

양생조건이 고로슬래그 미분말을 혼입한 시멘트 콘크리트의 염화물이온 확산계수에 미치는 영향

Effect of Curing Condition on the Chloride ion Diffusion Coefficient in Concrete with GGBFS

박 장 현¹

이 한 승^{2*}

Park, Jang-Hyun¹ Lee, Han-Seung^{2*}

Doctor's course, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea ¹

Professor, Department of Architecture & Architectural Engineering, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea ²

Abstract

The changes in the resistance to chloride ingress of concrete using a ground granulated blast furnace slag (GGBFS) according to curing conditions were examined. The curing conditions were divided in air-dry curing and under-water curing. Three concrete mixtures with the GGBFS replacement ratio of 0%(control), 30%, and 60% were prepared. For tests, evaluations of concrete compressive strength, and chloride ion diffusion coefficient were performed. As the GGBFS replacement ratio increased, the concrete compressive strength of the in air-dry cured specimens decreased compared to under-water cured specimens. When the chloride ion diffusion coefficient was measured, the chloride ion diffusion coefficient decreased as the GGBFS replacement ratio increased. However, the diffusion coefficient of the in air-dry cured specimen was increased up to 111% compared with the under-water cured specimen

Keywords : concrete, curing condition, ground granulated blast furnace slag, chloride ion, diffusion coefficient

1. 서 론

콘크리트의 성능은 일반적으로 강도 및 내구성에 의해 판단되며, 최근 콘크리트의 내구성이 사회적인 문제로 부각되면서 고품질 고내구성을 갖는 콘크리트 개발이 절실히 요구되고 있다. 이러한 철근 콘크리트의 내구성에 있어 가장 중요한 문제는 매립된 보강철근의 부식에 의한 열화이다 [1,2].

콘크리트에 매립된 철근은 강알칼리의 시멘트 환경에서 표면에 안정한 산화피막이 형성되어 철근이 부식으로부터

보호받는다. 하지만 콘크리트의 중성화로 인한 pH의 감소나, 염화물이온의 침투에 따라 철근은 부식하게 되며, 철근의 부식에 의해 생성된 부식생성물에 의해 철근의 부피가 증가하고 콘크리트의 균열을 발생시킨다[3]. 특히 해양환경의 영향을 받는 지역의 철근콘크리트 구조물의 경우 염화물이온 침투에 의한 철근부식으로부터 점차 막대한 유지관리비가 요구되는 단계이다.

콘크리트의 염해에 대한 내구성을 향상시키기 위한 방안으로 콘크리트의 공극구조를 치밀하게 하여 염화물이온 등과 같은 유해인자의 침입을 차단하는 데 유효하다고 알려져 있는 고로슬래그 미분말(GGBFS)이나 플라이 애쉬(FA) 등과 같은 혼화재를 활용하는 방법이 제시되어 있다[4,5]. 특히 콘크리트에 이러한 혼화재를 사용하면 대기로의 CO₂ 배출을 감소시키는데 도움이 되어 환경 친화적인 것으로 보고되었다[6,7]. 또한 경화된 콘크리트의 수분 및 염소이온의 침투성과 확산속도가 크게 감소하며, 콘크리트의 밀

Received : September 16, 2019

Revision received : October 1, 2019

Accepted : October 4, 2019

* Corresponding author : Lee, Han-Seung

[Tel: 82-31-400-5181, E-mail: ercleehs@hanyang.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

도 증가로 인해 황산염, 알칼리-골재 반응을 억제하고, 철근의 부식도 억제되는 것으로 알려져 있다[8,9].

그러나 시멘트를 GGBFS로 치환하여 사용하는 경우, 양생환경에 대한 의존성이 높다는 것은 지속적으로 지적되어 온 문제점 중 하나이다. 시멘트를 GGBFS로 치환하여 사용하는 경우 수중양생, 기중양생에 의한 콘크리트의 공극 구조의 변화가 크다는 연구결과가 보고되고 있다[10-16]. 또한 공극의 형성이 사용되는 재료 및 양생환경과 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며, 콘크리트 내부 공극의 크기 및 분포는 콘크리트 외부에서 침투하는 열화인자의 침투 및 확산과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되었다[14-18]. 이와 같이 콘크리트에 GGBFS가 사용되는 경우, 양생조건과 콘크리트의 열화인자에 대한 저항능력이 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 확인되며, 양생조건에 따른 GGBFS를 사용한 콘크리트의 염해에 대한 저항성의 변화에 대한 체계적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 양생조건이 GGBFS를 사용한 콘크리트의 염해저항성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 양생조건을 기중양생과 수중양생으로 구분한 콘크리트 시험체에 대하여 기초적 재료특성과 염화물이온 침투저항성 평가를 실시하여 비교평가 하였다. 이를 통하여 양생조건이 GGBFS를 사용한 콘크리트의 염해저항성에 미치는 영향에 대한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

연구에 사용된 결합재의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 시멘트는 KS L 5201에 명시되어 있는 밀도 3.15g/cm^3 , S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그 미분말은 KS F 2563에 명시되어 있는 분말도 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말 3종을 사용하였다.

굵은골재의 크기에 따른 콘크리트의 기초성능 및 염해저항성의 영향을 최대한 줄이기 위하여 굵은골재 최대크기를 13mm로 제한하여 사용하였으며, 잔골재는 쇄사와 세척사를 일정비율로 혼합하여 사용하였다. 혼화제는 콘크리트의 유동성 및 공기량을 확보하기 위하여 고성능 A·E감수제와 S·P제를 함께 사용하였으며, 철근 부식 및 염해저항성에 대한 영향을 최대한 줄이기 위하여 염소이온이 포함되어 있지 않은 S사의 제품을 사용하였다.

Table 1. Chemical compositions of binder

Name	Chemical Compositions (%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	etc.	L.O.I
OPC	19.7	5.3	0.3	2.9	61.7	3.8	2.5	0.9	2.8	2.3
GGBFS	33.4	13.4	0.6	0.3	44.6	4.1	2.7	0.4	0.5	0.1

2.2 콘크리트 시험체 배합

본 연구에서 사용된 콘크리트 시험체의 실험수준에 따른 콘크리트 배합비를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Concrete mix proportion

Name	W/B (%)	Unit weight (kg/m ³)					Unit weight (kg/m ³)		
		W	C	GG BFS	S1 ¹	S2 ²	G ³	S.P.	A.E.
OPC-40	40	180	450	-	553	240	867	3.60	0.15
OPC-50	50	180	360	-	607	260	867	3.24	0.12
OPC-60	60	180	300	-	640	273	867	3.01	0.09
S3-40	40	180	315	135	547	240	867	3.15	0.16
S3-50	50	180	252	108	600	260	867	2.88	0.13
S3-60	60	180	210	90	640	273	867	2.40	0.12
S6-40	40	180	180	270	540	233	867	2.70	0.43
S6-50	50	180	144	216	600	253	867	2.16	0.30
S6-60	60	180	120	180	633	267	867	2.10	0.25

¹Crushed Sand, ²Sea Sand, ³Maximum size of coarse aggregate : 13mm

실험에 사용된 콘크리트 시험체는 혼화재를 사용한 콘크리트의 GGBFS 치환율 및 W/B비에 따른 콘크리트의 기초적 재료특성 및 염해저항성을 비교평가 하기 위하여 결합재를 OPC 100%, OPC 70% + GGBFS 30%, OPC 40% + GGBFS 60% 세가지 수준으로 구분하여 제작하였다. 또한 W/B 변화에 따른 혼화재를 사용한 콘크리트의 기초적 특성 및 염해저항성을 비교평가 하기 위하여 W/B를 40%, 50%, 60% 세가지 수준으로 구분하여 총 9가지 콘크리트 시험체를 제작하였다.

2.3 시험체 제작방법

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 배합 직후 $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ 실린더 몰드에 타설 한 후 밀봉하였으며, 24시간 뒤 탈형하여 28일간 양생을 실시하였다.

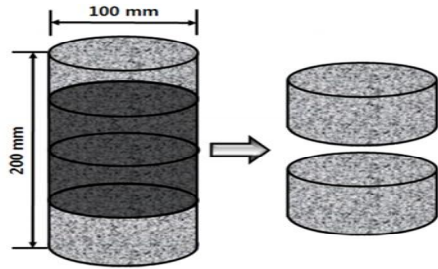


Figure 1. Schematic diagram of specimen for NT BUILD test

콘크리트 염화물이온 침투저항성 평가를 위한 시험체의 경우 양생이 종료된 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 시험체를 50mm간격으로 시험체를 절단하여 $\varnothing 100 \times 50 \text{mm}$ 크기로 제작하였으며, 제작된 시험체의 중앙부 2부분을 사용하였다. 제작된 콘크리트 염화물이온 침투저항성 평가용 시험체의 개요도를 Figure 1에 나타내었다.

2.4 시험체 양생

양생조건에 따른 콘크리트 시험체의 염해저항성을 비교 평가하기 위하여 기중양생과 수중양생으로 구분하여 콘크리트 시험체를 양생하였다. 기중양생 조건의 경우 항온항습기를 이용하여 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 에서 양생을 실시하였으며, 수중양생의 경우 온도 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수중에 완전히 침지하여 양생을 실시하였다.

2.5 실험방법

2.5.1 콘크리트의 기초적 재료특성 평가

KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험방법에 따라서 콘크리트 슬럼프 측정을 실시한 후, KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법에 따라 콘크리트의 공기량 측정을 실시하였다. 그 후 KS F 2403 콘크리트 강도 시험용 공시체 제작방법에 따라 $\varnothing 100 \times 200 \text{mm}$ 원주형 공시체를 제작하였다. 콘크리트의 압축강도 측정은 KS F 2405 콘크리트 압축 강도 시험방법에 따라 UTM (Universal testing machine) 을 이용하여 실시하였으며, 콘크리트 시험체의 양생일에 따라 3일, 7일, 28일에 걸쳐 3회 측정하였다.

2.5.2 콘크리트의 염화물이온 침투저항성 평가

콘크리트의 염해저항성은 폭로시험으로부터 가장 정확한 값을 도출할 수 있으나, 상당히 장시간이 소요되어 일반

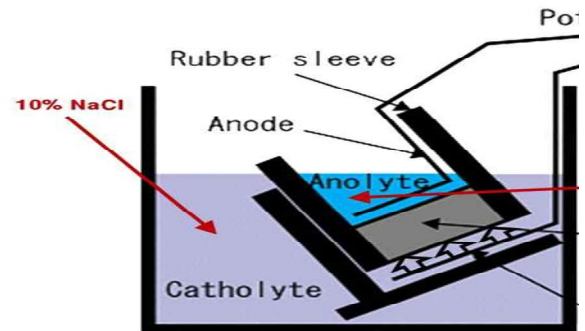


Figure 2. Test setup of non steady state migration test

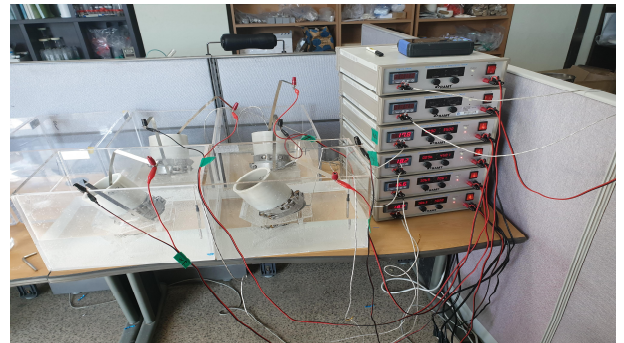


Figure 3. Photograph image of NT BUILD 492 test setup

적으로 전기화학적 촉진법을 이용하여 유해물질의 저항성 및 확산계수를 평가하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 염소이온 침투저항성 평가방법 중 정량 평가법으로 많이 사용되고 있는 북유럽 규정 NT BUILD 492에 의하여 CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON STEADY STATE MIGRATION EXPERIMENTS을 진행하였으며 실험을 위해 구성된 셀의 개요도를 Figure 2에, 모든 준비가 끝난 실험의 사진을 Figure 3에 나타내었다.

이 실험방법은 비정상상태의 전기적 이동 실험으로 콘크리트, 모르타르 및 시멘트로 구성된 보수재료의 염화물 이동계수를 결정하는 시험방법이다. $\varnothing 50 \times 100 \text{mm}$ 크기의 콘크리트 시험체를 준비하고 데시케이터와 진공펌프를 이용하여, 데시케이터에 포화 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 수용액을 채우고 시편을 침지한 후 진공 펌프를 이용하여 데시케이터 내부를 진공 상태로 유지하여 콘크리트의 공극이 포화수산화칼슘 용액으로 포화되도록 한다. 전처리가 모두 끝나면 Figure 3과 같이 염소이온 확산셀을 구성하여 양극에는 0.3M NaOH수용액을 넣고 음극에는 10% NaCl수용액을 채운다음 초기 전류값(I_{30V})를 측정하였다. 그 후 Table 3에서 초기 전류값에 따른 mA의 범위를 찾아 실제 적용전압을

조정하였으며 전류에 따른 적절한 시간을 선택하여 전위차를 이용한 염화물이온 침투저항성을 시험하였다.

Table 3. Test voltage and duration for concrete specimen with normal binder content

Initial current I_{30V} (with 30V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration (hour)
$I_{30V} < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_{30V} < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_{30V} < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_{30V} < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_{30V} < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_{30V} < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_{30V} < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_{30V} < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_{30V} < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_{30V} < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_{30V} < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_{30V} \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

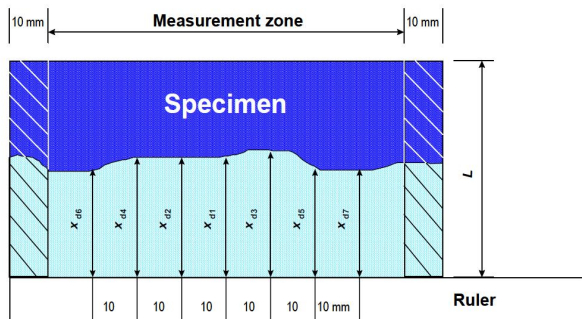


Figure 4. Measurement for chloride penetration depths

시험 종료 후 시편을 축방향으로 2개의 조각으로 할렬하여 할렬 단면에 0.1N AgNO₃용액을 분무하면 염화물이온의 침투깊이에 따라 시편의 변색부가 나타나며, 10mm 간격으로 7개소를 측정의 평균값을 염화물 침투깊이로 하여 확산계수를 구하였다. 염화물 침투깊이 측정방법에 대한 개요도를 Figure 4에 나타내었다.

또한 염화물이온 침투깊이로부터 확산계수 추정식은 식 (1)과 같다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (1)$$

여기에서, D_{nssm} : non-steady-state migration coefficient ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

U : absolute value of the applied voltage (V)

T : average value of the initial and final temperatures in the anolyte solution(°C)

L : thickness of the specimen (mm)

x_d : average value of the penetration depths (mm)

t : test duration (hour)

3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트의 물리적 특성 평가결과

W/B와 혼화재 치환율에 따른 콘크리트의 물성이 본 연구범위의 목표성능을 만족하는지 평가하기 위하여 슬럼프 플로 및 공기량 측정을 실시하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Result of concrete slump & air content

Name	Target Slump (mm)	Slump (mm)	Target Air content (%)	Air content (%)
OPC-40		210 (+10)		4.2 (-0.3)
OPC-50		205 (+5)		4.6 (+0.1)
OPC-60		195 (-5)		3.6 (-0.9)
S3-40		215 (+15)		5.0 (+0.5)
S3-50	200 ± 25	215 (+15)	4.5 ± 1.5	5.1 (+0.6)
S3-60		195 (-5)		5.2 (+0.7)
S6-40		210 (+10)		4.5
S6-50		200		4.7 (+0.2)
S6-60		200		4.5

균치않은 콘크리트 슬럼프 측정결과 배합에 따라 편차를 보이긴 했으나, 모든 수준에서 본 연구에서 목표했던 200±25mm를 만족하였다. 공기량 측정결과도 각 배합에 따른 편차를 보이긴 했으나, 모든 수준에서 본 연구에서 목표했던 4.5±1.5%를 만족하는 결과로 나타났다.

콘크리트의 실험수준과 양생조건 및 양생일에 따른 압축강도 측정결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Result of compressive strength

Name	Compressive Strength (MPa)			Rate of change (28d) (%)	
	3d	7d	28d		
OPC-40	W*	35.9	42.3	51.7	-7.54
	A**	35.8	42.7	47.8	
OPC-50	W	26.1	32.7	41.1	-5.84
	A	25.9	32.7	38.7	
OPC-60	W	18.4	23.2	30.0	-2.67
	A	18.0	23.2	29.2	
S3-40	W	28.3	37.8	53.6	-7.65
	A	27.2	37.8	49.5	
S3-50	W	19.6	28.9	43.9	-13.21
	A	19.4	28.9	38.1	
S3-60	W	13.6	22.6	34.0	-17.06
	A	13.6	20.9	28.2	
S6-40	W	25.2	40.8	50.7	-9.66
	A	24.7	37.1	45.8	
S6-50	W	17.3	30.1	42.7	-15.93
	A	16.6	28.8	35.9	
S6-60	W	11.8	22.4	33.4	-17.96
	A	11.8	20.9	27.4	

W : Underwater Curing(20±2°C),

A** : In Air Curing(20±2°C, Humidity 60±5%)

또한 양생조건 및 양생일에 따른 콘크리트 압축강도의 변화를 실험수준에 따라 Figure 5~7에 나타내었다.

측정된 콘크리트의 초기 압축강도(3d)는 양생조건에 따른 압축강도의 차이가 거의 보이지 않았으며, W/B 40%와 수중양생 조건 기준으로 OPC 35.9MPa > S3 28.3MPa > S6 25.2MPa 순으로 높게 나타났다. 같은 조건에서 28일 압축강도는 S3 53.6MPa > OPC 51.7MPa > 50.7MPa 순으로 S3-40 수중양생 시험체의 압축강도가 가장 높게 나타났다. 하지만 그 차이가 OPC 대비 2MPa 이하로 크지 않았으며, S6 시험체와도 3MPa 이하로 나타나 W/B 40%와 수중양생 조건에서 GGBFS 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도는 크게 차이가 나지 않는 것으로 확인되었다. 이는 수중양생 조건에서 GGBFS의 잠재수경성에 의한 압축강도 발현에 따른 것으로 사료되며, 추후 미세구조 분석 및 수화생성물 분석에 의한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

모든 시험체에서 동일하게 W/B비가 높아질수록 압축강도는 감소하는 경향이 나타났으며, 수중양생 조건에 비하여 기중양생 조건 시험체의 콘크리트 압축강도가 감소하는 경향이 나타났다.

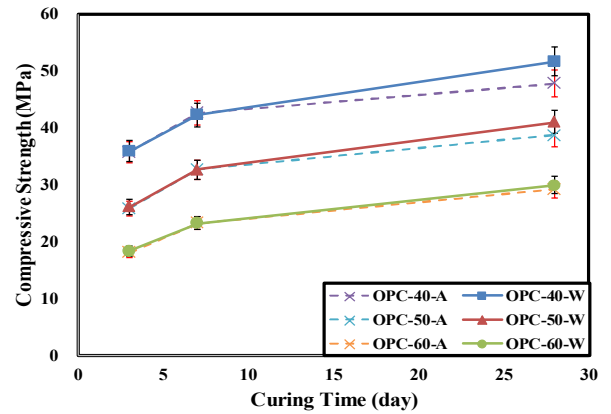


Figure 5. Result of compressive strength (OPC)

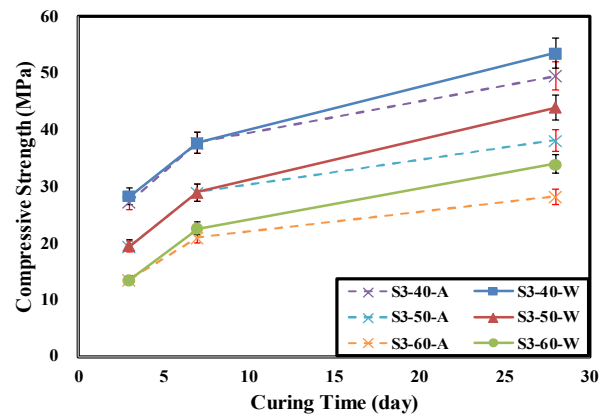


Figure 6. Result of compressive strength (S3)

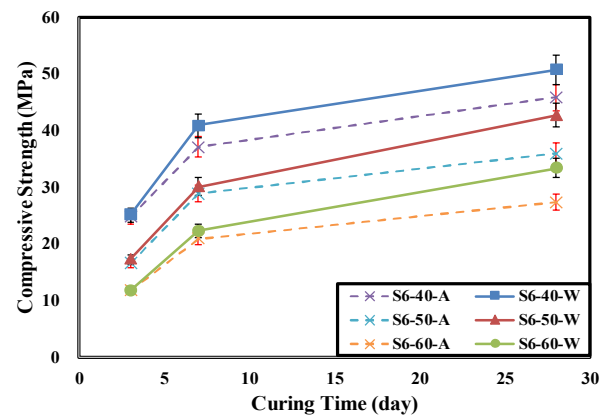


Figure 7. Result of compressive strength (S6)

특히 GGBFS가 혼입된 콘크리트의 경우 OPC를 사용한 콘크리트에 비하여 강도발현에 대한 수중양생 의존성이 높은 것으로 나타났다. 수중양생 대비 기중양생을 실시한 시험체의 콘크리트 압축강도 감소율이 OPC는 W/B 40% 조건에서 최대 7.54%의 압축강도 감소가 나타났지만,

GGBFS가 혼입된 콘크리트의 압축강도는 GGBFS 치환율이 증가할수록 압축강도 감소율이 증가하는 경향을 확인하였다. GGBFS 30% 치환 콘크리트의 경우 양생조건과 W/B에 따라 압축강도 감소율이 7.65%, 13.21%, 17.06% 감소하였으며, GGBFS 60% 치환 콘크리트의 경우 9.66%, 15.93%, 17.60%, 감소하였다. GGBFS를 사용한 콘크리트의 경우 압축강도 발현에 대한 수중양생의 의존도가 더 높은 것으로 판단되며, GGBFS 치환율이 증가할수록 수중양생에 대한 의존도는 더 높아지는 것으로 판단된다.

OPC의 경우 W/B가 증가할수록 양생조건에 따른 압축강도 감소율이 낮아지는 경향이 나타났다. 이는 W/B 증가에 따른 배합수의 증가로 인하여 콘크리트 내부에서 시멘트의 수화반응에 필요한 공극수가 충분히 내재하였으며, 기중양생 조건에서도 충분한 수화반응이 일어나며 많은 수화생성물이 생성되었기 때문일 것으로 사료된다. 하지만 GGBFS가 혼입된 시험체는 W/B가 증가할수록 양생조건에 따른 압축강도 감소율이 증가하는 경향이 나타났으며 이는 GGBFS의 잠재수경성이 충분히 발휘될 수 있는 양생수가 부족했고 시멘트의 절대량이 감소하여 시멘트 수화반응에 의한 수화물도 적게 생성되었기 때문으로 판단된다 [19-22]. 또한 낮은 재령일(28d)의 영향으로 GGBFS의 잠재수경성이 충분히 일어나지 못하였으며, 90일 이상의 양생을 거치는 경우 GGBFS의 잠재수경성에 의한 콘크리트 압축강도의 회복이 있을 것으로 예상된다.

S3-40 시험체의 경우 강도감소율이 7.65%로 GGBFS를 혼입한 시험체중 가장 낮게 나타났으며, 이는 시멘트가 충분히 수화할 수 있는 배합수가 존재했고 GGBFS도 부분적으로 잠재수경성반응이 진행되었기 때문으로 판단되며 추후 콘크리트 내부 공극구조 및 수화생성물에 관한 미세분석이 필요할 것으로 사료된다[20,22]. 결론적으로 기중양생을 실시한 GGBFS가 혼입된 콘크리트는 양생수의 부족에 의해 수화반응속도 및 수화생성물량이 수중양생에 비하여 제한되었으며, 이로 인해 콘크리트 내부구조가 치밀해지지 못하고 강도발현의 제한으로 이어진 것으로 판단된다 [21,22]. 콘크리트의 공극량과 공극분포의 영향을 받는 압축강도의 측정결과는 염소이온의 침투저항성에도 영향을 미칠 것으로 예상되며, 기중양생 대신 수중양생 조건에서 W/B가 낮을수록 GGBFS의 혼입이 콘크리트의 염해저항성을 증가시켜 매립된 철근의 부식을 지연시킬 수 있는 것으로 판단된다.

3.2 콘크리트 염화물이온 확산계수 평가결과

Table 6과 Figure 8에 콘크리트 배합과 양생조건과 시멘트의 GGBFS 치환율에 따른 콘크리트 염화물이온 확산계수 측정결과를 나타내었다.

Table 6. Result of compressive strength & chloride ion diffusion coefficient by specimens (28d)

Name		Compressive Strength 28d (MPa)	Chloride ion Diffusion Coefficient 28d ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	Rate of change (%)
OPC-40	W	51.7	9.92	28.53
	A	47.8	12.75	
OPC-50	W	41.1	16.56	15.70
	A	38.7	19.16	
OPC-60	W	30.0	22.05	17.94
	A	29.2	37.03	
S3-40	W	53.6	4.47	-0.5
	A	49.5	4.45	
S3-50	W	43.9	5.41	33.83
	A	38.1	7.24	
S3-60	W	34.0	7.42	111.19
	A	28.2	15.67	
S6-40	W	50.7	2.51	52.99
	A	45.8	3.84	
S6-50	W	42.7	3.24	87.96
	A	35.9	6.09	
S6-60	W	33.4	4.12	96.60
	A	27.4	8.10	

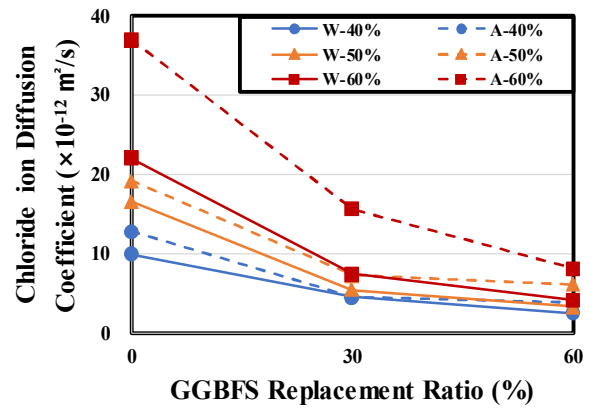


Figure 8. Result of chloride ion diffusion coefficient by specimen (28d)

본 연구에서 계산된 콘크리트 염화물이온 확산계수는 NT BUILD 492에 따라 측정된 염화물이온 이동계수로서 엄격하게는 겉보기 확산계수와 차이가 있지만 통상 측정 소요되는 시간적 문제 등을 감안하여 본 방법이 일반적으로 채용되어 있어 본 연구범위 내에서도 이 값을 기준으로 분석하였다.

모든 시험수준에서 GGBFS 미분말 치환율이 증가할수록 염화물이온 확산계수는 감소하는 경향이 나타났으며, OPC 콘크리트의 염화물이온 확산계수가 양생조건에 상관없이 모든 W/B 조건에서 가장 높게 나타났다. GGBFS를 혼입한 콘크리트의 염화물이온 확산계수는 OPC만을 사용한 시험체에 비하여 큰 폭으로 감소하였으며, GGBFS의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 염화물이온 확산계수는 감소하는 경향이 나타났다. 또한 모든 시험체의 수중양생 조건에서의 염화물이온 확산계수가 기건양생 조건에서의 염화물이온 확산계수보다 높게 나타났으며, W/B가 증가할수록 그 차이가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다.

또한 모든 시험수준에서 수중양생 대비 기중양생 콘크리트의 염화물이온 확산계수가 증가하는 경향이 나타났으며, S3-40 시험체만이 W/B 40% 조건에서 기중양생 시험체와 수중양생 시험체의 염화물이온 확산계수가 거의 동일함을 갖는 것으로 나타났다. 이는 GGBFS 치환 30%와 W/B 40% 시험수준에서 기중양생 조건에서도 콘크리트의 충분한 수화 및 GGBFS의 잠재수경성반응이 진행되어 치밀한 공극구조를 형성했기 때문으로 사료된다. 하지만 GGBFS 30%를 치환한 콘크리트 시험체의 W/B 50% 조건과 60% 조건에서는 수중양생 대비 기중양생 시험체의 염화물이온 확산계수가 높게 나타났으며, W/B가 증가할수록 수중양생 대비 기중양생 조건의 콘크리트 염화물이온 확산계수 증가율이 더 높아지는 것을 확인하였다. OPC 시험체의 경우 W/B가 증가할수록 양생조건에 따른 염화물 이온 확산계수 증가율이 감소하는 경향을 보였지만, GGBFS가 혼입된 콘크리트의 경우 W/B가 증가할수록 양생조건에 따른 염화물 이온 확산계수 증가율이 증가하는 경향을 확인하였다.

국내 콘크리트 시방서 내구성 편에서는 실험을 통해 염화물 이온 확산계수 예측식을 도출하도록 하고 있으며, 실험에 따른 염화물이온 확산계수 예측식을 식 (2)에 나타내었다.

$$\log D_p = a(W/B)^2 + b(W/B) + c \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서, W/B : 물-결합재 비

a, b, c : 실험으로 정해지는 상수

식 (2)를 이용하여 도출된 시험수준에 따른 염화물이온 확산계수 예측식을 Table 7에 나타내었으며, 기존에 사용되는 예측식 중 하나인 일본 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 시멘트 종류에 따른 염화물이온 확산계수 예측식 (JSCE, 2001)과 실험결과를 통해 도출된 예측식을 비교하여 Figure 9와 10에 나타내었다.

Table 7. Chloride ion diffusion coefficient prediction according to binder type & curing condition

Name	Chloride ion diffusion coefficient prediction equation
OPC	W $\log D_p = 1.7366x^2 - 0.0021x - 8.2805$
	A $\log D_p = 10.277x^2 - 7.9616x - 6.3541$
S3	W $\log D_p = 2.7158x^2 - 1.6154x - 8.1381$
	A $\log D_p = 6.1976x^2 - 3.464x - 7.9576$
S6	W $\log D_p = 1.0356x^2 + 0.0405x - 8.7822$
	A $\log D_p = 1.4819x^2 + 0.1388x - 8.7083$

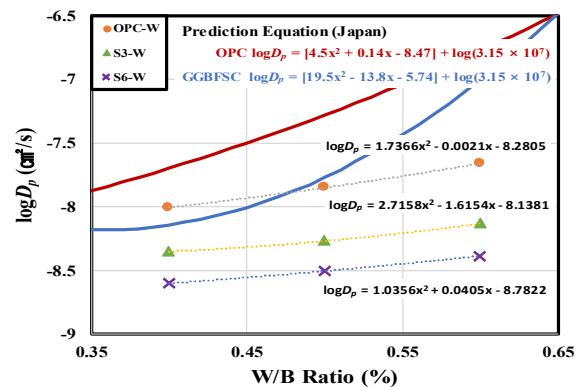


Figure 9. Variation of chloride ion diffusion coefficient according to W/B in under-water curing condition

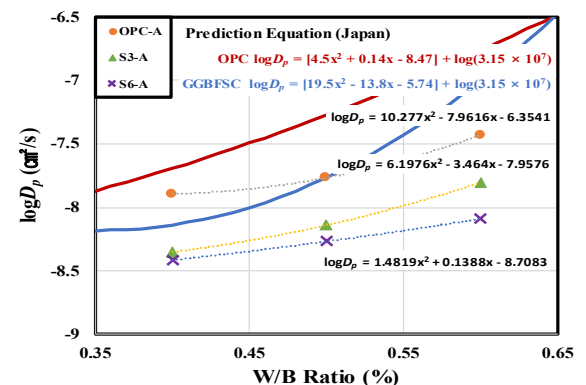


Figure 10. Variation of chloride ion diffusion coefficient according to W/B in air-dry curing condition

하지만 수중양생을 실시한 시험체의 염화물이온 확산계수 예측식보다 기중양생을 실시한 시험체의 염화물이온 확산계수 예측식의 기울기가 크게 나타났으며, 이는 기중양생 시험체의 경우 W/B가 증가함에 따라 염화물이온 확산계수의 증가량이 수중양생보다 크게 나타나 추세선의 기울기가 증가하기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 양생조건이 GGBFS를 사용한 콘크리트의 염해저항성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 양생조건을 기중양생과 수중양생으로 구분한 콘크리트 시험체에 대하여 기초적 재료특성과 염화물이온 침투저항성 평가를 실시하였으며 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 양생조건에 따른 콘크리트의 압축강도 평가결과 양생 3일에서는 GGBFS치환율, W/B, 양생조건에 따른 압축강도의 차이가 존재하지 않았지만, 양생 28일에서는 수중양생대비 기중양생 시험체의 압축강도가 감소하는 경향을 확인하였으며, OPC의 경우 W/B가 증가할수록 양생조건에 따른 압축강도의 감소율이 줄어드는 것을 확인하였다. GGBFS를 혼입한 경우 GGBFS 치환율이 증가할수록 수중양생 대비 기중양생 시험체의 압축강도 감소율이 증가하는 것을 확인하였다.
- 2) 양생조건에 따른 콘크리트의 염화물이온 확산계수 평가결과 GGBFS치환율이 증가할수록 감소하는 것을 확인하였으며, W/B가 증가할수록 염화물이온 확산계수가 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 GGBFS치환율이 증가할수록 수중양생 대비 기중양생 시험체의 콘크리트 염화물이온 확산계수가 증가하였으며, 최대 111%까지 양생조건에 의해 증가하는 것을 확인하였다.
- 3) OPC를 GGBFS로 치환하여 사용하는 경우 GGBFS 치환율이 증가할수록 수중양생 대비 기중양생 콘크리트의 압축강도 발현이 제한되었으며, 콘크리트의 염해저항성도 수중양생 대비 기중양생 조건에서 크게 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 GGBFS치환율이 증가할수록 콘크리트의 성능발현에 대한 수중양생 의존도가 높아지는 것으로 확인되었다.

요 약

양생조건이 GGBFS를 사용한 시멘트 콘크리트의 염화물이온 확산계수에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. 양생조건은 기중양생 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, RH $60 \pm 5\%$)과 수중양생 ($20 \pm 2^\circ\text{C}$)으로 구분하였으며, GGBFS 치환율은 0% (대조군), 30%, 60%로 구분하여 3가지 배합의 콘크리트를 W/B 40%, 50%, 60%로 구분하여 제작하였다. 시험은 콘크리트 압축강도평가, 염화물이온확산계수 평가를 실시하였다. 콘크리트의 압축강도는 GGBFS 치환율이 증가할수록 수중양생 대비 기중양생 시험체의 압축강도의 발현율이 감소하였다. 염화물이온확산계수 측정결과 GGBFS치환율이 증가할수록 염화물이온 확산계수가 감소하였지만, 수중양생대비 기중양생 시험체의 콘크리트 염화물이온 확산계수는 증가하여 최대 111%까지 증가하는 것을 확인하였다.

키워드 : 콘크리트, 양생조건, 고로슬래그, 염소 이온, 확산계수

ORCID

Jang-Hyun Park, <http://orcid/0000-0001-9911-8145>

Han-Seung Lee, <http://orcid/0000-0001-9776-5859>

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2015R1A5A1037548)

References

1. Mangat PS, Limbachiya MC. Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials. *Cement and Concrete Research*. 1999 Sep;29(9):1475-85. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00130-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00130-1)
2. Wallbank EJ. The performance of concrete in bridges. A survey of 200 highway bridges. London: Hms; 1989. 96 p.
3. Skalny JP. *Materials science of concrete*. Westerville: American Ceramic Society; 1989. p. 285-313.

4. Hussain SE, Mechanisms of high durability performance of plain and blended cements, [master's thesis]. [Dhaharan (Saudi arabia)]: King Fahad University Of Petroleum And Minerals; 1991. 367 p.
5. Page CL, Havdahl J. Electrochemical monitoring of corrosion of steel in microsilica cement pastes, *Materials and Structures*, 1985 Jan;18(1):41–7.
<https://doi.org/10.1007/BF02473363>
6. Gjorv OE, Sakai K. *Concrete technology for a sustainable development in the 21st century*. London: CRC Press; 1999. p. 226–35.
7. Ryu DW, Kim WJ, Yang WH, You JH, Ko JW. An experimental study on the freezing–thawing and chloride resistance of concrete using high volumes of GGBS, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2012 Jun;12(3):315–22.
<https://doi.org/10.5345/JKIBC.2012.12.3.315>
8. Berke NS, Resistance of Microsilica Concrete to Steel Corrosion Erosion and Chemical Attack. Alloy Casting Institute Special Publication, 1989 May;114:861–86.
9. Hussain SE, Rasheeduzzafar. Corrosion resistance performance of fly ash blended cement concrete, *Materials Journal*, 1994 May;91(3):264–72.
10. Papadakis VG, Vayenas CG, Fardis MN. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation, *Materials Journal*, 1991 Jul;88(4):363–73.
11. Ngala VT, Page CL. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, 1997 Jul;27(7):995–1007.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00102-6)
12. Thiery M, Faure P, Morandeau A, Platret G, Bouteloup JF, Dangla P, Baroghel–Bouny V. Effect of carbonation on the microstructure and moisture properties of cement–based materials, 12th International Conference on Building Materials and Components; 2011 Apr 12–15; Porto, Portugal, Porto (Portugal): Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2011. p. 1–8.
13. Mehta PK, Studies on blended Portland cements containing Santorin earth, *Cement and Concrete Research*, 1981 Jul;11(4):507–18.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90080-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90080-6)
14. Goto S, Roy DM. The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, 1981 Jul;11(4):575–9.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90087-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90087-9)
15. Page CL, Short NR, Tarras AEL. Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes, *Cement and concrete research*, 1981 May;11(3):395–406.
[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90111-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90111-3)
16. Aldea CM, Young F, Wang K, Shah SP. Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement, *Cement and Concrete Research*, 2000 Mar;30(3):465–72.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00200-3)
17. Guneyisi E, Mermerdas K. Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air–cured and water–cured concretes modified with metakaolin, *Materials and Structures*, 2007 Dec;40(10):1161–71.
<https://doi.org/10.1617/s11527-007-9258-5>
18. SY JANG, S KARTHICK, SJ KWON. Investigation on durability performance in early aged high–performance concrete containing GGBFS and FA, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017 Mar;2017:1–11.
19. Guneyisi E, Ozturan T, Gesoglu M. A study on reinforcement corrosion and related properties of plain and blended cement concretes under different curing conditions, *Cement and Concrete Composites*, 2005 Apr;27(4):449–61.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.05.006>
20. Poon CS, Wong YL, Lam L. The influence of different curing conditions on the pore structure and related properties of fly–ash cement pastes and mortars, *Construction and Building Materials*, 1997 Sep;11(7–8):383–93.
[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00061-5)
21. Kim YY, Lee KM, Bang JW, Kwon SJ. Effect of W/C ratio on durability and porosity in cement mortar with constant cement amount, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014 Apr;2014:1–11.
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/273460>
22. Park C, Jung YS, Seo CH. An experimental study on the characteristics of microporous structure formation by curing condition of cement and blast furnace slag composite, *Journal of The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 2017 Dec;33(12):63–70.
https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2017.33.12.63