

## 현장 항만 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석

한상훈 <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> 한국해양연구원

(2005년 4월 18일 원고접수, 2005년 8월 30일 심사완료)

## Analysis of Chloride Ion Penetration for In-Situation Harbor Concrete Structures

Sang-Hun Han <sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Coastal & Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, 426-744, Korea

(Received April 18, 2005, Accepted August 30, 2005)

### ABSTRACT

The chloride penetration model, which considers diffusion and sorption, is proposed. The FEM program developed on the basis of the diffusion and sorption model provides the estimation of chloride concentration variation according to cyclic humidity and temperature. The humidity diffusion analysis is carried out, and the chloride ion diffusion and sorption analysis are conducted on the basis of the pre-estimated humidity data in each element. Each element has different variables at different ages and locations in analysis. At early ages, the difference of relative humidity between inner and outer concretes causes the chloride ion penetration by sorption. As the humidity diffusion reduces the difference of relative humidity between inner and outer concretes with age, the effect of sorption on the chloride ion penetration decreases with age. The cyclic humidity increases the effect of sorption on the chloride ion penetration at early ages, and increases the quantity of chloride ion around steel at later ages. Therefore, the in-situ analysis of chloride ion penetration for harbor concrete structures must be performed considering the cyclic humidity condition and the long term sorption.

**Keywords :** chloride, diffusion, sorption, FEM, cyclic humidity

### 1. 서 론

항만 콘크리트 구조물의 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중의 하나가 염소이온의 침투에 의한 철근부식이다. 염소이온이 콘크리트 구조물 내부로 침투하여 철근이 부식하게 되면 철근의 부피 팽창으로 콘크리트 덮개에 균열이 발생하고 철근의 단면적도 줄어들게 된다. 따라서 구조물은 사용연한을 채우지 못 하고 붕괴되거나 사용성에 큰 문제가 발생하게 된다. 이러한 염소이온 침투에 의한 철근부식을 예측하고 방지하기 위해서는 콘크리트 구조물의 깊이 에 따른 염소이온농도를 해석하는 것이 필요하다. 그러나, 콘크리트의 염소이온농도를 해석하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 콘크리트는 재령에 따라서 그 성질이 변화하는 재료이므로 염소이온 확산계수가 매순간마다 변화하고 구조물의 각 부분의 염소이온농도도 다르다. 또한, 습도나 온도와 같은 외부 환경 요인이 변화하면 이에

따라서도 염소이온의 농도가 달라지게 된다.

콘크리트 내부의 염소이온은 크게 2가지 메커니즘에 의해서 그 농도가 변화하게 된다. 하나는 일반적으로 알려진 염소이온의 확산에 의한 것이다. 염소이온의 농도가 높은 콘크리트 외부에서 내부로 확산현상이 발생하여 염소이온이 내부로 이동하는 메커니즘이다. 다른 하나는 수분확산에 의한 염소이온의 이동을 들 수 있다. 실제의 해양 환경 하에서는 습도의 증감이 발생하고 내부의 습도가 외부의 습도보다 낮으면 외부의 수분이 내부로 이동한다. 이때, 염소이온도 이러한 수분과 함께 이동하여 콘크리트 내부의 염소이온량을 증가시키게 되는 것이다. 따라서 현장 상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석을 수행하기 위해서는 2가지 메커니즘이 같이 고려되어야한다. 한편, 국내외적으로 염소이온 침투를 수치적으로 모델링하기 위한 많은 시도가 있어 왔다. Saetta 등<sup>1)</sup>은 염소이온의 확산뿐만 아니라 습도와 열확산을 고려하는 논문을 발표하였고 Martin-Perez 등<sup>2)</sup>은 염소이온 확산 예측에서 고정염소이온의 영향을 고려하는 모델링을 제시하였다. 또한, 국내에서는 김은겸 등<sup>3)</sup>은 가용성 염분의 이동에 초점

\* Corresponding author

E-mail : shhan@kordi.re.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

을 맞춘 모델링을 발표하였고 구현본 등<sup>4)</sup>은 염소이온 침투 모델링을 개발하여 물-시멘트비와 상대습도와 같은 영향인자들의 영향을 파악하였다. 이외에도 여러 연구자들<sup>5,6)</sup>에 의해서 염소이온 침투 해석을 위한 연구들이 진행되었지만 각 연구들은 일정한 한계와 단점을 가지고 있다. 몇몇 모델들은 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향을 고려하지 않거나 고정염소이온의 영향을 제대로 모델링하지 못 하였다. 특히, 대부분의 연구 결과들이 일정한 온도와 습도를 가진 외부 환경에 대한 수치해석을 실시하여 온도와 습도가 연속적으로 변화하는 현장 환경에 따른 염소이온 침투의 특성을 고찰하지 못 하고 있다.

본 연구에서는 대기 중에 노출된 현장 상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온농도를 모델링하기 위해서 염소이온 확산 메커니즘과 수분확산에 의한 염소이온의 이동 메커니즘을 모두 고려하여 염소이온 침투량을 유한요소법으로 모델링하였다. 또한, 실제에 가까운 콘크리트 성질을 모델링하기 위해서 환경 조건에 따라 유한요소 각각의 염소이온 확산계수와 수분 확산계수 특성을 달리하여 해석을 수행하였다. 특히, 온도와 습도가 연속적으로 변화하는 현장 환경에 따른 염소이온 침투의 특성을 고찰하기 위해 부산지역의 30년간의 기상 데이터를 이용하여 해석을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

## 2. 염소이온 침투 모델링

### 2.1 수분이동 모델링

확산에 의한 수분의 변화량은 다음과 같은 Fick의 제1법칙으로 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$J_m = - \left[ k_{hx} \frac{\partial h}{\partial x} \bar{i} + k_{hy} \frac{\partial h}{\partial y} \bar{j} + k_{hz} \frac{\partial h}{\partial z} \bar{k} \right] \quad (1)$$

여기서,  $J_m$  : 확산에 의한 수분의 변화량 (m/s)

$k_{hx}, k_{hy}, k_{hz}$  : 각 방향으로의 투수계수 (m<sup>2</sup>/s)

$h$  : 공극의 상대습도

시료의 수분확산이 등방성을 나타낸다면 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_m = -k_h \text{grad} h \quad (2)$$

식 (1)에서 (-)기호는 확산이 수분 증가의 반대 방향으로 일어난다는 것을 의미한다. Fick의 제2법칙(또는 질량보존의 법칙)을 적용하면 수분의 시간에 따른 변화를 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = -\text{div} J_m \quad (3)$$

여기서,  $H$  : 비함수량 (공극수와 공극의 최대증발수량 사이의 비)

위의 식 (3)을 정리하면 다음과 같은 상대습도에 대한 식으로 바꿀 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial h}{\partial H} \div J_m = \frac{\partial h}{\partial H} \div (k_h \text{grad} h) = \div (D_h \text{grad} h) \quad (4)$$

여기서,  $D_h$  : 수분확산계수 (m<sup>2</sup>/s) (=  $\frac{\partial h}{\partial H} k_h$ )

### 2.2 염소이온 침투 모델링

앞에서 언급한 바와 같이 염소이온의 침투는 크게 확산에 의한 것과 수분이동에 의한 것으로 나뉜다. 확산에 의한 염소이온의 침투량은 앞의 수분확산과 유사한 방법으로 Fick의 제1법칙과 제2법칙을 이용하여 구할 수 있다<sup>2,8)</sup>.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t_{diff}} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] = \text{div} (D_c' \text{grad} C_f) \quad (5)$$

여기서,  $C_f$  : 단위공극용액 부피당 자유 염소이온의 농도

$C_b$  : 단위 콘크리트부피당 고정 염소이온의 농도 (unit : kg/m<sup>3</sup>)

$\omega_e$  : 단위콘크리트 부피당 증발가능수량 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

$D_c$  : 염소이온의 확산계수 (m<sup>2</sup>/s)

$D_c'$  : 염소이온의 겉보기 확산계수 (m<sup>2</sup>/s)

$$\left( = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \right)$$

위의 식 (5)에서의  $\omega_e$ 는 부피단위로 나타낸 증발가능수량이고 식 (3)에서의  $H$ 는 질량단위를 바탕으로 계산한 값이다. 두 값들은 물리적으로는 동일한 것이다.

확산이외의 수분이동에 의한 염소이온의 침투는 이동된 수분속의 염소이온량을 계산함으로써 구할 수 있는데 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다<sup>1)</sup>.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t_{sorp}} = -\div J_{cs} = -\div C_f J_m = \div (C_f k_h \text{grad} h) \quad (6)$$

여기서,  $J_{cs}$  : 수분이동에 의한 염소이온 침투량 (kg/m<sup>2</sup> · s)

따라서, 확산과 수분이동에 의한 염소이온 침투량은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t_{diff}} + \frac{\partial C_f}{\partial t_{sorp}} = \text{div} (D_c' \text{grad} C_f) + \text{div} (C_f k_h \text{grad} h) \quad (7)$$

### 3. 유한요소법에 의한 정식화

#### 3.1 수분확산의 유한요소법에 의한 정식화

미소체적 내부에서 확산과정이 등방성이고 확산계수가 일정하다면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = D_h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = D_h (\Delta^2 h) \quad (8)$$

공간영역에서 유한요소 정식화를 위해, 절점에서의 물리량과 요소내의 물리량을 결합시켜주는 형상함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 물리량을 나타내는  $h(t)$ 의 곱으로 요소의 물리량 분포를 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{h(t)\} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입하고 Galerkin법을 이용하면 식 (10)과 같다.

$$\int_{v^e} [N]^T \left\{ D_h \nabla^2 ([N]h(t)) - [N] \frac{\partial h(t)}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad (10)$$

식 (10)에 Green의 정리와 경계조건을 적용하면 수분의 확산에 대한 요소내의 평형방정식을 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$[C]_h \left\{ \frac{dh(t)}{dt} \right\} + [K]_h \{h(t)\} - \{Q\}_h = 0 \quad (11)$$

여기서,  $[C]_h = \int_{v^e} [N]^T [N] dV$

$$[K]_h = \int_{v^e} D_h \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} dV + \int_{s^e} f_h [N]^T [N] dS$$

$$\{Q\}_h = \int_{s^e} f_h [N]^T h_{en} dS$$

$f_h$  : 수분확산의 표면계수

$h_{en}$  : 외기의 상대습도

#### 3.2 염소이온침투의 유한요소법에 의한 정식화

염소이온침투는 확산과 수분이동에 의한 침투가 동시에 일어나므로 수분확산보다는 정식화 과정이 조금 복잡하다. 확산 과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유염소이온에 대한 고정염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>5,8)</sup>.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) + \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} + C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] \quad (12)$$

절점에서의 물리량과 요소내의 물리량을 결합시켜주는 형상함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 염소이온량을 나타내는  $C_f(t)$ 를 이용하여 요소의 염소이온량 분포를 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_f(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{C_f(t)\} \quad (13)$$

식 (12)에 Galerkin법을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{v^e} [N]^T \frac{\partial C_f}{\partial t} dV - \int_{v^e} [N]^T \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] dV - \int_{v^e} [N]^T \left[ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right] dV - \int_{v^e} [N]^T C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] dV = 0 \quad (14)$$

식 (13)을 식 (14)에 대입시키면 식 (14)의 첫 번째 항은 다음과 같이 계산된다.

$$\int_{v^e} [N]^T \frac{\partial C_f}{\partial t} dV = \int_{v^e} [N]^T [M] \left\{ \frac{\partial C_f(t)}{\partial t} \right\} dV \quad (15)$$

식 (14)의 두 번째 항에는 Green의 정리를 적용한다.

$$\int_{v^e} [N]^T \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c' \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] dV = \int_{s^e} [N]^T D_c' \left[ l \frac{\partial C_f}{\partial x} + m \frac{\partial C_f}{\partial y} + n \frac{\partial C_f}{\partial z} \right] dS - \int_{v^e} D_c' \left[ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right] \{C_f(t)\} dV \quad (16)$$

여기서,  $l, m, n$  : 경계면에서의 방향코사인

접촉 경계면에서의 조건을 고려하면 표면에서의 적분항은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$\int_{s^e} [N]^T D_c' \left[ l \frac{\partial C_f}{\partial x} + m \frac{\partial C_f}{\partial y} + n \frac{\partial C_f}{\partial z} \right] dS = \int_{s^e} f_c [N]^T C_{f,en} dS - \int_{s^e} f_c [N]^T [N] dS \{C_f(t)\} \quad (17)$$

여기서,  $f_c$  : 염소이온확산에 대한 표면계수  
 $C_{f.en}$  : 외기에서의 자유염소이온 농도

식 (14)의 세 번째 항에 식 (9)와 (13)을 대입시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{v^e} [M]^T \left[ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right] dV \\ &= \int_{v^e} [M]^T \left[ \frac{\partial [M]}{\partial x} \{C_f(t)\} k_h \frac{\partial [M]}{\partial x} \{h(t)\} \right. \\ &+ \frac{\partial [M]}{\partial y} \{C_f(t)\} k_h \frac{\partial [M]}{\partial y} \{h(t)\} \\ &+ \left. \frac{\partial [M]}{\partial z} \{C_f(t)\} k_h \frac{\partial [M]}{\partial z} \{h(t)\} \right] dV \end{aligned} \quad (18)$$

식 (3)을 고려한다면 식 (14)의 네 번째 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{v^e} [M]^T C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right. \\ &+ \left. \frac{\partial}{\partial z} \left( k_h \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] dV = \int_{v^e} [M]^T [M] \{C_f(t)\} \frac{\partial H}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} dV \end{aligned} \quad (19)$$

위의 식들을 정리하면 다음과 같은 요소 매트릭스 방정식을 유도할 수 있다.

$$[C] \left\{ \frac{dC_f(t)}{dt} \right\} + ([K_1] - [K_2] - [K_3] + [K_4]) \{C_f(t)\} - \{Q\} = 0 \quad (20)$$

여기서,  $[C] = \int_{v^e} [M]^T [M] dV$ ,  $[K_1] = \int_{v^e} D_c' \left\{ \frac{\partial [M]^T}{\partial x} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]^T}{\partial y} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]^T}{\partial z} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right\} dV$   
 $[K_2] = \int_{v^e} k_h [M]^T \left[ \frac{\partial [M]}{\partial x} \{h(t)\} \frac{\partial [M]}{\partial x} + \frac{\partial [M]}{\partial y} \{h(t)\} \frac{\partial [M]}{\partial y} + \frac{\partial [M]}{\partial z} \{h(t)\} \frac{\partial [M]}{\partial z} \right] dV$   
 $[K_3] = \int_{v^e} \frac{\partial H}{\partial h} [M]^T [M] \left\{ \frac{\partial h(t)}{\partial t} \text{RIGHT} [M] dV \right.$   
 $[K_4] = \int_{S^e} f_c [M]^T [M] dS$ ,  $\{Q\} = \int_{S^e} f_c [M]^T C_{f.en} dS$

### 3.3 평형방정식의 해

시간 영역에 대해서 식 (11)과 (20)의 해를 구하기 위하여, 직접적분법으로서 시간 간격의 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark- $\beta$ 방법을 사용한다. 자유염소이온량과 자유염소이온의 시간에 따른 변화율은 Newmark- $\beta$ 방법에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_f(t)}{dt} = \frac{dC_f(t)^t}{dt} + \left[ (1-\delta) \frac{d^2 C_f(t)^t}{dt^2} + \delta \frac{d^2 C_f(t)^{t+\Delta t}}{dt^2} \right] \Delta t \quad (21)$$

$$\begin{aligned} C_f(t) &= C_f(t)^t + \frac{dC_f(t)^t}{dt} \Delta t \\ &+ \left[ \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \frac{d^2 C_f(t)^t}{dt^2} + \beta \frac{d^2 C_f(t)^{t+\Delta t}}{dt^2} \right] (\Delta t)^2 \end{aligned} \quad (22)$$

위의 식에서 자유염소이온  $C_f(t)$ 를 상대습도  $h(t)$ 로 치환하면 같은 방법으로 식 (11)의 해를 구할 수 있다. 본 논문에서는  $\beta$ 와  $\delta$ 를 각각 0.25와 0.5로 하여 해석을 수행한다<sup>7)</sup>. 구조물에 대한 해석은 수분확산해석이 먼저 이루어진 후에 염소이온 침투 해석이 순서대로 수행된다. 예를 들어, 시간 단계  $n$ 에서 먼저  $h^n$ 의 상대습도분포를 바탕으로 수분확산해석을 수행하여  $h^{n+1}$ 의 상대습도분포를 구하며 이를 바탕으로 식 (20)의 요소매트릭스를 구하고 염소이온침투 해석을 수행하여  $C_f^{n+1}$ 을 구한다. 이러한 과정을 반복하여 재령에 따른 염소이온의 농도를 각 지점마다 구하게 된다.

## 4. 해석 결과 및 토의

### 4.1 수치해석을 위한 변수들

#### 4.1.1 확산계수

해석을 수행하기 위해서는 수분과 염소이온의 확산계수, 염소이온 고정화 관계식, 증발가능수량 등에 대한 모델식들이 필요하다. 먼저 염소이온 확산계수와 수분확산계수의 상대습도, 온도, 재령에 대한 영향은 다음과 같은 식으로 모델링하였다.

$$D_c = D_{c,ref} F_1(h) F_2(T) F_3(t) \quad (23)$$

$$D_h = D_{h,ref} G_1(h) G_2(T) G_3(t) \quad (24)$$

여기서,  $D_{c,ref}$ ,  $D_{h,ref}$  : 상대습도가 100%, 주위온도 23°C, 재령 28일 일때의 염소이온 확산계수 및 수분확산계수

$$F_1(h) = G_1(h) = \gamma + (1-\gamma) \left\{ \frac{1}{1 + \left( \frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right\} \quad (25)$$

$$F_2(T) = G_2(T) = \exp \left[ \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (26)$$

$$F_3(t) = G_3(t) = \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (27)$$

여기서,  $h$  : 콘크리트의 상대습도

$h_c$  :  $F_1(h)$ 가 최대값과 최소값의 중앙에 있을 때의 상대습도,  $\gamma, n$  : 상수

$E$  : 결빙기 활성화에너지 (J/mol)

$R$  : 가스상수 (= 8.3144 J/K-mol)

$T_{ref}$  : 표준온도 (Kelvin),  $T$  : 양생온도 (Kelvin)

$t$  : 재령 (days),  $t_{ref}$  : 기준 재령 (=28일)  
 $m$  : 상수 (ACI LIFE-365 모델; 1종 보통  
포틀랜드시멘트 = 0.264)

온도와 재령에 대한 보정식은 ACI LIFE-365 모델식<sup>10)</sup>을 사용하였고, 습도의 염소이온확산계수와 수분확산계수에 대한 영향은 CEB-FIP 1990 MODEL CODE<sup>11)</sup>에서 제안한 식을 사용하였으며 이 식들에 대한 유효성은 국내외 논문들에서 고찰되었다<sup>9)</sup>. 식 (25)의  $F_1(h)$  와  $G_1(h)$  는 공극내의 수분이 염소이온 확산계수와 수분 확산계수에 미치는 영향을 모델하는 것으로 공극들이 모두 물로 채워져 있으면 염소이온은 연속적인 공극의 통로를 통하여 확산된다. 그러나 수분의 증발로 물로 채워진 공극이 줄어들게 되면 확산 통로가 줄어들게 되고 또한 시멘트페이스트 주변의 흡착수들의 감소로 페이스트와 이온의 강한 인력으로 인하여 확산은 방해받게 된다. 상대습도가  $h_c$  에 이르면 확산계수는 급격히 감소한다. 기존의 연구자들의 실험 결과들을 이용하여 일반적으로  $h_c$  는 0.75를,  $\nu$  는 0.03을,  $n$  은 4의 값을 사용한다<sup>7)</sup>.

결보기 활성에너지는 저자가 제안한 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다<sup>12)</sup>.

$$E = E_0 e^{-\lambda t} \quad (28)$$

$$\lambda = 0.00017 (T - 273) \quad (29)$$

$$E_0 = 42,830 - 43 (T - 273) \quad (30)$$

표준 염소이온 확산계수,  $D_{c,ref}$  는 여러 영향인자에 의해 변화하지만 가장 지배적인 영향을 미치는 것이 물-시멘트비이다. 물-시멘트비에 따라 염소이온 확산계수를 예측하는 식은 Papadakis et al.<sup>13)</sup>, Stewart & Rosowsky<sup>14)</sup>, Hobbs<sup>15)</sup> 등에 의해서 제안되었지만, 본 논문에서는 널리 쓰이는 ACI LIFE -365의 제안식을 적용하였다.

$$D_{c,ref} = 10^{-12.06 + 2.40(w/c)} \quad (31)$$

교유수분확산계수,  $D_{h,ref}$  는 염소이온확산계수와 같이 많은 적용 실적이 있는 CEB-FIP CODE 1990의 모델식을 다음과 같이 사용한다.

$$D_{h,ref} = \frac{D_{1,0}}{\frac{f_{ck}}{f_{cko}}} \quad (32)$$

여기서,  $D_{1,0}$  : 최대염소이온확산계수 (=  $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )  
 $f_{ck}$  : 설계기준강도 (MPa),  $f_{cko} = 10 \text{ MPa}$

#### 4.1.2 염소이온의 고정화

고정염소이온은 주로 시멘트  $\text{C}_3\text{A}$  성분과 염소이온이 결

합하여 Friedel염의 형성으로 생성되는 것이다. 따라서 많은  $\text{C}_3\text{A}$  성분을 가진 콘크리트는 많은 양의 고정염소이온을 발생시키게 된다. Glass등<sup>16)</sup>은 이러한  $\text{C}_3\text{A}$  성분 때문에 자유염소이온(공극용액의 농도)과 고정염소이온의 상관관계를 Langmuir isotherm을 바탕으로 제시하였다. 기존의 연구에서 Freundlich isotherm이 Langmuir isotherm보다 정확한 값을 예측한다는 연구 결과를 발표하였으므로 본 논문에서는 Glass의 결과를 이용하여 고정염소이온과 자유염소이온의 상관관계를 Freundlich isotherm을 이용하여 식 (33)과 같이 제시하였다.

$$\frac{\theta C_b}{\theta C_f} = \alpha_c \beta_c C_f^{\beta_c - 1} \quad (33)$$

$$\alpha_c = 0.056 + 0.025 C_{3A} \quad (34)$$

$$\beta_c = \frac{1}{0.076 C_{3A} + 1.91} \quad (35)$$

여기서,  $C_{3A}$  : 시멘트 성분의 양 (%)

#### 4.1.3 증발가능수량

식 (5)의 확산방정식에서 결정되지 않은 변수는 증발가능수량 ( $\omega_e$ )이다. 앞선 연구에서 발표한 바와 같이 증발가능수량은 모세관 공극수와 겔 공극수의 합으로 나타낼 수 있으며 그 값은 다음의 식들로 모델링할 수 있다<sup>8)</sup>.

$$\omega_e = v_g + v_c \quad (36)$$

$$v_g = w_g \times c \times \frac{1}{w_s} = (0.18\alpha) \frac{c}{1000} \quad (37)$$

$$v_c = \frac{P_c}{1000} \times c = \left(\frac{w}{c} - 0.36\alpha\right) \frac{c}{1000} \quad (38)$$

여기서,  $v_g$  : 단위콘크리트 부피당 겔 공극의 부피 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$v_c$  : 단위콘크리트 부피당 모세관 공극의 부피 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )

$w_g$  : 시멘트량에 대한 겔 공극수량 (g/g)

$w_s$  : 물의 단위중량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\alpha$  : 수화도

$P_c$  : 단위시멘트량에 대한 모세관 공극의 부피 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

물-시멘트비와 단위시멘트량은 배합이 결정되면 얻을 수 있지만 수화도는 얻을 수 없다. 엄밀히 정의하면 수화도란 전체 시멘트량과 수화된 시멘트량의 비이지만 실용적인 관점에서 한계압축강도와 각 재령의 압축강도의 비로도 나타낼 수 있다. 이에 따라 온도와 재령에 따른 강도를 예측하기 위해서 저자가 제시했던 예측식<sup>12)</sup>을 이용하여 다음과 같이 수화도를 계산할 수 있다.

$$\alpha = \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + A \sum_{i=1}^n \left( e^{-\frac{E_0}{RT_i} - x} + e^{-\frac{E_0}{RT_i} - x_{i-1}} \right) (t_i - t_{i-1})}} \right] \quad (39)$$

$$t_o = 0.66 - 0.011 (T_i - 273) \quad (t_o \geq 0) \quad (40)$$

여기서,  $\lambda$  : 비례상수(식(29)로 계산)

$E_o$  : 초기 결빙기 활성화에너지 (J/mol)

(식 (30)으로 계산)

$t_{i-1}, t_i$  : 양생온도가  $T_i$ 인 재령의 시작점과 종료점

$R$  : 가스상수 (= 8.3144 J/K-mol)

$T_i$  : 재령  $t_{i-1}$ 과  $t_i$  사이에서의 양생온도 (Kelvin)

$A$  : 비례상수 (=  $10^7$ )

또한, 이러한 증발가능수량은 시료표면의 염소이온 농도에도 큰 영향을 미친다. 표면의 증발가능수량이 증가하면 표면염소이온농도가 증가할 것이다. 본 논문에서는 시료 표면의 염소이온 농도가 시방서에서 규정한 일정한 값이 아니라, 시료 표면의 상대습도에 따라 연속적으로 변화하는 것으로 가정한다. 즉, 시료의 표면염소이온농도는 바닷물의 염소이온농도와 콘크리트 표면의 증발가능수량을 이용하여 계산된다<sup>8)</sup>.

#### 4.1.4 수축등온선

건습이 반복되는 외부 환경을 모델링하는데 있어서 중요한 것 중의 하나가 수분의 수축등온선이다. 수축등온선은 건조시와 수분이 증가할 때가 다르다. 건조시의 수축등온선은 Bazant가 제시한 다음과 같은 식을 이용한다<sup>17)</sup>.

$$H = 0.25 + 0.75 \left( \frac{h}{0.98} \right)^3 \quad (0.25 \leq h \leq 0.98) \quad (41)$$

일반적으로 같은 상대습도에서 습윤시의 수축등온선에 의한 증발가능수량이 건조시의 수축등온선에 의한 증발가능수량보다 작다. 기존의 여러 실험 결과들을 고려하여 다음과 같은 습윤시의 수축등온선을 가정하였다<sup>18)</sup>.

$$H = 0.15 + 0.85 \left( \frac{h}{0.98} \right)^3 \quad (0.25 \leq h \leq 0.98) \quad (42)$$

## 4.2 해석 프로그램의 예측값과 실험값의 비교

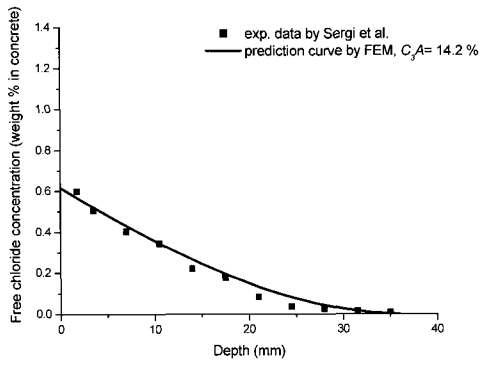
개발된 해석프로그램에 의한 예측값과 실험값을 비교하여 해석프로그램의 유효성을 검증한다. 실험값은 Sergi<sup>19)</sup> 등이 시멘트페이스트에 대해서 행한 실험 결과를 이용하였다. 전체염소이온량의 시료 깊이에 따른 변화를 측정할 실험 결과는 많지만 Sergi 처럼 자유염소이온량과 고정염소이온량의 깊이에 따른 변화를 측정할 실험결과는 많지 않다. 사용된 시멘트 페이스트의 물-시멘트비는 0.50 이고, 시료는  $\phi$  49mm  $\times$  75mm 공시체를 사용하였다. 20  $^{\circ}$ C 에서 90일 동안 양생한 후에, 1 mol의 염화나트륨 용액에 100일 동안 노출시켰다. 이때, 노출면 한쪽을 제외한 다른 면들은 파라핀으로 밀봉하였다. 시멘트의 성분 중에  $C_3A$ 의 양은

14.2%로 측정 되었다. 식 (31)의 확산계수는 콘크리트에 적용하기 위한 것으로 시멘트페이스트에 적용하기 위해서는 그 값을 변화시켜야 한다. 일반적으로 확산은 시멘트페이스트에서 주로 발생하며 골재에서는 매우 작은 양만의 확산이 발생한다. 따라서, 골재의 확산을 무시한다면 콘크리트의 전체 부피와 시멘트페이스트에 대한 부피의 비율 식 (31)의 결과에 곱하면 시멘트페이스트의 확산계수를 추정할 수 있다<sup>13)</sup>. 이러한 과정으로 구한 시멘트페이스트의 확산계수( $D_{c,ref}$ )는  $43.1 \times 10^{-12} m^2/s$  이다.

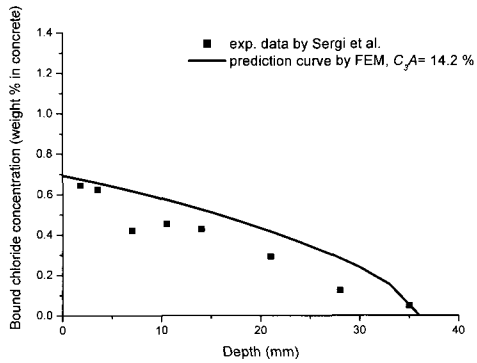
Fig. 1은 실험값과 예측값을 비교하고 있다. Fig. 1(a)는 자유염소이온의 깊이에 따른 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 실험값과 예측값은 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 확산계수를 일반식에서 구하고 재령과 양생온도에 대한 보정항도 일반식에서 구한 값을 사용했다는 것을 감안할 때, 이러한 실험값과 예측값의 일치는 매우 긍정적이다. Fig. 1(b)는 고정염소이온량의 깊이에 따른 변화를 나타내고 있다. 시멘트 성분 분석에서 실험에 사용된 시멘트의  $C_3A$ 양이 14.2%로 측정되어 이 값을 식 (34)와 (35)에 대입하여 고정염소이온량을 계산하였다. 그림에 나타난 바와 같이 예측곡선은 고정염소이온량을 조금 크게 평가한다. 그러나, 이것으로 고정염소이온량과 자유염소이온량의 상관관계를 나타내는 식 (33)에서 (35)가 유효하지 않다고 판단해서는 안된다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 고정염소이온 실험값들의 분산이 자유염소 이온량보다 크고 이러한 실험값의 분산을 고려할 때, 예측한 곡선과 실험값의 차이는 크지 않다. 식 (33)에서 (35)는 현재까지의 실험 결과를 바탕으로 하고 있으므로 앞으로의 실험 결과 축적과 실험법의 발전에 따라 수정될 수 있을 것으로 사료된다. Fig.1(c)는 자유염소이온량과 고정염소이온량의 합인 전체 염소이온량의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 고정염소이온량의 오차만큼 실험값과 예측값이 차이가 남을 알 수 있다.

## 4.3 수분이동에 따른 염소이온 침투량의 변화

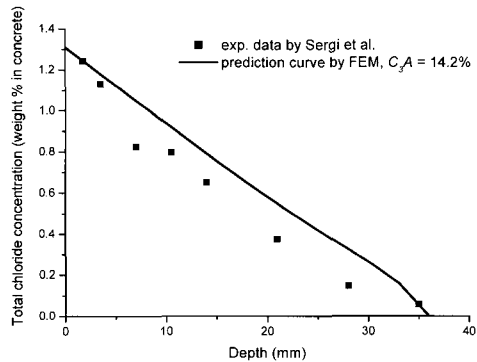
수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 염소이온 침투량해석을 수행하여 수분이동이 염소이온 침투량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 해석 대상물은 75mm  $\times$  75mm  $\times$  300mm의 기둥형태를 띠고 있으며 확산이 일어나는 한 쪽면(위쪽의 정사각형의 면)을 제외한 나머지 모든 면은 외부와의 수분이동을 차단하였다. 앞의 재료 모델링 식들을 적용하면 각 요소들의 확산계수는 시간에 따라 변화하게 된다. 배합은 항만 콘크리트용으로 주로 사용되는 0.50의 물-시멘트비를 가지고 단위시멘트량이 345kg/m<sup>3</sup>인 콘크리트를 모델링하였고  $C_3A$ 의 양은 8%로 가정하였다. Fig. 2는 재령 2개월과 10년으로 나누어서 염소이온 침투량에 대한



(a) Free chloride concentration



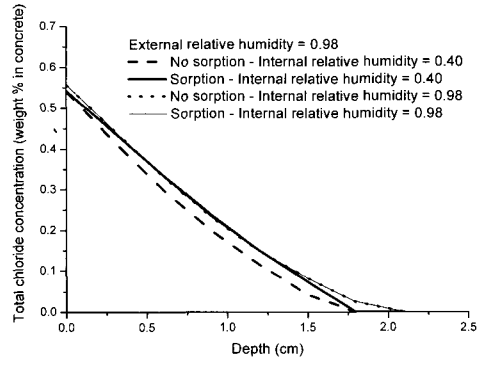
(b) Bound chloride concentration



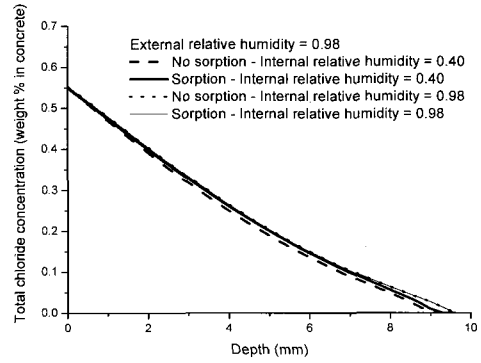
(c) Total chloride concentration

Fig. 1 Comparison of experimental and predicted values

수분이동의 효과를 나타내고 있다. 수분이동에 의한 염소 이온침투를 발생시키기 위해서 초기 콘크리트 내부의 상대습도를 0.40으로 가정하였다. 또한, 내부의 상대습도가 0.98인 경우에도 해석을 수행하여 수분이동이 발생하지 않는 경우의 염소이온변화량도 고찰하였다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트 내부의 상대습도가 0.40이면 수분이동을 고려한 해석의 염소이온 침투량이 고려하지 않은 것보다 크고, 15mm 정도의 깊이에서는 그 상대적인 차이가 50% 이상임을 알 수 있다. 그러나, 콘크리트 내부의 상대습도가 0.98이면 수분이동이 발생하지 않으므로 수분이동 고려 유무에 따른 염소이온 침투량의 차이가 없음을



(a) 2 months



(b) 10 years

Fig. 2 Analysis of chloride ion penetration considering sorption

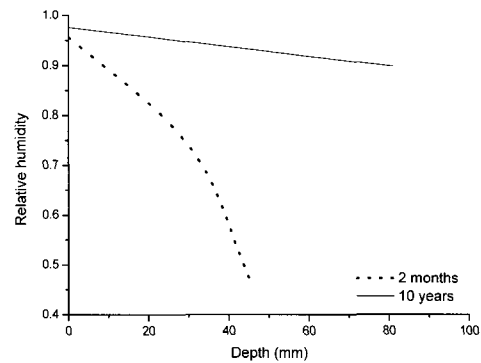
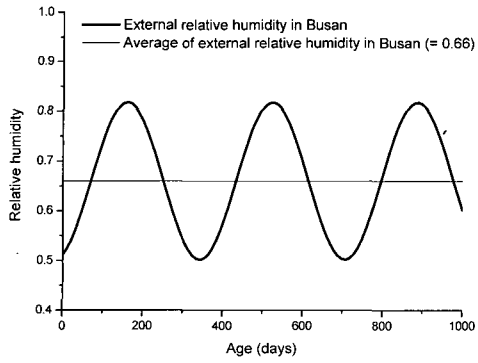
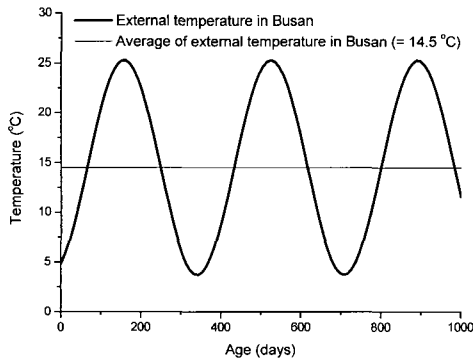


Fig. 3 Relative humidity of inner specimen (Initial relative humidity of inner specimen = 0.40)

알 수 있다. Fig. 2(b)는 재령이 10년인 경우의 염소이온 침투량을 나타내고 있다. 재령이 10년 정도 경과하면 Fig. 3에 나타난 바와 같이 초기 0.40의 내부 상대습도를 가진 시료가 외부수분의 확산에 의해 내외부의 상대습도의 차이가 크게 줄어들는다. 따라서, Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 초기의 내부상대습도의 차이에 따른 염소이온 침투량의 차이가 거의 없어지고 수분이동의 영향도 거의 발생하지 않는다. 따라서, 내외부의 상대습도의 변화가 크면 수분이동에 의한 염소이온 침투량의 변화가 발생하지만 그



(a) Humidity



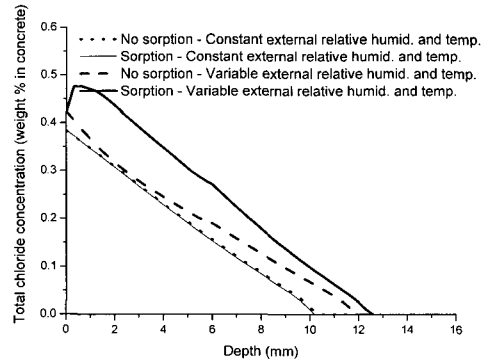
(b) Temperature

**Fig. 4** Humidity and temperature in Busan

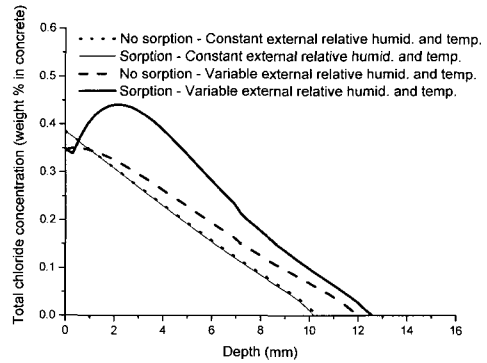
렇지 않은 경우에는 수분이동에 의한 염소이온 침투의 효과가 미미함을 알 수 있다.

#### 4.4 현장 환경 하에서의 염소이온침투 해석

실제 현장에서의 상대습도와 온도변화에 따른 염소이온 침투량을 해석하기 위해서 부산지방에 대한 30년간의 기상 측정 데이터를 바탕으로 한 온도와 습도의 변화 모델식을 구하였다(Fig. 4). 온도와 습도의 평균값은 각각 14.5 °C와 0.66 정도이다. Fig. 5는 온도와 습도변화에 따른 재령 100년, 100년 6개월 시의 염소이온 침투량의 변화이다. 온도와 습도가 1월에 최저가 되고 7월에 거의 최고가 되므로 이를 고려하여 재령 100년과 100년 6개월일 때의 해석 결과를 비교하였다. Fig. 5(a)와 (b)에 나타낸 바와 같이 평균온도와 습도가 적용된 해석의 염소이온 침투량은 두 재령에서 동일하고 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향도 거의 없음을 알 수 있다. 외부의 습도와 온도가 계절에 따라 크게 변화하므로 건습의 반복을 고려하는 해석의 재령 100년과 100년 6개월의 표면부근의 염소이온량은 각각 크게 다른 값을 나타낸다. 외부의 상대습도가 표면부근 시료내부의 상대습도보다 높으면 수분이동에 의해 염소이온이 시료내부로 빨리 이동하지만 확산은 수분이동



(a) 100 years



(b) 100.5 years

**Fig. 5** Analysis of chloride ion penetration of a harbor structure in Busan

에 의한 침투만큼 빠른 속도로 전개되지 않으므로 염소이온이 표면 부근에 쌓이게 된다. 이러한 경향이 시간에 따라 누적되면 Fig. 5와 같은 염소이온 농도구배를 갖게 된다. 이러한 농도구배는 외기상대습도의 차이가 큰 여름과 겨울에 따라 다른데 Fig. 5(a)는 여름을, Fig. 5(b)는 겨울에 해당하는 해석결과이다. 그러나, 시료의 내부로 갈수록 외기의 상대습도에 따른 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향이 줄어들어 따라 깊이 50mm이하에서는 재령 100년과 100년 6개월의 염소이온량이 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 습도와 온도가 연속적으로 변화하는 경우의 염소이온 침투량을 해석하기 위한 프로그램을 개발하고 그 결과를 제시하였다.

개발된 해석 프로그램은 자유염소이온농도의 실험값과 매우 근사한 예측값을 제시하였다. 고정염소이온농도의 실험값과 예측값은 조금 오차가 있었지만, 이것은 프로그램의 오차보다는 재료 모델링의 오차인 것으로 판단된다. 고정염소이온에 대한 실험결과의 축적으로 재료 모델링이



개선된다면 이러한 오차는 줄어들 것으로 사료된다.

습도가 연속적으로 변화하는 경우에는 확산뿐만 아니라 수분이동에 의해서도 염소이온 침투량이 변화함을 관찰하였다. 현장상황과 같이 건설의 반복이 장기적으로 발생하게 되면 확산과 수분이동을 함께 고려한 염소이온 침투량이 수분이동을 고려하지 않은 염소이온 침투량보다 매우 크다. 따라서, 항만 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투해석을 장기재령동안 수행할 경우에는 수분이동 메커니즘을 포함한 수치 모델링을 바탕으로 건설의 반복을 고려하여 해석을 수행하는 것이 해석의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Saetta, A. V., Scotta, R. V., and Vitaliani, R., "Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.5, 1993, pp.441~451.
2. Martin-Perez, B., Zibara, H., Hooton, R. D., and Thomas, M. D. A., "A Study of the Effect of Chloride Binding on Service Life Predictions", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.8, 2000, pp.1215~1223.
3. 김은겸, 신치범, 이윤환, "콘크리트 구조물의 염화물이온 침투거동 해석", 콘크리트학회 논문집, Vol.9, No.6, 1997, pp.233~241.
4. 구현본, 김의태, 이광명, "철근콘크리트 구조물의 염화이온 침투 모델", 콘크리트학회 논문집, Vol.15, No.1, 2003, pp.25~34.
5. Martin-Perez, B., Pantazopoulou, S. J., and Thomas, M. D. A., "Numerical solution of mass transport equation in concrete structures", *Computers and Structures*, Vol.79, No.13, 2001, pp.1251~1264.
6. 박승범, 김도겸, "해양 구조물의 철근 부식 예측 기법 개발에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, Vol.11, No.6, 1999, pp.89~100.
7. 김진근, 이철성, "콘크리트의 부등건조수축에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, Vol.9, No.2, 1997, pp.153~161.
8. 한상훈, 김진근, 김동현, 박우선, "콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석에 대한 확산계수의 영향", 대한토목학회 논문집, Vol.22, No.2-A, 2002, pp.347~350.
9. 한상훈, 박우선, 김동현, "해양콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석", 한국해양해양공학회지, Vol.15, No.2, 2003, pp.71~79.
10. ACI 365 committee, *Service life prediction-State of art report*, ACI, 2000, pp.6~7.
11. *CEB-FIP MODEL CODE 1990*, Thomas Telford, 1993, pp.62.
12. 한상훈, 김진근, 문영호, "수정 반응률 상수 모델에 의한 콘크리트 압축강도의 예측", 콘크리트학회 논문집, Vol.12, No.2, 2000, pp.31~42.
13. Papadakis, V. G., Roumeliotis, A. P., Fardis, M. N., and Vagenas, C. G. *Mathematical Modeling of Chloride Effect on Concrete Durability and Protection Measures*, Concrete repair, rehabilitation and protection, London(UK). E & FN Spon., 1996, pp.165~174.
14. Vu, K.A.T. and Stewart M.G., "Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models", *Structural Safety*, Vol.22, No.4, 2000, pp.313~333.
15. Hobbs, D. W., "Minimum requirements for durable concrete: carbonation and chloride included corrosion, freeze thaw attack and chemical attack", British Cement Association, Crowthorn (UK), 1998, pp.50~55.
16. Glass, G. K., Hassanein, N. M., and Buenfeld, N. R., "Neural network modeling of chloride binding", *Magazine of Concrete Research*, Vol.49, No.181, 1997, pp.323~335.
17. Bazant, Z. P. and Baweja, S., "Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage: 2. Updating and theoretical basis", *Materials and Structures*, Vol.28, 1995, pp.488~495.
18. Xi, U., Bazant, Z. P., and Jennings, H. M., "Moisture diffusion in cementitious materials", *Advanced Cement Based Materials*, Vol.1, 1994, pp.248~257.
19. Sergi, G., Yu, S. W., and Page, C. L. "Diffusion of Chloride and Hydroxyl Ions in Cementitious Materials Exposed to a Saline Environment", *Magazine of Concrete Research*, Vol.44, No.158, 1992, pp.63~69.

---

## 요 약

본 논문에서는 확산과 수분이동에 의한 침투를 함께 고려할 수 있는 염소이온침투 모델을 제시하고 이를 바탕으로 유한요소 프로그램을 개발한다. 개발된 프로그램을 이용하여 습도와 온도가 연속적으로 변화하는 현장상태에 대한 염소이온 침투 해석을 수행한다. 해석과정으로 먼저 수분확산해석을 수행한다. 이 해석에 의한 각 유한요소의 상대습도를 바탕으로 염소이온 침투해석을 위한 재료상수를 구한다. 이러한 재료상수를 이용하여 염소이온 침투해석을 수행하게 된다. 각 유한요소들은 시간과 재령에 따라 연속적으로 변화하는 재료상수값을 가지게 된다. 내외부의 상대습도 차이가 크면 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향이 커지지만 내외부의 상대습도의 차이는 수분확산에 의해서 재령에 따라 감소하므로 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향은 재령에 따라 감소한다. 반복 습윤은 수분이동에 의한 염소이온 침투의 영향을 증가시켜 철근 주위의 염소이온 농도를 키치게 한다. 현장상황과 같이 건습의 반복이 장기적으로 발생하게 되면 수축과 확산을 함께 고려한 염소이온 침투량이 수분이동을 고려하지 않은 염소이온 침투량보다 매우 크다. 따라서, 항만 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투해석을 장기재령동안 수행할 경우에는 수분이동 메커니즘을 포함한 수치 모델링을 바탕으로 건습의 반복을 고려하여 해석을 수행하는 것이 해석의 오차를 줄일 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 염소, 확산, 수축, 유한요소법, 반복 습윤

---