

## 해양 콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석

### Analysis of Chloride Ion Penetration of Marine Concrete Structure

한상훈\* · 박우선\* · 김동현\*

Sang-Hun Han\*, Woo-Sun Park\*, and Dong-Hyawn Kim\*

**要 旨 :** 본 논문에서는 염소이온 침투해석에 사용되는 염소이온 확산계수, 염소이온 고정화 관계식, 증발가능 수량에 대한 일반예측식들을 제시하였다. 이러한 식들을 염소이온 확산모델링에 대입하여 그 식들의 유효성을 검토하였다. 상대습도와 양생온도의 염소이온 확산에 대한 영향은 주로 확산계수를 변화시켜 고려한다. 상대습도가 증가하면 염소이온 확산깊이는 증가하고 재령이 경과할수록 상대습도가 확산깊이에 미치는 영향은 커진다. 반면에, 양생온도가 증가하면 확산깊이는 조금 증가하지만 재령이 경과할수록 양생온도가 확산깊이에 미치는 영향은 감소한다. 한편, 염소이온의 고정화에 영향을 미치는 시멘트의  $C_3A$ 양이 증가하면 표면에서는 고정염소이온의 증가로 인해 전체염소이온량이 증가하지만 깊이가 깊어질수록 확산되는 자유염소이온의 감소로 인해 전체염소이온량이 감소한다. 물-시멘트비가 감소하면 염소이온의 확산깊이는 급격히 감소하고 염소이온의 확산을 막는 가장 효과적인 방법은 물-시멘트비를 감소시키는 것임을 알 수 있다.

**핵심용어 :** 염소이온, 확산, 해양콘크리트,  $C_3A$ , 물-시멘트비

**Abstract** □ The estimation functions were proposed for calculating diffusion coefficient, chloride binding, and evaporable water. The program estimating chloride ion penetration was developed on the basis of these functions and the effects of humidity, curing temperature, water-cement ratio, and  $C_3A$  on chloride penetration were analyzed. The relative humidity increases the depth of chloride ion penetration and the trend becomes greater with aging. On the contrary, the influence of curing temperature on chloride ion penetraton decreases with aging. By the way, the rise of  $C_3A$  in cement increases total chloride concentration on the surface as the bound chloride concentration increases but it decreases total chloride concentration on the inner part as the diffusion velocity of free chloride decreases. The fall of water-cement ratio decreases the chloride penetration depth rapidly. Therefore, the reduction of water-cement ratio may be the most effective method for reducing of the steel corrosion by chloride penetration.

**Keywords :** chloride ion, diffusion, marine concrete,  $C_3A$ , water-cement ratio

## 1. 서 론

염소이온 확산해석을 실제 구조물에 대해 수행하기 위해서는 여러 변수들에 대한 값들이 필요하다. 이러한 변수들에 대한 값들은 사용 배합에 대한 실험을 통해 직접 측정할 수도 있지만 설계단계에서 염해에 의한 내구성평가를 위해 실험을 수행하기가 실용적인 관점에서 매우 어렵다. 또한, 염소이온 확산에 대한 실험은 그 값의 편차

가 크기 때문에 다년간 숙련된 연구자가 실험하지 않을 경우에는 실제값과 차이가 큰 실험값을 측정할 수도 있다. 이러한 이유로 염소이온 확산해석에 사용되는 변수들에 대한 일반 모델식들이 제시되고 있으나 국내에서는 모델식들을 제시하기 위해 사용될 수 있는 실험값들의 숫자가 제한적이고 또한 각 실험기기에 의한 오차가 크기 때문에 설계기준 등에서 인정된 모델식은 아직 없다.

한편, 염소확산 모델링에서 가장 중요한 수치해석변수

\*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: Sang-Hun Han, Coastal and Harbor Engineering Research Lab., KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. shhan@kordi.re.kr)

는 확산 계수이고 그 값은 상대습도, 양생온도, 재령 등에 따라 변화한다. 또한 내구성 저하에 직접적인 영향을 미치는 자유염소이온의 농도는 시멘트의 C<sub>3</sub>A성분에 영향을 받는데 염소이온 침투해석을 위해서는 C<sub>3</sub>A와 자유염소이온의 상관관계를 파악하는 것이 필요하다.

이 연구에서는 저자가 앞서 발표한 논문에서 개발한 염소이온 해석 프로그램의 해양 콘크리트 구조물에 대한 실제 적용성을 파악하기 위해 국외에서 발표된 기존의 실험결과들과 해석결과들을 종합하여 해석변수들에 대한 일반화 모델식을 제시하고 그 변수들의 변화에 따른 염소이온 확산깊이의 변화를 고찰하였다.

## 2. 수치해석 변수들

### 2.1 확산계수

기존의 여러 연구들에서 염소이온의 콘크리트 내부로의 확산에 대해서 다음과 같은 확산방정식을 제시하였다 (한상훈 *et al.*, 2002).

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{D_c}{1 + \frac{1}{\omega_e} \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial C_f}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, C<sub>f</sub>: 단위공극용액 부피당 자유 염소이온의 농도 (kg/m<sup>3</sup>)

D<sub>c</sub>: 염소이온 확산계수(m<sup>2</sup>/s)

ω<sub>e</sub>: 단위콘크리트 부피당 유효증발가능수량(m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)

C<sub>b</sub>: 단위콘크리트부피당 고정염소이온의 농도(kg/m<sup>3</sup>)

염소이온의 확산과 함께 수분확산을 고려하기 위해서는 수분확산에 대한 확산방정식도 필요한데 이것은 식 (2)와 같이 좀 더 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

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

여기서, H: 공극의 상대습도

D<sub>h</sub>: 수분의 확산계수(m<sup>2</sup>/s)

식 (1)과 식 (2)의 확산계수는 양생온도, 재령, 상대습도에 따라서 변화하고 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 (Saetta *et al.*, 1993; 김진근 *et al.*, 1997).

$$D_c = D_{c,ref} F_1(h) F_2(T) F_3(t) \quad (3)$$

$$D_h = D_{h,ref} G_1(h) G_2(T) G_3(t) \quad (4)$$

$$F_1(h) = G_1(h) = \gamma + (1 - \gamma) \left\{ \frac{1}{1 + \left( \frac{1-h}{1-h_c} \right)^n} \right\} \quad (5)$$

$$F_2(T) = G_2(T) = \exp \left\{ \frac{E}{RT_{ref}} - \frac{1}{T} \right\} \quad (6)$$

$$F_3(t) = G_3(t) = \beta + (1 - \beta) \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \quad (7)$$

여기서, D<sub>c,ref</sub> 또는 D<sub>h,ref</sub>: 재령 28일, 상대습도 100%, 양생온도 T<sub>ref</sub>에서의 염소이온 및 수분 확산계수(m<sup>2</sup>/s)

h: 콘크리트의 상대습도

h<sub>c</sub>: F<sub>1</sub>(h)가 최대값과 최소값의 중앙에 있을 때의 상대습도

γ: 상수

E: 겉보기 활성에너지(J/mol)

R: 가스상수(=8.3144 J/K-mol)

T<sub>ref</sub>: 표준온도(Kelvin)

T: 양생온도(Kelvin)

t: 재령(days)

β: 상수

겉보기 활성에너지인 저자가 제안한 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다(한상훈 *et al.*, 2000).

$$E = E_o e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$E_o = 42,830 - 43(T - 273) \quad (9)$$

$$\lambda = 0.00017(T - 273) \quad (10)$$

표준 염소이온 확산계수, D<sub>c,ref</sub>,는 여러 영향인자에 의해 변화하지만 가장 지배적인 영향을 미치는 것이 물-시멘트비이다. 물-시멘트비에 따라 염소이온 확산계수를 예측하는 식은 Papadakis *et al.*(1996), Stewart & Rosowsky (1998), Hobbs(1998) 등에 의해서 제안되었지만 근래에 들어 추천되는 식은 Papadakis 등이 제안한 다음과 같은 식이다.

$$D_{c,ref,\infty} = D_{H_2O} 0.15 \frac{1 + \rho_c \frac{w}{c}}{1 + \rho_c \frac{w}{c} + \frac{\rho_c a}{\rho_a c}} \left( \frac{\rho_c \frac{w}{c} - 0.85}{1 + \rho_c \frac{w}{c}} \right)^3 \quad (11)$$

여기서, D<sub>H2O</sub>: 무한용액에서의 염소이온 확산계수(염화나트륨 1.6×10<sup>-9</sup> m<sup>2</sup>/s)

c: 단위시멘트량(kgf/m<sup>3</sup>)

w: 단위수량(kgf/m<sup>3</sup>)

a: 단위골재량(kgf/m<sup>3</sup>)

$\rho_c$ : 시멘트의 밀도

$\rho_a$ : 골재의 밀도

$$D_{h,ref} = \frac{D_{1,o}}{\left(\frac{f_{ck}}{f_{cko}}\right)} \quad (13)$$

여기서,  $D_{1,o}$ : 최대염소이온 확산계수( $=1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ )

$f_{ck}$ : 설계기준강도(MPa)

$f_{cko}=10 \text{ MPa}$

식 (11)은 재령 2개월에서 14개월 사이에서 실험된 값을 기준으로 제시된 것으로 계산된 확산계수가 어떤 재령에 해당되는 값인지를 결정하는 것은 어렵다. 이 논문에서는 식 (11)에서 계산되는 확산계수를 극한재령에서의 확산계수로 가정(극한재령의 확산계수가 가장 작으므로 실제값과 가정값의 차이 만큼의 안전률을 확보가능)하고 식 (7)의 재령보정계수는 이에 맞추어서 다음과 같이 수정하였다.

$$F_3'(t) = 1 + \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \left(\frac{28}{t}\right)^0.5 \quad (12)$$

Fig. 1은 물-시멘트비와 골재량에 따른 확산계수의 변화를 나타내고 있다. 그럼에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 증가하면 확산계수는 선형적으로 증가함을 알 수 있고 골재량의 증가는 확산계수의 감소를 가져옴을 알 수 있다. 이것은 미세구조적 관점에서 설명될 수 있다. 즉, 물-시멘트비가 증가하면 공극이 증가하여 확산경로가 커지고, 반대로 골재량이 증가하면 시멘트 페이스트량이 감소하여 확산이 일어날 수 있는 경로가 줄어들게 되어 Fig. 1과 같은 결과가 나타나는 것이다.

고유수분확산계수,  $D_{h,ref}$ 에 대한 연구는 고유염소이온 확산계수보다 그 연구결과가 많이 축적되어 CEB-FIP CODE 1990에서는 이에 대한 모델식을 다음과 같이 제시하고 있다.

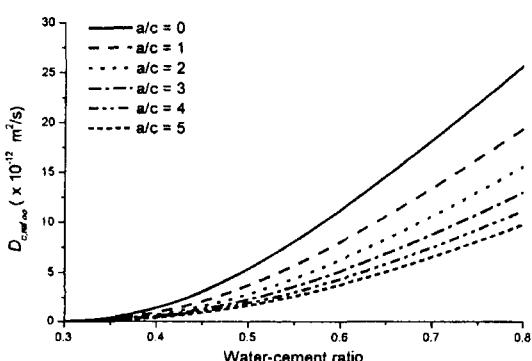


Fig. 1. Diffusion coefficient with water-cement and aggregate-cement ratios.

식 (5)의  $F_1(h)$ 와  $G_1(h)$ 는 공극내의 수분이 염소이온 확산계수와 수분 확산계수에 미치는 영향을 모델링한다. 공극들이 모두 물로 채워져 있으면 염소이온은 연속적인 공극의 통로를 통하여 확산된다. 그러나 수분의 증발로 물로 채워진 공극이 줄어들게 되면 확산 통로가 줄어들게 되고 또한 시멘트 페이스트 주변의 흡착수들의 감소로 페이스트와 이온의 강한 인력으로 인하여 확산은 방해받게 된다. 상대습도가  $h$ 에 이르면 확산계수는 급격히 감소한다. 기존의 연구자들의 실험결과들을 이용하여 일반적으로  $h_c$ 는 0.75를,  $\gamma$ 는 0.03을,  $n$ 은 4의 값을 사용한다(김진근 et al., 1997).  $F_2(T)$ 와  $G_2(T)$ 는 양생온도의 확산계수에 대한 영향을 나타낸 것으로 재령 6개월이하에서는 그 영향이 크지만 재령이 경과할수록 그 영향은 급격히 줄어든다. 예를들어, 재령이 1년이상이고 양생온도가 20 °C이상이면  $F_2(T)$ 값의 변화는 0.9에서 1.1 미만이다.  $F_3(t)$ 와  $G_3(t)$ 는 재령의 확산계수에 대한 영향을 모델링하는데 그 값은  $\beta$ 에 크게 영향을 받는다.  $\beta$ 는 0에서 1사이의 값으로 시멘트의 종류와 물-시멘트비에 따라 변한다. 낮은 물-시멘트비를 가진 콘크리트나 조강 시멘트를 사용한 경우에는 1에 근접한 값을, 높은 물-시멘트비를 가진 콘크리트에는 작은 값을 사용한다. 이것은 물-시멘트비가 낮을수록 빠른 수화반응으로 인해 28일이후의 콘크리트의 재료성질이 거의 일정하게 되고 확산계수도 재령에 따라 거의 변화하지 않게 되는 것이다.  $\beta$  값이 0.5인 경우에는 재령이 30년정도 경과하면 확산계수가 0.5배정도로 감소한다(Saetta et al., 1993).

## 2.2 염소이온의 고정화

고정염소이온은 주로 시멘트 C<sub>3</sub>A성분과 염소이온이 결합하여 Friedel염의 형성으로 생성되는 것이다. 따라서, 많은 C<sub>3</sub>A성분을 가진 콘크리트는 많은 양의 고정염소이온을 발생시키게 된다. Glass 등(1997)은 이러한 C<sub>3</sub>A성분에 따른 자유염소이온(공극용액의 농도)과 고정염소이온의 상관관계를 Langmuir isotherm을 바탕으로 제시하였다. 기존의 연구에서 Freundlich isotherm<sup>o</sup> Langmuir isotherm 보

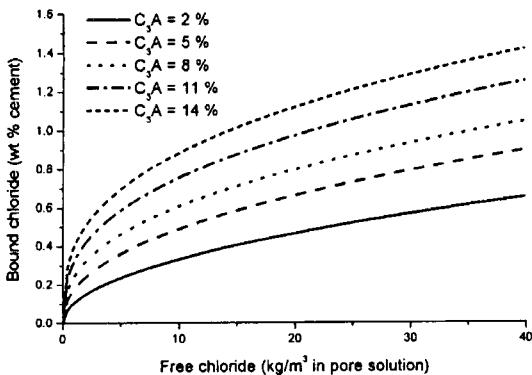


Fig. 2. Relationship between free and bound chloride concentration.

다 정확한 값을 예측한다는 연구결과를 발표하였으므로 (한상훈 *et al.*, 2002) 본 논문에서는 Glass의 결과를 이용하여 고정염소이온과 자유염소이온의 상관관계를 Freundlich isotherm을 이용하여 식 (14)와 같이 제시하였다.

$$C_{bc} = \alpha C_f^\beta \quad (14)$$

$$\alpha = 0.056 + 0.025 C_3A \quad (15)$$

$$\beta = \frac{1}{0.076 C_3A + 1.91} \quad (16)$$

여기서,  $C_{bc}$ : 고정염소이온량(시멘트와의 무게비, %)  
 $C_f$ : 단위공극용액 부피당 자유염소이온의 농도( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $C_3A$ : 시멘트 성분의 양(%)  
 $\alpha, \beta$ : Freundlich isotherm의 상수

Fig. 2는  $C_3A$ 성분에 따른 자유염소이온과 고정염소이온의 상관관계를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이  $C_3A$ 성분이 증가할수록 고정염소이온의 양이 증가함을 알 수 있다.

### 2.3 증발가능수량

식 (1)의 확산방정식에서 결정되지 않은 변수는 증발가능수량( $e$ )이다. 앞선 연구에서 발표한 바와 같이 증발가능수량은 모세관 공극수와 겔 공극수의 합으로 나타낼 수 있으며 그 값은 다음의 식들로 모델링할 수 있다(한상훈 *et al.*, 2002).

$$\omega_e = v_g + v_c \quad (17)$$

$$v_g = \omega_g \times c \times \frac{1}{w_s} = (0.18 \alpha) \frac{c}{1000} \quad (18)$$

$$v_c = \frac{P_c}{1000} \times c = \left( \frac{w}{c} - 0.36 \alpha \right) \frac{c}{1000} \quad (19)$$

여기서,  $v_g$ : 단위콘크리트 부피당 겔 공극의 부피( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )  
 $v_c$ : 단위콘크리트 부피당 모세관 공극의 부피( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )  
 $\omega_g$ : 시멘트량에 대한 겔 공극수량(g/g)  
 $w_s$ : 물의 단위중량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $P_c$ : 단위시멘트량에 대한 모세관 공극의 부피( $\text{cm}^3/\text{g}$ )  
 $\alpha$ : 수화도  
 $w$ : 단위수량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $c$ : 단위시멘트량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

물-시멘트비와 단위시멘트량은 배합이 결정되면 얻을 수 있지만 수화도  $\alpha$ 는 얻을 수 없다. 염밀히 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(한상훈 *et al.*, 2000)을 이용하여 다음과 같이 수화도를 계산할 수 있다.

$$\alpha = \left\{ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^n \left[ e^{-\frac{E_o}{RT_i} e^{-\lambda t_i}} + e^{-\frac{E_o}{RT_i} e^{-\lambda t_{i-1}}} \right] (t_i - t_{i-1})}} \right\} \quad (20)$$

$$t_o = 0.66 - 0.011(T_i - 273)(t_o \geq 0) \quad (21)$$

여기서,  $E_o$ : 초기 결보기 활성에너지(J/mol)(식 (9)로 계산)  
 $\lambda$ : 비례상수(식 (10)으로 계산)  
 $t_{i-1}, t_i$ : 양생온도가  $T_i$ 인 재령의 시작점과 종료점  
 $R$ : 가스상수( $=8.3144 \text{ J/K-mol}$ )  
 $T_i$ : 재령  $t_{i-1}$ 과  $t_i$  사이에서의 양생온도(Kelvin)  
 $A$ : 비례상수( $=10^7$ )

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 실험값과 예측값의 비교

개발된 해석프로그램에 의한 예측값과 실험값을 비교하여 해석프로그램의 유효성을 검증한다. 실험값은 Sergi (1992) 등이 시멘트 페이스트에 대해서 행한 실험결과를 이용하였다. 전체염소이온량의 시료 깊이에 따른 변화를 측정한 실험결과는 많지만 Sergi처럼 자유염소이온량과 고정염소이온량의 깊이에 따른 변화를 측정한 실험결과는 많

지 않다. 사용된 시멘트 페이스트의 물-시멘트비는 0.50이고, 시료는  $\phi 49\text{ mm} \times 75\text{ mm}$  공시체를 사용하였다. 20°C에서 90일동안 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 (11)을 이용하여 확산계수를 계산하였는데 그 값은  $5.4 \times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ 이고 재령보정상수  $\beta$ 가 0.2로 가정하면  $D_{c,ref}$  값은  $27.0 \times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ 이다. 곧 재가 존재하지 않으므로 재령에 따른 시료의 성질변화가 클 것으로 예상되어  $\beta$ 를 0.2로 하였다.

Fig. 3은 실험값과 예측값을 비교하고 있다. Fig. 3(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. 3(b)는 고정염소이온량의 깊이에 따른 변화를 나타내고 있다. 시멘트 성분분석에서 실험에 사용된 시멘트의  $C_3A$ 양이 14.2%로 측정되어 이 값을 식 (15)와 (16)에 대입하여 고정염소이온량을 계산하였다. 그림에 나타난 바와 같이 예측곡선은 고정염소이온량을 조금 크게 평가한다. 그러나, 이것으로 고정염소이온량과 자유염소이온량의 상관관계를 나타내는 식 (14)에서 (16)이 유효하지 않다고 판단해서는 안된다. Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 고정염소이온 실험값들의 흘어짐이 자유염소 이온량보다 크고 이러한 실험값의 흘어짐을 고려할 때, 예측한 곡선과 실험값의 차이는 크지 않다. 식 (14)에서 (16)은 현재까지의 실험결과를 바탕으로 하고 있으므로 앞으로의 실험결과 축적과 실험법의 발전에 따라 수정될 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 3(c)는 자유염소이온량과 고정염소이온량의 합인 전체염소이온량의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 고정염소이온량의 오차만큼 실험값과 예측값이 차이가 남을 알 수 있다.

### 3.2 해석변수의 변화에 따른 염소이온농도의 변화

앞에서 언급한 해석변수 중에서 확산계수와 중별가능수량에 영향을 미치는 습도, 양생온도, 물-시멘트비 및 염소이온 고정화의 영향요소인  $C_3A$ 의 양에 따른 확산깊이의 변화를 고찰하고자 하였다.

Fig. 4는 재령에 따른 외기상대습도가 염소이온 확산깊이에 미치는 영향을 고찰하고 있다. 해석 대상물은  $75\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 의 보형태를 띠고 있으며 확산이 일어

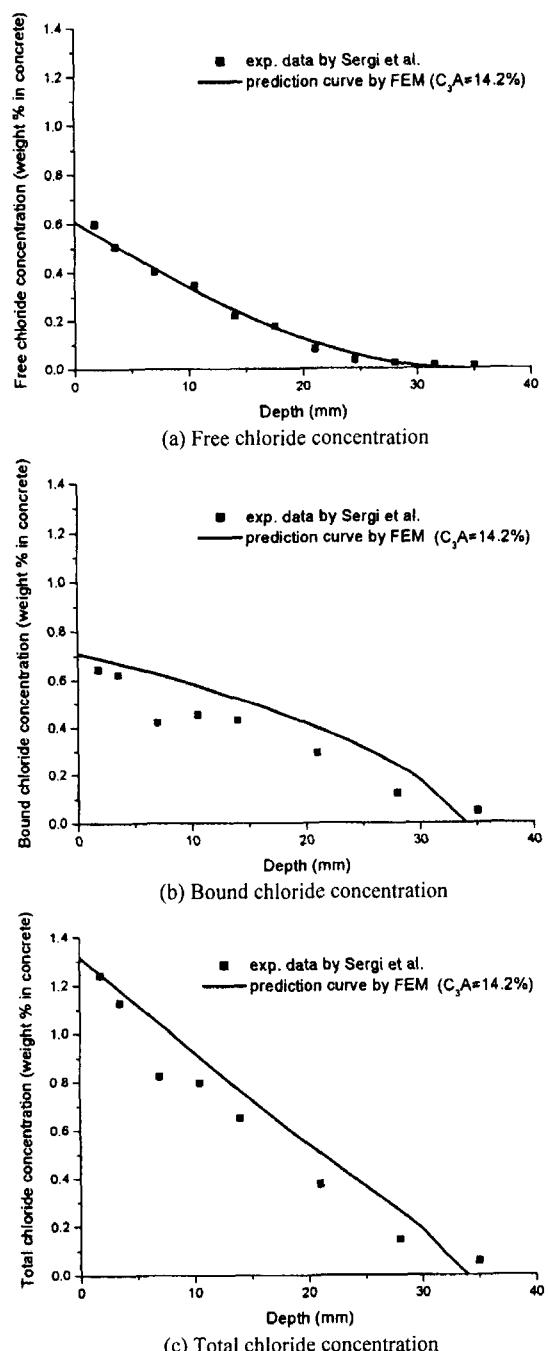


Fig. 3. Comparison of experimental and calculated chloride concentrations.

나는 한 쪽면(정사각형의 면)을 제외한 나머지 모든 면은 외부와의 수분이동을 차단하였다. 배합은 해양콘크리트용으로 주로 사용되는 0.50의 물-시멘트비를 가지고 단위시

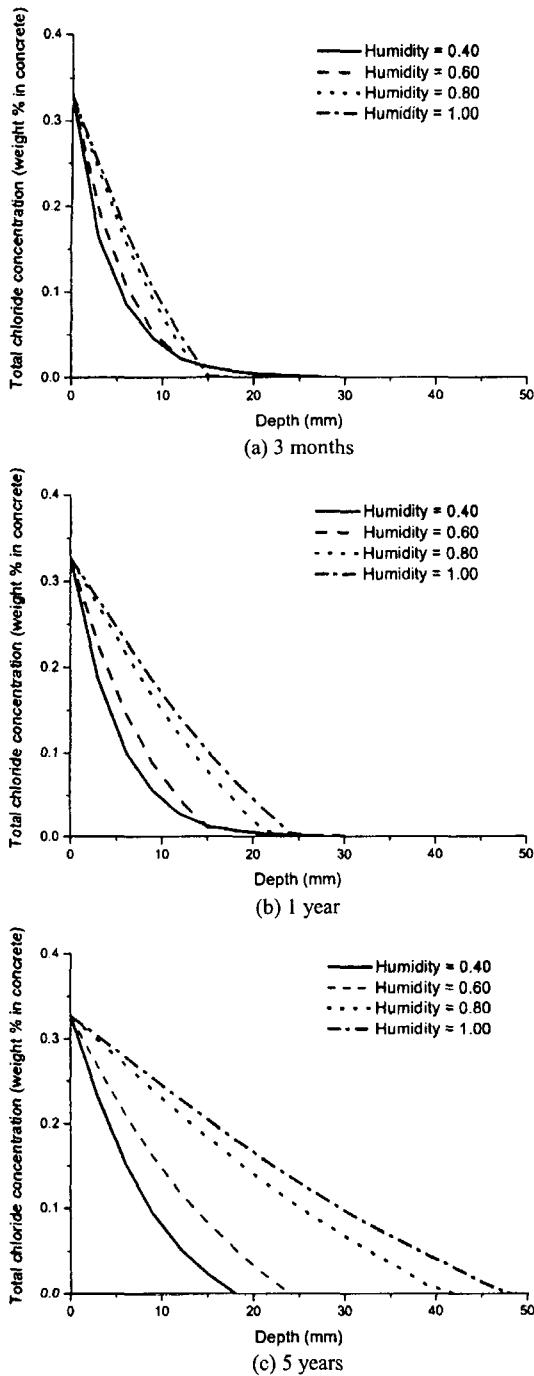


Fig. 4. Total chloride concentration with humidity.

멘트 량이  $345 \text{ kg/m}^3$ 인 콘크리트를 모델링하였고 재령보정 계수는 0.5로 하였다. 식 (11)과 (12)에 의해 계산된 염소 이온 확산계수( $D_{c,ref}$ )는  $3.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}^\circ$ 이고  $D_{h,ref}$ 는  $3.33 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 을 사용하였다. Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 재

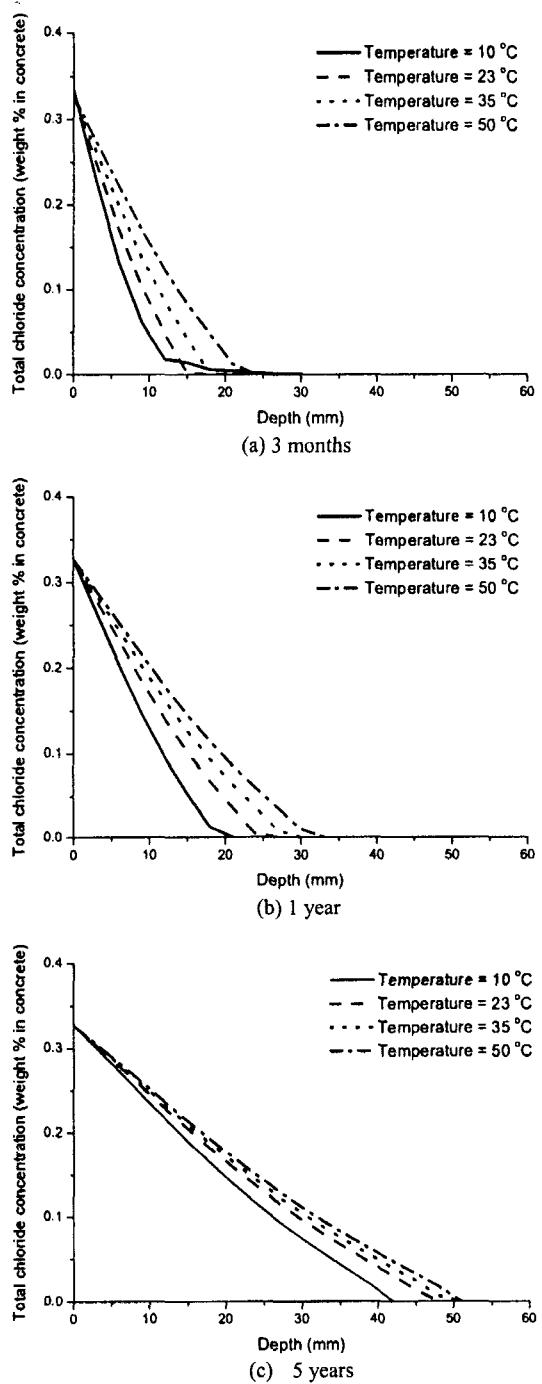


Fig. 5. Total chloride concentration with curing temperature.

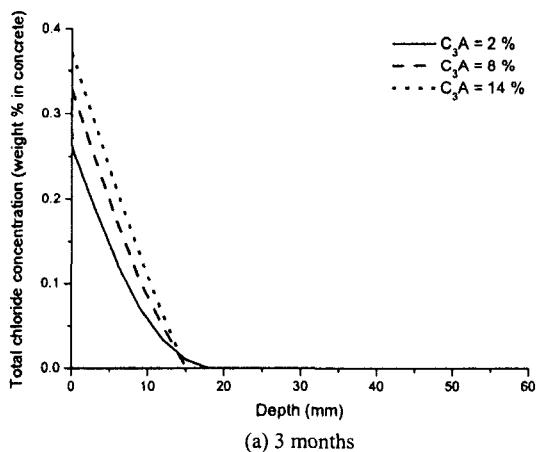
령이 경과할수록 상대습도가 확산깊이에 미치는 영향이 커진다. 재령 5년이 경과하면 Fig. 4(c)에 나타난 바와 같이 포화된 경우의 확산깊이는 상대습도가 0.4인 경우보다 2.5 배이상임을 알 수 있다. 따라서, 상대습도가 염소이온의

확산깊이에 미치는 영향이 크므로 주기적인 견습이 반복되는 곳이나 대기에 노출된 곳에서는 상대습도 변화에 따른 염소이온 확산 해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

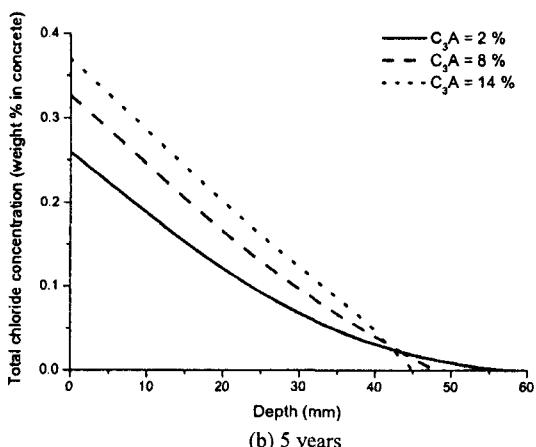
Fig. 5는 양생온도에 따른 확산깊이의 변화를 재령 3개월, 1년, 5년에서 각각 나타내었다. 해석조건은 앞의 습도에 대한 영향을 파악하기 위한 해석과 동일하고 각각의 양생온도만을 변화시켰다. 그림에 나타난 바와 같이 초기 재령에서는 양생온도가 염소이온의 확산깊이에 미치는 영향이 상당히 크지만 장기재령에서는 양생온도의 확산깊이에 대한 영향이 급격히 줄어듬을 알 수 있다. 재령 3개월에서  $10^{\circ}\text{C}$ 로 양생한 콘크리트의 확산깊이는  $50^{\circ}\text{C}$ 로 양생한 콘크리트에 비해 50% 정도 작음을 알 수 있다. 그러나 재령 5년에서는 그 값들의 차이가 20% 보다도 작다. 양생온도는 식 (6)의 보정계수에 영향을 미쳐 식 (3)의 확산계수를 변화시킨다. 또한 양생온도는 증발가능수량(한상훈 *et al.*, 2002)에도 영향을 미치지만 그 영향에

의한 확산깊이의 변화는 매우 미미하다. 즉, 양생온도는 식 (6)에 의한 보정계수에 가장 큰 영향을 미쳐 확산깊이를 변화시킬 수 있다.

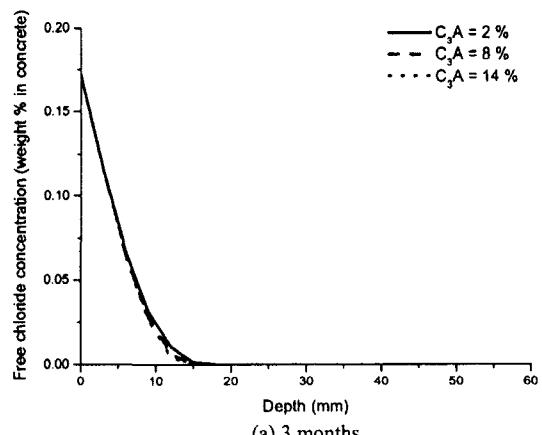
Fig. 6과 7은 염소이온 고정화의 주성분인  $\text{C}_3\text{A}$ 의 양에 따른 확산깊이의 변화이다. Fig. 6은 전체염소이온농도를 나타낸 것이고 Fig. 7은 자유염소이온 농도의 변화를 나타낸 것이다. 해석조건은 앞의 상대습도의 경우와 동일하고 각각의  $\text{C}_3\text{A}$ 의 양만을 변화시켰다. Fig. 6에 나타난 바와 같이  $\text{C}_3\text{A}$ 의 양이 증가하면 표면부근에서의 전체 염소이온량은 증가하지만 깊이가 깊어질수록 그 값들의 차이는 줄어들고 특정깊이 이하에서는  $\text{C}_3\text{A}$ 의 양이 증가할수록 전체염소이온량이 감소함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7의 자유염소이온량을 참조하여 설명할 수 있다. Fig. 7에 나타난 바와 같이  $\text{C}_3\text{A}$ 의 양이 달라져도 외부염소이온 농도가 동일하면 표면 부근의 자유염소이온 농도는  $\text{C}_3\text{A}$ 의 양에 관계없이 동일하다. 그러나, 고정염소이온량은  $\text{C}_3\text{A}$ 의



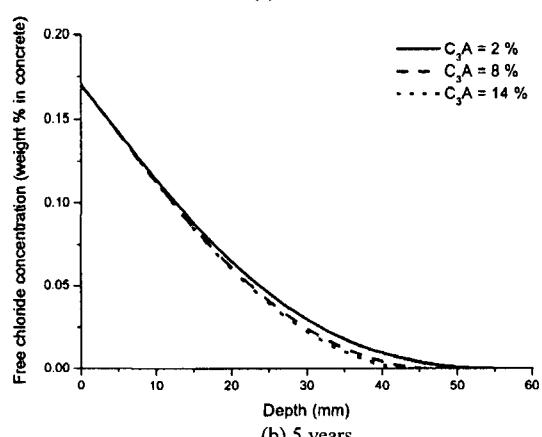
(a) 3 months



(b) 5 years

Fig. 6. Total chloride concentration with  $\text{C}_3\text{A}$ .

(a) 3 months

Fig. 7. Free chloride concentration with  $\text{C}_3\text{A}$ .

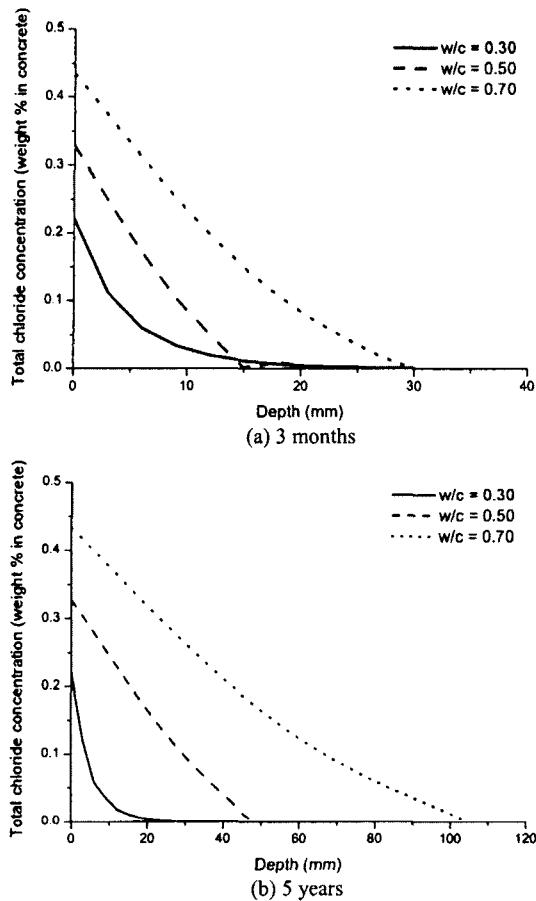


Fig. 8. Total chloride concentration with water-cement ratio.

양에 따라 변화하므로 Fig. 6과 같이 표면부근에서의 전체 염소이온 농도는 고정염소이온이 증가함에 따라 증가하게 된다.  $C_3A$ 의 양이 증가할수록 많은 양의 염소이온이 고정화되고 이러한 염소이온 고정화는 확산속도를 감소시킨다. 따라서, 염소이온의 확산이  $C_3A$ 의 양이 증가할수록 감소하고 이것은 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 즉, 표면에서는  $C_3A$ 의 양이 증가할수록 고정염소이온의 증가로 인해 전체염소이온량이 증가하고 깊이가 깊어질수록 확산되는 염소이온의 감소로 인해  $C_3A$ 의 양이 증가할수록 전체염소이온량이 감소하게 되는 것이다.

Fig. 8은 물-시멘트비의 변화에 따른 전체염소이온의 변화를 나타내고 있다. 첫번째로 물-시멘트비가 변화하게 되면 식 (11)에 제시된 바와 같이 확산계수가 변화한다. 앞에서 언급한 바와 같이 물-시멘트비가 0.50이면 확산계수는  $3.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고 물-시멘트비가 0.30과 0.70인 경우에는 각각  $0.0131 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 과  $12.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

이다. 물-시멘트비가 0.50에서 0.70으로 증가하면 확산계수는 4배이상 증가함을 알 수 있다. 또한, 물-시멘트비가 0.50에서 0.30으로 감소하면 확산계수는 250분의 1로 감소한다. 확산은 시멘트 페이스트의 포화 공극들을 통해 이동하는데 물-시멘트비가 감소하면 공극의 숫자가 급격히 감소한다. 또한 0.30의 물-시멘트비는 수화에 필요한 최소한의 수량만을 공급하므로 확산의 가능성은 매우 줄어들게 되는 것이다. 저자가 이전에 발표한 논문(한상훈 *et al.*, 2002)에서 제시한 바와 같이 물-시멘트비는 초기 표면염소이온량도 변화시킨다. 이러한 물-시멘트비에 따른 염소이온 확산의 변화는 Fig. 8에 자세히 나타나 있다. 그림에 나타난 바와 같이 물-시멘트비를 감소시키면 깊이에 따른 확산량이 급격히 줄어듬을 알 수 있다. 재령 3개월에서는 물-시멘트비가 0.7인 것의 확산깊이는 0.30인 것보다 3배이상 크고, 재령 5년인 시점에서는 6배이상 큼을 알 수 있다. 물-시멘트비가 0.30인 경우에는 재령이 3개월에서 5년으로 경과해도 그 확산깊이의 증가가 크지 않음을 관찰할 수 있다. 따라서, 염소이온확산에 의한 철근의 부식을 방지하는 가장 효과적인 방법은 물-시멘트비를 감소시키는 것임을 알 수 있다.

#### 4. 결론

콘크리트 구조물의 염소이온 침투를 모델링하기 위해 사용되는 해석변수들을 살펴보고 이에 대한 영향들을 평가한 후에 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 해석 프로그램은 자유염소이온의 깊이에 따른 변화를 정확하게 모델링하였다. 해석 프로그램이 고정염소이온의 양을 조금 크게 예측하지만 실험값과 예측값의 차이는 크지 않았다.

2) 상대습도가 염소이온 침투깊이에 미치는 영향은 재령이 경과할수록 커진다. 상대습도가 1.0인 콘크리트의 염소이온 침투깊이는 재령이 5년경과하면 상대습도가 0.40인 경우보다 2.5배이상 커진다.

3) 초기재령에서는 양생온도가 염소이온확산에 미치는 영향이 크지만 재령이 경과할수록 그 영향은 감소한다.

4)  $C_3A$ 의 양이 증가하면 표면에서 전체염소이온은 증가하지만 일정깊이이하에서는 반대의 경향이 나타난다.

5) 물-시멘트비가 줄어들면 염소이온확산량은 급격히 줄어들므로 물-시멘트는 염소이온확산에 가장 큰 영향을 주는 요소 중의 하나이다.

## 참고문헌

- 김진근, 이칠성, 1997. 콘크리트의 부등건조수축에 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.
- 한상훈, 김진근, 김동현, 박우선, 2002. 콘크리트 구조물의 염소이온 침투해석에 대한 확산계수의 영향. 대한토목학회 논문집, **22**(2-A): 347-350.
- Glass, G. K., Hassanein, N. M., Buenfeld, N. R., 1997. Neural network modeling of chloride binding, *Magazine of Concrete Research*, **49**(181), pp. 323-335.
- Hobbs, D. W., 1998. *Minimum requirements for durable concrete: carbonation- and chloride-induced corrosion, freeze-thaw attack and chemical attack*, British Cement Association.
- Papadakis, V. G., Roumeliotis, A. P., Fardis, M. N., and Vagenas, C. G., 1996. Mathematical modeling of chloride effect on concrete durability and protection measures. *Concrete repair, rehabilitation and protection*, E & FN Spon, London (UK), pp. 165-174.
- 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.
- Sergi, G., Yu, S. W., and Page, C. L., 1992. Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment. *Magazine of Concrete Research*, **44**(158), pp. 63-69.
- Stewart, M. G., Rosowsky, D. V., 1998. Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion, *ASCE Journal of Infrastructure Systems*, **4**, pp. 146-155.

---

Received December 17, 2002

Accepted March 19, 2003