

# 온도 · 습도분포 및 혼화재를 고려한 염분침투에 관한 연구

## A Study About Chloride Penetration Considering Temperature, Humidity Distribution and Admixtures

최 종 권<sup>\*</sup>      김 기 현<sup>\*\*</sup>      차 수 원<sup>\*\*\*</sup>      장 승 엽<sup>\*\*\*\*</sup>      장 승 필<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Choi, Jong Kwon      Kim, Ki Hyun      Cha, Soo Won      Jang, Seung Yup      Chang, Sung Pil

### ABSTRACT

Chloride penetration is the main reason which causes the deterioration of concrete structures. Chloride penetration of concrete structures due to chemical-physical phenomena can be profitably analyzed by means of model-based simulations. The main purpose of this paper is to analyze chloride penetration considering self-desiccation, convection and admixture(GBFS: granulated blast-furnace slag) effects. Basic governing equations are modified properly to apply these effects to chloride penetration analysis. Temperature and relative humidity data of In-Cheon from Korea Meteorological Administration are used for analyzing chloride penetration.

### 1. 서론

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 염소이온 침투에 의한 철근의 부식이다. 염소이온의 침투는 염소이온의 확산과 수분의 이동에 의한 염소이온의 전달로 이루어진다. 이 때 염소이온의 확산은 온도분포와 습도분포에 영향을 받는다. 특히 수화반응에 의한 열의 발생이나 콘크리트 내부의 수분 손실은 염소이온의 확산계수에 직접적으로 영향을 미치므로 수화반응이 염소이온침투해석에 고려되어야 한다. 콘크리트에서 수화반응이 일어나면 수화과정 중에 수분이 사용되기 때문에 수분의 손실이 일어나 콘크리트 내부의 상대습도가 감소하게 된다. 특히 고강도 콘크리트는 수화에 의한 수분의 손실에 따른 상대습도의 변화가 크기 때문에 염분침투 해석 시에 수화에 의한 수분의 손실을 고려해주어야 한다. 수분손실 뿐만 아니라 수화가 진행되는 동안 콘크리트 내부에서 수화열이 발생하는데 열의 발생이 염분확산계수와 수분확산계수에 영향을 주기 때문에 초기 열전달 문제에 수화열에 대한 고려가 필요하다. 혼화재의 종류와 양에 따라 공극구조가 달라지며 그에 따라 염분과 수분확산의 특성이 영향을 받게 된다. 그러므로 혼화재의 함량에 따라 염소확산계수( $D_c$ )에 대한 보정이 필요하다.

\* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정

\*\* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

\*\*\* 정희원, 울산대학교 건설환경공학부 교수

\*\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\*\*\*\* 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

## 2. 모델링

### 2.1 기본 지배방정식

열전달, 수분전달, 염소이온전달의 기본 지배방정식의 형태는 다음과 같다.

$$C \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla(K \nabla u) + s$$

여기서,  $C$ 는 체적용량,  $u$ 는 상태변수,  $K$ 는 전도계수,  $s$ 는 생성, 소멸 또는 대류를 나타내는 항이다.

### 2.2 열전달 모델

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q$$

여기서,  $\rho c$ 는 콘크리트의 열용량,  $T$ 는 온도,  $k$ 는 콘크리트의 열전달계수,  $q$ 는 수화반응에 의한 열생성률을 나타낸다.

단열온도상승으로 수화반응에 의한 열생성률을 구하는 실험식은 다음과 같다.

$$q_{ad}(t) = c\rho \frac{d\Delta T_{ad}(t)}{dt}, \quad T_{ad} = K(1 - e^{-\alpha t})$$

여기서,  $T_{ad}$ 는 단열온도상승,  $K$ 는 최대온도상승,  $\alpha$ 는 열 발생률,  $t$ 는 시간을 나타낸다.

### 2.3 수분전달 모델

$$\frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial w_e}{\partial h} \left( \frac{\partial h_s}{\partial t} + K \frac{\partial T}{\partial t} \right)$$

여기서,  $\frac{\partial w_e}{\partial h}$ 는 수분용량,  $h$ 는 공극상대습도,  $D_h$ 는 수분확산계수,  $h_s$ 는 자기수축에 의한 수분감소량,  $K$ 는 습도온도계수,  $T$ 는 절대온도를 나타낸다. 이때 수분전달에 대한 온도의 영향은 무시한다.

( $K \frac{\partial T}{\partial t} \approx 0$ , Bazant and Thonguthai, 1978; Akita *et al.*, 1997)

수분용량은 Xi *et al.* (1994a)에 의해 제안된 식을 사용한다.

$$w_e = \frac{CkV_m h}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]}$$

여기서,  $w_e$ 는 단위콘크리트 부피당 증발가능수량(Evaporable water content),  $C$ ,  $k$ ,  $V_m$ 는 온도와 등가 재령에 의해 결정되는 상수들이다.(Xi *et al.*, 1994a)

수분확산계수는 CEB-FIP MC90에서 제시한 식을 사용하였다.

$$D_h = D_{h,ref} \cdot \left[ \alpha_o + \frac{1 - \alpha_o}{1 + [(1 - h)/(1 - h_o)]^n} \right]$$

위 식은 공극상대습도에 의해 수분확산계수가 영향을 받는다는 것을 나타낸다.

여기서,  $D_{h,ref}$ 는  $h = 1$ 인 경우의 최대 수분확산계수,  $h$ 는 콘크리트의 상대습도,  $\alpha_o$ 는 수분확산계수의 최소값과 최대값의 비율( $D_{h,min}/D_{h,max} = 0.05$ ),  $h_o$ 는 수분확산계수가 최대값과 최소값의 중간값을 가질 때의 상대습도(0.80),  $n$ 은 실험결과로부터 얻어내는 상수값으로 6에서 16사이 값의 범위를 갖는다( $n = 15$ ).

수화과정에 의한 수분량의 변화는 다음의 식을 이용한다.(Cha, Soo-won, 1999)

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} = \frac{\partial h_s}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = (h_{s,max} - 1) \frac{s}{\alpha_{max}} \left( \frac{\alpha}{\alpha_{max}} \right)^{s-1} \frac{\partial \alpha}{\partial t_{eq}} \frac{\partial t_{eq}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t_{eq}} = \alpha \frac{\lambda \kappa}{t + t_{eq}} \left( \ln \left( 1 + \frac{t_{eq}}{t} \right) \right)^{-\kappa-1}, \quad \frac{\partial t_{eq}}{\partial t} = \beta_T \beta_w / \beta_w$$

여기서,  $h_s$ 는 자기수축에 의한 수분손실량,  $\alpha$ 는 수화도,  $h_{s,max}$ 는 최대수화도에서 자기수축에 의한 상대습도,  $s$ 는 3.0~6.0사이의 값으로  $w/c$ 에 비례한다.  $t_{eq}$ 는 콘크리트의 등가재령,  $\beta_T, \beta_w/c, \beta_w$ 는 각각 양생온도, 물-시멘트비, 수분분포가 수화반응에 미치는 영향을 고려한 계수이다.

#### 2.4 염소이온전달 모델

염소이온침투모델은 콘크리트 내부의 염소이온확산과 수분이동에 의한 대류항을 모두 고려하였으며, 염소이온의 구속효과도 고려한 다음과 같은 지배방정식을 사용한다.

$$\left( 1 + \frac{1}{w_c} \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( C_f \cdot D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( C_f \cdot D_h \frac{\partial h}{\partial y} \right)$$

여기서,  $w_c$ 는 단위콘크리트 부피당 증발가능수량(Evaporable water content),  $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ 는 염소구속능 (Chloride binding capacity),  $C_b$ 는 고정염소이온의 농도,  $C_f$ 는 자유염소이온의 농도,  $D_c$ 는 염소이온 확산계수,  $D_h$ 는 수분확산계수,  $h$ 는 공극상대습도를 나타낸다.

염소구속능은 Freundlich isotherm을 사용하여 나타낸다.

$$C_b = \alpha C_f^\beta, \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \alpha \beta C_f^{\beta-1}$$

염소이온의 확산계수는 Saetta *et al.*(1993)에서 제안된 식을 변형시켜 사용하였다.

$$D_c = D_{c,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(t) \cdot f_3(h)$$

수분확산계수와 비슷하게 염소이온의 확산계수도 온도, 재령, 상대습도에 의해 영향을 받는다. 그리고 각각을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$f_1(T) = \exp \left[ \frac{U}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad f_2(t) = \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m, \quad f_3(h) = \left[ 1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)^4} \right]^{-1}$$

여기서,  $t_{ref}$ 는 염소이온 확산계수를 측정하는 시점의 시간,  $t$ 는 염분환경 노출시간,  $m$ 은 시간의존상수를 나타낸다.

표 1 배합에 따른 염소이온 확산계수

자료 출처	재료	w/c	$D_c(m^2/s)$
McGrath and Hooton(1997)	OPC concrete	0.4	$6.30 \times 10^{-12}$
	OPC + 8%GBFS concrete		$2.25 \times 10^{-12}$

#### 3. 해석예제

온도분포와 상대습도 분포의 입력값으로 기상청 홈페이지에서 구한 인천지역 월평균 값을 사용하였다. 프로그램에서의 적용성을 위해 온도와 습도의 최대, 최소값인 24.9°C, -2.4°C 그리고 63.8%, 82.4%를 기준으로 사인함수로 근사하였다.

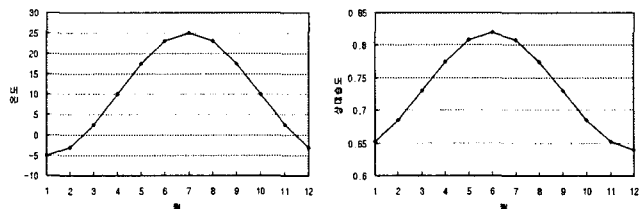


그림 1 인천지역의 온도 및 습도 분포

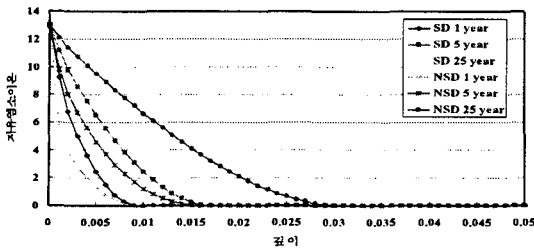


그림 2 자기수축에 의한 염소이온침투 비교

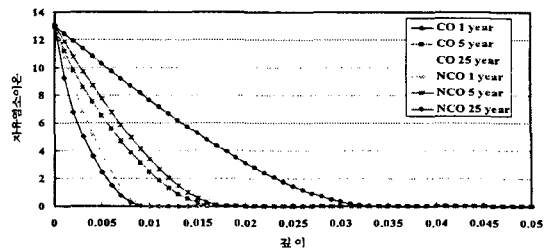


그림 3 대류에 의한 염소이온침투 비교

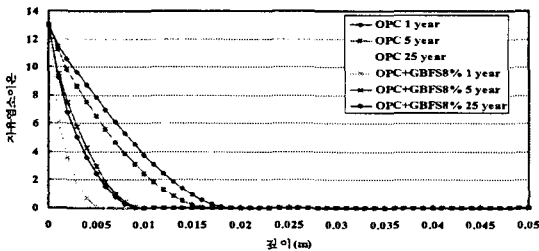


그림 4 혼화재에 따른 염소이온침투 비교

SD: 자기수축고려함  
 NSD: 자기수축고려안함  
 CO: 대류에 의한 염소이온확산고려함  
 NCO: 대류에 의한 염소이온확산고려안함

#### 4. 결과 및 향후 개선방향

- 1) 본 연구에서는 수화반응에 의한 발열과 자기수축에 의한 수분손실을 고려하여 염분침투 해석을 수행하였다. 이를 통해 염분침투 해석에서 수화반응에 의한 발열과 자기수축에 의한 수분손실량의 영향에 의해 염소이온 침투가 더 잘 일어난다는 사실을 알 수 있다.
- 2) 예제에서는 외부의 상대습도가 콘크리트 내부보다 낮아서 대류에 의해 염소이온침투가 더 적게 일어났다.
- 3) 혼화재의 종류와 함량에 따라 달라지는 염소이온의 확산계수의 차이를 고려해 볼 때 혼화재를 첨가하는 것이 염소이온침투를 방지하는데 효과적이다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 건설핵심기술연구개발사업 고성능·다기능 콘크리트 핵심 및 활용기술 연구과제의 지원에 의한 것이므로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Beatriz Martín-Pérez (1999) "Service Life Modeling of R.C. Highway Structures Exposed to Chlorides", PhD dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of Toronto
2. Cha, Soo won(1999) "Modeling of Hydration Process and Analysis of Thermal and Hygral Stresses in Hardening concrete", PhD dissertation, Dept. of Civil Urban Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
3. Jang Seung-yup(2003), "Modeling of Chloride Transport and Carbonation in concrete and Prediction of Service Life of Concrete Structures Considering Corrosion of Steel Reinforcements", PhD dissertation, Dept. of Civil Urban Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
4. CEB-FIP MODEL CODE 1990
5. Xi, Y., Bazant, Z., and Jennings, H.(1994a). "Moisture diffusion in cementitious materials: Adsorption isotherms." *J. Ad. Cementitious Mater.*, 1, 248 - 257.