



염소이온 노출개시시기를 고려한 기존 확산계수 모델 수정제안

김기현¹⁾ · 차수원^{2)*}

¹⁾서울대학교 에너지자원신기술연구소 ²⁾울산대학교 건설환경공학부

Chloride Diffusion Coefficient Model Considering the Initiation Time of Exposure to Chloride Environment

Ki-Hyun Kim¹⁾ and Soo-Won Cha^{2)*}

¹⁾Research Institute of Energy And Resources, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT A reference diffusion coefficient model from ACI life-365 is drawn from test results by NT build 443. This test method gives a time-averaged diffusion coefficient during immersion period, thus the ACI model uses the time-averaged diffusion coefficient as a reference value. ACI model needs to be revised, considering the difference between the time-average value and reference value at specified time. In this study, firstly the analytic solutions of diffusion equation are derived considering the initiation time and period of exposure to chloride, and secondly the time-averaged diffusion coefficient from NT build 443 is converted into the diffusion coefficient at reference time. From this study, the reference diffusion coefficient of ACI model should be modified to be about 10% larger values than those of present ACI model. For convenient design of service life, previous relationship between the chloride diffusion coefficient from NT build 443 and that from NT build 492 is also modified. To compare the chloride diffusion coefficients of ACI and JCI models, the reference chloride diffusion coefficient with respect to the JCI model is drawn in the similar form of ACI model's, and service life prediction by ACI life-365 method is confirmed to give a conservative result.

Keywords : initiation time of exposure, diffusion equation, diffusion coefficient, NT build 443, NT build 492

1. 서 론

균열은 콘크리트구조물에 대한 가장 중요한 열화인자로서, 균열은 그 종류와 발생 원인이 매우 다양하다. 특히 최근에는 해양환경에 건설되는 콘크리트구조물이 증가함에 따라 염소이온 침투로 인한 철근부식에 기인한 장기재령의 균열 위험성이 증가되고 있다. 많은 연구자들이 콘크리트로의 염소이온 침투 메커니즘을 구명하기 위해 노력하고 있고^{1,4)} 철근부식이 시작되는 임계염소이온 농도에 대한 연구를 진행하고 있다.⁵⁻⁷⁾

이러한 연구 성과들을 바탕으로 최종적으로는 염소이온 침투를 받는 기존 콘크리트구조물의 잔존수명을 산정하거나 신설되는 콘크리트구조물의 내구수명을 예측할 수 있다.

염소이온 침투에 대한 콘크리트구조물의 내구수명을 평가하는데 가장 중요한 물리량은 염소이온 확산계수와 표면 염소이온 농도이다. 특히 염소이온 확산계수에 대한 많은 모델들이 존재하지만 모든 콘크리트 배합 및 환경조건에 적용할 수 있는 모델을 이끌어 내기에는 아직

많은 연구가 필요하며 확산계수의 의미 또한 혼동되게 사용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 각국의 확산계수 모델 중 현재 내구성 설계에 많이 사용되고 있는 JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 확산계수 모델의 평가를 수행하였다. 이를 위해 먼저 시간 의존형 확산계수 모델에 대하여 염소이온 노출개시시기를 고려하여 해석해를 유도하였다. 현재 많이 사용되고 있는 ACI life-365 확산계수 모델은 NT build 443 방법으로 측정된 확산계수들을 바탕으로 만들어졌는데, 염소이온 노출개시시기를 고려한 해석해를 사용하여 ACI life-365 확산계수 모델이 실제 확산계수를 과소평가하고 있음을 밝히고, 이에 따라 ACI life-365 확산계수 모델의 기준 확산계수를 수정 제안하였다. 또 NT build 443 방법과 NT build 492 방법 간의 상관관계를 수정 제시하였다. 마지막으로 JCI 확산계수 모델의 기준 확산계수를 유도하여 JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 확산계수 모델의 직접적인 비교를 수행하였으며, 보통 해양 환경에 사용되는 범위의 물시멘트비에 대하여 JCI 확산계수 모델은 ACI life-365 확산계수 모델에 비하여 작은 확산계수 값을 제시하고 있는 것을 확인하였다. 또 염소이온 구속능에 대한 실험자료를 바탕으로 표면 염소이온 농도를 계산하는 방법을 제시하였다.

*Corresponding author E-mail : chasw@ulsan.ac.kr

Received May 23, 2009, Revised April 30, 2009

Accepted May 5, 2009

©2009 by Korea Concrete Institute

2. 염소이온 확산방정식 및 확산계수

콘크리트로의 염소이온 침투는 확산, 이송 등 다양한 방법에 의해 일어나는데 특히 포화 상태의 콘크리트에서는 주로 확산에 의해 염소이온 침투가 발생한다. 1차원 침투를 가정할 때 물질평형방정식 (연속방정식)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\frac{\partial J_c}{\partial x} \quad (1)$$

여기서, C_t 는 총 염소이온 농도 ($\text{kg/m}^3_{\text{conc}}$), J_c 는 염소이온 유동률 ($\text{kg/m}^3_{\text{conc}} \times \text{m/s}$), x 는 거리 (m), t 는 시간 (s)이다. 염소이온 농도는 콘크리트 단위 부피에 대한 염소이온의 중량으로 표현하였으며, 총 염소이온 농도는 구속 염소이온 농도 ($C_b, \text{kg/m}^3_{\text{conc}}$)와 자유 염소이온 농도 ($C_f, \text{kg/m}^3_{\text{conc}}$)의 합이다. 확산에 의한 염소이온 유동률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_c = -D_i \frac{\partial C_f}{\partial x} \quad (2)$$

여기서, D_i 는 고유 확산계수 (intrinsic diffusion coefficient, m^2/s)로서, 콘크리트 공극구조에 따라 결정되는 고유한 값이다. 콘크리트 내 공극수 단위부피에 대하여 자유 염소이온 농도와 유동률을 정의할 때의 염소이온 확산계수를 고유 확산계수라 하는데, 두 물리량 모두를 콘크리트 단위부피에 대하여 표현해도 같은 의미를 가진다. 이상의 관계로부터 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial C_b}{\partial t} + \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$\left(1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) \frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) \quad (4)$$

여기서, $\partial C_b / \partial C_f$ 는 염소이온 구속능이며, 구속 염소이온 농도를 자유 염소이온 농도의 함수로 표현한 염소이온 구속 등온식으로 부터 구할 수 있다. 비선형 구속 등온식을 사용할 경우에는 유한차분법 또는 유한요소법과 같은 수치해석을 사용하여 식 (4)를 풀어야 한다.

한편, 자유 염소이온 농도를 변수로 하는 대신에 총 염소이온 농도를 변수로 설정할 수도 있다. 염소이온 농도 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\partial C_t = \partial C_b + \partial C_f = \left(1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) \partial C_f \quad (5)$$

식 (5)를 이용하여 식 (3)을 다시 쓰면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_i}{1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f}} \frac{\partial C_t}{\partial x} \right) \quad (6)$$

거리에 따라 염소이온 구속능과 고유 확산계수가 일정하다면, 식 (6)은 다음과 같은 형태로 정리된다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{D_i}{\left(1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right)} \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} = D_a \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} \quad (7)$$

여기서, D_a 는 겉보기 확산계수 (apparent diffusion coefficient)로서, 염소이온 구속의 영향을 고려한 확산계수이다.

식 (7)의 해는 다음 장에서 설명하는 바와 같이 오차함수 (error function)를 사용하여 해석해 (analytical solution)로 구할 수 있다. 콘크리트 내에서는 자유 염소이온 만 이동할 수 있으므로 식 (4)와 같이 자유 염소이온 농도를 상태변수 (state variable)로 하여 지배방정식을 세우는 것이 바람직하나, 현장의 실측자료나 실내의 침지실험에서 보통 총 염소이온 농도를 측정하는 경우가 많으므로 식 (7)에 대한 해석해를 많이 이용한다.

식 (7)에 대한 해석해를 사용하기 위해서는 염소이온 구속능 $\partial C_b / \partial C_f$ 이 일정한 값을 가져야 하는데, 이러한 경우는 염소이온 구속이 발생하지 않거나 ($C_b = 0$) 자유 염소이온 농도와 구속 염소이온 농도가 비례하는 가장 간단한 형태의 선형 구속 등온식, 즉 $C_b = \alpha C_f$ 형태인 경우로만 국한된다. 이러한 경우 자유 염소이온 농도를 상태변수로 하거나 총 염소이온 농도를 상태변수로 하더라도 확산계수는 같은 값을 가진다.

3. 염소이온 노출개시시기를 고려한 해석해

3.1 시간의존형 확산계수 모델

염소이온 확산계수가 항상 일정한 값을 가진다는 가정 아래 Collepardi⁸⁾는 오차함수를 사용하여 미분방정식 (7)의 해석해를 다음과 같이 제시하였다.

$$C_t(x, t) = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right] \quad (8)$$

여기서, C_i 와 C_o 는 각각 초기 염소이온 농도와 외부 염소이온 농도이고, $\text{erf}()$ 는 오차함수이다. 염소이온 프로파일을 식 (8)의 형태로 회귀분석하여 구한 확산계수는 해당 프로파일을 최적으로 표현하기 위한 값으로, 프로파일 획득 시기까지의 평균적인 확산계수를 의미한다.

실제로 콘크리트는 타설 후 시간 경과에 따라 수화반응이 계속되어 콘크리트의 공극구조가 점차 조밀해지므로 확산계수는 시간에 따라 점차 감소하는데, 식 (8)은

이러한 현상을 고려하지 않는다는 사실에 주의할 필요가 있다.

이후 1990년대 중반 들어 유효 확산계수 (effective diffusion coefficient)가 시간에 따라 변하는 확산계수 모델이 제시되었으며,⁹⁾ 이에 따라 선형비례하는 구속등온식을 쓸 경우 식 (7)의 겉보기 확산계수를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$D_a(t) = D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \quad (9)$$

여기서, D_o 는 기준 확산계수, t_o 는 기준 확산계수에 대응하는 기준 시기, n 은 재령의 효과를 나타내는 재령계수이다. 이 때 식 (7)은 식 (10)과 같이 쓸 수 있고, 식 (11)과 같은 변수 치환에 의해 식 (12)와 같이 간단히 정리된다.

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} \quad (10)$$

$$\partial T = \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \partial t \quad (11)$$

$$\frac{\partial C_t}{\partial T} = D_o \frac{\partial^2 C_t}{\partial x^2} \quad (12)$$

오차함수를 사용한 식 (12)의 해석하는 식 (13)과 같다.

$$C_i(x, t) = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_o T}} \right) \right] \quad (13)$$

3.2 타설 직후 침투를 가정한 기존의 해석해

기존에는 식 (13)에서 T 를 식 (14)와 같이 구하였다.

$$T = \int_0^t dT = \int_0^t \left(\frac{t_o}{t} \right)^n dt = \frac{1}{1-n} \left(\frac{t_o}{t} \right)^n t \quad (14)$$

따라서 식 (9)의 형태로 재령효과를 고려한 경우의 해석하는 다음과 같이 표현된다.

$$C_i(x, t) = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n t}} \right) \right] \quad (15)$$

시간이 충분히 경과되어 시멘트의 수화반응이 완료되면 공극구조가 안정되고 확산계수는 더 이상 감소하지 않고 일정해진다고 본다. 확산계수가 일정해지는 시기를 t_c 라 할 때 t_c 이후의 염소이온 침투깊이를 식 (17)과 같이 구분할 수도 있다.

$$T = \int_0^t dT = \int_0^{t_c} \left(\frac{t_o}{t} \right)^n dt + \int_{t_c}^t \left(\frac{t_o}{t} \right)^n dt = \left(\frac{t_o}{t_c} \right)^n \left[1 + \frac{n}{1-n} \left(\frac{t_c}{t} \right) \right] t \quad (16)$$

$$C = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \left[1 + \frac{n}{1-n} \left(\frac{t_c}{t} \right) \right] t}} \right) \right] \quad (17)$$

3.3 노출개시시기를 고려한 해석해

식 (15) 및 식 (17)은 콘크리트 타설 직후부터 염소이온의 침투가 시작된다고 가정하였을 때의 해석해이다. 그러나 실제로 콘크리트구조물물의 염소이온 침투는 어느 정도 콘크리트가 양생된 이후에 발생한다. 즉, 콘크리트가 염소이온에 노출되어 염소이온 침투가 시작되는 시기를 t_s 라 할 때 식 (13)의 T 는 식 (18)과 같이 표현되고 이에 대응하는 해석하는 식 (19)와 같다.

$$T = \int_{t_s}^t \left(\frac{t_o}{t} \right)^n dt = \frac{t_o^n}{1-n} (t^{1-n} - t_s^{1-n}) = \frac{1}{1-n} \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \left[1 - \left(\frac{t_s}{t} \right)^{1-n} \right] t \quad (18)$$

$$C_i = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \left[1 - \left(\frac{t_s}{t} \right)^{1-n} \right] t}} \right) \right] \quad (19)$$

마찬가지로 확산계수가 더 이상 감소하지 않는 시기에는 식 (21)을 사용해야 한다.

$$T = \int_{t_s}^t dT = \int_{t_s}^{t_c} \left(\frac{t_o}{t} \right)^n dt + \int_{t_c}^t \left(\frac{t_o}{t} \right)^n dt = \frac{t_o^n}{1-n} (t_c^{1-n} - t_s^{1-n}) + \left(\frac{t_o}{t_c} \right)^n (t - t_c) = \left(\frac{t_o}{t_c} \right)^n \left[1 + \frac{n}{1-n} \left(\frac{t_c}{t} \right) - \frac{1}{1-n} \left(\frac{t_c}{t_s} \right)^n \left(\frac{t_s}{t} \right) \right] t \quad (20)$$

$$C_i = C_i + (C_o - C_i) \left[1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_o \left(\frac{t_o}{t} \right)^n \left[1 + \frac{n}{1-n} \left(\frac{t_c}{t} \right) - \frac{1}{1-n} \left(\frac{t_c}{t_s} \right)^n \left(\frac{t_s}{t} \right) \right] t}} \right) \right] \quad (21)$$

Table 1 Different methods of determining diffusion coefficient

Item	Chloride profiling	NT Build 443	NT Build 492
Process	Regression using error-function solution after profiling	Profiling after relatively short immersion period of 35 days	Measuring penetration depth with specimen whose migration period is about 1 day
Penetration mechanism	Diffusion	Diffusion	Migration
Assumption	Linear chloride binding	Linear chloride binding	Linear chloride binding (The shorter the test period is, the more proper the assumption is)
Diffusivity	Apparent diffusion coefficient	Non-steady state diffusion coefficient	Non-steady state migration coefficient
Application	JCI diffusivity model	ACI Life-365 diffusivity model	European durability design, DuraCrete
Advantage	<ul style="list-style-type: none"> Based on the field data of real structure Easiest to use in design 	<ul style="list-style-type: none"> Relatively easy to use in design Considers the effect of admixture Considers the effect of time on diffusivity 	<ul style="list-style-type: none"> Takes very short test period Profiling is not required Precise result with a few test Proper test method for individual project
Shortcoming	<ul style="list-style-type: none"> Diffusivity describing chloride profile at a profiling moment Not accurate for profile at another moment 	<ul style="list-style-type: none"> Many tests are required for a reliable result Needs time-consuming profiling process 	<ul style="list-style-type: none"> Not a generalized diffusivity model Is a way to check diffusivity of a specified mixture Needs informations about cover depth of other design cases at initial design state

4. 염소이온 확산계수 모델 수정제안

4.1 염소이온 확산계수 기존모델 및 측정방법

현재 내구성 설계에서 자주 사용되는 염소이온 확산계수 모델로는 JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 확산계수 모델이 있다. 여기서는 각 모델에 대하여 살펴보고 자주 사용되는 확산계수 측정방법과의 관계를 파악하고자 한다.

4.1.1 JCI 내구성지침에 의한 확산계수 모델

일본의 연구자들은 실내 침지시험에 의한 데이터 뿐만 아니라, 수년 또는 수십 년에 걸쳐 염화물 침투를 받은 현장의 콘크리트구조물에서 깊이별로 시료를 채취하여 총 염화물량을 측정하고, 이를 식 (8)로 회귀분석하여 Fig. 1과 같이 염화물 확산계수를 구하였다. 보통 시멘트에 대한 확산계수 모델은 다음과 같다.¹⁰⁾

$$D_{JCI} = 1 \times 10^{4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 12.47} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (22)$$

JCI의 염소이온 확산계수 모델은 실제 염해환경에 오랜 기간 동안 노출되어 온 현장 구조물로부터 채취한 자료를 바탕으로 한 모델이므로 그 의미가 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 이와 같이 구한 확산계수는 콘크리트가 염소이온 침투를 받아온 전체 시간에 걸친 평균적인 의미의 확산계수라 할 수 있고, 이는 해당 콘크리트에 대하여 어느 한 시점의 염소이온 프로파일을 표현할 뿐이다. 즉, JCI 모델은 다양한 재령의 콘크리트에 대하여 평균적인 의미의 확산계수들을 구하고 이를 통계분석하여

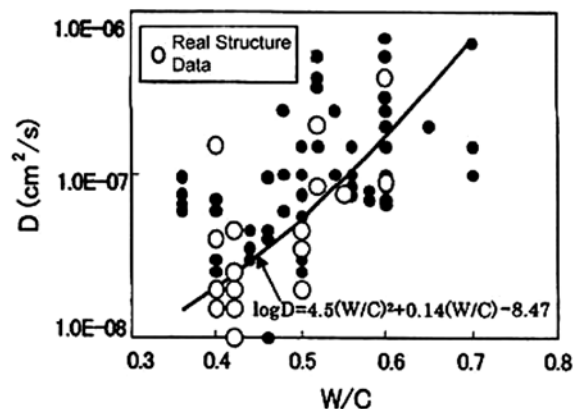


Fig. 1 Diffusion coefficient for OPC (JCI)

확산계수를 제시하였으므로 수학적으로 엄밀한 모델이라고 할 수는 없다.

한편, JCI 내구성지침에 의한 내구수명 평가는 총 염화물량 프로파일의 회귀분석에 의한 확산계수를 사용한 평가이므로, 앞의 2장에서 설명한 바와 같이 선형비례관계의 간단한 구속등온식을 가정하고 있는 방법이다.

4.1.2 ACI life-365에 의한 확산계수 모델

북미의 life-365에서는 염소이온 침투에 대한 콘크리트 구조물의 내구수명을 유한차분법으로 식 (10)의 미분방정식을 풀어 구한다. 여기서 기준 확산계수는 보통 28일 재령의 확산계수를 의미하는데, Fig. 2에 나타난 바와 같이 여러 연구자들의 침지시험에 의한 확산계수 연구 결과를 이용하여 구하였으며, 물-결합재비 (W/CM)에 따른 기준 염소이온 확산계수는 식 (23)과 같다.¹¹⁾

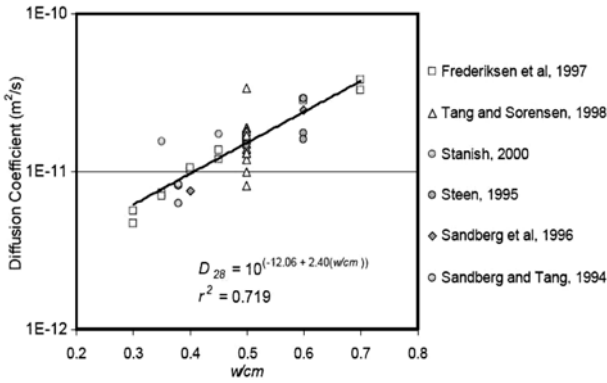


Fig. 2 Relationship between $D_{ACI,28}$ and W/CM ¹¹⁾

$$D_{ACI,28} = 1 \times 10^{-12.06 + 2.40W/CM} \text{ (m}^2\text{/s)} \quad (23)$$

여기서, 기준 확산계수는 NT build 443에 의하여 측정된 실험 결과를 대신 사용할 수 있다.

NT build 443의 개요는 다음과 같다. 28일 재령의 포화된 콘크리트를 NaCl 농도 165 kg/m^3 의 수용액, 즉 Cl 농도 100 kg/m^3 의 수용액에 35일간 침지하여 염소이온을 침투시킨다. 침지가 끝나는 시점에서 시편의 깊이별로 총 염소이온량을 측정하고 이를 식 (8)의 형태로 회귀분석하여 확산계수를 구한다. 35일의 비교적 짧은 기간 동안 침지하므로 그 동안의 확산계수가 일정하다고 보고, 깊이별로 측정된 총 염소이온량을 식 (8)을 사용하여 회귀하여 얻은 확산계수를 재령 28일에서의 기준 확산계수로 하고 여기에 식 (9)와 같은 형태로 재령효과를 고려한다.

실구조물 환경 또는 실험 환경에서 염소이온 프로파일의 회귀분석으로 구한 확산계수는 비정상상태 확산에 의한 확산계수로서 D_{nssd} 로 나타낸다.

NT build 443 방법도 총 염소이온량을 측정하여 구한 염소이온 프로파일을 오차함수를 사용한 해석법의 형태로 회귀분석하여 확산계수를 구하므로, JCI 내구성지침에서와 마찬가지로 선형비례관계의 간단한 구속등온식을 가정하고 있는 방법이다.

4.1.3 Rapid chloride migration (RCM) test

유럽에서는 콘크리트의 염소이온 확산계수를 직접 측정하여 내구수명을 예측하도록 추천하고 있는데, 여기에 NT build 492 방법이 사용된다. Tang¹²⁾은 전기영동실험에 의한 염소이온 확산계수 측정 방법을 제시하였다. 영동 (migration)이란 대전입자가 전기장에 의해 이동하는 현상을 말한다. 이 방법은 시편을 영동시험장치에 설치하고 전기장을 걸어 염소이온을 침투시킨 후, 시편 활렬면에 질산을 용액을 분무하여 측정된 염소이온 침투깊이로부터 염소이온의 확산계수를 측정하는 방법이다. 이 방법은 과거에는 보통 CTH 방법으로 불리기도 했으나 최근에는 RCM으로 불리고 있으며, 특히 1999년에는 standard nordtest method NT build 492로 채택되었다. 이렇게 구

한 확산계수는 비정상상태에서의 영동시험에 의한 것으로서 다음의 식으로 주어진다.¹²⁾

$$D_{nssm} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (24)$$

여기서, α 는 실험상수로 다음과 같다.

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (25)$$

D_{nssm} 은 고유 확산계수와 다음의 관계를 가진다.¹²⁾

$$D_i = D_{nssm} \left(1 + K_b \frac{W_{gel}}{\varepsilon} \right) \quad (26)$$

여기서, K_b 는 시멘트종류에 따른 구속능과 관계되는 상수, W_{gel} 은 C-S-H겔의 양 ($\text{kg}_{gel}/\text{m}^3_{conc}$), ε 은 공극률($\text{m}^3/\text{m}^3_{sample}$)이다.

NT build 443과 같은 비정상상태 확산실험에 의한 총 염소이온량의 프로파일로부터 구한 확산계수가 일정하지 않은 값을 가지는데 비하여, NT build 492에 의한 D_{nssm} 은 비교적 일관적인 결과를 준다고 알려져 있다.¹²⁾ 또한 이 방법은 보통 24시간 정도의 단기간에 비교적 정밀한 염소이온 확산계수 측정이 가능한 장점이 있다.

식 (7)과 (26)에 의해 비정상상태 확산시험에 의한 확산계수 D_{nssd} 와 비정상상태 영동시험에 의한 확산계수 D_{nssd} 의 관계는 다음과 같다.

$$D_i = D_{nssd} \left(1 + \frac{\partial C_b}{\partial C_f} \right) = D_{nssm} \left(1 + K_b \frac{W_{gel}}{\varepsilon} \right) \quad (27)$$

최근 종료된 유럽의 CHLORTEST 프로젝트에서는 NT build 443과 NT build 492의 상관관계를 제시하는 연구가 수행된 바 있으며 이에 따르면 두 방법에 의한 상관관계는 Fig. 3과 같다.¹³⁾

Fig. 3에서 x, y 는 각각 NT build 443과 NT build 492

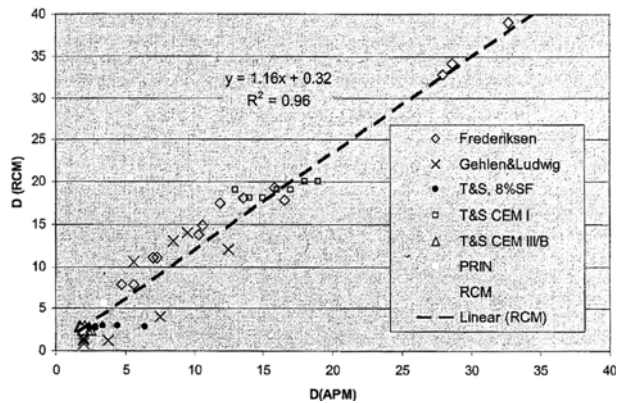


Fig. 3 Correlation between chloride diffusion coefficient from immersion test NT build 443 and migration test NT build 492 ($\times 10^{-12} \text{ m}^2\text{/s}$)¹³⁾

에 의한 확산계수, 즉 D_{nssd} 와 D_{nssm} 을 의미한다. 두 측정 방법에 의한 결과가 비교적 높은 상관계수를 보이고 있는데 NT build 492에 의한 확산계수가 다소 크게 나타났다.

4.2 ACI life-365 확산계수 모델의 수정제한

Life-365 확산계수 모델은 NT build 443 방법의 실험 결과들은 바탕으로 만들어졌는데, 이렇게 구한 확산계수는 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 침지기간 동안의 평균적인 확산계수이다. 즉, life-365에서 사용하는 기준 확산계수 모델은 엄밀한 의미에서의 28일 재령의 확산계수 (○)가 아니라 재령 28일 근처의 어느 기간 동안의 평균적인 의미의 확산계수 (■)이다.

식 (23)의 life-365 확산계수 모델은 앞의 3.3절에서 유도한 노출개시시기와 노출종료시기를 고려한 해석해인 식 (19)를 사용하여 재해석할 수 있다. 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 대하여 재령계수 $n=0.2$ 를 사용하고 침지개시시기를 t_s , 침지지속기간을 t_d 라 할 때, 식 (8)과 식 (19)를 비교하면 다음의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{D'_{ACI,28} \times t_o^n}{1-n} [(t_s + t_d)^{1-n} - t_s^{1-n}] = D_{ACI,28} \times t_d \quad (28)$$

$$D'_{ACI,28} = F_1 \times D_{ACI,28} \quad (m^2/s) \quad (29)$$

Table 2는 식 (29)의 F_1 을 나타낸 것이다. Life-365 확산계수 모델 개발을 위해 사용한 자료가 대부분 재령 28일의 시험체에 대하여 35일간 침지한 것임을 고려하면, Table 2에서 볼 때 실제 28일 재령에서의 염소이온 확산계수는 기존 모델 보다 10% 정도 증가되어야 한다는 것

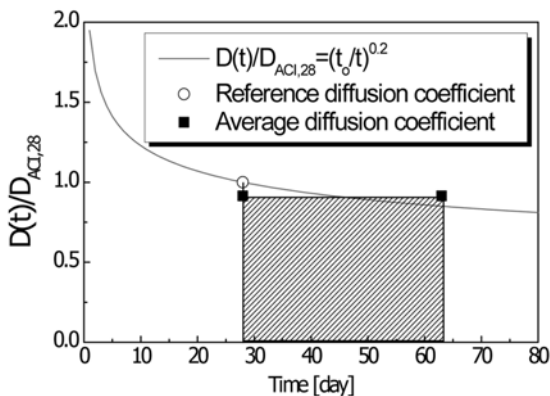


Fig. 4 Reference diffusion coefficient for OPC

Table 2 F_1 values

t_s (day) \ t_d (day)	21	28	35
28	1.039	1.079	1.115
35	1.056	1.095	1.129
56	1.102	1.136	1.166

을 알 수 있다.

위와 같이 확산계수를 수정하면 침지개시시기 $t_s=28$ 일에 대하여, Fig. 3의 NT build 443과 NT build 492⁽¹³⁾에 의한 결과의 침지지속시간별 관계도 각각 다음과 같이 변화된다.

$$y = 1.16 \left(\frac{x}{1.079} \right) + 0.32 \approx 1.075x + 0.32 \quad (30-1)$$

$$y = 1.16 \left(\frac{x}{1.095} \right) + 0.32 \approx 1.059x + 0.32 \quad (30-2)$$

$$y = 1.16 \left(\frac{x}{1.136} \right) + 0.32 \approx 1.021x + 0.32 \quad (30-3)$$

염해환경에 건설되는 콘크리트구조물을 설계할 때 직접 NT build 492에 의한 확산계수 측정 결과를 사용할 경우에는 식 (30)의 관계에 따라 보정하면 된다. 위의 회귀분석에서의 관계가 정확히 원점을 지나는 비례관계가 아닌 것은 식 (27)의 비교적 일정하지 않은 구속능 $\partial C_b / \partial C_f$ 과 비교적 일정한 값 $K_b W_{gel} / \varepsilon$ 의 차이에서 기인한 것이지만, 물시멘트비 0.35~0.50 범위에서 식 (29)에 의하면 기준 확산계수가 $6.6 \sim 15.1 \times 10^{-12} m^2/s$ 에 해당하므로 절편값은 그리 큰 영향을 주지 않는다.

Fig. 5는 식 (23) 및 (29)에서 $F_1=1.095$ 인 경우의 확산

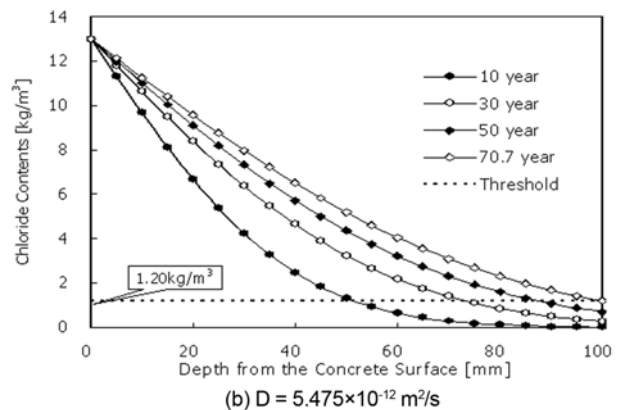
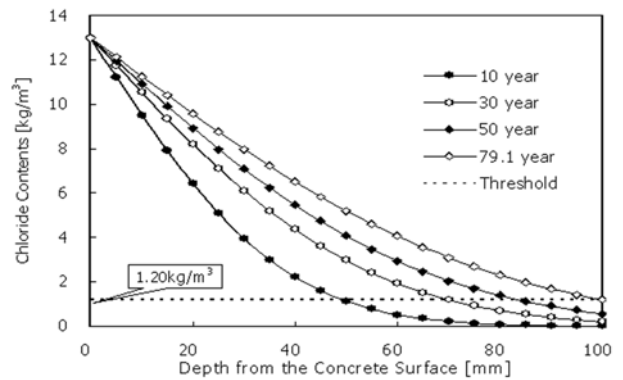


Fig. 5 Chloride profiles with original and revised diffusion coefficient of life-365 model

Table 3 Parameters for the evaluation of service life

Parameter	Value
Reference time, t_o (day)	28
Critical value, C_{cr} (kg/m ³)	1.2
Initial concentration, C_i (kg/m ³)	0
Surface concentration, C_o (kg/m ³)	13
Cover depth, x (mm)	100
Reference diffusion coefficient, D_o (m ² /s)	5.000×10^{-12} , 5.475×10^{-12}
Age factor, n	0.36

계수에 대하여 Table 3에 나타낸 물리량을 적용한 경우의 염소이온 침투 프로파일을 보인 것이다. 기존의 life-365의 확산계수 모델을 사용한 경우와 식 (29)와 같이 증가된 경우에 대한 부식개시시기는 각각 79.1년과 70.7년으로서, 수정제안된 확산계수를 사용한 경우 내구수명이 약 10% 정도 줄어든다.

수십 년에서 100년 이상에 걸친 염소이온 침투문제를 다루는데 있어서, 타설 이후 재령 28일까지의 염소이온 침투는 장기재령의 염소이온 프로파일이나 내구수명에 큰 차이를 주지 않는다. 그러나 위의 예와 같이 초기재령의 비교적 짧은 기간에서의 측정으로부터 재령 28일 기준 확산계수를 구하는 데는 염소이온 노출개시시기와 노출종료시기를 고려하는 것이 중요하다. 따라서 life-365에 의한 내구수명 예측시 기존의 확산계수 모델을 염소이온 노출개시시기 및 종료시기를 고려하여 증가시켜 사용해야 한다.

해양 환경은 매우 극심한 염해 환경이라고 할 수 있어 해양에 건설되는 콘크리트구조물 내구수명 예측이 중요한 문제로 대두되고 있다. 최근 들어 해상교량과 해안 구조물 건설이 증가되고 있는데 이런 중요 구조물에 대해서는 실제로 염소이온 침투시험을 통해 확산계수를 구하고 이를 이용하여 내구수명을 예측하려는 노력이 시도되고 있다. 여기서 NT build 443 방법을 사용할 수 있는데 이 경우에도 염소이온 노출개시시기 및 노출종료시기를 고려하여 기준 확산계수를 정해야 할 것으로 판단된다.

NT build 443 방법은 몇 주 정도의 오랜 침지기간이 필요하므로 최근에는 하루 또는 수일 이내의 비교적 빠른 측정이 가능한 NT build 492 방법이 이용되기도 한다. 이 경우에도 Table 2 또는 식 (30)의 관계를 고려하여 기준 확산계수를 산정하고, 식 (15) 또는 (19), 식 (17) 또는 (21)을 각각 사용해야 한다.

4.3 JCI 확산계수 모델의 기준 확산계수 추정

JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 확산계수 모델은 그 모델 정립과정이 다르므로 두 모델을 직접적으로 비교하기는 어렵다. JCI의 확산계수 모델은 물시멘트비의 함수로만 확산계수를 표현하고 있으며 이 모델을 만들기 위해 사용된 많은 콘크리트의 재령은 고려되지 않고 있지만, 오랜 재령의 현장 데이터들을 이용했다는 점에서 의

미가 크다. 이에 비해 ACI 모델은 특정 재령에서의 기준 확산계수를 제시하고 다른 시점에서는 재령의 효과를 고려하도록 하고 있으므로, 타설 후 시간 경과에 따라 수화반응이 계속되어 콘크리트의 공극구조가 점차 조밀해지는 일반적인 경향을 어느 정도 반영할 수 있는 장점이 있다. 따라서 콘크리트의 시간에 따른 경화현상을 고려할 때는 ACI 확산계수 모델이 더욱 바람직하다고 하겠다. Fig. 6은 OPC에 대한 기존의 ACI life-365 기준 확산계수와 JCI 확산계수 모델을 함께 도시한 것이다.

여기서는 JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 모델의 비교 및 두 모델의 관계를 명확히 하기 위하여 JCI 확산계수 모델의 28일 재령의 기준 확산계수 $D_{JCI,28}$ 을 추정해 보고자 한다. 단, JCI 모델식을 평가함에 있어 재령의 효과는 식 (9)와 같은 형태를 취한다고 가정하였다.

JCI 모델에는 오랜 기간 동안 염소이온 환경에 노출된 현장데이터가 많이 포함되어 있으므로 염소이온 침투시간이 상당히 길다고 할 수 있다. 따라서 침지지속기간이 10년에서 50년으로 다양한 경우에 대하여 평가를 수행하였다. 염소이온 노출개시시기는 21일, 28일, 35일의 세 경우로 가정하였다. 앞의 4.2절에서와 마찬가지로 식 (8)과 식 (19)를 비교하면 다음과 같다.

$$\frac{D_{JCI,28} \times t_o^n}{1-n} [(t_s + t_d)^{1-n} - t_s^{1-n}] = D_{JCI} \times t_d \quad (31)$$

$$D_{JCI,28} = F_2 \times D_{JCI} \text{ (m}^2\text{/s)} \quad (32)$$

Table 4는 다양한 노출개시시기 및 침지지속기간에 대한 F_2 를 나타낸 것으로, 노출개시시기 보다 침지지속기간이 큰 영향을 미친다.

식 (32)에 식 (29)를 변형 나누면 두 모델의 기준 확산계수를 비교할 수 있다.

$$\frac{D_{JCI,28}}{D'_{ACI,28}} = \frac{F_2}{F_1} \times 10^{4.5(W/C)^2 - 2.26(W/C) - 0.41} \quad (33)$$

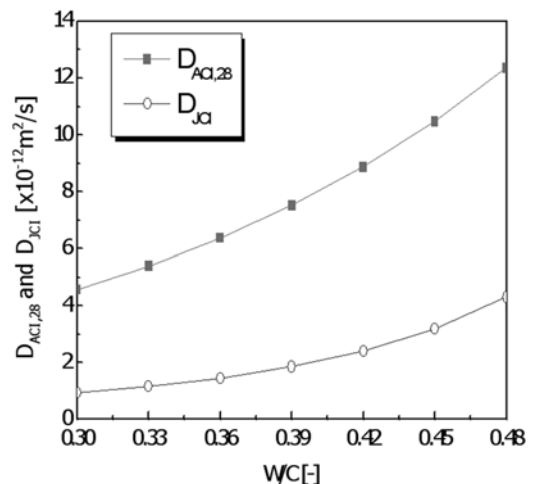


Fig. 6 Comparison of chloride diffusion coefficient model

Table 4 F_2 values

t_d (year) \ t_s (day)	21	28	35
10	2.144	2.149	2.155
20	2.451	2.455	2.459
30	2.653	2.657	2.660
40	2.808	2.810	2.813
50	2.934	2.936	2.939

F_2/F_1 은 Table 2와 Table 4에 나타난 값의 조합에 의해 1.839~2.829의 값이다. 물시멘트비 0.30~0.48의 범위에서 식 (33)은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 빗금 영역에 있어 항상 1 보다 작으므로, 기준 확산계수를 비교할 경우 ACI life-365 모델의 기준 확산계수가 JCI 모델의 기준 확산계수 보다 크다. 따라서 동일한 표면 염소이온 농도를 적용할 경우 ACI life-365 방법으로 내구수명을 예측한 경우가 더 보수적인 결과를 준다.

4.4 표면 염소이온 농도와 확산계수

염소이온 확산계수와 더불어 염소이온 침투에 대한 콘크리트구조물의 내구수명을 평가하는데 매우 중요한 물리량으로 표면 염소이온 농도를 들 수 있다. JCI에서는 표면 염소이온 농도를 해안선으로부터의 거리에 따라 제시하고 있는데, 이는 많은 현장 프로파일들에 대하여 확산계수와 표면 염소이온 농도를 동시에 변수로 두고 회귀분석하여 얻은 자료를 바탕으로 한 것이다. 따라서 JCI에서 제시하는 표면 염소이온 농도값은 물리적 의미가 다소 부족하므로 우리나라에 그대로 적용하기에는 미흡한 점이 있다.

ACI life-365에서도 비말대와 수중부, 그리고 해안으로부터의 거리에 따라 표면 염소이온 농도값을 제시하고 있는데, 예를 들어 수중부의 경우 콘크리트 중량비를 최대 0.8%로 하고 있다. 단위중량 2,300 kg/m³인 수중부 콘크리트에 대한 표면 염소이온 농도의 최대값 18.4 kg/m³

를 노출순간부터 즉시 가하고 있다. 이에 비해 JCI에서는 9~13 kg/m³ 정도의 값을 즉시 가하고 있다. ACI life-365에서 제시하는 값은 최대 표면 염소이온 농도이므로 내구성 설계시 각 환경에 적합한 값을 설계자가 선택해야 한다. 실제로 유럽의 HETEK 프로젝트의 일부자료¹⁴⁾를 보면 NT build 443으로 측정된 프로파일에서 대부분의 표면 염소이온 농도가 콘크리트 중량비 0.7~0.9%에 있으며, 이는 ACI life-365에서 제시하는 최대값과 비슷한 범위이다. 전술한 바와 같이 NT build 443은 CI 농도를 바닷물의 5배에 이르는 100 kg/m³의 수용액에서 시험을 실시하므로, 실제 내구수명 예측을 위해 ACI life-365의 최대값을 그대로 사용하기에는 무리가 있다.

염소이온 침투에 대한 내구수명 예측을 위해서는 표면 염소이온 농도를 정립이 필요할 것으로 판단된다. 해중 환경에 있는 콘크리트의 표면 염소이온 농도는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. 콘크리트에 존재하는 염소이온의 양은 자유 염소이온량과 구속 염소이온량을 각각 구하면 알 수 있다. 콘크리트의 공극량을 15%, 단위중량을 2,300 kg/m³, 해수의 자유 염소이온 농도를 20 kg/m³이라 하면 표면에 존재하는 자유 염소이온의 콘크리트 단위중량에 대한 비율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{s,f} = \frac{20 \text{ kg/m}^3_{sol} \times 0.15 \text{ m}^3_{sol}/\text{m}^3_{conc}}{2,300 \text{ kg/m}^3_{conc}} = 0.13\% \quad (33)$$

다음으로 표면의 구속 염소이온량을 구해 보자. Tang 등은 여러 가지 물시멘트비의 페이스트와 모르타르에 대하여 자유 염소이온의 농도와 C-S-H의 중량에 대한 구속 염소이온 중량의 관계를 Fig. 8과 같이 제시하였다.¹²⁾

자유 염소이온 농도 20 kg/m³에 대응하는 구속 염소이온량은 C-S-H 중량에 대한 비율 11.144 g/kg이며, 일반적인 콘크리트 배합조건과 수화도를 고려하면 콘크리트 단위중량에 대한 C-S-H의 중량은 15~20% 정도이므로, 콘

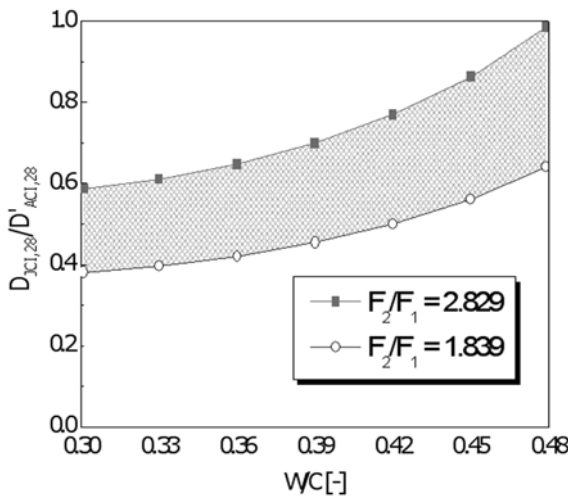


Fig. 7 $D_{JCI,28}/D'_{ACI,28}$

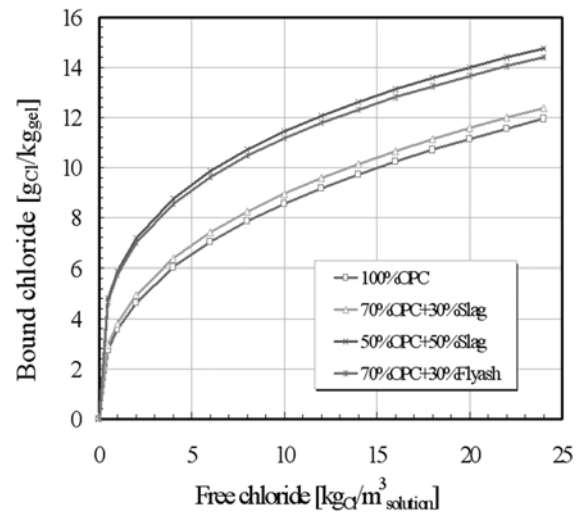


Fig. 8 Chloride binding isotherm (reproduced from Tang et.al.¹²⁾)

크리트 단위 중량에 대한 구속 염소이온 중량의 비율은 0.17~0.22%에 해당한다. 따라서 해수중 콘크리트 표면의 총 염소이온 농도는 콘크리트 단위중량비 0.30~0.35%이며, 단위중량이 2,300 kg/m³인 콘크리트의 경우 표면 염소이온 농도 6.9~8.1 kg/m³에 해당한다.

수중부 이외의 부분에서는 부식의 가능성 및 산소 공급도 등을 고려하여 수중부값을 기준으로 하여 증가 또는 감소시켜 사용하는 것이 바람직하다. 앞으로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 JCI 확산계수 모델과 ACI life-365 확산계수 모델에 대한 평가를 수행하였다. 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트가 염소이온 환경에 노출되기 시작하는 시기를 고려한 확산방정식의 해석해를 유도하였다.
- 2) NT build 443 시험방법에 대하여 염소이온 노출개시시기를 고려한 해석해를 적용하여, ACI life-365 확산계수 모델이 10% 내외 정도로 확산계수가 증가되도록 수정되어야 함을 밝혔다.
- 3) 염소이온 확산계수 측정실험을 통하여 내구수명을 예측하는데 있어, NT build 443 방법과 NT build 492 방법에 의한 확산계수 간의 기존관계를 개선하였다.
- 4) 기존 JCI 확산계수 모델에 대한 기존 확산계수를 구하고 ACI life-365 확산계수 모델과 비교하였다. 비교결과 일반적으로 사용하는 물시멘트비 범위에서 ACI life-365 확산계수 모델에 의한 내구수명 예측이 더 보수적인 결과를 줌을 확인하였다.
- 5) 염소이온 구속능에 대한 기존 연구 결과를 사용하여 수중부에 대한 표면 염소이온 농도를 산정하는 방법을 제시하였다.

확산방정식의 해를 통한 염소이온 침투에 대한 내구수명 예측 및 내구성 설계를 위해서는 확산계수와 표면 염소이온 농도에 대한 정확한 평가가 선행되어야 한다. 우리나라 환경에 적용할 수 있는 확산계수 모델 및 표면 염소이온 농도의 기준이 명확하지 않기 때문에, 콘크리트구조물의 내구수명 평가에서 확산계수 모델과 표면 염소이온 농도의 선택에 다소 혼동이 있다. NT build 443 방법과 NT build 492 방법이 좋은 상관관계를 보여주고 있고, ACI 확산계수 모델이 JCI 확산계수모델에 비해 보수적인 결과를 준다. 표면 염소이온 농도의 선택은 각 해양환경에 적합한 값을 사용해야 하며 수중부 콘크리트의 경우를 기준값으로 하여 환경조건별로 증가 또는 감소시키는 등의 기준정립이 시급하다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 건설교통부의 지원사업인 콘크리트코리아연구단의 “고성능다기능 콘크리트의 개발 및 활

용기술” 과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Saetta, A. V., Scotta, R. V., and Vitaliani, R. V., “Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 5, 1993, pp. 441~451.
2. Martin-Perez, B., “Service Life Modeling of RC Highway Structures Exposed to Chlorides,” Ph.D. Dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada, 1999, 168 pp.
3. Jang, S. Y., “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, 2003, 275 pp.
4. 구현본, 김의태, 이광명, “철근콘크리트구조물의 염소이온 침투 모델,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 6호, 2003, pp. 25~34.
5. Alonso, C., Castellote, M., and Andrade, C., “Chloride Threshold Dependence of Pitting Potential of Reinforcements,” *Electrochimica Acta*, Vol. 47, 2002, pp. 3469~3481.
6. Moreno, M., Morris, M., Alvarez, M. G., and Duffo, G. S., “Corrosion of Reinforcing Steel in Simulated Concrete Pore Solutions-Effect of Carbonation and Chloride Content,” *Corrosion Science*, Vol. 46, 2004, pp. 2681~2699.
7. 양승규, 김동석, 엄태선, 이종열, 河野克哉, “단위시멘트량이 다른 콘크리트 중에서의 철근부식 임계염화물량에 관한 연구,” 콘크리트학회 논문집, 20권, 4호, 2008, pp. 415~421.
8. Collepardi, M., Marciallis, A., and Turriziani, R., “Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concrete,” *American Ceramic Society*, Vol. 55, No. 10, 1972, pp. 534~535.
9. Maage, M., Helland, S. Poulsen, E., Vennesland, Ø., and Carlsen, J., “Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment,” *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp. 602~608.
10. 일본콘크리트공학협회, 내구성설계지침(안), 일본콘크리트공학협회, 1991, 76 pp.
11. Bentz, E. C. and Thomas, M. D. A., *Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, January 8, 2008, 67 pp.
12. Tang, L., “Chloride Transport in Concrete-Measurement and Prediction,” Ph.D. Dissertation, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996, 88 pp.
13. Rob B. Polder, Gert van der Wegen, and Michel Boutz, “Performance Based Guideline for Service Life Design of Concrete for Civil Engineering Structures-A Proposal Discussed in the Netherlands,” *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, 19~21 March 2006, Madrid, Spain, 10 pp.
14. Frederiksen, J. M., Sørensen, H. E., Andersen, A., and Klinghoffer, O., “HETEK, The Effect of the w/c Ratio on Chloride Transport into Concrete-Immersion, Migration and Resistivity Tests,” *Report No. 54*, 1997, 35 pp.

요 약 ACI life-365 기준확산계수 모델은 NT build 443 방법에 의한 시험 결과들로부터 만들어졌다. 이 방법은 침지기간 동안의 시간평균 확산계수를 구하는 방법이므로 ACI에서는 침지기간 동안의 시간평균 확산계수를 기준확산계수로 정의한 것이다. ACI 모델에서는 재령에 따른 감소효과를 지수함수 형태로 표현하고 있으므로 이를 고려한 ACI 기준확산계수 모델의 수정이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 염소이온 노출개시기를 고려한 확산방정식의 해석해를 유도하고, 이를 사용하여 NT build 443 방법의 시간평균 확산계수를 기준재령의 확산계수로 변환하였다. 연구결과 life-365 기준확산계수 모델은 기존 값 보다 10% 정도 증가되고 수정되어야 함을 밝혔으며, 이에 따라 NT build 443 방법과 NT build 492 방법의 기존관계를 수정하여 내구수명 평가에 이용할 수 있도록 하였다. JCI 확산계수모델과 ACI 확산계수모델의 직접적인 비교를 위하여 JCI 확산계수모델에 대응하는 기준확산계수를 유도하였으며, 이를 통해 JCI 모델보다 ACI 모델이 더 보수적인 결과를 나타내는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 노출개시시기, 확산방정식, 확산계수, NT build 443, NT build 492