韓國海岸海洋工學發表論文集 (2003)
第14券, pp. 307-314

# 현장 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석
# Analysis of Chloride Ion Penetraion for In-place Concrete Structure

한상훈[1] • 박우선[1]
Sang-Hun Han[1] and Woo-Sun Park[1]

## 1. 서 론

해양콘크리트 구조물의 내구성에 가장 큰 영향은 미치는 요인 중의 하나가 염소 이온의 침투에 의한 철근부식이다. 염소이온이 콘크리트 구조물 내부로 확산되어 철근이 부식하게 되면 철근의 부피팽창으로 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 깊이에 따른 염소이온 농도를 해석하는 것이 필요하다. 그러나, 콘크리트의 염소이온 농도를 해석하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 콘크리트는 재령에 따라서 그 성질이 변화하는 재료이므로 염소이온농도가 매순간마다 변화하고 구조물의 각 부분의 염소이온농도도 다르다. 또한, 습도나 온도와 같은 외부환경요인이 변화하면 이에 따라서도 염소이온의 농도가 달라지게 된다.

콘크리트 내부의 염소이온은 크게 2가지 메카니즘에 의해서 그 농도가 변화하게 된다. 하나는 일반적으로 알려진 염소이온의 확산에 의한 것이다. 염소이온의 농도가 높은 콘크리트 외부에서 내부로 확산현상이 발생하여 염소이온이 내부로 이동하는 메카니즘이다. 다른 하나는 흡착을 들 수 있다. 실제의 대기중에 노출된 해양환경하에서는 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, 현장상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 침투 해석을 수행하기 위해서는 2가지 메카니즘이 같이 고려되어야한다.

이 연구에서는 대기중에 노출된 현장상태의 콘크리트 구조물에 대한 염소이온농도를 모델링하기 위해서 확산과 흡착의 작용을 모두 고려하여 염소이온침투량을 유한요소법으로 모델링한다. 또한, 실제에 가까운 콘크리트 성질을 모델링하기 위해서 환경조건에 따라 유한요소 각각의 확산계수와 흡착특성을 달리하여 해석을 수행하였다.

## 2. 염소이온 침투모델링

### 2.1 수분이동 모델링

확산에 의한 수분의 변화량은 다음과 같은 Fick의 제1법칙으로 나타낼 수 있다(김진근 et al, 1997).

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

여기서, $J_m$ : 확산에 의한 수분의 변화량 (m/s)
$k_{hx}, k_{hy}, k_{hz}$ : 각 방향으로의 투수계수 ($m^2/s$)
$h$ : 공극의 상대습도

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

[1] 한국해양연구원 연안항만공학부 (Corresponding Author : Sang-Hun Han, Coastal and Harbor Engineering, Korea Ocean Research and Development, Ansan P. O Box 29, Seoul 425-600, Korea, shhan@kordi.re.kr)

$$J_m = -k_h \; grad \; h \tag{2}$$

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t} = -\,div J_m \tag{3}$$

여기서, $H$ : 비함수량 (공극수와 공극의 최대증발수량의 비)

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

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

여기서, $D_h$ : 수분확산계수 (m²/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 제 2법칙을 이용하여 구할 수 있다(한상훈 *et al*, 2002).

$$\frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} = \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{D_c}{1+\frac{1}{w_e}\frac{\partial C_b}{\partial C_f}}\frac{\partial C_f}{\partial x}\right)\right.$$
$$\left. + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{D_c}{1+\frac{1}{w_e}\frac{\partial C_b}{\partial C_f}}\frac{\partial C_f}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{D_c}{1+\frac{1}{w_e}\frac{\partial C_b}{\partial C_f}}\frac{\partial C_f}{\partial z}\right)\right]$$
$$= div(D_c' \; grad \; C_f) \tag{5}$$

여기서, $C_f$ : 단위공극용액 부피당 자유 염소이온의 농도 (kg/m³)

$C_b$ : 단위 콘크리트부피당 고정 염소이온의 농도 (kg/m³)

$\omega_e$ : 단위콘크리트 부피당 증발가능수량 (m³/m³)

$D_c$ : 염소이온의 확산계수 (m²/s)

$D_c'$ : 염소이온의 겉보기 확산계수 (m²/s)

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

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

확산이외의 수분이동에 의한 염소이온의 침투는 이동된 수분속의 염소이온량을 계산함으로서 구할 수 있는데 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp} = -\,div \; J_{cs} = div \; C_f J_m$$
$$= div(C_f \, k_h \; grad \; h) \tag{6}$$

여기서, $J_{cs}$ : 수분이동에 의한 염소이온 침투량 (kg/m²·s)

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

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial C_f}{\partial t}_{diff} + \frac{\partial C_f}{\partial t}_{sorp}$$
$$= div(D_c' \; grad \; C_f) + div(C_f \, k_h \; grad \; h) \tag{7}$$

# 3. 유한요소법에 의한 정식화

## 3.1 수분확산의 유한요소법에 의한 정식화

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

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

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.

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

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

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

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

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

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 흡착이 동시에 일어나므로 수분확산보다는 정식화과정이 조금 복잡하다. 확산과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유염소이온에 대한 고정염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_f}{\partial t} &= \left.\frac{\partial C_f}{\partial t}\right|_{diff} + \left.\frac{\partial C_f}{\partial t}\right|_{sorp} \\ &= \frac{\partial}{\partial x}\left(D_c' \frac{\partial C_f}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_c' \frac{\partial C_f}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_c' \frac{\partial C_f}{\partial z}\right) \\ &+ \frac{\partial C_f}{\partial x} k_h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial C_f}{\partial y} k_h \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial C_f}{\partial z} k_h \frac{\partial h}{\partial z} \\ &+ C_f \left[ \frac{\partial}{\partial x}\left(k_h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_h \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_h \frac{\partial h}{\partial z}\right) \right] \end{aligned} \tag{12}$$

절점에서의 물리량과 요소내의 물리량을 결합시켜주는 형상함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 염소이온량을 나타내는 $C_f(t)$를 이용하여 요소의 염소이온량 분포를 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

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

식 (12)에 Galerkin법을 적용하면 다음과 같다.

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

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

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

식 (14)의 두 번째 항에는 Green의 정리를 적용한다.

$$\begin{aligned} &\int_{v^e} [N]^T \left[ \frac{\partial}{\partial x}\left(D_c' \frac{\partial C_f}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_c' \frac{\partial C_f}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_c' \frac{\partial C_f}{\partial z}\right) \right] dV \\ &= \int_{S^e} [N]^T D_c' \left[ l \frac{\partial C_f}{\partial x} + m \frac{\partial C_f}{\partial y} + n \frac{\partial C_f}{\partial z} \right] dS \\ &- \int_{V^e} D_c' \left[ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} \right] \{C_f(t)\} dV \end{aligned} \tag{16}$$

여기서, $l, m, n$ : 경계면에서의 방향코사인

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

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

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.

$$\int_{v^e}[N]^T\left[\frac{\partial C_f}{\partial x}k_h\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial C_f}{\partial y}k_h\frac{\partial h}{\partial y}+\frac{\partial C_f}{\partial z}k_h\frac{\partial h}{\partial z}\right]dV$$

$$=\int_{v^e}[N]^T\left[\frac{\partial[N]}{\partial x}\{C_f(t)\}k_h\frac{\partial[N]}{\partial x}\{h(t)\}\right.$$

$$+\frac{\partial[N]}{\partial y}\{C_f(t)\}k_h\frac{\partial[N]}{\partial y}\{h(t)\}$$

$$\left.+\frac{\partial[N]}{\partial z}\{C_f(t)\}k_h\frac{\partial[N]}{\partial z}\{h(t)\}\right]dV \qquad (18)$$

식 (3)을 고려한다면 식 (14)의 네 번째 항은 다음과 같다.

$$\int_{v^e}[N]^TC_f\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(k_h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_h\frac{\partial h}{\partial y}\right)\right.$$

$$\left.+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_h\frac{\partial h}{\partial z}\right)\right]dV$$

$$=\int_{v^e}[N]^T[N]\{C_f(t)\}\frac{\partial H}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t}dV \qquad (19)$$

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

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

$$-\{Q\}=0 \qquad (20)$$

여기서, $[C]=\int_{v^e}[N]^T[N]dV$

$$[K_1]=\int_{v^e}D_c'\left\{\frac{\partial[N]^T}{\partial x}\frac{\partial[N]}{\partial x}\right.$$

$$\left.+\frac{\partial[N]^T}{\partial y}\frac{\partial[N]}{\partial y}+\frac{\partial[N]^T}{\partial z}\frac{\partial[N]}{\partial z}\right\}dV$$

$$[K_2]=\int_{v^e}k_h[N]^T\left[\frac{\partial[N]}{\partial x}\{h(t)\}\frac{\partial[N]^T}{\partial x}\right.$$

$$\left.+\frac{\partial[N]}{\partial y}\{h(t)\}\frac{\partial[N]^T}{\partial y}+\frac{\partial[N]}{\partial z}\{h(t)\}\frac{\partial[N]^T}{\partial z}\right]dV$$

$$[K_3]=\int_{v^e}\frac{\partial H}{\partial h}[N]^T[N]\left\{\frac{\partial h(t)}{\partial t}\right\}[N]dV$$

$$[K_4]=\int_{S^e}f[N]^T[N]dS$$

$$\{Q\}=\int_{S^e}f[N]^TC_{f,en}dS$$

### 3.3 평형방정식의 해

시간 영역에 대해서 식 (11)과 (20)의 해를 구하기 위하여, 직접적분법으로서 시간간격의 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark-β방법을 사용한다. 자유염소이온량과 자유염소이온의 시간에 따른 변화율은 Newmark-β방법에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$\left.+\delta\frac{d^2C_f(t)}{dt^2}^{t+\Delta t}\right]\Delta t \qquad (21)$$

$$C_f(t)=C_f(t)^t+\frac{dC_f(t)}{dt}^t\Delta t$$

$$+\left[\left(\frac{1}{2}-\beta\right)\frac{d^2C_f(t)}{dt^2}^{t}+\beta\frac{d^2C_f(t)}{dt^2}^{t+\Delta t}\right](\Delta t)^2$$

$$(22)$$

위의 식에서 자유염소이온 $C_f(t)$를 수분 $h(t)$로 치환하면 같은 방법으로 식 (11)의 해를 구할 수 있다. 본 논문에서는 β와 δ를 각각 0.25와 0.5로 하여 해석을 수행한다(김진근 *et al*, 1997).

구조물에 대한 해석은 수분확산해석이 먼저 이루어진 후에 염소이온침투 해석이 순서대로 수행된다. 예를 들어, 시간 단계 n에서 먼저 $h^n$의 수분분포를 바탕으로 수분확산해석을 수행하여 $h^{n+1}$의 수분분포를 구하며 이를 바탕으로 식 (20)의 요소매트릭를 구하고 염소이온침투 해석을 수행하여 $C_f^{n+1}$을 구한다. 이러한 과정을 반복하여 재령에 따른 염소이온의 농도를 각 지점마다 구하게 된다.

## 4. 해석결과 및 토의

### 4.1 수치해석을 위한 변수들

해석을 수행하기 위해서는 수분과 염소이온의 확산계수, 염소이온 고정화 관계식, 증발가능수량 등에 대한 모델식들이 필요하다. 이에 대한 식들은 저자가 앞서 발표한 논문에서 자세히 설명하였는데 이를 다음과 같이 다시 정리하였다. 먼저 수분확산계수와 염소이온 확산계수는 다음과 같다(한상훈 *et al*, 2002).

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

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

여기서,

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

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

$$F_3(t) = G_3(t) = \beta + (1-\beta)\cdot\left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}$$

또한, 고정염소이온량은 다음의 식으로 계산된다.

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha_c \beta_c C_f^{\beta_c - 1} \tag{25}$$

여기서, $\alpha_c = 0.056 + 0.025\ C_3A$

$$\beta_c = \frac{1}{0.076\ C_3A + 1.91}$$

증발가능수량은 다음의 식으로 계산된다.

$$\omega_e = v_g + v_c \tag{26}$$

여기서,

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

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

식 (23)에서 (26)에 대한 자세한 사항은 저자가 발표한 기존의 논문에 자세히 설명되어 있으므로 여기서는 생략한다(한상훈 *et al*, 2002).

건습이 반복되는 외부환경을 모델링하는데 있어서 중요한 것 중의 하나가 수분의 흡착등온선이다. 흡착등온선은 건조시와 수분이 증가할 때가 다르다. 건조시의 흡착등온선은 Bazant가 제시한 다음과 같은 식을 이용한다(Bazant *et al*, 1995).

$$H = 0.25+0.75\left((\frac{h}{0.98})^3\right) \tag{27}$$

여기서, 상대습도는 0.25와 0.98사이임

일반적으로 같은 상대습도에서 습윤시의 흡착등온선에 의한 증발가능수량이 건조시의 흡착등온선에 의한 증발가능수량보다 작다. 기존의 여러 실험결과들을 고려하여 다음과 같은 습윤시의 흡착등온선을 가정하였다(Xi *et al*, 1994).

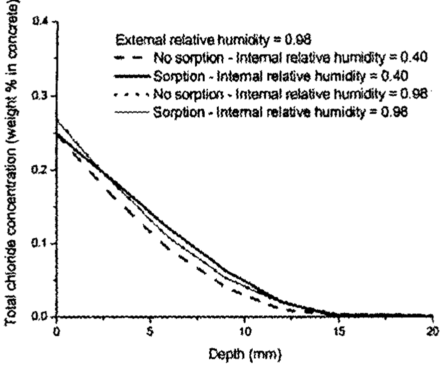
$$H = 0.15+0.85\left((\frac{h}{0.98})^3\right) \tag{28}$$

### 4.2 흡착에 따른 염소이온침투량의 변화

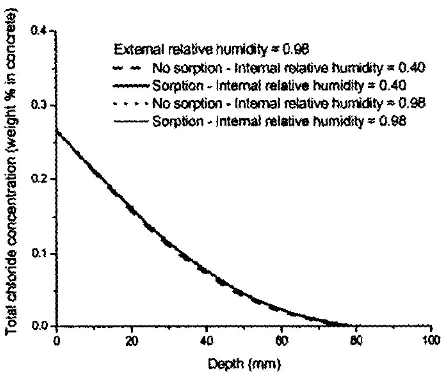
흡착의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 염소이온침투량해석을 수행하여 흡착이 염소이온침투량에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 해석대상물은 75 mm × 75 mm × 300 mm의 보형태를 띠고 있으며 확산이 일어나는 한 쪽면(정사각형의 면)을 제외한 나머지 모든 면은 외부와의 수분이동을 차단하였다. 배합은 해양콘크리트용으로 주로 사용되는 0.50의 물-시멘트비를 가지고 단위시멘트량이 345 kg/㎥인 콘크리트를 모델링하였고 재령보정계수는 0.5로 하였다. 염소이온 확산계수( $D_{c,ref}$)는 3.1 × $10^{-12}$ m²/s을, $D_{h,ref}$ 는 3.33× $10^{-10}$ m²/s을 사용하였다.

Fig. 1은 재령 2개월과 10년으로 나누어서 염소이온침투량에 따른 흡착의 효과를 나타내고 있다. 흡착에 의한 염소이온이동을 발생시키기 위해서 초기 콘크리트 내부의 상대습도를 0.40으로 하였다. 또한, 내부의 상대습도가 0.98인 경우에도 해석을 수행하여 흡착이 발생하지 않는 경우의 염소이온변화량도 고찰하였다. Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 콘크리트 내부의 상대습도가 0.40이면 흡착을 고려한 해석의 염소이온침투량이 고려하지 않은 것보다 크고, 10 ㎜정도의 깊이에서는 그 상대적인 차이가 50%이상임을 알 수 있다. 그러나, 콘크리트 내부의 상대습도가 0.98이면 흡착이 발생하지 않으므로 흡착 고려 유무에 따른 염소이온침투량의 차이가 없음을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 재령이 10년인 경우의 흡착에 따른 염소이온침투량을 나타내고 있다. 재령이 10년정도 경과하면 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 초기 0.40의 내부 상대습도를 가진 시료가 외부수분의 확산에 의해 내외부의 상대습도의 차이가 크게 줄어든다. 따라서, Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 초기의 내부상대습도의 차이에 따른 염소이온침투량의 차이가 거의 없어지고 흡착의 영향도 거의 발생하지 않는다. 따라서, 내외부의 상대습도의 변화가 크면 흡착에 의한 염소이온침투량의 변화가 발생하지만 그렇지 않은 경우에는 흡착의 효과가 미미함을 알 수 있다.

### 4.3 현장환경하에서의 염소이온침투 해석




**(a)** 재령 2개월




**(b)** 재령 10년

**Fig. 1.** 흡착의 유무에 따른 염소이온.

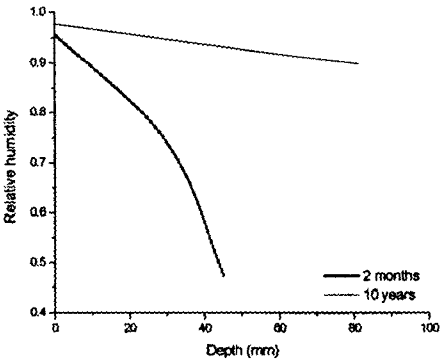
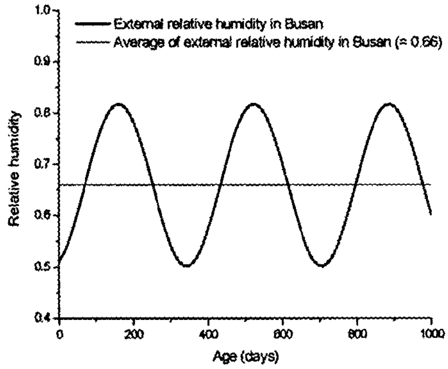


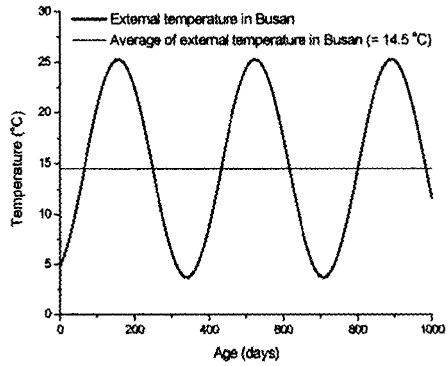

**Fig. 2.** 초기내부상대습도가 0.40인 경우의 재령에 따른 상대습도 변화.

실제 현장에서의 상대습도와 온도변화에 따른 염소이온침투량을 해석하기 위해서 Fig. 3과 같은 온도와 습도를 사용하였다. 이것은 부산지방에 대한 30년간의 기상측정데이타를 바탕으로 하고 있다. 온도와 습도의 평균값은 각각 14.5 ℃와 0.66 정도이다.

Fig. 4는 Fig. 3의 온도와 습도변화에 따른 재령 2개월, 10년, 10년6개월시의 염소이온침투량의 변화이다. 온도와 습도가 1월에 최저가 되고 6월에 거의 최고가 되므로 이를 고려하여 재령 10년과 10년 6개월일 때의 해석결과를 비교하였다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 재령 2개월인 경우에는 습도와 온도가 변화하는 환경조건의 염소이온침투량이 평균적인 온도와 습도에 노출된 염소이온침투량보다 작다. 이것



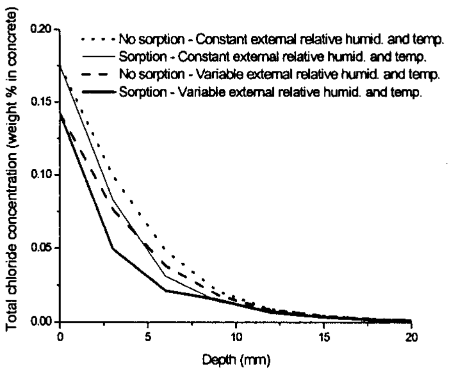

**(a)** 습도



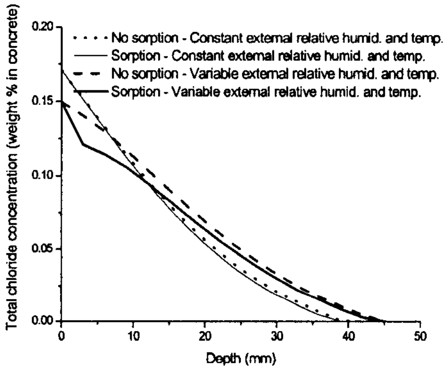

**(b)** 온도

**Fig. 3 .** 부산지역의 습도와 온도변화.

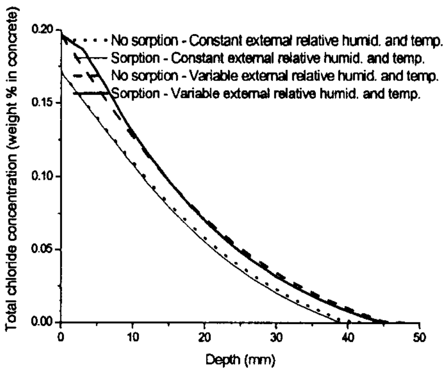
은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 재령 2개월일 때에는 습도와 온도가 모두 평균값보다 작은 범위에 존재하므




(a) 재령 2개월




(b) 재령 10년




(c) 재령 10년 6개월

**Fig. 4.** 부산지역 환경조건에 따른 염소이온침투.

로 나타난 현상으로 사료된다. 한편, 습도와 온도변화가 있는 경우에 흡착의 영향이 조금 더 큼을 Fig. 4(a)에서 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)와 (c)는 재령 10년과 10년 6개월에서의 염소이온침투량의 해석결과를 나타내고 있다. 그림에 나타낸 바와 같이 평균온도와 습도가 적용된 해석의 염소이온침투량은 두 재령에서 동일하고 흡착의 영향도 거의 없음을 알 수 있다. 외부의 습도와 온도가 계절에 따라 크게 변화하므로 재령 10년과 10년 6개월의 표면부근의 염소이온량은 각각 크게 다른 값을 나타낸다. 그러나 깊이 20 mm이하에서는 재령 10년과 10년 6개월의 염소이온량이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한, 표면부근에서는 흡착해석의 유무에 따라 염소이온량의 차이가 있지만 깊이가 깊어질수록 그 차이는 줄어든다. 이것은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 상대습도의 변화가 깊이에 따라 크게 줄어들기 때문에 나타난 현상으로 사료된다. 즉, 시료의 표면에서 외부의 상대습도가 변화하여 내외부의 상대습도 차이가 커서 염소이온침투량의 차이가 발생하지만 시료의 내부에서는 외부의 습도변화에 대한 영향이 적어서 흡착의 효과가 미미함을 알 수 있다.

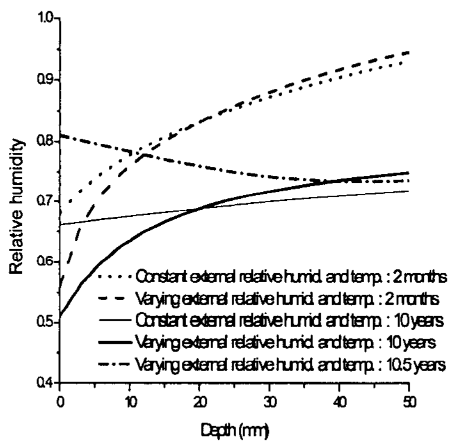



**Fig. 5.** 상대습도의 깊이에 따른 변화.

## 5. 결 론

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

습도가 연속적으로 변화하는 경우에는 확산뿐만 아니라 흡착에 의해서도 염소이온침투량이 변화한다. 장기재령보다는 초기재령에서, 시료의 내부보다는 표면에서 흡착의 염소이온침투량에 대한 영향이 크다. 따라서, 현장구조물의 초기재령에서의 염소이온 침투량을 계산하기 위해서는 각 현장의 습도와 온도자료를 바탕으로한 해석이 필요하지만 장기적인 염소이온침투해석을 수행할 때에는 평균적인 온도와 습도를 사용해도 큰 문

제가 없을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

김진근, 이칠성, 1997. 콘크리트의 부등건조수축에 관한 연구. *한국콘크리트학회 논문집*, 9(2), 153-161.

한상훈, 김진근, 김동현, 박우선, 2002. 콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석에 대한 확산계수의 영향. *대한토목학회 논문집*, 22(2-A), 347-350.

Bazant, Z. P. and Baweja, S., 1995. Justification and refinements of model B3 for concrete creep and shrinkage : 2. Updating and theoretical basis. *Materials and Structures*., 28, 488-495.

Xi, U., Bazant, Z. P. and Jennings, H. M., 1994. Moisture diffusion in cementitious materials. *Advanced Cement Based Materials*., 1, 248-257.