



GGBFS를 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 강도 및 염소이온 침투 저항성

박재성¹⁾ · 윤용식¹⁾ · 권성준^{1)*}

¹⁾한남대학교 건설시스템 공학과

Strength and Resistance to Chloride Penetration in Concrete Containing GGBFS with Ages

Jae-Sung Park,¹⁾ Yong-Sik Yoon,¹⁾ and Seung-Jun Kwon^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon 34430, Rep. of Korea

ABSTRACT Concrete is a durable and cost-benefit construction material, however performance degradation occurs due to steel corrosion exposed to chloride attack. Penetration of chloride ion usually decreases due to hydrates formation and reduction of pores, and the reduced chloride behavior is considered through decreasing diffusion coefficient with time. In the work, HPC (High Performance Concrete) samples are prepared with 3 levels of W/B (water to binder) ratios of 0.37, 0.42, and 0.27 and 3 levels of replacement ratios of 0%, 30% and 50%. Several tests containing chloride diffusion coefficient, passed charge, and compressive strength are performed considering age effect of 28 days and 180 days. Chloride diffusion is more reduced in OPC concrete with lower W/B ratio and GGBFS concrete with 50% replacement ratio shows significant reduction of chloride diffusion in higher W/B ratio. At the age of 28 days, GGBFS concrete with 50% replacement ratio shows more rapid reduction of chloride diffusion than strength development, which reveals that abundant GGBFS replacement has effective resistance to chloride penetration even in the early-aged condition.

Keywords : chloride ion, GGBFS, diffusion coefficient, passed charge, strength

1. 서 론

고성능 콘크리트(HPC: High Performance Concrete)는 강도 및 내구성 뿐만 아니라 작업성에도 우수한 건설재료이므로 1990년대 후반부터 꾸준히 사용되고 있다. 염해에 노출된 콘크리트는 매립된 철근의 부식에 따라 사용성의 저하가 발생하고 균열의 진전, 피복 콘크리트의 박락 등을 야기하며, 최종적으로 구조물의 안전성에 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)은 공학적 안정성이 확보된 부산물로 내구성 확보를 위하여 많이 사용되고 있다. 고로슬래그는 급냉과 서냉으로 분류되는데, 급냉 고로슬래그의 경우 배출된 고온·용융상태의 슬래그에 고압의 냉각수를 다량 방출하여 급냉시킨 슬래그이다. 냉각속도가 빠르기 때문에 결정질 조직이 형성되지 못하고 유리질이 90% 이상을 차지하는 비정질상을 가지며 모래와 유사한 입상을 형

성한다. 급냉 슬래그는 화학조성이 일반 시멘트와 유사하고 화학 반응성이 활발하며, 시멘트의 수화 반응에서 생성된 Ca(OH)₂과 수화반응을 일으키는 잠재 수경성을 나타내기 때문에 미분쇄하여 시멘트 원재료 또는 콘크리트용 혼화재로서 널리 활용되고 있다.^{3,4)} GGBFS를 혼입한 콘크리트는 잠재수경성으로 인해, 수화물을 추가적으로 생성하므로 공극구조가 밀실해지고 장기적인 강도 및 내구성 향상에 매우 효과적인 건설재료로 알려져 있다.^{4,6)} 특히 염해에 매우 효과적이는데, 이는 자유염화물의 흡착량이 OPC (Ordinary Portland Cement)를 사용한 콘크리트보다 크므로 철근부식에 직접적으로 관여하는 자유염화물의 침투에 매우 효과적이다.⁷⁾ 또한 유해물질이 침투하는 확산에 대해서는 조밀한 공극구조로 인해, 확산계수가 감소하게 된다.^{3,8,9)} 초기강도 저하 및 양생시의 특별한 관리가 필요한 단점도 있으나, 최근 들어 단위수량이 확보된 콘크리트에 대해서는 희석효과(Dilution Effect)로 인해, OPC 성분 중 Alite 및 Ferrite의 수화가 촉진된다. 이로 인해 초기재령 강도가 상대적으로 회복되어, 대단위 슬래그 치환 콘크리트(HVSC: High Volume Slag Concrete)와 같은 연구도 진행되고 있다.¹⁰⁻¹³⁾

GGBFS를 사용한 콘크리트에서는 염화물 확산계수가 OPC를 사용한 콘크리트에 비하여 뚜렷하게 감소하게 되는

*Corresponding author E-mail : jjuni98@hannam.ac.kr

Received February 27, 2017, Revised March 27, 2017,

Accepted April 19, 2017

©2017 by Korea Concrete Institute

데, 이는 장기적인 염화물 유입에 효과적으로 대처할 수 있는 효과적인 방어가 된다. 시간에 따라 감소하는 확산계수는 물리적으로는 공극구조의 개선에 따른 확산계수 감소, 수화물 생성에 따른 흡착량의 증대가 주된 기구(Mechanism)이지만, 공학적인 계산을 위해서 시간에 따른 지수함수를 이용하여 염화물 확산 문제를 고려하고 있다.¹⁴⁻¹⁷⁾ 신타조사결과나 장기 침지된 시편을 대상으로 하여 도출된 겉보기 확산계수는 Fick's 2nd Law에 적용이 가능하며, 사용자에게 염화물량을 직접적인 해로 제공하므로 유용하게 사용되고 있다. 그러나 장기간의 실험기간과 질산은 적정에 따른 실험오차가 많이 문제시 되므로 RCPT (Rapid Chloride Penetration Test)와 같은 전기영동실험을 통하여 자유염소 이온의 전기장 내의 속도를 평가하는 방법이 많이 사용되고 있다.^{18,19)} 촉진확산계수를 이용하여 염화물 침투를 해석하기 위해서는 자유염화물과 고정염화물과의 상평형과 확산, 침투, 흡착을 고려한 해석 프레임이 필요하지만,^{5-7,20)} RCPT를 통한 확산성 평가를 통하여 염해 저항성에 대한 상대 비교가 가능하다.

본 연구에서는 재령 28일 및 180일에 대하여 GGBFS를 혼합한 콘크리트의 염화물 저항성과 강도 변화를 재령 특성을 고려하여 분석하였다. 기존의 연구와는 다르게 동일한 배합 및 양생 조건을 고려하였으며, 비정상상태의 염화물 확산계수 특성과 통과된 염화물 전하 특성이 6개월 양생이 진행됨에 따라 강도와 어떤 관계를 가지고 변화하는지에 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 물-결합재비를 3가지 수준(0.37, 0.42, 0.47)으로 설정하고 GGBFS의 치환률을 30% 및 50%로 고려하여 총 9개의 배합을 준비하였다. 또한 ASTM C 1202에서 제안한 전하 통과량과 Tang's Method에 따른 촉진확산계수를 도출하여, 시간에 따른 염화물 거동을 평가하였다.^{21,22)}

2. 실험 프로그램의 개요

2.1 콘크리트 배합

콘크리트 바인더로는 OPC와 GGBFS가 사용되었다. 각 바인더의 화학적 특성은 Table 1에 나타내었으며, 사용된 골재 특성과 혼화제 특성은 Tables 2와 3에 나타내었다. Table 4에서는 HPC의 배합표를 나타내었는데, 슬럼프 150 ± 10 mm, 공기량 4.0 ± 1.0%를 목표로 W/B (water to binder)를 0.37, 0.42 및 0.47로 변화시켜 총 9개 배합의 콘크리트를 제조하였다.

Table 1 Properties of OPC and GGBFS

Types	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)
OPC		21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
GGBFS		32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.2	2.89	4,340

Table 2 Physical properties of aggregate

Types	Items	Gmax (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
	Fine aggregate	-	2.58	1.01	2.90
	Coarse aggregate	25	2.64	0.82	16.87

Table 3 Properties of super-plasticizer

Types	Items	Type	pH	Main component	Solid	Density
	2000R	Liquid	6.7	Polycarbonic Acid	25%	1.08

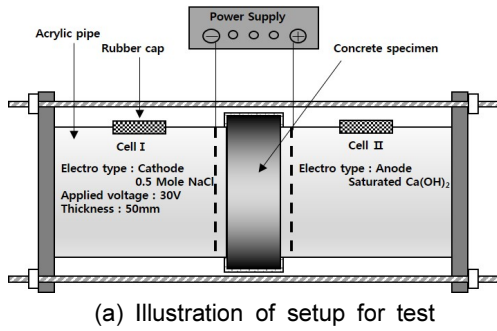
Table 4 Mix proportions for High Performance Concrete

	W/B (%)	Unit weight(kg/m ³)					S.P* (%)
		W	C	GG BFS	F.A	C.A	
OPC 100	37	168	454	0	767	952	1.1
	42	168	400	0	787	976	1.0
	47	168	357	0	838	960	0.95
GGBFS 30	37	168	318	136	762	946	1.3
	42	168	280	120	783	972	1.1
	47	168	250	107	835	956	1.0
GGBFS 50	37	168	227	227	760	943	1.4
	42	168	200	200	780	969	1.2
	47	168	179	179	832	853	1.1

S.P*: Super-plasticizer (wt % of binder)

2.2 Tang's Method에 따른 촉진 촉진염화물 확산시험

전위차에 의한 촉진 염소이온 확산계수를 평가하기 위하여 확산셀을 구성하였다. 음극셀 (Cell I) 용액은 0.5M의 염화나트륨 (NaCl) 용액을 사용하였으며, 양극셀 (Cell II) 용액은 포화 수산화칼슘 (Sat. Ca(OH)₂) 용액을 사용하였다. 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 침투 깊이로부터 촉진확산계수 ($D_{r,qt}$)를 도출하였다. 식 (1) 및 (2)는 촉진확산계수 도출식을 나타낸다.²¹⁾



(a) Illustration of setup for test



(b) Photo for accelerated diffusion test

Fig. 1 Photos for Tang's method test

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

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

여기서 D_{rcpd} 는 비정상상태에서 구한 전위차 촉진 염소이온 확산계수(m^2/sec), R 은 기체상수($8.314\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$), T 는 절대온도(K), L 은 시편두께(m), z 는 이온전자가($=1.0$), F 는 패러데이상수($96,500\text{J}/\text{V}\cdot\text{mol}$), U 는 전위차(V), x_d 는 비색법에 의한 침투깊이(m), t 는 전위차의 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 시편을 제조하였으며 그 평균값을 결과로 사용하였다. Fig. 1에서는 촉진염화물 시험 사진을 나타내고 있다.

2.3 통과 전하량 측정시험

염소이온 투과성 실험은 ASTM C 1202-10²²⁾와 KS F 2711²³⁾의 ‘전기 전도도에 의한 콘크리트 염소이온 침투저항성 시험방법’에 따라 지름 100 mm, 두께 50 mm의 시편을 대상으로 시험을 수행하였다. 시편의 28일 및 180일 수중 양생이후, 3%의 NaCl 수용액과 0.3 M NaOH 수용액을 가진 셀에 60 V의 전압을 인가하여 30분 간격으로 6시간까지 통과 전류량을 측정한다. 60 V의 전압기간 이후 시편을 통과한 전류의 총 투과량은 염화물 침투 저항의 지표로 사용되는데, 식 (3)에서는 계산식을 나타내고 있다.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (3)$$

여기서 Q 는 총 통과 전하량(Coulomb)을 나타내고 있으며,

I_x 는 x 분에서의 전류값(A)를 나타낸다.

2.4 압축강도실험

물-결합재비가 다른 콘크리트에 대하여 재령 28일, 49일, 180일에 대한 압축강도를 평가하였다. 실험방법은 $100 \times 200 \text{ mm}$ 실린더 공시체 시편을 이용하였으며, KS F 2405에 따라 강도실험을 수행하였다. 동일 배합의 3개 시편을 사용하여 그 평균값을 결과로 사용하였다.

3. 시간에 따른 염소이온 침투 저항성의 변화

3.1 시간의존적 확산계수 (RCPT)

본 절에서는 재령에 따른 촉진 확산계수의 변화를 분석하였으며, Table 5에 그 결과를 나타내었다.

실험결과 GGBFS를 사용한 HPC에서는 시간의 경과에 따른 확산계수의 감소가 두드러졌는데, 전술한대로 공극구조 개선과 잠재수경성에 따른 CSH의 증가로 인한 자유염화물의 흡착과 확산성의 감소에 기인한다. Fig. 2에서는 배합과 시간에 따른 확산계수의 변화를 나타내었으며, Fig. 3에서는 확산계수의 감소 비율을 도시하였다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이, GGBFS 혼입량이 증가할수록, W/B가 낮을수록 확산계수는 감소하고 있는데, 이는 기존의 이론과 같은 경향을 보인다.⁶⁾ 재령 28일인 경우, 최대값은 OPC 100%를 사용하고 W/B가 가장 높은 0.47인 경우 $17.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 평가되었으며, 최소값은 GGBFS를 50% 치환하고 W/B가 가장 낮은 0.37인 경우 $2.92 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 평가되었다. 재령이 180일로 증가한 경우도 같은 배합에서 최대값 및 최소값이 평가되었는데, 최대값은 $12.28 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 으로, 최소값은 $1.91 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 평가되었다.

재령이 28일에서 180일로 증가하면서 OPC 100의 경우 59.2~71.4%수준으로 확산계수가 감소하였으며, W/B가 낮을수록 크게 감소하였다. GGBFS 30의 경우 74.8~86.5%수준의 감소를 나타내었으며, GGBFS 50의 경우 32.5~60.0%수준

Table 5 Diffusion coefficients from RCPT with ages

Mix	Items	D_{rcpd} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	
		28 days	180 days
OPC100-37		12.05	7.14
OPC100-42		13.77	9.49
OPC100-47		17.20	12.28
G30N70-37		5.22	4.37
G30N70-42		5.45	4.72
G30N70-47		6.60	4.94
G50N50-37		2.92	1.75
G50N50-42		3.40	1.95
G50N50-47		5.99	1.91

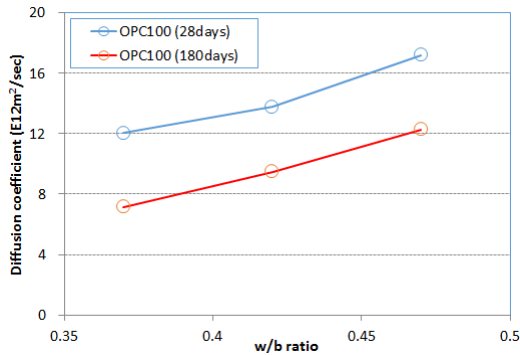
으로 감소하였다. GGBFS 30의 경우 감소율이 너무 작게 평가되었는데, 이는 28일 초기재령에서의 확산계수가 작게 평가되어 감소율이 낮은 것으로 평가되었다. 그러나 GGBFS 50

의 경우 뚜렷한 감소율을 보이며, W/B가 증가할수록 크게 감소하고 있음을 알 수 있다

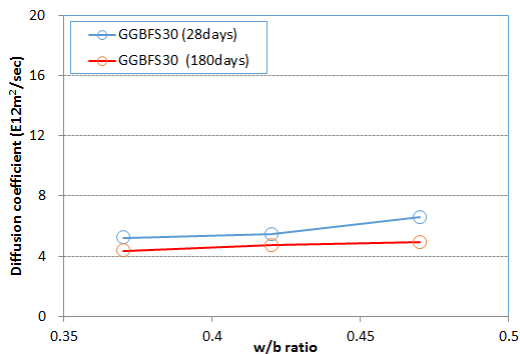
3.2 시간의존적 통과전하량 분석

ASTMC 1202 및 KS F 2711에 따라 통과전하량을 6시간동안 측정하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 또한 배합별 통과전하량을 Fig. 4에, 시간에 따른 전하량 변화율을 Fig. 5에 나타내었다. 또한 ASTM에서 제시한 전하량 평가 등급은 Table 7에 나타내었다.

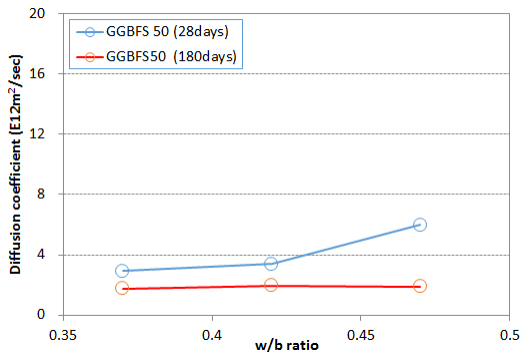
통과 전하량은 염화물 확산계수의 결과와 비슷한 경향이 도출되었는데, 28일 재령에서는 W/B 0.47, OPC 100에서 최대값이 6863.4 C로 평가되었다. 최소값은 W/B 0.37, GGBFS 50에서 829.8 C로 평가되었다. 재령이 180일로 증가함에 따라 통과전하량이 크게 감소하였는데, 동일 배합에서 최대값과 최소값이 2408.4 C와 232.2 C로 감소함을 알 수 있다. 재령이 28일에 대해서는 OPC 배합에서 모두 4000 C를 초과하였으며, 높은 부식 위험군이었으나, 180일 경과 후에는 W/B 0.37 및 0.42 배합에서는 보통수준으로 평가되었다. GGBFS 30 배합에서는 1659.6~2194.2 C 수준으로, GGBFS 50 배합에서는 829.8~1954.8 C 수준으로 비교적 초기재령에서도 우수한 부식 저항성을 가지고 있음을 알 수 있다. 재령효과는 확산계수와 경향이 비슷하지만, 통과전하량은 크게 감소하였다. 통과전하량의 변화는 OPC 100에서는 53.6~67.0%수준으로 감소하였으나, GGBFS 30의 경우는 70.8~84.1%수준으로, GGBFS 50의 경우는 26.2~54.4%수준으로 감소하였다. 확산



(a) OPC system



(b) GGBFS 30 system



(c) GGBFS 50 system

Fig. 2 Diffusion coefficient with W/B ratio and curing period

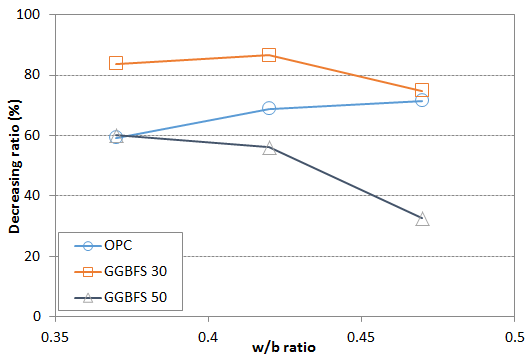


Fig. 3 Decreasing ratio of diffusion coefficient from 28 days to 180 days

Table 6 Passed charge from RCPT with ages

Mix	Items	Q (Coulomb)	
		28 days	180 days
OPC100-37		4494.6	2408.4
OPC100-42		5266.8	3380.4
OPC100-47		6863.4	4597.2
G30N70-37		1659.6	1344.6
G30N70-42		1747.8	1470.6
G30N70-47		2194.2	1553.4
G50N50-37		829.8	451.8
G50N50-42		997.2	513.0
G50N50-47		1954.8	500.4

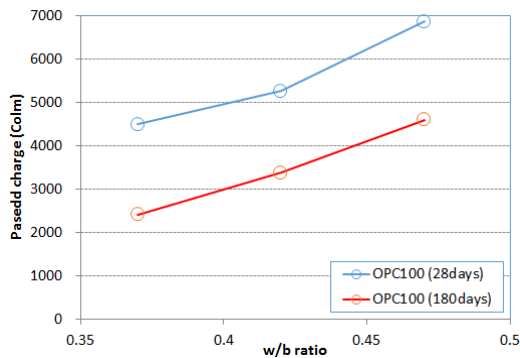
Table 7 Chloride ion permeability based on charge passed

Charge passed (c)	Chloride ion permeability
>4,000	High
2,000-4,000	Moderate
1,000-2,000	Low
100-1,000	Very low
<100	Negligible

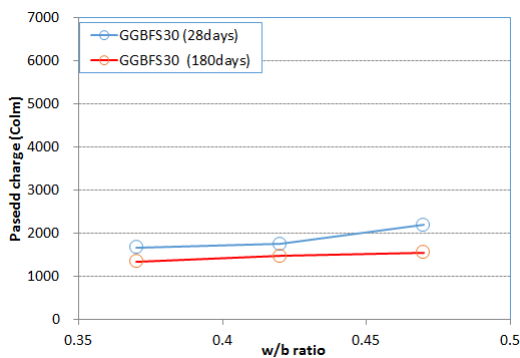
계수와 마찬가지로 GGBFS 30에서는 뚜렷한 전하량 감소를 확인하기 어려웠다.

3.3 시간의존적 강도특성 분석

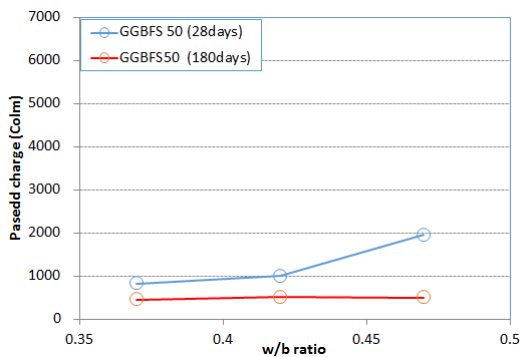
본 절에서는 시간의존적 강도특성을 분석하였다. 각 배합은 재령의 영향에 따라 강도가 증가하였으며, GGBFS 치환



(a) OPC system

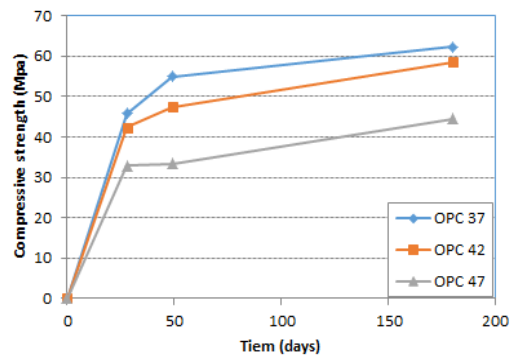


(b) GGBFS 30 system

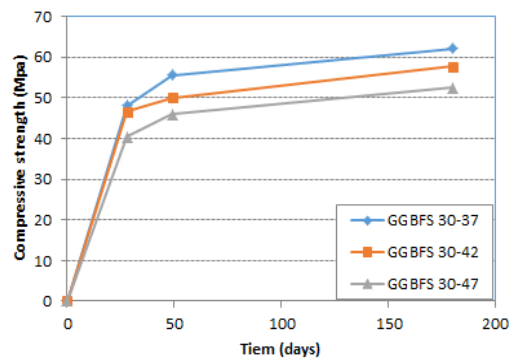


(c) GGBFS 50 system

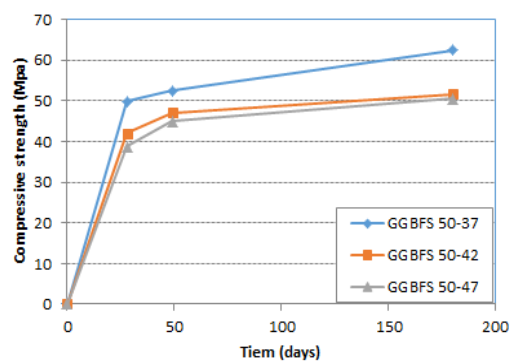
Fig. 4 Passed charge with W/B ratio and curing period



(a) OPC series



(b) GGBFS 30 series



(c) GGBFS 50 series

Fig. 6 Strength development with ages and binder type

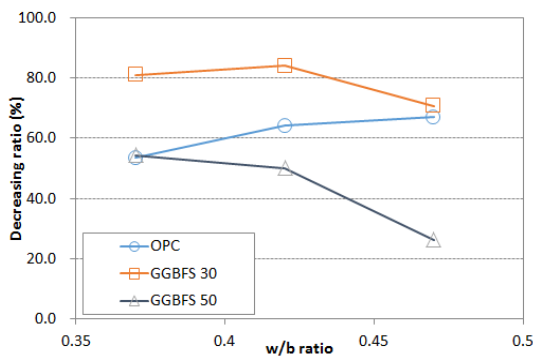


Fig. 5 Decreasing ratio of passed charge from 28 days to 180 days

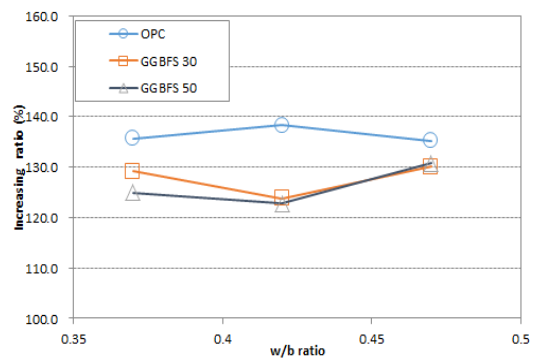


Fig. 7 Increasing ratio of strength from 28 days to 180 days

량이 증가할수록 장기강도 발현이 우수하였다. Fig. 6에서는 재령에 따른 강도특성을 나타내고 있으며, Fig. 7에서는 28일에서 180일로 재령이 증가할 때의 강도증가율을 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 28일에서 180일로 재령이 증가할 때 OPC 100 배합에서는 강도증가율은 135.3~138.3%로, GGBFS 30에서는 123.7~130.1%로, GGBFS 50에서는 122.8~130.8%로 강도 증가가 발생하였다.

4. 시간에 따른 염해 저항성 및 강도 변화 분석

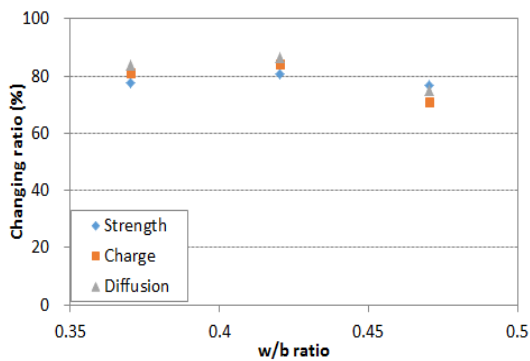
본 절에서는 28일 재령에서의 염화물 확산계수, 통과 전하량, 강도가 180일 재령에서 어떤 관계를 가지고 변화하는지 분석하도록 한다. 시간의 증가에 따라 확산 및 통과 전하량은 감소하고 강도는 증가하므로, 강도의 경우는 증가비의 역수를 취하여 분석하였다. 일반적으로 강도의 증가에 따라 염화물 확산계수는 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있

나 혼화재료의 특성에 따라 크게 변화한다.^{19,24)} Fig. 8에서는 강도, 통과전하량, 확산계수에 대해 각각 재령 28일에 대한 재령 180일의 측정값의 비를 W/B 및 치환률에 따라 분석한 그래프이다.

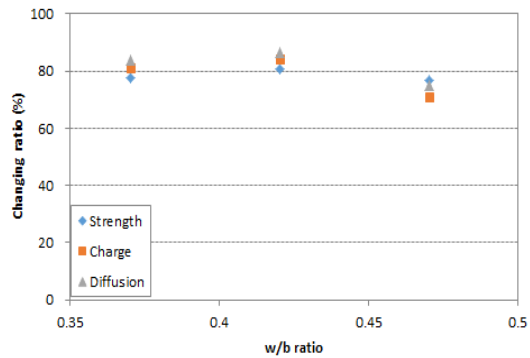
OPC 배합에서는 W/B가 높을수록 염화물 확산 및 통과전하량이 약간 크게 감소하였다. GGBFS의 치환효과는 30%에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않지만, 50%를 치환한 Fig. 8(c)의 결과에서는 매우 큰 감소율을 보이고 있다. W/B의 증가에 따라 강도변화율은 76.5~81.5%수준으로 크게 변화를 보이지 않지만, 통과 전하량에서는 54.4%에서 26.2%로, 확산계수는 60.0%에서 32.5%로 크게 감소하였다. 강도 변화보다 더욱 명확하게 확산성이 감소되는 이유는 GGBFS는 시멘트보다 분말도가 크고, GGBFS를 다량 치환한 콘크리트에서는 GGBFS의 잠재수경성으로 인한 CSH겔의 증가가 나타나고 그에 따른 유효공극률의 감소, 수밀성 증가 및 CSH의 자유 염화물 흡착이 더욱 커지기 때문이다.²⁵⁻²⁹⁾ 확산계수와 통과 전하량의 변화는 거의 일치하는데, 이는 전기장 내에서의 염화물 이동과 침투깊이가 식 (1)과 같이 사용되기 때문이다.

또한 강도와 염화물 확산계수 및 통과전하량의 관계는 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

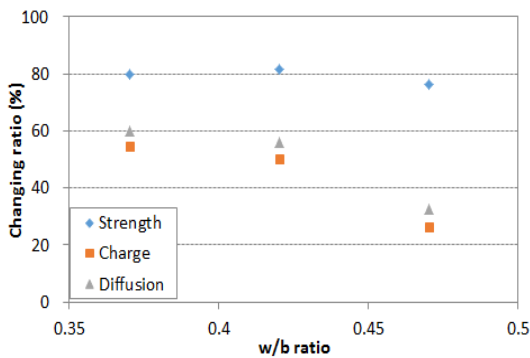
초기재령인 28일에서는 OPC의 경우 강도의 증가에 따라 확산계수 및 통과전하량은 선형적으로 감소한다. 또한 GGBFS 30 배합에서도 강도와 선형적인 관계가 평가되었다. 그러나



(a) OPC series

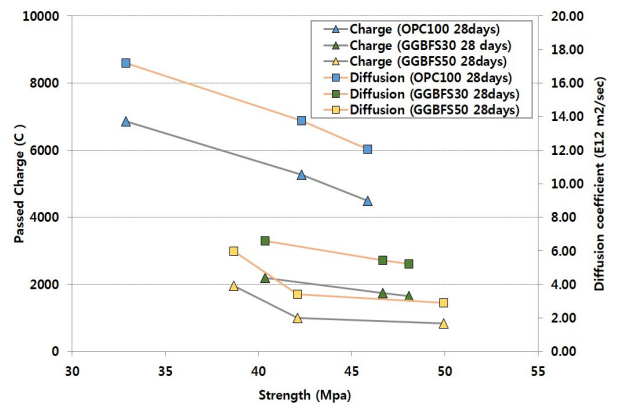


(b) GGBFS 30 series

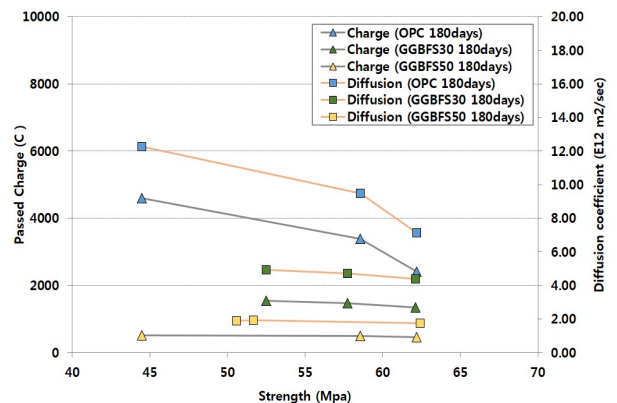


(c) GGBFS 50 series

Fig. 8 Changing ratio of test results with W/B ratio



(a) Strength and chloride behavior (28 days)



(b) Strength and chloride behavior (180 days)

Fig. 9 Relationship between strength and chloride resistance

GGBFS 50 배합의 경우 45 MPa 이상일 때 매우 낮은 수준으로 확산계수와 통과전하량이 감소하였다. GGBFS의 치환량이 큰 경우 재령 28일에서도 염해 저항성이 강도 특성보다 우수하게 평가되기 때문이다. 재령이 180일인 경우, OPC 및 GGBFS에서 모두 거의 선형적인 기울기가 유지되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 28일 및 180일에 측정된 염화물 확산계수 및 통과전하량을 일반 콘크리트 및 GGBFS를 혼입한 콘크리트에 대하여 평가하였으며, 시간에 따라 변화하는 염화물 거동 특성을 강도 변화와 함께 평가하였다. GGBFS를 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 강도, 염화물 확산계수, 전하량 변화 분석을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 재령이 28일에서 180일로 증가하면서 염소이온 확산계수는 OPC 100의 경우 59.2~71.4%수준으로, GGBFS 30의 경우 74.8~86.5%수준으로, GGBFS 50의 경우 32.5~60.0%수준으로 감소하였다. GGBFS 50의 경우 뚜렷한 감소율을 보이며, 물-결합재비가 증가할수록 크게 감소하였다. 통과전하량에서는 OPC 100에서 53.6~67.0%수준으로 감소하였으나, GGBFS 30의 경우는 70.8~84.1 %수준으로, GGBFS 50의 경우는 26.2~54.4%수준으로 감소하였다. 확산계수와 마찬가지로 GGBFS 50에서는 뚜렷한 전하량 감소가 평가되었다.
- 2) 초기재령인 28일에서는 OPC의 경우 강도의 증가에 따라 확산계수 및 통과전하량은 선형적으로 감소하였으며, 이러한 경향은 GGBFS 30 배합에서도 비슷하게 평가되었다. 그러나 GGBFS 50 배합의 경우 확산계수와 통과전하량이 45 MPa 이상부터 크게 감소하였다.
- 3) GGBFS 50 배합의 경우 초기재령에서 강도 특성보다 염해 저항성이 우수하며, 단위수량이 확보된다면 초기 강도 저하의 감소 및 염해저항성의 증가를 확보할 수 있다. 초기재령시 적절한 양생 및 온도관리가 수행된다면 비교적 이른 시기에 염해에 노출되더라도 염해 저항성을 기대할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548).

Reference

1. Broomfield J. P., *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E. & F.N. Spon, London, 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 Environ-

- ment Considering Coupled Deterioration", *Journal of Restoration of Building and Monument*, Vol. 12, No. 1, 2006, pp. 265-284.
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.
4. Korea Concrete Institute, *Concrete and Environment*, Kimondang press, Korea, 2011, pp. 28-36.
5. 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 KSCE*, Vol. 25, No. 1A, 2005, pp. 213-223.
6. Song, H. W., and Kwon, S. J., "Evaluations 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.
7. 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.
8. 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, No. 9, 2009, pp. 672-676.
9. Rob B. Polder, Gert van der Wegen., and Michel Boutz, "Performance Based Guideline for Service Life Design of Concrete for Civil Engineering Structures - A Proposal Discussed in the Netherlands", *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Spain, 2006, pp. 19-21.
10. Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Choi, Y. C., Jung, S. H., and Kim, J. I., "Effects of Replacement Ratio and Fineness of GGBFS on the Hydration and Pozzolanic Reaction of High-strength High-volume GGBFS Blended Cement Pastes", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 2, 2015, pp. 115-125.
11. Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Choi, Y. C., Jung, S. H., and Kim, S. I., "Effect of Limestone Powder and Silica Fume on the Hydration and Pozzolanic Reaction of High-Strength High-Volume GGBFS Blended Cement Mortars", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 27, No. 2, 2015, pp. 127-136.
12. Escalante-Garcia, J. I., and Sharp, J. H., "Effect of Temperature on the Hydration of the Main Clinker Phases in Portland Cements: Part II. Blended Cements", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 9, 1998, pp. 1259-1274.
13. Erdem, T. K., and Kirca, O., "Use of Binary and Ternary Blends in High Strength Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 7, 2008, pp. 1477-1483.
14. 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.
15. Tang, L., and Joost, G., "On the Mathematics of Time-dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 4, 2007, pp. 589-595.
 16. Poulsen, E., "On a Model of Chloride Ingress into Concrete, Nordic Mini Seminar- Chloride Transport", *Department of Building Materials*, Gothenburg. 1993, pp. 1-18.
 17. Al-alaily, H. S. and Hassan, A. A. A., "Time-dependence of Chloride Ion for Concrete Contraining Metakaolin", *Journal of Building Engineering*, Vol. 7, No. 9, 2016, pp. 159-169.
 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. Lee, H. S., and Kwon, S. J., "Analysis 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.
 20. Ishida, T., Maekawa, K., and Kishi, T., "Enhanced Modeling of Moisture Equilibrium and Transport in Cementitious Materials Under Arbitrary Temperature and Relative Humidity History", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 4, 2007, pp. 565-578.
 21. 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.
 22. ASTM C 1202, *Annual book of ASTM standards*, ASTM International, Vol. 4, 2010. pp. 2-5.
 23. KS F 2711, *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration by Electrical Conductance*, Korean Standards Service Network, 2012, pp. 1-18.
 24. Lee, S. H., Kwon. S. G., "Experimental Study on the Relationship between Time-dependent Chloride Diffusion Coefficient and Compressive Strength", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, 2012, pp. 715-726.
 25. Oh, K. S., Mun, J. M., Kwon, S. J. "Chloride Diffusion Coefficient in Cold Joint Concrete with GGBFS", *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol. 20, No. 5, 2016, pp. 44-49.
 26. Delagrave, A., Marchand, J., Ollivier, J. P., Julien, S., and Hazrati, K., "Chloride Binding Capacity of Various Hydrated Cement Paste Systems", *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, No. 1, 1997, pp. 28-35.
 27. Mohammed, T. U., and Hamada, H., "Relationship between Free Chloride and Total Chloride Contents in Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, No. 9, 2003, pp. 1487-1490.
 28. Dhir, R. K., and Jones, M. R., "Development of Chloridere-Sisting Concrete Using Fly Ash", *fuel*, Vol. 78, No. 2, 1999, pp. 137-142.
 29. Song, H. W., Lee, C. H., and Lee, K. C., "A Study on Chloride Binding Capacity of Various Blended Concretes at Early Age", *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol. 12, No. 5, 2008, pp. 133-142.

요 약 콘크리트는 경제적이고 내구성을 가진 건설재료지만, 염해에 노출될 경우 내부 철근부식으로 인한 성능저하를 나타낸다. 콘크리트로 침투하는 염화물 이온은 수화물의 생성, 공극률 감소 등으로 인해 감소하게 되며, 주로 시간에 따라 감소하는 염화물 확산계수를 통하여 염화물 거동이 구현되고 있다. 본 연구에서는 고로슬래그 미분말(GGBFS: Ground Granulated Blast Furnace Slag)과 보통포틀랜드 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement)를 사용한 고성능 콘크리트를 대상으로 염화물 확산계수, 통과전하, 강도를 재령효과를 고려하여 평가하였다. 이를 위해 물-결합재비를 3가지 수준(0.37, 0.42, 0.47), 치환률을 3가지 수준으로 (0%, 30%, 50%)를 고려한 콘크리트를 제조하였으며, 28일 및 180일 재령에 따라 시험을 수행하였다. OPC를 사용한 콘크리트에서는 물-결합재비가 낮은 배합에서 염화물 확산이 감소하였으며, GGBFS를 50% 혼입한 배합에서는 물-결합재비가 높은 경우 염화물 확산성이 크게 감소하였다. 28일 재령에서 GGBFS 치환률이 50%인 경우 강도의 증가보다 빠르게 염화물 확산계수와 통과전하의 감소가 평가되었으며, 이는 초기재령에서도 효과적으로 염화물 침투에 저항할 수 있음을 나타낸다.

핵심용어 : 염화물 이온, 고로슬래그 미분말, 확산계수, 통과전하, 강도