

Pilot plant 규모 유동층 소각로의 제지 슬러지 소각 용량에 관한 실험적 연구

라승혁*, 문동진**, 강경태**, 신동훈*, 황정호*

Experimental study on the capacity of pilot scale FBC for paper sludge

Seung-Hyuck La, Dong-Jin Moon, Kyung-Tae Kang, Dong-Hoon Shin, Jung-Ho Hwang

Abstract

In this paper, the effects of water contents on combustion characteristics of paper sludge and capacity of fluidized bed combustor(FBC) were investigated using 0.26m diameter, 1.75m height pilot-plant scale combustor. Combustion tests of paper sludge containing water contents between 40wt% and 50wt% were performed. The temperature and emission variation, the pressure inside combustor were measured to monitor the fluidization quality. The experimental results showed that 30kg/hr feeding rate of sludge containing water up to 45wt% was preferable for this system. Sludge loading rate, heat release rate were calculated from experimental data as major parameters showing FBC capacity. Comparison with sludge loading rate from other source was also performed

Key Words : Paper Sludge, Fluidized Bed Incineration, Water Contents, Sludge Loading rate, Heat release rate

기호설명

<i>A</i>	Ash content in sludge	<i>N</i>	Nitrogen content in sludge
<i>C</i>	Carbon content in sludge	<i>O</i>	Oxygen content in sludge
<i>H</i>	Hydrogen content in sludge	<i>S_L</i>	Sludge loading rate
<i>H_h</i>	High heating value	<i>S</i>	Sulfur content in sludge
<i>H_l</i>	Low heating value	<i>W_w</i>	Water content in sludge
<i>H_r</i>	Heat release rate		

1. 서론

슬러지는 하·폐수 처리 시설이 증가하면서 그 배출량도 증가하고 있고 산업 및 생활 폐수 등 다

양한 배출원이 있다 우리나라의 경우 산업 폐기물 중 슬러지의 배출량은 2000년 약15000톤으로 1992년도 1천여톤에 비해 15배 가량 증가하였다. 2003년에는 해양투기가 금지됨으로 현재 매립이나 해양투기에 의존하는 우리 나라에서는 슬러지의 소각처리 방법과 정화 처리 시설의 건설기술 축적은 시급하다고 하다. 슬러지의 소각 처리 방법으로 유동상을 이용하는 경우가 많은데 이는 유동층 소각 방식이 함수율이 높고 발열량이 낮은 슬러지의 처리에 있

*연세대학교 대학원 기계공학과

**한국생산기술연구원 신에너지 환경팀

† 라승혁, E-mail : emotionaltech@yonsei.ac.kr

어서 타 소각 방식들에 비해 적합하기 때문이다. 이러한 배경에서 슬러지 유동층 소각로 설계에 대한 다양하고 실제적인 설계 기술 축적이 요구되는데, 소각로 설계에 있어서 투입 연료의 성상과 연소 방식, 소각로 규모 등이 중요한 인자이다. 그 동안 슬러지의 소각처리 기술에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔는데 각종 슬러지의 물리화학적 성상 파악과 발열량의 측정 및 계산, 연소 온도 측정 등 기초적인 연구가 주로 수행되었고 실제 처리 가능 용량이나 연속 운전 특성등 실제 플랜트 설계에 필요한 인자들에 대한 연구는 부족하다.

본 연구에서는 플랜트 운전 시 연료의 성상뿐만 아니라 실제 슬러지의 연소 운전 시 연료의 투입률과 함수율 등이 실제 소각 성능과 어떠한 관계가 있는지 실험적으로 나타내었다. 또한 일반적인 소각로의 규모 및 처리 용량을 선정하는 데에는 화로부하율과 화상부하율을 선정하는데 본 실험에 사용된 장치에 대해서 화로 부하율과 화상부하율을 산출하여 문헌에 알려진 수치와 비교하였으며 현재 운영되고 있는 실제 소각장의 운전 조건과 비교하였다

2. 실험

2.1 실험방법

본 연구에서는 제지 슬러지를 사용하였고 함수율, 슬러지 투입률, 투입 공기량 등을 변화시키면서 실험하였으며 실험에 사용된 조건들을 Table 1에 나

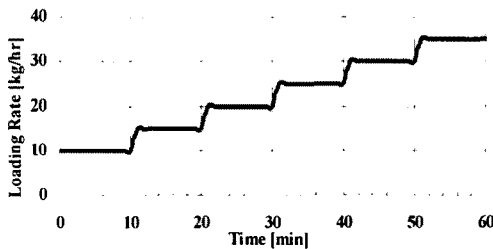


Fig. 1 Sludge Loading Rate Variations

타내었다. Fig. 1은 실험 방법을 그림으로 나타내었는데 슬러지의 투입량을 시간에 따라 증가 시킨

것을 보이고 있다.

2.2 실험장치

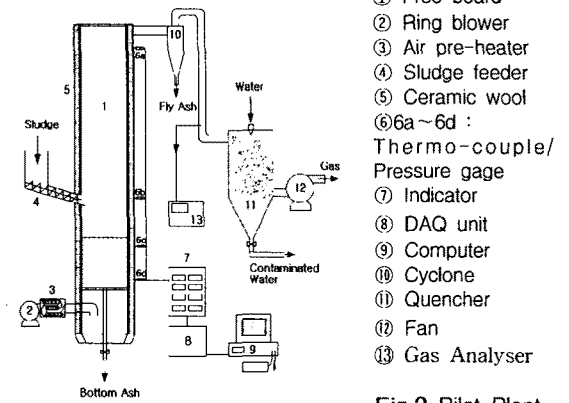


Fig.2 Pilot Plant

본 실험에서 사용한 실험실 규모 소각로의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 소각로는 유동층 본체, 분산판, 송풍기, 오리피스, 전기 예열기, 슬러지 공급장치(hopper & feeder), 데이터 처리용 assembly, 사이클론, 배기팬, quencher, 모래 배출부 등으로 구성되었다. 오리피스와 인버터를 이용하여 송풍기로부터 공급되는 유량을 제어하고 스크류 타입의 공급장치로 슬러지를 연속 투입하였고 유동화 및 연소 상태의 파악을 위해 소각로 벽에 부착된 압력센서 (pressure transducer)와 열전대 (K-type thermo-couple)를 6a부터 6d까지 4지점에 장치하여 A/D 보드로 모니터링 하였다. 6c와 6d 지점의 압력센서는 유동화 상태를 관찰하기 위해 배드 상부와 하부에 설치하였다.

슬러지 공급구에서 연소 가스의 역류로 투입되는 슬러지가 건조되어 투입 조건에 영향을 주는 것을 방지하기 위해 배기구에 팬을 설치하였고 quencher를 이용하여 연소 가스를 급냉하여 배기팬 보호와 잔류 분진 및 유해가스를 처리한 후 배출 되도록 하였다.

2.3 연료의 성상

본 실험에 연료로 사용된 제지 슬러지의 성분 분석

Table 1 Experiment Condition

함수율 (%)	40 / 45 / 50	소각로 높이 (m)	1.75
투입율 (kg/hr)	10 ~ 45	연소실 직경(m)	0.26
베드높이 (m)	0.4	베드 높이 (m)	0.4
투입공기량(kg/hr)	101	본체 재질	STS 301
최소유동화속도(m/s)	0.5(상온)	송풍기용량(kW)	7.5
공기비(kg/kg)	1.2~2.6	Air-preheater(kW)	15×1 / 10×2

결과를 Table 2 에 제시하였다. 그리고 연료의 열함량을 정의하기 위하여 고위 발열량(H_h ; high heating value, HHV), 저위발열량(H_l ; low or net heating value, LHV) 그리고 유효발열량(available heating value, Q_a) 등이 있는데 소각로에서는 저위 발열량이 유효하며 발열량의 예측에는 Dulong식과 Scheurer-Kestnert식 보다 Steuer 식이 슬러지의 발열량 예측에는 더 잘 맞는 것으로 알려졌다. 고위 및 저위 발열량 계산식은 다음과 같다.

Steuer 식

$$H_h = 8100 \left(C - \frac{3}{8} O \right) + 34250 \left(H - \frac{O}{16} \right) + 2500 S + 5700 \left(\frac{3}{8} O \right) \quad [\text{kcal/kg}]$$

Low heat value

$$H_l = H_h - 600(9 \cdot H + W_w) \quad [\text{kcal/kg}]$$

건조 고체의 고위 발열량은 2648(kcal/kg)이며 함수율 50%일 때 919(kcal/kg)으로 나타났다.

Table 2 Elementary Analysis

원소분석					
Ash	C	H	O	N	S
40.77	25.75	3.88	25.37	4.23	0.0
공업분석					
Volatile		Fixed carbon		Ash	
50.48		8.75		40.77	

3. 실험 결과

3.1 슬러지 함수율에 따른 온도 및 배기 가스 특성

3.1.1 함수율 40% 슬러지

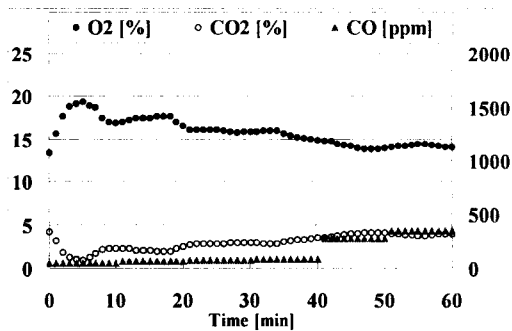


Fig. 3 40w% Gas Analysis

그 Fig 2와 Fig. 3은 40% 함수율의 제지 슬러지의 실험 결과이다. 슬러지는 Fig. 1 과 같은 방법으로 투입하였으며 30kg/hr 투입까지는 정상적인 연소 과정이 수행되고 있는 것으로 판단되나 35kg/hr

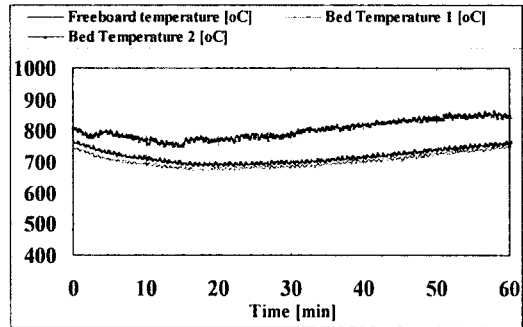


Fig. 4 40wt% Sludge Temperature Profile

투입 시기부터 CO의 배출량이 다소 증가하고 프리보드의 온도가 감소하기 시작하며 베드의 온도의 상승이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 그러나 대체적으로 전 구간에서 비교적 안정적인 연소 상태를 나타내고 있다. 다만 35kg/hr로 투입량을 증가시킬 경우 연소 상태가 불안정해지므로 40% 함수율의 슬러지의 경우 30kg/hr가 본 실험 장치에서는 적정 소각량으로 판단된다.

3.1.2 함수율 45% 슬러지

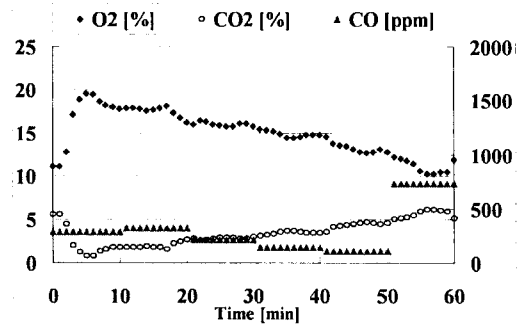


Fig. 5 45w% Gas Analysis

Fig5, Fig. 6 은 45%의 제지 슬러지를 연속 투입한 결과이다. 로내 슬러지 투입 개시 초기에는 베드 및 프리보드의 온도가 하강하는 구간이 40wt% 슬러지 보다 길었으나 점차 베드의 온도가 상승하고 CO의 발생 농도가 서서히 감소하면서 연소가 안정되어 가는 것을 알 수 있다. 40wt%의 슬러지 연소시의 결과와 비교해 보면 베드의 온도는 10%내외로 더 낮게 나타났으며 수분에 의한 현열이 원인으로 사

려된다. 그러나 온도의 변화 패턴이나 O₂, CO₂,

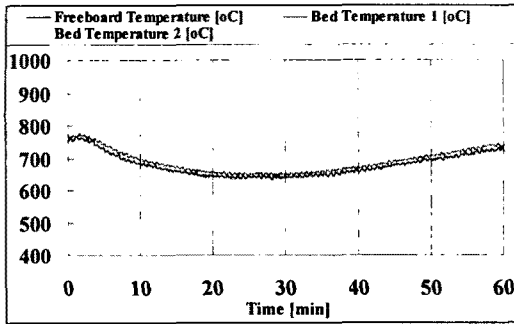


Fig. 6 45wt% Sludge Temperature Profile

CO의 배출량의 변화 패턴은 함수율 40%와 45%에서 비슷한 양상을 보이고 있다.

슬러지의 투입률이 35kg/hr을 넘어서면서 베드 및 프리보드의 온도가 하강하면서 CO는 급격히 증가하는 부분이 나타난다. 따라서 본 장치의 적정 소각량도 40~45% 슬러지 모두 약 30kg/hr으로 볼 수 있다. 그러나 가스 분석 데이터에서 산소의 농도는 꾸준히 감소하면서 CO가 증가하는데 이는 슬러지의 투입이 누적되면서 슬러지가 희박 산소 분위기에서 열분해가 일어나고 있을 가능성도 제시한다.

3.1.3 함수율 50% 슬러지

Fig. 7, Fig. 8은 함수율 50% 슬러지의 투입량 증가에 따른 소각로내 온도를 나타낸 것인데 슬러지 투입률을 15kg/hr으로 증가시키면서 계속 온도가 하강하는 것을 볼 수 있고 그림3에서 CO 배출량을 보면 30분 경과 후 O₂와 CO₂ 배출량이 큰 폭으로 변화하게 되는데 CO₂의 배출량이 급속도로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 연소가 급속도로 둔화되는 것으로 판단되고 CO도 감소하였는데 이는 슬러지의 수분 현열에 의해 건조 과정이 주로 일어나고 있음을 예측 할 수 있다. 수분에 의한 현열과 휘발 및 고정 탄소분에 의한 열량이 균형을 이루어 연소가 정상적으로 진행 될 수 있는 분위기는 초기 투입 10~15kg/hr에서는 거의 이루어지고 있지 않는 것으로 사려된다.

따라서 본 실험 장치에서 50wt%의 슬러지의 적정 소각량이 10kg/hr 정도로 보인다. 그런데 40%와 45%의 슬러지의 소각 결과의 차이는 큰 차이가 없는 것과는 대조적으로 50%의 소각실험에서는 연소 상태가 상당히 비정상적으로 보여지고 있다.

이는 수분 함량의 결과에 따라 일정하게 투입률 및 소각량이 변화되지 않고 50% 함수율에서는 급격하게 연소 상태가 나빠져 나타남을 보여주고 적정 소각량의 급격한 감소를 보이고 있다.

함수율의 증가에 비해 소각량 및 배기가스의 통도

가 크게 차이가 나는 것은 건조, 탈휘발, 고정탄소로 가정되는 슬러지의 연소 과정 중 45%와 50% 함수율에서 임의의 한계 함수율이 존재하기 때문으로 예측된다.

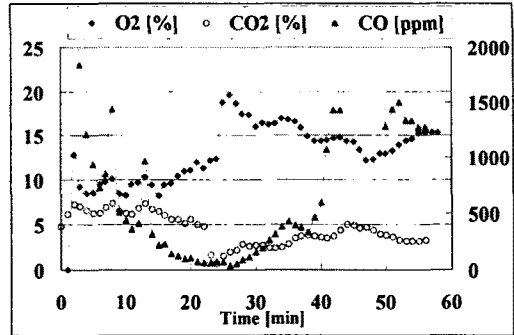


Fig. 7 50w% Gas Analysis

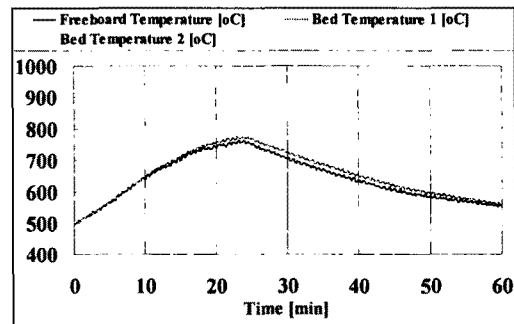


Fig. 8 50wt% Sludge Temperature Profile

3.2 열 부하율과 화상 부하율

연료(가연물질)를 연소시킬 경우, 연소실의 단위체적(m³), 단위시간(hr)당 발생하는 평균 열량을 열부하(또는 연소실 열 발생률), 고체 가연 물질을 화상에 놓고 연소시킬 경우 단위면적, 단위 시간당의 연소 공급 능력을 화상 부하(kg/m²h)라고 정의하고 본 실험에 사용된 소각로의 열 부하율과 화상 부하율을 계산하여 Table 3에 제시하였다. 문헌에 제시된 유동층 소각로의 슬러지에 대한 화상 부하율과 열 부하율은 각각 350~450(kg/m²h), 15~45($\times 10^4$ kcal/m²h)이고 본 실험 장치에서 소각 가능한 투입률은 30kg/hr 정도로 화상부하율이 약 190~750(kg/m²h), 열 부하율이 약 60~80($\times 10^4$ kcal/m²h) 나타나는 것을 알 수 있었다 이는 화상 부하율과 열 부하율이 약 20%정도 크게 나타나는 것이다.

화상 부하율은 화상 면적을 소각로의 단면적을 주로 계산하게 되는데 이는 화염이 베드 표면에서 형

성된다는 가정 때문이다. 그러나 유동층 소각방식은 작동 특성상 연속적으로 혼합 및 분쇄가 이루어지기 때문에 베드 내부에서도 건조 및 열분해 현상이 이루어진다. 따라서 화상 면적을 베드 표면에만 제한되지 않는다고 할 수 있다. 그러므로 유동층 소각로에서는 단위 면적 당 시간당 소각량을 정의하는 화상 부하율 보다 단위 체적 당 시간당 소각량을 정의하는 것이 적합 것이다. 또한 유동층 소각방식은 베드에서 탈휘발된 가연분이 프리보드에서 연소하게 되므로 로내 온도가 유지되는 열원은 거의 프리보드에서의 가스상 연소이므로 열 부하율을 정의할 때 로의 부피를 베드를 제외하고 보아야 할

Table 3 슬러지 투입량에 따른 화로 열 부하율

	KITECH Pilot	A	B	C
소각용량(ton/day)	0.72	700	451	100
W_w (%)	40	80	80	80
H_L (kcal/kg)	1170	167	171	85
S_L ($\times 10^4$ kg/m ³ hr)	339	193	153	115

가능성도 있다.

Table 3는 실제 운영되고 있는 유동층 소각로의 슬러지 소각에 대한 운전 요소 값들을 비교한 것이다. 본 실험에 사용된 pilot plant에서 화상 부하율이 높게 나온 것은 실제 소각로와 달리 로 단면적에 비해 베드의 깊이가 높기 때문으로 보인다. 이것은 유동층 소각에서는 화상 부하율 산정시 화상이 베드 단면적만을 고려하게 되기 때문이라고 생각된다.

4. 결론

- 1) 본 실험 장치 실험에서 적정 슬러지 투입량 실험은 30kg/hr으로 나타났다.
- 2) 함수율 50%와 45%사이에서 소각 가능 투입량이 급격히 달라진 것은 연소 과정 중 건조 단계에서 함수율 50%의 슬러지는 수분 증발에 과다한 열이 소비되어 베드 온도가 일정 수준 유지되지 못했기 때문으로 보인다.
- 3) 함수율 45~50% 사이에 임의의 한계점이 존재하는 것으로 예상된다.
- 4) 유동층 방식의 소각로에서는 화상 부하율과 열 부하율이 크게 산출되며 화상 부하율 보다는 단위 체적당 시간당 소각량을 기준으로 잡는 것이 적절할 것이다.

5. 후기

본 연구는 산업 자원부 청정생산기술 개발사업 지원 하에 "산업 슬러지 기포 유동층 소각 시스템 개

발사업"의 일환으로 이루어 졌으며 국가청정개발 지원센터, 산업자원부 및 관계자 여러분께 감사 드립니다.

6. 참고문헌

- [1] 2000년 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 환경부, 2000.
- [2] J. Werther, T. Ogada, Sewage sludge combustion, Progress in energy and combustion science, Vol. 25, pp. 55~116, 1999.
- [3] Yang-Soo Won, Chul-Hee Lee, Seong-Pil Choi, Characteristics of compostion and incineration of swage sludge, J. Korea solid wastes engineering society, Vol14, No.1,1997, pp.43~53.
- [4] 박제현 외, 하수 슬러지의 유동층 소각특성, 공업화학전망, 제4권, 제4호, 2001.
- [5] Paul B. Liao, Fluidized bed sludge incinerator desing, J., WPCF, Vol. 46, No 8, pp.1895~1913, 1974.
- [6] 환경 시리즈2, 폐기물소각로 - 계획과 설계, 환경연구회편, 문지사, 1993
- [7] 최금찬 외, 폐기물소각로, 신평문화사, 서울, 2000.
- [8] Lowe P. Development in the thermal drying of sewage sludge, J. CIWEN, Vol. 9, pp. 306~316, 1995.