

# 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 공학적 특성 분석

## Engineering Characteristics Analysis of High Strength Concrete Followed in replacement ratio increase in Blast Furnace Slag

(2009년 9월 25일 원고접수, 2009년 10월 21일 심사완료/ Received September 25, Accepted October 21, 2009)

한천구<sup>1)</sup> 김성환<sup>2)</sup> 손호정<sup>1)\*</sup>  
청주대학교 건축공학과<sup>1)</sup>, (주)리더스큐엠<sup>2)</sup>  
Han, Cheon-Goo<sup>1)</sup>, Kim Seoung Hwan<sup>2)</sup>, Son, Ho-Jung<sup>1)</sup>

### Abstract

This research examined engineering properties of high performance concrete, when substitution rate of BS increases. A summary of the test result is as follows. The fluidity of unset concrete increases as the substitution rate of BS increases. The amount of air is reduced more or less, but it seems that enough amount of air can be secured by using more air-entraining agent. Setting time is dramatically delayed as the substitution rate of BS increases. The compressive strength of hardening concrete was weaker than OPC before 28 days passes, due to latent hydraulic property of BS. However, after 28 days, it shows same or better property, which is exceptional for the practical uses of hyper strength concrete. Changes in drying shrinkage rate is quite much, because when hydration happens, the amount of free water in concrete increased as W/B gets larger. The amount of drying shrinkage increases as BS substitution rate increases, but every composition shows less than  $-500 \times 10^{-6}$ , which is relatively fine.

**키워드 :** 고로슬래그 미분말, 고강도 콘크리트, 공학적 특성, 건조수축

**Keywords :** Blast Furnace Slag, High Strength Concrete, Engineering Characteristics, Drying Shrinkage

## 1. 서 론

최근의 건축 구조물은 대형화, 고층화함에 따라 콘크리트인 경우도 고품질화 및 고성능화와 함께 혼화재료의 활용량도 점차 증대되고 있는 실정이다.

특히, 이러한 혼화재료 중 양적으로 가장 많이 활용되고 있는 것은 고로슬래그 미분말(Blast Furnace Slag)(이하 BFS라 칭함)로서, BFS를 치환한 콘크리트는 수화발열속도의 저감, 콘크리트의 온도상승 억제 등에 기인하여 매스 콘크리트의 균열을 억제 하는데 효과적으로 사용되어 지고 있다. 또한, BFS는 잠재 수경성 반응에 의한 장기강도 증진과 수밀성 향상 및 해수 등의 화학적 침식에 대한 저항성도 증대되어 보통콘크리트는 물론이고 해양콘크리트 등에도 우수한 효과를 발휘하고 있다.<sup>1),2),3)</sup>

단, BFS를 치환한 콘크리트는 상기와 같은 장점에 반하여 초기강도 저하, 응결지연, 중성화 촉진 등 단점도 있다. 따라서 실제 레미콘 생산에 있어서는 시멘트에 최고 30% 미만으로 BFS가 치환되어 사용되고 있고, 그 활용에 있어서도 고강도 콘크리트에의 다량활용은 그다지 많지 않은 것으로 보고되고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 고강도 콘크리트의 제작시 BFS를 다량 치환하여 활용하기 위한 목적으로 BFS를 다량 사용한 고강도 콘크리트의 기초적 특성 및 내구특성을 분석함으로써, 고로슬래그 미분말의 치환율 향상 방안에 기여하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 즉, 실험요인은

\* Corresponding author  
E-mail : sonmr50@hanmail.net

로 물결합재비(이하 W/B)는 25, 30, 35 %의 3수준에 대하여, BFS의 치환율을 0, 30, 40, 50 % 4수준으로 하여 총 12배치를 실험계획 하였다. 이때, BFS를 30 % 치환한 시험체를 플레인 배합으로 하고, 목표 슬럼프플로우 700±100mm, 목표 공기량 3.5±1.5 %를 만족하도록 배합설계 한 다음 여타 실험변수에도 동일하게 적용하였다.

실험사항으로는 굳지않은 콘크리트에서 슬럼프플로우, 공기량, 단위용적질량 및 응결시간을 측정하고, 경화 콘크리트에서는 계획된 재령에서 간이 단열에 의한 온도 상승량, 압축강도 및 건조수축 길이변화율을 측정하는 것으로 실험계획 하였다. 이때 콘크리트의 배합사항은 Table 2와 같다.

Table 1. Design of experiments

Experiment factors		Test Level	
Mixture	W/B(%)	3	25, 30, 35
	Slump flow(mm)	1	700±100
	Air content(%)	1	3.5±1.5
	BFS (%)	4	0, 30, 40, 50
Experiment fact	Fresh concrete	4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Slump flow</li> <li>Air content</li> <li>Unit volume weight</li> <li>Setting time</li> </ul>
	Hardened concrete	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adiabatic temperature rise</li> <li>Compressive strength (3, 7, 28, 56, 91days)</li> <li>Length change (1, 3, 7, 28, 56, 91, 180days)</li> </ul>

Table 2. Mixture proportions of concrete

W / B (%)	BFS contents (%)	S/a (%)	AE제 (%)	SP제 (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	Weight of unit volume (kg/m <sup>3</sup> )			
						C	BFS	S	G
25	0	44.0	0.035	1.30	170	680	0	657	846
	30					476	204	651	838
	40					408	272	649	836
	50					340	340	647	833
30	0	45.0	0.020	1.15	170	567	0	714	883
	30					397	170	709	876
	40					340	227	707	874
	50					283	283	705	872
35	0	45.5	0.015	1.00	170	486	0	752	912
	30					340	146	748	906
	40					291	194	746	904
	50					243	243	744	902

## 2.2 사용재료

본 연구에서 사용한 사용재료로 시멘트 및 BFS는 모두 국내산을 사용하였고, 그 물리·화학적 성질은 Table 3~4와 같다. 골재로 강모래와 부순모래를 1:1로 혼합한 혼합잔골재 및 굵은 골재는 모두 충북 옥산산을 사용하였고, 혼화제로써 고성능 감수제는 국내산 폴리칼본산계를 사용하였으며, AE제는 국내산 고급지방산계를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 5~6과 같고, 골재의 입도곡선은 Fig 1과 같다.

Table 3. Physical Properties of cement

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (g/cm <sup>3</sup> )	Soundness (%)	Setting time (Min)		Compressive strength (MPa)		
			Ini	Fin	3d.	7d.	28d.
3.15	3 144	0.18	230	375	20.9	28.4	38.9

Table 4. Physical and chemical Properties of BFS

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Basic	Chemical composition(%)						
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	
2.90	4 300	1.89	33.1	14.8	42.1	5.8	2.10	0.004	

Table 5. Physical Properties of aggregate

Aggregate		Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness modulus	Absorption (%)	Unit volume weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine agg.	River sand	2.58	2.21	0.46	1 518
	Cru-sand	2.58	3.26	0.46	1 684
Coarse agg.		2.62	6.48	0.58	1 564

Table 6. Physical properties of chemical admixture

Agents	Ingredient	Type	Color	Density (g/cm <sup>3</sup> )
SP	Polycarbonic acid	Fluid	brown	1.05
AE	protein	Fluid	Dark brown	1.01

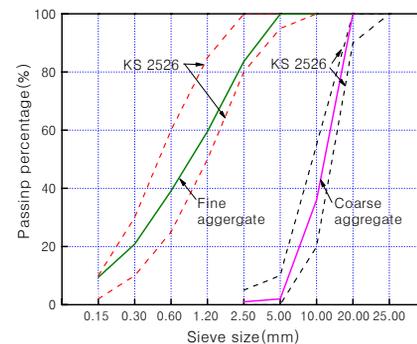


Fig 1 Grading curve aggregate

### 2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 굳지않은 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하였다.

또한, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공기량은 KS F 2421, 단위용적질량은 KS F 2409의 규정에 의거 실시하였다. 또한, 응결시간은 KS F 2436에 의한 프록터관입침 저항시험 방법에 의거 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는  $\varnothing 100 \times 200$  mm 공시체를 제작하여, 계획된 재령에서 KS F 2405의 규정에 의거 실시하였다. 콘크리트의 간이 단일온도상승량 시험은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 직접시험법으로 각 배합조건에 따라 배합한 콘크리트를  $\varnothing 100 \times 200$  mm 플라스틱 몰드에 콘크리트를 타설한 다음 열전대선을 시험체 중앙에 매설한 후 두께 100 mm의 스티로폼 단열재로 6면을 밀봉한 입방시험 장치에 넣어 열전대 온도계에 의해 7일간 온도변화를 측정하였다. 건조수축 길이변화율시험은 계획된 재령에서 KS F 2424 규정에 의거 실시 하였다.

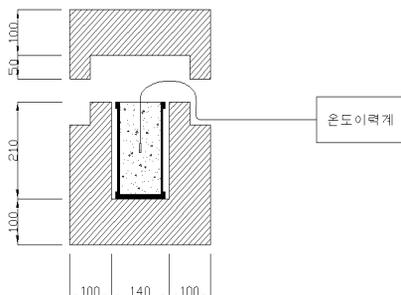


Fig. 2 Semi adiabatic temperature rise test



Fig. 3 Test apparatus set for semi adiabatic temperature rise

## 3 실험 결과 및 분석

### 3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

Fig 4는 W/B 별 BFS 치환율 변화에 따른 슬럼프플로우를 나타낸 것이다.

먼저, W/B 별 BFS 치환율 변화에 따른 슬럼프플로우는

BFS를 혼입하지 않은 OPC의 경우를 제외하고 모두 목표범위를 만족하였는데, 전반적으로 BFS 치환율이 증가할수록 유동성은 증가 하는 경향이였다. 이는 BFS의 표면성상과 분말도, 치환율 및 시멘트와의 밀도 차이에 의한 페이스트 용적 증가 및 점도의 변화가 종합적으로 영향을 미침에 기인한 것으로 판단된다.

Fig 5는 W/B 별 BFS 치환율 변화에 따른 공기량 및 단위용적질량을 나타낸 것이다.

BFS 치환율 변화에 따른 공기량은 모두 목표범위인  $3.5 \pm 1.5$  %에 만족하는 것으로 나타났고, BFS를 사용함에 따라 공기량은 다소 감소였는데, 이는 콘크리트 내부의 공극을 미세한 BFS 입자가 채워주는 것 및 시멘트와 BFS의 밀도 차이에 따라 BFS를 혼입하지 않은 OPC에 비하

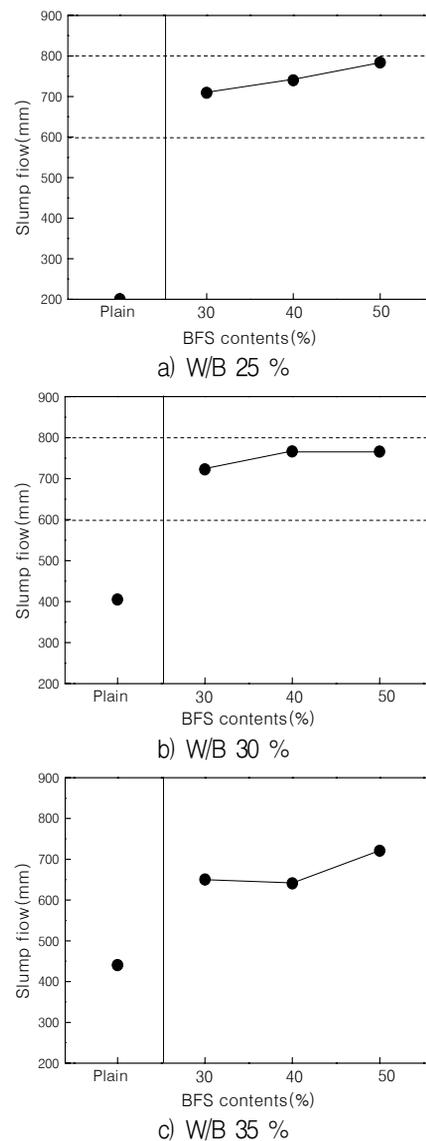


Fig. 4 Slump flow with W/B and BFS content

여 시멘트 페이스트량이 증가하였기 때문에 사료된다. 그러나, 이러한 BFS 치환에 따른 콘크리트의 공기량 감소

는 AE제의 사용으로 적정 공기량을 확보하는 데에는 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다.<sup>1)</sup>

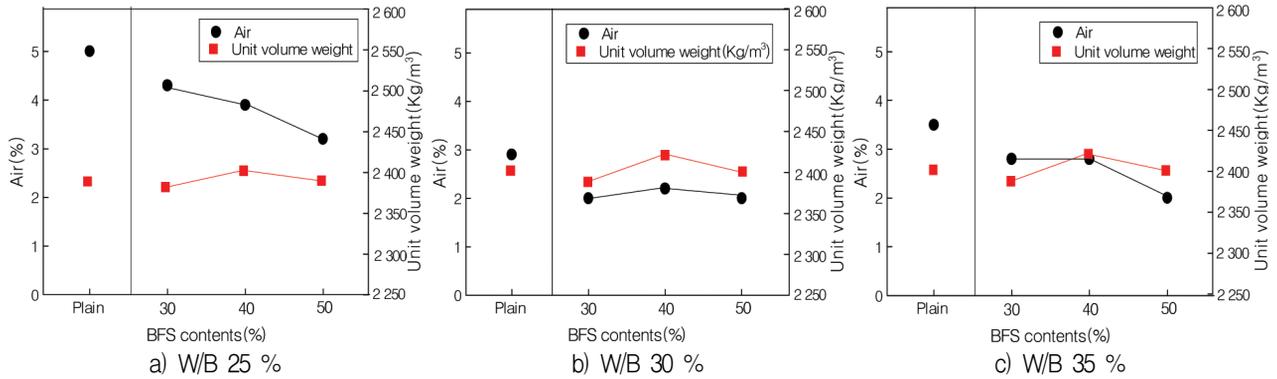
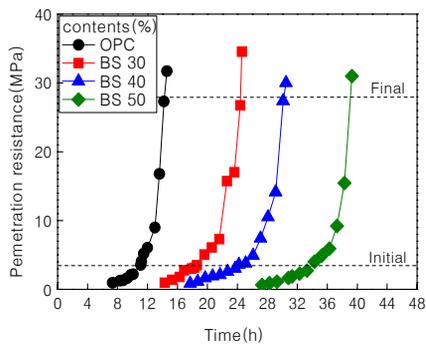
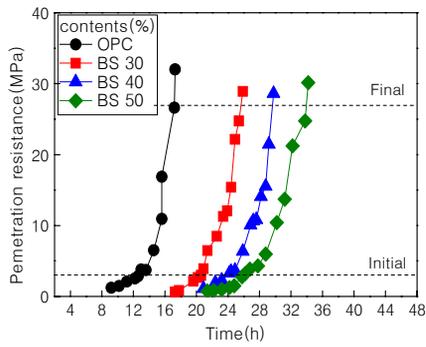


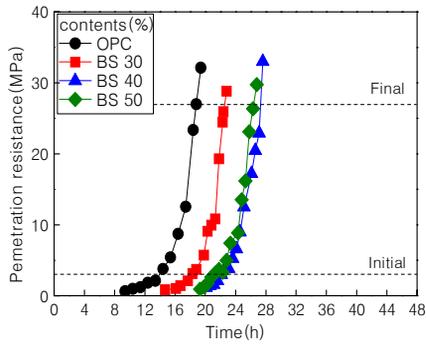
Fig. 5 Air content and Unit volume weight with W/B and BFS content



a) W/B 25 %

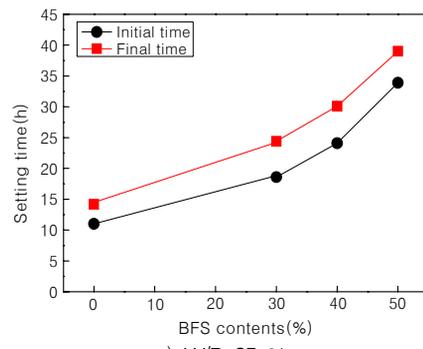


b) W/B 30 %

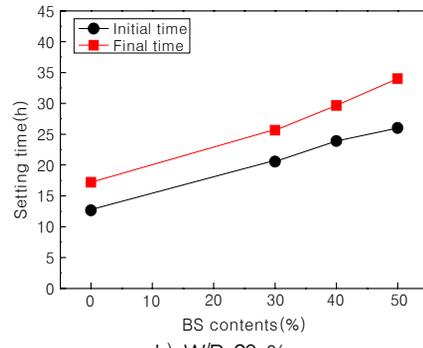


c) W/B 35 %

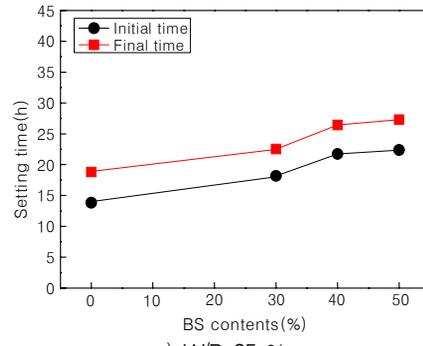
Fig. 6 Penetration resistance with time



a) W/B 25 %



b) W/B 30 %



c) W/B 35 %

Fig. 7 Initial setting time and final setting time with W/B and BFS content

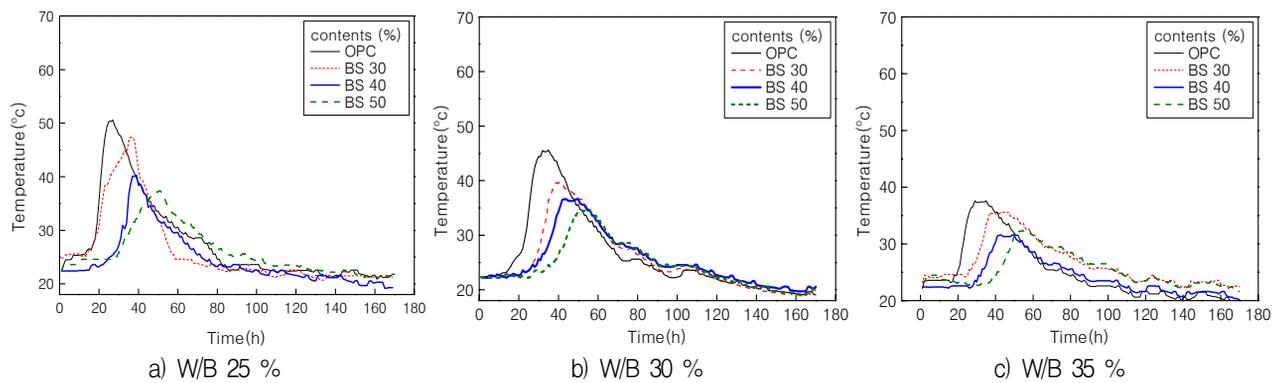


Fig. 8 Adiabatic temperature rise with time

한편, W/B 별 BFS 치환율 변화에 따른 단위용적질량은 BFS 치환율이 증가할수록 감소하는 경향이었지만 공기량 감소에 따라 단위용적질량이 증가하는 추세까지 반영되어 크게 저하하는 경향은 아니 었다.

Fig 6은 W/B 및 BFS 치환율 별 경과시간에 따른 관입 저항치를 나타낸 것이고, Fig 7은 W/B 별 BFS 치환율 변화에 따른 초결 및 종결 시간을 나타낸 것이다.

BFS 치환율 변화에 따른 응결시간은 W/B에 따라서로 상이한 결과를 나타내었지만 전반적으로 모든 배합에서 BFS의 치환율이 증가할수록 지연되는 것으로 나타났다. 즉, W/B 25% OPC의 경우는 초결 시간이 11.0 시간, 종결 시간이 14.2 시간인데 비하여, BFS 치환율 변화에 따라 초결시간이 약 7~22 시간, 종결 시간은 10~25 시간 지연되는 것으로 나타났고, W/B 30%의 경우는 초결시간이 8~14 시간, 종결 시간이 8~17시간, W/B 35%의 경우는 초결시간이 4~9 시간, 종결시간이 5~9 시간으로 BFS 치환율이 증가할수록 응결시간은 비례적으로 크게 지연되는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트 혼합시 물을 주입한직후 BFS 입자 표면에 부동태피막이 형성되어 잠재수경성반응이 시작되기까지 수화반응이 억제되어 응결시간이 지연된 것으로 판단된다.

### 3.2 경화 콘크리트의 특성

Fig 8은 W/B 및 BFS 치환율 별 경과시간에 따른 단위열온도상승량을 나타낸 것이다.

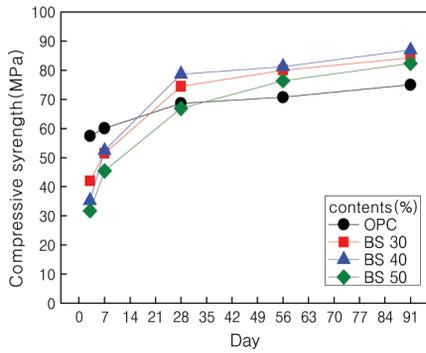
BFS 치환율 별 경과시간에 따른 간이단열에 의한 온도 상승량은 재령 1~2일 사이에서 가장 높은 온도 범위를 나타내었고, W/B가 낮을수록 수화열 온도는 높은 것으로 나타났다. 또한, BFS 치환율 변화에 따라서는 수화초기에 BFS 치환율 증가에 따라 초기수화온도는 낮아졌으나 후반부에서는 BFS의 잠재수경성 반응에 기인하여 콘크리트

의 수화온도가 증가하는 경향도 나타났다.<sup>2)</sup>

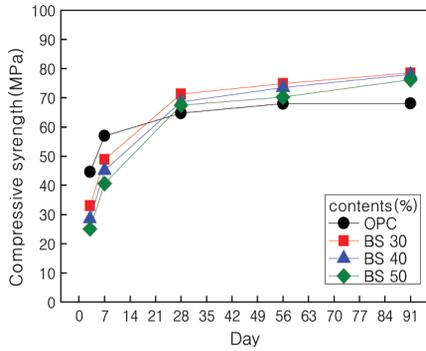
Fig 9는 W/B 및 BFS 치환율 별 재령 경과에 따른 압축강도를 나타낸 것이고, Fig 10은 W/B 및 재령 별 BFS 치환율 변화에 따른 OPC에 대한 상대 압축강도비를 나타낸 것이다.

전반적으로 압축강도는 BFS 치환율이 증가할수록 재령 28일 미만에서는 OPC에 비하여 크게 저하 하였으나, 그 이후 재령에서는 OPC와 동등 수준 혹은 그이상의 수준을 발휘 하였다. 즉, 재령경과에 따른 압축강도는 W/B 25%에서 OPC의 경우 재령 3일 57.4 MPa에서 재령 91일 74.9 MPa로 증가한 것에 비하여, BFS 치환율 변화에 따른 재령 3일 압축강도는 BFS 치환율 30%의 경우 42.0MPa, 40%의 경우 35.2MPa, 치환율 50%의 경우 31.7MPa로 OPC에 비해 26~44% 감소 하였다. 반면, 재령91일 압축강도는 BFS 치환율 30%의 경우 84.4 MPa, 40 %의 경우 86.9 MPa, 50%의 경우 82.3 MPa로 OPC에 비하여 9~13 % 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 BFS의 잠재수경성 반응에 기인한 것으로 판단된다. 또한, W/B 30%, W/B 35%의 경우도 W/B 25%와 유사한 경향으로 BFS 치환율이 증가할수록 재령 3일에서는 OPC에 비해 26~44% 전후로 저하 하였지만 재령 91일에서는 11~15% 전후로 증가하게 나타나 전반적으로 BFS를 치환할 경우에는 후기재령에서 지속적인 강도 발현을 보였다.

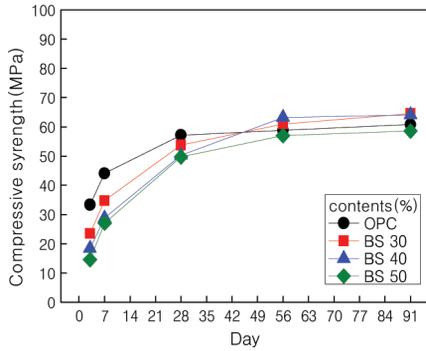
따라서 고강도 콘크리트의 공학적 특성에서 OPC 만을 사용할 경우는 초기강도가 3일의 경우 60% 전후인 30~60 MPa로 지나치게 크게 발휘함에 BFS를 30 %에서 50%까지 증가시켜 주더라도 42% 전후인 23~41 MPa에서 31%인 14~31 MPa 전후로 발휘되어 공기가 급박한 건설 공사를 제외한 경우의 거푸집공정에는 크게 문제되지 않을 것으로 사료된다.



a) W/B 25 %

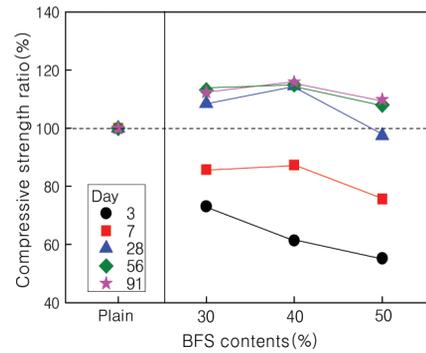


b) W/B 30 %

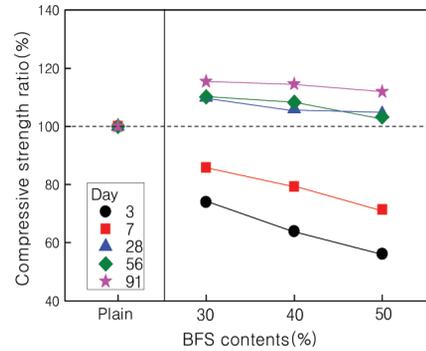


c) W/B 35 %

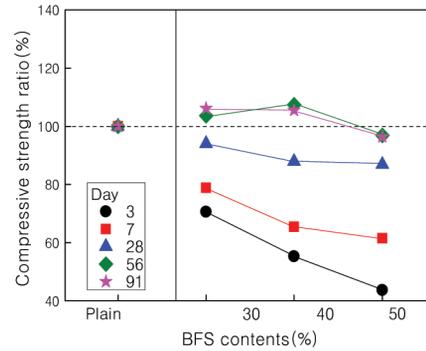
Fig. 9 Compressive strength with age



a) W/B 25 %

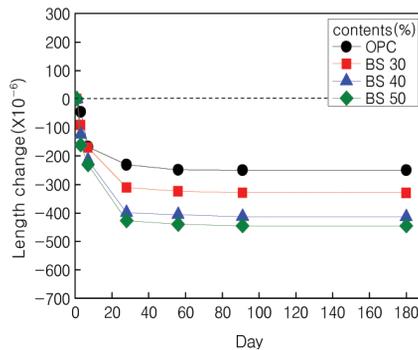


b) W/B 30 %

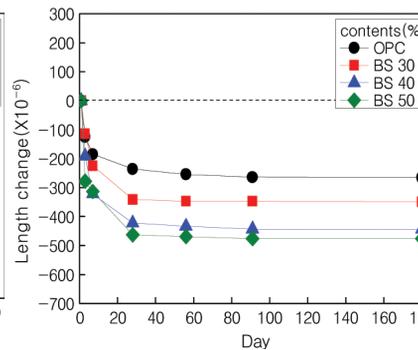


c) W/B 35 %

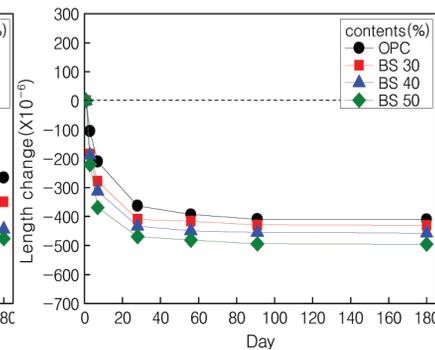
Fig. 10 Compressive strength ratio with W/B and BFS content



a) W/B 25 %



b) W/B 30 %



c) W/B 35 %

Fig. 11 Length change with W/B and BFS content

이에 비하여 관리재령인 28일 및 그 이후의 압축강도에서 특히 W/B 30 % 이하인 고강도의 경우 100 % 이상으로 우수한 품질을 발휘함에 유동성, 압축강도 및 경제성 측면까지도 종합적으로 고려한다면 BFS 치환율을 50 %까지 증가시켜도 큰 문제점은 없을 것으로 사료된다.

Fig 11은 W/B 및 BFS 치환율 별 재령경과에 따른 건조수축 길이변화율을 나타낸 것이다. W/B에 따른 건조수축량은 W/B가 클수록 수화반응시 콘크리트 내부에 존재하는 자유수의 양이 증가함에 기인<sup>4)</sup>하여 다소 크게 나타났고, BFS치환율이 증가할수록 수화활성화에 기인하는 자기수축량 증가 등이 포함되어 전체 수축량으로 관측되는 건조수축량은 증가하는 경향이었는데, 모든 배합에서 재령 180일 건조수축량은  $-500 \times 10^{-6}$  이하로 보통콘크리트인 경우보다는 비교적 양호할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 BFS 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 제반 공학적 특성을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 굳지않은 콘크리트의 유동성은 BFS 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었고, 공기량은 다소 감소하는 경향을 나타내었으나 AE제 사용량 증가로 적정량의 공기량 확보는 가능할 것으로 판단된다. 응결시간은 BFS 치환율이 증가할수록 비례적으로 크게 지연되는 것으로 나타났다.

2) 경화 콘크리트의 축강도는 BFS의 잠재수경성 반응에 기인하여 BFS 치환율이 증가할수록 재령 28일 미만에서는 OPC에 비하여 저하하였으나, 그 이후 재령에서는 동등 이상의 수준을 발휘 하는 것으로 나타나 특히, 초고강도 콘크리트

리트의 활용에 탁월한 효과가 있는 것으로 분석되었다.

3) 건조수축길이변화율은 W/B가 클수록 수화반응시 콘크리트 내부에 존재하는 자유수의 양이 증가함에 기인하여 다소 크게 나타났고, BFS 치환율이 증가할수록 건조수축량은 증가하는 경향이 나타났으나, 모든 배합에서  $-500 \times 10^{-6}$  이하로 비교적 양호하였다.

이상을 종합하여 볼때 BFS 치환율 30%를 한계로 활용하고 있는 고강도 콘크리트<sup>5)</sup> 시공 실무에서는 응결시간지연, 초기강도저하 등 문제점이 허용 혹은 극복될 수 있다면 50% 까지로 그 치환율을 증가시켜도 무방할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- 1) 최항, 이상수, 원철, 김동석, 정한웅, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 경제적인 효과에 관한 연구, 대우건설기술, 통권 제22호, pp. 61 ~ 73, 2000. 04
- 2) 한천구, 한천구의 콘크리트 실무가이드 100, (주)건설미디어, 2006. 02
- 3) 이상수, 송하영, 고로슬래그 미분말을 사용한 고성능 콘크리트의 역학특성 및 내구특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), Vol. 23 No. 11, pp. 119~126, 2007. 10
- 4) 최우진, 지남용, 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 습도변화에 따른 건조수축 특성에 관한 연구, 대한건축학회 우수졸업논문전 수상논문개요집, pp 277~280, 2005. 4
- 5) 신성우, 고강도 콘크리트, 콘크리트학회지, 제 2권 1호 pp 18~23, 1991. 03

#### 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 공학적 특성 분석

본 연구는 BFS치환율 증가에 따른 고강도 콘크리트의 제반 공학적 특성을 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 굳지않은 콘크리트의 유동성은 BFS 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었고, 공기량은 다소 감소하는 경향을 나타내었으나 AE제 사용량 증가로 적정량의 공기량 확보는 가능할 것으로 판단된다. 응결시간은 BFS 치환율이 증가할수록 비례적으로 크게 지연되는 것으로 나타났다. 경화 콘크리트의 압축강도는 BFS의 잠재수경성 반응에 기인하여 BFS 치환율이 증가할수록 재령 28일 미만에서는 OPC에 비하여 저하하였으나, 그 이후 재령에서는 동등 이상의 수준을 발휘 하는 것으로 나타나 특히, 고강도 콘크리트의 활용에 탁월한 효과가 있는 것으로 분석되었다. 건조수축길이변화율은 W/B가 클수록 수화반응시 콘크리트 내부에 존재하는 자유수의 양이 증가함에 기인하여 다소 크게 나타났고, BFS 치환율이 증가할수록 건조수축량은 증가하는 경향이 나타났으나, 모든 배합에서  $-500 \times 10^{-6}$  이하로 비교적 양호하였다.