

## 가압유동층 연소로에서 무연탄의 연소특성

한근희<sup>†</sup> · 강석환<sup>\*</sup> · 류정인<sup>\*\*</sup> · 진경태

한국에너지기술연구소 유동층기술연구센터

<sup>\*</sup>충남대학교 화학공학과, <sup>\*\*</sup>기계공학과

(2000년 11월 13일 접수, 2001년 7월 7일 채택)

## Combustion Characteristics of Domestic Anthracite Coal in a Pressurized Fluidized Bed Combustor

Keun-Hee Han<sup>†</sup>, Suk-Hwan Kang<sup>\*</sup>, Jung-In Ryu<sup>\*\*</sup> and Gyoung-Tae Jin

Fluidization Research Center, Korea Institute Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

<sup>\*</sup>Dept. of Chemical Eng., <sup>\*\*</sup>Dept. of Mechanical Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

(Received 13 November 2000; accepted 7 July 2001)

### 요 약

연소로의 층(bed)하부 직경이 0.17 m, 높이가 2 m이고, freeboard의 직경이 0.25 m, 높이가 3 m인 tapered bed 형태의 가압 유동층 연소로에서 58.25%의 탄소와 0.34%의 황을 포함하고 있는 강원도 태백지역 무연탄의 연소 및 배가스 특성에 대해 연구하였다. 연소로의 압력은 6기압, 층 높이는 2 m로 일정하게 유지한 상태에서, 연소 온도는 850-950 °C범위에서 실험하였다. 또 공기의 유동화속도를 0.9-1.3 m/s로 변화시키고, 과잉공기를 10-30% 범위로 실험하였다. 실험결과 연소온도가 850 °C에서 950 °C로 증가함에 따라 연소효율은 93%에서 99.5%로 증가하였으며, NO<sub>x</sub>는 33-55 ppm으로 배출되었다. 또 N<sub>2</sub>O 17 ppm 이하의 값을 얻었다. SO<sub>2</sub>의 배출농도는 850 °C에서 950 °C로 층온도가 증가함에 따라 증가하였다.

**Abstract** – The combustion and emissions characteristics of the domestic anthracite coal containing 58.25% carbon and 0.34% sulfur was investigated in pressurized fluidized bed combustor(PFBC), 0.17 m bed I.D.×2 m height tapered bed and 0.25 m I.D.×3 m height freeboard. The pressure of the combustor was constantly maintained at 6 atm, and the combustion temperatures are varied from 850 °C to 950 °C. Also the air velocity was changed from 0.9 to 1.3 m/s. Consequently, combustion efficiency and NO<sub>x</sub> concentration in the flue gas with increasing combustion temperature from 850 °C to 950 °C were increased in the ranges 93-99.5% and 33-70 ppm respectively. But N<sub>2</sub>O concentration is obtained less than 20 ppm. SO<sub>2</sub> concentration increasing bed temperature from 850 °C to 950 °C in the flue gas was increased.

**Key words:** Pressurized Fluidized Bed Combustor, Emission Characteristics, Domestic Anthracite, Coal Combustion

### 1. 서 론

1970년대 석유파동 이후 세계적으로 각종 석유 대체에너지 자원의 개발이 상당한 주목을 받아 오면서 대표적인 대체에너지원으로 석탄의 다양한 이용이 추구되어 왔다. 이러한 노력은 기준에 미달되어 방관되어 왔던 저급석탄의 이용에 관한 모색에 이르렀다. 한 예로 황 함유량이 적고 열량이 적은 국내 무연탄의 경우 그 효용성이 인정되고 있다[1].

유동층에 의한 석탄의 연소기술은 기존의 연소기에서 효과적으로 연소시킬 수 없는 저열량탄이나 오일셀을 연소시키기 위하여 선진국에서 관심을 갖게 되었는데, 연료의 선택폭이 넓고, 조업 및 유지관리가 우수하며 석회석(limestone)이나 백운석(dolomite)을 첨가하여 석탄중의 황을 90% 이상 제거할 수 있고, 연소온도를 낮게 유지함으로써 NO<sub>x</sub>의 발생

량을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다[2]. 최근 지구의 환경보존과 오염배출에 관한 규제가 강화되면서 청정석탄활용기술의 개발이 활발해지고 있다. 청정석탄활용기술의 하나인 가압유동층 복합발전(Pressurized Fluidized Bed Combustor-Combined Cycle, PFBC-CC)은 가압 용기 안의 유동층 연소로에서 발생하는 열과 연소가스를 이용하여 증기터빈과 가스터빈을 구동하는데, 고효율 및 저공해의 신기술로써 1960년대 말부터 연구가 시작되어 지금은 상용발전 규모로 운전되고 있다. 또한 가압유동층 복합발전에는 가스터빈의 효율을 개선하기 위하여 연소로에서 배출된 연소가스상에 천연가스를 연소시켜 가스터빈에 유입되는 가스온도를 상승시키는 1.5세대가 있다. Carbonizer에서 연료가스를 제조하여 1.5세대의 천연가스 대용으로 Topping Combustor에 공급하는 제 2 세대 가압유동층 복합발전기술이 미국 · 유럽 · 일본을 중심으로 연구개발이 활발히 진행되고 있다[3]. 가압유동층 연소는 연소로를 압력 용기 안에 설치하여 장치의 소형화와 설치비의 절감을 이룰 수 있다. 또 연소장치를 가압한 만큼 로내의 산소 농도가 높아짐으로서 연소효율이

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: heehan@kier.re.kr

높아 같은 용적의 다른 유동층 반응기 보다 많은 연료를 처리할 수 있는 장점과 열 추출로 인한 증기터빈과 고압의 가스로 인한 가스터빈을 구동할 수 있는 복합발전이므로 고효율의 장점을 지니고 있다[4].

본 연구는 벤치규모의 가압유동층연소로에서 국내 무연탄의 연소특성을 고찰하여 이의 효율적 이용과 청정석탄기술인 가압유동층 복합발전기술이 도입 또는 설치될 것에 대비하여 이에 대한 설계 및 운전자료, 최적화 및 기술개발에 기본자료를 제공하고, 국내무연탄의 활용기술개발에 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

가압유동층연소는 가압조건에서 운전되므로 상압하에서 운전되는 기포유동층과 비교하여 용량, 연소효율, 탈황효율, 열전달률 및 배가스의 특성에서 많은 차이점을 갖고 있다. 기포유동층에서는 층 내에서의 압력강하와 유도송풍기와 배풍기의 용량 결정 및 power소요량 증가에 따라 유동층의 높이가 1.2 m이하로 제약을 받지만, 가압유동층연소는 상승된 시스템의 압력에 비하여 층 내에서의 층 높이에 의한 압력손실이 상대적으로 무시할 만큼 적어 유동층 높이를 3.5-4 m 정도로 높게 조업할 수 있다. 유동층의 높이가 높게 되므로써 유동층의 용량이 증대되고, 가스의 층내 체류시간이 증가하여 연소효율과 배가스저감 성능이 좋다. 또한 가압유동층에서는 공기의 밀도가 증가하기 때문에 최소유동화속도는 감소하고, 상압에 비하여 공기부피가 압력비만큼 감소하기 때문에 보일러 연소영역의 용적을 압력의 증가만큼 감소시킬 수 있으며, 낮은 공압속도와 높은 층높이로 기-고 접촉시간이 증가한다. 압력이 증가하면 산소의 분압이 커지고 확산계수는 감소하여 전체적으로 물질전달에 미치는 영향은 없으나, 고체의 체류시간이 길어지기 때문에 미연탄소분의 감소와 흡착제의 반응성이 증가한다[3]. Table 1에는 이전의 연구자들에 의한 석탄의 유동층 연소특성에 관한 실험결과를 요약하여 나타내었다[4-9]. 연구결과를 보면 연료의 형태나 연소로의 온도에 따라 약간은 다르지만 상압기포유동층에서 얻어진 연소효율보다 가압유동층연소로에서 나타난 연소효율이 현저히 높게 나타나고, 배가스의 배출특성도 매우 큰 차이를 보이고 있다.

### 2-1. 연소특성

유동층의 연소효율을 결정하는 인자는 온도, 압력에 따른 석탄의 반응속도, 층내에서의 기체의 체류시간, 과잉공기의 양, 석탄의 비산, 석

탄의 표면적, char의 O<sub>2</sub>에 의한 기체 확산 등이 있다. 반응속도는 반응 온도, 산소농도의 영향을 받으며, 고체-기체와의 접촉시간 및 체류시간은 미연탄소분 및 기상에서의 반응에 영향을 주고, 압력은 반응속도와 기체확산에 영향을 준다[4].

연소로에 주입된 석탄은 표면에 있는 수분이 증발한 후 volatile의 연소를 거쳐 char의 연소로 진행된다. 휘발분은 유동층 내에서 확산과 화학반응에 의해 발생되며, 층 표면상부의 freeboard 영역에서 산소와 혼합하여 연소된다[10]. 때문에 freeboard 영역의 높이를 증가시킴으로써 휘발분이 연소할 수 있는 시간을 증가시켜 연소성을 증대시킬 수 있다. 또한 유속을 증가시키면 층높이는 증가하지만 고체의 체류량 감소에 따라 층내부에서 고체의 접촉시간 증가는 기대하기 어렵다. 그러나 일정한 유속에서 층물질을 주입하여 층높이를 증가시키면 고체 및 기체의 체류시간은 증가하여 높은 연소효율을 기대할 수 있다[11]. 압력에 대한 연소특성을 보면 압력증가시 산소의 분압이 증가하기 때문에 당연히 반응속도는 증가할 것으로 기대된다. 그러나 Wallman 등[12]은 산소의 확산속도가 압력의 증가에 따라 감소함으로써 전체적인 반응속도의 증가는 관찰할 수 없었다고 발표하였는데, 즉 실험영역에서 온도 및 산소의 분압에 따라서 영향은 얻을 수 있었으나 일정한 산소의 분압에서 압력의 영향은 없었다고 발표하였다.

### 2-2. 탈황특성

배출가스 중 SO<sub>2</sub>의 제거를 위하여 상압의 연소로에 석회석을 넣어 주면 온도가 상승함에 따라 식 (1)과 같이 석회로 소성되고, SO<sub>2</sub>와 반응하여 CaSO<sub>4</sub>가 생성된다. 그러나 압력이 증가하면 유동층 반응기내에 CO<sub>2</sub>의 분압이 증가하기 때문에 석회와 CO<sub>2</sub>로의 소성반응을 억제하여 소성반응 없이 식 (2)와 같이 탈황반응이 진행되므로 상압에서 보다 탈황률이 낮다고 보고되었다[13, 14]. 그러나 Hajaligol 등[15]에 의하면, 석회석의 탈황은 초기에 표면반응에서 반응시간이 지속되면서 미반응된 석회석의 CO<sub>2</sub>가 분해되어 기공이 생겨 서서히 탈황반응이 진행되기 때문에 탈황률이 증가한다고 발표하였다.

상압:

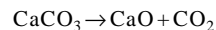
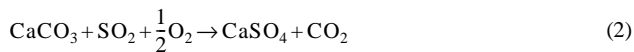


Table 1. Combustion efficiency and emissions for FBC boilers burning coals

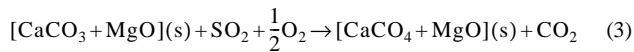
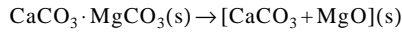
Plant		KIER[5]	RRC[6]	Shimizu[7]	NIRE[8]	HUT[9]		KIER
Type		AFBC	CFBC	CFBC	PFBC	PFBC	PFBC[4]	PFBC
Size		Bench scale	Pilot	Laboratory	Laboratory	Bench scale	Bench scale	Bench scale(this study)
Fuel		Anthracite	Bituminous	Semianthracite	Bituminous	Peat	Bituminous	Anthracite
Bed temperature(°C)		850-960	900	950	820	850	850-950	850-950
Pressure(bar)		Atmospheric	Atmospheric	Atmospheric	8	6	6	6
Combustion efficiency(%)		70-83	97.5-98.5	not given	>99.5	99.3	>99.5	93-99.5
NO <sub>x</sub> (ppm)		50-120	100-210	80	80-110	130	10-75	35-70
N <sub>2</sub> O(ppm)		-	30-65	220	50	-	<11	<20
CO(ppm)		30-150	<210	-	nearly 0	200	<188	<150
SO <sub>2</sub> (ppm)		70	330-665	340	-	<200	<280	235-445
Ultimate	Carbon	32.8-36.1	68.4	90.2	71.45	55.1	73.16	58.25
anal.(%)	Hydrogen	0.28-0.32	5.1	4.2	6.06	6.2	4.55	1.55
	Nitrogen	0.18-0.24	1.2	1.8	1.10	1.4	1.60	0.49
	Sulfur	0.12-0.15	2.8	0.3	0.02	0.2	0.29	0.34
Superficial gas vel.(m/s)		1.8-2.9	-	6.2	0.15	0.6-1.2	0.9-1.3	0.9-1.3
Excess air ratio(%)		0-60	O <sub>2</sub> 3%	O <sub>2</sub> 6%	O <sub>2</sub> 6.5%	O <sub>2</sub> 0.5-7%	5-35	10-30

(O<sub>2</sub> concentration in flue gas is set at 6% v/v dry basis)

가압:



또한 백운석을 탈황제로 사용하면  $\text{MgCO}_3$ 가 원자비 1:1로 포함되어 있어  $\text{CO}_2$ 가 차지한 만큼 기공이 생겨 가압에서는 석회석보다 높은 탈황률을 얻을 수 있다[16].



### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 연료 및 공기의 공급과 연소로 그리고 배가스처리부로 구성되어 있다. 연료인 석탄의 공급은 screw feeder에 의해 정량화 되어 연소로의 하부(공기분배기로부터 높이 0.15 m)에 공급된다. 공기를 연소로에 공급하기 위하여 MFM(mass flow meter)에서 공급유량을 측정하여 연소로에 공급하였다.

연소로는 크게 층(bed)과 freeboard로 나눌 수 있으며, 층(bed)은 하부의 직경이 0.17 m이고, 상부가 0.25 m인 tapered bed 형태로 높이가 2 m이다. 또한 freeboard의 높이는 3 m이다. 연소로는 내화재와 단열재로 구성되고, 압력을 견디기 위해 탄소강관의 압력용기 안에 설치되어 있다. 또한 연소로 측면에 압력과 온도를 측정할 수 있도록 tap이 있으며, 연소온도를 제어하기 위하여 수평이중전열관이 층(bed)부분과 freeboard 부분에 설치되어 있다.

배가스처리부는 비산입자를 포집하기 위한 2개의 cyclone이 하나의 압력용기 내에 들어 있고, 전체적인 연소시스템의 압력을 조절하기 위한 압력조절밸브, 배가스의 압력을 강하하기 위한 소음기(silencer)와 배가스 중의 분진을 제거하기 위한 bag filter로 구성되어 있다.

#### 3-2. 실험방법

먼저 연소로에 LPG를 공급하여 예열버너로 연소로 하부의 온도를 약 500 °C까지 상승시키면서 충물질인 sand를 주입한 후 석탄을 투입하면

서 압력과 온도를 실험조건에 가깝게 조절하였다. 연소상태가 안정되면 원하는 공기량과 석탄을 공급하였다.

석탄의 연소효율은 주입되는 석탄 중 연소되지 않은 석탄이 bed ash, fly ash 및 배가스의 CO로 배출되는 양으로부터 계산하였다. 각 조건마다의 연소효율을 얻기 위해 2시간 간격으로 bed ash와 cyclone에서 포집한 fly ash의 중량을 측정하고 시료를 채취하였다. 공업분석기에서 측정된 회분중에 미연분(휘발분, 고정탄소)의 양과 배가스 중 CO의 농도로부터 다음 식과 같이 연소효율을 계산할 수 있다.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{X_b F_b + X_f F_f + X_c F_c}{X_c F_c}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기서,  $\eta$ 는 연소효율이며,  $F_c$ 와  $X_c$ 는 연소로에 유입되는 석탄 가연분(휘발분, 고정탄소)의 유입량과 분율이다. 그리고  $F$ 와  $X$ 의 아래 첨자 b, f, c는 bottom, fly, cyclone ash의 미연분(휘발분, 고정탄소)의 유입량과 분율이다.

Table 2에는 본 실험에 사용된 석탄과 충 물질의 물성을 나타내었다. 석탄은 국내 무연탄으로 입도가 5 mm이하를 사용하였으며, 1 mm이하가 약 35%를 차지한다. 성분은 황 0.3%, 탄소 58.3%를 함유하고 있으며, 석탄에 함유된 석회와 황의 몰비(Ca/S)는 0.73이고, 발열량은 4,530 kcal/kg이었다. 또한 공업분석치는 고정탄소 55.3%, 휘발분 5.1%, 그리고 회분 35.0%였다. 충 물질에 사용된 모래의 밀도는 2,500 kg/m<sup>3</sup>, 입자의 크기는 300-700  $\mu\text{m}$ 였다. 유동 높이는 2 m, 압력은 6기압으로 일정하게 유지하였으며, 실험조건은 Table 3에 수록하였다. 공기의 유속은 0.9-1.3 m/s, 과잉공기율은 10-30%, 연소로 온도는 850-950 °C로 변화하였다.

가스분석을 위하여 연소가스는 연소로의 압력이 대기압으로 강하된 소음기의 후단에서 채취하였다. 채취된 가스는 필터를 통하여 분진을 제거하고, O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>(Ultramat23, SIEMENS), CO(48H, TE Instruments), SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub>(42C, TE Instruments), N<sub>2</sub>O(46H, TE Instruments)로 농도를 분석하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4-1. 연소효율

연소로내의 반응온도는 석탄의 주입과 공기의 유입등을 고려하여 층

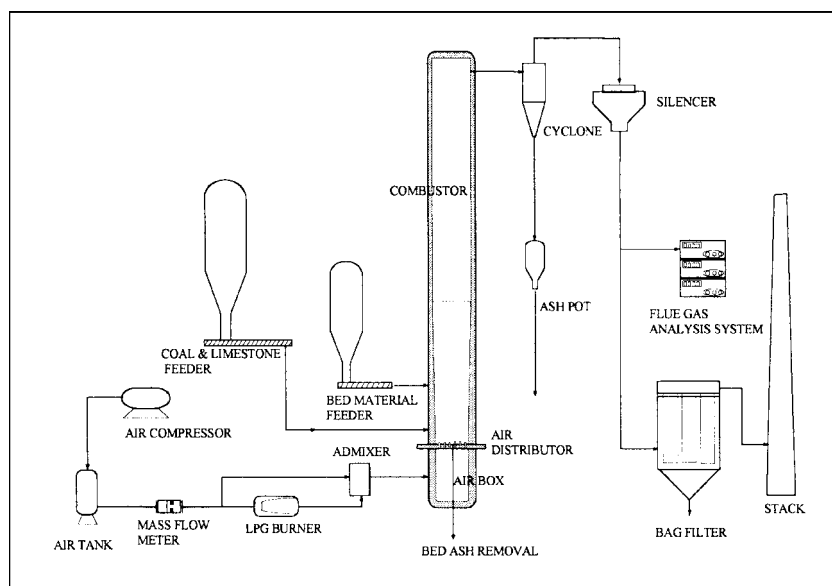


Fig. 1. The schematic diagram of PFBC(Pressurized Fluidized Bed Combustor) facility.

Table 2. Properties of coal and bed material(sand)

Coal	Proximate analysis(%)	Moisture	4.6
		Volatile mater	5.1
		Ash	35.0
		Fixed carbon	55.3
	Elemental analysis(%)	Carbon	58.3
		Hydrogen	1.6
		Nitrogen	0.5
		Sulfur	0.3
		Oxygen	6.2
	Mean particle diameter(mm)		0.3
	Calorific heating value(kcal/kg)		4,530
	*Proximate analyzer(MAC-400, LECO)		
*Elemental analyzer(CHN-1000, LECO)			
*Sulfur analyzer(SC-432DR, LECO)			
*Calorific analyzer(AC-300, LECO)			
**Dry basis			
Bed material (sand)	Density(kg/m <sup>3</sup> )	2,500	
	Particle size(μm)	300-700	

Table 3. Experimental conditions

Experimental variables	Operating conditions
Superficial gas velocity(m/s)	0.9, 1.1, 1.3
Bed temperature(°C)	850, 900, 950
Excess air ratio(%)	10, 20, 30
Operation pressure(atm)	6.0
Bed height(m)	2.0

내에서 층물질과 연료가 균일한 혼합이 이루어지는 공기분배기로부터 0.7 m의 높이를 설정하였다. 연소효율은 연소로 성능을 상대적으로 평가할 수 있는 방법 중 하나이며, 높은 연소효율은 적은 연료비 뿐만 아니라 비산화나 bottom ash의 미연탄소분을 낮춤으로써 회재의 재이용을 높일 수 있다. 대개의 경우 연소로의 층 온도가 상승함에 따라 연소효율은 상승하는 것으로 나타나는데 이것은 연소로 내부의 온도가 증가함에 따라 석탄의 연소 속도가 증가하기 때문인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 2는 연소 온도의 변화에 따른 연소효율을 나타내었다. 연소 온도의 증가에 따라 연소효율은 93-99.5%를 보였다. 유속 1.1 m/s에 대하여 연소온도 850 °C에서 과잉공기가 10%에서 30%로 증가함에 따라 96%에서 98.5%로 증가하였고, 900 °C에서는 96%에서 99.3%로 증가하였으나, 950 °C에서는 연소효율의 증가폭은 낮았다. 또 유속 0.9 m/s에서도 연소온도 850 °C에서 과잉공기의 증가에 따라 93%에서 97%로 증가하였고, 900 °C에서는 96%에서 98.7%까지 증가하였으나, 950 °C에서 연소효율의 증가는 상대적으로 낮게 나타났다. 한편 유속 1.3 m/s에서는 연소온도의 변화에 연소효율은 거의 변화하지 않았다. 층온도 850-900 °C에서는 유속을 감소하거나 과잉공기를 증가시킬 경우 연소효율은 증가하였지만, 950 °C부근에서는 과잉공기 및 유속의 변화에 대하여 연소효율은 영향을 거의 받지 않았다. 이렇게 높은 연소온도에서 영향이 낮게 나타난 것은 가압상태에서 적당량의 산화제와 고온에서 char의 충분한 반응으로 산화제를 증가시키거나, 산화제와의 접촉시간을 증가시켜도 반응에 가담하는 char의 양이 적기 때문이라고 사료된다. 본 연구에서 연소효율은 국내무연탄을 상압순환유동층에서 연소하는 경우, 과잉공기가 10%에서 30%로 증가할 때 94%에서 96.5%까지를 보인 것[20]과 비교하면, 약 3%이상의 높은 결과를 보였는데 이것은 압력이 증가함에 따라 높은 산소의 분압 때문에 반응속도가 증가하는 것이다.

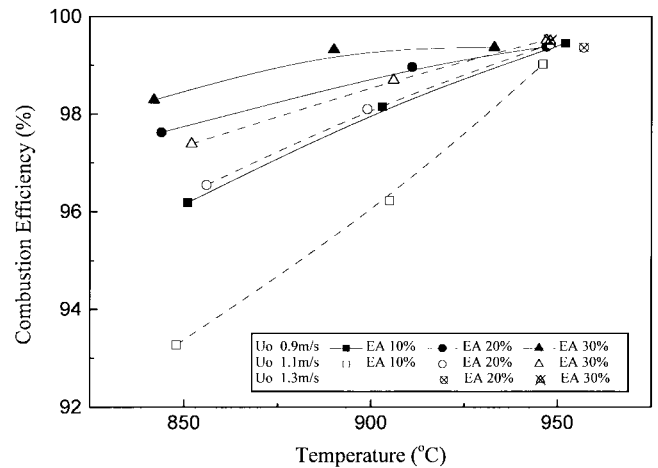
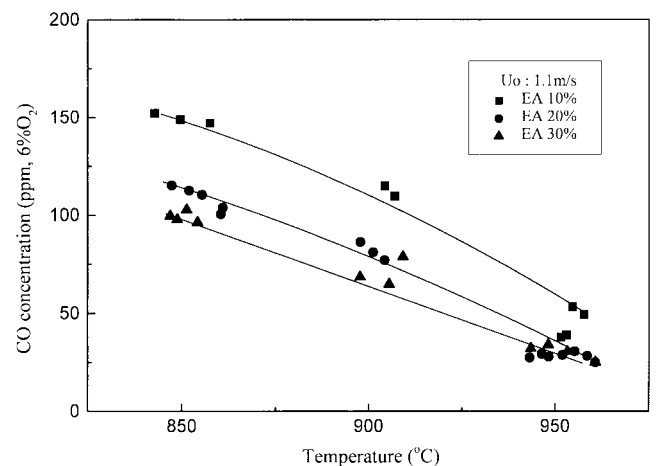


Fig. 2. The effect of the bed temperature on combustion efficiency.

#### 4-2. CO의 배출

CO는 독성가스로서 배출허용치를 현재 250 ppm이하로 규제하고 있으나, 실제로 이 값의 증가는 연소효율의 감소와 장치의 부식을 초래하기 때문에 경제성 및 보일러의 효율성 문제면에서 저감하여야 한다. CO의 농도는 온도 증가에 따라 CO<sub>2</sub>와의 평형관계에 의해 감소한다[21].

유동층 반응기의 연소온도가 배가스중 CO에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 1.1 m/s의 유속에서 연소로의 온도가 850 °C에서 950 °C로 증가함에 따라 CO의 농도는 150 ppm에서 25 ppm까지 감소하였다. 이것은 온도가 증가함에 따라 반응속도가 증가하여 결과적으로 불완전 연소에 의해 발생하는 CO의 농도가 감소하기 때문이다. 또한 유동화속도를 증가(0.9-1.3 m/s)시키면서 CO의 농도를 관찰해 보면, 같은 온도조건에서 유속이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 유속이 증가함에 따라 CO와 공기의 접촉시간이 짧아져 배출되는 CO농도가 증가하는 것이다. 본 연구에서와 유사한 국내무연탄을 연소하는 상압순환유동층에서 CO의 배출특성을 보면 950 °C에서 약 200 ppm을 보였다[20]. 그러나 본 연구의 가압유동층에서는 약 25 ppm을 보여 현저히 감소되었음을 볼 수 있다. 이것은 가압상태에서는 층물질이 유동하는 층 높이로 인하여 발생하는 압력이 비하여 전체 시스템에 걸리는 압력이 훨씬 높기 때문에 상압상태에서 보다 층높이를 높일 수 있기 때문이다. 가압유동층에서 높은 층높이는 기체가 층물질의 유동층을 지나는 층에

Fig. 3. The effect of the bed temperature on CO emission(U<sub>o</sub>=1.1 m/s).

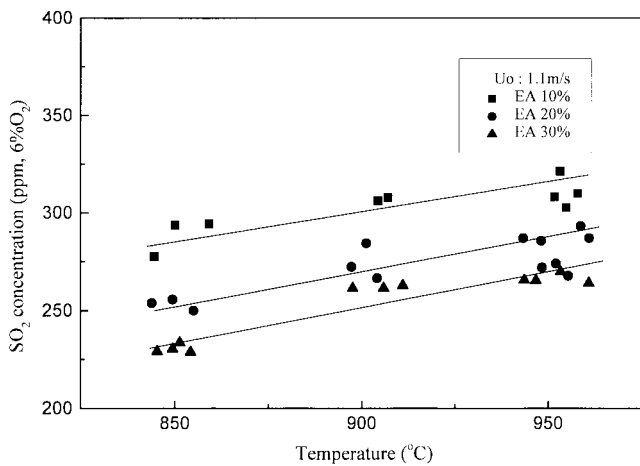


Fig. 4. The effect of the bed temperature on SO<sub>2</sub> emission (U<sub>o</sub>=1.1 m/s).

체류하는 시간이 길기 때문에 충분한 반응으로 CO의 배출을 상압유동층보다 현저히 줄일 수 있다.

#### 4-3. SO<sub>2</sub>의 배출

Fig. 4에는 흡착제를 주입하지 않은 상태의 유속이 1.1 m/s에서 과잉공기의 변화와 유동층 온도에 대한 SO<sub>2</sub>의 배출특성을 나타내었다. SO<sub>2</sub>의 배출농도는 과잉공기를 10%에서 연소로의 온도가 850 °C에서 950 °C로 증가함에 따라 270 ppm에서 320 ppm으로 증가하였으며, 과잉공기를 20%와 30%에서도 온도의 증가에 따라 10%와 마찬가지로 거의 같은 비율로 증가하였다. 반면에 같은 연소 온도에서 과잉공기의 증가에 따라 약 40 ppm정도 거의 같은 양으로 감소하였다. 연소온도의 증가에 따라 SO<sub>2</sub> 농도가 증가하는 것은 연소효율과 마찬가지로 S와 O<sub>2</sub> 반응의 증가로 볼 수 있다. 동일한 과잉공기와 층 온도에서 유동화 속도가 증가하면 SO<sub>2</sub> 농도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 석회석과 O<sub>2</sub>의 접촉시간이 짧아져 배출농도가 증가한 것으로 볼 수 있다. Fig. 5에는 과잉공기의 증가에 따라 유속이 각각 0.9 m/s, 1.1 m/s에서의 SO<sub>2</sub> 배출특성을 나타냈다. 과잉공기가 10%에서 30%로 증가함에 따라 SO<sub>2</sub>의 농도는 각 조건에 따라 다르지만 최대 220 ppm으로 감소하고 있다. 이렇게 과잉공기의 증가에 따라 배출가스의 SO<sub>2</sub>가 감소된 이유는 산소농도의 증가가 CaSO<sub>4</sub>의 반응속도식에서 알 수 있듯이 생성속도를 증가시켰기 때문이며, 석탄의 회분중에 CaO는 Ca/S 몰비 0.73정도를 함유하고 있다.

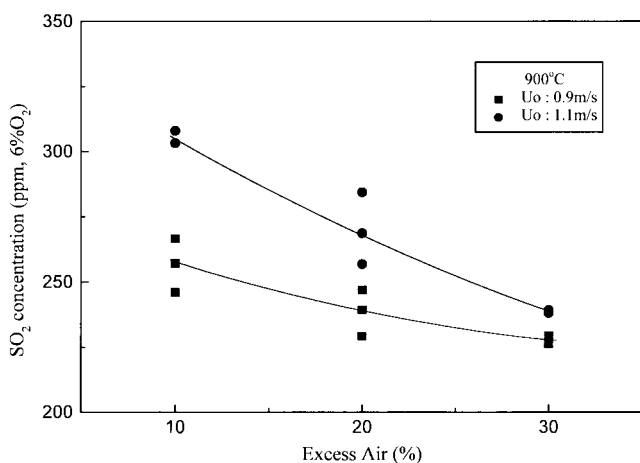


Fig. 5. The effect of the excess air ratio on SO<sub>2</sub> emission (T=900 °C).

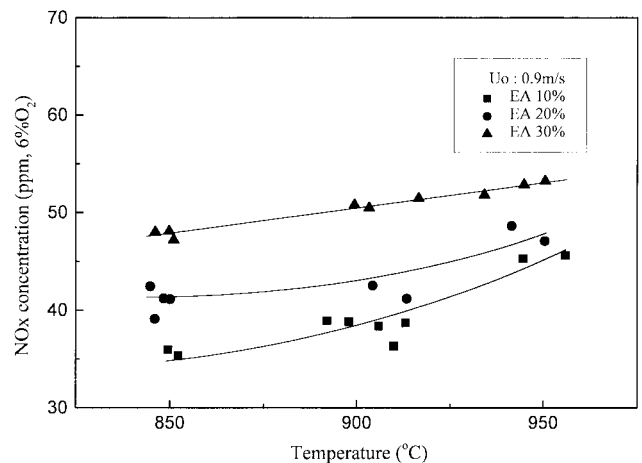


Fig. 6. The effect of the bed temperature on NO<sub>x</sub> emission (U<sub>o</sub>=0.9 m/s).

#### 4-4. NO<sub>x</sub>의 배출

NO<sub>x</sub>가 증가하면 N<sub>2</sub>O는 감소하는 것으로 서로 상대적인 관계에 있다고 보고되고 있다[22]. Fig. 7에는 유속이 0.9 m/s이고, 과잉공기에 따라 층 온도가 NO<sub>x</sub>의 농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 층 온도 변화에 따른 NO<sub>x</sub>의 농도는 약간 증가하였지만, NO<sub>x</sub>의 배출량은 유연탄 연소시 70-150 ppm보다 훨씬 적은 35-70 ppm으로 나타났다. 실제 NO<sub>x</sub>의 발생은 석탄에 함유된 volatile-N과 Fuel NO<sub>x</sub>와 관련이 있고, CO의 농도와도 관련이 있다. 국내 무연탄은 유연탄보다 Fuel NO<sub>x</sub>가 절반 정도로 적고, 매우 낮은 volatile-N을 함유하고 있어 유연탄에 비하여 낮은 NO<sub>x</sub>를 나타낸다. 그리고 CO와 반응하여 NO<sub>x</sub>를 생성하기 때문에 배출되는 CO의 농도와 반비례적인 관계에 있다. 또한 연소로내에서 가스의 체류시간, 과잉공기량 등의 실험변수에 영향을 받기도 하며, 압력에 대한 영향과 높은 층높이로 인하여 연소성이 떨어져 높은 농도의 char 및 ash의 촉매 역할에 의하여 NO<sub>x</sub>의 농도가 감소한 것으로 설명할 수 있다. NO<sub>x</sub>에 비해 N<sub>2</sub>O에 대한 관심은 매우 적으나 온실가스의 하나로 부각되면서 이의 발생과 저감 반응에 대한 많은 연구가 발표되고 있다[23]. Fig. 8에는 온도의 변화가 N<sub>2</sub>O의 배출농도에 미치는 영향을 나타내었으며, 아울러 유속과 과잉공기의 영향에 따른 변화도 나타내었다. 배출농도는 20 ppm 이하로 배출되었다. N<sub>2</sub>O는 volatile이 연소하면서 생성되기 때문에 유연탄보다 적게 배출되었다. 또한 과잉공기량의 증가에 따른 영향은 volatile과 반응할 수 있는 O<sub>2</sub>의 양이 증가하여 N<sub>2</sub>O의 농도

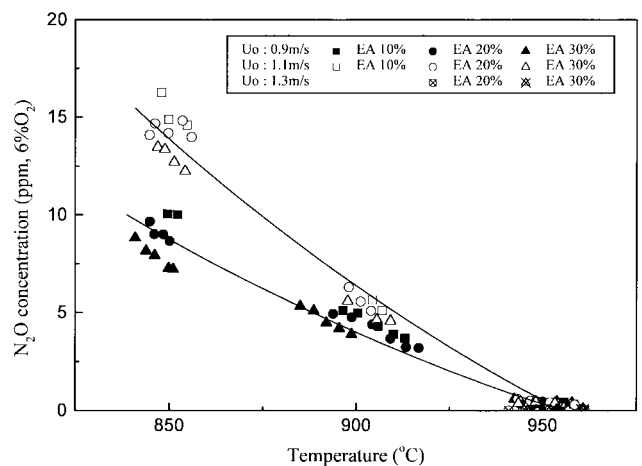


Fig. 7. The effect of the bed temperature on N<sub>2</sub>O emission.

가 증가하였다. 950 °C 부근에서는 5 ppm이하로 실험조건에 영향을 받지 않았다.

## 5. 결 론

벤치규모 가압유동층연소로에서 국내 무연탄에 대한 연소 및 배가스 특성 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연소효율은 과잉공기와 유동층온도가 증가함에 따라 증가하고, 유동화속도가 증가하면 감소하는 경향을 보였으며, 93-99.5%를 얻었다.
- (2) CO의 배출은 유동층온도가 850°C에서 950°C 증가하고, 과잉공기가 10%에서 30%로 증가함에 따라 170 ppm에서 25 ppm까지 감소하였다.
- (3) SO<sub>2</sub>의 배출농도는 무연탄에 CaO의 함량이 Ca/S몰비 0.7정도 함유되어 있어, 이론적 배출농도보다 낮게 배출되고, 실험조건에 따라 220 ppm에서 450 ppm까지 배출되어 탈황이 필요하였다.
- (4) NO<sub>x</sub>는 층온도와 유동화속도에 대한 영향은 적었지만, 과잉공기가 10%에서 30%로 증가함에 따라 33 ppm에서 55 ppm까지 증가하였다. 또한 volatile과 CO의 반응이 NO<sub>x</sub>의 생성에 영향을 주기 때문에 NO<sub>x</sub>의 농도는 배출되는 CO의 농도와 반비례 관계를 보였다.
- (5) N<sub>2</sub>O는 모든 실험조건에서 17 ppm 이하의 낮은 농도로 배출되었으며, 과잉공기 및 온도의 증가에 따라 감소하였다.

## 감 사

본 연구는 산업자원부가 지원하는 청정에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비의 지원에 감사드립니다.

## 사용기호

- F : feed rate [kg/s]  
 X : combustible fraction in ash [-]  
 η : combustion efficiency [%]

## 하첨자

- b : bottom  
 C : combustor  
 c : cyclone  
 f : fly ash

## 참고문헌

1. Choi, J.-H., Son, J. and Kim, S.-D.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 494 (1988).
2. Jin, G.-T., Han, K.-H., Shun, D., Yi, C.-K., Bae, D.-H., Jo, S.-H. and Park, J.-H.: "Development of Bench Scale Pressurized Fluidized Bed Combustion Technology," Research Report, KIER-973402, KIER, 28(1998).
3. Lee, Y.-W. and Son, J.: *Chemical Industry and Technology*, **13**, 53 (1995).
4. Han, K. H., Oh, D.-J., Ryu, J.-I. and Jin, G.-T.: *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, **24**(5), 677(2000).
5. Son, J., Park, Y.-S., Park, Y.-O., Choi, J.-H., Park, Y.-C., Yi, C.-K., Han, K.-H., Bae, D.-H. and Jo, S.-H.: "A Development of Low Calorific Value Coal Combustion Technology in a Fluidized Bed Combustor," Research Report, KE-86-21, KIER, 15(1986).
6. Ake, T. R., Dixit, V. B. and Mongeon, R. K.: *Proc. of 12th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 81(1993).
7. Shimizu, T., Fujita, D., Ishizu, K. Kobayashi, S. and Inagaki, M.: *Proc. of 12th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 611(1993).
8. Suzuki, Y. and Hatano, H.: *Proc. 17th annual Int. Pittsburgh Coal Conf.* 649(2000).
9. Horvath, A., Hulkkonen, S. and Jähkola, A.: *Proc. of 10th Int'l. Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 1083(1989).
10. Podolski, W. F. and Miller, S. A.: "Pressurized Fluidized Bed Combustion Technology," Noyes Data Co., New Jersey(1983).
11. Verwey, N., Renz, U. and Reinartz, A.: *Proc. 11th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion*, 1401(1991).
12. Wallman, P. H. and Carlsson, R. C. J.: *Proc. 11th Int. Conf. Fluidized Bed Combustion*, 1571(1991).
13. Iisa, K. and Hupa, M.: *J. Inst. Energy*, **65**, 201(1992).
14. Sarofim, A., Goel, S. K. and Morihara, A.: *International Clean Coal Technology Symp. on PFBC*, Kitakyusyu, Japan, July, 12(1994).
15. Hajaligol, M. R., Longwell, J. P. and Sarofim, A. F.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**(12), 2203(1988).
16. Yrjas, K. P., Lisa, K. and Hupa, M.: *Proc. of 12th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 265(1993).
17. Koskinen, J., Lehtonen, P. and Sellakumar, K. M.: *Proc. of 13th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 369(1995).
18. Johnsson, J. E.: *Proc. of 10th Int'l Conf. on Fluidized Bed Combustion*, 1111(1989).
19. Jensen, A., Johnson, J. E., Andries, J., Laughlin, K., Read, G., Mayer, M., Baumann, H. and Bonn, B.: *Fuel*, **74**(11), 1555(1995).
20. Shun, D., Bae, D.-H., Han, K.-H., Son, J., Kang, Y., Wee, Y.-H., Lee, J.-S. and Ji, P.-S.: *HWAHAK KONGHAK*, **34**, 321(1996).
21. Arthur, J. R.: *Trans. Faraday Soc.*, **52**, 16(1951).
22. Leckner, B.: *Prog. Energy Combust. Sci.*, **24**, 31(1998).
23. Heije, M., Maria, P. and Dan, S.: *Energy & Fuels*, **9**(1), 10(1995).