

해양 콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석

- 해석 프로그램의 개발 중심으로 -

Analysis of Chloride Ion Penetration of Marine Concrete Structure

- Part I. Development of Analysis Program -

한상훈¹, 박우선¹

Sang Hun Han¹, Woo Sun Park¹

1. 서 론

근래에 건설공간의 부족과 교통의 편리함으로 인해 해양 콘크리트 구조물의 건설이 증가하고 있다. 이러한 해양 콘크리트 구조물의 내구성에 가장 문제가 되는 것이 염해에 의한 철근의 부식이다. 염해에 의해 철근이 부식하게 되면 구조물의 안전성이나 사용성에 큰 악영향을 미치게 된다. 따라서, 이러한 염해에 의한 철근부식을 예측하고 방지하기 위해서는 콘크리트 구조물의 깊이에 따른 염소이온의 농도 해석이 필수적이다. 이러한 필요성에서 몇몇 연구자들은 콘크리트 구조물의 염소이온 확산에 대한 수학적 모델링과 이를 바탕으로 한 유한요소해석 프로그램을 제시하고 있다. Saetta 등(1993)은 수분확산을 고려한 염분해석을 수행하기 위하여 1차원 유한요소 프로그램을 개발하였고 김은경 등(1997)은 실제 구조물의 실험결과와 3차원 유한요소해석에 의한 해석 결과를 비교하였다. 또한 최근에 Martin-Perez 등(2000)은 염소이온의 비선형 고정화를 고려하는 모델을 제시하였다. 그러나 기존의 해석 모델들은 구조물 전체의 확산계수가 일정하다고 가정하거나 콘크리트의 특성이 확산계수에 미치는 영향을 고려하지 못하였다. 이 논문에서는 확산계수가 각 구조물의 지점과 재령 및 배합에 따라 연속적으로 변한다고 가정하여 염해에 대한 해석을 수행하고자 하였다. 또한 보의 단부나 비대칭 구조물에서도 프로그램의 적용이 가능하도록 3차원 유한요소를 도입한 모델링을

제시하였다.

이 연구에서는 콘크리트 내부의 자유 염소이온의 고정화와 증발가능수량이 확산계수에 미치는 영향을 고려하여 새로운 확산계수 모델을 제시하고 이를 바탕으로 콘크리트 구조물에 대한 염소이온 확산을 예측할 수 있는 유한요소 프로그램을 개발하였다.

2. 염소이온의 확산 모델링

2.1 확산방정식

다른 여러 물리량(수분, 황산염, 열 등)의 확산과 마찬가지로 염소이온의 확산은 다음과 같은 Fick의 제 1 법칙으로 나타낼 수 있다(Martin-Perez et al, 2000).

$$J_c = -\omega_e \left[D_{cx} \frac{\partial C_f}{\partial x} \bar{i} + D_{cy} \frac{\partial C_f}{\partial y} \bar{j} + D_{cz} \frac{\partial C_f}{\partial z} \bar{k} \right] \quad (1)$$

여기서,

J_c : 확산에 의한 염소이온의 변화량 ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

D_{cx}, D_{cy}, D_{cz} : 각 방향으로의 확산계수 (m^2/s)

ω_e : 단위콘크리트 부피당 유효증발가능수량 (m^3/m^3)

C_f : 단위공극용액 부피당 자유 염소이온의 농도 (kg/m^3)

식 (1)에서 (-)기호는 확산이 자유 염소이온 농도의 증가와는 반대의 방향으로 일어난다는 것을 의미한다. Fick의 제 2 법칙(또는 질량보존의 법칙)을 적용

¹ 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, 425-744, Korea)

하면 전체 염소이온 농도의 변화를 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot J_c \quad (2)$$

여기서, C_t : 단위콘크리트 부피당 전체 염소이온의 농도 (kg/m^3)

고정 염소이온, 자유 염소이온, 전체 염소이온의 농도들에 대한 상관관계는 식 (3)과 같다. 본 논문에서는 수분확산의 영향을 고려하지 않으므로 증발가능수량이 수분확산의 영향으로 감소하지 않아 ω_e 는 $\omega_{e, \text{sat}}$ 로 나타낼 수 있다.

$$C_t = C_b + \omega_{e, \text{sat}} C_f \quad (3)$$

여기서, C_b : 단위 콘크리트부피당 고정 염소이온의 농도 (kg/m^3)

식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 자유 염소이온에 대한 확산방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} & \left(\frac{D_c}{1 + \frac{l}{\omega_{e, \text{sat}}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_c}{1 + \frac{l}{\omega_{e, \text{sat}}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{D_c}{1 + \frac{l}{\omega_{e, \text{sat}}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 유한요소법에 의한 정식화

미소체적내부에서의 자유 염소이온의 시간에 따른 변화는 식 (4)를 이용하여 나타낼 수 있다. 이 때, 확산 과정이 등방성이고 미소체적내부에서 자유 염소이온에 대한 고정 염소이온의 변화율과 확산계수 및 증발가능수량이 일정하다면 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{D_c}{1 + \frac{l}{\omega_{e, \text{sat}}} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] \quad (5)$$

$$= D^c (\Delta_s C^c)$$

여기서, D_c : 겉보기 확산계수 (m^2/s)

공간영역에서 유한요소 정식화를 위해, 절점에서 자유 염소이온농도와 요소내의 염소이온 농도를 결합시켜주는 형상함수와 시간에 따른 요소의 절점에서의 염소이온 농도를 나타내는 $c_f(t)$ 의 곱으로 요소의 염소이온 분포를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_f(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] \{c_f(t)\} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하고 Galerkin 법을 이용하면 식 (7)과 같다.

$$\{D_c \nabla^2 [N(x, y, z) \{c_f(t)\}] - [N(x, y, z)] \frac{\partial c_f(t)}{\partial t}\} dV = 0 \quad (7)$$

$$\int_V [N(x, y, z)]^T$$

이 때, Gauss의 부분적분공식을 이용하여 식 (7)을 전개하면 염소이온 확산에 대한 요소내의 평형방정식을 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$[C] \left\{ \frac{\partial c_f(t)}{\partial t} \right\} + [K] c_f(t) = \{Q\} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } [C] = \int_V [N]^T [N] dV$$

$$[K] = \int_V D_c \left\{ \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right\} dV$$

$\{Q\}$: 경계조건의 영향을 고려하는 항

시간 영역에 대해서 식 (8)의 해를 구하기 위하여, 시간간격의 선택에 관계없이 비교적 안정된 해를 가지는 Newmark- β 방법을 사용한다. Newmark- β 방법은 속도와 변위를 식 (9)와 같이 가정하는 것에 바탕을 두고 있으며, 여기서는 β 와 δ 를 각각 0.25와 0.5로 하여 해석을 수행한다(김진근과 이철성, 1997).

$$\dot{C}_f^{t+\Delta t} = \dot{C}_f^t + [(1-\delta)\dot{C}_f^t + \delta \ddot{C}_f^{t+\Delta t}] \Delta t \quad (9)$$

$$C_f^{t+\Delta t} = C_f^t + \dot{C}_f^t \Delta t + [(0.5-\beta)\dot{C}_f^t + \beta \ddot{C}_f^{t+\Delta t}] (\Delta t)^2 \quad (10)$$

3. 결보기 확산계수의 변화

3.1 증발가능수량의 변화

시멘트 페이스트 내부의 수량은 증발가능수량과 비증발수량으로 나누어진다. 증발가능수량은 크게 모세관 공극수와 젤 공극수로 구성되고 비증발수량은 시멘트젤 내부에 화학적으로 결합된 수량으로 결정수와 결정내수 등으로 구분할 수 있다. 비증발수량의 양은 수화도에 비례하며 Power(1958)는 다음과 같은 비증발수량에 대한 실험식을 제시하였다.

$$\omega_n = 0.24 \alpha \quad (11)$$

여기서, ω_n : 시멘트량에 대한 비증발수량 (g/g)
 α : 수화도

이것은 모든 시멘트가 수화가 되면 각 시멘트 1 g 당 0.24 g의 비증발수량이 시멘트 페이스트 내부에 존재한다는 것이다. 젤 공극수의 양도 다음의 식에서 예측할 수 있다(Mindess & Young, 1981).

$$\omega_g = 0.18 \alpha \quad (12)$$

여기서, ω_g : 시멘트량에 대한 젤 공극수량 (g/g)

또한, 모세관 공극의 부피는 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다(Mindess & Young, 1981).

$$P_c = \frac{w}{c} - 0.36\alpha \quad \left(\text{if } \frac{w}{c} \leq 0.36, P_c = 0 \right) \quad (13)$$

여기서, P_c : 단위시멘트량에 대한 모세관 공극의 부피 (cm³/g)

w : 단위수량 (kg/m³)

c : 단위시멘트량 (kg/m³)

위의 식과 같이 모세관 공극의 부피는 물-시멘트비에 큰 영향을 받고 물-시멘트비가 0.36 이하이면 모세관 공극이 거의 발생되지 않음을 알 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 증발가능수량은 모세관 공극수와 젤 공극수의 합이므로 콘크리트에 대한 증발가능수량은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\omega_e = v_g + v_c \quad (14)$$

$$v_g = \omega_g \times c \times \frac{1}{w_s} = (0.18\alpha) \frac{c}{1000} \quad (15)$$

$$v_c = \frac{P_c}{1000} \times c = \left(\frac{w}{c} - 0.36\alpha \right) \frac{c}{1000} \quad (16)$$

여기서, v_g : 단위콘크리트 부피당 젤 공극의 부피 (m³/m³)

v_c : 단위콘크리트 부피당 모세관 공극의 부피 (m³/m³)

w_s : 물의 단위중량 (kg/m³)

물-시멘트비와 단위시멘트량은 배합이 결정되면 얻을 수 있지만 수화도 α 는 얻을 수 없다. 엄밀히 정의하면 수화도란 전체 시멘트량과 수화된 시멘트량의 비이지만 실용적인 관점에서 한계압축강도와 각 재령의 압축강도의 비로도 나타낼 수 있다 (Chanvillard & D'Aloia, 1996). 이에 따라 온도와 재령에 따른 강도를 예측하기 위해서 저자가 제시했던 예측식(한상훈 et al, 2000)을 이용하여 다음과 같이 수화도를 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^n A \left[e^{-\frac{E_o}{RT_i} e^{-a_i t_i}} + e^{-\frac{E_o}{RT_i} e^{-a_i(t_i-1)}} \right] (t_i - t_{i-1})}} \right\} \quad (17)$$

$$a = 0.00017 (T_i - 273) \quad (18)$$

$$E_o = 42,830 - 43 (T_i - 273) \quad (19)$$

$$t_o = 0.66 - 0.011 (T_i - 273) \quad (t_o \geq 0) \quad (20)$$

여기서, E_o : 초기 결보기 활성화에너지 (J/mol)

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 (= 10⁷)

a : 비례상수

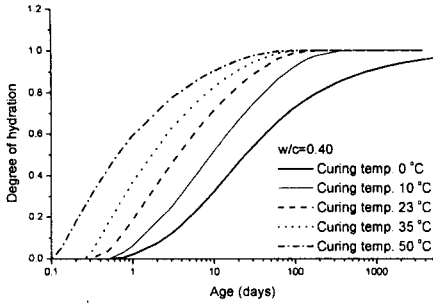
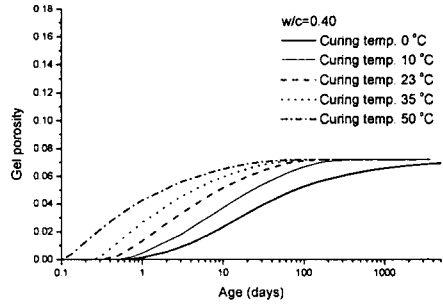


Fig. 1. 수화도.

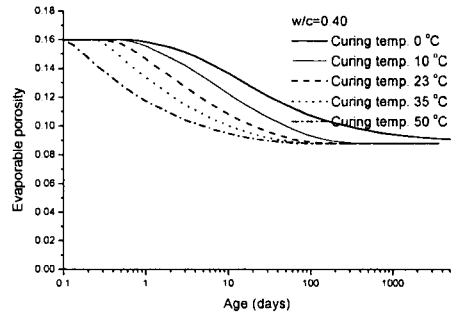
Fig. 1 은 등온양생에서의 수화도의 변화를 식 (17)에서 (20)을 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 1 에 나타난 바와 같이 23 °C 이상의 온도로 양생한 경우에는 재령이 100 일 이상이 되면 수화도가 거의 1 에 수렴함을 알 수 있다. 양생온도가 10 °C 인 경우도 재령이 1 년 정도 되면 거의 수화도가 1 이 되지만 양생온도가 0 °C 이면 수화의 진행속도가 매우 느림을 알 수 있다.

Fig. 2 는 Fig. 1 의 수화도 곡선을 바탕으로 단위시멘트량이 400 kg/m³ 이고 물-시멘트비가 0.40 인 경우의 겔공극의 부피, 모세공극의 부피, 증발가능수량을 나타내고 있다. Fig. 2(a)에 나타난 바와같이 수화가 진행됨에 따라 겔공극의 부피는 늘어나고 수화도가 거의 1 이 되면 겔공극의 부피도 더 이상 늘어나지 않음을 알 수 있다. 모세공극수들은 시멘트와 반응하여 수화물을 생성함에 따라 모세관 공극은 수화가 진행됨에 따라 계속적으로 감소하고 이것은 Fig. 2(b)와 같다. 증발가능수량은 겔공극수와 모세관공극수의 합으로 구하고 이것은 Fig. 2(c)에 나타내었다. Fig. 2(c)에 나타난 바와 같이 증발가능수량은 1 년 이상의 재령에서 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 증발가능수량은 확산계수의 계산에 사용되기도 하지만 콘크리트의 내부 염소이온량의 계산에서도 필수적으로 사용된다. 즉, 증발가능수량이 크면 내부 염소이온량도 증가하여 철근부식의 가능성이 증가한다.

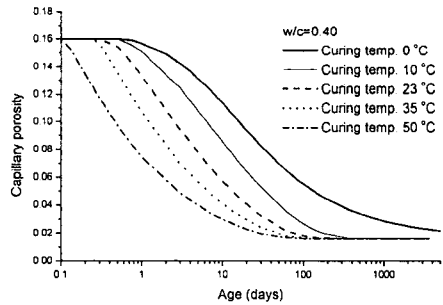
Fig. 3 은 물-시멘트비에 따른 증발가능수량의 변화이다. 여기서 물-시멘트비의 영향만을 고려하기 위해서 단위시멘트량은 400 kg/m³ 로 고정시켜서 해석을 수행하였다(실제로는 물-시멘트비의 변화에 따라 단위시멘트량도 변화할 것이다). 식 (15)와 (16)에서 모델링한 것과 같이 겔공극수는 물-시멘트비에 따라 변화하지 않지만 모세관 공극수는 물-시멘트비에 따라 변화한다. 이러한 모세관 공극수의 변화를 Fig. 3



(a) 겔 공극수



(b) 모세관 공극수



(c) 증발가능수량

Fig. 2. 양생온도에 따른 공극수의 변화.

은 포함하고 있다. Fig. 3 에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 증가할수록 증발가능수량은 커지고 물-시멘트비 0.36 과 0.70 의 증발가능수량의 차이는 3 배 이상이다. 이것은 공극수내의 자유 염소이온 농도가 물-시멘트비에 따라 일정하다면 0.70 의 물-시멘트비를 가진 콘크리트는 0.36 의 물-시멘트비를 가진 콘크리트보다 3 배 이상의 자유 염소이온을 포함하고 있다고 예측할 수 있다.

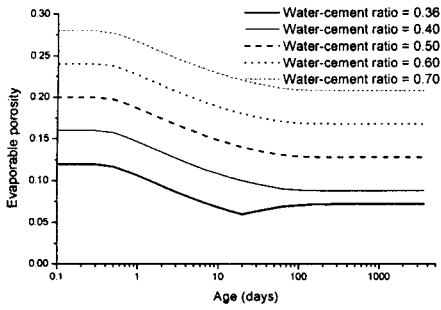


Fig. 3. 물-시멘트비에 따른 증발가능수량의 변화.

3.2 고정 염소이온과 자유 염소이온의 상관관계

결보기 확산계수에 영향을 미치는 다른 요인은 고정 염소이온에 대한 자유 염소이온의 변화율이다. 고정 염소이온에 대한 자유 염소이온의 변화율은 고정 염소이온과 자유 염소이온의 상관관계를 알면 쉽게 구할 수 있다. 이러한 상관관계 중에서 가장 간단한 것이 고정 염소이온이 발생하지 않는다고 가정하는 것이다. 이러한 경우는 식 (21)과 같이 확산계수와 결보기 확산계수가 같아진다.

$$C_b = 0, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = 0, \quad D'_c = D_c \quad (21)$$

그러나, 많은 실험들(Martin-Periz et al, 2000; Tang & Nilsson, 1993)에서 고정 염소이온의 존재가 증명되었으므로 식 (21)은 실제의 거동과는 거리가 있다. 고정 염소이온과 자유 염소이온의 다른 상관관계식으로 선형관계식을 생각할 수 있고 이를 식으로 나타내면 식 (22)와 같다.

$$C_b = aC_f, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = a, \quad D'_c = \frac{D_c}{1 + \frac{a}{\omega_e}} \quad (22)$$

선형관계식을 쓰면 식 (5)가 간단하게 되므로 몇몇 모델링에서 이러한 고정 염소이온과 자유 염소이온의 선형관계식을 사용하였다. 그러나, Nilsson (1996)은 선형관계식이 낮은 자유 염소이온 농도에서는 고정 염소이온의 양을 과소평가하고 반대로 높은 자유 염소이온 농도에서는 고정 염소이온의 양을 과대평가한다고 지적하였다. 이러한 단점을 개선하기 위해서 고정 염소이온의 자유 염소이온에 대한 변화율

이 자유 염소이온의 농도에 따라 변하는 Langmuir 상관계식이 식 (23)과 같이 제안되었다.

$$C_b = \frac{aC_f}{1 + bC_f}, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{a}{(1 + bC_f)^2} \quad (23)$$

$$D'_c = \frac{D_c}{1 + \frac{a}{\omega_e (1 + bC_f)^2}}$$

자유 염소이온의 농도가 증가함에 따라 Langmuir 상관계식의 기울기는 0에 수렴한다. 즉, 고정 염소이온이 생성되는 양은 한계가 있다는 개념이다. Tang & Nilsson(1993)은 공극내의 염소이온 농도가 0.05 mol/l 보다 작을 때는 Langmuir 상관계식이 두 값의 상관관계를 잘 모델링한다는 연구결과를 발표하였다. 한편 Tang & Nilsson은 공극내의 염소이온 농도가 0.01 mol/l 보다 큰 경우에는 식 (24)와 같은 Freundlich 상관계식이 두 값을 잘 모델링한다는 연구결과를 제시하였다.

$$C_b = aC_f^b, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = abC_f^{b-1}, \quad (24)$$

$$D'_c = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} abC_f^{b-1}}$$

Martin-Perez (2000) 등의 실험결과와 위에서 제시한 3 가지 상관관계식을 비교하면 Fig. 4 와 같다. Fig.

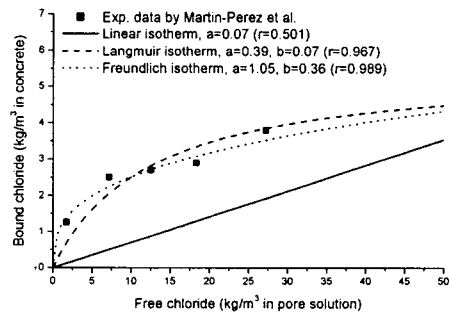
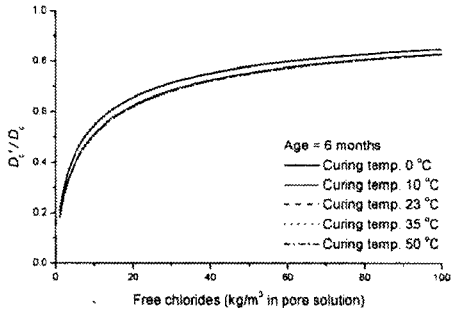
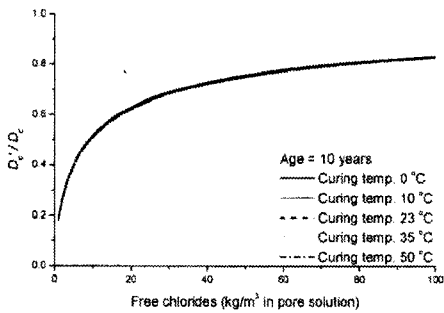


Fig. 4. 자유염소이온과 고정염소이온의 상관관계.



(a) 6 개월

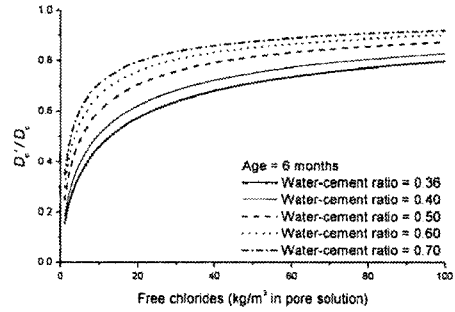


(b) 10 년

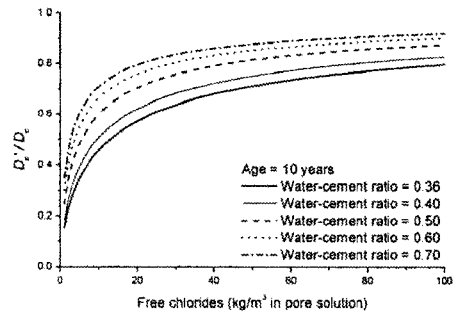
Fig. 5. 양생온도에 따른 겔보기 확산계수
(물-시멘트비=0.40, 단위시멘트량=400kg/m³)

4에 나타난 바와 같이 Freundlich 상관관계식이 가장 실험결과에 유사한 예측값을 제시하고 있으며 결정계수(r)도 가장 1에 가깝다. Tang 과 Nilsson 이 제안한 Langmuir 상관관계식의 유효범위인 자유염소이온 농도 0.05 mol/l 는 1.755 kg/m³ 에 해당하므로 Freundlich 의 상관관계식이 Fig. 4 에서 가장 실험값과 유사하게 나타난 것으로 사료된다. 일반적으로 염소이온의 확산예측에 사용되는 자유 염소이온의 농도 범위는 0.1 mol/l 이상이므로 대부분의 경우에 Freundlich 의 상관관계식을 사용하는 것이 적당할 것이다.

Fig. 5 와 6 은 앞에서 구한 증발가능수량과 식 (24) 의 Freundlich 의 상관관계식을 이용하여 겔보기 확산계수와 확산계수의 비를 나타내고 있다. Fig. 5 는 양생온도에 따른 겔보기 확산계수와 확산계수 비의 변화이다. Fig. 5 에 나타난 바와 같이 재령이 6 개월 정도 경과한 경우에는 겔보기 확산계수와 확산계수의 비가 양생온도에 따라서 조금 차이가 나지만 재령이 10 년 정도 경과한 경우에는 양생온도에 따른 값의



(a) 6 개월



(b) 10 년

Fig. 6. 물-시멘트비에 따른 겔보기 확산계수
(양생온도=23°C, 단위시멘트량=400kg/m³)

변화가 거의 없다. 즉, 양생온도는 겔보기 확산계수와 확산계수의 비에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나, 다른 여러 연구자들(Sacetta et al, 1993)이 제시한 바와 같이 양생온도가 증가하면 이온들의 활동성이 증가하여 확산계수의 절대값은 증가할 것으로 사료된다. Fig. 6 은 물-시멘트비에 따른 겔보기 확산계수와 확산계수 비의 변화를 나타내고 있다. Fig. 5 와는 달리 물-시멘트비는 겔보기 확산계수와 확산계수 비에 크게 영향을 미친다. 물-시멘트비가 증가할수록 겔보기 확산계수와 확산계수 비는 증가하고 0.70 의 물-시멘트비를 가진 콘크리트는 0.40 의 물-시멘트비를 가진 콘크리트보다 30 % 이상 큰 D_s/D_c 값을 가진다.

4. 염소이온 확산에 대한 수치해석결과

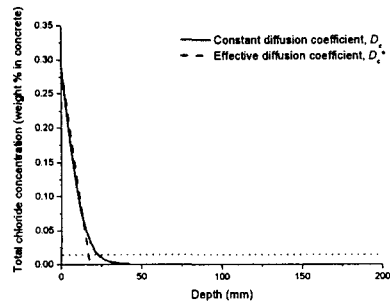
겔보기 확산계수와 확산계수의 차이는 Fig. 5 와 6 에서 설명하고 있지만 이러한 확산계수들의 차이보다도 더 중요한 것은 구조물 각 지점의 확산계수변화

에 따른 염소이온 침투속도의 변화이다. 이를 위하여 결보기 확산계수를 사용한 유한요소법 해석결과와 구조물의 모든 부분에서 확산계수가 일정하다고 가정 한 유한요소법 해석결과를 비교하였다. 해석 대상 물은 75 mm × 75 mm × 300 mm 의 보 형태이며 확산이 일어나는 한 쪽면을 제외한 나머지 모든 면은 외부와의 이온이동을 차단하였고 0.40 의 물-시멘트 비와 370 kg/m³ 의 단위시멘트량을 가지고 있으며 재령 3 일부터 염소이온에 노출되었다고 가정하였다. 또한 외부 염소이온 농도는 바닷물의 염소이온 농도를 감안하여 35000 ppm 으로 하였다. 초기 확산계수는 3.0 × 10⁻¹² m²/s 를 사용하였고 재령에 따른 확산계수의 변화는 고려하지 않았다. Fig. 7 은 해석결과를 재령이 6 개월과 10 년이 경과한 후로 나누어 나타내고 있다. Fig. 에 나타난 바와 같이 재령 6 개월인 경우에는 확산계수에 따른 염소이온 침투깊이가 큰 차이가 없다. 그러나, 재령 10 년이 경과한 경우에는 매우 큰 차이를 나타냄을 알 수 있고 일반 확산계수를 사용한 것보다 결보기 확산계수를 사용한 것이 염소이온의 침투속도가 느림을 알 수 있다. 즉 일반적인 확산계수를 사용하면 염소이온의 침투속도를 너무 크게 예측하는 오류를 범하게 되는 것이다. 깊이가 깊어질수록 두 값의 차이가 커지는데 이것은 Fig. 6 으로 설명할 수 있다. 시료의 내부에는 자유 염소이온의 농도가 매우 적고 따라서 Fig. 6 에 나타난 바와 같이 일반 확산계수에 비해 결보기 확산계수는 매우 작은 값을 가지게 된다. 따라서 깊이가 깊어질수록 결보기 확산계수는 작아지고 염소이온의 침투속도도 감소하게 된다.

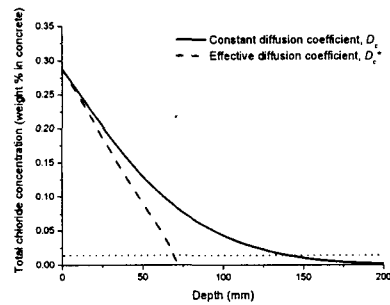
5. 결 론

콘크리트 구조물의 염소이온 침투를 모델링하기 위해 새로운 확산계수를 제시하고 이를 이용하여 구조물 해석 프로그램을 개발한 후에 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

- 1) 결보기 확산계수와 일반 확산계수의 비는 양생 온도에는 큰 영향을 받지 않지만 물-시멘트비가 감소하면 두 값의 차이는 증가한다.
- 2) 기존의 일반 확산계수를 사용하면 염소이온의 침투속도를 너무 크게 예측하여 깊이에 따른 염소이온 농도를 결보기 확산계수를 사용한 것보다 과대평가한다.



(a) 재령 6 개월



(b) 재령 10 년

Fig. 7. 확산계수의 변화에 따른 염소이온 농도변화.

참고문헌

- 김은겸, 신치범, 이운환, 1997. 콘크리트 구조물의 염화물이온 침투거동 해석 한국콘크리트학회 논문집, 9(6) : 233-241.
- 김진근, 이철성, 1997. 콘크리트의 부동전조수축에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 9(2) : 153-161.
- 한상훈, 김진근, 문영호, 2000. 수정 반응률 상수 모델에 의한 콘크리트 압축강도의 예측, 한국콘크리트학회 논문집, 12(2) : 31-42.
- Saetta, A. V., Scotta, R. V. and Vitaliani, R., 1993. Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, *ACI Materials Journal*, 90(5), pp.441-451.
- Martin-Perez, B., Zibara, H., Hooton, R. D. and Thomas, M. D. A., 2000. A study of the effect of chloride binding on service life predictions, *Cement and Concrete Research*, 30(8), pp.1215-1223.
- Powers, T. C., 1958. The physical structure and engineering properties of concrete, *Research and Development Bulletin*, 90, Portland Cement Association, Skokie, Ill.
- Mindess, S. and Young, J. F., 1981. *Concrete*, Prentice-Hall.

- Chanvillard, G. and D'Aloia, L., 1996. Concrete strength estimation at early ages : Modification of the method of equivalent age. *ACI Materials Journal*, 94(6), pp.520-530.
- Nilsson, L. O., Poulsen, E. and Sorensen, H. E., 1996. Chloride penetration into concrete, State-of-the-Art, The Road Directorate, Copenhagen.
- Tang, L. and Nilsson, L. O., 1993. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 23(2), pp. 247-253.