

2단 선회류 유동층 연소로내에서 저품위 무연탄의 연소특성(I)

이제근·허철구·노진기·신용섭*·전해수*

부산수산대학 환경공학과

* 고려대학교 화학공학과

(1988년 5월 9일 접수, 1988년 8월 26일 채택)

Combustion Characteristics of Low-Grade Anthracite Coal in a Two-Stage Swirl-Flow Fluidized Bed Combustor(I)

Jea-Keun Lee, Chul-Goo Hu, Jin-Gi No, Yong-Seop Shin*, and Hai-Soo Chun*

Dept. of Environ. Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-023, Korea

* Dept. of Chem. Eng., Korea University, Seoul 136-701, Korea

(Received 9 May 1988; accepted 26 August 1988)

요 약

연소효율을 증진시키기 위하여 2단 선회류 유동층 연소로를 고안하였다. 이 연소로는 하단과 상단의 두 개 층으로 구성되었고 층내 물질이 연속 배출되는 일류관이 각 층에 설치되어 연속 조작되었다. 하단으로부터 상승하는 연소기체(미분고체 입자를 포함한)는 2단 분산판에 부착된 4개 노즐을 통과하여 접선류를 이루고, 분산판 윗판의 다공을 통과하는 2차 공기는 축류를 이루도록 구성되었다. 이는 "축류-접선류 선회류 장치"에 상당되며, 비산되는 미세입자가 원심력에 의해 기벽을 타고 하강해서 2단 분산판 위에 수집되어 2차 공기에 의해 유동화 되면서 동시에 연소된다. 이 장치에서 국내산 저품위 무연탄(총발열량=2,810 kcal/kg, 입자경<2 mm)의 연소실험을 수행하였다.

실험결과 선회류 영향으로 인하여 비산유출량과 미연소 탄소 손실량이 같은 크기의 단단 유동층 연소로에 비하여 크게 감소하였고 연소효율은 단단 유동층 연소로에 비하여 약 20% 이상 증진되었다.

Abstract—A two-stage swirl-flow fluidized bed combustor(FBC) has been devised to increase the combustion efficiency. The combustor consists of a first stage and a second stage with overflow drain, respectively. The combustion gas, including fine particles from the first stage, is tangentially introduced into the second stage through 4 nozzles, which are inserted into holes drilled in the second stage distributor, and secondary air is axially introduced through multiorifices drilled on the upper plate of the second distributor. The second stage is equivalent to a "axial-plus-tangential entry swirl generator", so that fine particles in the second stage are thrown to the wall under the influence of centrifugal forces in the swirl-flow, decended, collected on the second distributor, fluidized by the secondary air, and burnt within the second stage. Hot bed tests are carried out using low-grade anthracite (gross heating value = 2,810 kcal/kg, particle diameter <2 mm).

Due to the effect of swirl-flow, the amount of fines elutriated and the unburned carbon loss are considerably reduced in the two-stage swirl-flow FBC as compared with the same size single-stage FBC. Combustion efficiency is increased by about 20% as compared with the same size single-stage FBC.

1. 서 론

유동층 연소장치는 다른 연소장치에 비해 여러가지 장점이 있어 이에 대한 연구가 많이 행해져 왔으나, 미세한 미연소 입자의 과다한 비산유출로 인해 연소효율이 낮아지는 문제점을 갖고 있다[1-5].

이러한 문제점을 보완하기 위해 비산유출되는 미연소 입자를 사이클론이나 백필터에 포집한 후 층내로 다시 공급하여 연소시키는 재순환식 유동층 연소법(recycling FBC)[6-8]과 포집된 미연소 입자를 다른 별개의 연소로(carbon burn-up cell, CBC)에서 재연소시키는 방법[9, 10] 등이 개발되어 왔다. 재순환식 연소법은 간편하고 연소효율 증진효과는 크지만 미연소 입자를 정상적으로 재순환시키는 것은 쉽지 않고 집진부하가 증대되는 등의 문제점이 있으며, CBC를 이용하는 방법에서는 CBC가 고온(약 1,100°C), 고산소 분위기에서 운전되기 때문에 NO_x의 발생량이 많고 회분의 용융으로 인한 소결현상이나 fouling현상이 문제가 되고 있어 단단 유동층에서 연소효율을 개선하는 방법은 많은 어려움이 수반되고 있다[5, 11]. 또한 Hiram 등[12]은 NO_x저감, 탈황제 이용율의 증대 및 연소효율 증진효과를 동시에 얻기 위해 2단 유동층 연소법을 제안하였다. 이들이 제안한 2단 유동층 연소장치는 NO_x저감 및 탈황제 이용율 증대효과가 뚜렷이 나타났으나 연소효율 증진효과는 크지 않으며, 또한 상단에 설치한 bubble cap type의 재분산판으로 인해 압력손실이 큰 것으로 보고되었다[5, 13, 14]. 우리나라 저품위 무연탄의 유동층 연소에 관한 연구[20-24]도 많이 수행되었고 현재 진행중인 연구도 많은 것으로 안다.

본 연구에서는 비산입자의 체류시간과 연소효율을 증진시키기 위한 방안으로 하단 유동층 표면에서 배출된 연소가스가 상승하면서 선회류를 형성할 수 있게 하고 axial flow의 2차 공기를 유입시킬 수 있는 상단 분산판, 즉 axial-plus-tangential swirl generator에 상당되는 분산판을 설치한 새로운 개념의 2단 선회류 유동층 연소장치를 고안하였다. 즉 선회류에 의해서 하강된 입자는 상단에서 2차 공기에 의해 유동화되면서 재연소된다.

이러한 특징을 지닌 2단 선회류 유동층 연소장치의 연소특성을 파악하기 위해서는 동일한 조건의 단단 유동층 연소장치의 연소특성과 비교할 필요가 있다. 그러나 석탄 유동층 연소장치의 연소특성은 동일한 조건에서 실험을 행하더라도 사용하는 석탄의 종류 및 입경분

포 등에 따라 큰 차이를 나타내므로, 다른 연구자들에 의해 행해진 단단 유동층 연소장치의 연소실험 결과와 직접적인 비교가 곤란하다.

그래서 본 연구에서는 상단 분산판을 분리할 수 있도록 제작하고, 상단 분산판 설치 여부에 따른 저품위 무연탄의 연소실험 결과를 각각 비교하여 2단 선회류 유동층 연소장치의 연소특성을 파악하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 연구에 사용한 실험장치를 Fig. 1에 나타냈다. 유동층 연소로는 내경이 11.0cm이고, freeboard 상단

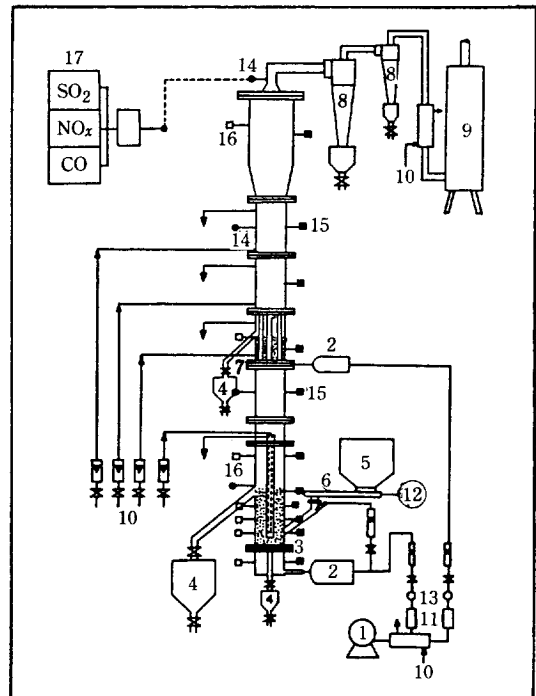


Fig. 1. Schematic flow diagram of experimental apparatus.

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1. Compressor | 2. Air preheater |
| 3. 1st air distributor | |
| 4. Ash overflow tube and hopper | |
| 5. Coal hopper | 6. Screw feeder |
| 7. Swirl generator | 8. Cyclone |
| 9. Bag filter | 10. Cooling water line |
| 11. Air filter | |
| 12. Variable speed motor | |
| 13. Regulator | 14. Sampling line |
| 15. Thermocouple | 16. Pressure tap |
| 17. Gas analyzer | |

끝부분 40 cm는 내경이 15.6 cm로 확장되어 있으며, 하단 공기분산판으로부터 freeboard 상단 끝부분까지의 높이를 170 cm가 되게 스테인레스 강관으로 제작하였다. Freeboard부는 높이 조절이 가능하도록 하기 위해 20 cm씩 절단하여 flange에 의해 조립하였으며, 연소로 하부 외벽에는 조업을 시작할 때 층온도를 석탄의 착화온도까지 예열시키기 위해 전열선 (Kanthal heating element)을 감고 연소로 전체 외벽에는 ceramic wool을 20 cm두께로 감아 단열시켰다. 또한 연소로내 각 부분에서의 온도 및 압력을 측정하고 연소 가스를 분석하기 위해 높이별로 열전대와 압력 측정탭 및 가스 채취구를 필요한 위치에 각각 설치하였으며 유동층 내부의 연소상태를 관찰할 수 있도록 하단 공기분산판으로부터 25 cm 상부에 투시경을 설치하였다.

석탄은 주입량 조절이 가능한 screw feeder에 의해 하단 공기분산판으로부터 5 cm 상부 지점에서 주입하며 하단 층내의 화재는 하단 공기분산판으로부터 20 cm 상부의 측면에 설치된 일류관 또는 하단 공기분산판 중앙에 부착된 하부 배출관으로 배출하며 하단 유동층 높이는 20 cm로 일정하게 유지되도록 하였다. 또한 상단 층내의 화재는 상단 공기분산판으로부터 10 cm 상부에 위치한 일류관을 통해 배출하며 상단 유동층의 높이는 10 cm로 유지되도록 하였다.

연소용 공기는 공기압축기로부터 1차 및 2차 공기로 나누어져 로타미터를 통하여 공기에열기로써 예열시킨 후 1차 공기는 multi-orifice의 하단 공기분산판을 통해 주입하고, 2차 공기는 상하 2중판으로 구성된 분산판의 윗쪽 다공을 통해 주입된다. 연소가스는 직렬로 연결된 2개의 사이클론과 백필터를 거치면서 연소가스 중의 미연소 입자가 포집된 후 배출관을 통해 배출된다. 그리고 로내의 온도조절을 위해 하단에는 annulus 형 냉각관을 층내에 수직으로 설치하고, 상단에는 연소로 외벽에 stainless steel tube로 된 냉각관을 감아 각 단의 온도조절이 용이하도록 하였다.

또한 하단의 층표면에서 배출된 1차 연소가스를 freeboard 내에서 선회류로 만들기 위해 상단 분산판을 하단 공기분산판으로부터 70 cm 상부에 설치하였으며 이의 구조 및 크기는 Fig. 2와 같다. 상단 분산판은 선회류를 유도하는 4개의 nozzle이 부착되었고 2중판의 윗판이 다공으로 되어 축류(axial flow)의 2차 공기에 의해 상층 입자를 유동화시키도록 구성되었다. nozzle의 내경은 1.28 cm이고 상단 공기분산판으로부터 노즐 분사구의 중심부까지의 높이는 20 cm이다. 또한 4개의 노즐에 의해 유도된 선회류의 중심은 연소로

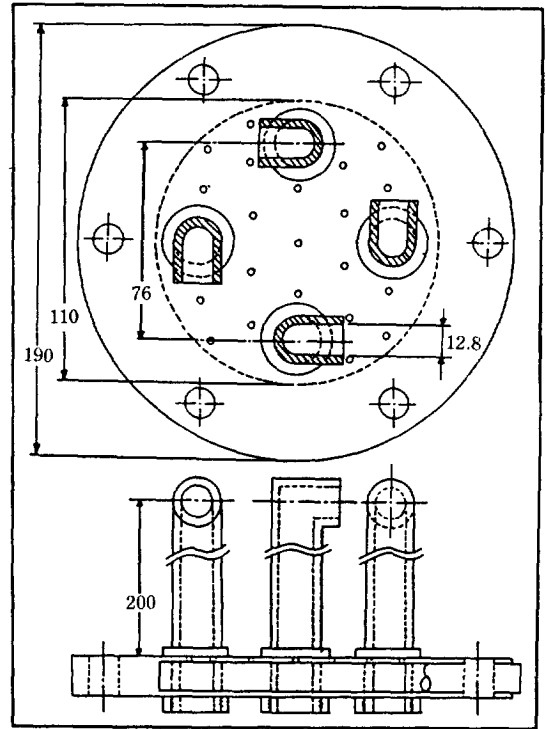


Fig. 2. Details of swirl generator(unit: mm).

의 중심과 같으며, 선회류의 선회원경은 nozzle의 분사각도를 변화시켜 조절할 수 있도록 하였다.

2-2. 실험방법

연소실험을 시작할 때는 석탄과 동일한 입경분포를 갖는 회재를 우선 층내에 충전시키고, 예열된 공기를 공급하여 층내 물질을 유동화시키면서 연소로 외벽에 감은 전열선에 의해 층내의 온도를 석탄의 착화온도 이상인 700°C 정도까지 가열시킨 후 석탄을 서서히 공급하였다. 석탄이 착화되면 미리 보정된 screw feeder의 입력전압을 조절하여 석탄 공급량을 원하는 양까지 점차로 증가시키고 동시에 공기 주입량도 필요한 양까지 서서히 증가시켰다. 주입한 석탄의 연소에 의해 층온도가 급속히 상승하기 시작하면 조업 개시용 전열선의 전원을 끄고 냉각수 유량을 조절하여 층내의 온도가 원하는 범위에서 일정하게 유지되도록 하였다. 이 때 연소로의 수직 온도분포를 계속적으로 측정하여 각 지점의 온도가 일정하게 유지될 때(대략 6-7시간 소요됨) 연소로의 연소상태가 정상상태에 도달한 것으로 간주하였다.

연소로의 연소상태가 정상상태에 도달하게 되면, 각

Table 1. Experimental conditions

Variables	Conditions
Bed temperature	1st stage $T_{b1} = 900^\circ\text{C}$ 2nd stage $T_{b2} = 900^\circ\text{C}$
Superficial gas velocity	1st stage $U_{o1} = 0.9\text{--}1.5\text{m/sec}$ 2nd stage $U_{o2} = 0.27\text{m/sec}$
Fluidized bed height	1st stage $H_{f1} = 20\text{cm}$ 2nd stage $H_{f2} = 10\text{cm}$
Air flow rate	1st stage $F_{a1} = 120\text{--}200 \text{ l/min}$ 2nd stage $F_{a2} = 35 \text{ l/min}$
Coal feed rate	$F_c = 37.47\text{--}58.33\text{g/min}$
Stoichiometric air ratio	$\lambda = 1.20$

실험조건에서의 미연소분 손실특성 및 연소효율을 파악하기 위하여 1시간 동안 10분 간격으로 각 부분에서 배출되는 회재를 포집한 후 포집된 회재의 무게를 달아 회재의 배출량을 측정하며, 필요에 따라 입경분석, 성분분석 또는 가연성성분 함량을 분석하고 이와 동시에 각 시료가스 채취구에서 포집된 연소가스 중의 CO 농도를 CO 자동분석장치(Horiba MEXA-324F)로써 측정하였다. 이 때 연소효율은 공급하는 석탄과 각 부분에서 배출되는 회재를 포집한 후 각각의 발열량을 측정하여 발열량 수치를 기준으로 계산하였다[27].

그리고 본 연구의 실험조건은 Table 1에 정리하여 나타냈다. 여기서 층온도 T_{b1} , T_{b2} 는 각각 하단 및 상단 공기분산판으로부터 10cm, 5cm 상부 지점의 층내 온도이며, 상하단의 가스공탄속도는 공기를 이상기체로 가정하고 1차 및 2차 공급공기량을 이상기체 상태 방정식에 의해 층온도 조건에서의 부피로 환산한 후 이를 연소로 단면적으로 나누어 계산한 값이다.

2-3. 석탄시료

본 연구에 사용한 석탄은 강원도 보림탄(정선탄광)으로 공업 분석치와 원소 분석치를 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 보면 본 실험에 사용한 보림탄은 회분함량(56.05%)이 높고, 발열량(2,810 kcal/kg)이 낮은 저품위 고회분 무연탄임을 알 수 있다. 실험에 사용한 석탄은 입경이 2mm 이하가 되도록 분쇄하여 사용하였으며, 실제 유동층내로 공급되는 석탄의 입경분포를 알아보기 위해 석탄을 screw feeder에 통과시킨 후 입경분포를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 그리고 석탄시료의 연소에 의한 입경수축의 정도를 파악하기 위해 screw feeder를 통과시킨 석탄을 전기로내에서 고정한 상태로 완전히 연소시킨 후 재의 입경분포를 측정

Table 2. Compositions of Borim coal

Proximate analysis(wt.%)		Ultimate analysis(wt.%)*	
Moisture	1.83	C	34.39
Volatile matter	5.79	H	0.70
Fixed carbon	36.33	O	4.18
Ash	56.05	N	1.46
Calorific value	2810	S	2.18
(Gross, kcal/kg)		Ash	57.09

*dry basis

하여 Fig. 3에 점선으로 나타냈다. Fig. 3의 결과로부터 본 실험에 사용한 보림탄은 연소에 의해서는 입경수축이 거의 일어나지 않는 특성을 지님을 알 수 있다.

또한 입경별 가연성 성분 함량을 분석한 결과를 Fig. 4에 나타냈는데, 그림에서 보는 바와 같이 입경이 작을수록 가연성 성분 함량은 높음을 알 수 있다. 그러므로 석탄중의 미세입자가 연소되지 않은 상태로 비산 유출되면 이로 인한 미연소분 손실이 커 연소효율을 저감시키는 주원인이 됨을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 유동층 연소장치의 미연소분 손실

석탄 유동층 연소장치에서 연소효율에 직접적인 영향을 미치는 요인은 비산유출되는 미세입자에 의한 미연

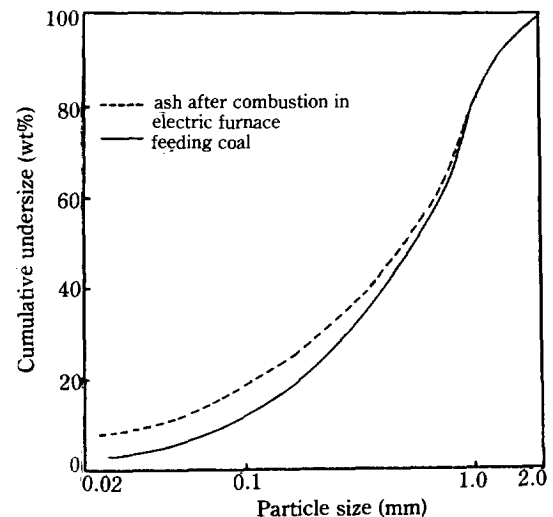


Fig. 3. Size distributions of coal fed through screw feeder and of ash after combustion in electric furnace.

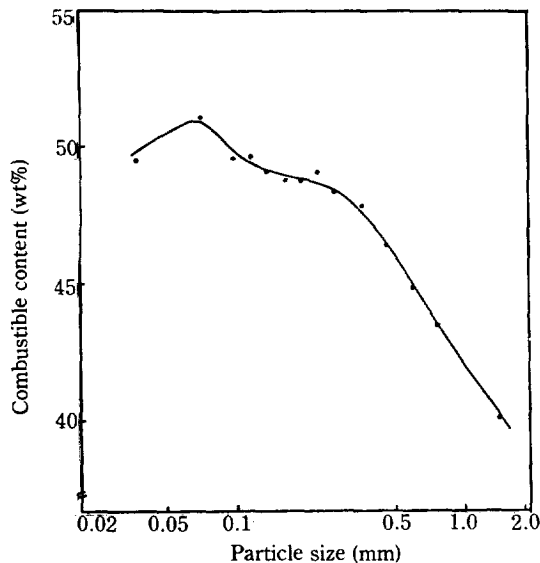


Fig. 4. Combustible content in each size interval of feeding coal.

소분 손실, 하단 및 상단층으로부터 배출되어 회재내에 포함되는 미연소분 손실, 그리고 배기가스중에 함유된 CO가스에 의한 미연소분 손실 등이다[17]. 이들 미연소분 손실은 석탄의 종류 및 입경분포, 조업조건 등에 따라 큰 차이를 나타내므로[16] 본 실험조건에서의 미연소분 손실특성을 우선 파악하고자 하였다.

먼저 단단 유동층 연소장치에서 가스공탐속도에 따른 미연소분 손실특성을 측정하여 그 결과를 Table 3에 나타냈다. Table 3에서 보면 단단 유동층 연소장치에서 비산유출되는 미세입자에 의한 미연소분 손실이 전체 미연소분 손실의 대부분을 차지함을 알 수 있는데, 이는 석탄중에 함유된 미세입자가 로내 체류시간이 짧아 연소가 거의 일어나지 않은 상태로 유출되기 때문이다[1]. 이 때 전체 미연소분 손실에 대한 비산유출되는 미세입자에 의한 미연소분 손실의 비율은 가스공탐속도가 클수록 증가하는데, 이것은 가스공탐속도가 클수록 입자에 가해지는 drag force가 증가하여 더 큰 입자까지 비산유출되기 때문이다[17]. 반면에 층내로부터 배출되는 비교적 큰 회재는 층내 체류시간이 길어 거의 완전연소된 후 배출되므로 이로 인한 미연소분 손실은 크지 않으며, 또한 배출되는 연소가스중의 CO 농도는 500 ppm 이하로서 이로 인한 미연소분 손실은 무시할 수 있을 정도로 적음을 알 수 있었다.

이상에서 살펴본 단단 유동층 연소장치의 미연소분 손실특성으로 미루어 볼 때 연소효율을 증진시키기 위

Table 3. Combustible loss and CO concentration in flue gas from the single-stage fluidized bed combustor($T_{b1} = 900^{\circ}\text{C}$)

U_o (m/sec)	F_c (g/min)	Combustible loss rate(g/min)			CO (ppm)
		bed drain	carry-over	total	
0.9	37.47	0.55	4.92	5.47	425
1.1	44.42	0.53	6.36	6.89	400
1.3	51.39	0.57	8.12	8.69	430
1.5	58.33	0.49	9.95	10.44	440

T_{b1} : bed temperature at 10 cm above distributor

U_o : superficial gas velocity

F_c : coal feeding rate

해서는 비산유출에 의한 미연소분 손실을 저감시킬 수 있는 방안을 모색해야 함을 알 수 있다.

3-2. 단단 유동층과 2단 선회류 유동층 연소장치의 연소특성 비교

3-2-1. 미세입자의 비산 유출특성

새로운 개념으로 설계된 2단 선회류 유동층 연소장치의 연소특성을 규명하기 위하여 동일한 조업조건으로 단단 유동층과 2단 선회류 유동층 연소장치에서 각각 석탄의 연소실험을 행하여 미세입자의 비산유출 특성을 측정한 결과를 Table 4에 나타냈다. Table 4에서 보면 2단 선회류 유동층 연소장치에서는 상단 일류관을 통해 정상적으로 회재가 배출되고 있고, 나머지 일부가 비산유출되는데 그 비산유출량은 단단 유동층 연소장치에 비해 훨씬 적으나, 비산유출량과 상단층의 일류관으로부터 배출되는 회재량을 합하면 단단 유동층 연소장치의 비산유출량과 거의 비슷함을 알 수 있다. 이로부터 본 2단 선회류 유동층 연소장치에서는 하단으로부터의 연소가스가 노즐을 통해 선회류를 형성하면서 상단으로 유입되므로 하단으로부터 유출되는 미연소 입자중 아주 작은 입자 일부는 연소가스에 함유되어 그대로 비산유출되지만 비교적 큰 입자들은 선회류 효과에 의해 연소가스로부터 분리되어 상단 유동층내로 축적되고, 이 축적된 미연소 입자들은 2차 공기에 의해 유동화되면서 재연소된 후 상단 유동층의 일류관을 통한 배출이 잘 이루어졌다. 이 때 상단 유동층은 2차 공기만으로 유동화되므로 가스공탐속도가 낮아 떨어진 미연소 입자들은 재비산되지 않고, 층내에 머물면서 재연소가 일어난 후 일류관을 통해 배출되므로 상단 유동층으로부터 배출되는 회재중의 가연성 성분 함량은 7% 이하로 낮아짐을 볼 수 있었다.

Table 4. Data of carry-over in the single- and in the two-stage swirl-flow fluidized bed combustor($T_{b1} = 900^\circ\text{C}$)

U_0 (m/sec)	F_c (g/min)	Single-stage		Two-stage			
		carry-over		carry-over		drain from 2nd bed	
		rate(g/min)	$C_d(\%)^*$	rate(g/min)	$C_d(\%)$	rate(g/min)	$C_d(\%)$
0.9	37.47	11.91	41.29	6.85	31.03	3.58	6.49
1.1	44.42	15.44	41.21	9.21	31.52	4.60	6.74
1.3	51.39	19.55	41.55	12.82	31.32	4.96	6.91
1.5	58.33	24.32	40.92	16.99	30.25	5.08	6.66
							total (g/min)

* : combustible content

또한 2단 선회류 유동층 연소장치로부터 비산유출되는 미세입자중의 가연성 성분 함량은 단단 유동층 연소장치에 비해 10% 정도 낮아지는데, 이것은 2단 선회류 유동층 연소장치에서는 상단에서 형성되는 선회류 효과에 의해 비산유출되는 미연소 입자의 로내 체류시간이 길어지고[25] 또한 상단 유동층내로 포집된 미연소 입자가 재연소됨에 따라 연소로 상부의 온도가 단단 유동층 연소장치에 비해 높게 유지되므로 미연소 입자의 연소 반응속도가 더 빠르기 때문이다.

3-2-2. 연소로내 온도분포

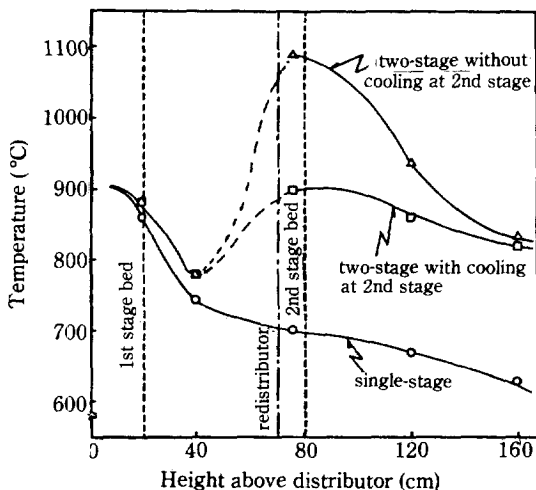
2단 선회류 유동층 연소장치의 로내 수직 온도분포는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 하단의 층내 온도를 900°C 로 일정히 유지시켰음에도 불구하고 상단의 온도는 2단 선회류 유동층 연소장치가 단단 유동층 연소장치에 비해 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 결과가 나타나는 이유는 2단 선회류 유동층 연소장치의 상단에

서는 선회류 효과에 의해 하단 공기분산판으로부터 70 cm 높이에 위치한 상단 분산판 상부에 미연소 입자가 포집되어 2차 공기에 의해 유동화하면서 재연소가 일어나기 때문이다. 이 때 40 cm 부근의 로내 온도가 층온도에 비해 훨씬 낮게 나타나는데 이것은 층온도를 조절하기 위해 공급되는 냉각수가 이 부분에서 유입되기 때문이다. Fig. 5에서 층고 40 cm-70 cm 사이는 저온에서 고온으로 급격한 상승이 있게 됨으로 이 지점은 점선으로 표시하였다.

이와 같이 2단 선회류 유동층 연소장치에서는 선회류에 의해 포집된 미연소 입자가 상단 유동층내에서 재연소됨에 따라 상단부분에 냉각을 시키지 않는 경우에는 Fig. 5에서 보는 한 예와 같이 상단의 온도가 회재의 소결점 이상으로 높아져 정상 운전이 불가능하게 된다. 따라서 본 실험에서는 상단에 냉각 코일을 설치하여 그 냉각수량에 의해 상단의 층온도를 하단의 층온도와 같게 900°C 로 조절하였다. 그리고 하단과 상단층 온도를 850°C , 950°C 로 유지한 결과도 Fig. 5와 유사하게 나타났다[27].

3-2-3. 연소효율

2단 선회류 유동층 연소장치에서는 상단내의 선회류 효과로 인해 미세입자중의 일부가 상단 분산판 위로 포집되므로 비산유출되는 미세입자의 양이 크게 감소되고 또한 포집된 미연소 입자는 상단 층내에서 2차 공기에 의해 유동화하면서 충분히 연소된 후 배출되므로 상단에서 배출되는 회재 중의 가연성 성분 함량은 아주 낮아진다. 그리고 비산 유출되는 미세입자는 선회류 효과에 의해 로내 체류시간이 길어지고[26] 상단 freeboard부분의 온도가 높게 유지되므로 단단 유동층 연소장치에 비해 상단 freeboard부분에서 더 많이 연소된 후 배출됨에 따라 비산유출 회재중의 가연성 성분 함량이 낮아져 연소로 전체의 미연소분 손실량이 감소된다. 이에 따라 Fig. 6에서 보는 바와 같이 2단 선회류 유동층

**Fig. 5. Axial temperature profiles of single- and two-stage fluidized bed combustor ($T_{b1} = 900^\circ\text{C}$, $U_{o1} = 1.1\text{m/sec}$).**

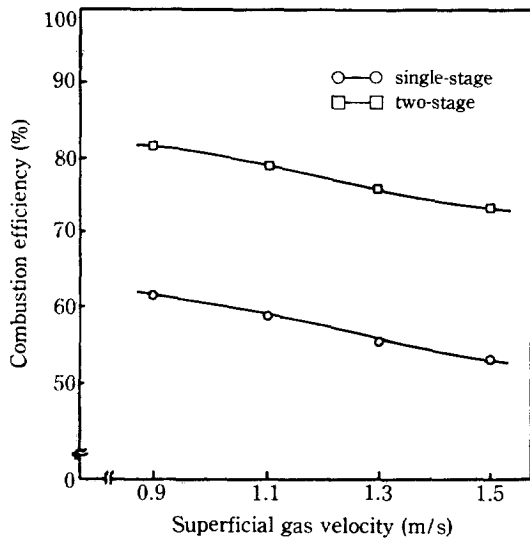


Fig. 6. Comparison of combustion efficiency between single- and two-stage fluidized bed combustor ($T_{b1} = 900^{\circ}\text{C}$).

연소장치는 동일한 조건의 단단 유동층 연소장치에 비해 약 20% 정도의 연소효율 증진효과를 얻을 수 있을 것을 알 수 있었다.

사용한 석탄의 종류 및 조업조건이 달라 다른 연구결과들과 직접적인 비교는 곤란하였고, 본 2단 선회류 유동층 연소장치의 연소효율 증진효과는 Hirama 등[5]이 제안한 2단 유동층 연소장치의 연소효율 증진효과(3~4%)보다는 훨씬 크며, Castleman[18], Tatebayashi[8], Valk 등[7]에 의해 보고된 비산유출회재를 재순환시키는 재순환 유동층 연소장치에서의 연소효율 증진효과와 비슷한 정도라고 생각된다.

3-2-4. CO 배출량

단단 유동층과 2단 선회류 유동층 연소장치에서 석탄을 연소할 때 높이에 따라 4지점에서 연소가스 중의 CO 농도를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 보면 단단 유동층의 경우가 2단 선회류 유동층 연소장치에 비해 약간 높은 CO 농도값이 나타나는데 이는 단단 유동층 내의 온도가 다소 낮기 때문이라 생각된다. 그리고 2단 선회류 유동층 연소로의 경우 총고 120 cm 지점에서 CO 농도가 급격히 떨어진 것은 2차 공기에 의해 연소되었기 때문이라 생각되며 이 부분에서의 반응기구는 좀 더 규명되어야 할 것이다. 2단 선회류 유동층 연소장치의 최종배출 연소 가스중의 CO 농도는 350 ppm으로 다른 연구자들에 의해 보고된 결과[12, 19]와 비슷한 값을 보였으며, 이로 인한 미연소분 손실

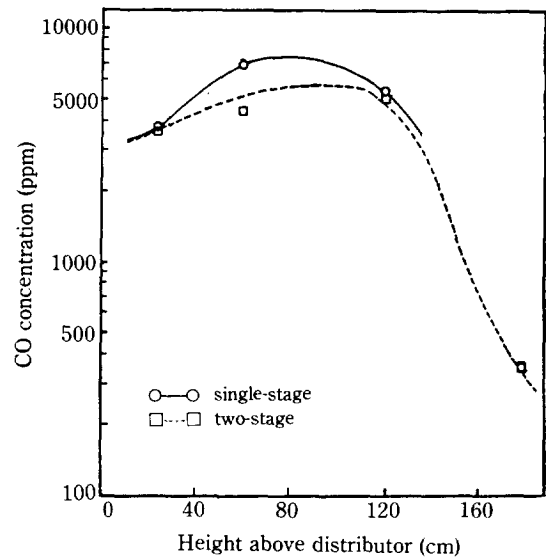


Fig. 7. Axial distributions of CO concentration in single- and two-stage fluidized bed combustor ($T_{b1} = 900^{\circ}\text{C}$, $U_{01} = 1.1 \text{ m/sec}$).

은 무시할 수 있을 정도로 적음을 알 수 있다.

3-2-5. 압력손실

Hirama 등[5]이 제안한 2단 유동층 연소장치에서는 bubble cap type의 상단 분산판을 설치함에 따라 단단 유동층 연소장치에 비해 압력손실이 커지게 된다.

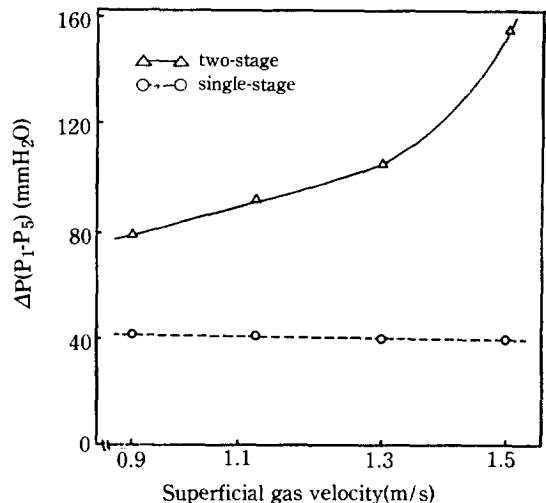


Fig. 8. Comparison of pressure difference between single- and two-stage fluidized bed combustor (P_1 : static pressure at 2cm above distributor, P_5 : static pressure at 170 cm above distributor).

이들이 제안한 2단 유동층 연소장치에서는 재분산판 설치로 인한 압력손실이 연소효율의 2% 증진효과에 상당하는 에너지 손실을 초래하지만 재분산판을 설치함으로써 얻어지는 연소효율의 증진효과는 이보다 큰 3-4%이기 때문에 이 문제는 해결할 수 있다고 보고하였다. 이 연구자들의 결과를, 본 연구의 압력손실 측정결과와 비교하기 위해, 에너지 손실량을 압력손실(mmH_2O)로 환산해 보면 가스공탐속도가 1.1m/sec 일 때, 압력손실은 $1,030\text{mmH}_2\text{O}$ 정도 되어 일반 유동층 연소장치에서의 유동층 형성에 따른 압력손실이 약 $500\text{mmH}_2\text{O}$ 정도인 점을 감안할 때 이 압력손실은 대단히 큰 값이다. 그러나 본 연구의 2단 선회류 유동층 연소장치에서는 노즐의 설치로 인한 압력손실이 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 가스공탐속도가 $0.9-1.5\text{m/sec}$ 의 범위에서 $32-157\text{mmH}_2\text{O}$ 정도로 아주 작아 이로 인한 소요동력의 증가는 크지 않다.

4. 결 론

유동층 연소로의 출구면에서 배출되는 연소가스가 상승하면서 선회류를 형성할 수 있도록 노즐이 부착되고 또 2차 공기는 axial flow가 되도록 설계된 상단 분산판이 삽입된 2단 선회류 유동층 연소장치와 단단 유동층 연소장치에서 각각 저품위 무연탄(총 발열량 = $2,810\text{kcal/kg}$, 입경 $< 2\text{mm}$)의 연소실험을 행하여 이 두 결과를 비교함으로써 2단 선회류 유동층 연소장치의 연소특성을 파악한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선회류 효과에 의해 미세입자가 상단 유동층내로 포집되므로 2단 선회류 유동층 연소장치에서 미세입자의 비산유출량은 단단 유동층 연소장치에 비하여 크게 감소하였다.

2. 상단 유동층에 포집된 미연소 입자들은 2차 공기에 의해 재연소되고, 연소로 상부의 온도가 높게 유지되며 미세입자의 로내 체류시간이 길어짐에 따라 비산 유출되는 회재와 상단에서 일류되는 회재중의 가연성 성분의 함량이 크게 감소된다. 그 결과 2단 선회류 유동층 연소장치에서의 연소효율이 동일 조건의 단단 유동층 연소장치에 비해 약 20% 정도 증진되었다.

3. 2단 선회류 유동층 연소장치에서는 연소로 상부의 온도가 높게 유지되고 선회류 효과에 의해 연소가스중의 CO와 2차 공기의 혼합효과가 커 연소가스중의 CO 농도는 동일 조건의 단단 유동층 연소장치에 비하여 낮았으며, 최종 배출가스중의 CO 농도는 약 350ppm 이

었다.

4. 상단 분산판 설치로 인한 압력손실은 가스공탐속도 $U_{01}=0.9-1.5\text{m/sec}$ 범위에서 $32-157\text{mmH}_2\text{O}$ 정도로 아주 낮아 선회류 유도관 설치로 인한 동력손실은 아주 낮았다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구비(1987)에 의해 이루어진 연구결과와 일부이다. 당 재단에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Delong, M.M., et al.: Proc. of the 9th Int. Conf. on FBC, 132 (1987).
2. Radovanovic, M.: "Fluidized Bed Combustion", Hemisphere Publishing Cor. New York, (1986).
3. Chen, T.P. and Saxena, S.C.: Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf., 151 (1978).
4. Takagi, H., et al.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 279 (1985).
5. Tomita, M., et al.: Reports of the Government Industrial Development Laboratory, Hokkaido, Japan, ISSN 0385-194X, (1984).
6. Jixiang, L., et al.: Proc. of the 9th Int. Conf. on FBC, 1096 (1987).
7. Valk, M., Radovanovic, M., and Alblas, B.P.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 1408 (1985).
8. Tatebayashi, J. and Tsutsumi, K.: Proc. of the 1st Korean-Japan Sym. on Fluidization, 20 (1987).
9. Chen, Y.S., et al.: Proc. of the 8th Int. Sym. on Combustion, 243 (1981).
10. Fujiwara, N., et al.: Proc. of the 1st Korean-Japan Sym. on Fluidization, 1 (1987).
11. EPA Report, EPA-600/7-81-074 (1981).
12. Hiram, T., Tomita, M., and Adachi, T.: *Environ. Sci. Technol.*, **14**(8), 960 (1980).
13. Hiram, T., et al.: Proc. of the 4th Int. Conf. on Fluidization, 467 (1983).
14. Hiram, T., et al.: *Nenryokyoikaishi*, **59**(642), 833 (1980).
15. Naude, D.P. and Dutkiewicz, R.K.: Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf., 280 (1978).
16. Horio, M., Hoshiba, M., and Oyama, T.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 130 (1985).
17. Choi, J.H., et al.: *Korean J. of Chem. Eng.*, **2**(2), 111 (1985).
18. Castleman, J.M.: Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, 196 (1985).

19. Zobeck, B.J., et al.: Proc. of the 9th Int. Conf. on FBC, 330 (1987).
20. Son, J.E., et al.: KE Report 82T-8 (1982), KE-83-16 (1983), KE-84-11 (1984).
21. KAIST Report, N-25(2)-2062-6-2 (1984), BSN-15-2186-6 (1985), N-105-2372-6 (1985).
22. Park, D.K. and Lee, J.K.: *J. KICChE*, **25**, 55 (1987).
23. Park, W.H., et al.: *ibid.*, **25**, 345 (1987).
24. Son, J.E. and Bak, Y.C.: *ibid.*, **25**, 546 (1987).
25. Gupta, A.K., et al.: Swirl-flow, Abacus Press, Kent, 295-371 (1984).
26. Lim, J.H.: M.S. Thesis, Korea Univ., (1987).
27. Hu, C.G.: Ph.D. Thesis, National Fisheries Univ. Pusan (1988).