

석탄유동층 연소로에서의 Freeboard 연소특성

I. 실험적 연구

박영성 · 김영성 · 손재익 · 맹기석*

한국동력자원연구소 폐자원연구실

*충남대학교 공과대학 화학공학과

(1990년 5월 8일 접수, 1990년 9월 15일 채택)

Characteristics of the Freeboard Combustion in a Fluidized-Bed Coal Combustor

I. Experimental Investigation

Yeong-Seong Park, Young-Sung Ghim, Jae-Ek Son and Ki-Suck Maeng*

Korea Institute of Energy and Resources, P.O. Box 5, Daedeok Science Town, Daejeon, Korea

*Dept. of Chem. Eng., Chungnam National University, 220, Kung-Dong, Daejeon, Korea

(Received 8 May 1990; accepted 15 September 1990)

요 약

Bench-scale 유동층 연소로에서 국내무연탄에 대한 freeboard 연소특성을 고찰하였다. 시료로는 회분 함량 60%, 발열량 2,500 kcal/kg 정도의 저열량 무연탄이 사용되었다. Freeboard내 축방향의 온도분포, O₂ 및 CO농도분포, freeboard 탄소연소율 등을 측정하였으며, freeboard에서의 탄소연소반응이 주로 석탄시료의 입자크기, fly ash recycle ratio, bed temperature 등에 좌우됨을 알 수 있었다. Freeboard 탄소연소율은 fly ash 재순환이 없는 상태에서 2-10%이나 재순환이 있는 경우 20% 정도까지 증가하였으며 관련된 조업변수를 토대로 다음과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.

$$Y_{fc} = -22.50 + 0.04(T_b) - 3.25(U_{gb}) - 6.67(\bar{d}_p) + 11.57(R/F)$$

Abstract—Characteristics of the freeboard combustion were experimentally investigated with the low-grade Korean anthracite in a bench-scale fluidized bed combustor. Korean anthracite used in this study had a heating value of about 2500 kcal/kg and contained about 60% ash. The axial distribution of temperature, O₂ and CO concentration distribution with respect to freeboard were measured. The fraction of carbon combustion in the freeboard were also estimated. The experimental results showed that carbon combustion reaction in the freeboard mainly depended on coal particle size, bed temperature, and fly ash recycle ratio. The fraction of carbon combustion in the freeboard was found to be in the range of 2-10% without fly ash recycle, however it increased up to 20% with recycling of fly ash. The following correlation was obtained for the fraction of carbon combustion in the freeboard:

$$Y_{fc} = -22.50 + 0.04(T_b) - 3.25(U_{gb}) - 6.67(\bar{d}_p) + 11.57(R/F).$$

1. 서 론

유동층 연소로는 고체입자의 조밀한 상(dense pha-

se)으로 유지되는 유동층(bed)과 유동층 상부로부터 연소로 top에 이르는 고체입자의 희박상(dilute phase)으로 구성된 freeboard로 나뉜다. Freeboard의

주요기능은 충표면에서 기포의 eruption과 함께 비산된 입자 중에서 기체유속, 입자크기, 밀도 등을 토대로 굵은 입자를 다시 bed로 떨어뜨리는 disengagement 역할과 비산입자와 반응기체간의 빈번한 접촉에 의해 일어나는 carbon 및 휘발분연소, SO_2 absorption, NO_x reduction 등 각종 균일, 불균일 반응을 들 수 있다[1-3]. 이들 기능은 석탄유동층 연소에 있어서 석탄의 연소효율, 분진 및 배기가스 emission 등에 직접적인 영향을 주게 되며 따라서 효율적인 유동층 연소로 설계에 있어 freeboard 연소특성이해는 매우 중요한 요소가 되고 있다[4, 5].

그러나 지금까지 대부분의 연구는 freeboard 영향을 무시한 가운데 주반응영역인 유동층에 국한하여 연소특성을 해석하거나 별도로 freeboard를 분리하지 않고 연소로 전체에 대한 연소특성조사에 치우쳐 있어 사실상 freeboard 특성에 대한 연구결과는 상당히 미흡한 실정이다.

근래에 들어 Gibbs와 Beer[6], Tang 등[7], Martens 등[8]은 freeboard 연소율, gas 온도분포 등의 실험자료를 제시한 바 있고, Wells 등[9], Zhang 등[4], Tung 등[10]은 freeboard에서의 carbon연소, SO_2 흡수반응, NO_x 환원반응에 대한 모델을 제시한 바 있으나 아직은 실험자료가 빈약하고 모델의 타당성이 뚜렷이 밝혀지지 못하고 있어 이 분야에 대한 연구가 크게 요청되고 있다. 특히 국내무연탄의 경우 생성 단계에서 받은 지각변동에 의해 미분탄의 함량이 높은 것이 특징이며 이는 유동층연소에 있어서 비산량의 증대와 함께 freeboard연소반응의 촉진을 가능케함으로써 freeboard연소반응특성의 파악은 커다란 관심의 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 bench-scale 유동층 연소실험을 통해서 국내무연탄을 대상으로 하여, 입도분포, 유동층 온도, 유동화 속도, 비산회 재순환 비율 등의 조업변수에 따른 freeboard 탄소연소율, freeboard내의 O_2 , CO 등의 gas composition 분포, 온도분포 등을 구함으로써 종합적인 freeboard 연소특성을 고찰하였다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며 크게 석탄 및 공기주입부분, 연소로부분, 연소가스 배출부분으로 나뉜다. 석탄주입부분은 석탄저장조와 감속기(1/10), 2"관의 screw feeder로 구성되며 변속조절기(variable speed controller)를 사용하여 석탄의 공급량을

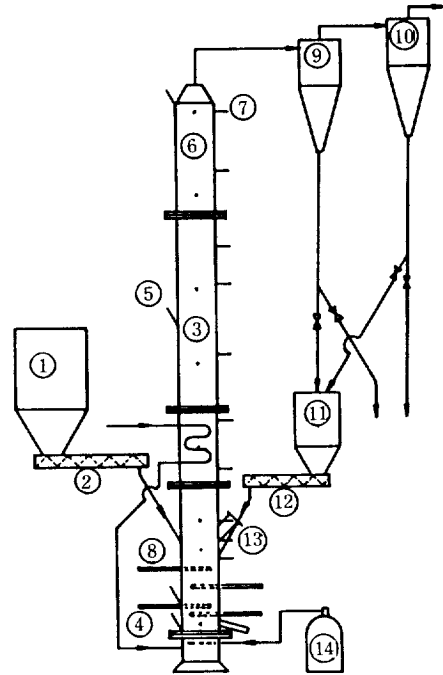


Fig. 1. Bench-scale fluidized bed coal combustor.

- | | |
|--------------------|--------------------|
| 1. Coal hopper | 2. Screw feeder |
| 3. Combustor | 4. Distributor |
| 5. Pressure tap | 6. Thermocouple |
| 7. Gas probe | 8. Cooling tube |
| 9. First cyclone | 10. Second cyclone |
| 11. Fly ash hopper | 12. Recycle screw |
| 13. Sight glass | 14. LPG bomb |

조절할 수 있도록 하였다. 공기주입부분은 rotary compressor 및 regulator, 유량계(flow meter) 등으로 구성되며 연소용 공기는 조절기가 부착된 전기 히터를 거쳐 plenum내로 유입되도록 되어 있다.

연소로부분은 스텐레스판으로서 내경 20 cm, 높이 60 cm의 bed 부분과 내경 20 cm, 높이 240 cm의 freeboard로 구성되며 연소로 외벽은 15 cm 두께로 고온용 단열재인 세라믹 화이버와 열전도도가 낮은 암면으로 이중 단열을 함으로써 연소로에서의 벽면 열손실을 최대한 줄일 수 있도록 하였다. 공기분산판은 다공판(perforated plate)을 사용하였는데 orifice size 0.2 cm, pitch 1.8 cm, opening ratio 1.2%를 차지한다. 석탄투입구는 공기분산판으로부터 약 50 cm 위에 위치하며 운전 중에는 overbed로 석탄이 투입되도록 하였다.

연소로내의 공기분산판으로부터 10 cm 간격으로 외경 1 cm인 스텐레스판으로 되어 있는 3개의 수평전열관을 설치하여 조업조건의 변화 및 유동층온도조절이

Table 1. Experimental conditions

Coal feed rate	9-16 kg/hr
Coal size	< 3 mm
Bed material size	< 3 mm
Air flow rate	40-60 m ³ /hr at 20°C, 1 atm
Excess air	0-40%
Fluidizing velocity	1.5-2.3 m/sec
Static bed height	20-26 cm
Freeboard pressure	20 mmH ₂ O
Bed temperature	850-950°C
Recycle ratio (R/F)	0-1.5

가능하도록 하였으며, 노내온도분포와 압력차 그리고 층높이를 측정하기 위한 12개의 열전대(K type)와 5 군데의 압력점(pressure tap)이 설치되어 있다. 또한 연소로내 freeboard에는 수직방향으로 8군데의 가스 sampling probe가 설치되어 있으며, 채취된 배기가스의 수분용측 및 제거를 위한 냉각조(cooling bath), 분진 제거용의 1차 및 2차 filter, 가스흡입용의 air pump (AP-115 N), 가스 header, by-pass valve, 실리카겔 건조기 등이 가스분석을 위해 부수적으로 설치되어 있다. 가스분석기로는 O₂, CO, CO₂, NO_x, SO₂의 5 가지 성분이 동시에 측정되는 multi-gas analyzer(IMR-3000 P)를 사용하였다.

이 밖에도 공기분산판으로부터 5 cm 높이에 45° 경사를 갖는 bed material 배출관을 설치하여 운전 중 층높이가 조절이 가능하도록 하였다. 연소가스 배출부문은 비산하는 고체입자(fly ash)를 포집하기 위한 1차 및 2차 사이클론과 배기가스 흡입용의 I.D.(induced draft) fan으로 구성하였다.

2-2. 실험방법

층물질(bed material)로 연소로 내부에 3 mm 이하의 석탄회(coal ash)를 약 5 kg 충전하여 static bed height가 20 cm 정도에 이르도록 하고, 전기히터로부터 100-150°C로 예열된 연소용 공기를 25-30 Nm³/hr의 속도로 plenum과 공기분산판을 거쳐 공급함으로써 유동층이 형성되도록 한다. 유동층이 형성된 후 plenum내의 별도 노즐을 통해 들어오는 13-15 liter/min의 LPG를 bed 상부에서 수동으로 착화시킴으로써 유동층을 예열시킨다. 이 때 연소로내 압력은 I.D. fan의 개폐 valve를 사용하여 조절하며 유동층내에 설치된 3개의 전열관에는 미리 실험조건에 따라 선정된 소요전열관수만큼의 물순환이 이뤄지도록 한다.

예열이 시작된 후 0.5-1시간 동안에 bed온도는 석

Table 2. Size distribution of feed coals

Sample Size (mm)	Cumulative fraction (-)		
	d _{p1}	d _{p2}	d _{p3}
2.83-2.00	0.31	0.13	0.11
2.00-1.00	0.78	0.36	0.29
1.00-0.71	0.94	0.48	0.39
0.71-0.42	0.96	0.62	0.55
0.42-0.25	0.97	0.81	0.73
0.25-0.177	0.98	0.92	0.89
< 0.177	1.00	1.00	1.00
Mean size (mm)	0.996	0.390	0.327
H.H.V. (kcal/kg)	2320	2650	2680

탄의 착화가 가능한 700°C 정도에 도달하게 되며 이때부터 hopper에 저장된 시료석탄을 screw feeder를 써서 over bed로 공급한다. 초기 석탄공급속도는 정상조건의 1/3 정도로 적용하여 서서히 증가시킨다. 석탄과 LPG가 동시에 연소되면서 bed온도는 급격히 상승하게 되며 이 때부터 LPG공급량을 서서히 줄이기 시작하여 bed 온도가 900-950°C에 이르면 LPG 공급을 완전히 중단하고 석탄공급량, 공기량 등을 조절하면서 digital thermometer(Fluke model 2190A)와 water manometer에 나타나는 연소로내 온도와 압력차에 대한 지시치에 따라 유동상태를 확인하면서 연소가 정상상태에 이르도록 한다.

연속적인 정상조업상태하에서 연소로내 축방향에 대한 온도, 압력, 가스성분 등의 측정을 실시하고 아울러 공급되는 석탄 및 공기와 배출되는 석탄회(bottom ash 혹은 fly ash)에 대한 유량측정을 행하여 이를 토대로 각 조건에서의 freeboard 연소특성을 고찰한다. Table 1은 본 실험에 적용된 각종 조업변수의 조업범위를 나타낸 것이다.

2-3. 시료특성

본 실험에서는 충남 대천지역에서 채탄되는 저열량 무연탄을 석탄시료로 사용하였다. 시료의 입경은 주어진 유동화속도 조건에서 층내 굵은 입자의 segregation을 방지하여 유동층의 형성을 원활하게 하고 freeboard 연소특성고찰에 잘 부합될 수 있도록 최대 크기를 3 mm 이하로 하였으며, 공급되는 시료의 입도변화에 따른 freeboard 연소특성을 고찰하기 위하여 원탄을 체분리하여 Table 2와 같이 세 종류의 입도분포를 갖는 시료를 마련하였다. 본 실험에 적용된 유동화속도를 종말속도(terminal velocity)로 갖는 입도범위는 0.42-0.71 mm에 해당되며 이를 기준으로 살펴볼 때 d_{p1}

Table 3. Coal properties

Proximate analysis (wt%)		Ultimate analysis (dry basis, wt%)	
Moisture	4.48	C	33.94
Volatile matter	4.64	H	0.57
Ash	58.02	O	4.06
Fixed carbon	32.86	N	0.12
		S	0.10
		Ash	61.21

으로 분류되는 시료는 미분(fine particle)이 거의 제거된 조쇄한 석탄(coarse coal)이며 d_{p3} 는 미분함량이 상당히 높은 석탄이다.

Table 3은 본 실험의 대표적인 시료에 해당하는 d_{p2} 경우에 대한 공업분석 및 원소분석치를 나타낸 것이다. 시료의 구성성분 중 수분 및 휘발분 함량은 각각 5 wt% 이내이며 유황분과 질소성분의 함량은 0.1 wt% 정도로 매우 낮은 편이다.

2-4. Freeboard 탄소연소율의 추정

본 실험에 적용된 국내무연탄은 휘발분함량이 매우 낮은 편이므로 가연성분(고정탄소 및 휘발분)에 대한 freeboard 연소반응은 탄소와 산소의 반응을 통해서 CO, CO₂ 등이 생성되는 carbon 연소반응으로 간주될 수 있다. 즉 CO, CO₂ 두 생성물 모두를 고려할 경우 탄소연소속도는 다음식으로 표시할 수 있다[6, 11].

Rate of carbon burning

$$= (\text{CO}_2 \text{ generation rate}) + (\text{CO generation rate})$$

$$= (\text{O}_2 \text{ consumption rate}) + 1/2(\text{CO generation rate})$$

$$C_{br} = (\Delta[\text{O}_2] + 1/2\Delta[\text{CO}]) / 100 \times N_g$$

여기서 C_{br} 은 freeboard에서 carbon 연소속도이며 $\Delta[\text{O}_2]$, $\Delta[\text{CO}]$ 는 freeboard 상하부 지점간의 O₂ 및 CO% 농도차, 그리고 N_g 는 배기가스의 몰유속을 나타낸다. 이 때 연소로에 주입되는 전체 탄소공급량을 C_{in} 이라고 하면 freeboard 탄소연소율은 다음식으로부터 계산된다.

$$Y_{fc} = (C_{br}/C_{in}) \times 100$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 온도분포

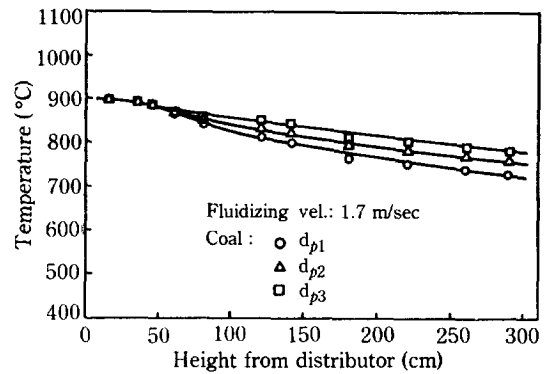


Fig. 2. Effect of feed coal size on the axial temperature profile.

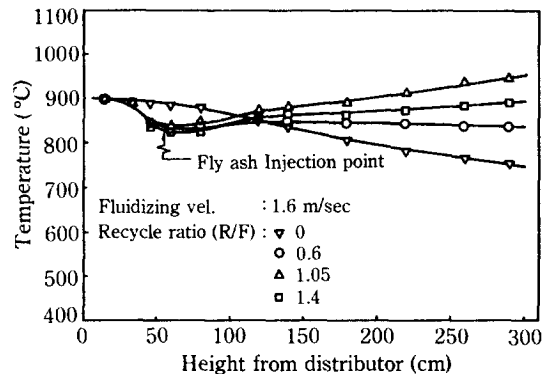


Fig. 3. Effect of recycle ratio on the axial temperature profile.

Fig. 2는 주어진 유동층온도와 유동화속도하에서 시료의 입도에 따른 축방향의 온도분포를 나타낸 것이다. Freeboard 온도분포는 시료의 입자크기에 반비례함을 보여주고 있는데, 이러한 현상은 시료의 입자가 작을수록 미분입자의 비산량이 늘어나 freeboard 탄소 체류량(carbon load)의 증가와 더불어 freeboard 탄소연소반응이 다소 촉진되기 때문이다[12].

Fig. 3은 fly ash의 재순환에 따른 축방향의 온도분포를 나타낸 것이다. Fly ash의 재순환은 공기분산판 상부 55 cm 지점의 splash 영역을 통해 이뤄지는데 주입된 fly ash 가열에 따른 현열손실로 인해 주입부근에서 두드러진 온도하강현상이 일어나며, freeboard 상부로 올라갈수록 재주입된 fly ash의 활발한 탄소연소반응으로 급격한 온도증가현상이 일어남을 보여주고 있다. 재순환이 있는 경우, freeboard top의 온도는 재순환이 없는 경우에 비해 100-200°C 상승하는 것으로 나타났다.

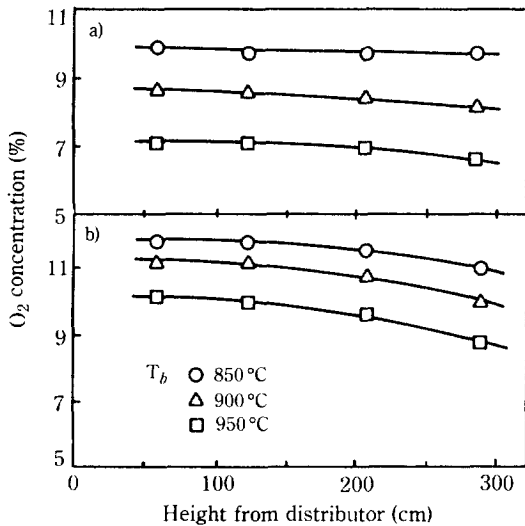


Fig. 4. Axial O_2 concentration profile in the freeboard at various bed temperatures.

Coal, a) $d_{p1}(\bar{d}_p: 0.996 \text{ mm})$, b) $d_{p3}(\bar{d}_p: 0.327 \text{ mm})$

한편 재순환비율이 1.4인 경우에는 오히려 재순환비율이 1.05인 경우에 비해 freeboard 온도가 낮은 값을 갖는 것으로 나타났는데 이러한 현상은 재순환비율이 어느정도 이상 달하면 주입된 fly ash의 가열에 따른 현열손실이 추가되는 연소열을 증가하기 때문에 일어나는 것으로 간주된다[13].

3-2. 축방향의 O_2 농도분포

Freeboard에서 일어나는 탄소연소반응의 추이를 살펴보기 위해 축방향의 O_2 농도를 측정하였다. Fig. 4는 시료의 입자크기에 따른 축방향의 O_2 농도를 나타낸 것이다. a)는 Table 2의 d_{p1} 과 같은 입도분포를 갖는 것으로 비분이 거의 제거된 시료이며, b)는 d_{p3} 에 해당되는 것으로 미분함량이 매우 높은 시료다. 두 경우를 비교해보면 a)의 경우는 freeboard 높이에 따라 O_2 농도가 거의 일정하거나 약간 감소하는 경향을 보인 반면, b)의 경우에는 freeboard 높이에 따라 뚜렷한 O_2 농도 감소현상이 나타나고 있다. 이러한 현상은 시료의 입자가 작을수록 미분입자의 비산량이 늘어나 freeboard 영역 내에서 carbon load가 증가되면서 탄소연소반응이 촉진되어 O_2 소비율이 증가되기 때문이다.

한편 시료입자가 굵을수록, 그리고 유동층온도가 높을수록 freeboard 유입지점에서의 O_2 농도는 낮은 값을 갖게 되는데 이는 시료입자가 굵고 유동층온도가 높을수록 bed 영역에서의 연소율이 증가되면서 그만큼

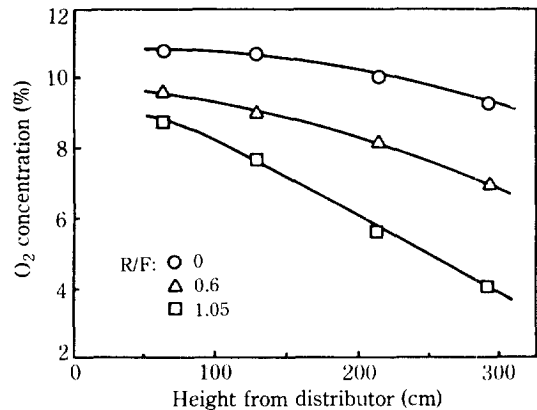


Fig. 5. Axial O_2 concentration profiles at various recycle ratios.

Coal, d_{p2} ; U_{gb} , 1.6 m/s; X_{ea} , 5%

bed에서의 O_2 소비가 늘어나기 때문이다.

또한 전체적으로 freeboard 상부영역에서 O_2 변화 폭이 크게 나타나고 있는데 이는 상온의 석탄이 유동층 표면상부로 주입된 후 일부 미분입자가 직접 freeboard로 비산될 때 다소의 가열기간을 거친 후 연소반응을 일으키기 때문에 freeboard 하부영역보다는 상부영역에서 좀 더 커다란 O_2 농도 감소현상이 일어나는 것으로 볼 수 있다. 본 실험에 있어서 freeboard를 거쳐 비산유출된 입자는 대부분 0.5 mm 이하로서 평균입경은 0.1 mm 정도에 해당되는데 이들의 freeboard 체류시간은 2-4초이며 이들이 연소가능온도인 700°C 이상까지 가열되는데는 0.1-0.5초의 시간이 소요되는 것으로 추산되었으며, 따라서 비산입자의 freeboard 연소반응은 유동층내에서 마모에 의해 비산된 일부를 제외하고는 대부분 freeboard의 어느 높이 이상부터 실제적인 연소반응이 일어날 것으로 예측된다[11].

Fig. 5는 fly ash 재순환비율에 따른 축방향의 O_2 농도분포를 나타낸 것으로 재순환 비율이 증가될수록 O_2 농도는 급격한 감소현상을 보여주고 있다. 이는 재순환비율이 증가될수록 freeboard에 체류하는 탄소량이 크게 늘어나 좀더 활발한 탄소연소반응이 야기되기 때문이다[14].

3-3. 축방향의 CO 농도분포

Fig. 6은 시료입자크기에 따른 축방향의 CO 농도분포를 나타낸 것이다. a)는 시료탄이 비교적 조쇄한 경우이며, b)는 미분탄의 함량이 매우 높은 경우이다. 두 경우에 있어서 CO 농도는 freeboard 높이에 따라 점차 증가함을 보이고 있으며 특히 시료입자가 작을수록

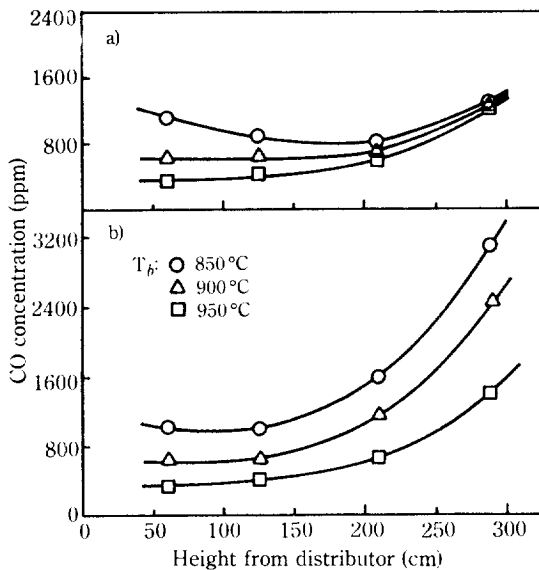


Fig. 6. Axial CO concentration profiles in the freeboard at various bed temperatures.
Coal, a) d_{p1} ($d_p: 0.996$ mm), b) d_{p3} ($d_p: 0.327$ mm)

훨씬 높은 증가율을 보이고 있다[4]. 이와 같은 현상은 주어진 freeboard 온도조건에서 탄소연소가 불완전 연소반응으로 진행되고 있음을 말해주는 것이다. 물론 CO 농도는 탄소의 연소에 따른 CO의 생성속도와 생성된 CO의 재연소반응속도의 상대적인 크기로 결정되지만, Fig. 2에 표시된 바와 같이 $700\text{--}800^\circ\text{C}$ 에 해당된 충분히 높지 않은 freeboard 온도조건하에서는 CO의 생성속도가 CO의 재연소반응속도에 비해 큰 편이므로 결국 CO의 농도가 freeboard의 높이에 따라 점차 증가하게 되며, 이는 시료의 입자크기가 작을수록, 즉 freeboard영역의 carbon load가 클수록 뚜렷해지는 것으로 볼 수 있다[15,16].

Fig. 7은 fly ash 재순환비율에 따른 축방향의 CO 농도분포를 나타낸 것이다. 재순환이 있는 경우, CO 농도는 오히려 하부에서 높은 값을 갖다가 freeboard 상부로 올라갈수록 급격히 감소하는 전혀 상반된 양상을 보여주고 있다. 이는 Fig. 3에서 보듯이 freeboard 하부에서는 재주입되는 fly ash에 의한 현열손실로 인해 freeboard 하부온도가 낮아져 CO 발생율이 높으나, 상부로 올라갈수록 탄소연소반응의 촉진과 더불어 freeboard온도가 크게 상승됨에 따라 CO재연소반응이 급격히 빨라지기 때문에 CO농도는 점차 줄어드는 경향을 갖는 것으로 볼 수 있다.

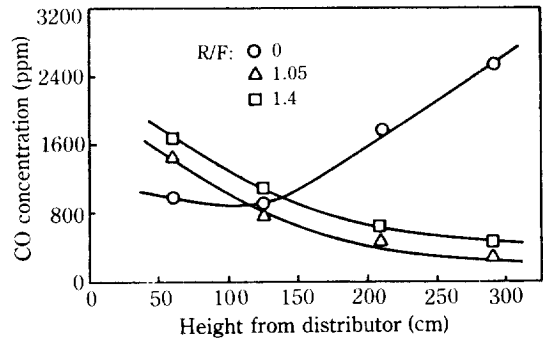


Fig. 7. Axial CO concentration profiles at various recycle ratios.
Coal, d_{p2} ; U_{gb} , 1.6 m/s; X_{ca} , 5%

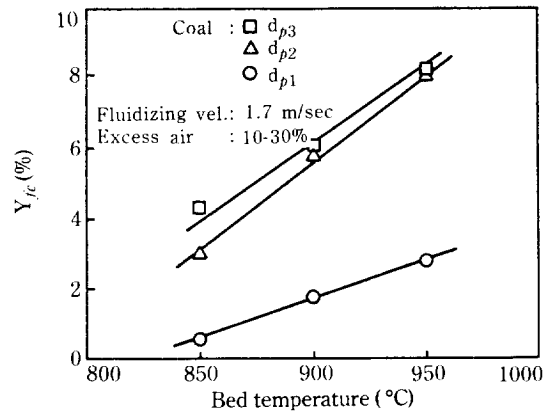


Fig. 8. Effect of bed temperature on the fraction of carbon combustion in the freeboard with employing various sizes of the feed coal.

3-4. Freeboard 탄소연소율

Fig. 8은 주어진 유동화속도와 과잉공기조건하에서 시료의 입자크기와 유동층온도에 따른 freeboard 탄소연소율을 나타낸 것이다. 시료의 입자크기가 작을수록, 그리고 유동층의 온도가 높을수록 freeboard 탄소연소율의 두드러진 증가현상을 보이고 있다. 이는 앞에서 기술한 바와 같이 시료의 입자가 작을수록 미분석탄의 비산량이 증가되어 freeboard에서의 탄소연소반응이 촉진되며, 유동층 온도가 증가될수록, freeboard 온도 증가와 더불어 freeboard내 탄소연소반응속도가 빨라지기 때문이다. 이처럼 시료의 미분함량 증가에 따른 freeboard 탄소연소율증가는 Tang 등[5]과 Hiram 등[12]의 연구결과를 통해서도 밝혀진 바 있다.

Fig. 9는 주어진 유동화속도, 유동층온도에서 fly

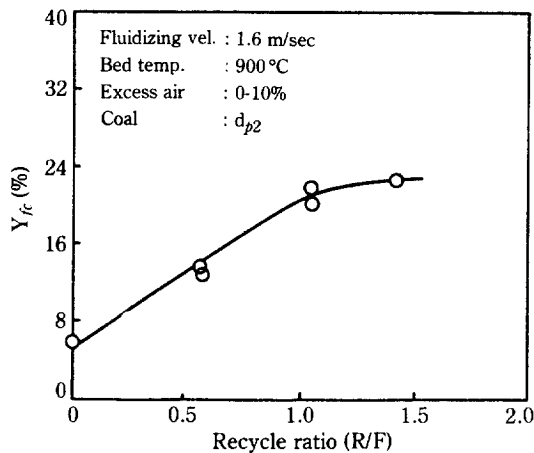


Fig. 9. Effect of recycle ratio on the fraction of carbon combustion in the freeboard.

ash의 재순환비율에 따른 freeboard 탄소연소율을 나타낸 것이다. 재순환이 없는 경우 freeboard 탄소연소율은 약 7%에 달하나 재순환비율이 증가됨에 따라 급격히 증가하기 시작하여 재순환비율이 1정도에서는 20%를 상회하는 커다란 증가를 보이고 있다. 이처럼 fly ash의 재순환이 다른 조업조건의 변화에 견줄 수 없을만큼 커다란 비율로 freeboard 탄소연소율 상승효과를 가져오는 것은 fly ash의 반복적인 연소로내 재투입이 freeboard내 carbon load를 크게 증가시키기 때문이다. 이와 같은 결과는 유연탄이나 갈탄 등의 다른 탄종에 비해서는 다소 큰 값에 해당되는 것으로 나타났는데, 이는 국내무연탄의 경우 reactivity가 낮아 미반응상태의 탄소 비산유출량(미연탄소 유출량)이 높아지며, 이들이 재순환될 경우 freeboard carbon load의 증가와 함께 더 높은 freeboard 탄소연소율을 나타내는 것으로 판단된다. 이처럼 reactivity가 작은 석탄의 freeboard 탄소연소율이 향상되는 것은 Meulink 등 [13]에 의해서도 제시된 바 있다. 이 밖에도 freeboard 탄소연소율에 대한 유동화속도의 영향은 비교적 작은 편이었으며 일정유속범위에서 유동화속도가 증가할수록 다소 감소하는 것으로 나타났다.

이들 실험결과를 토대로 다중선형회귀법(multiple linear regression)을 사용하여 freeboard 탄소연소율을 조업변수들에 대한 1차 다항식의 상관관계로 나타내면 다음과 같다.

$$Y_{fc} = -22.50 + 0.04(T_b) - 3.25(U_{gb}) - 6.67(\bar{d}_p) + 11.57(R/F)$$

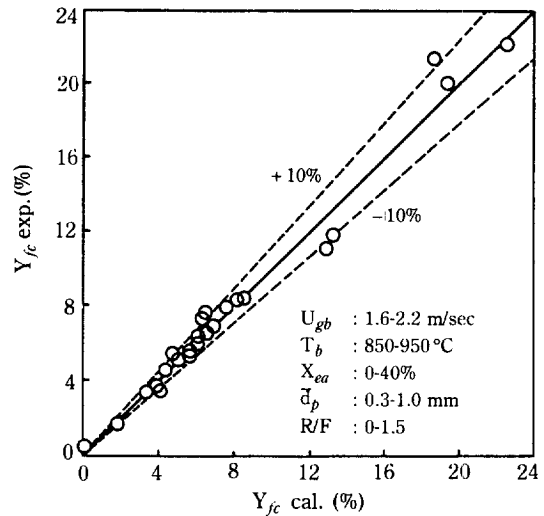


Fig. 10. Comparison between the calculated and measured Y_{fc} .

$$850 \leq T_b \leq 950^\circ\text{C}, 1.6 \leq U_{gb} \leq 2.2 \text{ m/sec}, 0.3 \leq \bar{d}_p \leq 1 \text{ mm}, 0 \leq R/F \leq 1.5$$

이 때 상관관계식의 상관계수(r^2)는 0.97이며 Fig. 10에 표시된 바와 같이 실측치와 예측치는 $\pm 10\%$ 이내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

Bench-scale 유동층연소로에서 국내 저열량 무연탄에 대한 freeboard 연소특성 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Freeboard내 축방향의 O_2 농도는 지속적인 탄소 연소반응으로 0.5-4%의 감소현상을 보였으며, 연소반응은 주로 freeboard내 carbon load와 반응속도를 좌우하는 시료의 입자크기, fly ash 재순환비율, 유동층 온도 등에 커다란 영향을 받는 것으로 밝혀졌다.

2. Freeboard내 축방향의 CO농도는 CO생성속도와 재연소반응속도의 상대적인 크기로 결정되며, 시료 중의 미분함량이 높거나 freeboard영역의 온도가 낮을수록 증가하나 fly ash의 재순환이 있는 경우, 온도증가에 따른 CO 재연소반응의 촉진으로 급격한 감소현상을 보였다.

3. Freeboard 온도는 시료의 입자크기가 작을수록 높아지며 fly ash를 재순환시킬 경우 freeboard내 carbon load 증가에 따른 연소반응촉진으로 현저한 온도 증가현상을 보였다.

4. Freeboard 탄소연소율은 시료의 입자가 작을수록, 유동층온도가 높을수록, fly ash 재순환비율이 높을수록 증가하며 fly ash 재순환이 있는 경우에는 20%까지 증가함을 보임으로써 fly ash 재순환의 영향이 지대함을 알 수 있었다. 또한 주어진 조건에서 관련된 조업변수를 토대로 freeboard 탄소연소율에 대한 상관관계식을 얻을 수 있었다.

NOMENCLATURE

C_{br} : carbon burning rate in the freeboard [kgmol/sec]
 $\Delta[CO]$: difference in CO concentration between two levels in the freeboard [%]
 C_{tr} : total carbon feed rate [kgmol/sec]
 \bar{d}_p : mean particle diameter of feed coal [mm]
 d_{p1}, d_{p2}, d_{p3} : classification of feed coal based on the size distribution provided in Table 1
 N_{fg} : molar flow rate of flue gas [kgmol/sec]
 $\Delta[O_2]$: difference in O_2 concentration between two levels in the freeboard [%]
 R/F : recycle ratio based on the coal feed rate [-]
 T_b : bed temperature [$^{\circ}C$]
 U_{gb} : fluidizing velocity [m/sec]
 X_{ea} : excess air ratio [%]
 Y_{fc} : fraction of carbon combustion in the freeboard [%]

REFERENCES

1. Chen, L.H. and Wen, C.Y.: *AIChE J.*, **28**(6), 1019 (1982).
2. Chen, G.T., Shang, J.Y. and Wen, C.Y.: Proc. of the 1st China-Japan Symposium of Fluidization, 1 (1985).
3. Walse, P.M., Chung, T.Z., Dutta, A., Beer, B.M. and Sarofim, A.F.: *Paper Am. Chem. Soc. Div. Fuel*, **27**(1), 243 (1982).
4. Zhang, X.H., Cao, Y.A., Ren, Y.Z., Chen, J. and Hong, Y.H.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, Vol. 1, 75 (1985).
5. Krishnan, R.P., Bhaskaran, C., Chandrasekaran, S. and Vasudevamurthy, A.V.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, Vol. III, 1377 (1985).
6. Gibbs, B.M. and Beer, J.M.: *I. Chem. E. Symp. Ser.*, 43 (1975).
7. Tang, J.T., Duqum, J.N., Modrak, T.M. and Aulisio, C.J.: Proc. of the 7th Int. Conf. on FBC, Vol. 1, 373 (1982).
8. Martens, F.J.A., Op den Brouw, H. and Van Koppen, C.W.J.: Proc. of the 7th Int. Conf. on FBC, Vol. 2, 1054 (1982).
9. Wells, J.W., Byrd, J.R. and Krishnan, R.P.: Proc. of the 7th Int. Conf. on FBC, Vol. 1, 284 (1982).
10. Tung, S.E., Chung, T.Z., Sharma, P.K., Hodges, J. and Louis, J.F.: Proc. of the 6th Int. Conf. on FBC, Vol. III, 1131 (1980).
11. Brimhall, W.L., Fields, D.E. and Rickman, W.S.: EPRI final report, RP-1179-6 (1981).
12. Hiram, J., Hosoda, H., Nishizaki, H., Chiba, T. and Kobayashi, H.: *Int. Chem. Eng.*, **24**(3), 502 (1984).
13. Son, J.E., Choi, J.H., Park, Y.S. and Park, Y.O.: Proc. of 2nd Korea-U.S.A. Joint Workshop on Coal Utilization Technology, 235 (1985).
14. Meulink, J.P., Haasteren, A.W.M.B.V. and Temmink, H.M.G.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, Vol. 1, 179 (1985).
15. Sarofim, A.F. and Beer, J.M.: Proc. of DOE/WVU Conf. on FBC System Design and Operation, 136 (1980).
16. Kim, J.R. and Lee, K.H.: Proc. of the Asian Conf. on Fluidized-Bed & Three-Phase Reactors, 209 (1988).