

# 환경조건을 고려한 염소이온 침투해석 프로그램 개발

## Development of Chloride Penetration Analysis Program Considering Environmental Conditions

김기현\* · 장승엽\*\* · 차수원\*\*\* · 장승필\*\*\*\*

Kim Ki Hyun · Jang Seung Yup · Cha Soo Won · Chang Sung Pil

### Abstract

Developed is a chloride penetration analysis program in which changes of environmental conditions such as temperature, humidity and external chloride concentration, and the diffusion, convection and binding of chlorides are considered. In order to consider the changes of environmental conditions, analyses for temperature and moisture distribution are implemented simultaneously, and variation of diffusion coefficients due to temperature, humidity and age is also considered. By comparing the calculated total chloride contents with some experimental data, it has been confirmed that the proposed analysis program can trace measured chloride distribution well. Also, through some example analyses, the mechanism of accumulation of chlorides at near surface and acceleration of corrosion of steel reinforcement in case that the moisture distribution changes according to repeated drying and wetting cycles have been verified.

Keywords : chloride penetration, environmental conditions, diffusion, convection, binding of chlorides

### 요 지

본 논문에서는 온도 및 습도 등 환경조건의 변화와 염소이온의 확산, 이송 및 구속 현상을 고려하는 콘크리트 내부로의 염소이온 침투해석 프로그램을 개발하였다. 외부 환경조건의 변화를 고려하기 위하여 온도와 습도분포 해석을 동시에 수행할 수 있도록 하고, 확산계수의 온도, 습도 및 재령에 대한 변동성을 반영하였다. 실측데이터와의 비교를 통해 개발된 프로그램이 실측결과와 잘 일치함을 검증하였으며, 건습의 반복 등 외부 환경조건의 변화에 따라 콘크리트 내부 수분량이 변화하는 경우 염소이온이 표면부에 축적되는 현상의 기본 메커니즘과 그에 따른 철근부식 발생의 촉진과정을 예제해석을 통해 규명하였다.

핵심용어 : 염소이온 침투, 환경조건, 염소이온 확산, 이송, 염소이온 구속

### 1. 서 론

건전한 콘크리트는 알칼리도가 매우 높고 철근 표면에 치밀한 부동태 피막을 형성하여 철근을 부식으로부터 보호한다(Mehta 등, 2006). 그러나 염소이온이 존재하면 철의 부동태 피막이 파괴되거나 부동태화가 방해된다. 철의 부동태 피막을 파괴하는 여러 유해성분 중 염소이온은 가장 그 작용이 강력하며 콘크리트 중에 혼입될 수 있는 기회가 많으므로 철근부식에 대하여 가장 유해한 이온이다. 따라서 염해에 노출된 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측하고 적절한 시기에 보수 및 보강을 수행하기 위해서는 염소이온의 침투를 정확히 평가하는 것이 중요하다.

콘크리트에서의 염소이온의 확산속도는 콘크리트 내부의

온도분포와 습도분포에 크게 영향을 받으며, 또한 공극수 속의 수분이 이동하면서 그 수분 속에 녹아 있는 염소이온도 함께 이동하기 때문에(이송현상) 해상교각과 같이 건습반복의 영향을 받는 콘크리트 구조물에서는 건습의 반복에 따라 콘크리트 내부에 해수에 침지된 경우보다 더 많은 염소이온이 축적될 수 있다(Neville, 1995). 실제로 해수에 항상 잠겨있는 수중부 콘크리트보다 건습반복 영역, 즉 간만부 콘크리트의 노출 조건이 훨씬 극심하다고 알려져 있다(Tang, 1996). 따라서 콘크리트 내부로 침투하는 염소이온의 양을 예측하기 위해서는 이러한 온도, 습도, 특히 건습반복에 의한 환경조건의 변화를 정확히 반영할 수 있어야 한다. 기존 문헌에서도 이러한 건습작용을 고려하기 위한 다양한 모델이 제시된 바 있으나(Saetta 등, 1993; Martín-Pérez, 1999;

\*정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (E-mail : login738@snu.ac.kr)

\*\*정회원 · 한국철도기술연구원 선임연구원 (E-mail : syjang@krii.re.kr)

\*\*\*정회원 · 교신저자 · 울산대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : chasw@ulsan.ac.kr)

\*\*\*\*참여회원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : spchang@snu.ac.kr)

Sandberg, 1998), 각기 지배방정식의 구성이나 해를 구하는 방법이 달라서 혼동을 줄 여지가 있다. 이에 본 논문에서는 콘크리트 내부에서의 염소이온 이동, 온도 및 습도분포의 메커니즘을 재정립하여 온도와 습도 등 외부 환경조건 변화에 의한 영향을 고려할 수 있는 염소이온 침투해석 프로그램을 개발하였고, 앞서 설명한 건습반복 작용에 의한 염소이온의 축적 현상의 메커니즘을 개발된 프로그램을 이용한 해석예제를 통해 규명하였다.

## 2. 온도, 습도 및 염소이온 분포해석

### 2.1 모델의 구성

그림 1은 염소이온의 침투에 영향을 주는 영향요소를 정리하여 나타낸 것이다. 전술했듯이 염소이온의 확산과 이송 현상은 온도와 습도에 큰 영향을 받으므로 그 영향이 포함될 수 있도록 염소이온 침투와 함께 온도와 습도 분포도 동시에 예측할 수 있어야 하며, 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 수분 확산계수, 염소이온 확산계수가 변화하므로 오랜 시간에 걸쳐 발생하는 염소이온 침투를 평가하기 위해서는 재령에 따른 물성변화를 고려할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해 여기서는 염소이온, 온도, 습도분포 해석을 포함하고 온도, 습도 및 재령에 대한 확산계수의 변동성을 고려할 수 있도록 모델을 구성하였다.

### 2.2 염소이온 침투해석모델

먼저 염소이온의 확산에 의한 유동률은 다음과 같이 표현된다.

$$J_{chloride} = -D_c \frac{\partial C_f}{\partial x} \quad (1)$$

여기서,  $J_{chloride}$ 는 염소이온 유동률( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ),  $D_c$ 는 염소이온 유효 확산계수( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $C_f$ 는 공극수의 자유 염소이온 농도( $\text{kg}/\text{m}^3$ )이다.

한편 총 염소이온량  $C_t$ 는 단위 부피의 콘크리트 내에 존재하는 염소이온의 총량( $\text{kg}/\text{m}^3$ )으로, 구속 염소이온의 양( $C_b$ )과 자유 염소이온의 양( $w_e C_f$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$C_t = C_b + w_e C_f \quad (2)$$

여기서,  $w_e$ 는 콘크리트 단위부피 내에 존재하는 증발가능수량의 부피( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )이다. 구속 염소이온량과 자유 염소이온 농도도 시간에 따라 변화하고, 콘크리트 표면에서의 수분 증발과 유입, 콘크리트 내부에서의 수분이동 등에 의하여 콘크리트에 존재하는 물의 부피 또한 시간에 따라 변화하므로 따라서 총 염소이온량의 시간변화률은 다음과 같이 표현된다.

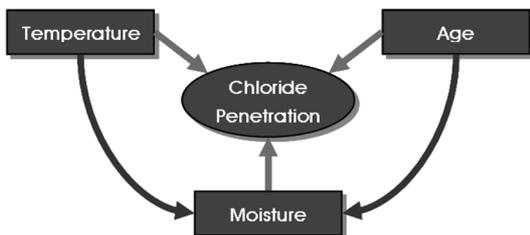


그림 1. 염소이온 침투의 영향요소

$$\frac{\partial C_b}{\partial t} + w_b \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial w_e}{\partial t} = \left( w_e + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial w_e}{\partial t} \quad (3)$$

많은 연구자들이 수분량의 시간적 변화에 따른 자유 염소이온 농도의 변화를 나타내는 항 즉,  $C_f(\partial w_e / \partial t)$ 를 고려하지 않고 있는데(Martín-Pérez, 1999, 2000; Sandberg, 1998, 1999; Sergi, 1992), 본 연구에서는 이 항을 고려하여 이것이 건습반복 작용에 어떤 영향을 미치고 있는지를 검토하였다.

콘크리트 내부가 포화되지 않은 경우에는 공극수에 녹아 있는 염소이온은 공극수의 이동에 의한 이송에 의해서도 전달된다. 염소이온의 이송에 의한 유동률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{chloride}' = C_f J_{moisture} \quad (4)$$

확산 및 이송에 의한 염소이온 유동률을 질량보존 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 염소이온 전달 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\frac{\partial J_t}{\partial x} = -\frac{\partial J_{chloride}}{\partial x} - \frac{\partial J_{chloride}'}{\partial x} \quad (5)$$

$$\left( w_e + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_c \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (C_f J_{moisture}) \quad (6)$$

여기서,  $\partial C_b / \partial C_f$ 는 콘크리트의 구속능(binding capacity)이다. 염소이온의 구속능은 구속 염소이온과 자유 염소이온의 평형농도와의 관계를 나타내는 구속등온선으로부터 구할 수 있다. 구속등온선을 나타내는 모형에는 선형 관계식과 비선형 관계식이 있는데, 일반적으로 염소이온 침투에 적합한 모델은 Langmuir 등온선과 Freundlich 등온선이 있다. Tang(1996)의 연구에 따르면 Langmuir 등온식은 자유 염소이온 농도가 0.05 mol/L 이하에서 실험결과와 잘 일치하는 반면 Freundlich 등온식은 0.01~1 mol/L의 범위에서 실험결과와 일치한다. 해양의 평균 염분량은 35% 정도이며 염소이온의 농도는 19.4‰ 즉, 0.56 mol/L에 해당하는 값이므로 해양환경 콘크리트의 염소이온 침투 문제에서는 Freundlich 등온식의 사용이 더 적절하다고 판단된다. 식(7)의 Freundlich 등온식을 적용하면 콘크리트의 구속능은 식(8)로 표현된다.

$$C_b = a C_f^b \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_b}{\partial C_f} = a b C_f^{b-1} \quad (8)$$

여기서,  $a$ ,  $b$ 값은 콘크리트의 종류에 따라 결정되는 값으로, Tang(1996)에 의하면  $a = W_{hyd} f_b$ 으로 콘크리트 단위 부피에 대한 수화물의 건조중량  $W_{hyd}$ 와 상수  $f_b$ 로 나타낼 수 있다.

### 2.3 수분분포 해석모델

콘크리트 내부의 수분분포 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 콘크리트 내부의 상대습도를 상태변수로 할 때 수분 유동률은 다음과 같다.

$$J_{moisture} = -D_h \frac{\partial h}{\partial x} \quad (9)$$

여기서,  $J_{moisture}$ 은 수분 유동률( $\text{m}/\text{s}$ ),  $D_h$ 는 수분 확산계수( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $h$ 는 콘크리트 내부 상대습도이다. 그리고 위 식에 대해 질량보존의 법칙을 적용하면 수분전달의 지배방정식을

유도할 수 있다. 여기서 염소이온 침투현상이 장기 재령에서 중요한 문제가 되므로 수화반응에 의한 자기건조(self-desiccation)는 고려하지 않았다.

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial w_e}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial J_{moisture}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (10)$$

콘크리트 내의 상대습도와 수분량의 관계를 나타내는 모델로 수정 BET 모델인 BSB 모델(Xi 등, 1994)은 0.05-1.0의 상대습도 범위에 적용할 수 있으므로 본 논문에서는 이 모델을 적용하였다.

$$w_e = \frac{CkV_m h}{(1-kh)[1+(C-1)kh]} \quad (11)$$

따라서, 수분의 용량을 나타내는  $\partial w_e / \partial h$  는 증발가능수량  $w_e$ 를 상대습도  $h$ 에 대해 미분하여 구할 수 있다.

#### 2.4 온도분포 해석모델

콘크리트에서 열은 온도기울기에 의한 전도로 인하여 이동하므로 열전도 유효율은 다음과 같이 나타낸다.

$$J_{heat} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (12)$$

여기서,  $J_{heat}$  는 열유속(W/m<sup>2</sup>),  $k$ 는 열전도율(W/m·K),  $T$ 는 절대온도(K)이다. 수화반응에 의한 발열량을 고려하지 않는 경우 에너지 보존의 법칙에 따라 열전도 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (13)$$

여기서,  $\rho$ 는 콘크리트의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $c$ 는 콘크리트의 비열(J/K)이다.

#### 2.5 경계조건

콘크리트 경계면에서의 염소이온 전달량은 외부 환경의 자유 염소이온 농도와 콘크리트 내부의 자유 염소이온 농도의 차이에 비례한다.

$$J_{chloride}^s = \beta_c(C_s - C_a) + C_a \beta_h(h_s - h_a) \quad (14)$$

여기서,  $J_{chloride}^s$  는 표면에서의 염소이온 유통률(kg/m<sup>2</sup>·s),  $\beta_c$ 와  $\beta_h$ 는 각각 표면에서의 염소이온과 수분의 전달계수(m/s)이며,  $C_s$ 는 콘크리트 표면의 자유 염소이온 농도(kg/m<sup>3</sup>),  $C_a$ 는 외부 염소이온 농도(kg/m<sup>3</sup>)이다.

콘크리트 경계에서의 수분과 열의 전달도 아래와 같이 각각 습도차와 온도차에 의해 표현된다.

$$J_{moisture}^s = \beta_h(h_s - h_a) \quad (15)$$

$$J_{heat}^s = \beta_T(T_s - T_a) \quad (16)$$

여기서,  $J_{moisture}^s$  는 표면에서의 수분 유통률(m/s),  $h_s$ 는 콘크리트 표면 상대습도,  $h_a$ 는 대기 상대습도를 나타내며,  $J_{heat}^s$  는 표면에서의 대류 열유속(W/m<sup>2</sup>),  $\beta_T$ 는 대류 열전달계수(W/m<sup>2</sup>·K),  $T_s$ 는 콘크리트 표면 온도(K),  $T_a$ 는 대기 온도(K)이다.

### 3. 확산계수

콘크리트의 염소이온 확산계수는 콘크리트의 내부 구조적 특성, 온도, 시간, 상대습도, 이온 농도 등 다양한 인자에 의해 결정된다. 특히 온도, 습도 및 재령의 영향이 중요하다. 이제 가지 요인을 고려하면 확산계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Saetta 등, 1993).

$$D_c = D_{c,ref} \cdot g_1(T) \cdot g_2(h) \cdot g_3(t) \quad (17)$$

여기서,  $D_{c,ref}$ 는 콘크리트의 기준 염소이온 확산계수,  $g_1(T)$ ,  $g_2(h)$ ,  $g_3(t)$ 는 각각 온도( $T$ ), 공극 상대습도( $h$ ), 노출 시간( $t$ )에 대한 영향계수이며, Saetta 등(1993)에 의하면 각 영향함수들은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_1(T) = \exp \left[ \frac{U_T}{R} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (18)$$

$$g_2(h) = \frac{1}{1 + \left( \frac{1-h}{1-h_c} \right)^4} \quad (19)$$

$$g_3(t) = \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (20)$$

여기서,  $U_T$ 는 이온 확산 활성화 에너지(J/mol),  $R$ 는 기체상수(8.314 J/mol·K)이고,  $T_{ref}$ 는 기준 염소이온 확산계수를 측정된 시점의 온도(K)이다. 또,  $h_c$ 는 임계 상대습도이고,  $t_{ref}$ 는 기준 염소이온 확산계수를 측정된 시점의 시간,  $t$ 는 재령(s),  $m$ 은 염소이온 확산계수의 시간의존성을 나타내는 상수( $0 \leq m < 1$ )이다.

확산 활성화 에너지  $U_T$ 와 시간의존상수  $m$ 에 대해서는 몇몇 연구자들이 실험을 통해 표 1, 2와 같이 대표적인 값을

표 1. 물시멘트비 및 시멘트 종류에 따른 확산 활성화 에너지

w/c	$U_T/R$ (-)	
	OPC	Pozzolana cement
0.4	5027.7±481.1	-
0.5	5364.5±517.2	502.77
0.6	3848.93±288.7	-

표 2. 염소이온 확산계수의 시간의존상수

References	PC			Remark
	PC	PC + FA	PC + SG	
Life-365 manual (2001)	0.2	0.2+0.4(%FA/50+%SG/70)		$t_R=28$ days FA≤50% SG≤70%
Thomas and Bamforth (1999)	0.1	0.7	1.2	$t_R=28$ days
Bamforth (1988)	0.264	0.699	0.621	$t_R=20$ years
Mangat and Molloy (1994)	2.5(w/c)-0.6	-	1.23	$t_R=1$ year

Note) PC : Portland cement, FA : fly ash, SG : slag

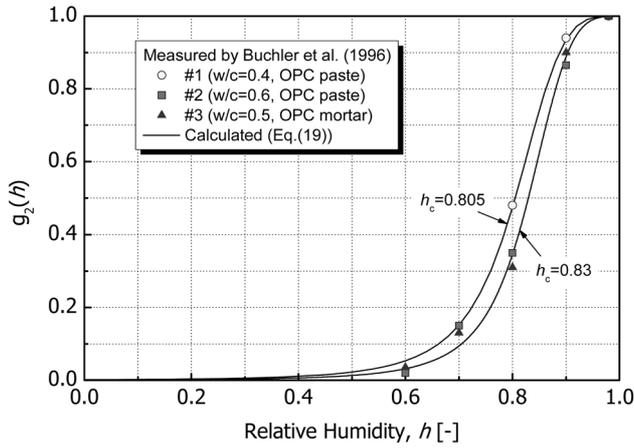


그림 2. 상대습도에 따른 염소이온 확산계수

제시하고 있다. 그러나, 이것은 매우 제한적인 양의 데이터이고, 연구자마다 다소 차이가 있기 때문에 이 값들의 결정은 신중을 기해야 한다.

한편 대부분의 확산계수 측정방법이 콘크리트가 포화된 상태에서 가능하기 때문에 염소이온 확산계수에 대한 상대습도의 영향에 관한 연구결과는 매우 드물다. 거의 유일하게 Büchler 등(1996)만이 물-시멘트비 0.3~0.5의 시멘트 페이스트 또는 모르타르에 대한 상대습도별 확산계수 측정결과를 그림 2와 같이 제시하고 있다. 그림에서 식(19)를 곡선피팅하면 임계 상대습도  $h_c$ 는 대략 0.82의 값을 나타냄을 알 수 있다.

한편, 수분 확산계수  $D_h$  또한 공극 상대습도, 온도, 재령 등에 의해 영향을 받는다. 이러한 영향을 나타내기 위해 본 연구에서는 아래의 Bažant-Thonguthai(1978) 모델을 적용하였다.

$$D_h = D_{h,ref} \cdot f_1(T) \cdot f_2(h) \cdot f_3(t) \quad (21)$$

여기서,  $D_{h,ref}$ 는 콘크리트의 기준 수분 확산계수,  $f_1(T)$ ,  $f_2(h)$ ,  $f_3(t)$ 는 각각 온도, 공극 상대습도, 재령에 대한 영향계수이며, 각 영향함수들은 다음과 같다.

$$f_1(T) = \exp\left[\frac{U_h}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (22)$$

$$f_2(h) = \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c}\right)^m} \quad (23)$$

$$f_3(t) = 0.3 + \sqrt{\frac{13}{t}} \quad (24)$$

여기서, 상수  $\alpha_0=0.05$ , 수분에 대한 임계 상대습도  $h_c=0.75$  이고,  $m$ 은 실험 결과로부터 얻어내는 상수(6~16사이의 값),  $U_h$ 는 수분 전달 과정에서의 활성화 에너지(J/mol),  $T_{ref}$ 는 기준 수분 확산계수를 측정할 때의 온도(편의를 위해 보통은 염소이온 확산계수 기준 온도와 동일하게 설정함),  $t$ 는 재령(day)을 나타낸다.

#### 4. 염소이온 침투해석 유한요소 프로그램

##### 4.1 개요

콘크리트로의 염소이온 침투해석을 위하여 온도, 습도, 자유 염소이온 농도를 상태변수로 하는 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 유한요소 모형을 위해 4절점 사각형요소

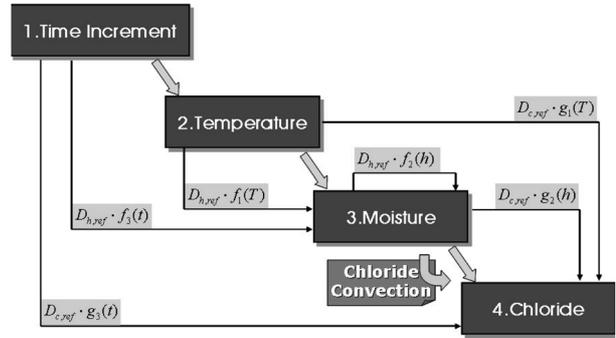


그림 3. 염소이온 농도 해석 과정

를 적용하였고, Galerkin 방법으로 정식화하였으며 유한차분으로 시간적분을 수행하였다. 해석 과정에 필요한 BSB 모델, 비선형 염소이온 구속능, 외부 온도와 외부 습도의 변화, 전달계수에 대한 온도, 습도, 재령의 영향함수들을 부함수로 작성하여 프로그램에 포함시켰다.

#### 4.2 해석방법

개발된 유한요소 프로그램은 온도분포 지배방정식(식(13)), 습도분포 지배방정식(식(10)) 및 자유 염소이온 농도 분포의 지배방정식(식(6))을 동시에 푼다. 결과물로 콘크리트 깊이에 따른 온도, 습도, 자유 염소이온 농도, 총 염소이온량, 그리고 철근 위치와 같은 특정한 위치에서의 시간에 따른 온도, 습도, 자유 염소이온 농도, 총 염소이온량을 계산한다.

염소이온 전달계수와 수분 전달계수는 각각 식(17)과 식(21)을 사용하였으며, 여기서 온도, 습도, 재령의 영향계수는 식(18)~(20), 식(22)~(24)를 각각 사용하였다. 계산된 자유 염소이온 농도로부터 식(2)를 이용하여 총 염소이온량을 구하였다. 그림 3은 염소이온 농도의 해석 과정을 도시한 것이다.

#### 5. 예제해석 및 고찰

##### 5.1 예제 1 : 수분량 변화와 이송항의 영향 검토

먼저 염소이온 해석에 있어서 수분량의 변화와 이에 따른 이송항의 영향을 살펴보기 위해 다음 그림 4와 같이 수분의 분포가 달라질 때 수분량의 변화와 이송항을 모두 고려하는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 각각 염소이온 농도변화를 예측하였다(표 3 참조). 이 때 수분만 벽체를 통해 유출되고

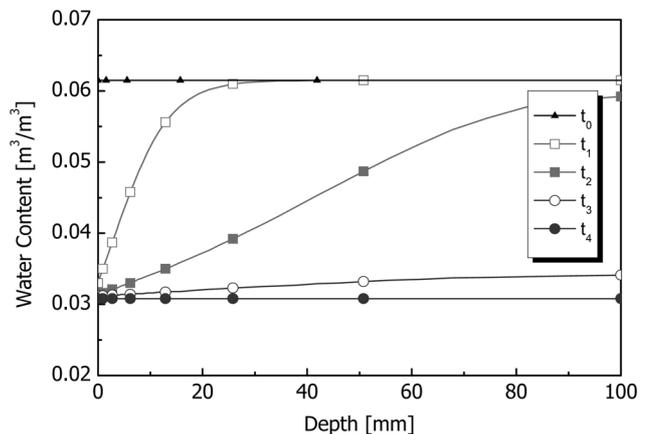
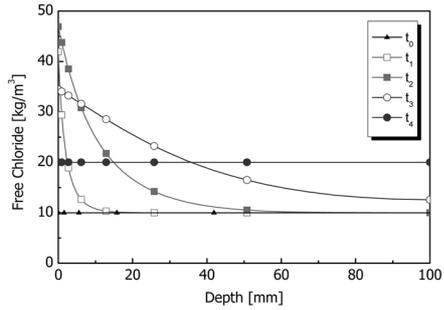


그림 4. 시간 경과에 따른 벽체 수분량 분포

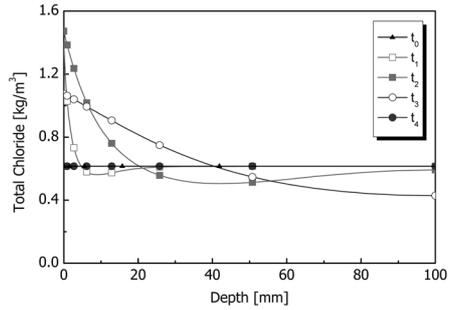
표 3. 염소이온 전달방정식의 수분변화에 의한 농도 변화항 및 이송항 고려여부

Variable	$C_f(\partial w_e / \partial t)$	$-\nabla \cdot (C_f J_{moisture})$	Corresponding governing equation
Case-A	C	C	$(w_e + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}) \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_c \frac{\partial C_f}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (C_f J_{moisture})$
Case-B	N	C	$(w_e + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_c \frac{\partial C_f}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x} (C_f J_{moisture})$
Case-C	C	N	$(w_e + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}) \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_c \frac{\partial C_f}{\partial x})$
Case-D	N	N	$(w_e + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_c \frac{\partial C_f}{\partial x})$

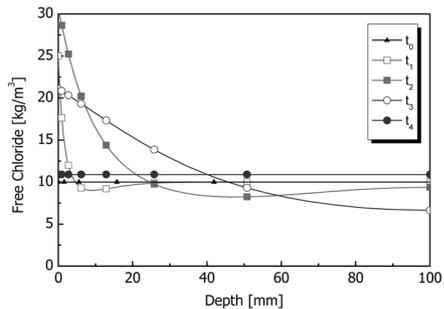
(C : Considered, N : Not considered)



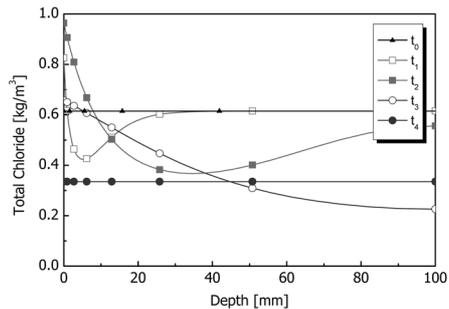
(a) 자유 염소이온 농도(Case-A)



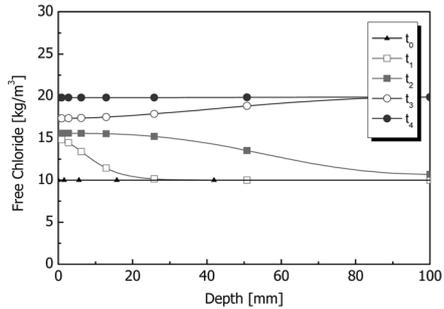
(b) 총 염소이온량(Case-A)



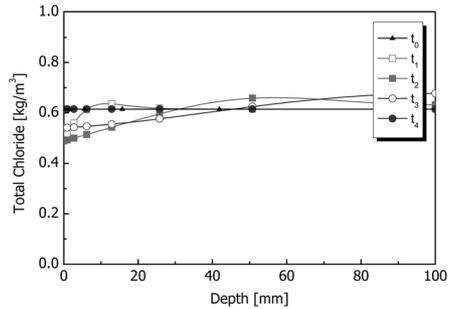
(c) 자유 염소이온 농도(Case-B)



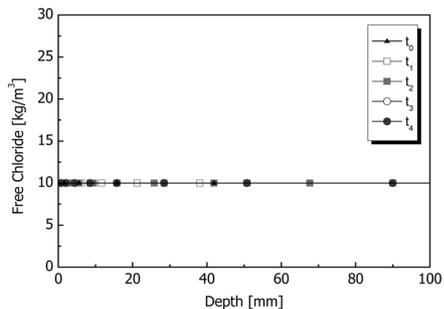
(d) 총 염소이온량(Case-B)



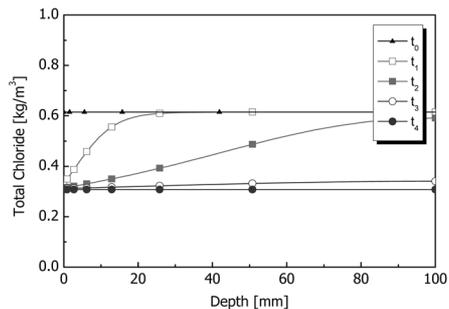
(e) 자유 염소이온 농도(Case-C)



(f) 총 염소이온량(Case-C)



(g) 자유 염소이온 농도(Case-D)



(h) 총 염소이온량(Case-D)

그림 5. 수분량의 변화와 이송항의 영향에 따른 염소이온 분포 비교

염소이온은 유출되지 않으며, 비교의 편의를 위해 염소이온 구속은 없는 것으로 가정하였다.

시간  $t_0$ 의 초기상태에서 수분과 염소이온이 벽체 전체에 걸쳐 균일하게 분포되어 있다. 수분량, 자유염소이온량, 총염소이온량의 초기값은 각각  $0.0615 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ,  $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $0.615 \text{ kg}/\text{m}^3$ 이라고 가정하였다.  $t_1, t_2, t_3, t_4$ 는 각각 시간 1일, 30일, 150일, 600일이다. 그림 4는 일정 두께를 갖는 벽체의 한쪽면으로 수분이 빠져나가는 경우로, 최종적으로 전체 수분의 양이 절반으로 감소하는 경우이다. 이렇게 수분의 양이 절반으로 감소하면 자유 염소이온 농도는 초기값( $10 \text{ kg}/\text{m}^3$ )의 두 배로 증가( $20 \text{ kg}/\text{m}^3$ )되어야 하고, 외부와의 염소이온 유출입이 없으므로 총 염소이온량은 초기값( $0.615 \text{ kg}/\text{m}^3$ )과 같아야 한다. 이 밖에 염소이온 농도분포의 특징을 요약하면 다음과 같다.

(a) 수분 증발 초반부에, 수분량 감소에 의해 표면에서 자유 염소이온 농도가 증가되고 수분이 표면부로 이동하면서 이송에 의해 인근의 염소이온이 이동하므로 표면에서 자유 염소이온 농도는  $20 \text{ kg}/\text{m}^3$  보다 커진다.

(b) 수분이 최종값에 이를 때까지 자유 염소이온 농도구배는 항상 (+)라야 한다. 즉 표면부의 농도가 콘크리트 내부보다 항상 커야 한다.

(c) 전 시간에 걸쳐 자유 염소이온 농도는  $10 \text{ kg}/\text{m}^3$  보다 작아질 수 없다.

(d) 수분 증발 초반부에 이송에 의해 인근의 염소이온이 표면으로 옮겨 오므로, 총 염소이온량이 표면부에 비해 작고,  $0.615 \text{ kg}/\text{m}^3$  보다 작은 구간이 존재한다.

(e) 염소이온이 외부로 유출되지 않으므로 각 시간단계에서 벽체 내부에 존재하는 총 염소이온량의 합은 항상 일정

하다. 즉, 총 염소이온량 곡선 아래 면적은 항상 동일하다.

각 Case별 해석결과를 그림 5에 나타냈다. 위의 현상 (a)~(e)를 모두 나타내는 것은 Case-A(그림 5-a, b)이다.

반면 Case-B(그림 5-c, d)는 조건 (b), (c), (e)를 만족하지 못한다. 수분량 감소에 따른 자유 염소이온 농도의 증가가 고려되지 않아 총 염소이온량이 계속 감소하게 되므로 총 염소이온량 곡선 아래 면적이 점차 작아진다.

또, Case-C(그림 5-e, f)는 조건 (a), (b), (d)를 만족하지 못한다. 수분 증발 초기에 이송에 의해 염소이온이 표면부로 이동되는 현상이 고려되지 않아 자유 염소이온 농도가 작고, 확산에 의해서만 염소이온이 이동하므로 벽체 안쪽 즉, 오른쪽의 총 염소이온량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Case-D(그림 5-g, h)는 조건 (a), (b), (d), (e)를 만족하지 못한다. 수분 감소와 이송을 모두 고려하지 않으므로 자유 염소이온의 변화가 전혀 없고, 결국 총 염소이온량은 수분량 변화와 닮은꼴로 감소하고 있다.

이상 살펴본 바와 같이 수분량의 변화와 이에 따른 이송량의 영향이 고려되어야만 건조기에서의 자유염소이온농도의 변화에 이에 따른 총 염소이온의 재분배 현상이 설명될 수 있음을 알 수 있다.

#### 5.2 예제 2 : 실측데이터와의 비교를 통한 해석결과의 검증

다음으로 해석결과의 검증을 위해 온도, 습도, 염소이온 농도가 일정한 경우와 온도, 염소이온 농도가 변화하는 경우에 대하여 염수에 침지한 콘크리트 시편에서 얻은 깊이별 총 염소이온량 실측데이터와 개발된 유한요소 프로그램의 해석 결과를 비교하였다.

표 4. 실험 조건 및 유한요소 해석 프로그램의 입력값

Item	Unit	오병환 등(2001)	Nilsson 등(1997)
<b>Mixture property</b>			
Cement content	$\text{kg}/\text{m}^3$	405 (Type 5)	420
w/c ratio	-	0.42	0.44
<b>Environmental conditions</b>			
	$^{\circ}\text{C}$		
Chloride concentration	$\text{g}/\text{L}$	30.33 (constant, 5% NaCl)	10~18 (sinusoidal)
Temperature	$^{\circ}\text{C}$	20 (constant)	2~20 (sinusoidal)
Humidity	-	1	1
Exposure time	day	210	721
<b>Material property</b>			
<b>For temperature analysis</b>			
Concrete density	$\text{kg}/\text{m}^3$	2269	2000
Specific heat	$\text{kcal}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$	0.23	0.23
Conductivity	$\text{kcal}/\text{mhr } ^{\circ}\text{C}$	1.2	1.2
<b>For humidity analysis</b>			
$D_{h,ref}$	$\text{m}^2/\text{sec}$		$1.00 \times 10^{-10}$
<b>For chloride analysis</b>			
$a$ for binding isotherm	-	1.19	3.57
$b$ for binding isotherm	-	0.48	0.38
Exponent for age-dependent diffusion coefficient	-	0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.3
$D_{c,ref}$	$\text{m}^2/\text{sec}$	$6.275 \times 10^{-12}$	$7.24 \times 10^{-12}$

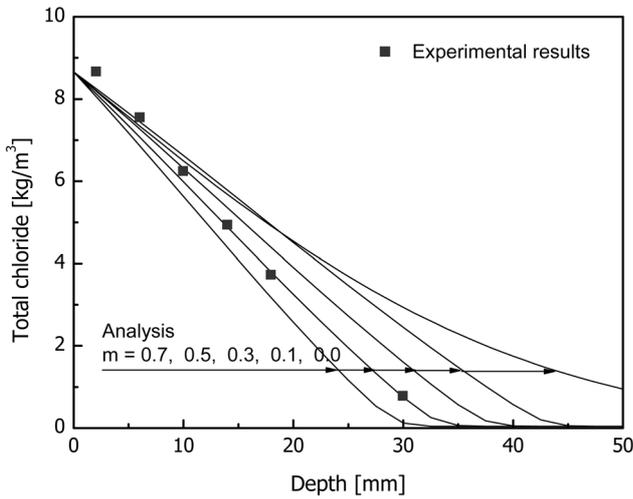


그림 6. 해석결과와 실측데이터와의 비교(일정 온도, 완전 침지조건)

**Case 1: 원전격납구조물 콘크리트(5종 시멘트)의 실내시험 데이터**

오병환 등(2001)은 원전구조물의 열화모델 개발에 관한 연구에서 5종 시멘트를 사용한 물-시멘트비 42%의 콘크리트 시편을 5% NaCl 염수에 침지시켜 염소이온이 콘크리트 내부로 침투하게 한 다음 일정시간 경과 후, KS F 2714 및 KS F 2715에 따라 깊이별 수용성 염화물량과 산-가용성 염화물량을 측정하였다. 그림 6은 실측데이터와 유한요소 해석 결과를 비교한 것이며, 표 4는 실험조건과 유한요소 해석을 위한 입력값을 나타낸 것이다. 염소이온 확산계수는 CTH 방법(Tang, 1996)으로 측정된 값을 기초로 유효 확산계수로 환산된 값이며, 일정 농도의 염수에 시편을 침지하여 콘크리트 내부가 포화된 상태로 가정할 수 있으므로 수분의 이동은 일어나지 않고 수분 전달계수의 값은 해석에 영향을 미치지 않는다. 온도는 일정한 것으로 가정했고, 재령에 따른 확산계수의 감소를 고려하기 위해 시간의존상수 값을 0~0.7 까지 변화시켜 해석하였다. 그림에서 알 수 있듯이  $m=0.5$ 일 때 실험결과와 잘 일치한다. 즉 시간의존상수  $m$ 의 산정이 해석 결과의 신뢰성에 큰 영향을 준다고 볼 수 있다.

**Case 2: 스웨덴, 덴마크 남부의 해양환경 노출시험 데이터**

Nilsson 등(1997)은 온도 및 외부 염소이온 농도가 변화하는 스웨덴과 덴마크 남부의 해양 환경에 콘크리트 시편을 침지한 후, 깊이별 염소이온량을 측정하였다. 시편을 해수에 침지하였으므로 시편 내부는 포화되어 있고 따라서 염소이온의 이동은 발생하지 않는다. 해양의 온도와 염소이온 농도는 계절별로 사인함수 형태로 변화하는 것으로 가정하였다. 측정 결과와 유한요소 해석 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시간의존상수  $m=0.3$ 으로 가정할 때 실측결과와 해석결과가 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 반면 온도와 외부 염소이온농도의 변화를 고려하지 않는 경우는 실측자료와 큰 차이를 나타내고 있다.

**5.3 예제 3: 건습반복을 받는 해상교각 염소이온 침투 예측**

다음으로 건습반복에 따른 염소이온 분포의 변화를 살펴보

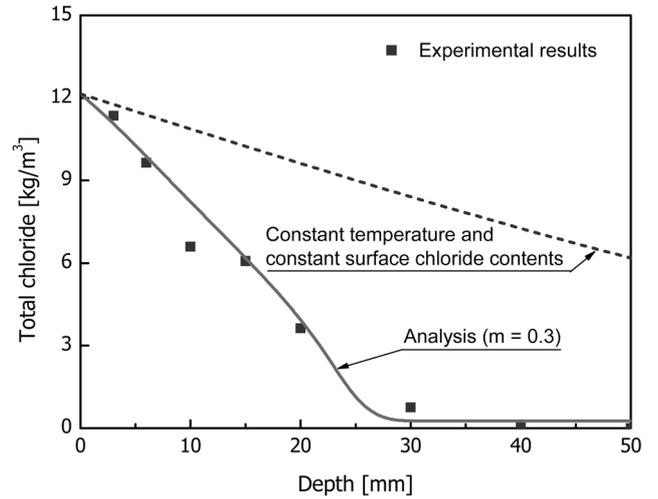


그림 7. 해석결과와 실측데이터와의 비교(온도와 표면농도가 변하는 해수 침지조건)

기 위해 간만대 구간의 해상교각을 가정하여 예제해석을 수행하였다. 건습반복의 영향을 확인하기 위하여 온도는 23°C로 유지하였으며, 외부 염소이온 농도는 우리나라 평균 해수의 염소이온 농도인 20 kg/m<sup>3</sup>으로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 수분 확산계수의 기준값은  $1 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/sec, 염소이온 확산계수의 기준값은  $8 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/sec인 콘크리트에 대하여, 확산계수의 상대습도에 대한 영향계수를 고려하였으며, Freundlich 구속등온식의 상수  $a$ 와  $b$ 는 각각 1.2, 0.5로 가정하였다.

건습반복 조건은 건조기간의 길이에 따라 염소이온 침투량을 비교하기 위하여 상대습도 75%의 건조기간과 상대습도 100%의 습윤기간을 5일을 주기로 변화하도록 하고, 습윤기간과 건조기간의 길이에 따라 건습반복 형태를 W1D4, W2D3, W3D2, W4D1, W5D0로 표기하였으며, 비교의 편의를 위해 콘크리트가 수분으로 포화된 상태에서 염소이온의 유입이 시작되는 것으로 가정하였다. 또 수분량의 변화와 이송량의 고려여부에 따른 차이를 확인하기 위해 예제1의 Case-A, B, C, D에 대해서도 각각 해석을 수행하였다.

먼저 수분량의 변화와 이송량의 고려여부에 따른 염소이온 분포를 비교하였다. 그림 9에서 알 수 있듯이 Case-B는 총 염소이온량을 과대평가하고 Case-C, D는 과소평가하는 결과를 보여주고 있다.

건습의 반복에 따른 염소이온 분포의 변화를 살펴보면, 건조기간에는 표면에서 수분의 증발이 발생하고 콘크리트 내

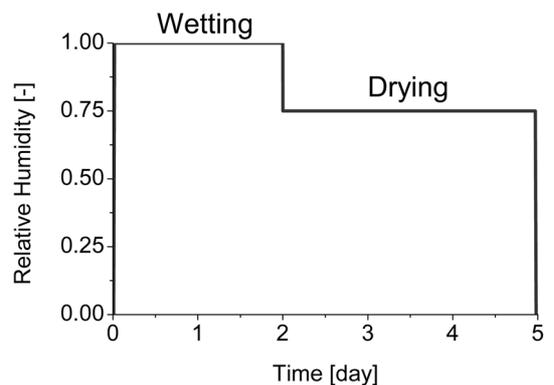
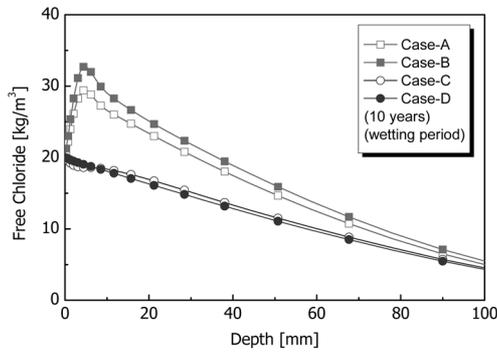
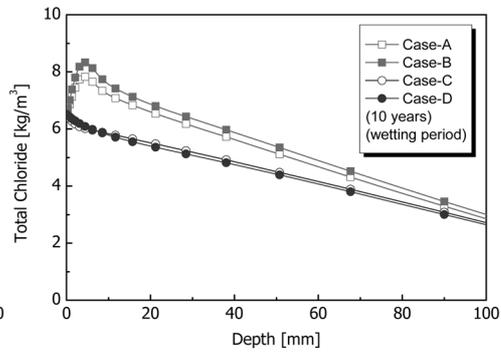


그림 8. 건습반복 형태 (W2D3)

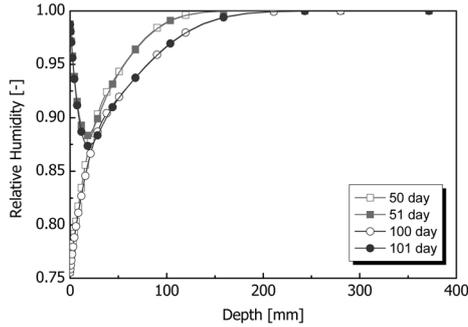


(a) 자유 염소이온 농도

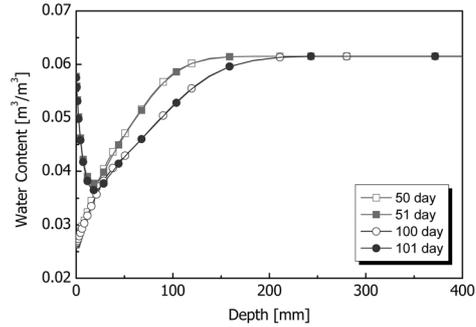


(b) 총 염소이온량

그림 9. 수분량 변화와 이송 고려 여부에 따른 염소이온 분포 (W2D3)

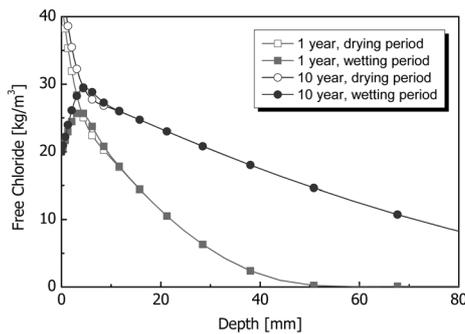


(a) 상대습도

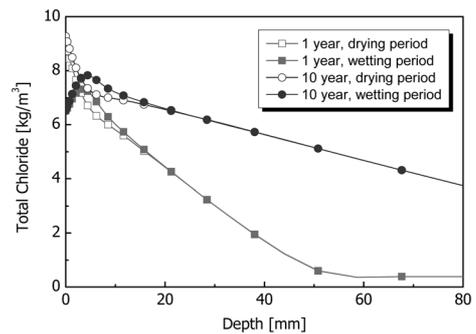


(b) 수분량

그림 10. 표면 건조 반복에 의한 상대습도와 수분량 변화 (W2D3)



(a) 자유 염소이온 농도



(b) 총 염소이온량

그림 11. 건조기간-습윤기간 전환 시 염소이온 분포 (W2D3)

부의 수분이 표면으로 이동하게 된다(그림 10). 따라서 표면부에 염소이온이 축적되어 염소이온량이 증가한다. 특히 건조기간이 끝날 때까지 표면부의 자유 염소이온 농도는 수분 감소에 의하여 크게 증가하게 된다(그림 11). 콘크리트가 다시 해수에 잠기게 되면 수분이 다시 유입되고(그림 10), 해수의 염소이온 농도 보다 콘크리트 표면부의 자유 염소이온 농도가 더 높기 때문에 콘크리트에서 해수로 염소이온의 유출이 가능하다. 그러나 염소이온의 확산속도보다 수분의 이동속도가 더 크기 때문에, 콘크리트 표면에 축적된 염소이온이 외부로 확산되는 양보다 내부로 이송되는 양이 많게 되고, 전체적으로 염소이온은 내부로 침투하게 된다(그림 11). 또 해수의 유입으로 인해 수분량이 많아지므로 자유 염소이온 농도는 어느 정도 감소하게 된다. 건조기간이 지속됨에 따라 표면부의 염소이온 농도는 증가되었고, 다시 수중에 잠기고 난 후 염소이온이 내부로 이동한 것을 알 수 있다(그림 11). 이러한 현상을 반복함에 따라 염소이온 농도는 항상 수중에 잠겨있는 경우 보다 건설반복을 받는 경우에 표면부에

서 더욱 증가함을 알 수 있다(그림 12~14).

건설반복을 받는 경우 내부의 염소이온이 많아질수록 표면 근처의 염소이온 농도의 최대값은 점차 증가함을 알 수 있는데(그림 12-c, d), 이는 수중부 콘크리트의 경우 표면부의 농도가 크게 변하지 않고 내부의 양만 증가하는 것과는 차이가 있다(그림 12-a, b). 내부의 염소이온이 많을수록 건조기간에 표면에 축적되는 염소이온이 많아지기 때문인데, 이로 인해 습윤기간에 더욱 많은 염소이온이 내부로 이동할 수 있게 되어 건설반복을 받는 경우에도 염소이온 침투가 활발하게 발생할 수 있는 것으로 생각된다.

다음으로 건조기간에 따른 염소이온의 침투경향을 살펴보면, 그림 13~14에서 건설반복 형태에 따라 염소이온 침투속도와 분포형태가 다르다는 것을 알 수 있다. 표면부의 염소이온의 축적량은 건조기간의 길이에 따라 달라지며 W2D3와 W3D2의 경우가 표면부에서 가장 염소이온량이 많은 것으로 나타났다. 그러나 어느 특정 깊이 이후에는 염소이온량이 오히려 역전되는 현상을 보여준다. 이 깊이를 하나의 임계깊이

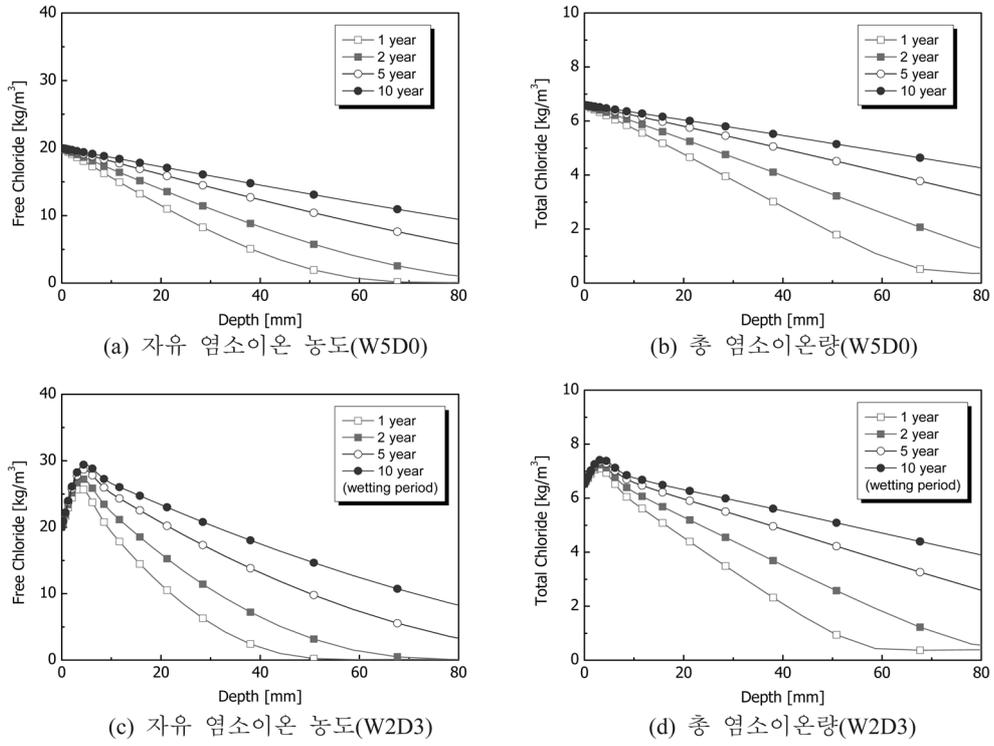


그림 12. 노출조건의 변화에 따른 시간별 염소이온 분포

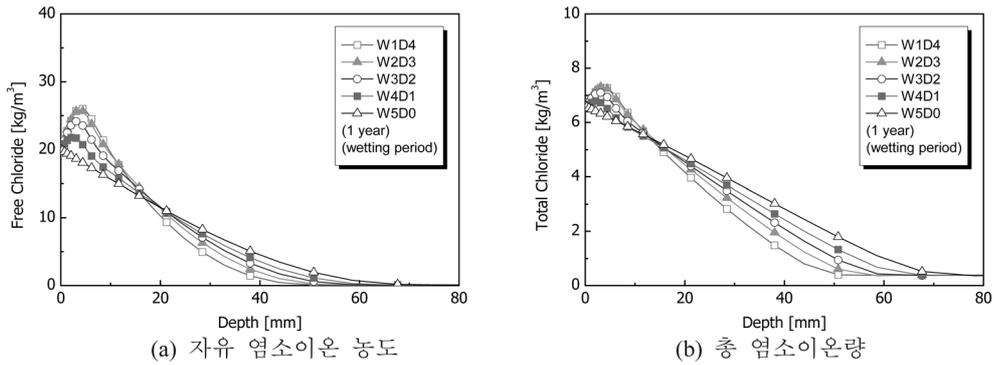


그림 13. 건습반복 형태별 염소이온 분포 (1년)

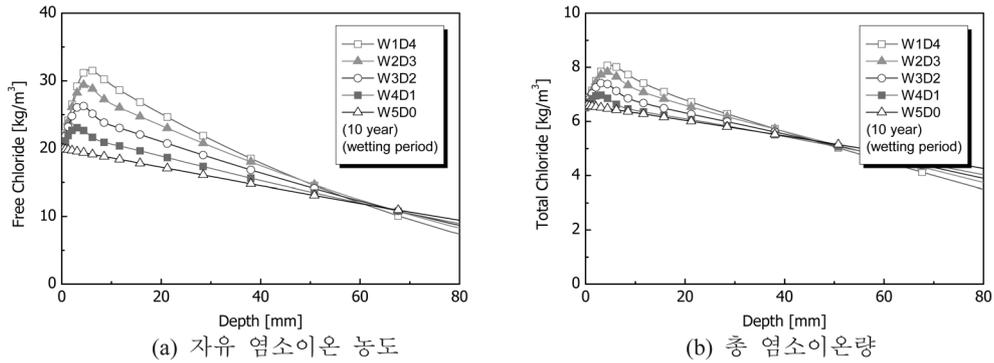


그림 14. 건습반복 형태별 염소이온 분포 (5년)

로 본다면 이것은 수분의 변화와 밀접한 연관이 있고, 또 시간이 지남에 따라 점점 깊어진다. 따라서 어느 특정 시간에 임계깊이가 철근의 위치보다 더 깊다면 건습반복에 의해 완전 침지되는 경우보다 철근 부식이 더 빨리 발생하게 된다. 특히 임계깊이를 기준으로 표면부는 수분이 포화도가 내부보다 더 낮은 상태이므로(그림 10), 부식반응에 필요한 산소의 공급이 더 원활하여 부식속도가 매우 높아질 가능성이 있다. 이와 같이 건습반복의 영향을 받는 조건에서는 외부의

환경조건의 변화에 따라 민감하게 달라질 수 있기 때문에 외부 환경조건을 고려한 염소이온 침투해석이 반드시 필요하다고 판단된다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 온도, 상대습도 등 환경조건과 외부 염소이온량의 변화, 그리고 수분량의 변화와 이에 따른 염소이온의

이송현상을 고려한 염소이온 침투해석 프로그램을 개발하였고, 실측 자료와 해석 결과의 비교를 통하여 개발된 프로그램의 타당성을 검증하였다. 또한 콘크리트 내부 수분량의 변화와 이송현상을 반영하지 않는 경우와의 비교를 통해 그 필요성을 재확인하였으며, 건습반복 작용에 의한 염소이온의 축적 현상의 메커니즘과 그에 따른 철근부식 발생축진현상을 예제해석을 통해 규명하였다.

현재 콘크리트 표준시방서(2003)에서 제시되고 있는 염소이온 침투량 평가식은 온도 및 수분분포, 외부 염소이온 농도 변화에 따른 영향을 고려하지 못하기 때문에 향후 성능기반의 내구성 설계기법을 확립하기 위해서는 이러한 환경조건의 변화를 고려할 수 있는 예측모델의 적용이 반드시 필요하다. 특히 건습의 반복을 받는 지역에서는 콘크리트 내부의 수분분포에 따라 부식의 위험이 더 증가될 수 있으므로 본 연구에서 제시된 바와 같이 복합적인 침투해석을 통해 적절한 철근피복두께와 목표 확산계수가 결정되어야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서 개발된 프로그램은 향후 염소이온 침투에 의한 철근 부식 평가 및 구조물 내구수명 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2006년도 건설교통부의 지원사업인 콘크리트코리아연구단의 “고성능다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술” 과제에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

오병환 등(2001) 원전력납건물 구조재료의 열화실험 및 열화모델 개발, 연구보고서, 서울대학교 기초전력공학공동연구소 공동 연구.  
 건설교통부(2003) 콘크리트 표준시방서.  
 Saetta, A.V., Scotta, R.V., and Vitaliani, R.V. (1993) Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 5, pp. 441-451.  
 Bažant, Z. and Najjar, L. (1972) Nonlinear water diffusion in non-saturated concrete, *Materials and Structures*, Vol. 5, No. 25, pp. 3-20.  
 Bažant, Z. and Thonguthai, W. (1978) Pore pressure and drying of

concrete at high temperature, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 104(EM5), pp. 1059-1079.  
 Jang, S.Y. (2003) *Modeling of chloride transport and carbonation in concrete and prediction of service life of concrete structures considering corrosion of steel reinforcements*, Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea  
*Life 365 Service Life Prediction Model, User's manual*. 2001.  
 Mangat, P.S. and Molloy, B.T. (1995) Chloride binding in concrete containing PFA, GBS or silica fume under sea water exposure, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 47, No. 171, pp. 129-141.  
 Martín-Pérez, B. (1999) *Service life modeling of RC highway structures exposed to chlorides*, Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada  
 Martín-Pérez, B., Zibara, H., Hoonton, R.D., and Thomas, M.D.A. (2000) A study of the effect of chloride binding on service life predictions, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 8, pp. 1215-1223.  
 Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2006) *Concrete, Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw Hill, New York, N.Y.  
 Neville, A.M. (1995) *Properties of concrete*, Prentice Hall, Essex, England  
 Nilsson, L.-O., Sandberg, P., Poulsen, E., Tang, L., Andersen, A., and Frederiksen, J. (1997) *HETEK, A System for Estimation of Chloride Ingress into Concrete, Theoretical Background*, Report No.83, Road Directorate, Denmark Ministry of Transport, pp. 33-36.  
 Sandberg, P. (1998) *Chloride Initiated Reinforcement Corrosion in Marine Concrete*, Tech. Rep. No. TVBM-1015, Lund University, Lund, Sweden  
 Sandberg, P. (1999) Studies of chloride binding in concrete exposed in marine environment, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 473-477.  
 Sergi, G., Yu, S., and Page, C. (1992) Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 44, No. 158, pp. 63-69.  
 Tang, L. (1996) *Chloride transport in concrete - Measurement and Prediction*, Ph.D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Sweden  
 Thomas, M.D.A. and Bamforth, P.B. (1999) Modeling chloride diffusion in concrete - Effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 487-495.  
 Xi, Y., Bažant, Z., and Jennings, H. (1994) Moisture diffusion in cementitious materials - Adsorption isotherms, *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 1, No. 6, pp. 248-257.

(접수일: 2007.8.7/심사일: 2007.10.28/심사완료일: 2008.6.3)