



## 저분말도 고로 슬래그 시멘트의 특성에 관한 연구

박수현<sup>1\*</sup> · 유동우<sup>1</sup> · 이승현<sup>1</sup> · 노상균<sup>2</sup> · 조재우<sup>2</sup>

<<sup>1</sup>군산대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>한국건설생활환경시험연구원>

### 1. 서 론

최근 구조물의 초고층화 및 대형화가 됨에 따라 콘크리트의 높은 내구성과 성능이 요구되고 있다. 이러한 고기능성 구조물을 건설하기 위해서 콘크리트의 품질뿐만 아니라 내구적, 역학적 성능도 확보되어야 하기 때문에 합리적인 건설재료의 선택이 필요하다. 일반적인 고로 슬래그 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 다르게 수화열의 저감, 장기강도의 증진, 화학저항성의 향상, 내해수성의 향상, 알칼리 골재반응의 억제 대책 등의 특징을 가지고 있다. 그러나 최근 콘크리트의 초기강도를 향상시키기 위해 고로 슬래그의 분말도를 4000 cm<sup>2</sup>/g 이상으로 증가시킨 결과 고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 단열온도 상승량은 보통 포틀랜드 시멘트보다 커지고 자기수축 또한 증가하여 콘크리트 구조물에 균열을 발생시키는 등의 현상이 나타나 고로슬래그 시멘트의 특징인 저발열, 내구성 향상이라는 특징을 잃어가고 있다. 현재 해외에서는 고로 슬래그 분말도를 3,000cm<sup>2</sup>/g 정도로 낮은 저분말도 고로 슬래그 시멘트를 매스콘크리트 구조물에 시공하고 있으며, 이를 바탕으로 내구성능을 개선시킨 콘크리트를 개발하고 있다. 따라서 우리나라에서도 저분말도 고로슬래그 시멘트의 개발이 필요하다고 생각하여 본 논문에서는 저분말도 고로 슬래그 시멘트의 특성에 관한 연구를 진행하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 사용원료

본 연구에서 사용된 고로 슬래그는 광양제철소에서 발생하는 것을 이용하여 불밀로 분쇄하여 분말도 2500,

3000, 4200 cm<sup>2</sup>/g으로 맞추어 제작하였는데, 이 때 첨가한 석고는 태국산 석고를 사용하였으며 시멘트는 S사의 비중 3.15 g/cm<sup>3</sup>, 분말도 3540 cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> 2.53%의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 고로 슬래그와 석고에 대한 화학 조성을 아래의 Table 1에 나타내었다.

#### 2.2 실험조합

제작한 2500, 3000, 4200 cm<sup>2</sup>/g의 고로 슬래그를 현재 시판되고 있는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)와 각각 40%, 50%, 60% 혼합하였으며 SO<sub>3</sub> 함량은 1.2% 및 3.8%로 하였다. Table 2와 같이 시료는 총 18개로 조합하여 실험을 진행하였다.

#### 2.3 시멘트 시험

저분말도 고로슬래그 혼합시멘트를 이용한 안정도, 응결 시간, 플로우값, 압축강도, 길이변화율 그리고 콘크리트 단열온도 측정, 콘크리트의 건조수축 및 자기수축 등을 KS 시험법에 의해 실험하였다. 그리고 콘크리트에 대해서는 단열온도 측정, 건조수축, 자기수축 등을 측정하였다.

Table 2 실험 조합표

고로슬래그 분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	SO (mass%)	고로 슬래그 혼합량 (mass%)		
		40	50	60
4200	1.2	40	50	60
	3.8	40	50	60
3000	1.2	40	50	60
	3.8	40	50	60
2500	1.2	40	50	60
	3.8	40	50	60

Table 1 원재료의 화학조성

원료	화학 조성(mass%)					
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>
고로슬래그	49.2	29.4	13.4	0.6	3.6	0.3
석고	39.0	1.4	1.1	0.3	0.7	53.1

Table 3 콘크리트 배합표

Sample	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )								
			Water	Total Binder	OPC	BFS		Fly Ash	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	AD
						4200	3000				
OPC 100%	50	46	170	340	340	-	-	-	807	998	0.5
BFS 4200 cm <sup>2</sup> /g (SO <sub>3</sub> 1.2%) 50%	50	45	170	340	170	170	-	-	784	1010	0.7
BFS 3000 cm <sup>2</sup> /g (SO <sub>3</sub> 3.8%) 50%	47	46	460	340	170	-	170	-	813	1006	0.5
BFS 3000 cm <sup>2</sup> /g (SO <sub>3</sub> 3.8%) 60%	50	46	170	340	136	-	204	-	800	990	0.5
BFS 4200 cm <sup>2</sup> /g (SO <sub>3</sub> 1.2%) 50% +Fly Ash 20%	50	47	170	340	136	-	136	68	789	977	0.4

\* BFS : Blast Furnace Slag  
 \* W/B : Water -Binder (cement + GGBFS + Fly ash) ratio  
 \* AD : PC Admixture

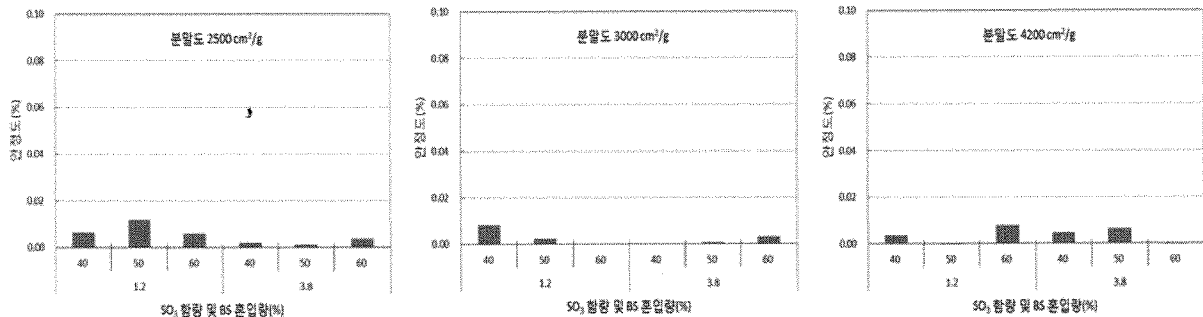


Fig. 1 안정도 실험 결과

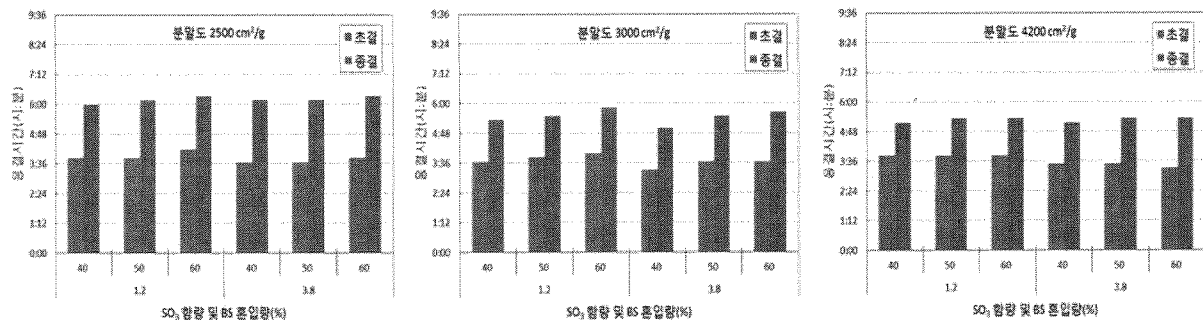


Fig. 2 응결시간 실험 결과

### 2.3 콘크리트 시험

콘크리트에 대해서는 단일온도 측정, 건조수축, 자기수축 등을 측정하였다. 콘크리트 배합은 설계강도 24 MPa에 대하여 목표 슬럼프 150±25 mm, 공기량 4.5±1.0%로 설정하였다. 콘크리트 배합은 Table 3과 같으며 총 5개의 콘크리트 배합으로 기본배합인 보통 포틀랜드 시멘트(OPC) 100%, 고로 슬래그(BFS) 분말도 4200 cm<sup>2</sup>/g(SO<sub>3</sub> 1.2%) 50% 치환배합, 고로 슬래그(BFS) 분말도 3000 cm<sup>2</sup>/g (SO<sub>3</sub> 3.8%) 50% 치환배합, 고로 슬래그(BFS) 분말도 3000 cm<sup>2</sup>/g (SO<sub>3</sub> 3.8%) 60%(SO<sub>3</sub> 3.8%) 치환배합, 고로슬래그(BFS) 분말도 4200 cm<sup>2</sup>/g(SO<sub>3</sub> 1.2%) 40%, 플라이 애시 20% 치환배합으로 실험을 진행하였다. 잔골재는 밀도 2.58 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 1.01%, 조립율 2.90의 것을 사용하였으며 굵은 골재는 최대 크기

가 25 mm, 밀도 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.82%이었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 안정도

안정도란 시멘트 페이스트의 체적 팽창을 측정하여 유리 산화칼슘(free-CaO) 및 유리 산화마그네슘(free-MgO)의 수산화에 의한 팽창 가능성을 평가하는 것이다. 실험 결과 아래의 Fig. 1과 같이 전체적으로 0~0.01%의 범위로 나타나 KS L 5210 기준인 0.2% 이하를 모두 만족하였다. 또한 고로 슬래그의 분말도 및 혼합량에 따라서 안정도는 특별한 경향을 나타내지 않았으며 SO<sub>3</sub>함량에 따라서도 특별한 경향을 나타내지 않았다.

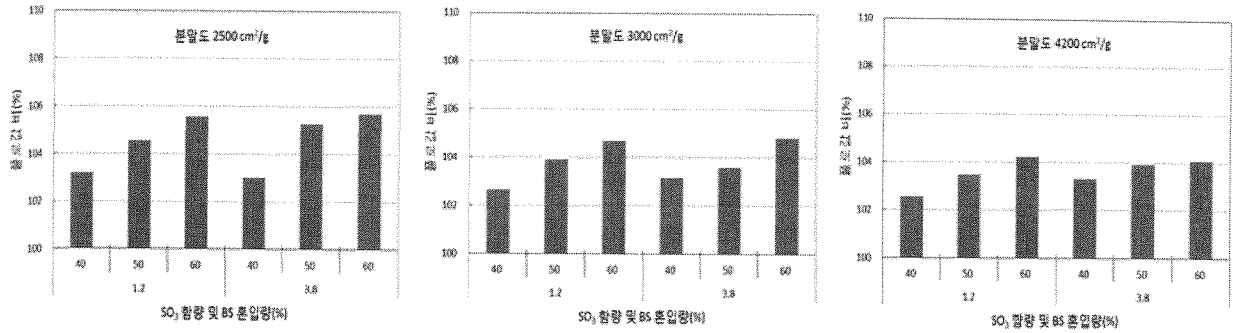


Fig. 3 플로우값 비

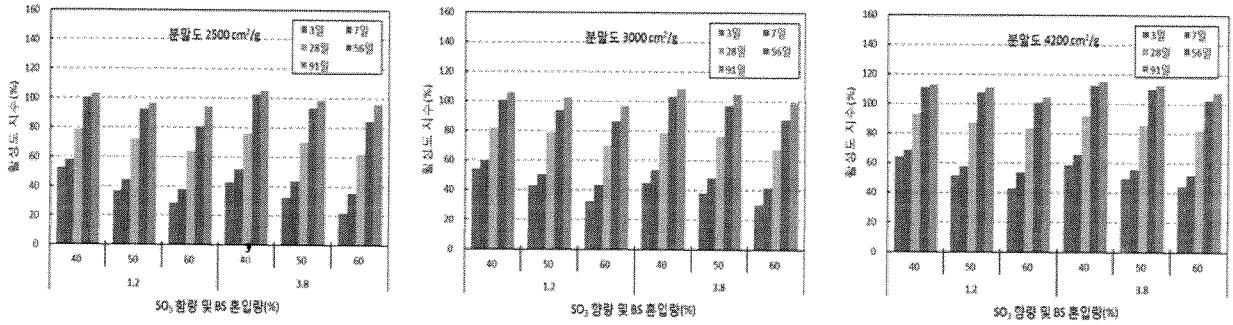


Fig 4 각 배합에 따른 압축강도 비

### 3.2 응결시간

응결시간이란 표준 주도를 가진 시멘트 페이스트에 들어가는 바늘의 침입도를 측정하여 시멘트 페이스트가 유동성을 잃고 경화가 시작되는 시간을 평가하는 것으로 Fig. 2에 나타냈다. 본 실험에서는 전체적으로 초결은 3~4 시간, 종결은 5~6시간 범위로 나타나 KS L 5210 기준인 초결 1시간 이상, 종결 10시간 이내를 모두 만족하였다. 또한 고로 슬래그의 분말도가 커질수록 응결시간은 촉진되는 경향을 나타냈다. 그러나 고로 슬래그의 혼합량이 많아질수록 응결시간은 지연되는 경향을 나타내었다. 반면에 SO<sub>3</sub>함량에 따라서는 큰 차이 없이 비슷한 값을 보였다.

### 3.3 플로우값 비

플로우값 비는 고로 슬래그를 혼합하지 않은 기준 모르타르에 대한 고로 슬래그를 혼합한 시험 모르타르의 플로우값 비를 백분율로 표시한 것으로 유동성을 평가하였으며 전체적으로 103~106%의 범위로 나타났으며 KS F 2563의 기준인 95% 이상을 모두 만족하였다(Fig. 3). 고로 슬래그의 분말도가 커질수록 플로우값 비는 감소하는 경향을 나타냈으며 고로 슬래그의 혼합량이 많아질수록 플로우값 비는 증가하는 경향을 나타냈고, SO<sub>3</sub>함량에 따라서는 큰 차이 없이 비슷한 값을 나타내었다.

### 3.4 압축강도

압축강도비는 고로 슬래그를 혼합하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트 모르타르에 대한 고로 슬래그를 혼합한 시

험 모르타르의 압축강도비를 백분율로 표시한 것으로 잠재수경성 반응에 의한 강도 발현성을 평가하였다. 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다. 재령 28일의 경우 압축강도는 40.0~59.9 MPa의 강도를 가지고 있으며 압축강도비는 62~93% 범위를 나타냈으며, 91일의 경우 압축강도가 60.7~74.2 MPa의 강도를 가지며 압축강도비는 95~116%의 범위를 나타내고 강도발현이 양호하였다. 또한 고로 슬래그 분말도가 커질수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타내며 고로 슬래그의 혼합량이 많아질수록 압축강도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 SO<sub>3</sub>함량에 따라서 초기 재령은 SO<sub>3</sub>1.2%가 SO<sub>3</sub>3.8%보다 더 큰 값을 나타냈으나, 재령 56일 이후에는 SO<sub>3</sub> 3.8%가 SO<sub>3</sub> 1.2%보다 약 2~3% 더 큰 값을 나타내었다.

### 3.5 길이변화율

길이변화율은 모르타르의 건조수축에 의한 체적변화를 평가하는 것으로 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 길이변화율 28일의 경우 0.068~0.115% 범위를 나타내고 91일의 경우 0.101~0.147% 범위를 나타내었고 고로 슬래그의 분말도가 커질수록 길이변화율은 증가하는 경향을 나타내고 있으며 고로슬래그의 혼합량이 많아질수록 길이변화율은 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 7에서 SO<sub>3</sub> 함량에 따라 SO<sub>3</sub> 3.8%가 재령 3일은 0.006%, 재령 91일은 0.018% 더 작은 값을 나타내어 건조수축에 대한 보상효과가 우수하였다. 이를 통해 재령이 증가할수록 SO<sub>3</sub> 3.8%의 건조수축에 의한 길이변화율은 더 효과적일 것으로 판단된다.

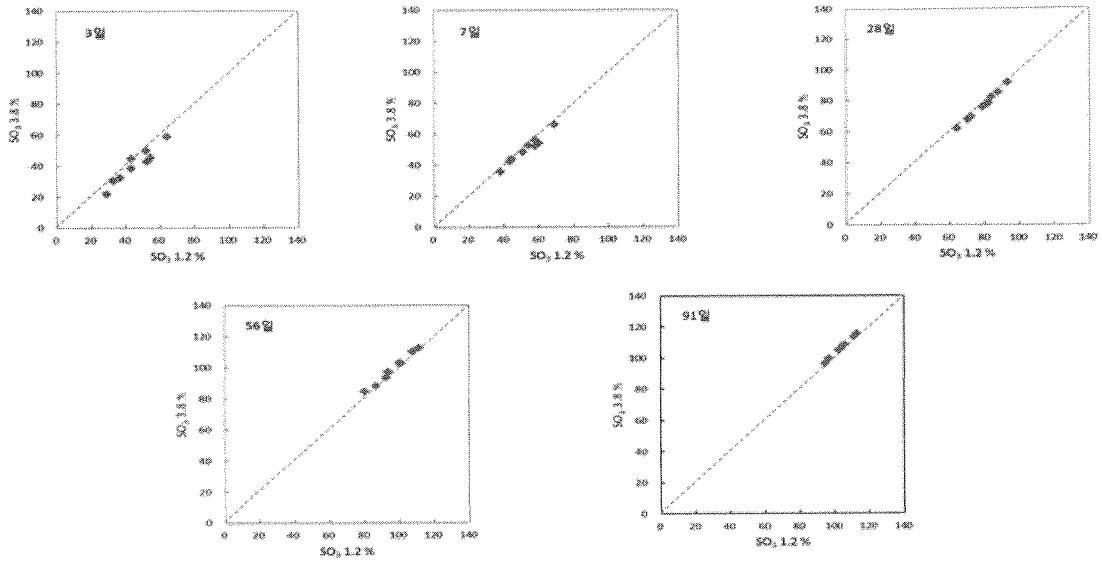


Fig. 5 각 재령 별 SO<sub>3</sub> 함량에 따른 압축강도비

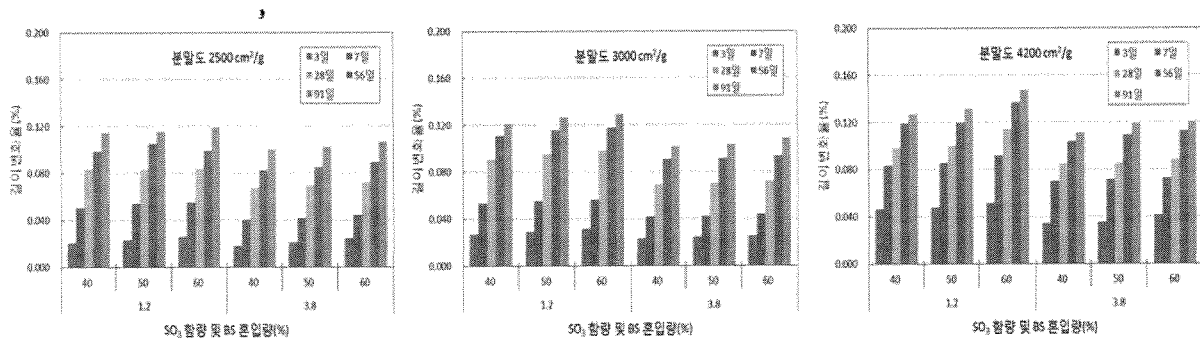


Fig. 6 각 배합에 따른 길이변화율

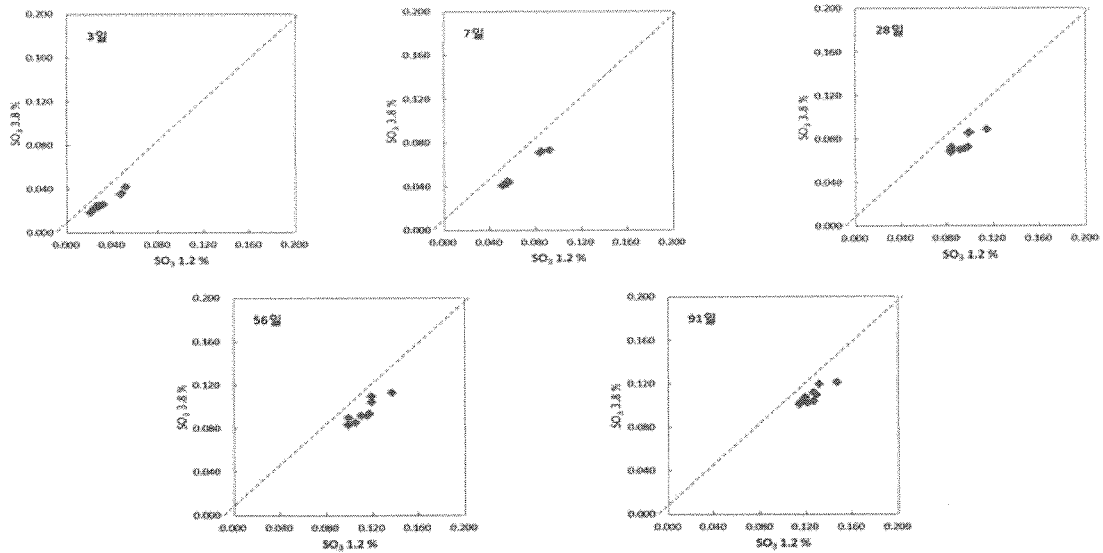
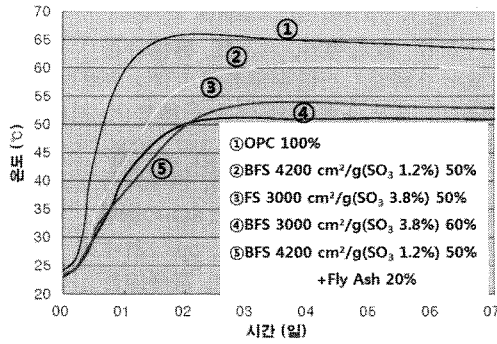


Fig. 7 각 재령 별 SO<sub>3</sub> 함량에 따른 길이변화율

### 3.6 콘크리트 단일온도 측정

콘크리트 단일온도 측정 결과를 Fig. 8에 나타냈다. 단일온도 측정 결과 저분말도 고로 슬래그 3000 cm<sup>2</sup>/g

배합은 OPC와 비교하여 ΔT가 11.2°C 낮아졌으며 고로 슬래그 미분말 4200 cm<sup>2</sup>/g 50% 배합과 비교하여 ΔT가 6.2°C가 낮아져 고로 슬래그의 분말도의 저하가 단일온



배합	시료	$\Delta T(^{\circ}C)$	최고온도 도달시간(Hr)
①	OPC 100%	42.1	49
②	BFS 4200 cm <sup>2</sup> /g(SO <sub>3</sub> 1.2%) 50%	37.1	63
③	BFS 3000 cm <sup>2</sup> /g(SO <sub>3</sub> 3.8%) 50%	30.9	58
④	BFS 3000 cm <sup>2</sup> /g(SO <sub>3</sub> 3.8%) 60%	28.3	65
⑤	BFS 4200 cm <sup>2</sup> /g(SO <sub>3</sub> 1.2%) 50% + Fly Ash 20%	30.9	82

Fig. 8 단열온도 측정 결과

도 상승 온도 억제효과가 큰 것으로 나타났다.

참고적으로 현재 널리 사용되고 있는 3성분계 저열 혼합시멘트(OPC 40%+고로 슬래그 4200 cm<sup>2</sup>/g 40%+Fly ash 20%) 배합과 비교하여 고로 슬래그 3000 cm<sup>2</sup>/g 60% 배합은  $\Delta T$ 는 2.6°C 정도 낮아져 단열온도 상승 억제 효과는 매우 우수한 것으로 나타났다. 그러나 최고온도 도달 시간은 17시간은 정도 빨라져 온도 상승률은 크게 나타났다. 이것은 고로 슬래그의 온도 의존성이 플라이 애시보다 커서 나타나는 효과로 판단된다.

### 3.7 콘크리트 건조수축 및 자기수축

건조수축 실험 결과 보통 포틀랜드 시멘트 배합과 비교하여 고로 슬래그 혼합 콘크리트에서 건조수축량이 저감되는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있으며, 분말도 3000 cm<sup>2</sup>/g 혼합 콘크리트에서 수축량이 최소로 나타났다. 자기수축 실험도 Fig. 10을 보면 건조수축 실험 결과와 동일하게 분말도 3000 cm<sup>2</sup>/g 고로슬래그 혼합 콘크리트에서 수축저감 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 고로 슬래그 미분말의 분말도를 저감시키면 수축저감에 대한 효과가 큰 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

저분말도 고로 슬래그 시멘트에 대해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 저분말도 고로 슬래그 미분말은 플로우값 비에서 KS F 2563의 3종 기준인 95% 이상을 모두 만족하였으며 압축강도는 28일의 경우 40~59.9 MPa, 91의 경우 60.7~74.2 MPa 범위를 나타 내고 압축 강도비는 재령 28일 60%, 재령 91일 90%이상을 나타내어 장기강도 발현율이 증가 하였다. 고로 슬래그의 분말도가 커질수록 압축강도는 증가하였으나 고로 슬래그의 혼합량이 많아질수록 압축강도는 감소하는 경향을 보였다.

2) 길이변화율에서 저분말도 고로 슬래그 미분말은 분말도 4200 cm<sup>2</sup>/g보다 작은 값을 나타냈으며, 안정도, 응결시간에서 KS L 5210의 고로슬래그 시멘트 2종의 기준을 모두 만족하였다.

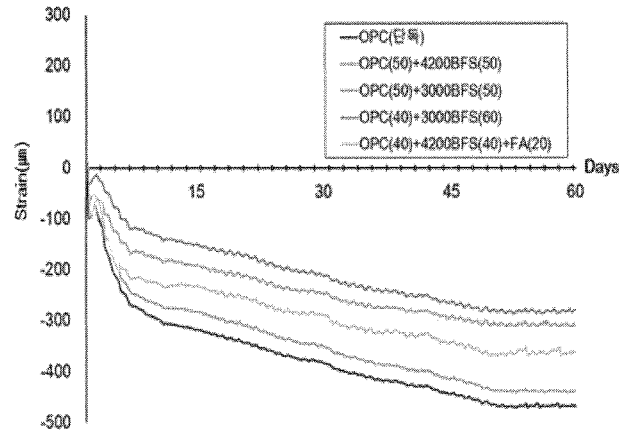


Fig. 9 건조수축 길이변화 실험 결과

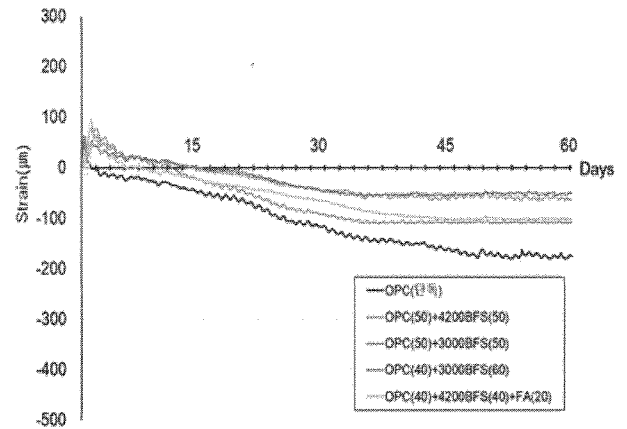


Fig. 10 자기수축 길이변화 실험 결과

3) 콘크리트 단열온도 측정 실험에서는 OPC와 비교하여 저분말도 고로 슬래그 미분말 3000 cm<sup>2</sup>/g의 50% 배합은  $\Delta T$ 가 11.2°C 낮아졌으며 현재 시판중인 OPC 40%+고로 슬래그 미분말 은 분말도 4200 cm<sup>2</sup>/g 40%+Fly ash 20% 배합과 비교하여 고로 슬래그 미분말 3000 cm<sup>2</sup>/g의 60% 배합은 거의 동등한 수준임을 보였다.

4) 콘크리트 건조수축 실험 결과 보통 포틀랜드 시멘트 배합과 비교하여 고로 슬래그 혼합 콘크리트에서 건조수축량이 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 분말도

3000 cm<sup>2</sup>/g 혼합 콘크리트 에서 수축량이 최소로 나타났  
다. 또한 자기수축 실험도 건조수축 실험 결과와 동일하  
게 분말도 3000 cm<sup>2</sup>/g 고로 슬래그 혼합 콘크리트에서 수  
축저감 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

#### <참고문헌>

1. 한국세라믹학회 시멘트부회, 사회환경머티리얼(번역본), 한림원 2009.
2. N. Nito et al., Property of Concrete Using Low Heat and Resist Shrinkage Portland Blast Furnace Slag Cement, Cement and Concrete, No. 722, pp. 10-16, 2007.
3. 宮澤伸吾 et al., 低發熱·收縮抑制型高爐セメントを用いたコンクリートの特性, 콘크리트工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 487-492, 2005.
4. 二戸信和, 廣島明男, 大友健, 宮澤伸吾 : スラグ粒度と化学成分を調整した低發熱高炉セメントコンクリートおよび膨張コンクリートの發熱·強度·体積変化, 第60回セメント技術大会講演要旨集, pp. 236-237, 2006.
5. 二戸信和, 大沢友宏, 鯉淵清, 宮澤伸吾 : 高炉セメントの發熱と收縮に及ぼす粉末度とSO<sub>3</sub>の影響, 콘크리트工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 121-126, 2008.
6. 二戸信和, 廣島明男, 大友健, 宮澤伸吾 : スラグ粒度と化学成分の異なる高炉セメントB種を用いたコンクリートの特性, セメント·コンクリート論文集, No. 59, pp. 231-238, 2005.
7. M. Fujiwara et al., Property of Low-heat Type Portland Blast-Furnace Slag Cement Class-B and Its Application to Construction Work, Concrete Journal, Vol. 17, No. 3, pp. 10-15, 2009.