

# 혼합 촉진 장치의 형상에 따른 탈황효율 비교

## Comparison of the SO<sub>2</sub> Removal Efficiency by Mixing Enhancement Shape

정진도<sup>†</sup> · 김장우\* · 배영필\*\*

Jin-Do Chung<sup>†</sup> · Jang-Woo Kim\* · Young-Peel Bae\*\*

호서대학교 환경공학과, \*호서대학교 디스플레이공학부, \*\*호서대학교 대학원 반도체디스플레이공학과

Department of Environmental Engineering, Hoseo University

\*Division of Display Engineering, Hoseo University

\*\*School of Graduate, Department of Semiconductor & Display Engineering, Hoseo University

(2008년 10월 20일 접수, 2009년 12월 14일 채택)

**ABSTRACT** : The aim of this study is to research applicable possibility of DSI (Dry Sorbent Injection) technique in SO<sub>2</sub> removal process using lab-scale facility based on 500MW in capacity coal-fired thermal power plant operated by South Korea N. Power Co., Ltd.

To increase the SO<sub>2</sub> removal efficiency, it is considered the mixing enhancement as different shapes called lobed-plate and step-plate tested ultimately for optimum shape. Also it tested to analysis SO<sub>2</sub> removal efficiency by numbers of injection holes. At experimental it showed the SO<sub>2</sub> removal efficiency is higher using mixing enhancement than not installed mixing enhancement and case on the step-plate was shown the most SO<sub>2</sub> removal efficiency. Also, SO<sub>2</sub> removal efficiency was higher recording which will increase the injection holes case on not installed mixing enhancement. But, the SO<sub>2</sub> removal efficiency was higher 4 injection holes case on installed mixing enhancement.

**Key words** : Sonolysis, Multi-irradiation, Ultrasound, Pyrolysis, Trichloroethylene

**요약** : 본 연구의 목적은 대형 석탄 화력 발전소에 DSI (Dry Sorbent Injection)공정을 실제 적용 할 경우에 실현 가능성에 대한 연구로서 N 발전(주)의 S 화력발전본부에서 운용중인 500MW급 석탄화력 발전시설의 보일러 후단에서 전기 집진기 전 단까지를 모델로 삼아 Lab-scale 실험장치를 제작하여 탈황효율을 높이기 위한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 Lobed-plate와 Step-plate라는 혼합촉진장치를 고안하고 각각 형상을 달리하여 궁극적으로 탈황효율을 높이기 위한 혼합촉진장치의 최적 형상도출을 위한 실험을 수행하였으며 부수적으로 탈황제의 분사구의 개수에 따른 탈황효율 또한 분석하였다. 그 결과 혼합촉진장치가 설치된 경우가 더 높은 탈황 효율을 나타내었고 형상에서는 계단형상일 경우 가장 높은 탈황효율을 보였다. 또한, 탈황제의 분사구의 개수에 따른 탈황효율은 혼합 촉진 장치가 설치되지 않은 경우, 분사구의 개수가 증가할수록 높은 탈황 효율을 보였으나 혼합촉진장치가 설치된 경우는 분사구의 개수가 4개일 경우가 이론적 결과와 같이 가장 높은 탈황효율을 나타내었다.

**주제어** : DSI, Lab-scale, 탈황효율, 혼합촉진장치, 분사구

## 1. 서론

우리나라는 급격한 경제성장과 국민소득의 향상으로 편리하고 깨끗한 에너지에 대한 선호도가 증가하고 있으며 특히 전기 에너지 이용도는 날로 증가하는 추세이며 에너지의 수요 증가는 발전원에서 야기되는 환경오염 물질의 증가로 이어졌다.<sup>1)</sup> 특히, 석탄을 연료로 사용하는 화력 발전소는 심각한 대기오염물질 배출원으로 황산화물의 주 발생 원인으로 인식되고 있다. 황산화물을 제거하는 방법으로 배연탈황공정(FGD : Flue Gas Desulfurization)을 통해서 황산화물을 제거 필요

하다.<sup>2,3)</sup>

이 배연탈황공정 중 건식탈황공정은 황산화물의 제거효율이나 기술적인 신뢰성, 경제성이 습식에 비해 낮았기 때문에 큰 진전을 이루지 못하였지만 최근에 고온 연소로뿐만 아니라 덕트에서도 탈황제를 주입할 수 있고 습식 공정 보다 적은 투자비용으로 배출 규제치를 만족시킬 수 있게 되어 새로운 관심을 갖게 되었다.<sup>4,5)</sup> 특히, 건식탈황공정 중 DSI(Dry Sorbent Injection) 공정은 습식탈황공정에 비해 투자비용이 적게 들고 설치 면적이 크지 않기 때문에<sup>6)</sup> 가동 중에 있는 발전소에서 적용할 수 있는 배가스 탈황장치 중에서 가장 이점

<sup>†</sup> Corresponding author : E-mail : jdchung@hoseo.edu Tel : 041-540-5743 Fax : 041-540-5748

이 있는 공정으로 인식되고 있다.<sup>7)</sup>

본 연구의 예비 연구로 Vortex에 의한 DSI 공정 중 혼합효율 향상에 관한 연구에서 효율 개선에 대한 수치해석을 수행한 결과를 바탕으로<sup>8)</sup> 본 연구에서는 설비의 개조가 용이하고 공정 설비비용이 경제적인 건식탈황공정 중 DSI 공정을 적용하기 위한 실험적 연구이다. 하지만 본 공정은 황산화물과 탈황제의 낮은 접촉율과 짧은 반응시간으로 비교적 낮은 탈황효율을 보이고 있는데 이를 해결하기 위하여 Lobed-plate와 Step-plate라는 혼합촉진장치(mixing enhancement)를 고안하여 장치의 유무와 형상에 따른 탈황효율을 검증하였다. 또한 덕트형상 반응기 내 배가스와 탈황제의 혼합을 돕기 위하여 탈황제의 분사구(Injection hole)의 개수를 달리하였고 그에 따른 탈황효율도 분석하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1. Ca(OH)<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>의 반응원리

황산화물 가스를 제어하기 위한 건식탈황제로서 Ca계 및 Na계 가 가장 널리 쓰이고 있으나 Mg, Fe, Cu 등의 알칼리계 금속도 많이 이용되고 있는 실정이다.<sup>9)</sup> 각각의 물질마다 반응성 및 경제성에 따른 장단점이 있겠지만 본 논문에서는 Ca계 탈황제인 Ca(OH)<sub>2</sub>를 이용하였으며, 본 연구에 적용된 방법으로는 DSI 공정 중 덕트형상 반응기 내에 Ca(OH)<sub>2</sub>를 분사하는 방법론을 적용하였다.

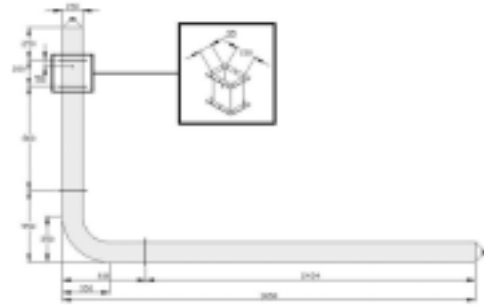
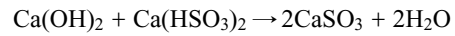
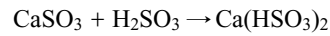
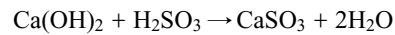
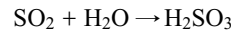


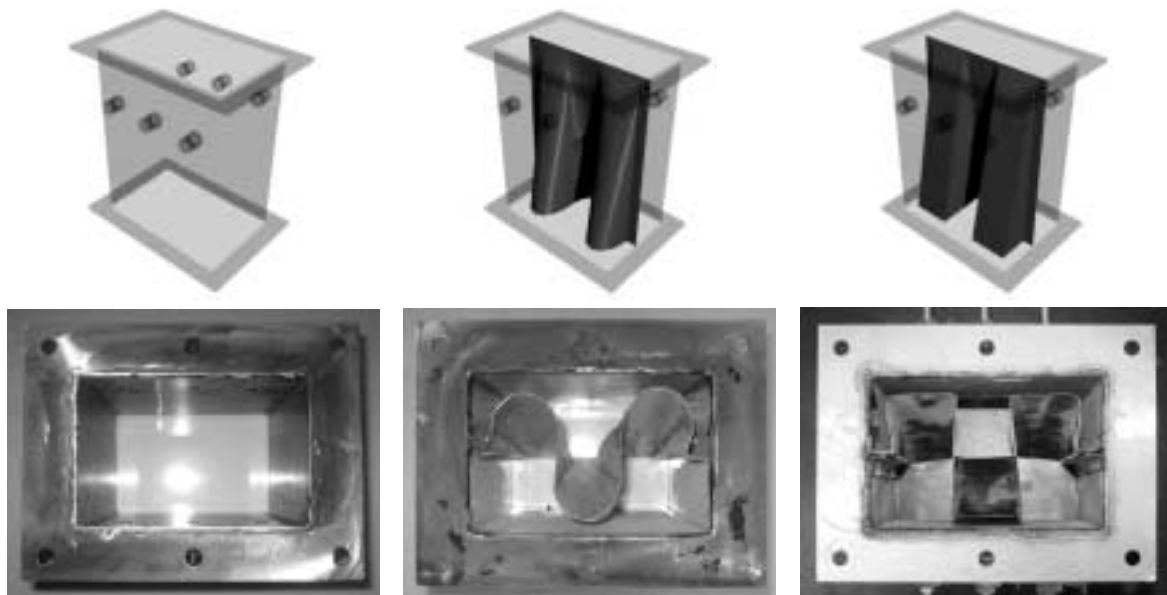
Fig. 1. Photograph of lab-scale facility.

탈황공정에서 Ca(OH)<sub>2</sub>의 SO<sub>2</sub>와의 반응에 대하여는 여러 반응 기구가 제안되어 있으며 일반적으로 다음과정을 통하여 일어나는 것으로 알려져 있다.<sup>10)</sup>



## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1. Lab-scale 실험장치



(a) No mixing enhancement

(b) Installed lobed-plate

(c) Installed step-plate

Fig. 2. Shapes of mixing enhancement.

실험장치 Fig. 1은 Lab-scale 실험장치의 시스템을 보여 준다. 본 실험 장치는 N화력 S발전본부에서 운영 중인 발전 시설의 보일러 후단과 전기 집진기 사이에 존재하는 덕트의 형상을 토대로 제작되었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 실험장치는 덕트형상 반응기, 반응가스, 시료 분사부, 시료 공급장치, 수증기 공급장치 및 장치제어부로 구성되어 있다.

반응기의 형상은 사각 덕트로서 연구대상인 N화력 S발전 본부의 덕트 형상과 유사하도록 구성하였고 반응기 내 유속을 0.32 m/s로 고정하여 연구를 수행할 경우 탈황제와 가스의 반응이 최대 12초 이상 반응할 수 있도록 높이 1.8 m, 길이 3 m로 설정하여 덕트의 유효길이가 4.7 m 이상 되도록 제작하였다.

### 3.2. 혼합촉진장치

황산화물의 제거효율 향상을 위해 기존의 Lab-scale 실험 장치에 추가로 Lobed-plate와 Step-plate라고 하는 혼합촉진장치를 반응기의 시료 분사부에 Fig. 2와 같이 탈부착이 가능하도록 설치하였다. 혼합촉진장치의 설치목적은 반응기 내 유동장의 변화를 더욱 많이 생기게 하여 탈황제와 가스의 혼합을 촉진시키는 역할<sup>11)</sup>을 하기 위함이다.

이 장치는 본래 초음속 기류에 연료를 혼합하여 원활한 연소 성능을 얻기 위해 스크램제트엔진(Scram Jet : Supersonic combustion ram jet) 등에 적용이 검토되었던 것으로 직선으로 된 평판이며 길이 방향으로 진행할수록 일정한 주기와 연결되어진 기하학적 형상이다.<sup>12~14)</sup> 본 논문에서는 주기곡선의 마루와 골의 최대 길이가 85 mm, 폭 150 mm, 높이 200 mm인 물결형상과 계단형상 혼합촉진장치를 고안하여 이 장치의 유무와 형상에 따른 탈황효율을 분석하였다.

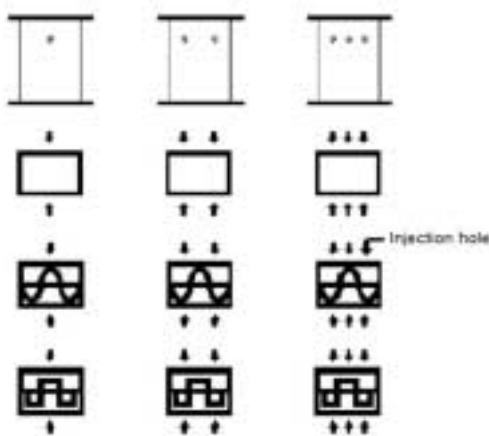


Fig. 3. Number of injection holes.

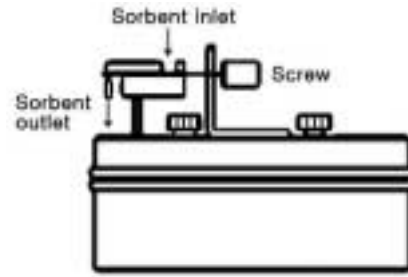


Fig. 4. Schematic diagram of screw feeder.

### 3.3. 탈황제 분사

탈황제는 분사부의 서로 마주보는 면에 분사구를 각각 3개씩 설치하여 최소 1개에서 최대 6개의 분사구에서 분사가 되도록 하였다. 탈황제의 반응기 내 분사방법은 강한 기류에 탈황제 입자를 실어 반응기 내에 분사하는 방법<sup>15)</sup>으로 분사각도는 반응기 내 기류에 수직 방향이며 Fig. 3와 같이 각각 다른 분사구의 개수(2개, 4개, 6개)에 따른 탈황효율의 분석이 가능하도록 구성하였다.

또한, 정확한 탈황제의 공급이 가능하도록 Screw type의 공급 피더를 이용하여 탈황제를 분사하였다.<sup>16)</sup> Sorbent inlet으로 유입된 탈황제는 Screw장치가 회전함에 따라 Sorbent outlet으로 일정량이 배출된다.

### 3.4. 반응가스와 소석회 특성 및 실험조건

본 실험에서는 실험조건의 제약으로 연소가스를 사용하지 않고 제조된 5%의 SO<sub>2</sub>를 함유한 SO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>혼합가스를 사용하였다. 이렇게 제조된 혼합가스는 덕트형상 반응기로 유입된 혼합되어 140 ppm의 농도로 유입이 가능하도록 구성하였다. 가스의 유입량은 Mass flow meter로 조정이 가능하다.

반응기 내로 유입된 일정농도의(140 ppm)의 황산화물을 제거하기 위한 탈황제로 평균입경 5 μm인 소석회(평균 비표면적 : 40.5 m<sup>2</sup>/g, 세공용적 : 0.124 cm<sup>3</sup>/g)를 사용하였고 탈황제는 황산화물과 반응에 해당하는 이론적 양론비 SR3으로 분사된다. 또한 탈황 효율 분석 시 환경적 요인에 의한 실험의 부정확성을 방지하기 위하여 반응기 내 온도는 25°C, 습도

Table 1. Operating conditions of lab.-scale facility

Experimental components	Characteristics
Solid phase	Sorbent : Ca(OH) <sub>2</sub>
Gas phase	Composition : SO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> + Air Total flow rate : 4.56 × 10 <sup>-3</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Operating Parameters	Calcium to sulfur molar ratio (Ca/S) : 3 SO <sub>2</sub> Inlet concentration : 140 (ppm) Temperature : 25(°C) Relative humidity : 10 (RH%) Numbers of injection holes : 2ea, 4ea, 6ea

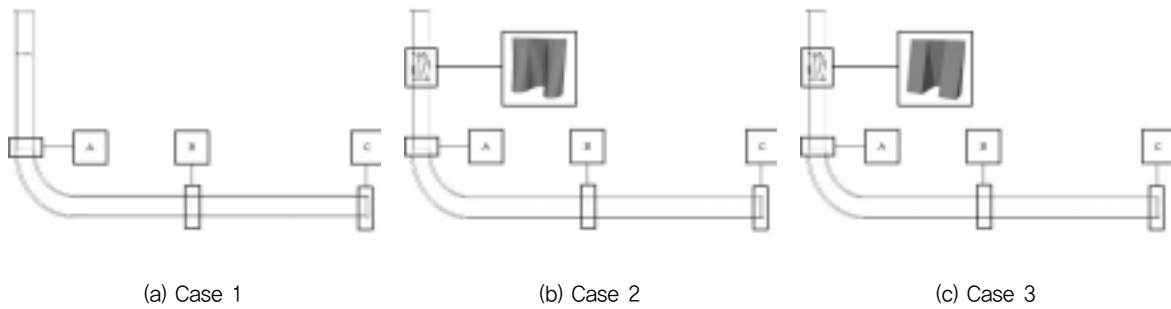


Fig. 5. Measurement 3 points.

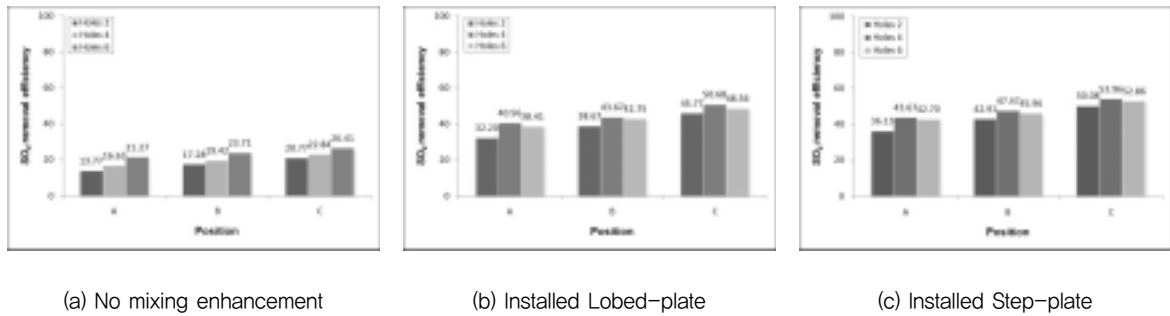


Fig. 6. Comparison with SO<sub>2</sub> removal efficiency as a variation of mixing enhancement.

는 RH10%로 고정하였고 분사구의 개수는 2개, 4개, 6개로 나누어 탈황제를 분사하였다.

### 3.5. 측정지점

본 논문은 실증플랜트에 DSI공정 적용 전 Lab-scale 실험 장치를 제작하여 도출가능한 문제점을 해결하고 최적의 적용 조건을 제시하고자 한다. Lab-scale 실험의 내용으로는 혼합촉진장치의 유무, 탈황제의 분사구의 개수를 중심으로 두었다. 배연탈황 공정 중 DSI공정 적용 가능성을 실험하기 위하여 반응기 내 일정속도로 지나가는 가스에 직접 탈황제를 분사한 후 제거되는 황산화물의 분석이 가능하도록 탈황제의 이동 거리별로 샘플포트를 설치한 후 황산화물의 농도를 측정하였다.

실험에서 측정지점은 각각 A, B, C이고 A, B, C로 갈수록 가스와 탈황제와의 접촉률이 늘어난다. Fig. 5에서 보듯이 Case 1은 반응기 입구 초기에 혼합촉진장치가 설치되지 않은 경우이며 이때 형성된 기류는 반응기 내부 구조물로 인한 영향을 받지 않게 구성된 반면, Case 2는 입구 초기에 물결형상의 혼합촉진장치를 설치하였고, Case 3는 입구 초기에 계단형상의 혼합촉진장치를 설치하여 이에 따른 탈황효율을 분석하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 혼합촉진장치의 유무와 형상에 따른 탈황효율

혼합촉진장치가 설치되지 않은 Case 1의 경우 평균 20%의 탈황효율을 보였고 물결형상의 혼합촉진장치가 설치된 Case 2의 경우 혼합촉진장치가 설치되지 않은 경우보다 평균 22% 높은 42%의 탈황효율을 나타내었으며 계단형상의 혼합촉진장치가 설치된 Case 3의 경우 평균 26% 높은 46%의 탈황효율을 나타내었다. 이는 기류가 반응기 내를 이동하는 동안 설치된 혼합촉진장치를 지나게 되고 이때 유입된 탈황제와 반응기 내 기류가 고른 혼합을 이루면서 탈황효율이 증가한 것으로 판단된다. 또한 물결형상과 계단형상의 탈황효율 비교는 계단형상의 혼합촉진장치의 경우가 물결형상보다 평균 4% 높게 나타내었다. 이는 물결형상과 계단형상의 형상차이로 인한 기류가 물결형상에서보다 4% 높은 유동장의 변화를 계단형상에서 일으켰다고 판단된다.

### 4.2. 분사구의 개수에 따른 탈황효율

분사구의 개수에 따른 탈황효율을 분석하기 위하여 분사구의 개수가 2개, 4개, 6개의 3가지 경우를 토대로 탈황효율을 분석하였다. Case 1의 경우 분사구의 개수가 2개, 4개, 6개로 증가할수록 탈황효율이 높아짐을 나타내었는데 이는 분사구의 개수가 증가될수록 가스와 탈황제의 접촉률이 증가하므로

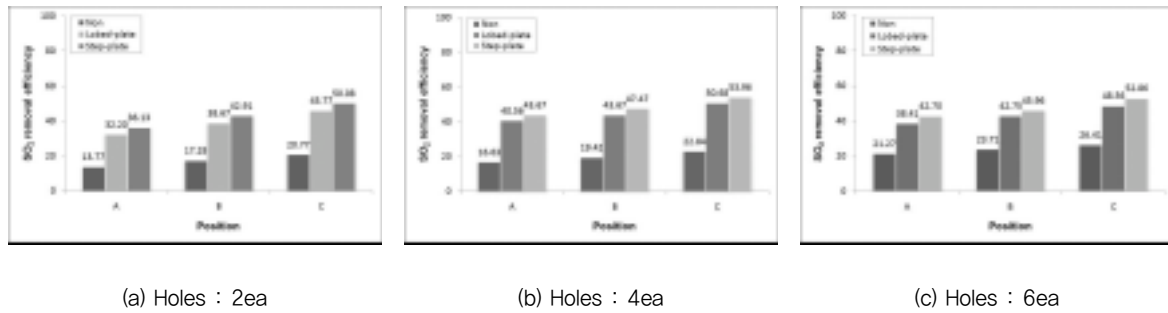


Fig. 7. Comparison with SO<sub>2</sub> removal efficiency as a variation of injection holes.

탈황효율도 증가하는 것으로 판단된다. Case 2와 Case 3의 경우, 분사구의 개수가 2개일 경우보다 4개와 6개일 경우가 탈황효율이 높았으나 Case 1의 경우와는 달리 분사구의 개수가 6개일 경우보다 4개일 경우의 탈황효율이 높게 나타났다. 두 경우 모두 분사구가 4개일 경우가 혼합촉진장치의 반응기 내 유동장 변화가 가장 큰 것으로 분석되며 이로 인하여 가스 탈황제의 접촉율도 확대 되는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문은 예비 연구로 Vortex에 의한 DSI 공정 중 혼합효율 향상에 관한 연구에서 효율향상을 검증한 결과를 바탕으로 건식 탈황공정의 DSI공정 적용 및 탈황효율 향상에 관한 연구로서, Lab.-scale 규모의 실험장치를 설계 및 구성하였고 탈황효율 실험을 토대로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

혼합 촉진장치를 이용한 탈황효율 실험 결과, 혼합촉진장치가 설치되지 않은 경우 평균 20%, 물결형상의 혼합촉진장치가 설치된 경우 평균 42%, 계단형상의 혼합촉진장치가 설치된 경우 평균 46%의 탈황효율의 향상을 보였다. 이로서 탈황효율을 높이기 위해서는 혼합촉진 장치의 설치가 고려되어야하고 그 형상은 계단형상이 최적으로 나타났고, 수치해석적인 경향과 일치한다고 판단된다.

분사구의 개수에 따른 탈황효율은 혼합촉진장치가 설치되지 않은 경우 분사구의 개수가 증가할수록 탈황효율이 높게 나타났고 혼합촉진장치가 설치된 경우 분사구의 개수가 4개일 경우가 난류 혼합의 증가로 가장 높은 탈황효율을 나타내었다.

본 연구 결과를 토대로 탈황효율 향상을 위하여 계단형상의 혼합촉진장치를 설치하는 것이 효과적이며 이때, 분사구의 개수는 양쪽 끝 4개 지점에서 탈황제를 분사시키는 것이 가장 큰 탈황효율 얻기 위한 최적의 조건을 도출하였다.

KSEE

## 사 사

본 연구는 2008년도 산업자원부 전력산업 연구개발사업의 일원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 홍진표, “배연탈황 기술 현황 및 개발방향,” 기계저널, **40**(7), pp. 40~44(2000).
- 손한호, “화력발전소 배연탈황설비 및 기술에 관한 연구,” 진주산업대학원, pp. 2~10(2005)
- Jin-do Chung, Jang-woo Kim, Byung-hwan Kim, Young-moon Park, “Numerical analysis for improving of SO<sub>2</sub> removal efficiency in the DSI(Dry Sorbent Injection Technology) of FGD system(1),,” *KSEE*, **29**(1), 47~53(2007).
- Paul S. Nolan, “Flue Gas Desulfurization Technologies for Coal-Fired Power Plants,” Coal-Tech 2000 International Conference, (2000)
- 박재만, 신창섭, “소석회를 사용한 In-duct형 건식탈황공정의 최적화와 첨가제의 영향,” 한국산업안전학회지, **12**(2), 102~110(1997).
- Energy and Environmental research corporation, “Global approach for enhanced mass transger effects in duct flue gas desulfurization processes,” DOE report No. DOE/PC/88873-T6, (1988)
- Rice, R. M. and Bond, G. A., “Flue gas desulfurization by in-duct dry scrubbing using calcium hydroxide,” *AIChE J*, **36**(3), 473-477(1990).
- 정진도, 김장우 “Vortex에 의한 DSI 공정 중 혼합효율 향상에 관한 연구,” 한국액체미립화학회지, **14**(1), 1-7, (2009)
- Vuthaluru. H. B. , V. K Pareek. and R. Vuthaluru., “Multiphase flow simulation of a simplified coal pulveriser,” *Fuel Processing Technology*, 1195~1205(2005).

10. Crowe C. , M. Sommerfield, Yutaka Tsuji, "Multiphase Flows with Droplets and particles," CRC Press, (1998).
11. Stouffer, M. R., Yoon, H. and Burke, F. P., "An Investigation of the Mechanisms of flue gas Desulfurization by in duct dry sorbent injection," *Ind Eng. Chem. Res.*, **28**(1) 20~27(1989)
12. Babu, M., Forsythe, Runyon, C. V., Evans, E., Thompson, J. L., "Results of 1.0 MM Btu/hour testing of HALT(Hydrate additon at low temperature) for SO<sub>2</sub> Control," Proceedings of the joint symposium on Dry SO<sub>2</sub> and Simultaneous SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> control technologies, 2, pp. 1/34-32/34(1986)
13. Hall B. W., C. Singer, W. Jozewicz, "Current Status of Advacate process for flue gas desulfurization," Report No. EPA/600/D-91/173, (1991)
14. Sedman C. B, M. A. Maxwell, W. Jozewicz, and J. C. S Chang, "Commercial development of the advacate process for flue gas desulfurization," Report No. EPA/600/D-90/147, (1990)
15. Stouffer M. R., W. A. Rosenhoover, and J. A. Withum, "Advanced coolside desulfurization process," *Environ. prog.*, **12**(2), 133-139(1993)
16. Stouffer Yoon, H., M. R., Rosenhoover, W. A., Withum, J. A. and Burke, F. P., "Pilot process variable study of coolside desulfurization." *Environ. prog.*, **7**(2), 104~111(1988)