

2단 선회류 유동층 연소로내에서 Paper Sludge의 소각

이제근 · 이기호 · 이규현* · 전해수**

부산수산대학교 환경공학과

*선경건설(주) 연구소

**고려대학교 화학공학과

(1990년 3월 8일 접수, 1990년 5월 17일 채택)

Incineration of Paper Sludge Wastes in a Two-Stage Swirl-Flow Fluidized Bed Combustor

Jea Keun Lee, Ki Ho Lee, Kyu Hyun Lee* and Hai Soo Chun**

Dept. of Environ. Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea

**Sunkyoung Engineering and Construction Limited, Seoul 110-300, Korea*

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

(Received 8 March 1990; accepted 17 May 1990)

요 약

2단 선회류 유동층 연소로에서 수분함량이 높은 paper sludge의 소각을 위한 기초자료를 얻기 위해 유동화 공기속도, 연료주입량, 층온도 및 양론공기비를 변화시키면서 소각실험을 행하였다.

밀도가 낮은 paper sludge의 유동층 연소에 있어 층매질과 paper sludge간의 밀도차로 인한 분급현상에 의해 유동층내의 온도분포는 균일하지 않았다. 또한 연소가스중에 함유되어 하단 유동층으로부터 유출되어 상단 freeboard에 유입된 미세입자중 일부는 선회류 효과에 의해 가스흐름으로부터 분리되어 상단 유동층내에서 재연소가 일어나고, 연소로 밖으로 유출되는 입자들도 선회류 흐름을 따라 움직이기 때문에 로내 체류시간이 길어져 연소효율은 단단 유동층 연소로에 비해 증가하였다.

Abstract—Incineration experiments are carried out to obtain the fundamental data for application of a two-stage swirl-flow fluidized bed combustor to the incineration of paper sludge wastes with high moisture content. Experimental parameters are identified as the fluidizing air velocity, fuel feed rate, bed temperature and stoichiometric air ratio.

Experimental results show that temperature distribution within the fluidized bed is not uniform due to the segregation by density difference between bed materials and paper sludge. A part of unburnt fines entrained from the lower bed are separated from the gas stream due to the swirling effect in the upper stage freeboard of the combustor, and eventually settled down on the upper bed and burnt by secondary air. Further, the non-separated remainder has a long residence time as it moves along the swirling flow. Therefore, the combustion efficiency of paper sludge in the two-stage swirl-flow fluidized bed combustor is enhanced compared with that in the single-stage fluidized bed combustor under the same operating conditions.

1. 서 론

고형 폐기물의 처분은 폐기물 종류의 다양성 때문에

그 처리법도 여러 가지 방법(토양매립, 해양투기, 농지살포, 열분해 또는 연소법)이 보고되어 왔으나 1970년대까지는 토양매립에 의한 처리법이 크게 행해져

왔다. 그러나 유독성 물질을 함유한 폐기물을 매립에 의해 처리할 경우 2차 환경오염(토양오염 및 지하수 오염)을 야기시킬 수 있고, 한편으로는 가용한 자원을 폐기하는 결과를 초래하게 되므로 선진국의 경우 유독성 폐기물의 처리면과 폐자원의 활용(에너지화)면을 동시에 고려한 연소법(또는 소각법)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-5].

연소로의 종류로는 다단로(multiple-hearth furnace), 유동층로(fluidized-bed furnace), 전기 적외선로(electric infrared furnace), 회전로(rotary kiln) 등이 보고되고 있으나[1, 5], 유동층 연소로(또는 유동층 소각로)는 다른 연소장치에 비해 층내 혼합효과가 커서 연소 효율이 높고, 높은 전열율과 비교적 저온 연소 가능성으로 인한 NO_x 배출량 감소 등의 장점이 있고, 또한 높은 연소강도를 얻을 수 있어 다른 연소장치에 비해 저 발열량 물질(또는 연료) 연소도 가능하여 최근들어 각종 폐기물의 소각에 활용되고 있다[2-5]. 그러나 유동층 연소장치에서 석탄이나 고형 폐기물을 연소시킬 경우 연료의 분쇄과정, 주입과정 및 유동화시 입자 충돌에 의해 생성되는 미세입자들이 연소로내에서 체류 시간이 충분하지 못해 미연소된 상태로 비산유출됨에 따라 연소효율이 낮아지고, 비산유출되는 미세입자들이 대기오염의 원인이 되고 있다. 또한 유동층 연소로내에서 밀도가 낮은 폐기물을 연소시킬 경우엔 유동층내에 주입된 연료가 층매질과 완전혼합이 일어나지 않고 우회(bypass) 현상에 의해 층내 체류시간이 짧고 대부분이 freeboard내에서 연소가 일어나게 되므로 유동층 연소로 설계시 미연입자의 완전연소를 위한 freeboard 높이(통상 8-11 m)와 freeboard내에서 연료와 공기의 혼합효과를 증진시킬 수 있는 방법 등이 설계의 큰 변수로 작용하고 있다.

Lee 등[6-8]은 기존 유동층 연소장치에서 나타나는 미세입자의 비산유출 문제와 freeboard부에서 연료와 공기의 부적절한 혼합문제를 개선하기 위한 방안으로써 2단 선회류 유동층 연소로를 고안하여 저질무연탄 연소실험을 통해 기본적인 연소특성을 밝힌 바 있다. 이 연소장치의 특징은 Fig.1에 나타낸 바와 같이 하단 유동층을 통과한 1차 연소가스(미연소된 미세입자를 함유한)가 상단분산판에 부착된 선회류 유도노즐을 통과하면서 상단 freeboard부에서 선회류를 형성하게 된다. 상단 freeboard부에서 형성된 선회류 효과에 의해 가스흐름중에 함유된 미연소 입자의 일부가 연소로 내벽에 충돌하여 불활성 매질로 이루어진 상단 유동층내로 떨어지고, 여기에 떨어진 미연소 입자들은 상단

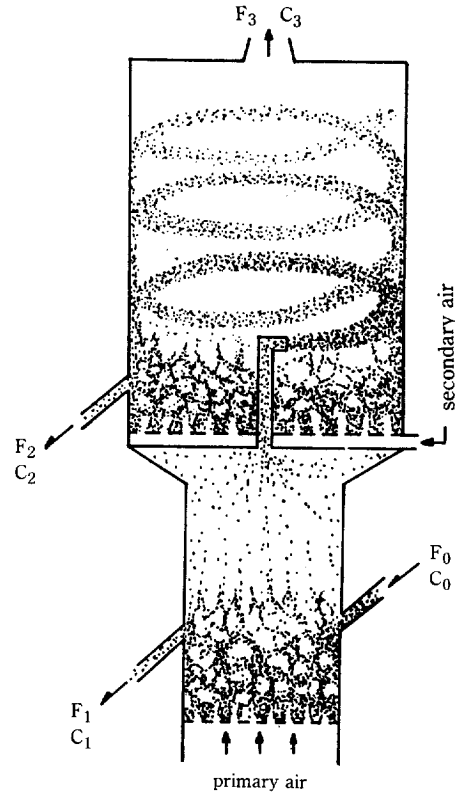


Fig. 1. Presentation of a two-stage swirl-flow fluidized bed combustor.

유동층 매질과 함께 2차 주입공기(축류흐름)에 의해 유동화하면서 재연소가 일어난다. 또한 연소로 내벽에 충돌하지 않고 가스흐름중에 섞여 비산유출되는 미연소 입자도 선회류 흐름을 따라 나선으로 움직이기 때문에 체류시간이 길어지며, 동시에 상단 freeboard부에서 선회류 흐름(1차 연소가스)과 축류흐름(2차 연소가스)의 공존에 의해 난류강도가 커져 공기-연료간 접촉효과가 증진되어 2단 선회류 유동층 연소가 단단 유동층 연소로에 비해 연소효율이 크게 증가된다고 보고하였다.

그러나 유동층 연소에 있어 연료의 종류, 물리적 성상 및 조성이 바뀌면 연소특성 또한 변하게 되므로, 연료가 선정되면 그 연료특성에 맞는 유동층 연소로의 설계 및 조업조건이 결정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 제지공장에서부터 폐기되는 고형폐기물으로써 기존 유동층 연소로에서 연소할 경우 미연 입자의 과다한 비산유출에 따른 연소효율 저하가 문제시되는 paper sludge를 연료로 선정하여 이의 유동층 연소실험을 행하여 그 연소특성을 살펴보고, paper sludge 연소에

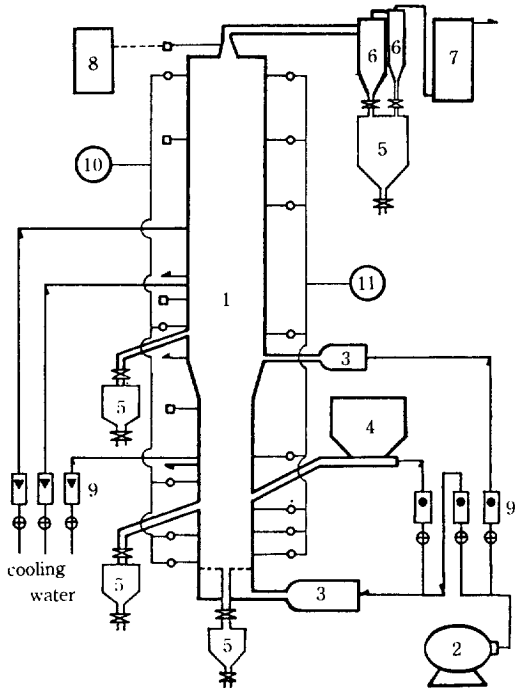


Fig. 2. Schematic flow diagram of experimental apparatus.

- 1. Combustor
- 2. Compressor
- 3. Air preheater
- 4. Fuel hopper and screw feeder
- 5. Ash hopper
- 6. Cyclone
- 7. Bag filter
- 8. Gas analyzer
- 9. Rotameter
- 10. Pressure measuring unit
- 11. Temperature measuring unit and recorder

2단 선회류 유동층 연소로의 적용을 위한 기초자료를 얻기 위해 동일 크기의 단단 유동층 연소로와 2단 선회류 유동층 연소로에서 각각 연소실험을 행하여 그 성능을 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 연구에 사용한 유동층 연소설비 공정의 흐름도를 Fig. 2에 나타냈다. 실험설비는 유동층 연소로, 연료공급기, 압축공기 공급기, 공기 예열장치와 압력 및 온도 측정 계기로 구성되어 있다.

2단 선회류 유동층 연소로는 상단 공기분산판을 중심으로 상단과 하단으로 구성되어 있는데 연소로 하단은 내경 11 cm, 높이 70 cm인 스테인레스 강관으로,

상단은 내경 15.6 cm, 높이 100 cm인 스테인레스 강관으로 제작하였다. 연소로 하부 외벽에는 조업을 시작할 때 층내온도를 연료의 착화온도까지 예열시키기 위해 전열선(Kantal heating element)을 감고 연소로 전체 외벽에는 ceramic wool을 20 cm이상 두께로 감아 단열시켰다. 또한 연소로 각 지점에서의 온도 및 압력을 측정하기 위해 높이별로 열전대와 압력측정탭을 필요한 위치에 각각 설치하였으며 유동층 내부의 연소상태를 관찰할 수 있도록 하단 공기분산판으로부터 25 cm 상부에 투시경을 설치하였다. 로내 온도조절을 위해서 하단에는 환형 냉각관을 층내에 수직으로 삽입하여 설치하고, 상단에는 연소로 외벽에 냉각코일(내경 1 cm인 스테인레스관)을 감아 냉각수 주입량에 의해 상하단 층표면 온도를 각각 조절하였다. 하단 공기분산판은 개공비 1.2%인 multi-orifice형 분산판을 사용하였으며, 상단 공기분산판은 전보[6-8]에서 사용한 바 있는 axial-plus-tangential entry swirl generator에 상당한 분산판을 사용하였다. 본 실험에 사용된 선회류 유도노즐의 내경은 1.28 cm이고, 노즐높이는 25 cm이다.

연료의 공급은 주입량 조절이 가능한 screw feeder를 사용하였으며 연료의 층 하부주입(underbed feeding)과 층 상부주입(overbed feeding)을 각각 실험하기 위해 하단 공기분산판으로부터 5 cm 상부지점과 25 cm 상부지점에 screw feeder를 설치하였다. 그리고 하단 유동층내의 화재는 하단 공기분산판으로부터 20 cm 상부의 연소로 벽면에 설치된 일류관 또는 하단 공기분산판 중앙에 부착된 하부 배출관을 통해 배출하며, 하단 유동층 높이는 20 cm로 일정하게 유지하도록 하였다. 또한 상단 유동층내의 화재는 상단 공기분산판으로부터 10 cm 상부에 부착된 일류관을 통해 배출하며, 상단 유동층 연소로 높이는 10 cm로 유지되도록 했다.

연소실험을 시작할 때는 단단 유동층 연소로의 경우 층매질로 -10~+20 mesh 범위의 모래입자를 1100 g 정량하여 하단에 주입하고, 2단 선회류 유동층 연소로의 경우엔 하단 층매질로 단단 유동층 연소로에서와 같은 크기의 모래를 1100 g 주입하고 상단층 매질로는 -100~+150 mesh 범위의 모래입자를 600 g 정량하여 상단에 주입하였다.

연소용 공기는 공기압축기로부터 1차 및 2차 공기로 나뉘어져 로타메터를 거쳐 공기 예열기로서 예열시킨 후 1차 공기는 하단 공기분산판을 통해, 2차 공기는 상단 공기분산판의 윗쪽 다공판을 통해 축방향으로

Table 1. Experimental conditions

Variables	Conditions
Lower bed temperature (°C)	$T_{bl} = 800, 900$
Primary superficial gas velocity (m/s)	$U_{01} = 0.67, 0.86, 1.05, 1.29$
Air flow ratio (-)	$Q_1/Q_2 = 2.68, 3.45, 4.19, 5.14$
Fuel feed rate(g/min)	$F_0 = 28.82, 33.77, 38.54, 44.62$
Fluidized bed height (cm)	
lower bed:	$h_1 = 20$
upper bed:	$h_2 = 10$
Air-fuel ratio (-)	$\lambda = 1.05, 1.2, 1.41$

주입된다. 연소로 상부로 배출된 연소가스는 직렬로 연결된 2개의 cyclone과 bag filter를 거치면서 가스 중에 함유된 입자가 포집된 후 배출관을 통해 배출된다.

측방향 압력분포 측정을 위해 하단 공기분산판으로부터 2, 12, 30, 86, 160 cm 높이에 압력측정탐을 설치하였고, 측방향 온도분포를 측정하기 위해 역시 6, 14, 20, 40, 86, 118, 138, 158 cm 높이에 K형(chromel-alumel) 열전대를 설치하였으며 측정된 온도와 압력은 자동기록계에 의해 연속적으로 기록되었다.

2-2. 실험방법

연소실험을 시작할 때는 먼저 층매질을 주입한 후 예열된 공기를 공급하면서 연소로 외벽에 감은 전열선을 이용하여 층매온도가 paper sludge의 착화온도 이상인 500°C가 될 때까지 가열시켜, 층매온도가 500°C 이상이 되면 paper sludge를 서서히 공급한다. Paper sludge가 착화되면 전열선의 전원을 끄고 미리 보정된 screw feeder의 입력전압을 조절하여 연료 공급량을 원하는 양까지 점차로 증가시키고 동시에 공기 주입량도 필요한 양까지 서서히 증가시킨다. 이 때 주입된 연료의 연소에 의한 급격한 층매 온도상승을 막기 위해 연소로 상 하단에 설치된 냉각관에 냉각수를 공급하여 층표면의 온도를 일정조건으로 유지하였다.

층매질과 주입한 연료(paper sludge)와의 혼합특성을 살피기 위해 하단 일류관을 통해 배출되는 물질 중 모래의 양을 시간에 따라 측정하였다. 또 연소상태가 정상상태에 도달하게 되면(조업시작후 6-7시간후), 각 실험조건에서 층매 온도분포와 freeboard부의 온도분포를 각각 측정하였다.

Paper sludge 유동층 연소시 미연소분 손실특성 및

Table 2. Composition of paper sludge used in the experiments

Analysis		wt%
Proximate	Moisture	44.60
	Combustibles	44.71
	Ash	10.69
Ultimate (dry basis)	C	39.32
	H	6.44
	N	2.27
	O + S	30.68
	Ash	21.29
Calorific value (gross, kcal/kg)		3760

효율을 파악하기 위해 각 실험조건(Table 1)에서 연소상태가 정상상태에 도달하게 되면 상단 및 하단 유동층의 일류관을 통해 배출되는 회재와 연소로 상부의 배출관을 통해 유출되는 회재를 10분 간격으로 7회씩 각각 포집하여 포집된 회재의 무게, 가연성 성분함량 및 발열량을 각각 측정하였다. 이 때 연소효율은 발열량을 기준하여 계산하였다.

2-3. 시료

본 연구에서 사용한 paper sludge의 공업분석치와 원소분석치를 Table 2에 나타냈다. Table 2에서 보면 본 실험에 사용된 paper sludge는 수분함량(44.6%)이 높고 회분함량(10.7%)이 비교적 낮으며 나머지 대부분이 가연성 성분으로 구성된 연료임을 알 수 있다. 실험에 사용한 paper sludge는 제지공장에서 탈수되어 나온 것을 수분함량 44.6%로 건조한 후 치차 파쇄기(toothed-roll crusher)에 의해 분쇄한 후 체분리하여 5 mm 이하인 것을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

유동층내에서 밀도가 다른 두 종류의 물질이 존재할 경우 조업조건 변화(유동화속도, 입자크기, 밀도차, 농도 등)에 따라 층매에서 혼합이 양호하지 않고 분급현상이 나타나는 것은 이미 널리 알려진 사실이다[9-11]. 본 연구에서는 층매질과 밀도차가 있는 paper sludge를 단단 유동층 연소로에서 연소실험하여 얻은 결과를 전보[6]에서 발표한 바 있는 저품위 무연탄의 연소실험 결과와 비교 검토하고 동시에 paper sludge의 단단 유동층 연소특성과 2단 선회류 유동층 연소특성도 비교하고자 한다.

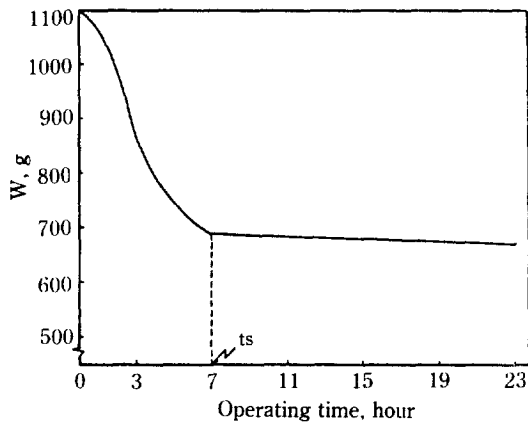


Fig. 3. Variation of bed material (sand) with respect to operating time ($U_{01}=1.05\text{m/s}$, $T_{b1}=800^\circ\text{C}$, $\lambda=1.2$).

3-1. Paper sludge의 단단 유동층 연소특성

층매질과 주입되는 연료(paper sludge)와의 혼합특성을 살피기 위해 조업시작할 때부터 하단 일류관을 통해 배출되는 물질 중 층매질(모래)의 양을 1시간 간격으로 측정된 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 조업 시작전 일정량의 층매질(1100 g)을 연소로내에 주입하고 일정량의 예열공기를 연속적으로 공급하면서 연소로 외벽에 감은 전열선을 작동시키고 조업을 시작하여 정상조업에 들어갈 때 까지는(6-7시간 정도 소요) 층내 온도 상승으로 인해 가스공압속도도 증가하게 되어 층매질의 일부가 연소로 밖으로 계속 넘쳐나오므로 인해 연소로내에 잔류하는 층매질의 양은 초기에 투입한 양보다 크게 감소하지만 정상상태에 도달한 이후에는(Fig. 3의 t_s 이후) 연소로내에 잔존하는 층매질의 양은 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 정상상태에 도달한 이후에는 층매질의 일류배출량은 거의 무시할 정도였으며, 별도의 층매질을 보충 공급하지 않고도 정상상태를 유지하면서 장시간(정상상태 도달 후 16시간 조업) 동안 정상조업할 수 있었다. 유동층내에서 공급된 paper sludge와 유동화 매질간에 완전혼합이 이루어진다면 유동화 매질이 일정량씩 계속 연소로 밖으로 배출되어 시간이 경과함에 따라 유동화 매질의 부족으로 인해 정상조업이 불가능해질 것이나, Nienow와 Chiba [10]가 휘발분 함량이 높고 밀도가 낮은 가연성 물질을 밀도가 큰 입자가 층물질의 대부분을 차지하는(jetsam-rich system) 유동층 연소로에서 연소시킬 경우 밀도가 낮은 가연성 물질은 부유성 입자(flotsam)로 작용한다고 보고한 바와 같이, 본 실험에서도 paper sludge의 회재만 계속적으로 일류배출되는 것으로 보아 paper

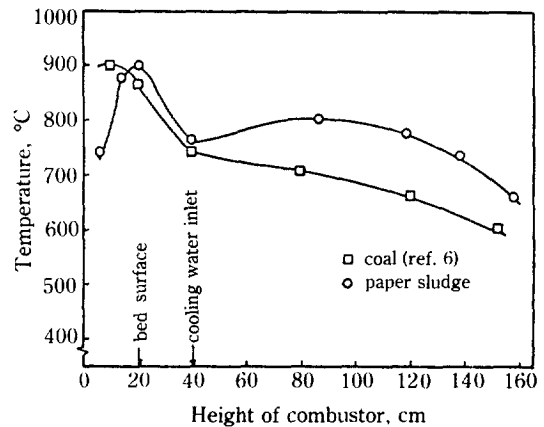


Fig. 4. Axial temperature profiles in a single-stage FBC($U_{01}=0.9\text{ m/s}$ (coal), 0.94 m/s (paper sludge), $T_{b1}=900^\circ\text{C}$, $\lambda=1.2$).

sludge와 층매질간에 완전혼합이 이루어지지 않고 분급현상이 나타남을 알 수 있다.

Paper sludge의 유동층 연소시 연소로 높이에 따른 온도분포를 측정된 결과와 전보[6]에서 이미 발표된 무연탄 연소시의 온도측정 결과를 비교하여 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 보면 무연탄 연소의 경우와 paper sludge 연소의 경우에 연소로 높이별 온도분포가 다르게 나타남을 볼 수 있는데, 전보[6-8]에서 발표한 바와 같이 저품위 무연탄의 유동층 연소에서는 연료로 공급한 무연탄 입자가 연소과정 중에서 크기변화가 거의 일어나지 않고 마모율도 크지 않기 때문에 층매질을 별도로 공급하지 않고도(회재가 층매질로 작용하기 때문에) 정상조업이 가능하였으며, 또 층매질과 주입한 무연탄 입자는 밀도차가 없으므로 층내 혼합이 양호하여 연소는 대부분 층내에서 일어나게 되어 층내부의 온도는 대체로 균일한 분포를 나타낸다. 그러나 수분을 다량 함유한 일반 sludge의 연소에서는 sludge를 유동층 연소로에 주입하게 되면 층매질과의 열전달에 의한 건조과정이 먼저 일어나게 되고 그 다음에 연소과정이 진행된다[2,3]. 특히 수분과 휘발분 함량이 높고 밀도가 낮은 paper sludge를 층상부 주입(overbed feeding)하게 되면 수분과 휘발분 함량이 낮은 무연탄 연소와는 달리 층매질과 paper sludge 사이에 완전혼합이 일어나지 않고 층표면에서 건조가 일어나며 건조된 일부입자는 층표면에서 착화과 동시에 거의 연소되므로 연소시간이 대단히 짧아 층하부에서의 연소는 불가능하여 층내부의 온도분포는 균일하지 않고 층하부로 갈수록 온도가 낮게 나타난다. 그러나 건조된 후 착화되지 못한 입자는 밀도가 더욱 낮아져 연소공

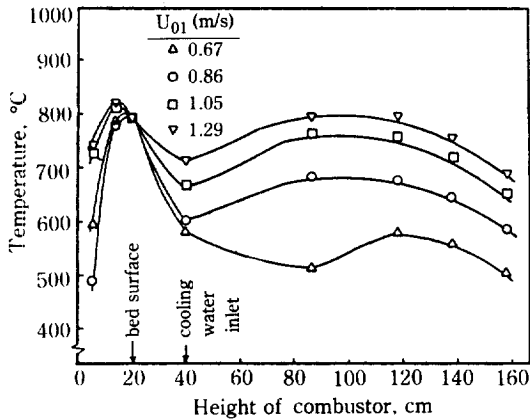


Fig. 5. Variation of axial temperature profiles with the primary superficial air velocity in a single-stage FBC ($T_{b1}=800^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1.2$).

기와 함께 층표면에서 freeboard부로 분출되어 대부분의 연소가 freeboard부에서 진행되므로 freeboard부의 온도는 무연탄 연소의 경우에 비해 전체적으로 높게 나타난다.

Paper sludge의 유동층 연소에 있어서 freeboard부에서 거의 대부분의 연소가 진행되는 현상은 하단 가스공탑속도가 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 나타나 Fig. 5에서 보면 하단 가스공탑속도가 커지면 freeboard부의 온도가 더 높음을 알 수 있다. 이는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 paper sludge 연소의 경우엔 유동화 매질(모래)과의 밀도차로 인해 층매질과 연료간의 완전혼합이 일어나지 않고 층표면에서 건조된 paper sludge 입자는 대부분 연소공기와 함께 층표면에서 분출되어 freeboard부에서 연소가 진행되고 또한 본 실험에서는 하단 가스공탑속도를 증가시킬 경우 전체 공기-연료비(λ)를 일정하게 유지하기 위해서 연료공급량도 비례적으로 증가시켰기 때문에 층표면에서 분출되어 freeboard부로 유입되어 연소되는 입자의 양도 증가하므로 freeboard부의 온도는 더욱 높게 나타나게 된다. 그리고 본 실험에선 층매질로 단일 입경을 가진 모래를 사용하였기 때문에 하단 가스공탑속도가 증가함에 따라 유동화 매질(모래)간에 혼합이 양호하게 되어 층하부의 온도는 상승하는 경향을 보인다. 그런데 Fig. 5에서 하단 공기분산판으로부터 40 cm 지점의 온도가 낮게 측정된 이유는 조업온도를 일정하게 유지하기 위해 냉각관에 공급하는 냉각수의 주입지점이 이곳에 위치하기 때문이다.

이상의 결과들(Fig. 3, 4, 5)은 층매질보다 밀도가 낮고 휘발분 함량이 높은 연료를 유동층 연소시킬 경우

연료와 층매질간에 완전혼합이 일어나지 않고 층표면에서 연소가 일어난다고 보고한 Nienow와 Chiba[10]의 결과와 일치함을 알 수 있다. 본 연구에서는 밀도가 낮은 연료를 유동층 연소시킬 경우 비록 층내에서 분급현상과 연료의 우회현상이 나타나더라도 층내 체류시간을 증가시킬 목적으로 paper sludge 연소에 있어 층하부 주입법(underbed feeding technique)을 시도하였으나 screw feeder에 의해 층내주입이 원활하지 못하였고 screw feeding과 공기주입법(pneumatic feeding)을 병행해야만 원활한 주입이 가능하였다. 그러나 공기주입법을 병행할 경우 연료주입에 많은 양의 공기가 소요되기 때문에 1차 유동화 공기와 2차 유동화 공기의 조절이 불가능하였다. 따라서 연료주입방법에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것이나 본 연구에서는 정상적인 연료주입이 가장 용이한 층상부 주입법(overbed feeding)으로 조업하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 층매질과 밀도차이가 크고 수분과 휘발분을 다량 함유한 paper sludge를 유동층 연소시킬 때 freeboard부에서 대부분의 연소가 진행되기 때문에 기존의 단단 유동층 연소로에서 paper sludge를 연소시킬 경우에는 freeboard내에서의 미연입자의 체류시간을 증대시킬 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 freeboard부에서의 미연입자의 체류시간을 증대시키기 위한 방안으로 Lee 등[6]이 고안한 2단 선회류 유동층 연소로를 선정하여 그 적용가능성을 검토하고자 단단 유동층 연소로에서의 연소실험과 동일한 조업조건으로 2단 선회류 유동층 연소로에서 paper sludge의 연소실험을 행하여 2단 선회류 유동층 연소로에서의 연소특성과 연소로의 성능을 파악하고자 했다.

3-2. Paper sludge의 2단 선회류 유동층 연소특성

2단 선회류 유동층 연소로의 로내 수직 온도분포를 측정하여 단단 유동층 연소로의 수직 온도분포와 비교하여 나타낸 Fig. 6을 보면 하단 유동층 표면 온도와 가스공탑속도 등의 운전조건이 동일함에도 불구하고 단단 유동층 연소로보다 2단 선회류 유동층 연소로의 상부 온도가 높게 나타남을 볼 수 있다. 이는 단단 유동층 연소로에서는 freeboard내에서 공기와 연료의 혼합이 부적당하고 미연입자의 로내 체류시간이 비교적 짧은 반면에 2단 선회류 유동층 연소로에서는 하단 유동층 표면에서 분출된 미연입자를 함유한 가스가 상단 분산판에 부착된 선회류 유도노즐을 통과하면서 상단 freeboard부에서 선회류를 형성하게 되고, 이와

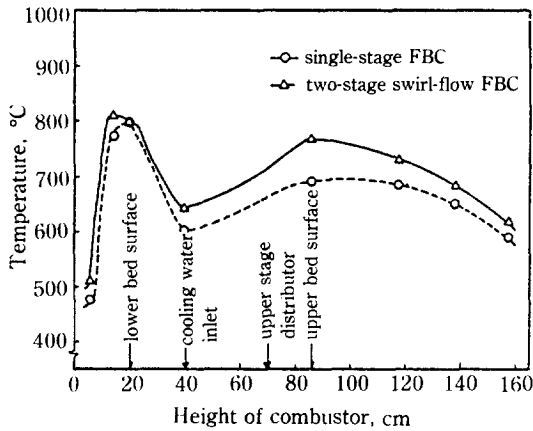


Fig. 6. Comparison of axial temperature profiles between single-stage FBC and two-stage swirl-flow FBC($U_{02}=0.86\text{m/s}$, $T_{b1}=800^\circ\text{C}$, $\lambda = 1.2$).

같은 선회류 효과에 의해서 미연입자의 일부는 연소로 내벽에 충돌하여 상단분산판 상부의 불활성 매질로 이루어진 상단 유동층내로 떨어지고, 떨어진 미연소 입자들은 상단 유동층 매질과 함께 2차 주입공기(촉류흐름)에 의해 유동화하면서 재연소가 일어나게 된다. 그리고 연소가스중에 함유되어 비산유출되는 미연입자는 로내를 선회운동을 하므로 로내 체류시간이 길어지며, 동시에 상단 freeboard부에서는 선회류 흐름과 축방향 흐름이 공존하므로 난류강도가 커져 연료-공기 접촉효과가 증대되기 때문이다.

2단 선회류 유동층 연소로에서 가스공탐속도 변화에 따른 로내 수직 온도분포를 측정된 결과를 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7에서 보면 하단 유동층 표면온도를 일정하게 유지했음에도 불구하고 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 연소로 상단부의 온도가 상승함을 볼 수 있다. 이와같은 이유는 하단 가스공탐속도를 증가시키게 되면 전체 공기-연료비를 일정하게 유지시키기 위해 연료의 공급량도 비례적으로 증가시켰기 때문에 하단 유동층 표면으로부터 상단으로 비산유출되는 미연 미세입자의 절대량이 증가되었을 뿐 아니라 선회류 유도 노즐에서의 가스분사속도도 커지므로 선회강도가 더욱 커져 보다 많은 양의 미연입자가 상단 유동층내로 포집되어 재연소되고, 또한 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 연소가스의 질량유속증가로 인한 현열 증대효과를 가져와 상단부의 온도가 상승하게 된다.

이와같이 미연입자가 상단 유동층내로 포집(trapping)되어 재연소되는 현상은 하단 가스공탐속도에 따른 상단 freeboard내에서의 입자 포집(trapping

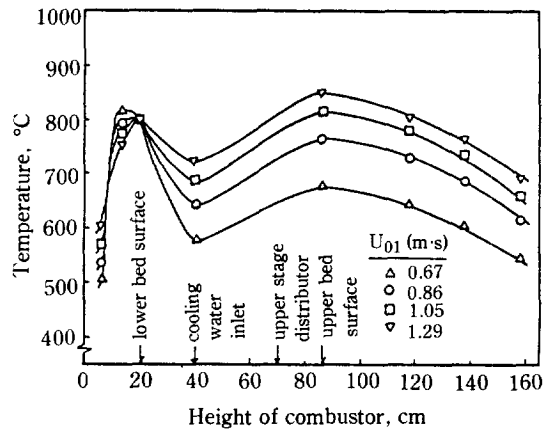


Fig. 7. Variation of axial temperature profiles with the primary superficial air velocity in a two-stage swirl-flow FBC($T_{b1}=800^\circ\text{C}$, $\lambda = 1.2$).

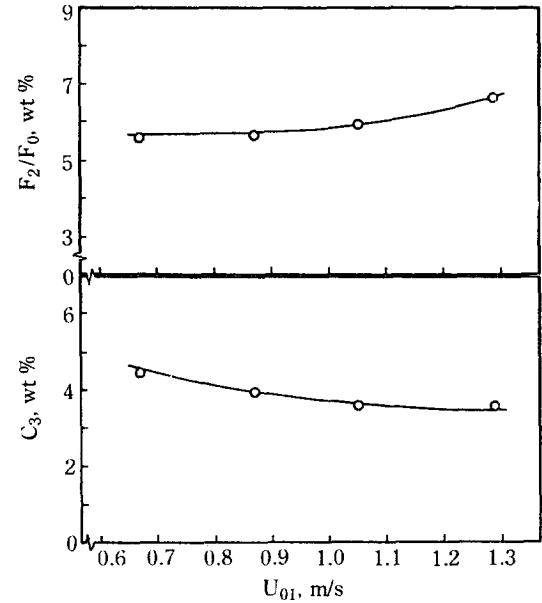


Fig. 8. Variations of trapping rate and combustible content of overflow fines with respect to the primary superficial air velocity ($T_{b1}=800^\circ\text{C}$, $\lambda = 1.2$).

rate)과 상단에서 일류배출된 입자중에 함유된 가연성 성분 함량을 측정된 결과(Fig. 8)에서도 확인할 수 있다. Fig. 8에서 2단 선회류 유동층 연소로의 상단 일류 배출관을 통해 상단 유동층내에 포집된 회재가 정상적으로 배출됨을 볼 수 있는데, 이로써 하단 유동층 표면으로부터 배출된 미연입자를 함유한 배기가스가

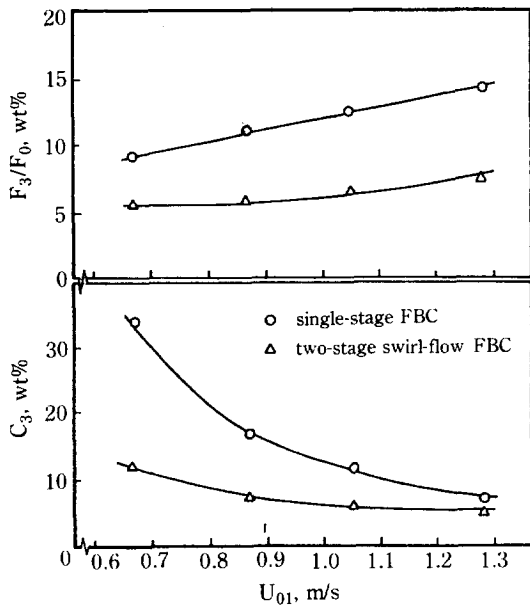


Fig. 9. Variations of carryover rate and combustible content of carryover fines with respect to the primary superficial air velocity ($T_{b1}=800^{\circ}\text{C}$, $\lambda=1.2$).

상단 분산판에 설치된 선회류 유동층을 통과하면서 상단 freeboard부에서 선회류를 형성함에 따라 밀도가 비교적 낮은 미세입자도 효과적으로 포집할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 하단 가스공탐속도가 증가함에 따라 상단 freeboard내에서의 입자 포집률(trapping rate) 역시 증가하는데 이는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 선회류의 선회강도가 커지기 때문이다. 또한 이러한 선회류 효과에 의해 불활성 매질로 이루어진 상단 유동층내로 포집된 입자는 상단분산판의 상부에 부착된 가스 분산판을 통해 측 방향으로 공급되는 2차 공기에 의해 불활성 매질과 함께 유동화하면서 재연소가 일어나므로 상단 일류관을 통해 배출된 회재중의 가연성 성분 함량은 5% 이하로 대단히 낮게 나타났다.

단단 유동층 연소로 및 2단 선회류 유동층 연소로에서 하단 가스공탐속도의 변화에 따라 측정된 비산 유출량(carryover rate)을 Fig.9에 나타냈다. Fig.9에 나타낸 바와 같이 2단 선회류 유동층 연소로에서 하단 가스공탐속도가 증가하면 비산유출량 역시 증가하지만 같은 조건에서 실험한 단단 유동층 연소로에 비해 그 양은 훨씬 낮음을 볼 수 있다. 비산유출량이 단단 유동층 연소로에 비해 낮게 나타난 이유는 2단 선회류 유동층 연소로에서는 하단 유동층 표면으로부터 분출된 미연입자중 일부는 선회류 효과로 인해 상단 유동층

Table 3. Effects of operating parameters on the combustion efficiency ($T_{b1}=800^{\circ}\text{C}$)

U_{01} (m/s)	F_0 (g/min)	Q_1/Q_2 (-)	λ (-)	Combustion Efficiency (%)	
				SS*	TSSF**
0.67	28.82	2.68	1.20	90.19	97.58
0.86	33.77	3.45	1.20	93.62	98.00
1.05	38.54	4.19	1.20	95.30	98.11
1.29	44.62	5.14	1.20	-	98.12
0.86	38.54	3.45	1.05	93.58	97.86
0.86	33.77	3.45	1.20	93.62	98.00
0.86	28.82	3.45	1.41	94.60	98.16

*SS: single-stage FBC

**TSSF: two-stage swirl-flow FBC

내로 포집되고 나머지 입자들만 비산유출되어 나가기 때문이다. 또한 Fig.9에서 보면 비산유출된 입자중의 가연성 성분 함량도 역시 단단 유동층 연소로에 비해 낮음을 알 수 있다. 이는 연소가스에 함유되어 비산유출되는 입자는 로내를 선회운동을 하므로 로내 체류 시간이 길어질 뿐 아니라 freeboard부에 선회류 흐름과 2차 공기의 공급에 의한 측방향 흐름이 공존하므로 난류강도가 커져 연소가스중의 미반응 산소와 미연입자사이에 존재하는 저항(입자표면에서의 경막저항)이 감소하여 미연입자의 연소속도가 증진되기 때문이다.

단단 유동층 연소로 및 2단 선회류 유동층 연소로에서 하단 가스공탐속도(U_{01})와 공기-연료비(λ) 변화에 따른 paper sludge의 연소효율 측정결과를 Table 3에 나타냈다. Table 3에서 보면 2단 선회류 유동층 연소로와 단단 유동층 연소로에서 paper sludge를 연소시킬 경우 하단 가스공탐속도가 증가하면 연소효율은 다소간 증가하는 경향을 보이는데 그 결과는 전보[6-8]에서 보고된 무연탄 연소의 것과는 상반되는 것이다. 이와 같이 상반된 결과가 나타나는 이유는 paper sludge는 무연탄에 비해 착화온도가 낮고 휘발분 함량이 높아 본 실험에서 적용한 연소온도조건($T_{b1}=800^{\circ}\text{C}$)에서 대단히 빠른 연소반응을 일으키기 때문이며, 또 다른 이유로는 무연탄 연소의 경우 연소과정에서 생성된 회분층의 산소전달저항이 연소속도를 크게 지배하게 되지만 paper sludge의 연소에서는 회분층 저항이 없기 때문인 것으로 생각된다. 그런데 동일한 조업조건에서 측정된 단단 유동층 연소로와 2단 선회류 유동층 연소로의 연소효율을 비교하면 단단 유동층 연소로에 비해 2단 선회류 유동층 연소로의 연소효율이 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 2단 선회류 유동층 연소로에서는 상단 freeboard

부에서 발생하는 선회류 효과로 인해 하단 유동층 표면에서 분출된 미연입자의 일부가 상단 유동층내에 포집되어 재연소될 뿐 아니라 상단 freeboard내에서 포집되지 않고 비산유출되어 나가는 미연 미세입자도 선회류 흐름을 따라 움직이므로 로내 체류시간이 길어진 때문이다. 그리고 냉각수 주입량을 조절하면서 하단 층표면온도를 일정($T_{b1}=800^{\circ}\text{C}$)하게 유지한 상태로 전체 공기-연료비 변화에 따른 paper sludge의 연소실험을 행하여 연소효율을 측정할 결과(Table 3)를 보면 공기-연료비가 증가하면 단단 유동층 연소로와 2단 선회류 유동층 연소로의 연소효율은 모두 약간씩 증가하는 경향을 보였으며 2단 선회류 유동층 연소로의 경우 앞에서 설명된 바와 같이 상단 freeboard부에서 발생하는 선회류 효과로 인해 단단 유동층 연소로에 비해 연소효율이 다소 높게 나타났다. 이상과 같이 2단 선회류 유동층 연소로에 paper sludge를 연소시킬 경우 하단 가스공탐속도나 공기-연료비가 증가하면 연소효율은 다소 증가하지만 paper sludge의 높은 연소효율로 인해 연소효과와 조업조건 변화와의 상관성은 명확하게 밝힐 수 없었다.

4. 결 론

제지공장에서부터 폐기되고 있는 paper sludge의 유동층 연소실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 층매질보다 밀도가 낮은 paper sludge를 층상부 주입법으로 연소시키게 되면 층매질(모래)과 연료간의 밀도차로 인한 분급현상에 의해 층내부 온도분포는 불균일하였으며 층표면에서 층하부로 내려 갈수록 온도는 낮아짐을 볼 수 있었다.

2. 수분을 다량 함유한 paper sludge는 유동층 표면부근에서 층매질로부터 받은 열에 의해 건조된 후 유동화 공기에 의해 freeboard부로 분출되어 주입된 연료의 대부분이 freeboard내에서 연소되기 때문에 freeboard부의 온도분포는 무연탄 연소에 비해 높게 나타났다.

3. 2단 선회류 유동층 연소로에서 하단 가스공탐속도가 증가하면 상단 freeboard내에서 선회강도가 커져 하단에서 유출된 미세입자의 상단 유동층내로의 포집률(trapping rate)이 증가하였다.

4. 2단 선회류 유동층 연소로에서는 상단 freeboard부에서 생성된 선회류 효과 때문에 하단에서 유출된 미연 미세입자가 상단 유동층내로 포집되어 재

연소가 일어날 뿐만 아니라 비산유출되는 미세입자도 로내 체류시간이 길어져(연소시간이 길어져) 단단 유동층 연소로에 비해 연소효율이 증가하였다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 기초연구비 지원(과제번호 871-1004-011-2)으로 수행한 연구결과의 일부분입니다. 당 재단에 감사드립니다.

NOMENCLATURE

- C_0 : combustible content in fuel [wt%]
 C_1 : combustible content in particles drained from lower bed [wt%]
 C_2 : combustible content in particles drained from upper bed [wt%]
 C_3 : combustible content in particles collected in cyclones (carryover) [wt%]
 F_0 : fuel feed rate [g/min]
 F_1 : weight of particles drained from the lower bed [g/min]
 F_2 : weight of particles drained from the upper bed [g/min]
 F_3 : weight of particles collected in cyclones(carryover) [g/min]
 h_1 : fluidized bed height of lower bed [cm]
 h_2 : fluidized bed height of upper bed [cm]
 Q_1 : primary air flow rate measured at 25°C and 1 atm [L/min]
 Q_2 : secondary air flow rate measured at 25°C and 1 atm [L/min]
 T_{b2} : lower bed temperature at the surface of lower bed [$^{\circ}\text{C}$]
 t_s : time reached to the steady state [hour]
 U_{01} : primary superficial gas velocity at T_{b1} [m/s]
 W : weight of bed material (sand) [g]
 : volumetric ratio of fed air to stoichiometric air calculated on the basis of fuel [-]

REFERENCES

1. EPA Seminar Publication: EPA/625/4-85/015 (1985).
2. Liao, P.B.: *WPCF*, **46**, 1985 (1974).
3. Baeyens, J. and Geldart, D.: Proc. of the Second Eng. Found. Conf., Cambridge, England, 264 (1978).
4. Kudo, H. and Mikawa, K.: Proc. of the First Korean-Japan Sym. of Fluidization, Seoul, Korea, 54 (1987).

5. Furlong, D.A. and Wade, G.L.: *AIChE Sym. Series*, No. 122, 152 (1972).
6. Lee, J.K., Hu, C.G., No, J.G., Shin, Y.S. and Chun, H.S.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 517 (1988).
7. Lee, J.K., Hu, C.G., Shin, Y.S. and Chun, H.S.: Proc. of the 10th Int. Conf. on FBC, San Francisco, ASME, U.S.A., 1199 (1989).
8. Lee, J.K., Hu, C.G., Shin, Y.S. and Chun, H.S.: *Can. J. Chem. Eng.*, **68**(1990), in press.
9. Nienow, A.W., Rowe, P.N. and Cheung, L.Y.-L.: *Powder Technology*, **20**, 89 (1978).
10. Nienow, A.W. and Chiba, T.: in Fluidization, 2nd ed., edited by Davidson, J.F., Clift, R. and Harrison, D., Academic Press, 357 (1985).
11. Berruti, F., Liden, A.G. and Scott, D.S.: *Chem. Eng. Sci.*, **43**, 739 (1988).