

## 석탄유동층 연소로의 열전달 특성

최종찬 · 김영재 · 문상흡\* · 김상돈

한국과학기술원 화학공학과  
(1985년 1월 26일 접수, 1985년 3월 12일 채택)

## Heat Transfer Characteristics of a Fluidized Bed Coal Combustor

J. C. Choi, Y. J. Kim, S. H. Moon\* and S. D. Kim

*Department of Chemical Engineering Korea Advanced Institute of Science  
and Technology Seoul, 131 Korea*

(Received 26 January 1985 ; accepted 12 March 1985)

### 요 약

시험공장 (pilot plant) 규모인 25.4cm 직경 5.85m 높이의 유동층 연소로에서 국내 저질 무연탄 (3400Kcal/kg) 으로 대기압하에서 연소 실험을 수행하였다. 석탄 입자의 평균크기를 0.49와 0.62mm 로 변화시키고 연소온도를 750~950°C 범위에서 변화시켰고, 공기유속을 23~76cm/s 범위에서 변화시켜 가면서 유동층내와 freeboard에 설치된 열전달관 사이의 열전달계수, 축방향 온도분포 및 석탄연소 효율에 미치는 영향을 규명하였다.

실험 결과 열전달 계수는 공기유속에 따라 증가하여서 최대치를 보이고 감소하며 유동층온도가 증가함에 따라 증가하는 반면 입자크기가 증가하면 감소하였다. 유동층내의 축방향 온도 분포는 공기유속이 증가할수록 균일하여지며 연소효율은 공기유속이 증가하면 감소하는 반면 유동층 온도가 증가함에 따라 증가하였다.

**Abstract** — In a cylindrical fluidized bed combustor-pilot plant (25.4 cm-diameter  $\times$  5.85 m-height), combustion experiments were carried out with the domestic high ash content anthracite (3400 Kcal/Kg) coal.

The effects of coal mean size (0.49, 0.62 mm), air velocity (23-76 cm/s) and bed temperature (750-950°C) on heat transfer coefficients between either fluidized bed, free-board and vertically immersed cooling tubes, temperature profiles along the bed height and combustion efficiency have been determined. The heat transfer coefficient exhibited a maximum value with air velocity. However, it increased with bed temperature and decreased with particle size.

The temperature profiles along the bed height became flattened with increase of air velocity. Whereas, combustion efficiency decreased with air velocity but it increased with bed temperature.

### 서 론

국내의 석탄 생산은 해마다 전체 탄질이 50~100 Kcal/kg씩 저열량화 되고 있으며 또한 외국 석탄

\* 반응공학연구실

에 비하여 회분이 많고 연소성이 좋지 않아서 이러한 저질탄을 활용할 수 있는 기술개발이 절실히 요구되고 있다. 그 활용방안의 대표적인 경우가 유동층을 이용한 석탄연소라고 할 수 있겠다[1-4]. 유

유동층을 이용한 석탄연소는 석회석을 첨가하여 유황분을 제거할 수 있는 점과 비교적 낮은 온도에서 조업이 가능하여  $\text{NO}_x$ 의 배출량이 적다는 점, 단위 체적당 발열량이 크다는 점등의 여러가지 장점 때문에 최근에 유동층을 이용한 석탄 연소로의 개발이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 유동층의 효율적인 설계를 위해서는 석탄입자의 크기, 유동화속도, 석탄주입량 등이 열전달계수, 축방향 온도분포 및 연소효율에 미치는 영향을 규명하여야 한다.

그러므로 본 실험 연구에서는 발열량 3400Kcal/kg인 국내 저질탄의 입자크기를 0.49 및 0.62mm로 바꾸어 연소시켜서 연소온도를 750~950℃ 범위로 변화시켰고 이때의 공기유속을 23~76cm/s 범위에서 변화시켜서 이의 실험 변수들이 열전달 계수, 축방향 온도분포 및 석탄연소 효율에 미치는 영향을 규명하였다.

## 실험 장치

본 유동층 연소로는 4 가지 부분으로 구성 되어져 있다. 1) 유동층 연소로, 2) 석탄 장입장치, 3) 연도가스 배출 부분, 4) 연소열 회수 부분으로 대별할 수 있다.

### 1) 유동층 연소로

전체적인 실험 장치도를 Fig. 1에 도시하였다. 연소로는 내경 25.4cm이며 안쪽에 내화벽돌 114mm와 보온단열 벽돌 65mm, 실리카 보드 50mm로 구성되어 있으며 외피는 연강을 사용하였고, 전체 높이는 3.5m로 7개의 부분을 후렌지로 연결하였다. 최상단은 cyclone의 부하를 감소시키기 위하여 확장된 내경을 사용하였다. 최하단의 air box는 높이가 1.8m로서 경유 버너, LPG 버너, 맨홀과 공기 주입관이 설치되어 있다. 연소로는 skirt로서 지지하였고 연소로에는 공기분배기(air distributor), 일류관(overflow pipe), 열전대(thermocouple), 압력꼭지(pressure tap) 및 시동 버너가 설치 되어 있다.

본 장치의 공기 분배기는 perforated plate를 사용하였으며 135개의 3.1mm hole로 구성되어 있다. 재질은 stainless steel 304로서 판의 두께는 16mm를 사용하였다. 일류관은 석탄재를 제거하기 위하

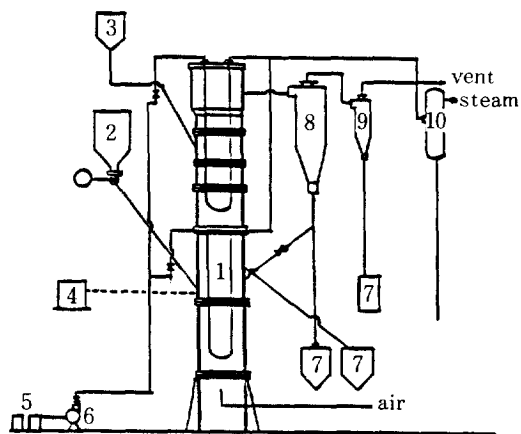


Fig. 1. FBC Pilot Plant.

- |                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| 1. Main bed            | 2. Coal hopper      |
| 3. Bed material hopper | 4. Controller       |
| 5. Water tank          | 6. Pump             |
| 7. Ash receiver        | 8. 1st cyclone      |
| 9. 2nd cyclone         | 10. Steam separator |

여 분배기로 부터 25, 55, 80cm위에 2.54cm관을 설치하였다.

연소로 조업시의 온도 측정과 제어를 위하여 분배기로 부터 20, 45, 70, 95cm 간격으로 4개의 열전대(chromel-alumel)를 설치하였고 1개는 주입공기의 온도를 측정하기 위하여 air box내에 설치하였다. 또한 freeboard의 온도를 측정하기 위하여 4개의 열전대를 설치하였다. 이중 분배기로 부터 5번째 열전대는 온도지시 제어기에 연결되어서 버너를 제어하게 된다. 연소로내의 정압력을 측정하기 위해 열전대 설치높이와 같은 곳에 압력 꼭지를 설치하여서 manometer에 연결하였다. 연소로의 시동 때 회분층을 예열하기 위하여 경유 버너를 설치하였다. 이 버너를 이용하여 연소로의 온도를 700℃까지 올려서 석탄을 착화시킨다.

### 2) 석탄 장입 system

연료로써의 석탄은 회전 공급기(rotary feeder)를 이용하여 석탄을 계량한 후 공기압 수송(pneumatic transport)시켜서 주입하였다. 장입관과 연소로 노벽간의 각도는 60°이며 장입관 중간 부분에 아크릴관을 설치하여서 석탄의 주입을 관찰하였다. 장입관은 분배기로 부터 43.5cm지점에 설치하였다. 또한 회전 공급기 상부에 설치된 hopper의 용량은

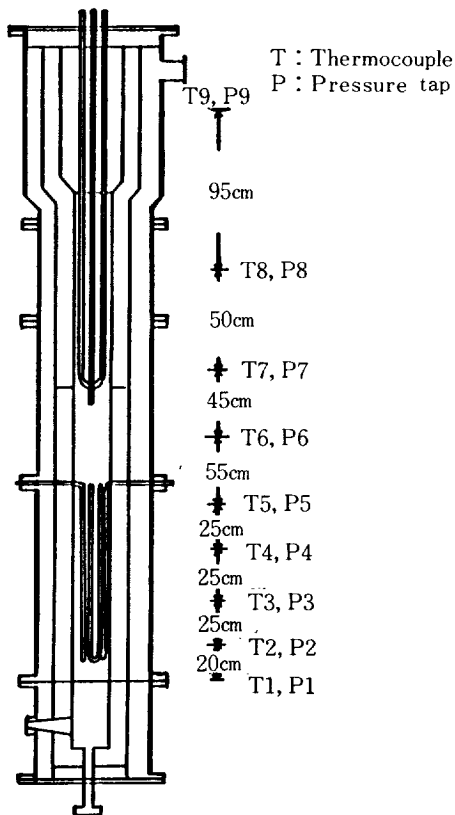


Fig. 2. Fluidized bed combustor.

250kg이며 장입관에도 공기주입을 시켜서 석탄을 주입하였다.

### 3) 연도가스 배출 system

비말동반에 의한 미분탄은 cyclone을 통과하면서 대부분의 비산 회(fly ash)는 집진된다. 본 장치에서는 두단계 cyclone을 설치하였으며, 첫번째와 두번째 cyclone의 직경은 각각 52cm와 26cm로 연강으로 제작되었다.

### 4) 연소열 회수 system

일반적으로 수직관이 수평관에 비하여서 열전달 효과가 크므로 [1] 본 장치에서는 유동층내와 free-board내에 각각 6개의 hairpin모양의 열전달관을 설치하여서 (Fig. 2) 냉각수를 각관에 pump로 공급하였다. 이 냉각관은 1.27cm 내경의 stainless steel 304를 사용하였고 유동층내의 냉각관의 총 길이는 13.2m이고 free-board내의 총길이는 23m이다. 각관

Table 1. Summary of Experimental conditions and specifications of the column.

Material	Coal
Calorific Value:	3,400Kcal/kg
Ash: 46%, Moisture:	3.1%,
Fixed Carbon: 45.2%	
Volatile matter: 5.7%	
Diameter of the column	25.4cm
Height of the Column	5.85m
Static Bed Height	40cm
Temperature of the bed	750~950℃
Superficial Air Velocity	23~76cm/sec
Temperature and Pressure	
tap Height	20, 45, 70, 95, 150, 195, 244, 340cm
Distributor	
Material	Stainless Steel 304
Type	Perforated Plate
Opening Area	2.0%
Thickness	1.6cm
Hole Size	3.1mm

에 공급되는 물의 유량은 rotameter로 측정하였다. 유동층연소시의 열회수는 가열된 물이 배출되는 지점과 초기 냉각수의 온도를 열전달을 설치하여서 결정하였다.

본 장치의 규격을 Table 1에 제시하였다.

## 실험방법

본 실험에 사용한 석탄은 국내 저질탄 활용의 일환으로 3400Kcal/kg의 열량을 가진 국내 무연탄으로 그 공업분석치를 Table 1에 보여 주고 있으며 석탄입자의 분포도는 log-normal분포에 따르므로 logarithmic probability도표에 도시 (Fig. 3) 하여서 평균 입자경을 구하였다.

유동층내에 열매체로 석탄 회분을 40cm높이 만큼 채운후 LPG와 기름 burner를 점화시켜서 유동층 온도를 700~750℃로 예열한 후 회전공급기를 이용하여 석탄을 주입하면서 burner를 끄고 원하는 공기량을 주입하면서 일정온도를 냉각관에 물을 주

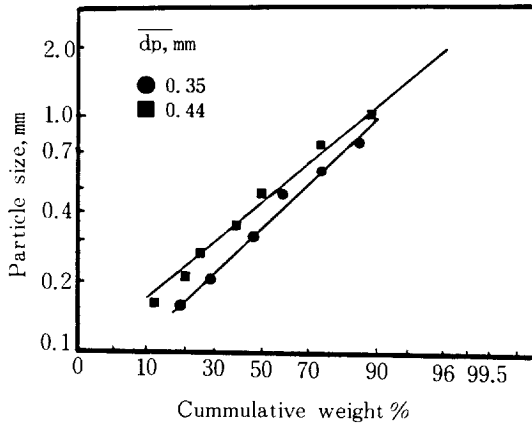


Fig. 3. Particle size distribution of feeding coal.

입하여 유지시킨다. 원하는 일정온도에서의 석탄 공급량, 유동화속도, 압력강하, 유동층의 축방향온도, 냉각관에 주입되는 물의 입구와 출구의 온도 및 유량을 측정하고 주기적으로 연소된 석탄의 회분을 채취하여서 연소효율을 측정한다. 상기한 방법을 석탄 입자크기를 바꾸어서 실험하여 입자크기의 영향을 실험하였다.

## 실험결과 및 고찰

### 가. 최소 유동화속도

상온에서의 최소유동화 속도를 공기의 유속변화에 따른 압력강하를 측정하여 결정한 결과 석탄의 평균입자 크기가 0.62 및 0.49mm일 때 각각 55 cm/s와 42cm/s로 결정되었다. 고온(900℃)에서의 최소 유동화속도는 같은 방법으로 측정하여서 상온상압 조건으로 환산한 결과 입자경이 0.62와 0.49 mm일 때 각각 10.5와 6.6cm/s로 결정되었다.

### 나. 열전달 계수

본 실험에서의 열전달 계수란 유동층과 열전달관 사이의 열전달 계수이며 아래 식으로 부터 계산하였다.

$$h = \frac{1}{\frac{1}{U} - \frac{x_m D_o}{k_m D_i} - \frac{D_o}{h_i D_i}} \quad (1)$$

일반적으로 유동층의 열전달 계수는 유속변화에 따라 증가하면서 최고점을 나타내고 더 유속이 증

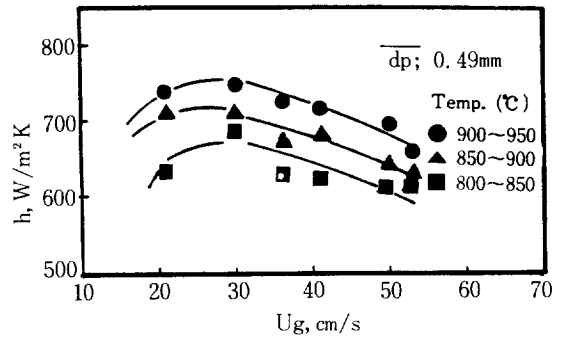


Fig. 4. Effect of air velocity on heat transfer coefficient.

가하면 열전달계수는 감소한다. 이것은 고체입자와 열전달관과의 접촉빈도가 어떤 최적 고체의 농도하에서 최대가 되는 조건하에서 일어나는 현상으로 설명할 수 있다. 즉 초기 유동화속도에서 부터 유속을 증가시켜가면 고체입자들의 혼합이 격렬하여져서 열전달 저항이 감소하며 아울러 열전달관과의 접촉빈도가 증가한다. 그러나 최적유속 조건보다 더 유속을 증가시키면 고체입자의 밀도가 감소하면서 열전달 계수는 감소한다. 본 실험 조건에서도 Fig.4 및 5에서 보듯이 주어진 입자층에서 층온도에 따라 유속변화에 따른 최대 열전달 계수를 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 여기서 보듯이 열전달 계수는 온도가 증가하면 증가하였고 입자의 평균입자경이 감소하면 증가하였다[2-4]. 즉 입자경이 증가하면 열전달관과의 접촉면적이 주어진 접촉빈도하에서 감소하여 열전달이 감소한다고 할 수 있겠다. 그러나 일반적으로 입자경이 1.6mm 이상이 되면 입자경

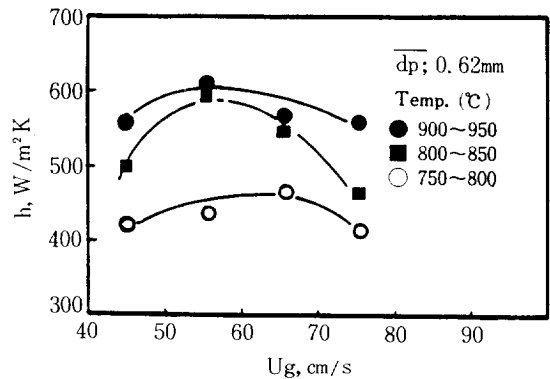


Fig. 5. Effect of air velocity on heat transfer coefficient.

의 증가에 따른 열전달 계수의 감소는 일정하여지다가 다시 증가하는 경향을 보이며 이는 열전달의 대류성분(convective component)이 증가하여서 증가하는 것으로 알려져 있다[5].

본 실험의 열전달 계수 결과와 영국의 National Coal Board [2]의 유동층 연소로(30cm×30cm-square)에서 기체유속 변화시의 최대 열전달 계수치를 Fig. 6에 비교 도시하였다. 여기서 보듯이 주어진 기체유속하에서의 열전달 계수값은 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

이제까지 유동층내의 열전달계수는 Nusselt number(Nu)로 표시하여서 Reynolds number(Re)의 함수관계로 많은 연구 결과를 발표하였다[6]. 그러나 열전달 계수는 기체유속에 따라 증가하다가 최고점을 보이고 감소하므로 본실험 결과를 열전달 계수가 유속에 따라 증가하는 영역과 감소하는 영역으로 나누어서 Nusselt과 Reynolds수의 함수관계로 표시한 결과는 다음과 같다.

증가 영역일때 :

$$Nu = 3.13 Re^{0.35} \quad (2)$$

감소 영역일때 :

$$Nu = 4.60 Re^{-0.17} \quad (3)$$

문헌상의 결과는 증가영역에서는 Wender와 Cooper[4]의 결과는 Re수의 0.23승, Sarkits[7]의 결과는 0.4승으로 발표되었고 감소영역의 경우는 S-

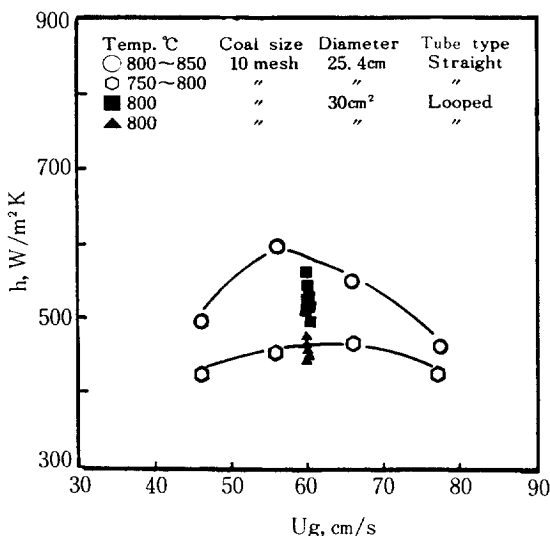


Fig. 6. Effect of air velocity on heat transfer coefficient in two different bed geometry.

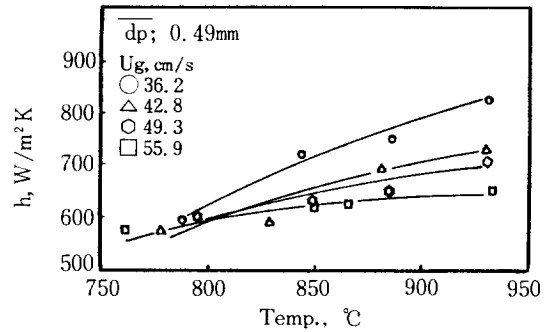


Fig. 7. Effect of bed temperature on heat transfer coefficient.

arkits[7]의 결과가 -0.14로 발표되어서 본 실험 결과치와 유사함을 알 수 있다.

#### 다. 유동층 온도가 열전달에 미치는 영향

온도에 따른 열전달 계수의 증가는 온도가 아주 높지않은 영역에서는 거의 직선적으로 변화한다[8]. 유동층내의 온도가 800~900°C 범위에서는 열의 복사사에 의한 전달은 대략 10%미만으로[10] 무시할만하므로 온도의 증가에 따라 기체의 열전도도가 증가하게 되므로 열전달 계수는 기체의 열전도도, Kf에 거의 0.5승에 비례한다[9].

본 실험 결과도 Fig. 7과 8에서 보듯이 연소온도가 증가함에 따라 열전달 계수는 증가하였다. 그림에서 보듯이 그 증가율은 입자경이 작을 때가 클 때보다 크며 이는 앞에서 설명한 입자경의 영향과 작은입자 경우가 큰 입자때 보다 연소반응이 더 잘 일어날 수 있기 때문으로 생각된다.

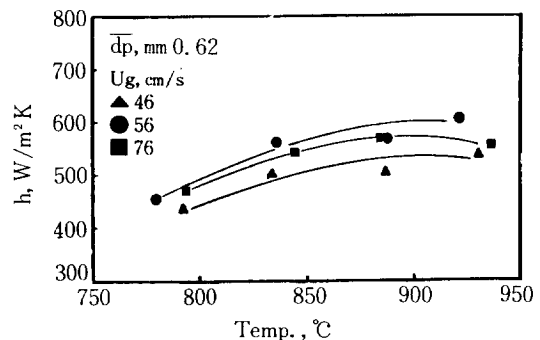


Fig. 8. Effect of bed temperature on heat transfer coefficient.

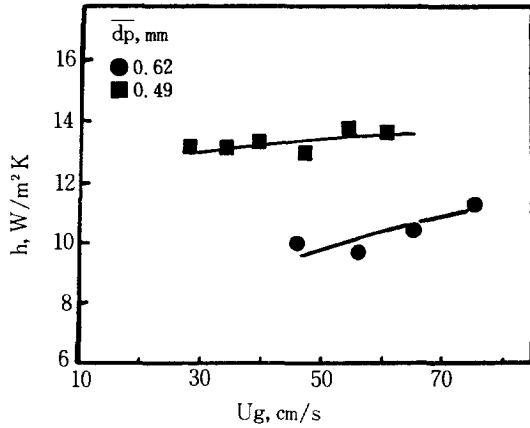


Fig. 9. Effect of air velocity on heat transfer coefficient in freeboard zone.

라. Freeboard에서의 공기유속과 입자크기가 열전달 계수에 미치는 영향

공기유속 및 입자경이 freeboard의 열전달 계수에 미치는 영향을 Fig. 9에 보여주고 있다. 여기서 유동층 온도에 따른 열전달 계수의 변화는 거의 무시할 정도로 작아서 주어진 유속에서의 온도에 따

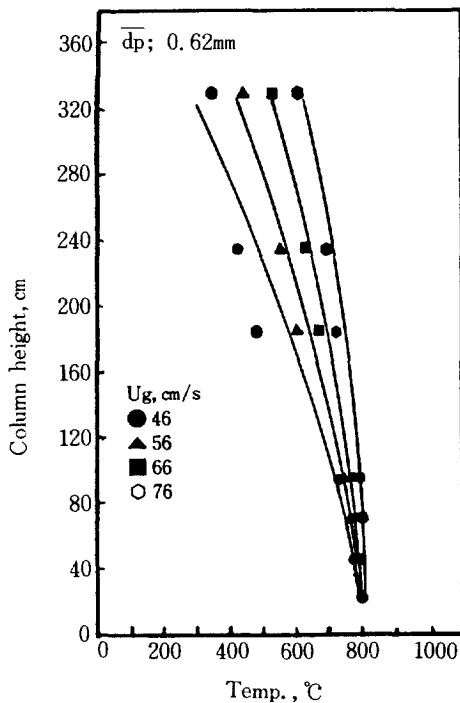


Fig. 10. Temperature distribution along the bed height.

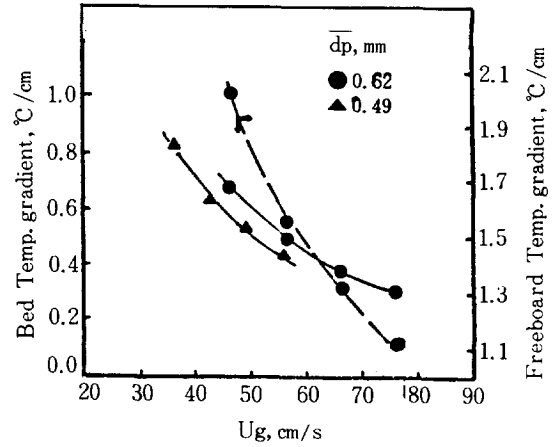


Fig. 11. Effect of air velocity on bed and freeboard temperature gradients.

른 열전달계수 값들의 평균치를 구하였다. 그림에서 보듯이 freeboard내의 열전달 계수는 공기 유속 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 공기 유속의 증가에 따라서 석탄입자의 비말동반(entrainment)량이 증가하여서 freeboard영역에서의 연소가 석탄농도의 증가로 더 일어나며 동시에 유속의 증가는 대류전열의 증가와 과잉공기량의 증가를 수반하므로 연소효율이 증가[2]를 가져오므로 열전달 계수는 증가하게 된다. 또한 그림에서 보듯이 입자경이 작은 경우가 큰 경우보다 열전달 계수가 크게 나타나며 이는 입자경이 작은 입자들이 주어진 유속에서 비말동반이 더 많이 일어나서 입자의 농도를 증가시키고 아울러 입자들이 열전달관과의 접촉 빈도가 증가되기 때문으로 생각된다[2-4].

#### 마. 유동층내의 온도분포

유동층내의 축방향 온도분포를 Fig. 10에 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 유동층과 freeboard에서의 온도분포는 공기유속의 증가에 따라 온도분포는 점점 균일하게 나타난다. 또한 공기유속의 증가에 따라 유동층과 freeboard간의 온도 차이가 적어짐을 관찰할 수 있는데 이는 유속 증가에 따라 입자의 비말동반되는 양이 증가하여서 온도가 높은 석탄입자의 양이 freeboard에 증가하는데 기인한다.

공기유속 증가에 따른 유동층 높이에 따른 온도구배( $\Delta T/L_r$ )를 Fig. 11에 보여주고 있다. 여기서 보듯이 유속의 증가에 따라 온도구배는 급격히 감

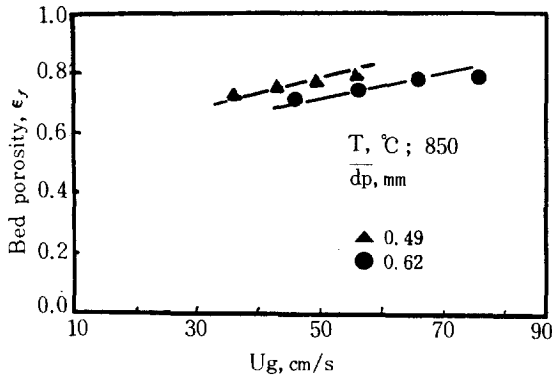


Fig. 12. Effect of air velocity on bed porosity.

소함을 알 수 있다. 이는 공기유속의 증가는 유동층내의 기포생성 크기를 증가시켜서 입자혼합을 증가시키므로 유동층높이에 따른 온도구배를 감소시킨다고 할 수 있겠다. 또한 평균입자경이 0.62 mm일 때가 0.49mm때보다 온도 변화율이 크게 나타나며 이는 주어진 유속하에서 작은 입자들의 혼합도가 큰입자 경우보다 커서 층높이에 따른 온도 변화율이 감소하기 때문이다. 공기유속 변화시 free-board내의 높이에 따른 온도 변화율을 Fig. 11에 보여주고 있다. 여기서 보듯이 공기유속이 증가하면 온도 구배는 급격히 감소한다. 이는 유속증가에 따라 비말동반되어서 분산되는 입자량이 증가하여 온도가 높이에 따라 점점 균일하여지는데 기인한다고 생각된다.

#### 바. 공기유속에 따른 층공극율 변화

유동층내의 층공극율은 유동층의 높이에 따른 정압력을 측정하여서 높이에 따른 압력변화를 도식하여 고체입자의 유동층 높이와 공극율을 다음식으로부터 계산할 수 있다.

$$\Delta P/L_f = (1 - \epsilon_f)(\rho_s - \rho_g) \frac{g}{g_c} \quad (4)$$

본 실험 범위에서의 층공극율의 변화를 공기유속의 변화에 따라 Fig. 12에 도식하였다. 본 실험범위내의 공기유속에 따라 공극율은 증가하는 경향은 보이나 그 증가율은 매우 작으며 주어진 공기유속에서 작은 입자의 경우가 층팽창이 더 이루어져서 층공극율은 크다. 그러나 본 실험 범위의 공기유속은 최소 유동화 속도보다 3~4 배 이상의 높은 유속이므로 층공극율의 심한 변화는 일어나지 않았음

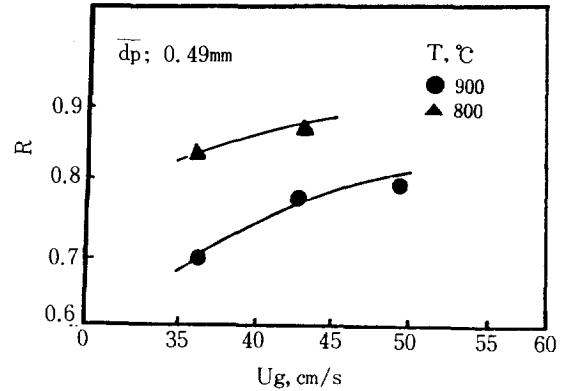


Fig. 13. Effect of air velocity on unburned carbon fraction of entrained ash.

을 예측할 수 있겠다. 또한 입자경이 작은 경우 (0.49mm)가 큰 경우 보다 주어진 공기유속 하에서 층팽창이 더 일어나므로 층공극율은 증가하는 것으로 나타난다.

#### 사. 연소효율

일류관으로 부터 배출된 회분내의 탄소함량은 1~2%로 이 자체의 연소효율은 96% 이상이 됨을 알 수 있었으나 cyclone에 집진된 비말동반 되어진 회분내의 탄소함량은 높은 값을 보여주고 있다(Fig. 13). 여기서 보듯이 유동층내의 온도가 높을수록, 공기유속이 낮을수록 비말동반된 회분내의 최초석탄의 탄소함량을 기준으로 한 탄소함량 분율은 적어지므로 전체 연소효율은 증가함을 알 수 있다. 즉 유동층 온도가 높아지면 산소의 입자내로의 확산이 증가하여서 산화 반응속도가 커질것이므로 연소효율이 증가할 것으로 예상되는 반면(2-4) 공기유속이 증가하면 석탄입자의 체류시간이 감소하는 동시에 비말동반되는 입자량이 증가하므로 연소효율은 감소하게 될 것이다[3].

일류관을 통해서 배출된 회분내의 탄소함량은 극히 적으므로 전체 연소효율은 비말동반되어 나오는 회분의 탄소함량이 좌우한다. 따라서 이차 연소기를 사용하여 재연소하는 방법이나 이회분을 다시 순환하여서 연소시키는 순환계를 사용하여 연소효율을 증가시키는 방법이 필요하다고 생각된다.

#### 결 론

본 실험 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열전달 계수는 유속에 따라 최고점을 나타내며 본 실험 조건에서의 최대 열전달 계수는 입자경이 0.49mm이고 층온도가 900~950°C일 때 780 W/m<sup>2</sup>K이고 입자경이 0.62mm일 때 온도에서 620 W/m<sup>2</sup>K 정도로 나타났다.

2. 열전달 계수는 층온도가 증가하면 증가하였고 입자크기가 증가하면 감소하였다.

3. 유동층내의 축방향 온도 분포는 공기유속이 증가함에 따라 온도분포는 균일하게 되었다.

4. 연소효율은 공기유속이 증가하면 비말동반 효과로 감소하고 층온도가 증가하면 증가하였다.

## NOMENCLATURE

$D_i$  : inside diameter of tube, m  
 $D_l$  : logarithmic mean diameter, m  
 $D_o$  : outside diameter of tube, m  
 $h$  : heat transfer coefficient, W/m<sup>2</sup>K  
 $h_i$  : heat transfer coefficient for inside of tube, W/m<sup>2</sup>K  
 $k_w$  : thermal conductivity of tube wall, W/mK  
 $L_f$  : expanded bed height, m  
 $N_u$  : Nusselt number,  $hD/k$ , dimensionless  
 $\Delta P$  : pressure drop, kg/m<sup>2</sup>  
 $R$  : unburned carbon fraction of entrained ash.  
 $Re$  : Reynolds number, dimensionless  
 $T$  : temperature, °C

$U$  : overall heat transfer coefficient, W/m<sup>2</sup>K  
 $U_s$  : air superficial velocity, m/s  
 $x_w$  : thickness of tube wall, m  
 $\rho_s$  : solid density, Kg/m<sup>3</sup>  
 $\rho_g$  : gas density, Kg/m<sup>3</sup>  
 $\epsilon_f$  : bed porosity, dimensionless

## REFERENCES

1. McLaren, J. and Williams, D.F.: Combustion, May 21 (1970).
2. Lee, G.S., Han, G.Y. and Kim, S.D.: Kor. J. Chem. Eng. 1, 71 (1984).
3. Park, Y.S., Choi, J.H., Son, J.E. and Maeng, K.S.: Hwahak Konghak, 22, 107 (1984).
4. Shin, B.C., Koh, Y.B. and Kim, S.D.: Hwahak Konghak, 22, 253 (1984).
5. Gelperin, N.I. and Einstein, V.G.: Chapter 10, "Fluidization", Davidson and Harrison Eds., Academic Press, (1971).
6. Kim, S.D.: Hwahak Konghak, 17, 85 (1979).
7. Sarkits, V.B.: Diss, Technol, Inst, Im. Lensovieta, Leiningrad (1959).
8. Vreedenberg, H.A.: J. Appl. Chem. 2, Suppl. Issue S26, 526 (1952).
9. Wicke, E. and Fetting, F.: Chem. Ing. Tech., 26, 301 (1954).
10. Bak, Y.C., Son, J.E. and Kim, S.D.: Hwahak Konghak, (in press), (1985).