

고로슬래그 미분말 콘크리트의 분말도 및 치환율에 따른 염해 저항성 평가

Evaluation of Chloride Penetration in Concrete with Ground Granulated Blast Furnace Slag considering Fineness and Replacement Ratio

이현호¹ · 권성준^{2*}

Hyun-Ho Lee¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received May 9, 2013 / Revised June 7, 2013 / Accepted June 21, 2013)

Durability performance in RC structures varies significantly with changes in cover depth and mix proportions. GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag) is very effective mineral admixture and widely used for an improved resistance to chloride attack. In this paper, characteristics such as porosity, compressive strength, and diffusion coefficient are evaluated in GGBFS concrete with 30 ~ 70% of replacement ratio and 4,000 ~ 8,000 cm²/g of fineness. Through the tests, more dense pore structure, higher compressive strength, and lower diffusion coefficient are obtained in GGBFS concrete, which are evaluated to be more dependent on replacement ratio than fineness. With increasing curing period from 3 to 91 days, porosity decreases to 77.47% and strength increases to 373% in GGBFS concrete. Chloride diffusion coefficient in GGBFS concrete decreases to 64.4% compared with that in OPC concrete, which shows significant improvement of durability performance.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 분말도, 치환율, 내구성, 공극률

Keywords : GGBFS Ground Granulated Blast Furnace Slag, fineness, replacement ratio, durability, porosity

1. 서론

콘크리트 구조물은 경제적이며 우수한 내구성을 가지고 있으며, 1900년대 초반부터 꾸준히 사용되고 있는 건설재료이다. 최근 들어 내구성에 대한 문제가 사회적, 공학적으로 대두되고 있다. 그 중 염해 (Chloride Attack)에 대한 위험성은 꾸준히 보고되고 있으며, 철근의 부식에 가장 큰 영향을 미치므로 염화물 이동 모델링 및 침투에 대한 연구가 꾸준히 수행되고 있다(Broomfield et al, 1997; Song et al, 2006; Kwon et al, 2007). 피복두께는 매립된 철근을 보호하는 가장 큰 방어기재 (Primary Barrier)이고 이에 따라 국내외 시방서에서는 노출환경에 따른 피복두께 규정을 제시하고 있다(Korea Concrete Institute 2004; JSCE-Concrete committee 2002). 그러나 동일한 피복두께를 가진 RC (Reinforced Concrete)

구조물이라 하더라도 콘크리트의 품질 및 특성에 따라 염화물 침투거동은 크게 달라지며 이에 따라 내구수명 역시 크게 변화한다 (Broomfield et al, 1997; Kwon et al, 2009). 일반적으로 낮은 w/c (water to cement)비와 높은 단위 시멘트량을 가진 콘크리트 배합은 조밀한 공극구조를 가지므로 공극률이 작고 수화물생성량이 많으므로 염화물 침투 저항성이 큰 것으로 알려져 있다(Tang et al, 1993; Song et al, 2007). 또한 동일한 w/c 또는 단위 시멘트량을 가진 배합이라 하더라도 분말도가 높으면 화학적 활성도가 높아지며, 수화도 개선과 낮은 공극률을 유도할 수 있다(Maekawa et al, 1999; Maekawa et al, 2003).

염해에 대한 내구적 저항성을 향상시키기 위해 혼합시멘트 또는 혼합재료 (Mineral admixtures)가 많이 사용되고 있다(Kwon et al, 2007). 특히 고로슬래그미분말 (GGBFS: Ground Granul-

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

¹동양대학교 건축소방행정학과 교수 (Donyang University, Architecture and Fire Administration, Yeongju, 750-711, Korea)

²한남대학교 건설시스템공학과 조교수 (Hannam University, Civil and Environmental Eng., Daejeon, 306-791, Korea)

ated Blast Furnace Slag)은 용광로 방식의 제철작업에서 알루미늄이나 규산염을 주성분으로 한 고온 슬래그를 물, 공기 등에 의하여 급냉시켜 제작한 뒤 분쇄한 혼화재로이다. 고로 슬래그는 잠재수 경성을 가지고 있으며, 장기강도 개선, 수밀성 향상, 수화발열 속도 저감 등의 장점을 가지고 있으므로 플라이애쉬 (FA: Fly Ash)와 함께 대표적으로 사용되는 혼화재로이다.

초기에는 GGBFS 콘크리트에 대하여 강도와 배합도출 등에 따른 정성적인 연구에서 GGBFS 콘크리트의 초기재령 거동(Maekawa et al. 1999; Maekawa et al. 2003), 초기재령거동을 고려한 투수 및 확산특성(Song and Kwon 2009; Lee and Kwon 2012)과 같은 정량적인 모델링 및 평가분야로 확대되고 있다.

본 논문에서는 혼화재로인 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리

트와 보통 콘크리트의 염화물 침투특성을 분석하도록 한다. 특히 분말도를 증가시킨 GGBFS 콘크리트의 역학적 특성 변화 및 공극률 변화를 중심으로 염해 특성을 분석하였다.

2. GGBFS 콘크리트의 특성 실험

2.1 실험개요

분말도 및 치환율에 따른 GGBFS 콘크리트의 역학적 특성 변화 및 염해 침투저항성을 분석하기 위해 3가지 GGBFS의 분말도 (4,000, 6,000, 8,000cm²/g)를 고려하였다. 또한 치환율에 대한 영향을 분석하기 위해 치환율을 30%, 50%, 70%로 고려하였다. 각 배합의 공극구조변화를 분석하기 위해 수은압입법 (MIP: Mercury Intrusion Porosimetry)을 수행하였으며, 염해 침투저항성 평가를 위해 염화물 침지실험을 수행하여 자유염화물 분포를 평가하였다. 압축강도 시험은 KS 2405 기준을 따라 수행하였으며 분말도 및 치환율에 따른 역학적 거동을 평가하였다.

Table 1에서는 실험에 사용된 시멘트와 GGBFS의 특성을 나타내고 있으며 Table 2에서는 골재특성을 나타내고 있다. Table 3에서는 본 연구를 위한 배합표를 나타내며, SAB는 GGBFS를 사용한 시편(S)으로 치환율(A)과 분말도(B)을 나타내고 있다.

Table 1. Properties of OPC and GGBFS

Items	Chemical composition(%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss	Specific gravity	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. Properties of fine and coarse aggregates

Items	Gmax (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Fine aggregate	-	2.60	1.00	2.70
Coarse aggregate	25	2.62	0.78	6.78

Table 3. Mix proportions for OPC and GGBFS concrete

Code	Blaine (cm ² /g)	W/B (%)	S/a (%)	Rep. (%)	Unit Weight (kg/cm ³)					
					W	C	SG	Gyp - sum	Sand	Coarse Aggregate
OPC	-	45	44	0	175	387	0	1.7	750.9	992.8
S34	4,000			30		271	116	6.4	746.9	988.7
S54				50		184	194	9.5	744.8	986.5
S74				70		104	272	12.6	741.9	983.4
S36				6,000		30	271	116	6.4	746.9
S76	70					104	272	12.6	741.9	983.4
S38	30					271	116	6.4	746.9	988.7
S58	8,000			50		184	194	9.5	744.8	986.5
S78				70		104	272	12.6	741.9	983.4

- Gmax : 19mm · Slump : 15cm
- Code AB (replacement A×10%, fineness B×1,000cm²/g)

2.2 GGBFS 콘크리트의 공극구조

공극구조 분석을 위해서는 질소흡착법, 단위중량법 등이 사용되기도 하지만, 최근들어 MIP방법이 많이 사용되고 있다(Kwon et al. 2012). 각 배합에 따라 수중양생 28일 및 91일에 대한 공극률을 MIP 실험을 통하여 도출하였다. Table 4에서는 공극률 평가를 위한 MIP 실험조건을 나타내고 있다.

2.3 GGBFS 콘크리트의 염화물 침투시험

Table 4. Conditions for MIP test for porosity evaluation

Advancing contacting angle	130.0 deg
Receding contacting angle	130.0 deg
Mercury density	13.5335 g/mL
Mercury surface tension	485.0 dyn/c
Maximum head pressure	4.4500 psi
Stem volume	0.3920 ml
Penetrometer weight	63.9570 g
Penetrometer volume	6.0020 mL
Penetrometer constant	10.79 /pF

염화물 침투시험을 수행하기 위해 100×200mm 실린더 몰드가 사용되었으며 제조후 4주간 수중양생 시킨 뒤 염화물 침투시험을 수행하였다. 시편의 3면을 코팅한 뒤 1면 유입을 유도하였으며, NaCl 3.5% 농도의 인공해수에 4주간 침지시킨 후 단면의 자유염화물 분포를 조사하였다. 염화물 이온 분무시험을 수행한 뒤 시편을 깊이방향으로 10mm 단위씩 커팅하여 깊이별 염화물 함유량을 측정하였다. 측정방법은 JCI-SC4 방법을 통하여 시편을 처리하여 자유염화물량을 측정하였다. Table 5에서는 촉진 염화물 침투 조건을 요약하여 나타내었다.

Table 5. Conditions for submerging test in saline water

Specimen size	10×20 (Cylinder)	Specimen Condition
No. of specimen	3 per Code	· Wax coating for 1-D penetration · 2 Weeks curing in water and 2 Weeks curing in air (20℃)
Period	4 Weeks	
RH(%)	100	
Chloride Concentration(%)	3	

3. GGBFS 콘크리트의 공학적 특성 및 염해 저항성 평가

3.1 공극구조 평가

GGBFS 콘크리트는 잠재수경성을 가지고 있으므로, 초기재령에서는 뚜렷한 내구적 저항성을 확보하지 못하지만, 장기적으로는 밀실한 구조를 이루면서 우수한 염해저항성을 확보하는 것으로 알려져 있다(Kwon et al, 2007; Maekawa et al, 1999; Korea Expressway Corporation 1999). 이는 수화물의 생성을 통한 공극 구조 감소로 인한 염화물 확산계수의 감소와 수화물에 의한 염화물 이온의 흡착으로 요약할 수 있다(Korea Expressway Corporation 1999). Table 6에서는 재령에 따른 공극률의 변화를 나타내고 있으며 이를 Fig. 10에 도시하였다.

Fig. 1에서 알 수 있듯이 재령 3일 및 28일에서는 OPC 콘크리트

Table 6. Porosity in OPC and GGBFS concrete with time

Porosity (%)	OPC	S34	S36	S38	S54	S74
3 days	19.98	21.70	23.62	21.33	22.90	20.80
28 days	18.12	19.97	21.43	20.02	20.71	19.94
91 days	17.62	16.81	15.40	14.95	15.28	13.22

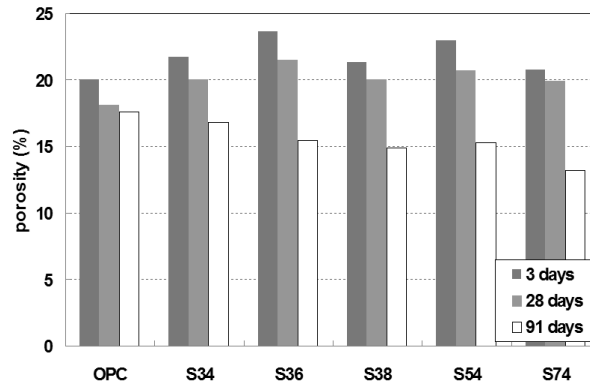


Fig. 1. Porosity variation with time and mixing conditions

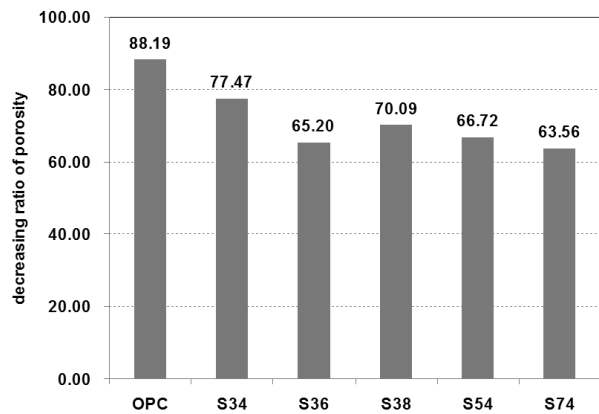


Fig. 2. Decreasing porosity ratio with mix conditions

와 GGBFS 콘크리트의 큰 차이가 발생하지 않았으나, 장기재령인 91일 시편에 대해서는 GGBFS 콘크리트에서 더욱 낮은 공극률이 측정되었다. 또한 분말도와 치환율이 증가할수록 낮은 공극률이 측정되었다. 재령 3일이고 치환율이 30%인 경우 분말도가 4,000cm²/g, 6,000cm²/g, 8,000cm²/g으로 증가할수록 16.81%, 15.40%, 14.95%로 공극률이 감소하였다. 또한 동일한 치환율 4,000cm²/g에 대해서는 치환율이 30%, 50%, 70%로 증가함에 따라 16.81%, 15.28%, 13.22%로 공극률이 감소하였다.

기준이 되는 OPC 콘크리트의 공극률의 감소를 비교하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. OPC 콘크리트가 88.19%의 감소율을 보인 반면, S74의 경우 최대 63.56% 수준으로 감소하였다.

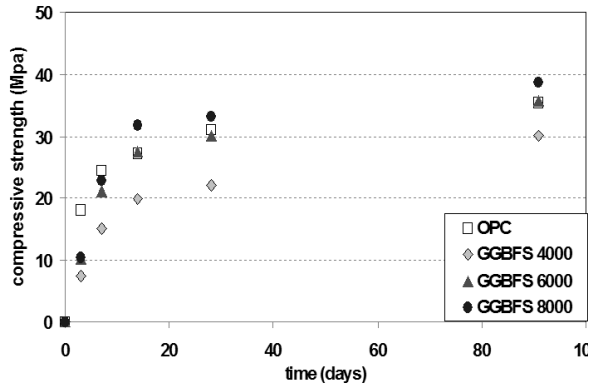
3.2 역학적 특성 평가

본 절에서는 재령 3일에서 및 91일까지 압축강도 변화를 분석하도록 한다. 3.1절과 마찬가지로 분말도를 4,000cm²/g, 6,000cm²/g, 8,000cm²/g으로 분류하였으며 각각에 대하여 치환율 30%, 50%,

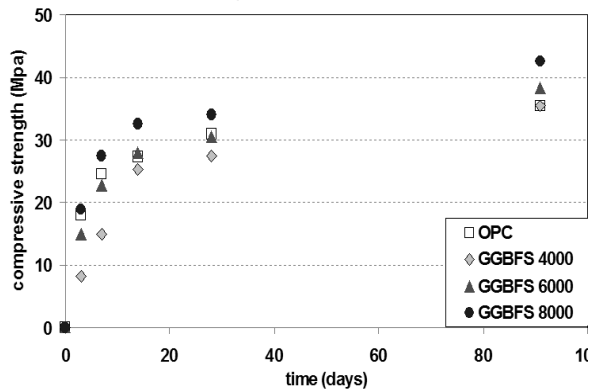
70%로 하여 GGBFS를 혼입하였다.

3.2.1 치환율에 따른 영향

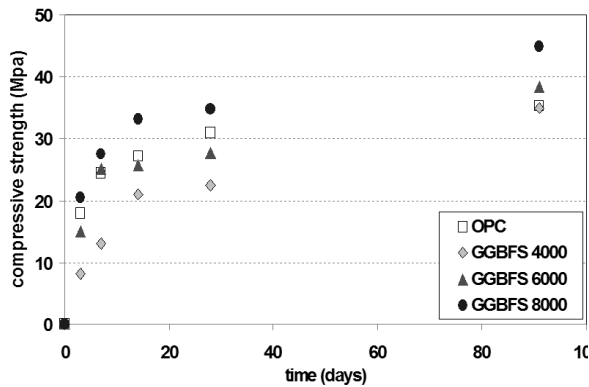
치환율에 따른 압축강도 분포를 Fig. 3에 나타내었다. 치환율이 증가할수록 28일 이전의 강도증가는 OPC 콘크리트에 비하여 두



(a) 30% Replacement of GGBFS



(b) 50% Replacement of GGBFS



(c) 70% Replacement of GGBFS

Fig. 3. Compressive strength with different GGBFS replacement ratios

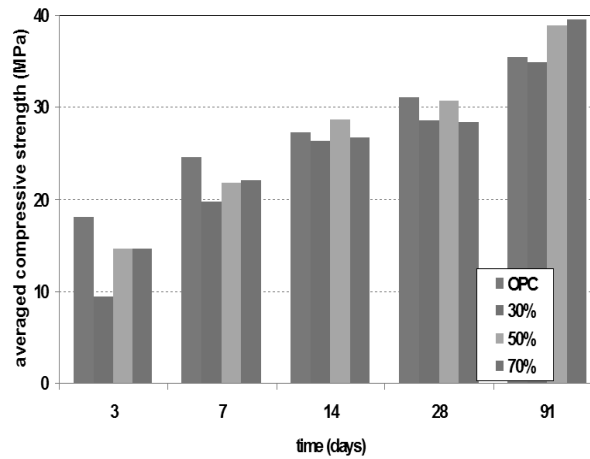


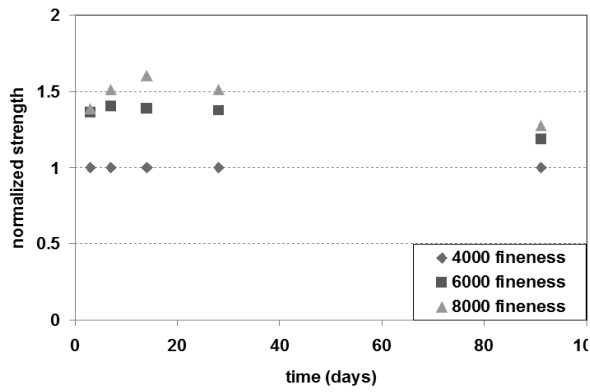
Fig. 4. Comparison of compressive strength with averaged GGBFS replacement ratio

렷하지 않았으나, 장기강도에서는 뚜렷한 강도증가를 나타내었다. 분말도를 고려하지 않고 4,000cm²/g~8,000cm²/g을 평균하여 OPC 콘크리트의 강도와 비교하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

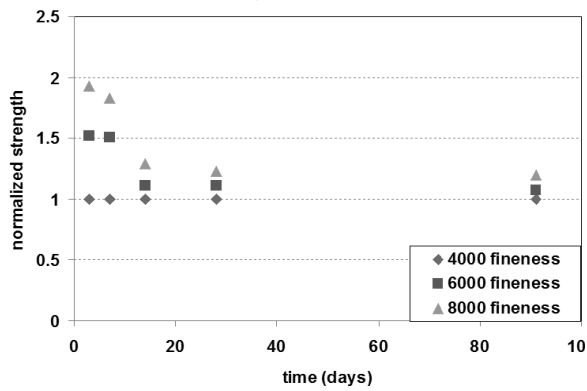
Fig. 4에서 알 수 있듯이 OPC의 경우 재령 3일에서 91일로 증가 하면서 강도는 2배 정도 증가하였으나, 30% 치환의 경우 3.73배, 50% 치환의 경우 2.67배, 70%의 경우 2.71배의 강도 증진을 나타 내었다. 분말도 4,000cm²/g인 경우 OPC 콘크리트와 비교할 때 약간 낮은 압축강도가 평가되었다.

3.2.2 분말도에 따른 영향

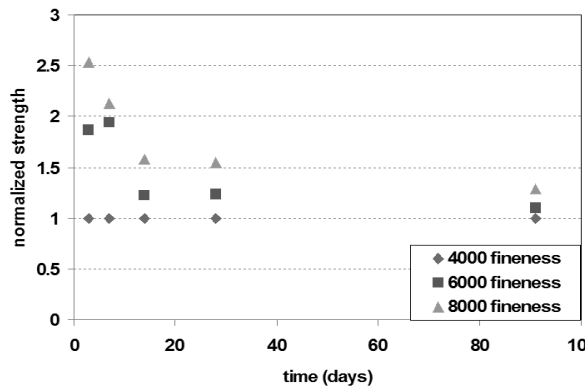
분말도에 따른 강도특성을 분석하기 위해 각 치환율별로 분말 도의 영향을 4,000cm²/g을 기준으로 정규화하여 Fig. 5에 나타내 었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 치환율이 증가할수록 4,000cm²/g 을 기준으로 한 강도비는 초기재령에서 크게 평가되고 장기적으로 갈수록 영향이 작아진다. 즉 초기재령에서는 치환율이 클수록 그 리고 분말도가 클수록 강도가 민감하게 변화함을 알 수 있다. 초기 재령 7일에서 30% 치환일 경우, 분말도의 증가에 따라 강도는 136 ~151% 수준으로 증가하였으나, 50% 치환율에서는 151~193%의 증가율을 나타내었고, 70%에서는 186~212% 수준으로 증가하였 다. 분말도가 클수록 초기재령의 양생조건이 중요함을 알 수 있다. 또한 장기재령 91일에서는 30% 치환시 119~128%의 증가를, 50% 치환시 108~120%의 증가를, 70% 치환시 110~128%의 증가를 보 였다.



(a) 30% replacement ratio



(b) 50% replacement ratio

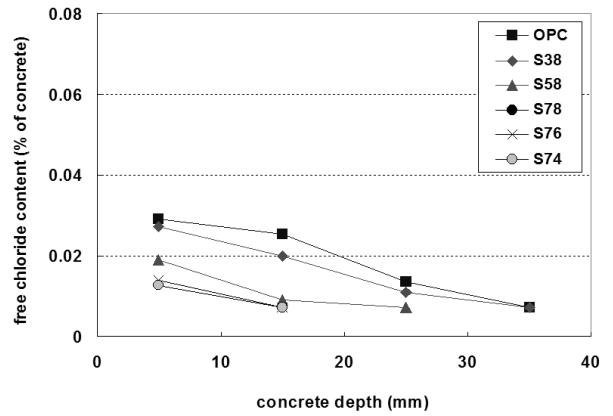


(c) 70% replacement ratio

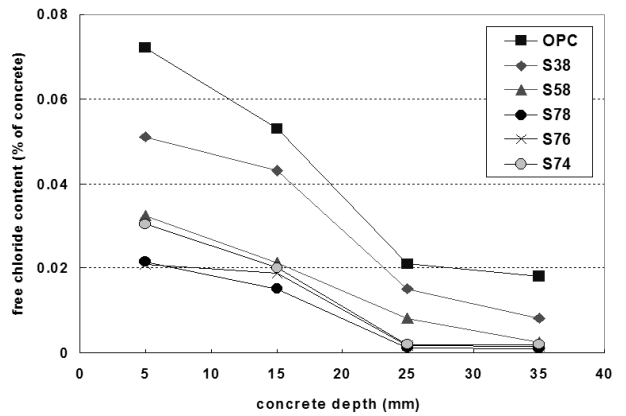
Fig. 5. Effect of fineness with different replacement ratios

3.3 염화물 침투 특성 평가

전술한대로 GGBFS를 혼입한 콘크리트에서는 많은 내구성능향을 기대할 수 있으며 특히 염해 저항성에 대하여 뚜렷한 침투저항성을 보이고 있다. Table 7에서는 염화물 침투깊이를 나타내고 있으며 이를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) Chloride profile with various GGBFS mixture(28days)



(b) Chloride profile with various GGBFS mixture(91days)

Fig. 6. Chloride profile in concrete with GGBFS

Table 7. Free chloride profile in OPC and GGBFS concrete

Specimen type	Depth(cm)	Free chloride content(%)	
		28days	91days
OPC	0.0 ~ 10	0.02920	0.072
	10 ~ 20	0.02555	0.053
	20 ~ 30	0.01338	0.021
	30 ~ 40	0.00730	0.018
S38	0.0 ~ 10	0.02738	0.051
	10 ~ 20	0.02008	0.043
	20 ~ 30	0.01095	0.015
	30 ~ 40	0.00730	0.0082
S58	0.0 ~ 10	0.01886	0.0325
	10 ~ 20	0.00913	0.0213
	20 ~ 30	0.00730	0.0082
	30 ~ 40	-	0.0024
S78	0.0 ~ 10	0.01278	0.0215
	10 ~ 20	0.00730	0.0152

Table 7. Continued

Specimen type	Depth (cm)	Free chloride content (%)	
		28 days	91 days
S78	20~30	-	0.0013
	30~40	-	0.0011
S76	0.0~10	0.01399	0.0208
	10~20	0.00730	0.0188
	20~30	-	0.0018
	30~40	-	0.0015
S74	0.0~10	0.01278	0.00305
	10~20	0.00730	0.0201
	20~30	-	0.002
	30~40	-	0.002

4. 분말도와 치환율을 고려한 GGBFS 콘크리트의 특성도출

본장에서는 분말도와 치환율에 따른 공극률, 강도, 염화물 침투 저항성을 정량적으로 분석하도록 한다. 치환율에 대해서는 분말도 4,000cm²/g을 기준으로 30%, 50%, 70% 변화를 분석하고 분말도에 대해서는 치환율 30%를 기준으로 분말도 4,000cm²/g, 6,000cm²/g, 8,000cm²/g의 특성을 비교하였다. 각 영향인자는 객관적인 비료를 위하여 선형회귀 분석되었으며, 그 기울기를 통하여 영향을 평가하도록 한다.

4.1 공극률 변화율 분석

치환율이 30%~70%로 변화할 때, 재령 3일 공극률과 재령 91일의 공극률 변화율을 분석하면 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다. OPC 콘크리트의 감소율이 88.2%인 것에 비해 치환율이 30%일 때는 77.5%, 치환율 50%일 때는 66.7%, 그리고 치환율 70% 일 때는 63.6%로 감소율이 평가되었다.

또한 치환율에 따른 공극률 감소는 식 (1)과 같이 회귀분석 할 수 있다.

$$P_r = -0.3477R + 86.634, R^2: 0.91 \quad (1)$$

여기서, P_r 은 공극률 감소율(%), R 은 치환율(%)를 나타낸다.

또한 치환율 30%일 경우, 분말도의 영향을 분석하면, 4,000cm²/g 일 때는 77.5%, 6,000cm²/g일 때는 65.2%, 그리고 8,000cm²/g일

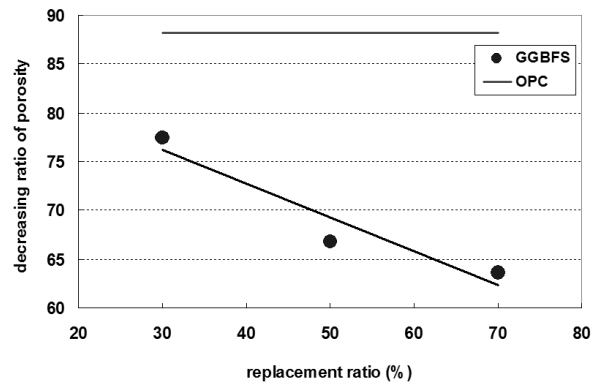


Fig. 7. Effect of replacement ratio of GGBFS for porosity

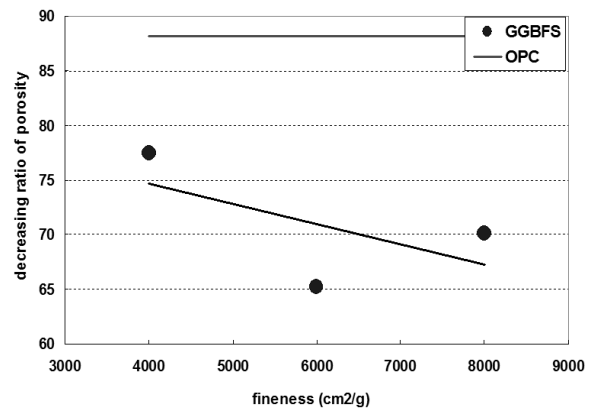


Fig. 8. Effect of fineness of GGBFS for porosity

때는 70.1%로 분석되었다. Fig. 8에서는 이 경향을 그림으로 나타냈으며, 회귀분석식을 식 (2)에 나타내었다.

$$P_r = -0.0018F + 81.972, R^2: 0.3565 \quad (2)$$

여기서, F 는 분말도(cm²/g)을 나타낸다. GGBFS의 8,000cm²/g의 공극률이 약간 차이가 발생하지만, 전체적인 경향은 분말도가 증가할수록 공극률이 감소하는 경향을 나타내었다. 공극률의 감소에 대해서는 치환율이 분말도보다 더욱 지배적인 영향인자로 평가되었다.

4.2 압축강도 변화율 분석

공극률과 마찬가지로 강도에 대한 증가율을 치환율 및 분말도에 대하여 나타내었다. 치환율이 30%~70%로 증가할 때 각각의 재령 3일에서 91일까지의 강도 증가율을 분석하였다. Fig. 9에서는 강도증가율과 치환율과의 관계를 나타내었으며, 회귀분석을 식

(3)에 나타내었다. OPC 콘크리트의 강도 증가율이 196.7% 수준인데 비하여 GGBFS 콘크리트는 402~438%로 매우 큰 강도발현성을 가지고 있었다.

$$R_s = 0.7358R + 387.56, R^2: 0.5987 \quad (3)$$

여기서, R_s 는 강도증가율(%)을 나타낸다.

분말도에 대한 영향을 같은 방법으로 Fig. 10에 나타내었는데, 분말도에 대한 상관성은 매우 작게 평가되었다. 그 이유는 분말도가 작은 4,000cm²/g의 경우 초기강도가 매우 낮게 평가되어, 장기강도가 제일 작음에도 불구하고 강도 증가율은 크게 평가되었다. 식 (4)에서는 분말도에 대한 강도증가율의 회귀분석 결과를 나타내고 있다.

$$R_s = -0.0079F + 422.08, R^2: 0.3653 \quad (4)$$

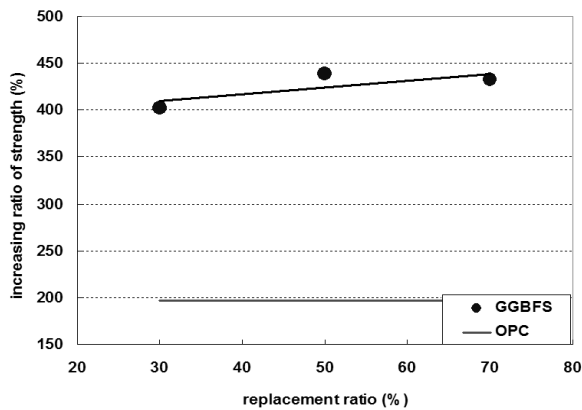


Fig. 9. Effect of replacement ratio of GGBFS for strength

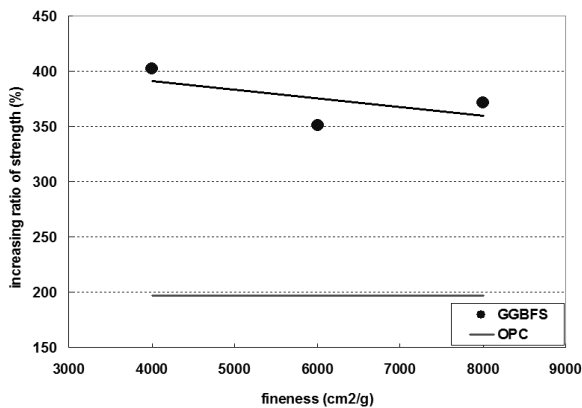


Fig. 10. Effect of fineness of GGBFS for strength

강도 증가에 대한 분말도 및 치환율은 공극률에 비하여 상관성이 작은 것으로 평가되었다.

4.3 염해 침투저항성 분석

염해에 대한 저항성을 정량적으로 분석하기 위해서는 확산계수의 도출이 필수적이므로 91일 재령 염화물 침투 프로파일을 이용하여 각 배합의 겔보기 확산계수를 도출하도록 한다(Broomfield 1997; RILEM 1994).

다양한 회귀분석 방법이 있으나 일반적으로 편하게 적용되는 선형회귀 분석법을 이용하여 각 배합의 확산계수를 도출하였다 (Samsung Construction 2003). 전염화물에 대한 확산계수를 도출하는 것이 바람직하지만 시험결과, 자유염화물량만 도출되었으므로 이에 대한 확산계수를 도출하였다. Fig. 11에서는 각 배합에 따른 확산계수를 나타내고 있는데, 최대값은 OPC에서 4.26E-11 (m²/sec)가 평가되었으며, 최소값은 S78에서 2.74E-11(m²/sec)로

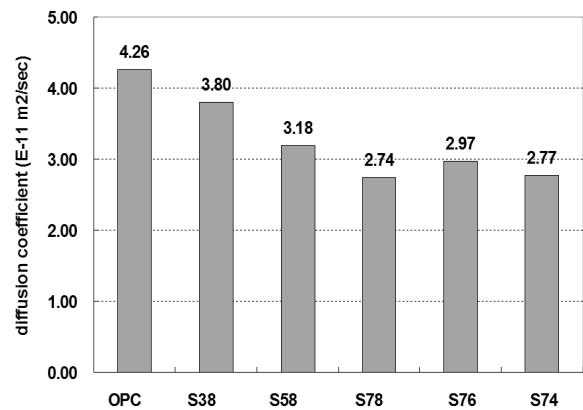


Fig. 11. Diffusion coefficient with various GGBFS concrete

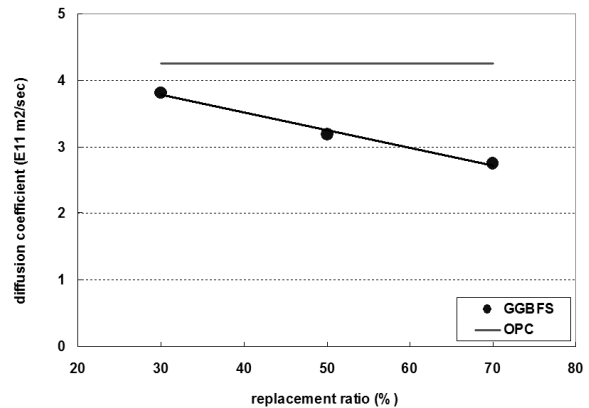


Fig. 12. Effect of replacement ratio of GGBFS for chloride diffusion

평가되었다. 이는 GGBFS를 대단위 치환함으로써 공극구조가 개선되고 염화물 흡착력이 증가하기 때문이다(Kwon et al. 2007; Korea Expressway Corporation 1999).

공극률 및 강도 특성과 마찬가지로 치환율의 변화와 분말도의 변화를 중심으로 확산계수 변화 기술품을 분석하였다. Fig. 12에서는 치환율의 변화에 따른 확산계수의 변화를 나타내었으며 회귀분석 결과는 식 (5)에 나타내었다.

$$R_d = -0.0265R + 4.5685, R^2: 0.9901 \quad (5)$$

여기서, R_d 는 확산계수의 변화($\times 10^{11} \text{m}^2/\text{sec}$)이다.

또한 분말도의 변화에 따른 확산계수의 감소는 Fig. 13에 나타내었으며 식 (6)에 회귀분석 결과를 나타내었다.

Fig. 13에서 알 수 있듯이 상관성은 거의 없는 것으로 평가되었는데, 이는 예상과는 약간 다르게 평가되었으며 추가적인 실험이 필요하다고 판단된다. 분말도의 증가는 수화를 촉진시키므로 확산계수의 감소가 분명하지만 본 실험에서는 감소율이 너무 낮게 평가되었다.

$$R_d = -7(10^{-6})F + 2.8675, R^2: 0.0122 \quad (6)$$

본 연구에서는 공극률, 강도, 그리고 확산계수의 변화에 대해 치환율과 분말도의 영향을 분석하였다. 분말도 보다는 치환율이 더욱 민감하게 작용함을 알 수 있었으며, 고내구성 및 고품질 콘크리트의 제조를 위해서는 대단위 치환에 대한 재료배합 및 시공기술이 연구되어야 한다.

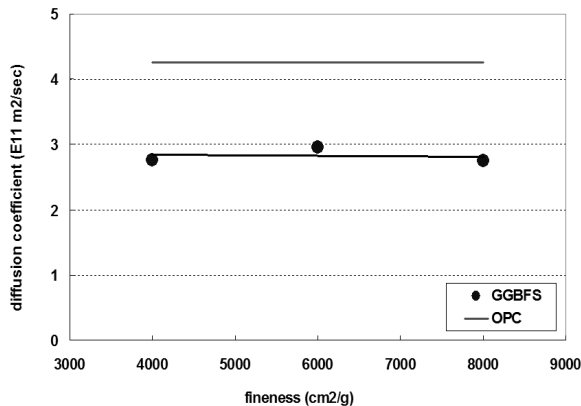


Fig. 13. Effect of fineness of GGBFS for chloride diffusion

5. 결론

고로슬래그 미분말 콘크리트의 분말도 및 치환율에 따른 염해 저항성 평가를 통해 도출된 연구는 다음과 같다.

1. GGBFS를 혼입한 콘크리트에 대하여 분말도(4,000~8,000cm²/g)와 치환율(30~70%)을 고려하여 역학적, 내구적 특성을 평가한 결과 분말도에 의한 영향보다는 치환율에 의한 영향이 더욱 지배적임을 알 수 있었다.
2. OPC 콘크리트의 공극률이 3일 재령에서 91일 재령까지 88.19%의 감소를 보인 것에 비해 GGBFS 콘크리트는 63.56~77.47% 수준으로 감소하였으며, 높은 치환율과 분말도를 가진 배합에서 최대 공극률 감소가 확인되었다.
3. OPC 콘크리트의 강도는 3일 재령에서 91일 재령까지 200% 정도 증가하였으나, GGBFS 30% 치환의 경우 3.73배, 50% 치환의 경우 2.67배, 70%의 경우 2.71배의 높은 강도증진을 나타내었으며 장기강도 발현이 우수함을 확인하였다. 특히 초기재령에서 GGBFS 치환에 따라 강도변화가 민감하므로 초기 양생이 매우 중요함을 알 수 있다.
4. GGBFS 콘크리트의 염화물 확산계수는 치환율에 따라 OPC 콘크리트의 64.4% 수준으로 크게 감소하였으며, 70%로 치환할 경우, 분말도의 변화에 따라 확산계수 변화는 크게 평가되지 않았다.

References

- Broomfield, J.P. (1997). Corrosion of Steel in Concrete: understanding, investigation and repair, London, E&FN, 272-278.
- JSCE-Concrete committee. (2002). Standard specification for concrete structures.
- Korea Concrete Institute. (2004). Concrete Standard Specification-Durability Part [in Korean].
- Korea Expressway Corporation. (1999). Characteristics Study with Cement Type for Concrete Durability Improvement of RC, Technical Report, 129-133 [in Korean].
- Lee, H.S., and Kwon, S.J. (2012). "Analysis Technique for Chloride Behavior using Apparent Diffusion Coefficient of Chloride Ion from Neural Network Algorithm," Journal of the Korea Concrete Institute, **24(4)**, 481-490 [in Korean].

- Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T. (1999). Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport, Routledge, London and New York, 150–177.
- Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2003). “Multi-Scale Modeling of Concrete Performance,” *Journal of Advanced Concrete Technology*, **1(2)**, 91–126.
- Kwon, S.J., Lee, H.S., and Park, S.G. (2012). “Effect of Additional Water on Durability and Pore Size Distribution in Cement Mortar,” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, **16(3)**, 75–83.
- Kwon, S.J., Na, U.J., Park, S.S., and Jung, S.H. (2009). “Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack : Probabilistic Approach for Chloride Diffusion,” *Structural Safety*, **31(1)**, 75–83.
- Kwon, S.J., Song, H.W., Byun, K.J., and Park, C.K. (2007). “Analysis of Chloride Penetration in Concrete with Mineral Admixtures Using Neural Network Algorithm and Micro Modeling,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **27(1A)**, 117–129 [in Korean].
- RILEM. (1994). Durability Design of Concrete Structures, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN, 28–52.
- Samsung Construction. (2003). Evaluation for Diffusivity Characteristics in High Durable Concrete, Technical Report, Seoul, Korea, 27–33 [in Korean].
- Song, H.W., and Kwon, S.J. (2007). “Permeability Characteristics of Carbonated Concrete Considering Capillary Pore Structure,” *Cement and Concrete Research*, **37(6)**, 909–915.
- Song, H.W., and Kwon, S.J. (2009). “Evaluation of Chloride Penetration in High Performance Concrete Using Neural Network Algorithm and Micro Pore Structure,” *Cement and Concrete Research*, **39(9)**, 814–824.
- Song H.W., Pack, S.W., Lee, C.H., and Kwon, S.J. (2006). “Service Life Prediction of Concrete Structures under Marine Environment Considering Coupled Deterioration,” *Journal of Building and Monuments*, **12(1)**, 265–284.
- Tang, L., and Nilsson, L.O. (1993). “Chloride Binding Capacity and Binding Isotherms of OPC Paste and Mortar,” *Cement and Concrete Research*, **23(2)**, 347–353.

고로슬래그 미분말 콘크리트의 분말도 및 치환율에 따른 염해 저항성 평가

RC 구조물의 내구성능 피복두께의 변화뿐 아니라 배합조건에 따라 크게 변화한다. 고로슬래그 미분말은 유용한 혼화재료이며, 최근들어 염해에 대한 저항성을 확보하기 위해 많이 사용되고 있다. 본 연구는 고로슬래그 미분말을 30~70%로, 분말도를 4,000~8,000cm²/g으로 변화시키면서 공극률, 압축강도, 확산계수의 변화를 분석하였다. 실험결과 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트는 보통 콘크리트에 비하여 조밀한 공극구조, 높은 강도발현과 확산계수 감소를 확보하였으며, 분말도보다 치환율에 더욱 민감하게 변화하였다. 고로슬래그 미분말 콘크리트에서 재령이 3일에서 91일로 증가함에 따라 공극률은 77.47% 수준으로 감소하였으며, 압축강도는 373%로 증가하였다. 또한 염화물 확산계수는 OPC 콘크리트의 64.4% 수준으로 감소하여 내구적 저항성이 크게 개선됨을 알 수 있었다.