

# High Volume Slag를 사용한 저탄소 콘크리트의 역학 및 내구특성

## Dynamic and Durability Properties of the Low-carbon Concrete using the High Volume Slag

문 지 환 이 상 수\*

Moon, Ji-Hwan Lee, Sang-Soo\*

Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-730, Korea

### Abstract

Blast furnace slag (BFS) have many advantages that are related to effective value improvement on applying to concrete while side effects of blast furnace slag also appear. Thus, research team conducted an experiment with high volume slag to see if the attribute of waste alkali accelerator for mixing rate, mixed use of NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, and early strength agent for mixing rate for replacement ratio and for the types of the stimulants in order to increase the use of blast furnace slag's powder. As the result of the experiment, when it comes to compression strength, all of the alkali stimulants have been improved as the replacement rate increases except for sodium hydroxide. Among the alkali stimulants, sodium silicate was high on dynamic elastic modulus and absorption factor. In case of early strength agent, the mix of mixing 1.5% and blast furnace slag 75% have showed high strength enhancement. In event of Waste Alkali accelerator, it has showed different consequences for each experiment.

Keywords : blast furnace slag, alkali accelerator, waste alkali

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

최근 건설산업에서는 시멘트 생산에 따른 환경문제가 이슈화되고 있으며, 특히 기존의 석회석을 사용하는 시멘트의 경우 환경파괴와 더불어 보존자원의 고갈이라는 큰 문제점을 가지고 있어, 건설업계에서도 CO<sub>2</sub>를 저감하기 위하여 신소재 개발과 기존의 혼화재를 다량 사용하는 High Volume의 개념적 접근이 이루어지고 있다[1]. 시멘트의 사용량을 줄이기 위해서는 시멘트의 성질에 만족하거나 그 이상이 되는 성질을 가진 재료가 필요하다. 기존의 혼화재료중 플라이애쉬의 경우, 우수한 경제성과 더불어 High Volume As

h로서 활용성이 증대되는 경향인 반면에 고로슬래그의 경우, 사용량이 늘어나는 추세지만 지금까지 치환율이 30 ~ 50%범위로 제한되어 있다. 고로슬래그를 콘크리트에 사용할 때 효율적인 가치향상과 작업성 개선, 장기강도의 증진, 수화열 감소, 건조수축 감소, 수밀성 증가 및 화학저항성 증가로 해수, 공장폐수, 하수 등에 접하는 콘크리트에 적합함에도 불구하고 초기강도저하, 콘크리트의 중성화 및 한중 시공시 저온으로 인한 응결지연 등이 작용하여 사용량 증대에 부작용으로 나타나고 있어 사용량이 저조한 실정이다[2, 3]. 또한 기존 High Volume Slag의 연구의 경우, 빠른 경화와 안정적인 강도발현을 위해 NaOH와 CSA계의 팽창재 및 조강제를 투입시켜 초기강도를 개선시키는 화학적인 방법과 고로슬래그 미분말의 분말도를 증가시켜 응결을 촉진시키는 물리적인 방법이 다양하게 이루어졌다. 하지만 이러한 연구의 특성상 기존의 기성품을 사용하는 산업체에서 콘크리트에 적용하기에는 한계점으로 작용할 수 있으며, 알칼리 자극제 사용으로 인한 콘크리트의 가격상승으로 많은 산업체에서 활용을 하지 못하고 있는 실정이다.

Received : January 4, 2013

Revision received : March 5, 2013

Accepted : April 18, 2013

\* Corresponding author : Lee, Sang-Soo

[Tel: 82-42-821-1635, E-mail: sslee111@hanbat.ac.kr]

©2013 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

## 1.2 연구의 목적

본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 활용성 증대와 더불어 다양한 알칼리자극제의 적용으로 인한 High Volume Slag의 유동성, 강도 및 내구성을 실험을 비교 분석함으로써 콘크리트 적용을 위한 High Volume Slag의 범용적인 활용성과 품질향상을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 기존 연구동향

### 2.1 국내 연구동향

본 연구와 관련하여 국내의 연구의 경우 대부분 알칼리 활성화 고로슬래그를 일정한 비율로 시멘트에 대체하여 사용하는 혼합사용에 관한 기술이 주로 이루고 있으며, 시멘트를 사용하지 않고 슬래그만을 사용한 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 연구가 일부 되고 있으나 아직까지 초기단계의 연구에 머무르고 있는 실정이다. 기존에는 산업부산물 활용 기술 개발의 일환으로서 폐석회, 석탄회 등을 이용한 알칼리 활성화 경화체의 특성에 관한 연구를 수행하면서 고로슬래그의 일부치환 및 완전 대체에 대한 가능성을 평가하였으나, 최근 알칼리 활성화 슬래그 페이스트 및 모르타르의 특성 파악에 관한 연구[4]를 본격적으로 수행하면서 시멘트의 80 ~ 100%를 대체한 슬래그 시멘트의 물성평가에 관한 연구가 진행 중에 있다.

### 2.2 국외 연구동향

국외 연구의 경우 제로 시멘트 콘크리트는 1987년 프랑스의 Davidovits가 중합반응(polymerization)을 유도하는 메커니즘으로 개발하였다[5]. 이후 1983년 핀란드의 Fross는 포졸란 물질(슬래그와 플라이애쉬)의 알칼리성 혼합물로 바인더를 제조하여 특허를 출원 하였다[6].

그러나 최근 지구 온난화의 주범인 온실가스에 대한 대책으로, 고로슬래그, 플라이애쉬와 같은 산업부산물을 이용하여 시멘트를 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국에서는 2001년 “Vision 2030: A Vision for the U. S. Concrete Industry”, 호주에서는 “Low-Calcium Fly-ash Based Geopolymer Concrete” 프로젝트를 계획하여 개발, 제조, 활용기술 개발을 목표로 본격적인 연구를 시작하였다.[5] 이외에도 일본, 유럽의 각국에서도 플라이애쉬 및 슬래그 등의 산업부산물을 이용한 알칼리 활성화 콘

크리트 연구가 진행되고 일부 실용화 되었다.[6]

## 3. 이론적 고찰

### 3.1 개요

고로슬래그 미분말은 잠재수경성을 가지고 있고 그 자체로 경화하는 성질은 미약하지만 알칼리자극으로 경화하며, 포틀랜드 시멘트와 혼합한 경우 수산화칼슘이나 황산염의 작용에 의해 경화가 촉진되고 포틀랜드 시멘트만으로는 얻을 수 없는 우수한 콘크리트의 특성을 얻을 수 있다[9].

고로슬래그 미분말의 활용과 용도는 Table 1과 같다.

Table 1. Use of utilization of blast furnace slag

Property	Main use
1. Fluidity	High flowing concrete (improvement on small energy concrete of construction, etc)
2. Improvement setting retardation effect	Bulk continuous casting concrete, etc
3. Low heat	mass concrete (Basis of large structure etc)
4. curing 28 days strength	Reduction of amount of unit cement
5. Improvement long-term strength	Improvement on durability of structures, reduction of amount of unit cement
6. High-strength	High-rise RC building
7. Improvement water tightness	Underground, marine and underwater structures
8. Improvement blockage of chloride	Coast structure, floating, marine structures
9. Improvement seawater resistance	Floating, marine structures
10. Improvement chemical resistance	Chemical plant buildings, spa building acid rain measures
11. Inhibition of alkali silica reaction	High durability of buildings

\* Concrete Standard Specification Commentary (KOREA CONCRETE INSTITUTE, 2009)

### 3.2. 알칼리 활성화 콘크리트

알칼리 활성화 슬래그란 고로슬래그 미분말에 자극제를 첨가해 잠재 수경성을 이끌어냄으로써 포틀랜드 시멘트와 같이 접착 역할을 할 수 있는 재료를 말하는 것으로, AAS (Alkali-Activated Slag)의 사용 가능성에 대한 연구는 1940년에 이루어졌으나 실질적인 개발은 1957년 Glukhovsk y에 의해 이루어졌다[7].

시멘트 제로 콘크리트 반응은 플라이애쉬 및 고로슬래그 등 결합재에 포함되어있는 Al과 Si성분을 고농도의 알칼리

활성화제에 의해 용해시켜 경화되는 것을 기본으로 하고 있다[8]. 일반적으로 알칼리 활성화제는 MOH형태의 가성 알칼리(caustic alkalis)와  $R_2O \cdot (n)SiO_2$  형태의 규산염(silicates)이 단독 또한 조합의 형태로 가장 많이 사용되고 있다.

알칼리 활성화는 고 알칼리 환경에서 Si-O-Al-O 합성체를 만드는 다양한 알루미늄-규산 산화물들 사이의 화학적 반응이며, 알칼리 활성화에 대한 화학 반응 기구는 아직 명확하게 밝혀지지 않았다.

### 3.3. 알칼리 활성화제 종류

고로슬래그의 잠재 수경성을 활성화시키기 위해서는 반응을 촉진시킬 수 있는 화학촉진제가 필요하다. 슬래그가 물과 접하면 슬래그 입자 표면에 치밀한 불투수성의 산성피막이 형성되기 때문에 강알칼리에 의해 피막이 파괴되어야만 반응이 계속 진행된다. 또한 알칼리 활성화 반응에 따른 슬래그 표면으로부터의 용해 반응이 발생하면 이후 용액으로부터 불용성 물질이 생성되어 석출되고 경화가 시작된다. 결합재의 종류에 따라 알칼리 활성화제도 적합한 것으로 사용할 필요가 있고, 고로슬래그 모재의 알칼리 활성화와 C-S-H 겔의 형성을 통해 규산 또는 나트륨과 같은 음이온이 활성화 된 생성물의 강도발현에 기여하게 된다. C-S-H 겔은  $Ca^{+}$ 이온과의 반응을 통해 실리카 수화생성물을 형성한다[10].

## 4. 실험계획 및 방법

### 4.1 실험계획

#### 4.1.1 알칼리자극제 종류 및 첨가율에 따른 검토

고로슬래그 미분말과 알칼리자극제별 경화성상 및 반응성을 확인하기 위하여 많은 기초실험을 바탕으로 예비실험을 진행하였으며, 기초배합을 토대로 고로슬래그 미분말과 알칼리자극제를 사용한 페이스트의 각종 반응성을 검토하기 위한 실험요인 및 수준은 Table 2와 같이 W/B는 30% 으로 고정하였고, 알칼리자극제 NaOH,  $Na_2SiO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $K_2SiO_3$  등 5가지를 사용하였다. 알칼리자극제 첨가율은 1, 3, 5, 7, 10(%)로 하였다. 실험인자로서는 유동성, 동결융해 저항성, 압축강도, 흡수율 등 4가지를 실험하였다.

Table 2. Experimental factor and level by replacement ratio of alkali accelerator

Experimental factor	Level	Number of level
Inorganic composite	· Blast furnace slag	1
W/B <sup>1)</sup>	· 30(%)	1
Alkali accelerator	· Sodium hydroxide (NaOH) · Sodium silicate ( $Na_2SiO_3$ ) · Sodium carbonate ( $Na_2CO_3$ ) · Sodium sulfate ( $Na_2SO_4$ ) · Potassium silicate ( $K_2SiO_3$ )	5
Alkali accelerator content	· 1, 3, 5, 7, 10(%)	5
Curing condition	· air dry curing : $20 \pm 2(^{\circ}C)$	1
Assessment items	· Fluidity, Freeze-thawing resistance, compressive strength, absorption rate <sup>2)</sup>	

1) W/B = water to binder ratio

2) It is carried out only at 3% of addition ratio of alkali accelerator

#### 4.1.2 NaOH와 $Na_2SiO_3$ 혼합사용한 모르타르의 성상검토

기존의 실험에서 나타난 결과를 바탕으로 고로슬래그 미분말과 NaOH와  $Na_2SiO_3$ 를 혼합 사용하였을 때 경화성상 및 반응성을 검토하기 위한 배합사항은 Table 3과 같이 W/B는 40, 50(%)이며, 시멘트 사용을 저감하기 위하여 고로슬래그를 30, 50, 75, 100(%)로 치환하였다. 고성능 감수제는 Binder의 0.5(%)를 첨가하였다.

Table 3. Mortar mixtures containing combined NaOH and  $Na_2SiO_3$  alkali activator

W/B (%)	BFS <sup>1)</sup> (%)	Unit Weight (g)				Alkali activator (g)	HRWR <sup>5)</sup> (%)
		W <sup>2)</sup>	C <sup>3)</sup>	BFS	S <sup>4)</sup>		
	30 (Control)		3248	1392			
40	50	1406	2320	2320			
	75		1160	3480			
	100		-	4640			
	30 (Control)		3248	1392	11360	NaOH (341.38) $Na_2SiO_3$ 341.38	0.5
50	50	1870	2320	2320			
	75		1160	3480			
	100		-	4640			

1)BFS : Blast furnace slag, 2) W : Water, 3)C : Cement

4)S : Fine aggregate, 5)HRWR : High-range water reducer

\* C : S = 1 : 2.45

4.1.3 조강제 혼입율에 따른 모르타르의 정상검토

고로슬래그 미분말과 조강제의 혼입율에 따른 특성을 검토하기 위한 배합사항은 Table 4와 같으며, 조강제의 첨가율은 1, 1.5, 2(%)이다.

Table 4. Mortar mixtures containing early strength agent

W/B (%)	Early strength agent (%)	BFS (%)	Unit Weight (g)			
			W	C	BFS	S
40	1, 1.5, 2	30		840	360	
		50	480	600	600	2940
		75		300	900	
		100		-	1200	

4.1.4 폐알칼리자극제 첨가율별 페이스트의 정상검토

폐알칼리자극제를 사용한 실험에서의 W/B는 0.45로 설정하였으며, 알칼리자극제의 첨가율은 2, 2.5(%), 폐알칼리자극제의 첨가율은 9, 12, 15(%)이다. 실험요인으로는 유동성, 응결특성, 휨강도, 압축강도 등의 4수준으로 설정하여 실험을 실시하였다. 실험요인 및 수준은 Table 5와 같다. 또한 양생은 20℃±2의 기건양생 하였다.

고로슬래그 미분말과 폐알칼리자극제의 혼입율에 따른 특성을 검토하기위한 배합사항은 Table 6과 같으며, 본 실험에 사용한 폐알칼리자극제는 정제하기 전의 알칼리자극제로서 NaOH첨가량 6%인 것으로 사용하였다. pH농도 14이상으로 고농도의 pH를 가지고 있기 때문에, 본 실험을 실시하기 전에 기존의 알칼리자극제와 정제된 폐알칼리자극제 농도 20%를 사용하였다.

Table 5. Experimental factor and level using waste alkali accelerator

Experimental factor	Level	No. of level
Replacement ratio of blast furnace slag	· 50, 70, 80(%)	3
W / B	· 0.45	1
Alkali accelerator content	· 2, 2.5(%)	2
Waste alkali accelerator content	· 9, 12, 15(%)	3
Curing condition	· Air dry curing : 20±2(°C)	1

Table 6. Mix using waste alkali accelerator (paste)

W/B (%)	W (g)	C (g)	BFS (g)	Alkali (NaOH) (g)	Waste alkali (NaOH) (g)
45	759				150
	712	1000	1000	50	200
	665				250
	759				150
	712	600	1400	50	200
	665				250
	759				150
	712	400	1600	50	200
	665				250
45	759				150
	712	1000	1000	40	200
	665				250
	759				150
	712	600	1400	40	200
	665				250
	759				150
	712	400	1600	40	200
	665				250

4.2 사용재료

4.2.1 고로슬래그

본 연구에서 사용된 고로슬래그는 밀도 2.91 g/cm³, 분말도 4,464 cm²/g인 국내 G사의 제품으로 SEM촬영은 figure 1에 나타내었으며, Figure 2와 Table 7은 XRD와 XRF 분석을 나타낸 것으로 주성분은 SiO₂와 CaO이다.

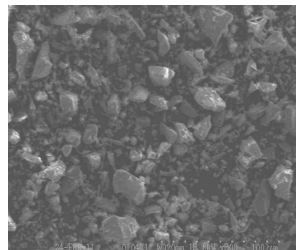


Figure 1. SEM of blast furnace slag

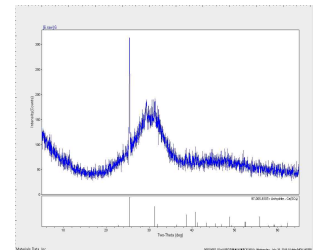


Figure 2. XRD of blast furnace slag

Table 7. XRF analysis of blast furnace slag

Classification	Chemical composition (%)									
	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	MnO	P₂O₅	TiO₂	L.O.I
Contents	35.80	13.87	0.52	41.1	3.60	2.36	0.33	0.02	1.20	0.24

4.2.2 알칼리자극제

알칼리자극제는 분말형보다는 액상에서 이용될 때 강도발현에 유리하지만 유동성 손실이 급격하게 나타난다는 점 때

문에 본 연구에서는 기초실험으로 분말형태의 알칼리자극제 ( $K_2SiO_3$ 는 제외) 를 사용하였으며, 사용된 자극제의 종류로는 Tabel 8과같이  $NaSiO_3$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $K_2SiO_3$  등을 사용하였다.

Table 8. Type of alkali accelerator

Kind of accelerator	Phase	Specific gravity
Sodium silicate ( $Na_2SiO_3$ )	White powder	2.13
Sodium hydroxide ( $NaOH$ )	White powder	2.53
Sodium sulfate ( $Na_2SO_4$ )	White powder	2.40
Sodium carbonate ( $Na_2CO_3$ )	White powder	2.70
Potassium silicate ( $K_2SiO_3$ )	Liquid phase	1.60

#### 4.2.3 잔골재 (Fine aggregate)

잔골재는 국내산 P사 부순잔골재를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 9와 같이 밀도  $2.61g/cm^3$ , 조립율 2.70 이다.

Table 9. Physical properties of fine aggregate

Classification	Density ( $g/cm^3$ )	Fineness modulus	Unit volume mass ( $kg/m^3$ )	Percent passing of 0.08 mm sieve (%)
Fine aggregate	2.61	2.70	1,640	1.2

#### 4.2.4 조강제 및 폐알칼리자극제

조강제는 무기염계로서 밀도는  $1.25g/cm^3$ 로 액상형을 사용하였으며, 폐알칼리자극제의 경우 pH농도 14이상의 강알칼리성을 가진 농도 6, 20(%)  $NaOH$  액상형을 사용하여 실험을 실시하였다.

#### 4.3 실험방법

비빔방법으로는 18ℓ 모르타르 혼합 믹서기를 사용하였으며 고로슬래그와 잔골재를 20rpm의 속도로 90초간 건비빔을 실시하였다. 그후 알칼리자극제와 배합수가 혼합된 액상을 첨가하여 30rpm속도로 90초 40rpm속도로 90초 총 270초동안 비빔을 실시한 뒤 토출하였다.

재령별 경화성상을 측정하기 위해서 KS L 5105의 방법으로  $50x50x50mm$ 의 몰드에 제작하여 시험을 실시하였으며, KS F 2437의 공명 진동에 의한 동탄성계수와 질량변화율을 측정하였다. 또한 고로슬래그의 알칼리자극제별 흡수율을 평가하기 위하여 KS F 2459의 방법에 의해 흡수율을 측정하였다.

## 5. 실험결과 및 분석

### 5.1 알칼리자극제 치환율별

#### 5.1.1 유동특성

유동특성을 알아보기 위한 시험으로 Figure 3에 나타난 바와 같이 결합수에 알칼리자극제의 첨가량을 달리하여

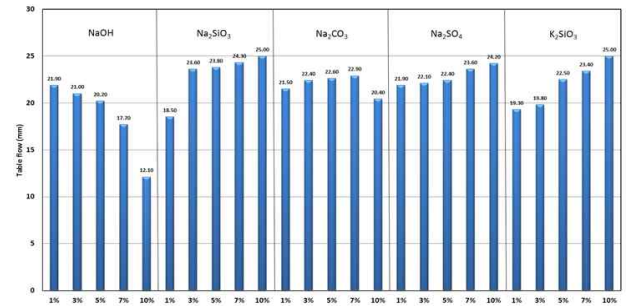


Figure 3. Effect of alkali accelerator content for fluidity of mixtures

측정결과, 수산화나트륨은 치환율이 증가함에 따라 유동성이 감소하였으며, 탄산나트륨의 경우 유동성이 증가후 일정비율 이상일때 감소하였다. 황산나트륨과 규산나트륨, 규산칼륨은 치환율이 증가함에 따라 유동성이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 강알칼리로서 물에 대한 용해도가 높으며, 슬래그 입자표면에 전기적 이중층을 형성함으로써 정전기적으로 서로 반발하여 유동성이 향상된 것으로 판단된다[11].

#### 5.1.2 압축강도

알칼리자극제의 종류 및 첨가량에 따른 재령별 및 양생온도별 압축강도를 나타내는 수산화나트륨을 제외한 나머지 알칼리자극제에서 치환율이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내었다.

한편, 수산화나트륨의 경우 치환율 5% 이후부터는 강도가 현저히 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 일정비율 이상의 수산화나트륨의 강알칼리성분이 시험체 외부로 용출되어 내부에 경화를 위해 축적된 알칼리 성분이 낮아져 강도발현이 저하된 것으로 판단된다. 또한 탄산나트륨, 황산나트륨, 규산나트륨, 규산칼륨 등의 경우 일정비율 이상이 되었을때 공시체 외부에 미세균열이 발생하였지만 강도발현에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

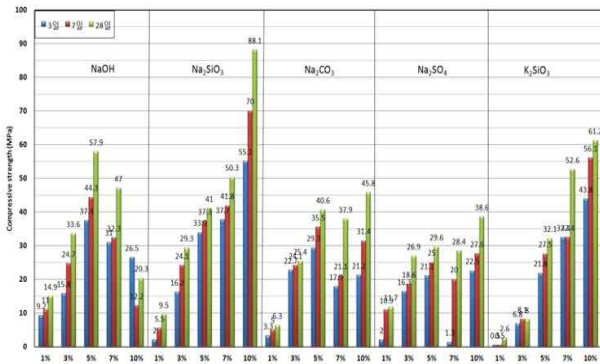


Figure 4. Compressive strength development for alkali accelerator content and type

5.1.3 동결융해 저항성

1) 상대 동탄성계수

공기연행제를 사용하지 않은 보통 콘크리트의 경우, 일반적으로 동결융해 300사이클 종료시점에서 상대 동탄성계수가 80%이하로 떨어지나, 무시멘트 고로슬래그를 기반으로 한 무기복합재는 알칼리자극제 종류에 관계없이 상대 동탄성계수 80%이상으로 동결융해 저항성이 강하며, 모든 시험체에의 공기량은 4.5±1.5%를 만족하였다. 규산나트륨을 첨가한 경우에는 내구성 지수가 90%를 상회하는 우수한 결과를 나타내었다. 이는 중합반응시 가수분해에 의해 미세한 공극이 발생하는데, 이때 일부 공극이 생성되어 동결융해 저항성이 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

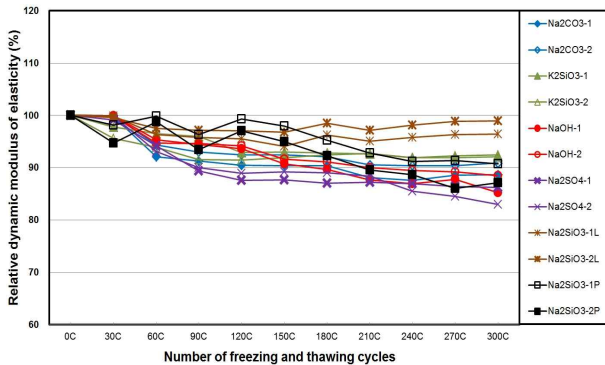


Figure 5. Dynamic modulus of elasticity by type of alkali accelerator

2) 질량변화율

질량변화율의 경우 모든 공시체의 질량 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 높은 동결융해 저항을 갖고 있어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다.

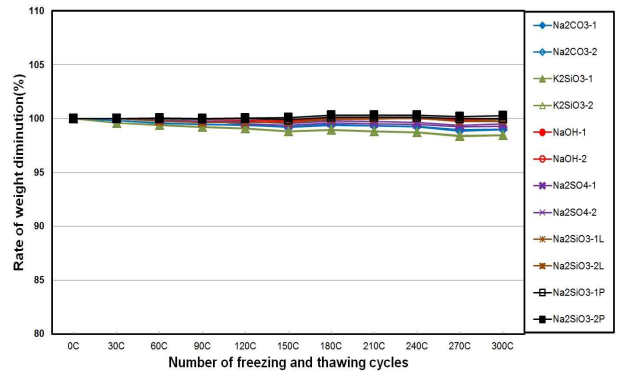


Figure 6. Weight change for type of alkali accelerator

5.1.4 흡수율

규산나트륨을 첨가한 공시체의 경우 흡수율이 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 유리질 구조의 규산나트륨이 고로슬래그의 입자사이의 공극을 채워주지 못하여 생긴 영향으로 판단된다.

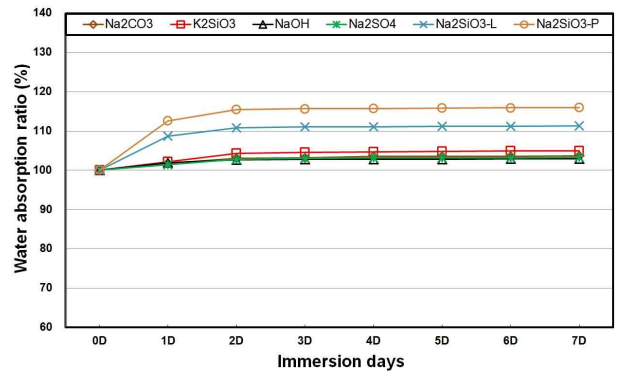


Figure 7. Water absorption for type of alkali accelerator

5.2 NaOH 및 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 혼합사용한 모르타르의 성상분석 결과

힘강도의 경우 W/B 0.4에서는 재령 1일 때 고로슬래그를 30% 치환한 기준시편 보다 비슷하거나 낮은 강도를 나타내었다. 3일 경과 후에는 모든 시험체에서 기준시편보다 높은 강도발현을 나타내었으며, 압축강도의 경우 W/B 0.4에서는 초기강도 변화율이 고로슬래그 100%에서 약 32.1% 우수하게 나타났으며, W/B 0.5 압축강도 시험에서는 약 35.5%의 강도증진 효과가 있었다. 이는 고로슬래그 30%를 치환한 시험체를 제외한 시험체의 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 알칼리자극제 (OH성분)와 반응하여 산화피막을 파괴시켜 C-S-H겔의 수화물의 형성으로 인한 강도증진 효과로 판단되어 진다.

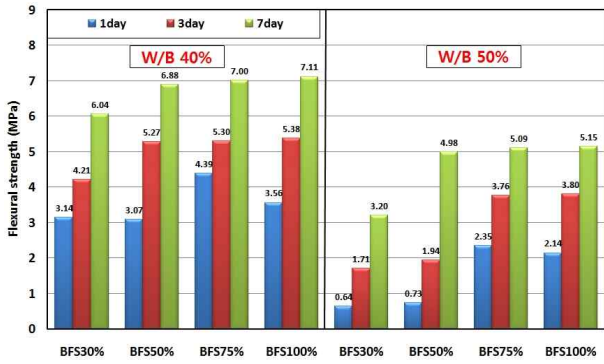


Figure 8. Flexural strength of combined NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> activator mixture

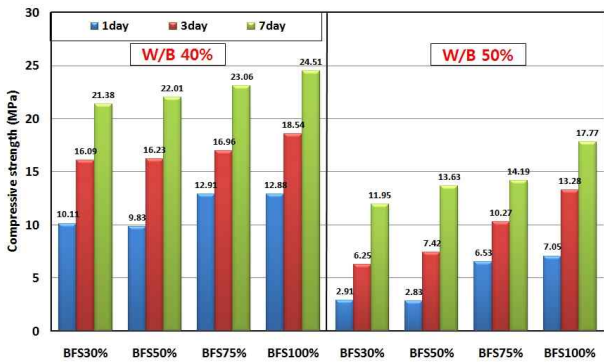


Figure 9. Compressive strength of combined NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> activator mixture

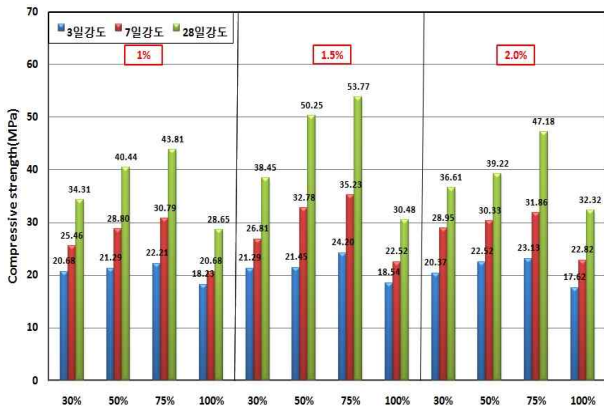


Figure 10. Compressive strength by mixing ratio of early strength agent

### 5.3 조강제 혼입율에 따른 모르타르의 성상분석 결과

압축강도의 시험결과, 휨강도 특성과 동일한 결과를 나타내었으며, 조강제 혼입율이 1.5%일 경우 압축강도 발현이 가장 우수하게 나타났다. 조강제 혼입율을 1.5%에서 고로슬래그 치환율을 75%일 때 고로슬래그를 30% 치환한 시험체가 재령 28일 때 15.32 MPa 높게 나타났다. 고로슬래그

100%를 치환한 시험체는 조강제의 혼입율과 관계없이 강도가 저하되는 것을 나타내었으며, 이로서 조강제 적정 혼입율은 1.5%인 것으로 판단된다.

### 5.4 페알칼리자극제 첨가율별 페이스트 성상분석 결과

#### 5.4.1 응결특성

알칼리자극제 2%를 치환한 시험에서는 시멘트와 고로슬래그의 비율 5:5에서 알칼리자극제 5%일 때 초결이 가장 빠르게 나타났으며, 종결의 경우 3:7에서 4%의 알칼리자극제가 종결이 가장 빠르게 나타났다. 2.5%의 수산화나트륨 용액 시험에서는 5:5에서 3%의 알칼리자극제를 치환한 시험체가 초결은 가장 느리게 나타났지만 종결은 가장 빠르게 나타났다. 이는 OPC와 알칼리자극제가 반응하여 나타나는 C-S-H 겔의 형성이 가장 빠르게 형성되어 나타난 결과로 판단되어 진다.

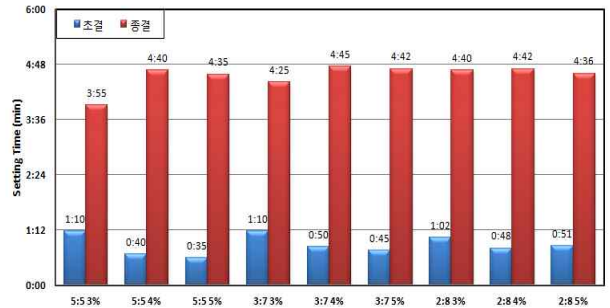


Figure 11. Setting time at 2% NaOH addition

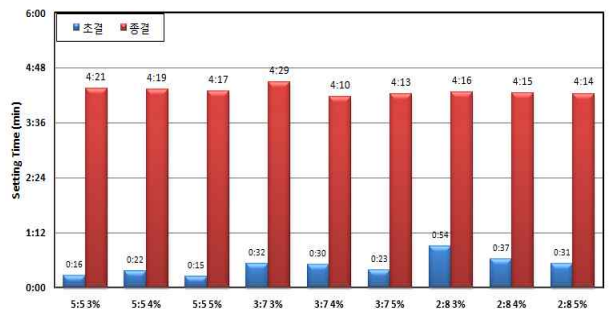


Figure 12. Setting time at 2.5% NaOH addition

#### 5.4.2 압축강도

2%의 NaOH를 치환한 시험에서는 3:7에 3%의 알칼리자극제를 첨가한 시험체가 가장 높은 강도 발현을 나타내었다. 또한 2.5%의 NaOH를 치환한 시험에서는 5:5에 3%를 치

환한 시험체에서 가장 높은 강도발현을 나타내었다. 이는 알칼리자극제 (OH성분)와 반응하여 고로슬래그의 산화피막을 파괴시켜 C-S-H겔의 수화물의 형성으로 인한 강도증진 효과로 판단되어 진다. 시멘트와 고로슬래그량을 고정으로 한 후 페알칼리자극제의 양을 증가시켰을 경우 강도가 낮아지는 경향을 보이는데 이는 페알칼리자극제에 함유되어져 있는 불순물에 의해 나타난 것으로 판단되며 페알칼리와 고로슬래그의 적정 사용은 미소하지만 약간의 강도증진의 도움이 되는 것으로 나타났다.

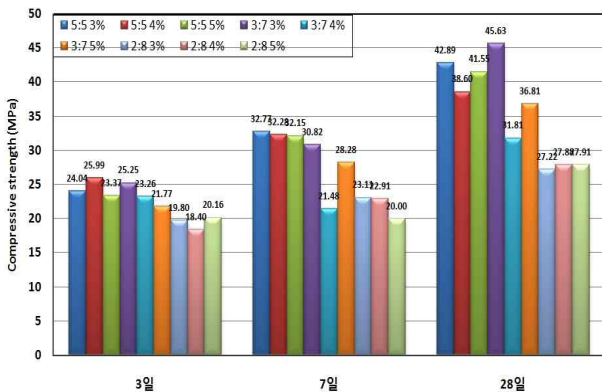


Figure 13. Compressive strength development at 2% NaOH addition

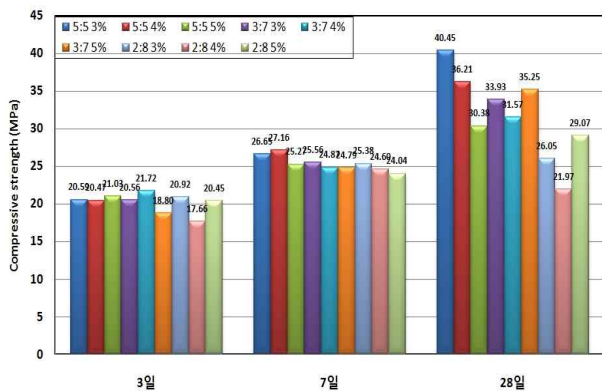


Figure 14. Compressive strength development at 2.5% NaOH addition

## 6. 결 론

본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 활용성 증대와 더불어 다양한 자극제의 적용으로 인한 High Volume Slag의 역학 및 내구특성을 실험·실증적으로 비교 분석함으로써 콘크리트 적용을 위한 High Volume Slag의 범용적인 활용

성과 품질향상을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

- 1) 알칼리자극제 치환율별 특성에서는 수산화나트륨을 제외한 모든 자극제에서 치환율이 증가함에 따라 강도가 증가하였다.
- 2) 알칼리자극제 종류별 특성에서는 압축강도에서는 수산화나트륨, 동탄성계수, 흡수율 등에서는 규산나트륨이 가장 높게 나타났다.
- 3) 조강제 혼입율에 따른 특성에서는 조강제 혼입율 1.5%에서 슬래그 치환율이 75%일 경우 기준시편에 비해 압축강도 15.32MPa의 강도 증진을 확인할 수 있었다.
- 4) 페알칼리자극제 첨가율에 따른 특성의 경우 응결특성은 자극제 혼입율에 관계없는 결과를 나타냈으며, 2%와 2.5%의 경우 초결과 종결의 영향을 크게 미치지 않은 것으로 나타났다. 또한 압축강도 시험결과 각기 다른 결과 값을 나타냈다.

## 요 약

고로슬래그는 콘크리트의 적용시 효율적인 가치향상과 관련하는 많은 장점도 있으나, 고로슬래그의 사용량 증대에 따른 부작용도 나타나고 있다. 따라서 고로슬래그 미분말의 활용성 증대를 위해 High Volume Slag를 자극제 종류별, 치환율별, 조강제 혼입율별, NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 혼합사용시, 페알칼리자극제 혼입율별 특성을 알아보기 위해 실험하였다.

실험결과, 압축강도의 경우 수산화나트륨을 제외한 모든 알칼리자극제에서 치환율이 증가함에 따라 강도가 증진되었다. 알칼리자극제 중 규산나트륨이 동탄성계수와 흡수율 등에서 높게 나타났으며, 조강제의 경우 혼입율 1.5%와 고로슬래그 치환율 75%가 높은 강도증진을 나타내었다. 페알칼리자극제의 경우 모든 실험에서 각기 다른 결과를 나타내었다.

**키워드** : 고로슬래그, 알칼리자극제, 페알칼리

## Acknowledgement

This research was supported by a the Hanbat National University Research Grant in 2011



---

## References

1. Han CG, Lee JH, Han MC, Ryu GS, Park BK, Yoo JW. Effects of stimulant types on initial strength of concrete replaced by high volume of blast furnace slag powder. Proceedings of Korea recycled construction resource institute; 2008 Jun 19; Seoul (Korea). Seoul (Korea): Korea recycled construction resource institute; 2010. p. 61–4.
2. Han CG, Lee JH, Koh KY, Han MH, Lee JS. Temperature dependency affecting the properties at early age of the concrete containing high volume blast furnace slag. Journal of the Korea recycled construction resource institute. 2009 Sep;4(1):74–7.
3. Kim MH, Kim GY, Cho BS, Na CS, Kim YD. An experimental study on the engineering property and durability of concrete using ground granulated blast furnace slag. Architectural Institute Korea collection of dissertations Structural Journal. 2007 May;23(3):61–8.
4. Park SS, Kang HY, Han KS. Development of fly ash/slag cement using alkali-activated reaction(2) – reaction products and microstructure. Journal of Korean Society of Environmental Engineers. 2007 Jul;29(7):810–10.
5. Cheema DS, Roads M, Australia W. Low calcium fly ash geopolymer concrete : a promising sustainable alternative for rigid concrete road furniture. 25th ARRB Conference; 2012 November; Perth, Australia. Australia: ARRB Group Ltd; 2012. 10 p.
6. Chonbuk National University. Development of Cement Production Technology without Sintering Process by Combination of Inorganic Industrial Wastes for Zero CO<sub>2</sub> Emission. Gwacheon-si (Korea): Ministry of Environment; 2007. p. 32–4.
7. Gweok GH, Jee NY, Yoon SC. The Experimental Study on The Practical Use of Secondary Product of Concrete Contained Alkali-Activated Slag. Architectural Institute Korea collection of dissertations Structural Journal. 2007 Jan;23(1):121–8.
8. Won H. A laboratory study on anti-acid mortar using calcium-aluminate cement and blast-furnace slag with fly-ash [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: Seoul National University of Science Technology; 2010. 17 p.
9. Kim SW, Kim JS, Lee SS, Song HY, Kim EY. An Experimental Study on the Durability of High Performance Concrete according to the Replacement ratio of Blast Furnace Slag. Proceeding of the Korea Concrete Institute; 2007 April; daegu (Korea). Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2007. p. 565–8.
10. Oh SH. Study on compressive strength and flowing characteristics of alkali-activated mortar containing blast furnace slag [master's thesis]. [Seoul (Korea)]: University of Sungkyunkwan; 2011. 20 p.
11. An YJ, Mun KJ, Soh SY, Soh YS. The Properties of Alkali Activated Slag Mortars using Sodium Silicate with Activator. Architectural Institute Korea collection of dissertations Structural Journal. 2006 Oct;26(1):26–2.