

流動層 燃焼爐에서 有·無煉炭 混合 燃焼時 大氣汚染物質 排出에 관한 研究

조상원 · 정종현* · 손병현 · 김영식** · 오광중

부산대학교 환경공학과, *경주전문대학 환경공학과, **밀양산업대학교 환경공학과

A Study on Contaminant Emission and Combustion of Anthracite-Bituminous Coal Blend in a Fluidized Bed Coal Combustor

Sang-Won Cho, Jong-Hyeon Jung*, Byung-Hyun Shon,
Young-Sik Kim** and Kwang-Joong Oh

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

** Department of Environmental Industry, Kyong-Ju Junior College*

*** Department of Environmental Engineering, Miryang National University*

ABSTRACT

The objects of this study were to investigate emissions of air pollutant the particles as well as the combustibility of the low grade domestic anthracite coal and imported high-calorific bituminous coal in the fluidized bed coal combustor. The production of air pollution from anthracite-bituminous coal blend combustion in a fluidized bed coal combustor was evaluated. The effects of air velocity and anthracite fraction on the reaching time of steady state condition was also evaluated. We used coal samples; the domestic low grade anthracite coal with heating value of 2,010 kcal/kg and the imported high grade bituminous coal with heating value of 6,520 kcal/kg. The experimental results are presented as follows. The time of reaching to steady state was affected by the temperature variation. The steady state time was about 120 minute at 0.3 m/s which was the fastest. It has been found that O₂ and CO₂ concentration were reached steady state at about 100 minute. As the height of fluidized bed becomes higher, the concentration s of SO₂ and NO_x mainly increased. The concentration of freeboard was the highest and emission concentration was diminished. Also, as anthracite fraction increased, the emission of SO₂ concentration was increased. But, it has been found that the variation of NO_x concentration with anthracite fraction was negligible and the difference of emission concentration according to air flow rates was negligible, too. It has been found that O₂ concentration decreased and CO₂ concentration increased as the height of fluidized bed increased. As anthracite fraction increased, the mass of elutriation particles increased, and CO₂ concentration decreased. Also, as air velocity increased, O₂ concentration decreased and CO₂ concentration increased. Regardless of anthracite fraction and flow rate, the combustible weight percentage in elutriation particles were high in the case of fine particles.

Keyword : anthracite-bituminous coal blend, fluidized bed, combustor, elutriation, fine particles

I. 서 론

경제발전 에 따른 에너지 수요 증가는 필연적이며 선진국 진입을 앞둔 우리나라에서는 급속한 경제발전 에 의하여 에너지 소비량 증가율이 선진국 에너지

소비율을 증가하는 현상이 나타나고 있다. 에너지 이용으로 발생되는 환경오염물 배출은 피할 수 없는 사실이며 특히 국내 에너지 자원이 빈약하여 필연적으로 화석연료를 이용해야 하므로 연소 배가스로 인한 대기오염 악화현상은 날로 증대될 것으로 전망이

다. 이와 같은 현상은 그간 경제발전 우선 정책에 의하여 소홀히 다루어졌던 환경정책에 원인이 있으나 근래에 환경에 관한 중요성이 국내 뿐만 아니라 전 세계적으로 인식됨에 따라 에너지와 환경문제를 조화롭게 해결해야 할 필요성이 있다.

대기중에 존재하는 황산화물은 화학공장의 배가스 및 연료 중에 포함된 유황성분의 연소에 의하여 발생하는 것으로, 천연가스와 액화석유가스를 제외한 석유 및 석탄계의 연료에는 약 2% 미만의 유황성분이 함유되어 있다. 황산화물 발생경로에 따르면 연료에 포함된 유황성분이 증가할 수록 연소 배가스 중 황산화물 농도는 증가되고 아울러 대기중 황산화물 농도를 증가시켜 산성비의 원인을 증폭시키므로 이의 기본적인 대책으로 정부에서는 저유황연료의 공급을 확대하고, 연소 또는 공정 배가스 처리공정의 설치를 고려하고 있다. 최종적으로 공급되는 연료 중 유황성분 함량을 낮추기 위하여 석탄 정제법 및 정유공정 탈황설비 설치등과 같은 대책이 고려 또는 추진되고 있으나 경제적인 원인으로 연료 중의 유황성분을 완전히 제거하지 못하고 있다.¹⁾

연료의 연소로부터 발생하는 질소산화물은 독성이 있고 광화학반응(NO_x cycle)을 일으켜 오존층을 파괴하는 특성이 있어 지구 온난화 가스의 일종인 것으로 알려지고 있으며, 특히 NO_x 는 부식성과 강한 질식성을 가진 유독가스이다. 이와 같은 질소산화물은 대기 중에 존재하여 동물의 심폐기능에 장애를 줄 뿐만 아니라 호흡기 질환을 유발하며 식물의 성장을 저해하거나 고사시키는 것으로 알려지고 있다.

현재 국내 석탄의 대부분은 고회분 무연탄으로서 이중 총매장량의 34.3%에 달하는 대량의 석탄이 발열량 400 kcal/kg 이하의 저질탄으로 알려져 있다.^{3,4)} 또한 해마다 채굴량의 10~20% 정도가 산지에 방치됨으로써^{2,5)} 탄광 지역의 환경공해 문제를 일으키고 있고 수입 유연탄의 급증과 국내 무연탄의 수요감소로 인한 폐광의 증가는 국가 에너지원의 낭비를 초래하고 있다. 특히 국내 무연탄의 산업적인 소비는 거의 없으며 가정용 석탄의 소비 감소로 인하여 국내 무연탄의 사용이 계속 감소되고 있어 새로운 무연탄 사용 연구가 시급하다 하겠다. 그러나 현재 국내 무연탄만의 연소는 고회분으로 인하여 그 경제성에 문제가 있고, 기존의 유연탄과 함께 연소시키면 회분량도 무연탄만 연소시킬때 보다는 상대적으로 적을 것이므로, 유연탄의 수입 대체효과도 가져와, 광산의 보호 및 국가 자원 개발의 효율적 이용 측면

에서 매우 중요하다고 하겠다.

한편, 국내외적으로 석탄의 활용방안에 대한 연구가 이루어져 왔으나, 현재까지 보고된 바에 의하면 유동층연소로에서 직접 연소시키는 것이 에너지 회수율을 높이고, 공해물질 배출량을 최소화할 수 있는 가장 효과적인 방법이라고 알려져 왔다.^{6,7,8)} 미분탄 연소방법의 경우에는 휘발분이 18% 이상이어야 하는 등의 탄종에 대한 제약이 있으나,⁹⁾ 분산판을 통해 유체를 불어넣어 반응기속에 있는 고체입자를 분산판에서 생성된 기포에 의하여 유동시키는 방법인 유동층 연소법의 경우에는 석탄의 종류에 제약이 없고, 석탄의 전처리 과정을 거치지 않고 직접 연소시킬 수 있으며, 질소산화물과 유황분 제거^{10,11)} 등 공해방지의 측면에서도 석탄연소의 첨단기술로 인식되고 있다. 또한 미분탄 연소에 비해 장치 규모를 작게할 수 있으며, 기-고 접촉면적을 증가시키고 연소로내에서 난류를 발생시켜 연소효율을 증가시킬 수 있고 기-고 접촉효과가 뛰어나므로 열전달계수가 높다.

본 연구에서는 유동층연소로에서 고회분, 저열량인 무연탄과 저회분, 고열량인 유연탄의 혼합연소시 무연탄비에 따라서 대기중에 영향을 미치게 되는 비산유출입자의 유출율, 그리고 연소시 발생하는 CO_2 , SO_2 , NO_x 등의 생성 및 배출특성 등을 조사하였으며, 오염물질이 대기중으로 얼마나 배출되고 있는지를 측정함으로써, 이후에 수행될 오염물질제어에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 실험장치 및 실험방법

1. 시료

실험에 사용한 시료의 원산지는 무연탄은 충북 부령산이며 발열량이 매우 낮고, 유연탄은 호주산으로 저회분, 고열량 석탄이다. 시료는 Roll mill로 분쇄하여 무연탄은 1.00 mm, 유연탄은 1.68 mm의 U.S Tyler 표준체를 이용하여 분류하였다. 이들 시료에 대한 공업분석치는 Table 1에 나타내었으며, 원소분석치는 Table 2에, 그리고 회분의 성분분석은 Table 3에 나타내었다. 원소분석을 이용하여 발열량을 계산하면 무연탄은 2,010 kcal/kg로 매우 낮고, 유연탄은 6,520 kcal/kg이 된다. 휘발분과 고정탄소를 합한 가연분은 무연탄이 33.45%이며, 유연탄이 84.57%로 유연탄이 무연탄 보다 약 2.5배의 가연분을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 시료 중의 황성

분은 무연탄이 0.3%로 0.2%인 유연탄보다 약간 높게 나타났으며, 회분에 함유된 주성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 등이다.

본 실험에서 사용한 시료의 입도분포는 Fig. 1에 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이 같은 중량 %에서 무연탄에는 미세입자의 분율이 높고, 유연탄에는 무연탄에 비해 굵은 입자의 분율이 높은 것으로 나타났다. 시료로 사용한 무연탄 입자는 입경이 1.00 mm이하이며, 유연탄 입자는 입경이 1.68 mm이하인 다입자이다. 따라서 무연탄 입자가 유연탄보다 미세 입자의 분율이 높은 것을 알 수 있다. 무/유연

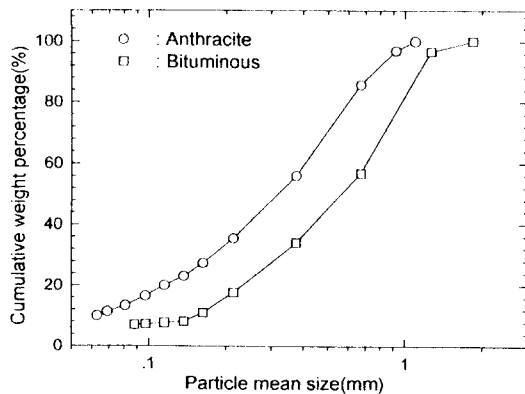


Fig. 1. Cumulative weight percentage of anthracite and bituminous by size.

Table 1. Results of proximate analysis of coals

Type of Coal	Moisture (wt.%)	Volatile matter (wt.%)	Ash (wt.%)	Fixed carbon (wt.%)	Calory (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 2. Results of Ultimate analysis of coals(wt.%, dry basis)

Type of 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

Table 3. Comparison of coal ash(wt.%)

Type of Coal	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	BaO	TiO_2	CaO	MgO	P_2O_5	Na_2O	K ₂ O
Anthracite	53.0	28.23	2.68	0.096	0.12	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

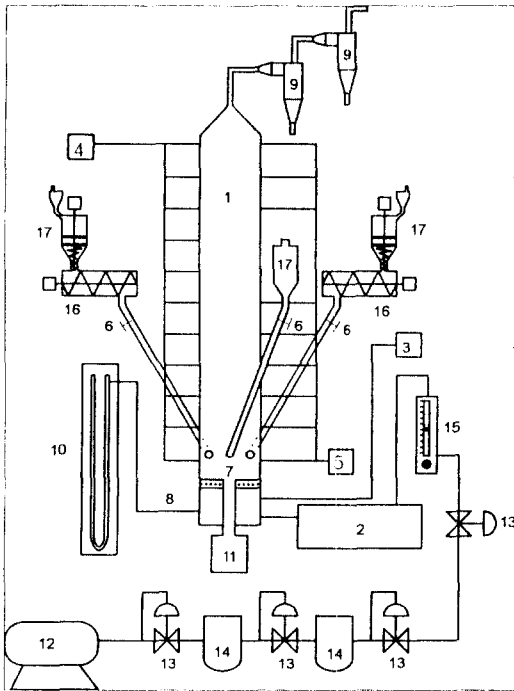
탄 혼합비가 증가할수록 미세입자의 비산유출율이 증가함을 보이고 있다.

2. 실험장치

유동층 연소로는 내경 0.067 m, 높이 약 2 m이며 부식을 방지하기 위하여 실린더형의 stainless steel관으로 제작하였다. 가스 분산판에는 주입공기의 고른 공급을 유도하기 위해 유동층과 같은 재질의 pore size 1.0 mm I.D., hole 334개를 내었고, 개공비는 1.51%이다. 유동화 공기의 공급을 위하여 다음의 순서로 장치를 설치하였으며, 본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 2와 같다. 5 Hp의 공기압축기, 공기정화기(SMC-AF-400), 4개의 정압기(SMC-AR-400, 정압범위 0~10 Kgf/cm), oil 정화기(SMC-AL-400)를 사용하였으며, 유동화 공기량을 조절하기 위해 glove valve와 유량계(Gilmont Co. No.-15)를 설치하였다. 연소로내로 시료를 주입하기 위하여 가스 분산판 상부 0.2 m 지점에 각각 목탄과 무연탄 및 유연탄 주입관을 설치하였으며, 회분은 연소로 하부에 설치된 진동배출기를 사용하여 배출관을 통해 배출시켰다.

배출가스중의 입자간의 마찰, 입자와 연소로 기벽과의 마찰 그리고 연소동에 의해 생성되는 비산 입자를 포집하기 위하여 cyclone을 연소로 상부에 설치하였다. 유동층내의 온도를 석탄의 착화점 이상으로 가열하기 위하여 220 V, 3 kW의 칸탈선을 이용한 예열기를 사용하였으며, 연소로 외부에 동관을 감고 냉각수를 공급하여 석탄의 연소에 의해 생성된 연소열을 제거하여 연소로내의 온도를 900°C로 일정하게 유지하도록 하였다.

Chromel-alumina type의 열전대를 층의 높이에 따라 11개를 설치하여 유동층내의 온도를 측정하였고, 정상적인 유동화 상태를 확인하고, 유동층내의 충전물의 양을 측정하기 위하여 air holder에 manometer를 설치하였다. 그리고 연소로 단열 보온을 위하여 Kawool을 연소로 외부에 감았으며, 연소로내의 가스채취를 위하여 가스분산판으로 부터 0.010 m 지점의 in-bed zone과 약 0.025 m, 0.35 m 지점의 splash zone, freeboard zone에 4개의 배출



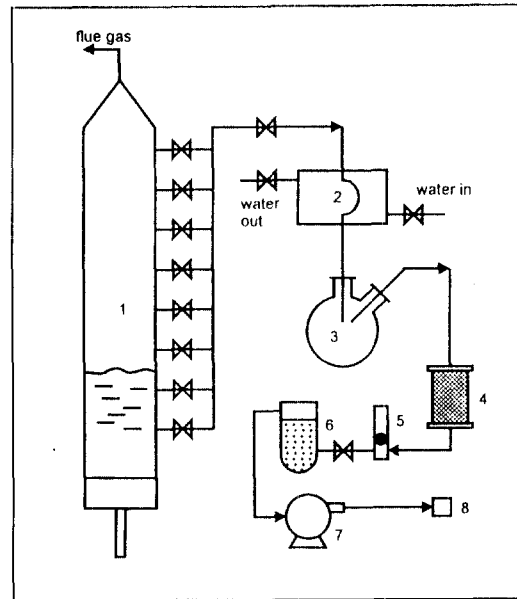
- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. Fluidized bed combustor | 10. manometer |
| 2. Preheater | 11. Vibrating discharger |
| 3. PID temperature controller | 12. Air compressor |
| 4. Digital multithermometer | 13. Regulator |
| 5. Analyzer | 14. Air filter |
| 6.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

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

구동 모두 8개의 채취관을 설치하였다. 채취관은 직경 0.0064 m의 원통형 stainless steel관이며 연소로와 수직으로 장치하였고, 채취관내에 100 mesh stainless steel망을 이중으로 설치하여 유동층로내의 입자상물질이 유출되는 것을 방지하였다. Fig. 3은 배기가스의 분석시스템으로서 유동층 내부의 연소 배가스의 농도를 측정하기 위하여 cooling bath와 condenser를 통과하도록하였고, 분석기에 미치는 분진의 영향을 최소화하기 위하여 Filter를 거쳐 흡인 펌프를 통해 분석기로 배가스가 유입되도록 하였다.

3. 실험방법

층물질로써 도입자 회분을 L/D 비가 1이 되도록



- | | |
|--------------------|-----------------|
| 1. Combustor | 5. Flow meter |
| 2. Cooling bath | 6. Dryer |
| 3. Water condenser | 7. Suction pump |
| 4. Filter | 8. Gas analyzer |

Fig. 3. Flue gas analysis system.

爐내에 주입한 후 공기를 공급하였으며, 공기압축기, 제습기를 거친 후 안정된 공기를 공급하기 위해 설치된 정압기 4개를 6.0 kg/cm², 4.5 kg/cm², 3.0 kg/cm², 2.5 kg/cm²으로 고정하고, 정압기 사이의 oil-정화기와 공기정화기를 통과시켜 공급하였다. 예열기에 연결된 열선을 PI-Controller에 연결하여 setting temperature를 처음에는 250°C, 약 1시간 후에 350°C, 다시 약 30분 후에 480°C에 고정하여 bed내의 온도가 350°C 이상을 유지하도록 가열한 후 glove valve로 유동화 공기의 양을 조절하였다. In-bed의 온도가 350°C에 도달한 후 약 1시간이 지나면 목탄을 주입하여 유동층의 온도를 500°C 이상으로 하여 소량의 유연탄을 천천히 주입하였고, 유연탄에 의해 유동층내의 온도가 700°C 이상으로 증가하면 무연탄을 주입하여 유동층내의 온도를 900°C로 하여 조업하였다.

온도와 이산화탄소의 농도를 확인하여 유동층이 정상상태에 도달하면 각 채취관으로 부터 시료가스를 채취하였고, 시료가스의 성분분석은 Combustion Analyzer(ENERAC 2000, USA)를 이용하여 분석하였으며, 분석의 정확도를 높이기 위해

Table 4. Experimental conditions

Operation variables	Operation range
Anthracite fraction (X_a)	0.1, 0.3, 0.5
Air velocity(m/s)	0.25, 0.3, 0.35
Bed temperature (°C)	900
Aspect ratio (L/D)	1
Excess air (%)	20

1000 ppm SO₂ span gas로서 calibration하였다. 또한 비산유출되는 입자상물질은 cyclone으로 포집하였다.

4. 실험 조건

본 실험에서는 무/유연탄 비와 공급 공기유속에 따라 실험을 수행하였으며, gas sampling position은 분산판으로 부터의 높이를 0.10 m, 0.25 m, 0.35 m, 0.45 m, 0.85 m, 1.45 m, 1.85 m, 2.10 m로 선정하였고, 초기 증분질은 시료와 같은 1.68 mm 이하의 다입자 회분을 사용하였다. bed temperature는 900°C, Aspect ratio(L/D)는 1.0, excess air는 20%로 하였다. 본 실험의 실험변수는 Table 4와 같다.

III. 결과 및 고찰

1. CO₂ 및 O₂ 농도변화

Fig. 4는 공기유속 0.3 m/s일때 무/유연탄비에 따른 CO₂ 및 O₂농도를 분산판으로 부터의 높이에 따라 나타낸 것이다. Distributor로부터 높이가 상승함에 따라 CO₂농도는 점차 증가하는 것으로 나타났으나, 무/유연탄비가 0.1과 0.5에서는 분산판으로부터 25 cm지점이 35 cm지점보다 CO₂농도가 높게 나타나는 것으로 보아 splash영역인 25 cm 지점에서 연소가 더욱 활발히 일어남을 알 수 있다. 또한, 무/유연탄비가 0.3인 경우에는 분산판으로부터 25 cm보다 35 cm지점의 CO₂농도가 더 높게 나타나는 것으로 보아 35 cm근처 지점이 연소영역인 것을 알 수 있으며, 이것은 무/유연탄비 0.1과 0.5에 비해 입자의 분급현상이 무/유연탄비 0.3에서 가장 뚜렷함을 예측할 수 있다. freeboard영역 및 배출구에서 큰 차이는 없으나, 무/유연탄비가 증가할수록 CO₂농도가 감소하므로 무/유연탄비가 증가할수록 불완전 연소정도가 커짐을 알 수 있다. 또한, O₂의 농도변화는 유동층 연소로의 높이가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 무/

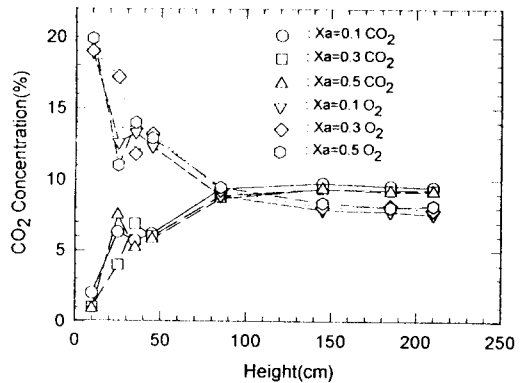


Fig. 4. CO₂, O₂ concentration profile by anthracite fraction and height (m=1.2, Temp.=900°C, L/D=1.0, U₀=0.3 m/s)

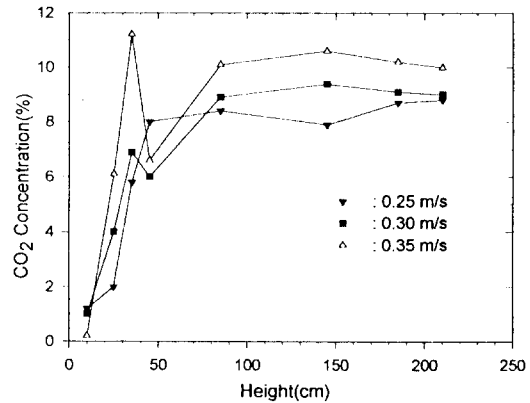


Fig. 5. CO₂ concentration profile by air velocity and height at constant excess air and anthracite fraction (m=1.2, X_a=0.3, Temp.=900°C, L/D=1.0)

유연탄비가 0.1, 0.5인 경우에는 25 cm근처에서 산소가 급격히 감소하는 것으로 보아 이 부근에서 연소영역이 형성되는 것을 알 수 있으며, 무/유연탄비가 0.3인 경우에는 CO₂와 마찬가지로 35 cm근처가 연소영역인 것으로 볼 수 있고, 무/유연탄비에 따른 O₂의 농도는 85 cm지점 이후로는 별로 큰 차이가 없으나, 무/유연탄비가 0.1일때 가장 낮은 농도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이것을 CO₂농도와 연관시켜 이해하면 연소가 활발할 때 CO₂의 농도는 증가하고 O₂농도는 감소하며, 연소가 활발하지 못하면 그 반대현상이 발생한다. 또한 distributor로부터 0.45 m 이후에는 무/유연탄비에 따른 CO₂, O₂농도의 차이가 거의 없었다.

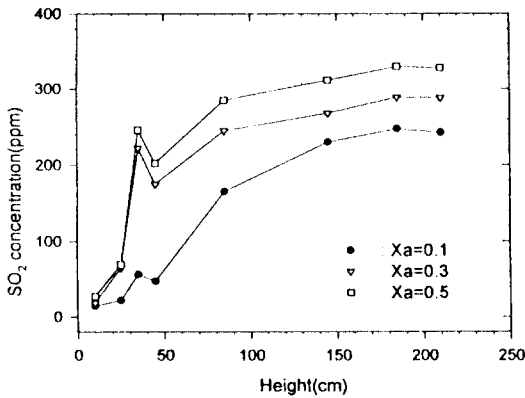


Fig. 6. SO₂ concentration profile by anthracite fraction and height ($m=1.2$, $U_0=0.3$ m/s, Temp.=900°C, L/D=1.0)

Fig. 5는 air velocity(m/s)에 따른 CO₂농도를 높이에 따라 나타낸 그림으로서 유량이 증가할수록 freeboard영역과 출구근처에서의 CO₂농도는 지속적으로 증가하는 것으로 나타났고, 이것은 유량이 증가하면 비산입자 양이 증가하며, 또한 freeboard영역에서 연소되는 입자의 양이 증가하여 연소가 활발히 일어나기 때문이다. 또한 연소영역은 대체로 약 35 cm부근임을 알 수 있다.

2. SO₂, NO_x 농도변화

Fig. 6은 무/유연탄비에 따른 SO₂ 농도를 distributor로부터 높이에 따라 나타낸 것으로서 연소로 높이가 증가할수록 대체로 SO₂농도도 증가하지만 35 cm지점에서의 SO₂ 농도가 45 cm지점에서의 SO₂ 농도보다 더 높다는 것을 알 수 있다. 이것은 35 cm지점에서 대체로 연소가 활발히 일어나 splash zone이 이 부근에서 형성되는 것으로 보이며, freeboard 영역 및 배출구에서는 무/유연탄비의 증가와 함께 SO₂농도가 증가하는 데, 이것은 원시료 속의 황함량이 유연탄보다 무연탄이 더 높기 때문이다. 또한 85 cm지점과 145 cm지점 사이에서 최대농도를 나타내는데, 이것은 석탄이 freeboard 영역으로 올라가면서 계속 연소됨을 의미한다.

Fig. 7은 유속에 따른 각각의 SO₂ 농도를 높이에 따라 나타낸 그림이며, 250 scfh에서는 25 cm 지점에서, 300 scfh와 350 scfh에서는 35 cm지점에서의 SO₂농도가 25 cm와 45 cm지점에서의 SO₂농도보다 더 높은 것으로 나타났다. 이것 또한 연소영역과 관

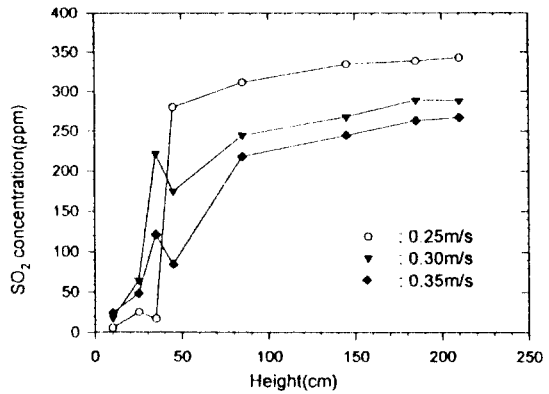


Fig. 7. SO₂ concentration profile according to air flow rate and height ($m=1.2$, $X_a=0.3$, Temp.=900°C, L/D=1.0).

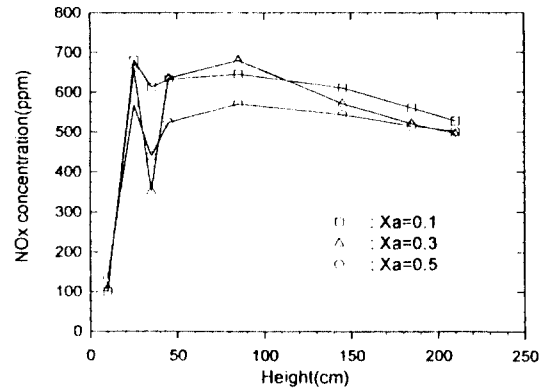


Fig. 8. NO_x concentration profile with anthracite fraction and height ($m=1.2$, $U_0=0.3$ m/s, Temp.=900°C, L/D=1.0).

련되는 것으로 판단되며, 85 cm 지점에서 SO₂농도는 유속변화에 따라 큰 차이가 나지만 145 cm이후의 freeboard 영역과 배출구에서의 SO₂의 농도는 거의 일정한 경향을 보인다.

무/유연탄비에 따른 NO_x의 농도를 유동층높이에 따라 나타낸 것이 Fig. 8이며, 그림에서 알 수 있듯이 in-bed영역인 10 cm지점에서는 NO_x 농도가 무/유연탄의 비에 관계없이 약 100 ppm 근처로 매우 낮게 나타났으며, 25 cm 지점에서 NO_x가 600~700 ppm까지 급격하게 증가함을 볼 수 있고, NO_x농도는 연소로높이에 따라 차이가 크며 특히 무/유연탄비에 관계없이 25 cm지점이 35 cm지점보다는 높은 농도

를 나타내었다. 이것은 시료속의 C성분 보다는 N성분이 산소와 더 빨리 반응하여 Fig. 4에서의 연소영역 이하에서 NO_x가 많이 발생하는 것을 알 수 있으며, 연소로내의 NO_x농도는 큰차이는 없으나 무/유연탄비 0.1일 때 가장 높은 것으로 나타났다. 이것은 원시료속의 N성분 함량이 무연탄에서보다 유연탄에서 더 높고, 무/유연탄비 0.1일때 연소상태가 가장 좋기 때문이다. 연소영역에서 NO_x는 최대이고, 이후의 freeboard영역에서 NO_x는 환원반응에 의해 점차 감소한다.

Fig. 9는 유량의 변화에 따른 NO_x의 농도를 연소로높이에 따라 나타낸 것으로서 25 cm 지점에서의 NO_x 농도가 35 cm 지점에서의 NO_x 농도보다 더 높게 나타났고, 85 cm 지점에서는 0.35 m/s일때 가장 높고 185 cm 지점에서는 0.25 m/s일때 가장 높으며, 배출농도는 유량에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이것은 유량변화에 따른 유동층 각 지점에서의 농도는 다르게 나타나지만 가연성분과 공급공기의 비는 일정하기 때문에 배출농도에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

3. 비산유출입자의 유출율

Fig. 10은 공기유량에 따른 fly ash의 누적 중량%를 평균 입자크기에 따라 나타낸 것으로서 공기유량에 따른 입도분포는 공기유속 0.2 m/s와 0.35 m/s 일때가 비슷한 경향을 나타내었고, 또한 0.25 m/s와 0.3 m/s일때도 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 0.25 m/s와 0.3 m/s에서 미세입자와 굵은입자의 분리현상이 뚜렷하기 때문이다.

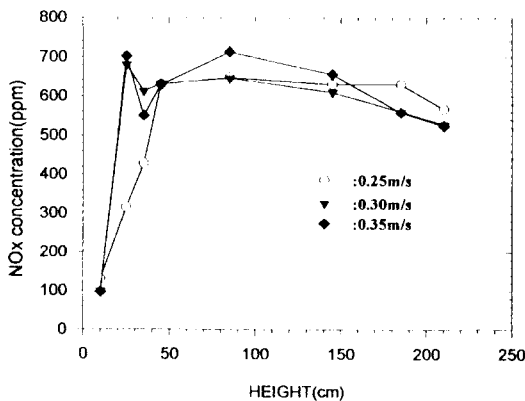


Fig. 9. NO_x concentration profile according to air velocity and height (m=1.2, X_a=0.3, Temp=900°C, L/D=1.0).

Fig. 11은 무/유연탄비에 따라 유출되는 미세입자를 cyclone에서 포집하여 체분석한 후 6개의 mesh 별 particle size를 전체 100으로 볼 때 입자크기가 0.1 mm 이하의 미세입자를 보면 A/B가 0.3에서 약 80%를 차지하여 미세입자의 분율이 매우 높은 것으로 나타났다. 무/유연탄비에 따라 유출되는 미세 비산입자를 포집한 후 13개의 mesh size별로 체분석하여 누적 중량%로 나타낸 것이다. 원시료 속의 무/유연탄비가 증가할수록 미세입자의 중량이 증가하지만 연소시 비산되는 fly ash는 무/유연탄비가 0.3일때는 0.2 mm 이하의 미세입자의 분율이 높고, 무/유연탄비가 0.1과 0.5일 경우에는 0.2 mm 이상의 굵은 입자의 분율이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이것은 무/유연탄비가 0.3일 때 연소되기전 유속에

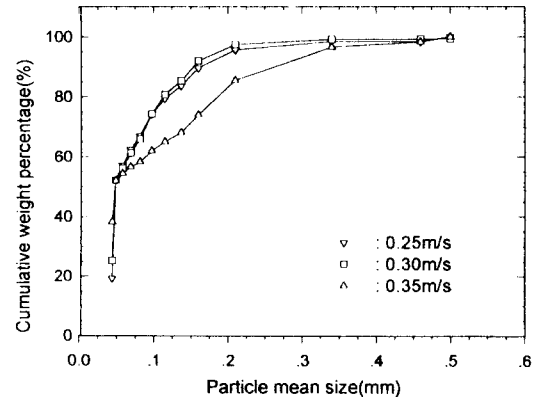


Fig. 10. Size distribution of elutriated particles according to air velocity (m=1.2, X_a=0.2, Temp.=900°C, L/D=1.0).

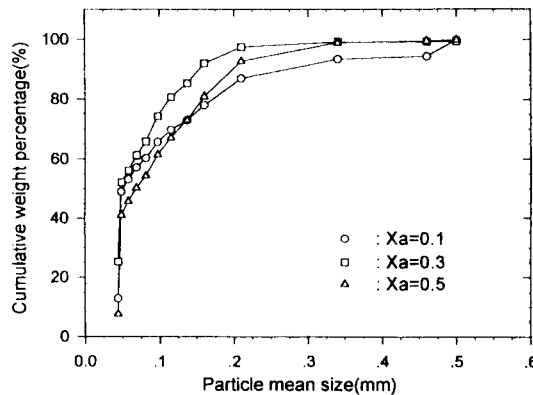


Fig. 11. Cumulative weight percentage of fly ash by anthracite fraction and particle mean size (m=1.2, Temp.=900°C, L/D=1.0, U₀=0.3 m/s).

의해 날려 올라가는 미세입자 양이 많고, 무/유연탄비 0.5일때는 밀도가 큰 무/유연탄비가 증가하므로서 주입석탄이 무/유연탄비 0.3일때 보다 밀으로 떨어져, 오히려 위로 비산되어 올라가는 동안 미세입자가 combustion zone을 통과하면서 연소되며 무/유연탄비 0.1일때는 시료속의 미세입자의 분율이 낮아져 비산입자중의 미세입자분율도 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 비산유출율을 무/유연탄비에 따라 나타낸 것으로서 무/유연탄비가 0.1일때보다는 0.3, 0.5로 증가할수록 비산율은 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 13은 가연성분비(유출가연성분/주입가연성분)를 무/유연탄비에 따라 나타낸 것으로서 무/유연탄비

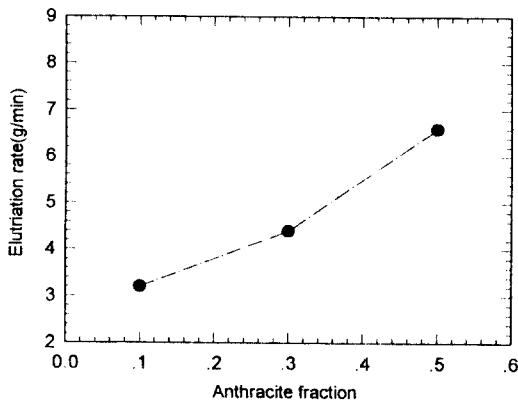


Fig. 12. Elutriation rate by anthracite fraction at constants velocity ($m=1.2$, $Temp.=900^{\circ}C$, $L/D=1.0$, $U_o=0.3$ m/s).

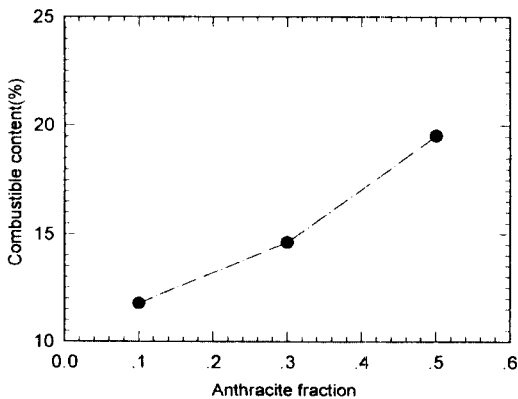


Fig. 13. Unburned combustible contents with air velocity ($m=1.2$, $Temp.=900^{\circ}C$, $L/D=1.0$, $U_o=0.3$ m/s).

가 0.1일때보다는 0.3, 0.5로 증가할수록 비산율은 증가하는 것으로 나타났다. 주입가연성분에 대한 유출가연성분의 비도 무/유연탄비가 0.5일때 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이것은 입자유출이 상대적으로 많기 때문으로 판단된다.

Fig. 14는 비산율을 air velocity에 따라 나타낸 것으로서 air velocity가 증가할수록 비산입자의 비산율은 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 15는 가연성분비(유출가연성분/주입가연성분)를 air velocity에 따라 나타낸 것으로서 유속에 따른 주입가연성분에 대한 유출가연성분비 역시 증가할수록 대체로 증가함을 보여주고 있으나 유속 0.2 m/s, 0.25 m/s, 0.3 m/s일때의 주입가연성분에 대한 유출가연성분비의 백분율이 비슷하고, 0.35 m/s에서는 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 정상상태 도달시간과 비산입자의 유출에 따른 연소효율을 고려하면 유속 0.3

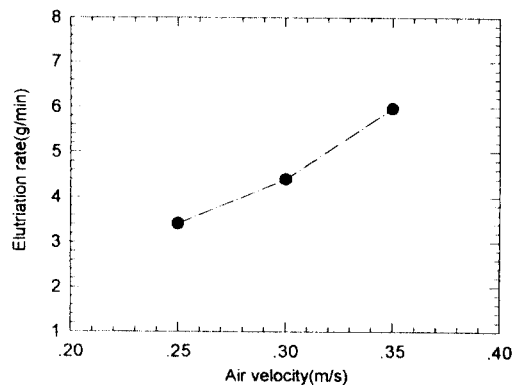


Fig. 14. Elutriation rate with air velocity ($m=1.2$, $Temp.=900^{\circ}C$, $X_a=0.3$, $L/D=1.0$).

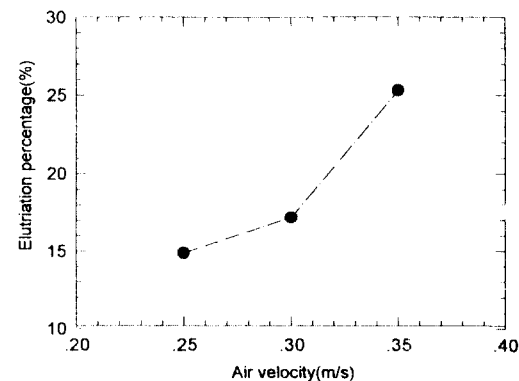


Fig. 15. Elutriation percentage with air velocity ($m=1.2$, $Temp.=900^{\circ}C$, $X_a=0.3$, $L/D=1.0$).

m/s가 적합한 것으로 나타났다.

IV. 요약 및 결론

유동층연소로에서 무/유연탄 혼합연소시 대기오염물질 배출에 관한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

유동층 연소로의 높이가 증가할수록 SO₂농도와 NO_x농도는 대체로 증가하였고, Freeboard에서의 농도가 가장 높으며 배출농도는 다시 감소하는 것으로 나타났다. 또한 무/유연탄비가 증가할수록 배출 SO₂농도는 증가하였고 NO_x농도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 유속에 따른 배출농도도 큰 차이가 없었다. 유동층 연소로 높이가 증가할수록 O₂농도는 대체로 감소하였고, CO₂농도는 증가하는 것으로 나타났으며, 연소영역은 주로 25 cm지점에서 35 cm지점인 것으로 나타났다. 또한 무/유연탄비가 증가할수록 배출 O₂농도는 증가하였고 CO₂농도는 감소하였으며, 유속이 증가할수록 O₂농도는 감소하고 CO₂농도는 증가하였다. 또한, 온도변화에 따른 정상상태 도달시간은 유량변화에 따라 큰 차이를 보이며 O₂농도와 CO₂농도는 100분 근처에서 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다.

비산유출율은 무/유연탄비가 0.1일때보다는 0.3, 0.5로 증가할수록 증가하는 것으로 나타났고, 가연성분비(유출가연성분/주입가연성분)는 무/유연탄비가 0.1일때보다는 0.3, 0.5로 증가할수록 비산율은 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 비산율은 air velocity가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났고, 가연성분비(유출가연성분/주입가연성분)는 유속에 따라 역시 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 무/유연탄비가 0.3일 때 미세입자의 비산유출 분율이 상

대적으로 높고, 무/유연탄비와 유속에 관계없이 비산유출입자의 평균입경에 따른 미연분함량은 미세입자일수록 대체로 높은 것으로 나타났다.

V. 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특징기초연구과제(92-26-00-02)연구비 지원에 의해 이루어진 연구 결과의 일부이며 연구비를 지원해 주신 당 재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 한국 에너지 기술 연구소: Energy部門 環境公害 低減對策 堅立(IV), 1994.
- 2) 孫宰翼: 低質炭의 流動層 燃燒技術 開發 研究(II), 韓國動力資源研究所 研究報告書 1983.
- 3) 大韓石炭協會: 9, 55, 1982.
- 4) 韓國統計年鑑: 127, 1982.
- 5) 孫宰翼: 低質炭의 流動層 燃燒技術 開發 研究(III), 研究報告書, 韓國動力資源研究所, 1983.
- 6) Schmal, D.: Improving the Action of Sulfur Sorbent in the Fluidized Bed Combustion of Coal, *Ind. Eng.chem. process des. dev.*, **22**, 72, 1985.
- 7) 최청송, 金翼壽, 조영민, 도동섭: 低質炭 活用을 위한 流動層 技術 (1): 流動層으로부터의 微細粒子 流出, *化學工學* 23, 6, 431, 1985.
- 8) Berkowitz, N.: "An Introduction to Coal Technology", CH10, ACADEMIC PRESS, 1979.
- 9) 도동섭: *Energy* **1**, 5, 1982.
- 10) Anthony, E.J., H.A. Becker, R.K. Code, D.T. Liang and J.R. Stephenson: Combustion of high-sulfur eastern Canadian Coals by AFBC, Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 32-42, 1985.
- 11) Pack, J. H., Choi, C. S. and Kang, W. K.: A Study on Anthracite Combustion in a Fluidized Bed, *PACHEC*, **3**, 223, 1983.