

# 고로슬래그 자극재로써 건식 및 습식 배연탈황석고의 활용가능성 평가

## Use of Flue Gas Desulfurization Gypsum as an Activator for a Ground Granulated Blast Furnace Slag

이 현 숙                      김 지 현                      이 재 용                      정 철 우\*

Lee, Hyun-Suk      Kim, Ji-Hyun      Lee, Jae-Yong      Chung, Chul-Woo\*

*Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Busan, 48513, Korea*

### Abstract

Flue gas desulfurization gypsum(FDG) is produced when removing sulfur oxides from combustion gas generated by coal power plant. However, the recycling of FDG is still limited to the certain purposes. In order to expand the possible application of FDG, this study aims to utilize FDG as an activator for ground granulated blast furnace slag. FDG produced by dry- and wet-process were used for the experiments. Slag paste specimens were produced by mixing with deionized water and simulated pore solution, and the role of FDG as an activator for blast furnace slag was evaluated using hydration study by XRD analysis and compressive strength development. According to the results, dry-type FDG was found to work as an activator for blast furnace slag without the presence of soluble alkalis. However, wet-type FDG needs assistance by soluble alkalis in order to work as an activator for blast furnace slag. It was also found that the substitution of dry- and wet-type FDG into blast furnace slag can increase the 28 day compressive strength of slag paste. It is expected that efficient and economical recycling of FDG will be possible if quantitative analysis of strength enhancement according to substitution rate of both dry- and wet-type FDG.

Keywords : flue-gas desulfurization gypsum, dry-type, wet-type, blast furnace slag, activator

### 1. 서 론

화력발전소의 전력 생산을 위한 연료의 연소 시 다량의 대기오염물질이 발생한다. 대표적인 대기오염물질로는 미세먼지, 황산화물, 질소산화물 및 이산화탄소 등이 존재하며, 점차 강화되는 환경규준으로 인해 이러한 대기오염물질을 처리할 수 있는 시설의 도입은 시대적 요구사항이 되었다. 이로 인해 대기오염물질의 처리과정중에 발생한 다양한 형태의 산업부산물을 처리하기 위한 기술 개발 또한 매우 중요

한 문제로 다가오게 되었다. 화력발전소에서 생산된 산업부산물은 환경보호의 일환으로 점차 폐기보다는 재활용에 초점을 맞추어 활용성을 검토하고 있으며, 전기집진법을 이용하여 얻어진 부산물인 플라이애쉬(fly ash)의 경우 건설현장에서 포졸란재료로써 널리 활용되고 있는 매우 성공적인 산업부산물 재활용의 예시로 볼 수 있다. 그러나 대기중으로 배출되는 황산화물의 제거 시 발생하는 배연탈황석고(Flue gas Desulfurization Gypsum; FDG)의 경우(특히 습식 방식으로 생산되는 경우) 그 순도가 상당히 높음에도 불구하고 현재까지는 석고보드용 원료 외에는 다른 방안으로 적극적인 재활용이 되지 않고 있어 이에 대한 방법을 모색할 필요성이 있다[1,2].

배연탈황석고는 화력발전소에서 황을 함유하는 연료를 사용함에 따라 대기중으로 배출되는 SO<sub>x</sub>성분을 제거하기 위한 공정[3]을 통해 생성되는 산업부산물을 통칭한다. 배연탈황

Received : February 24, 2017

Revision received : March 21, 2017

Accepted : July 14, 2017

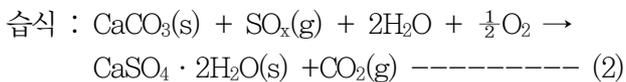
\* Corresponding author : Chung, Chul-Woo

[Tel: 82-51-629-6084, E-mail: cwchung@pknu.ac.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

공정은 흡수제의 수분량에 따라 크게 건식 배연탈황법과 습식 배연탈황법으로 나눌 수 있는데[4,5], 건식 배연탈황법은 배기가스를 분말이나 펠릿형태의 촉매층을 통과 시키는 방법으로 고온의 배기가스 연소실에 건조한 분말형태인 석회석, 소석회, 알칼리 금속화합물 등과 같은 반응제를 분사하여 배기가스에 존재하는  $\text{SO}_x$ 와의 결합을 유도시켜 제거한다. 건식 배연탈황법은 반응제를 고체 상태로 사용하기 때문에 생성물인 탈황석고 또한 고체의 형태로 생성되게 된다.

반대로 습식 배연탈황법은 물, 알칼리성 용액 등의 수분을 함유한 흡수제를 이용하여 배기가스의  $\text{SO}_x$ 를 흡수하는 방법 [6]이다. 흡수제의 종류로는  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  등을 활용하며 연소과정에서 발생된 배연가스는 분진을 제거한 후, 흡수탑에서  $\text{SO}_x$ 를 기체와 액체의 접촉을 통해, 황산화물과 알칼리 반응제가 반응하도록 유도하고, 이를 통해 수분을 함유한 형태(슬러리 형태)의 탈황석고가 생성된다. 건식과 습식 배연탈황법  $\text{SO}_x$  제거과정 화학반응은 다음과 같이 요약할 수 있다[7].



현재 국내 화력발전소에서 발생하는 배연탈황석고의 대부분은 석고보드용 원료 및 시멘트 부원료 등과 같은 용도로 활용되고 있는 것으로 알려져 있다. 향후 배연 탈황 설비의 확대에 인하여 탈황석고의 배출량도 증가될 것을 감안하면, 이에 대응하기 위하여 탈황석고의 활용용도를 확대시키기 위한 관련기술 연구를 통해 배연탈황석고의 재활용률을 높일 필요성이 있다.

석고(특히 무수석고)의 경우 고로슬래그 미분말의 반응성 자극을 위해 사용되는 경우가 많은데[8] 슬래그 자극재로서 사용하는 천연 무수석고 및 화학 무수석고까지 건식 및 습식 방식으로 생산되는 배연탈황석고로 대체할 수 있다면 환경보호에 기여하면서도 생산 원재료의 단가 상승이나 생산효율성 저하에 따른 제조원가상승을 억제할 수 있을 것이다. 이로 인해 충분한 경제적 효과를 누릴 수 있는 동시에 배연탈황석고의 재활용 비율을 높이는 데 큰 기여를 할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 건식 및 습식 배연탈황법으로 생산

된 배연탈황석고(이하 건식 배연탈황석고 및 습식 배연탈황석고)의 슬래그 자극재로서의 역할을 비교 검토하고자 하였다. 따라서 배연탈황석고를 혼입한 고로슬래그 미분말의 수화반응 특성을 연구하고 이를 혼입한 슬래그 미분말로 제작된 페이스트 시험체의 압축강도 변화를 파악하여 건식 및 습식 배연탈황석고의 슬래그 자극재로서의 활용성을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험 재료

본 실험에서는 국내 화력발전소에서 건식 및 습식 배연탈황법으로 생산된 샘플을 사용하였다. 건식과 습식 배연탈황석고의 광물학적 특성의 차이를 비교하기 위해 Rigaku사의 Ultima IV X-ray diffractometer를 활용하여 X-선 회절 분석법(X-Ray Diffraction; XRD)을 실시하였으며, 그 결과를 Figure 1에 나타내었다. Figure 1에 나타난 건식 배연탈황법에 의해 생산된 배연탈황석고의 XRD 패턴에 따르면, 건식배연탈황석고의 주 구성 광물은 생석회(lime;  $\text{CaO}$ ), 무수석고(anhydrite;  $\text{CaSO}_4$ ), 방해석(calcite;  $\text{CaCO}_3$ ), 석영(quartz;  $\text{SiO}_2$ ) 및 수산화칼슘(portlandite;  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이 중 수산화칼슘의 존재는 내부의 생석회 성분과 대기 중의 수분이 결합하여 소량의 수산화칼슘을 생성시켰기 때문으로 사료된다.

Figure 2는 습식 배연탈황법에 의해 생산된 배연탈황석고의 XRD 패턴을 나타낸 것이다. 습식 배연탈황석고는 건식과는 달리 단일형태의 광물상인 이수석고(gypsum;  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 만이 관찰되었다. XRD 패턴에 따르면 다른 불순물들이 거의 함유되어 있지 않은 천연석고의 광물학적 패턴과 매우 유사함을 확인할 수 있었는데 건식과 습식 배연탈황석고의 광물학적특성이 매우 상이한 것은 배연탈황 공정에 따른 차이 때문으로 보인다.

본 연구에 사용된 고로슬래그 미분말의 XRD 패턴은 Figure 3에 나타나 있다. Figure 3에 나타난 고로슬래그 미분말의 XRD 패턴에서는 Figure 1 및 2에 나타난 건식 및 습식 배연탈황석고와 같은 조건에서 스캔되었음에도 불구하고 Figure 1 및 2에서 관찰된 것과 같은 결정성의 날카로운 peak를 전혀 확인할 수 없었다. 고로슬래그 미분말의 peak는 매우 완만한 형태로 구성되어 있음을 확인할 수 있는데, 이는 본 실험에 사용된 슬래그가 전형적인 비결정성

칼슘실리케이트임을 의미한다. 또한 본 연구에서는 배연탈황석고의 고로슬래그 미분말 자극 효과를 검증하기 위해서 고로슬래그는 처리과정에서 무수석고를 인위적으로 투입하지 않은 재료를 사용해야 할 필요가 있었는데 이는 Figure 3의 XRD 패턴에서 무수석고의 peak이 나타나지 않은 것을 통해 확인할 수 있었다.

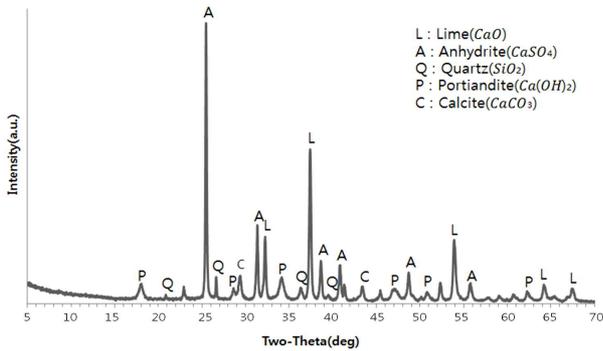


Figure 1. XRD pattern of flue gas desulfurization gypsum produced by dry process

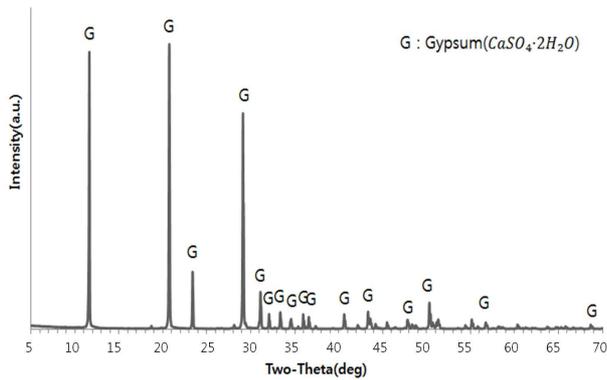


Figure 2. XRD pattern of flue gas desulfurization gypsum produced by wet process

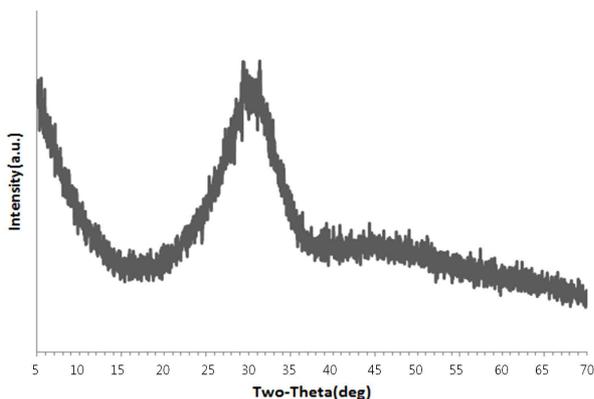


Figure 3. XRD pattern of blast furnace slag

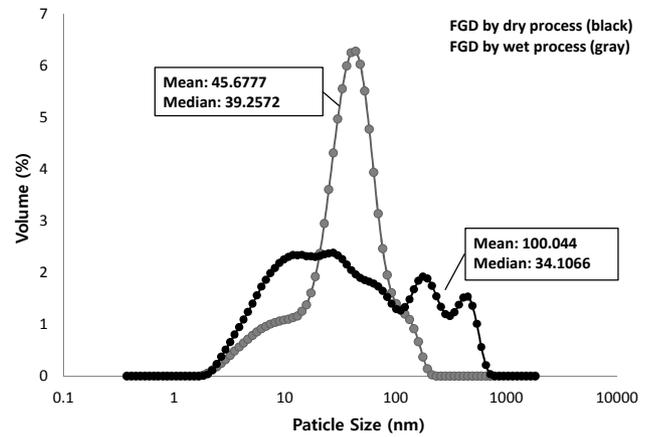


Figure 4. Particle Size distribution of flue gas desulfurization gypsum

Figure 4는 건식과 습식배연탈황석고의 입도를 분석한 결과이다. 입자크기는 LS 13320 레이저 회절 입자 크기 분석기(Beckman Coulter, USA)로 측정하였다.

## 2.2 실험 방법

본 연구에서 배연탈황석고의 슬래그 자극 효과를 확인하기 위한 방법은 크게 두 가지로 구성된다.

첫 번째는 배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트의 수화반응 특성을 XRD 분석을 통해 확인하는 것이며, 두 번째는 배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트의 28일 재령에서의 압축강도 특성을 확인하는 것이다.

### 2.2.1 고로슬래그 미분말의 수화반응 분석

배연탈황석고의 종류에 따른 고로슬래그 미분말의 수화반응 특성의 차이를 비교·분석하기 위하여 고로슬래그 미분말 대비 배연탈황석고의 치환율을 5%로 고정하였다. 그리고 석고의 종류를 건식 배연탈황석고 및 습식 배연탈황석고로 구분하여 석고 및 무수석고 성분이 포함되어 있지 않은 고로슬래그 미분말에 혼입하였다. 배합수는 초순수(18.2MΩ cm) 및 모사공극용액(초순수 1l 당 0.6M KOH, 0.2M NaOH, 0.001M Ca(OH)<sub>2</sub>를 함유)[9]를 사용하였다. 물결합재비(W/B)는 0.4로 고정하여 슬래그 페이스트 시험체를 제작하였으며, 모든 시편은 제작 1일 후 탈형하였다. 또한 시험체 양생 3일 후 XRD 시험을 실시하여 반응후의 광물학적 특성을 비교 분석하였다. 본 실험에 사용된 배합비 및 실험조건은 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Experimental plan for hydration study

Experimental factor	Experimental level
Binder conditions	BFS <sup>a)</sup> +FDG <sup>b)</sup>
Replacement ratio of FDG	5(wt.%)
W/B	40%
Curing conditions	Temperature (20±2°C), 3days
Test item	XRD

a) BFS : Blast Furnace Slag

b) FDG : Flue Gas Desulfurization Gypsum

본 실험에서 모사공극용액을 활용한 이유는 슬래그의 수화반응 메커니즘을 확인하고자 하였고, 이를 통해 슬래그의 반응량 정도를 조금 더 정밀하게 파악해 보기 위함이다. 따라서 본 실험에서 얻은 결론은 시멘트를 혼입한 시스템에서 얻은 결론과는 100% 일치하지 않을 수 있지만, 시멘트에 혼입하여 측정하는 경우 강도발현 측면에서 슬래그의 반응성이 일부 저하되더라도 시멘트에 의한 강도발현 특성이 매우 커서 슬래그 자극에 의한 효과가 작게 드러날 수 있기 때문이다.

### 2.2.2 고로슬래그 미분말의 압축강도

배연탈황석고 치환율에 따른 역학적 특성의 변화를 관찰하기 위하여 고로슬래그 미분말 대비 배연탈황석고의 치환율을 2.5, 5, 7.5(%)로 변화시킨 후 슬래그 페이스트를 제작하여 28일 압축강도를 측정하였다. Table 2는 압축강도 실험 계획에 대해 요약 정리한 것이다. W/B는 0.4로 고정하였으며 배합수로는 초순수(18.2MΩcm) 및 모사공극용액(초순수 1l 당 0.6M KOH, 0.2M NaOH, 0.001M Ca(OH)<sub>2</sub>를 함유)을 사용하였다.

배합이 완료된 슬래그 페이스트는 5cm×5cm×5cm 각형 몰드에 성형하였으며 배합 1일 후에 몰드를 제거하고 포화수산화칼슘 수용액에 침지시킨 후 (20±2°C) 재령 28일에 압축강도를 측정하였다.

Table 2. Experimental plan for compressive strength of slag paste

Experimental factor	Experimental level
Binder conditions	BFS <sup>a)</sup> +FDG <sup>b)</sup>
Replacement ratio of FDG	2.5, 5, 7.5(wt.%)
W/B	40%
Curing conditions	Saturated lime solution Temperature (20±2°C)
Test item	Compressive strength (28days)

a) BFS : Blast Furnace Slag

b) FDG : Flue Gas Desulfurization Gypsum

## 3. 실험 결과

### 3.1 배연탈황석고의 수화특성

Figure 1에서 나타난 건식 배연탈황석고의 XRD 패턴을 고려하면 습식 배연탈황석고와는(이수석고로 구성됨) 달리 건식 탈황석고에 존재하는 생석회와 물과 반응하여 일정량의 수화물을 생성시킬 수 있는 것으로 판단된다. 건식 배연탈황석고 내부의 생석회 성분의 반응성을 명확하게 확인하기 위해 건식 배연탈황석고에 초순수(deionized water)를 배합한 페이스트를 제작하였고, 이의 XRD 패턴을 Figure 5에 나타내었다.

Figure 5에 따르면 물과 반응한 후 생석회의 peak는 사라지고 수산화칼슘(portlandite)의 peak가 두드러지게 증가하는 것을 확인되었는데, 이는 생석회의 수화반응을 통한 수산화칼슘의 생성과 관련된 것이다.

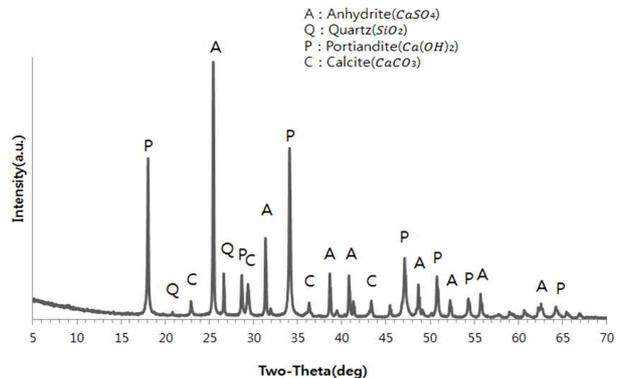
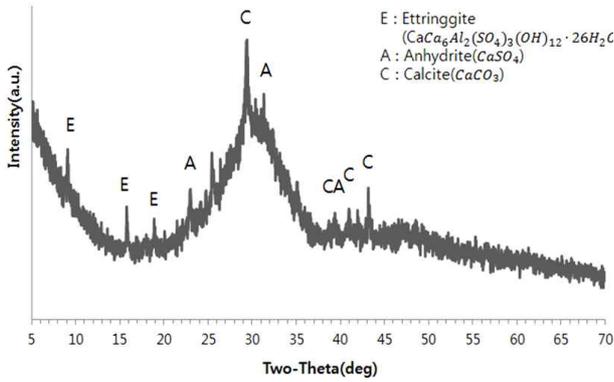


Figure 5. XRD patterns of flue gas desulfurization gypsum produced by dry process and deionized water

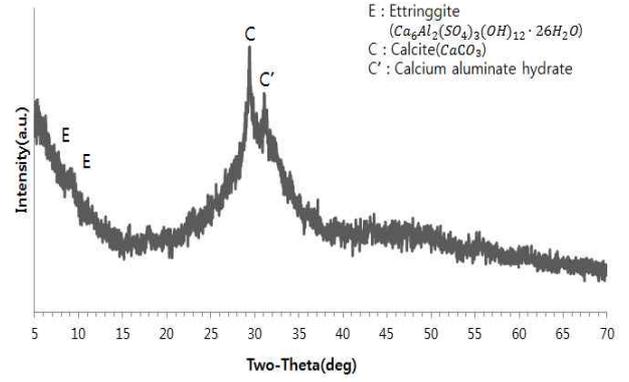
### 3.2 배연탈황석고 혼입 고로슬래그 페이스트 수화특성

건식과 습식 배연탈황석고를 고로슬래그 미분말 대비 5% 치환한 후 초순수와 배합한 슬래그 페이스트 시험체의 XRD 패턴 결과는 Figure 6에 나타내었다.

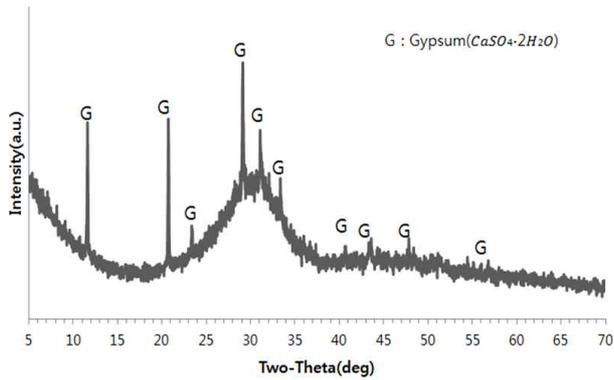
Figure 6 (a)에 따르면 슬래그에 건식 배연탈황석고를 혼입하고 초순수를 배합수로 활용하는 경우 에트링가이트(ettringite)를 생성하는 것을 확인하였으며, 건식 배연탈황석고에서 존재하는 무수석고 및 방해석이 3일 이후에도 반응하지 않고 여전히 존재함을 알 수 있었다. 에트링가이트의 생성은 앞서 언급된 바와 같이 건식 배연탈황석고 내부에 존재하는 생석회의 수화반응과 관계가 있으며, 생석회 성분의 수화반응으로 생성된 수산화칼슘이 고로슬래그 미분말을



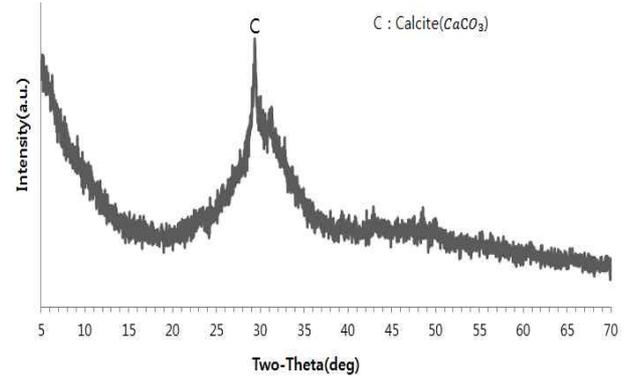
(a)



(a)



(b)



(b)

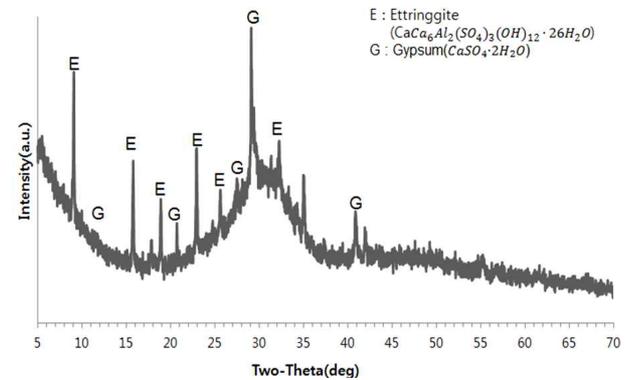
Figure 6. XRD patterns of hydrated slag paste incorporating 5% of flue gas desulfurization gypsum and deionized water; (a) using FDG by dry process; (b) using FDG by wet process

자극하여 슬래그 내부의 비결정성 칼슘실리케이트 및 비결정성 칼슘알루미네이트 성분의 반응을 유도한 것으로 사료된다.

칼슘실리케이트 수화물의 경우 비결정성이므로 XRD 패턴으로는 명확한 확인이 불가능하였으나, 칼슘알루미네이트 계열의 성분은 내부에 존재하는 무수석고와 반응하여 일정량의 에트링가이트를 생성시켰으며 에트링가이트의 경우 결정성의 광물이므로 XRD 패턴에서 확인이 가능하였던 것으로 사료된다.

그러나 슬래그에 습식 배연탈황석고를 치환하여 초순수와 배합한 경우에는(Figure 6 (b)) 이수석고의 peak만 명확하게 보이고 다른 수화생성물의 존재여부를 확인할 수 없었다. 이는 초순수를 배합수로 활용하는 경우 습식 배연탈황석고는 고로슬래그 미분말의 자극효과가 거의 없음을 의미한다.

Figure 7은 배합수를 모사공극용액(simulated pore solution)으로 사용하였을 때의 슬래그 페이스트의 XRD 패



(c)

Figure 7. XRD patterns of hydrated slag paste incorporating 5% of flue gas desulfurization gypsum and simulated pore solution; (a) without FDG (slag only paste), (b) using FDG by dry process, and (c) using FDG by wet process

턴을 나타낸 것이다. 모사공극용액을 사용한 이유는 시멘트 페이스트와 유사한 환경 하에서 건식 및 습식 배연탈황석고의 슬래그 자극효과를 관찰하기 위함이다. Figure 7 (a)의 탈황석고를 혼입하지 않은 슬래그 페이스트의 XRD 패턴에 따르면 모사공극용액의 존재하에서 슬래그는 다소간의 반응성

을 보이며, 회절각  $2\theta$  29.4~29.5° 사이에 방해석의 peak (재료의 탄산화로 인해 발생한 것으로 추정됨) 혹은 C-S-H로 추정되는 peak가(슬래그 페이스트의 수화반응으로 인해 발생한 것으로 추정할 수 있음) 관찰되었다.

Figure 7 (b)에 나타난 건식배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트의 경우 초순수를 혼입하였을 경우와는 달리 에트링가이트 peak가 거의 관찰되지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 모사공극용액의 존재 하에서 건식 배연탈황석고의 반응성이 오히려 저하될 수 있음을 의미한다. 그러나 건식 탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트와는 대조적으로 Figure 7 (c)에 나타난 습식 배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트의 XRD 패턴에서는 이수석고의 peak가 상대적으로 감소하고 매우 명확한 에트링가이트 peak가 관찰되었다. 이는 습식 배연탈황석고의 경우 모사공극용액의 존재하에서만 에트링가이트의 생성에 간여할 수 있음을 나타낸다.

일반적으로 슬래그의 화학반응 메커니즘은 초기 자극은  $\text{Ca(OH)}_2$ 에 의해 이루어지고, 이는 고로슬래그가 물과 만나 형성한 Si-O-Si의 막구조를 파괴하게 되어  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  등의 용출을 일으켜 C-S-H 및 C-A-H의 수화물을 형성하는 것으로 알려져 있다. 이후 석고의  $\text{SO}_4^{2-}$  성분이 에트링가이트의 형성에 관여함으로써 강도형성이 기여하게 된다[10]. 본 실험에서 사용된 건식 탈황석고의 경우 CaO와  $\text{CaSO}_4$ 의 존재로 자체적인  $\text{Ca(OH)}_2$  생성을 통한 자극효과를 가질 수 있으나, 습식 탈황석고의 경우  $\text{Ca(OH)}_2$ 가 없어 모사공극용액의 존재하에서만 자극효과를 보이는 것으로 결론지을 수 있다.

### 3.3 배연 탈황석고 혼입 고로슬래그 페이스트의 압축강도

Figure 8은 건식 배연탈황석고의 치환율에 따른 초순수와 모사공극용액을 배합수로 한 슬래그 페이스트의 28일 압축강도 결과를 나타낸 그래프이다. Figure 8에는 나타나 있지 않지만, 앞서 언급된 바와 같이 슬래그 페이스트의 경우 모사공극용액을 활용하지 않으면 강도발현이 전혀 일어나지 않았다. 그러나 Figure 8에서 나타난 결과에 따르면, 슬래그의 2.5%, 5%, 7.5% 만큼 건식 배연탈황석고가 치환되고 배합수로 초순수를 사용하는 경우 28일 재령에서 각각 10.76, 14.8 및 19.56MPa의 압축강도 값이 나타나, 배연탈황석고의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 초순수만 활용하였는데도 불구하고 상당한 강도발현 성상을 보였는데, 이는 건식 배연탈황석고의

경우 별도의 알칼리 자극이 없어도 슬래그의 반응을 유도하는 성분을 가지고 있음을 의미한다. 따라서 건식 배연탈황석고는 자체적으로 슬래그의 자극효과를 가짐을 확인할 수 있었다.

모사공극용액을 배합수로 사용한 경우에도 건식 배연탈황석고를 치환한 슬래그 페이스트의 압축강도는 28일 재령에서 각각 8.79, 11.42 및 16.68MPa로 건식 배연탈황석고의 혼입률이 증가할수록 상당한 압축강도의 상승폭을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 전반적으로 모사공극용액보다는 초순수를 배합수로 활용한 경우에 더욱 높은 압축강도를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

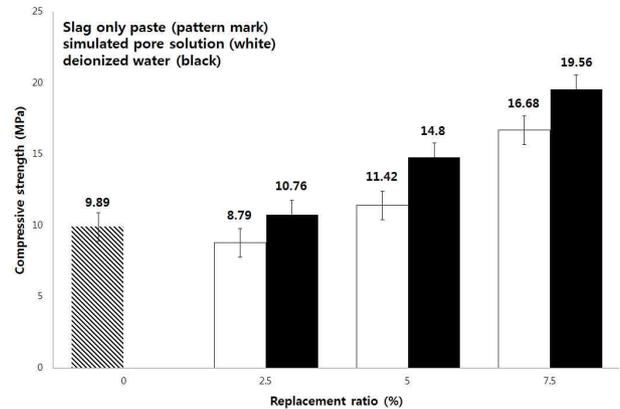


Figure 8. Compressive strength of hydrated slag paste incorporating 0, 2.5, 5, and 7.5% of flue gas desulfurization gypsum by dry process. Note that slag pastes were made using simulated pore solution

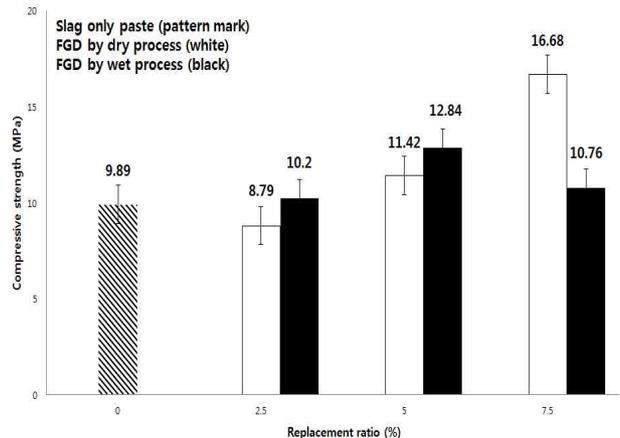


Figure 9. Compressive strength of hydrated slag paste incorporating 0, 2.5, 5, and 7.5% of flue gas desulfurization gypsum and simulated pore solution

이러한 결과는 Figure 6 및 7에서 나타난 결과와 매우 유사한 것으로 건식 탈황석고를 활용하는 경우 별도의 알칼리 자극은 슬래그 페이스트의 수화생성반응을 오히려 억제하여 강도발현성상을 저하시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 건식 배연탈황석고를 슬래그의 자극재로써 활용하는 경우, 이러한 슬래그를 시멘트의 대체 재료로 투입하는 방안은 모사공극용액의 존재 하에서 다소간 역학적 성능이 저하되는 건식 배연탈황석고의 특성에 대한 명확한 이해가 선행되기 전에는 활용하지 않는 것이 옳다고 사료된다.

Figure 9는 건식과 습식 배연탈황석고의 치환율에 따른 모사공극용액을 배합수로 한 슬래그 페이스트의 28일 압축강도 결과이다. 앞서 건식과 달리 습식 배연탈황석고의 경우 Figure 6 (b)에서 초순수를 배합수로 활용하는 경우 고로슬래그 미분말의 자극효과를 전혀 가지지 않음을 확인하였고, 이에 배합수로 모사공극용액만을 사용하여 실험을 진행하였다.

Figure 9에 따르면 모사공극용액을 사용한 경우, 건식 배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트는 건식 배연탈황석고 치환율이 높아짐에 따라 슬래그 페이스트의 28일 압축강도가 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 5% 이상 치환하여야만 습식 배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트보다 높은 압축강도가 나타났다. 또한 7.5%의 건식 배연탈황석고를 혼입한 슬래그 페이스트의 28일 압축강도가 가장 높게 나타났는데 이러한 결과가 나타난 이유는 슬래그 페이스트의 자극을 위해서는 적정량 이상의 석고가 필요한데 건식 배연탈황석고는 무수석고 이외에도 다양한 형태의 광물을 함께 함유하고 있어 5% 이하의 건식 배연탈황석고로는 충분한 자극효과를 얻을 수 없었기 때문인 것으로 사료된다. 이는 건식 배연탈황석고의 활용에 있어서 매우 중요할 수 있는 부분으로 건식 배연탈황석고 내부에 존재하는 생석회의 양 및 무수석고의 양이 슬래그의 자극에 미치는 영향에 대해 명확하게 규명하여야만 신뢰성 있는 활용방안을 도출할 수 있다.

반면, 모사공극용액을 배합수로 하여 습식 배연탈황석고를 치환한 슬래그 페이스트의 경우 치환율 5%까지 건식 배연탈황석고에 비해 압축강도가 높게 나타났으며, 5% 치환한 것이 가장 높은 강도를 나타냄을 알 수 있었다. 그러나 7.5% 치환된 배연탈황석고 혼입 슬래그 페이스트의 경우 오히려 강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 습식 배연탈황석고가 순수한 형태의 석고( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )이기 때문에[11] 건식에 비해 적은 양으로도 슬래그의 자극효과를 충분히 얻을 수 있었던 것으로 사료되며, 특정 함량을

넘어서는 경우 오히려 강도가 저감되는 것은 적정량보다 과다 투입되었기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 슬래그 자극재로서 배연탈황석고의 활용가능성을 평가하기 위해, 슬래그에 건식과 습식 배연탈황석고를 치환하여 제작한 슬래그 페이스트 시험체의 XRD 분석과 재령 28일 압축강도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 건식 배연탈황석고는 생석회의 수화반응 때문에 자체적으로 경화반응을 진행시킬 수 있는 것으로 나타났으나, 습식 배연탈황석고의 경우 초순수와 배합하여도 아무런 반응이 발생하지 않았다.
- 2) 건식 배연탈황석고의 경우 생석회 성분의 수화반응을 통해 생성된 수산화칼슘 및 무수석고가 슬래그의 반응성을 자극하는 것으로 보인다.
- 3) 습식 배연탈황석고의 경우 고로슬래그 미분말의 자극을 위해서는 일정수준 이상의 알칼리량이 필요한 것으로 나타났다.
- 4) 건식 배연탈황석고를 치환한 슬래그 페이스트의 경우 모사공극용액보다 초순수를 배합수로 활용한 것이 더 높은 강도를 나타냈다. 이는 건식 배연탈황석고의 경우 별도의 알칼리 자극이 가해지면 슬래그의 반응을 오히려 제어하여 강도성상을 저하시킬 수 있음을 의미한다.
- 5) 모사공극용액을 배합수로 활용한 건식과 습식 배연탈황석고 치환 슬래그 페이스트의 28일 압축강도는 건식 배연탈황석고의 경우 7.5% 치환 시 가장 높은 강도를 보였으며 습식 배연탈황석고의 경우 5% 치환한 것이 가장 높은 강도를 나타냈다.

#### 요 약

화력발전소의 전력 생산을 위한 연료의 연소 시 발생한 황산화물의 제거과정에서 생산되는 배연탈황석고의 경우 현재까지는 적극적인 재활용이 되지 않고 있다. 본 연구는 화력발전소의 배연탈황공정인 건식, 습식공법을 통해 발생된 배연탈황석고의 슬래그 자극재로써의 활용가능성을 연구하

기 위하여 일정량의 건식 및 습식 배연탈황석고를 고로슬래그 미분말에 치환하고, 슬래그 페이스트를 제작한 후, 그에 따른 수화반응 특성과 압축강도 특성을 분석해서 슬래그 자극재나 천연석고의 대체재로서 역할을 할 수 있는지 검토하고자 하였다.

본 연구의 결과에 따르면, 건식 배연탈황석고의 경우 별도의 알칼리 자극이 없어도 슬래그를 충분히 자극하는 것으로 보이며, 습식배연탈황석고의 경우 일정수준 이상의 알칼리 자극이 주어지야만 충분한 슬래그 자극효과를 볼 수 있는 것으로 나타났다. 또한 건식과 습식 배연탈황석고를 슬래그 페이스트에 적정량 치환하면 슬래그 페이스트의 압축강도 개선효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

추후 추가적인 연구를 통해 치환율에 따른 강도증진 성상을 정량적으로 규명하면 배연탈황석고의 효율적·경제적 재 활용이 가능하게 될 것으로 사료된다.

**키워드** : 배연탈황석고, 건식, 습식, 슬래그, 자극재

## Acknowledgement

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2016Year).

## References

1. Hyun JY, Jeong SB, Chae YB, Kim BS. Manufacture and Application of anhydrous calcium sulfate from flue gas desulfurization gypsum. *Journal of The Korean Institute of Resources Recycling*. 2015 Apr;14(2):11-3.
2. Tesarek P, Drchalová J, Kolísko J, Rovnaníková P, Černý R. Flue gas desulfurization gypsum: Study of basic mechanical, hydric and thermal properties. *Construction and Building Materials*. 2007 Jul;21(7):1500-09.
3. Srivastava RK, Jozewicz W. Flue gas desulfurization: the state of the art. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2001 Dec;51(12):1676-88.
4. Guo XL, Shi HS. Thermal treatment and utilization of flue gas desulphurization gypsum as an admixture in cement and concrete. *Construction and Building Materials*. 2008 Jul;22(7):1471-76.
5. Galos KA, Smakowski TS, Jzlugaj J. Flue gas desulphurisation products from Polish coal-fired power-plants. *Applied Energy*. 2003 Feb;75(3-4):257-65.
6. Ishizuka T, Tsuchiai H, Murayama T, Tanaka T, Hattori H. Preparation of active absorbent for dry-type flue gas desulfurization from calcium oxide, coal fly ash, and gypsum. *Industrial & engineering chemistry research*. 2000 Mar;39(5):1390-96.
7. Lee HG. Flue gas desulfurization plant. Korea: The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea; 2007 Dec;36(12):34-6.
8. Lee HY. Effect of blast furnace slag matrix by alkali activator and sulfate activator[Dissertation]. [Jeonju (Korea)]: Chonbuk National University;2007. 54 p.
9. Scrivener K,L, Young J,F. Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems, Boston, E&FN SPON; 1995, Part 1, Microstructure and Mechanisms of Chemical Degradation; p. 3-22.
10. Taylor HFW. *Cement Chemistry*. 2nd ed. London: Thomas Telford; 1997. 459 p.
11. Chung CW, Lee JY, Kim JH, Kim YS. Investigation on properties of cement mortar using heat treated flue gas desulfurization gypsum. *Journal of The Korea Institute of Building Construction*. 2016 Dec;16(6):497-503.