

유동상 소각로에서 하수 슬러지 연료 특성

최진환* · 최상민* ·

Fuel Characteristics of Sewage Sludge in a Fluidized Bed Incinerator

Jinhwan Choi and Sangmin Choi

Key Words : sewage sludge, fuel characteristics, TGA, pyrolysis, FBC, mixing, residence time, volatile, char.

Abstract

Fuel characteristics of sewage sludge as required for the fluidized bed incinerators have been evaluated. Sewage sludge is basically a solid fuel with high percentage of moisture. Moisture content of the fuel directly affects the heating value of the fuel and the exhaust gas composition. When the sludge of transported into the incinerator, sludge cake is subject to the mixing, break-up and heat-up. Fluidization process would enhance these physical processes. The sludge fuel could then undergo the moisture evaporation and devolatilization process. Subsequent oxidation of volatiles as well as the remaining char would then follow. Sludge samples are characterized with high percentage of volatiles out of total combustibles. Quantitative understanding of above listed subprocesses would certainly help in the utilization of fluidized bed incinerators. A limited set of fuel characterization tests including calorimetric analysis, proximate analysis, elemental analysis and thermogravimetric analysis were conducted for the selected sludge samples. The measurement results of sludge samples were reported along with some published data. Limited experience in the actual incinerator plant is also presented.

1. 서 론

우리나라에서는 1997년 기준으로 하루 3천톤 이상의 하수 슬러지가 발생하고 있으며, 약 75%는 육상 매립으로

그리고 약 20%는 해양투기에 의해 처리되고 있다⁽¹⁾. 그러나 2001년부터 하수 슬러지의 직 매립이 금지되고, 해양투기는 국제적으로 기피의 대상으로 감소 추세에 있어 안정적 처리방안을 마련하여야 한다. 이러한 배경에서, 하수 슬

* 한국과학기술원 기계공학과

러지의 소각 처리는 국내외적으로 현실적이고 합리적인 처리방안으로 인정되면서 이의 적용이 증가하고 있다. 또한 소각처리의 구체적 방법 중에서는 유동상 소각로를 이용하는 방법이 하수 슬러지의 특성에 가장 적절하게 대응하는 방안으로 인식되면서 선호 되고 있다.

소각처리의 관점에서 하수 슬러지는 다량의 수분을 포함하고 있는 고체연료로 볼 수 있다. 수분함량은 기계식 탈수기를 통과한 뒤에도 흔히 80 ~ 85%에 이르기 때문에 소각의 전단계 과정으로 이들 수분을 증발시켜야 하며 이 과정에 막대한 양의 열량이 필요하다. 따라서 슬러지의 수분함량 및 건조 후 기준 슬러지의 발열량 등이 가장 중요한 설계 기준이 된다. 이에 추가하여 슬러지의 원소 구성성분 및 고체연료로서의 연소 특성을 파악하여야 한다.

한편 이들 특성은 하수 슬러지의 종류 및 성상에 따라 달라진다. 우선 하수 처리장에 유입되는 하수의 종류 및 경로에 따라 축산 폐수, 도시 하수, 공장 폐수 등으로 구분된다⁽²⁾. 또한 같은 지역에서 발생한 하수라도 처리 공정이 나 일기 및 계절에 따라 슬러지의 특성이 달라진다. 그러므로 이들 특성을 설계 및 운전 과정에 어떻게 반영하는가가 중요한 고려 사항이 될 수 밖에 없다.

소각에서 달성하여야 하는 목표로 에너지 활용의 극대화와 함께 배가스에 의한 공해 발생을 최대한 억제하기 위하여 연료 특성을 기초 설계에 반영하고 운전 과정에서 관리하여야 하나, 구체적으로 연료 특성에 대한 이해가 부족하고 자료의 확보가 미비한 상황이다. 이에 대응하기 위해서는 우선 고체 연

료로서의 특성을 파악하고 유동상 소각로에서의 슬러지 연료 거동을 이해할 필요가 있다. 또한 슬러지를 연료로 하는 소각공장의 최종 운전 상황과 연료 특성과의 연관 관계를 평가할 수도 있다. 본 연구에서는 연료 특성에 대한 지금까지의 결과를 정리하고 향후 추진 방향을 점검해 보고자 한다.

2. 연료 거동 및 특성 측정

2.1 연료 거동과 관련 결과

슬러지는 파이프라인에 의하여 수송할 수 있는 장점이 있으나 이 과정에서 마찰 또는 마모 특성에 대한 이해가 있어야 한다. 특별히 수분 함량에 따른 점도의 변화가 중요하다. 투입 연료인 슬러지의 크기와 밀도는 투입 방식에 따라 변한다. 수분이 많은 경우 파이프라인을 통해 압력으로 밀어내는 주입 방식이 이용되고 건조된 슬러지의 경우 피더 스크류나 스프래더에 의해 투입되는 방식이 주로 사용된다. 투입 방식과 더불어 슬러지의 투입 위치도 투입된 연료 거동에 많은 영향을 미친다. 유동층 상부에 투입된 슬러지의 경우 슬러지의 밀도가 유동사보다 낮아지면 유동층 내부로 침투되기 어렵지만 유동층 내부로 투입된 슬러지는 유동사와의 접촉이 원활히 이루어질 것이다. 투입 위치는 슬러지의 소각과정에서 중요한 인자이다.

슬러지가 유동층에 투입되면 유동사와의 물리적인 접촉에 의해 열전달, 혼합, 분쇄 과정이 일어난다. 여기에서는 슬러지의 크기, 밀도, 다공도 등 물리적 형상과 분쇄 특성 등이 중요하다.

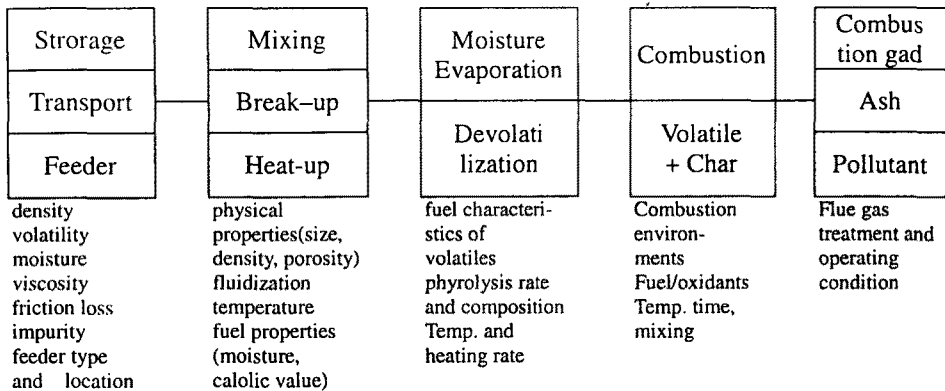


Fig. 1 연료 거동과 주요인자.

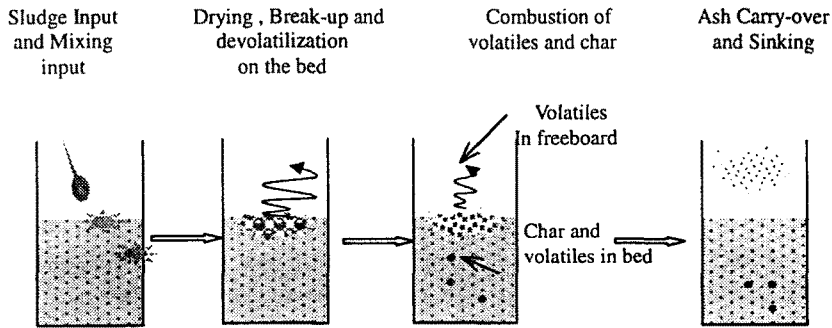


Fig. 2 베드에서의 슬러지 분쇄 혼합, 탈휘발, 연소 모델

이런 일련의 과정에서 슬러지는 가열, 건조, 탈휘발, 연소과정을 거쳐 소각되어 진다. 연소 과정은 휘발분 연소와 고정 탄소 연소로 나뉠 수 있으며 휘발분의 연소는 베드와 프리보드에서 동시에 진행된다. 탈 휘발과정에 영향을 미치는 운전인자는 슬러지의 특성(성분, 수분함량, 발열량, 입자 크기), 베드의 온도, 산소 농도, 슬러지의 혼합정도 등이 있다⁽⁴⁾. 연소 과정에서 생성되는 가스 조성은 공기비, 연소온도 및 혼합 등의 연소 조건에 따라 변하고 베드와 프리보드에서의 휘발분 연소를 역시 운전 조건에 영향을 받는다.

슬러지의 거동 및 연소과정을 단순화

하여 Fig. 1,2 와 같이 도시 할 수 있다.

2.2 기초 연료 특성 측정

슬러지를 포함한 고체 연료의 특성 분석은 열량분석, 삼성분 분석, 원소 분석이 흔히 행해지고 있으며 이들 측정값은 실제 연소로의 설계나 운전에 있어서 매우 중요한 자료로 사용되고 있다.

발열량 측정은 Leco 350A 발열량 측정기를 사용하였다. 발열량 측정기의 측정오차는 2% 이하이다. 발열량에서 수분 잠열의 고려 여부에 따라 고위발열량과 저위 발열량으로 나뉘는데 건조된 시료의 고위 발열량으로부터 수분 함량

과 수소 성분 비를 알 경우 저위 발열량을 구할 수 있다. 하수 슬러지는 수분 함량이 많기 때문에 저위 발열량 계산에서 주요 변수는 수분 함량이다.

삼성분 분석은 수분, 가연분, 회분의 양을 측정하는 것을 말한다. 수분은 105°C, 가연분의 함량 측정은 820 °C에서 시료가 완전 건조 또는 연소된 후 질량의 변화율로부터 계산한다.

원소 분석은 EA1110-Fisonsion 원소 분석기(0.3% 이하 오차)를 이용하였다. 고위 발열량 측정과 마찬가지로 원소 분석에서 측정 오차를 유발하는 것은 시료 중에 포함된 수분의 함량이다. 105 °C에서 5시간 이상 건조 시킨 다음 시료의 균일성을 보장하기 위해 시료를 분말로 만들어 시료 중 C,H,O,N,S를 측정하였다. 원소 중 산소의 함량은 가연분의 양과 다른 성분의 양으로부터 계산된 값이다.

고체 연료의 연료 특성 분석에서 이용되는 또 다른 방법으로 열중량 분석이 있다. 열중량 분석 실험은 일정 온도 상승률을 갖는 가열로 내부에 복사, 전도 등의 영향을 받는 입자가 놓여 있을 때, 이 입자들의 중량 감소량을 관찰하는 것이다.

유동층 연소로에서 슬러지의 연소 특성을 알아보기 위한 추가적 실험으로 휘발분 발생을 및 성분분석, 건조 및 연소 후 입자 크기 및 성분 분석 등을 고려할 수 있으며 이의 측정을 위하여 대용량 휘발분 시험 장치 및 유사 유동층 연소기에서의 고체 연료 연소 실험 등이 행해지고 있다^(4,5,6). 그러나 이런 실험에서 얻을 수 있는 정보를 체계적으로 실제 장치에 적용하는 데는 많은 제약 조건이 따르므로 유의해야 한다

3. 측정 결과

3.1 기초 자료

측정된 하수 슬러지의 발열량은 수분을 완전히 건조시킨 후 측정한 고위 발열량이다. 발열량 측정 결과를 보면 분당, 양평, 성남, 구리 순으로 발열량이 높은 것을 알 수 있다. 측정된 고위 발열량을 기초로 수분 함량에 따른 슬러지의 저위 발열량을 계산할 수 있다. 건조 전의 슬러지는 수분함량 80% 기준으로 건조 후 슬러지는 수분함량 40%를 기준으로 계산하였으며 통상 설계 기준인 수분 함량 65%에 대해서도 계산하였다(Table 1). 또한 원소 분석 결과와 Dulong 식을 이용하여 발열량을 이론적으로 계산하여 함께 표시하였다. 건조하지 않은 하수 슬러지를 소각하기 위해서는 보조 연료의 투입이 불가피한 것을 쉽게 알 수 있다.

Table 1. 슬러지 시료 발열량 분석 (단위: kcal/kg)

	고위 발열량		저위 발열량(수분%)		
	건조 시료		80%	40%	65%
	측정	계산	통상 입 력 조건	통상 건 조 조건	설계 기 준
K(구리)	2499	2637	-	1140	415
Y(양평)	3848	3926	236	1907	862
B(분당)	4184	4019	317	2070	958
S1(성남)	3513	3308	169	1707	746
S2(서울)	2431	1878	-	816	225

* S2는 서울시 자료 1999년 9월

가연분의 양은 측정된 발열량에 비례하였다. S1을 제외하고 측정된 건조 시료의 발열량과 Dulong 식으로 계산된 발열량이 10%이내 오차로 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 황 성분은 구리시 하수 슬러지에서 많이 존재하며 분당, 성남 슬러지의 경우 황 성분의 양이

0.1% 이하였다.

Table 2. 슬러지 성분 분석 (단위 %)

	수분	건조 기준					재
		가연분					
		C	H	O	N	S	
K	80.4	50.1	7.3	31.9	8.1	2.5	49.6
Y	84.7	54.6	7.3	28.8	8.9	0.4	30.8
B	80.2	52.6	8.3	31.5	9.3	-	29.9
S1	80.9	51.4	8.0	32.7	8.0	-	39.5
S2	72.3	51.9	5.7	31.3	8.3	2.5	61.3
R1	-	52.1	7.7	31.4	6.7	2.1	46.4
R2	-	46.8	8.3	36.5	6.7	1.7	47.5

R1, R2는 타 논문 자료 (5.6)

Table 3. 회분 및 중금속 분석 자료

성분	R1	R2	S2
Ash analysis (%)			
SiO ₂	22.4	38.3	46.9
Al ₂ O ₃	9.0	14.8	20.3
Fe ₂ O ₃	24.6	12.5	8.54
CaO	12.5	9.1	6.56
MgO	2.8	2.8	2.58
K ₂ O	0.8	2.2	2.36
SO ₃	2.6	2.2	*
Heavy metals (mg/kg)			
Ba	195	820	*
Pb	<20	180	25
Cd	2.9	5.3	3.5
Cr	330	140	233
Cu	485	410	1482
Ni	76	207	*
Hg	<5	<5	*
Zn	995	2290	2196

* 측정 측정 대상에서 제외된 항목

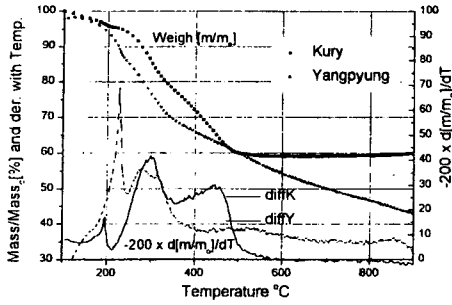
하수 슬러지의 성상과 발열량은 발생 지역에 따라 크게 변하고 계절적 요인 및 홍수등 기후적 요인 등의 영향을 받는 발생 시기에 따라서도 차이를 보인다⁽²⁾. 그러나 가연분 중의 원소 분석 결과(Table 2)에서 슬러지 가연분의 성분비는 크게 보아 거의 비슷한 분포를 보여 주고 있다. 그러나 중금속이나 회분의 경우는 주요 구성 성분은 비슷하나 그 비율은 개별적으로 다른 값을 보인다..

3.2 열중량 분석

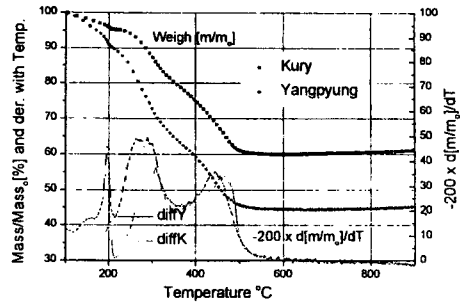
슬러지 샘플은 105 °C에서 5시간 이상 건조시킨 뒤 입자 크기의 영향을 줄이기 위해 망(sieve)를 이용하여 40µm ~ 74µm로 일정하게 하였다. 열중량 분석은 Setaram 열중량 분석기(Model DTA 92)를 이용하였으며 온도를 10 °C/min으로 상승시켜 시료의 중량 변화를 관찰하였다. 캐리어 가스로 아르곤과 산소/질소 혼합가스(산소 20%, 질소 80%)를 사용하여 무산소 열분해와 연소 환경에서의 열분해에 대한 자료를 얻었다. 최고 온도는 900 °C로 설정하여 실험하였다(Fig. 3, 4).

캐리어 가스의 변화 즉 가열 조건에서 산소의 존재 유무가 열분해 과정에 미치는 영향은 샘플별로 다른 특징을 보여 주고 있다. 그림에서 보듯이 K 및 B 연료는 산소 존재의 영향을 받지 않으며 550 °C 정도에서 열분해도 완료되는 것을 보여 주고 있다. 반면 Y, S 연료의 열중량 실험 결과를 보면 K, B 슬러지 실험 결과와 다르게 산소 공급 유무에 따라 열분해 과정이 크게 변하는 것을 관찰 할 수가 있다. 무산소의 경우 350 °C까지 열분해가 급격히 진행되지만 이 온도를 넘어서면서 분해율이 감소하여 900 °C까지도 열분해가 진행된다. 반대로 산소가 공급되는 경우를 보면 열분해가 550 °C에서 완료된다. 산소 주입시 열분해 과정은 네 슬러지 모두 3 단계를 거치는 것으로 나타났다.

양평, 성남 슬러지와 구리, 분당 슬러지를 비교하면 1,2 단계에서 가스상 물질의 탈착과 지방족 탄화수소 및 방향

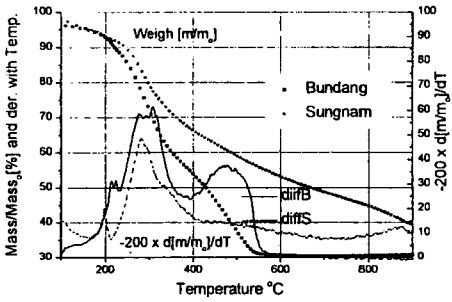


a) Argon 캐리어 가스

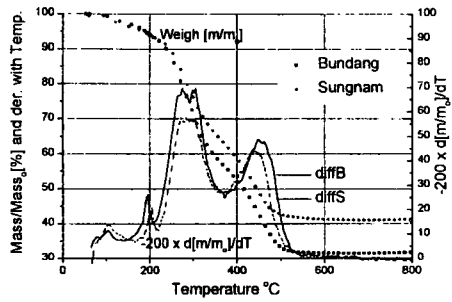


b) 산소 질소 혼합가스(산소 20%, 질소 80%)

Fig. 3 구리 양평 하수 슬러지 열중량 분석

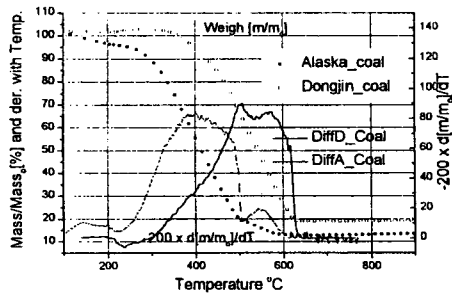


a) Argon 캐리어 가스

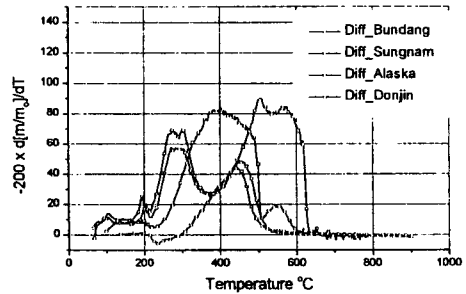


b) 산소 질소 혼합가스(산소 20%, 질소 80%)

Fig. 4 분당 성남 하수 슬러지 열중량 분석



a) 석탄 열중량 분석(혼합가스)



b) 슬러지와 석탄의 DTP 비교

Fig. 5 석탄 열중량 분석 및 DTP(differential thermogravimetric profile) 비교

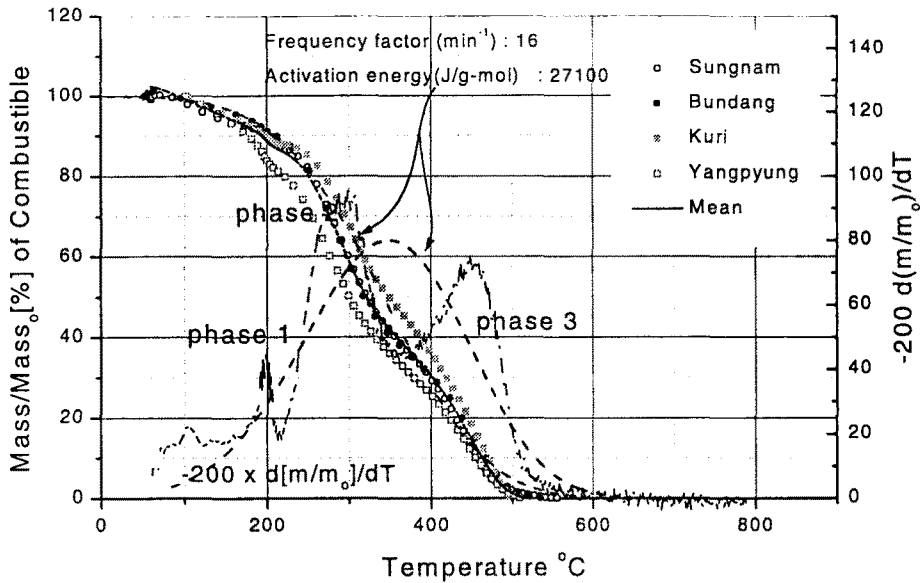


Fig. 6 산소 공급하에서 가연분에 대한 열중량 분석 및 모델

죽 탄화수소의 증발에 의한 탈휘발 과정이 일어나는데 열분해가 일어난 양을 가연분 중의 분해 비율로 나타내면 두 슬러지 모두 40 ~ 50%로 유사한 경향을 보인다. 그러나 3 단계에 해당하는 거대분자 (macromolecule)의 분해가 일어나는 과정은 캐리어 가스의 종류에 따라 차이가 있다. 이것은 양평과 구리 슬러지에서 거대분자의 존재 형태가 양평, 성남의 슬러지와 다름을 암시한다.

슬러지와 연료 특성이 다른 석탄에 대해서 질소/산소 혼합가스를 캐리어 가스로 사용하여, 동일한 실험 조건으로 열중량 분석을 실시하였다. 알래스카 석탄은 열분해가 동진 석탄에 비해 낮은 온도에서 일어나는 것을 볼 수 있는데 이것은 두 석탄이 함유한 휘발분 양

의 차이에서 비롯된 것으로 보인다. 슬러지는 고정탄소의 비율이 높은 석탄에 비해 낮은 온도에서 열분해가 대부분 일어나는 것으로부터 휘발분의 함량이 높은 것을 알 수 있다.

산소 공급 상태에서의 열분해 실험 결과에서 가연분의 분해 과정만을 살펴보면 Fig. 5 과 같이 슬러지의 분해 형태가 모든 슬러지에 대해 거의 유사한 것을 볼 수가 있다. 가연분의 유산소 열분해 과정에 대해 1 차 아레니우스 모델을 적용하여 빈도 상수와 활성화 에너지를 구할 수 있다⁷⁾. 빈도상수는 16 (min⁻¹) 이고 활성화 에너지는 27100 (J/g-mol) 로 계산되었다. 열분해의 미분치를 관찰하면 열분해 과정을 3 단계로 구분하여야 하나 전반적 경향은 1 단계 단순

1 차 아레니우스 식으로 이상화하는 것이 타당하다는 것을 Fig 5 에서 볼 수 있다

이 실험 결과와 같이 실험 대상 연료인 슬러지의 가연분은 200 ~ 500 °C 에서 방출되는 휘발분 성격을 나타내고 있다. 따라서 슬러지의 연소에서 탈휘발 과정과 휘발분의 연소가 중요한 것으로 판단된다. 휘발분은 베드 내부 또는 프리보드에서 연소되므로 휘발분 방출 및 베드 환경에 따라 베드 내부와 프리보드부에서 연소하는 비율이 결정 될 것이다. 이와 같은 연소 모형을 열중량 분석 결과만으로 설명할 수는 없으므로 열분해와 유동화 현상을 동시에 모사하는 실험 조건에서 측정하는 것이 필요할 것으로 보인다.

추가적인 슬러지 특성 자료로 슬러지 강도, 점도, 휘발분 성분, 연소실 상향에서의 수분 건조 속도 등 슬러지 거동을 지배하는 많은 인자들이 있다.

4. 실험플랜트 운전 결과

4.1 설비

Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 구리 유동층 소각 시스템은 대기압 기포형 유동층 연소로, 증기식 패들 슬러지 건조기, 공기 예열기, 보일러, 건식 반응기, 백필터 등의 장치들로 이루어졌다

설계 기준 처리 용량은 수분함유 기준으로 약 70 t/day (수분 80% 기준 기준 14 t/day)이다. 증기식 슬러지 건조기에서 40% 수분함량으로 건조되어 베드 상부에 스프래더로 투입되고 있다. 연소 공기는 공기 예열기에서 500 °C 로 예열되어 공급되고 프리보드에 추가로 주입되는 (흔히 2 차 공기라고 불리는) 연소 공기는 없다. 슬러지의 수분을 80% 에서 40 %로 건조시키는 데 필요한 열량은 슬러지의 발열량만으로 충분하지 않다. 하수 처리장에서 생산한 증기를 추가로 공급 받아 건조율을 높게 운전하고 있다. 건식 반응기는 소석회 투입량이 300 kg/day 으로 출구에서의 HCl 농도를 저감할 목적으로 설치되었다.

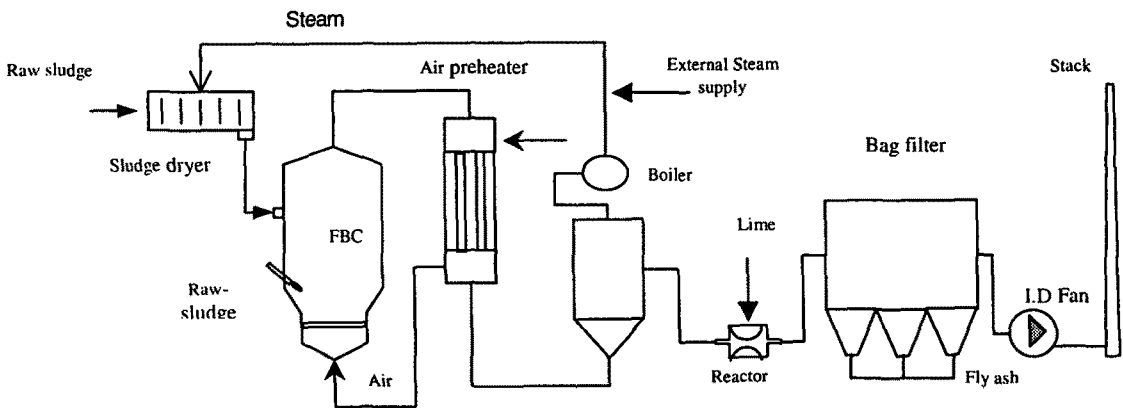


Fig. 7 K 시 유동층 소각로 개요도

강수기인 여름철에 슬러지에 모래 성분
 분비 증가하며 이에 따른 발열량 저감
 및 유동사의 유입과다에 의한 유동 모
 래층 높이의 증가 등이 문제로 발생하
 였다. 현재 반입되는 6개 슬러지 중
 에서 양평 등 축산 및 인분뇨 등이 높은
 경우 3500 kcal/kg 이 넘고 낮은 경우
 2500 ~ 2700 kcal/kg 정도이다. 반입 슬러
 지 종류를 번갈아 가며 받아 약 80톤
 의 병커에서 개략적으로 혼합율을 관리
 한다. 발열량이 떨어지는 경우 목재 편
 을 보조 연료로 사용한다.

4.2 실편랜트 운전

하수 슬러지의 원활한 연소를 위해서
 는 우선 투입되는 연료인 슬러지에 대
 한 자료가 충분히 확보되어야 한다.

슬러지의 성상 및 특성을 발생원, 계
 절적 요인을 고려하여 투입되는 슬러지
 의 연소 관련 인자에 대해 점검하고 보
 조 연료의 양을 확인해야 한다. 슬러지
 와 보조 연료의 양에 맞춰 연소 공기량
 도 결정되어야 한다. 연소 공기량의
 결정은 보일러 출구의 산소농도와 일산
 화 탄소의 농도를 수시로 확인해서 제
 어하는 것이 바람직하다.

운전 조건에는 많은 불확실성이 존재
 한다. 투입 슬러지의 특성, 공기 주입량,
 보조 연료에 대한 정보 및 투입량, 기
 타 실제 연소 조건에 대한 자료가 충분
 하지 못한 경우가 많은데 이것은 실제
 장치의 운전 조건 및 상황 점검을 어렵
 게 만든다.

투입 연료인 슬러지의 조건은 플랜트
 운전에서 있어 중요하다. 발생원 별로 특
 성이 다른 연료의 혼합과 증기 여유도
 에 따른 건조율 차이가 운전 상황을 크
 게 변화시킨다. 연료 조건의 변화에 적
 절히 대처하기 위해서는 연료의 특성
 측정 주기 및 방법에 대한 구체적인 지

침이 필요하다.

운전 시에는 성상 및 운전 조건에 대
 한 개략적 자료만을 근거로 판단하게
 된다. 투입물의 성상을 매 순간 파악하
 지 못하며, 설령 성상이 순간적으로 변
 한다 하더라도 시스템 관성 때문에 즉
 각적인 반응이 나타나지 않는다. 장치
 의 운전 기준은 발열량 기준으로 하며
 발열량에 가장 큰 영향을 미치는 수분
 함량을 간이 방식으로 점검하여 운전
 조건을 맞춘다. 유동층 연소로에서는
 유동사의 큰 열용량에 의하여 순간적인
 발열량 변화에 대처할 수 있으므로 넓은
 대역의 슬러지 조건을 수용할 수 있
 었다. 건조율이 낮은 슬러지가 유입될
 경우 투입량을 하향 조절하거나 보조
 연료를 투입하여 대처한다.

그러나 이와 같은 연소로의 안정적인
 운전을 위한 대처 뿐만 아니라 공해 물
 질의 배출을 최대한 억제하는 것도 관
 심을 두어야 할 부분이다. 슬러에 포함
 된 황, 염소, 질소 등과 같은 성분은 공
 해 물질 배출의 잠재성을 가지고 있다.
 슬러지의 가연분 중 휘발분의 함량이
 높기 때문에 프리보드에서 휘발분의 완
 전 연소가 이루어지지 않을 경우 불완
 전 연소물질이 배출될 가능성이 있다.

유동층 운전 조건은 수분함량이 많은
 생 슬러지의 투입 여부에 따라 크게 변
 한다. 슬러지의 수분 함량에 따라 배가
 스 농도 조성파 연소실의 온도 분포가
 크게 달라지는 것이 관찰된다.

수분의 함량이 많은 슬러지의 투입은
 연소 과정의 변화를 초래 했음을 온도
 측정 결과를 통해 알 수 있었다. 수분
 이 많은 건조되지 않은 슬러지의 투입
 은 베드의 온도를 낮추고 프로 보드의
 온도를 높였다. 건조 된 슬러지만 투입
 할 경우 베드의 온도가 프리보드의 온

도 보다 높은 것과 상반된다. 프리보드의 온도가 높다는 것은 휘발분의 연소가 베드에서보다 프리보드에서 활성화되었음을 뜻한다.

슬러지의 탈휘발 속도는 매우 빨라서 수분의 증발과정에서도 휘발분이 발생하는 것으로 보고되고 있다³⁾. 수분이 많은 슬러지를 투입할 경우, 수분 증발시간이 길어지고 슬러지 주의 온도는 베드 온도에 비해 낮은 상태를 유지할 것이다. 또한 수분 함량의 증가는 연소가스량을 증가시켜 유동속도를 높여 베드에서 휘발분의 체류시간을 감소시킨다. 베드에서 발생한 휘발분은 낮은 온도와 베드 체류시간의 감소에 의해 베드에서 연소가 완료되지 못하고 프리보드로 이월되는 양이 증가할 것이다.

그러나 프리보드에서 충분한 산소와의 접촉과 체류시간을 만족하지 못할 경우 불완전 연소물의 배출이 증가한다. 생슬러지를 투입할 경우 건조 슬러지를 투입할 경우보다 일산화탄소의 농도가 증가한 것을 볼 때 불완전 연소가 일어나고 있는 것을 알 수 있다.

질산화물은 NH_3 , HCN 의 휘발분의 산화 과정을 통해 발생하는 것으로 보고되고 있다^(3,8,9). 이와 같은 휘발분에 대해 충분히 산화가 이루어지지 않을 경우 NO_x 의 발생량은 줄어들 것이다. 반대로 NH_3 와 같은 미연분의 배출은 증가한다. 건조 슬러지의 투입 시 NO_x 의 발생량이 생슬러지를 투입할 경우보다 높았는데 이런 맥락에서 설명될 수 있다. 백필터 벽면에 생성된 결정물 분석한 결과 NH_4Cl 로 판명되었고 이것은 간접적으로 이 유동층 소각로에서 NO_x 의 발생 경로가 NH_3 휘발분과 관련이 있음을 말해 준다.

슬러지의 연소에서 휘발분의 연소가

중요하며 휘발분의 프리보드에서의 연소 비율은 운전/설계 인자가 됨을 알 수 있다. 휘발분의 발생 속도, 위치에 대한 정보를 얻어야 연소로 운전의 최적화가 이루어질 수 있다. 열중량 분석을 통해 얻어진 휘발분에 대한 열분해 모델을 실제 연소로에 적용하기 위해서는 우선 열전달량의 변화에 따른 열분해율, 투입 연료의 크기, 열분해 생성물, 분쇄과정, 열전달, 수분 건조등에 대한 자료를 추가로 얻어야 할 것이다.

유동층 내부 연소 모델을 베드와 프리보드로 나누어 세울 수 있으나 베드에서의 슬러지 열분해, 거동, 열전달, 건조 등에 관련된 정보는 아직 미흡하다. 슬러지의 건조 및 열분해 과정에 대한 정보는 유사 유동층 연소로 실험을 통해 얻어질 것으로 기대한다.

5. 결론

유동층 소각로의 운전에 필요한 하수 슬러지의 연료 특성을 알아보기 위해 원소 분석, 발열량 분석, 열중량 분석을 실시하였다. 슬러지의 발열량은 가연분의 함량에 지배를 받고 하수 슬러지의 발생 지역에 따라 차이를 보였다. 그러나 원소 구성 성분비는 크게 다르지 않은 값을 가지며 유산소 열중량 분석 결과도 같은 유형을 나타내었다.

슬러지는 기본적으로 수분 함량이 많고 수분 건조율은 발열량과 배가스 조성에 직접적으로 영향을 주었다. 슬러지의 건조율에 따라 베드와 프리보드의 연소 비율 크게 변했다. 수분 함량이 많은 슬러지를 소각할 경우 프리보드에서의 연소가 중요했다.

참고문헌

- (1) 환경부, “환경 백서”, 1997.
- (2) 배재근, 조재경, 곽노혁, 김동욱, “하수 슬러지의 성장 분석에 의한 적정 처리 방안의 검토”, 폐기물 학회지, 1998, Vol 13, pp252~260.
- (3) T. Ogata and J Werther, “ Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed”, Fuel, Vol.75, 1996, pp 617 ~ 626.
- (4) J.A. Caballero, R. Front, A. Marcilla, J. A. Conesea, “Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis”, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1997, Vol. 41, pp. 433 ~ 450.
- (5) C. Storm, H. Rüdiger, H. Spliethoff, K. R. G. Hein, “ Co-pyrolysis of coal/biomass and coal/sewage sludge mixture.” Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 1999, Vol. 121, pp. 55~63.
- (6) T. H. Fletcher, “Time-resolved particle temperature and mass loss measurements of a bituminous coal during devolatilization”, Combustion and Flame, 1989, Vol. 78, pp. 223 ~ 236.
- (7) H. Teng, Y. C. Wei, “Thermogravimetric studies on the kinetics of rice hull pyrolysis and the influence of water treatment”, Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998, Vol.37, pp.3806~3811
- (8) Bo Lechner, “Fluidized bed combustion: Mixing and pollutant limitation” , 1998, Energy Combustion Sci. Vol. 24, pp. 31 ~ 61.
- (9) J. Werther, T. Ogata and C. Philipek, “N₂O emission from the fluidized-bed combustion of sewage sludges”, Journal of the Institute of Energy, 1995, Vol. 68, pp. 93 ~ 101.