



촉진염화물 확산계수의 시간의존성을 고려한 고성능 콘크리트의 염화물 침투 해석기법

권성준¹⁾ · 박선규^{2)*}

¹⁾한남대학교 건설시스템공학과 ²⁾목원대학교 건축학부

Analysis Technique for Chloride Penetration in High Performance Concrete Behavior Considering Time-Dependent Accelerated Chloride Diffusivity

Seung-Jun Kwon¹⁾ and Sun-Gyu Park^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

²⁾Dept. of Architectural Engineering, Mokwon University, Daejeon 302-729, Korea

ABSTRACT Recently, accelerated chloride diffusion coefficients are used for an evaluation of chloride behavior. Similar as apparent diffusion coefficients, accelerated diffusion coefficients decrease with time. In this study, decrease in diffusion coefficient with time is simulated with porosity. Utilizing DUCOM-program, porosities from 15 mix proportions are obtained and diffusion coefficients are modelled with regression analysis of porosity for 270 days. Considering non-linear binding capacity which means the relation between free and bound chloride ion, chloride behavior in high performance concrete is evaluated. Through utilizing the previous test results for concrete under chlorides for 180 days, the applicability of the proposed technique is verified. The proposed technique is evaluated to reasonably predict the chloride behavior in concrete with various w/c (water to cement) ratios and mineral admixtures (GGBFS and FA). It is also shown that decrease in chloride diffusion should be considered for chloride prediction in concrete with mineral admixture since it has very clear decrease in diffusivity with time.

Keywords : accelerated chloride diffusion coefficient, high performance concrete, time-dependent, mineral admixture, chloride behavior

1. 서 론

콘크리트 구조물은 내구적이며 경제적인 구조물이지만, 염해에 노출된 RC(reinforced concrete) 구조물은 매립된 철근이 부식함에 따라 내구성 및 안전성에 문제가 발생한다.^{1,2)} 콘크리트내의 염화물 침투를 평가하기 위해서 많은 연구가 수행되고 있는데, 해석적인 관점에서는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 장기간의 침투를 통하여 도출된 겉보기 확산계수를 이용하는 방법이고 나머지는 전기장내의 염화물 이온 속도로부터 도출되는 촉진염화물 확산계수를 이용하는 방법이다. 전자의 경우, 실질적인 염화물량을 직접적으로 연구자들에게 제공할 수 있고 간단한 Fick의 법칙을 적용하므로 많이 사용되고 있다.^{3,4)} 다만 수중 침투조건과 같은 정상상태의 경우에 국한하여 사용되므로 적용성에 제한을 갖기도 한다.⁵⁾ 촉

진염화물 확산계수는 전기장 내에서의 자유염화물 이온 속도를 나타내므로 실험이 비교적 간편하고 시간이 적게 걸리지만, 염화물 침투 해석을 하기 위해서는 자유염화물과 고정염화물의 상평형이 고려되어야 한다.^{6,7)} 또한 최근 들어 포화도, 공극률 같은 초기재령 콘크리트 거동이 포함되면서 연성해석 프레임 구축해야하는 어려움을 가지고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

겉보기 확산계수 또는 촉진확산계수 모두 시간의존적인 특성을 가지는데, 이는 콘크리트 모재의 수화물이 계속 형성되면서 공극률이 감소하고, 시간에 따라 염화물 농도구배가 감소하므로 확산계수는 점차적으로 감소하게 된다. 겉보기 확산계수의 시간의존성 변화는 지수함수 등을 가정하여 많은 연구가 진행되었고, 혼화재 치환율 등을 고려하여 시간지수를 변화시킴으로서 시간의존성 확산계수를 해석에 사용하고 있다.^{3,5,11)} Life 365와 같은 프로그램 역시 시간지수의 변화에 따라 감소하는 확산계수를 고려할 수 있도록 고안되었다. 또한 기존 연구에서는 주어진 시간내에서 이동된 염화물량이 같다는 가정하에, 평균화된 확산계수를 고려한 연구가 제안되어, 염

*Corresponding author E-mail : psg@mokwon.ac.kr
 Received August 14, 2012, Revised October 29, 2012,
 Accepted November 27, 2012
 ©2013 by Korea Concrete Institute

화물 거동의 시간의존적 해석에 많이 사용되고 있다.¹²⁾

축진확산계수의 경우, 측정시간이 수시간 이내이므로 단기적인 확산성(염화물 이온 이동성)을 측정하게 된다. 그러나 같은 콘크리트 시편이라 하더라도 장기간동안 수중 양생된 시편에서 측정된 축진확산계수는 공극률의 감소에 따라 변화하게 된다.

이 연구는 시간의존성을 가지는 축진염화물 확산계수를 간단하게 공극률의 함수로 구현하여 염화물 침투를 해석할 수 있는 기법을 개발하는 것이다. 이를 위해 28일에서 270일 동안 수중양생된 고성능 콘크리트(HPC: high performance concrete) 시편을 대상으로 Tang's Method로 알려진 비정상상태 축진확산계수에 대한 실험 결과를 이용하였다.¹³⁾ 실험적으로 각 배합 및 재령의 공극률을 도출할 수 없으므로 DUCOM 프로그램을^{10,14)} 활용하여 각 배합 및 재령별 공극률을 도출하였으며, 확산계수를 간단한 실험상수와 공극률의 함수로 모델링하였다. 또한 고로슬래그미분말(GGBFS: ground granulated blast furnace slag)과 플라이애쉬(FA: fly ash)를 사용한 고성능 콘크리트의 고정화율을 개선하고, 최종적으로 확산계수 모델링과 통합하여 염화물 침투를 예측할 수 있는 해석기법을 제시하였다.

일반적으로 축진확산계수를 실험적으로 도출하여 염화물 해석시 상수로 사용하고 있는데, 이럴 경우 염화물 해석을 과다하게 예측하게 된다. 재령에 따른 공극률의 감소를 고려한 염화물 해석을 통하여 더욱 합리적인 염화물 침투를 예측할 수 있다.

2. 시간의존적 확산계수

2.1 겉보기 확산계수의 시간의존성

겉보기 확산계수는 1980년대 이후 많은 연구가 수행되고 있으며, 식 (1)과 같은 지수함수의 형태를 가지고 있다.^{2,4)}

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (1)$$

여기서, D_{ref} 는 기준시간(t_{ref})에 따른 기준확산계수를 나타내며 t 는 재령을 나타낸다. 식 (1)은 실태조사 결과로부터 도출된 것이며, 30년 이후부터는 일정하다고 보고되고 있다. 확산계수를 시간에 따라 회귀분석한 식은 연구자에게 근사값을 쉽게 제공할 수 있으나, 물리적인 면에서는 설명이 되지 않는다. 왜냐하면 재령에 따라 변화하는 공극률, 수화물, 그리고 농도가 낮은 영역에서 발생하는 낮은 농도구배가¹⁵⁾ 확산성 감소의 원인이 되는 물리적인 양이기 때문이다. 식 (1)에서 해수에 노출되는 시간을 고정하면, 식 (2a) 및 식 (2b)와 같은 함수로 구현할 수 있다.¹²⁾

$$\bar{D} = \frac{1}{t} \int_0^t D_0 \left(\frac{t_0}{\tau} \right) d\tau = D_0 \frac{t_0^m}{t} \left[\frac{\tau^{1-m}}{1-m} \right]_0^t = \frac{D_0}{1-m} \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (2a)$$

$(t < t_c)$

$$\bar{D} = D_0 \left[1 + \frac{t_c}{t} \left(\frac{m}{1-m} \right) \right] \left(\frac{t_0}{t_c} \right)^m \quad (2b)$$

$(t \geq t_c)$

여기서, \bar{D} 는 평균화된 겉보기 확산계수, t_c 는 시간의존성이 작아지는 시점, 즉 확산계수가 일정하다고 가정되는 시점을 의미하며 일반적으로 30년으로 가정되고 있다.¹²⁾

2.2 축진확산계수의 시간의존성

축진확산계수의 시간의존성에 대해서는 뚜렷한 연구 결과는 없는 상태이며, 식 (1)을 가정하여 해석에 적용하기도 한다. 최근들어 NN(neural network)기법을 이용하여 축진확산계수를 도출하고 염화물 해석을 수행한 연구가 있다.¹⁶⁾ 최근들어 공극구조의 변화를 고려한 염화물 이온 확산계수가 제안되고 있는데 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$D_d = - \frac{\phi S}{\Omega} \delta D_0 \quad (3)$$

여기서, D_d 은 콘크리트내의 염화물 이온 확산계수, ϕ 는 공극률, S 는 포화도, D_0 는 수용액중의 기본 확산계수, Ω 는 미세공극구조의 복잡함으로 인해 나타나는 감소계수인 조도계수(tortuosity factor), δ 는 공극과 이온 이동사이의 상호작용에 따른 감소계수인 굴곡계수(constrictivity)를 나타낸다. 식 (4)에서는 조도계수를, 식 (5)에서는 굴곡계수를 나타내고 있다.¹⁰⁾

$$\Omega = -1.5 \tanh(3.0\phi - 0.25) + 2.5 \quad (4)$$

$$\delta = 0.395 \tanh 4.0(\log r_{cp}^{peak}) + 6.2 + 0.405 \quad (5)$$

여기서, r_{cp}^{peak} 는 모세관 공극의 최대값을 나타낸다.

이렇게 제안된 식들은 확산계수의 감소를 시간의존성이 아닌 공극구조의 복잡성과 공극의 감소를 통하여 제시하였으나, 실제에 적용하기에는 많은 가정과 변수를 포함하고 있으므로 사용이 어려운 단점이 있다. 특히 식 (5)는 DUCOM 프로그램에서만 도출될 수 있는 함수를 고려하고 있으므로 일반화시켜 적용하기에는 매우 제한적이다.

3. 시간의존적 확산계수를 고려한 염화물 해석

3.1 공극구조를 고려한 확산계수 모델링

이 절에서는 촉진확산계수의 모델링을 위해 기존의 촉진확산계수 실험자료 및 배합자료를 이용하였다.^{17,18)} 기존의 배합자료 및 양생조건을 입력조건으로 하고 DUCOM 프로그램의 MPSFM(micro pore structure formation model)을 활용하여 각 재령에 맞는 공극률을 구현하였다. 각 재령 및 배합에 따른 공극률을 실험적으로 도출하는 것이 가장 바람직하지만, 실험 결과가 없으므로 해석프로그램을 사용한 것이다.

기존의 실험에서는¹⁸⁾ Tang's Method를 사용하여 비정상 상태의 확산계수를 도출하였다. 식 (6) 및 (7)은 확산계수 도출식을 나타내고 있으며, Table 1에서는 실험조건을 나타내고 있다.

$$D_{r_{cpd}} = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - a\sqrt{d}}{t} \quad (6)$$

$$a = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right] \quad (7)$$

여기서, $D_{r_{cpd}}$ 는 비정상 상태에서 구한 전위차 촉진 염소 이온 확산계수(m^2/sec), R 은 기체상수($8.314 J/mol.K$), T 는 절대온도(K), L 은 시편두께(m), z 는 이온전자가(1.0), F 는 패러데이상수($96500 J/V.mol$), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 침투깊이(m), t 는 전위차 적용시간(sec), C_d 는 비색법에 의한 반응농도(mol/l), C_0 는 음극셀의 염소이온농도(mol/l)를 나타낸다.

해석에 이용한 실험자료에서는^{17,18)} 수중양생을 거친 시편에 대하여 재령 28일, 91일, 180일, 270일에 걸쳐 염화물 촉진실험이 수행되었다. 식 (3)은 공극구조에 기반한 확산계수의 변화를 나타내고 있으나, Ω (조도계수) 및 δ (굴곡계수)를 도출하여 적용하기에는 많은 제한사항이 있다. 공극률, 조도계수 등을 포함한 확산계수가 ϕ_{28} (재령 28일의 공극률)을 기준으로 감소한다고 가정하면 간단한

실험상수의 도입을 통하여 지수함수로 구현할 수 있다. 이러한 공극률의 지수함수형태의 확산계수 모델링은 기존의 연구에서도 찾아볼 수 있다.¹⁹⁾ 식 (3)은 ϕ_{28} 을 이용하여 식 (8)과 같이 가정하였다.

$$D_d = N \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{28}}\right)^n \cdot D_0 \quad (8)$$

여기서, D_d 은 촉진 염화물이온 확산계수, D_0 는 수용액속의 기본 염화물 확산계수로 291K에서 $1.22 \times 10^{-9} (m^2/sec)$ 의 값을 가진다.¹⁵⁾ 실험상수 N 과 n 은 실험값(촉진확산계수)¹⁸⁾과의 회귀분석을 통하여 도출하였다. 실험에서 인용한 배합표는 Table 2와 같으며, 확산계수 회귀분석 결과는 Table 3에 정리하였다. 각 배합에 따른 회귀분석 결

Table 2 Mix proportions for high performance concrete¹⁸⁾

Items Names of mix.	w/b (%)	Unit weight (kg/m ³)						Binder%		
		W	Binder materials				S	G	Admixture	
			C	GGBS	FA	SF			SP	AE
OPC100-37	37	168	454	-	-	-	767	952	1.0	0.017
OPC100-42	42	168	400	-	-	-	787	976	0.9	0.015
OPC100-47	47	168	357	-	-	-	838	960	0.85	0.017
G30N70-37	37	168	318	136	-	-	762	946	0.8	0.018
G30N70-42	42	168	280	120	-	-	783	972	0.75	0.013
G30N70-47	47	168	250	107	-	-	835	956	0.65	0.015
F10N90-37	37	168	409	-	45	-	760	943	0.75	0.018
F10N90-42	42	168	360	-	40	-	780	969	0.9	0.021
F10N90-47	47	168	321	-	36	-	832	952	0.75	0.017
F20N80-37	37	168	363	-	91	-	752	934	0.75	0.018
F20N80-42	42	168	320	-	80	-	774	961	0.85	0.025
F20N80-47	47	168	286	-	71	-	826	946	0.7	0.017
F30N70-37	37	168	318	-	136	-	745	952	0.75	0.2
F30N70-42	42	168	280	-	120	-	768	953	0.75	0.015
F30N70-47	47	168	250	-	107	-	820	939	0.65	0.019

Note) w/b : water to binder ratio, S: sand, G : gravel, SP: super-plasticizer, AE: air entrainer

Table 1 Conditions for rapid chloride penetration test

Conditions		Levels	Setup
Electrolyte	Cathode	0.5 mole NaCl	
	Anode	Saturated Ca(OH) ₂	
Applied voltage (V)	30		
Thickness (mm)	50		

Table 3 Results from regression analysis

Type	$D_d = N \cdot \left(\frac{\phi}{\phi_{28}}\right)^n \cdot D_0$	
	N	n
OPC100	$0.0404(w/c) - 0.0041$	7.882
G30N70	$0.0211(w/b)$	8.820
F10N90	$0.0241(w/b) + 0.0025$	11.497
F20N80	$0.00501(w/b) - 0.0079$	16.721
F30N70	$0.072(w/b) - 0.0163$	17.551

과와 실험값의 변화는 Fig. 1에 나타내었다.

Table 2에서 OPC100-37은 OPC(ordinary portland cement)를 100%(중량비)로 사용한 것을 의미하고 37은 물-시멘트비를 나타낸다. G30N70-37은 GGBFS의 치환률(중량

비) 30%를 나타내고 N70은 OPC의 중량비 70%를 의미한다. 37은 물-결합재비를 나타내고 있다. F는 FA를 나타내며 나머지 표기방법은 GGBFS와 동일하다.

Table 3에서는 공극률로 구성된 회귀분석식과 혼화재

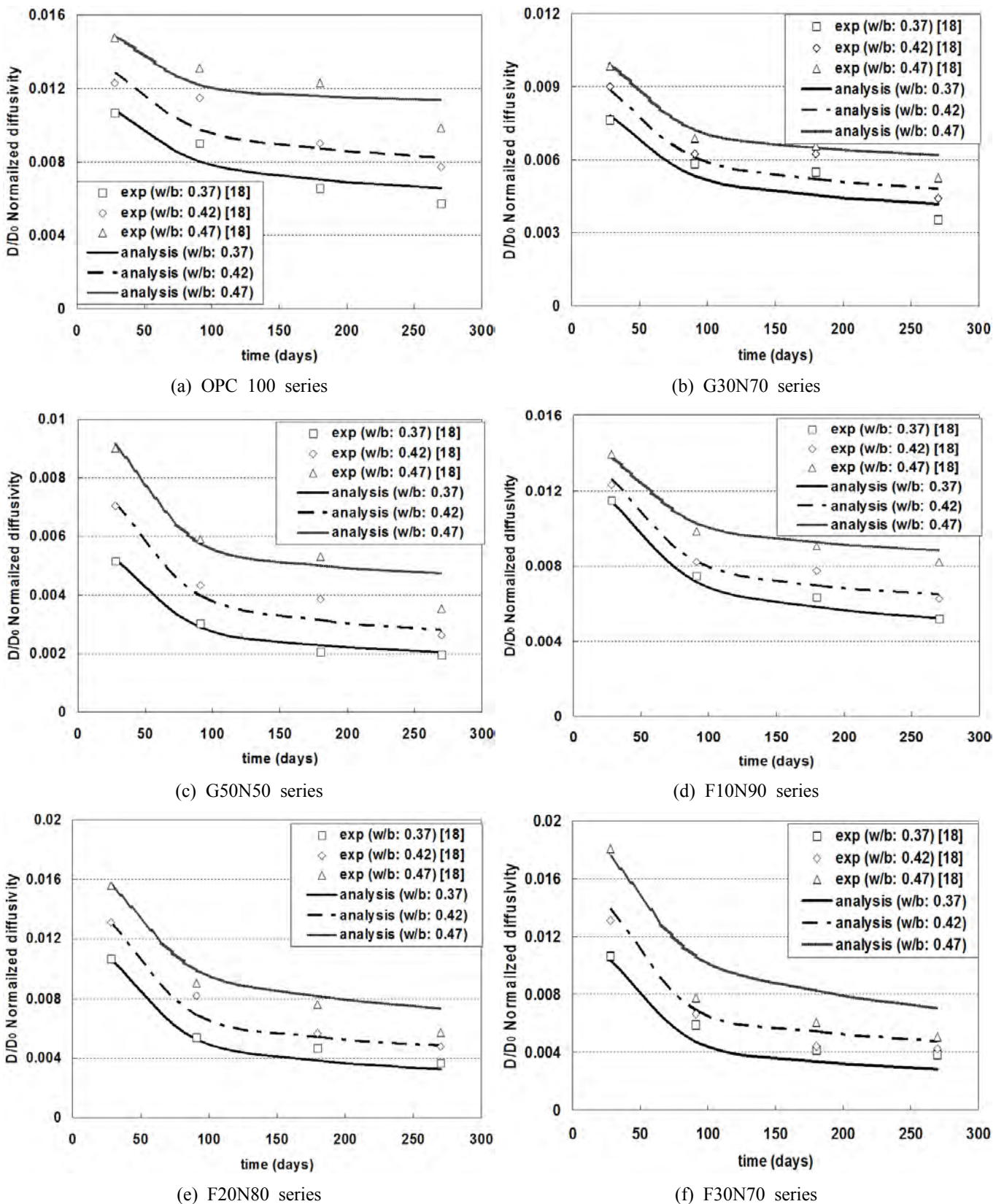


Fig. 1 Comparison of diffusion coefficient with test and analysis results

를 고려할 수 있는 N, n 을 제시하였다. 그러나 식 (3)과 마찬가지로 공극률과 조도계수, Knudsen 효과 등이 고려된 굴곡계수 등이 고려되어 확산계수 식을 제안할 필요가 있다. 다만 현상학적인 모델링에 충실하여 복잡하게 구현된 식보다는 경향을 충분히 따를 수 있도록 간단한 함수식의 제안이 요구된다.

3.2 자유염화물과 고정염화물과의 상평형

축진염화물 이온을 이용하여 염화물 해석을 하기 위해서는 자유염화물과 고정염화물 관계인 구속능(binding capacity)이 설정되어야 한다. 기존의 연구에서는 선형, 비선형 isotherm에 대한 관계가 제안되었으며,²⁰⁾ 최근들어 Freundlich isotherm에 대한 관계가 많이 사용되고 있다.²¹⁾ 이 연구에서는 자유염화물 이온과 고정염화물 이온을 중량비로 산출하여 관계를 도식한 연구를 수정하여 해석을 수행하도록 한다.¹⁰⁾ 식 (9)에서는 비선형 구속능을 나타내고 있으며, Fig. 2에서는 이를 그림으로 나타내었다.

$$C_b = A \left(\frac{\alpha C_f}{1 + 4.0 C_f} \right) \quad (9)$$

여기서, C_b 및 C_f 는 고정염화물 및 자유염화물량(% of binder mass)을 나타내고 있으며, α 는 혼화재료의 특성을 고려하여 식 (10a~10c)와 같이 구현된다.¹⁰⁾

$$\alpha = 11.8 \quad (10a)$$

$$\alpha = -34.0b^2 + 23.3b + 11.8 \quad (0 \leq b \leq 0.6) \quad (10b)$$

$$\alpha = -15.5f^2 + 1.8f + 11.8 \quad (0 \leq f \leq 0.4) \quad (10c)$$

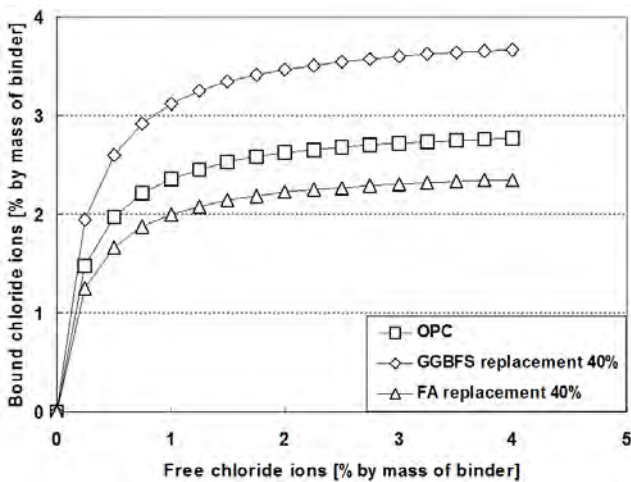


Fig. 2 Binding capacity of chlorides¹⁰⁾

여기서, b 와 f 는 GGBFS 및 FA의 중량치환율(%)을 나타내고 있다. 이 연구에서는 고정염화물이 과다하게 평가되었다고 판단하여 A 를 0.6으로 가정하였다. Fig. 2에서는 GGBFS 40% 치환인 경우, FA 40% 치환인 경우, OPC를 사용한 경우에 대하여 식 (9)를 도식한 것이다.

4. 열역학 연성해석 및 검증

4.1 염화물 거동해석을 위한 연성해석

4.1.1 지배방정식 구성

콘크리트와 같이 다공질매체를 통과하는 염화물 이온의 지배방정식은 식 (11)과 같이 구성할 수 있다.

$$\frac{\alpha_d \partial C_d}{\partial t} + \text{div}(J_d) + Q_d = 0 \quad (11)$$

여기서, α_d 은 염화물의 비용량(ϕS)을 나타내고, 처음항을 포텐셜항(potential term)이라고 한다. $\text{div}(J_d)$ 은 확산항(flux term)을 나타내는데 침투와 확산을 동시에 고려하는 것으로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.¹⁰⁾

$$J_d = - \left[q_s + \frac{\phi S \delta}{\Omega} D_d \frac{\partial C_d}{\partial x} \right] \quad (12)$$

여기서, q_s 는 1차원 유속(m/s)을, C_d 은 염화물이온(mol/l)의 농도를 나타낸다. 식 (12)에서 플럭스 항을 이 연구에서 도출된 공극률의 함수로 구현하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_d = - \left[q_s + N \left(\frac{\phi}{\phi_{s8}} \right)^n D_0 \frac{\partial C_d}{\partial x} \right] \quad (13)$$

마지막 Q_d 은 소멸항으로서 단위시간에 고착화되는 염화물량을 나타내고 있으며 이 연구에서는 기존의 이론을 이용하여 식 (4)와 같이 나타내었다.^{10,14)}

$$Q_d = - \frac{C_{bound}^{m+1} - C_{bound}^m}{t_{n+1} - t_n} \quad (14)$$

여기서, C_{bound} 는 구속된 염화물량(mol/l)으로서 식 (9)의 상평형을 이용하여 도출할 수 있다.

염화물 이온의 침투해석을 위해서, DUCOM 프로그램의 연성해석을 이용하였다. 먼저 다상복합수화발열 모델(MCHHM: multi-component hydration model)에 따른 발열량, 수화도, 수화물 형성이 선행되고 이 모델로부터 구한 수화도 및 화학적 결합수량으로 공극구조형성모델(MPSFM: micro pore structure formation model)이 계산된다. 도출된 공극구조는 수분이동모델(MTM: moisture transport model)에 도입되고 수분의 유속 및 공극내의 함수상태가 결정

된다. 각각의 모델에 대한 이론은 기존의 연구를 참고하는 것이 바람직하다.^{10,18,19)}

이러한 해석은 같은 시·공간상에 수행되는 연성해석이며 전체물리량(온도, 수압, 염화물 이온)에 대한 지배방정식은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \alpha_i(X_i)}{\partial t} + \text{div } J_i(X_i, \nabla X_i) - Q_i(X_i) = 0 \quad (15)$$

여기서, α_i 는 비용량(specific capacity), X_i 는 자유도 i 의 물리량(T, P, C_d), Q_i 는 생성·발산항(sink term)이며 각 자유도를 도출하기 위한 에너지 변수들은 Table 4에 정리하였다.

Table 4에서 ρC 는 열용량, K_H 는 열전도계수, K_i 는 액상수 이동계수, K_v 는 수증기 이동계수, Q_H 는 MCHHM으로 구한 열에너지의 생성항, Q_{hyd} 는 MCHHM으로 구한 수화에 의한 수분 소비량, Q_d 는 시간에 따른 염화물 이온 구속항을 나타낸다.

유한요소해석에서는 실험을 통해서 도출된 확산계수 대신, 3.1절의 공극률 함수를 이용한 D_d 이 사용되도록 구성하였다. 단위시간당 구속된 염화물량 Q_d 에서는 식 (9)와 같이 자유염화물과의 상평형을 이용한 식을 고려하였다. Fig. 3에서는 이 연구에 사용된 열역학 연성해석의 개요를 나타낸다.

4.1.2 유한요소해석의 정식화

유한요소법을 이용해서 식 (15)의 편미분 지배방정식을 풀 때에 공간에 대한 이산화로는 갤러킨법(Galerkin method)을 사용하였다. 시간미분항을 가지고 있으므로 시간에 관한 이산화를 포함한 전체 유한요소식은 변수 θ 에 대해 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.¹⁴⁾

$$[C + K\lambda\Delta t_n]X_{n+1} = \Delta t_n f_{n+\alpha} + [C - K(1-\lambda)\Delta t_n]X_n \quad (16)$$

식 (16)의 파라미터 λ 는 안정적인 수렴해를 얻기 위해서 2/3의 값을 사용하고 행렬 C, K 및 벡터 f 는 식 (17)과

같이 나타낼 수 있다.

$$f_{n+\alpha} = -\theta f_{n+1} - (1-\theta)f_n \quad (17)$$

Volume Integrals

$$C = \int_V \alpha N^T N dV, K = \int_V B^T D B dV, f = \int_V N^T Q dV$$

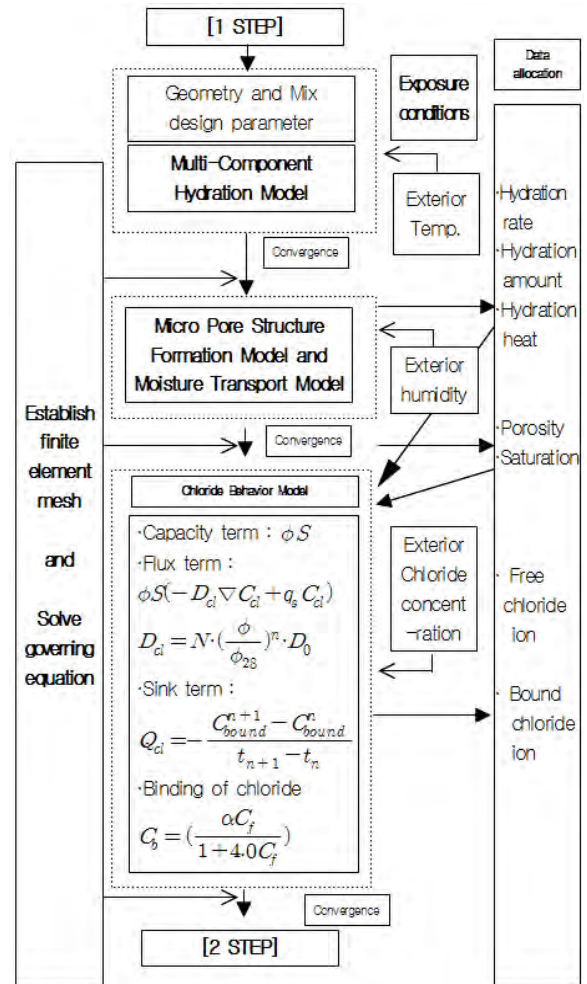


Fig. 3 Schematic diagram for thermo-dynamic analysis

Table 4 Variables for mass conservation law

Variables	Capacity, α_i	Flux, J_i	Sink, Q_i
T	ρc [Kcal/K.m ³] - Constant	$-K_H \nabla T$ [Kcal/m ² .s] - Constant	Q_H [Kcal/m ³ .s] - MCHHM of cement
P	$\phi S \partial S / \partial P$ [kg/Pa.m ³] - Path dependent moisture isotherms	$-(K_i + K_v) \nabla P$ [kg/m ² .s] - Random geometry of pores and Knudsen vapor diffusion	$-Q_{hyd} - \partial(\rho S \phi) / \partial t$ [kg/m ³ .s] - Water combined due to hydration; - bulk porosity change effect
C_d	ϕS [mol.l/mol.m ³] - Path dependent chloride ion transport	$\phi S(-D_d \nabla C_d + q_s C_d)$ [mol/m ² .s] - Chloride diffusivity with porosity - Diffusion and convection	Q_d [mol/m ³ .s] - Bound chloride ion along with nonlinear isotherm

Surface integrals

$$C=0, K=h_x \int_s N^T N dS, f=-h_x X_x \int_s N^T dS$$

여기서, B 는 변형률 텐서, D 는 확산텐서, N 은 형상함수 텐서를 나타낸다. 식 (17)에서, 경계요소의 유한요소식은 경계면을 출입하는 열, 수분 및 이온 전달계수 h_x (h_T, h_p, h_d) 및 경계물리량 X_x (T_s, h_s, C_d^s)를 이용하여 식 (18a)~(18c)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_s^T = -h_T (T - T_s) \quad (18a)$$

$$q_s^P = -h_p (h - h_s) \quad (18b)$$

$$q_s^d = -h_d (C_d - C_d^s) \quad (18c)$$

여기서, q_s^T, q_s^P, q_s^d 는 각각 경계상에서 외향 법선방향의 열플럭스(kcal/m².s), 수분플럭스(kg/m².s), 이온플럭스(mol/m².s)를 나타내며, h_T 는 열전달계수(2.3×10^3), h_p 는 수분전달계수(1.0×10^3), h_d 은 이온 전달계수(1.0×10^3), T_s 는 경계에서의 외부온도(K), h_s 는 경계에서의 외부상대 습도, C_d^s 은 경계에서의 염화물 이온농도(mol/l)를 나타낸다.

해석대상의 구조제원, 사용재료, 배합, 양생조건을 초기조건 및 경계조건으로 입력하면 각 현상에 기초한 재료모델을 통해서 시간과 공간에서 변동하는 콘크리트의 재료물성값이 도출된다. 도출된 재료 특성값을 지배방정

식(식 15)의 각항 $\alpha_i(X_i), J_i(X_i, \nabla X_i), Q_i(X_i)$ 에 대입하면 시스템 내에서 온도, 간극수압, 염화물 이온 농도에 대한 해를 시간 및 공간마다 산정할 수 있다.

이러한 연성과정에서, MCHHM 및 MPSFM에 의해서 계산된 공극률(ϕ)과 혼화제에 따른 상수(N, n), 그리고 기본확산계수의 함수로 구현된 염화물 확산계수(D_d)는 시-공간상에서 변화하여, 배합 및 재령조건의 영향을 반영하도록 구성되었다.

4.2 제안된 기법의 검증

이 장에서는 제안된 확산계수식과 비선형 염화물 구속을 고려하여 고성능 콘크리트내의 염화물 거동을 분석하도록 한다. Fig. 4에서는 유한요소해석을 위한 모델링 및 경계조건을 나타내고 있다.

Fig. 5에서는 제안된 시간의존성 촉진확산계수 모델링

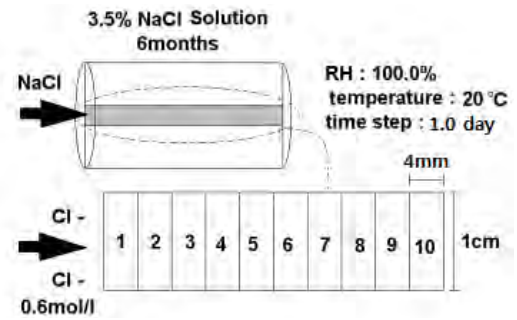


Fig. 4 Mesh generation and boundary conditions

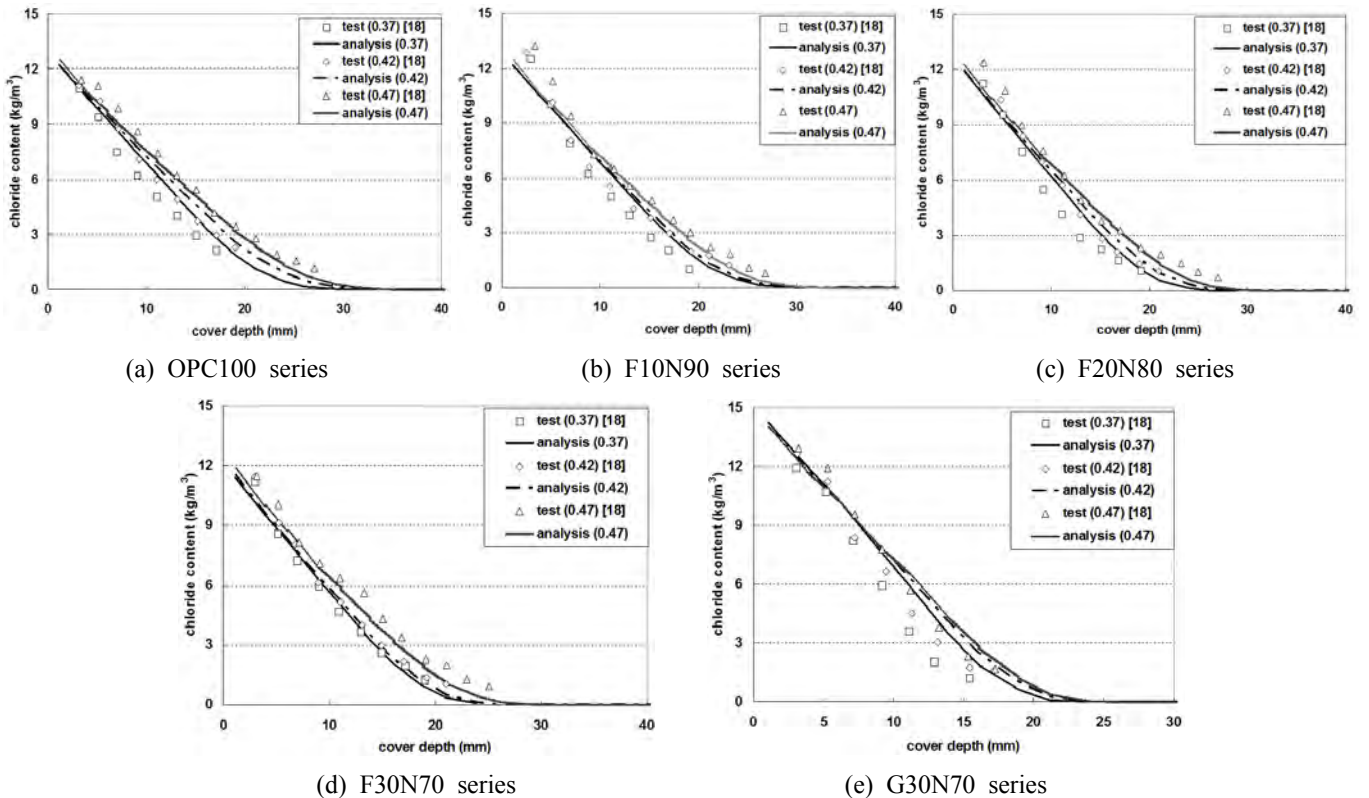


Fig. 5 Comparison of chloride behavior with test and the proposed technique

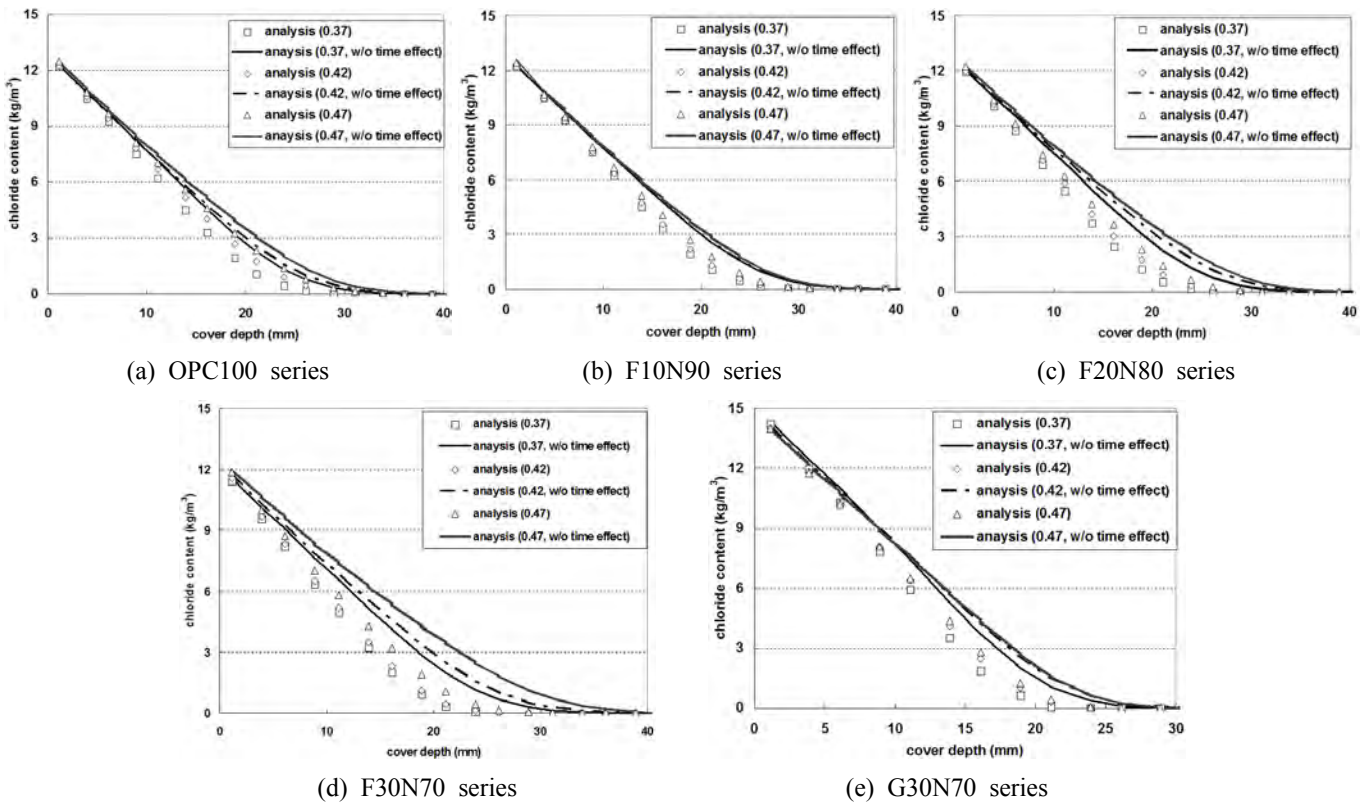


Fig. 6 Comparison of time effect in accelerated diffusivity

을 통한 염화물 거동을 나타내고 있는데, 전반적으로 혼화재의 치환율, 혼화재 종류에 따라 적절한 해석 결과를 나타내고 있다. 실험 결과는 기존의 연구 결과를 이용한 것이며,¹⁸⁾ 각 해석 결과는 3.5% NaCl에 180일 동안 침지된 결과와 비교를 하였다.

NaCl 3.5% 농도는 일반적인 해수의 염화나트륨 농도에 해당한다. 특히 Fig. 5(e)에서는 겉보기 확산계수를 이용한 식에서는 구현할 수 없는 곡선부가 상부에 발생하는데, 이는 비선형 구속식을 사용할 경우 발생하는 염화물 거동의 특징을 나타내고 있다.¹⁰⁾ Fig. 5에서 알 수 있듯이 제안된 기법은 180일 경과후의 염화물 거동을 비교적 정확하게 예측하고 있다.

Fig. 6에서는 시간의존성을 고려하지 않은 해석 결과를 시간의존성을 고려한 결과와 비교하여 도시하였다. 특히 시간지수(m)가 큰 경우인 FA 및 GGBFS를 사용한 배합에서는 시간의존성을 고려하지 않을 경우, 과다한 해석이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

이 연구는 겉보기 확산계수 뿐 아니라, 촉진확산계수에서도 시간의존성이 발생하며, 염화물 거동 해석시 시간의존성 영향을 고려해야지만, 더욱 합리적인 해석을 수행할 수 있음을 나타내고 있다.

이 연구에서는 공극률의 감소를 이용하여 확산계수 모델링을 수행하였으며, 수정된 염화물 상평형을 염화물 침투해석기법을 제안하였다. 그러나 GGBFS의 치환률 범위가 0~30%, FA의 치환률 범위가 0~30%이며, 촉진염화물 확산계수의 재량범위가 270일까지 제한되었다. 양생

기간을 증가시켜 더 넓은 확산계수의 재량영향을 고려할 필요가 있으며, 치환률 범위도 증가시켜 이에 따른 염화물 구속 및 확산계수의 변화를 연구할 필요가 있다.

5. 결 론

촉진염화물 확산계수의 시간의존성을 고려한 고성능 콘크리트의 염화물 침투 해석기법에 대한 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 시간에 대한 회귀분석이 아닌 공극률의 감소를 고려하여 촉진확산계수의 재량에 따른 감소를 구현하였으며, 실험상수를 도입하여 염화물 확산계수 모델링을 수행하였다. 또한 염화물의 비선형 구속능을 고려한 자유염화물과 고정염화물의 상평형 관계식을 이용하여 고성능 콘크리트의 염화물 거동을 해석할 수 있는 기법을 제안하였다.
- 2) 제안된 기법은 180일간 NaCl 3.5%에 존치된 기존의 실험자료를 이용하여 검증을 수행하였는데, 혼화재량의 증가 및 물-결합재비의 감소에 따른 염화물 침투 저감성을 잘 구현하고 있었다.
- 3) 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬를 사용한 고성능 콘크리트에서는 확산계수의 시간의존성이 크게 발생하므로 합리적인 해석을 위하여 확산계수의 시간에 따른 감소를 고려한 해석이 필요함을 알 수 있다.

참고문헌

1. Broomfield, J. P., Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, *Investigation and Repair*, London, E&FN, 1997, pp. 1-15.
2. RILEM, "Durability Design of Concrete Structures," *Report of RILEM Technical Committee 130-CSL*, E&FN, 1994, pp. 28-52.
3. Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B., "Modeling Chloride Diffusion in Concrete: Effect of Fly Ash and Slag," *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, 1999, pp. 487-495. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00192-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00192-6))
4. CEB-FIP, *Model Code for Service Life Design*, The International Federation for Structural Concrete (fib), Task Group 5.6, 2006, pp. 16-33.
5. Thomas, M. D. A. and Bentz, E. C., *Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, Life365 Manual, SFA, 2002, pp. 12-56.
6. Ary, C., Buenfeld, N. R., and Newmann, J. B., "Factors Influencing Chloride Binding in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, No. 2, 1990, pp. 291-300. (doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90083](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(90)90083))
7. Tang, L., *Chloride Transport in Concrete*, Publication P-96:6. Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996, pp. 26-85.
8. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., "Multi-Scale Modeling of Concrete Performance," *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, No. 2, 2003, pp. 91-126.
9. Park, S. S., Kwon, S. J., and Jung, S. H., "Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete Using Equivalent Diffusion and Permeation," *Construction and Building Materials*, Vol. 29, No. 2, 2012, pp. 183-192. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.019>)
10. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Tylor&Francis, London and Newyork, 1st Edition, 2009, pp. 291-352.
11. Tang, L. and Joost, G., "On the Mathematics of Time-Dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 4, 2007, pp. 589-595. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.006>)
12. Poulsen, E., "On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Miniseminar-Chloride Transport," Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1993, pp. 1-12.
13. Tang, L., "Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 176, 1996, pp. 173-179.
14. Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York, 1999, pp. 150-177.
15. Welty, J. R., Wicks, C. M., and Wilson, R. E., *Fundamental of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, John Wiley& Sons, Inc. pp. 363-386.
16. Song, H. W. and Kwon, S. J., "Evaluation of Chloride Penetration in High Performance Concrete Using Neural Network Algorithm and Micro Pore Structure," *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, No. 9, 2009, pp. 814-824. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.05.013>)
17. Lee, H. S. and Kwon, S. J., "Technique for Chloride Behavior Using Apparent Diffusion Coefficient of Chloride Ion from Neural Network Algorithm," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 4, pp. 481-490.
18. Samsung Construction, "Evaluation for Diffusivity Characteristics in High Durable Concrete," *Technical Report*, Seoul, Korea, 2003, pp. 27-33.
19. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "A Study on Analysis Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for high Performance Concrete Using Mineral Admixture," *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 1A, 2005, pp. 213-223.
20. Arya, C. and Newmann, J. B., "Assessment of Four Methods of Determining the Free Chloride Content of Concrete," *Materials and Structures*, Research and Testing (Rilem, Paris), Vol. 23, 1990, pp. 319-330. (doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472710>)
21. Tang, L., *Chloride Transport in Concrete*, Publication P-96:6, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996, pp. 26-85.

요 약 촉진 염화물 확산계수는 최근들어 염화물 거동 평가를 위하여 많이 사용되고 있다. 촉진 염화물 확산계수는 겔보기 확산계수와 마찬가지로 재령에 따라 감소하는데, 이 연구에서는 공극률을 이용하여 촉진 확산계수의 감소를 구현하였다. DUCOM 프로그램을 이용하여 15 배합에 대한 공극률을 도출하였으며, 이를 회귀분석하여 재령 270일 동안 감소하는 염화물 확산계수를 모델링하였다. 또한 자유염화물과 구속염화물간의 관계인 비선형 구속능을 고려하여, 고성능 콘크리트내의 염화물 거동을 평가하였다. 기존의 실험자료인 180일간 염화물에 침지되어 있는 시편을 이용하여, 이 연구에서 제안한 기법의 검증을 수행하였다. 제안된 기법은 다양한 물-시멘트비 및 혼화제(고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬)를 가진 고성능 콘크리트의 염화물 거동을 적절하게 평가하였다. 또한 혼화재료를 사용한 콘크리트의 경우, 확산계수의 시간의존성이 뚜렷하므로 염화물 거동 해석시 재령에 따른 염화물 확산계수의 감소를 반드시 구현해야 함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 촉진 염화물 확산계수, 고성능 콘크리트, 시간의존성, 혼화재료, 염화물 거동