

콘크리트의 염소이온 확산계수의 시간의존성에 대한 실험적 고찰

Experimental Study on the Time-dependent Property of Chloride Diffusivity of Concrete

최두선* · 최재진**

Choi, Doo Sun · Choi, Jae Jin

Abstract

It is time-consuming to estimate chloride diffusivity of concrete by concentration difference test. For the reason chloride diffusivity of concrete is mainly tested by electrically accelerated method, which is accelerating the movement of chloride ion by potential difference. In this study, portland cement concrete and concrete containing with ground granulated blast-furnace slag (40 and 60% of cement by weight) with water-cementitious material ratio 40, 45, 50 and 60% were manufactured. To compare with chloride diffusivity calculated from the electrically accelerated test and immersed test in artificial seawater, chloride diffusivity tests were conducted. From the results of regression analysis, regression equation between accelerated chloride diffusivity and immersed chloride diffusivity was linear function. And the determinant coefficient was 0.96 for linear equation.

Keywords : accelerated test, immersion test, chloride diffusivity, regression analysis

요 지

콘크리트 중의 염화물이온 확산특성의 평가는 농도 차에 의한 방법이 보통이지만, 이 방법은 보통 수개월에서 수년으로 많은 시간이 소요된다. 따라서 최근의 연구는 주로 전위차를 이용하여 염화물이온의 이동을 전기적으로 촉진시켜 전기화학적으로 해석하는 촉진 염화물 확산계수 평가 방법들이 주로 연구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 촉진시험 방법 중 하나인 Tang 등의 방법을 이용하여 구한 염화물이온 확산계수와 인공해수 침지시험을 통하여 구한 농도차 염화물이온 확산계수와의 비교 평가를 실시하였다. 포틀랜드시멘트 콘크리트 및 고로슬래그미분말을 시멘트 질량의 40 및 60% 혼합한 고로슬래그미분말 혼합 콘크리트에 대하여 각각 물-결합재비 40, 45, 50 및 60%로 하여 촉진 염화물이온 침투깊이 및 염화물이온의 확산계수를 평가하였다. 염화물이온의 확산계수 및 침투깊이는 시멘트의 수화가 진행될수록, 물-결합재비가 작을수록 크게 감소하였다. 또한 시험 방법별 염화물이온 확산계수의 회귀분석 결과에 의하면, 촉진 및 침지시험으로부터 구한 염화물이온의 확산계수 사이에는 선형함수 형태의 상관관계가 있었으며 결정계수 0.96으로 좋은 상관성을 나타내었다.

핵심용어 : 촉진시험, 침지시험, 염화물이온 확산계수, 회귀분석

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 미치는 인자로는 이산화탄소, 염화물이온 및 황산염과 같은 다양한 유해 이온이 있지만, 특히 해양 환경에 건설되는 콘크리트 구조물의 내구성 저하의 주된 원인은 염화물이온의 침투 및 확산에 의한 것이라고 Dullien(1992)과 Kropp 등(1995)은 보고하였다.

콘크리트 중의 염화물이온 확산계수는 내구성 설계와 보수 재료의 선정에 있어서 중요한 지표일 뿐만 아니라 철근콘크리트 구조물의 철근부식 개시시기 예측에 중요한 자료가 된다. 한편, 국내의 경우 콘크리트 구조물의 설계수명이 1등급일 경우 100년 이상을 요구하고 있으나 비교적 초기 재령의 시험 결과로부터 10년 또는 100년 이상의 결과를 예측하는 것은

쉬운 일이 아니다. 또한 초기 재령의 시험결과로부터 철근부식 개시시기를 정확히 예측하기 위해서는 주요 변수인 염화물이온 확산계수의 시간의존 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

실제 해양환경 등에서의 침투확산은 농도차에 의한 확산으로 간주되는 경우가 많으며, 비정상 상태의 확산조건이 된다. 그러므로 콘크리트 중의 염화물이온 확산계수는 농도차 확산에 의해 실험적으로 구하는 것이 보통이지만 많은 노력과 시간을 필요로 한다. 이러한 현장조건 또는 침지시험에 의한 확산계수의 시간의존성에 대해서는 많은 연구가 진행되었으나, 전기적 촉진시험에 의한 염소이온 확산계수의 시간의존성에 대한 연구결과는 많지 않다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트 중의 염화물이온 확산특

*공주대학교 건설환경공학부 겸임교수 (E-mail : doosun.choi@gmail.com)

**정회원 · 교신저자 · 공주대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : jjchoi@kongju.ac.kr)

표 1. 시멘트 및 고로슬래그미분말의 화학성분 및 물리적 성질

	Chemical compositions (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
NPC	19.88	4.87	3.11	61.56	2.95	2.82	0.78	3.15	3,120
GGBFS	31.88	12.64	0.39	42.46	6.38	3.63	0.65	2.92	4,450

성이 시간의존적이라는 점을 감안하여, 다양한 축진시험 방법 중 하나인 전위차 축진 후 질산은에 의한 염소이온 침투 깊이를 측정하는 방법(Tang *et al.*, 1993)을 이용하여 물-결합재비 4단계, 고로슬래그미분말 혼합률 2단계로 하여 제작한 콘크리트 공시체를 대상으로 재령 730일 까지 6개의 재령에서 측정된 축진 염화물이온 확산계수의 시간의존 특성을 실험적으로 평가하였다. 또한 각 재령의 축진 염화물이온 확산계수와 2배 농도의 인공해수에 침지하여 구한 겉보기 확산계수와와의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 결합재 및 화학혼화제

포틀랜드시멘트(NPC)와 NPC에 고로슬래그미분말(GGBFS)을 각각 시멘트 질량비로 40%(S4C) 및 60%(S6C)를 혼합한 3종류의 결합재를 사용하였다. NPC 및 GGBFS의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

한편 콘크리트의 단위수량의 저감 및 연행공기를 확보하기 위하여 밀도 1.09±0.02 g/cm³인 액상의 리그닌계 표준형 AE감수제를 사용하였다.

2.1.2 골재

표 2. 골재의 물리적 성질

	G _{max} (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	F.M.
Fine aggregate	-	2.59	0.80	1,581	2.65
Coarse aggregate	25	2.62	0.78	1,533	6.83

잔골재는 밀도 2.59 g/cm³, 조립률 2.65인 강모래, 굵은 골재는 밀도 2.62 g/cm³, 최대치수 25 mm인 부순 골재를 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 표 2와 같다.

2.2 콘크리트 배합 및 압축강도

GGBFS를 NPC의 질량에 대하여 40 및 60% 혼합하였으며, 콘크리트의 목표 슬럼프 및 공기량은 각각 15±2 cm 및 4.5±1.0%, 물-결합재비 40, 45, 50 및 60%의 4단계로 변화시킨 총 12배합의 콘크리트는 표 3과 같다. 콘크리트 공시체는 ø100×200 mm의 원주형으로 제조하였으며, 재령 1일에 탈형하여 23±1.5°C의 수중에서 양생을 실시, 재령 28일에 KS F 2405에 의하여 측정된 콘크리트의 압축강도(*f*₂₈)를 표 3에 정리하여 나타내었다.

2.3 실험 방법

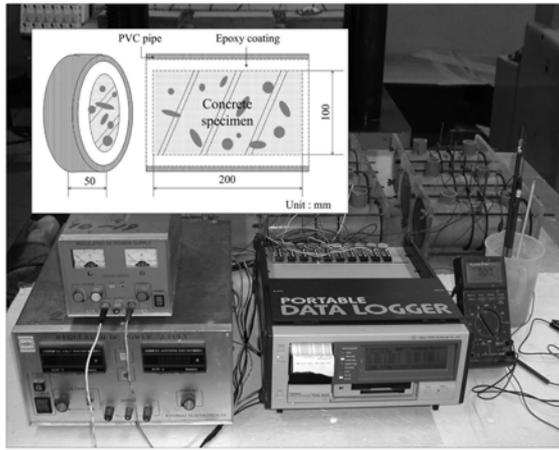
2.3.1 전기적 축진시험

전기적 축진 염화물이온 확산계수를 구하기 위하여 재령 28, 56, 120, 180, 365 및 730 동안 각각 수중 양생을 실시하였으며, ø100×200 mm 콘크리트 공시체를 에폭시 코팅하여 50 mm 두께로 절단한 후 그림 1(a)와 같이 확산셀을 구성하였다(Moon *et al.*, 2003).

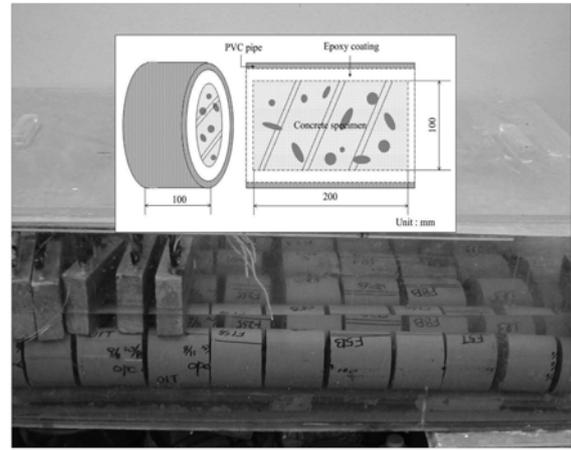
시험편에 30 V의 전압을 8시간 동안 인가하여 염소이온의 이동을 축진시킨 후 콘크리트 시험편을 쪼개 0.1 N AgNO₃을 분부하였으며, 쪼개 면을 대상으로 5 mm간격으로 20개소에서 측정된 염소이온의 평균 침투깊이로부터 식 (1)을 이용하여 축진염소이온 확산계수(*D*_{Tang})를 구하였다(Tang *et al.*, 1993). 이때 전해질로는 음극셀(Cell I)에 0.5 M 염화나트륨(NaCl)과 포화 수산화칼슘(sat. Ca(OH)₂) 수용액, 양극셀(Cell II)에 포화 수산화칼슘 수용액을 사용

표 3. 콘크리트 배합

	Gmax (mm)	Air (%)	W/cm (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					<i>f</i> ₂₈ (MPa)
					W	C	S	G	GGBFS	
NPC40	25	4.0	40	41	187	467	655	958	-	44.2
NPC45	25	4.4	45	42	187	416	689	967	-	37.8
NPC50	25	4.8	50	43	187	374	720	970	-	34.6
NPC60	25	5.5	60	45	187	312	777	964	-	26.6
S4C40	25	4.1	40	41	187	280	651	951	187	45.4
S4C45	25	4.3	45	42	187	250	685	960	166	41.7
S4C50	25	4.8	50	43	187	224	716	964	150	36.2
S4C60	25	5.2	60	45	187	187	773	960	125	28.4
S6C40	25	3.9	40	41	187	187	648	947	280	44.7
S6C45	25	4.2	45	42	187	166	683	957	250	38.8
S6C50	25	4.6	50	43	187	150	714	961	224	35.5
S6C60	25	5.1	60	45	187	125	771	957	187	27.5



(a) 전위차 촉진염소이온 확산시험



(b) 침지시험

그림 1. 전위차 촉진염소이온 확산시험과 침지시험 광경

하였다.

$$D_{Tang} = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha\sqrt{x_d}}{t} \quad (1)$$

여기서,

- D_{Tang} : 촉진 염화물이온 확산계수(m²/sec)
- R : 기체상수
- T : 절대온도
- L : 시편두께(m)
- z : 이온 전자가
- F : 패러데이 상수
- U : 전위차(V),
- x_d : 염화물이온 침투깊이(m),
- α : 실험상수(23,600 m⁻¹)
- t : 적용시간(s)

2.3.2 인공해수 침지시험

콘크리트 공시체를 재령 28일간 수중 양생한 후 에폭시 코팅하여 100 mm로 절단한 후 그림 1(b)와 같은 2배 농도의 인공해수에 180일 동안 침지하였다. 인공해수는 ASTM D 1141 “Standard Specification for Substitute Ocean Water”에 의하여 제조하였으며, 인공해수의 조성은 표 4와 같다.

콘크리트 중의 염화물 이온량은 시험편의 표면에서부터 소정의 간격으로 로터리 해머 드릴을 이용하여 분말을 채취, 105°C의 건조로에서 항량시킨 후, 산가용성 염화물량을 측정하였다. 염화물량의 적정은 조합전극과 표준용액(0.1 N AgNO₃ 용액)을 이용하여 직접 적정하였으며, 식 (2)로부터 계산하였다(AASHTO T 260).

$$Cl^{-}(\%) = 3.5453 \times \frac{N \cdot V}{W} \quad (2)$$

여기서,

- Cl^{-} : 염화물이온 농도(%)
- N : AgNO₃ 농도(Normality)

표 4. 인공해수의 조성

	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl
Concentration(g/l)	49.06	10.40	8.18	2.32	1.39

V : AgNO₃ 부피(ml)

W : 중량(g)

한편 콘크리트 중 이온의 확산이 비정상상태일 때 식 (3)과 같은 Fick의 확산 제2법칙을 적용할 수 있으며,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

아래의 초기조건과 경계조건에서 Fick의 확산 제2법칙의 해석하는 식 (4)로 주어진다.

- 초기조건: $C(x, 0) = C_i$, for $t = 0$

- 경계조건: $C(0, t) = C_s$, for $x = 0$

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (4)$$

Abramowitz *et al.*(1970)에 의하면, 식 (4)의 오차함수를 식 (5)와 같은 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$\operatorname{erfc}(x) \cong \left(1 - \frac{x}{\sqrt{3}}\right)^2, \quad 0 \leq x < \sqrt{3} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하면 식 (6)과 같다.

$$\sqrt{C(x, t) - C_i} = -\sqrt{\frac{C_s - C_i}{12Dt}} \cdot x + \sqrt{C_s - C_i} \quad (6)$$

식 (6)은 $y = \alpha x + \beta$ 형태이며, 깊이별 염화물 이온량을 직선회귀분석하여 α 와 β 를 구하여 염화물이온의 확산계수(D_{pond})를 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$D_{pond} = \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{1}{12t} \quad (7)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 촉진시험에 의한 염화물이온 침투깊이 및 확산계수

3.1.1 염화물이온의 침투깊이

전기적 촉진 실험 후 시험편을 쪼갠 면에 0.1 N AgNO₃ 용액을 분무하여 비색법에 의해 측정한 염화물이온의 침투깊이를 결합재의 종류, 재령 및 물-결합재비별로 정리하여 나타낸 것이 그림 2이다.

이 그림에서 콘크리트 중의 염화물이온 침투깊이는 물-결합재비가 증가할수록 크게 나타났으나, GGBFS의 혼합률과

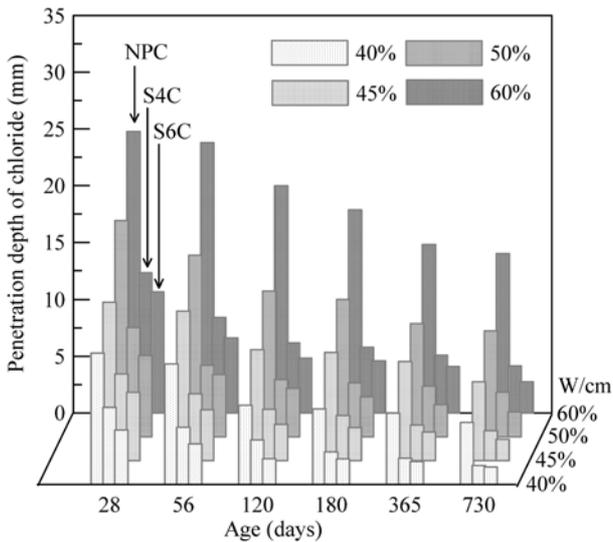


그림 2. 촉진시험에 의한 염화물이온의 침투깊이

재령이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 동일한 물-결합재비의 NPC 콘크리트와 GGBFS 콘크리트의 염화물이온 침투깊이는 재령에 따라 다소 상이하였으나, NPC 콘크리트와 비교하면 재령 28일의 경우 GGBFS 40 및 60% 혼합 콘크리트(S4C, S6C)는 각각 53 및 65%, 재령 730일에서는 각각 83 및 90% 정도의 큰 감소효과가 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 GGBFS 콘크리트의 염화물이온 침투깊이는 재령이 증가함에 따라 GGBFS의 잠수경성이 증진되어 콘크리트의 압축강도가 증가하였을 뿐만 아니라 공극구조가 치밀해졌기 때문에 크게 감소된다는 Leng *et al.*(2000)의 연구결과와도 일치한다.

3.1.2 촉진 염화물이온 확산계수

물-결합재비 4종류 콘크리트의 재령 730일까지 염화물이온의 확산특성을 평가하기 위하여 전기적 촉진시험에 의하여 측정된 염화물이온 침투깊이로부터 산정한 염화물이온 확산계수를 콘크리트 종류별로 정리하여 나타낸 것이 그림 3이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 콘크리트의 물-결합재비 및 GGBFS의 혼합 유무에 따라 촉진 염화물이온 확산계수는 크게 상이하였으며 재령의 증가에 따라 멱함수 형태로 감소

표 5. 시간의존성을 나타내는 함수의 형태

Type of Equation	Remark
$D(t) = \alpha \cdot e^{-\beta \cdot t}$	Type I
$D(t) = \alpha \cdot t^{-\beta}$	Type II
$\log D(t) = \alpha \sqrt{t} + \beta$ or $D(t) = \alpha e^{\beta \sqrt{t}}$	Type III
$D(t) = \zeta + 1(1 - \zeta) \cdot \sqrt{28/t}$ or $D/t = \alpha + \beta/\sqrt{t}$	Type IV

함을 알 수 있다. NPC 콘크리트의 재령 730일 염화물이온 확산계수는 재령 28일과 비교하여 물-결합재비에 관계없이 50~63% 정도로 균일하게 감소하였다. 그러나 GGBFS 콘크리트의 염화물이온 확산계수는 재령이 증가할수록 물-결합재비에 관계없이 GGBFS의 혼합률이 클수록 수렴함을 알 수 있었다.

재령 28일에서 측정한 염화물이온 확산계수는 NPC 콘크리트의 경우 물-결합재비에 따라 $10 \sim 26 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ 이며, GGBFS 콘크리트의 경우 혼합률 40%에서 $4 \sim 11 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$, 60%에서 $3 \sim 10 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ 로 NPC 콘크리트와 비교하여 평균 55% 및 68% 각각 감소효과가 있었다.

또한 재령 365일에서는 GGBFS 콘크리트의 확산계수는 혼합률 40% 및 60%에서 NPC 콘크리트의 확산계수의 평균 20% 및 10% 수준으로 매우 크게 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 염소이온의 시간의존성, 즉 재령이 증가함에 따라 콘크리트의 수화조각이 치밀해져 공극의 연결성이 감소되고 굴곡도가 증가되어 염화물이온의 침투 및 확산을 억제하기 때문이며, Mangat *et al.*(1994)와 Tumidajski *et al.*(1995)의 연구결과와도 일치한다.

한편, 침지시험에 의한 염소이온 확산계수의 시간의존성에 대한 연구결과를 표 5에 정리하여 나타내었다.

전위차 촉진 염소이온 확산계수의 시간의존성을 가장 잘 나타내는 함수의 형태를 알아보기 위하여 $W/cm = 50\%$ 대하여 정리한 것이 그림 4와 표 6이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 촉진 염소이온 확산계수의 시간의존 특성은 Type II와 Type IV 함수 형태가 가장 높은 결정계수를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 Type IV의 경우는 함수의 특성상 염소이온의 확산계수가 재령이 증가할수록 한없이 감소하기 때문에 본 연구에서는 Type II로 염소

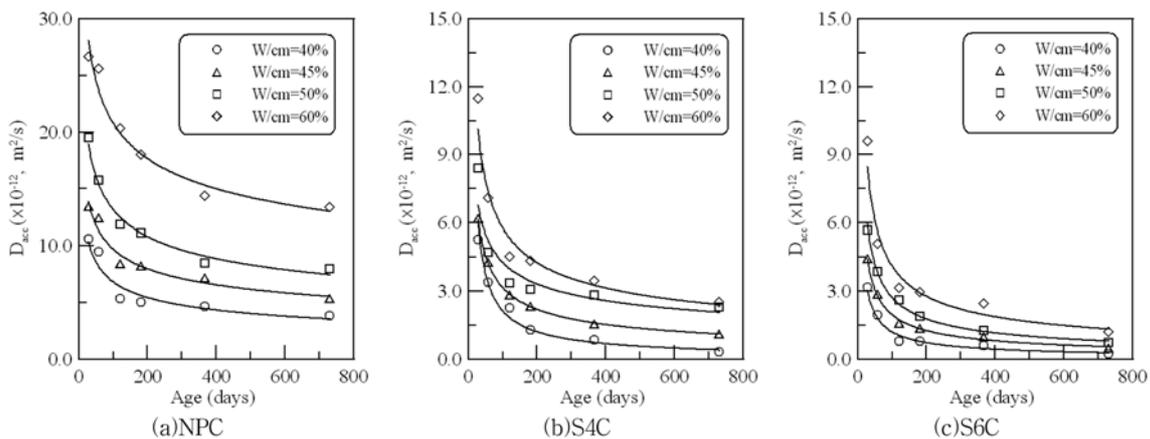


그림 3. 촉진시험에 의하여 구한 염화물이온 확산계수

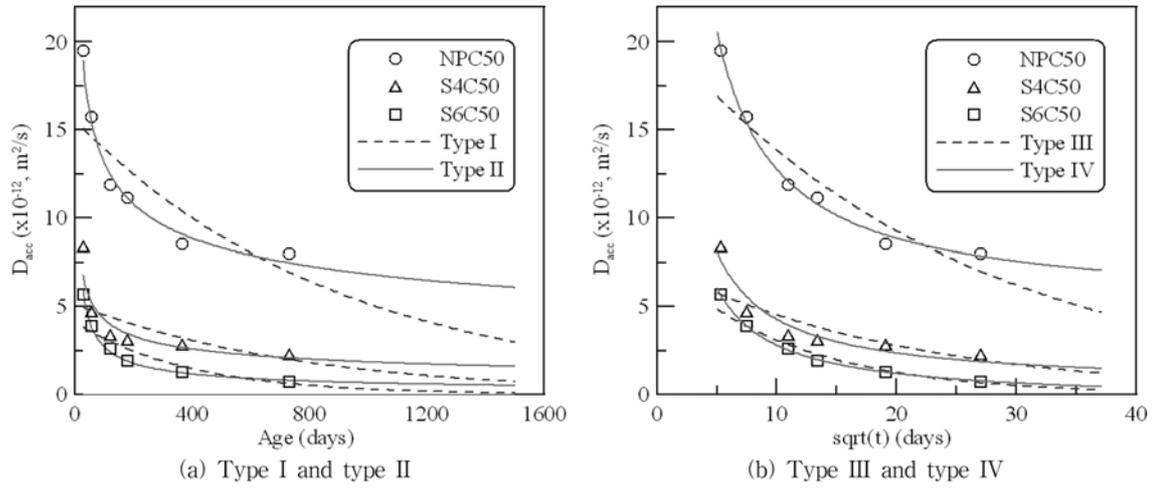


그림 4. 전위차 촉진염소이온 확산계수의 시간의존성

표 6. 회귀분석 결과 및 결정계수

	NPC50			S4C50			S6C50		
	α	β	R^2	α	β	R^2	α	β	R^2
Type I	15.574	0.0011	0.72	5.170	0.0013	0.59	4.125	0.0026	0.87
Type II	49.077	0.2856	0.98	22.894	0.3642	0.89	46.413	0.6154	0.99
Type III	20.703	0.0401	0.87	7.382	0.0489	0.73	7.626	0.0903	0.97
Type IV	4.9484	78.203	0.99	0.4455	38.297	0.92	-0.4296	32.3986	0.99

표 7. 콘크리트 배합별 시간의존 특성 파라미터

	NPC				S4C				S6C			
	40	45	50	60	40	45	50	60	40	45	50	60
D_{28}	10.66	13.45	19.53	26.65	5.29	6.19	8.42	11.49	3.19	4.46	5.68	9.61
α	2.90	2.64	2.51	2.32	17.56	5.73	2.72	3.83	10.96	8.35	8.17	5.84
β	0.33	0.28	0.29	0.24	0.82	0.52	0.63	0.44	0.73	0.64	0.62	0.57
R^2	0.91	0.96	0.98	0.97	0.97	1.00	0.89	0.96	0.96	0.98	0.99	0.95

이온 확산계수의 시간의존성을 분석하였다. 따라서 콘크리트 배합별 시간의존 특성을 멱함수 형태인 식 (8)과 같이 정리하여 나타낸 것이 표 7이다.

$$D_{acc}(t) = \alpha \cdot t^{-\beta} \times D_{28} \quad (8)$$

여기서, $D(t)$ 는 시간 t (day) 후의 염화물이온 확산계수이며, D_{28} 은 재령 28일에 측정된 염화물이온 확산계수, α , β 는 실험상수이다.

3.2 인공해수 침지시험

3.2.1 깊이별 농도 프로파일

물-결합재비 4종류의 콘크리트에 대한 전기적 촉진 염화물이온의 확산계수를 침지실험으로부터 구한 염화물이온 확산계수와 비교하기 위하여 2배 농도의 인공해수 침지실험을 실시하였다. 그림 5에 물-결합재비에 따른 180일 인공해수 침지실험에 의한 콘크리트의 깊이별 염소이온의 프로파일을 나타내었다.

콘크리트의 표면으로부터 5 mm를 기준으로 NPC콘크리트 및 GGBFS 콘크리트의 염화물이온 농도가 물-결합재비와 상관없이 역전됨을 알 수 있다. 또한 GGBFS 콘크리트는 콘크리트 표면 근처에서 염화물이온이 고정화되어 농축됨으로

써, NPC 콘크리트와 비교하여 표면으로부터 거리에 따라 염화물이온 농도가 크게 작아졌다. 이는 GGBFS 콘크리트가 NPC 콘크리트보다 C_3A 의 함유량이 많아 많은 염화물이온을 화학적으로 고정화하여 Friedel's salt ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)를 형성하기 때문이며, 염화물의 고정화 능력이 크다는 Buenfeld *et al.*(1990)의 연구와도 유사한 결과임을 확인하였다.

3.2.2 농도프로파일에 의한 염화물이온 확산계수

깊이별 염소이온의 프로파일로 부터 구한 염소이온의 확산계수를 콘크리트 종류 및 물-결합재비로 정리하여 나타낸 것이 그림 6이다.

NPC 콘크리트의 경우 물-결합재비에 따라 큰 차이가 있지만 GGBFS의 혼합률이 높은 콘크리트일수록 물-결합재비에 상관없이 염화물이온의 확산계수가 거의 비슷한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

이는 전위차 촉진 염소이온의 확산계수와도 같은 경향이며, GGBFS의 잠재수경성 반응에 의해 시멘트 수화생성물과 Al_2O_3 , SiO_2 등이 반응하여 생성된 C-S-H, C-A-H 및 AF_m 상 등이 포틀랜드시멘트의 수화 생성물 사이의 큰 공극을 메워 그림 7과 같이 공극의 연결성을 감소시키고 굴곡도

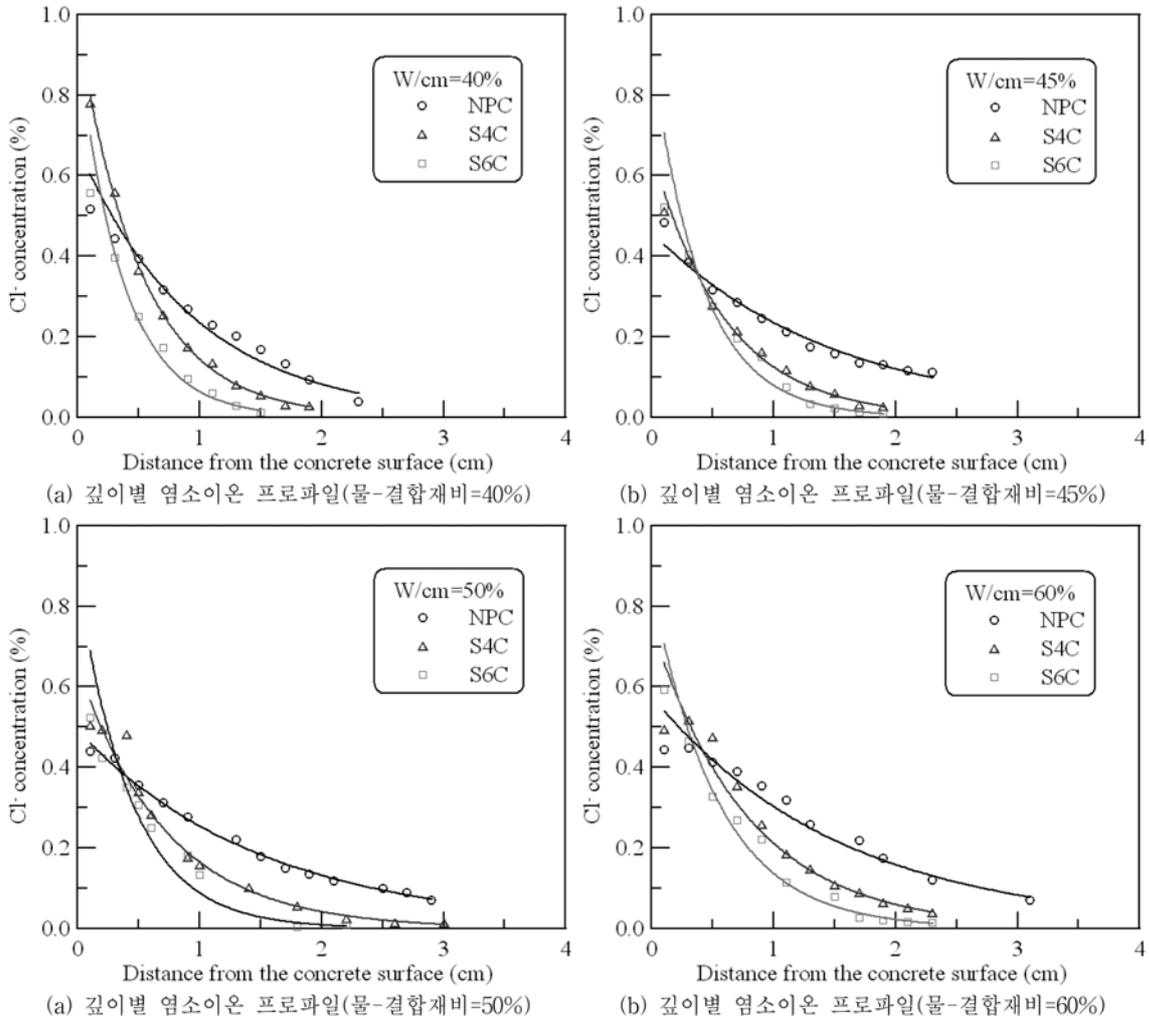


그림 5. 인공해수 침지실험에 의한 콘크리트의 깊이별 염소이온 프로파일

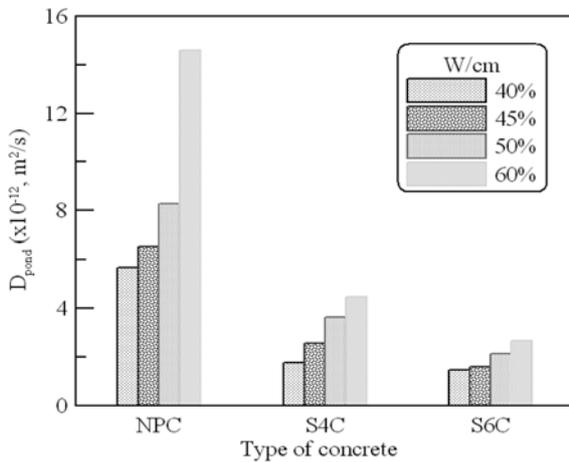


그림 6. 침지실험에 의한 염소이온 확산계수

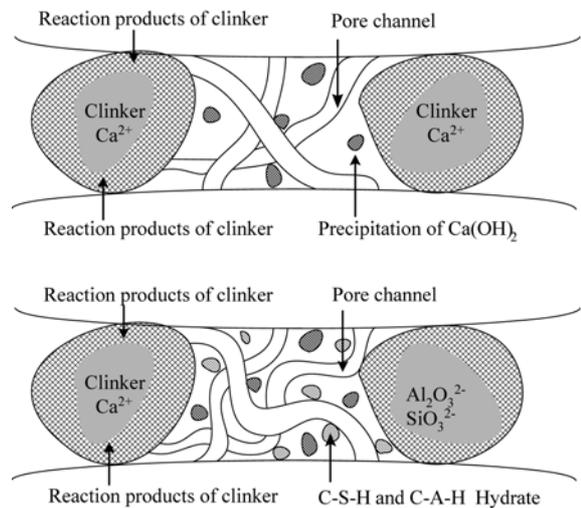


그림 7. 콘크리트 공극의 연결성 및 굴곡도

를 증가 시켰기 때문으로 생각된다.

3.3 축진시험 및 인공해수 침지실험에 의한 확산계수의 비교

침지시험(180일, 2배 농도)에 의한 염화물이온 확산계수보다는 축진시험에 의한 염화물이온 확산계수가 전반적으로 크게 나타났으며, 이들 사이의 선형 회귀분석을 실시한 결과를 정리한 것이 그림 8이다.

회귀 분석의 결과 콘크리트 종류에 상관없이 결정계수가

0.96 이상으로 축진 및 침지 실험으로부터 구한 각각의 염화물이온 확산계수 사이에는 좋은 상관관계가 있었으며, 높은 신뢰도로 전기적 축진시험의 결과로부터 염화물이온의 확산계수를 추정하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구의 단계에서 구한 콘크리트 중 염소이온의 축진

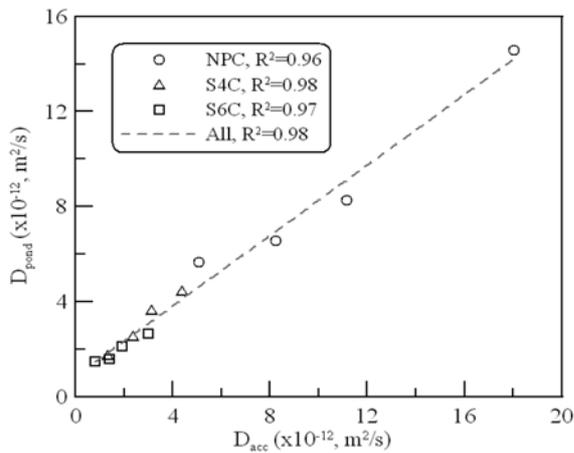


그림 8. 촉진 및 침지시험에 의한 염화물이온 확산계수

및 침지시험으로부터 구한 확산계수를 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 동일한 물-결합재비의 NPC 콘크리트와 GGBFS 콘크리트의 염화물이온 침투깊이는 재령에 따라 다소 상이하였으나, NPC 콘크리트와 비교하면 재령 28일의 경우 GGBFS 40% 및 60% 혼합 콘크리트는 각각 53% 및 65%, 재령 731일에서는 각각 83% 및 90% 정도의 큰 감소효과가 있었다.
2. 염화물이온 침투깊이로부터 구한 염화물이온 확산계수는 재령이 경과됨에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, GGBFS 콘크리트의 경우 NPC 콘크리트와 비교하여 매우 크게 감소하였다. 또한 GGBFS 콘크리트의 염화물이온 확산계수는 재령이 증가함에 따라 한 점으로 수렴하는 경향이 있었다.
3. 결합재의 종류에 따라 각각 염화물이온의 고정화 능력의 차이에 의해 깊이별 염화물이온의 농도 프로파일은 큰 차이가 있으며, GGBFS 콘크리트의 경우 표면으로부터 약 5 mm 이내의 범위에서 염화물이온이 고정화됨에 따라 NPC 콘크리트와 비교하여 염화물이온의 확산계수가 상대적으로 작게 나타났다.

4. 전위차 촉진시험과 침지시험으로부터 구한 염소이온의 확산계수의 회귀분석의 결과 선형함수 형태의 회귀식을 얻을 수 있었으며, 콘크리트 종류에 관계없이 결정계수는 각각 0.96 이상으로 좋은 상관관계가 있었다. 즉, 신뢰도 95% 수준으로 전기적 촉진시험의 결과로부터 염화물이온의 확산계수를 추정하는 것이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (1970) *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York.
- ASSTO T 260-93 (1993) *Sampling and Testing for Total Chloride Ion Concrete and Concrete Raw Materials*.
- ASTM D 1141-90 (1990) *Standard Specification for Substitute Ocean Water*.
- Buenfeld, N.R., Newman, J.B., and Arya, C. (1990) Factors influencing chloride-binding in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, pp. 291-300.
- Dullien, F.A.L. (1992) *Porus Media : Fluid Transport and Pore Structures*, 2nd Ed., Academic Press, INC.
- Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. (1995) Performance criteria for durability, *RILEM Report 12*, London, pp. 166-178.
- Leng, F., Feng, N., and Lu, X. (2000) An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 989-992.
- Mangat, P.S. and Molloy, B.T. (1994) Prediction of long term chloride concentration in concrete, *Materials and Structures*, Vol. 27, pp. 338-346.
- Moon, H.Y., Kim, H.S., and Choi, D.S. (2003) The characteristic of capillary pore and chloride diffusivity by electrical difference into various concrete, *Korean Society of Civil Engineer*, No. 23 5A, pp. 969-976.
- Tang, L. and Nilsson, L.O. (1993) Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 1, pp. 49-53.
- Tumidajski, P.J., Chan, G.W., Feldman, R.F., and Strathdee, G. (1995) Boltzmann-manato analysis of chloride diffusion, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 1556-1566.

(접수일: 2009.1.2/심사일: 2009.3.31/심사완료일: 2009.6.10)