



시간의존성 염화물 확산계수와 압축강도 상관성에 대한 실험적 연구

이승훈¹⁾ · 권성준^{2)*}

¹⁾삼성물산(주)건설부문 기술연구소 ²⁾한남대학교 건설시스템공학과

Experimental Study on the Relationship between Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficient and Compressive Strength

Seung-Hoon Lee¹⁾ and Seung-Jun Kwon^{2)*}

¹⁾Samsung Corporation Co., Ltd, Seoul 137-956, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

ABSTRACT Since strength and diffusion coefficient of concrete, representative concrete properties that in change with age, the time effect must be considered in the analysis of chloride penetration. In this study, an evaluation of correlation between accelerated diffusion coefficient, apparent diffusion coefficient, and compressive strength in high performance concrete with various mineral admixtures such as ground granulated blast furnace slag, fly ash, and silica fume was performed. For this work, thirty mix proportions were prepared. Accelerated diffusion coefficients at the age of 28, 91, 180, and 270 days were evaluated. For apparent diffusion coefficient, submerging test for 6 months was performed. For evaluation of compressive strength with ages, the compressive strength test was carried out at an age of 7, 28, 91, 180 days. The results of accelerated diffusion coefficient, apparent diffusion coefficient, and strength were compared, and the correlation was analyzed considering time dependency. From this study, linear relationship between accelerated diffusion and apparent diffusion coefficient were obtained regardless of concrete age. The linear relations were also observed in strength-accelerated diffusion coefficient and strength-apparent diffusion coefficient regardless of concrete age.

Keywords : high performance concrete, time-dependency, accelerated diffusion coefficient, strength, apparent diffusion coefficient

1. 서 론

염해(chloride attack)는 철근콘크리트 구조물에 매립된 철근 부식을 직접적으로 야기하므로 매우 중요한 열화인자이다.^{1,2)} 많은 연구가 콘크리트 내의 염화물 침투를 해석 또는 평가하기 위해 진행되고 있으며, 국내외 시방서에서도 철근부식에 대한 임계값을 제안하고 이를 고려하도록 내구성 설계를 유도하고 있다.³⁻⁵⁾ 콘크리트 내부로 유입된 염소이온은 흡착, 확산, 침투 등의 메커니즘을 통하여 내부로 유입되며, 이중 자유염소 이온은 철근부식에 직접적으로 관여한다.⁶⁻⁸⁾

콘크리트 내부의 염화물 침투에 대해서는 Fick's 2nd Law에 기반을 둔 겉보기 확산계수를 통한 염화물 해석이 일반적이다. 겉보기 확산계수를 통한 지배방정식은 기술자에게 직접적인 염화물량을 해(solution)로 제공하기 때

문에 많이 사용되고 있으며, 최근 들어 Life 365와 같은 범용 프로그램을 통하여 더욱 사용이 늘어나고 있다.⁹⁻¹¹⁾ 또한 겉보기 확산계수를 이용하여, 균열부의 염화물 증가 및 내구수명 평가,¹²⁾ NN(neural network)를 통한 겉보기 확산계수의 추정¹³⁾ 등 관련된 연구가 진행되고 있다. 그러나 겉보기 확산계수는 장기간의 침지기간을 요구하며 주로 실태조사를 통하여 도출되므로 다양한 배합을 가진 시편에 대하여 실험적으로 도출하기에는 많은 제약이 있다.

최근 RCPT(rapid chloride penetration test)와 같은 전기영동실험을 통하여 자유염소 이온의 전기장 내의 속도를 평가함으로써 염소 이온의 고유확산계수를 도출하려는 시도가 진행되고 있다.^{14,15)} 또한 NN기법을 이용하여 다양한 배합의 콘크리트의 촉진확산계수를 도출하고 이를 이용하여 염화물 침투를 해석하려는 연구도 수행되었다.¹⁶⁾ 촉진확산계수를 이용하여 염화물 침투를 해석하기 위해서는 자유염화물과 고정염화물과의 상평형^{17,18)} 또는 다양한 침투 및 흡착을 고려한 해석 프레임 등⁶⁻⁸⁾ 상대적으로 복잡한 해석처리과정을 포함해야 하지만, 비교적 짧은 시간과 간편한 시편처리를 통하여 촉진확산계수를 도출할 수 있으므로 최근 들어 그 사용은 더욱 증가하고 있다.

*Corresponding author E-mail : jjuni98@hnu.kr

Received July 4, 2012, Revised October 24, 2012,

Accepted November 12, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

이러한 염소 이온의 확산은 재령의 영향을 받게 되며 콘크리트 수화물의 형성, 공극구조의 형성 등에 따라 감소한다. 이미 걸보기 확산계수에 대해서는 시간지수를 고려하여 시간에 따라 감소하는 확산계수에 대한 연구가 진행되어 있으나,⁹⁾ 축진 확산계수에 대해서는 아직 명확한 연구가 진행되지 못하고 있다.

이 연구는 일반적으로 콘크리트 특성을 가장 잘 대변할 수 있는 압축강도와 시간에 따라 변화하는 확산계수(걸보기 확산계수, 축진확산계수)와의 관계를 분석하는 것이다. 이 연구는 비정상상태의 축진 확산계수인 Tang's Method를 이용하여¹⁴⁾ 다양한 배합을 가지는 고성능 콘크리트(HPC: high performance concrete)의 확산계수를 도출하였으며, 재령(28일, 91일, 180일, 270일)에 따라 변화하는 축진확산계수를 분석하였다. 이후 각 재령에서 압축강도와 축진확산계수와의 상관성을 분석하였으며 6개월간 침지실험에 따른 걸보기 확산계수와 재령별 강도와의 상관성을 분석하였다. 또한 걸보기 확산계수와 재령에 따라 변화하는 축진확산계수와의 상관성 역시 고찰되었다.

2. 실험 프로그램의 개요

2.1 콘크리트 배합

시멘트로는 보통포틀랜드 시멘트(OPC: ordinary portland cement)가 사용되었으며, 혼화재료로서 고로슬래그 미분말(GGBFS: ground granulated blast furnace slag), 플라이 애쉬(FA: fly ash), 실리카퓌름(SF: silica fume) 등이 사용되었다. Table 1에서는 시멘트 및 혼화재료의 화학성분 및 물리적 특성을 나타내고 있으며, Table 2에서는 골재의 물리적 성질을, Table 3에서는 고성능 감수제 성분을 나타내고 있다. Table 4에서는 HPC의 배합표를 나타내었는데, 슬럼프 150±15 mm, 공기량 4.5±1.0%를 목표로 물-결합재비를 37%, 42% 및 47%로 변화시켜 30개 배합의 콘크리트를 제조하였다.

2.2절 이후부터 언급되는 염소이온의 확산계수는 장기간의 침지실험을 통해서 Fick의 법칙을 기본으로 한 확산계수가 있으며, 전기영동실험을 통하여 도출된 염소이온확산계수가 강도특성과 비교될 것이다.

이 논문에서는 장기간의 침지실험으로 도출된 염소이

온 프로파일을 Fick의 법칙을 이용, 회귀분석하여 도출

Table 2 Physical properties of aggregate

Items	G_{max} (mm)	Specific gravity (g/cm^3)	Absorption (%)	FM
Fine aggregate	-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate	25	2.64	0.82	6.87

Table 3 Properties of super-plasticizer

Items	Type	pH	Main component	Solid	Density
2000R	Liquid	7.3	Naphthalene	36.5%	1.19

Table 4 Mix proportions for high performance concrete

Items	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
G50N50-37	37	168	227	227	-	-	760	943	0.75	0.017
G50N50-42	42	168	200	200	-	-	780	969	0.7	0.0135
G50N50-47	47	168	178	179	-	-	832	853	0.6	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
F10S05-37	37	168	386	-	45	23	756	938	1.0	0.023
F10S05-42	42	168	340	-	40	20	777	965	0.9	0.021
F10S05-47	47	168	303	-	36	18	829	950	0.9	0.021
F20S05-37	37	168	340	-	91	23	749	929	0.9	0.023
F20S05-42	42	168	300	-	80	20	771	957	0.85	0.025
F20S05-47	47	168	268	-	71	18	810	927	0.9	0.025
G30S05-37	37	168	295	136	-	23	759	942	0.75	0.015
G30S05-42	42	168	260	120	-	20	765	949	0.75	0.015
G30S05-47	47	168	232	107	-	18	832	952	0.8	0.015
G35F15-37	37	168	227	159	68	-	751	932	0.65	0.014
G35F15-42	42	168	200	140	60	-	773	959	0.65	0.014
G35F15-47	47	168	178	125	54	-	804	921	0.7	0.014

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

Table 1 Properties of cement and mineral admixtures

Items	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)
NPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3214
GGBFS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4340
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	3621
SF	93.3	0.5	1.21	0.27	1.03	0.02	1.1	2.21	190.620

된 확산계수를 겉보기 확산계수로 정의하였다. 또한 전기영동실험을 통하여 도출된 염소이온의 전기장내의 이온확산속도를 촉진확산계수로 정의하였다.

2.2 전기영동 실험 (전위차 촉진 실험)

전위차에 의한 촉진 염소이온 확산계수를 평가하기 위하여 확산셀을 구성하였다. 음극셀(cell) 용액은 0.5 M의 염화나트륨(NaCl)용액을 사용하였으며, 양극셀(cell) 용액은 포화 수산화칼슘(sat. Ca(OH)₂) 용액을 사용하였다. Table 5에서는 시험조건 및 실험방법을 나타내고 있다.

콘크리트에 일정시간 전위차를 가한 후 시험편을 쪼개어 표면에 0.1 N의 AgNO₃ 용액을 분무한 뒤, 음극측 표면에서부터 은색으로 변하는 지점까지의 깊이를 염소이온의 침투깊이로 측정하였다. 전위차 촉진시험법에 의한 비정상 상태의 염소이온 확산계수는 Tang's method을 이용하여 염소이온 침투깊이로부터 촉진확산계수(D_{rcpd})를 도출하였다. 식 (1) 및 (2)는 촉진확산계수 도출식을 나타낸다.

$$D_{rcpd} = \frac{RTL x_d - a\sqrt{d}}{zFU t} \quad (1)$$

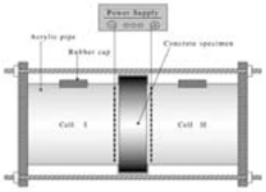
$$a = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \operatorname{erf}^{-1}\left[1 - \frac{2C_d}{C_0}\right] \quad (2)$$

여기서, D_{rcpd} 는 비정상상태에서 구한 전위차 촉진 염소이온 확산계수(m²/sec), R 은 기체상수(8.314 J/mol.K), T 는 절대온도(K), L 은 시험편두께(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. 촉진염화물 확산계수는 각 재령 및 배합에 대하여 3개의 시험편을 제조하였으며 그 평균값을 결과로 사용하였다.

2.3 겉보기 확산계수 실험

겉보기 확산계수는 장기침지실험을 통하여 도출되며, Life 365와 같은 프로그램에서는 기준 확산계수를 구하기 위해 높은 농도의 염소이온에 한 달간 침지과정을 거치기도 한다.¹⁹⁾ 침지시험을 통한 겉보기 확산계수의 도출을 위해 콘크리트 공시체를 28일 동안 수중양생한 후, 3.5% NaCl 용액에 6개월 간 노출시켰다. 시험편은 일방향

Table 5 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	

유입을 위하여 한쪽 면을 제외한 나머지 면은 에폭시로 코팅하였다. 침지후 콘크리트 공시체를 깊이별로 갈아내었으며, AgNO₃ 용액을 이용한 전위차 적정으로 염소이온 프로파일을 구하였다. 이후 선형회귀분석법을 이용하여 표면염화물량과 겉보기 확산계수를 도출하였다.

콘크리트 미분쇄 시료를 대상으로 AASHTO T 260에 의거하여 산 가용성 염소이온량을 측정하였는데, 식 (3)을 이용하여 염소이온량 (전염분량)을 적정하였다.

$$CT = \frac{3.545(NV)}{W} \quad (3)$$

여기서, CT 은 미분쇄된 콘크리트 분말시료 중의 염소이온 농도(%), N 은 질산은(AgNO₃) 표준용액의 노르말 농도(N), V 는 종말점에서의 질산은 표준용액 사용량(ml), W 는 미분쇄된 콘크리트 분말시료의 중량(g)을 나타내고 있다. 촉진확산계수와 마찬가지로 세 개의 시험편을 제조하여 그 평균값을 결과로 사용하였다.

2.4 압축강도실험

결합재의 종류 및 물-결합재비가 다른 콘크리트에 대하여 재령 7일, 28일, 91일, 180일에 대한 압축강도를 평가하였다. 실험방법은 100×200 mm 실린더 공시체 시험편을 이용하고 KS F 2405에 따라 강도실험을 수행하였다. 강도 역시 동일 배합의 3개 시험편을 사용하여 그 평균값을 결과로 사용하였다.

3. 시간에 따른 확산계수의 변화

3.1 시간의존적 확산계수 (RCPT)

3.1.1 촉진확산계수 실험 결과

이 절에서는 재령에 따른 촉진 확산계수의 변화를 분석하였으며, Table 6에 그 결과를 나타내었다.

실험 결과 혼화재를 사용한 HPC에서는 시간의 경과에 따른 확산계수의 감소가 두드러졌으며, SF를 사용한 콘크리트에서는 재령초기부터 확산계수가 급격하게 감소하고 있음을 확인할 수 있었다. FA를 사용한 콘크리트에서는 포졸란반응에 따른 추가적인 수화물 생성으로 공극구조가 개선되고 이에 따라 확산계수가 감소되고 있다.^{8,10)} GGBFS를 사용한 콘크리트에서 역시 슬래그의 잠재수경성으로 인해 추가적인 수화물의 형성을 기대할 수 있으며, 이에 따라 공극구조가 개선되어 확산계수가 감소한다.¹⁰⁾ 또한 GGBFS를 사용한 콘크리트에서는 자유염화물의 흡착 등이 증가하게 되는데, 이런 현상이 확산계수의 효과적인 감소를 야기한다.²⁰⁾ SF를 사용한 콘크리트에서는 공극구조가 packing효과로 매우 개선되므로 강도 뿐만 아니라 내구적인 성능이 크게 개선된다고 알려져 있으며, 이 연구에서도 SF를 혼입한 배합에서 그 특성을 확인할 수 있었다.^{21,22)} Fig. 1에서는 재령에 따른 촉진확산계수

Table 6 Diffusion coefficients from RCPT with ages

Items	D_{rcpt} (m^2/s)			
	28 days	91 days	180 days	270 days
OPC100-37	1.3E-11	1.1E-11	8.0E-12	7.0E-12
OPC100-42	1.5E-11	1.4E-11	1.1E-11	9.4E-12
OPC100-47	1.8E-11	1.6E-11	1.5E-11	1.2E-11
G30N70-37	9.3E-12	7.1E-12	6.7E-12	4.3E-12
G30N70-42	1.1E-11	7.6E-12	7.6E-12	5.4E-12
G30N70-47	1.2E-11	8.4E-12	8.0E-12	6.4E-12
G50N50-37	6.3E-12	3.7E-12	2.5E-12	2.4E-12
G50N50-42	8.6E-12	5.3E-12	4.7E-12	3.2E-12
G50N50-47	1.1E-11	7.2E-12	6.5E-12	4.3E-12
F10N90-37	1.4E-11	9.1E-12	7.7E-12	6.3E-12
F10N90-42	1.5E-11	1.0E-11	9.4E-12	7.6E-12
F10N90-47	1.7E-11	1.2E-11	1.1E-11	1.0E-11
F20N80-37	1.3E-11	6.6E-12	5.7E-12	4.5E-12
F20N80-42	1.6E-11	1.0E-11	6.9E-12	5.8E-12
F20N80-47	1.9E-11	1.1E-11	9.3E-12	7.0E-12
F30N70-37	1.3E-11	7.2E-12	5.0E-12	4.7E-12
F30N70-42	1.6E-11	8.1E-12	5.4E-12	5.2E-12
F30N70-47	2.2E-11	9.5E-12	7.4E-12	6.2E-12
F10S05-37	6.9E-12	4.2E-12	3.1E-12	2.4E-12
F10S05-42	7.8E-12	5.4E-12	4.1E-12	3.3E-12
F10S05-47	8.9E-12	6.7E-12	4.8E-12	3.6E-12
F20S05-37	6.0E-12	4.1E-12	3.5E-12	2.9E-12
F20S05-42	7.1E-12	6.4E-12	4.8E-12	4.5E-12
F20S05-47	8.8E-12	7.3E-12	6.4E-12	6.1E-12
G30S05-37	5.3E-12	3.3E-12	2.3E-12	2.2E-12
G30S05-42	5.8E-12	4.1E-12	2.8E-12	2.5E-12
G30S05-47	6.1E-12	4.8E-12	3.1E-12	2.9E-12
G35F15-37	5.0E-12	3.8E-12	3.1E-12	2.7E-12
G35F15-42	6.5E-12	4.0E-12	3.6E-12	2.9E-12
G35F15-47	8.8E-12	5.4E-12	4.5E-12	4.3E-12

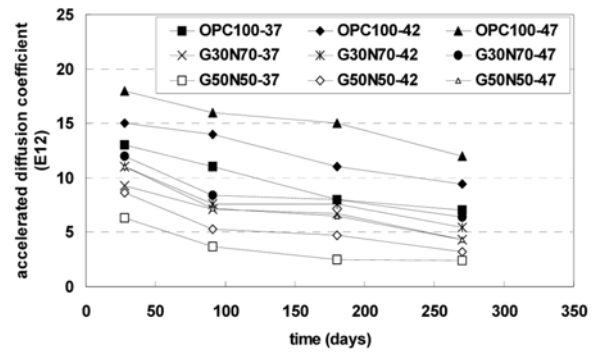
의 변화를 도시하였다.

3.1.2 촉진확산계수의 시간 의존성 분석

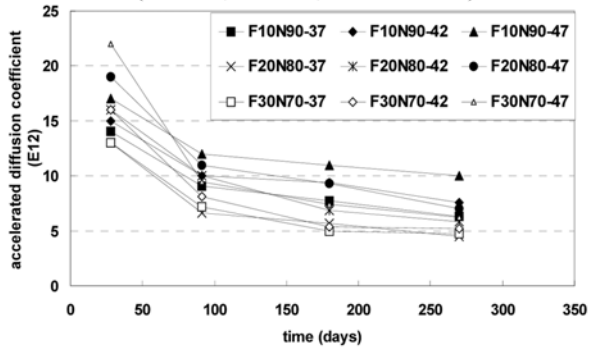
촉진확산계수의 시간의존성을 분석하기 위하여 시간지수를 가진 확산계수식과의 비교를 수행하도록 한다. 촉진확산계수에 대해서는 시간지수에 대한 식이 제안된 것이 없으므로, 겔보기 확산계수에 대한 시간의존성을 고려한 식인 식 (4)를 이용하여 시간지수(m)의 변화를 분석하도록 한다.

$$D(t) = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^m \quad (4)$$

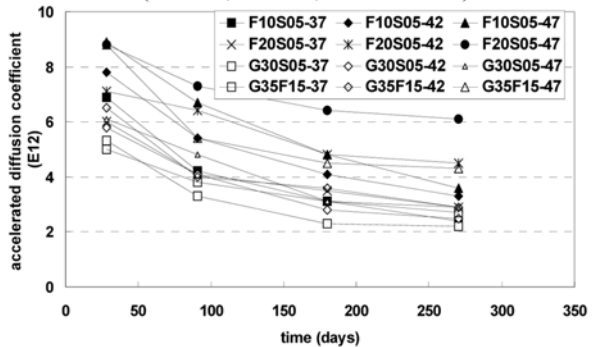
여기서, D_{ref} 는 기준시간 (t_{ref})에 따른 확산계수를 나타내고 t 는 재령을 나타낸다.



(a) Accelerated diffusion coefficient (OPC100, G30N70, G50N50 series)



(b) Accelerated diffusion coefficient (F10N90, F20N80, F30N70 series)



(c) Accelerated diffusion coefficient (F10S05, F20S05, G20S05, G35F15 series)

Fig. 1 Accelerated diffusion coefficient with ages

겔보기 확산계수는 염소이온용액에 촌치기간동안 지속적으로 염화물 침투가 발생하게 된다. 그 기간동안 콘크리트의 수화반응에 따른 공극률 감소, 염소이온 농도차에 따른 확산 특성의 변화, 염소이온의 흡착 등 다양한 전달기구를 통하여 유입된 염소이온을 Fick의 법칙을 기본으로 하나의 상수로 나타낸 것이 겔보기 확산계수이다. 식 (4)에서는 각 재령 순간의 겔보기 확산계수의 변화를 나타낸 것이다.

식 (4)는 Log관계를 이용하여 식 (5)와 같이 변환시킬 수 있으며 선형관계를 이용하면 m 값을 회귀분석할 수 있다.

$$\text{Log} \left(\frac{D(t)}{D_{ref}} \right) = m \cdot \text{Log} \left(\frac{t_{ref}}{t} \right) \quad (5)$$

선형회귀분석 결과인 m 을 이용한 결과는 Fig. 2에 나타낼 수 있으며, Table 7에 회귀분석 결과와 결정계수(R^2)

를 함께 나타내었다.

Table 7에서 알 수 있듯이 물-결합재가 낮을수록 대체적으로 큰 m 값이 도출되었으며, GGBFS 및 FA를 사용한 콘크리트에서는 OPC 콘크리트에 보다 m 값이 크게 도출되었다. 최대값은 F30N70-47(FA 30% 치환, w/b 47%)에서 0.5895로 평가되었으며, 최소값은 OPC100-47(OPC 100%, w/b 47%)에서 0.1399로 평가되었다. 270일 경과후 F30N70-37의 확산계수는 $4.7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이며 F30N70-47의 확산계수는 $6.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다. 그러나 m 값은 확산계수가 감소하는 기울기를 나타내므로 F30N70-47이 절대값에서는 작지만, 큰 m 값을 가지게 된다. 즉 F30N70-37에 비하여 작은 결합재량으로 28일 확산계수값이 상대적으로 높게 평가되었으며, 이후 장기간 포졸란 반응으로 확산계수가 작아져서 m 값이 크게 평가된 것이다. FA10과 FA20 series에서는 FA의 치환량이 FA30 series에 비하여 작으며

로 포졸란 반응에 의한 확산계수 감소가 두드러지지 못한 것으로 사료된다.

일반적으로 사용하는 Life 365에서는 식 (6)과 같이 시간지수(m)를 산정하고 있는데, OPC 콘크리트에서는 0.2로 고정하고 있으며, 물-결합재비에 따른 변화를 고려하고 있지 못하다.

$$m = 0.2 + 0.4(FA/50 + SG/70) \leq 0.6 \quad (6)$$

여기서, FA 및 SG는 플라이애쉬 및 슬래그의 치환량(%)을 나타내고 있으며, SF를 사용한 콘크리트에서는 OPC 콘크리트와 같은 0.2를 가정하고 있다.⁹⁾

OPC 콘크리트라 하더라도 단위 시멘트양이 큰 배합에서는 수화물 생성이 더욱 활발해지고 이로 인해 공극률 감소와 확산계수 감소가 더욱 커질 것이므로 결합재량의 변화에 따라 시간지수의 변화를 고려할 필요가 있다. R_m 은 OPC 콘크리트에서 물-시멘트비의 증가에 따라 시간지수(m)이 감소하는 비율을 정의하는 것으로 물-시멘트비가 0.37에서 0.47로 증가하면서 시간지수가 0.2506에서 0.1399로 감소하는 것을 회귀분석한 것이다. 이를 식 (7)에 나타내었다.

$$R_m = 8.4026e^{-0.0583(w/c)} \quad (7)$$

Table 7처럼 실험으로 도출된 m 값과 식 (6)에 의한 m 값의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. OPC 콘크리트에서는 비교적 정확하게 일치하고 있으나, 삼성분계(FA와 GGBFS) 콘크리트, SF를 혼입한 콘크리트에서는 큰 차이를 나타내고 있다. 겉보기 확산계수에서 사용된 m 은 실태조사 및 장기침지실험을 통하여 도출된 것이므로 삼성분계 콘크리트 및 SF 콘크리트에 대해서는 m 에 대한 보완이 필요하다.

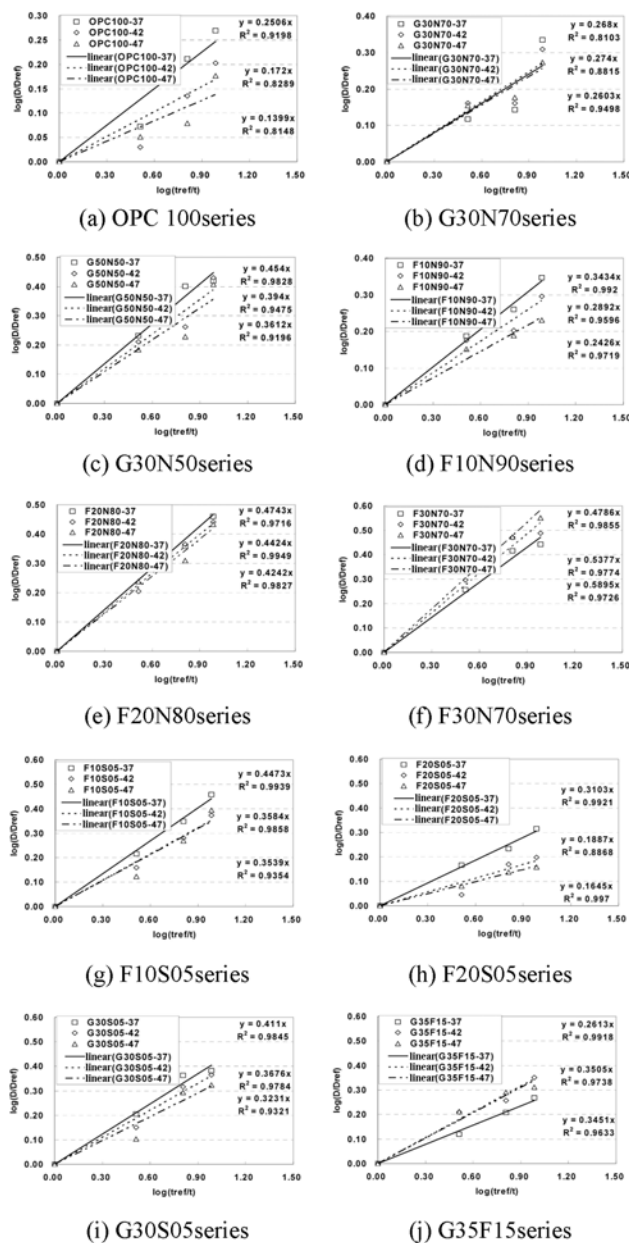
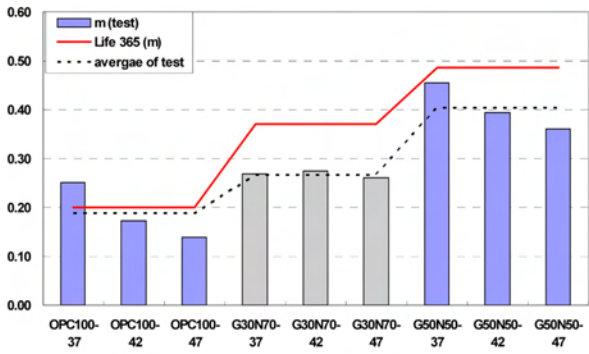


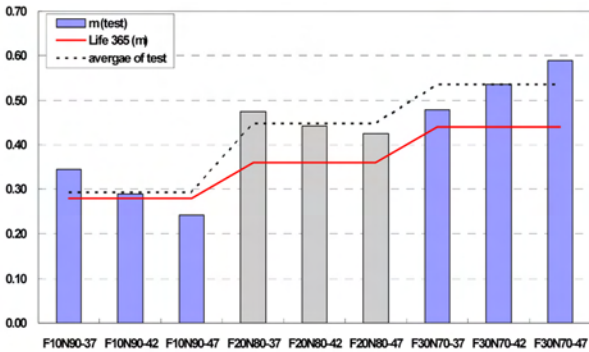
Fig. 2 Time exponent (m) of various HPC

Table 7 Results of time exponent (m) with various HPC

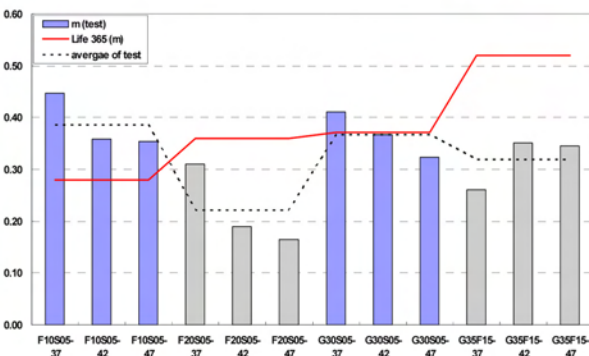
Mix	m	R ²	Mix	m	R ²
OPC100-37	0.2506	0.9198	F30N70-37	0.4786	0.9855
OPC100-42	0.1720	0.8289	F30N70-42	0.5357	0.9774
OPC100-47	0.1399	0.8148	F30N70-47	0.5895	0.9726
G30N70-37	0.2680	0.8138	F10S05-37	0.4473	0.3584
G30N70-42	0.2740	0.8815	F10S05-42	0.3584	0.9858
G30N70-47	0.2603	0.9498	F10S05-47	0.3539	0.9534
G50N50-37	0.4540	0.9828	F20S05-37	0.3103	0.9921
G50N50-42	0.3940	0.9475	F20S05-42	0.1887	0.8868
G50N50-47	0.3612	0.9196	F20S05-47	0.1645	0.997
F10N90-37	0.3434	0.9920	G30S05-37	0.4110	0.9845
F10N90-42	0.2892	0.9596	G30S05-42	0.3676	0.9784
F10N90-47	0.2426	0.9179	G30S05-47	0.3231	0.9321
F20N80-37	0.4743	0.9716	G35F15-37	0.2613	0.9918
F20N80-42	0.4424	0.9949	G35F15-42	0.3505	0.9738
F20N80-47	0.4242	0.9827	G35F15-47	0.3451	0.9833



(a) OPC 100%, G20N70, and G50N50 series



(b) F10N90, F20N80, and F30N70 series



(c) F10S05, F20S05, G30S05, and G35F15 series

Fig. 3 Comparison of m-exponent with test and Life 365

3.2 겉보기 확산계수와 축진확산계수와의 관계

3.2.1 겉보기 확산계수 실험 결과

이 절에서는 6개월 침지된 시편에서 도출한 겉보기 확산계수와 시간의존성 축진확산계수를 비교하도록 한다. 겉보기 확산계수의 결과는 Table 8과 같이 나타내었으며, 그 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4의 결과에서처럼 혼화재료를 사용한 경우와 물-결합재가 낮은 경우 뚜렷한 확산계수의 감소를 보이고 있다. 가장 높은 확산계수는 OPC100-47에서 나타났으며 ($7.3E-12 \text{ m}^2/\text{sec}$), G50N50-37과 G30S05-37에서 가장 낮은 확산계수($1.4E-12 \text{ m}^2/\text{sec}$)가 평가되었다. 28일에서 측정된 축진확산계수와는 달리 겉보기 확산계수에서는 6개월의 존치기간을 가지므로 충분한 수화반응이 진행되었으며, 이로 인해 높은 혼화재료 치환률을 가지는 배합에서는

Table 8 Results for apparent diffusion coefficient (6 months)

Mixture	Diffusion coefficient (m^2/sec)	Mixture	Diffusion coefficient (m^2/sec)
OPC100-37	4.1E-12	F30N70-37	3.9E-12
OPC100-42	5.2E-12	F30N70-42	4.3E-12
OPC100-47	7.3E-12	F30N70-47	5.9E-12
G30N70-37	2.1E-12	F10S05-37	2.2E-12
G30N70-42	3.0E-12	F10S05-42	2.8E-12
G30N70-47	3.2E-12	F10S05-47	3.3E-12
G50N50-37	1.4E-12	F20S05-37	2.5E-12
G50N50-42	1.6E-12	F20S05-42	3.6E-12
G50N50-47	1.7E-12	F20S05-47	3.8E-12
F10N90-37	3.5E-12	G30S05-37	1.4E-12
F10N90-42	5.2E-12	G30S05-42	1.8E-12
F10N90-47	6.2E-12	G30S05-47	1.9E-12
F20N80-37	3.2E-12	G35F15-37	1.8E-12
F20N80-42	4.0E-12	G35F15-42	1.9E-12
F20N80-47	5.9E-12	G35F15-47	2.3E-12

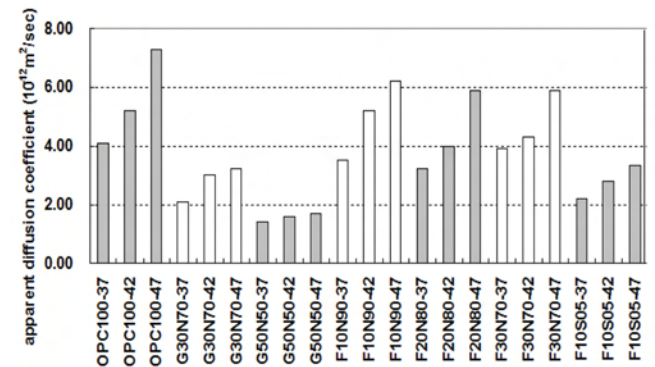


Fig. 4 Apparent diffusion coefficient with various HPC

낮은 확산계수가 측정되었다. 축진확산계수 실험 결과와 동일하게 SF를 혼입한 콘크리트에서 매우 낮은 겉보기 확산계수를 도출할 수 있었다. SF 콘크리트에서 packing 효과에 의한 확산계수 감소와 내구성능 개선은 많은 문헌에서 확인할 수 있다.^{21,22)}

3.2.2 축진확산계수와의 관련성 분석

겉보기 확산계수에서도 혼화재료의 증가와 단위결합재량의 증가에 따른 확산계수의 감소를 확인할 수 있었다. 기존의 연구에 의하면 축진확산계수와 겉보기 확산계수의 상관성은 주로 선형으로 나타나는데,^{14,23)} 일반적으로 축진확산계수가 약간 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 그 이유는 일반적으로 장기침지에서 도출되는 확산계수는 충분한 수화를 통하여 개선된 공극구조를 가지고 있으며, 축진확산계수는 보통 28일의 재령시편에 인위적인 전압을 가하여 얻은 염화물 이동속도이기 때문이다.

겉보기 확산계수는 6개월에 대한 자료만 있으므로 식

(4)과 식 (6)을 이용하면, 각 재령(28일, 91일, 180일, 270일)에 대한 겉보기 확산계수를 도출할 수 있다. 이 값들을 동일한 재령의 촉진확산계수 실험 결과와 비교하였으며, 그 관계를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 결과중 (c)-180일에 대한 결과는 6개월 침지후의 겉보기 확산계수와 수중에서 6개월 양생된 시편의 촉진확산계수를 비교한 것이다.

재령에 따라 겉보기 및 촉진확산계수가 감소하므로 Fig. 5(a)에서 (d)로 이동하면서 전체적인 확산계수들이 감소하고 있고 선형적인 관계가 유지되고 있음을 알 수 있다. 촉진확산계수는 겉보기확산계수에 비해 1.6878~1.7805배 큰 선형관계를 가지고 있었는데, 재령의 증가와 무관하게 거의 일정한 상관관계를 가지고 있었다. 회귀분석 결과를 식 (8)~(11)에 결정계수와 함께 나타내었다.

기존의 연구에 의하면 비정상 상태의 촉진확산계수는 겉보기 확산계수에 비해 1.10~1.38배 정도 증가하고²⁴⁾ 일부 연구에서는 1.23~2.0배까지 증가한 결과도 있다.²⁵⁾ 또한 NT BUILD 492(촉진실험)와 443(침지실험)과의 상관성에서도 1.16배 증가하는 것으로 나타났다.^{26,27)} 이 실험 결과는 기존의 연구에 비해 촉진확산계수값이 약간 크게 평가되었다.

$$D_{rcpt} = 1.6878D_{app}, R^2 = 0.7866 \quad (8)$$

$$D_{rcpt} = 1.6979D_{app}, R^2 = 0.7029 \quad (9)$$

$$D_{rcpt} = 1.7805D_{app}, R^2 = 0.7211 \quad (10)$$

$$D_{rcpt} = 1.6905D_{app}, R^2 = 0.8253 \quad (11)$$

여기서, D_{rcpt} 는 촉진확산계수, D_{app} 는 겉보기확산계수, 식 (8)~(11)은 각각 재령 28일, 91일, 180일, 270일에서의 상관관계를 나타내고 있다.

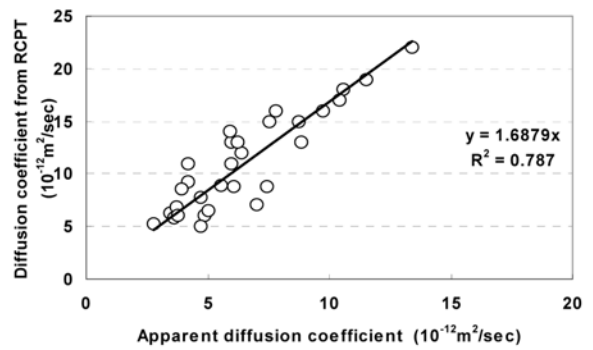
3.3 강도특성과의 관계

3.2.1 강도특성 결과

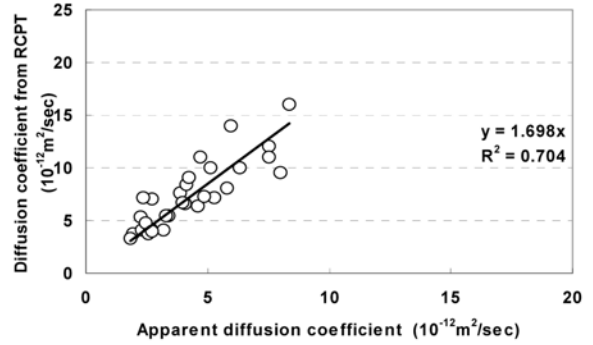
강도실험은 7일, 28일, 91일, 180일에 측정되었으며, 그 결과를 Table 9에 나타내었다. HPC에서 볼 수 있는 전형적인 강도증가를 나타내었는데, 28일 이후로 GGBFS나 FA로 치환된 HPC에서 장기강도 증가를 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 강도 특성 역시 확산계수 특성과 비슷한 관련성을 가질 것으로 예상된다.

3.2.2 촉진 확산계수와 강도의 관련성 분석

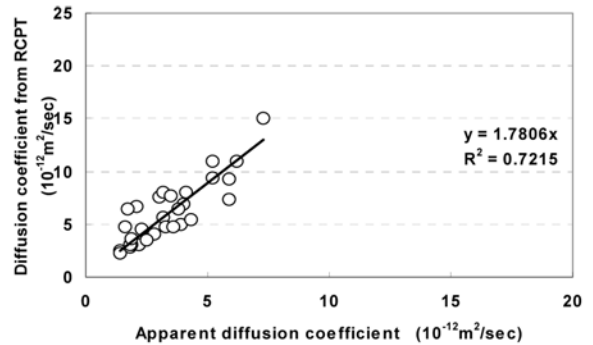
기존의 연구에서도 알 수 있듯이,²⁸⁾ 강도는 내구성지표(durability indices)로 사용되고 있다. 기존의 연구에서는 비선형회귀분석을 통하여 확산계수, 염화물 침투성, 흡수계수 등에 대한 상관관계를 강도를 통하여 구현하였다.²⁸⁾ 그러나 이 값들은 재령28일에서 실험한 결과이며, 시간의 변화에 따른 상관관계를 구현하지 못하였다. 이 실험에서는 재령에 따른 염화물 확산계수와 강도를 고려하여 분석하도록 한다.



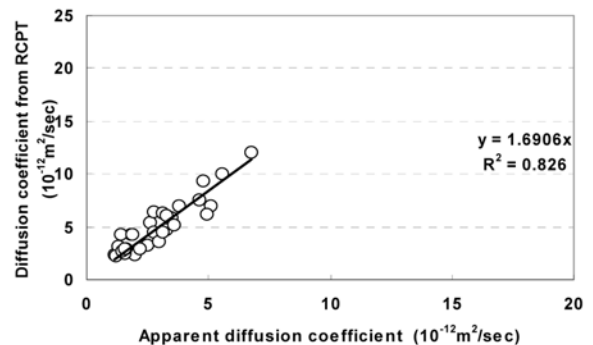
(a) At the age of 28 days



(b) At the age of 91 days



(c) At the age of 180 days



(d) At the age of 270 days

Fig. 5 Relationship between apparent and accelerated diffusion coefficient

먼저 동일 재령에서의 강도와 촉진확산계수를 분석하면 Fig. 6과 같은 결과를 도출할 수 있다.

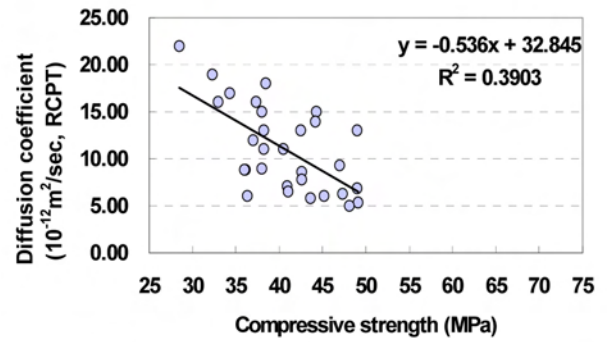
Fig. 6과 같이 강도증가에 따라 확산계수가 감소하면

Table 9 Compressive strength with different ages in HPC

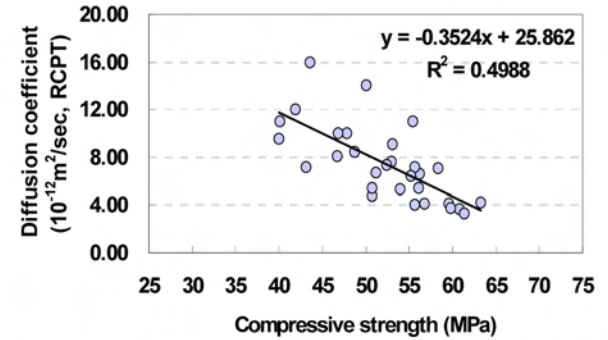
Mixture	Ages			
	7	28	91	180
OPC100-37	43.5	49	55.4	60
OPC100-42	37.8	44.3	50.1	55.2
OPC100-47	29.2	38.5	43.6	45.8
G30N70-37	40.4	47	58.3	62.4
G30N70-42	31.8	40.5	53	56.4
G30N70-47	28.1	37	48.7	49.8
G50N50-37	40.9	47.3	60.8	64.8
G50N50-42	31.1	42.6	54	58.1
G50N50-47	24	38.2	43.1	47.2
F10N90-37	38.2	44.2	53.1	62.5
F10N90-42	32.2	38	47.8	54.3
F10N90-47	26.4	34.3	41.9	48.2
F20N80-37	37.1	42.5	56.2	65.4
F20N80-42	30.5	37.3	46.8	54.4
F20N80-47	24.3	32.3	40.1	46.8
F30N70-37	30.4	38.2	55.6	63.2
F30N70-42	26	33	46.7	52
F30N70-47	22.1	28.5	40	45.1
F10S05-37	43.5	49	63.2	70.5
F10S05-42	37.8	42.6	56.1	62.2
F10S05-47	32.4	38	51.2	55.8
F20S05-37	38.3	45.2	59.6	65.4
F20S05-42	32	40.9	55.2	58.4
F20S05-47	28.6	36.1	52.4	55.4
G30S05-37	39.6	49.1	61.3	68.9
G30S05-42	33.5	43.6	56.8	64.4
G30S05-47	29.9	36.3	50.7	60
G35F15-37	35.2	48.1	59.8	66.1
G35F15-42	28.5	41	55.7	61.5
G35F15-47	22.5	36	50.7	57.6

서 어느 정도 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 일정 시점의 강도를 기준으로하고 각 배합조건에 따라 확산계수를 분류하여 강도와 축진확산계수의 관계를 분석하였다. 일반적으로 28일 강도가 대표성을 띠고 있으므로 Fig. 6의 (a) 조건인 28일 강도를 x축으로 설정하였으며, 배합조건에 따라 변화하는 재령별 축진확산계수를 y축으로 하여 관계를 분석하였다. 강도와 각 재령에 따른 축진확산계수는 거의 선형적인 관계를 나타내었는데, Fig. 7에서는 그 결과를 나타내었으며, 상관식과 결정계수를 Table 10에 정리하였다.

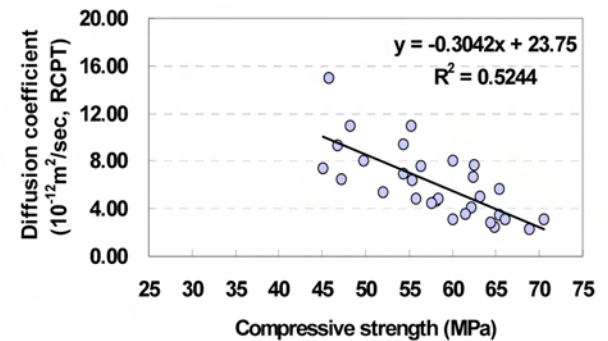
Fig. 7 및 Table 10에서 알 수 있듯이 대부분 0.9 이상의 결정계수를 보이고 있었으며, 28일 재령 강도와 시간에 따른 확산계수의 변화는 재령에 상관없이 선형관계를 가지고 있었다. 더 많은 시편을 사용하여 강도 및 축진확산계수의 상관성을 분석하면 더욱 정밀한 결정계수를



(a) Compressive strength and diffusion coefficient (28 days)



(b) Compressive strength and diffusion coefficient (91 days)



(c) Compressive strength and diffusion coefficient (180 days)

Fig. 6 Diffusion coefficient and compressive strength with different ages

도출할 수 있으며 선형관계의 신뢰성을 높일 것이다.

축진확산계수와 재령 28일 압축강도와의 상관성을 배합별로 분석하기 위해, 배합별로 기울기를 분석하였다. OPC 콘크리트의 경우, 재령이 28일에서 270일로 증가할 때, 기울기는 -0.4778에서 -0.4757로 큰 변화는 없었다. 그러나 G50N50 series의 경우, -0.5162에서 -0.2084로 비교적 큰 기울기의 변화가 발생하였다. 이는 강도감소에 비하여 확산계수의 완만하게 감소되었다는 것을 의미한다. 이러한 경향은 F30N70 series에서도 동일한 경향을 보이고 있다. 28일 재령에서 270일로 증가할 때, 기울기는 -0.9188에서 -0.1531로 큰 수준으로 감소하였다. 즉 FA 및 GGBFS와 같은 혼화재료가 혼입된 콘크리트에서는 재령이 증가할수록 Fig. 7(c)~(f)와 같이 낮은 기울기가 발생하게 된다. SF 품을 혼입한 콘크리트에서는 재령에 따른 기울기의 변화

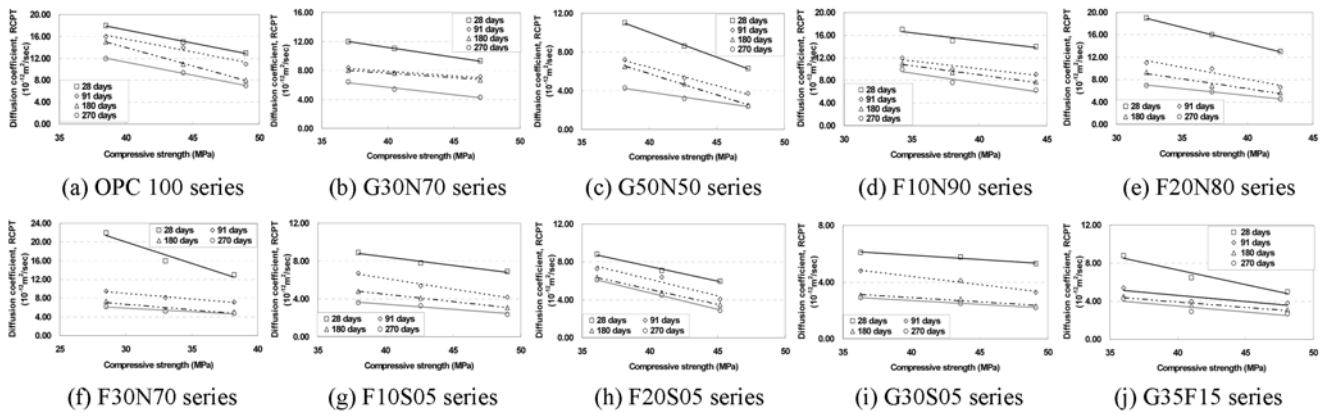


Fig. 7 Relationship between compressive strength and diffusion coefficient (RCPT) in various HPC

Table 10 Results of regression analysis of compressive strength (28 days) and diffusion coefficient (RCPT)

Mixture	Linear relationship $D_{rcpt} = A \times f_{28} + B$ (f_{28} : strength at 28 days)							
	28 days		91 days		180 days		270 days	
	A	B	A	B	A	B	A	B
	R^2		R^2		R^2		R^2	
OPC100 series	-0.4778	36.323	-0.4711	34.365	-0.6676	40.661	-0.4757	30.34
	0.9970		0.9696		0.9995		0.9986	
G30N70 series	-0.2689	21.927	-0.1233	12.817	-0.1311	12.873	-0.2049	13.868
	0.9995		0.9104		0.9978		0.9794	
G50N50 series	-0.5162	30.674	-0.3841	21.802	-0.4399	23.35	-0.2084	12.197
	0.999		0.9953		0.9985		0.988	
F10N90 series	-0.2884	26.533	-0.2777	24.15	-0.3272	22.074	-0.3568	21.822
	0.892		0.8757		0.9839		0.9042	
F20N80 series	-0.5882	37.978	-0.4329	25.374	-0.3521	20.458	-0.2451	14.926
	0.9999		0.9162		0.9600		0.9999	
F30N70 series	-0.9188	47.535	-0.2355	16.092	-0.243	14.010	-0.1531	10.456
	0.9472		0.9725		0.8418		0.9472	
F10S05 series	-0.1792	15.609	-0.2248	15.143	-0.1547	10.681	-0.1111	7.8984
	0.9771		0.9863		0.9999		0.9655	
F20S05 series	-0.3086	19.87	-0.3485	20.128	-0.319	17.892	-0.3513	18.809
	0.9917		0.9241		0.9992		0.999	
G30S05 series	-0.0614	8.3719	-0.1161	9.0571	-0.00614	5.3719	-0.0547	4.8851
	0.9505		0.9858		0.9505		1.000	
G35F15 series	-0.3071	19.574	-0.1252	9.6224	-0.1127	8.4312	-0.1252	8.5224
	0.952		0.763		0.9322		0.763	

는 비교적 작은 것으로 평가되었다.

3.2.3 겉보기 확산계수와 강도와의 관련성 분석

이 항에서는 6개월간 인공해수 준치 후 도출된 겉보기 확산계수와 강도와의 상관성을 분석하도록 한다. Fig. 8에서는 겉보기 확산계수와 재령별 강도와의 상관성을 나타내고 있으며 식 (12)~(15)는 선형회귀분석 결과를 나타내고 있다. Fig. 6과 마찬가지로 높은 결정계수는 도출되지 못하였는데, 이는 OPC 콘크리트 뿐 아니라 다양한 혼화재료를 혼입하고 있는 콘크리트 자료 전체를 대상으로

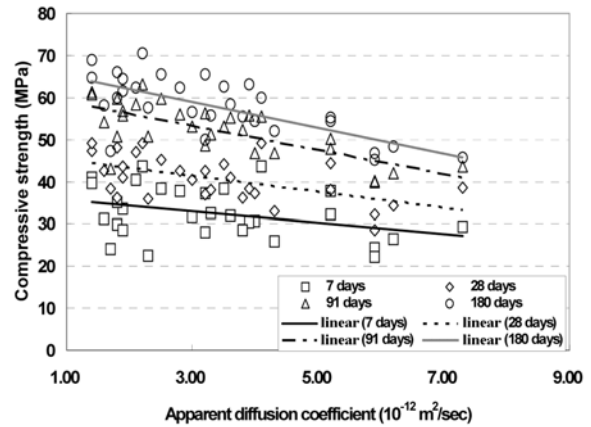


Fig. 8 Apparent diffusion coefficient and compressive strength with various ages

로 도출된 결과이기 때문이다.

$$C_7 = -1.3477D_{app} + 37.064, R^2 = 0.1234 \quad (12)$$

$$C_{28} = -1.8815D_{app} + 46.954, R^2 = 0.3066 \quad (13)$$

$$C_{91} = -2.8811D_{app} + 61.963, R^2 = 0.5151 \quad (14)$$

$$C_{180} = -3.0938D_{app} + 68.342, R^2 = 0.4869 \quad (15)$$

여기서, C_i 는 재령에서의 압축강도 (MPa)이며, D_{app} 는 겉보기 확산계수를 나타내고 있다.

Fig. 7과 같이 각 배합에 따라 재령에 따른 강도와 겉보기 확산계수를 분석하면 뚜렷한 선형관계를 확인할 수 있다. 겉보기 확산계수의 자료가 6개월 준치자료밖에 없으므로 이를 x축으로 하여 도시하였으며, y축을 강도로 하여 회귀분석을 수행하였다. 기존의 연구에서는 겉보기 확산계수와 강도와의 관계를 지수함수로 모델링하였으나,²⁹⁾ 실제로는 거의 선형에 가까운 결과를 가지고 있었다. Fig. 9에서는 각 배합에 따른 강도와 겉보기 확산계수의 관계를 나타내고 있으며 그 회귀분석 결과를 Table 11에 정리하였다.

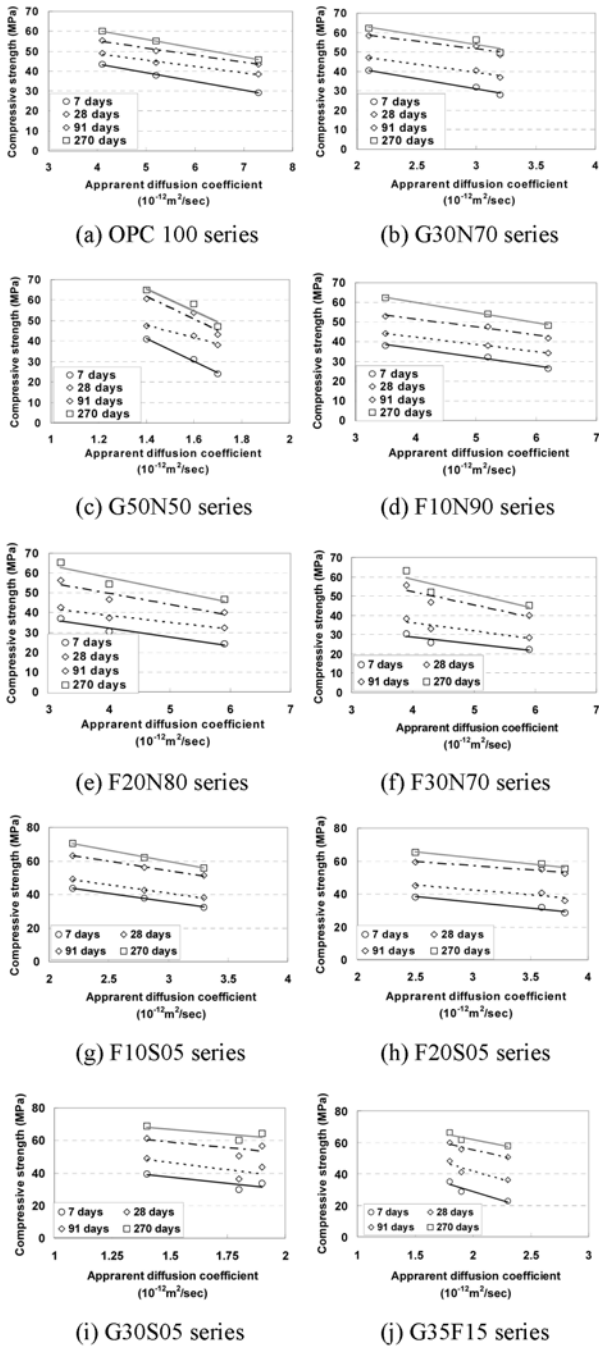


Fig. 9 Relationship between strength and apparent diffusion coefficient in various HPC

Fig. 9와 Table 11에서도 알 수 있듯이 각 배합과 재령 따라 강도와 겉보기 확산계수에서도 선형관계가 분석되었다. 촉진확산계수와 마찬가지로 배합별로 기울기를 분석하기 위해 Fig. 7과 결과를 비교해보면 전반적으로 재령에 따른 기울기의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다. OPC 콘크리트에서 재령에 따라 확산계수에 대한 강도의 기울기는 -4.4193에서 -4.4426으로 큰 차이는 없었다. 한편 GGBFS를 혼입한 경우에는 최대 -55.286의 기울기가 관측되었는데, 이는 확산계수의 증가에 따라 빠르게 강도가 감소됨을 의미한다. FA를 혼입한 콘크리트의 경우 기울기의 변화는 OPC 콘크리트의 기울기 변화와 비슷하

Table 11 Results of regression analysis of compressive strength and apparent diffusion coefficient

Mixture	Linear relationship $C_i = A \times D_{app} + B$							
	7 days		28 days		91 days		180 days	
	A	B	A	B	A	B	A	B
OPC100 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-4.4193	61.287	-3.2125	61.709	-3.6091	69.67	-4.4426	78.249
G30N70 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-10.684	62.994	-8.5194	65.07	-7.8592	75.077	-9.9903	83.84
G50N50 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-55.286	118.61	-29.357	88.693	-55.429	139.47	-55.071	142.98
F10N90 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-4.2809	53.528	-3.6646	57.034	-4.0385	67.658	-5.246	81.055
F20N80 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-4.4731	50.166	-3.5702	52.956	-5.5217	71.811	-6.3657	83.33
F30N70 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-3.6607	43.372	-4.2679	53.292	-6.7679	79.242	-7.6964	89.607
F10S05 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-10.071	65.764	-10.022	70.927	-10.94	87.099	-13.379	99.849
F20S05 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-6.8776	55.663	-5.9592	60.399	-5.0204	72.301	-7.2449	83.641
G30S05 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-18.214	65.298	-22.214	80.764	-18.357	87.474	-15.929	91.512
G35F15 series	R^2		R^2		R^2		R^2	
	-22.429	73.59	-20.857	83.414	-16.571	88.543	-14.929	91.59

였으나, GGBFS와 SF를 혼입한 콘크리트에서는 기울기가 매우 큰 수준으로 증가하였다. FA 콘크리트에서는 기울기가 -3.6607~-6.3657의 수준을 가지고 있으나, GGBFS 콘크리트에서는 -7.8592~-55.286의 범위를, SF 콘크리트에서는 -5.0204~-22.429의 범위를 가지고 있었다. 겉보기 확산계수의 감소에 따라 빠르게 강도감소가 발생하고 있음을 알 수 있다.

이 연구에서는 시간의존성 특성인 겉보기 확산계수, 촉진확산계수, 그리고 강도에 대한 상관성을 재령에 따라 분석하였다. 선형관계가 각각의 상관성에서 도출되었으나, 시편의 개수가 3개로 매우 제한적이며, 이 논문에서 강도 범위는 29.2~70.0 MPa로 일반강도 콘크리트와는 차이가 있다. 또한 겉보기 확산계수의 범위는 $1.4 \times 10^{-12} \sim 7.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이고, 촉진확산계수의 경우, $1.8 \times 10^{-11} \sim 2.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 범위를 가지고 있었다. 이 범위에서는 강도와 확산계수가 어느 정도 선형적인 관계를 가지고 있다고 할 수 있으며, 다양한 강도 및 확산계수 범위를 가진 실험자료를 기반으로 한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

시간의존성 염화물 확산계수와 압축강도 상관성에 대한 실험적 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 6개월간 침지시킨 겉보기 확산계수에서 혼화재료를

사용한 경우와 물-결합재가 낮은 경우 뚜렷한 확산계수의 감소를 보이고 있었다. 가장 높은 확산계수는 OPC100-47에서 나타났으며(7.3E-12 m²/sec), 가장 낮은 확산계수는 G50N50-37과 G30S05-37에서 1.4E-12 m²/sec로 평가되었다.

- 2) 촉진확산계수의 시간의존성을 시간지수 m 을 이용하여 겔보기 확산계수와 비교를 수행하였다. GGBFS 및 FA를 사용한 콘크리트에서는 장기적으로 확산계수의 감소가 두드러지므로 OPC 콘크리트에 비하여 큰 m 이 도출되었다. m 최대값은 F30N70-47(FA 30% 치환, w/b 47%)에서 0.5895로 나타났으며 최소값은 OPC100-47(OPC 100%, w/b 47%)에서 0.1399로 평가되었다. 충분한 FA 치환률을 가진 콘크리트가 초기에는 높고 장기적으로는 낮은 확산계수를 가지므로 높은 m 값이 도출되었다.
- 3) OPC 콘크리트라 하더라도 단위시멘트량이 큰 배합에서는 수화물 생성이 더욱 활발해지고 이로 인해 확산계수의 감소가 커진다. 물-시멘트비에 따라 시간지수의 변화를 고려할 필요가 있다고 판단되며, 이 실험을 통한 시간지수의 감소율을 도출하였다.
- 4) 촉진확산계수와 겔보기확산계수의 비교에서는 재령이 증가할수록 전체적인 확산계수들이 감소하고 있으며, 선형 관계가 유지되고 있었다. 촉진확산계수는 겔보기확산계수에 비해 1.6878~1.7805배 큰 선형관계를 가지고 있었는데, 재령의 증가와 무관하게 거의 일정한 상관관계를 가지고 있었다.
- 5) 재령의 변화에 따른 촉진확산계수와 28일 강도는 배합별로 모두 뚜렷한 선형적인 상관성을 나타내고 있었으며, 거의 0.9 이상의 높은 결정계수를 보이고 있었다. 또한 재령 6개월의 겔보기 확산계수와 재령에 따라 변하는 강도의 비교에서도, 각 배합별로 선형적인 관계가 도출되었다.

참고문헌

1. Broomfield, J. P., *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*. London: E&FN, 1997, pp. 1-15.
2. Song, H. W., Pack, S. W., Lee, C. H., and Kwon, S. J., "Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration," *Journal of Restoration of Building and Monument*, Vol. 12, No. 1, 2006, pp. 265-284.
3. RILEM, "Durability Design of Concrete Structures," Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 1994, pp. 28-52.
4. JSCE-Concrete committee, Standard Specification for Concrete Structures, 109, 2003, pp. 28-52.
5. MLTM, *Standard Concrete Specification-Durability*, Korea Concrete Institute, 2004, pp. 18-26.
6. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., "Multi-Scale Modeling of Concrete Performance," *Journal of Advanced Con-*

- crete Technology*, Vol. 1, No. 2, 2003, pp. 91-126.
7. Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T., *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Tylor & Francis, London and Newyork. 1st Ed., 2009, pp. 291-352.
8. Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K., "A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete Using Mineral Admixture," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 1A, 2005, pp. 213-223.
9. 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.
10. 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))
11. CEB-FIP Model Code for Service Life Design, *The International Federation for Structural Concrete (fib)*, Task Group 5.6, 2006, pp. 16-33.
12. Kwon, S.-J., Na, U. J., Park, S.-S., and Jung, S. H., "Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion," *Structural Safety*, Vol. 31, No. 1, 2009, pp. 75-83. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.03.004>)
13. 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, 2012, pp. 481-490. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.4.481>)
14. 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.
15. NORDTEST Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, NT BUILD 492, 1999, pp. 1-11.
16. Kwon, S. J., Song, H. W., Byun, K. J., and Park, C. K., "Analysis of Chloride Penetration in Concrete with Mineral Admixtures Using Neural Network Algorithm and Micro Modeling," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 1A, 2007, pp. 117-129.
17. 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-A](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(90)90083-A))
18. Tang, L., *Chloride Transport in Concrete*, Publication P-96:6. Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996, pp. 26-85.
19. Nordtest Method, NT BUILD 443, Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration, UDC 622. 43, Approved 1995, 11 pp.
20. Korea Expressway Corporation, "Characteristics Study with Cement Type for Concrete Durability Improvement of RC," *Technical Report*, 1999, pp. 129-133.
21. Song, H.-W., Jang, J.-C., Saraswathy, V., and Byun, K. J.,

- “An Estimation of the Diffusivity of Silica Fume Concrete,” *Building and Environment*, Vol. 42, No. 3, 2007, pp. 1358-1367. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.019>)
22. Khedr, S. A. and Zaid, M. N., “Characteristics of Silica-Fume Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 6, No. 3, 1994, pp. 357-375.
23. Polder, R. B., Wegen, G. V., and Boutz, M., “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*, Madrid, Spain., March 2006, pp. 19-21.
24. Lee, C. Y., Kim, H. S., Kim, J. C., Cheong, H. M., and Ahn, T. S., “Comparison of Test Methods for Evaluation of Chloride Diffusion Coefficient in Concrete,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 1, 2008, pp. 581-584.
25. Leem., Y. M., Yang, E. I., and Min, S. H., “Comparison of Diffusion Characteristics of Chloride According to the Condition of Hardened Concrete,” *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 19, No. 3, 2004, pp. 89-94.
26. Yoon, C. S., Kim, K. H., Yang, W. Y., and Cha, S. W., “Chloride Diffusion Coefficient at Reference Time for High Performance Concrete for Bridge Pylons in Marine Environment,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 4, 2012, pp. 435-444. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.4.435>)
27. Polder, Rob B., Wegen, Gert van der, and Boutz, M., “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*, Madrid, Spain, 2006.
28. Al-Amoudi, O. S. B., Al-Kutti, W. A., Ahmad, S., and Maslehuddin, M., “Correlation between Compressive Strength and Certain Durability Indices of Plain and Blended Cement Concretes,” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 9, 2009, pp. 672-676. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.005>)
29. Yoon, E. S., Lee, T. W., and Park, S. B., “Analysis of Correlation between Compressive Strength, Void Ratio and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Using Various Kinds of Cement,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 5, 2005, pp. 735-742.

요약 콘크리트의 대표적 물성치인 강도 및 염화물 확산계수는 재령에 따라 변화하며, 염화물 침투 해석시 이러한 영향들이 고려되고 있다. 이 연구는 다양한 혼화재료 (고로슬래그 미분말, 플라이애쉬, 실리카 폼)을 포함하는 고성능 콘크리트의 축진염화물 확산계수, 겔보기 염화물 확산계수, 강도 특성을 재령에 따라 실험적으로 도출하고 그 상관성을 분석하는데 목적이 있다. 이를 위해 30개의 배합을 가지는 고성능 콘크리트가 제작되었고, 재령 28일, 91일, 180일, 270일에 대한 축진확산계수를 실험적으로 도출하였으며, 또한 동일배합에 대하여 침지 6개월 이후의 겔보기 확산계수가 도출되었다. 재령에 대한 강도 특성을 평가하기 위해, 재령 7일, 28일, 91일, 180일에 대한 강도시험이 수행되었다. 시간 의존적인 축진확산계수의 변화가 겔보기 확산계수 및 강도와 비교되었으며, 각각의 상관관계가 재령에 대하여 분석되었다. 이 연구를 통하여 겔보기 확산계수와 축진확산계수는 재령에 큰 영향을 받지 않으면서 선형적인 상관성이 도출되었다. 또한 강도와 축진확산계수 그리고 강도와 겔보기 확산계수에서도 재령에 큰 영향을 받지 않는 선형적인 관계가 도출되었다.

핵심용어 : 고성능 콘크리트, 시간의존성, 축진확산계수, 강도, 겔보기확산계수