

사이클론 연소기에서 성상이 다른 석탄의 연소 특성 비교

홍성선 · 황갑성* · 최병선**

충북대학교 공과대학 화학공학과

*충청전문대학 환경공학과

**한전기술연구원 화학환경연구소

(1993년 11월 29일 접수, 1994년 2월 15일 채택)

Comparison of Combustion Characteristics of the Different Property Coal in Cyclone Combustor

Sung-Sun Hong, Kap-Sung Hwang*, and Byung-Sun Choi**

Dept. of Chem. Eng., Chungbuk Nat'l. Univ., Cheongju 360-763, Korea

*Dept. of Envi. Eng., Chungcheong College, Chengwoen 363-890, Korea

**Research Center, Korea Electric Power Corp., Daijeun 305-606, Korea

(Received November 29, 1993, Accepted February 15, 1994)

요약 : 높은 연소효율과 환경오염물질을 적게 배출하는 75kw급 소형 접선방향 연료주입식 수직형 사이클론 연소기를 이용하여 성상이 다른 수입 유연탄(역청탄, 아역청탄)을 시료로 하여 공기비 0.4~1.6 범위에서 각각의 연소 특성 및 연소 후 회분의 포집효율을 조사하였다. 로 내 온도 분포는 전영역에서 역청탄이 아역청탄보다 약 100℃ 이상 높게 나타났고 로 내에서는 로 하부와 축선이 높게 나타났다.

Abstract: Two coals which have a quite different properties were selected to compare the combustion characteristics in a cyclone combustor. The capacity of the combustion test rig is about 75kW and total volume is 5.7 liters. The pulverized sample coals are well burned from fuel rich(air ratio 0.4) to fuel lean(air ratio 1.6). Two different property coals show quite different patterns of ash collection in slag pot, dust separator and combustion chamber. Combustion temperature of subbituminous coal is about 100℃ lower than bituminous coal at the entire region, and in case of bituminous coal, hot spot appeared at the lower part and axial line of the combustion chamber.

1. 서론

석탄은 많은 양이 세계적으로 널리 분포되어 있어 에너지원으로 계속 이용될 전망이다. 우리나라가 외국에서 수입한 석탄은 연소과정을 거쳐 주로 전기에너지 생산에 이용되고 있다. 석탄의 에너지화 방법에는 에너지 이용 효율면이나 환경오염 생성 정도에

많은 차이가 있다.

석탄의 연소시 일반적인 연소방식은 미분탄 직접연소 방식으로 대형 발전소에서 많이 이용되고 있으나 석탄을 200mesh 이하로 미분해야 하는 어려움이 있고, 연소과정 중 석탄 내 함유되어 있는 광물질들이 연소로 벽에 응착되는 등 연소 장애가 종종 발생되며 비교적 연소실 용적을 크게 차지하는 단점을 가진다.

유동층 연소방식은 최근 많은 연구가 있었고 환경 오염방지 측면에서도 첨가제의 주입으로 연소시 생성되는 SO_x, NO_x 생성을 저감하는 이점을 가지고 있으나 보일러의 열출력을 수시로 변경할 수 있는 능력이 좋지 않은 결점을 가지고 있다[1].

사이클론 연소방식은 비교적 연소가 어려운 연료들을 연소하는데 이점이 있는 연소방식으로 수분이 많은 농업 부산물이나 고회분의 석탄 그리고 휘발분 함량이 작아 비교적 연소가 어려운 석탄을 연소하거나 각종 폐기물 소각에 적합한 것으로 알려져 있다[2].

본 연구에서는 높은 연소효율과 환경오염물질을 적게 배출하는 사이클론 연소기를 이용하여 우리나라에서 수입하여 사용하고 있는 여러 종류의 석탄 중에서 고정탄소 함량이 높고 연소성이 낮은 역청탄과, 휘발분 함량이 높고 산소 함량이 높은 아역청탄이 사이클론 연소기에서의 연소시 발생하는 여러 가지 현상과 문제점을 파악하고자 하였다.

수직형 사이클론 연소기의 기본 구조 및 연소기 내의 흐름은 Fig. 1과 같이 고려되며 각 영역은 힘의 균형에 의하여 특징지어진다. 연소기 내에서 유체와

작은 석탄입자는 높은 속도로 연소기의 외부 벽에서 접선으로 도입되며 I 영역은 얇은 영역으로 고려되고 전 원통벽을 둘러싸고 있으며 도입된 운동량은 원통의부벽에서 전단응력으로 손실된다. 또한 이 영역에서 석탄입자의 연소가 시작된다. 새로운 유체가 연속적으로 도입될 때 그 유체는 내부와 배출구를 향해 반경방향으로 부유되고 접선과 반경방향 속도는 증가하여 반경방향 운동과 질량운동의 보존에 기여한다. I 영역에서 연소된 입자와 유체는 III영역으로 도입이 되며 I 영역에서 연소된 입자와 연소가 채 되지 않은 입자들은 II 영역을 통하여 하부의 회분 포집기나 출구를 통해 외부로 방출되며 일부의 미연 탄소입자들은 III영역으로 다시 들어가 연소가 진행된 후 반경방향 운동량의 감소와 축 운동량의 증가로 인하여 IV영역을 통하여 외부로 방출된다. 그러므로 사이클론 연소기에서는 입자의 체제시간을 길게 하고 회분 제거가 용이하며 회분포집률이 높다.

본 연구에서는 제작한 75kW 용량의 사이클론 연소기에서 석탄을 연소하여 연소실 내의 온도 분포, 연소기부위별 석탄회 포집양상 및 연소효율 등을 분석하여 연소에 관한 제반 특성을 조사 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 실험에 사용한 장치의 흐름도표는 Fig. 2에 나타낸 바와 같으며 주장치로는 연소로(Combustor), 석탄공급기(Coal feeder), 주입기(Ejector), 기타설비 등으로 구분되어 있으며 연소로는 내부직경이 158mm, 길이가 318mm인 수직원통형이다. 내부는 알루미늄 캐스터블로 내장하여 단열을 도모하였고, 연료 연소를 위한 공기는 예열없이 상온에서 공급되었으며 공급되는 석탄과 공기는 석탄입자의 원심력 증가를 위하여 연소기 내의 상부에서 접선방향으로 연소기 내로 주입되어 선회를 일으키면서 벽면 주위에서 연소가 발생되며 아래방향으로 이동하도록 제작하였다. 연소된 후 석탄회분은 하부의 직경 60mm의 회분 포집구에서 포집이 되며 연소된 고온의 가스는 윗방향으로 올라가 직경 76mm의 vortex finder를 거쳐 연소로 밖으로 나가게 된다. 연소시 연소로 내의 온도 분포를 측정하기 위하여 연소로의 측면에 3개의 R-type 열전대를 설치하여 로 내의 온도를 측정하였으며 이에 대한 구조를 Fig. 1에 나타내었다.

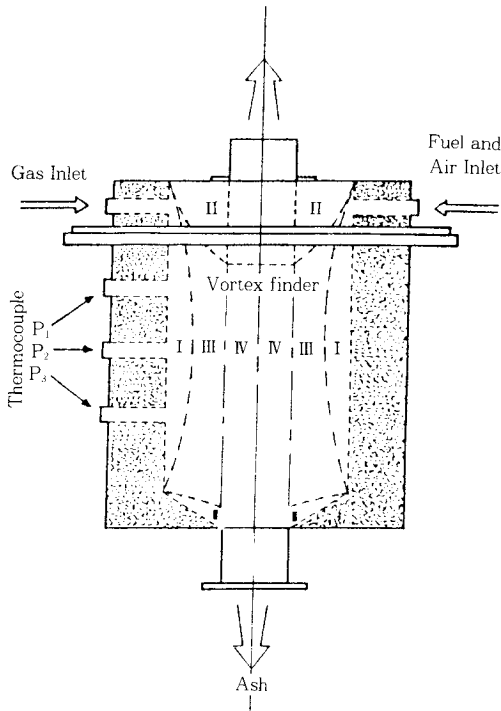
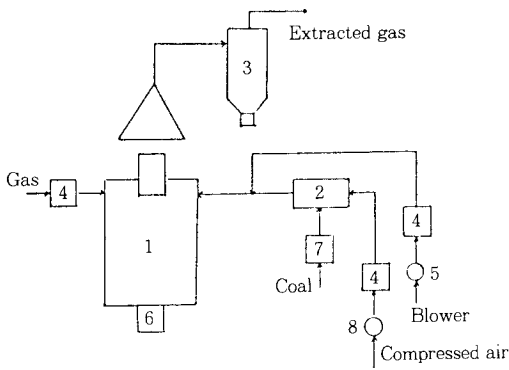


Fig. 1. Flow regions and schematic diagram of cyclone combustor.



- 1. Cyclone combustor
- 2. Ejector
- 3. Cyclone separator
- 4. Rotameter
- 5. Valve
- 6. Ash removal pocket
- 7. Rotary feeder
- 8. Pressure regulator

Fig. 2. Schematic diagram of test facility.

석탄공급기로는 로타리공급기(날개 반지름 8mm × 8개)를 사용하여 일정한 속도로 공급되고 이것은 공기분사기에서 1차 공기와 혼합되어 공기압 수송방식으로 연소기에 압송된다[5].

석탄의 겉보기 밀도를 400~450kg/m³으로 가정하고 10rpm으로 로타축이 회전할 때 약 320~440g/min의 석탄 공급량을 갖도록 하였다. 구동 모터의 속도는 PID 제어법으로 조절할 수 있는 brushless 모터(이원전기; Model-IW430304), 로타 축과의 기어감속비는 감속비를 60 : 1로 하였다.

회분이나 미연탄소분의 배출을 방지하기 위하여 최적 vortex finder를 연소로에 설치하였고 연소로에서 배출되는 가스 내의 환경오염물질인 회분이나 미연탄소분을 포집하기 위하여 출구 외부에 사이클론을 부착하였다. 설계시 입구에서의 공급속도와 처리 가스 유량이 기준이 되어 가스유량을 4000 l/min, 입구속도 15m/s를 기준으로 하여 설치하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 시료의 분석방법

시료의 공업분석은 KS E 3705, ASTM D 3172에 의하여 수분, 휘발분, 고정탄소분, 회분을, 원소분석은 ASTM D 3176에 의해 탄소, 산소, 수소, 질소, 유황, 비연소성 회분을 측정하였다[6]. 또한, Perkin Elmer TGA-7을 이용하여 시료석탄에 대한 비등온 열분석을 행하여 반응 개시온도, 종료온도, 가연 성

Table 1. Proximate Analysis of Sample Coal

Item/Name of sample	Bituminous coal	Subbituminous coal
Moisture (%)	6.91	14.58
Volatile matter (%)	25.86	35.60
Fixed carbon (%)	50.52	34.75
Ash (%)	16.71	15.07
Heating value(Kcal/kg)	6550	5344

Table 2. Ultimate Analysis of Sample Coal

Item/Name of sample	Bituminous coal (%)	Subbituminous coal (%)
Carbon	69.03	58.95
Hydrogen	4.27	4.38
Oxygen	7.79	20.00
Nitrogen	1.45	1.24
Sulfur	0.75	0.36
Ash	16.71	15.07

분의 양, 최고 중량 감소비를 나타내는 지점의 온도를 측정하였다. Malvern 2600 Laser Diffraction Particle Sizer를 이용한 시료의 입도분석한 결과는 Table 1, 2와 같다.

2.2.2. 연소 실험방법

연소 실험은 1) 필요 연소조건 선정, 2) 연소 예열단계, 3) 석탄주입기의 보정, 4) 예열중지와 석탄 주입, 5) 연소실 내 온도 분포 측정, 6) 연소 종료 및 냉각, 7) 부위별 포집된 석탄회의 정량 등으로 구분하여 시행하였다.

연소 필요조건 선정은 주입석탄량의 결정과 연소용 공기량의 결정단계로 다음의 식에 의하여 결정하였다.

연소에 필요한 전체 공기량은 시료석탄의 원소분석 결과에서 (1)식에 의하여 이론 산소량을 구하였다.

$$A_o = 1.87C + 5.6\left(H - \frac{O}{8}\right) + 0.7S \quad (\text{Nm}^3/\text{kg}) \quad (1)$$

- A_o : 이론 산소량
- C : 시료석탄의 탄소 함량 (%)
- H : " 수소 "
- O : " 산소 "
- S : " 유황분 "

Table 3. Combustion Test Conditions of Subbituminous Coal

Air ratio	Coal feed rate		Air feed rate(at 15°C)		
	kg/H	Feeder controller RPM	Primary air		2nd air flow rate(Nm ³ /H)
			Compressor pressure (kg/cm ²)	Flow rate (Nm ³ /H)	
0.4	12.0	240	3	5.82	23.1
0.6	12.0	240	3	5.82	37.7
0.8	12.0	240	3	5.82	52.3
1.0	12.0	240	3	5.82	67.0
1.2	12.0	240	3	5.82	81.6
1.4	12.0	240	3	5.82	96.2
1.6	12.0	240	3	5.82	110.8

Table 4. Combustion Test Conditions of Bituminous Coal

Air ratio	Coal feed rate		Air feed rate(at 15°C)		
	kg/H	Feeder controller RPM	Primary air		2nd air flow rate(Nm ³ /H)
			Compressor pressure (kg/cm ²)	Flow rate (Nm ³ /H)	
0.4	11.7	180	3	5.82	28.7
0.6	11.7	180	3	5.82	46.1
0.8	11.7	180	3	5.82	63.5
1.0	11.7	180	3	5.82	80.9
1.2	11.7	180	3	5.82	98.3
1.4	11.7	180	3	5.82	115.7
1.6	11.7	180	3	5.82	133.1

이렇게 구해진 이론산소량에서 이론공기량 A_A 는 (2)식에 의해 구했고

$$A_A = \frac{A_O}{0.21} \quad (2)$$

실제 공기량 A_R 은 (3)식에 의해서 구하였다.

$$A_R = A_A \times \text{공기비} \quad (3)$$

예열은 프로판가스를 연소하여 석탄이 원활하게 착화될 수 있도록 중앙부 벽면온도가 900°C가 될 때까지 예열하여 연소실 각 부위 온도가 일정하게 안정될 때까지 가열하였다.

석탄을 석탄주입기에 투입하기 전에 석탄주입기의 회전속도를 미리 보정곡선에서 보정하여 공급기의 회전속도를 조정하였고 석탄시료 2kg을 사이로에 넣고 공급석탄의 공기비를 계산하여 요구하는 공기비가 되도록 전체 공기량을 조절하였으며 공기비 별로 0.4~1.6 범위에서 0.2 간격으로 시험하였다. 이때

석탄공급기와 연소기 공기 공급조건은 Table 3, 4와 같이 설정하였다[7]. 석탄 연소시 연소실 내 부위별 즉, 상(P_1), 중(P_2), 하(P_3)와 벽면, 중간, 중심의 각 위치별 온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 연소실 내 온도 분포

석탄이 연소될 때 연소실 부위별 온도 분포상태는 연료의 연소 특성을 파악하고 연소기를 설계하고 제작하는데 매우 중요한 요소가 되고 있다. 본 실험에서는 아역청탄(Alaska탄)과 같이 휘발분이 많은 시료와 역청탄(Ulan탄)과 같이 고정탄소분이 많은 성상이 크게 다른 두 시료를 연소실에서 연소하여 Fig. 1의 각 영역의 상부(P_1), 중앙부(P_2), 하부(P_3)에서 각각 연소온도를 측정하였다.

휘발분이 많은 아역청탄의 경우 석탄이 주입되어 입자들이 원심력을 받아 벽면을 따라 선회하면서 연

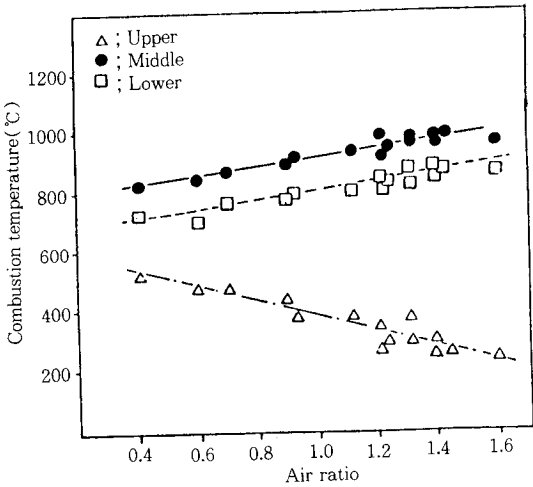


Fig. 3. Combustion temperature at the region I of subbituminous coal vs. air ratio.

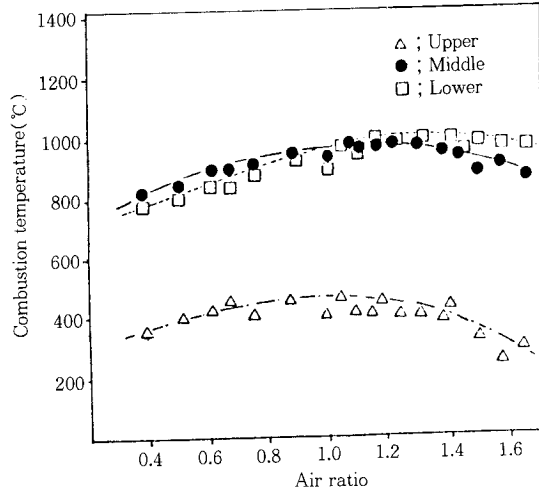


Fig. 5. Combustion temperature at the region I of bituminous coal vs. air ratio.

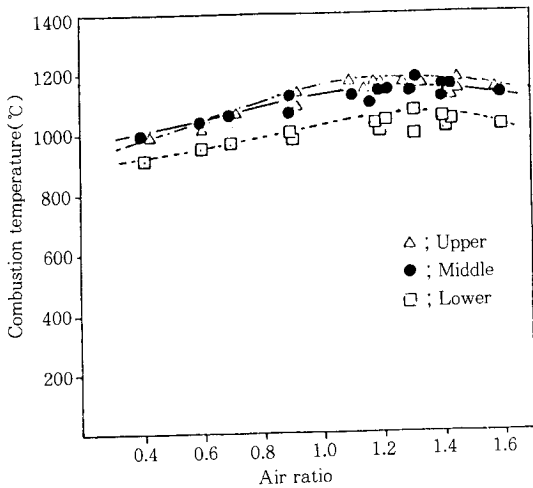


Fig. 4. Combustion temperature at the region IV of subbituminous coal vs. air ratio.

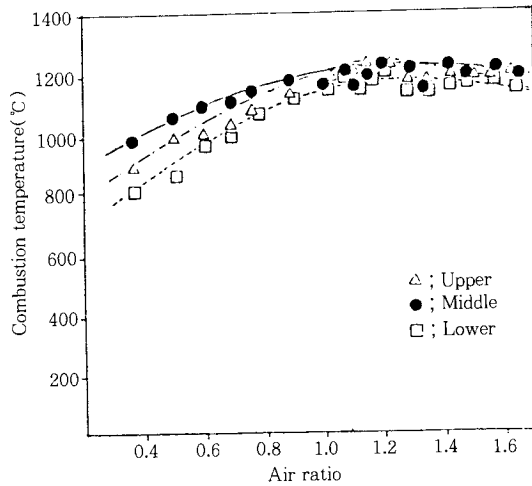


Fig. 6. Combustion temperature at the region III of bituminous coal vs. air ratio.

소되는 영역 I에서의 온도는 Fig. 3과 같이 상부는 공기비 증가에 따라 점차적으로 낮아진 반면에 중간과 하부에서는 공기비 증가에 따라 온도가 상승되고 있었다. 이와 같이 로 내에서 벽면이 현격한 온도차와 공기비 저하에 따라 온도 저하가 생기는 것은 예열되지 않은 외부 공기가 연소로에서 아직 가열되지 않아 주위로부터 열을 흡수하기 때문이다.

영역 IV에서의 온도 분포는 Fig. 4와 같이 연소기 내의 최종온도 분포를 간접적으로 추정할 수 있는 것으로 상부온도의 경우 공기비 증가에 따라 소폭으

로 증가하여 공기비 1.3 정도에서 최고 약 1200°C까지 상승하였고 공기비가 1.6에서는 다소 낮아지고 있었다. 이 실험결과를 주요 실험조건인 공기비별로 종합하여 연소실 내 연소온도 분포를 보면 공기비가 낮은 경우 착화가 늦고, 연소온도도 비교적 낮았으며 연소실 전체에 산포되어 연소되는 것으로 추정되며 공기비가 증가함에 따라 출구 중심선에서 연소가 활발하게 일어나는 것으로 나타났다. 고정탄소 함량이 높은 역청탄의 경우 연료가 연소로로 주입되어 원심력을 크게 받고 있는 영역 I에서의 온도 분포는 Fig.

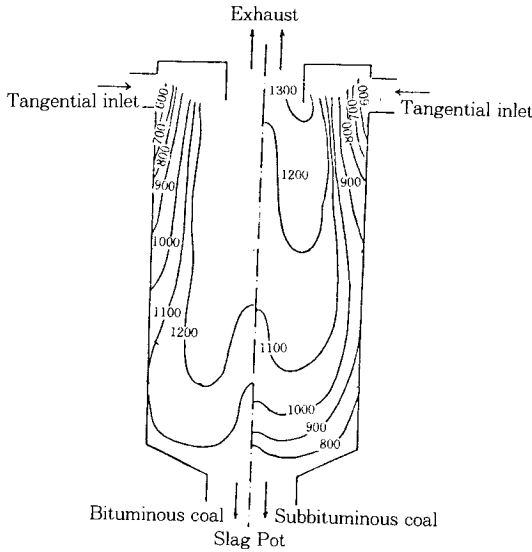


Fig. 7. Comparison of combustion temperature profile on the air ratio 1. 2.

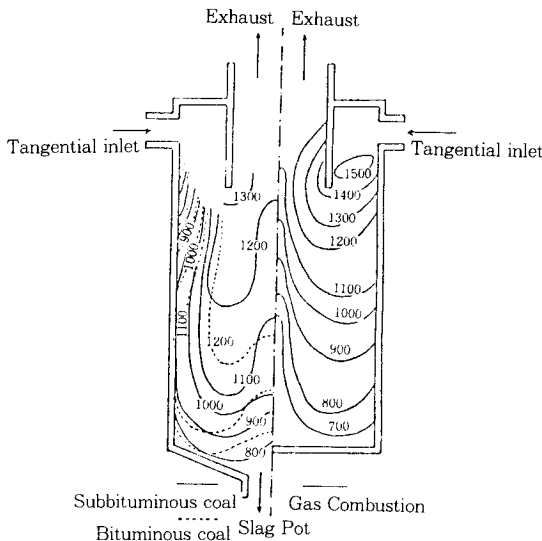


Fig. 8. Comparison of combustion temperature profile.

5와 같고 연소영역 III에서의 온도는 Fig. 6과 같이 로 내의 온도가 공기비 증가에 따라 전반적으로 상승하였으며 공기비 1.2 부근에서 최대 온도 분포를 나타내고 있었다.

두 연소시료의 공기비에 따른 연소온도 분포 양상을 쉽게 구별하기 위하여 Fig. 7에 좌측은 역청탄,

우측은 아역청탄의 온도 분포를 나타내었다. 탄의 전반적인 연소양상에서는 역청탄이 아역청탄보다 약 100°C 이상의 높은 연소온도를 나타내고 있었다. 이는 고정탄소 함량이 많은 역청탄이 휘발분이 많이 함유된 아역청탄의 경우보다 약 100°C 이상 높은 온도에서 연소되었고 고정탄소 함량이 많은 석탄의 경우에는 로 내 중앙부와 하부에 큰 온도 차이는 없으나 로 내 하부온도가 중앙부 온도보다 연소온도가 높게 나타나고 휘발분 함량이 많은 석탄은 중앙부의 온도가 가장 높게 나타나고 있어 연료 중의 휘발분이 많고 쉽게 착화되는 석탄의 경우 비교적 로 내의 중앙부에 고온연소영역의 형성이 가능하고 고정탄소 함량이 많아 착화가 늦은 석탄의 경우 로 내의 하부와 중심축 배출선상에 고온연소영역의 형성이 이루어져 연소로 내의 고온부위가 달라진다.

Fig. 8의 오른쪽에 Najim의 가스 및 공기 혼합체의 사이클론 연소기 내의 온도 분포를 왼쪽에는 본 실험에서의 온도 분포를 도시하였다[8]. 이 그림에서 알 수 있듯이 가스연소에서는 접선방향 입구 근처가 가장 높은 1500°C를 나타내고 있는데 비하여 본 연구의 시료에서는 연소가 늦어 그와 반대로 연료입구 근처가 가장 낮은 온도를 보여준다. 이러한 현상은 또한 고체연료일지라도 연료 중에 휘발분이 많고 쉽게 착화되는 아역청탄 연료의 경우 비교적 연소실 상부에 고온 연소영역의 형성이 가능하고 휘발분 함량이 적고 착화가 늦은 역청탄 연료의 경우 연소실 하부와 중심축 배출선상에 고온 연소영역의 형성이 가능할 것으로 추정되었다[9].

3. 2. 공기비에 따른 부위별 석탄회 포집 양상

시료석탄 2kg을 연소하며 부위별로 포집된 석탄회는 아역청탄과 역청탄에서 서로 매우 다른 양상을 보이고 있다. Fig. 9는 연소 후의 회분포집상태를 나타내는 것으로 아역청탄의 경우는 공기비가 약 0.4 일 때 포집효율이 가장 높았으나 공기비가 증가함에 따라 로저회(Bottom Ash)는 점차 감소하였으며 역청탄의 경우는 공기비 0.4에서는 낮았으나 점차 공기비가 증가함에 따라 증가하여 1.6에서 가장 높은 포집효율을 나타냈다. 사이클론 먼지포집기에서 포집된 양의 경우 아역청탄은 공기비에 따라서 변함없이 일정하게 포집되고 있었으나 역청탄의 경우는 공기비 0.4에서 330그램 정도 포집되었고 공기비 증가에 따라 서서히 감소하여 공기비가 1.6까지 증가되면서

5그램 이하의 적은 양이 포집되었다. 연소실 내에 부착된 클링카회(Clinker Ash)의 경우 두 석탄의 양상은 정반대의 경향을 나타내고 있다. 아역청탄은 공기비 0.4에서 0.8까지 거의 생성되지 않았으나 0.9 근처에서 생성되기 시작하여 공기비가 증가하여 공기비 1.2 이상에서는 70그램 이상이 부착되고 있었다. 그러나 역청탄의 경우는 공기비 0.4에서 170그램 이상이 부착되었으나 공기비 1.0 이상에서는 서서히 감소하여 소량만이 부착하였다.

이러한 현상들은 로저회분의 경우 역청탄이 공기비 증가에 따라 포집량이 증가하는 것은 공기공급이 많아지면서 사이클론 연소기 내에 체류시간이 짧아져서 Bottom으로의 흐름이 증가하는 것으로 추정된다. 연소실 내 회분의 경우 연소실 내 부착된 양이 역청탄의 경우 아역청탄보다 다소 높게 나타나고 있으나 큰 차이는 없었으며 배출가스의 사이클론에서 포집된 회분은 미소한 양이나 이것은 시료석탄의 연소성과의 상관관계가 있는 것으로 해석되며 충분한 공기가 공급되는 공기비 1.0 이상부터는 큰 차이를 찾아볼 수 없었다.

이러한 현상들은 석탄의 착화성과 전체 연소시간, 연소로 내의 온도 그리고 석탄 자체의 물리적 성상과 밀접한 관계가 있는 것으로 해석된다. 또한 시료

석탄의 공업분석 중 휘발분 함량 차이에서 유추가 가능한바, 아역청탄의 경우 휘발분 함량이 35.67% 였으나 역청탄의 경우 25.9%로 약 10% 정도가 낮기 때문인 것으로 추정된다.

3.3. 공기비에 따른 부위별 가연 성분의 함량

Fig. 10은 연소 후 포집된 회분을 채취하여 규격분 석(KS E 3704)에 의해 각 공기비 변화에 따른 가연 성분의 함량을 측정하여 아역청탄의 로저회는 공기비 0.4에서 약 52% 이상의 가연 성분이 함유되어 있었으나 공기비가 증가되면서 감소하였다. 역청탄의 경우도 공기비 증가에 따라 가연 성분이 완만하게 감소 경향을 나타내고 있어서 두 시료 모두 공기비가 증가하면 가연 성분이 감소하는 추이에서는 거의 같은 양상을 나타내고는 있으나 전체적인 가연 성분의 공기비 증가에 따른 감소율은 아역청탄이 다소 크게 나타났다. 이는 공기비가 증가함에 따라 연소효율이 좋아진다는 것을 나타내고 있다.

사이클론에서 포집된 비회는 아역청탄의 경우 공기비가 증가하면 가연 성분은 급격히 감소하여 공기비 1.6에서는 매우 낮음을 보여주고 있으나 역청탄은 공기비 증가에 따른 가연 성분 함유율의 감소폭이 현저하게 낮았다. 이는 역청탄 입자들의 blowby되는 현

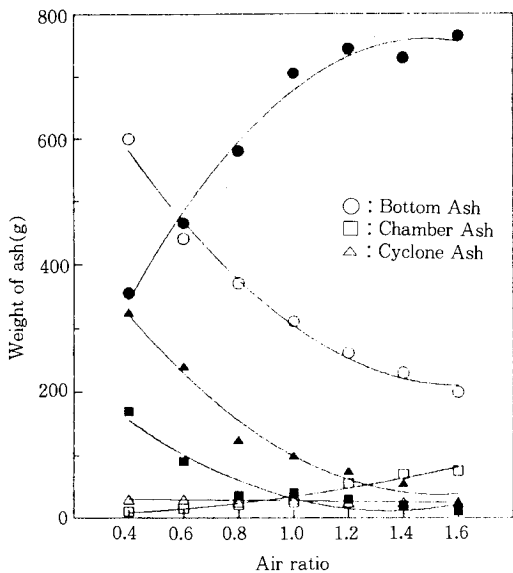


Fig. 9. Weight of collected ashes vs. combustion air ratio (● ; bituminous coal, ○ ; subbituminous coal).

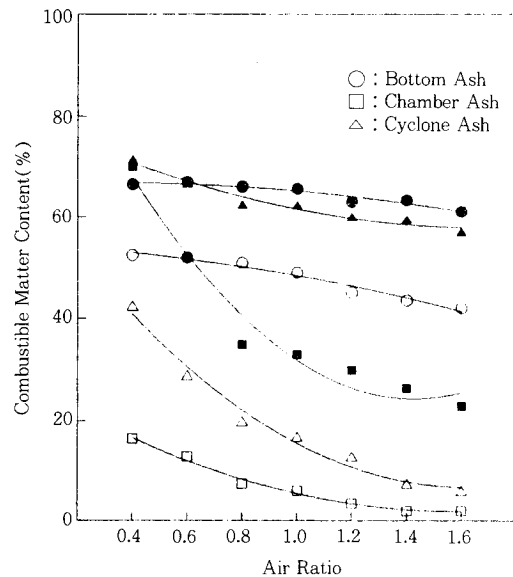


Fig. 10. Combustible matter content of coal ash vs. combustion air ratio (● ; bituminous coal, ○ ; subbituminous coal).

상이 공기비 증가에 따라 증가하고 있음을 나타낸다.

연소로 내에 부착된 회분의 경우 아역청탄의 경우 공기비 증가에 따라 가연 성분 함량이 감소되어 공기비가 1.2를 넘게 되면 급격히 감소하였다. 역청탄의 경우도 연소로 내에 부착된 회분 중 가연 성분의 함량은 공기비가 증가함에 따라 감소함을 나타내고 있었다. 공기비 증가에 따른 가연 성분의 함량은 두 석탄 모두 감소하고 있었으며 감소 쪽에서는 공기비 1.0까지는 크게 나타났으나 그 이상에서는 비교적 둔감한 상태를 보여주고 있다. 이는 공기비가 증가함에 따라 연소효율이 좋아진다는 것을 나타내며 또한 공기비에 따른 연소로 내의 온도 분포의 현상에서 공기비 1.0~1.4의 범위에서 가장 높은 온도를 나타내는 것과 일치하고 있다.

4. 결 론

사이클론 연소기 내에서 성상이 다른 석탄을 공기비 0.4의 연료 과잉상태에서 공기비 1.6의 공기과잉 상태까지의 범위에서 연소 특성을 조사한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 사이클론 연소기 내의 연소온도는 아역청탄은 역청탄에 비하여 벽면영역 I에서 영역 IV까지 100℃ 정도 낮은 온도 분포를 나타냈다. 아역청탄의 경우 높은 온도가 연소실 전체적으로 넓게 분포되어 있으나 역청탄의 경우는 연소실 하부와 중앙 중심선을 따라 높은 온도가 나타나고 있었다.

2. 회분 포집률은 역청탄의 경우 공기비 증가에 따

라 증가하나 아역청탄의 경우는 공기비 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.

3. 연소 후 회분의 가연 성분 함량은 역청탄이 아역청탄보다 높고 공기비 증가에 따라 감소하였다.

참 고 문 헌

1. R. Joseph, The 17th International Conference on FBC Oct(1982).
2. C. J. Lawn, "Principle of Combustion Engineering for Boilers.", 451, Academic Press, New York(1987).
3. A. K. Gupta, P. G. Lilley, and N. Syred, "Swirl Flows", ABACUS Press, New York(1984).
4. L. Zhou, Z. Zhang, and K. Yu, *Chem. Res. Des.*, **66**, 114(1988).
5. H. F. Mark, and D. F. Other, Encyclopedia of Chemical Technology, The 3th Ed., John Wiley & Sons, New York(1990).
6. D. Merrick, Coal Combustion and Conversion Technology, Macmillan(1984).
7. K. S. Hwang, Ph D. Thesis, Dept. of Chem. Eng., Univ. of Chungbuk(1993).
8. S. E. Najim, A. C. Styles, and N. Syred, *J. Inst. Energy*, **55**, 19(1982).
9. S. Y. No, Ph D. Thesis, Dept. of Mechanical Eng. and Energy Studies, Univ. of Wales(1990).