

# 고로슬래그 미분말의 초기강도 향상을 위한 석고 종류 및 첨가량 검토

## Investigation on the Ratio and Type of Gypsum for Early Strength Improvement of Blast Furnace Slag Powder

(Received November 26, 2010 / Revised December 24, 2010 / Accepted December 24, 2010)

정 용<sup>1)</sup> 유정훈<sup>1)</sup> 신재경<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>(주) 삼표 기술연구소

Yong Jeong<sup>1)</sup> Jung-Hoon Yoo<sup>1)</sup> Jae-Kyung Shin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>SAMPYO Corporation, Kwangju-Si, Gyeonggi-Do, 464-080, Korea

### Abstract

We were tried to draw a conclusions related to additive amount of gypsum in blast furnace slag in the study.

In the result, fluidity of concrete decreased with an increase of gypsum and was not satisfied with KS standard in the cases of natural gypsum and limestone sludge more than 2.6% addition. Early compressive strength of concrete containing desulfurized gypsum, fluosilicic acid gypsum and phosphoric acid gypsum were improved respectively but calcined lime sludge and lime powder were not influenced on strength. If available, additive gypsum should be managed less than 2.0% owing to low fluidity. In low temperature, fluosilicic acid gypsum was to advantages on the fluidity while desulfurized gypsum was in high temperature. There also are conclusions that additive gypsum was to be 2.6% in winter and in summer; it's to be fewer than 2.6%

**키워드 :** 석고, 고로슬래그 미분말, 초기강도, 최적 품질

**Keywords :** Gypsum, Blast furnace slag powder, Early strength, Optimum Quality

## 1. 서론

최근 건설산업에서는 환경 문제가 무엇보다 중요한 사안으로 대두됨에 따라 새로운 대처방안이 요구되고 있다. 특히 콘크리트 산업에서는 환경 문제와 함께 부존자원의 고갈대책도 중요한 문제점으로 제기되어 이를 해결하기 위하여 각종 산업부산물이나 산업폐기물을 콘크리트용 자원으로 재이용하는 방법이 연구되고 있다.

산업부산물 중에서 고로슬래그는 선철을 제조할 때에 고로에서 생성되는 용융슬래그의 냉각 처리에 의해 배출되는데 국내 제철산업의 규모에 비례하여 연간 약 1,100만 톤 이상이 생산되고 있으며, 당진 현대제철소의 설립으로

인하여 생산량은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 과거에는 생산된 고로슬래그를 대부분 매립이나 도로 보조 기층재료 등의 저부가가치성 목적으로 사용되거나 폐기처분 되었으나, 각종 고로슬래그 관련 연구를 시작으로 유효활용성이 증가하였다.

현재 고로슬래그 미분말은 원가절감의 목표와 잠재수경성에 의한 장기재령에서의 강도증진, 수화열에 의한 온도상승 억제, 내구성 향상을 목적으로 전국의 레미콘 공장에서 고로슬래그 미분말을 혼합하여 제조하고 있다<sup>1)</sup>. 일본의 경우 고로 수쇄슬래그 생산량의 90% 이상을 시멘트 원료 및 혼화재료로서 콘크리트에 사용되고 있으며 국내에서도 일본과 마찬가지로 고로 수쇄슬래그를 콘크리트 제조에 주로 사용하고 있다.

그러나, 고로슬래그를 사용한 콘크리트를 건축물의 구조체에 적용하는 경우 선결되어야 할 문제점으로는 조기

\* Corresponding author  
E-mail : rapperjsa@sampyo.co.kr

강도의 저하, 초기 건조수축 및 콘크리트의 중성화 등을 들 수 있으며 기존의 보통 포틀랜드 시멘트와 동등 이상의 성능을 발현시키기 위해서 다양한 각도로 연구가 진행되고 있다.

특히 고로 수쇄 슬래그는 수산화칼슘과 같은 강알칼리 와 석고 등의 자극제가 존재하면 시멘트와 같이 수화하는 특성을 가지고 있고, 그 품질이 비교적 균질하기 때문에 분쇄하여 가공을 하면 더욱 더 고부가가치형 제품으로 용도를 극대화 할 수 있다<sup>2)</sup>. 그러나 고로슬래그의 새로운 활용도를 창출하고 그 활용범위를 극대화하기 위해서는 고로슬래그의 미립화를 위한 분쇄조건이 도출되어야 하고 석고 등과 같은 자극제의 사용에 대한 데이터 확보가 중요하다.

기존에도 고로슬래그 미분말의 물성에 관한 연구는 많이 진행되어 왔으나, 이는 동일한 배합이라 하더라도 슬래그 및 석고의 생산지별 차이 등에 따라 각기 다른 물성의 차이를 보여<sup>2)</sup>, 현재 시기의 조건을 고려하여 제반 물성을 재검토하는 것이 바람직하다.

그러므로 본 연구에서는 고로슬래그 미분말 제조에 있어서 주로 사용되어지고 있는 무수석고, 이수석고, 석회석 미분말 및 석회 소성슬러지의 첨가량에 따른 물성 영향을 재검토함으로써 고로슬래그 미분말의 품질향상 방안을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 장은 석고 종류별 첨가량에 따른 기초 물성을 검토 하기 위한 실험으로, 실험계획은 표 1과 같다.

즉, 배합사항으로 W:B:S(물:결합재:잔골재)는 KS L ISO 679에 의거하여 1:2:6으로 하였고, 석고 종류로는 천연, 탈황, 불산, 인산석고 4수준과 석고 대체로 석회석 미분말 및 석회 소성슬러지 2수준의 6종류를 계획하였다. 이때 석고첨가량은 SO<sub>3</sub> 함유량을 기준으로 경제성이 확보되는 범위에서 0, 1.7, 2.0, 2.3, 2.6, 2.9% 6수준으로 하였는데 석회석 미분말 및 소성슬러지의 경우에는 질량비로 천연석고의 첨가량과 동일하게 하여 36배치를 비교 검토한 후 선별된 석고에 대하여 분말도는 4300, 5300, 6300급 3수준, 모르타르 비빔온도는 10, 20, 25°C 3수준에서 물리적 특성을 비교하는 것으로 계획하였고 실험사항으로 굳지않은 모르타르 및 경화 모르타르에서 플로우지수, 응결시간 및 압축강도를 측정하였다.

### 2.2 사용재료

본 연구에 사용된 재료로서 보통 포틀랜드 시멘트와 고로 수쇄 슬래그 및 석고의 화학적 성질은 표 2와 같다. 또한 잔골재는 ISO 표준모래를 사용하였다. 모르타르 제작 방법은 KS L ISO 679의 규정에 의거하여 실시하였으며, 시험체 제작은 질량에 대한 비율로 결합재는 시멘트와 고

표 1 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W:B:S	1	· 1:2:6
	석고 종류	6	· 천연석고 · 탈황석고 · 불산석고 · 인산석고 · 석회석 미분말 · 석회 소성슬러지
	석고첨가량(SO <sub>3</sub> %)	6	· 0.0 1.7 2.0 2.3 2.6 2.9
	고로슬래그 미분말 분말도(cm/g)	3	· 4300 5300 6300
	모르타르 비빔온도(°C) (분말도 4300)	3	· 10 20 25
	실험사항	굳지않은 모르타르	3
경화 모르타르			· 압축강도(3, 7, 28일)

표 2 사용 결합재 화학적 특성

구분		SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	강열감량 (lg. loss)	
보통 포틀랜드 시멘트 (OPC)		21.09	5.18	61.97	2.48	2.96	2.42	3.15	1.42	
고로 슬래그 미분말	고로 수쇄 슬래그	32.4	13.5	42.1	5.93	1.59	0.02	2.90	1.17	
	석고	탈황 이수석고	1.18	0.24	40.3	0.08	0.28	55.5	2.52	5.78
		인산 무수석고	3.67	0.41	38.9	1.18	0.23	50.9	2.82	1.80
	종류	불산 무수석고	-	0.07	42.0	0.03	0.13	56.0	2.94	1.44
		천연 무수석고	0.61	0.18	42.8	0.03	0.09	55.4	2.72	1.15
		석회석 미분말	3.62	0.72	50.6	2.41	0.84	0.22	2.78	37.76

로슬래그 미분말을 1:1로 혼합하였고, 결합재와 잔골재를 1.3의 비율로 혼합하였으며 비빔수는 1:2로 혼합하였다.

### 3.1.2 응결시간

그림 2는 석고 종류에 따른 응결시간을 나타낸 것이다. 플레인인 석고를 첨가하지 않은 고로슬래그 미분말을 50% 치환하였고, 종류별 석고를 2.3% 첨가하여 페이스트의 응결시간을 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 석고 종류 및 첨가량 변화 모르타르 특성

#### 3.1.1 플로우 지수

그림 1은 석고 종류 및 첨가량 변화에 따른 플로우 지수를 나타낸 것이다. 먼저 석고첨가량이 높아질수록 대체적으로 유동성이 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 탈황석고, 불산석고, 인산석고, 석회석 미분말의 경우에는 모든 첨가량에서 KS 기준인 95%를 만족하는 것으로 나타났고, 천연석고 및 석회 소성 슬러지의 경우에는 SO<sub>3</sub>함량 2.6% 이상에서는 KS 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 석회석 미분말의 경우 KS 기준은 만족했으나 유동성이 크게 저하하여 사용상에 위험성이 따를 것으로 판단되고, 천연석고의 경우에는 고로슬래그 미분말 제조시 첨가량을 2.6% 이하로 조절할 필요가 있다.

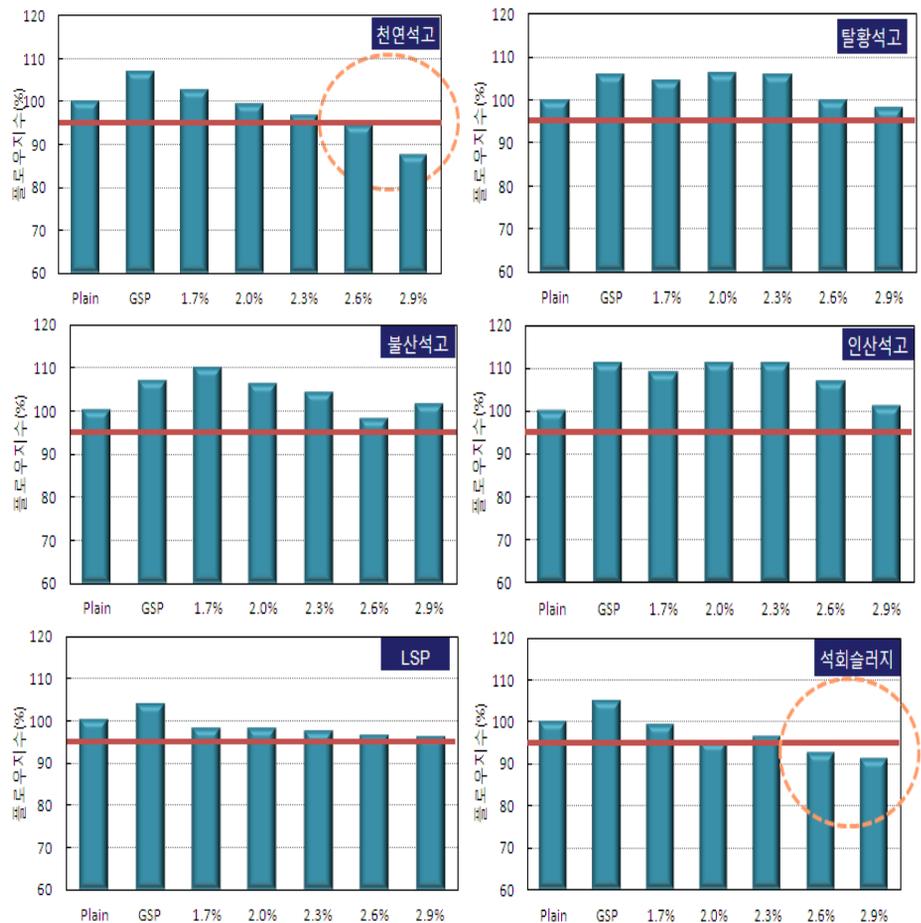


그림 1. 석고 종류별 첨가량에 따른 플로우지수

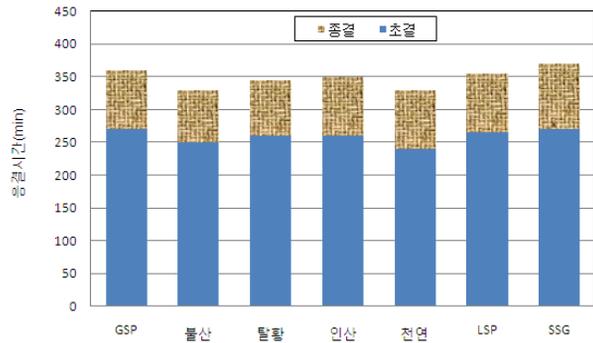


그림 2. 석고 종류에 따른 응결시간

초결 시간은 천연석고가 240분으로 가장 짧게 나타났고 초결에서 중결이 되는 시간은 불산석고가 80분으로 가장 짧게 나타나 전체적인 응결시간은 천연석고와 불산석고가 가장 빠른 것으로 나타났고, 탈황석고, 인산석고 순으로 플레인과 비교하여 응결이 촉진되는 것으로 나타났다.

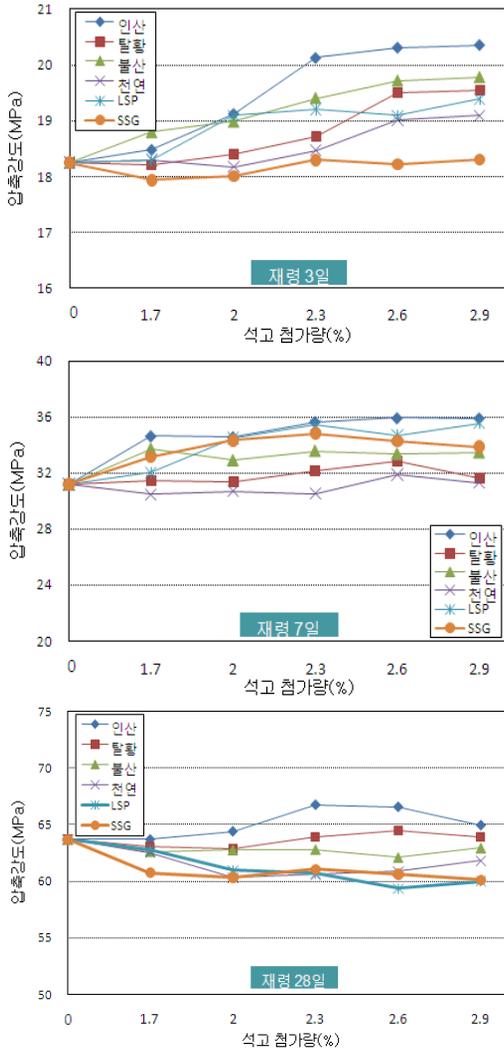


그림 3. 석고 종류별 첨가량에 따른 압축강도

이에 비해 석회석 미분말 및 석회 소성 슬러지의 경우에는 플레인과 비교하여 응결시간에 차이는 없는 것으로 나타났다.

### 3.1.3 압축강도 특성

그림 3은 석고 종류별 첨가량 변화에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저 초기재령에서는 인산석고, 탈황석고, 불산석고와 같은 화학석고가 첨가량이 증가함에 따라 압축강도 발현이 높게 나타났는데 탈황석고의 경우에는 2.6%에서 강도증가 현상이 두드러졌고 인산 및 불산석고의 경우에는 2.3% 이상에서 강도가 크게 나타났다. 또한 천연석고의 경우에도 2.6%에서 압축강도가 크게 증가하였다. 그러나 석회 소성슬러지의 경우에는 첨가량과 상관없이 강도발현 성상에는 영향이 없는 것으로 나타났고, 천연

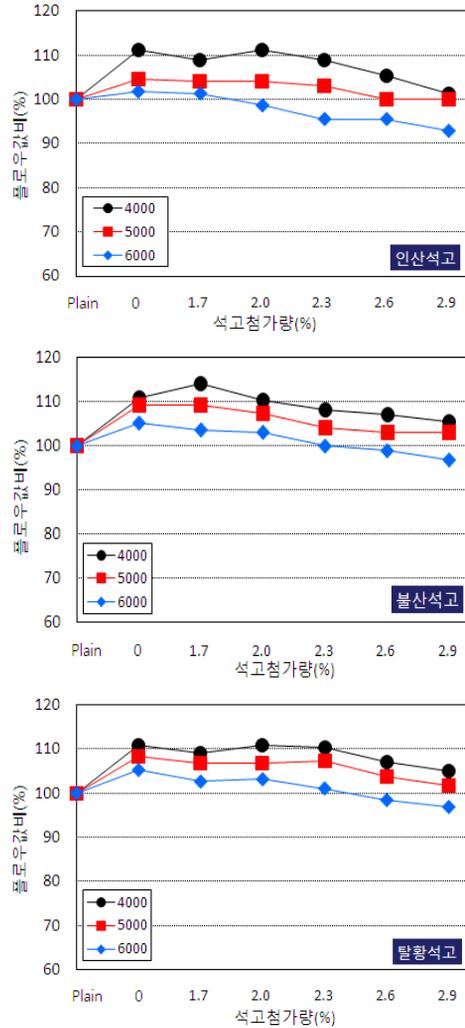


그림 4. 석고종류 및 분말도별 석고첨가량에 따른 플로우 지수

석고 및 석회석 미분말의 경우에는 초기재령과 장기재령에서 압축강도가 다른 석고에 비하여 낮게 나타났다.

이에 천연석고 및 석고 대체재료로 고려되었던 석회석 미분말 및 석회 소성슬러지는 유동성이 저하하고 압축강도도 낮게 나타났기 때문에 이후 실험에서는 배제하는 것으로 하였다.

### 3.2 분말도 및 타설온도별 석고첨가량에 따른 모르타르 특성

#### 3.2.1 플로우 지수

그림 4는 석고 종류 및 분말도별 석고첨가량 변화에 따른 플로우 지수를 나타낸 것이다. 먼저 석고 종류와 상관 없이 분말도가 높아질수록 모세관 장력이 증가함에 따라 플로우 지수가 낮게 나타났는데 석고첨가량이 증가할수록 플로우 지수가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 분말도 6000cm<sup>3</sup>/g급의 경우 인산석고는 2.0% 이상에서, 탈황석고

및 불산석고는 2.3% 이상에서 플레인보다 작게 나타나 분말도 6000이상에서는 석고량을 2.0%이하로 관리할 필요가 있다.

#### 3.2.2 압축강도 특성

고로슬래그 미분말의 조기강도 확보를 위한 방안 중 일환으로 분말도를 4000~6000cm<sup>3</sup>/g급으로 제조한 후 앞 절과 동일한 방법으로 석고 종류별 첨가량에 따른 강도 성상을 검토하였다.

그림 5는 재령 3일에서의 석고종류 및 분말도별 첨가량 변화에 따른 압축강도를 나타낸 것이고 그림 6은 석고첨가량 2.6%일 때 압축강도를 비교한 것이다. 분말도가 높을수록 압축강도 발현율이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 분말도 4000에서 5000급으로 올라갈 때 압축강도 증가폭이 크게 나타났다. 석고첨가량 변화에 따라서는 첨가량이 증가할수록 압축강도가 증가하였으나 분말도 증가에 의한 증가폭보다는 그 변화가 크지 않았다. 이에 분말도를

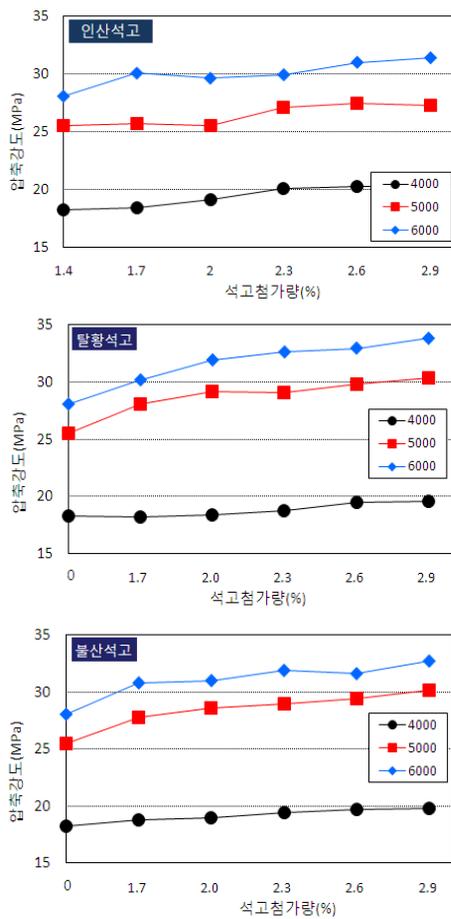


그림 5. 석고종류 및 분말도별 석고첨가량에 따른 압축강도(3일)

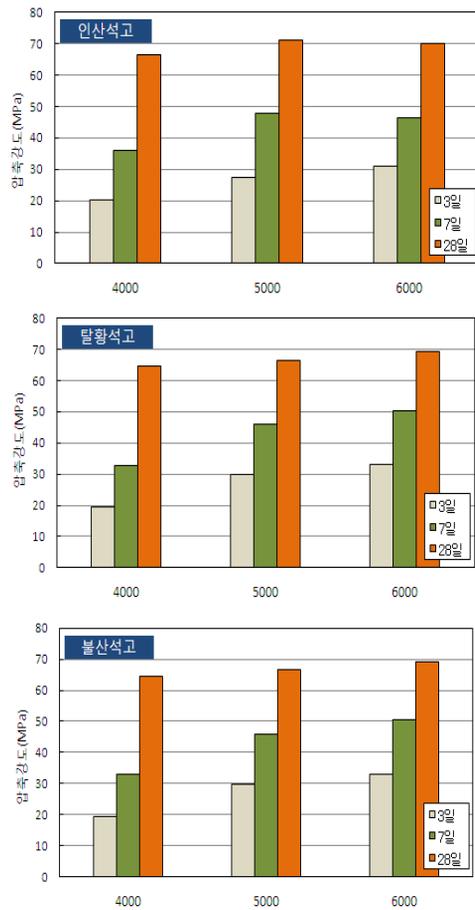


그림 6. 석고 종류 및 재령별 분말도에 따른 압축강도 (석고첨가량 2.6%)

5000, 6000급으로 증가하여 고로슬래그 미분말을 분쇄하여 콘크리트에 적용할 경우 석고첨가량을 최소한으로 하여도 무방할 것으로 판단된다.

### 3.3 타설온도 변화에 따른 석고첨가량 검토

#### 3.3.1 플로우 지수

레미콘 적용시 타설시기에 따른 최적 석고첨가량을 도출하기 위하여 타설온도에 따른 기본 모르타르 물성을 검토하였다. 또한 본 절에서는 인산석고의 경우 초기강도 확보에 효과가 있는 것으로 분석되었으나, 시료 건조시 인성분으로 인하여 심한 악취가 발생하여 현장에 적용하는데 무리가 있다고 판단되어 본 실험에서는 제외되었다.

그림 7-12는 탈황석고 및 불산석고의 타설온도(10, 20,

25℃)별 첨가량에 따른 플로우 지수를 나타낸 것이다. 모든 경우에서 온도가 높을수록 유동성은 저하하였지만 플레인 대비 플로우 지수는 30℃에서 가장 높게 나타나 타설온도가 높은 서중 콘크리트에는 고로슬래그 미분말을 치환하여 사용하는 것이 유동성 확보에 유리한 것으로 나타났다. 또한 석고 종류에 따라서는 저온에서는 불산석고가 유동성 확보에 다소 유리한 것으로 나타났고, 고온에서는 탈황석고가 유동성 확보에 유리한 것으로 나타났다.

#### 3.3.2 압축강도 특성

그림 13-15는 재령 3일에서 불산석고와 탈황석고의 타설온도별 첨가량에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 먼저 타설온도에 따라서는 온도가 올라감에 따라 약 5-6MPa 정도 증가하는 것으로 나타났는데 장기재령으로 가면서

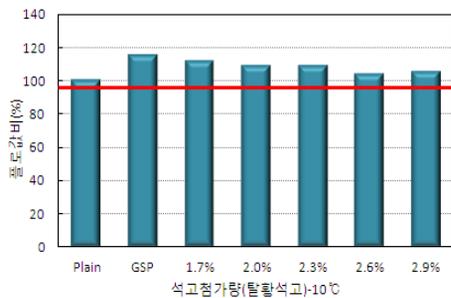


그림 7. 석고첨가량에 따른 플로우 지수(탈황-10℃)

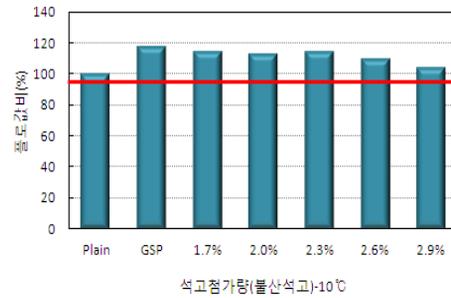


그림 10. 석고첨가량에 따른 플로우지수(불산-10℃)

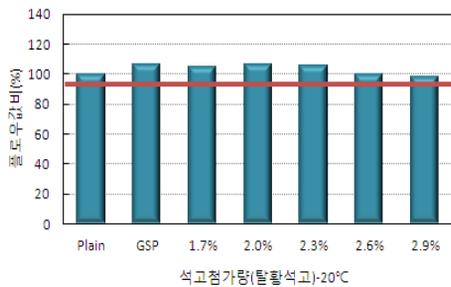


그림 8. 석고첨가량에 따른 플로우 지수(탈황-20℃)

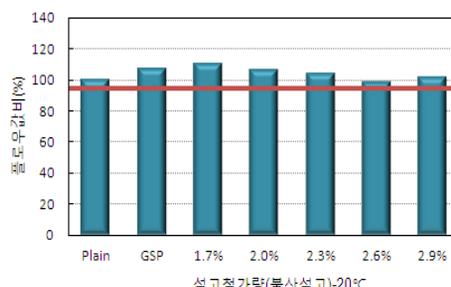


그림 11. 석고첨가량에 따른 플로우지수(불산-20℃)

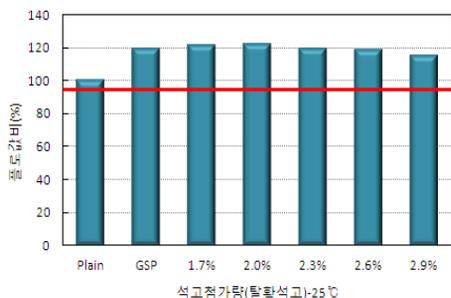


그림 9. 석고첨가량에 따른 플로우지수(탈황-25℃)

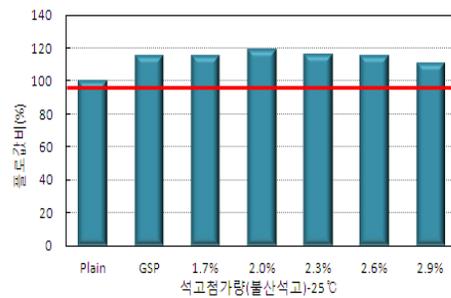


그림 12. 석고첨가량에 따른 플로우지수(불산-25℃)

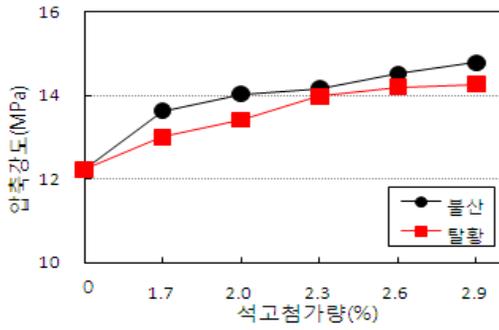


그림 13. 석고종류별 석고첨가량에 따른 압축강도 (10°C) (재령 3일)

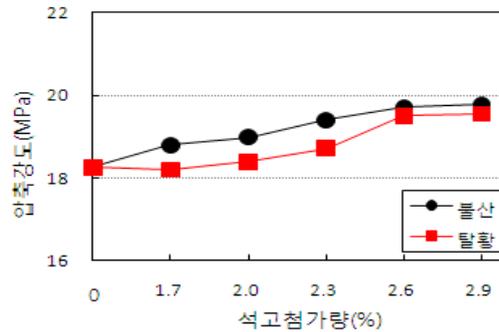


그림 14. 석고종류별 석고첨가량에 따른 압축강도 (20°C) (재령 3일)

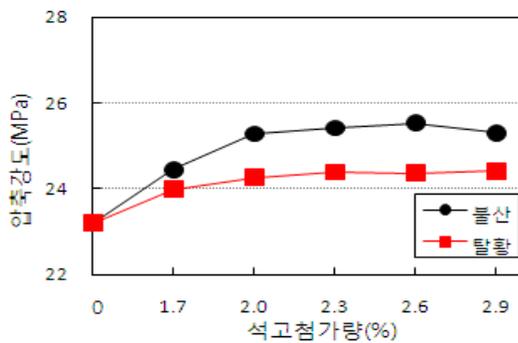


그림 15. 석고종류별 석고첨가량에 따른 압축강도 (25°C) (재령 3일)

강도차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 석고 종류에 따라서는 전체적으로 불산석고가 탈황석고보다는 초기 재령에서 강도발현 성능이 우수한 것으로 나타났고, 특히 타설온도 25°C에서 우수한 강도 성상을 보이는 것으로 나타났다.

타설온도 10°C에서는 표준온도 20°C와 비교하여 재령 초기에 강도 발현이 약 10% 정도 낮게 나타나므로 석고첨가량을 2.6% 이상 사용할 것을 권장하는 바이고 타설온도 30°C에서는 표준온도와 비교하여 높은 압축강도를 보이고 있기 때문에 석고를 최소한으로 첨가하거나 혹은 무첨가

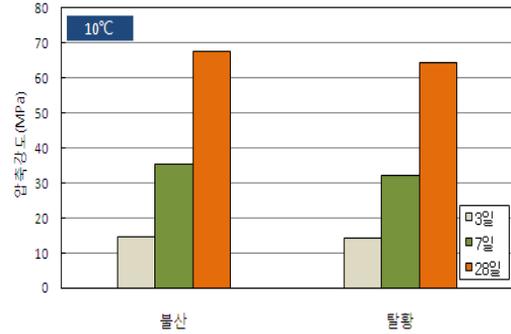


그림 16. 재령별 석고 종류에 따른 압축강도(2.6%) (10°C)

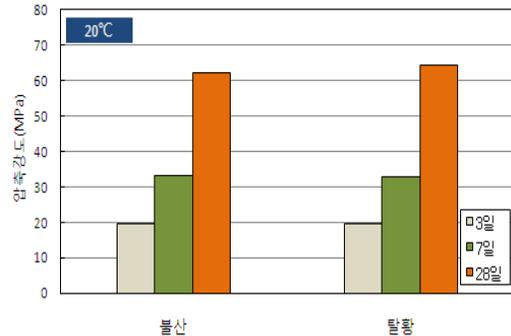


그림 17. 재령별 석고 종류에 따른 압축강도(2.6%) (20°C)

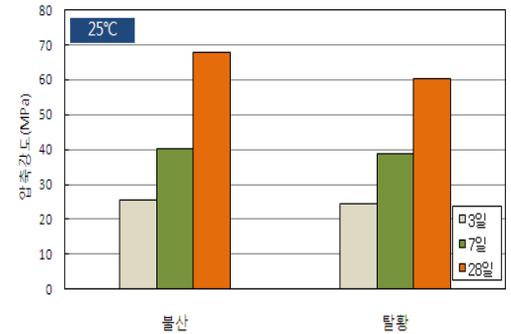


그림 18. 재령별 석고 종류에 따른 압축강도(2.6%) (25°C)

하여도 무방할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고로슬래그 미분말의 품질관리 향상을 위한 기초자료로 활용하기 위하여 석고첨가량 도출, 치환율 및 타설온도와 분말도 변화에 따른 모르타르 물성에 대하여 실험을 실시하였는데, 그 실험결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 석고 종류 및 첨가량에 변화에 의한 특성으로 유동성은 석고첨가량이 높을수록 다소 저하하는 경향이었고 천연석고와 석회 소성슬러지의 경우에는 첨가량 2.6%이상에서 KS 기준을 만족하지 못하였다. 응결시간은 석고를 첨가한 경우 응결시간이 촉진되는 것으로 나타났는데 천연석고와 불산석고의 응결시간이 가장 촉진되는 것으로 나타났고, 석회석 미분말 및 석회 소성슬러지는 응결이 지연되는 것으로 나타났다. 압축강도는 인산, 탈황, 불산석고의 초기강도가 높게 형성되었고 석회 소성슬러지와 석회석 미분말은 강도발현에 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다.

(2) 분말도 및 타설온도 변화에 따른 석고첨가량에 모르타르 특성으로서 분말도가 높아지면 유동성이 감소하고 압축강도는 증가하기 때문에 석고첨가량을 2.0%이하로 관리해야 한다. 또한 타설온도가 높아질수록 플로우지수가 크게 나타나 고로슬래그 미분말을 치환하여 사용하는 것이 유동성 확보에 유리한 것으로 나타났고, 저온에서는 불산석고, 고온에서는 탈황석고가 유동성 확보에 유리하다. 압축강도는 불산석고가 강도발현 성능이 가장 우수한 것으로 나타났고, 동결기인 10℃에서는 2.6%, 서중기인 30℃에서는 2.0%이하로 사용하는 것을 권장한다.

### 참고문헌

1) 小林一輔, “高爐セメントとその特性”, コンクリート工學, vol.14, No.9, p.23~30, 1976.  
 2) 서신석, 나상철, 윤용식, 이덕우, 고로슬래그 시멘트 물성에 미치는 석고의 영향, 양회협회

3) 전종협, 인산부산석고와 이의 활용, 태학원 출판사, p.80~87, 1984.  
 4) 井上和久, “高爐スラグ係混合セメントの初期水和に及ぼす石こうの影響”, セメント・コンクリート論文集, No.46, p.74~79, 1992.  
 5) 이의학, 전준영, 김진욱, 유창진, 석고 형태 및 첨가량이 시멘트 경화체의 품질에 미치는 영향성 검토, 양회협회  
 6) 한천구, 콘크리트의 특성과 배합설계, 기문당, 1998  
 7) 井上和久, 高爐スラグ係混合セメントの初期水和に及ぼす石こうの影響, セメント・コンクリート論文集, No.46, 1992.  
 8) S.N. GHOSH, ADVANCES IN CEMENT TECHNOLOGY, PERGAMON PRESS, 1981.  
 9) 김영근, 김승진, 조재우, 손진근, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트 제품의 특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 제11권 제2호, pp. 191~194, 1999. 11  
 10) 한국콘크리트학회(편), 고로슬래그 콘크리트, Posco Forum 발표집, 한국콘크리트학회, 1999. 11  
 11) 송하원, 고로슬래그 미분말을 사용한 고내구성 콘크리트의 개발, KCI POSCO Forum, 2000  
 12) 김상규, 고로슬래그 콘크리트의 건축구조물에서의 이용, KCI POSCO Forum, 2000  
 13) 이석홍, 고로슬래그 콘크리트의 사회기반시설에서의 이용, KCI POSCO Forum, 2000  
 14) 강훈, 고로슬래그 콘크리트의 최적배합설계 및 현장실용화, KCI POSCO Forum, 2000  
 15) 임영수, 정현일, 석고형태별 시멘트 특성에 미치는 영향, 시멘트 심포지엄 No. 21, 1993

### 고로슬래그 미분말의 품질 향상을 위한 석고 종류 및 첨가량 검토

본 연구에서는 고로슬래그 미분말 제조시 혼입되는 최적의 석고량을 도출하고, 분말도 및 제조환경에 관한 제반 물성을 실험적으로 검토함으로써 고로슬래그 미분말의 품질향상 방안과 사용성 확대를 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 실험결과, 유동성은 석고첨가량이 높을수록 저하하는 경향이었고 천연석고와 석회 소성슬러지의 경우에는 첨가량 2.6%이상에서 KS 기준을 만족하지 못하였다. 압축강도는 인산석고, 탈황석고, 불산석고의 화학석고가 초기 강도가 높게 형성되었고 석회 소성슬러지와 석회석 미분말은 강도발현에 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다. 분말도가 높아지면 유동성이 감소하고 압축강도는 증가하기 때문에 석고첨가량을 2.0%이하로 관리하는 것이 경제적인 것으로 판단된다. 저온에서는 불산석고, 고온에서는 탈황석고가 유동성 확보에 유리한 것으로 나타났고 동결기인 10℃에서는 2.6%, 서중기인 30℃에서는 2.0%이하로 사용하는 것을 적정 사용량으로 결정하였다.