

유동층 연소로에서 유, 무연탄 혼합연소시 탈황에 관한 연구 - 천연석회석을 이용한 황산화물 제어 -

조상원* · 민병철* · 정종현** · 전영화 · 김대영 · 정덕영

*창원기능대학 환경기술학과, **경주전문대학 환경공업과, 부산대학교 환경공학과

A study on Desulfurization by Anthracite-Bituminous coal blend combustion in a fluidized bed combustor - A desulfurization using natural limestone -

Sang-Won Cho*, Byoung-Chul Min*, Jong-Hyeun Jung**,
Young-Hwa Jeon, Dae-Young Kim and Duck-Young Jung

*Department of Environmental Technology, Changwon Polytechnic College, Changwon

**Department of Environmental Industry, Kyoungju Junior College, Kyoungju

Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan

ABSTRACT

It has been studied that SO₂ removal efficiency of anthracite-bituminous coal blend combustion in a fluidized bed coal combustor. The objectives of this study were to investigate SO₂ removal characteristics of coal blend combustion with Ca/S, anthracite fraction, bed temperature, and limestone size. The experimental results were presented as follows: First, the effect of the desulfurization by the dia size of limestone was great and SO₂ removal efficiency was highest in limestone dia 631 μm. Second, as air velocity increased, the desulfurization rate decreased a little. But the difference of the desulfurization rate according to air velocity was not too large. As the height of fluidized bed combustor increased regardless of air velocity, SO₂ concentration tends to increase largely. Third, as Ca/S mole ratio increased, SO₂ desulfurization rate increased rapidly up to Ca/S mole ratio 3 while the desulfurization rates did not increase too largely in the range of more than the level. Forth, the bed temperature had a great effect on the desulfurization rate and the desulfurization rate tended to increase slightly as anthracite fraction increased.

Keywords: Desulfurization, Fluidized bed combustor, Limestone, Anthracite-bituminous coal blend combustion

I. 서 론

유류수급의 불안정과 산업연료의 유류 의존도를 줄이기 위한 연구가 증대되고 있으며, 그 중 원자력의 경우 현재 사용이 가장 활발하나 핵의 확산, 방사능 오염 등 인체에 미치는 영향과 핵폐기물 처리 등의 문제점을 내포하고 있다. 또한, 영원히 고갈되지 않는 에너지원이며 청정 에너지라 불리우는 태양력, 지열, 풍력 등의 환경에너지는 현재까지 기술적, 경제적인 면에서 어려움이 많으므로 국내 유일의 풍부한 부존자원인 석탄을 에너지원으로 이용하는 연구

가 중대한 관심사가 되고 있다. 따라서 산업위생학적인 측면과 환경오염 등의 문제를 안고있는 석탄은 새로운 대체 에너지의 개발이 이루어질 때까지는 여전히 에너지원으로서의 중요성을 갖고 있다.

현재 국내 부존 석탄의 대부분은 청정연료화가 부적당한 고회분의 저품위 무연탄으로 알려져 있으며¹⁾ 또 해마다 많은 양의 무연탄이 산지에 방치됨으로써 광산지역사회의 환경오염문제를 유발하고 있고, 수입 유연탄의 급증으로 인한 국내 무연탄의 수요 감소는 폐광을 가중시키고 있으므로, 무연탄의 효과적인 이용에 대한 연구는 환경오염저감과

국가자원 개발이라는 면에서 매우 중요한 과제이다. 이제까지의 국내외 연구상황을 종합해 볼때 석탄연소는 유동층연소법이 가장 효율적인 방법이라고 알려져 왔다.⁴⁾ 유동층 연소법은 연료의 종류에 거의 제약이 없으며, 저품위 연료도 효과적으로 연소가 가능하고 단위용적당 발열량이 재래식 연소로인 고정층이나 이동층 보다 크고 열전달계수가 크며, 재래식 연소법에 비해 비교적 낮은 온도인 800-900°C에서 연소되므로 화재의 용융이나 소결현상이 없을 뿐만 아니라, 석회석을 이용하여 대기오염의 주원인인 아황산 가스의 제어도 가능하다.

한편, 최근 산업위생과 보건측면, 그리고 환경오염과 보호에 관한 국민의 인식은 모든 과학 발전 및 기술개발에 환경오염제어를 병행하여 수행하지 못하면 기술개발 자체의 의미가 소멸되는 결과를 낳는다. 특히 석탄연소에 대한 위생학적 인식은 다량의 오염물질의 배출로 인해 부정적인 요소가 많으며, 석탄내의 황성분이 공기와 반응하여 황산화물을 생성하므로 유동층 연소기술의 개발과 더불어 유동층 연소에 따른 공해문제도 연구되어야 할 과제이다. 이러한 석탄 유동층 연소로에서 발생하는 황산화물의 제어방법으로는 연소로내에 흡착제를 투입하는 방법과 흡수탑을 사용하여 배출가스의 방출을 억제하는 방법이 있으며, 흡수탑과 같은 장치를 부착하지 않고 흡착제를 사용한 황산화물제거 기술이 관심의 대상이 되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 유동층연소로에서 유,무연탄 혼합연소시 발생하는 황산화물의 생성과 배출 특성에 대해 살펴보고, 석회석 입자크기, Ca/S몰비, 가스 유속, 무연탄비, 층온도 등의 운전조건에 따라 탈황연구를 수행하는 것이다.

II. 재료 및 실험방법

1. 재료

본 실험에서 사용한 무연탄은 국내 충북 부령산의 저질탄이며, 유연탄은 호주산으로 저회분, 고열량 석탄이다. 시료를 Roller mill로 분쇄하여 무연탄은

Table 2. Ultimate analysis of coals(wt.%, dry basis)

component coal	C	H	O	N	S
Anthracite	30.0	0.71	4.24	0.34	0.31
Bituminous	72.3	4.30	11.70	0.36	0.21

16mesh, 유연탄은 10mesh(Tyler 표준체)로 체분석하였으며, 잘 말린 후 공기와 접촉하지 않도록 플라스틱 용기에 담아 보관하였다. 이들 시료에 대한 공업분석치는 Fisher Coal Analyzer 490을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었고, 원소분석치는 Perkin-Elmer 240C Elements Analyzer를 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 또한 회분의 성분분석은 ICP(Inductively Coupled Plasma, JY 24)로써 분석하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

본 연구에서 사용한 흡착제인 천연산 석회석은 층복 단양에서 채취한 것으로 부산시 한국화학검사소에서 ICP로 분석한 결과를 Table 4에 나타내었으며, 표에서 알 수 있듯이 CaO 함량을 calcium carbonate (CaCO₃)으로 환산하면 97.68%이다.

Fig. 1은 석회석 시료를 Automatic Derivative Differential Thermo-balance기기를 이용하여 TGA 분석을 나타낸 그림으로서, 승온율은 10°C/min이고 석회석의 소성이 약 600°C에서 일어나기 시작하여 석회석이 CaO로 완전히 소성되는 온도는 약 860°C이며, 그 때 무게감량이 약 44% 임을 보여주고 있다. 그러므로 유동층 연소로 내의 반응온도를 이 소성완결온도 이상으로 유지하여 실험해야 할 수 있다.

2. 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 유동층 연소로는 내경 0.1 m, 높이 2 m이며, 부식을 방지하기 위하여 실린더형의 stainless steel관으로 제작하였으며 가스 분산판을 이용하여 공기를 공급하였다. 이때 유동화 공기의 공급을 위하여 공기압축기, 공기정화기, 4개의 정압기, oil정화기를 사용하였

Table 1. Proximate analysis of coals

coal	Moisture (wt.%)	Volatile matter (wt.%)	Ash (wt.%)	Fixed carbon (wt.%)	Heating value (kcal/kg)
Anthracite	1.80	6.48	64.75	26.97	2,010
Bituminous	6.74	27.38	8.38	57.19	6,520

Table 3. Analysis of coals ash(wt.%)

Coals	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	BaO	TiO ₂	CaO	MgO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O
Anthracite	53.0	28.23	2.68	0.096	0.120	1.28	1.43	1.85	0.17	1.06	3.93
Bituminous	65.5	27.94	2.24	0.026	0.053	1.50	0.19	0.35	0.30	0.43	1.40

Table 4. Analysis of limestone(wt.%)

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Igloss
weight %	1.62	0.07	0.12	54.7	0.25	42.9

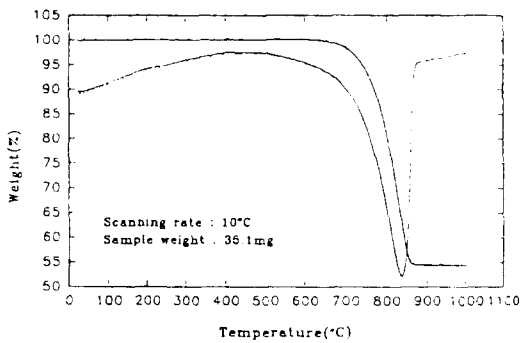
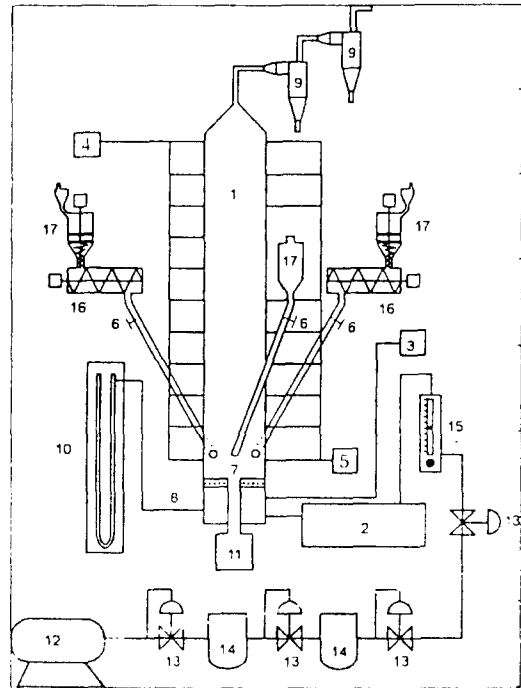


Fig. 1. TGA-DTA profile of Dan-yang limestone.

으며, 유동화 공기량을 조절하기 위해 glove valve 와 유량계를 설치하였다. 석탄 및 석회석의 연소로 내의 주입은 가스 분산판으로부터 상부로 0.2 m 지점에 설치된 주입관을 통하여 코일공급기를 사용하여 석회석과 석탄을 함께 공급하였다. 또한 석회석이 아황산가스와 반응하여 생성되는 황산칼슘과 회분은 연소로 하부에 설치된 배출관을 통하여 진동배출기를 사용하여 배출하였다. 배출가스 중에 마찰과 연소로 인하여 생성 비산하는 미세입자를 포집하기 위하여 cyclone을 연소로 상부에 설치하였다. 유동층연소로 내의 층온도를 석탄의 착화점 이상으로 가열하기 위하여 예열기를 설치하였고, 연소로 외부에 동관을 감고 냉각수를 공급하여 연소로내의 온도를 일정하게 유지하였다. Chormel-alumina type의 열전대를 위치에 따라 유동층의 중심부에 설치하여 유동층내의 온도를 측정하였으며, 정상적인 유동화상태 및 유동층내의 충전물의 양을 측정하기 위하여 air holder에 manometer를 설치하였다.

3. 실험방법

다입자로 구성된 회분을 연소로 내에 넣고 공기를 공급하였고 공기압축기로부터 공급되어진 공기



- 1. Fluidized bed combustor
- 2. Preheater
- 3. PID temperature controller
- 4. Digital multithermometer
- 5. Analyzer
- 6. Valve
- 7. Distributor
- 8. Air holder
- 9. Cyclone
- 10. manometer
- 11. Vibrating discharger
- 12. Air compressor
- 13. Regulator
- 14. Air filter
- 15. Flow meter
- 16. Screw feeder
- 17. Hopper

Fig. 2. Experimental facilities and data processing system at high temperature.

는 제습기를 거친 후, 안정된 공기를 공급하기 위해 설치된 정압기 4개를 적정압력으로 고정하고, 정압기 사이의 oil-정화기와 공기정화기를 통과시켜 공급하였다. 예열기에 연결된 열선을 PI-Controller에 연결하여 bed내의 온도가 350°C이상을 유지하도록 가열하였으며, glove valve로 유동화 공기의 양을 조절하였다. 예열기에 의해 in-bed의 온도가 약 350°C에 도달한 후 1시간이 지나면 목탄을 주입

Table 5. Experimental conditions

Operating variables	Conditions
Anthracite fraction	0.1, 0.3, 0.5
Gas velocity(m/s)	0.2, 0.3, 0.4
Temperature(°C)	800, 850, 900, 950
Ca/S(mole/mole)	0, 1, 2, 3, 4, 5
Limestone size(μm)	Natural(100, 200, 631, 1016)

하여 유동층의 온도를 500°C이상으로 하여 황가루가 혼합된 유연탄을 소량으로 천천히 주입하였고, 유연탄에 의해 유동층내의 온도가 700°C이상으로 증가하면 석회석이 혼합된 무연탄을 주입하여 유동층내의 온도를 조업온도로 유지하였으며, 온도를 확인하여 유동층이 정상상태에 도달하면 각 채취관으로부터 시료가스를 채취하였다. 탈황효율을 조사하기 위하여 석회석을 사용하지 않은 경우의 황산화물 농도를 측정 한 후 석회석을 혼합한 무연탄을 주입하여 정상상태에 도달하면 황산화물의 농도를 측정하여 탈황효과를 조사하였다. 또한 Table 2에서 알 수 있듯이 석탄시료속의 황함량이 무연탄 0.31%, 유연탄 0.21%로서 낮으므로 발생하는 SO₂의 농도가 매우 낮기 때문에 석회석에 의한 탈황효과를 확실히 알기 위하여 밀도가 작은 유연탄에 황가루를 혼합하였고, 석회석은 밀도가 비슷한 무연탄과 함께 혼합하여 실험하였다. 시료가스의 성분분석은 Combustion Analyzer (ENERAC 2000)를 이용하여 분석하였으며, 환경오염공정시험법(아르세나조 III법)으로 비교·확인하였다.

본 실험에서의 실험조건은 Table 5와 같고, 층높이는 L/D ratio를 1.0으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 석회석 입자크기가 SO₂농도에 미치는 영향

Fig. 3은 무연탄비 0.5, Ca/S몰비 3, 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D비 1.0일때 석회석 size를 100, 200, 631, 1016 μm로 달리 했을 때와 석회석을 첨가하지 않았을 경우의 SO₂농도를 비교하여 유동층 연소로 높이에 따라 SO₂농도로 나타낸 것이다. 그림으로 알 수 있듯이 비산석탄의 연소로 인해 유동층 높이가 증가할수록 SO₂농도가 대체로 증가하였으며, 25 cm지점보다 45 cm지점의 SO₂농도가 낮은 것은 25 cm지점에서 연소영역이 형성되므로 주입되는 석탄속의 황성분이 급격히 연소하기 때문이다. 석회석

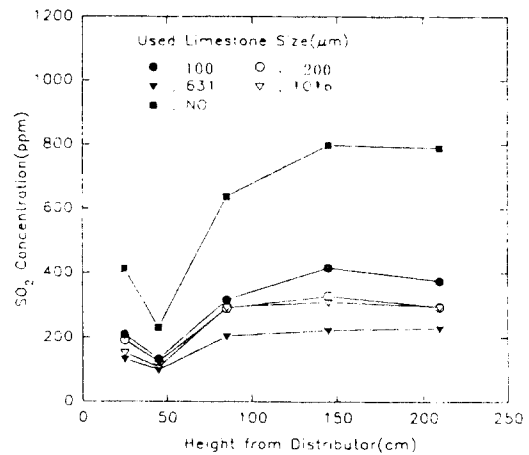


Fig. 3. SO₂ concentration according to limestone size.

size에 따른 SO₂제어 효과를 살펴보면 631 μm일때의 제어율이 가장 높은 것으로 나타났다. 그것은 1016 μm의 석회석 입자는 유속에 비해 입경이 상대적으로 크기 때문에 SO₂와의 반응표면적이 작고, 유동층연소로의 층물질 부분에서 주로 탈황이 일어나며, 연소로 위쪽에서의 탈황은 마모에 의한 미세 석회석 입자에 의해서만 일어나므로 매우 작은 양의 SO₂가 제거되어 전체적인 탈황율이 떨어지기 때문이다. 한편, 631 μm보다 더 작은 크기의 입자인 100 μm와 200 μm는 소성반응이 일어나기전에 유속에 의해 freeboard 위쪽으로 비산될때 유출되는 양이 많기 때문에 탈황율이 낮아진다. 따라서 석회석 입자의 최적 탈황 크기는 631 μm임을 알 수 있고, 배출농도에 대한 탈황효율을 살펴보면 석회석 입자크기 100 μm, 200 μm, 631 μm, 1016 μm의 경우 각각 52.5%, 62.7%, 71%, 62.6%를 나타내었다.

2. Ca/S몰비에 따른 SO₂의 영향

Fig. 4는 최적 Ca/S몰비를 결정하기 위해 무연탄비 0.5, 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D비 1.0, 석회석 입자크기 631 μm일때 Ca/S몰비에 따른 SO₂제거율을 각영역별(연소영역, freeboard영역, 배출구)로 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Ca/S몰비 3까지는 SO₂제거율이 급격히 증가하다가 Ca/S몰비 3, 4, 5사이에는 큰차이가 없으며, 연소영역 보다는 145 cm의 freeboard 영역과 배출구에서의 탈황율이 약간 높다. 그것은 층내에서의 탈황효과 이외에도 소량의 석회석이 비산되면서 freeboard 영역 이후에서 약간의 탈황효과를 나타내기 때문이다.

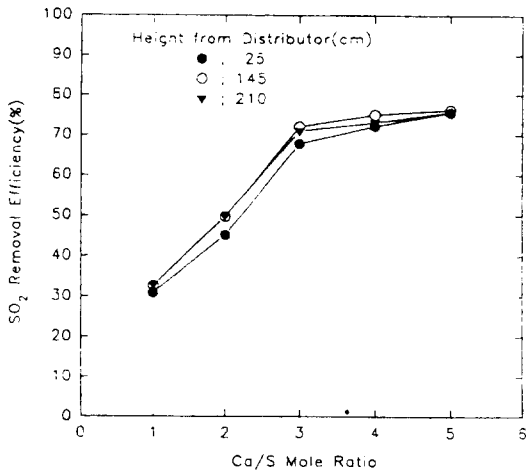


Fig. 4. SO₂ removal efficiency with Ca/S mole ratio and region.

Fig. 5는 무연탄비 0.5에 대해 석회석 입자크기 631 μm, 층온도 850°C, L/D ratio 1.0, 공기유속 0.3 m/s일때 유동층연소로 높이에 따라 Ca/S 몰비가 SO₂농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Ca/S몰비에 관계없이 유동층 연소로 높이에 따른 SO₂농도 경향은 비슷하며, 배출구에서의 SO₂농도를 살펴보면 Ca/S몰비 1, 2, 3까지는 SO₂농도가 급격히 감소하다가 Ca/S몰비 3, 4, 5사이에는 SO₂농도의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 또한 유동층 연소로 높이에 따라 SO₂농도가 대체로 증가하였으며, 그것은 freeboard영역 까지 석탄과 황가루가 계속 비산되면

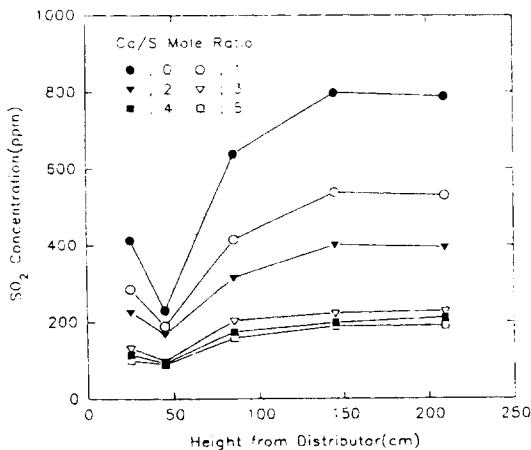


Fig. 5. SO₂ concentration with Ca/S mole ratio and height.

서 연소하므로 SO₂농도가 증가하기 때문이다. 따라서 Fig. 4와 5를 종합해 볼때, 유동층연소로 내에서 발생하는 SO₂를 제거하는데 필요한 석회석의 양은 많을 수록 좋으나 탈황율과 연소후 배출되는 회분을 고려할때 Ca/S몰비를 3으로 결정하는 것이 타당하다고 판단되어 이후 실험에서는 Ca/S몰비를 3으로 하여 실험하였다.

3. 무연탄비가 SO₂의 제거율에 미치는 영향

Fig. 6은 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D 비 1.0, Ca/S몰비 3, 석회석 입자크기 631 μm일때 무연탄비에 따른 SO₂농도를 유동층연소로 높이에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 무연탄비가 증가할수록 발생하는 농도가 높으므로 물질전달율이 크기 때문에 탈황율도 증가하였고 이때의 탈황율은 약 70% 근처로 나타났다.

Fig. 7은 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D비 1.0, 석회석 입자크기 631 μm일때 Ca/S몰비에 따른 SO₂제거율을 무연탄비에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Ca/S몰비 3까지는 급격한 제거율을 보이다가 그 이후에서는 완만한 증가율을 나타내며, 무연탄비가 증가함에 따라 탈황율이 약간 증가하는 것으로 나타났고, 그것은 무연탄비가 증가할수록 황함량이 증가하여 탈황시 감소되는 SO₂농도의 절대치가 증가하기 때문이다.

4. 유속이 SO₂제거율에 미치는 영향

Fig. 8은 무연탄비 0.5에 대해 층온도 850°C, L/

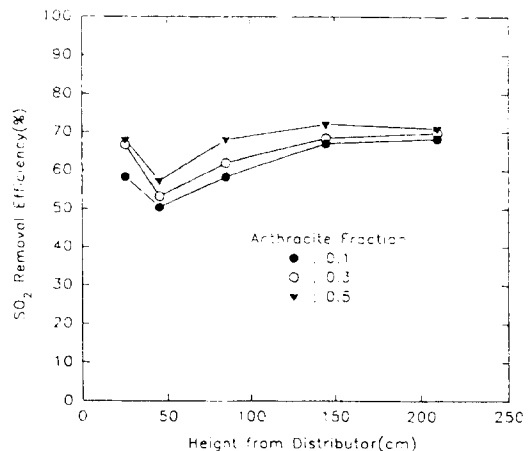


Fig. 6. SO₂ removal efficiency with anthracite fraction and height.

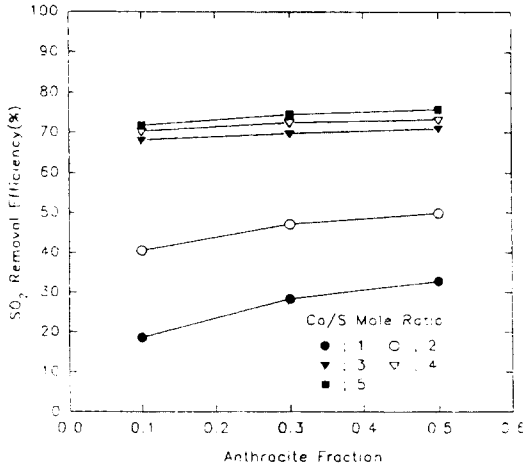


Fig. 7. SO₂ removal efficiency with anthracite fraction and Ca/S mole ratio.

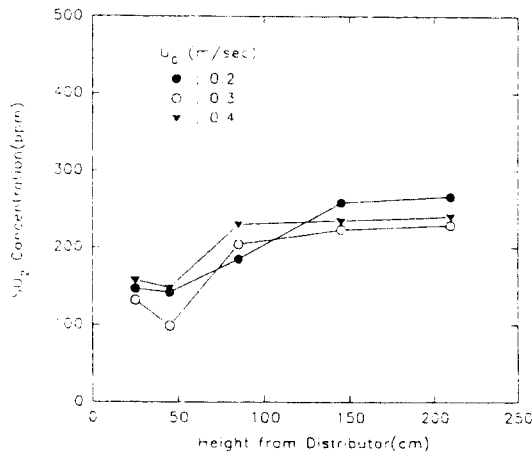


Fig. 8. SO₂ concentration with air velocity and height.

D비 1.0, Ca/S몰비 3, 석회석 입자크기 631 μm일때 유속에 따른 SO₂농도를 유동층연소로 높이에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 공기유속에 대한 SO₂탈황율은 0.3 m/s가 최적임을 알 수 있다. 유속 0.2 m/s는 고기 혼합도가 충분하지 않아 탈황율이 떨어지며, 0.4 m/s는 고기 혼합도는 충분하지만 연소로 내의 체류시간이 작아서 탈황율이 떨어진다. Fig. 9는 배출구에서의 탈황율에 대해 나타낸 그림인데, 0.2 m/s, 0.3 m/s, 0.4 m/s일때 탈황율이 각각 66%, 71%, 68.8%이며, 본 실험 범위의 유속내에서는 탈황율이 유속에 큰 영향을 받지않는 것으로 나타났다.

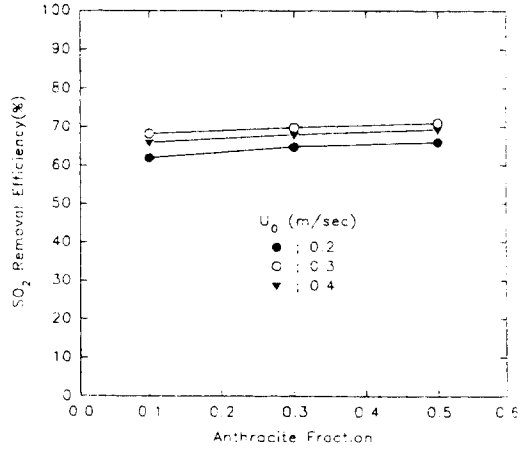


Fig. 9. SO₂ removal efficiency with anthracite fraction and air velocity.

5. 층온도가 SO₂제거율에 미치는 영향

Fig. 10은 Ca/S몰비 3, 석회석 입자크기 631 μm, L/D비 1.0, 유속 0.3 m/s일때 무연탄비 0.5에 대해 SO₂농도를 유동층 연소로 높이에 따라 층온도 영향을 살펴 본 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도 900°C까지는 증가하다가 950°C에서는 오히려 감소하였다. 층온도 800°C와 950°C에서의 SO₂농도는 850°C와 900°C일때의 SO₂농도 보다 훨씬 높으며 850°C와 900°C일때의 SO₂농도는 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 그것은 800°C일 경우 석회석의 소성 완결온도 이하이므로 탈황율이 감소하며, 층온도 950°C일때는 sintering(소결)현상에 의한 석회석 입

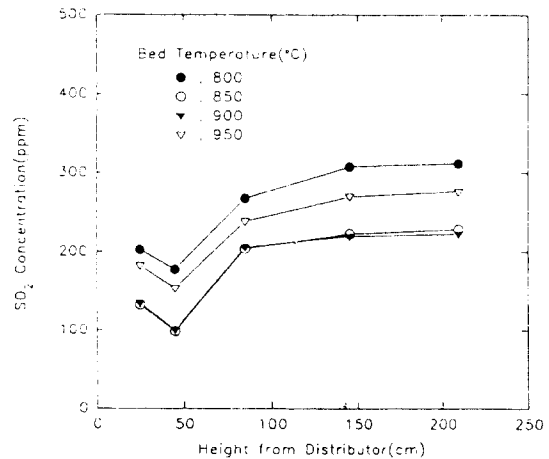


Fig. 10. SO₂ concentration with bed temperature and height.

자 기공의 감소로 탈황율이 떨어지기 때문이다.

IV. 결 론

유동층 연소로에서 무, 유연탄 혼합연소시 발생되는 황산화물을 천연산 석회석으로 제거하는 본 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 석회석 입자크기가 탈황에 미치는 영향은 큰 것으로 나타났으며, 무연탄비 0.5, 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D비 1.0, Ca/S몰비 3일때 석회석 입경 100 μ m, 200 μ m, 631 μ m, 1016 μ m의 탈황율은 각각 52.5%, 62.7%, 71.0%, 62.6%로 나타나 631 μ m 일때 탈황율이 가장 높았다.

2. Ca/S몰비가 증가할수록 탈황율은 증가하였으며, Ca/S몰비 3까지는 SO₂ 제거율이 급격히 증가하였으나, 그 이상의 Ca/S몰비에서는 탈황율이 크게 증가 하지 못하는 것으로 나타났다.

3. 유속에 의한 탈황율 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, 유속에 관계없이 유동층 연소로 높이가 증가함에 따라 SO₂농도도 대체로 증가는 경향을 보였다.

4. 무연탄비 0.5, 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D비 1.0, Ca/S몰비 3일 때 층온도 850°C와 900°C의 탈황율은 약 70% 근처로 비슷하였으며, 층온도 800°C와 950°C 일때의 탈황율은 약 60.5%, 65% 정도로 나타나, 탈황율은 층온도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 유속 0.3 m/s, 층온도 850°C, L/D비 1.0, Ca/S몰비 3의 조건에서 무연탄비 0.1, 0.3, 0.5에 대해 각각 68.2%, 69.8%, 71.0%정도의 탈황율을 나타내어 무연탄비의 증가에 따른 탈황율 변화는 작은 것으로 나타나 유, 무연탄혼합비에 크게 관계없이 발열량을 고려하여 혼합연소시켜도 탈황율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

사용부호

DL	: Particle size (μ m)
L/D	: Aspect ratio
Temp.	: Bed temperature (°C)
U _o	: Superficial gas velocity (m/s)
X _A	: Anthracite ratio

참고문헌

- 1) 손재익: 저질탄의 유동층 연소기술 개발 연구(II), 한국동력자원연구소, 1983.
- 2) 한국통계연감, 127, 1982.
- 3) 오광중: 저품위 한국산 무연탄의 특성과 Screen 충전물이 유동층연소로의 동특성에 미치는 영향, 고려대학교 박사학위 논문, 1985.
- 4) Berkowitz, N.: An Introduction to coal Technology, CHIO, ACADEMIC PRESS, 1979.
- 5) Senary M. K. and Pirkey J.: Limestone Characterization for AFBC Applications, 10th International Conference of Fluidization Bed Combustion, 341, 1988.
- 6) Raymant A. P.: Sulphur Capture by Coal Ash and Freeboard Process during Fluidized Bed Combustion, 10th International conference on Fluidized Bed Combustion, Atlanta GA, april 597, 1988.
- 7) D. C. FEE. and K. M. MYLES: In-Bed Limestone Sulfation In Fluidized-Bed Coal Combustors, Chem. Eng. Sci., 39, 4, 1984.
- 8) R.H.Borgwardt and K.R.Bruce: Effect of specific surface area on the reactivity of CaO with SO₂, AIChE journal, 32(2), 1986.
- 9) Bruce K. R., Gullett B. K. and Beach L. O.: Comparative SO₂ Reactivity of CaO Derived from CaCO₃ and Ca(OH)₂, AIChE J., 35, 371, 1989.
- 10) Simons G. A.: Parameters Limiting Sulfation by CaO, AIChE J., 34, 167, 1988.
- 11) Solon Zarkanitis and Stratis V. Sotirchos: Pore structure and particle size effects on limestone capacity for SO₂ removal, AIChE Journal, 53(5), 1989.
- 12) 김재범, 홍성창, 오광중, 도동섭: 저품위 무연탄 유동층연소로에서 석회석을 이용한 이산화황 가스의 제어, 대한환경공학회지, 12(2), P71, 1990.
- 13) 장현태: 유동층 연소로에서 Screen 충전물이 아황산 가스 제어에 미치는 영향, 석사학위 논문, 고려대학교 화학공학과, 1991.
- 14) F. Garcia-Labiano and J. Adanez: Characterization of the Reactivity of Limestones with SO₂ in a Fluidized Bed Reactor, Chem. Eng. 70, 1992.
- 15) 오광중, 홍성창, 김재용, 도동섭: 석회석 특성이 유동층연소로의 탈황에 미치는 영향, 대한환경공학회지, 13(1), 37, 1991.
- 16) 박태성: 유,무연탄 혼합에 따른 유동층 연소특성, 고려대학교, 석사 학위논문, 1993.