

## 국내산 무연탄의 순환유동층 연소특성 연구

선도원<sup>†</sup> · 배달희 · 한근희 · 손재익 · 강 용\* · 위영호\*\* · 이정수\*\* · 지평삼\*\*

한국에너지기술연구소 에너지환경연구부

\*충남대학교 화학공학과

\*\*전력연구원

(1995년 5월 30일 접수, 1995년 12월 7일 채택)

## Circulating Fluidized Bed Combustion of Korean Anthracite

Dowon Shun<sup>†</sup>, Dal-Hee Bae, Keun-Hee Han, Jae-Ek Son, Yong-Kang\*,  
Young-Ho Wee\*\*, Jung-Su Lee\*\* and Pyung-Sam Ji\*\*

Energy & Environment Research Dept., Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea

\*Chung-Nam University, Taejeon 305-380, Korea

\*\*Korea Electric Power Research Institute, Taejeon 305-764, Korea

(Received 30 May 1995; accepted 7 December 1995)

### 요 약

국내산 무연탄(발열량: 4,529 kcal/kg, 회분: 38%)의 순환유동층 시험 연소로에서의 연소현상을 고찰하였다. 대상탄은 삼척지역에서 채광된 무연탄으로 평균입경 0.39 mm로 분쇄한 후 연소로에 공급하였다. 석탄 공급속도에 따른 온도분포, 과잉공기를 변화에 따른 연소효율, 석회석 투여에 따른 탈황효과, 기타 연소조건이 SO<sub>2</sub>와 CO, NO<sub>x</sub> 발생에 미치는 영향 등을 고찰하였다. 연소효율은 과잉공기 15%에서 최대 96%로 나타났으며, 탈황효율은 Ca/S 몰비 2.3에서 92%로 나타났다. CO 배출은 반응기 온도에 따라 최저 210 ppm에서 최고 720 ppm으로 나타났으며, 석탄 중 질소성분의 NO<sub>x</sub>로의 전환은 1차 공기의 비율에 따라 4-10% 범위에서 변화하였다.

**Abstract**— Combustion characteristics of Korean anthracite with heating value of 4,529 kcal/kg and ash content of 38% in a circulating fluidized bed test unit was investigated. Feed coal was received from the mines of Samchuk province and sized to average diameter of 0.39 mm. The effect of coal feed rate on temperature profiles, the effect of excess air on combustion efficiency, sorbent effect on desulfurization, and the effect of operating variables on the emission of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> were monitored during operation. Highest combustion efficiency of 96% was attained at the excess air ratio of 15%. Sulfur retention of 92% was achieved at the Ca/S mole ratio of 2.3. Carbon monoxide emission was varied between 210-720 ppm according to combustor temperature. Conversion of fuel nitrogen to NO<sub>x</sub> varied 4-10% by primary air ratio.

**Key words:** Coal Combustion, Korean Anthracite, Circulating Fluidized Bed

### 1. 서 론

순환유동층 연소기술은 다양한 성상의 연료를 저공해, 고효율로 연소할 수 있는 우수한 연소방식으로 발전 및 열병합 발전, 소각, 또는 복합발전 등에 적용되는 차세대 연소기술이다[1,2]. 종래의 기포유동층 연소방식의 문제점인 규모의 한계를 극복하고, 연소효율 및 탈황효율 등을 개선하기 위하여 개발된 순환유동층 보일러는 미국의 ABB-CE, Foster Wheeler, 독일의 Lurgi, 스웨덴의 Studsvik, 핀란드의 Ahlstrom 등 유명 보일러사에 의해 개발되어 열병합 발전 또는 발전용으로 보급되고 있으며, 현재 기술의 성숙도가 높아 발전용으로는 300-450 MWe급으로 또는 복합발전 가압유동층 기술 등으로 확대되고 있다[3]. 순환유동층 상용 보일러는 1980년대 중반부터 기포유동층을 앞질러 보급이 되고 있으며, 국내에도 거의 같은 시기에 수입 유연탄과 petroleum coke를 연료로 하는 열병합 발전용 보일러

가 외국으로부터 도입되었다. 현재 국내에 보급된 보일러는 10 여기에 이르며 경제성, 관리체계의 우수성 등을 인정받아 발전용으로 확대보급될 전망이다.

한편 국내의 기술은 외국기술의 개발단계에서 도입되었으며 국내의 기술이 자립되지 않아 당분간 보일러의 도입은 계속될 전망이다. 그러나 운전조건 변화에 따른 연소특성 및 수력학적 특성에 대한 충분한 검토 및 분석없이 조업 중이어서 여러 가지 문제점이 발견되고 있다. 특히 문제점 해결 또는 설계개선을 위해서 많은 부분을 다시 제작사에 의존하게 되어 시간 및 외화의 낭비가 지적되고 있다.

제2에너지로서의 석탄의 중요성은 이미 정부의 중장기 에너지 정책에서 나타나며 석탄의 청정 연소기술의 하나로 순환유동층 연소기술은 그 중요성이 인정되고 있다[4]. 순환유동층 보일러 개발을 위한 국내의 연구는 1980년대 초반부터 수력학적 기초연구로 시작되

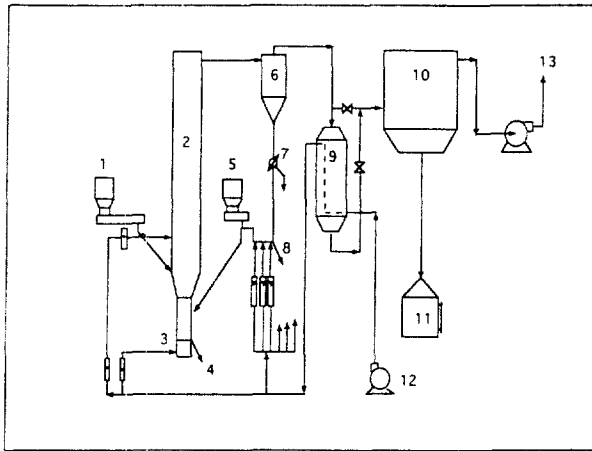


Fig. 1. Flow diagram of CFB combustion test unit.

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. Coal feeder          | 8. Loopseal ash drain    |
| 2. Combustor            | 9. Air preheater         |
| 3. Air distributor      | 10. Bag house            |
| 4. Bottom ash drain     | 11. Bag filter ash drain |
| 5. Limestone feeder     | 12. F.D. Fan             |
| 6. Cyclone              | 13. I.D. Fan             |
| 7. Solid diverter valve |                          |

어 '90년대부터 연구기관과 기업체의 상용화 연구가 계속 진행 중이다. 그러나 설계를 위한 연소 특성자료는 절대적으로 부족하며, 특히 도입된 보일러가 모두 유연탄과 petroleum coke를 연소하기 위한 설비이므로 국내무연탄 연소에 관한 자료는 전무한 현실이다[5].

본 연구는 저공해 연소기술의 개발로 제 2에너지원으로서의 석탄의 안정적 활용을 도모하고 국내무연탄의 활용을 증진시키기 위하여 순환유동층에서의 국내산 무연탄의 연소실험을 수행하였다. 본 연구에서는 순환유동층 보일러 국산화를 목표로 공정개발을 위한 설계 기초자료 확보를 위해 국내무연탄의 순환유동층에서의 연소가능성, 연소특성, 배가스 특성 등을 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치인 시험연소로의 공정도를 Fig. 1에 나타내었다. 보일러 부분을 제외한 공정의 구성은 상용 순환유동층 연소로의 원리와 유사하게 제작되었다[6]. 공정의 주요구성은 석탄 및 석회석의 공급장치, 연소로(combustor), 사이클론 및 회재 재순환장치(loopseal)[7], 배가스 집진장치로 되어 있다. 연소로의 개념도를 Fig. 2에 나타내었다. 연소로는 원통형 스테인레스 스틸로 제작되었으며 외벽은 20 cm 두께의 ceramic wool로 단열되어 있다. 연소로의 규격은 연료와 재순환 회재가 공급되어 안정적 연소층을 이루는 하부가 내경 0.2 m, 높이 1 m로 되어 있고 회재의 비산으로 freeboard 역할을 하는 상부는 내경 0.25 m, 높이 10 m로 되어 있다. 분산판(air distributor)은 다공판 형으로 직경 3 mm의 구멍을 사각 pitch로 뚫었으며, 개구비는 4.5%로 하였다. 연소공기는 분산판 하부로부터 공급되는 1차 공기(primary air)와 분산판 위 2.1 m 지점에서 공급되는 2차 공기로 나누어 공급된다. 석탄은 나선식 공급기를 통하여 연소로 하부에 해당하는 분산판 위 1 m 지점(bed)으로 정량 공급하며 중력으로 투입된다. 탈황제인 석회석은 재순환 장치인 loopseal의 연소로측 도입관을 통해 loopseal 상부에서 정량 공급된다. 공급된 석탄은 연소로(bed)에서 연소되기 시작하며 연소열을 지닌 회재는 공

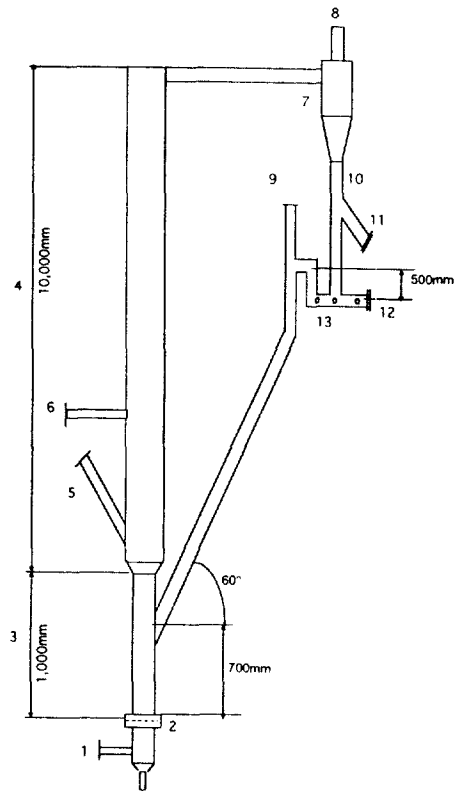


Fig. 2. Diagram of CFB combustor.

- |                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. Primary air line   | 8. To stack              |
| 2. Air distributor    | 9. Limestone feed line   |
| 3. Bed                | 10. Dipleg               |
| 4. Freeboard          | 11. Solid diverter valve |
| 5. Coal feed line     | 12. Loopseal ash drain   |
| 6. Secondary air line | 13. Loopseal             |
| 7. Cyclone            |                          |

기와 연소기체에 의하여 연소로 상부(freeboard)를 통해 사이클론으로 수송된 뒤 집진된다. 사이클론 하부에는 포집회재를 loopseal로 회송시키는 dipleg 및 잉여회재를 배출하기 위한 밸브가 설치되어 있다. 회재는 dipleg를 통해 loopseal로 재순환되고, 여기서 회재는 연소로내 재주입구의 압력과 loopseal에 포집된 고체의 총압과의 차에 의하여 연소로내 분산판 위 0.7 m에 위치한 재주입구로 재순환된다. 연소회재는 연소로의 하부에서 배출되는 굵은 입자의 하부회(bottom ash), 사이클론을 통과하여 최후의 제진장치인 bag filter에서 포집되는 bag filter회로 구분된다. 사이클론에서 1차 제진된 기체는 사이클론 상부를 통해 bag filter로 공급되며 여기서 최종적으로 제진된 후 I.D. fan을 통해 대기로 배출된다. I.D. fan은 부압(negative pressure) 조건에 따른 배기체 및 연료주입 공정의 단순화를 도모하기 위하여 설치되었고, 설정조건은 freeboard 상부압력을 -10 mmH<sub>2</sub>O로 하였다.

### 2-2. 실험조건 및 측정

본 실험에 사용된 석탄은 우리나라 삼척지역에서 채광한 무연탄으로 발열량은 4,529 kcal/kg이다. 석탄의 최대 입경은 6 mm로 제한하였고, 평균입경은 0.39 mm이다. 석탄의 성분분석과 연소에 필요한 이론공기량을 계산하여 Table 1에 요약하였다. 본 석탄을 편의상 삼척탄으로 명명하였으나 특정 광산에서 수급한 석탄으로 산지의 대표적인 석탄으로 볼 수는 없다. 다만 석탄의 발열량과 회재분율,

Table 1. Analysis of fuel and limestone

Analysis	Fuel	Samchuk coal	Limestone
Composition, wt%			
CaO		0.38	49.26
MgO		0.63	1.23
SO <sub>3</sub>		0.22	
CO <sub>2</sub>		0.87	40.0
C		52.89	
H		0.18	
N		0.46	
S		0.57	
O		4.51	
Moisture		3.53	
Inert		36.77	9.51
HHV*, kcal/kg		4,529	
Mean diameter, mm		0.39	0.17
Air requirement, kg mol/kg			
O <sub>2</sub> requirement		0.0424	
N <sub>2</sub> in air		0.1597	
Dry air mols		0.2021	
Abs humidity**		0.0013	
Wet air mols		0.2063	

\*High heating value, \*\*Assumed.

Table 2. Operating conditions

Parameters	Range
Coal feed rate, kg/h	21-44
Limestone feed rate, kg/h	2-5
Excess air ratio, %	1-29
Bed temperature, °C	780-940
Freeboard top temperature, °C	580-780
Air velocity in bed, m/s @h=0.5	3.0-5.9
Air velocity in freeboard, m/s @h=3	3.0-5.5
Combustor capacity, MW <sub>st</sub>	0.13-0.23

유황 함유량을 현재 국내 무연탄 발전소에서 사용하는 석탄사양과 유사하게 설정하였다. 석탄의 특징은 회재함량이 37%, 탄소성분이 53%, 유황 함유량은 0.6%로 나타난다. 석회석은 국내 단양산 석회석으로 국내 유동층연소설비[1]에 공급되는 제품 그대로 입수하여 전처리없이 사용하였다. 석회석은 평균입경 0.17mm로서 무게비 88%가 입경 0.53-0.11mm 범위에 속한다.

Table 2에는 본 실험에 적용된 대표적인 운전조건을 나타내었다. 석탄의 공급속도는 최저 21 kg/h에서 최대 44 kg/h까지 변화하였고, 연소공기는 이론공기의 129%까지 공급하였다. 공기의 유속은 유동층조건을 석탄의 평균입도를 기준으로 고속유동(fast bed)을 유지하도록 하였다. 공기의 유속은 운전상태하에서 3.0-5.9 m 범위에 들었다. 연소로의 온도는 하부(bed)가 780-940°C, 상부(freeboard)가 580-780°C 범위에 속하였다. 연소효율은 고체 중 가연성분의 수치를 비교하여 아래와 같이 계산하였다.

$$C.E. = \left( 1 - \frac{B.H. \times X_{BF} + B.A. \times X_{BA}}{C.F. \times X_C} \right) \times 100$$

여기서, C.E.: Combustion efficiency, %

B.H.: Bag filter ash flow rate, kg/h

X<sub>BF</sub>: Combustible in bag filter ash, %

B.A.: Bottom ash flow rate, kg/h

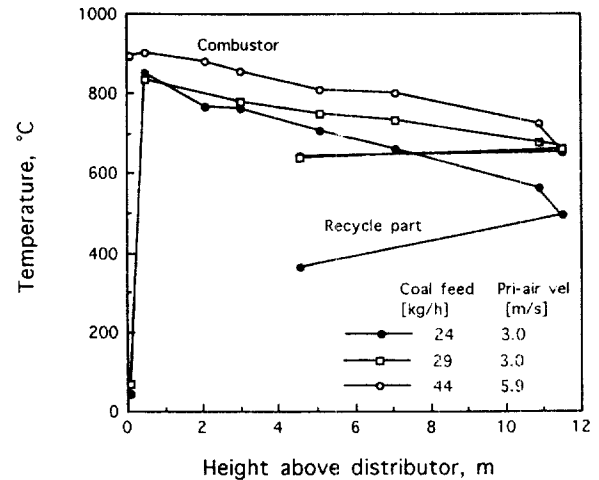


Fig. 3. Axial temperature profile inside the combustor.

Table 3. Typical operation data

Coal feed rate, kg/h	Limestone feed rate, kg/h	Excess air, %	Average gas velocity, m/s	Bed temp., °C (h*=0.5 m)	Freeboard temp., °C (h=5.1 m)	Combustion efficiency, %
24	0	29	3.1	852	707	96.4
29	0	7	3.0	835	748	95.5
44	0	19	4.1	840	805	94.2
44	2	19	5.5	904	809	95.1

\*Height above distributor.

X<sub>BA</sub>: Combustible in bottom ash, %

C.F.: Coal feed rate, kg/h

X<sub>C</sub>: Combustible in coal, %

실험 중 가스의 조성은 가스분석기(Horiba ENDA-828, 837)를 이용해 연속적으로 측정하였으며 측정된 가스(CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>)는 6% 산소 조건으로 보정하였다. 석탄 중 탄소와 질소성분의 CO, NO<sub>x</sub>로의 전환율은 각각 탄소와 질소의 CO, NO<sub>x</sub>와의 몰비로 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 연소온도특성

Fig. 3에 석탄 공급량에 따른 연소로내 축방향 온도분포를 나타내었다. Table 3에는 대표적 실험결과를 요약하였다. 연소로 내부의 온도는 활발한 연소와 고체혼합이 일어나는 연소로 하부에서 가장 온도가 높게 나타났고, 연소로 상부인 회박상으로 올라갈수록 연소분율의 감소와 외벽으로의 열손실로 온도가 저하하였다. 공급열량은 석탄량이 증가함에 따라 늘어나며, 이에 따른 열량증가에 의해 연소로내 축방향 온도차는 감소하였다. 석탄공급량 24 kg/h와 29 kg/h에서 나타나는 분산판 위 0.1-0.5 m간의 심한 온도차는 낮은 부하량과 이에 따라 공기유속이 3.0-3.1 m로 유동이 불안정하여 착화되지 않은 굵은 입자가 층하부로 가라앉은 층분리현상이 나타나는 것으로, 석탄공급량을 44 kg/h로 늘임에 따라 연소공기량과 함께 유속이 4.1-5.5 m까지 증가하여 연소로 내의 고속유동이 유지되면서 층분리현상도 소멸되었다. 회재는 다시 재순환부로 내려오면서 열손실에 의해 온도가 계속 감소하였으며 연소로측 재주입관인 분산판위 4.5 m에서는 각각 석탄 공급량 24 kg/h와 44 kg/h에서 최저 365°C와 최고 660°C를 나타내었다.

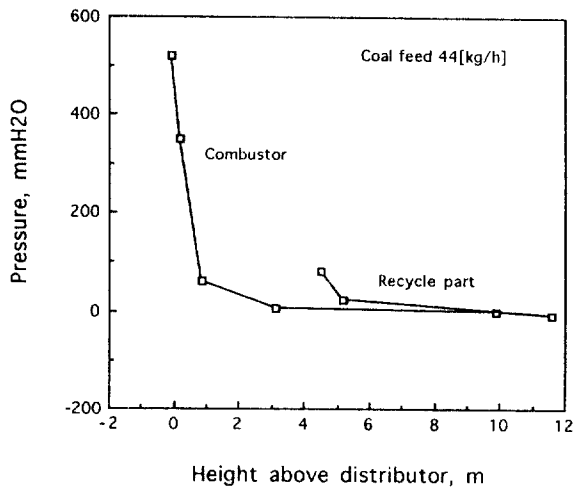


Fig. 4. Axial pressure profile inside the combustor.

3-2. 압력 및 회재순환특성

Fig. 4에 연소로내 축방향 압력분포를 나타내었다. 분산판으로부터 1 m까지는 연소층을 형성하며 연소로내 농후층의 무게를 의미하는 총압은 약 500 mmH<sub>2</sub>O를 나타내고 있으며, 압력은 축방향을 따라 상부 방향으로 지수적으로 감소하여 농후층의 표면에 해당하는 1 m 지점에서 이미 25 mmH<sub>2</sub>O로 감소하며, 3 m 이상부터 freeboard 상부까지는 회박상이 형성되고 freeboard 정상에서 대기압 정도로 나타난다. 압력분포와 유동화 속도의 고찰을 통해 분산판으로부터 0.5 m까지는 기포유동층에서와 같은 농후층을 유지하며 0.5-3 m 사이는 고체의 비산과 하강이 격렬하게 유지되는 난류층을 3 m 이상에서는 미세입자의 수송을 수행하는 영역으로 판단된다. 재순환부에서는 압력은 사이클론의 dipleg를 따라 하강하면서 증가하여 사이클론 포집회가 모이는 loopseal 바닥에서 100 mmH<sub>2</sub>O의 값을 나타내었다. 연소로 내의 회재는 재순환 입구인 분산판위 1 m 지점의 압력 25 mmH<sub>2</sub>O와 재순환부(loopseal)의 회재의 총압 100 mmH<sub>2</sub>O간의 차압에 의하여 재순환이 유지된다.

Fig. 5에 석탄, 하부회, bagfilter회, loopseal회의 입경분포를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 하부회의 입경범위는 최대 6 mm 이하로 석탄과 입경범위가 같다. 그러나 연소로 내에서의 미세입자의 비산에 의한 분리로 입경 0.9 mm 이하의 분율은 줄고, 그 이상의 조대입자의 분율이 늘어났다. 유연탄의 순환유동층 연소 시 일반적으로 나타나는 현상인 휘발분 연소에 따른 중하부 과열현상과 이에 따른 하부회의 clinker에 의한 응결현상이 무연탄 연소에서는 나타나지 않았으며, 이것은 무연탄이 휘발분이 적은 관계로 연소로 온도가 회저의 용융점까지 이르지 못하기 때문으로 판단되었다[5, 7]. Bagfilter회의 입경은 대부분 0.05-0.09 mm 범위를 나타내며, loopseal회의 입경은 0.2 mm 부근에서 최대로 나타났다. 이에 따라 순환회재의 입경은 백필터 입경분포와 하부회의 입경분포의 사이에 드는 0.1-0.3 mm로 파악하였다.

3-3. 연소효율

Fig. 6에 과잉공기 변화에 따른 연소효율 변화를 나타내었다. 연소효율은 과잉공기가 증가함에 따라 산소의 공급이 증가됨과 동시에 공기와 석탄의 접촉이 향상되어 증가할 수 있다. 본 연구의 실험구간에서도 같은 경향을 나타내었다. 그러나 연소효율의 증가는 과잉공기 1-15% 범위에서 2% 정도의 증가에 그쳤으며, 과잉공기 15% 이상에서는 과잉공기에 의한 연소효율의 증대효과가 나타나지 않았다. 순환유동층의 유동화 특성은 고속유동에 해당하여 이미 기체와

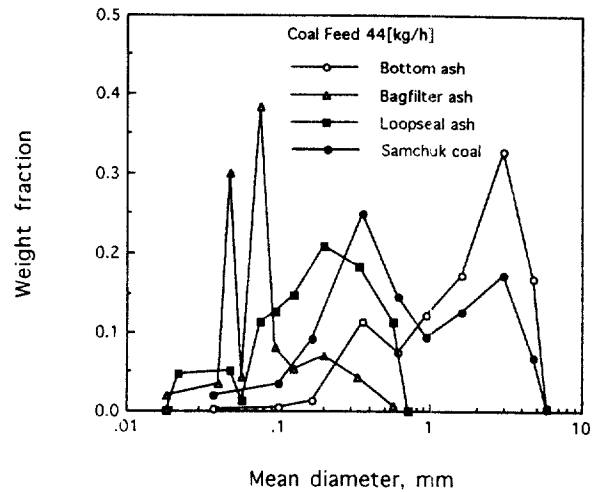


Fig. 5. Size distribution of combustion ash.

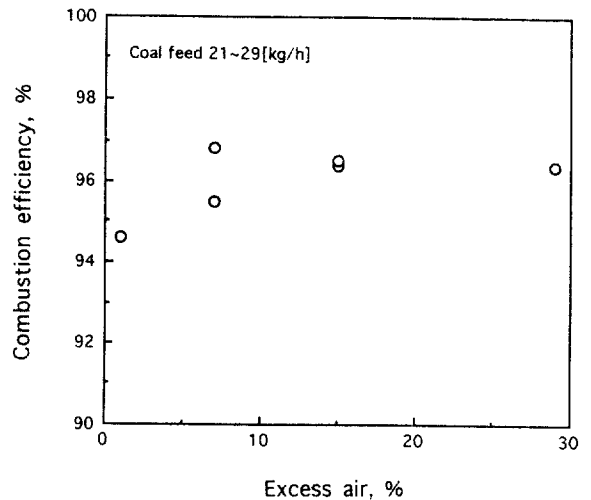


Fig. 6. Effect of excess air on combustion efficiency.

고체의 접촉효율은 충분히 크다고 볼 수 있으며 이 때 연소효율은 석탄의 반응성, 연소로 내의 체류시간 등 석탄의 고유반응에 더욱 의존한다고 볼 수 있어 과잉공기의 증가 효과가 현저하게 나타나지 않는 것으로 보인다. 연소효율에 영향을 줄 수 있는 또 다른 인자로 공기량 증가에 따른 입자의 비산속도를 고려할 수 있으며, Fig. 7에 나타난 바와 같이 연소로내 유속 증가에 따라 연소효율의 감소 효과가 나타난다. 이는 입자 유속의 증가에 따라 입자 비산속도가 증가하며, 이에 따른 미연탄소의 유실이 늘어 연소효율이 줄어드는 것으로 판단되며, 과잉공기 증가에 반하여 나타날 수 있는 연소효율의 역효과로 생각된다. 연소효율은 상용장치의 98-99%[9, 10]보다 낮으나, 이는 낮은 사이클론 효율로 인한 미연탄소의 유실과 연소로 벽면을 통한 열손실로 인하여 연소온도가 유지되지 못하여 낮아진 것으로 본 장치에서는 개선시키기 어려운 조건이므로 연소효율 자체의 향상을 위한 고려는 더 이상 하지 않았다.

3-4. 배가스특성

Fig. 8에 석회석 중 칼슘과 황의 물비(Ca/S) 변화에 따른 탈황특성을 나타내었다. 탈황효율은 탈황제의 비율이 증가함에 따라 기체와 고체간의 접촉이 증가하면서 함께 증가하나 기-고 접촉저항, CaSO<sub>4</sub>에 의한 기공폐색 등으로 반응이 지연되어 탈황효율의 증가경향이

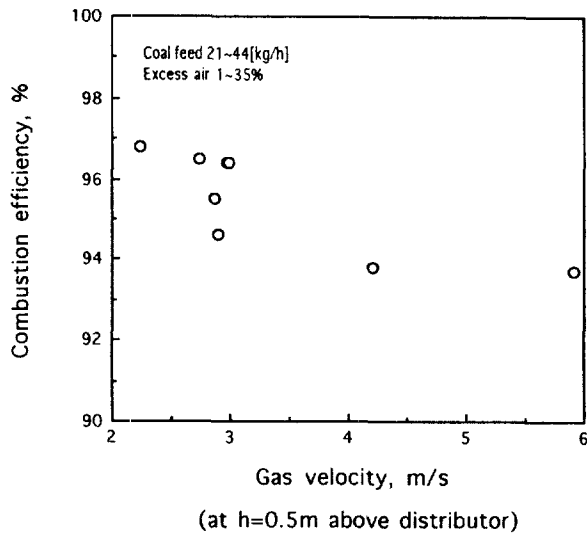


Fig. 7. Effect of superficial gas velocity on combustion efficiency.

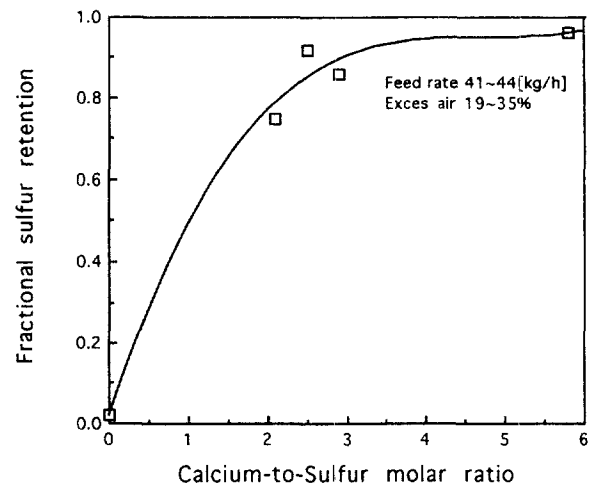


Fig. 9. Effect of combustor temperature on CO emission.

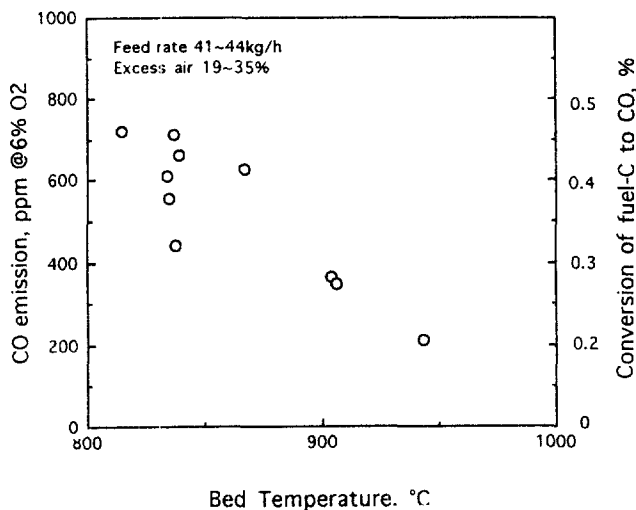
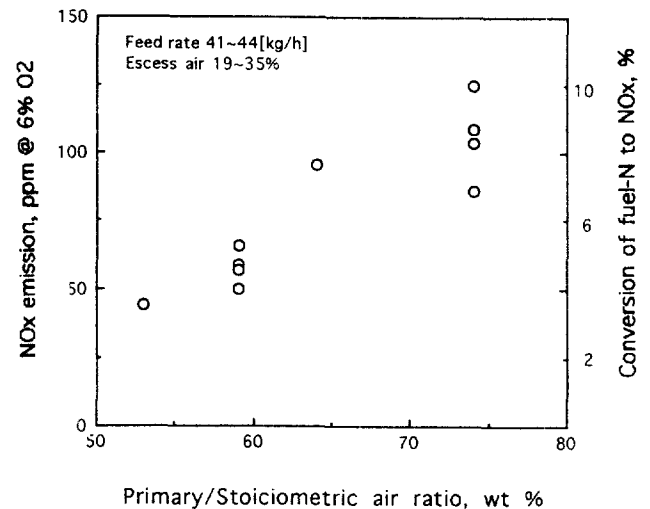


Fig. 8. Sulfur retention according to limestone input.

Fig. 10. Effect of primary to secondary air ratio on NO<sub>x</sub> emission.

급격히 줄어드는 현상을 보인다[7, 11]. 그림에서 황의 전환율은 Ca/S 몰비 2.3까지는 급격하게, 그 이상의 탈황제 투입에 대해서는 완만하게 증가하였다. 전환율은 Ca/S 몰비 2.3에서 92% 그리고 5.8에서 96%의 전환율을 나타내었다. 탈황효과가 최대인 온도범위가 800-850°C인 점을 고려하면[11] Fig. 3에서와 같이 석탄 공급량 44 kg/h의 경우에는 freeboard 상부까지 연소로 전 영역이 탈황에 유효한 온도범위라고 보아진다. 그러나 연소로내 평균 기체 체류시간이 2-2.5 sec로 탈황에 필요한 최소 체류시간 3.5 sec[7]보다 짧아 1회 순환에서 충분한 반응이 일어난다고 보기 어렵다. 그럼에도 불구하고 일반적인 기포유동층에서 90% 황 전환율에 필요한 Ca/S 몰비 3.5와 비교하여[9], 본 실험에서 나타나는 높은 전환율은 순환유동층에서의 탈황제의 재순환에 의한 반복활용에 기인한다고 볼 수 있다.

Fig. 9에 연소로 하부(분산판위 0.5 m)의 온도에 따른 CO 발생을 나타내었다. CO 발생은 연소로의 온도가 낮거나, 이론공기 이하로 공급되는 1차 공기의 영향 하에서 발생한다. 본 실험에서는 CO의 2차 연소가 일어날 수 있는 freeboard에서의 800°C 정도의 낮은 온도와 2-2.5 sec의 짧은 체류시간으로 충분한 재연소 반응이 진행되지 못하는 것으로 판단된다[12, 13]. CO의 발생은 연소로 온도에 반비례하였으며, 1차 공기 범위 53-74%에서의 변화특성은 나타나지 않

았다. CO 발생률은 반응기온도 815°C에서 최고치 720 ppm 그리고 943°C에서 최저치 210 ppm을 나타내었다. 실험범위에서 탄소의 CO로의 전환율은 0.2-0.5%로 나타났다.

Fig. 10에 1차 공기의 비율에 따른 NO<sub>x</sub> 발생을 나타내었다. 순환유동층에서는 연소공기의 단계적 주입에 의하여 1차 공기가 주입되는 연소로 하부에서의 불완전 연소로 질소산화물의 발생이 억제되며 연소온도가 낮아 freeboard에서의 재산화가 억제된다[14]. 상업용 설비의 경우 역시 순환유동층의 온도가 전반적으로 850-950°C로 유지되어 thermal NO<sub>x</sub>의 발생은 거의 일어나지 않으며, 분산판으로 공급되는 1차 공기는 이론공기 미만으로 공급되어 fuel NO<sub>x</sub>의 발생을 억제한다. 본 실험에서는 NO의 발생이 1차 공기의 비율에 따라 현저하게 변화하였으며, 발생량은 1차 공기/이론공기비 53%에서 44 ppm, 74%에서 125 ppm을 나타내었다. 국내 환경기준치 350 ppm[4]을 만족시키는 낮은 NO<sub>x</sub> 발생률은 원인적으로는 시료석탄 성분에 포함된 낮은 질소함유율에 기인한다. 연료 중 N 성분은 이론공기에 대한 1차 공기 비율 53-74%에서 3.9-10.5%까지 NO<sub>x</sub>로 전환되었다.

## 4. 결 론

본 연구는 국내 무연탄의 연소를 위한 순환유동층 보일러 설계를

전체로 석탄의 연소실험을 통한 설계변수의 특성을 고찰하는 것을 목표로 하였다. 국내산 무연탄인 삼척탄은 순환유동층에서 연소가 능하였으며 그 연소특성은 다음과 같다.

(1) 온도분포는 활발한 연소와 고체혼합이 일어나는 연소로 하부에서 가장 높고 연소로 상부로 올라감에 따라 외벽으로의 열손실에 의하여 점진적으로 감소하였다. 압력분포는 연소로 하부로부터 free-board로 올라가면서 지수적으로 감소하였으며, 약 5m 상부부터는 희박상을 이루었다.

(2) 유사한 온도분포와 공기량 그리고 공기유속에서 연소효율은 과잉공기의 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 실험조건인 과잉공기율 1.29% 범위에서 연소효율의 변화는 2% 내외로 크지 않았다. 과잉공기율이 15%에서 96%의 연소효율을 얻었으며, 1%에서는 연소공기의 부족현상이 나타나 연소효율이 94%로 실험치 가운데 가장 낮게 나타났다. 대체로 유사한 온도 및 유속 조건에서 15% 이상의 과잉공기 증가는 연소효율 증가에 효과를 주지 못했는데 이것은 초기유속의 증가에 따라 비산화재와 함께 미연분이 유실되어 과잉공기 효과를 상쇄하는 것으로 판단되었다.

(3) 삼척탄의 탈황은 효과적으로 이루어졌으며 투입 탈황제 기준으로 Ca/S 몰비가 2.3일 때 탈황률 92% 그리고 Ca/S 몰비 5.8에서 96%를 나타내었다.

(4) 배가스 중 CO는 공기의 분할공급에 따라 증하부의 불완전 연소조건을 이루고, 본 연소로에서의 freeboard의 낮은 온도에 기인한 낮은 CO 재연소율과 짧은 체류시간으로 비교적 높게 발생하였다. CO의 발생은 증하부의 온도증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 연소로의 온도가 815°C에서 최고치인 720 ppm 그리고 943°C에서 최저치인 210 ppm을 나타내었다.

(5) 연료 중 N성분은 1차 공기 비율에 비례하여 NO<sub>x</sub>로 전환되었으며 이론공기에 대한 1차 공기 분율 53-74%에서 3.9-10.5%까지 전환되었다.

## 감 사

이 논문은 한국전력(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 사용기호

C.E. : combustion efficiency [%]  
 B.H. : bag filter ash flow rate [kg/h]  
 X<sub>B.F.</sub> : combustibile in bag filter ash [%]  
 B.A. : bottom ash flow rate [kg/h]  
 X<sub>B.A.</sub> : combustibile in bottom ash [%]

C.F. : coal feed rate [kg/h]  
 X<sub>C</sub> : combustibile in coal [%]

## 참고문헌

1. 선도원, 박영성, 손재익 : 화학공업과 기술, 13(1), 6(1995).
2. 손재익 : 청정석탄활용기술개발, 한국에너지기술연구소 보고서, 제 3장(1994).
3. Maitland, J. E., Skowrya, R. S. and Wilhelm, B. W.: "Design Considerations for Utility Size CFB Steam Generators", Proc. 10th Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, IV-71(1994).
4. 신규식 : "석탄가스화 복합발전(IGCC) 기술", '94종합연구발표자료, 한국전력공사 기술연구원(1994).
5. 선도원, 손재익, 지평삼, 위영호 : "국내무연탄의 순환유동층 연소 특성 연구", 한국에너지기술연구소 보고서, 한국전력공사 기술연구원 93Y-TO3(1994)
6. 최정후, 손재익, 김영성, 박영옥, 한근희, 배달희, 조성호 : "순환유동층 보일러의 연소로기동해석", 한국동력자원연구소 연구보고서(1991).
7. Basu, P. and Fraser, S. A.: "Circulating Fluidized Bed Boilers", Ch. 8, Butterworth-Heinemann, Stoneham(1991).
8. 선도원, 손재익, 박영성, 구철오, 한근희, 배달희, 임정환, 최정후 : "저공해 유연탄보일러 보급확대를 위한 순환유동층 기술개발(II)", 한국에너지기술연구소 보고서 KE-92050G(1992).
9. 최정후, 손재익, 한근희, 배달희, 조성호 : "저공해 유연탄 보급확대를 위한 순환유동층 기술개발(I)", 한국에너지기술연구소 연구보고서 KE-91009G(1991).
10. Mann, M. D., Hajicek, D. R., Henderson, A. K. and Thomas, A. M.: EERC Pilot-Scale CFBC Evaluation Facility, University of North Dakota, Grand Forks, North Dakota(1992).
11. Schaub, G., Reimert, R. and Albrecht, J.: "Investigation of Emission Rates from Large Scale CFB-Combustion Plants", Proc. 1th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion, 685(1989).
12. Smith, J. M. and Van Ness, H. C.: Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, 4/e, Ch. 15, McGraw-Hill, Singapore (1987).
13. 박영성, 김영성, 손재익, 맹기석 : 화학공학, 28(5), 568(1990).
14. Furusawa, T. and Shimizu, T.: "Analysis of Circulating Fluidized Bed Combustion Technology and Scope for Future Development", Proc. of the 2nd International Conference on Circulating Fluidized Beds, 51(1988).