

고로슬래그 미분말을 대량 사용한 콘크리트의 염해 및 동결융해 저항성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Freezing-Thawing and Chloride Resistance of Concrete Using High Volumes of GGBS

류 동 우^{1*} 김 우 재² 양 완 희³ 유 조 형² 고 정 원⁴

Ryu, Dong-Woo^{1*} Kim, Woo-Jae² Yang, Wan-Hee³ You, Jo-Hyung² Ko, Jeong-Won⁴

Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pochon-si, Gyeonggi-do, 487-811, Korea ¹

Research & Engineering Division R&D CENTER, POSCO E&C, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea ²

Intchem Co., Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-370, Korea ³

Daewoo Institute of Construction Technology, DAEWOO E&C, Suwon-si, Gyeonggi-do, 440-210, Korea ⁴

Abstract

The effect of ground granulated blast-furnace slag(GGBS) and alkali activator compressive strength, resistance of chloride attack and freezing-thawing is assessed to develop high volume slag concrete, the replacement rate of GGBS of which is more than 80 percent. result, as the replacement rate of GGBS increases, the compressive strength development properties of concrete in early and long term age decreased and resistance chloride attack and freezing-thawing is increased. The early strength development property, however, is extremely advanced by addition of the alkali activator, which is also found to improve resistance chloride attack and freezing-thawing.

Keywords : ground granulated blast-furnace slag(GGBS), alkali activator, chloride resistance, freezing-thawing resistance

1. 서 론

1.1 연구의 목적

온실가스 감축을 위한 범 정부차원의 다각적인 노력이 진행되고 있는 시점에서 건설산업 분야의 CO₂ 배출량은 전 산업의 약 42%에 해당되는 CO₂ 대량 배출산업으로 ‘저탄소 녹색성장’의 실현가능 여부에 있어서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 이를 위해 국토해양부, 지식경제부 및 환경부 등의 관련부처에서는 다양한 건설기술의 녹색성장 실행 계획 및 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 등을 추진하고 있으며 보다 능동적인 건설산업의 Zero Emission화

를 실현하기 위한 CO₂ 저감기술의 개발이 어느 때 보다 절실하다. 특히 건설재료산업은 건설산업 분야 LCCO₂ 배출량의 약 38%를 차지하고 있으며 이중에서 시멘트산업은 철강산업과 더불어 대표적인 CO₂ 대량 배출산업으로 인식되고 있다. 즉, 시멘트 제조에서의 CO₂ 발생은 원료인 석회석의 탈탄산과 화석연료의 연소에 의해 대부분이 발생되고 있으며 이러한 CO₂ 발생을 감소시키기 위해서 소성온도를 낮추거나 소성의 열효율을 높이는 방안과 함께 산업부산물을 적극 이용함으로써 결과적으로 시멘트(석회석)의 양을 줄이는 방안이 제시되고 있다[1, 2, 3]. 정부에서도 「철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용지침(환경부, 지식경제부 개정·고시, 09.12.31)」에서 슬래그의 재활용 목표율은 95%, 석탄재는 75%로 규정하고 있다.

이와 같이 콘크리트의 고성능화 및 자원의 유효활용, 환경부하 저감, 지구온난화의 요인인 CO₂ 배출량 저감 등의 관점에서 산업부산물인 고로슬래그를 대량으로 혼입한 콘크

Received : January 16, 2012

Revision received : February 28, 2012

Accepted : March 30, 2012

* Corresponding author : Ryu, Dong-Woo

[Tel: 82-31-539-1949, E-mail: dwryu@daejin.ac.kr]

©2012 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 사용량 또한 급증하고 있는 추세이다.

현재 고로슬래그 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트에 고로슬래그 미분말을 혼합하거나 클링커와 고로슬래그를 혼합분쇄 또는 단독분쇄 후 혼합 제조하는 혼합시멘트로서 KS L 5210 「고로슬래그 시멘트」에서는 고로 슬래그의 함유량에 따라 1종, 2종, 3종으로 규정되어 있으며, 국내에서 유통되고 있는 고로슬래그 시멘트의 약 90% 이상은 2종으로 고로슬래그의 함유량은 30~60% 이다. 또한 국내 고로슬래그 미분말 판매량의 대부분은 고로슬래그 시멘트용 혼화재로 사용되고 있으며 별도의 소성이 필요 없기 때문에 콘크리트 제조시 그 치환율에 비례해서 대량의 CO₂ 저감효과를 기대할 수 있을 뿐만 아니라 원가절감이 가능한 시멘트 대체재료이다.

기존의 연구에서는 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트에 대하여 분말도 및 치환율에 따른 수많은 실험과 연구가 진행되어져 왔으며 그 결과 수화발열량 감소, 수밀성 증대, 장기강도 향상, 알칼리골재반응 억제, 염해 및 동결융해 저항성, 화학적 부식저항성 등이 현저히 향상되는 것으로 알려져 있다. 이에 반해 조기강도 발현저하, 자기수축 및 초기 건조수축 증대, 중성화 촉진 등은 문제점으로 지적되고 있다[4, 5, 6].

특히 고로슬래그의 치환율 증가에 따른 조기강도 저하 문제는 거푸집 존치기간의 증가로 인한 현장적용의 어려움과 콘크리트의 내구성 향상이라는 양면성을 가지고 있다. 이를 위해 슬래그의 분말도를 증가시키거나 알칼리 자극제를 사용하여 조기강도를 개선시키는 방법 등이 제시되고 있으나 이는 콘크리트 제조시 원가상승 요인으로 작용하여 고로슬래그의 사용 확대에 걸림돌로 작용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 레미콘 업계에서 가장 일반적으로 사용하고 있는 분말도 4,000cm²/g급의 고로슬래그 미분말을 대상으로 하여 치환율 80% 이상에 이르는 슬래그 대량 치환 콘크리트(High Volume Slag Concrete, HVSC)의 개발을 목표로 그 내구특성에 미치는 고로슬래그의 영향, 특히 그 효과가 탁월한 것으로 알려진 염해 및 동결융해 저항성에 대하여 실험을 통해 정량적으로 고찰하였다.

또한, 슬래그의 대량사용으로 인한 조기강도 저하의 한계점을 극복하기 위하여 경제성을 고려한 최소한의 알칼리 자극제를 사용하여 자극제의 첨가 여부가 슬래그 대량 치환 콘크리트의 조기강도, 염해 및 동결융해 저항성에 미치는

영향에 관해서도 함께 검토하였으며 궁극적으로는 콘크리트용 혼화재료로서의 고로슬래그 사용 확대를 위한 기초적 자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

본 연구의 주요 실험인자 및 수준은 Table 1과 같다. 콘크리트 배합은 Table 2에 나타난 비와 같이 현재 레미콘 업계에서 일반적으로 사용하고 있는 물결합재비 45%, 잔골재율 47%, 단위수량 168kg/m³, 고로슬래그 치환율 40%를 기준배합으로 설정하였다.

결합재 중량에 대한 고로슬래그의 치환율은 40, 60, 80%의 3수준으로 설정하였으며 알칼리 활성 자극제의 경우 경제성이 확보되는 범위 안에서 사전 예비실험을 통하여 조기 강도 발현을 및 유동성이 우수한 석고계 1.0%의 1수준으로 선정하여 첨가하였다.

목표 슬럼프 값은 180±20mm, 공기량은 4.5±0.5%를 만족하도록 하였으며, 고로슬래그 치환율 증가에 따른 압축 강도, 염해 및 동결융해 저항성을 비교 검토하였다.

Table 1. Factors and levels of the experiment

Factors	Levels
W/B(%)	45
GGBS replacement (C×%)	40, 60, 80
Alkali activator (C×%)	0, 1.0
Measurement items (Curing age / cycles)	compressive strength (1, 3, 7, 28, 56, 91days) chloride penetration (7, 28, 56days) freezing-thawing resistance (300cycles)

Table 2. Mix proportions of concrete

Types	GGBS replacement (C×%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)				SP (C×%)	AA (C×%)	
				W	Binder		S			G
					C	BS				
BS 40	40			226	151	815	922	-	-	
BS 60	60			151	226	815	920	-	-	
BS 60 A	60	45	47	168				0.7	1.0	
BS 80	80			75	302	813	917	-	-	
BS 80 A	80							-	1.0	

2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트(비중 3.15 g/cm^3), 고로슬래그는 3종 고로슬래그 미분말(분말도 $4,341 \text{ cm}^2/\text{g}$), 알칼리 자극제는 Modified-Alkali-Calcium-Sulfate계를 사용하였으며, 이들의 화학적 성질은 Table 4 및 Table 5와 같다. 굵은 골재는 최대치수 25mm인 부순 자갈을 사용하였으며, 잔골재는 세척사를 사용하였다. 화학 혼화제로는 나프탈렌계 표준형 AE감수제를 사용하였다.

Table 3. Physical properties of Concrete

Types	Items	Specific gravity(g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	Absortion (%)
Cement		3.15	3,419	-
	GGBS	2.90	4,226	-
	Alkali activator*	2.75	-	-
	Coarse aggregate	2.62	-	1.03
	Fine aggregate	2.59	-	0.67

* Apparent specific gravity : $1.25 \text{ (g/cm}^3)$

Table 4. Chemical analysis of OPC and GGBS(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig.loss
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79
GGBS	32.74	13.23	0.41	44.14	5.62	1.84	0.44

Table 5. Chemical analysis of Alkali Activator(%)

	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
Alkali Activator	12~25	3~11	22~35	5 or less	38~56

2.3 시험체 제작 및 시험방법

압축강도 및 염화물 침투시험은 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ 의 원주 공시체를 제작한 후 소정의 재령까지 수중양생(20°C)을 실시하였다. 압축강도 시험은 재령 1, 3, 7, 28, 56일에, 염화물 침투시험은 재령 7일, 28일, 56일에 각각 실시하였다.

동결융해 시험은 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 의 각주 시험체를 제작하여 14일간 수중양생을 실시한 후 일련의 동결융해 시험을 실시하였다.

2.3.1 염화물 침투시험

염화물 확산계수 산정을 위한 염화물 침투시험은 NT BUILD 492에 규정된 전기영동 시험을 실시하였다[7].

시험체는 시험 전 원주형 공시체의 중앙부를 50mm 두께로 절단하여 염분침투를 촉진하기 위한 3시간의 진공처리를 실시하였다. 진공상태가 유지된 상태에서 포화 Ca(OH)_2 수용액을 주입한 후 대기압 상태에서 18 ± 2 시간동안 침지하는 전처리 과정을 거쳤다. Figure 1과 Figure 2에 나타난 바와 같이 0.3N의 NaOH 수용액을 양극(Anode)으로, 10%의 NaCl 수용액을 음극(Cathode)으로 하여 초기 30V 전압을 가했을 때의 초기 전류값을 기초로 하여 가압 전압 및 시험시간이 결정되며 본 연구에서는 24시간으로 실시하였다. 염화물 침투깊이는 시험이 종료된 후 시험편을 할렬하여 절단면에 0.1M의 질산은(AgNO_3) 용액을 분무하였을 때 은회색으로 변색된 부위를 측정하였다. 측정은 Figure 3과 같이 시험체 양단의 10mm를 제외하고 중심에서 외측방향으로 10mm 간격씩 7곳을 측정하여 그 평균 깊이를 염화물의 침투 깊이로 하였다. 비정상상태에서의 염화물 확산계수 산정은 아래의 식(1)에 의해 산출하였다.

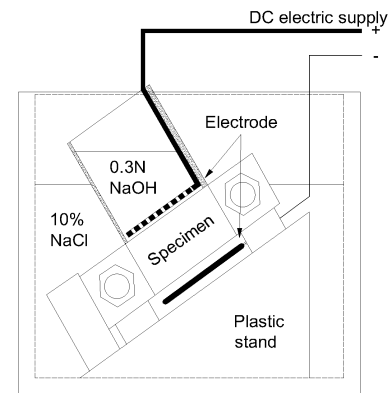


Figure 1. One arrangement of the migration set-up



Figure 2. NT BUILD 492 apparatus

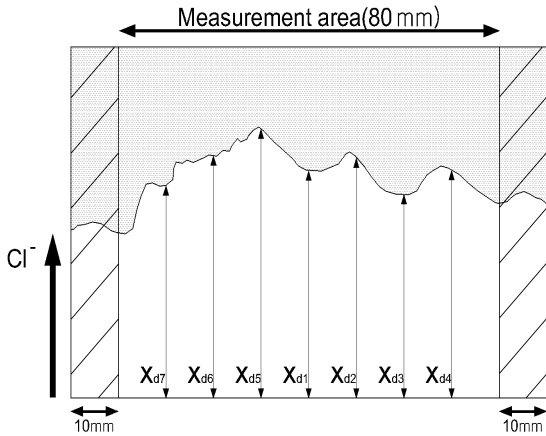


Figure 3. Illustration of measurement for chloride penetration depths

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

여기서,

D_{nssm} : 비정상 상태의 염화물 확산계수($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

U : 적용 전압의 절대 값(V)

T : 측정 전후의 양극(Anode)용액의 평균 온도($^{\circ}\text{C}$)

L : 시험체 두께(mm)

x_d : 염화물이온 침투 깊이(mm)

t : 시험 지속시간(h)

2.3.2 동결융해시험

동결융해 시험은 KS F 2456의 기중 급속동결 후 수중 융해 시험방법에 준하여 실시하였다. 동결융해 시험의 온도 범위는 공시체 중심온도를 $-18^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ 로 하고 1사이클의 시간은 3시간 30분으로 하여 36사이클마다 1차 공명 진동수와 시험체 질량을 300사이클까지 측정하여 식(2)에 의해 상대동탄성계수를 구하였다.

$$P_c = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서,

P_c : 동결융해 C사이클 후의 상대동탄성계수(%)

n_0 : 초기의 1차 공명 진동수(hz)

n_c : 동결융해 C사이클 후의 1차 공명 진동수(hz)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도

Table 6는 고로슬래그 치환율에 따른 재령별 압축강도의 결과이다. 일반적으로 고로슬래그를 사용한 콘크리트는 초기강도 발현율이 일반 콘크리트에 비해 낮지만 장기강도 발현율은 우수하며 이러한 경향은 치환율이 증가할수록 현저한 것으로 보고되고 있다[8, 9]. 이는 고로슬래그 미분말의 공극충전효과(Filler effect)와 더불어 슬래그 반응율이 낮은 초기재령에서는 슬래그의 치환율이 증가함에 따라 모세관 공극량이 증가하지만 수화가 진행됨에 따라 장기재령에서는 비교적 공극경이 큰 모세관 공극이 감소하고 겔공극(미세공극)량이 크게 증가하기 때문이다[10]. 그러나 본 연구에서는 Figure 4에 나타난 바와 같이 초기 및 장기의 모든 재령에서 고로슬래그의 치환율이 증가할수록 압축강도가 낮은 결과를 보여 기존과는 다소 상반된 결과가 나왔다. 본 연구와 같이 고로슬래그를 60% 이상 대량 치환한 경우에는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 생성량 및 슬래그 반응율이 매우 낮으며 장기에 걸쳐 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 생성량 및 소비량이 수축함에 따라 그에 따른 슬래그 반응율도 완만히 증진하는 잠재수정성 때문인 것으로 판단된다.

C. LI의 연구결과에 의하면 분말도 $4,000 \text{cm}^2/\text{g}$ 급의 고로슬래그 미분말은 수화반응이 늦기 때문에 재령 3일에서 91일까지의 압축강도는 슬래그 치환율이 증가함에 따라 작게 되며 이와 반대로 분말도 $18,000 \text{cm}^2/\text{g}$ 이상의 경우는 초기 수화반응이 빠르고 장기수화반응이 억제되어 치환율이 증가할수록 재령 28일까지의 압축강도는 크게 되지만 재령 91일에는 작게 되기 때문에 분말도 $8,000 \sim 11,000 \text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그 미분말을 사용하는 것이 초기 및 장기강도발현에 가장 우수한 것으로 나타났[11]. 또한 A. Oner는 최대 압축강도를 얻기 위한 고로슬래그 미분말($4,250 \text{cm}^2/\text{g}$)의 최적 치환율은 전 결합재량의 55% 전후로 보고하고 있다[12].

C. L. Hwang의 연구에 있어서도 모르타르 실험에 의해 압축강도 발현에 미치는 고로슬래그 치환율의 관계를 재령별로 정리한 결과(Figure 5 참조)를 살펴보면 장기재령에서 최대강도를 내는 고로슬래그 치환율은 대략 50~60%인 것으로 나타났[13]. 따라서 고로슬래그 대량 치환에 따른 최대 압축강도 발현특성은 슬래그 치환율 60%와 밀접한 관련이 있으며 이를 보다 정량적으로 파악하기 위해서는 분말도

에 따른 고로슬래그 시멘트의 수화반응 즉 슬래그 반응율, 재령 경과에 따른 Ca(OH)_2 생성량 및 슬래그 반응에 의한 Ca(OH)_2 소비량, 미세공극구조, 각 조성광물(C_3S , C_2S)의 반응율 등을 향후 자세히 검토할 필요가 있다.

Table 6. Compressive strength with different curing periods

Items Types	Air (%)	Slu- mp (mm)	Compressive strength(MPa)					
			1 day	3 days	7 days	28 days	56 days	91 days
BS 40	5.8	185	4.2	15.5	28.6	38.8	41.6	43.1
BS 60	5.9	180	2.1	14.2	28.2	36.2	38.3	39.4
BS 60 A	5.8	185	2.8	16.5	29.2	36.0	37.6	38.0
BS 80	5.0	180	0.7	13.1	25.3	29.4	31.3	32.5
BS 80 A	5.2	190	0.9	14.9	26.0	28.4	30.5	31.0

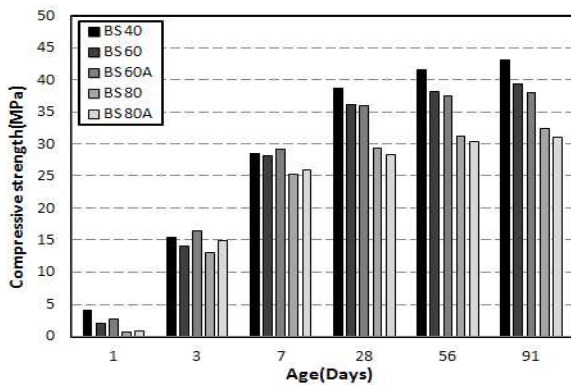


Figure 4. Relation between compressive strength development and quantity of GGBS replacement

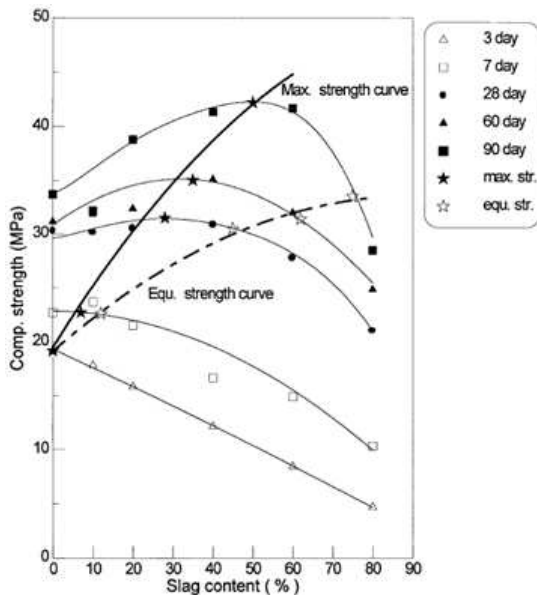


Figure 5. Effect of slag content on strength development in cement mortars [13]

한편, 알칼리 자극제가 압축강도 발현에 미치는 영향은 재령 1~3일에서 높은 강도발현율을 보여 약점으로 지적되는 초기강도 발현특성을 현저히 개선시키는 것으로 나타났으나 재령 28일을 경과하면서 그 증진효과는 오히려 감소하였다.

3.2 염화물이온 침투저항성

NT BUILD 492의 시험방법에 의한 염화물이온의 침투깊이 및 확산계수의 시험결과는 각각 Table 7 및 Table 8과 같다. Figure 6 및 Figure 7에 나타난 바와 같이 고로슬래그 미분말의 치환율 및 재령이 증가함에 따라 염화물이온의 확산계수는 현저히 감소하는 것으로 나타났다.

재령 56일 기준으로 모든 배합의 염화물 확산계수는 $4.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이하(치환율 80% : $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 이하)의 값을 보여 고로슬래그 미분말의 사용이 염화물 침투저항성 향상에 기여하는 효과가 큰 것을 알 수 있었다.

Table 7. Chloride penetration depth with different curing periods

Types	Average value of the chloride penetration depth(mm)		
	7 days	28days	56days
BS 40	12.66	9.75	8.00
BS 60	10.12	8.85	7.28
BS 60 A	8.07	7.75	6.38
BS 80	7.01	4.70	4.12
BS 80 A	3.73	3.71	3.06

Table 8. Chloride diffusion coefficient with different curing periods

Types	Diffusion coefficient $\times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$		
	7 days	28days	56days
BS 40	6.436	4.879	4.087
BS 60	3.963	3.361	3.174
BS 60 A	2.700	2.123	2.027
BS 80	2.618	1.684	1.229
BS 80 A	1.410	1.313	0.875

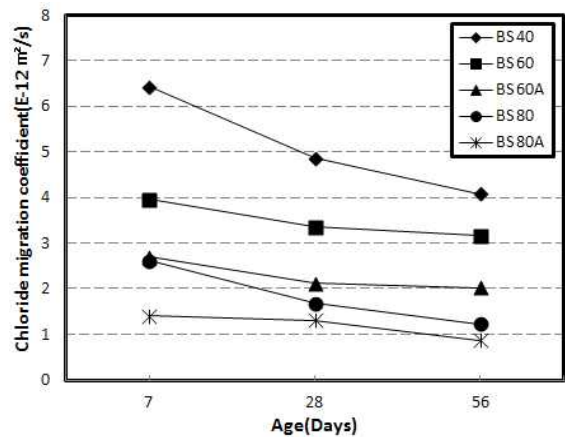


Figure 6. Relation between chloride migration coefficient and ages

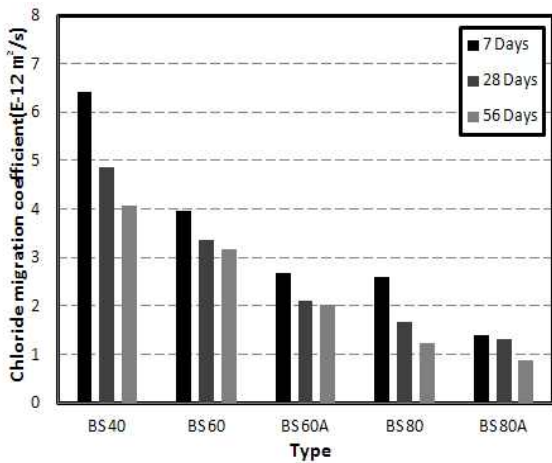


Figure 7. Relation between chloride migration coefficient and quantity of GGBS replacement

특히 BS 80, BS 40의 경우 재령 28일에서 각각 35.7%, 24.2%, 재령 56일에서 각각 27%, 16.2%의 감소율을 보여 재령증가에 따른 염화물 확산계수의 저감효과가 뚜렷한 것으로 나타났다. 반면 BS 60의 경우는 재령 7일에서 28일 사이에 염화물 확산계수가 크게 감소한 반면 그 후의 재령에서는 감소폭이 작았다. 한편 알칼리 자극제를 첨가한 BS 60A, BS 80A의 경우에는 재령 56일 기준으로 자극제를 첨가하지 않은 배합에 비해 염화물이온 확산계수가 각각 36%, 29% 저감하는 효과를 보여 염해 저항성에 큰 효과가 있음을 확인하였다.

고로슬래그 미분말 사용에 따른 염화물 확산계수의 저감 효과는 슬래그 치환율의 증가에 따른 콘크리트의 염화물이온 고정능력이 향상됐기 때문으로 판단된다. 즉, 콘크리트 경화체중에 존재하는 염화물은 자유 염화물과 고정 염화물로 크게 분류되며 고정 염화물은 C_3A (모노설페이트)와 염화물 이온과의 반응으로 생성되는 프리델씨염(Friedel's salt, $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$)과 공극벽면의 전기이중층에 구속되는 흡착 염화물로 구분할 수 있다. 본 연구와 같이 고로슬래그 미분말을 대량 사용하는 경우에는 그 치환율이 증가함에 따라 프리델씨염과 흡착 염화물의 형태로 다량의 염화물이 고정되는 것으로 보고되고 있다. 염화물이온 고정능력은 프리델씨염의 경우 슬래그 치환율 40%를 경계로 최대가 되며 그 이상의 치환율에서는 슬래그 미분말의 대량 치환으로 인한 공극의 치밀화로 흡착가능 면적이 증대하여 흡착에 의한 염화물 고정이 현저한 것으로 알려져 있다[14, 15, 16]. 다만, 본 연구에서 평가한 염화물이온 확산계수는 전기영동법

에 의한 실효확산계수이며 염수 침지시험 등에 의한 겉보기 확산계수와는 다소 차이가 있다. 즉 실제 자연상태에서의 염화물이온 확산은 농도구배차에 의해 침투·확산되는 것에 반해 전기적 전위차에 의한 염화물이온의 강제 이송방식의 실효확산계수는 겉보기 확산계수보다 큰 값을 나타낼 것으로 판단되며 향후 두 시험방법에 의한 상관관계를 검토하여 확산식의 도출이 필요하다고 판단된다.

3.3 동결융해 저항성

Figure 8은 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 상대동탄성계수를 나타낸 것이다. 시험결과 동결융해 300사이클 종료시점에서 BS 80 배합을 제외한 전 배합에서 상대동탄성계수가 80% 이상으로 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 일본 JASS 5에서 정의한 고내구성 콘크리트의 품질목표인 내구성 지수 80(300사이클시)을 만족하는 것으로 고로슬래그 미분말을 다량 치환한 경우에도 동결융해저항성을 충분히 확보할 수 있음을 확인하였다.

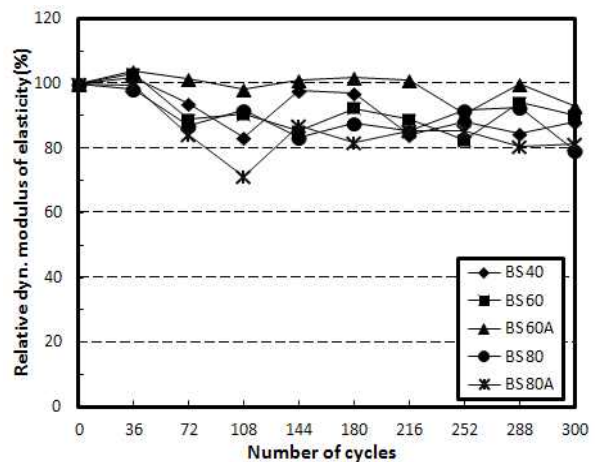


Figure 8. Relation between relative dynamic modulus of elasticity and quantity of GGBS replacement

또한 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 상대동탄성계수는 BS 60A, BS 60, BS 40, BS 80A, BS 80의 순으로 높았으며, 특히 BS 60A, BS 60 배합의 경우 상대동탄성계수가 90% 이상으로 동결융해 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 비빔직후의 공기량 및 동결융해시험 개시시점인 재령 14일에서의 압축강도발현 차이에 기인한 것으로 판단된다.

동결융해 저항성은 압축강도가 높을수록 동결시 팽창압과

용해시 응축력에 대한 저항력이 상대적으로 증가하며 Figure 4에 나타난 바와 같이 슬래그 치환율이 상대적으로 높은 BS 80, BS 80A 배합의 압축강도가 낮았기 때문에 동결융해 저항성이 저하된 것으로 판단된다. 한편 알칼리 자극제를 첨가한 BS 60A, BS 80A의 경우는 자극제를 첨가하지 않은 BS 60, BS 80 배합에 비해 상대동탄성계수가 높았으며 이는 알칼리 자극제의 첨가로 초기 압축강도가 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

고로슬래그의 치환율이 80% 이상에 이르는 슬래그 대량 치환 콘크리트(High Volume Slag Concrete, HVSC)의 개발을 목표로 압축강도, 염해 및 동결융해 저항성에 미치는 고로슬래그의 영향 및 알칼리 자극제의 효과에 대해 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 압축강도 발현특성은 초기 및 장기의 모든 재령에서 감소하였다. 알칼리 자극제의 첨가는 초기강도 발현특성을 현저히 개선시키는 것으로 나타났으나 재령 28일을 경과하면서 그 증진효과는 오히려 감소하였다.
- 2) 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 염화물 확산계수는 현저히 감소하였으며, 재령 56일 기준으로 모든 배합의 염화물 확산계수는 $4.1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이하 (치환율 80% : $1.2 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 이하)의 값을 보여 고로슬래그 미분말의 사용이 염화물 침투저항성 향상에 기여하는 효과가 큰 것을 알 수 있었다. 알칼리 자극제를 첨가한 경우에는 자극제를 첨가하지 않은 배합에 비해 염화물이온 확산계수가 각각 36%, 29% 저감하는 효과를 보여 염해 저항성에 우수한 효과를 나타내었다.
- 3) 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 동결융해 저항성은 동결융해 300사이클 종료시점에서 BS 80 배합을 제외한 전 배합에서 상대동탄성계수가 80% 이상으로 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 알칼리 자극제를 첨가한 경우에는 자극제를 첨가하지 않은 배합에 비해 상대동탄성계수가 높았으며 이는 알칼리 자극제의 첨가로 초기 압축강도가 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 고로슬래그의 치환율이 80% 이상에 이르는 슬래그 대량 치환 콘크리트(High Volume Slag Concrete, HVSC)의 개발을 목표로 압축강도, 염해 및 동결융해 저항성에 미치는 고로슬래그의 영향 및 알칼리 자극제의 효과에 대해 평가하였다. 그 결과 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 압축강도 발현특성은 초기 및 장기의 모든 재령에서 감소하였으며 염해 및 동결융해 저항성은 매우 우수한 것으로 나타났다. 한편 알칼리 자극제의 첨가에 따른 초기강도 발현특성은 현저히 개선되었으며 염해 및 동결융해 저항성 향상에 기여하는 효과가 큰 것으로 나타났다.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 알칼리 자극제, 염해 저항성, 동결융해 저항성

Acknowledgement

This subject is supported by Korea Ministry of Environment as "The Eco-technopia 21 project" (405-111-006)

References

1. Shin SW, Sustainable building technology and economic efficiency, Seoul (Korea): Sustainable Building Research Center; 2010. p. 11-2.
2. Ferraris CF, Obla KH, Hill R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete, Cement and Concrete Research, 2001;31:245-55.
3. Chan WWJ, Wu CML, Durability of concrete with high cement replacement, Cement and Concrete Research, 2000;30(6):865-79.
4. ACI Committee 206, Ground granulated blast-furnace slag as cementations constituent in concrete, ACI Materials Journal, 2009;No.84-M34:327-42.
5. Hester D, McNally C, Richardson MG, Study of influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete, Construction and Building Materials, 2005;19(9):661-5.
6. Leng F, Feng N, Lu X, An experiment study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, Cement and Concrete

- Research, 2000;30:989–92.
7. Nordtest NT–BUILD 492. Chloride migration coefficient from non–steady–state migration experiments. Nordtest, Finland, 1999.
 8. Architectural Institute of Japan. [Recommendation for practice of concrete make use of ground granulation blast furnace slag]. Japan: Architectural Institute of Japan; 1996. p. 25–51. Japanese.
 9. Lee SS, Song HY. An experimental study on the durability and mechanical properties of high performance concrete using blast–furnace slag powder. *Journal of Architectural Institute of Korea*. 2007 Nov.;23(11):119–26.
 10. Sagawa T, Nawa T. Hydration micro–structural evolution and drying shrinkage of portland cement – blast furnace slag system. *Journal of Structural and Construction Engineering*. AIJ. 2010 Jun.;75(652):1029–37.
 11. Li C, Yoda A, Yokomuro T. Effect of ground granulated blast furnace slag on pore structure and compressive strength of hardened cement pastes. *Journal of Structural and Construction Engineering*. AIJ. 1998 April;506:1–6.
 12. Oner A, Akyuz S. An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composite*. 2007 January;29(6):505–14.
 13. Hwang CL, Lin CY. Strength development of blended blast furnace slag cement mortars. *ACI SP 91–65*, Detroit, 1986;91:1323–40.
 14. Dhir RK, Mak EM, Dyer TD. Chloride binding in GGBS concrete. *Cement and Concrete Research*. 1996;26(12):1767–73.
 15. Luo R, Cai Y, Wang C, Huang X. Study of chloride binding and diffusion in GGBS concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(1):1–7.
 16. Ishida T, Miyahara S, Maruya T. Cl binding capacity of mortars made with various portland cement and admixture. *Journal of JSCE*. 2007 Jan.;63(1):14–26.