

## 유동층 Pilot Plant에서의 제지 및 소화 하수 슬러지 연소 특성

이근후 · 신병철 · 유용호<sup>\*†</sup>

삼성엔지니어링(주) 기술연구소  
(2001년 7월 2일 접수, 2001년 7월 30일 채택)

### Combustion Characteristics of Paper and Sewage Sludges in a Pilot Scale Fluidized Bed

Keun Hoo Lee, Byung Chul Shin and Yong Ho Yu<sup>\*†</sup>

R&D Center, Samsung Engineering Co., LTD.,  
39-3, Sungbok-Ri, Suji-Eup, Yongin-Si, Kyunggi-Do 449-844, Korea  
(Received 2 July 2001; accepted 30 July 2001)

#### 요 약

내경 0.5 m, 높이 3.35 m의 유동층에서 제지 및 소화 하수슬러지의 연소특성을 연구하였다. 슬러지 연소 때 높이에 따른 온도변화를 살펴보면 층표면 근처에서 최대온도를 나타내었다. 함수량이 59.8%인 제지슬러지의 경우 보조연료 없이 연소가 가능하였으나, 함수량이 79.3%인 소화하수 슬러지의 경우는 보조연료를 사용하여야 연소가 가능하였다. 압력요동신호로부터 얻어진 평균압력과 표준편차로부터 유동층 운전의 안정성 여부를 판단할 수 있었고, 슬러지 투입량이 급격히 증가할 때 층표면 근처에서의 평균압력은 감소하는 경향을 보이는 반면, 표준편차는 증가하는 경향을 보였다. 일산화탄소의 배출량은 배가스 중의 산소농도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이나, NO<sub>x</sub>의 배출량은 증가하는 경향을 보였다.

**Abstract** – Combustion characteristics both of paper and sewage sludges have been studied in a 0.5 m I.D. × 3.35 m H fluidized bed. The maximum temperature along the height was found and maintained near the surface of fluidized bed during the combustion. The paper sludge containing water about 59.8% of water could be burned without auxiliary fuel, while the auxiliary fuel was required to incinerate the sewage sludge, which containing about 79.3% of water. The stable operation status could be monitored by the mean pressure and the standard deviation of pressure fluctuation signal. The mean pressure near the surface of fluidized bed decreased with the increase of sludge feed rate. On the other hand, the standard deviation of pressure fluctuation increased with the increase of sludge feed rate. The emission of CO decreased with oxygen content in the flue gas, while that of NO<sub>x</sub> increased with the oxygen content.

**Key words:** Combustion Characteristics, Sludge, Fluidized Bed, Pressure Fluctuation, Carbon Monoxide

#### 1. 서 론

산업의 고도성장과 생활수준의 향상으로 산업 및 도시폐기물의 종류와 양은 급속한 증가 추세에 있으며, 협소한 국토 사정으로 인하여 이를 매립하는 데는 한계가 있으므로 소각처리가 늘어나고 있는 실정이다 [1]. 현재 적용되고 있는 대표적인 슬러지 소각 기술은 다단식 소각로와 유동층 소각로이며, 유기물의 완전 연소를 이룩하여 공해물질의 배출을 줄이고 있다. 그러나, 다단식 소각로의 경우는 기계적 장치의 복잡성 및 고가 등의 문제점이 있으므로, 다단식 소각로 보다는 비교적 간단한 유동층 소각로의 개발 및 적용이 확대되고 있다 [2-5]. 특히, 유동층 연소로는 층 내 연소뿐 아니라, freeboard에서도 연소가 이루어지므로 열효율이 높아 소형화가 가능하고, 염화수소나 이황화수소의 발생을 억제할

수 있어 대기오염 방지에도 뛰어난 성능을 보이고 있다. 따라서, 유동층 연소로의 슬러지 소각에의 적용이 확대되고 있으며, 특히 제지 및 하수 슬러지는 가연 성분이 대부분 휘발되기 때문에 유동층에 슬러지가 주입되면 층 내에서 건조 및 탈휘발이 일어나면서 대부분 freeboard에서 연소된다고 알려져 있다 [6, 7]. 따라서, 슬러지의 연소에 있어서 유동층 내 뿐만 아니라 freeboard에서의 온도 분포가 유동층의 운전 및 설계에 매우 중요한 인자이다. 따라서, Park 등 [7]은 유동층의 freeboard에서 탄소의 비산에 대한 연소반응을 적용하여 모델링을 한 결과 축방향의 온도 분포는 freeboard 높이에 따라 감소함을 보였으며 실험결과를 잘 예측한 바 있다. 한편 Lee 등 [8]은 수분함량이 21-25 wt%로 건조된 소화하수 슬러지를 유동층에서 연소하여 축방향의 온도분포를 측정하고 freeboard에서 무연탄 연소의 경우보다 높게 유지된다고 보고한 바 있다. 한편 수분함량이 70% 이상인 슬러지에 대한 유동층 연소 특성이 연구된 바 있으나 [3, 5] 석탄 혹은 프로판 가스와 같은 보조연료를 혼합하여 소각하였다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: yyh1@samsung.co.kr

본 연구에서는 내경 0.5 m의 유동층 pilot plant에서 수분 함유량이 각각 59.8%, 79.3%인 제지 슬러지 및 소화 하수 슬러지에 대하여 소각실험을 행하였고, 특히, 제지 슬러지의 경우 보조연료가 없는 조건에서 연소가 가능함을 고찰하였다. 유동층 pilot plant에서 초기 승온 및 슬러지 투입량 변화에 따른 온도 및 압력변화, fly ash 및 bottom ash의 입도 분포, 압력요동 특성 및 배가스 분석을 행하였으며, 이로부터 최적 운전조건을 제시하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 연구에 사용한 유동층 pilot plant의 대략적인 공정흐름도는 Fig. 1과 같으며, 슬러지 공급장치, 유동층로, 열교환기 및 배가스 처리장치로 구성된다. 유동층 연소로는 유동층 영역과 freeboard 영역으로 구분되며, 유동층 영역의 내경은 0.5 m이며 비말 동반을 억제하기 위하여 freeboard 영역의 내경은 0.76 m로 확장하였다. 유동층 영역의 높이는 1.13 m이며, freeboard 영역의 높이는 2.12 m로서 총 높이는 분산판으로부터 3.35 m이다. 유동층으로 도입되는 1차 공기의 온도 뿐 아니라 유동층 영역 및 freeboard 영역에서의 각 지점에 따른 온도분포를 측정하기 위하여 분산판 위로 6지점(0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.5, 2.0 m)에 열전대를 설치하였다. 또한 완전 연소를 촉진하기 위하여 1차 공기는 열교환을 통해 가열한 후 분배판을 통하여 공급하고 freeboard 영역에 2차 공기를 주입하였다. 이때, 2차 공기는 선회류 형태로 공급함으로써 freeboard 영역에서 체류 시간 연장 및 완전연소를 촉진하였다. 초기 기동 시 유동층을 가열하기 위하여 유동층 영역 상단에 경유 보조버너(설계열량: 42,000 kcal/h)를 설치하였으며, 슬러지는 유동층의 상부로 spreader 형태의 공급기에 의하여 연속적으로 주입된다. 유동층에서 연소된 슬러지의 회분은 유동층과 혼합되어 유동층 연소로 하부로 배출되며, 이때, 모래는 screen으로 선별되어 유동층으로 재순환된다. 분배판은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 triangular pitch(70 mm)로 37개의 tuyere로 구성되며 각각의 tuyere에는 2.0 mm의 구멍이 4개가 뚫려 있다. 한편 연소 후 발생하는 고온의 배가스는 열교환기를 거치면서 상온 연소공기를 예열하고, 이어서 고온 사이클론에서 fly ash 등 입자상 비산물질이 제거된다. 사이클론을 지난 배

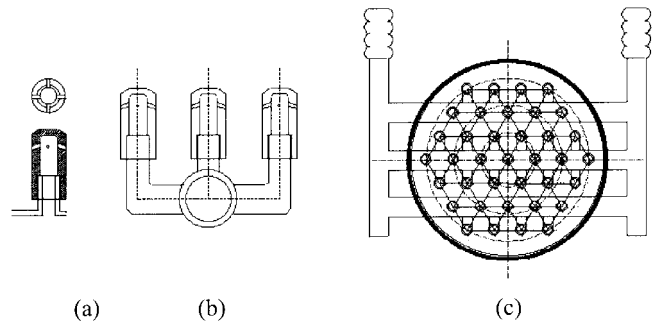


Fig. 2. Schematic diagram of air distributor and tuyere type nozzle.

(a) A tuyere, hole: 2 mmφ×4ea

(b) Air mainfold: 50 mm O.D.×25 mm I.D.

(c) Air distributor assembly: 37 tuyere with 70 mm triangular pitch

가스는 quencher에서 급냉되어 적정온도로 제어된 후, 습식 세정기에서 잔류 미진 및 유해 가스를 제거한 후 대기 중으로 배출된다.

### 2-2. 실험방법

유동층 영역에서는 연소 공기에 의해 유동매체(유동사)가 유동화되어 유동층을 형성하게 된다. 분산판으로부터 0.5-0.8 m까지 유동사(주문진 규사 5호, 평균 입경: 1.0 mm, 겉보기밀도: 2,640 kg/m<sup>3</sup>)를 채우고 연소 공기를 공급하면 유동층이 형성되고, 유동층 상부에 보조버너로 반응기를 600 °C까지 예열하여 연소 반응을 위한 준비를 하게 된다. 슬러지 공급 장치를 이용하여 유동층 연소로 내로 슬러지를 투입하게 되면 슬러지의 수분이 증발함과 동시에 가연 성분이 휘발하여 유동층 상부의 freeboard 영역에서 연소반응이 진행된다. Freeboard 영역으로 2차 공기를 공급하여 가연분의 완전연소를 촉진하고 연소로가 과열될 때 freeboard내 온도를 적정수준으로 유지시킨다. 연소공기 속도는 최소 유동화속도의 1.5-2.2이고, 과잉공기비가 1.25-2.0인 조건에서 실험하였으며, 연소반응이 진행되면 유동층의 온도가 상승하여 유동현상이 매우 격렬해지므로 출구의 산소농도를 측정하여 투입되는 연소공기를 조정하였다.

정상 운전 시 유동층의 온도는 750-800 °C로 유지되고 freeboard 영역은 800-900 °C이며 freeboard 영역으로 주입되는 2차 공기로 온도 및 완전연소가 제어된다. 유동화 공기는 가연분의 완전연소를 위해 5초 이상 반응기내에서 체류시간을 갖도록 하였다. 슬러지의 투입과 함께 유동층에서 연소된 슬러지의 회분은 유동층 내로 혼합되면서 노 하부로 유동사와 함께 유출된다. 모든 시스템이 정상상태에 도달되었을 때, bottom ash와 fly ash의 크기분포를 측정하였다. Bottom ash의 경우 14 mesh부터 200 mesh까지의 sieve를 사용하여 크기분포를 측정하였으며, fly ash의 경우는 사이클론 전단에서 시료를 채취하여 37 μm까지는 sieve를 사용하여 크기 분포를 측정하였으며, 그 이하의 크기 분포는 입자를 격실에서 부유시키고 전량을 0.1 acfm의 유량으로 cascade impactor(Andersen MakII, eight stage stack sampler)로 흐르게 하여 측정하였다. 연소 배가스는 열교환기에서 열교환 후 750 °C 정도로 떨어지면서 1차 연소공기를 250 °C까지 예열시킨다. 이후 고온 사이클론에서 fly ash를 제거하고 난 연소배가스에서, O<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> 성분 함량을 IR가스분석기를 사용하여 측정하였다. 이후 가스는 quencher를 거쳐 110 °C까지 급냉되며, 이때 소요되는 20 °C의 물의 양은 대략 70 kg/h이다. 또한 후단에 scrubber를 두어 2차로 분진 및 HCl을 제거하였다. 제지 슬러지와 소화 하수 슬러지의 원소 및 공업 분석치는 Table 1과 같다. 한편 층 내의 시간에 따른 압력요동을 측정하기 위하여 분산판으로부터 높이 0.1 m, 0.5 m의 두 지점에 층 내로 내경 0.002 m의 stainless steel 관을 삽입하여 1 m 끝에 최대 압력 측정범위가 1.0 psi인 압력센서(Valcom Co. VPRN)를 부착하

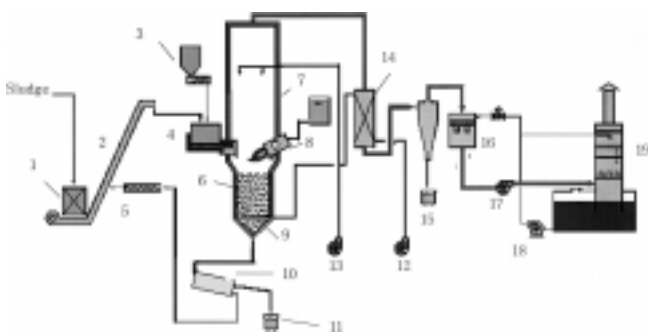


Fig. 1. Schematic diagram of fluidized bed pilot plant for sludge combustion.

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. Sludge hopper        | 11. Bottom ash           |
| 2. Conveyor             | 12. Air blower           |
| 3. Limestone            | 13. 2nd air fan          |
| 4. Feeder               | 14. Heat exchanger       |
| 5. Sand screw feeder    | 15. Fly ash from cyclone |
| 6. Fluidized bed region | 16. Quencher             |
| 7. Freeboard region     | 17. I.D. fan             |
| 8. Auxiliary burner     | 18. Pump                 |
| 9. Air distributor      | 19. Scrubber             |
| 10. Screen              |                          |

Table 1. Elementary analyses of paper and sewage sludges

Item	Paper sludge	Sewage sludge
C(%)	39.82	36.04
H(%)	4.53	6.48
O(%)	19.22	13.74
N(%)	0.7	5.6
S(%)	0.11	0.0
Cl(%)	0.02	0.44
Moisture(%)	59.8	79.3
Ash(%)	35.6	37.7
HHV(kcal/kg-wet)	912	610

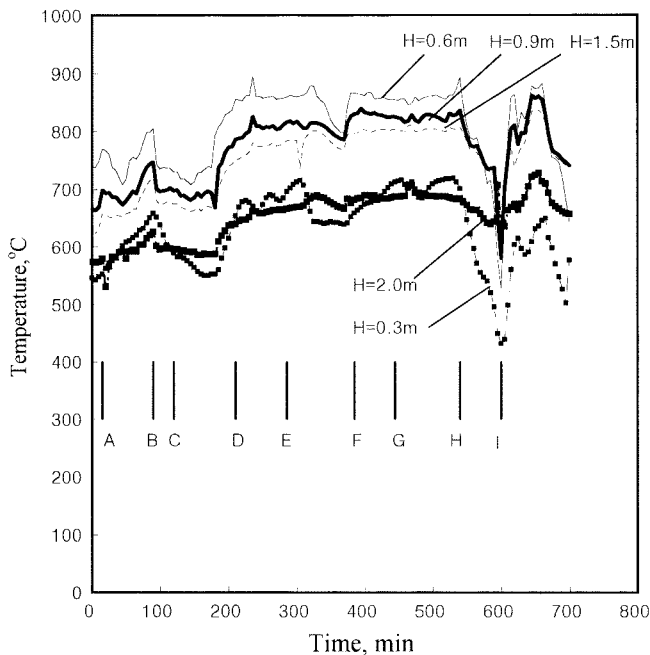


Fig. 3. Historical trends of temperature with the variation of sludge feed rate at the each height from air distributor. operation conditions are referred to in Table 2.

었다. 또한 stainless steel 관의 끝 부분에는 고체입자가 들어가지 않도록 유리섬유로 봉하였다. 압력요동은 sampling 간격을 10 ms로 하여 총 163.84초 동안 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 유동층 소각로 내 온도분포

제지 슬러지의 투입량 변화에 따른 유동층 내 위치별 온도변화를 Fig. 3에 나타내었으며, 이에 따른 각 구간별 운전 상황의 변화를 Table 2에 정리하였다. 유동층 연소로가 시동버너에 의해 충분히 예열되면 유동층 공기는 폐열 열교환기에서 배가스에 의해 250 °C까지 예열되어 유동층에 인입되므로, 유동층 하부온도는 500 °C 이상, 상부는 730 °C까지 올라간다. 이런 조건에서 제지 슬러지를 60 kg/h로 투입하면(A) 슬러지 내 수분으로 인해 층 상부의 온도가 조금 떨어지게 되나, 슬러지의 연소로 인하여 점차 층 내 온도가 상승한다. 제지 슬러지의 고정탄소나 미휘발분이 주로 유동층 내에서 연소하게 되므로 유동층 내부 온도는 제지 슬러지가 투입되면 급격히 증가하여 정상상태를 유지하게 된다. 적정 시간이 경과한 후 슬러지 자체 발열량으로 소각이 진행되도록 보조버너를 끄면(B), 유동층 상부 및 freeboard 온도가 급격히 감소하고 유동층 온도도 서서히 감소하나 시간 내에 일정온도로 유지됨을 보였다. 이는 제지 슬러지에서 수분을 제외한 회분이 35.6%인 경우 수분함유량이 60%에 도달하여도 보조연료 없이 운전이 가능하다는 것을 의미한다. 이때 슬러지의 투입량을 72 kg/h로 증대시키면(C) 온도가 약간 감소함을 보이지만, 층 내의 온도가 안정되게 유지됨을 볼 수 있다. 한편 슬러지 투입량을 90 kg/h로 증대시키면(D) 연소가 증대되어 전반적인 온도상승이 나타나나, 투입량을 102 kg/h로 증대시키면(E) 오히려 온도가 하강하는 현상을 보인다. 이는 설계치, 85 kg/h를 초과한 슬러지의 과다투입으로 인해, 불완전연소와 동시에 슬러지의 건조에 많은 열이 사용되고 있음을 의미한다. 이때, 운전중단을 우려하여 슬러지 투입량을 40 kg/h, 공기유량을 70 Nm<sup>3</sup>/h로 줄이고 보조버너를 가동하였다(F). 한편 설계치의 부하율보다 큰 100 kg/h의 슬러지도 보조버너의 가동(G)으로 원활하게 소각 처리할 수 있음을 알 수 있다. 이후 플랜트의 shutdown과 동시에 재가동을 하였으며, 0.3 m에서의 온도가 430 °C, 층 표면 부근의 온도가 520 °C일 경우 보조버너와 함께 10분에 기동이 완료되는 것을 확인할 수 있었다.

그러나, 소화 하수 슬러지의 경우는 높은 함수량 때문에 발열량이 제지 슬러지의 2/3이므로, 하수 슬러지 자체만으로는 연소가 이루어지지 않으므로, 보조 열량을 투입하여야 한다. 따라서, freeboard의 온도가 850-900 °C가 되도록 보조버너의 열량을 조절하였다. 하수 슬러지 연소의 경우 Table 3의 운전조건하에서 연속운전에 대한 온도변화를 살펴보면 Fig. 4와 같다. 제지 슬러지의 경우와 비교하여 보면, 훨씬 안정적으로 운전이 이루어지는 것을 알 수 있는데, 이는 보조연료로 인해 슬러지 투입량을 변화시켜도 온도를 일정하게 유지할 수 있기 때문이다. 즉,

Table 2. Operation conditions of paper and sewage sludges combustion as shown in Fig. 3 and Fig. 4

Sludge type	Interval	Sludge feed rate $W_s$ (kg/h)	Air flow rate $F_{air}$ (Nm <sup>3</sup> /h)	Auxiliary burner $F_{oil}$ (liter/h)
Paper sludge	A	60	72	ON
	B	60	75	OFF
	C	72	80	OFF
	D	90	90	OFF
	E	102	90	OFF
	F	40	70	ON
	G	102	90	ON
	H		Shut down	
	I		Restart	
Sewage sludge	A'	49	70	44
	B'	70	80	54
	C'	80	83	70
	D'	90	85	95

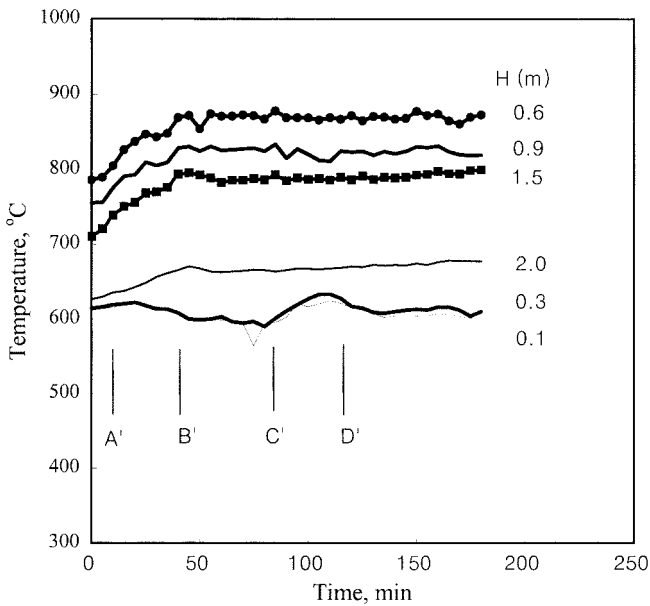


Fig. 4. Historical trends of temperature with various sludge feed rate at each height from air distributor. operation conditions are referred to in Table 2.

슬러지 투입량이 40-80 kg/h일 때, freeboard의 온도가 850-900 °C가 유지되기 위하여 경유(발열량: 10,300 kcal/kg)가 슬러지 1 kg당 약 0.9-1.1 liter가 소요되었다. 따라서, 많은 열량이 슬러지 건조에 사용되므로, 경제적인 면을 생각할 때 슬러지 투입에 있어서 건조과정을 첨가하여 함수량을 60%이하로 하는 것이 바람직하다고 생각된다. 제지 슬러지와 소화 하수 슬러지를 유동층에서 소각할 경우, 정상상태에 도달하였을 때의 분산관로부터의 높이에 따른 각각의 온도 분포를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 제지 슬러지와 소화 하수 슬러지의 경우 모두 층 표면 근처에서 최대 온도를 나타내며, freeboard에서 높이가 높아질수록 약

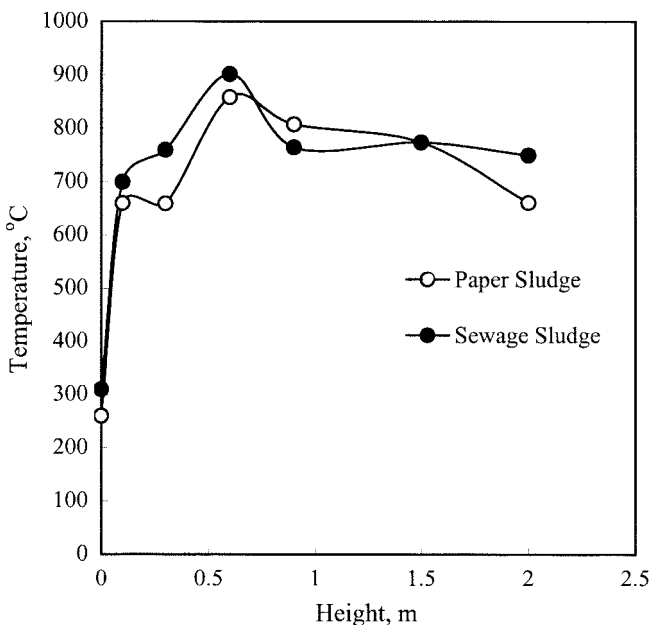


Fig. 5. Temperature profiles along the height from air distributor in case of combustion of paper and sewage sludges. sludge feed rate: 70 kg/h, air flow rate: 70 Nm<sup>3</sup>/h.

간씩 감소하는 경향을 보인다. 이는 앞선 연구자들의 결과[3, 8]와 유사한 결과를 보이며, 특히 Ogada와 Werther[3]에 의하면 슬러지의 유동층 연소에서 고정탄소의 80%가 휘발분과 같이 유출되어 freeboard에서 연소된다고 하였으므로, 본 연구 결과에서도 외벽을 통한 열손실이 일어남에도 불구하고, freeboard에서의 온도가 감소하지 않는 결과를 보인다.

제지 슬러지의 경우는 소화 하수 슬러지보다 수분량이 적어 유동층 표면에 투입되면 하수 슬러지의 경우보다 건조가 빨리 이루어지므로, 무게의 감소로 인하여 freeboard쪽으로 비산되면서 연소되는 입자의 양이 많아, 상대적으로 유동층 내로 혼합되는 슬러지의 양이 적으므로, 유동층 내의 온도가 낮게 유지되는 반면, 하수 슬러지의 경우는 유동층 내로 혼합되는 슬러지의 양이 상대적으로 많아 유동층 내에서 연소되는 양이 많으므로, 유동층 내의 온도가 상대적으로 높게 유지된다. 이는 Fig. 6에서의 bottom ash와 fly ash의 입도 분포를 보면 알 수 있다. 또한 제지 슬러지의 경우에는 연속적인 슬러지 투입 시 층 높이의 증가가 거의 없으므로, bottom ash로서의 ash 유출은 거의 없었다.

### 3-2. Bottom ash와 fly ash 입도분포

제지 슬러지의 연속 소각 시에는 층 높이의 증가는 거의 없었으며, 층 내 압력의 증가도 없었다. 즉, 사이클론과 습식 세정기에서 주로 회분의 배출되었으며, 층 하부의 회분 유출은 거의 없었다. Fig. 7은 제지 슬러지와 하수 슬러지 소각의 경우에 있어서 각각 사이클론에서 포집한 fly ash에 대한 SEM 사진이다, 사진에서 비교되듯이 제지 슬러지의 경우 입자의 크기가 대부분 200  $\mu\text{m}$  이상이였으며, 하수 슬러지의 경우에는 fly ash의 크기가 훨씬 작았다. 또한 하수 슬러지의 연속 소각의 경우, 층 높이가 점차로 증가되었으며, 층 하부에서 유동상의 배출로 층 높이가 일정하게 유지되었다. Table 1에서 보는 바와 같이 회분의 함량은 서로 비슷하지만, 수분함량이 하수 슬러지가 많으므로 수분 증발에

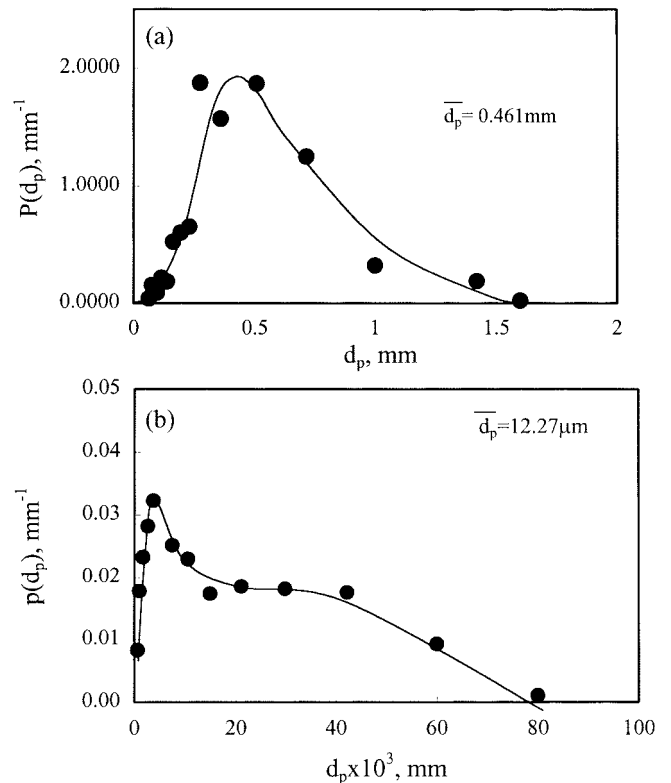


Fig. 6. Size distributions of (a) bottom ash and (b) fly ash from sewage sludge incineration in the fluidized bed.  $W_s=80$  kg/h,  $F_{air}=70$  liter/h.

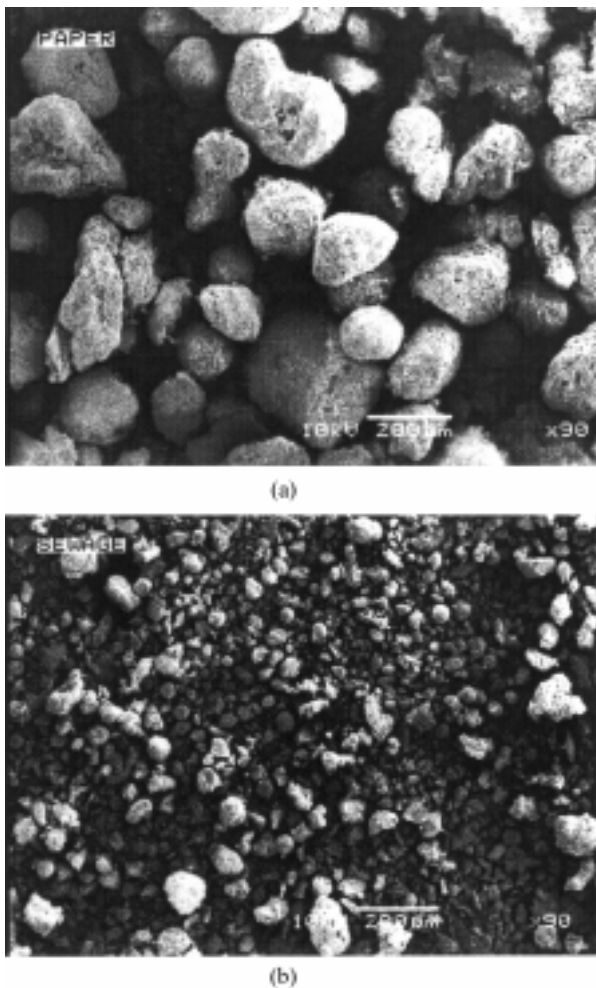


Fig. 7. Photographs of the fly ash of (a) paper and (b) sewage sludges.

따라 슬러지의 분쇄가 더욱 활발하게 이루어지게 되기 때문이라고 생각된다. 또한 하수 슬러지의 경우 보조버너의 화염근처에서 하수 슬러지의 회가 용융되며 합체 현상이 일어나, bottom ash에 크기가 큰 입자가 존재한다고 생각된다. 반면 제지 슬러지의 경우 자체 연소만으로 운전이 가능하여 물의 증발에 따른 다공성 입자로 존재하여 겉보기 밀도가 작아 층높이의 증가 없이 대부분 비탈동반된다. 슬러지 조각의 경우 수분의 함량에 따라 fly ash의 크기가 달라진다는 것을 알 수 있다. 하수 슬러지를 80 kg/h로 투입할 때, bottom ash와 fly ash의 입도 분포확률을 나타내면 Fig. 6에 나타내었다. Bottom ash의 크기 분포는 평균 입경을 중심으로 비교적 좁은 분포를 보이는데 반해 fly ash의 경우는 평균 입경을 중심으로 넓은 분포를 보인다. 이는 물의 증발에 의한 ash의 분쇄가 주된 이유라 생각된다.

### 3-3. 압력요동

제지 슬러지의 유동층 운전에서 유동화 물질의 거동은 압력요동 해석으로부터 진단될 수 있으며, 평균 압력, 표준 편차 등의 변화로부터 유동층의 운전상태 및 이상현상을 감지할 수 있으므로 압력요동 측정 은 매우 유용한 정보를 제공한다[9-11]. 평균압력과 표준편차는 앞선 연구자들과 같은 방법으로 계산하였으며[9, 10], Fig. 8에 슬러지 연소소에서 슬러지의 투입량의 변화에 따른 평균압력의 변화를 표시하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 슬러지의 투입이 시작되면 층 높이가 증가하여 상부의 압력 평균값은 증가하였다가 시간이 지날수록 감소하는 경향을

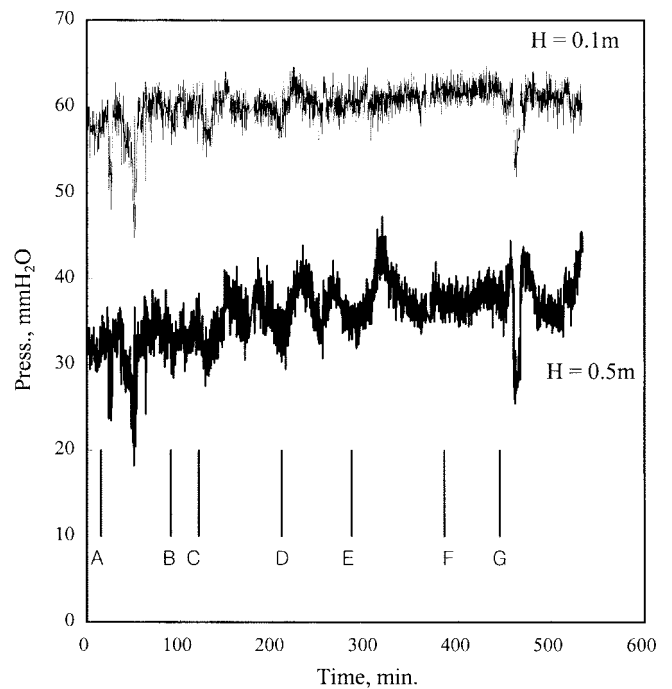


Fig. 8. Historical trend of mean pressure of pressure fluctuation in case of paper sludge incineration in fluidized bed. The operation conditions are referred to in Table 2.

보이는 반면, 하부의 평균값은 크게 변화하지 않는다. 이는 슬러지가 층 상부로 투입되어 층 높이가 갑자기 증가하여 평균압력이 상승하였으나, Jang 등[9]이 보고한 바와 같이 슬러지 연소가 더욱 진행됨에 따라 온도가 상승하고 이에 따른 고체 입자에 작용하는 부력이 증가하게 되어 층 표면에서의 층 밀도가 적어짐에 기인한다. 그러나, 층 하부의 압력변화가 크지 않은 것은 일정한 온도로 유지되므로, 온도상승에 의한 압력의 증가효과는 거의 없으며, 슬러지 투입량의 증가에 의한 층 높이 증가에 의하여 영향을 받는다고 사료된다. 그러나, 이는 슬러지 투입량이 G구간에서처럼 40 kg/h에서 102 kg/h로 급격하게 변하게 되면, 평균압력이 급격히 하강하는 것을 볼 수 있는데, 유동층 내의 불균일 혼합으로 channeling 현상이 발생하기 때문이라고 볼 수 있다. 한편, Fig. 8과 동일한 조건에서의 표준편차의 변화를 계산한 결과를 Fig. 9에 보였다. Fig. 9에서 보듯이 표준편차는 슬러지 투입량의 변화 후 대략 20분에서 30분 후에 최대값을 나타내는데, 표준편차가 최대일 경우, 기포의 합체 등 고체입자의 혼합상태가 가장 우수하다고 하였으므로, 20분에서 30분 정도 일 때 기포의 합체가 가장 격렬하게 일어난다고 할 수 있다[9, 10]. 그후 표준편차는 약간 감소하는 경향을 보이는데, 기포의 합체뿐만 아니라 분쇄도 동시에 일어나는 정상상태에 도달하기 시작한다고 볼 수 있다.

### 3-4. 배가스 분석

슬러지 유동층 연소에 있어서 공해물질인  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ 는 연료 및 연소조건에 따라 배출농도가 변한다. 앞서 기술한 바와 같이 하수 슬러지 연소의 경우 보조버너를 가동하였으나, 보조 연료 연소에 따른 연소 배가스에 대한 영향을 줄이기 위하여 과잉 공기량을 20%로 조절하였다. Fig. 10에서 보듯이 소화하수 슬러지 연소의 경우  $\text{CO}$ 의 배출농도는 연소상태에 관계하며, 산소농도가 증가함에 따라  $\text{CO}$ 의 농도는 감소하는 경향을 보였다. 특히 배가스 중의 산소농도가 6% 전후에서의  $\text{CO}$  농도가 급격한 변화를 보였다. 배가스 내의 산소농도를 6-8% 범위에서 산소농도를 유지시키면,  $\text{CO}$ 의 농도가 10 ppm 이하로서 완전연소에 가깝게 운전할 수 있었으며, 산소 농도가 6%이하의 영역에서는 산소농도의

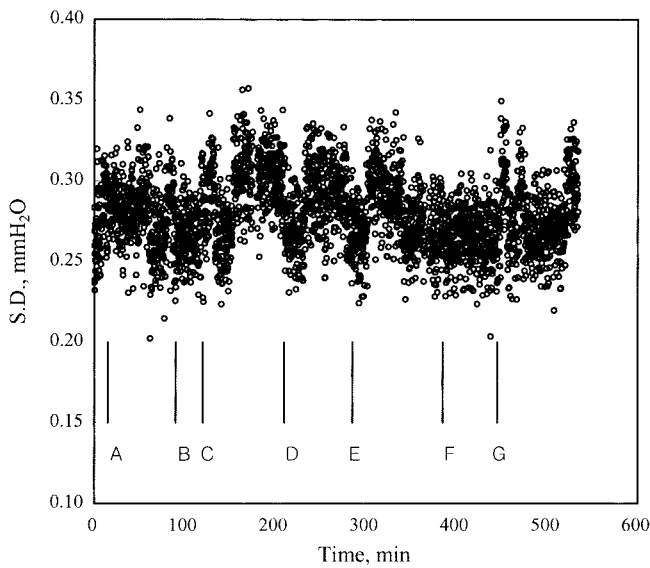


Fig. 9. Historical trend of standard deviation of pressure fluctuation in case of paper sludge incineration in fluidized bed. The operation conditions are referred to in Table 2.

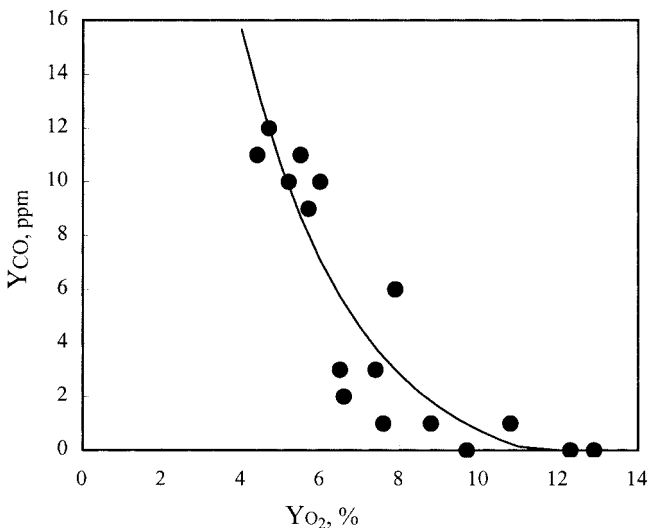


Fig. 10. Effect of oxygen content in the flue gas on CO emission in case of sewage sludge incineration in the fluidized bed.

감소에 따라 CO의 배출농도가 급격히 증가하는 경향을 보인다. 한편 제지 슬러지의 경우 Douglas 등[4]은 산소농도가 5%까지는 CO의 배출농도가 급격히 감소하고 그 이상의 농도에서는 변화가 크지 않다고 하였으므로, 슬러지 연소 시 과잉 산소의 농도를 6% 정도로 유지하는 것이 완전연소에 가깝고, 과잉공기를 줄일 수 있는 방법이라 할 수 있다.

CO의 배출농도,  $Y_{CO}$ 는 연소조건에 주로 의존하므로 배가스 중의 산소농도,  $Y_{O_2}$ 와 다음과 같은 상관식으로 나타낼 수 있었다.

$$Y_{CO}(\text{ppm}) = -1.297 + 69.6 \exp(-0.353Y_{O_2}) \quad (1)$$

$$4.4\% \leq Y_{O_2}(\%) \leq 13\%$$

이때의 상관계수(r)는 0.907이며 표준편차는 2.14 ppm으로 비교적 실측치를 잘 예측하였다.

한편,  $NO_x$ 의 배출농도의 변화는 Fig. 11과 같은데, Douglas 등[4]과 Lee 등[8]의 결과와 같이 과잉산소의 농도의 증가에  $NO_x$ 의 배출농도는 증가하는 경향을 보인다. 유동층 연소의 경우 타 소각기술에 비하여 낮

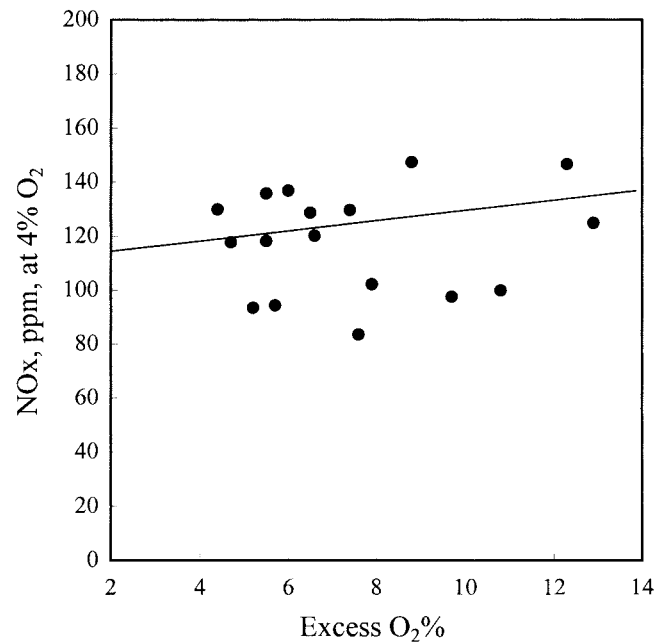


Fig. 11. Effect of oxygen content in the flue gas on the  $NO_x$  emission in case of sewage sludge incineration in the fluidized bed.

은 온도에서 연소되므로, thermal  $NO_x$ 의 생성이 감소하는데, 배가스 중 산소농도 4.4-13%(과잉 공기비 1.25-2.0)의 범위에서  $NO_x$ 의 배출농도는 150 ppm이하로 낮음을 알 수 있다. 따라서, 유동층 연소는  $NO_x$ 의 배출량을 크게 줄일 수 있으면서 슬러리를 안전하게 소각처리할 수 있는 적합한 기술로 사료된다.

#### 4. 결 론

유동층 pilot plant의 슬러지 소각 운전을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 슬러지는 주로 유동층 표면과 freeboard에서 주로 연소되어 유동층 표면 근처에서 가장 높은 온도를 보이며, freeboard에서 높이가 증가할수록 감소하였다.
- (2) 제지 슬러지의 경우 bottom ash는 거의 발생하지 않으며, 주로 fly ash로 배출되나, 소화 하수 슬러지의 경우 bottom ash와 fly ash로 배출되었다.
- (3) 압력요동 측정을 이용하여 유동층 연소로의 운전상태를 확인할 수 있었으며, 슬러지 투입량이 급격히 증가하면 평균압력은 급격히 하강했다가 다시 복귀하는 현상을 보였다. 한편 표준편차는 슬러지 투입량이 증가한 후 20분에서 30분 정도 경과 후 최대값을 가지며 안정화되었다.
- (4) 배가스 중 일산화탄소의 농도는 산소농도에 잘 상관되며, 산소농도 증가에 따라 감소하며 산소농도 6% 전후로 급격한 감소를 보였다.
- (5) 따라서 함수량이 60% 정도의 제지 슬러지의 경우, 부하율 460 kg/h·m<sup>2</sup> 및 과잉 공기비 1.4 정도에서 보조연료 없이 안정적인 연소가 가능하며, 소화하수 슬러지의 경우 같은 유동화 조건에서 보조연료 0.9-1.1 liter/kg의 사용으로 안정적인 연소가 가능하였다.

#### 감 사

본 연구는 과학기술정책연구원(STEPI)의 특정 연구개발사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 사용기호

$d_p$	: particle size [mm]
$F_{air}$	: combustion air flow rate [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ]
$F_{oil}$	: auxiliary fuel flow rate [liter/h]
$H$	: height from air distributor [m]
$P(d_p)$	: probability density for particle size, $d_p$ [1/mm]
$W_s$	: sludge feed rate [kg/h]
$Y_{CO}$	: concentration of CO in the flue gas [ppm]
$Y_{O_2}$	: concentration of oxygen in the flue gas [%]

## 참고문헌

1. Werther, J. and Ogada, T.: *Progress in Energy and Comb. Sci.*, **25**, 55(1999).
2. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Lee, N. S. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 499(1992).
3. Ogada, T. and Werther, J.: *Fuel*, **75**, 617(1996).
4. Douglas, M. A., Latva-Somppi, J., Razbin, V. V., Friedrich, F. D. and Tran, H. N.: *Tappi Journal*, **77**, 109(1994).
5. Werther, J., Ogada T. and Philippek, C.: Proc. Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, New York, ASME, **2**, 951(1995).
6. Park, D., Levenspiel, O. and Fitzgerald, T. J.: *Chem. Eng. Sci.*, 295(1980).
7. Park, Y. S., Ghim, Y. S., Son, J. E. and Maeng, K. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 18(1994).
8. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G., Lee, N. S., Lim, J. S. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 228(1992).
9. Hong, S. C., Cho, B. L., Doh, D. S. and Choi, C. S.: *Powder Technol.*, **60**, 215(1990).
10. Jang, H. T., Park, T. S. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **37**, 910(1999).
11. Kim, S. H. and Han, G. Y.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 677(1999).