

# 고로슬래그 미분말을 대량 사용한 콘크리트의 건조수축 및 중성화에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Carbonation and Drying Shrinkage of Concrete Using High Volumes of Ground Granulated Blast-furnace Slag

류 동 우<sup>1\*</sup>

김 우 재<sup>2</sup>

양 완 희<sup>3</sup>

박 동 철<sup>3</sup>

Ryu, Dong-Woo<sup>1\*</sup>

Kim, Woo-Jae<sup>2</sup>

Yang, Wan-Hee<sup>3</sup>

Park, Dong-Cheol<sup>3</sup>

*Department of Architectural Engineering, Daejin University, Pochon-si, Gyeonggi-do, 487-811, Korea <sup>1</sup>  
Research & Engineering Division R&D CENTER, POSCO E&C, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea <sup>2</sup>  
Intchem Co., Ltd., Suwon-si, Gyeonggi-do, 443-370, Korea <sup>3</sup>*

### Abstract

The effect of ground granulated blast-furnace slag (GGBS) and alkaline activator on the properties of setting, compressive strength, drying shrinkage and resistance of carbonation was assessed to develop high volume slag concrete, the GGBS replacement rate of which was more than 80 percent. The changes in the concrete as the replacement rate of GGBS increases were as follows. Initial and final setting time was delayed by two and a half hours, and the compressive strength development properties of concrete in early and long term age were decreased. Drying shrinkage was satisfactory as below  $6 \times 10^{-4}$  in every mixture, and yet showed a tangible trend by replacement rate. Carbonation was materially increased. Setting time and early strength development property, however, were extremely advanced by the addition of the alkaline activator. While drying shrinkage was improved by the alkaline activator, resistance to carbonation was not.

Keywords : ground granulated blast-furnace slag(GGBS), alkali activator, drying shrinkage, carbonation resistance

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

최근 콘크리트의 고성능화 및 자원의 유효활용, 환경부하 저감, 지구온난화의 요인인 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 등의 관점에서 산업부산물인 고로슬래그를 대량으로 혼입한 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 사용량 또한 급증하고 있는 추세이다[1,2]. 그러나 고로슬래그의 사용이 산업부산물의 유효 활용과 CO<sub>2</sub> 대량저감이라는 두

가지의 목표를 동시에 해결할 수 있는 매우 유효한 환경부하 저감 대책임에는 틀림이 없으나 그 특성에 대한 충분한 검토 없이 사용된다면 오히려 콘크리트의 품질저하를 초래할 수 있어 그 사용에 있어 신중한 접근이 요구된다.

일반적으로 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 소오의 슬럼프 및 공기량을 얻기 위한 단위수량을 저감할 수 있으며 유동성이나 재료분리 저항성이 개선되기 때문에 고유동 콘크리트에도 적용되는 등 다수의 실적이 보고되고 있다. 또한 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 향상되는 것으로 알려져 있다. 이에 반해 조기강도 발현저하, 자기수축 및 초기 건조수축 증대, 중성화 촉진 등이 문제점으로 지적되고 있다[3,4,5,6].

Received : January 26, 2012

Revision received : May 1, 2012

Accepted : June 11, 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.

특히 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 플레인 콘크리트에 비해 단위 시멘트량이 작은 것에 기인하여  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 생성량이 적고 양생조건이나 배합조건에 따라 중성화에 대한 저항성이 떨어지는 것으로 보고되고 있다. 그러나 중성화 저항성은 장기적인 내구성을 확보하는 데 있어서 매우 중요한 지표가 되기 때문에 고로슬래그가 중성화에 미치는 영향에 관한 검토가 필요하다.

한편 고로슬래그의 치환율 증가에 따른 조기강도 저하 문제는 거푸집 존치기간의 증가로 인한 현장적용의 어려움과 콘크리트의 내구성 향상이라는 양면성을 가지고 있다.

현행 고로슬래그 미분말을 사용하는 콘크리트의 슬래그 치환율은 일본토목학회 [고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 시공지침]에서 30~70%, 일본건축학회 [고로슬래그 미분말을 사용하는 콘크리트의 배합설계시공지침(안)-동해설]에서는 70% 이하로 규정되어 있으며 일반적으로 고로슬래그 치환율이 40% 대인 고로시멘트가 보편적으로 사용되고 있다[6]. 이러한 조기강도를 개선시키는 방법으로서 고로슬래그의 분말도를  $6,000\text{cm}^2/\text{g}$  이상으로 증가시키거나 알칼리 자극제를 사용하는 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  $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ 급의 고로슬래그를 대상으로 하여 치환율 80% 이상에 이르는 슬래그 대량 치환 콘크리트(High Volume Slag Concrete, 이하 HVSC)의 개발을 목표로 그 내구특성에 미치는 고로슬래그의 영향, 특히 그 문제점으로 지적되고 있는 건조수축 및 중성화에 미치는 고로슬래그의 영향에 대하여 실험을 통해 정량적으로 고찰하였다. 또한, 고로슬래그의 대량사용으로 인한 조기강도 저하의 한계점을 극복하기 위하여 경제성을 고려한 최소한의 알칼리 자극제를 사용하여 자극제의 첨가 여부가 고로슬래그 대량 치환 콘크리트의 응결특성 및 조기강도 발현성, 건조수축 및 중성화에 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. 콘

크리트 배합은 Table 2에 나타난 바와 같이 현재 레미콘 업계에서 일반적으로 사용하고 있는 물결합재비 45%, 고로슬래그 치환율은 40, 60, 80%의 3수준으로 설정하였으며 알칼리 활성 자극제의 경우 경제성이 확보되는 범위 안에서 사전 예비실험을 통하여 조기강도 발현율 및 유동성이 우수한 석고계 1.0%의 1수준으로 선정하여 첨가하였다.

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	bleeding / setting time
	compressive strength(1, 3, 7, 28, 56days)
	drying shrinkage(120days)
	carbonation(1, 4, 8, 13weeks)

\* GGBS : ground granulated blast-furnace slag

Table 2. Mix proportions of concrete

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

Table 3. Physical properties of Concrete

Type	Items	Specific gravity(g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Absorption (%)
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 density : 1.25 (g/cm<sup>3</sup>)

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

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	lg.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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Alkali Activator	12~25	3~11	22~35	5 or less	38~56

굳지 않은 콘크리트의 특성으로서 목표 슬럼프 값은  $150 \pm 30\text{mm}$ , 공기량은  $4.5 \pm 0.5\%$ 를 만족하도록 하였으며, 블리딩 및 응결 특성을 비교 검토하였다. 또한 경화 콘크리트의 특성으로서는 고로슬래그 치환율 증가에 따른 압축강도와 길이변화 및 중성화 저항성을 검토하였다.

## 2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 3에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트(비중  $3.15 \text{ g/cm}^3$ ), 고로슬래그는 3종 고로슬래그 미분말(분말도  $4,341\text{cm}^2/\text{g}$ ), 알칼리 자극제는 Modified-Alkali-Calcium-Sulfate 계를 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.

## 2.3 시험체 제작 및 시험방법

굳지 않은 콘크리트의 시험방법으로 블리딩 시험은 KS F 2414 「콘크리트의 블리딩 시험방법」, 응결시간은 KS F 2436 「관입저항침에 의한 콘크리트의 응결시험방법」에 준하여 측정하였다. 한편 경화 콘크리트의 시험방법으로 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준해  $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주 공시체를 제작하여 소정의 재령까지 수중양생( $20 \pm 1^\circ\text{C}$ )을 실시한 후 재령 1, 3, 7, 28, 56일에서 측정하였다.

길이변화 시험은  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 각주 시험체를 제작하여 이틀간 기중양생을 실시한 후 Figure 1과 같이 60mm 부착형 스트레인지지를 사용하여 온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 140일간 연속 측정하였다. 촉진 중성화 시험은  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 의 각주 시험체를 제작하여 KS F 2585 「콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법」에 준한 온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ ,  $\text{CO}_2$  농도  $5 \pm 0.2\%$ 의 시험조건으로 실시하였다. 시험체는 전 양생으로서 탈형 후  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  수중양생을 4주간 실시한 후 온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도  $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 4주간 기중양생을 실시하였다. 중성화의 측정은 시험개시 후 재령 1, 4, 8, 13주에서 시험체 할렬 후 페놀프탈레인 1% 용액을 분무하여 각 시험체당 상하면의 10군데를 0.01mm까지 측정하여 그 평균값을 중성화 깊이로 산정하였다.



Figure 1. Drying shrinkage test

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 블리딩 및 응결시간

Figure 2와 Figure 3은 고로슬래그 치환율에 따른 블리딩률과 누적 블리딩량을 나타낸 결과이다. 고로슬래그 치환율이 증가할수록 블리딩률은 증가하는 경향을 나타냈으며, 알칼리 자극제를 첨가한 배합에서는 블리딩률이 현저히 감소함과 동시에 블리딩 종료시간도 빠른 것으로 나타났다.

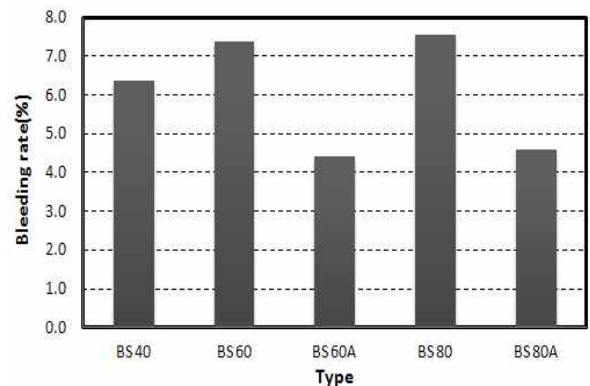


Figure 2. Relation between bleeding rate and quantity of GGBS replacement

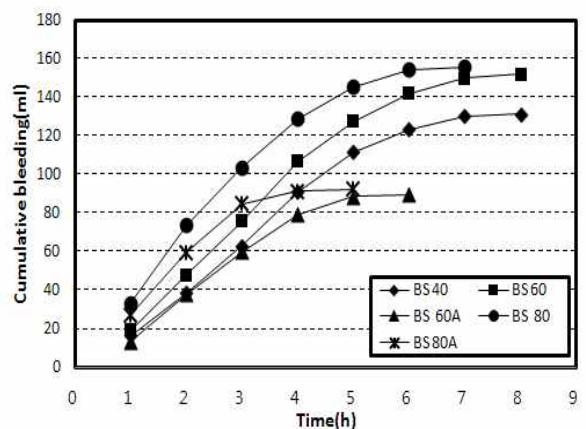


Figure 3. Cumulative bleeding time curves

본 연구와 같이 분말도  $4,000\text{cm}^2/\text{g}$ 급의 고로슬래그를 사용하고 그 치환율이 큰 경우에는 플레인 콘크리트에 비해 블리딩량이 약간 증가하지만 단위수량을 2~3% 저감시키거나 분말도를 높힘으로써 블리딩량을 감소시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다[6].

Figure 4는 고로슬래그 치환율별 경과시간에 따른 관입 저항치의 변화를 나타낸 것이다. 고로슬래그 치환율이 증가할수록 초결 및 종결 도달시간이 약 2~2.5시간 지연되는 것으로 나타났으며 이는 기존 연구와 유사한 경향으로 나타났다. BS 40을 기준으로 치환율이 증가할수록 초결 도달시간의 차이는 BS 60의 경우 50분, BS 80의 경우 105분, 종결 도달시간의 차이는 BS 60의 경우 100분, BS 80의 경우 140분 정도 지연되는 것으로 나타났다.

한편 알칼리 자극제를 첨가한 경우에는 초결 도달시간이 BS 40과 거의 유사하거나 BS 80A의 경우는 오히려 1시간 정도 빠른 것으로 나타났으며 종결 도달시간 또한 무첨가 배합에 비해 응결시간을 약 1.5시간 정도 앞당기는 것으로 나타나 알칼리 자극제가 고로슬래그 치환 콘크리트의 초기 강도 발현에 크게 기여하는 것을 알 수 있다.

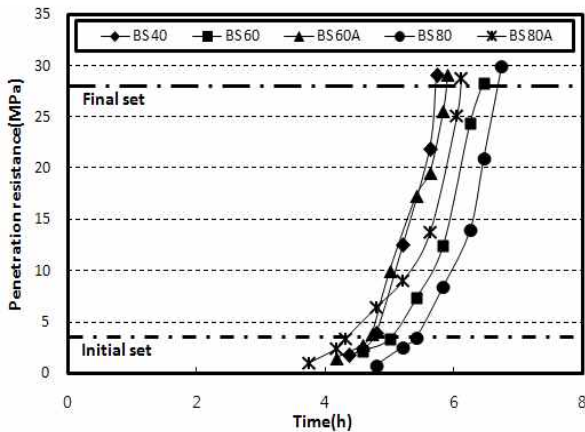


Figure 4. Influence of quantity of GGBS replacement on penetration resistance

### 3.2. 압축강도

Table 6은 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[6,7]. 이는 고로슬래그 미분말의 공극충전효과(Filler effect)와 더불어 슬래그 반응율이 낮

은 초기재령에서는 슬래그의 치환율이 증가함에 따라 모세관 공극량이 증가하지만 수화가 진행됨에 따라 장기재령에서는 비교적 공극경이 큰 모세관 공극이 감소하고 젤공극(미세공극)량이 크게 증가하기 때문이다[8]. 그러나 본 연구에서는 Figure 5에 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 잠수수경성 때문인 것으로 판단되며, A. Oner, C. L. Hwang의 연구에 있어서도 장기재령에서 최대 압축강도를 얻기 위한 고로슬래그 미분말의 최적 치환율은 전 결합재량의 50~60% 전후로 보고하고 있다[9,10,11,12].

한편, 알칼리 자극제가 압축강도 발현에 미치는 영향은 재령1~3일에서 높은 강도발현율을 보여 약점으로 지적되는 초기강도 발현특성을 현저히 개선시키는 것으로 나타났으나 재령 28일을 경과하면서 그 증진효과는 오히려 감소하였다.

Table 6. Compressive strength with different curing periods

Items	Air (%)	Slump (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	

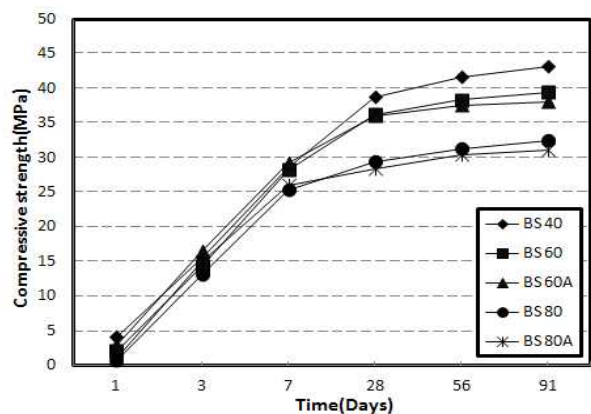


Figure 5. Relation between compressive strength development and quantity of GGBS replacement



### 3.3. 건조수축

Figure 6은 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 건조수축율을 시험체 제작 초기부터 120일간 연속 측정된 결과를 나타낸 것이다. 시험결과 건조수축율은 BS 60 > BS 40 > BS 60A > BS 80 > BS 80A 순으로 높게 나타났으나 모든 배합에서  $6 \times 10^{-4}$  이하의 값을 보여 일본건축학회 JASS 5에서 정의한 내구성 확보를 위한 수축균열 저감목표치인  $8 \times 10^{-4}$  이하의 값을 충분히 만족하였다.

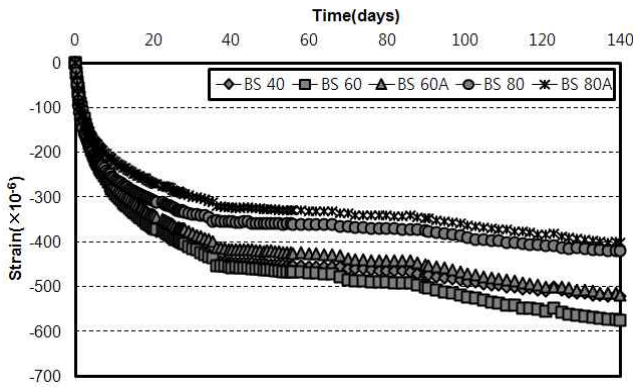


Figure 6. Relation between drying shrinkage and quantity of GGBS replacement

초기 재령에서의 고로슬래그 치환율 증가에 따른 건조수축의 영향은 BS 40에 비해 BS 60이 다소 증가하는 경향을 나타냈으나 슬래그가 대량 치환된 BS 80의 경우 건조수축율이 큰 폭으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 알칼리 자극제의 첨가에 따른 건조수축율은 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 플레인 콘크리트의 건조수축율에 비해 고로슬래그를 치환한 콘크리트는 건조수축율이 약간 증가하는 경향을 나타낸다는 기존 연구보고와 일치하고 있으며 이러한 연구의 대부분이 고로슬래그의 치환율 범위를 30~60% 정도 사용하고 있다[6,8].

경화체에 발생하는 수축응력은 공극구조(공극경 분포와 공극량)와 밀접한 관련이 있으며 수분 증발시 생기는 모세관 장력은 모세관 공극보다 젤 공극에서 더 크다. 또한 압축강도가 증가하게 되면 변형이 생기기 어렵게 되고 건조수축 변형은 그다지 증가하지 않는 것으로 보고되고 있다 [13]. 3.2절에서 서술한 바와 같이 고로슬래그의 수화반응 기구를 고려해 볼때 초기재령에서 고로슬래그의 치환율이 증가함에 따라 모세관 공극량이 증가하여 건조수축률이 증가하는 경향이 있지만 수화가 진행됨에 따라 장기재령에서는 젤 공극

량의 생성과 함께 강도도 함께 증가하기 때문에 건조수축량이 크게 증가하지 않는 것으로 판단된다. 또한 알칼리 자극제의 첨가에 따른 건조수축율의 감소 경향도 알칼리 자극작용에 의한 슬래그 반응율이 촉진되어 초기강도가 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

한편 고로슬래그가 대량 치환된 BS 80과 같은 경우는 고로슬래그의 분말도가 증가할수록 미세공극 및 빈 공극이 충전되어 콘크리트의 크리프와 건조수축율을 감소시킨다는 Jianyong의 연구 결과에 비추어 슬래그 미분말의 대량 치환에 의한 공극충전 효과에 의해 모세관 공극량이 감소하여 수분의 증발이 억제됐기 때문에 건조수축율이 감소한 것으로 판단된다[14].

### 3.4. 중성화

Table 7과 Figure 7, 8은 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 촉진 재령별 콘크리트의 중성화 깊이를 나타낸 것이다. 고로슬래그의 치환율이 증가할수록 재령의 증가와 함께 중성화 침투깊이가 현저히 증가하는 경향을 나타냈으며 촉진 재령 8~13주 사이에서 중성화 속도가 빠른 것으로 나타났다. 알칼리 자극제의 첨가에 따른 중성화 속도는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

Table 7. Carbonation depth with different accelerated periods

Types	age	Average value of the carbonation depth(mm)			
		1 week	4 weeks	8 weeks	13 weeks
BS 40		0.87	1.81	3.78	6.72
BS 60		1.64	2.56	5.23	11.80
BS 60 A		1.37	2.33	4.92	11.81
BS 80		3.16	4.55	8.30	21.51
BS 80 A		2.75	4.10	7.84	20.02

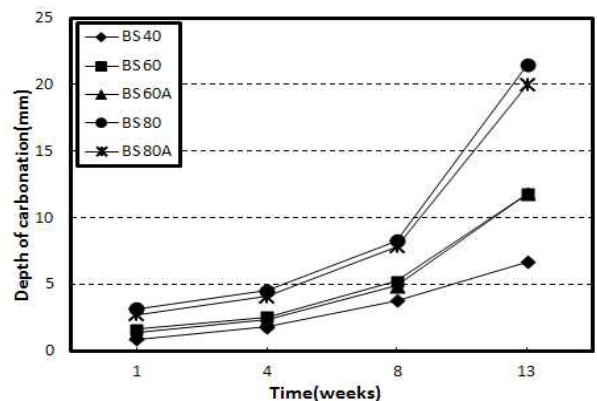


Figure 7. Relation between depth of carbonation and quantity of GGBS replacement

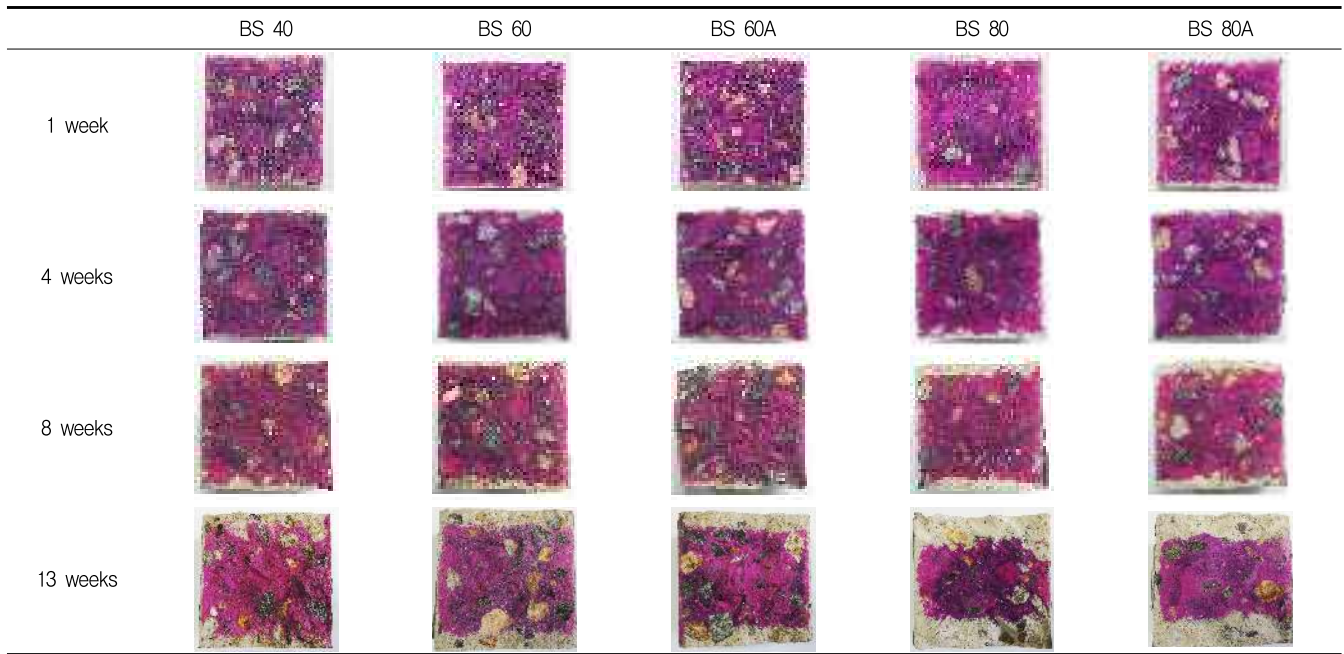


Figure 8. Results of accelerated carbonation

일반적으로 고로슬래그를 치환한 콘크리트는 플레인 콘크리트에 비해 중성화 속도가 다소 큰 것으로 알려져 있으며 이는 고로슬래그 미분말의 치환율에 따라 콘크리트 중의 단위시멘트량이 적게 되고 결과적으로 시멘트 수화에 의해 생성되는  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  생성량이 감소하기 때문이다. 또한 고로슬래그의 수화반응에 의해서도  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 이 소모되며 Richardson에 의하면 고로슬래그 수화반응의 화학량론적인 검토에서 도입된 화학반응식에 따라  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 소비량을 산정하면 슬래그 반응량 당  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 소비량은 각각 17.8%, 35.7%로 보고되고 있다[15]. 결과적으로 중성화 반응 메카니즘을 고려해 볼 때 외부에서 침투한  $\text{CO}_2$ 는 세공

중의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 반응하여  $\text{CaCO}_3$ 을 생성하며 장기적으로는 C-S-H로부터 Ca를 공급받아 세공용액의 pH를 유지하는데 고로슬래그 치환 콘크리트의 C-S-H는 플레인 콘크리트의 Ca/Si 비 1.7~2.0에 비해 Ca/Si 비가 약 1.0으로 세공용액중의 pH 유지 능력이 떨어지기 때문에 콘크리트 표면부터 중성화가 촉진된다. 또한 알칼리 자극제의 영향은 용해된 알칼리 성분에 의해 pH가 서서히 감소하는 것으로 판단된다[16].

한편 중성화 속도는 콘크리트의 압축강도와도 높은 상관관계가 있으며 본 연구에 있어서도 동일 재령에서의 압축강도와 중성화 깊이가 거의 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

향후 촉진재령 26주까지 중성화 깊이를 측정하여 일반적으로 내구성을 고려한 중성화 제한깊이 25mm 도달 여부를 검토하여 최종적인 중성화 저항성을 평가할 예정이다.

#### 4. 결 론

본 연구의 범위 안에서 고로슬래그의 치환율이 80% 이상에 이르는 슬래그 대량 치환 콘크리트(High Volume Slag Concrete, HVSC)의 개발을 목표로 응결특성, 압축강도, 길이변화 및 중성화 저항성에 미치는 고로슬래그 치환율의 영향 및 알칼리 자극제의 효과에 대해 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 블리딩량은 증가하는 경향을 나타냈으며, 알칼리 자극제를 첨가한 배합에서는 블리딩량이 현저히 감소함과 동시에 블리딩 종료시간도 빠른 것으로 나타났다.
- 2) 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 응결시간은 초결 및 종결 도달시간이 약 2~2.5시간 지연되는 것으로 나타났다. 알칼리 자극제를 첨가한 경우에는 초결 및 종결 도달시간이 무첨가에 비해 현저히 단축하는 것으로 나타났다.
- 3) 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 압축강도 발

현특성은 초기 및 장기의 모든 재령에서 감소하였다. 알칼리 자극제의 첨가는 초기강도 발현특성을 현저히 개선시키는 것으로 나타났으나 재령 28일을 경과하면서 그 증진효과는 오히려 감소하였다.

- 4) 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 건조수축은 BS 60> BS 40> BS 60A> BS 80> BS 80A 순으로 높게 나타났으나 모든 배합에서  $6 \times 10^{-4}$  이하의 값을 보여 일본건축학회 JASS 5에서 정의한 내구성 확보를 위한 수축균열 저감목표치인  $8 \times 10^{-4}$  이하의 값을 충분히 만족하였다.
- 5) 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 재령의 증가와 함께 중성화 침투깊이가 증가하는 경향을 나타냈으며 촉진 재령 8~13주 사이에서 중성화 속도가 빠른 것으로 나타났다. 알칼리 자극제의 첨가에 따른 중성화 속도는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 콘크리트 제조시 사용목적에 따라 치환율을 조절하거나 슬래그와 혼합제조가 가능한 분말형태의 알칼리 자극제를 사용하여 초기강도 발현율을 높임으로써 HVSC에 대한 기초적 자료를 구축하는 데에 기여할 것으로 판단되며, 향후 고로슬래그 대량 사용에 따른 시멘트 수화반응의 정량적 분석과 더불어 HVSC의 시공지침을 도출함으로써 현장 적용이 가능한 실용기술의 개발이 필요하다고 판단된다.

## 요 약

본 연구에서는 고로슬래그의 치환율이 80% 이상에 이르는 슬래그 대량 치환 콘크리트(High Volume Slag Concrete, HVSC)의 개발을 목표로 응결특성, 압축강도, 건조수축 및 중성화 저항성에 미치는 고로슬래그 치환율의 영향 및 알칼리 자극제의 효과에 대해 평가하였다.

고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 시험결과는 다음과 같다. 응결시간은 초결 및 종결 도달시간이 약 2~2.5 시간 지연되는 것으로 나타났으며 압축강도 발현특성은 초기 및 장기의 모든 재령에서 감소하였다. 건조수축은 치환율에 따른 뚜렷한 경향을 나타내지 않았으며 모든 배합에서  $6 \times 10^{-4}$  이하의 값을 보여 매우 양호한 것으로 나타났다. 중성화는 현저히 증가하는 경향을 나타냈다. 한편 알칼리 자극제의 첨가에 따른 응결시간 및 초기강도 발현특성은 현

저히 개선되었으며 건조수축에 기여하는 효과가 큰 것으로 나타났다. 반면 중성화 저항성에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

**키워드** : 고로슬래그 미분말, 알칼리 자극제, 길이변화, 중성화 저항성

## Acknowledgement

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

## References

1. 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(2):245-55.
2. Chan WWJ, Wu CML. Durability of concrete with high cement replacement. *Cement and Concrete Research*, 2000;30(6):865-79.
3. Domone PL, Soutsos MN. Properties of high-strength concrete mixes containing PFA and ggbs. *Magazine of Concrete Research*, 1995;47(173):355-67.
4. Hester D, McNally C, Richardson MG. A study of influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete. *Construction and Building Materials*, 2005;19(9):661-5.
5. Leng F, Feng N, Lu X. An experimental 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(6):989-92.
6. Architectural Institute of Japan. Recommendation for Practice of Concrete with Portland Cement and Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2001. p. 35-52.
7. 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.
8. Sagawa T, Nawa T. Hydration microstructural evolution and drying shrinkage of portland cement - blast furnace slag system. *Journal of Structural and Construction Engineering*. AJJ, 2010 Jun.;75(652):1029-37.

9. 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.
10. 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.
11. Hwang CL, Lin CY. Strength development of blended blast furnace slag cement mortars. *ACI SP 91–65*, Detroit, 1986;91:1323–40.
12. McNally C., Sheils E. Probability-based assessment of the durability characteristics of concretes manufactured using CEM II and GGBS binders. *Construction and Building Materials*. 2012;30:22–9.
13. Nagashio Y., Masuda Y. Influence of ground granulated blast-furnace slag on drying shrinkage and carbonation of concrete with ecocement. *Journal of Structural and Construction Engineering: Transactions of AIJ*. 2010 April;75(650):675–80.
14. Jianyong L, Yan Y. A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(8):1203–06.
15. Richardson I.G. Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C–S–H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate,  $\beta$ -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(9):1733–77.
16. Bakharey T, Sanjayan JG, Cheng Y–B. Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(9):1277–83.