

# 고성능 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Development of High-Performance Concrete

제1보 : 고미분말 슬래그 혼합시멘트의 물성

Part 1. Properties of Cement Mortar Mixed with Finely Ground Blast-Furnace Slag

구 자 술\*, 이 영 진\*, 김 남 호\*, 정 재 동\*\*  
Koo, Ja Sul Lee, Young Jin Kim, Nam Ho Jaung, Jae Dong

## Abstract

This paper describes some results of various tests which were carried out with varying the fineness of slag from 6000 to 10000  $\text{cm}^2/\text{g}$  and the slag content in cement from 30 to 50wt% for the purpose of utilizing finely ground blast-furnace slag as an ingredient for high-performance concrete. Test for heat of hydration, microstructural and hydration characteristics in paste, and fluidity and compressive strength in mortar were carried out. From these test results, it was found that, by properly determining the content and fineness of the slag, it is possible to manufacture high-performance concrete that has low heat of hydration, high fluidity, accelerated hydration, high early strength development, fine pore size and a highly densified microstructure.

### 1. 서 론

최근 콘크리트 구조물의 고층화, 대형화 등 국내의 건설환경이 급변함에 따라 콘크리트에 있어서도 고품질의 요구, 공기단축, 3D 기피로 인한 기술인력의 부족 등의 문제를 해소하기 위해 콘크리트 공사의 성력화, 합리화가 요구됨과 함께 작업자의 숙련도나 공법 등에 좌우되지 않는 고품질, 고내구성, 콘크리트의 개발이 강하게 요구되고 있다.

본 연구에서는 고로수쇄슬래그(이하 슬래그로 약기)를 미분말화하여 보통포틀랜드시멘트에 첨가함으로써 유동성의 증진, 충전성의 향상 및 그

로인한 강도와 내구성의 증진효과를 고성능 콘크리트에 응용하기 위한 기초적 연구로서, 슬래그 분말도, 함량, 무수석고 함량 등의 변화가 유동성, 강도발현, 수화발열 등 모르타르의 제반 특성에 미치는 영향을 검토하였다.

### 2. 실험

#### 2.1. 사용재료

실험에 사용한 시멘트는 국내에서 시판되고 있는 보통포틀랜드시멘트이고 슬래그 및 석고의 화학성분은 표 1과 같으며, 사용시멘트의 물리적 성질은 표 2와 같다. 슬래그는 포항제철산으로 비표면적을 6000, 8000, 10000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 으로 제트밀(고속기류 충격법)을 이용하여 분쇄하였으며, 분쇄된 시료의 입도분포는 그림 1과 같이 불밀 분쇄에 의한 것에 비해 집중입도를 가지고 있다는 장점이

\*\* 正會員, 東洋中央研究所, 2次製品室長, 工博

\* 團體會員, 同, 研究員

표 1. 사용재료의 화학성분

(단위: wt%)

재료 \ 항목	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig. loss
시멘트	21.25	63.18	3.07	6.17	2.47	2.08	0.04	0.68	1.61
슬래그	36.13	41.14	0.94	14.11	6.91	0.09	0.29	0.49	-
석 고	1.25	31.95	0.09	0.11	-	46.04	-	-	결정수: 20.01

표 2. 사용 시멘트의 물리적 성질

주도(%)	응결시간(min.)		압축강도(Kgf/cm <sup>2</sup> )			비표면적 (블레인 : cm <sup>2</sup> /g)
	초결	종결	3일	7일	28일	
24	172	291	236	309	389	3250

있다. 이때의 평균입경은 각각 6.7, 4.5, 3.6 $\mu$ m 이었다. 또한 석고는 태국산 천연석고를 800 $^{\circ}$ C 에서 1시간 동안 열처리 하여 불용성 무수석고로 제조하였으며 석고의 비표면적은 8000cm<sup>2</sup>/g 으로 분쇄하여 사용하였다.

### 2.2. 실험인자 및 수준

본실험에 사용한 실험인자 및 수준은 표 3과 같다.

### 2.3. 실험방법

#### 2.3.1. 유동성

몰탈에 대하여 KS L 5105 “수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 준하여 플로우 시험을 하였다. 시멘트:세골재 비는 1:2.45로 혼합했으며, 물 시멘트비는 48.5%로 했다. 혼화제의 첨가영향을 실험하기 위해 나프탈렌계 고성능 감수제(분산제)를 첨가하여 분산효과를 검토하여 보았다.

#### 2.3.2. 압축강도

KS L 5105의 “수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법”에 따라 시험체를 제작하여 소정일 양생후 압축강도를 측정하였다.

#### 2.3.3. 수화열

슬래그 미분말 첨가에 따른 수화열 저감 효과

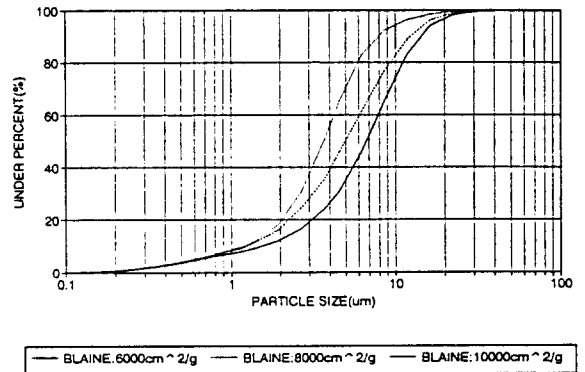


그림 1. 미분쇄 슬래그의 입도분포

를 검토하기 위하여 수화열을 측정하였으며, 물 시멘트비 50%, 23 $^{\circ}$ C에서 페이스트를 혼련후 미소 수화열량계에 의해 48시간 까지의 수화발열속도 및 적산발열량을 측정하였다.

#### 2.3.4. 수화특성

물 시멘트비 50%, 23 $^{\circ}$ C에서 페이스트를 혼련후 소정일 양생후 아세톤으로 수화정지하여, 진공오븐에서 55 $^{\circ}$ C, 24시간 건조시켜 각종 기기분석을 하였다.

표 3. 실험수준 및 인자

슬래그 분말도 (Blaine: cm <sup>2</sup> /g)	슬래그 함량 (wt%)	무수석고 함량 (SO <sub>3</sub> , wt%)
6000	30	0
		1
		2
	40	0
		1
		2
	50	0
		1
		2
8000	30	0
		1
		2
	40	0
		1
		2
	50	0
		1
		2
10000	30	0
		1
		2
	40	0
		1
		2
	50	0
		1
		2

보통포틀랜드시멘트

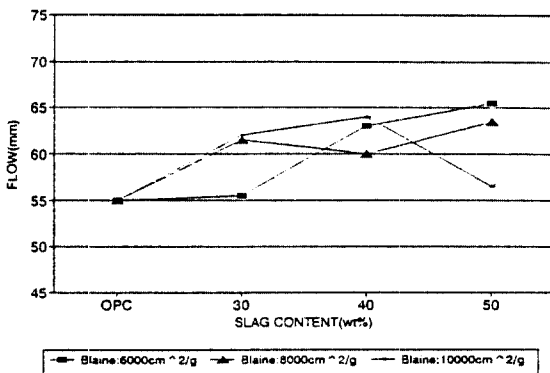


그림 2. 슬래그 첨가량에 따른 플로우 변화

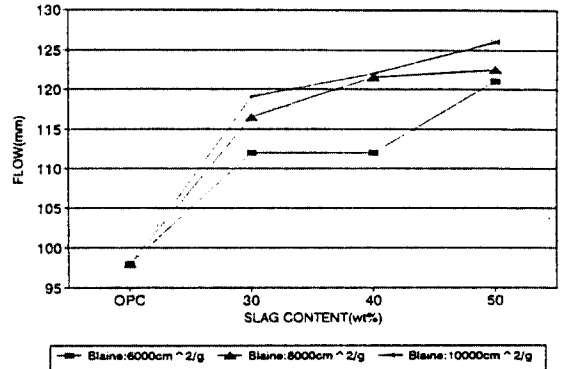


그림 3. 혼화제 첨가에 의한 슬래그 함량과 플로우의 관계

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 유동성

그림 2는 고미분말 슬래그를 첨가했을 때 플로우 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 슬래그의 함량이 증가함에 따라 플로우 값이 증가하고 있는 것을 볼 수 있으나, 비표면적이 높은 경우는 플로우 감소경향을 나타내고 있었다. 이의 영향을 확실히 검토하기 위해 액상 나프탈렌계 고성능 감수제(고형분 0.4%)를 1wt% 첨가하여 실험한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 슬래그의 함량증가 및 비표면적의 증가는 분산제 무첨가의 경우에 비하여 유동성의 증진에 상당히 기여함을 알 수 있으며, 상술한 슬래그 비표면적 증가에 따른 유동성 저하현상은 고성능 감수제(분산제) 첨가로 자체 응집된 미분말을 분산시켜줌으로서 현저히 회복되고 있다.

#### 3.2. 압축강도

고미분말 슬래그 첨가 시멘트의 압축강도는 슬래그의 반응성 즉 염기도, 분말도 및 자극제의 영향이 크다. 본 실험에 사용한 슬래그의 염기도<sup>1)</sup>는 1.72로 KS 규정치 1.4를 상회하고 있다. 그림 4는 수화재령 3일에서의 슬래그 분말도 및 무수

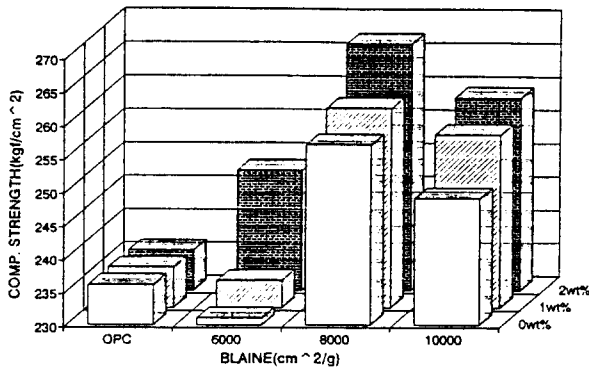


그림 4. 재령 3일에서 슬래그 분말도 및 무수 석고 함량에 따른 압축강도 변화

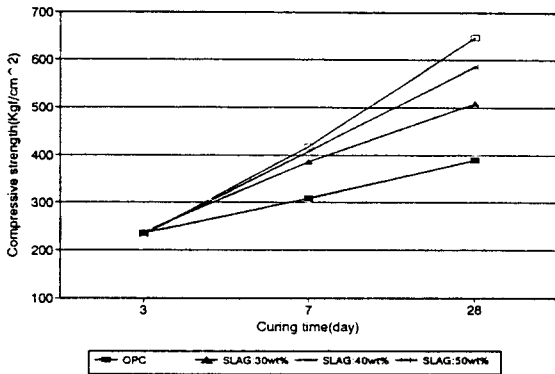


그림 5. 분말도 10000cm<sup>2</sup>/g인 슬래그의 함량에 따른 양생재령별 압축강도의 발현 관계

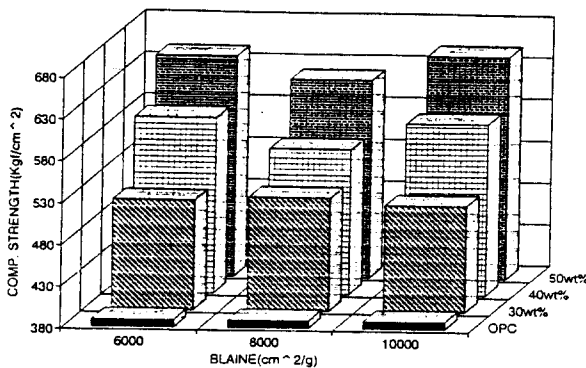


그림 6. 재령 28일에서 슬래그 분말도 및 함량에 따른 압축강도 변화

석고 함량 증가에 따른 압축강도의 발현 특성을 슬래그 함량 30wt%에 대해 도시한 것이다. 슬래그의 비표면적이 8000cm<sup>2</sup>/g 이상으로 증가했을 경우 전 시료 모두 보통포틀랜드시멘트의 강도를 훨씬 능가하고 있으며, 무수석고량 증가 역시 슬래그의 잠재성 자극<sup>2-3)</sup>으로 반응을 촉진시켜 초기강도 발현에 기여함을 쉽게 알 수 있다. 그림 5는 슬래그 비표면적 10000cm<sup>2</sup>/g의 경우 양생 재령별에 따른 압축강도를 슬래그 함량에 따라 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 각 재령에서의 강도 증진율은 슬래그 함량에 관계없이 보통포틀랜드시멘트에 비하여 크게 나타나고 있으며 그의 폭은 슬래그 함량이 많을 수록 증가하고 있다. 이는 슬래그의 반응 동참이 주된 이유임이 명확하고 슬래그 분말 10 $\mu$ m이하의 재령 28일 이내의 강도에, 10-40 $\mu$ m는 재령 28일 이후의 강도에 기여한다는 기존의 연구결과와 잘 일치하고 있다<sup>4)</sup>. 앞에서 언급한 바와 같이 비표면적 10000cm<sup>2</sup>/g의 슬래그는 평균입경 3.6 $\mu$ m로 10 $\mu$ m 이내 입자가 96%를 차지하고 있어 이들이 조기 강도발현에 크게 기여하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 슬래그의 비표면적과 함량에 따른 재령 28일의 압축강도 발현 특성을 나타낸 것으로, 슬래그의 비표면적 6000cm<sup>2</sup>/g 이상에서는 슬래그 함량에 관계없이 보통포틀랜드시멘트에 비해 월등히 높은 강도 발현을 하고 있으며 특히 슬래그 함량 50wt% 이상에서는 600kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 압축강도를 안정적으로 확보할 수 있었다.

### 3.3. 수화열

그림 7은 주수 직후 48시간 까지의 적산 발열량을 보통포틀랜드시멘트를 100 기준으로 잡았을 때 슬래그 함량 및 함량 50wt%에서의 비표면적 변화에 따라 도시한 것이다. 미분말 슬래그의 함량 증가는 대폭적으로 수화열을 감소시키며, 또한 슬래그의 비표면적은 높을수록 수화열이 크나 보통포틀랜드시멘트에 비해서는 슬래그 첨가폭이 낮아진다. 이외에도 무수석고의 함량증가는 슬래그 반응성 촉진 및 칼슘 알루미네이트계 수화물의 생성량 증대로 수화열을 증가시키고 있다.

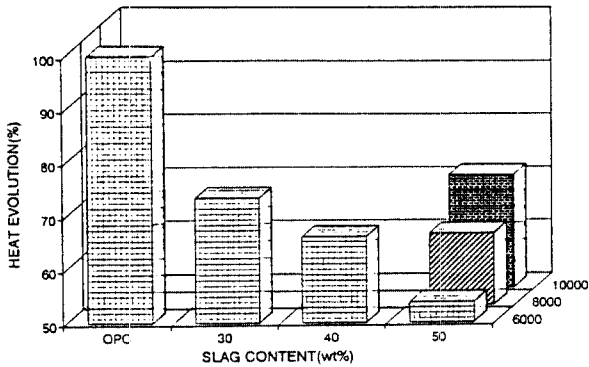


그림 7. 슬래그의 함량과 분말도에 따른 48시간 수화발열량(슬래그 함량 50wt%)

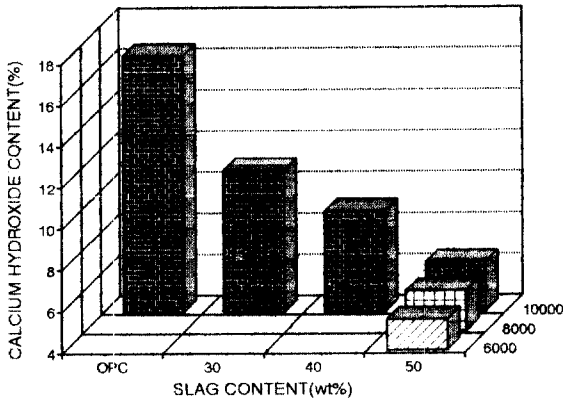
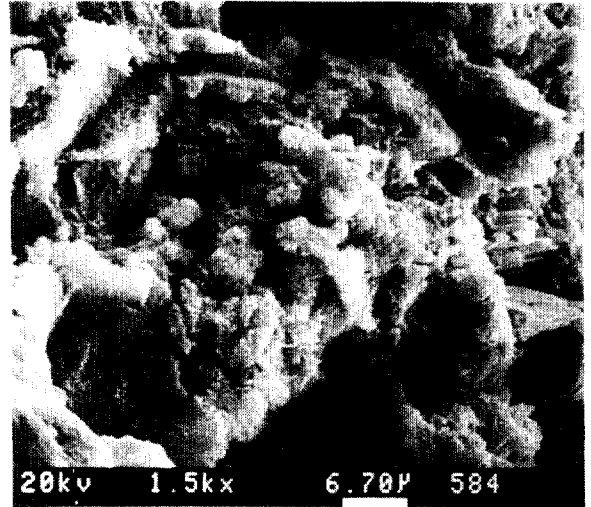


그림 8. 재령 7일에서 슬래그 함량 및 분말도에 따른 Ca(OH)₂ 생성량 변화(TGA)

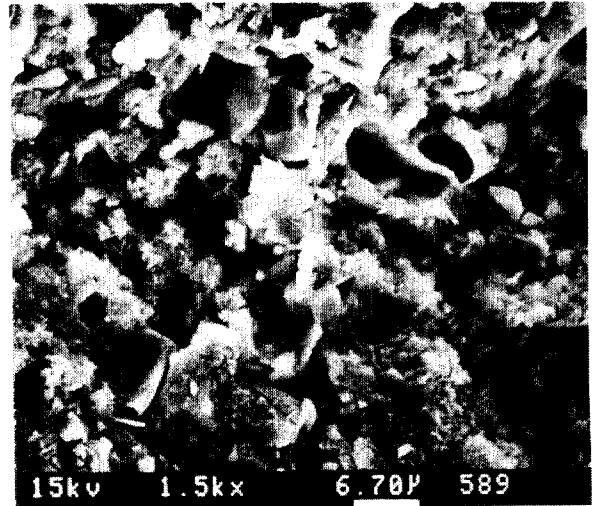
### 3.4. 수화특성

슬래그시멘트의 수화는 물의 접합과 동시에 이루어지며<sup>5,6,7)</sup>, 포틀랜드시멘트 수화시 생성되는 Ca(OH)₂가 강한 알칼리성 분위기를 유도, 슬래그의 SiO₂ 체인을 끊어 반응을 개시시킴으로서 CaO, MgO, Al₂O₃를 용해시킨다<sup>1)</sup>. 그결과 수화반응 진행으로 칼슘 실리케이트, 칼슘 알루미늄이트, 칼슘 설포알루미늄이트 수화물들이 생성되고 Ca(OH)₂는 일부가 주 수화물인 칼슘 실리케이트 수화반응에 동참한다.

그림 8은 슬래그의 첨가가 Ca(OH)₂를 얼마나 소비했는가를 알아보기 위해 열중량분석기(TGA)를 이용, Ca(OH)₂ 분해온도 450℃ 근방에서의 중량변화를 분석한 결과이다. 보통포틀랜드시멘트 수화



A. 보통포틀랜드시멘트 경화체



B. 슬래그 분말도 6000cm²/g, 함량 50wt%인 경화체

사진 1. 재령 7일에서 경화체의 주사전자현미경 관찰

재령 7일에서는 약 16.4wt%의 Ca(OH)₂를 볼 수 있으나 슬래그 함량이 증가함에 따라 Ca(OH)₂ 량은 현저히 감소함을 관찰 할 수 있으며, 비표면적 증가도 슬래그의 반응성을 촉진시켜 초기재령(7일)에서 Ca(OH)₂량을 소량 감소시킨 것을 볼 수 있었다. 또한 그외의 수화물 들도 생성량이 증가되었

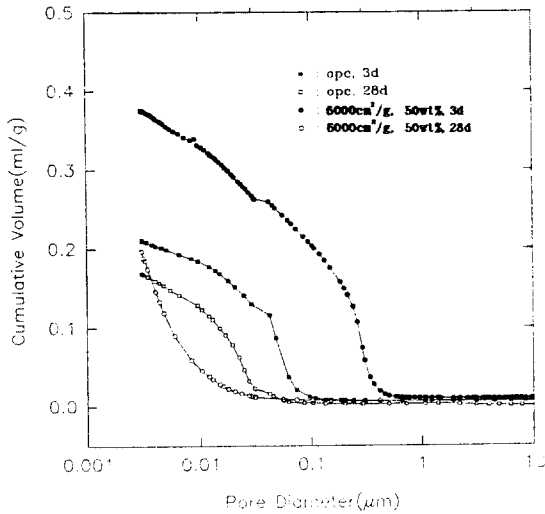


그림 9. 재령 3, 28일에서 경화체의 기공분포

음을 열중량 분석결과 수화물의 열분해 반응에 의한 감량분으로 추정할 수 있었으며, 이들의 상호작용이 앞에서 서술한 압축강도 증진에 직접적인 영향을 미친 요인중의 하나로 사료된다. 사진 1은 보통포틀랜드시멘트 및 슬래그 함량 50wt%, 비표면적 6000cm<sup>2</sup>/g의 수화재령 7일에서의 주사전자현미경 사진이다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 보통포틀랜드시멘트의 경우 칼슘 설포알루미늄 수화물, Ca(OH)<sub>2</sub> 및 C-S-H 형태I의 수화물들이 주로 관측되며 기공이 여러곳에 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 고미분말 슬래그 첨가시는 칼슘 설포알루미늄 수화물, Ca(OH)<sub>2</sub> 등이 현저히 감소함을 볼 수 있었으며 거대기공에 미수화 슬래그 입자들이 충전되어 치밀한 수화구조를 이루고 있음을 알 수 있었다. 또한 이와 같이 치밀한 수화구조는 장기재령으로 진행됨에 따라 두드러지게 나타나고 있으며, 미분 슬래그의 지속적인 반응으로 공극 충진이 이루어져 재령 28일에서는 그림 9와 같은 기공분포를 갖게되어 미분 슬래그 사용시의 수화조직의 치밀화를 한눈에 볼 수 있다.

#### 4. 결론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 고미분말 슬래그 유동특성은 함량 및 비표면적 증가에 따라 증가함을 볼 수 있었으며, 고성능 감수제(분산제)를 사용하는 것이 슬래그 자체의 응집을 방지하여 더 우수한 유동성을 나타내었다.

2) 초기재령(3일)에서의 압축강도는 무수석고 함량 증가에 따라 증진되었고, 비표면적 8000cm<sup>2</sup>/g 이상에서도 보통포틀랜드시멘트에 비해 높은 압축강도를 나타내었다.

3) 장기재령에서의 압축강도는 슬래그 비표면적 보다는 함량이 더 크게 영향을 주었으며, 50wt% 첨가시는 600kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 압축강도를 안정적으로 확보할 수 있었다.

4) 수화열은 슬래그 함량이 증가함에 따라 초기 수화열이 급격히 감소하였다.

5) 이상의 결과에서와 같이 고미분말 슬래그는 보통포틀랜드시멘트에 비하여 유동성이 우수하고 초기 및 장기강도에 우수하면서도 낮은 수화열을 확보할 수 있어 고성능 콘크리트용 혼합재료로서의 사용이 가능할 것으로 사료된다.

#### 5. 참고문헌

- 1) 田中太郎ほか, セメント 技術年報, No. 8, 148(1954).
- 2) F. Keil, et al., Z-K-G, No. 6, 245(1958).
- 3) 田中太郎ほか, セメント 技術年報, No. 10, 119(1956).
- 4) M. Daimon, "Characterization and performance prediction of cement and concrete", Engineering foundation, No. 82-15.
- 5) M. Daimon, Proc. of 7th ICC., Principal paper, (1980).
- 6) R. Dron, et al., Proc. of 7th ICC., 3-134(1980).
- 7) R. Regourd, et al., CCR, 13, 549(1983).