

확산과 이송을 고려한 콘크리트의 염소이온 침투해석

Chloride Penetration into Concrete in Tidal Zone by Diffusion-Convection Analysis

김 기 현* 차 수 원† 정 형 목**

Kim, Ki-Hyun Cha, Soo-Won Jung, Hyung-Mok

(논문접수일 : 2009년 10월 6일 ; 심사종료일 : 2009년 12월 1일)

요 지

본 논문에서는 염소이온의 확산과 이송해석이 가능한 유한요소해석 프로그램을 개발하였으며, 해양 간만대의 건습 반복 조건을 고려하여 염소이온 침투해석을 수행하였다. 염소이온 침투에 영향을 미치는 열과 수분의 전달을 동시에 고려하였으며, 특히 염소이온 이송을 생성항 또는 소멸항으로 처리하여 온도, 상대습도, 염소이온농도를 순차적으로 풀 수 있도록 하였다. 건습 반복 주기를 변수로 한 유한요소해석 결과와 ACI Life-365방법에 의한 침투 프로파일의 비교를 통하여, Life-365 방법은 해중에서의 염소이온 침투에 대해서는 정확한 결과를 주지만 간만대의 해석결과는 건습 주기의 영향을 고려하지 못하는 것을 확인하였다. 실제 해양 콘크리트는 다양한 건습 주기의 간만대 환경에 노출되어 있으므로, 정밀한 염소이온 침투해석을 위해서는 확산-이송 해석을 수행해야 할 것으로 생각된다.

핵심용어 : 염소이온 침투, 확산, 이송, 간만대, 건습 반복 조건

Abstract

Analysis of chloride penetration into concrete is performed considering the repeated wetting and drying conditions of tidal zone, by means of the developed finite element program which enables the diffusion-convection analysis to be conducted. Heat conduction and moisture diffusion are also included in the finite element analysis program in order that their effects to chloride penetration may be considered. For the efficiency of calculation, the analyses of temperature, relative humidity and free chloride concentration are conducted successively in that order, by treating the convection of chloride due to moisture diffusion as a source or sink term. By comparing the analysis result from finite element analysis, where main variable is a wetting and drying period, with the chloride profiles from ACI Life-365 method, it is shown that the Life-365 method gives an accurate result for the submerged zone but does not consider the differences of wetting and drying period. To obtain an accurate chloride profile in the tidal zone, it is confirmed that the diffusion-convection finite element analysis should be applied.

Keywords : chloride penetration, diffusion, convection, tidal zone, wetting and drying conditions

1. 서 론

콘크리트 구조물의 가장 중요한 내구성 저하 요인으로는 철근부식을 들 수 있다. 철근부식은 하중을 받을 수 있는 철근 유효단면적을 감소시킬 뿐만 아니라, 부식이 계속 진행될 경우 부식생성물의 부피 팽창으로 인해 콘크리트 피복에 압력을 가하여 피복의 균열 및 탈락을 일으키는 원인이 된다. 해양환경에 건설되는 콘크리트에서는 주로 염소이온 침투가

철근부식의 원인이 되고 있다(Collepardi 등, 1972). 콘크리트 내에 존재하는 철근은 시멘트 수화물로 인한 알칼리 환경에서 철근표면에 만들어지는 부동태 피막에 의해 부식으로부터 보호된다. 그러나 콘크리트로 침투한 염소이온은 철근의 부동태 피막에 직접 작용하여 부동태 피막을 파괴하여 철근이 부식되기 쉬운 상태가 되도록 한다. 최근 해상교량을 비롯하여 항만 구조물, 방파제 등 해양환경에 건설되는 콘크리트 구조물이 크게 증가하므로, 철근부식 위험 평가를 위해

† 책임저자, 정회원 · 울산대학교 건설환경공학부 교수
Tel: 010-3790-4611 ; Fax: 052-259-2629
E-mail: chasw@ulsan.ac.kr

* 서울대학교 에너지자원기술연구소 선임연구원

** 삼성물산 건설부문 토목사업본부 함양·성산간 고속도로 현장소장

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 2월 28일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 4월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

콘크리트로의 염소이온 침투해석이 필수적이다(김기현 등, 2009).

해양의 염소이온 환경은 크게 해중, 간만대, 물보라 지역, 해상대기 중으로 구분한다(콘크리트표준시방서, 2009). 해중은 항시 바다 속에 존재하는 부분으로서 해수로부터 항상 염소이온을 공급받는 부분을 말한다. 간만대와 물보라 지역은 조석간만이나 파도로 인하여 주기적으로 건조와 습윤을 반복하는 지역이며, 해상대기 중은 해수면 위에 존재하는 부분을 말한다. 이와 같은 다양한 해양환경에 대한 염소이온 침투해석을 위해서는 염소이온의 확산 뿐만 아니라, 수분의 이동을 고려한 해석이 필요하다. 염소이온의 직접적인 공급은 해수에 의한 경우가 대부분이므로 해중과 간만대에 대한 염소이온 침투문제가 더욱 중요하다. 따라서 본 논문에서는 해중과 간만대에 대한 염소이온 침투해석을 위한 지배방정식을 정립하고 이에 대한 유한요소 코드를 작성하였다.

간만대에 대한 염소이온 침투해석 결과 수분이동에 의한 염소이온의 이송으로 인해 표면부에서 염소이온 농도가 해중보다 증가할 수 있음을 확인하였다. 또 건설 반복 주기에 따라 염소이온 프로파일이 달라짐을 확인하였고, ACI Life-365 모델의 간만대 해석과 본 논문의 건설 반복 해석 결과를 비교하였다.

2. 염소이온 침투 지배방정식

2.1 유동률

콘크리트에서의 열, 수분, 염소이온의 유동률은 다음과 같다.

$$J_i = -k_i \nabla \phi_i \tag{1}$$

여기서, k_i 는 전달계수로서 열전달계수, 수분전달계수, 염소이온전달계수를 각각 k_T , k_H , k_C 로 표현하였으며, ϕ_i 는 포텐셜, 즉 상태변수로서 온도 $T(^{\circ}C)$, 상대습도 $H(-)$, 자유염소이온농도 $C_f(kg/m^3_{sol})$ 를 사용하였다. 자유염소이온농도는 콘크리트 공극수의 부피에 대한 염소이온의 질량으로, 콘크리트 단위부피 내의 총염소이온량은 다음과 같이 표현된다.

$$C_t = C_b + WC_f \tag{2}$$

여기서, $C_t(kg/m^3_{conc})$ 와 $C_b(kg/m^3_{conc})$ 는 총염소이온량과 구속염소이온량이며, $W(m^3_{so}/m^3_{conc})$ 는 콘크리트 단위부피 내의 수분량이다. 구속염소이온은 콘크리트 내 모세공극에 물리적으로 흡착되거나 화학적으로 시멘트 수화물의 일부분

을 구성하여 구속된 염소이온으로서 공극 내에서 이동하지 않는다. 이에 비해 자유염소이온은 공극수에 용해되어 자유롭게 이동할 수 있는 염소이온으로, 콘크리트 내에서의 염소이온은 자유염소이온의 형태로 내부로 이동하게 된다. 구속염소이온량은 자유염소이온농도의 함수로 표현되는데, 이를 염소이온 구속등온관계라 한다.

2.2 전달의 지배방정식

온도, 수분에 대한 평형방정식은 다음과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_T \nabla T) \tag{3}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k_H \nabla H) \tag{4}$$

여기서, ρc 는 콘크리트의 열용량, $\partial W/\partial H$ 는 수분용량이다. 수분등온선은 수분의 양을 상대습도의 함수로 표현한 것으로서 Xi 등(1994)의 수분등온선 모델이 널리 알려져 있다. 식(4)의 수분용량은 수분등온선을 상대습도로 미분하여 얻을 수 있다. Xi 등(1994)의 수분등온선 모델은 시멘트 페이스트 단위질량에 대한 수분의 무게를 제시하므로, 본 논문에서는 콘크리트 단위부피에 대한 수분부피로 나타낸 수분량의 정의를 고려하여 Xi 등(1994)의 수분등온선 모델에 단위변환을 가하였다.

콘크리트 내의 염소이온은 농도차에 의한 전도 뿐만 아니라 수분의 이동에 의한 이송에 의해서도 전달된다. 따라서 확산과 이송을 모두 고려한 염소이온 유동률은 다음과 같다.

$$J_C = J_{C1} + J_{C2} = -k_C \nabla C_f + C_f J_H \tag{5}$$

여기서, J_H 는 수분 유동률이며, $J_H = -k_H \nabla H$ 이다.

위 식을 평형방정식에 대입하면 아래의 염소이온에 대한 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_t}{\partial t} &= \left(W + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \frac{\partial W}{\partial t} \\ &= \nabla \cdot (W k_C \nabla C_f) + \nabla \cdot (C_f k_H \nabla H) \end{aligned} \tag{6}$$

2.3 전달계수

수분전달계수는 공극률과 상대습도의 함수로 표현된다. 상대습도가 낮은 경우 수분은 모세공극에서 증기의 형태로 이동

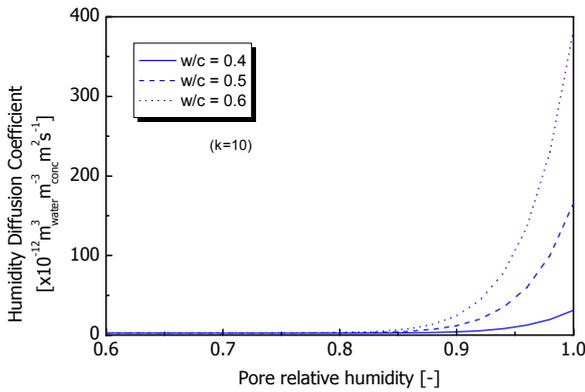


그림 1 물-시멘트비에 따른 수분전달계수

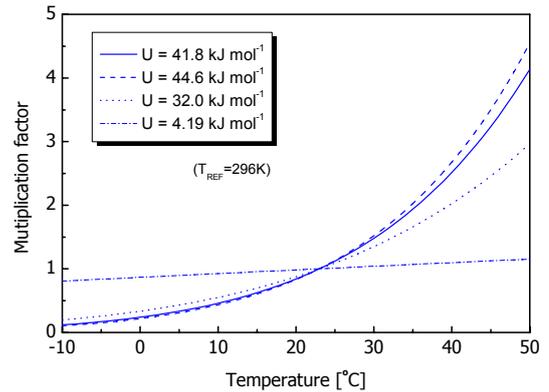


그림 3 염소이온 확산계수의 온도 의존성

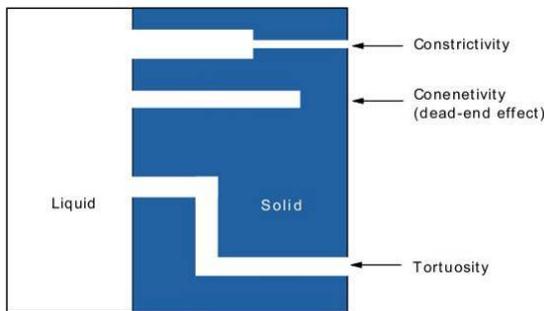


그림 2 공극의 수축, 연결 및 단절, 굴곡(Shane 등, 1999)

하며, 상대습도가 높은 경우 모세공극은 물로 채워지며 물의 이동이 지배적이다. 본 논문에서는 다음과 같은 Hedenblad (1997)의 수분전달계수 모델을 사용하였다.

$$k_H = k_{H=0.6} + (k_{H=1.0} - k_{H=0.6}) \left(\frac{H-0.6}{0.4} \right)^k \quad (7)$$

여기서, $k_{H=0.6}$ 과 $k_{H=1.0}$ 은 상대습도 60%와 100%에서의 수분전달계수이다. 수분전달계수 모델은 그림 1에 나타내었다.

콘크리트에서의 염소이온전달계수는 그림 2와 같은 공극 구조의 영향을 고려하여 얻어진다. 콘크리트의 공극구조는 공극의 연결 또는 단절상태와 굴곡의 정도에 따라 매우 복잡하므로 확산계수 측정실험을 통하여 얻는 경우가 많다.

오랜 기간에 걸친 수화반응으로 인하여 콘크리트의 공극구조가 시간경과에 따라 복잡해지고 따라서 염소이온전달계수도 시간에 따라 감소하는데, 본 논문에서는 기준재령 염소이온전달계수에 다음과 같이 재령효과를 고려하였다(Bamforth, 1998; Maage 등, 1996; Mangat 등, 1994).

$$f_t(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (8)$$

여기서, 기준재령 t_0 에서의 염소이온전달계수이고 m 은 재령

계수이며, m 이 클수록 확산계수가 빠르게 감소된다.

또한 염소이온 확산계수는 온도에 영향을 받는데, 다음과 같은 Arrhenius 방정식 형태의 함수로 온도의 의존성을 고려하였다(Saetta 등, 1993).

$$g_T = \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (9)$$

여기서, E 는 활성화에너지(J/mol)로 물-시멘트비 0.4인 OPC는 41.8kJ/mol의 값을 가지며(Page 등, 1981), R 은 기체상수(8.314J/molK), T_{ref} 는 기준재령 염소이온전달계수를 측정할 온도로 보통 23°C에서 시험이 이루어진다. 다음은 온도의 영향에 의한 확산계수의 변화를 보인 것이다.

콘크리트의 열전도계수는 염소이온 침투환경에서는 일정하므로 상수로 본다.

2.4 경계조건

열과 수분의 전달해석에서는 다음과 같은 Robin 경계조건을 사용하였다.

$$J_T^s = B_T(T - T_{en}) \quad (10)$$

$$J_H^s = B_H(H - H_{en}) \quad (11)$$

여기서, T_{en} , H_{en} 은 외부의 온도와 습도이며, B_T , B_H 는 각각 표면 열전달계수와 표면 수분전달계수이다. 염소이온 침투에서는 전도에 의한 유동률과 이송에 의한 유동률이 있으므로 다음과 같은 경계조건을 쓸 수 있다.

$$J_{C1}^s = B_C(C_f - C_{f,en}) \quad (12)$$

$$J_{C2}^s = C_{f,en} B_H(H - H_{en}) \quad (13)$$

여기서, J_{C1}^s, J_{C2}^s 는 전도와 이송에 의한 노출면의 유동률이며, $C_{f, en}, B_C$ 은 외부 자유염소이온농도와 표면 염소이온전달계수이다.

콘크리트 표면이 대기에 노출된 상황에서 표면공극의 상대 습도가 대기 상대습도 보다 높으면 콘크리트 표면에서 수분의 증발이 발생한다. 이 때 표면 근처의 염소이온은 표면으로 이송되어 증발되지 않고 축적된다(Neville, 1995). 본 논문에서는 건조기의 이러한 경우를 모사하기 위하여 식 (10)과 식 (11)을 표면 전달계수들을 영으로 두고 염소이온 유출이 발생하지 않도록 하였다.

3. 유한요소해석 모델

3.1 지배방정식 시스템 구성

염소이온 침투해석을 위한 유한요소의 절점자유도는 온도, 상대습도, 자유염소이온농도의 3가지이며, 식 (3), 식 (4), 식 (6)을 사용하여 지배방정식을 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{\partial C_f}{\partial t} \end{Bmatrix} = \nabla \cdot \left(\begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \nabla T \\ \nabla H \\ \nabla C_f \end{Bmatrix} \right) \quad (14)$$

콘크리트에서는 열전달계수가 가장 크고, 그 다음으로 수분전달계수, 염소이온전달계수의 순이다. 온도와 수분은 비교적 빠른 시간 내에 전달되나 염소이온 이동은 오랜 시간에 걸쳐 이루어지는 매우 느린 현상이다. 따라서 양질의 콘크리트의 경우 수십 년이 지나야 염소이온이 철근에 도달하는 것이 보통이다. 매 해석단계에서 온도와 수분은 비교적 빠르게 수렴하지만, 수분이동에 의한 염소이온의 이송을 고려하여 염소이온이동을 해석할 때는 수렴의 어려움이 있다. 이는 수분전달계수가 염소이온전달계수 보다 수백 배 이상 크기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 온도와 습도를 풀 때 필요한 것 보다 훨씬 조밀하게 공간을 분할해야 한다. 특히 건설 반복이 주기적으로 일어나는 경우를 100년 정도의 시간에 대하여 해석하기 위해서는 매우 많은 시간 스텝이 필요하고, 결국 해석에 오랜 시간이 걸리게 된다. 실제 온도와 수분의 전달방정식은 수회의 반복계산으로 수렴하는 반면, 이송을 포함한 염소이온 전달방정식은 몇 배의 반복계산이 필요하다. 따라서 식 (14)의 절점 당 자유도 3개의 시스템을 풀면

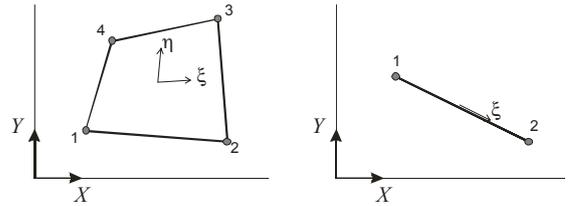


그림 4 콘크리트 내 전달해석을 위한 요소

온도해석과 습도해석은 염소이온해석의 수렴을 위해 필요 이상으로 많은 계산을 수행하게 된다.

식 (14)를 보면 염소이온은 온도해석과 습도해석에 영향을 주지 않도록 구성되어 있으므로, 본 논문에서는 식 (14) 대신에 한 시간 스텝에 아래와 같은 절점 당 자유도 1개인 문제를 3회 풀도록 프로그램을 작성하였다. 먼저 식 (15)와 식 (16)을 풀고 난 후, 습도해석에서 계산된 $\{\partial H/\partial t\}$ 와 $\{\nabla H\}$ 를 생성항 또는 소멸항으로 처리하여 염소이온 이동에 관한 식 (17)을 푼다.

$$[c_{11}] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \nabla \cdot ([k_{11}] \{ \nabla T \}) \quad (15)$$

$$[c_{22}] \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} = \nabla \cdot ([k_{22}] \{ \nabla H \}) \quad (16)$$

$$[c_{33}] \left\{ \frac{\partial C_f}{\partial t} \right\} = \nabla \cdot ([k_{33}] \{ \nabla C_f \}) + \nabla \cdot ([k_{32}] \{ \nabla H \}) - [c_{32}] \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} \right\} \quad (17)$$

유한요소 모형을 위해 그림 4와 같은 4절점 요소와 2절점 경계요소를 사용하였고, Galerkin방법으로 유한요소를 정식화하였다.

3.2 해석모델 검증

해석모델의 검증을 위해 다음과 같은 1차원 포물선형 편미분방정식에 대한 유한요소해석 결과와 오차함수를 사용한 해석해를 비교하였다.

$$c \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(k \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (18)$$

초기값은 $\phi=1$, 경계조건은 $\phi=20$ 을 사용하였다. 이에 대한 해석해는 식 (19)와 같고, 그림 5에서 보인 바와 같이 두 결과가 일치하였다.

$$\phi = \phi_i + (\phi_{en} - \phi_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\frac{k}{c}t}} \right) \right] \quad (19)$$

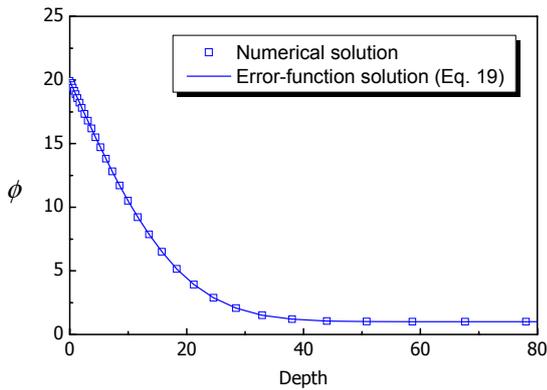


그림 5 해석해와 유한요소해석 결과

4. 염소이온 침투문제의 수치해석

4.1 ACI Life-365 모델

콘크리트로의 염소이온 침투해석을 위하여 Life-365에서는 총염소이온량을 변수로 하고 유한차분법을 사용하여 다음의 지배방정식을 수치적으로 푼다(Bentz 등, 2008).

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^m \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} \quad (20)$$

여기서, D_o 는 기준재령 t_o 에서의 기준확산계수, m 은 재령계수이며, 각각 다음과 같다.

$$D_o = 1 \times 10^{-12.06 + 2.40 W/C} \quad [m^2/s] \quad (21)$$

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \quad (22)$$

치환률은 플라이애시는 50%까지, 슬래그는 70%까지로 제한되고 따라서 $m \leq 0.6$ 이 된다. Life-365모델에서도 Arrhenius방정식 형태로 확산계수의 온도의존성을 고려한다.

Life-365에서는 환경조건에 따라 표면염소이온량을 다르게 지정하고 있는데, 그림 6에 보인 바와 같이 해중에 대해

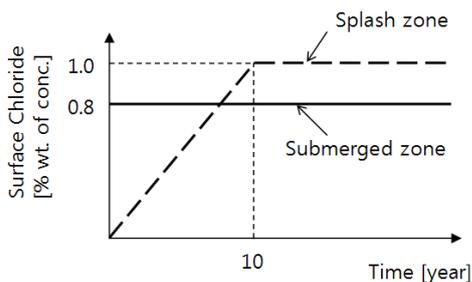


그림 6 Life-365 방법의 표면염소이온농도

서는 콘크리트 단위중량의 0.8%를 즉시 작용시키고 간만에 대해서는 0.1%/년의 속도로 증가시키되 최대 1.0%까지 가한다. 이와 같이 Life-365방법은 건습 주기를 고려한 수분 이동해석을 수행하지 않고 표면염소이온농도를 시간에 따라 증가시켜 염소이온 침투해석만 수행하는 간접적 방법으로 건습 반복에 의한 이송을 고려한다.

4.2 온도변화를 고려한 유한요소해석

이 절에서는 확산계수의 온도의존성을 고려한 수치해석의 필요성을 확인하였다. 최고온도 30℃, 최저온도 -10℃, 연평균온도 10℃로 기온변화를 보이는 어느 지역의 해중 콘크리트를 고려한다. 기준온도 23℃에서 측정된 확산계수가 $1 \times 10^{-12} m^2/sec$ 일 때, Arrhenius 방정식을 고려하여 연평균온도 10℃의 확산계수를 구하고, 이 값에 대하여 10년 후의 염소이온 프로파일을 구해 보면 온도의 연변화를 고려하여 구한 프로파일을 과소평가하고 있다.

이는 그림 3에 보인 바와 같이 온도가 증가할수록 염소이온 확산계수는 더욱 커지기 때문이다. 연평균온도 보다 높은 온도에서는 확산계수의 증가율이 더 크기 때문에 이 경우는 연평균온도에 대응하는 확산계수가 아니라 다음의 관계에 의해 등가확산계수를 구해야 한다.

$$\bar{t} = \int_0^t \exp \left[\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] dt = 1.3667t \quad (23)$$

즉, 연평균온도인 10℃에 대응하는 확산계수 보다 1.3667 배 큰 확산계수를 사용할 때 연간온도변화를 고려한 수치해석과 동일한 결과를 준다. 이 수치는 식 (9)와 그림 3을 참고하면 약 15℃에 해당하는 값이다. 염소이온 침투해석을 위한 전산해석을 사용하지 않고 식 (19)와 같은 해석해가 자주 사용되고 있으므로 식 (23)의 방법은 설계단계에서 유용할 것으로

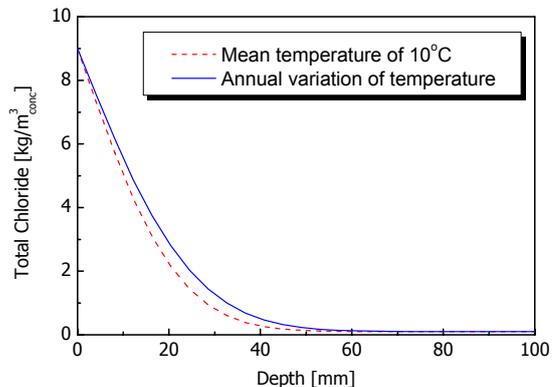


그림 7 온도변화 고려여부에 따른 염소이온 프로파일

사료되며, 정밀한 침투해석을 위해서는 여전히 전산해석이 필요할 것으로 생각된다.

4.3 건습 반복 환경의 확산이송 유한요소해석

건습 반복 환경에 대하여 유한요소해석 결과와 Life-365 모델 해석결과를 비교하기 위하여 다음과 같은 예제를 해석하였다. 물-시멘트비 0.36이고, 단위중량 2,300kg/m³인 콘크리트에 대하여 선형구속등온식 $C_b = 0.864 C_f$ 을 적용하였으며, 해수의 염소이온농도 20kg/m³_{sol}를 사용할 때 콘크리트 표면의 총염소이온량이 18.4kg/m³_{conc}가 된다. 기준확산계수는 $6.37 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$, 재령계수는 0.4를 적용하였다. 해수의 염소이온농도는 20kg/m³_{sol}으로 설정하였고, 건습 반복 주기는 상대습도 100%의 습윤기와 상대습도 85%의 건조기를 1일 : 4일, 2일 : 3일 등으로 변화시켰다(표 1 참고). 그림 8은 습윤기와 건조기가 2일 : 2일인 경우 습윤기와 건조기 사이의 콘크리트 내 수분분포 해석결과를 보인 것이다. 건조와 습윤이 반복될 때 표면 근처의 일부구간에서 수분량 변화가 급격하고 내부는 상대적으로 변화가 작다.

그림 9는 염소이온 침투개시 20년 후 건습 조건에 따른 총염소이온량 분포를 나타낸 것으로, 항상 해중 환경인 W5D0의 결과에 비하여 건습 반복 환경에서는 표면부 농도는 다소 높게, 내부 농도는 다소 낮은 것을 알 수 있다. 이는 그림 8에 보인 바와 같이 건습이 반복될 때에는 표면 근처에서 수분이동이 활발하고, 따라서 표면의 염소이온이 내부로 전달되기 전에 일부가 표면으로 이송되기 때문인 것으로 생각된다. 또 그림 9를 보면 건조기간이 길수록 표면부 농도는 더 높고 내부 농도는 더 낮은 것을 알 수 있다. 건습 조건에 따라 해석결과가 달라지므로, 해양환경의 간만대 콘크리트에서의 정확한 염소이온 침투량 산정을 위해서는 건습 기간을 고려한 염소이온 확산이송해석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

다음으로 Life-365 방법 및 DIANA의 해석결과와 확산이송 유한요소 해석결과를 비교해 보았다. 그림 6의 하중조건에 따라 단위중량 2,300kg/m³인 콘크리트의 해중과 간만대의 표면염소이온의 최대값은 각각 18.4, 23kg/m³_{conc}이다. Life-365방법으로 염소이온 확산문제를 풀기 위한 유한요소 코드를 작성하고 이를 사용하여 10년, 20년에서 해중과 간만대의 염소이온 프로파일을 그린 것이 그림 10이며, 이는 DIANA를 사용한 해석과 동일한 결과를 보였다. 그림 10에서 알 수 있듯이 간만대는 해중에 비하여 표면부는 높게 내부는 낮게 계산되었다. 그러나 건습의 기간을 고려하지 못하는 것이 Life-365 방법의 단점이다.

표 1 건습 반복 환경조건

| 변수명 | 습윤기(RH 100%)(day) | 건조기(RH 85%)(day) |
|------|-------------------|------------------|
| W1D4 | 1 | 4 |
| W2D3 | 2 | 3 |
| W3D2 | 3 | 2 |
| W4D1 | 4 | 1 |
| W5D0 | 5 | 0 |

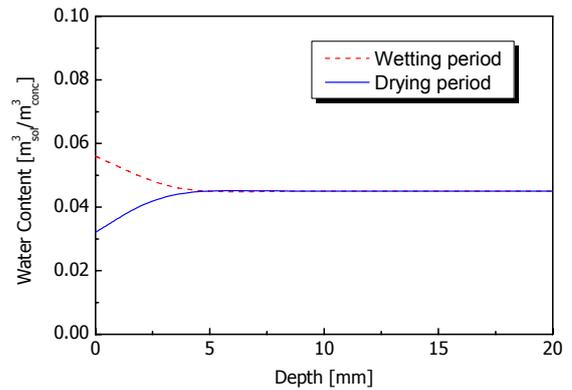


그림 8 건조기와 습윤기의 수분분포

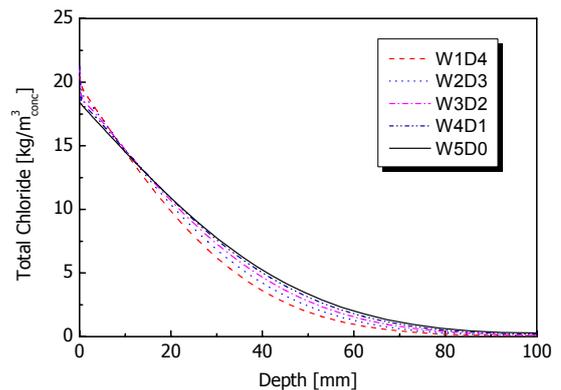


그림 9 건습 주기에 따른 총염소이온량(20년)

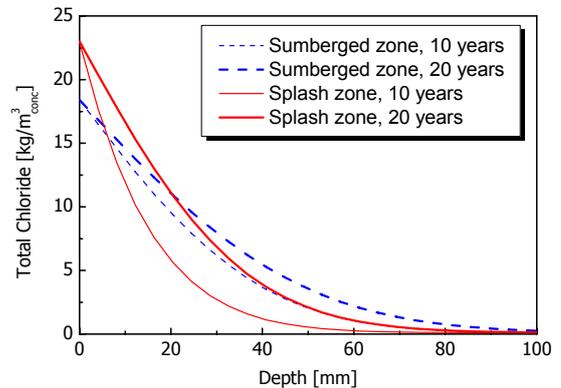


그림 10 Life-365 방법에 의한 해중과 간만대 침투해석

해석결과 비교를 위하여 그림 9의 상습습윤조건 W5D0와 그림 10의 해중 20년의 프로파일 함께 나타낸 것이 그림 11이다. 또 그림 9의 건습 반복 해석결과와 그림 10의 간만대

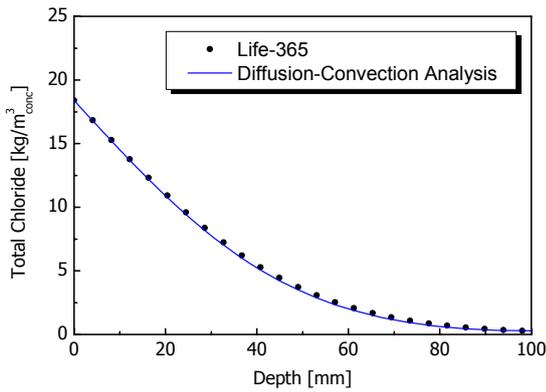


그림 11 해중 침투해석(20년)

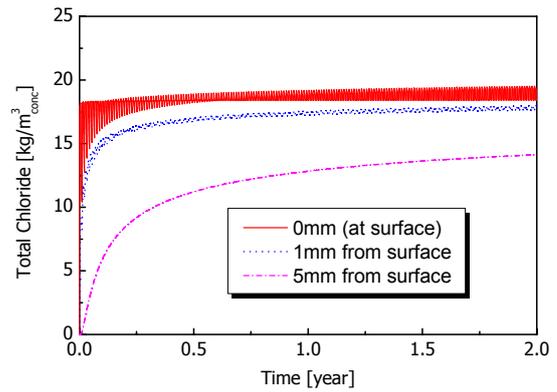


그림 13 표면 일부 지점의 염소이온 축적(W2D2)

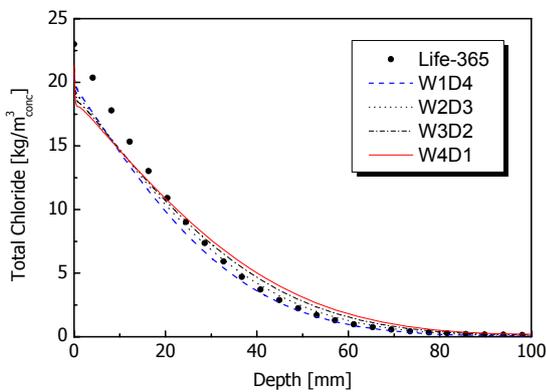


그림 12 간만대 침투해석(20년)

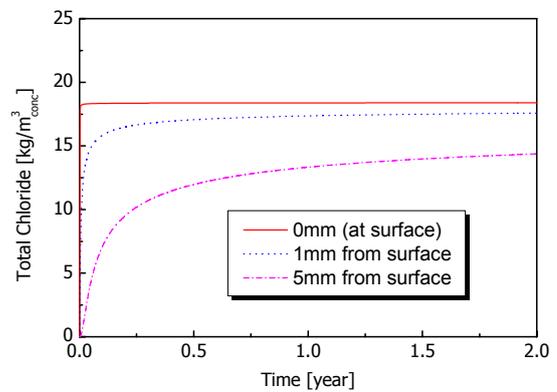


그림 14 표면 일부 지점의 염소이온 축적(W5D0)

20년의 프로파일 함께 나타낸 것이 그림 12이다. 해중 해석 결과인 그림 11에 대해서는 해석결과들이 잘 일치한다.

철근의 부식을 개시시키는 부식임계농도는 표면염소이온농도 보다 작으므로, 부식개시 시기를 예측하여 내구수명을 결정하기 위해서는 염소이온 침투 프로파일에서 내부의 꼬리부분 즉, 철근이 존재하는 피복두께 50mm이상의 영역의 예측이 중요한 관건이 된다. 그림 12에서 알 수 있듯이 Life-365에 의한 간만대 해석결과는 특정 건설 반복 주기에 대해서는 꼬리부분이 비교적 일치하고 있으나, 다양한 건설 반복 조건에 대해서는 예측이 불가능하다. 따라서 실제 건설 주기를 고려한 내구수명예측을 위해서는 확산이송해석이 필요하다고 할 수 있다.

그러나 이러한 수분의 이동을 함께 고려한 유한요소해석은 설계단계에서 실무자들이 사용하기에는 여전히 어려움이 있으므로, 식 (19)와 비슷한 형태의 간단한 해석해를 이용하거나 Life-365와 같이 염소이온 침투만을 다루는 간단한 수준의 수치적 방법을 사용할 수 있도록 해야 한다. 이 경우 건설 반복 주기에 따라 표면염소이온농도를 다르게 설정하는 방법이 가능하다. 실제로 W2D2와 W5D0의 표면근처의 일부 지점들에 대한 염소이온 축적은 그림 13 및 그림 14와

같다.

북미의 환경조건에 대한 Life-365 방법의 표면염소이온농도 모델을 우리나라 환경에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 해양환경에 많은 콘크리트 구조물을 건설하고 있는 현재 상황에서 우리나라에 적용이 가능한 표면염소이온농도 모델 및 이를 포함한 염소이온 침투해석 프로그램이 필수적이다. 표면염소이온농도 실측값은 표면부 콘크리트의 수 mm를 채취하여 구해야 하므로, 특히 그림 13과 그림 14의 시뮬레이션 결과는 실측자료로부터 표면염소이온농도를 구하는데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 생각된다.

한편 겨울철 제빙화학제의 사용에 의한 철근부식이 심각한 문제로 대두되고 있다. 제빙화학제에 의한 콘크리트로의 염소이온 침투를 다루기 위해서는 역시 온도해석, 수분전달해석을 포함한 염소이온 침투해석이 수행되어야 한다. 제빙화학제에 의한 침투해석 예제를 위해 앞의 건설 반복 해석에 사용한 것과 동일한 물성치를 사용하였다.

제빙화학제에 의한 표면염소이온량을 실측하기는 어렵고 그 변동성도 크기 때문에 본 논문에서는 목표제설온도의 개념을 도입하였다. 겨울철 강우나 강설에 의한 결빙을 방지하기 위한 목표온도를 설정하고 이 온도까지 어는점을 감소시

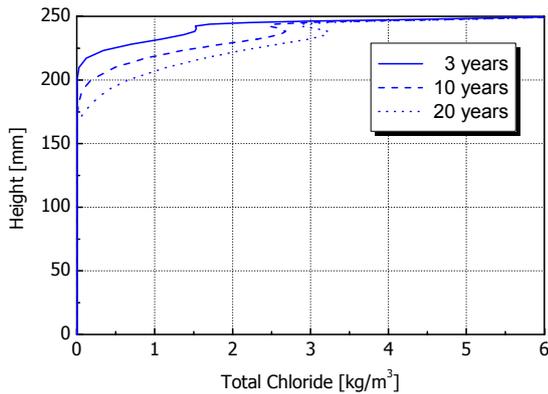


그림 15 제빙화학제에 의한 염소이온 침투 프로파일

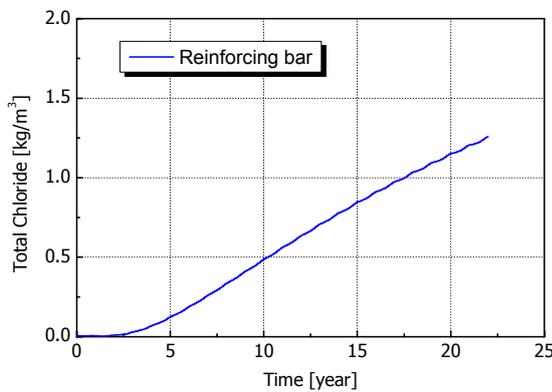


그림 16 제빙화학제에 의한 표면염소이온농도 축적

킬 수 있는 제설제 농도를 산정하였다. 이를 표면염소이온농도로 사용하여 제빙화학제에 대한 염소이온침투 해석을 수행하였다. 다음 그림은 제빙화학제에 의한 확산-이송 유한요소 해석결과들이다. 제빙화학제는 겨울철에 집중적으로 사용되므로 그림 16을 보면 해양환경(그림 13 및 그림 14)의 경우에 비하여 표면염소이온량의 축적이 다소 느리다. 그러나 제빙화학제의 영향을 받는 부위는 비교적 피복두께가 작아 부식의 위험이 크기 때문에, 제빙화학제에 대한 확산-이송 유한요소 해석을 설계단계부터 적용해야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 열, 수분, 염소이온의 전달을 풀 수 있는 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 건설 반복 환경조건에 대한 염소이온 확산이송해석이 가능하도록 하였다. 열, 수분, 염소이온 전달은 전달속도에서 큰 차이를 보이므로 해석에서 다루는 시간범위가 큰 차이를 가지게 된다. 따라서 세 가지 문제를 효율적으로 다루기 위해 염소이온 침투해석 단계에서 수분전달에 의한 염소이온 이송효과를 생성항 또는 소멸항으로 처리하여, 온도, 습도, 염소이온 침투해석을 순차적으로 다루도록 프로그램을 개선하였다.

확산이송해석 유한요소 프로그램의 해석결과와 ACI Life-365의 염소이온 침투 프로파일 산정 모델을 비교하였다. 염소이온 이송이 발생하지 않고 확산만 발생하는 해중에 대한 침투해석 결과와는 달리, 건설 반복 환경에서는 확산과 이송을 모두 고려한 정밀해석이 필요함을 확인하였으며, 따라서 본 논문의 확산-이송 해석 프로그램은 다양한 건설 환경조건에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2006년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

김기현, 차수원 (2009) 염소이온 노출개시시기를 고려한 기존 확산계수모델 수정제안, 한국콘크리트학회논문집, 21(3), pp.377~386.

콘크리트표준시방서 (2009) 한국콘크리트학회, 기문당.

Bamforth, P. (1998) Spreadsheet Model for Reinforcement Corrosion in Structures Exposed to Chlorides. In O. Gjorv, K. Sakai and N. Banthia (Eds), *Concrete Under Severe Conditions 2: Environment and Loading*, London: E&FN Spon., 1, pp.64~75.

Bentz, E.C., Thomas, M.D.A. (2008) *Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Programme for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, January 8, 2008, p.67.

Collepardi, M., Marciallis, A., Turriziani, R. (1972) Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concrete, *American Ceramic Society*, 55(10), pp.534~535.

Hedenblad, G. (1997) The Use of Mercury Intrusion Porosity or Helium Porosity to Predict the Moisture Transport Properties of Hardened Cement Past., *Advanced Cement Based Materials*, 6, pp.123~129.

Maage, M., Helland, S. Poulsen, E., Vennesland, Ø., Carlsen, J. (1996) Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment, *ACI Materials Journal*, 93(6), pp.602~608.

Mangat, P., Molloy, B. (1994) Prediction of Long Term Chloride Concentration in Concrete, *Materials*

- and Structures*, 27(170), pp.338~346.
- Neville, A.M.** (1995) *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Prentice Hall, England, p.844.
- Page, C.L. Short, N.R., El Tarras, A.** (1981) Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, 29, pp.79~86.
- Saetta, A.V., Scotta, R.V., Vitaliani, R.V.** (1993) Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete, *ACI Materials Journal*, 90(5), pp.441~451.
- Shane, J., Mason, T., Jennings, H.** (1999) Conductivity and Microstructure of the Interfacial Transition Zone Measured by Impedance Spectroscopy, *In Engineering and Transport Properties of the Interfacial Transition Zone in Cementitious Composites*, RILEM report 20, M.G. Alexander, G. Arliguie, G. Ballivy, A. Bentur and J. Marchand (Eds.), RILEM Publication S.A.R.L., Paris, pp.173~203.
- Xi, Y., Bažant, Z., Jennings, H.** (1994) Moisture Diffusion in Cementitious Materials - Adsorption Isotherms. *Advanced Cement Based Materials*, 1(6), pp.248~257.