

# 가압유동층연소로에서 석탄의 연소 및 배가스특성 연구

한근희\* · 오동진\*\* · 류정인\*\* · 진경태\*\*\*  
(1999년 9월 8일 접수)

## A Study on Combustion & Flue Gas Characteristics of Coal at Pressurized Fluidized Bed Combustor

Keun-Hee Han, Dong-Jin Oh, Jung-In Ryu and Gyoung-Tae Jin

**Key Words:** Flue Gas Characteristic(배가스특성), Coal Combustion(석탄연소), Pressurized Fluidized Bed Combustor(PFBC:가압유동층연소로), Fluidized Bed Combustion(FBC:유동층연소)

### Abstract

The characteristics of combustion and of emissions in pressurized fluidized bed combustor are investigated. The pressure of the combustor is fixed at 6 atm, and the combustion temperatures are set to 850, 900, and 950°C. The gas velocities are 0.9, 1.1, and 1.3 m/s. The excess air ratio is varied from 5 to 35%. The coal used in the experiment is Shenhwa coal in China. All experiments are executed at 2m bed height. Consequently, NO<sub>x</sub> & N<sub>2</sub>O concentration in the flue gas is increased with increasing excess air ratio but SO<sub>2</sub> concentration is decreased with increasing excess air ratio. CO concentration is maintained below 100ppm at over 15% of excess air ratio.

### 기호설명

- $d_p$  : 입자의 평균입도, m
- $F$  : 연료의 공급량, kg/sec
- $H$  : 발열량, MJ/kg
- $P_e$  : 평형압력, bar
- $T$  : 절대온도, K
- $\epsilon_{mf}$  : 최소유동화상태에서 층의 공극률, -
- $\eta$  : 연소효율, %
- $u_{mf}$  : 최소유동화속도, m/s
- $\mu$  : 기체의 점도, kg/m-s
- $\rho_g$  : 기체의 밀도, kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_s$  : 고체의 밀도, kg/m<sup>3</sup>
- $\phi_s$  : 고체의 구형도, -

### 1. 서론

에너지 소비의 증가는 경제성장과 밀접한 관계가 있다. 소득이 증대됨에 따라 편리한 에너지 자원으로의 전환과 생활방식의 전환이 이루어져 에너지의 사용량은 증대할 수밖에 없으며, 우리나라도 에너지의 사용량이 2006년도에 가서는 현재의 두배로 증가될 전망이다. 경제적이고 안정적으로 에너지를 공급하기 위하여는 세계적으로 널리 분포된 석탄의 사용비중을 높여야 한다. 그러나 석탄을 사용할 때 발생하는 공해물질의 배출량이 타 연료에 비하여 높기 때문에 세계적으로 강화되는 환경 규제치를 만족하기 위하여는 현재 개발 보급되고 있는 청정석탄기술을 사용하여 해결하여야 한다.

청정석탄이용기술은 연소전에 공해물질을 제거하는 연소전 처리방법과 연소중에 운전조건의 변경이나 흡착제를 주입하여 발생하는 질소산화물이나 황산화물의 양을 저감하는 연소중 처리방

\* 회원, 한국에너지기술연구소 유동층기술연구센터  
E-mail : heehan@kier.re.kr  
TEL : (042)860-3671 FAX : (042)860-3134

\*\* 충남대학교 기계공학부

\*\*\* 한국에너지기술연구소 유동층기술연구센터

법, 연소후에 발생된 배가스의 공해물질을 처리하는 연소후 처리방법 및 석탄을 가스화나 액화시킨 후 이를 정제하여 청정한 연료로 전환하는 방법이 있다. 기존의 미분탄 보일러에 적용하는 설비를 개선하거나 조업조건이나 연소방법을 변형하는 방법이나 배가스를 처리하는 방법은 같은 공해물질을 배출할 경우에 효율면에서 석탄 신발전방식인 석탄가스화복합발전과 가압유동층 석탄연소 복합발전방식에 비하여 낮으며, 경제성 부문에도 장점이 적어 기술이 정립되면 점차적으로 시장이 석탄신발전방식으로 전환될 전망이다.

유동층에 의한 석탄연소기술은 기존의 연소방법으로는 연소가 어려운 저열량탄이나 오일셸을 연소하기 위하여 1960년대에 영국과 중국에서 시작되어 석유파동이후 선진국에서 관심을 갖기 시작하였다. 유동층 연소기술은 연료의 선택폭이 넓고, 운전 및 유지관리가 우수하며 석회석이나 백운석을 첨가하여 연소시킴으로서 석탄중의 황을 별도의 설비 없이 90%이상 제거할 수 있고, 연소온도를 낮게 유지함으로써 NOx의 발생량을 낮게 유지할 수 있다.<sup>(1)</sup>

가압유동층복합발전(Pressurized Fluidized Bed Combustion Combined Cycle 또는 PFBC-CC)은 고효율 및 공해물질 배출이 적은 석탄이용 차세대 발전기술이다. 석탄을 연소하면서 연소열에 의해 생성된 증기로 증기터빈을 구동하고, 고온 고압의 연소가스로 가스터빈을 구동하여 복합 발전함으로써 효율을 42-45%까지 얻을 수 있다. 연소기내의 압력을 높여 연소함으로써 반응속도가 증가하고, 가압된 만큼 압력용기내의 산소분율이 높기 때문에 적은 용적내에서 많은 양의 연료를 연소할 수 있고, 유동층연소중 탈황과 낮은 질소산화물 배출특성으로 환경친화적이며, 경제적으로 우수한 청정석탄이용기술이다.<sup>(2)</sup>

## 2. 이론적 고찰

유동층연소는 연소장치의 운전압력을 대기압 상태에서 운전하는 상압유동층연소와 연소로에 압력을 가하여 운전하는 가압유동층연소로 나뉜다. 또 연소되고 있는 연료와 층물질의 유동상태에 따라, 연소로의 층에서 층물질이 유동하면서 연소되는 기포유동층과 연료와 층물질이 연소로의 상부까지 이송되어 다시 사이클론에서 포집하

여 이를 연소로의 하부에 순환하면서 연소하는 순환유동층연소로 구분된다. 연소로에 압력을 가하지 않고 운전되는 상압유동층연소는 가압유동층연소보다 비교적 낮은 연소효율을 보이고 있다. 이것은 연소로 층내에서 입자의 체류시간이 짧고, 기고 혼합정도가 떨어지기 때문이다. 상압 유동층에서는 유동층높이가 증가하면 압력손실이 커지기 때문에 원활한 운전을 위하여는 어느 정도 이상 층높이를 증가할 수 없다. 그러나 가압 유동층인 경우 유동층높이에 의한 압력손실은 전 시스템의 압력에 비하여 무시할 수 있어 층 높이가 증가함에 따른 문제가 없고 층높이의 증가로 고체의 체류시간 및 기-고의 접촉시간을 증대시킬 수 있다.

가압유동층에서는 공기의 밀도가 증가함에 따라 최소유동화속도는 감소하고 상압에 비하여 공기부피가 압력비만큼 감소하기 때문에 보일러의 연소영역의 부피를 압력의 증가에 따라 감소시킬 수 있으며, 상대적으로 낮은 유동화속도를 유지하기 위하여 비발동반되는 석탄입자의 양이 감소한다. 낮은 공압속도와 높은 층높이로 기-고 접촉시간이 증가하여 연소효율이 증가한다. 압력이 증가하면 산소의 분압이 커지고 확산계수는 감소하여 전체적으로 물질전달에 미치는 영향은 없으며, 반응속도는 증가하고, 고체의 체류시간이 길어지기 때문에 미연탄소분의 생성감소와 흡착제의 반응성이 증가한다.<sup>(3,4)</sup>

### 2.1 연소특성

유동층의 연소효율을 결정하는 인자는 온도, 압력에 따른 석탄의 반응속도, 층내에서의 기체의 체류시간, 과잉공기의 양, 석탄의 비산, 석탄의 표면적, char의 내부에서의 기체 확산 등이 있다. 반응속도는 반응온도, 산소농도의 영향을 받으며, 고체-기체와의 접촉시간 및 체류시간은 미연탄소분 및 기상에서의 반응에 영향을 주고, 압력은 반응속도와 기체확산에 영향을 준다. 대부분의 가압유동층의 연소효율은 99% 이상을 나타낸다.<sup>(5,6)</sup>

연소효율은 미연탄소분 및 배가스중 미반응 CO의 농도로 계산된다. 완전히 건조한 공기나 산소와는 CO가 잘 반응하지 않으며, 실제적으로 산소분자와는 반응하지 않는다고 하였다. 또 CO의 산화로 할로젠 화합물이 존재할 경우에는 방

해 메카니즘에 의하여 속도가 감소한다.<sup>(7)</sup>

CO/CO<sub>2</sub>의 열역학적상수는 식 (1)과 같이 나타낸다.<sup>(8)</sup>

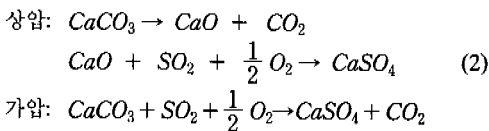
$$\frac{CO}{CO_2} = 2.766 \exp(-6.340/T) \quad (1)$$

만약 850℃에서 CO/CO<sub>2</sub>의 비는 9.8인 기포 유동층의 dense phase에서 CO산화에 대한 실험의 결론은 1000℃까지 도달하기 전에는 CO의 완전산화는 불가능하다. 오히려 기포내에서 기포의 분출영역 및 상부의 freeboard영역에서 산화가 관찰되는데 이 영역에서는 OH, H 등의 radical이 고체표면에서 CO와 재결합에 의해 CO가 고갈되기 때문이다.<sup>(9)</sup>

CO는 독성가스로서 공해물질중의 하나로 분류되어 그 농도를 제어하여야 하지만 이 값의 증가는 경제성과 보일러 성능에 중요한 영향을 미치는 연소효율의 감소를 의미한다. 국내에서는 CO의 배출규제치를 산소농도 6%에서 250ppm이하로 규제하고 있으나 효율향상을 위하여 낮은 배출치를 얻기 위한 각 조업인자들의 영향을 분석할 필요가 있다.

## 2.2 탈황특성

유동층내에서 석회 및 석회석의 탈황반응특성은 공해배출 저감을 위하여 매우 중요하다. Ca/S의 비율은 탈황률과 직접적인 관계가 있으나 탈황률을 증가시키기 위하여 높은 Ca/S비로 운전할 경우 발생하는 폐기물의 양 및 고온 필터에서 제거해야 하는 분진의 양이 증가한다. 상압 유동층에서 탈황반응은 석회석이 유리하다고 보고되고 있다. 가압유동층에서는 석회석의 하소단계없이 식 (2)와 같이 직접탈황이 진행된다. 한편 가압하에서는 석회석보다 백운석이 더 좋은 탈황효율을 보일 수 있다.



가압상태에서는 CaCO<sub>3</sub>가 CaO보다 안정함을 보인다. 산소가 희박한 영역에서는 반응후 생성된 CaSO<sub>4</sub>는 안정된 CaO로 분해되는데 가압유동

층인 경우는 산소의 분압이 높기 때문에 SO<sub>2</sub>로 분해반응이 일어나지 않아 상대적으로 탈황률이 높다. 따라서 SO<sub>2</sub>를 제거하기 위한 최적온도는 상압유동층과는 다르며, 사용하는 흡착제의 성능도 다르다. 가압유동층에서 탈황효율은 온도가 750℃에서 950℃로 증가하면서 계속 증가하지만 상압유동층에서는 820-850℃ 사이에 최대점을 보인다.<sup>(10)</sup> 상압일 경우 석회석 및 백운석의 탈황능력은 780-850℃ 근처에서 최적점을 보이지만, 가압하에서는 접촉시간 및 반응시간이 상압보다 길기 때문에 온도가 증가할 수록 높은 전환율을 예상할 수 있다.

탈황은 온도, 압력, 탈황제의 특성 및 입자크기 분포와 상관관계가 있고, Ca/S몰비가 증가함에 따라 NO<sub>x</sub>생성에 대한 상승효과가 있다<sup>[11]</sup>. SO<sub>2</sub>의 생성은 휘발분의 생성에 따른 H<sub>2</sub>S의 산화와 char의 연소 및 pyrite의 산화에 기인한다. 발생한 SO<sub>2</sub>는 대류 또는 확산에 의하여 이동하고 흡착제의 기공형성에 따라, SO<sub>2</sub>가 확산되어 반응이 일어나며 반응생성물의 결정이 성장함에 따라 기공을 막고 입자의 마모에 의한 기공의 노출에 의해 미 반응표면의 반응을 기대할 수 있다.

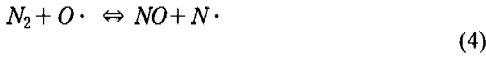
SO<sub>2</sub>의 흡착제는 700℃에서 CaO로 분해가 일어나는데 입자주위의 압력이 평형압력보다 높으면 분해반응은 일어나지 않는다. 이때 평형압력은 식 (3)과 같다.

$$P_e = 1.2 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{19140}{T}\right), [bar] \quad (3)$$

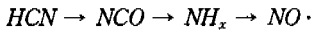
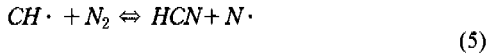
가압기포유동층에서 압력 15기압 반응온도가 950℃까지 상승하여도 석회석의 분해는 일어나지 않고 백운석의 경우는 340℃에서 분해가 시작된다. 이것은 상압에서 석회석이 하소반응을 일으켜 반응표면적이 증가하여 탈황률이 증가하지만 가압에서는 하소반응없이 탈황반응이 진행되기 때문에 석회석에 의한 탈황률이 낮다.<sup>(12)</sup>

## 2.3 NOx 배출

NO<sub>x</sub>의 발생경로는 3개의 다른 경로에 의하여 생성되며, 질소분자가 산소 radical과 직접 산화반응을 일으킨다. 이때 반응식은 식 (4)와 같이 표현되며, 발생되는 thermal NO<sub>x</sub>의 농도는 연소중 자유산소원자의 농도에 영향을 받으나 1693K 이하에서는 무시해도 좋다.<sup>(13)</sup>



연료과잉에서 탄화수소 radical과 질소분자가 HCN을 생성하고 prompt NOx로 산화된다. 비교적 온도가 낮은 영역에서는 식 (5)와 같이 반응이 진행된다.



휘발물질에 포함된 연료중 질소 성분이 HCN, NH<sub>3</sub>로 휘발하면서 HCN의 균일상 반응에서 식 (6)과 같이 N<sub>2</sub>O가 발생한다.



유동층연소에서 조업온도는 750-950℃를 유지하기 때문에 thermal NOx의 발생은 없으며, 온도가 낮기 때문에 N<sub>2</sub>O의 발생량은 높다. N<sub>2</sub>O와 NO의 발생은 서로 대응적인 관계에 있다. N<sub>2</sub>O의 발생은 온도가 증가함에 따라 감소하고 NO의 발생은 반대로 증가한다. 또 휘발분이 많을수록 NO의 발생량은 높고 N<sub>2</sub>O의 발생량은 상대적으로 낮게 발생한다. 특히 NOx의 발생은 과잉공기 및 온도가 증가할수록 증가한다.

질소산화물의 발생은 매우 복잡하고 다양한 반응기구를 갖으며, 유동층 연소에서는 반응온도가 낮기 때문에 thermal NOx의 발생은 없으며, 연료중의 질소성분이 휘발하면서 복잡한 경로를 통하여 배출하는 것으로 알려 지고 있다.<sup>(14,15)</sup>

NOx는 지구의 오존층을 파괴하여 생태계를 위협하기 때문에 오염 배출물중 가장 심각하게 고려되어지고 있다.<sup>(16)</sup>

## 2.4 유동화속도

가압유동층에서는 압력의 증가로 기체 밀도가 증가하여 최소유동화속도는 상압에서 보다 감소한다. 이것은 유속범위를 결정하는 중요한 인자가 되고, 과잉공기량을 결정하면 반응기 직경을 결정하는 값이 된다. 유동화속도에 따른 열전달, 기포의 속도 및 크기 등을 예측하고 반응성을 예

측할 수 있다. 입자의 종류 및 특성에 따라 최소 유동화 속도는 식 (7)에서 계산할 수 있다.<sup>(2)</sup>

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left( \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \left( \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right) \quad (7)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

Fig. 1은 가압유동층 연소실험장치의 공정개략도를 나타낸다. 실험장치는 연료 및 공기의 공급부분과 연소로부분 그리고 배가스처리부분으로 구성되어 있다. 연료인 석탄과 석회석의 공급은 screw feeder에 의하여 정량화 되어 연소로의 하부(공기분배기로부터 높이 0.15m)에 공급된다. 연료의 공급계통과 방법을 보면 상압에서 1차 저장조에 석탄을 저장하고 1차저장조에서 2차저장조로 석탄을 유입시킨다. 1차 저장조와 2차 저장조의 중간에 설치된 밸브를 작동하여 석탄을 2차 저장조에 유입시킨다. 2차저장조에서 석탄은 2차 저장조의 하부에 있는 screw feeder에 의하여 공급량을 정량화하여 석탄과 석회석을 연속적으로 연소로에 공급하는 screw feeder에 의하여 연소로까지 공급한다.

공기의 공급은 공기압축기에서 생성된 압축공기를 booster compressor에서 재 압축하여 압력조정기에서 압력을 조절하고 공기를 연소로에 공급하기 위하여 MFM(mass flow meter)에서 공급유량을 정량하여 연소로에 공급한다.

연소로는 층(bed)과 freeboard로 나뉜다. 층(bed)은 분배기와 접해 있는 부분은 직경 0.17m으로 그리고 높이 2m에 이르면 0.25m으로 확장되는 tapered bed이고, freeboard는 직경 0.25m, 높이 3m이며, 총 연소로 높이는 5m이다. 연소로는 내화재와 단열재로 구성되고 압력시일을 위하여 탄소강판의 압력용기로 둘러 싸여 있다. 또 연소로에는 압력과 온도를 측정하는 여러개의 압력측정구와 온도측정구 그리고 연소온도를 제어하기 위하여 수평이중전열관이 층(bed)부분과 freeboard 부분에 설치되어 있다.

배가스처리부분은 비산입자를 포집하기 위한 2개의 사이클론이 하나의 압력용기내에 들어 있

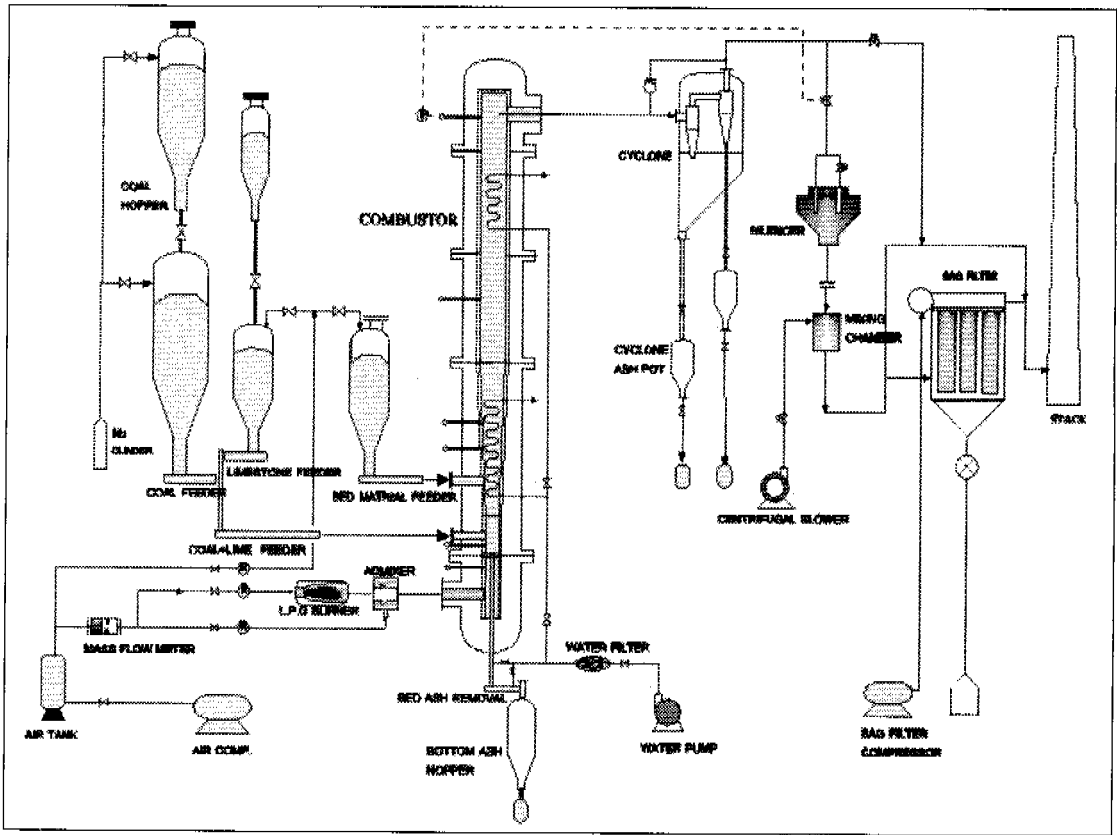


Fig. 1 Schematic diagram of pressurized fluidized bed combustion facility

고, 전체적인 연소시스템의 압력을 조절하기 위한 압력조절밸브, 가스터빈을 대신하여 배가스의 압력을 강하하기 위한 소음기(silencer)와 배가스 중의 분진을 제거하기 위한 bag filter로 구성되어 있다. 연소중 공해물질의 배출특성을 측정하기 위한 연소가스채취구는 연소로의 압력이 대기압으로 강해진 소음기의 후단에서 채취한다. 채취된 가스는 미세한 필터를 통하여 분진을 포집하고 배가스 분석은  $O_2$ 와  $CO_2$ (Ultramat23, SIEMENS),  $CO$ (48H, TE Instruments),  $SO_2$ 와  $NO_x$  (42C, TE Instruments),  $N_2O$ (46H, TE Instruments) 등을 분석하였다.

### 3.2 실험방법

연소로의 공기상자 전단에 설치된 예열버너에 LPG를 공급하고 LPG를 연소할 수 있는 적당량의 공기를 함께 주입하면서 점화하여 연소로의 예열을 시작한다. 연소로의 맨 하부가 일정온도

(약  $500^\circ C$ )까지 상승하면 층물질을 주입한다. 층물질의 주입은 연소로 층 높이의 일정량에 해당하는 적당한 높이를 유지하도록 주입한 후 계속적으로 LPG를 연소하면 주입되는 층물질을 가열하면서 연소로의 맨 하부 층온도가 석탄이 연소 가능한 온도까지 상승하게 된다. 연소로 층(bed)의 온도가 유연탄을 연소할 수 있는 온도에 이르면 석탄을 주입한다. 초기에 석탄을 주입하게 되면 층 온도는 서서히 상승하다가 주입된 석탄이 연소하기 시작하면 연소로의 온도가 급상승하게 된다. 주입된 석탄의 연소열로 인하여 연소로내 층온도를 유지할 수 있으면 LPG의 공급을 중단하고 예열버너쪽으로 공급된 공기를 차단하고 유동화 공기만을 주입한다. 연소로의 온도가 안정되면 계산된 공기량과 석탄을 공급한다. 연소로의 압력에 따른 층물질의 공급을 계속하여 정해진 실험조건외 층높이까지 층물질을 주입한다.

유동층내에서 연소효율은 주입되는 석탄층에

연소되지 않는 석탄이 bed ash, fly ash 및 배가스의 CO로 배출되는 양으로부터 계산한다. 각 실험조건마다의 연소효율을 계산하기 위하여 하나의 실험조건에 2시간동안 연속적인 운전을 통하여 얻어진 총회분 (bed ash)과 사이클론에서 포집된 회분 (fly ash)에 대하여 중량을 측정하고 시료를 채취한다. 공업분석기에서 측정된 회분중에 미연분의 양과 운전중에 배가스분석기로부터 측정된 일산화탄소의 양으로 결정하였는데 식 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta(\%) = (1 - \frac{H_b F_b + H_f F_f + H_g F_g}{H_c F_c}) \times 100 \quad (8)$$

Table 1에 석탄의 물성특성을 수록하였다. 중국의 선화탄으로 황함량이 0.29%, 탄소가 73.2%이고, 발열량은 7015kcal/kg이었다. 공업분석치는 고정탄소가 57.1%, 휘발분이 32.6%이고 회분이 5.5% 정도로 회분함량이 매우 낮은 특성이 있는 유연탄이다.

Table 2는 실험조건을 나타낸다. 연소압력은 6기압으로, 층높이는 2m로 고정하였다. 식 (7)에 의하여 최소유동화속도 ( $U_{mf}$ )가 0.125m/s로 계산되었다. 유동화공기의 속도는 대개 최소유동화속도의 5배이상으로 결정한다. 본 실험의 경우 실제 가압유동층연소소에서 적용되고 있는 1m/s를 기준하여 0.9-1.3m/s로 조절하였다. 과잉공기율은 5-35%, 실험온도의 범위는 850-950℃로 변화하였다. 실험온도는 석탄이 유동하면서 연소하는 유동층의 온도를 일컫는데 본 실험에서는 공기분배기로부터 높이 0.75m점에 설치된 열전대의 온도로 지정하고 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시간에 따른 온도변화

Fig. 2는 연소로의 높이별로 설치된 열전대로부터 측정된 연소로내의 온도변화를 운전시간의 흐름에 따라 나타낸 것이다. 연소로 예열을 시작한 때를 0으로 2시간정도 지나면 LPG의 공급을 중단하고 석탄만을 연소하여 연소로의 온도를 상승시키거나 유지시킨다. 운전시간이 8시간정도 지나, 연소로의 출구온도(높이4.95m)가 650℃에 이르면 정해진 실험조건에 따라 실험을 수행한

Table 1 Properties of coal

Proximate Analysis(%)	Moisture	4.84
	Volatile Meter	32.63
	Ash	5.46
	Fixed Carbon	57.07
Elemental Analysis(%)	Carbon	73.16
	Hydrogen	4.55
	Nitrogen	1.60
	Sulfur	0.29
	Oxygen	10.1
Mean Particle Diameter(mm)		0.35
Calorific Heating Value(kcal/kg)		7015
* Proximate analyzer(MAC-400, LECO)		
* Elemental analyzer(CHN-1000, LECO)		
* Sulfur analyzer(SC-432DR, LECO)		
* Calorific analyzer(AC-300, LECO)		
** Dry basis		

Table 2 Experimental conditions

Experimental item	Conditions
Superficial velocity(m/s)	0.9 - 1.3
Bed temperature(℃)	850 - 950
Excess ratio(%)	5 - 35
Bed height(m)	2.0
Pressure(atm)	6

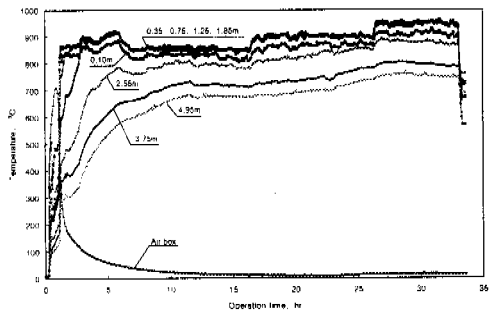


Fig. 2 Temperature profile with operation time

다. 그림에 표기된 값은 연소로의 공기분배기로부터 떨어진 거리를 나타낸다. 유동물질이 유동하고 있는 층높이는 공기분배기로부터 2m이다. Air box에서 측정한 온도를 보면 연소된 LPG로 온도가 450℃까지 상승하다가 갑자기 급상승하였는데 이 지점이 석탄을 공급한 시점이며, plenum의 온도가 720℃까지 상승하다가 갑자기 하락하였는데 이것은 LPG의 공급을 중단한 시점이다.

석탄이 연소되는 연소로의 층온도(높이 0.75m)를 실험온도로 설정하여 실험을 수행하였다. 연소로의 높이 0.35, 0.75, 1.25, 1.85m의 온도는 층물질이 유동하는 유동층으로 온도가 거의 유사하고 높이가 0.1m부분이 약 10℃정도 낮게 유지되었는데 이것은 상온의 석탄이 연소로로 투입된 지점이기 때문이다. 실험온도 850, 900, 950℃에서 약 8-10시간씩 층온도가 계속적으로 유지되고 있음을 보여주고 있다. 유동층영역의 온도가 비교적 고르게 분포한 것으로 보아 연소로내의 유동화 상태는 양호한 것으로 판단된다.

4.2 연소효율

Fig. 3은 압력 6기압상태에서 연소로의 층온도의 변화에 따른 연소효율을 나타낸 것이다. 연소효율을 결정하는 인자로는 반응온도, 압력, 산소농도, 석탄의 물성, 입자의 체류시간, 연소로내부에서 고체입자의 혼합정도, 전열관과의 열전달 등 많은 인자가 있다. 본 연구에서 연소효율은 99.5% 이상을 얻었다. 본 연구에서 연소효율에 미치는 인자는 연소압력, 유동층의 온도, 층높이 그리고 CO의 배출농도라고 할 수 있다. 유동층내부온도가 상승함에 따라 석탄의 연소속도가 증가하기 때문에 연소효율은 증가하게 된다. 또 보통 상압조건에서 95%의 연소효율<sup>(17)</sup>보다 높은 이유는 연소로내 압력의 증가로 산소의 분압이 증가하였기 때문이다. 층물질이 유동하고 있는 층높이가 2m로 높기 때문에 기체-고체간에 접촉하는 체류시간이 증가하여 높게 나타난 것으로 볼 수 있다. 또 CO의 배출농도가 높을 경우 연소효율은 감소하는 것으로 나타났다.

대부분 상업용 가압유동층연소는 1.0-1.6MPa (142-228psi)에서 운전되고 있고, 연소효율도 99% 이상을 나타내고 있다.<sup>(18)</sup>

4.3 CO의 배출

Fig. 4는 과잉공기율을 5%에서 35%까지 변화 하면서 CO의 배출농도를 고찰한 것이다. CO의 농도는 과잉공기율 12%이하와 연소온도 900℃이하에서는 규제치 이상으로 배출됨을 보이고 있다. 그러나 과잉공기율 12%에서 100ppm 정도로 배출되고, 과잉공기율이 증가함에 따라 점차적으로 10ppm까지 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 과잉공기가 증가함에 따라 불완전 연소되는 탄소

분의 양이 감소할 뿐 아니라 일산화탄소도 완전 연소되기 때문이다.

실제 상용으로 사용되는 연소로에서는 과잉공기율 35% 부근에서 연소되므로 CO 농도는 10 ppm 이하로 배출될 수 있음을 보이고 있다.

Fig. 5는 연소로 층온도 850-960℃의 변화에 따른 CO 배출농도를 나타낸다. 과잉공기율 15% 이상의 연소조건에서는 층온도의 변화에 관계없이 100ppm이하로 유지되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 과잉공기율 10% 미만의 연소조건에서는 온도가 증가함에 따라 점차적으로 감소하여 층온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다.

그러나 그 농도는 규제치보다 높게 나타나, 연소온도에 관계없이 과잉공기율을 15% 이하에서의 연소는 CO의 배출이 과다하여 불완전한 연소가 발생하는 것을 알 수 있다.

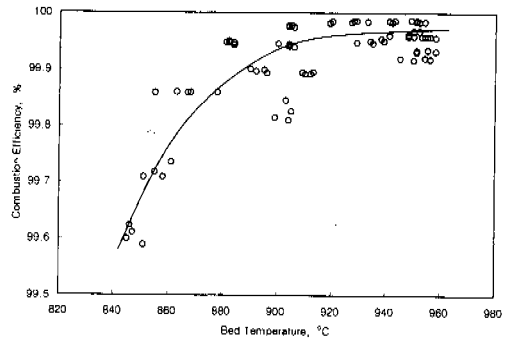


Fig. 3 The effect of bed temperature on combustion efficiency

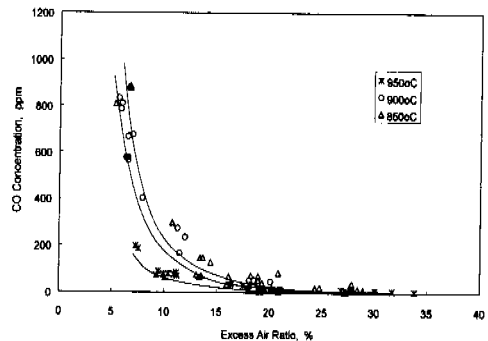


Fig. 4 The effect of excess air ratio on CO emission

4.4 SO<sub>2</sub>의 배출

본 연구에서 SO<sub>2</sub>의 배출은 흡착제를 주입하지 않고 공기량변화와 유동층온도에 대한 특성을 고찰하였다. Fig. 6은 과잉공기율이 5%에서 35%까지 변화할 때 SO<sub>2</sub>의 배출농도를 나타낸다.

연소온도가 950℃일 경우 SO<sub>2</sub>의 농도가 과잉공기 10% 부근에서 250-500ppm까지 분포하고 있으나 과잉공기 35% 부근에서는 160ppm까지 감소하고 있다. 과잉공기량의 증가에 따라 감소하는 것은 산소농도와와의 회석 때문인 것이다. 실제 국내에서의 규제치가 250ppm이므로 본 석탄의 연소에서는 흡착제를 사용하여 탈황을 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 연소로 층온도를 850℃에서 960℃까지 변화하면서 SO<sub>2</sub>의 배출농도를 고찰한 것이다. 층 온도가 증가할수록 SO<sub>2</sub>의 배출농도는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 과잉공기율 20%일 경우 층온도 850℃ 부근에서 100ppm 이하를 보이고, 960℃에서는 240ppm을 나타내고 있다. 이것은 온도가 증가함에 따라 S의 산화반응속도가 증가하기 때문인 것으로 설명할 수 있다.

4.5 NO<sub>x</sub>의 배출

Fig. 8은 과잉공기율을 5%에서 35%까지 변화하면서 NO<sub>x</sub>의 배출농도를 고찰한 것이다. 본 실험결과 NO<sub>x</sub>의 발생은 과잉공기가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 과잉공기율 5% 부근에서 NO<sub>x</sub>의 농도가 10-30ppm에 분포하였으나 과잉공기율이 증가하면서 계속적으로 증가하여 35% 부근에서는 80ppm에 이르고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 과잉공기가 증가함에 따라 NO 및 N<sub>2</sub>O의 농도가 증가한다고 알려져 있고, 산소농도에 비례하여 NO<sub>x</sub>가 발생하기 때문이다.<sup>(16)</sup> 그 뿐만 아니라 환원제로 작용하여 질소산화물의 농도를 저감시키는 CO 및 휘발분에서 생성되는 암모니아의 산화에 의하여 환원제의 감소뿐만 아니라 암모니아의 산화에 의해 질소산화물이 증가된다. 그런데 이 농도는 상압 기포유동층에서 200ppm 정도의 배출농도보다 훨씬 낮은 값이다.<sup>(19)</sup> 유동층의 높이를 증가시킬 경우 질소산화물이 유동층에 존재하는 Char 및 회분의 촉매 역할에 의하여 NO<sub>x</sub>의 농도가 감소하는 것으로 설명할 수 있다.

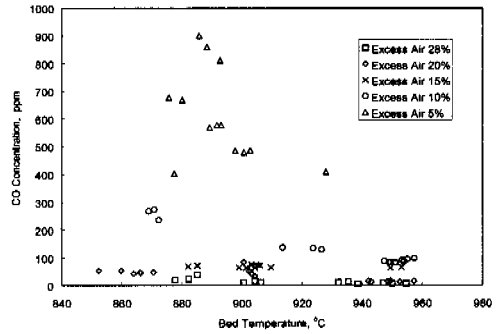


Fig. 5 The effect of bed temperature on CO emission

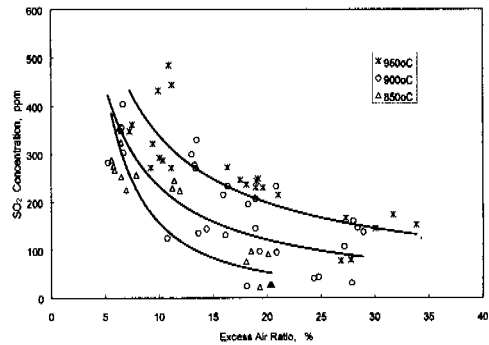


Fig. 6 The effect of excess air ratio on SO<sub>2</sub> emission

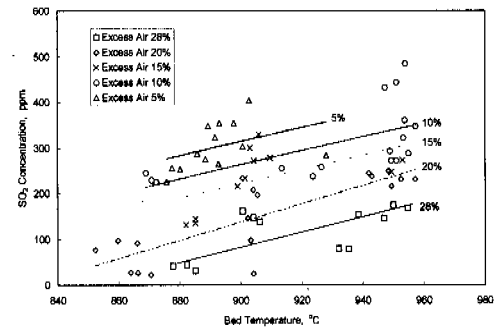


Fig. 7 The effect of bed temperature on SO<sub>2</sub> emission

Fig. 9는 유동층온도의 변화에 따른 NO<sub>x</sub>의 농도 변화를 나타낸 것이다. 과잉공기 20% 미만의 조건에서는 연소 층 온도에 관계없이 비슷한 분포를 나타내고 있다. 그러나 과잉공기 28%일 경우에는 층온도가 880℃에서 950℃로 증가함에 따라 농도의 변화는 50ppm에서 80ppm으로 점차적으로 증가함을 보였다.



4.6 N<sub>2</sub>O의 배출

아산화질소의 배출에 대하여는 중요하게 하지 고려 않았던 배출가스중의 하나였으나 최근에 지구온난화를 초래하는 온실가스의 하나로 부각되면서, 이에 대한 연구보고가 많이 발표되고 있다

Fig. 10에 과잉공기율의 변화에 따른 아산화질소의 배출특성을 나타냈다. 아산화질소의 배출은 10ppm이하로 그 농도가 매우 적으며 과잉공기 5%부근에서 2ppm정도이었으나 35%부근에서는 10ppm이상을 나타내 아산화질소의 농도는 NO<sub>x</sub>의 농도와 마찬가지로 과잉공기율이 증가하면 증가하는 것으로 나타났다. 가압유동층에서 N<sub>2</sub>O의 발생은 연소온도가 증가에 따라 감소하고, 과잉공기가 증가하면 증가하는 것으로 보고되고 있다.<sup>(20)</sup> 본 연구에서 N<sub>2</sub>O의 배출농도는 NO<sub>x</sub> 배출농도의 10%정도를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 유동층온도 증가에 따라 N<sub>2</sub>O는 약간 감소하는 경향으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서 중국의 석화탄에 대한 가압유동층연소배가스 특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 과잉공기율이 증가하면 연소효율은 증가하고, 압력 6기압, 층높이 2m에서 연소효율은 99% 이상을 얻을 수 있다.
- 2) 일산화탄소는 과잉공기 15%이상에서 규제치범위내에서 배출농도를 얻을 수 있다.
- 3) 황산화물의 배출은 과잉공기율이 증가하면 감소하고 연소로 층 온도가 증가하면 증가하여 규제치를 상회하여 배출되므로 흡착제를 사용하여 탈황하여야 한다.
- 4) 질소산화물의 배출은 과잉공기율이 증가하면 증가하고, 과잉공기 20%이하에서는 연소로의 층온도의 변화에 증가폭이 적지만, 그 이상에서는 층온도의 증가에 따라 점차적으로 증가함을 보인다.
- 5) 아산화질소는 과잉공기율의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 질소산화물의 10%범위에서 배출된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 청정에너지

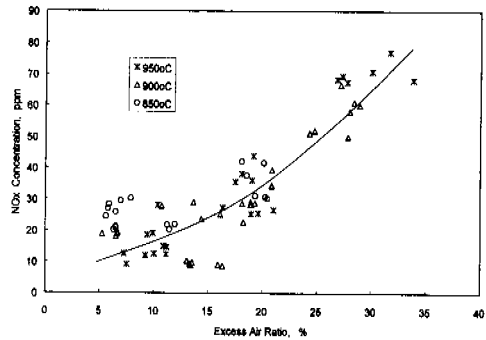


Fig. 8 The effect of excess air ratio on NO<sub>x</sub> emission

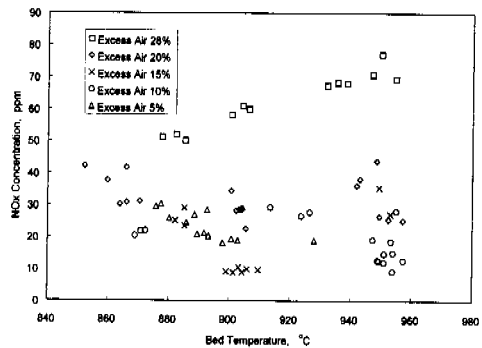


Fig. 9 The effect of bed temperature on NO<sub>x</sub> emission

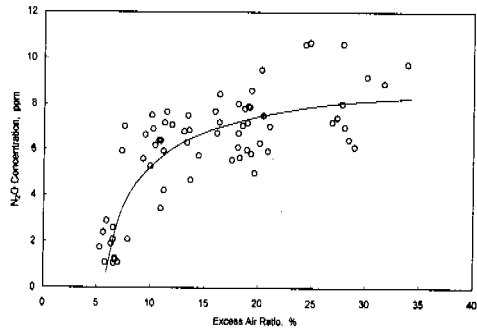


Fig. 10 The effect of excess air ratio on N<sub>2</sub>O emission

기술개발사업(1998-C-CC01-P-01)의 일환으로 수행되었습니다. 연구비의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 한근희, 선도원, 배달희, 손재익, 류정인, 1995. "상온 유동층에서 층내 전열관의 마모특

- 성," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, KSME 95S236, pp. 444~449.
- (2) 진경태, 선도원, 이창근, 박재현, 한근희, 배달희, 조성호, 1998, "Bench Scale 가압유동층 석탄연소기술 개발," 통상산업부연구과제보고서, KIER-973402, pp. 28~41.
- (3) 이영우, 손재익, 1995, "복합발전용 가압유동층 연소기술," 화학공업과 기술, 제13권 제1호, p. 53.
- (4) Moritomi, H., 1994, "Pressurized Fluidized Bed Combustion," *APEC CCT training Course*, Sydney, Nov.
- (5) Podolski, W. F., Miller, S.A., 1983, "Pressurized Fluidized Bed Combustion Technology," Noyes Data Co., New Jersey.
- (6) Cuenca, M. A. and Anthony, E. J., 1995, "PFBC," 1st edition, Chapman & Hall.
- (7) Baulch, D. L. and Drysdale, D. D., 1974, "An Evaluation of the Rate Data for CO+OH-CO<sub>2</sub>+OH Reaction," *Combustion & Flame*, Vol. 23, pp. 215~225.
- (8) Arthur, J. R., 1951, "Reactions between Carbon & Oxygen," *Trans. Faraday Soc.*, Vol. 52, pp. 16~178.
- (9) Hayhurst, A. N. and Tucker, R. F., 1990, "The Combustion of Carbon Monoxide in a Two-One Fluidized Bed," *Combustion & Flame*, Vol. 79, pp. 175~189.
- (10) Sarofin, A., 1994, "Fluidized Bed Combustion and Emission Control Issues," *International Clean Coal Technology Symp. on PFBC*, Kitakyusyu, Japan, July.
- (11) Verwey, N., Renz, U. and Reinartz, A., 1991, "Measurements and Modeling of SO<sub>2</sub> Emission from a Pressurized Bed Combustor," *Proceeding of The 11th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, p. 1401.
- (12) Yrjas, K. P., Lisa, K. and Hupa, M., 1993, "Sulphur Adsorption Capacity of Different Limestones and Dolomites under Pressurized Combustion Conditions," *Proceeding of The 12th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, p. 265.
- (13) Koskinen, J., Lehtonen, P. and Sellakumar, K. M., 1995, "Ultraclean Combustion of Coal in Ahlstrom Pyroflow PCFB Combustor," *Proceeding of The 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, p. 369.
- (14) Leckner, B., 1998, "Fluidized Bed Combustion : Mixing and Pollutant Limitation," *Prog. Energy Comb. Sci.*, Vol. 24, pp. 31~61.
- (15) Johnsson, J. E., 1994, "Formation and Reduction of Nitrogen Oxides in Fluidized Bed Combustion," *Fuel*, Vol. 73(9), p. 1398.
- (16) 신동신, 1994, "산업용 가스터빈의 저NOx 연소기," 대한기계학회지, 제34권 제12호, pp. 929~939.
- (17) 선도원, 손재익, 진경태, 이창근, 박재현, 한근희, 배달희, 조성호, 1997, "열병합 발전을 위한 순환유동층 석탄연소 기술개발," 통상산업부연구과제보고서, KIER-973403, pp. 69~74.
- (18) Stringer J., Wright I. G., 1999, "Material Issues in PFBC," *Proc. of The 16th International Pittsburgh Coal Conference*, Oct. 11~15.
- (19) Verloop, C., Andries, J., and Hein, K., 1995, "Experimental Study of the Effect of Ammonia Injection and Staged Combustion on the Emission of a PFBC," *Proc. of 13th Int. Conf. on PFBC*, pp. 149~159.
- (20) Lu Y., Hippinen I., Kudjoi A., Jahkola A., 1994, "N<sub>2</sub>O Emission from Pressurized Fluidized Bed Combustion of Gasification Residues," *Proc. of 6th International Workshop on Nitrous Oxide Emissions*, pp. 165~170.