

Screen 충전 유동층 연소로의 동특성에 관한 연구

오광중 · 홍성창* · 최청송** · 도동섭*

부산대학교 환경공학과

*고려대학교 화학공학과

**서강대학교 화학공학과

(1990년 7월 16일 접수, 1990년 11월 26일 채택)

A Study on the Dynamic Behavior of Screen Packed Fluidized Bed Combustor

K. J. Oh, S. C. Hong*, C. S. Choi** and D. S. Doh*

Dept. of Environ. Eng., Pusan National University

**Dept. of Chem. Eng., Korea University*

***Dept. of Chem. Eng., Sogang University*

(Received 16 July 1990 ; accepted 26 November 1990)

요 약

내경이 6.7 cm인, 충전 유동층 연소로의 동특성을 입자의 체재 시간 분포 곡선과 연소 온도 곡선을 이용하여 조사하였다. 연소에 사용된 유동화 입자는 크기가 균일하고 발열량이 3000 kcal/kg 이하의 저품위 무연탄을 사용하였으며 석탄 입자의 연소특성을 조사하기 위하여 열분석을 행하였다.

충전 유동층 연소로에서 동특성을 고려하여 석탄 입자의 연소시 혼합영역과 확산영역으로 구분하여 연소모델을 제시하였다. 모델에 따르면 분급되어 상향하는 입자와 하향하는 입자들의 향류흐름에 의한 혼합효과는 석탄 고유의 발열량에 영향을 받으며 또한 연소되는 입자들의 분급효과가 높은 저품위 무연탄의 연소는 충전 유동층이 유리하다는 것을 알았다.

Abstract—The dynamic behavior of a screen packed fluidized bed combustor of 6.7 cm inside diameter was investigated by the residence time distribution and the temperature profile of combustion. The low grade anthracite coal (H.V. < 3000 kcal/kg) of uniform size was used in this experiment and the thermal analysis was performed in order to know the combustion characteristics of coal particles.

Considering the dynamic behavior of the packed fluidized bed combustor, a combustion model which was consisted of a mixed zone and a dispersed zone of particles was proposed. It was found from the model that the particle mixing, which was caused by the counter-current flow of particles was influenced by the heating value of coal and that a packed fluidized bed was more effective for the combustion of low grade anthracite coal having high segregation effect of burning particles.

1. 서 론

석탄을 에너지원으로서 사용하는 방법 중 유동층 연소법은 저질탄의 연소가 가능하고 소형화도 가능하며 조업온도를 800°C - 1000°C 사이로 제어가 가능하므로 과잉공기율을 낮출 수 있어 질소 산화물 발생량이 적어지며 일산화탄소 및 미연소 탄소의 양을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들을 박 등[1]은 국내 저품위 무연탄을 유동층 연소로에 적용하여 이에 대한 조업 및 실험을 위한 기초자료를 제시하였다.

그러나 기-고체 유동층은 높은 유속에서 slugging 현상 때문에 층의 높이와 직경의 비에 제한이 있으며 압력요동이 심하고 미세 입자의 비말 동반에 의한 손실이 많은 점 등의 문제가 발생한다. 이런 단점들을 보완하기 위해 Sutherland 등[2]은 유동층에 Raschig ring, Berl saddle, screen 등을 packing 했을 경우 축방향의 고체 혼합에 대하여 발표했는데, 여기서 층부피의 약 5% 정도를 차지하는 금방 충진을 했을 때 slugging이 없는 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다고 보고하였다.

Tone 등[3]은 교반 유동층에서 고체의 흐름 모양을 piston 흐름영역, 완전혼합, dead space의 세 가지를 고려하여 흐름 모델을 측정해 본 결과 RTD 곡선으로부터 모델 계수를 계산한 값과 이론적 모델이 실험식에 잘 일치된다고 하였다. 또한 연속 조작계에서 고체 혼합은 고체 입자의 체류시간 분포를 측정하여 이것으로부터 고체 혼합을 설명할 수 있는데 Gilliland 등[4]이 유동층 내에서 기체와 고체간의 역 혼합을 연구하면서 RTD에 의한 측정방법을 처음으로 시도하였다. Danckwerts 등[5]은 이것을 더욱 체계적으로 정리해서 정상 흐름계에 적용시켜 계의 혼합 효과를 정량적으로 해석하였으며 규모가 큰 계에 대해서도 RTD곡선을 예견할 수 있었다. Wolf와 Resnick[6]는 실험에서 얻은 RTD 곡선을 두 개의 model parameter를 이용해서 해석하였으며, Overcashier 등[7]은 체류시간 분포에 대한 baffle effect를 조사하여 baffle이 RTD spectrum을 좁혀주고 비말 동반에 의한 고체 입자들의 손실도 줄여준다고 발표하였다. Kang 등[8]은 금방 충진 기-고체 유동층에서 확산 모델과 cell 모델을 유도하여 비교하였으며 회분계와 연속계 모두 확산 모델이 잘 적용된다고 발표하였다.

그러나 이들 대부분의 연구가 상온 또는 연소반응이 존재하지 않은 상태를 대상으로 하였으며 고온 충진 유동층 연소로의 동특성에 대한 발표는 거의 없는 상태이다.

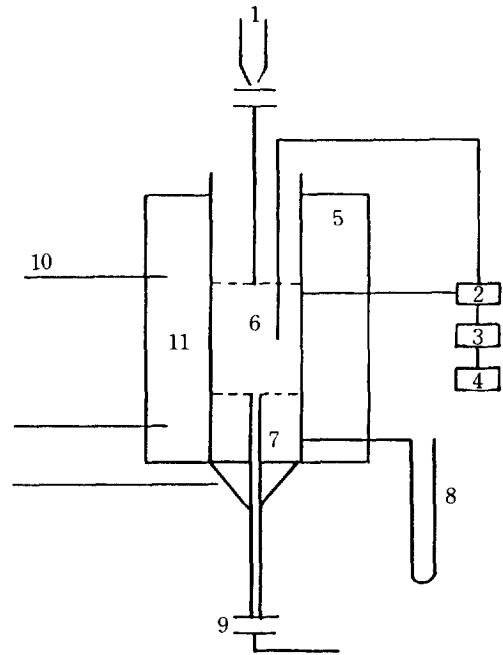


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

1. Vibrating feeder
2. Thermocouple
3. Controller
4. Recorder
5. Insulation
6. Fluidized bed
7. Distributor
8. Manometer
9. Vibrating discharger
10. Cooling coil
11. Electrical heater

따라서 본 연구에서는 무연탄의 발열량이 1300 kcal/kg 에서 2500 kcal/kg 까지의 매우 낮은 품위의 국내 무연탄을 대상으로 무연탄의 연소 특성에 따른 충진 유동층 연소로에서 무연탄의 연소시 유동층의 동특성을 입자의 체재 시간 분포 곡선으로부터 규명하여 저품위 무연탄을 이용한 충진 유동층 연소로 및 이와 유사한 유동층 반응기 해석을 위한 기초 자료 및 응용 연구에 기여하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

본 실험에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같으며 부

식을 방지하기 위해 내경 6.7 cm인 stainless steel을 사용하였다. 가스 분산판 위에는 고온에서 잘 견디는 직경 0.5 cm의 ceramic beads를 충전물로 사용했으며 석탄시료의 주입은 vibration feeder를 사용해서 위에서 아래로 하고 회분배출은 vibrating discharger를 사용해서 유동층의 가스 분산판 중앙에서 배출하도록 하였다. 이 때 공급관과 배출관의 크기는 같게 하였다. 층 내의 온도를 석탄의 착화점까지 올리거나 석탄의 발열량이 부족해서 가열할 필요가 있을 때 열을 공급하기 위해서 유동층 바로 외부에는 니크롬선을 감았고 발열량이 많을 경우 조업온도를 일정하게 유지하기 위해 니크롬선을 감은 외부에는 구리관을 감아서 냉각수를 공급할 수 있도록 하였으며 보온을 위해 규조토로 단열을 하였다. 층 내의 온도를 측정하기 위해서 Chromel-alumel 열전대를 아래 위로 움직일 수 있도록 하였으며 측정하고자 하는 위치에 고정시킬 수 있게 설치하였으며 층 내의 온도를 원하는 온도로 조절하기 위해서 P-controller를 사용하였다. 충전물은 8 mesh screen을 높이와 직경의 비가 1:1이며 위, 아래가 열린 1 cm 크기의 원통형으로 제작하여 사용하였으며 층 내의 배열은 random하게 석탄 입자의 최고 유동화 높이 바로 위까지 충전하였다.

2-2. 실험방법

먼저 층외부에 감은 니크롬선을 이용하여 층 내의 온도를 착화점 이상까지 가열한 후 회분을 넣고 유동화시킨 다음 석탄을 주입하기 시작해서 온도를 조업온도로 고정시킨 후 주입량과 배출량이 정상상태가 되면 연소시 회분과 색이 구분되는 추적자를 순간적으로 투입하고 동시에 배출구에서는 입자의 체제 시간 분포를 얻기 위해 1분마다 회분시료를 채취하여 회분시료에 포함되어 있는 추적자 수를 counting method를 사용하여 회분시료 속의 추적자의 농도를 측정하여 입자의 체제 시간 분포 곡선을 얻었다. 이 때 사용한 추적자는 시료의 발열량이 낮거나 회분 분석 결과 Fe_2O_3 의 양이 적은 경우에는 각 시료를 5 mmHg 이하의 진공상태로 유지하고 105°C에서 약 1시간 동안 열을 가하면서 용기 내의 시료를 잘 섞어준 후 48시간 동안 방치하여 고-액 분리 후 400°C에서 건조하여 유동층에서 연소 후 배출시 붉은 색을 나타내는 추적자를 만들어 사용했으며, 발열량이 높고 Fe_2O_3 의 양이 많을 경우에는 회분 전체의 색이 붉은 색을 나타내기 때문에 붉은 색의 추적자로는 식별이 불가능하므로 위와 같은 방법으로 포화 수용액만 $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 으로 바꾸어서 연소 후 배출시 회분이

Table 1. Physical properties of coal samples

Sample	True density (kg/m^3)	Sphericity	U_{mf} (m/s)	E_{mf}	Heating value (kcal/kg)
S ₁	2234	0.401	23.61	0.505	1320
S ₂	2215	0.398	23.92	0.512	1580
S ₃	2197	0.415	22.48	0.497	1830
S ₄	2112	0.409	22.06	0.489	2510

green 색을 나타내는 추적자를 만들어 사용하였다. 전환율이 낮아 추적자를 쉽게 구별하지 못하는 경우에는 채취된 시료를 전기로에 넣고 태워서 추적자를 판단하였다.

본 연구에서는 유속은 U_{mf} 의 2배로 하고 aspect ratio를 1.0, 온도를 900°C 부근으로 하여 실험하였다.

충진 유동층에서 연소과정 중 고체 입자들의 거동을 정성적으로 고찰하기 위하여 유동층의 가스 분산판으로부터 8 cm되는 높이에서부터 열전대를 1 cm씩 올라가면서 온도를 900°C로 유지하고 회분을 유동화시키면서 일정량의 석탄시료 4 g을 순간적으로 층상부에 주입하였을 때의 온도변화를 기록계로 연속적으로 기록하여 충전 유동층 내의 축방향에 따른 온도분포로부터 연소기구(combustion mechanism)를 고찰하였다.

2-3. 시료

본 연구에서 사용한 석탄 시료는 발열량에 따라 모두 4종으로 충북 부령 지구에서 채취하였다. 시료는 먼저 조 파쇄기(jaw crusher)로 조쇄한 후 roll mill로 분쇄하여 얻은 다중입자를 Tyler 표준체로 분리하여 평균 입경이 0.00065 m인 입자를 시료로 선택하여 사용하였다. 시료 입자의 특성을 균일화하기 위해 V-mixer를 사용해서 혼합이 가장 잘 되는 회전속도 30 rpm에서 약 30분간 혼합시켰다[9].

2-3-1. 시료 분석

실험에서 사용된 각 시료의 물리적 성질은 Table 1과 같으며 발열량을 2500 kcal/kg까지 제한한 것은 3000 kcal/kg 이상의 발열량을 갖는 석탄은 유동층 연소에 별 어려움이 없다는 것이 잘 알려져 있으며 그 이상에서는 유동층 연소시 입자들이 마모(attrition)되어 고체 입자 크기가 감소되고 이 때 생성된 미세 입자들의 유출이 심하므로 본 실험에서는 발열량을 2500 kcal/kg까지 제한하였다.

본 시료의 연소 반응 특성을 얻기 위해 열분석을 실시하였으며 사용된 기기는 CHYO BALANCE CO의 Automatic Derivative Differential Thermobalance(Mod-

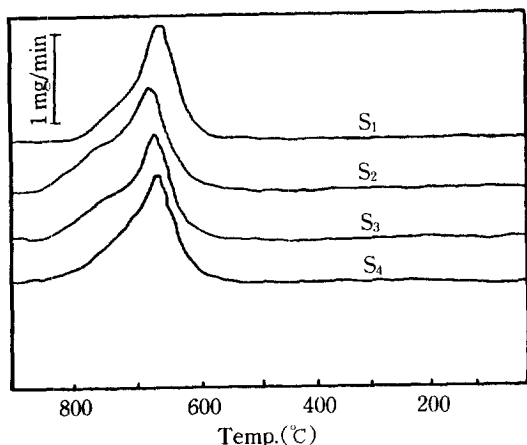


Fig. 2. DTG burning profile of coal samples.

Table 2. Exothermic peak temperature at pyrolysis

Sample	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_b(^{\circ}\text{C})$	$T_p(^{\circ}\text{C})$
S ₁	582	682	882
S ₂	578	684	865
S ₃	580	680	880
S ₄	568	668	875

el TRDA-H)를 이용하였으며 실험방법은 백금 시료 용기에 시료 50 mg과 기준 물질인 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 50 mg을 각 용기에 고루 퍼넣고 heating rate $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, chart speed 15 cm/hr , 온도 범위는 실온에서 900°C 까지 측정하였다. 각 시료에 대한 burning profile은 Fig. 2에 나타내었으며 각 시료의 착화 온도(T_i), 최고 온도(T_p), 최종 온도(T_b)를 Table 2에 표시하였다.

석탄은 단일 성분으로 구성된 물질이 아니라 석탄내에 함유하고 있는 여러 가지 성분들에 의해서 영향을 받고 온도 상승에 따라 석탄의 구조도 변하기 때문에 석탄연소시 반응속도상수는 온도 증가에 따라 일정하지 않을 것이다. 본 연구에서는 석탄시료의 활성화에너지를 구하기 위하여 열분석 결과를 Coats와 Redfern[10]이 제시한 방법으로 Fig. 3에 나타내었으며 Serageldin[11]이 석탄의 경우에 제시한 방법에 의해서 활성화 에너지를 구하였다.

1차 반응으로 가정하고 구한 활성화 에너지값을 Table 3에 표시하였다. 이 결과는 Hwang과 Son[12]이 국산 무연탄에 대해서 구한 값(비흑연성 탄종 40-45 kcal/mol, 흑연성 탄종 50 kcal/mol 이상)과 비슷함을 알 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

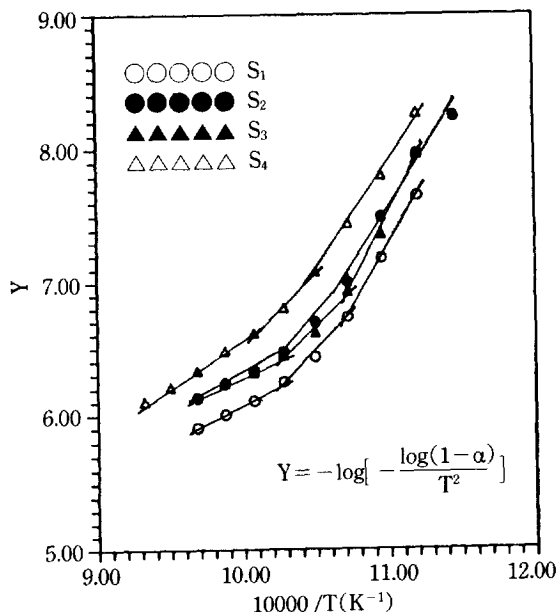


Fig. 3. Arrhenius plot of coal samples.

Table 3. Results of activation energy

Sample	$E_a(\text{kcal/mol})$
S ₁	53.41
S ₂	51.71
S ₃	45.16
S ₄	42.79

3-1. 연소 기구

Fig. 4-7에 나타난 바와 같이 가스 분산판으로부터 8-9 cm되는 층높이에서는 발열량이 1900 kcal/kg 이상인 시료 S₃와 S₄를 900°C 로 유지된 회분층에 순간적으로 주입할 시에 온도 변화가 거의 감지되지 않고 10 cm에서부터 약간의 온도 변화가 나타나다가 11 cm 높이에서는 확연히 온도 분포의 변화를 보여주며 특히 층상부인 12-13 cm에서 가장 활발한 연소가 일어나는 것을 선명히 보여주고 있다. 이러한 현상은 시료의 발열량이 높을수록 층상부에서 연소 영역을 이루고, 이 영역에서 연소 후 하향하는 것을 의미하며 반대로 발열량이 낮은 시료 S₁인 경우에는 주입된 시료가 유동층의 높이 8 cm 부근에서부터 활발한 연소 영역을 형성하는 것을 알 수 있다. 이는 Table 3에서 알 수 있듯이 발열량이 낮은 시료는 활성화 에너지가 높고, 연소 속도가 느리며 착화점의 온도가 높기 때문인 것으로 해석된다. 이같은 경향을 고찰하면 다음과 같은 결과를 알 수 있다.

1. Fig. 7에서 오른쪽에 점선으로 연결된 점선 A는

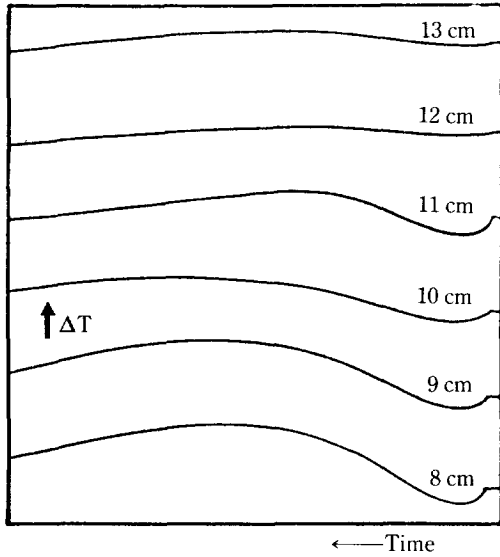


Fig. 4. Temperature profile with the bed height of sample S_1 .

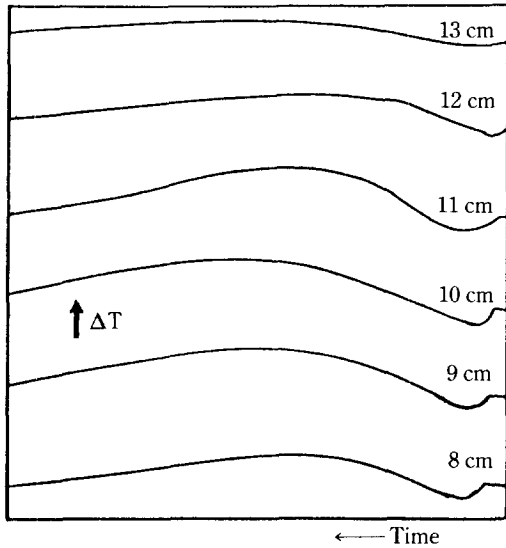


Fig. 5. Temperature profile with the bed height of sample S_2 .

주입된 시료가 주어진 층높이에 도달하는 시간이며 점선 B는 착화되는데 필요한 시간을 의미한다.

2. 발열량이 높을수록 층상부에서 주된 연소 영역을 이루며 동시에 연소 시간이 길다.

3. 시료 S_1 과 S_2 에서 보는 바와 같이 발열량이 낮은 경우에는 층높이 11 cm인 층의 중, 하 부근에서 높은 연소 속도 영역을 중심으로 층의 높이가 높을수록 연소

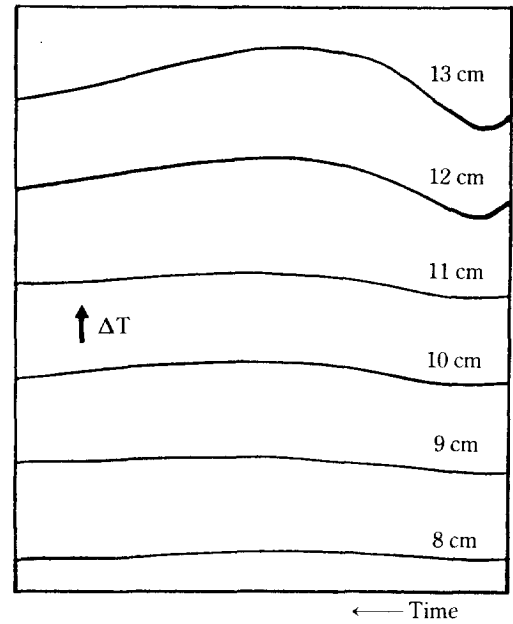


Fig. 6. Temperature profile with the bed height of sample S_3 .

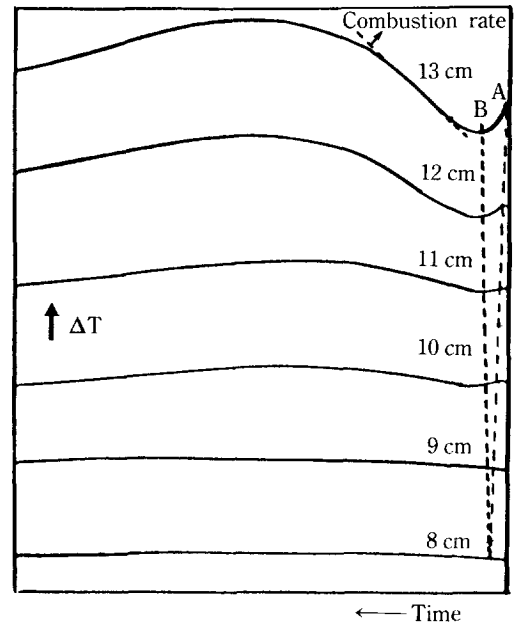


Fig. 7. Temperature profile with the bed height of sample S_4 .

시간이 길어짐을 알 수 있다. 이는 어느 이상의 연소 속도를 갖는 고체 입자에 대해서는 연소되는 과정에서 유동층의 윗 부분으로 분급되는 것을 의미한다.

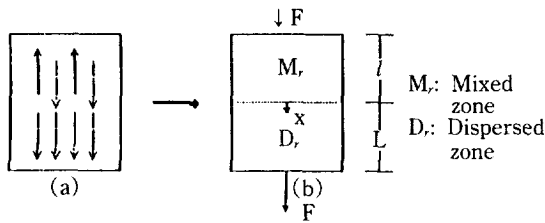


Fig. 8. Mechanistic model of coal particles in a packed fluidized bed combustor.

4. 분급되어 상향하는 입자와 연소 후 하향하는 입자간에는 향류(counter-current) 흐름에 의하여 혼합 효과가 상승함을 예견할 수 있고,

5. 위의 사실로부터 발열량이 낮을수록 충전층의 효과는 감소함을 나타낸다.

3-2. 이론적 모델 선정 및 해석

앞에서 설명한 실험결과들을 근거로 고체 입자들의 거동을 도식적으로 간략히 나타내면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8a에서 표시된 실선은 주입된 시료가 연소되면서 분급되어 상향하는 것을 의미하며 점선으로 표시된 것은 연소 후 회분성분이 많은 회분 입자가 하향하는 것을 보여주는 것이다. 여기서 유동층의 상단 부분은 상향하는 입자와 하향하는 입자가 서로 향류(counter current)에 의하여 입자들의 혼합도가 증대되어 이들 영역을 Fig. 8b에서와 같이 M_r 으로 나타내어 혼합 영역(mixed region)으로 간주하고, 충전층에서 회분으로 하향하는 하단 부분은 확산층으로 생각할 수 있을 것이다.

완전 혼합 후 L 부분에 대하여 확산 방정식과 경계조건을 고려하면 다음과 같다.

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

$$C(0, x) = 0$$

$$C(t, 0) = C_0 \exp\left(-\frac{u}{l} t\right)$$

$$C(t, \infty) = 0 \quad (2)$$

각 변수를 다음의 무차원 변수를 도입하면 식 (3)과 새로운 경계조건 (4)를 얻을 수 있다.

$$C_a = C/C_0, \quad t_a = ut/L, \quad x_a = x/L, \quad P_a = \frac{uL}{4D}$$

$$\frac{1}{4P_a} \frac{\partial^2 C_a}{\partial x_a^2} = \frac{\partial C_a}{\partial t_a} + \frac{\partial C_a}{\partial x_a} \quad (3)$$

$$C_a(0, x_a) = 0$$

$$C_a(t_a, 0) = \exp\left(-\frac{L}{l} t_a\right)$$

$$C_a(t_a, \infty) = \text{finite} \quad (4)$$

한편 $C_a(x_a, t_a) = V(x_a, t_a) \exp(2P_a x_a - P_a t_a)$ 라고 하고 식 (3)을 정리하면 다음과 같은 식 (5)와 경계조건 (6)으로 표현된다.

$$\frac{1}{4P_a} \frac{\partial^2 V}{\partial x_a^2} = \frac{\partial V}{\partial t_a} \quad (5)$$

$$V(0, x_a) = 0$$

$$V(t_a, 0) = \exp\left(P_a - \frac{L}{l}\right) t_a$$

$$V(t_a, \infty) = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 변수 t에 관하여 Laplace transform을 적용하면,

$$\bar{V}'' - 4P_a s \bar{V} = 0 \quad (7)$$

$$\bar{V}(s, 0) = \frac{1}{s - (P_a - \frac{L}{l})} \quad (8)$$

$$\bar{V}(s, \infty) = 0 \quad (9)$$

여기서 \bar{V} : V의 Laplace transform

식 (7), (8), (9)로부터 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{\exp(-\sqrt{4P_a x_a^2 s})}{s - (P_a - \frac{L}{l})} \quad (10)$$

Laplace transform Table[13]에서 V의 inverse Laplace transform을 구하면

$$V(t_a, x_a) = \frac{1}{2} \exp\left[-\left(\frac{L}{l} - P_a\right)t_a\right]$$

$$\cdot \exp\left[\sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right) \cdot 4P_a x_a^2}\right]$$

$$\times \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{4P_a x_a}{t_a}} + \sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right)t_a}\right]$$

$$+ \exp\left[-\sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right) 4P_a x_a^2}\right]$$

$$\times \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{4P_a x_a}{t_a}} - \sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right)t_a}\right] \quad (11)$$

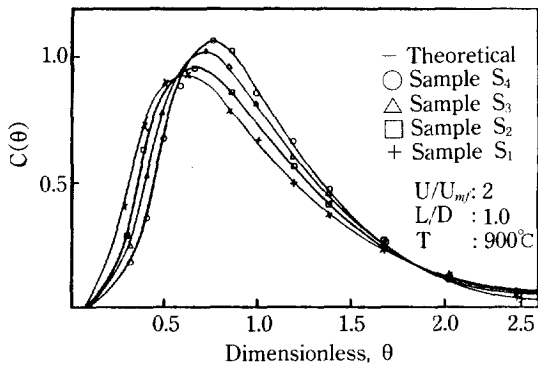


Fig. 9. Comparison of theoretical C-curve with the experimental C-curve in screen packed fluidized bed combustor.

Table 4. Parameters of the model in screen packed fluidized bed combustor

Sample	Mean residence-time (min)	Parameter	
		L/l	P_a
S ₁	20.435	0.918	1.0684
	19.237	0.910	1.0415
	18.312	0.905	1.0288
	17.651	0.902	1.0081
S ₂	21.421	1.145	1.1364
	20.769	1.143	1.1468
	22.672	1.150	1.1904
	23.542	1.157	1.2255
S ₃	22.412	1.235	1.3736
	23.643	1.250	1.4711
	24.379	1.270	1.5432
	24.011	1.263	1.4811
S ₄	23.695	1.372	1.9084
	24.452	1.380	2.0833
	24.452	1.380	2.0833
	24.954	1.382	2.1368

가 되며 따라서 $C_a(x_a, t_a)$ 는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 C_a(x_a, t_a) = & \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{L}{l}t_a + 2P_a x_a\right] \\
 & \times \exp\left[\sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right)4P_a x_a^2}\right] \\
 & \times \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{4P_a x_a^2}{t_a}} + \sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right)t_a}\right] \\
 & + \exp\left[-\sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right)4P_a x_a^2}\right]
 \end{aligned}$$

$$\times \operatorname{erfc}\left[\frac{1}{2}\sqrt{\frac{4P_a x_a^2}{t_a}} - \sqrt{\left(P_a - \frac{L}{l}\right)t_a}\right] \quad (12)$$

Fig. 9는 P_a 와 L/l 을 변수로 하고 식 (12)를 수치계산하여 그 값을 normalize하여 실험치와 비교해서 그린 것이다. 각 시료에 대해 실험결과와 이론식이 가장 잘 맞는 P_a 와 L/l 을 구해 정리하면 Table 4와 같다. 여기서 발열량이 증가할수록 L/l 이 증가하는데 이는 혼합 영역이 감소하고 확산 영역이 커짐을 알 수 있다. 이 결과는 발열량이 큰 석탄 입자는 대부분 유동층 윗쪽에서 연소됨을 보여준 연소온도곡선 결과와 잘 일치한다.

5. 결 론

저품위 무연탄을 대상으로 입자의 체재 시간 분포를 이용한 충전 유동층 연소로의 동특성에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 충전 유동층 내의 고체 입자의 동특성을 고려할 때 석탄 입자의 연소로 인한 혼합 영역과 회분층으로 이루어진 확산층으로 구분하여 제시한 이론적 모델이 비교적 잘 맞는다.
2. 확산과 혼합층의 크기의 비는 석탄 고유의 발열량에 따라 증가한다.
3. 유동층 내에 screen 충전물이 존재할 시에는 석탄 고유의 발열량이 3000 kcal/kg 이하인 저질 무연탄을 유동층 내에서 연소할 시 고체 입자들의 흐름 특성이 시료의 발열량에 따라 뚜렷한 차이를 나타낸다.
4. 연소되는 입자들의 분급효과가 높은 저질탄에 대해서는 충전 유동층이 유리하다.

감 사

본 연구는 한국과학재단 연구비(KOSEF 883-1005-002-2)에 의하여 이루어진 결과입니다. 연구비를 지원하여 주신 재단에 감사를 드립니다.

NOMENCLATURE

- C : concentration [kg/m³]
 C_o : initial feeding concentration [kg/m³]
 D : diffusivity [m²/s]
 $H.V.$: heating value [kcal/kg]
 L : the length of dispersed zone [m]
 l : the length of mixed zone [m]
 P_a : dimensionless group(modified Peclet number)

- t : time [s]
 T_d : dimensionless time(ut/L)
 T_b : burn out temperature [$^{\circ}\text{C}$]
 T_i : ignition temperature [$^{\circ}\text{C}$]
 T_p : peak temperature [$^{\circ}\text{C}$]
 u : velocity in x-direction [m/s]
 U_n : superficial gas velocity [m/s]
 U_{m^*} : minimum fluidized velocity [m/s]
 V : velocity at arbitrary time and x-direction [m/s]
 x : axial distance in the dispersed zone [m]
 x_n : dimensionless length(x/L)

REFERENCES

1. Park, J. H., Choi, C. S. and Kang, W. K.: Proceeding of PACHEC, Vol. III, 223(1983).
2. Sutherland, J. P., Vasilators, G. and Kubota, H.: *AIChE J.*, **9**, 437(1963).
3. Tone, S., Oda, I., Kawamura, K. and Otake, T.: *J. Chem. Eng. Japan*, **5**, 68(1962).
4. Gilliland, E. R. and Mason, E. A.: *Ind. Eng. Chem.*, **41**, 1191(1949).
5. Danckwerts, P. V.: *Chem. Eng. Sci.*, **2**, 1 (1953).
6. Wolf, D. and Resnick, W.: *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, **2**, 287(1963).
7. Overcashier, R. H., Todd, D. B. and Olney, R. B.: *AIChE J.*, **5**, 54(1959).
8. Kang, W. K. and Osberg, G. L.: *Can. J. Chem. Eng.*, **44**, 142(1966).
9. 김익수: 고려대학교 석사학위 논문, (1985).
10. Coats, A. W. and Redfern, J. P.: *Nature*, **201**, 68 (1964).
11. Serageldin, M. A. and Pan, W. P.: *Thermochim. Acta*, **71**, 1(1983).
12. 황정의, 손무룡: 대한화학회지, **11**, 1(1967).
13. Erdelyi, A.: Tables of Integral Transforms, 1, McGraw-Hill, 246(1954).