

철근 콘크리트 구조물의 염소이온 침투 모델

구현본^{1)*} · 김의태²⁾ · 이광명²⁾

¹⁾한국건설기술연구원 토목연구부 ²⁾성균관대학교 토목환경공학과

(2001년 12월 31일 원고접수, 2002년 12월 10일 심사완료)

Modeling of Chloride Ingress in Reinforced Concrete Structures

Hyun-Bon Koo^{1)*}, Eui-Tae Kim²⁾, and Kwang-Myong Lee²⁾

¹⁾Civil Engineering Reserch Division, Korea Institute of Construction Technology, Koyang, 411-803, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea

(Received December 31, 2001, Accepted December 10, 2002)

ABSTRACT

The degradation of reinforced concrete (RC) structures due to physical and chemical attacks has been a major issue in construction engineering. Deterioration of RC structures by chloride attack followed by reinforcement corrosion is one of the serious problems. An objective of this study is to develop a form of mathematical model of chloride ingress into concrete. In order to overcome some limits of the previous approaches, a chloride ingress model, consisting of chloride solution intrusion through the capillary pore and chloride ion diffusion through the pore water, was proposed. Moreover, the variability of chloride ion diffusivity due to the degree of hydration of cement, relative humidity in pore, exposure condition, and variation of chloride binding, was considered in the model. In order to verify the proposed model, the results predicted by the proposed model were compared with analysis results of Life-365, a computer program for predicting the service life of reinforced concrete structures exposed to chlorides. In conclusion, the proposed model would be promising to predict the chloride ion profile and to estimate the service life of RC structures.

Keywords : degradation, chloride ingress, corrosion, degree of hydration, diffusion

1. 서 론

현재까지 수행된 여러 현장 조사 및 연구 결과, 대부분의 철근 콘크리트(RC) 구조물은 완공 후 시간이 지남에 따라 설계 및 시공상의 오류, 사용 재료의 품질 및 재료 특성, 노출 환경 특성, 유지관리 요인 등과 같은 다양한 요인의 단독 또는 복합적인 영향에 의해 지속적인 내구적 열화 현상을 겪게된다. 이러한 열화 현상은 장기적인 측면에서 구조물의 성능을 저하시켜 목표수명 이전에 안전성 및 사용성에 심각한 문제를 야기하며, 최악의 경우 구조물의 붕괴까지 유발할 수도 있다. 더욱이 이러한 구조물의 열화 현상은 점차 양질의 천연 시공재료가 고갈되어 가고, 구조물이 유해 환경에 노출될 가능성이 높아짐에 따라 최근 그 문제의 심각성이 크게 대두되고 있다.

이에 따라 현재 건설 분야 전반에 걸쳐 구조물의 사용수명 증진 및 사용성·안전성 확보를 위해, 계획, 설계, 시공, 유지관리 각 단계별 특성과 적용성을 고려한 열화방지 및 성능향상 대책이 활발히 연구되고 있다. 그러나 이를 위해서는 먼저 RC 구조물의 발생 가능한 열화 현상을 규명하고, 그 진행 상황을 예측하여 해당 구조물의 사용수명을 정량적으로 평가할 수 있는 시스템이 구축되어야 한다.

일반적으로 지금까지 알려진 RC 구조물의 여러 열화 요인 중에서도 특히 염해는 그 열화 정도나 발생 빈도면에서 기타 다른 열화 요인에 비해 매우 심각하며, 이러한 열화 현상은 주로 해양 환경에 노출된 RC 구조물에서 발생하고 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 콘크리트 내부로의 염소이온 침투 메카니즘과 이에 영향을 미치는 주요 인자들의 간섭 효과를 모델링하고, 정립된 모델을 근거로 염소이온 침투 현상 및 사용수명을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

또한 본 연구에서 제안한 모델은 개발된 프로그램을 다양한 재료적, 환경적 요인을 가정한 예제의 해석을 수행함

* Corresponding author

Tel : 031-910-0557 Fax : 031-910-0121

E-mail : mygoomy@kict.re.kr

으로써 그 적용성을 검토하였으며, 각 예제의 해석 결과를 비교·분석을 통해 염소이온 침투 현상에 미치는 주요 인자의 영향을 고찰하였다.

2. 기존 연구 현황

2.1 기존의 염소이온 침투 모델

일반적으로 콘크리트로의 염소이온 침투를 가능하게 하는 여러 메카니즘 중 가장 지배적인 것은 콘크리트 내부의 공극수를 통한 염소이온 확산이다. 이러한 사실에 근거하여 Tuutti¹⁾는 콘크리트로의 염소이온 침투 거동을 오직 재료 내부의 공극수를 통한 이온 확산만으로 정의하고 다음과 같은 모델을 제안하였다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기서, D 는 공극수를 통한 콘크리트의 염소이온 확산 계수(m^2/sec), C_t 는 콘크리트의 단위 체적당 총 염소이온 농도(kgf/m^3), x 는 콘크리트 표면으로부터의 깊이, t 는 시간(재령)을 나타낸다.

이 모델은 염해 환경에 노출된 콘크리트 구조물의 염소이온 침투 거동을 근사적으로 묘사하는 기본 모델로서, 이후 여러 연구자들은 이 모델을 기본으로 한 다양한 형태의 수정 모델 및 평가 방법을 제안하였다.

그러나 실제로 염소이온의 침투 현상은 공극수를 통한 염소이온 확산뿐만 아니라 비포화 모세관 공극을 통한 염수의 직접적인 침투 현상에 의해서도 발생할 수 있다.

이러한 사실에 근거하여 Saetta²⁾와 Nagesh³⁾는 각각 다음과 같은 수정 모델을 제안하였다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{D_i}{\alpha} \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} + \frac{C_t}{\alpha} \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2)$$

$$\alpha \frac{\partial C_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_m}{\theta_{sm}} D(C_m, \theta_{sm}) \frac{\partial \theta_{sm}}{\partial x} + D_d(C_m) \frac{\partial C_m}{\partial x} \right) \quad (3)$$

여기서, $D(C_m, \theta_{sm})$ 은 염수, D_i , $D_d(C_m)$ 은 염소이온에 관한 콘크리트의 확산계수이며, C_m , θ_{sm} 은 콘크리트 단위 중량당 염소이온량과 염수의 중량(kgf/kgf), w 는 콘크리트 단위 체적당 증발 가능한 수분량(m^3/m^3), α 는 콘크리트의 염소이온 구속 계수이다.

2.2 주요 영향 인자의 간섭 효과

지금까지 수행된 연구 결과, 염소이온 침투 거동에 영향을 미치는 주요 인자는 재령(수화도), 온도, 상대습도인 것으로 알려지고 있다. Saetta²⁾와 Nagesh³⁾는 콘크리트의 재령과 상대습도의 영향을 Bazant⁴⁾의 제안식으로, 온도의 영향을 Arrhenius-Type의 식으로 고려하였다. 또한 Saouma⁵⁾는 재령과 물-시멘트비(W/C)가 콘크리트의 확산 특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고, 국지적 일조량에 따른 노출 온도차가 염소이온의 확산 속도에 미치는 영향을 모델에 반영하였다. 이 외에도 Maage⁶⁾는 성숙도에 따른 콘크리트 확산 특성의 변동성을 확산계수와 재령과의 선형관계로 간주한 평가 방법을 제안하였으며, Amey⁷⁾는 구조물의 위치에 따라 달라지는 노출 환경 특성을 고려하여, 이에 따른 사용수명 차이를 보고하였다.

3. 염소이온 침투 모델의 제안

3.1 모델의 개요

2장에서 언급한 바와 같이 실제로 콘크리트로의 염소이온 침투 현상은 공극수를 통한 염소이온 확산뿐만 아니라 모세관 공극을 통한 염수의 침투에 의해서도 발생할 수 있다. 최근 국내외적으로 염소이온 침투 현상의 지배 메카니즘의 규명과 수학적 모델링을 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으나^{1~10)} 제안된 모델마다 다소 상이하며, 많은 가정과 한계를 포함하고 있어 실제 구조물의 염소이온 침투 현상 구현에 많은 어려움이 있는 실정이다.

본 연구에서는 염수의 직접적인 침투가 미량의 유입량으로도 콘크리트내 염소이온 농도에 상당한 영향을 미칠 수 있다는 관점에서 공극수를 통한 염소이온의 확산 현상뿐만 아니라 비포화 모세관 공극을 통한 염수의 침투 현상 모듈을 염소이온 침투 현상의 지배 메카니즘으로 정의하고, 이를 수학적 모델로 정립하였다.

또한 일반적으로 콘크리트로의 염소이온의 침투 현상은 재료내 미세 공극의 형상과 분포, 공극내 수분 상태와 같은 물리적 특성에 따라 달라지며, 이는 시멘트의 종류, W/C, 재령, 재료 내·외부의 온도 및 상대습도 등의 재료적, 환경적 요인에 따라 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다. 따라서 다양한 재료적, 환경적 조건에 노출된 실제 구조물의 염소이온 침투 현상을 묘사하기 위해서는 먼저 이러한 콘크리트내 물리적 특성 규명을 통해 그에 따른 영향을 염소이온 침투 해석시 충분히 고려해야 한다.

본 연구에서는 이러한 측면에서 기존 모델이 갖고 있는 신뢰성과 적용성의 한계를 극복하고자 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수화도 및 수분 침투 모델을 이용해 재료적, 환

경적 조건에 따라 재령별, 깊이별로 상이한 콘크리트의 물리적 특성을 명확히 규명하고 그 영향을 고려한 염소이온 침투 모델을 정립하였다.

3.2 수화도 모델

본 연구에서는 시멘트의 수화도 α_c 를 모사하기 위하여 다음과 같은 Byfors¹¹⁾가 제안한 모델을 사용하였다.

$$\alpha_c = \exp \left[-\lambda_1 \left\{ \ln \left(1 + \frac{t_{eq}}{t_1} \right) \right\}^{-k_1} \right] \quad (4-a)$$

$$t_{eq} = \int_0^t \beta_T \beta_{W/C} \beta_W dt \quad (4-b)$$

여기서, t_{eq} 는 콘크리트의 등가 재령, $\beta_T, \beta_{W/C}, \beta_W$ 는 온도, 수분량, 수분 분포가 수화 반응에 미치는 영향을 고려한 계수이며, λ_1, t_1, k_1 은 재료 상수이다.

3.2.1 온도의 영향

일반적으로 시멘트의 수화도는 온도 이력에 의해 좌우되며, 수화 반응에 미치는 온도의 영향은 다음과 같은 Arrhenius-Type의 식에 의해 고려할 수 있다.

$$\beta_T = \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_o} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (5)$$

여기서, R 은 기체상수, T_o 는 기준 온도(°C), T 는 노출 온도(°C)이며, E 는 활성화 에너지(J/mol)로서 본 연구에서는 다음과 같은 Jonasson¹²⁾의 제안식을 이용하였다.

$$E(T) = R \cdot 4600 \left(\frac{30}{T+10} \right)^{0.39} \quad (6)$$

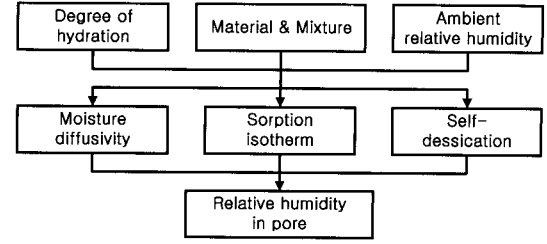
3.2.2 수분의 영향

수화 반응에서 수분은 양적인 측면, 분포적인 측면 모두에서 영향을 미치며, 먼저 양적인 측면에서의 영향은 다음과 같은 식으로 고려된다.

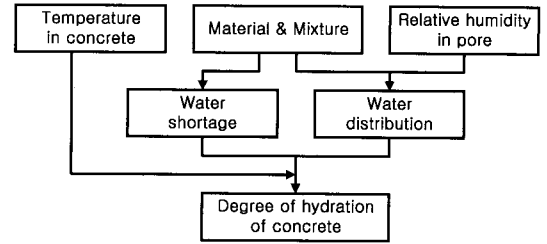
$$\beta_{W/C} = \left(\frac{\alpha_{c, \max} - \alpha_c}{\alpha_{c, \max}} \right)^r \quad (7)$$

여기서, r 은 재료 상수이며, $\alpha_{c, \max}$ 는 시멘트의 최대 수화도로서 W/C의 함수로 정의된다.

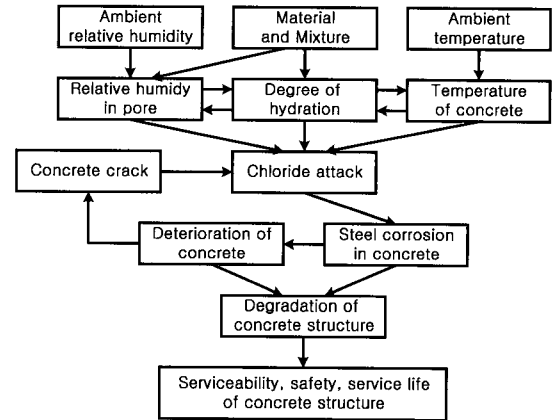
$$\alpha_{c, \max} = \frac{1.031 W/C}{0.194 + W/C} \quad (8)$$



(a) Relative humidity in pores



(b) Degree of hydration of concrete



(c) Chloride attack of concrete structure

Fig. 1 Flow chart for chloride ingress modeling

또한 수화 반응에 미치는 수분 분포의 영향은 모세관 공극수 중 수화 반응의 진행에 기여하는 자유 공극수의 분포 양상과 관련되어 있으며, 이는 공극 입도 분포 모델¹³⁾에 근거한 다음 식에 의해 고려할 수 있다.

$$\beta_W = \frac{A_{wat}(\alpha_c)}{A_{tot}(\alpha_c)} = \frac{\Phi_{wat}(\alpha_c) - \Phi_o}{\Phi_{\max}(\alpha_c) - \Phi_o} \frac{\Phi_{\max}(\alpha_c)}{\Phi_{wat}(\alpha_c)} \quad (9)$$

여기서, $A_{tot}(\alpha_c)$ 와 $A_{wat}(\alpha_c)$ 는 수화도 α_c 에서 전체 및 포화된 모세관 공극 벽의 면적, $\Phi_{wat}(\alpha_c)$ 는 모세관 공극 중 포화된 공극의 최대 직경, $\Phi_{\max}(\alpha_c)$ 와 Φ_o 는 모세관 공극의 최대 및 최소 직경(0.002 μ m)을 나타낸다.

3.3 수분 침투 모델

일반적으로 다공성 매체내의 수분 침투 현상은 확산, 포화 점성 흐름, 모세관 공극을 통한 이송에 의해 발생한다.

그러나 이 중 포화 점성 흐름에 의한 침투 현상은 압력 수두가 매우 큰 경우에 발생 가능한 현상으로서 일반적으로 대기압 상태에서는 무시됨에 따라 실제 공극내 수분 침투는 모세관 공극을 통한 액체 상태 수분의 이송 메카니즘과 증기 상태 수분의 확산 메카니즘의 복합 작용에 의한 것으로 볼 수 있다. Marten¹⁴⁾은 이러한 두 가지 메카니즘에 의해 발생하는 수분의 침투 현상을 다음과 같은 단일계수를 갖는 플럭스(flux)로 정의하였다.

$$J_m = -D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (10)$$

여기서, J_m 은 수분의 플럭스, φ 는 콘크리트의 공극내 상대습도이며, 상대습도에 의해 결정되는 수분 전달 계수 D_φ 는 다음과 같은 식에 의해 결정할 수 있다¹⁵⁾.

$$D_\varphi = D_{60\%} + (D_{100\%} - D_{60\%}) \left(\frac{\varphi - 0.6}{0.4} \right)^k \quad (11)$$

여기서, $D_{60\%}$ 와 $D_{100\%}$ 는 각각 상대습도 60%와 100%에서의 수분 전달 계수이며, k 는 재료 상수이다.

또한 수화 반응이 진행됨에 따라 콘크리트내의 수분은 다음과 같은 두 가지 형태로 존재하게 된다.

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial W_e}{\partial t} + \frac{\partial W_n}{\partial t} \quad (12)$$

여기서, W 는 콘크리트 단위 체적당 총수분량, W_e 와 W_n 은 각각 콘크리트 단위 체적당 증발 가능한 수분량과 수화 반응에 의해 화학적으로 구속된 수분량을 나타낸다.

본 연구에서는 식 (10)과 식 (12)를 이용해 다음과 같이 정의된 단일 계수를 갖는 수분의 확산 방정식을 콘크리트로의 수분 침투 모델로 사용하였다.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = k \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial \varphi_s}{\partial t} \quad (13)$$

여기서, k 는 아래 식과 같은 콘크리트 desorption isotherm 기울기의 역수 $\partial \varphi / \partial W_e$ 로 정의된다.

$$\frac{\partial W_e}{\partial \varphi} = \frac{\partial \gamma_{gel}}{\partial \varphi} W_{gel} + \frac{\partial \gamma_{cap}}{\partial \varphi} W_{cap} \quad (14)$$

여기서, γ_{gel} 과 γ_{cap} 은 수화도와 공극내 상대습도에 따른 겔 공극과 모세관 공극의 포화도를 나타내는 계수이며, W_{gel} 과 W_{cap} 은 콘크리트의 단위 체적당 겔 공극과 모세관 공극 내 최대 수분량(kgf/m³)을 나타낸다.

또한 $\partial \varphi_s / \partial t$ 는 수화도에 따른 콘크리트의 자기 건조 속도(rate of self-desiccation)를 나타내며, 이는 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} = \frac{\partial \varphi_s}{\partial \alpha_c} \frac{\partial \alpha_c}{\partial t_{eq}} \frac{\partial t_{eq}}{\partial t} \quad (15)$$

여기서 φ_s 는 수화 반응에 수분이 소모되어 발생하는 공극내 상대습도의 변화량, 즉 자기 건조 현상에 의한 상대습도의 낙차이며, 이는 다음 식에 의해 결정할 수 있다.

$$\varphi_s = (\varphi_{s,max} - 1) \left(\frac{\alpha_c}{\alpha_{c,max}} \right)^s + 1 \quad (16)$$

여기서, $\varphi_{s,max}$ 는 최대 수화도에서의 φ_s , s 는 W/C에 따라 결정되는 재료 상수이다.

3.4 염소이온 침투 모델

본 연구에서는 콘크리트로의 염소이온 침투 현상을, Table 1에서 보는 바와 같이, 비포화 모세관 공극을 통한 염수의 침투 메카니즘과 공극수를 통한 염소이온의 확산 메카니즘으로 정의하고, 이를 수학적 모델로 정립하였다.

3.4.1 콘크리트 내부로 침투된 자유 염소이온

외부로부터 침투된 자유 염소이온은 그 중 일부가 콘크리트 내부에서 화학적·물리적으로 구속됨에 따라 정량적인 변화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이를 고려하기 위해 콘크리트 내의 자유 염소이온 농도는 콘크리트의 포화도와 염소이온의 구속 능력에 따라 결정된다고 정의한 다음과 같은 제안식^{2,3)}을 사용하여 구하였다.

$$C_t = [w + (1 - w_{sat}) \cdot \gamma] C_f = \alpha C_f \quad (17)$$

Table 1 Phenomena of chloride ingress

Phenomenon	Chloride ion diffusion	Chloride solution intrusion
Reason	Transfer chloride ion for inequality of concentration	Chloride solution flows for inequality of RH
Mechanism	Ion diffusion through the pore water in concrete	Water diffusion into the unsaturated capillary pore in concrete
Equilibrium	When internal Cl ⁻ is same as exposure Cl ⁻	When internal RH is same as exposure RH

여기서, C_f 는 자유 염소이온의 농도(kgf/m³), w_{sat} 와 w 는 포화 및 비포화된 콘크리트의 단위 체적당 증발 가능한 수분량(m³/m³), γ 는 콘크리트의 염소이온 구속 계수를 나타내며, α 는 대략 0.5~1.0 사이의 값을 갖는다.

3.4.2 모세관 공극을 통한 염수의 침투

본 연구에서는 콘크리트로의 염수 침투 현상이 수분 침투 현상과 동일한 메카니즘에 의해 발생한다고 가정하였으며, 이에 따라 염수 침투에 의한 자유 염소이온의 유입량은 다음과 같이 식에 의해 결정할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = w_{sat} C_f \frac{\partial \varphi_{CS}}{\partial t} \quad (18)$$

여기서 $\partial \varphi_{CS} / \partial t$ 는 공극내 상대습도의 변화 중 침투된 염수에 의한 상대습도의 변화를 나타낸다.

결국 염수의 침투로 인해 발생하는 염소이온의 침투 현상인 식 (18)은 식 (17)을 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \alpha w_{sat} C_f \frac{\partial \varphi_{CS}}{\partial t} = w_{sat} C_t \frac{\partial \varphi_{CS}}{\partial t} \quad (19)$$

제안된 모델을 이용하기 위해서는 먼저 콘크리트 내부로 침투된 염수에 의한 상대습도 φ_{CS} 가 결정되어야 한다. 이를 위해 노출 시점 t^* 이후, 콘크리트에 발생하는 염수 침투 현상을 상대습도 φ_i^* 와 온도 T_i^* 를 초기 조건으로 하여 발생하는 수분 침투 현상과 같다고 간주하였으며, 그 정량적인 값은 노출 시점 이후 경계조건이 실제 외부 상대습도인 경우와 외부로부터 추가적인 수분의 공급이 없는 경우에 대한 해석을 수행한 후, 두 결과의 차이로부터 결정하였다. 단, 이때 콘크리트내의 염수의 전달속도는 총 상대습도에 따른 전달 속도와 같다($D_{\varphi_{CS}} = D_{\varphi}$)고 간주하였다.

3.4.3 공극수를 통한 염소이온의 확산

일반적으로 염소이온의 확산 메카니즘은 확산 방향으로의 농도의 변화율과 재료 고유의 확산도에 의해 지배됨에 따라 이온 확산에 의해 발생하는 염소이온의 침투 현상은 Fick의 법칙에 의해 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$J_{Cl} = -D_{Cl} \frac{\partial C_f}{\partial x} \quad (20)$$

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -div(J_{Cl}) = \frac{D_{Cl}}{\alpha} \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} \quad (21)$$

여기서, D_{Cl} 은 공극수를 통한 염소이온 확산에 관한 콘크리트의 확산계수(m²/sec)이다.

3.4.4 염소이온 침투 모델의 정립

두 가지 메카니즘(모세관 공극을 통한 염수 침투, 공극수를 통한 염소이온 확산)으로 정의된 콘크리트 내부로의 염소이온 침투 현상은 식 (19), 식 (21)으로부터 다음과 같은 모델로 정의된다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{D_{Cl}}{\alpha} \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} + w_{sat} C_t \frac{\partial \varphi_{CS}}{\partial t} \quad (22)$$

본 연구에서는 식 (22)와 같이 정의된 염소이온 침투 모델에 근거하여 Crank-Nicolson Method와 Thomas 알고리즘을 이용한 해석 프로그램을 개발하였다.

3.5 염소이온 확산 거동의 주요 영향 인자

기존의 연구 결과, 공극수를 통한 이온 확산 메카니즘에 의해 발생하는 염소이온 침투 현상은 주로 재령, 온도, 상대습도의 영향을 받는 것으로 보고됨에 따라²⁻¹⁰, 본 연구에서도 이들 3가지 인자를 염소이온 확산 거동의 주요 영향 인자로 선정하고 그 영향을 다음과 같이 고려하였다.

$$D_{Cl} = D_{Cl}^{28} \cdot f_1(t_{eq}) \cdot f_2(T) \cdot f_3(\varphi) \quad (23)$$

여기서, D_{Cl}^{28} 은 재령 28일에서의 확산계수이며, $f_1(t_{eq})$, $f_2(T)$, $f_3(\varphi)$ 는 각각 재령(수화도), 온도, 상대습도에 따른 확산계수의 변동성을 나타낸다.

단, 식 (23)에서 수화도, 상대습도는 3.2절과 3.3절에서 언급한 수화도 및 수분침투 모델을 통하여 결정하였다.

3.5.1 재령(수화도)의 영향

일반적으로 콘크리트는 재령이 경과할수록 수화도의 증가로 재료내 미세 공극 구조가 더욱 치밀해져 확산계수가 감소하게 되며, 이는 수화도가 최종값에 도달하여 수화반응이 종료될 때까지 지속된다.

기존 연구에서는 이러한 재령 경과에 따른 확산계수의 변동성을 대부분 시간에 따른 함수 $f(t)$ 로 정의하고 있으나, 이와 같이 단순히 실시간으로 모사된 모델은 실제 다양한 환경적, 재료적 요인에 의해 지속적으로 변화하는 콘크리트의 재료 특성을 모사하는데 많은 한계를 갖는다.

이를 위해 Sacta²⁾는 재령에 따른 확산계수의 변동성을 다음과 같은 등가 재령에 관한 식으로 정의하였으며, 본 연구에서도 이 식을 통해 재령에 따른 영향을 고려하였다.

$$f_1(t_{eq}) = \xi + (1 - \xi) \left(\frac{28}{t_{eq}} \right)^{1/2} \quad (24)$$

여기서 ξ 는 W/C에 따른 재료 상수($0 \leq \xi \leq 1$)로서 W/C가 0.32, 0.44, 0.55일 경우, ξ 는 각각 0.8, 0.6, 0.5로 정하였다.

단, 본 연구와 Saetta의 연구에서 사용한 수화도 모델의 차이로 인해 등가재령 t_{eq} 에 정량적 차이가 발생하게 되며, 두 수화도 모델에서 산출되는 등가재령비 $28/t_{eq}$ 의 관계는 아래 식과 Table 2에서 보는 바와 같다.

$$\frac{28}{t_{eq}} = A \cdot \left(\frac{28}{t_{eq}} \right)^B + C \quad (25)$$

$$* A, B, C = f(W/C) = a \cdot (W/C)^b + c$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이 $f_1(t_{eq})$ 는 재령이 경과함에 따라 감소하며, 그 감소폭은 W/C가 클수록 더욱 큰 것으로 나타났다.

3.5.2 온도의 영향

콘크리트 내부 온도는 침투되는 염소이온의 활성화도에 영향을 미쳐 결국 염소이온 침투 거동 전반에 영향을 미치게 되며, 이러한 영향은 일반적으로 다음과 같은 Arrhenius-Type의 식에 의해 고려된다.

$$f_2(T) = \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273 + T_0} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (26)$$

3.5.3 상대습도의 영향

본 연구에서는 식 (13)과 같이 제안된 수분 침투 모델을 통해 공극내 상대습도를 결정하고, 산정된 상대습도가 확산계수에 미치는 영향은 다음 식으로 고려하였다²⁾.

$$f_3(\varphi) = \left[1 + \frac{(1 - \varphi)^4}{(1 - \varphi_c)^4} \right]^{-1} \quad (27)$$

여기서 φ_c 는 임계상대습도(일반적으로 75%)이다.

Table 2 Values of coefficients in Eq. (25)

Coefficient		a	b	c
$t_{eq} \leq t_{eq}^{28}$	A	0.394	-1.631	0.742
	B	0.206	-1.010	0.902
	C	-0.462	-1.563	0.294
$t_{eq} > t_{eq}^{28}$	A	3.471	-0.019	-2.463
	B	0.526	-1.693	0.483
	C	-1.020	0.018	0.981

4. 염소이온 침투 현상의 해석

본 절에서는 본 연구의 제안 모델을 이용하여 다양한 재료적·환경적 조건에 따른 염소이온 침투 현상을 해석하였다. 대상 구조물은 피복 두께가 50 mm이고 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)가 사용된 가상의 RC 구조물로서, 배합 및 대기 노출 기간 중에 유입 또는 침투되는 염소이온이 없으며, 7일 표준 양생후 외부 환경에 노출된다고 가정하였다. 단 해석시, 온도와 상대습도 등의 외부 환경 조건은 부산 지역 기상 데이터의 10년 평균치를 사용하였으며, W/C에 따른 확산계수값은 기존 연구자¹⁶⁾의 실험 결과를 적용하였다. 기타 해석에 사용된 상세 데이터는 Table 3 및 4와 같다.

기존 연구 결과, 염소이온의 임계 부식 농도는 일반적으로 사용된 시멘트량의 0.2 ~ 1.0% 정도¹⁷⁾이므로 이를 적용하여 RC 구조물의 부식개시시간을 계산하여 Table 5에 나타내었다. 염소이온의 임계 부식 농도가 커질수록 부식개시 시기가 크게 증가함을 알 수 있다.

Table 3 Data for chloride ingress analysis

Variable	W/C	RHatm (%)	Temp (atm, °C)	Temp. (sea, °C)	D_{ci}^{28} (m ² /sec)	Depth (mm)	Tcu (day)	Tsw (day)
Water/cement ratio	0.4	66.2	14.7	16.5	2.9E-12	50	7	180
	0.6				9.4E-12			
	0.8				21.0E-12			
Exposure relative humidity	0.4	22.0	14.7	16.5	2.9E-12	30	7	180
		66.2						
		98.0						
Exposure temperature	0.4	98	5.0	9.0	2.9E-12	50	7	180
			14.7	16.5				
			30.3	28.4				
Concrete cover depth	0.4	66.2	14.7	16.5	2.9E-12	20	7	180
						30		
						40		
						50		
Curing & Exposure time	0.4	-	-	16.5	2.9E-12	30 & 50	7	7
						30	30	
						90	90	
						180	180	

* cu : curing, sw : sea water, ex : exposure, atm : atmosphere

Table 4 Material constants used for model

Material constants	Data		
	W/C=0.4	W/C=0.6	W/C=0.8
Degree of hydration (Type I cement)	λ_1	2.243	
	t_1	4.487 hr	
	k_1	1.288	
	r	2.0	1.0
Water intrusion	k	10.0	
	s	4.0	3.0
Chloride ion ingress	γ	0.7	

Table 5 Corrosion initiation time (analysis results)

Variable		Corrosion initiation time (days)		
		ACI222 0.2%	BS8110 0.4%	Page,Vassie 1.0%
Water cement ratio	W/C=0.4($D_{Cl}^{28}=2.9E-12$)	2384	3343	7028
	W/C=0.6($D_{Cl}^{28}=9.4E-12$)	932	1304	2784
	W/C=0.8($D_{Cl}^{28}=21.0E-12$)	491	647	1340
Exposure relative humidity	RH _{atm} =22.0%	2469	3428	7114
	RH _{atm} =66.2%	2384	3343	7023
	RH _{atm} =98.0%	2325	3284	6966
Exposure temperature	atm=5.0°C, sea=9.0°C	4431	3418	14084
	atm=14.7°C, sea=16.5°C	2325	3284	6966
	atm=30.3°C, sea=28.4°C	1433	1980	4042
Cover depth	20 mm	514	660	1300
	30 mm	946	1284	2608
	40 mm	1570	2182	4558
	50 mm	2384	3343	7028
Curing & exposure time	after 7 days	2134	3093	6773
	after 30 days	2168	3127	6807
	after 90 days	2238	3197	6878
	after 180 days	2332	3292	9674

4.1 염소이온 침투 현상의 주요 영향 인자

4.1.1 W/C의 영향

3.1절에서 언급한 바와 같이 염소이온 침투 현상은 다양한 인자의 영향을 받으며, 그 중 W/C는 염소이온의 침투 경로인 콘크리트의 공극 구조와 가장 관련이 깊다. 본 절에서는 W/C가 0.4, 0.6, 0.8인 콘크리트로의 염소이온 침투 거동을 해석하고 그 결과를 분석하였다.

수화도 해석 결과를 나타내는 Fig. 3을 보면, W/C에 따른 수화도의 차이는 분명한데 반해, 그 변화 양상은 초기에 급격하던 수화 발전 속도가 재령이 경과함에 따라 최대 수화도에 수렴하는 동일한 경향을 보였다.

W/C에 따른 염소이온 침투 현상은, Fig. 4에서 보는 바와 같이, W/C가 작을수록 콘크리트의 공극 구조가 밀실해짐에 따라 염소이온 침투량도 작은 것으로 나타났다. 또한 재령(수화도)에 따른 확산계수의 감소폭은 W/C에 비례함에 따라, W/C가 클수록 재령에 따른 염소이온의 농도 증가율이 다소 감소하는 것으로 나타났다.

한편 염소이온 침투 현상 해석시, 수화도의 영향을 고려하지 않으면, 재령에 따라 밀실해지는 콘크리트의 확산 특성이 반영되지 않아 염소이온의 침투량이 상당히 과대 평가되는 것으로 나타났다.

4.1.2 상대습도의 영향

외부 및 공극내 상대습도는 모세관 공극을 통한 염수의 침투 현상과 가장 밀접한 관련을 갖는 인자이다. 본 절에서는 배합과 품질이 동일한 콘크리트가 상대습도 22%,

66.2%, 98%에 노출된 경우, 염소이온 침투 거동을 해석하고 그 결과를 분석하였다.

먼저 콘크리트의 공극내 상대습도는, Fig. 5에서 보는 바와 같이, 외부 상대습도와 깊이에 따라 건습되는 속도에 상당한 차이가 발생하는 반면, 그 변화 양상은 초기 재령에서 상대습도의 급격한 감소 현상이 발생한 후, 재령이 경과할수록 노출 조건(본 예제에서는 180일 이후 100%)과 평형을 이루는 동일한 양상을 보였다. 재령에 따른 변화 양상은 확산으로 유입되는 수분량과 수화 반응에 소모되는 수분량의 시간에 따른 상대적 차이에 의해 비롯되고, 깊이에 따른 변화 양상은 표면으로부터의 거리에 따른 수분 출입의 용이성 때문인 것으로 판단된다.

결국 이러한 공극내 상대습도는 노출된 외부 상대습도에 따라 변화하게 되고, 이로 인하여 콘크리트에 유입되는 염수량에 차이가 발생한다. 깊이 30 mm에서 노출 상대습도에 따른 염소이온 농도를 나타내는 Fig. 6을 보면 노출 상대습도가 감소함에 따라 염수의 침투량의 증가에 의해 염소이온 농도가 점차적으로 증가하였다. 따라서 염소이온 침투 현상 해석시, 모세관 공극을 통한 염수의 침투 메카니즘은 반드시 고려되어야 하고, 이를 정량적으로 해석하기 위해서는 재료 내부의 공극 구조 및 상대습도 분포에 관한 해석이 반드시 수반되어야 함을 확인할 수 있었다.

4.1.3 온도의 영향

동일한 배합의 콘크리트를 3가지 온도에 각각 노출하였을 경우, 염소이온의 침투 거동을 해석하고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 온도가 높아질수록 염소이온 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 높은 온도에서 수화반응의 발전 속도 상승함에 따라 기대되는 콘크리트의 조기 밀실화 효과 보다 상대적으로 이온 활성화에 따른 염소이온 침투 속도의 가속화가 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다.

4.1.4 피복 두께에 따른 차이

본 절에서는 20, 30, 40, 50 mm 깊이에서의 염소이온 농도를 해석하고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

해석 결과, 염소이온의 농도 증가율은 콘크리트의 깊이에 따라 상당한 차이를 보였으며, 특히 표면에 근접할수록 상대습도차에 의한 염수 침투 현상(solution intrusion)에 의해 급격한 농도 증가 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 깊이가 깊어짐에 따라 이러한 염수 침투에 따른 영향은 감소하게 되며, 임의 깊이가(본 예제에서는 약 40 mm) 이상에서는 이온 확산(ion diffusion)에 의한 염소이온의 침투만이 작용함에 따라 상대적으로 낮은 농도 증가율을 갖는 것으로 확인되었다. 따라서 실제 구조물의 설계 및 시공시, 내구성 측면에서 염수 침투의 영향을 피하고, 이온 확산에 의해 침투되는 염소이온에도 안전할 수 있도록 충분한 피복 두께가 반드시 확보해야 할 것이다.

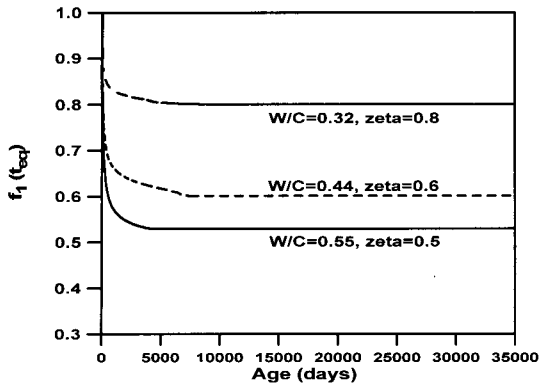


Fig. 2 Chloride ion diffusion coefficients with W/C

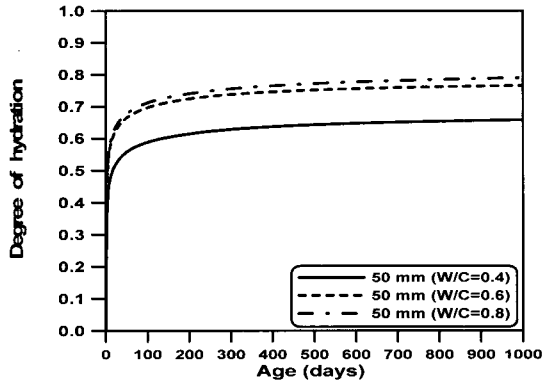


Fig. 3 Degree of hydration with W/C

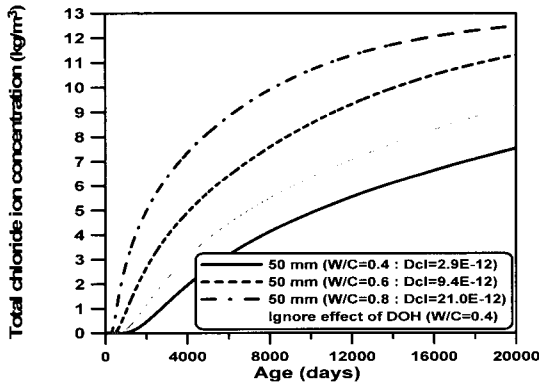


Fig. 4 Chloride ion concentration with age according to W/C

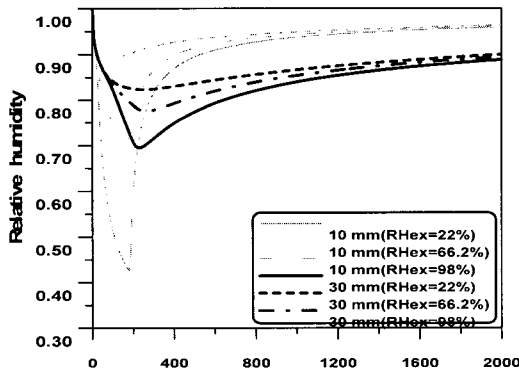


Fig. 5 Relative humidity in pore of concrete

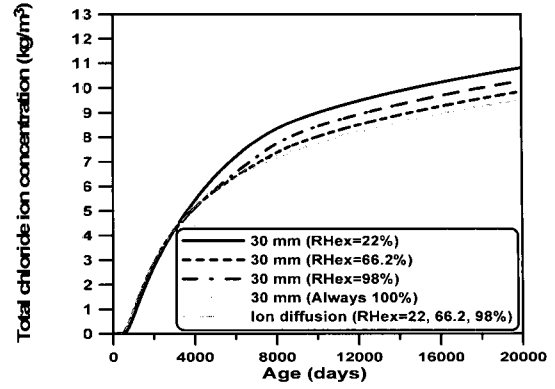


Fig. 6 Chloride ion concentration with age according to relative humidity

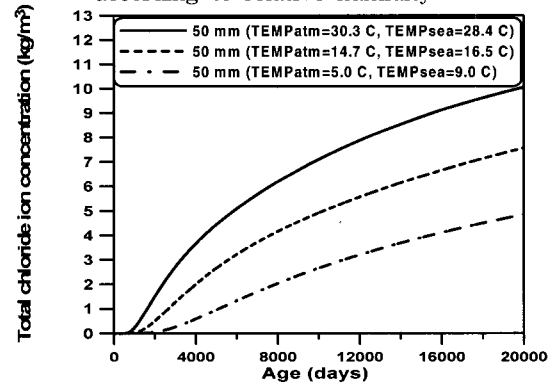


Fig. 7 Chloride ion concentration with age according to temperature

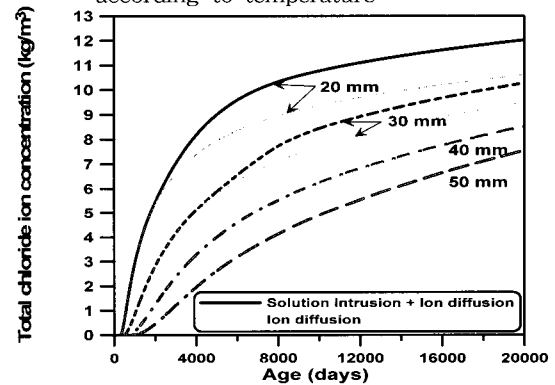


Fig. 8 Chloride ion concentration with age according to concrete depth

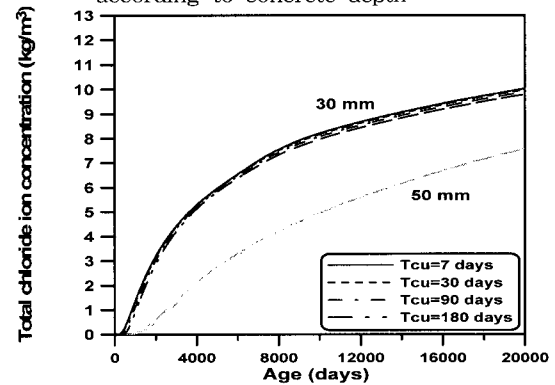


Fig. 9 Chloride ion concentration with age according to curing & exposure time

4.1.5 양생 시간 및 노출 시간의 영향

양생 시간 및 노출 시간에 따른 부식 개시 시기의 차이를 알아보기 위해 양생조건과 배합이 동일하고 양생 및 노출 시간이 다른 4가지 경우를 해석하였다.

깊이 30, 50 mm에서의 염소이온 농도를 나타내는 Fig. 9에 의하면, 양생 및 노출 시간이 염소이온의 침투 현상에 분명히 영향을 미치기는 하나, 언급한 상대습도와 온도 즉, 양생 방법 및 노출 조건에 비해서는 상대적으로 영향 정도가 낮은 것으로 나타났다.

4.2 기존 해석 프로그램과의 해석 결과 비교

4.2.1 Life-365 수명 예측 프로그램

Bentz와 Thomas¹⁸⁾가 개발한 Life-365는 염소이온 침투 현상의 지배 메커니즘을 공극수를 통한 염소이온의 확산만으로 규정하고, 배합비, 피복 두께, 재령, 노출 환경 등을 주요 인자로 하는 예측·평가 프로그램이다.

Life-365에서는, OPC 콘크리트의 경우, 재령 28일에서의 확산계수를 다음과 같은 추정식에 의해 산정하고 있다.

$$D_{28} = 1.0 \times 10^{(-12.06 + 2.40 W/C)} \quad (\text{m}^2/\text{sec}) \quad (28)$$

또한 30년 이전까지 확산계수는 재령에 따라 다음과 같이 감소하며, 그 이후는 일정한 것으로 정의하고 있다.

$$D(t) = D_{28} \left(\frac{28}{t} \right)^m \quad (29)$$

여기서, $D(t)$ 는 임의 재령에서의 확산계수, m 은 확산계수의 감소 상수(OPC의 경우에는 0.2)를 나타낸다.

또한 외부 온도에 따른 영향은 본 연구에서와 마찬가지로 식 (26)과 같은 Arrhenius-Type의 식을 통해 고려하고 있으며, 활성화 에너지의 값은 온도의 변화에 상관없이 35,000 J/mol을 사용하고 있다.

4.2.2 해석 결과의 비교

본 연구에서 제안한 식 (22)의 염소이온 침투 모델의 검증에 위해 동일한 조건에서 Life-365와 개발된 프로그램의 해석 결과를 비교하였다. 단 개발된 해석 프로그램에서 수화도의 영향은 식 (25)를 통해 고려하되, 확산계수의 감소 경향은 Life-365와 동일한 식 (29)를 이용하였다.

해석 결과를 나타내는 Fig. 10에서 보는 바와 같이, 이온 확산 거동(ion diffusion)의 경우는 거의 동일한 경향을 나타내었으나, 비포화 모세관 공극을 통한 염수 침투 현상(solution intrusion)을 포함하는 해석 결과는 표면에 가까울수록 Life-365와 다소 차이를 보였다. 이는 Life-365에서 콘크리트를 단순히 포화 상태로 가정하고 염소이온의

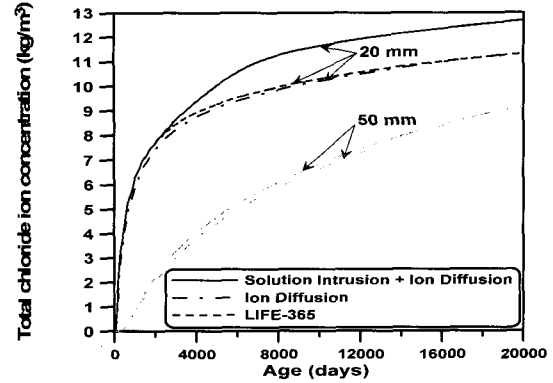


Fig. 10 Comparison of Life-365 results and results by proposed model

침투 현상을 공극수를 통한 염소이온의 확산만으로 정의함에 따라, 실제 콘크리트에서 발생 가능한 염소이온 침투 거동을 정확히 묘사하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 수행한 RC 구조물의 염소이온 침투 모델에 관한 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 염소이온 침투 현상의 지배 메커니즘을 농도차에 의해 발생하는 공극수를 통한 염소이온의 확산 현상과 상대습도차에 의해 발생하는 모세관 공극을 통한 염수 침투 현상으로 정의하고, 이를 근거로 새로운 개념의 염소이온 침투 모델을 제안하였다.
- 2) 제안된 염소이온 침투 모델을 통해 다양한 해석을 수행한 결과, 염소이온 침투 거동에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 W/C이며, 그 다음으로 온도, 상대습도 순인 것으로 나타났다. 또한 부식 개시 시기는 그 밖에도 임계 부식 농도, 피복 두께에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 3) 다양한 재료적, 환경적 요인에 따른 재료내 미세 공극 구조와 공극내 수분 상태의 변화를 수화도 모델 및 수분 침투 모델에 근거하여 정량적으로 해석하였으며, 이를 염소이온 침투 거동 해석에 반영함에 따라, 실제로 다양한 재료적, 환경적 특성을 갖는 현장 구조물에 그 적용성이 뛰어나다고 판단된다. 또한 제안된 모델은 기존 평가 프로그램과의 비교에서도 제한적인 조건하에서 그 결과가 거의 일치함에 따라 이를 통해 신뢰성 높은 내구성 평가(염소이온 침투 거동, 사용 수명)가 가능할 것으로 기대된다.
- 4) 향후 콘크리트의 수화열 및 열전달 특성에 따른 온도 변화와 콘크리트 고유의 수축 현상에 따른 미세 균열의 영향을 규명하여 이를 모델에 반영하고자 하며, 나아가 정립된 모델의 개념은 유해 물질의 침투로 인한 열화 현상 전반에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구를 지원해주신 KISTEP의 인위재해기술개발사업 관계자 여러분께 감사드리며, 아울러 연구 수행에 많은 도움을 주신 차수원 박사께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Tuutti, K. *Corrosion of Steel in Concrete*, Swedish Cement and Concrete Research institute, Stockholm, 1982.
2. Saetta, A. V., Scotta, R. V., and Vitaliani, R. V., "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.5, 1993, pp.441~451.
3. Nagesh, M. and Bishwajit, B., "Modelling of Chloride Diffusion in concrete in Concrete and Determination of Diffusion Coefficients," *ACI Materials Journal*, Vol.95, No.2, 1998, pp.113~120.
4. Bazant, Z. P. and Najjar, L. J., "Nonlinear Water Diffusion in Non-Saturated Concrete," *Materials and Structures, Research and Testing*, V. 5, No. 25, 1972, pp.3~20.
5. Hansen, E. J. and Saouma, V. E. "Numerical Simulation of Reinforced Concrete Deterioration - Part 1 : chloride diffusion," *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.2, 1999, pp.173~180.
6. Maage, M., Helland S., Poulsen, E., Vennesland, Ø, and Carlsen, J. E. "Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment," *ACI Materials Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.902~608.
7. Arney, S. L., Johnson, D. A., Miltenberger, M. A., and Farzam, H. "Predicting the Service Life of Concrete Marine Structures : An Environmental Methodology," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 2, 1998, pp.205~214.
8. 장승엽, 염소이온의 확산 모델에 의한 염해를 받는 콘크리트 구조물의 내구성 예측 연구, 석사논문, 서울대학교, 1997.
9. 김은겸, "콘크리트 구조물의 염화물 이온 침투 거동 해석," 한국콘크리트학회 논문집, 제9권 6호, 1997, pp. 233~241.
10. 박승범, 김도겸, "해양 구조물의 철근 부식 예측 기법 개발에 관한 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 6호, 1999, pp. 89~100.
11. Byfors, J., Plain concrete at early ages, *CBI report FO 3:8*, Sweden, 1980.
12. Jonasson, J-E., *Modelling of temperature, moisture and stresses in young concrete*, PhD dissertation, Lulea University of Technology, 1994.
13. Cha, S. W., *Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hydral Stresses in Hardening Concrete*, PhD dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.
14. Marten, J., *Method of Measuring the Moisture Diffusivity at High Moisture Levels*, Licentiate thesis, University of Lund, Sweden, 1997.
15. Hedenblad, G., "The Use of Mercury Intrusion Porosity or Helium Porosity to Predict the Moisture Transport Properties of Hardened Cement Paste," *Advanced Cement Based Materials*, No.6, 1997, pp.123~129.
16. Luping, T., and Nilsson, L. O., "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field," *ACI Materials Journal*, 1992, pp.49~53.
17. Hussain, S. E., Al-Gahtani, A. S., and Rasheeduzzafar., "Chloride Threshold for Corrosion of Reinforcement in Concrete," *ACI Material Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp. 534~538.
18. Bentz, E. C. and Thomas, M. D. A., "Life-365 Service Life Prediction Model," *Silica Fume Association*, 2001, pp.34~46.

요 약

최근 들어 물리·화학적 침해로 인한 RC 구조물의 열화에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. RC 구조물의 성능을 저하시키는 여러 가지 요인 중에서 특히 염소이온 침투로 인한 콘크리트내의 철근 부식이 가장 심각한 문제로 인식되고 있다. 본 연구에서는 콘크리트내의 염소이온 침투에 대한 수학적 모델을 제안하였다. 기존의 모델을 개선하기 위해 콘크리트 내부로 염소이온 침투에 대한 모델을 염수의 침투와 공극수를 통한 염소이온 확산항으로 구성하였다. 또한, 수화도, 상대습도, 온도, 염소이온 구축도에 따른 확산계수의 변동성을 염소이온 침투 모델에 고려하였다. 제안한 모델의 검증은 위하여 염소이온 침투 현상 해석 프로그램인 Life-365와의 해석 결과와 비교하였으며, 다양한 예제의 해석 결과를 비교·분석함으로써 염소이온 침투 현상에 미치는 주요 인자의 영향과 제안된 모델의 적용성을 검토하였다. 향후 제안한 염소이온 침투 모델을 적용하여 RC 구조물의 사용수명 혹은 잔존수명을 예측하여 이를 RC 구조물의 내구성 설계와 유지관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 열화, 염소이온 침투, 부식, 수화도, 확산