

## 소화 하수슬러지의 유동층 소각(I) —단단 유동층 소각특성—

이제근 · 이기호 · 장정국 · 이남수\* · 임종성\*\* · 전해수\*\*

부산수산대학교 환경공학과

\*\*고려대학교 화학공학과

(1991년 11월 23일 접수, 1992년 3월 30일 채택)

### Fluidized Bed Incineration of Digested Sewage Sludge Part 1. Combustion Characteristics of the Single-Stage Fluidized Bed Incinerator

Jea Keun Lee, Ki Ho Lee, Jeong Gook Jang, Nam Soo Lee\*,  
Jong Sung Lim\*\* and Hai Soo Chun\*\*

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

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

(Received 23 November 1991; accepted 30 March 1992)

#### 요 약

실험실 규모의 유동층 소각로에서 자연 건조시킨 소화 하수슬러지의 유동층 소각특성을 파악하였다. 실험에 사용한 하수슬러지는 수분함량이 21%이며 1050 kcal/kg 정도의 낮은 발열량을 가지고 있음에도 불구하고 보조연료와 별도의 증매질을 공급함이 없이 정상상태에서 연속적인 조업이 가능하였다. Freeboard 내에서 하수슬러지의 높은 연소율에 의해 연소효율은 94% 이상이었으며, 배출가스 중의 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>의 농도는 본 실험조건에서 각각 6.1-16.2 ppm, 830-1310 ppm이었다.

**Abstract**—Combustion characteristics of digested sewage sludges dried in ambient condition were measured in a laboratory scale fluidized bed incinerator. In spite of the low heating value(1050 kcal/kg) and the high moisture content(21%) of the sludge, steady state combustion could be obtained without addition of an auxiliary fuel. Addition of bed material was not needed in the experiment. The combustion efficiency was achieved over 94% due to the high combustion rate of the sludge in the freeboard. Emissions of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> ranged 6.1-16.2 ppm and 830-1310 ppm, respectively, in given experimental conditions.

#### 1. 서 론

하수 종말 처리장으로부터 배출되는 하수슬러지는 하

수도 보급율이 높아짐에 따라 그 발생량 또한 크게 증가하고 있어, 이의 원활한 처분문제가 지적되고 있다[1, 2]. 따라서 이를 안전하면서도 값싸게 처분할 수 있는 처리기술이 절실히 요구되고 있으나 아직까지는 완벽한 기술개발은 이루어지지 않고 있다. 다만 현재까지의

\*원주소: 한국중공업 기술연구소

연구 추세로 볼 때 슬러지의 감량화 및 안정화가 가능하고 에너지도 회수할 수 있을 뿐만 아니라 나아가 최종 소각 잔류물의 위생매립 및 매립지 축소가 가능한 소각기술이 폐기물의 처리에 가장 큰 잠재력을 지닌 것으로 판단되어 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[3-5].

하수슬러지의 소각을 위해 현재까지 개발된 소각로의 종류로는 다단소각로(multiple hearth incinerator), 유동층 소각로(fluidized bed incinerator) 및 전기적외선로(electric infrared incinerator) 등이 대표적이다[6]. 그러나 유동층 소각기술이 타 소각기술에 비해서 높은 연소강도와 전열율에 의해 장치의 소형화가 가능할 뿐만 아니라, freeboard부의 온도가 높아 악취성 오염가스가 유동층 소각로 내에서 완전처리된 후 배출되기 때문에 오염가스 처리를 위한 부대시설 경비를 줄일 수 있는 잇점이 있어, 최근 유동층 소각로의 건설비중이 크게 높아지고 있다[1, 3, 6-9].

그러나 기존의 유동층 소각로에서는 연료의 분쇄과정, 연료의 주입과정 또는 층 내에서 유동화시 입자간의 충돌 등에 의해 생성되는 미세한 입자들이 미연소된 상태로 연소가스와 함께 비말동반되어 freeboard 내에서의 불량한 연료-공기 접촉에 의해 완전 연소되지 못하고 비산유출됨에 의해 연소효율이 감소될 뿐 아니라 비산유출되는 미세입자들이 대기오염의 원인이 되고 있다. 이러한 미세입자의 비산유출 및 freeboard에서의 연료와 공기간의 혼합불량과 같은 문제점을 해결하기 위해 최근 Lee 등[10-14]은 기존의 유동층 연소로의 특성과 사이클론 연소로의 특성을 접목시킨 새로운 개념의 2단 선회류 유동층 연소장치를 개발하여 무연탄 및 paper sludge의 연소실험에 적용한 바 있다. 2단 선회류 유동층 연소로(또는 소각로)는 유동층 표면에서 배출된 연소가스가 상단 분산판을 통과하여 상단 freeboard 내로 유입되면서 선회운동을 하는 독특한 동역학적 흐름특성으로 인해 단단 유동층 연소로의 장점은 그대로 유지하면서도 기존의 유동층 연소로에서의 문제점을 해결할 수 있어 높은 연소효율을 얻을 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서는 이러한 장점을 지닌 새로운 개념의 2단 선회류 유동층 소각로에서 하수슬러지의 소각특성 및 오염물질 배출특성을 파악하여 하수슬러지 소각처리에 2단 선회류 유동층 소각로의 적용가능성을 확인하는데 그 목적이 있다. 그러나 하수슬러지 유동층 소각로의 소각특성은 같은 사양의 소각로에서 동일한 조건으로 운전을 행하더라도 사용되는 슬러지의 성상에 따라 큰 차이를 나타내므로, 본 2단 선회류 유동층 소각로에서 얻은 결과를 다른 연구자들에 의해 행해진 단단 유동층

소각로의 결과와 직접 비교하는 것은 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 하수슬러지의 소각에 2단 선회류 유동층 소각로를 적용시켜 이 장치의 장단점 및 성능을 검토하기 위해 앞서 실험실 규모의 단단 유동층 소각로에서 하수슬러지의 소각실험을 행하였으며, 여기에서 얻은 결과를 앞으로 적용될 2단 선회류 유동층 소각로 설계의 기본 자료로 사용하고자 한다. 2단 선회류 유동층 소각로에서 하수슬러지의 소각특성 및 황산화물 저감방안 등에 대한 연구를 계속할 예정이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 연구에 사용한 유동층 소각설비 공정의 흐름도를

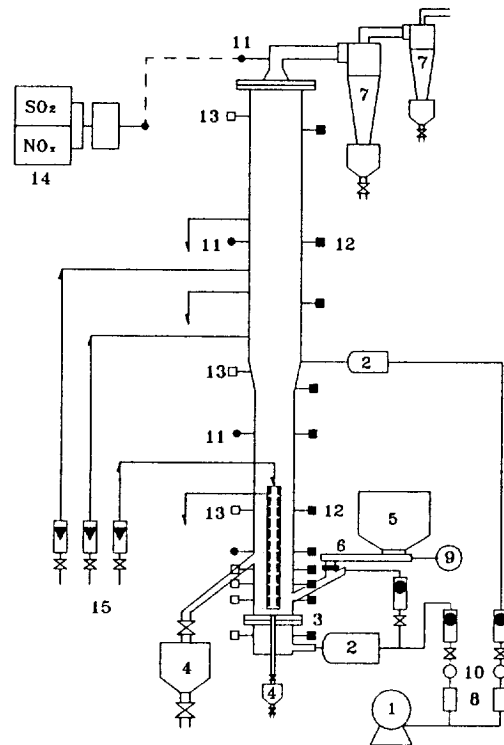


Fig. 1. Schematic flow diagram of experimental apparatus.

- |                               |                         |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1. Compressor                 | 8. Air filter           |
| 2. Air preheater              | 9. Variable speed motor |
| 3. Air distributor            | 10. Regulator           |
| 4. Ash overflow tube & hopper | 11. Sampling line       |
| 5. Hopper                     | 12. Thermocouple        |
| 6. Screw feeder               | 13. Pressure tap        |
| 7. Cyclones                   | 14. Gas analyzer        |
|                               | 15. Cooling water line  |

Fig. 1에 나타냈다. 실험설비는 유동층 소각로, 연료공급기, 압축공기 공급기, 공기 예열장치, 온도측정 계기로 구성되었다.

유동층 소각로는 공기분산판으로부터 연소가스 유출구까지 전체 높이가 1.70 m이며, 공기분산판으로부터 0.70 m 높이까지는 내경 0.11 m, 그리고 나머지 윗부분은 내경 0.16 m인 스테인레스 강관으로 제작하였다. 본 유동층 소각로에 사용한 1차 공기분산판은 두께 5 mm 스테인레스판에 직경 2 mm의 구멍을 정삼각형 배열로 뚫어서 개공비가 1.2% 되도록 제작한 다공판이다. 연소가스 중에 함유된 미세입자를 포집하기 위해 소각로 배출구 부근에 크기가 다른 두 개의 사이클론을 직렬로 연결하였으며, 단열을 위해 소각로 전체 외벽에는 ceramic wool을 0.2 m 두께로 감아 단열시켰다. 그리고 소각로 각 지점에서의 온도를 측정하기 위해 높이별로 열전대(공기분산판으로부터 0.05, 0.13, 0.21, 0.39, 0.84, 1.14, 1.54 m 높이지점)를 설치하였으며, 유동층 내부의 연소상태를 관찰할 수 있도록 하단 공기분산판으로부터 0.25 m 상부에 투시경을 설치하였다. 또한 소각로 내 공해물질(SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)의 수직 농도분포를 측정하기 위해 4개의 가스채취구(공기분산판으로부터 0.65, 1.00, 1.44 m, 그리고 사이클론 출구부근)를 설치하였다. 유동층의 온도조절을 위해서는 수직 환형 냉각관과 수평 냉각관을 각각 사용하여 실험하였다.

연료는 정량적 주입이 가능한 스크류 공급기를 사용하여 공기분산판으로부터 0.05 m 상부지점에서 주입하였다. 그리고 유동층 내의 회재는 공기분산판으로부터 0.20 m 상부의 소각로 벽면에 설치된 일류관을 통해 배출시키거나 공기분산판 중앙에 부착된 하부 배출관을 통해 배출시켰다. 유동층 높이는 0.20 m로 일정하게 유지하도록 하였다.

연소용 공기는 공기압축기로부터 1차 및 2차 공기로 나뉘어져 로타메타를 거쳐 공기 예열기 내에서 예열된 후 1차 공기는 plenum chamber와 공기분산판을 통해, 2차 공기는 공기분산판으로부터 0.90 m 상부 지점에 설치한 주입관을 통해 로 내로 주입하였다. 소각로 상부로 배출된 연소가스는 사이클론을 거치면서 가스 중에 함유된 입자가 포집된 후 배출관을 통해 배출되었다.

## 2-2. 시료 전처리 및 연료용 시료

하수 종말처리장에서 탈수 처리된 소화슬러지는 고분자 응집제를 첨가하여 탈수시킨 것으로 함수율은 75% 정도였다. 이와 같이 함수율이 높은 슬러지를 스크류 공급기에 의해 주입할 경우 슬러지 자체의 큰 응집력 때문에 정량적 주입이 어렵고, 정량적 주입이 된다 하더라도 덩어리 상태로 주입됨에 따른 유동화상의 불안

**Table 1. Compositions and size distributions of sewage sludges used in the experiment**

Analysis	Sludge A	Sludge B
Proximate(wt%)		
Moisture	25.00	21.00
Combustibles		
Volatile matter	27.62	24.12
Fixed carbon	3.83	3.19
Ash	43.55	51.69
Ultimate(dry basis, wt%)		
C	21.00	14.30
H	2.86	2.72
N	3.02	2.33
S	1.21	1.45
O	13.84	17.99
Ash	58.07	61.21
Calorific value(gross, kcal/kg)	2145	1050
Particle size range(dry basis, mm)		
2.00-0.84	68.18	50.06
0.84-0.75	6.48	6.61
0.75-0.30	16.90	23.67
0.30-0.21	3.06	5.03
0.21-0.15	2.42	4.69
0.15-0.10	1.07	3.83
<1.10	1.88	6.11

일성이 야기되어 본 실험에서는 하수 처리장에서 운반된 소화 슬러지를 수분함량 20-25% 정도까지 자연 건조시킨 후 치차 파쇄기로써 2 mm 이하로 분쇄시켜 소각 실험에 이용하였다.

하수처리장에서 발생하는 소화 하수슬러지의 조성은 강수량과 하수처리장의 운전조건에 따라 변하는데, 특히 합류식 하수관거를 통해 종말처리장으로 유입된 하수의 조성은 처리장으로 유입되기 전의 강수량에 크게 영향을 받는다. 그러므로 본 연구에서는 갈수기의 시료(sludge A)와 우수기의 시료(sludge B)를 선정하였으며, 그 조성을 Table 1에 나타냈다. Table 1에 나타난 결과를 살펴보면 sludge A의 경우 회재 함량이 43.55%, 가연성분 함량이 31.45% 정도였으며, sludge B는 회재함량이 51.69%, 가연성분 함량이 27.11% 정도로 나타났다. 발열량은 시료 모두 저품위 무연탄(통상 3000 kcal/kg)보다 낮은 값을 보였다. 원소분석 결과에서 질소와 황의 함량이 비교적 높게 나타나고 있어 연소시 공해물질의 배출문제를 고려해야 할 것으로 생각되었다.

치차 파쇄기를 통과해 나온 슬러지를 완전 건조시킨 후 입경분석한 결과(Table 1)를 살펴보면 소각로 내로 투입되는 슬러지는 입경이 10/24 mesh(750-2000 μm) 범위의 입경을 가진 입자가 50% 이상을 차지하

**Table 2. Experimental conditions**

Variables	Sludge A	Sludge B
Bed temperature ( $T_{b1}$ ), °C	750, 800, 850, 900	750, 800, 850
Superficial gas velocity( $U_{01}$ )*, m/s	0.8-1.5	0.9-1.4
Fuel feed rate( $F_0$ ), g/min	71.23-158.12	131.25-204.18
Fluidized bed height(h), m	0.2	0.2
Total air-fuel ratio ( $\lambda_T$ )**, -	1.0-1.4	1.1-1.4
PAF( $Q_1/Q_T$ )***, -	0.85	0.7, 0.8, 0.9

\*: gas flow rate at  $T_{b1}$  divided by the cross sectional area of fluidized bed

\*\* : air/fuel ratio normalized with respect to stoichiometric, that is,  $\lambda_T = (m_a/m_f)/(m_a/m_f)_s$

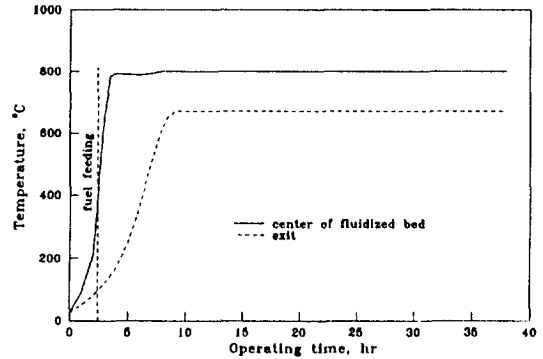
\*\*\*: primary air factor at standard condition(0°C, 1 atm).

였다.

**2-3. 실험방법**

소각실험을 시작할 때는 먼저 층매질로 -10+24 mesh 크기의 모래(또는 하수슬러지 회재)를 주입한 후 소량의 예열된 공기와 LPG 가스를 공급하면서 층 내 온도가 슬러지의 착화온도 이상인 400°C가 될 때까지 가열시킨 다음 슬러지를 서서히 공급한다. 슬러지가 착화되면 LPG 가스 공급을 중단하고 미리 보정된 스크류 공급기의 입력전압을 조절하여 연료 공급량을 원하는 양까지 점차로 증가시키고 동시에 공기 주입량도 필요한 양까지 서서히 증가시킨다. 이 때 주입된 연료의 소각에 의한 급격한 층 내 온도 상승을 막기 위해 유동층 내에 설치된 냉각관을 통해 냉각수를 공급하여 층표면 온도를 일정조건으로 유지하였다. 연소상태가 정상상태에 도달하게 되면(조업시작후 7-8시간 후), 각 실험 조건에서 열전대에 의해 소각로 높이별 온도를 측정하였다.

하수슬러지의 유동층 소각특성을 파악하기 위해, 각 실험조건(Table 2)에서 연소상태가 정상상태에 도달하게 되면 유동층의 일류관(overflow tube)을 통해 배출되는 회재와 사이클론에서 포집된 회재를 30분간 포집한 후 포집된 회재의 무게, 가연성분 함량 및 발열량을 각각 측정하였다. 이 때 연소효율은 발열량을 기준하여 식 (1)에 의해 계산하였다[15, 16]. 또한 소각로에 설치된 각 가스 채취구로부터 가스를 채취하여 질소산화물, 황산화물(SO<sub>2</sub>), 일산화탄소(CO), 산소의 농도를 가스 자동분석 장치에 의해 측정하였다.



**Fig. 2. Temperature variation with the operating time (sludge A,  $U_{01} = 1.2$  m/s,  $T_{b1} = 800^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_T = 1.2$ ).**

$$\eta = \left(1 - \frac{H_1F_1 + H_3F_3 + H_gF_g}{H_0F_0}\right) \times 100(\%) \quad (1)$$

**3. 결과 및 고찰**

**3-1. 정상조업 조건**

소각로를 설계할 때 먼저 고려해야 될 사항은 소각하고자 하는 물질(연료)의 자체 발열량만으로 정상조업이 가능한가를 판단하는 일이다. 만약 자체 발열량만으로 정상조업이 안 될 경우엔 보조연료를 공급하여야만 되기 때문이다. 연소에 필요한 연료와 공기의 물질수지(material balance) 관계로부터 에너지 수지(energy balance)를 세워 입구(inlet)쪽 에너지와 출구(outlet)쪽 에너지를 비교하였을 때, 정상조업이 되기 위해서는 입구쪽 에너지와 출구쪽 에너지가 같아야 된다. 그러나 출구쪽 에너지가 입구쪽 에너지보다 크게 되면 소각하고자 하는 물질의 자체 발열량만으로는 정상조업이 될 수 없으므로 적당량의 보조연료(auxiliary fuel)를 주입하여야만 되며, 반대로 출구쪽 에너지보다 입구쪽 에너지가 크게 되면 적당량의 냉각수를 주입하여 조업을 정상상태로 유지시켜야 된다. 이러한 에너지 수지식을 계산하는데 필요한 지식과 자료는 많은 문헌에 보고된 바 있다[15, 17, 18].

본 실험에서 사용된 하수슬러지의 유동층 소각시 보조연료 사용유무를 확인하기 위해 발열량이 낮은 슬러지 B에 대한 에너지 수지를 이론적으로 계산하였을 때 보조연료 없이도 하수슬러지의 자체 발열량에 의해 정상조업이 가능함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 실험적으로 확인하기 위해 조업 시작시부터 시간 경과에 따른 유동층 중앙부의 온도와 소각로 출구측 온도를 연속적으로 측정된 결과를 Fig. 2에 나타냈다. 본 실험에서는 운전을 시작하여 연료를 착화시킬 때까지만

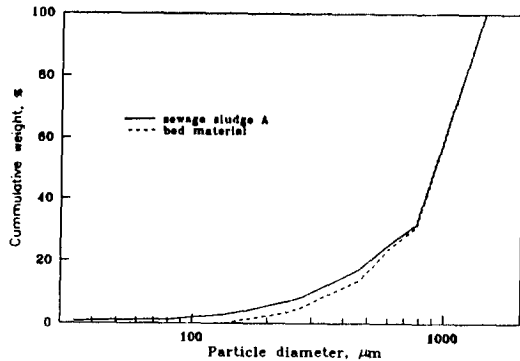


Fig. 3. Typical size distributions of sewage sludge and bed material (sludge A,  $U_{01}=1.2$  m/s,  $T_{b1}=800^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_T=1.2$ ).

LPG가스를 이용하여 외부에서 열을 공급하였으며, 그 이후에는 외부로부터 별도의 열 공급없이 단지 슬러지만의 연소에 의해 조업온도를 유지하였다. 또한 소각로의 운전상태가 정상상태에 도달한 이후에도 외부로부터 별도의 보조연료 공급은 하지 않았음에도 Fig. 2에서 보는 바와 같이 비교적 장시간(정상상태 도달 후 28시간 정도) 동안 별다른 어려움없이 연속조업을 할 수 있었다.

또한 정상상태 도달 이후 층 내 물질을 채취하여 체분리한 결과(Fig. 3)를 보면 주입되는 슬러지의 입경분포와 거의 유사함을 알 수 있었으며, 외관상으로 관찰해보아도 슬러지가 연소된 후 남은 회재임을 알 수 있었다. 따라서 초기에 층내 물질로 넣어준 모래는 주입된 슬러지 입자와 함께 유동화하면서 균일하게 혼합되므로서 회재와 함께 일정량씩 소각로 밖으로 일류배출(overflow)되므로 인해 시간이 경과함에 따라서 층내 물질은 모래에서 슬러지 회재로 완전히 교체되어[19, 20] 슬러지 회재가 층물질로 작용하였으며, 시간 경과에 따라 별도의 층물질을 공급하지 않고도 정상조업이 가능했다. 따라서 슬러지 회재도 층물질로 사용할 수가 있는 것으로 판단되어 이후 실험에서는 층물질로 모래는 사용하지 않고 하수슬러지의 회재를 층물질로 사용하였다.

또한 하수슬러지의 공급위치를 선정하기 위해 층상부(층 표면)와 층 하부(하단 공기분산판으로부터 0.05 m 상부지점)로의 주입을 교대로 실시해 본 결과, 어느 곳으로 공급해도 별다른 운전상의 어려움은 없었으므로 본 실험에서는 층 상부로 주입할 경우보다 슬러지 입자의 층 내 체류시간을 증진시킬 수 있는 층 하부 주입 방법을 선택하여 소각로를 운전하였다.

### 3-2. 하수슬러지의 유동층 소각특성

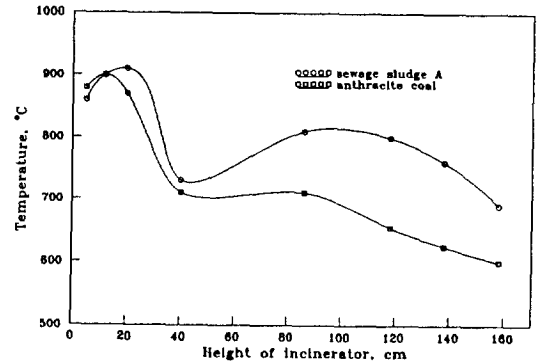


Fig. 4. Comparison of axial temperature profiles between coal and sewage sludge combustions ( $U_{01}=1.1$  m/s,  $T_{b1}=900^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_T=1.2$ ).

#### 3-2-1. 소각로 내 수직 온도분포

하수슬러지의 유동층 소각시 소각로 높이에 따른 온도분포를 측정된 결과와 저품위 무연탄 연소시의 온도 측정 결과[10]를 비교하여 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서 보면 무연탄의 유동층 연소에 비해 하수슬러지를 유동층 소각시킬 경우에는 freeboard부의 온도가 높게 유지됨을 볼 수 있었다. 이와 같은 이유는 저품위 무연탄의 경우 수분함량과 휘발분 함량이 낮아 유동층 연소시 연료의 대부분이 유동층 내에서 연소가 진행되지만, 수분 함량이 높고 가연성분의 대부분이 휘발분으로 구성된 하수슬러지의 소각에서는, 슬러지를 유동층 소각로에 주입하게 되면 열매체인 층물질과의 열전달에 의한 건조과정과 탈휘발 과정이 순간적으로 일어나고 동시에 연소과정이 진행된다. 이 과정에서 미세한 입자는 건조되면서 겉보기 밀도(bulk density)가 낮아져 연소공기와 함께 층표면에서 freeboard부로 분출되어 가스흐름에 섞여 소각로 출구로 유출되는 동안 freeboard부에서 연소되고, 탈휘발된 가스도 freeboard에서 동시에 연소가 진행되기 때문에 freeboard부의 온도가 저품위 무연탄 연소에 비해 높게 유지된다.

하수슬러지의 유동층 소각에 있어서 freeboard부에서 연소가 진행되는 현상은 유동층 내 총괄 공기-연료비( $\lambda_T$ )를 감소시키면서 로내 온도분포를 측정할 결과에서 더욱 뚜렷하게 나타나는데, Fig. 5에서 보면 가스 공압속도와 층온도가 일정한 조건하에서  $\lambda_T$ 가 낮을수록 freeboard 상부의 온도가 높아지는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 이유는 다른 조업조건이 일정할 때  $\lambda_T$ 가 감소하면 연료 주입량이 증가하게 되어 많은 양의 미세 입자가 유동층 내에서 건조된 후 층표면에서 분출되어 freeboard부를 통과하면서 탈휘발된 가스와 함께 연소가 활발해져 freeboard 상부에서의 온도가 증가하는

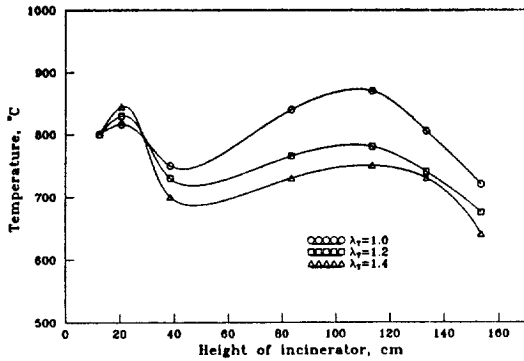


Fig. 5. Axial temperature profiles with the variation of  $\lambda_T$  (sludge A,  $U_{01} = 1.2$  m/s,  $T_{b1} = 800^\circ\text{C}$ ).

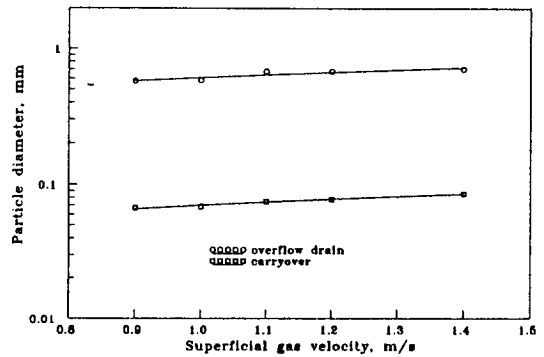


Fig. 7. Effect of superficial gas velocity on average particle diameter of outflow ash stream (sludge B,  $T_{b1} = 800^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_T = 1.2$ ).

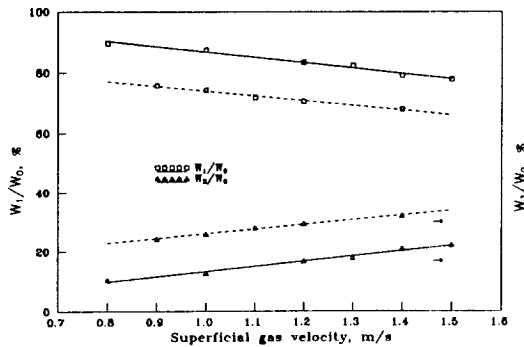


Fig. 6. Effect of superficial gas velocity on carryover and overflow rates of ash ( $T_{b1} = 800^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_T = 1.2$ ): —, sludge A; ---, sludge B.

경향을 보이게 된다. 이러한 온도분포는 sludge B에서도 동일한 경향을 나타냄을 관찰할 수 있었다. 로내 온도 분포를 나타낸 Fig. 4와 5에서 공기분산판으로부터 상부 0.39 m 부근에서의 온도가 낮게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 Fig. 1에서 본 것과 같이 소각로의 운전시 층온도를 일정하게 유지하기 위해 이 지점에서 냉각수를 주입하였기 때문에 나타난 결과이다.

또한 자연건조시킨 하수슬러지를 유동층 소각시킬 경우, 연소에 의한 입자의 크기 및 밀도 변화가 적고, 연소후 생성된 회재의 내마모성이 비교적 커 층매질로 사용되기 때문에 연료로 사용되는 하수슬러지와 층매질간에 혼합이 양호하여 층내 온도분포도 비교적 균일하게 나타남을 볼 수 있다.

### 3-2-2. 입자배출

하수슬러지의 유동층 소각시 입자의 배출특성을 파악하기 위해서 회재 일류량( $W_1/W_0$ )과 회재 비산유출량( $W_3/W_0$ )을 측정하여 Fig. 6에 나타냈다. 여기에서  $W_0$ 는

소각로 내에 공급되는 슬러지 중에 함유된 회분량이며,  $W_1$ 과  $W_3$ 는 유동층 표면에 부착된 일류관을 통해 배출되는 입자와 사이클론에 포집된 입자들 중의 회분량을 각각 나타낸다. Fig. 6의 결과에서 회재 일류량과 회재 비산유출량을  $W_1/W_0$ 와  $W_3/W_0$ 로 나타낸 이유는  $\lambda_T$ 를 일정하게 유지한 상태에서 조업변수 중의 하나인 가스공급속도를 변화시키면 슬러지 주입량도 따라 변하기 때문이다. Fig. 6의 결과에서 가스공급속도가 증가하면 유동층으로부터의 회재 일류량( $W_1/W_0$ )은 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 가스공급속도가 증가하게 되면 비산유출되는 입자의 입경도 커지게 되므로 이에 따라 보다 많은 양의 입자들이 비산유출되기 때문이다. 이와 같은 결과를 Fig. 7에서 잘 설명해 주고 있다. Fig. 7은 가스공급속도의 변화에 따라 소각로 각 부분에서 배출된 입자의 평균직경을 측정 한 결과이다. 가스공급속도가 증가하면 앞에서 언급한 바와 같이 비산유출될 수 있는 입자의 입경이 커져 종말속도가 상대적으로 큰 입자들까지 연소가스와 함께 비산유출되기 때문에 사이클론에 포집되어 배출되는 입자의 평균입경이 증가하게 되고, 그와 동시에 층내에 잔류하는 입자 중에는 큰 입자들의 분율이 증가하므로 유동층으로부터 일류배출된 입자의 평균직경도 역시 증가하게 된다.

### 3-2-3. 연소효율 및 공해물질 배출

조업조건 변화에 따라 미연분 손실량, 연소효율 및 공해물질( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) 배출량을 측정하여 그 결과를 Table 3에 나타냈다.

Table 3에서 보면 일류배출되는 입자와 비산유출되는 입자 중의 미연성분 함량은 층온도와  $\lambda_T$ 가 증가하면 감소하여 연소효율은 약간 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 층온도와  $\lambda_T$ 가 증가하면 연소속도가

Table 3. Effects of operating parameters on combustible loss, combustion efficiency, and emission of pollutants

$U_{01}$ (m/s)	$\lambda_T$ (-)	$T_{01}$ (°C)	$Q_{11}/Q_T$ (-)	$F_0$ (g/min)	$F_1$ ( $C_1$ ) (g/min) (%)	$F_3$ ( $C_3$ ) (g/min) (%)	$SO_2$ (ppm)	$NO_x$ (ppm)	$\eta$ (%)
Sludge A									
0.8	1.2	800	0.85	71.23	28.12(1.10)	3.28(1.71)	-	-	94.7
1.0	1.2	800	0.85	88.32	33.97(0.98)	4.92(1.83)	-	-	95.1
1.2	1.2	800	0.85	105.41	38.58(0.88)	7.79(1.50)	-	-	95.6
1.3	1.2	800	0.85	113.96	41.10(0.74)	8.97(1.55)	-	-	96.0
1.4	1.2	800	0.85	122.51	42.48(0.61)	11.26(1.09)	-	-	96.8
1.5	1.2	800	0.85	131.05	44.75(0.74)	12.83(1.24)	-	-	96.2
1.2	1.2	750	0.85	111.11	40.63(1.83)	8.71(2.30)	-	-	91.3
1.2	1.2	800	0.85	105.41	38.58(0.88)	7.79(1.50)	-	-	95.6
1.2	1.2	850	0.85	99.72	35.92(1.30)	8.14(1.99)	-	-	93.5
1.2	1.2	900	0.85	96.87	35.82(1.07)	6.87(1.69)	-	-	94.7
1.2	1.0	800	0.85	126.51	48.44(0.95)	10.16(1.60)	-	-	95.0
1.2	1.1	800	0.85	113.85	41.30(0.81)	8.77(1.60)	-	-	95.7
1.2	1.2	800	0.85	105.41	38.58(0.88)	7.79(1.50)	-	-	95.6
1.2	1.3	800	0.85	97.29	35.62(0.62)	7.07(1.35)	-	-	97.0
1.2	1.4	800	0.85	90.35	33.19(0.86)	6.57(1.73)	-	-	95.5
Sludge B									
0.9	1.2	800	0.70	131.25	51.93(1.07)	16.78(1.84)	858	6.8	94.9
1.0	1.2	800	0.70	145.84	56.53(1.06)	19.84(1.98)	-	-	94.8
1.1	1.2	800	0.70	160.42	60.30(1.08)	23.70(1.91)	1046	9.2	94.7
1.2	1.2	800	0.70	175.00	64.52(1.10)	27.17(1.98)	1140	10.0	94.5
1.4	1.2	800	0.70	204.18	72.63(1.28)	34.57(2.01)	1193	16.2	93.9
1.2	1.2	750	0.70	183.56	66.25(1.12)	29.97(1.98)	1099	9.8	94.2
1.2	1.2	800	0.70	175.00	64.54(1.10)	27.17(1.98)	1140	10.0	94.5
1.2	1.2	850	0.70	167.21	63.55(0.85)	23.84(1.75)	1170	10.2	95.6
1.2	1.2	900	0.70	160.00	61.62(0.80)	21.97(1.56)	-	10.2	96.0
1.2	1.1	800	0.70	190.91	71.95(1.23)	28.15(1.92)	1310	6.1	94.3
1.2	1.2	800	0.70	175.00	64.54(1.10)	27.17(1.98)	1140	10.0	94.5
1.2	1.3	800	0.70	161.54	58.91(1.08)	25.72(1.92)	925	11.8	94.6
1.2	1.4	800	0.70	150.00	53.88(1.09)	24.54(1.20)	830	12.4	95.5

증가하기 때문이다. 그리고 가스공탐속도가 증가하면 앞에서 언급한 바와 같이 비산유출량이 증가하게 되어 연소효율이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 일류관을 통해 배출된 입자와 비산유출된 입자 중에 함유된 미연성분 함량이 비교적 낮아 연소효율은 sludge A와 sludge B 모두 대략 94% 이상으로 높게 나타남을 볼 수 있었는데, 이처럼 연소효율이 높게 나타난 것은 사용한 시료가 Table 1에서 본 바와 같이 가연성분 중 대부분이 휘발분으로 구성되어 있기 때문이라 판단된다. 즉, 슬러지가 총 내에 주입되면 건조와 동시에 탈휘발 과정이 순간적으로 일어나고, 탈휘발된 가연성 가스는 고온에서 높은 연소속도에 의해 freeboard 내에서 거의 완전연소되는데 반해, 탈휘발되지 못하고 입자 중에 함유된 일부 가연성분(고정탄

소)은 유동층과 freeboard에서 연소가 진행되지만 완전연소에 필요한 체류시간을 갖지 못한 일부 입자는 미연소된 상태로 일류배출 또는 비산유출되어 연소효율의 저감원인이 된다. 그러므로 하수슬러지의 유동층 소각시보다 높은 연소효율을 확보하기 위해서는 freeboard 내에서 가연성 가스의 연소를 증진시키면서 미연 미세입자의 체류시간을 증진시킬 수 있는 방법이 강구되어야 할 것으로 생각된다.

하수슬러지 소각시 배출되는 질소산화물( $NO_x$ ) 및  $SO_2$ 의 배출농도를 측정된 결과(Table 3)를 보면, 하수슬러지 중의 질소분 함량이 높음에도 불구하고, 질소산화물의 배출농도는 6.1-16.2 ppm 정도로 비교적 낮은 값을 보인 반면,  $SO_2$  배출농도는 830-1310 ppm 정도로 배출

허용기준치(800 ppm)를 초과하였으며 하수슬러지의 주 입량과 층온도가 증가하면 SO<sub>2</sub> 배출농도가 증가하는 경향을 나타냈다.

### 5. 결 론

도시 하수처리장에서 발생하는 소화 하수슬러지의 유동층 소각특성 및 공해물질 배출특성을 파악하기 위해 실험실 규모의 유동층 소각로에서 하수슬러지의 소각 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 자연 건조에 의해 수분함량을 21-25%로 조절하여 실험에 이용한 소화 하수슬러지는 고회분 저발열량의 연료임에도 불구하고 별도의 보조연료를 공급하지 않고도 정상 조업이 가능하였다. 또한 하수슬러지의 잔류 회재가 층물질로 작용하므로 인해 층물질의 추가공급이 필요없었다.

(2) 소화 하수슬러지의 가연성분 중 대부분이 휘발 분으로 이루어져 있어 슬러지 입자를 유동층 내에 주 입하면 건조와 탈휘발 과정이 동시에 일어나 freeboard 내에서 연소가 활발해지므로 freeboard 상부의 온도가 높게 유지되었다.

(3) 본 실험조건에서 연소효율은 94% 이상으로 높게 나타났으며, NO<sub>x</sub> 배출농도는 6.1-16.2 ppm 정도였다. 그러나 SO<sub>2</sub> 배출농도는 830-1310 ppm 정도로 높은 값을 보이므로 SO<sub>2</sub> 저감대책이 요구된다.

### NOMENCLATURE

- C<sub>0</sub> : combustibile content in the sludge fed [%]
- C<sub>1</sub> : combustibile content in particles drained from the bed [%]
- C<sub>3</sub> : combustibile content in fly ash collected by cyclones [%]
- F<sub>g</sub> : flow rate of CO gas in flue gas [g/min]
- F<sub>0</sub> : sludge feed rate [g/min]
- F<sub>1</sub> : weight of particles drained from the bed [g/min]
- F<sub>3</sub> : weight of fly ash collected by cyclones [g/min]
- h : fluidized bed height [m]
- H<sub>g</sub> : calorific value of CO gas in flue gas [cal/g]
- H<sub>0</sub> : calorific value of sewage sludge [cal/g]
- H<sub>1</sub> : calorific value of ash drained from the bed [cal/g]
- H<sub>3</sub> : calorific value of ash collected by cyclones [cal/g]
- m<sub>a</sub> : molar flow rate of air [mol/s]
- m<sub>f</sub> : molar flow rate of fuel [mol/s]

- Q<sub>T</sub> : total air flow rate [l/min]
- Q<sub>1</sub> : primary air flow rate [l/min]
- Q<sub>2</sub> : secondary air flow rate [l/min]
- T<sub>b1</sub> : bed temperature 0.2 m above the distributor [°C]
- U<sub>01</sub> : superficial gas velocity at T<sub>b1</sub> [m/s]
- W<sub>0</sub> : ash weight in the sludge fed [g/min]
- W<sub>1</sub> : ash weight in particles drained from the bed [g/min]
- W<sub>3</sub> : ash weight in fly ash collected by cyclones [g/min]
- η : combustion efficiency [%]
- λ<sub>T</sub> : ratio of total air flow rate to theoretical air flow rate [-]

### Subscripts

- a : air
- b1 : bed
- f : fuel
- g : gas
- s : stoichiometric
- 0 : feed
- 1 : bed drain
- 3 : fly ash

### REFERENCES

1. Azuma, K.: *J. Environ. Pollut. Contr.(Japan)*, **21** (9), 838(1985).
2. Environment Administration: Korea Environmental Yearbook(Korea), 880(1988).
3. Kawaguchi, M.: *J. Environ. Pollut. Contr.(Japan)*, **21**, 853(1985).
4. Baeyens, J. and Geldart, D.: Proc. of the Second Eng. Found. Conf., Cambridge, England, 264(1978).
5. Wilson, E. M. and Freeman, H. M.: *Environ. Sci. Technol.*, **10**, 430(1976).
6. U. S. EPA: EPA/625/4-85/015(1985).
7. Liao, P. B.: *J. WPCF*, **46**(8), 1985(1974).
8. Kitami, S.: *J. Environ. Pollut. Contr.(Japan)*, **21**(9), 845(1985).
9. Takeuchi, T.: *J. Environ. Pollut. Contr.(Japan)*, **22**, 231(1986).
10. Lee, J. K., Hu, C. G., No, J. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **26**, 517(1988).
11. Lee, J. K., Hu, C. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: Proc. of the 10th Int. Conf. on FBC, ASME, San Francisco, U. S. A., Vol. 2, 1190(1989).



12. Lee, J. K., Hu, C. G., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: *Can. J. of Chem. Eng.*, **68**, 824(1990).
13. Lee, J. K., Lee, K. H., Lee, K. H. and Chun, H. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 470(1990).
14. Lee, J. K., Lee, K. H., Shin, Y. S. and Chun, H. S.: Proc. of 11th Int. Conf. on FBC, ASME, Montreal, Canada, Vol. 2, 571(1991).
15. Tomita, M., Hiramata, T., Adachi, T. and Yamaguchi, H.: ISSN0385-194X, Coal Mining Research Center, Hokkaido, Japan, 88(1984).
16. Jixiang, L.: Proc. of the 9th Int. Conf. on FBC, 1096 (1987).
17. U. S. EPA: EPA/625/6-85/010(1985).
18. U. S. EPA: EPA/625/1-79-011(1979).
19. Petho, A. and Noble, R. D.: RTD Theory in Chem. Eng., Verlag-Chem. GmbH, Weinheim, Germany (1982).
20. Gong, J. H., Lim, J. H., Shin, Y. S., Lee, J. K. and Chun, H. S.: Proc. of the 1st Asian Conf. on Fluidized Bed and 3-Phase Reactors, Tokyo, Japan, 202(1989).