 구조물 각 부위에 있어서 콘크리트 표면의 미세 환경 조건을 고려하여 콘크리트가 목표 내구 수명까지 소요의 성능을 유지할 수 있는지에 대해 검증이 가능한 설계법이다²⁸⁾. 염해 환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 시간의존적 특성을 고려한, 본 논문에서 제안된 모델을 검증하기 위하여 성능 중심의 확률론적 설계 기법 (PBD)²⁸⁾을 사용하였다. PBD에서 적용될 한계상태함수 ($g(t)$)는 식 (7)과 같이 표현되며, 목표 내구 수명에서의 구조물의 내구적 파괴확률 ($P_{f,t}$)은 식 (8)과 같이 정의된다²⁹⁾.

$$g(t_D) = R(t_D) - S(t_D) \quad (7)$$

$$P_{f,t} = P\{g(t_D) < 0\}_t < P_{target} = \Phi(-\beta_{target}) \quad (8)$$

여기서 R 은 설계 사용 수명 (t_D)에서 부재의 내구적 저항 성능이며, S 는 환경 하중을 나타낸다. 또한 P_{ft} 는 시간 t 에서 내구적 한계상태에 도달할 확률을 의미하며, 이는 표준정규분포함수로서 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고, β_{target} 은 목표신뢰성지수를 의미한다. 본 연구에서 내구적 한계상태는 부식 개시 시기에 도달하는 상태, 즉 콘크리트 내부의 철근에서의 염소이온농도가 C_{lim} 에 도달한 상태로 정의한다. 제안된 모델의 검증에 위해 사용된 β_{target} 값은 CEB-FIP³⁰⁾에 따라 파괴확률 10%에 해당하는 1.3으로 정하였다.

본 논문에서 C_s 와 D 의 시간의존성을 고려하여 제안된 모델의 검증을 위해 다음의 절차를 따른다: (1) 제안된 모델에 의해 주어진 배합에 대한 설계 확산계수 (D_d)를 구한다. (2) 제안된 모델로부터 계산된 설계 피복두께가 구조 설계로부터 계산된 피복두께를 만족하는 구간에 대하여 내구 수명 100년, 목표 신뢰성지수 ($\beta_{target} = 1.3$)를 만족하도록 성능 평가형 설계 기법 (PBD)에 의해 설계 피복두께 (x_p)에 해당하는 한계 확산계수 (D_{cr})를 구한다. (3) $D_{cr} > D_d$ 를 평가하여 제안된 모델이 합리적인 설계 방법인지 평가한다. Fig. 5에 이러한 내구성 설계 및 검증 절차의 흐름을 나타내었으며, 그 결과를 Tables 7, 8에 나타내었다.

성능 중심의 내구성 설계 기법에 의해 염해를 받는 대상 구조물이 목표 내구 수명 100년을 만족하도록 하는 D_{cr} 을 평가한 결과, Tables 7, 8와 같이 모든 구간에서, 제안된 모델에 의해 계산된 D_d 가 PBD에 의해 계산된 D_{cr} 보다 작게 나옴을 알 수 있다. 이는 제안된 모델이 신뢰할 만한 선진 내구성 설계 기법에 비해 보수적인 염

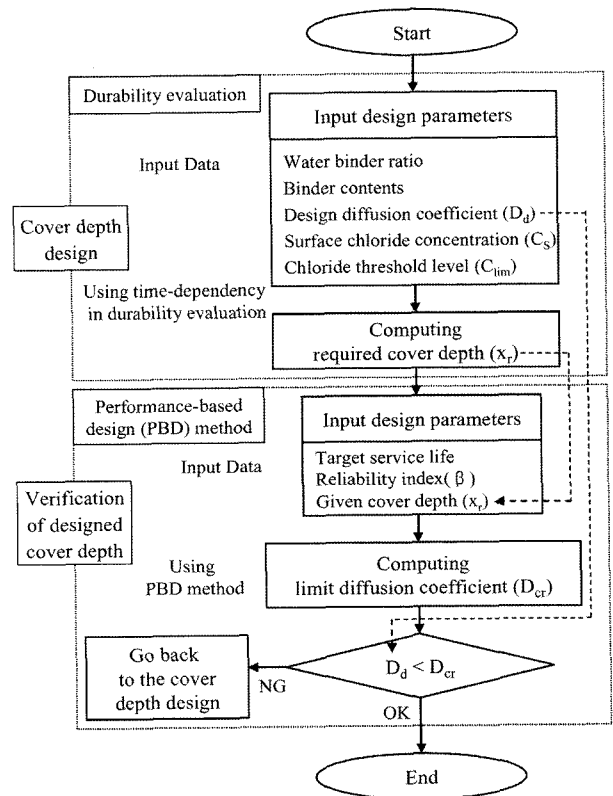


Fig. 5 Flow chart of verification of proposed durability design method

해 내구성 설계를 수행하도록 함을 의미하고, 이로부터 표준시방서의 염해 내구성 설계 기준이 매우 보수적인 설계 결과를 유발한다고 판단할 수 있으므로, 본 논문에서 제안된 염해 내구성 평가 모델은 기존 시방기준의 이

Table 7 Results of verifications for proposed models used in OPC case

Components	x_{sd}^1 (mm)	x_s^2 (mm)			x_r (mm)			D_{cr} ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)			D_d ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)	Criterion	Decision
		250 m	500 m	1,000 m	250 m	500 m	1,000 m	250 m	500 m	1,000 m			
Concrete slab	50	150	110	75	125	80	40	-	-	33.29	11.70	$D_d < D_{cr}$?	OK
PSC beam	40	100	70	50	80	45	<< 10	-	-	-	6.99		
Preflex beam	50	85	60	40	65	30	<< 10	-	24.23	-	5.70		
Substructure	100	150	110	75	125	80	40	-	21.24	33.29	11.70		
Retaining wall	80	175	125	85	145	95	55	-	-	40.27	14.59		

¹⁾ x_{sd} values are cover depths designed by structural designer for structures.

²⁾ x_s values are cover depths designed by the Korean standard specification.

Table 8 Results of verifications for proposed models used in SG 40% case

Components	x_{sd}^1 (mm)	x_s^2 (mm)			x_r (mm)			D_{cr} ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)			D_d ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)	Criterion	Decision
		250 m	500 m	1,000 m	250 m	500 m	1,000 m	250 m	500 m	1,000 m			
Concrete slab	50	100	75	50	70	45	25	-	30.75	44.39	11.70	$D_d < D_{cr}$?	OK
PSC beam	40	75	55	40	45	25	<< 10	-	21.40	-	6.99		
Preflex beam	50	65	50	35	35	15	<< 10	14.90	25.68	-	5.70		
Substructure	100	100	75	50	70	45	25	27.27	30.75	44.39	11.70		
Retaining wall	80	115	80	55	80	55	30	26.65	37.41	47.56	14.59		

¹⁾ x_{sd} values are cover depths designed by structural designer for structures.

²⁾ x_s values are cover depths designed by the Korean standard specification.

러한 문제점을 개선할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 표면 염소이온농도 (C_s)와 염소이온 확산계수 (D)의 시간의존성을 고려한 염해환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 평가 기법을 제안하고 이를 검증하였으며, 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 염소이온 침투 해석시에 C_s 의 시간의존성의 개념을 적용할 수 있도록 Fick의 제2법칙으로부터 확산방정식의 정밀해를 구하였다. 이러한 정밀해는 시간에 대해 변화하는 임의의 C_s 함수를 해석시에 사용할 수 있으므로 다양한 염해 환경 조건을 적용할 수 있고, 유한차분법과 같은 수치해석프로그램의 사용 없이도 정확한 염소이온의 확산을 평가할 수 있다.
- 2) 시간에 따라 증가하는 C_s 의 특성을 반영할 수 있는 C_s 의 시간에 대한 모델을 기존 데이터로부터 회귀분석을 통해 대수 함수의 형태로 제안하였다. 이 모델을 통해 C_s 의 시간에 따른 의존성을 정확히 반영하여 현실적인 내구성 평가 및 설계가 가능하다. 또한 확산계수의 시간의존성을 고려할 수 있도록 시간에 대한 확산계수 평균값을 염소이온 확산방정식의 정밀해에 적용하였다.
- 3) 본 논문에서 제안한 내구성 평가 모델과 기존의 콘크리트 표준시방서의 모델에 대하여, 염해 환경 하에 있는 철도 콘크리트 구조물에 대해 내구 수명 100년을 보장할 수 있도록 내구성 설계를 수행하였으며, 선진 설계 기법인 성능 중심의 확률론적 설계 기법을 사용하여 본 논문에서 제안된 모델을 검증하였다. 그 결과, 기존의 염해 내구성 설계 기준이 매우 보수적인 설계 결과를 유발하므로, 제안된 염해 내구성 평가 모델은 기존 시방기준의 이러한 문제점을 개선할 수 있다고 판단되며, 본 논문의 내구성 평가 방법은 기존 콘크리트 구조물의 수명 평가에도 효과적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 교육인적자원부 BK21사업인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연 공동사업의 일환으로, 사회기반시설물평가중점연구단(ISARC; 과제번호 C104A1020001-04A0202-00000) 및 한국철도시설공단의 재정적 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Hausmann, D. A., "Steel Corrosion in Concrete; How Does It Occur", *Materials and Protection*, Vol.6, 1967, pp.19~23.
2. Mustafa, M. A. and Yusof, K. M., "Atmospheric Chloride

Penetration into Concrete in Semitropical Marine Environment", *Cement and Concrete Research*, Vol.24, 1994, pp.661~670.

3. McGee R., "Modelling of Durability Performance of Tasmanian Bridges", In: Melchers RE, Stewart MG, Editors, *ICASP8 Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, Vol.1, 1999, pp.297~306.
4. Collepardi, M., Marcialis, A., and Turriziani, R., "Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concrete", *Journal of American Ceramic Society*, Vol.55, No.10, 1972, pp.534~535.
5. Thomas, M. D. A. and Bentz, E. C., *Life-365 Manual*, Released with Program by Master Builders, 2000, pp.6~10
6. Bamforth, P. B., "The Derivation of Input Data for Modelling Chloride Ingress from Eight-Years UK Coastal Exposure Trials", *Magazine of Concrete Research*, Vol.51, 1999, pp.87~96.
7. Weyers, R. E., Fitch, M. G., Larsen, E. P., Al-Qadi, I., Chamberlin, W. P., and Hoffman, P. C., *Concrete Bridge Protection and Rehabilitation: Chemical and Physical Techniques*, Service Life Estimates, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC, 1994, pp.139~189.
8. Uji, K., Matsuoka, Y., and Maruya, T., "Formulation of an Equation for Surface Chloride Content of Concrete due to Permeation of Chloride", *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Elsevier Applied Science, 1990, pp.258~267.
9. Kassir, M. K. and Ghosn, M., "Chloride-Induced Corrosion of Reinforced Concrete Bridge Decks", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, 2002, pp.139~143.
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서 내구성편, 한국콘크리트학회, 2004, pp.15~18.
11. Buenfeld, N. R., Shurafa-Daoudi, M. T., and McLoughlin, I. M., "Chloride Transport due to wick Action in Concrete", In: *Chloride Penetration into Concrete*, L.O. Nilsson and J. P. Oliver, eds., RILEM Publication, Paris, France, 1997, pp.302~324.
12. Song, H. W., Lee, C. H., and Ahn, K. Y., "Factors Influencing Chloride Transport in Concrete Structures Exposed to Marine Environments", *Cement and Concrete Composite*, 2007, Online Available.
13. Crank, J., *The Mathematics of Diffusion*, The Clarendon Press (2), Oxford, 1975, pp.19~21.
14. Amey, S. L., Johnson, D. A., Miltenberger, M. A., and Farzam, H., "Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures: An Environment Methodology", *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.2, 1998, pp.205~214.
15. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, The Clarendon Press (2), Oxford, 1959, pp.50~92.
16. Song, H. W., Pack, S. W., and Moon, J. S., "Durability Evaluation of Concrete Structures Exposed to Marine Environment Focusing on a Chloride Build-up on Concrete Surface", *Proceedings of the International Workshop on Life Cycle Management of Coastal Concrete Structures*, Nagaoka, Japan, 2006, pp.1~9.
17. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書(構造性能照査編), 2002, pp.94~114.
18. Kawamura, C., Tanimura, Y., Sogabe, M., Tottori, S., Hasegawa, M., and Higashigawa, K., "Study on the Penetration of

- Chloride Ions into Concrete Based on Investigation of Railway Structures”, *Journal of the Japan Society of Civil Engineering*, No.781, Vol.66, 2005, pp.193~204.
19. Poulsen, E., “On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Miniseminar-Chloride Transport”, *Department of Building Materials*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1993, pp.1~12.
 20. 한국콘크리트학회, 해양 환경에서 염해를 받는 철근콘크리트 조 구조물의 유지관리 지침(안), 특수환경콘크리트 위원회, 2004, pp.26~51.
 21. Schiessl, P. and Raupach, M., “Influence of Concrete Composition and Microclimate on the Critical Chloride Content in Concrete”, In: *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, Page, C. L., Treadaway, K. W. J. & Bamforth, P. B., eds., Elsevier Applied Science, London UK, 1990, pp.49~58.
 22. Vassie, P., “Reinforcement Corrosion and the Durability of Concrete Bridges”, *Proceeding of Institution of Civil Engineers*, Vol.76, 1984, pp.713~723.
 23. British Standard (BS) 8110, Part 1, *Structural Use of Concrete - Code of Practice for Design and Construction*, British Standards Institute, London UK, 1985, pp.3~8.
 24. Hooton, R. D., Geiker, M. R., and Bentz, E. C., “Effects of Curing on Chloride Ingress and Implications on Service Life”, *ACI Material Journal*, Vol.99, 2002, pp.201~206.
 25. Liu, Y. and Weyer, R. E., “Time to Cracking for Chloride-Induced Corrosion in Reinforced Concrete”, In: *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Page, C.L., Bamforth, P.B. and Figg, J.W., eds., Cambridge UK, 1996, pp.88~104.
 26. Ann, K. Y. and Song, H. W., “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete”, *Corrosion Science*, 2007, Online Available.
 27. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2003, pp.95~115.
 28. ISO/TC98, *General Principles on the Design of Structures for Durability*, ISO/CD 13823, 2005, pp.1~8
 29. DuraCrete, *Final Technical Report, Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures*, Document BE95-1347/R17, European Brite-Euram Programme, 2000, pp.27~51.
 30. CEB-FIP, *Model Code for Service Life Design, the International Federation for Structural Concrete (fib)*, Task Group 5.6, 2006, pp.38~39

요약 본 연구에서는 해안 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성 평가에 대한 모델을 표면 염소이온농도 (C_s)의 시간에 대한 증가와 염소이온 확산계수 (D) 및 임계염소이온농도 (C_{lim})를 고려하여 제안하였다. 또한 콘크리트 구조물의 정밀한 내구수명 예측을 위하여 C_s 와 D 의 시간의존성이 고려되었으며, 시간에 따라 변화하는 C_s 를 고려한 Fick의 제2법칙의 정밀해를 구하였다. C_s 의 시간의존성에 대해서는, 기존 실험 결과를 바탕으로 시간에 대한 대수 함수 형태의 C_s 모델을 제안하였으며, D 의 시간의존성을 고려하기 위하여 구조물의 전체 노출 기간에 대한 시간의 평균값을 적용하였다. 또한 염해 환경 하에 있는 철도 구조물이 100년의 내구 수명을 보장할 수 있도록 하기 위해, 본 논문에서 제안된 모델과 시방서 기준에 근거하여 내구성 설계를 수행하였다. 제안된 모델은 유럽에서 널리 사용되고 있는 성능 중심의 설계 기법에 의해 검증되었으며, 이로부터 기존의 시방서 설계기준은 해안 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구 성능을 과소 평가하여 매우 보수적인 설계결과를 유발하고 있음을 알 수 있다. C_s 와 D 의 시간의존성을 고려한 본 모델은 기존 시방기준의 이러한 문제점을 개선하여 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구수명을 정확하고 합리적으로 평가할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 내구성 평가, 표면염소이온농도, 염소이온 확산계수, 임계염소이온농도