

## 도시쓰레기와 유기성 하수 슬러지 혼합소각에 관한 연구

정종수\*\* · 진성민\*

### Study on Co-incineration of Municipal Solid Waste and Organic Sludges

Jongsoo Jung\*\* · Sungmin Chin\*

#### ABSTRACT

This study performs the pilot-plant experiments to evaluate the effect of the oxygen enrichment on the co-incineration of municipal solid waste and organic sludge from a wastewater treatment facility. The design capacity of the stoker-type incinerator pilot-plant is 150 kg/h. Combustion chamber temperatures were measured as well as the stack gas concentrations, i.e., NO<sub>x</sub>, CO, and the residual oxygen. The maximum ratio of organic sludge waste to the total waste input is 30%. Also the oxygen-enriched air with 23% of oxygen in supplied air is used for stable combustion.

As the co-incineration ratio of the sludge increased up to 30% of the total waste input, the primary and the secondary combustion chamber temperature was decreased to 900°C (primary combustion chamber), 750°C (secondary combustion chamber), respectively, approximately 200°C below the incineration temperature of the domestic waste only (primary: 1,100°C, secondary: 950°C).

However, if the supplied air was enriched to 22% oxygen content in air, the incinerator temperature was high enough to burn the waste mixture with 30% sludge, which has the heating value of 1,600 kcal/kg.

**Key Words** : Stalker type incinerator, Co-incineration, Oxygen-enrichment, Recuperator, Residual oxygen concentration,

#### 1. 서 론

2002년말 기준으로 전국 하수종말 처리시설에서 일평균 5,689톤의 하수 슬러지가 발생하고 있으며, 유형별로는 해양배출 72%, 육상매립 9.3%, 소각 9.8% 및 재활용 9.1% 순으로 처리되고 있으며, 해양 배출의 경우에는 98년에 38% 수준에 불과했으나 최근 들어 급격하게 증가하였다. 소각과 재활용시 하수 슬러지 처리 단가가 각각

50,000원 수준인 데 비해 해양 배출 시에는 26,000원 것이 해양 배출량이 급격히 증가한 이유이다.[1]

하수 슬러지의 발열량은 건조 후 2,000~4,500 kcal/kg으로 비교적 높은 편이지만, 탈수 슬러지의 탈수 후 수분 함량이 약 70~80% 수준이기 때문에 탈수 슬러지의 저위 발열량은 100 kcal/kg 수준으로 매우 낮아서 소각 처리 시에는 건조에 의한 수분 제거 과정이 필요하다.[2]

또한 발열량이 낮은 하수 슬러지 소각 시에는 불완전연소에 의해 일산화탄소 등의 유해가스 배출수준이 높아진다. 이에 대한 대응책으로 산소부화 소각 방법을 제시하고 있으며, 산소부화 소각의 예로 로타리 킬른 소각로를 이용한 폐고무의 산소 부화 소각[3] 시, 일반 공기 소각 시 부

\* 한국과학기술연구원 환경공정연구부

† 연락처, jjurng@kist.re.kr

분적으로 200 ppm을 훨씬 초과하는 CO 배출량이 30% O<sub>2</sub>의 산소 부화 공기(oxygen-enriched air)를 사용하면 기준 이하로 크게 감소하였다. 한편 Werther and Ogada[4]는 하수 슬러지의 처리 방법 및 소각 시의 배출가스 특성에 대해 포괄적으로 정리하였다.

본 연구에서는 150 kg/h급 도시쓰레기 소각로를 대상으로 도시쓰레기와 하수 슬러지의 혼소율을 30%까지 증가시켜 소각했으며, 이때 순산소 공급에 따른 연소실 온도와 배출 가스 성분 농도 등의 소각 상태 등을 살펴보았다.

## 2. 시스템 개요

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 150 kg/h급 도시쓰레기와 유기성 슬러지의 혼합 소각 실험용 소각로를 나타낸 그림이다. 본 실험은 함수율이 높고 발열량이 매우 낮은 유기성 슬러지가 연소실에 투입되므로 연소실에서 폐기물의 연소 상태를 향상시키기 위해 연소실에 공급되는 연소용 공기를 셸 앤 튜브형 고온 열교환기(shell and tube type recuperator)에서 가열하였다. 또한, 액체 산소 붐베와 기화기를 이용하여 1, 2차 연소실에 공급되는 연소용 공기의 산소 농도를 높였다.

1차 연소실(2.1 m<sup>3</sup>)에서 폐기물 연소 반응으로 생성된 배기가스는 2차 연소실(0.7 m<sup>3</sup>)에서 미연분의 재연소 과정을 거쳐 고온 열교환기로 보내

지며 연소 가스의 40%는 세정탑으로 나머지 60%는 재순환 팬을 통해 다시 연소실로 보내진다. 산성인 연소가스의 중화를 온도를 떨어뜨릴 목적으로 세정 탑에서 냉각수를 분무시키며 온도가 낮아진 연소가스는 활성탄 및 소석회와 혼합되어 백 필터(bag filter)와 ID 팬을 거쳐 굴뚝으로 배출된다.

Fig. 2는 슬러지 혼소용 소각로의 각 연소실을 나타내는 그림이다. 투입구에서 1차 연소실로 공급되는 혼합 폐기물은 유압식 램 푸셔(ram pusher)에 의해 연소로 건조단에 공급되며 각 화격자(grate)의 단차에 의해 교반된다. FD 팬에 의해 유인된 외부 공기는 고온열교환기에서 약 400℃로 가열되어 화격자 하단부로 공급되어 화격자 사이의 7 mm 크기의 슬릿(slot)을 통해 1차 연소실로 공급되며 2차 연소실의 경우 연소실 측면 노즐에서 연소용 공기가 공급된다.

### 2.2 실험 방법

1, 2차 연소실을 포함한 소각로 각 부분에서 T-type 열전대(thermocouple)를 설치하여 배출 가스 온도, 공급 공기 온도 및 화격자 온도 등을 측정하였으며 굴뚝에 배기가스 분석기(KM-9106, Kane-May Co., U.K.)를 설치하여 배출 가스 중 CO, NO<sub>x</sub> 등의 농도를 측정하였다. 또한 연소실로 유입되는 공급 공기량은 열선 유속계(TSI Co., USA)를 이용하여 평균 유속을 측정한 후 유량으로 환산하였다.

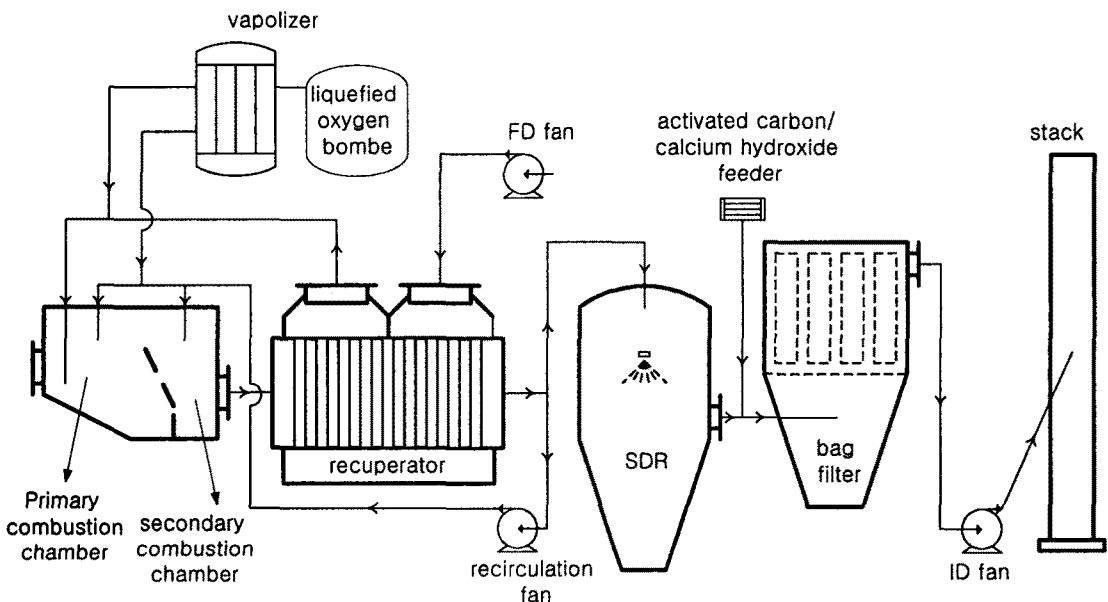


Fig. 1 Process diagram of co-incineration of municipal solid waste and organic sludges.

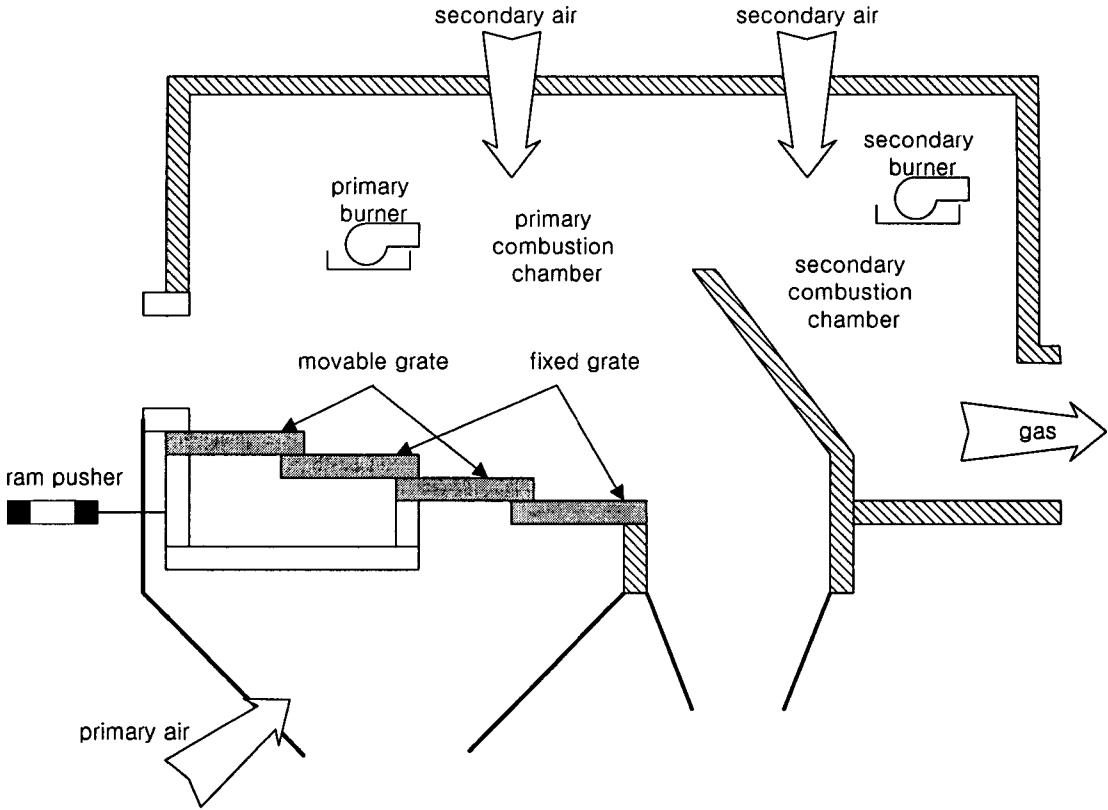


Fig. 2 Schematic diagram of primary and secondary combustion chamber.

본 실험에서는 폐기물을 정량 단위로 공급하기 위해 각 부피 단위를 계량하여 단위 시간당 폐기물 투입량을 계산하였으며, 5분당 50리터의 도시쓰레기를 연소실에 투입하였다. 2 kg 단위로 포장한 유기성 슬러지는 실험시 혼소실에 맞춰 투입 병커에서 도시쓰레기와 혼합하여 연소실에 투입하였다. 본 실험에서 도시쓰레기 투입량은 시간당 약 150 kg으로 고정한 상태에서 슬러지를 최고 70 kg 까지 추가 투입하여 혼소시키는 실험을 수행하였다.

Table 1, 2는 도시쓰레기와 유기성 슬러지의 공업 분석과 원소 분석 결과를 나타낸 표이다. 도시쓰레기의 수분 함량은 약 41%이며 저위발열량은 전국 평균치인 2,300 kcal/kg으로 추정하였다. 단순 기계적 탈수만을 거친 유기성 슬러지는 수분함량 약 80% 수준이며, 유기성 슬러지 건조 시료 기준 발열량은 측정 결과 약 3,900 kcal/kg이며, 가연분은 10% 미만이므로 습기준 저위 발열량은 거의 0 kcal/kg으로 추정된다. 원소 분석 결과 특징적인 것은 유기성 슬러지 중 함유된 질소 성분(도시쓰레기의 약 3.5 배) 및 황 성분(도시쓰레기의 30배 이상)이 높다는 점이며, 염소 성분은 상대적으로 낮았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 도시쓰레기 소각 시 연소 상태

Fig. 3은 도시쓰레기 소각 시의 1, 2차 연소실 온도의 시간적인 변동을 나타내는 그림이다. 폐기물 투입 주기에 따라 1차 연소실은 1,000~1,100℃, 2차 연소실은 850~900℃ 정도의 변동폭을 가지고 온도가 변동하는 양상을 나타냈다. 1,000~1,100℃인 1차 연소실의 온도 수준은 비교적 양호한 상태라고 생각되지만 이렇게 약 5분 간격의 폐기물 투입 주기에 따라 연소실 온도가 변동하는 것은 폐기물 투입구에서 도시쓰레기를 연소실로 공급한 직후의 외부 공기의 유입, 폐기물 투입 약 2분 후 폐기물 이송 슬라이더가 상단 화격자에 있는 폐기물을 하단으로 밀어 내림에 따른 변동과 폐기물 중 휘발분의 휘발에 의한 연소 등에 의해 각각의 연소실 온도가 ±50℃ 내외로 변동하는 것으로 판단된다. 한편 도시쓰레기 소각 시 폐기물 투입구를 통하여 1차 연소실의 화염 색상을 관찰한 결과 적색 화염으로 상당한 양의 미연 탄소입자(soot)가 발생하여 부분적으로 불완전 연소 상태인 것으로 생각된다.

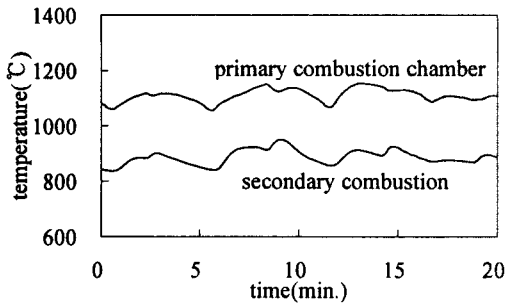


Fig. 3 Temperature variations in the primary and secondary combustion chamber.

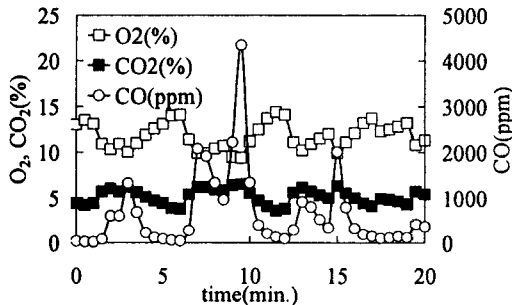


Fig. 4 Concentration variations for O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> and CO in the stack.

Fig. 4는 도시쓰레기 소각 시 굴뚝에서 가스분석기를 이용하여 측정된 연소배출 가스 중의 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO의 농도를 나타낸 결과이다. 잔류 산소 (residual O<sub>2</sub>)는 10~14%, CO는 최대 4,500 ppm, CO<sub>2</sub>는 4~6% 정도가 측정되었다. 소각 상태에 따라 각각의 가스 농도의 시간적인 변동이 상당히 심하게 나타나고 있는데 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO의 농도는 폐기물 투입 주기와 관련이 있는 것으로 판단되지만, CO 농도는 폐기물 투입 주기 또는 이송 화력자 주기와는 상관없이 급격히 상승 또는 감소하는 양상이 자주 나타나는데, 도시쓰레기 중에 플라스틱류 폐기물과 같은 고발열량 폐기물이 투입될 때 미연탄소분(soot)이 발생하는 것이 실험 중에 관찰될 때 CO 농도와 연소실 온도가 급격히 상승하는 현상이 관찰되며 그 반면에 잔류 산소 농도는 큰 폭으로 감소하는 것을 관찰하였다.

### 3.2 슬러지 혼소율에 따른 소각 상태

Fig. 5는 슬러지 혼소율의 변경에 따른 1, 2차 연소실의 평균 온도의 변화를 나타내는 그림이

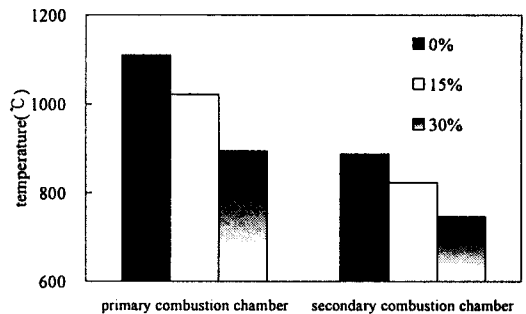


Fig. 5 Comparison on each combustion chamber temperature varying with the co-incineration percentage.

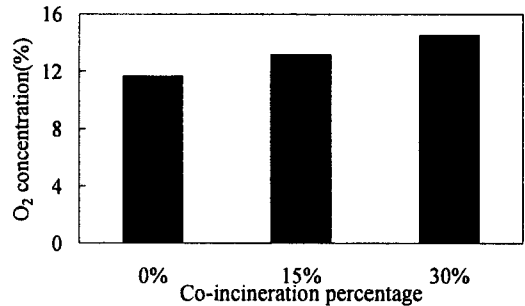


Fig. 6 Comparison on the residual oxygen concentration in the stack varying with the co-incineration percentage.

다. 도시쓰레기 만을 소각시키는 혼소율 0%일 때에는 1차 및 2차 연소실의 평균 온도는 각각 1,110°C, 890°C로서, 일반적인 소각로 적정 운전 조건(1차연소실 온도 >1,000°C, 2차연소실 온도 >850°C)을 만족시키고 있다. 하지만, 슬러지 혼소율을 증가시키기에 따라 혼합 폐기물의 발열량이 감소하므로 연소실의 온도가 저하하게 되며, 혼소율이 30%일 때 1, 2차 연소실 온도는 각각 900°C, 750°C까지 감소하였다.

Fig. 6은 슬러지 혼소율을 변화시킨 도시쓰레기-슬러지 혼합 폐기물을 소각시킬 때 굴뚝에서 측정된 잔류 산소 농도를 나타내는 그림이다. 본 실험에서는 도시쓰레기 투입량을 고정한 상태에서 슬러지를 추가로 투입하여 혼소하므로 슬러지 혼소 시 투입되는 가연분은 소폭 증가(30% 혼소 시 약 6 kg으로 약 7% 증가)하는 반면 공급공기량은 고정하므로 슬러지를 혼소하면 잔류산소량의 감소가 예상된다는 점에서 이 그림에서 관찰되는 슬러지 혼소율이 증가하면서 잔류산소농도가 높아지는 현상에 대한 적절한 설명이 필요하다. 이 실험 결과에 대해 검토해 본 결과 슬러지

혼소율 증가에 따라 연소실 온도가 저하하므로 (Fig. 5) 연소실에서 불완전 연소가 일어나 공급된 공기 중의 산소가 충분히 이용되지 않는다는 점이 굴뚝에서 측정된 잔류 산소 농도가 높아지게 되는 원인이라고 추정된다.

**3.3 산소 부화에 따른 소각 상태의 변화**

액체 산소 탱크로부터 기화기를 통하여 기화시킨 순산소를 약 200 lpm(liter per minute)의 유량으로 공급하면 산소 부화 공기의 산소 농도는 약 22% 수준이며 공급 공기 중의 질소 성분의 비율이 상대적으로 감소하기 때문에 연소실의 온도의 상승을 가져오는 것으로 추정하고 있다. 각

연소실에는 순도 99.5%의 산소를 200 lpm 씩 공급하였으며 산소 농도로 환산하면 1차 연소실은 22.1%, 2차 연소 공기는 산소 농도 10% 이하의 연소 가스를 재순환시키고 산소를 혼합하여 17.7%의 산소 농도로 공급된다.

Fig. 7은 유기성 슬러지의 혼소율이 각각 15%와 30%일 때 산소 부화 유(w/)·무(w/o)에 따른 1, 2차 연소실의 평균 온도를 비교하여 나타낸 그림이다. 산소 부화 없이 일반 공기를 연소실에 공급하여 슬러지를 혼합 소각했을 때 소각로 적정운전 온도에 비해 약간 낮은 수준인 각각의 연소실 온도가 산소 부화를 하면 1차 연소실 온도가 약 1,080℃에 도달하는 등 소각로 운전 조건 이상으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

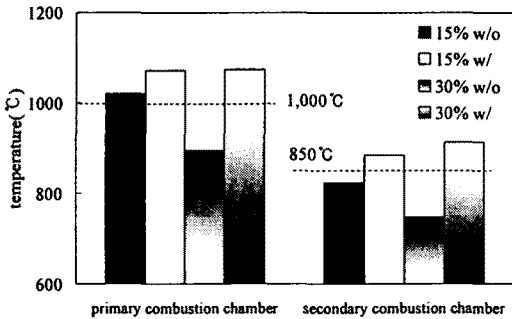


Fig. 7 Comparison on each combustion chamber temperature varying with the co-incineration percentage and the existence of the oxygen enrichment.

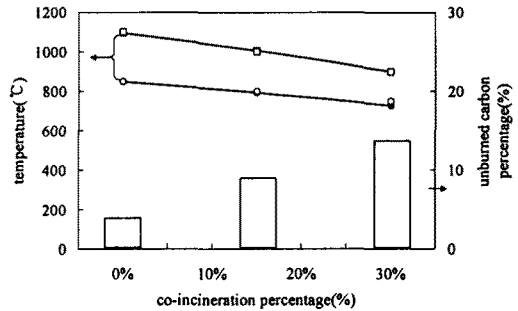


Fig. 9 Comparison on the calculation and experimental results in case of no oxygen enrichment varying with the co-incineration percentage. (varied unburned carbon percentage)

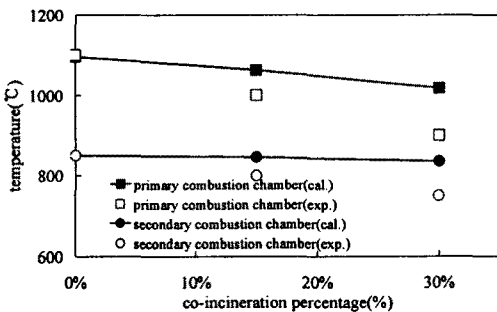


Fig. 8 Comparison on the calculation and experimental results in case of no oxygen enrichment varying with the co-incineration percentage. (fixed unburned carbon percentage)

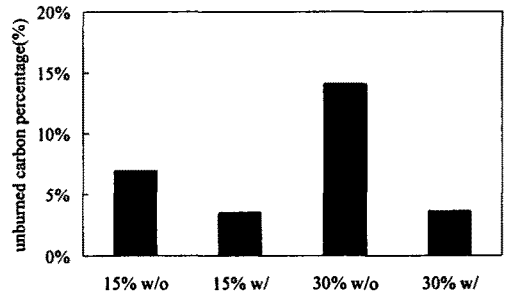


Fig. 10 Estimated unburned carbon ratios varying with the co-incineration ratio and oxygen-enrichment based on the experimental result.

### 3.4 슬러지 혼소 및 산소 부화에 따른 소각 온도의 변화에 대한 검토

슬러지 혼소 및 산소 부화에 따른 소각 온도의 변화는 각각 두 가지 요인에 의한 것으로 설명할 수 있다.

슬러지 혼소의 경우 연소실 온도가 저하되는 원인에 대해서 검토해 보면 우선 슬러지의 혼합에 의한 투입 폐기물의 평균 발열량의 저하에 의한 것으로 생각할 수 있다. Fig. 8은 유기성 슬러지의 저위발열량을 바탕으로 혼소 시의 투입 폐기물의 발열량을 추정하고, 이를 바탕으로 각 연소실 내에서의 열 및 물질정산에 의하여 연소실 온도를 계산한 결과를 Fig. 5의 실험 결과와 비교한 그림이다.

혼소율이 각각 15%, 30% 증가할 때 이에 따른 1차 연소실의 온도 감소의 정도가 실험 결과에서는 각각 100, 200℃로 두드러지지만, 슬러지의 혼합에 의한 발열량 감소를 고려한 본 계산 결과에서는 각각 40, 80℃ 정도로 상대적으로 감소 폭이 작다. 즉, 이러한 실험 결과에서 나타나는 온도의 저하는 슬러지의 혼합에 의한 발열량 감소에 의한 것만으로는 설명할 수 없다. 따라서, 연소실의 온도를 결정하는 인자 중 공급공기 투입 열량, 연소 재 손실, 벽면 열손실 등에는 큰 변동이 없는 것으로 판단되므로 폐기물 발열량 외에 실험 시 관찰되는 정도로 연소실의 온도를 저하시킬 수 있는 요인은 가연물질의 미연분 손실, 즉 미연 탄소분의 발생 증가에 의한 것으로 판단된다. Fig. 6에서 관찰된 잔류 산소 농도가 높아진 원인을 설명할 때 슬러지 혼소율 증가에 따라 연소실 온도가 저하하여 연소실에서 불완전 연소가 일어나 공급된 공기 중의 산소가 충분히 이용되지 않는다고 추정한 바와 같이, 슬러지 혼소율 증가에 따라 미연 탄소분의 발생이 증가한다고 추정할 수 있으며, 실제 슬러지 혼합소각 실험 후 백 필터의 분진에 미연분이 다량 함유된 것이 관찰된 것도 이와 같은 추정을 뒷받침하는 것으로 생각된다. 소각로 열 정산에서는 미연 탄소분 발생 비율을 일반적으로 가연성분의 4%로 고정하여 계산하여 왔는데 Fig. 9는 Fig. 5의 실험 결과 온도에 맞추어 미연 탄소 발생 비율을 변경하여 재계산한 결과이다. 도시쓰레기만을 소각시켰을 때에는 미연 탄소 비율이 4%이지만 슬러지 혼소율이 15%, 30%로 증가함에 따라 미연 탄소 비율이 9.1%, 14.1%로 증가하는 것으로 추정된다.

한편 산소 부화에 따른 소각 온도의 변화도 두 가지 요인에 의한 것으로 설명할 수 있다.

첫 번째는 산소 부화 시 연소실에 공급되는 산소 총량을 일정하게 유지시키므로 결국 공기 중

의 질소의 투입량이 감소되어 질소에 의한 현열 부하(sensible heat)가 줄어드는 것을 생각할 수 있다.

두 번째는 산소 부화 시 연소실에 공급되는 외부 공기의 산소 농도가 증가하여 연소실에서 사용되는 유효 산소량이 증가하여 미연 탄소분 발생량이 감소하는 것이다.

Fig. 10은 Fig. 7(혼소율과 산소부화에 따른 작동 상태)의 실험 결과 온도에 맞추어 미연 탄소 비율을 추정하여 계산한 결과이다. 슬러지 혼소율이 각각 15%, 30%로 증가하면 미연 탄소 비율도 각각 증가하지만, 슬러지 혼합소각 시 산소 부화 공기를 공급하면 미연 탄소 비율은 각각 3.5% 정도로 낮아져서 결과적으로 슬러지 혼합소각 시에도 1, 2차 연소실 온도가 소각로의 적정 운전 조건을 만족시키게 된다고 추정할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 150 kg/h급 도시쓰레기 소각로 파일롯 플랜트를 대상으로 도시쓰레기에 유기성 하수 슬러지의 혼소율을 30%까지 증가시키면서 소각 시의 연소실 온도 및 배출가스 농도 등을 측정하였으며, 산소 부화 공기의 공급에 따른 연소실 온도 등의 변화를 살펴보았다.

결론적으로 본 연구에서는 산소농도 수준이 약 22%의 크게 높지 않은 산소 부화 공기 소각 방식을 적용하여 수분 80% 수준의 탈수 유기성 슬러지를 건조하지 않은 상태로 30% 이상 안정적으로 소각하는 것이 가능하다는 것을 입증하였다.

도시쓰레기만을 소각시킬 때 1차 및 2차 연소실의 평균 온도는 각각 1,110℃, 890℃로 적정 운전 조건인 반면, 슬러지 혼소율을 증가시키기에 따라 연소실 온도가 저하하며, 혼소율이 30%일 때 1, 2차 연소실 온도는 각각 900℃, 750℃까지 약 200℃ 정도까지 크게 감소한다. 열정산 계산 결과 슬러지의 혼합에 의한 발열량 감소의 효과는 약 80℃ 정도로 나머지 온도 저하는 슬러지 혼소율 증가에 따라 낮아진 연소실 온도로 불완전 연소가 일어나 미연 탄소분의 발생이 증가한다고 추정할 수 있으며 이 경우 미연탄소분은 전체 가연분의 약 14% 수준인 것으로 판단되며, 실험 시 백 필터에서 포집된 분진 중에도 다량의 미연 탄소분이 관찰되었다.

유기성 슬러지의 혼소율이 30%일 때 산소농도 약 22% 수준의 산소 부화를 하면 1차 연소실 온도가 약 1,080℃에 도달하는 등 소각로 운전 조건 이상으로 증가한다. 이 경우에도 공급공기 중의 질소 성분이 감소하는 현열 부하 저감의 효과

는 크지 않으며, 이보다는 산소부화 연소 효과에 의한 활발한 연소의 영향으로 미연 탄소분이 감소한 것이 연소실 온도 상승과 배출가스 중의 CO 농도 저하의 주요한 원인으로 추정할 수 있다.

향후 슬러지 혼소 및 산소 부화에 따른 미연 탄소분의 발생량 변동에 대한 본 연구의 결론을 확인하기 위해서 도시쓰레기-유기성 슬러지 혼합소각 실험을 통하여 미연 탄소분의 발생에 대한 실험을 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

이 연구는 2005년 환경부 차세대핵심환경기술개발사업을 통해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

- [1] 류지영, "슬러지 소각 정책과 전망, 슬러지 소각처리 기술," Workshop(소각기술협의회), pp. 525-530, 2003.
- [2] 정진우, 한인호, 손성섭, "로타리킬른 소각로를 이용한 폐고무소각에서의 산소부화효과," 한국폐기물학회, 제17권, 제8호, pp. 994-1000, 2000.
- [3] 서용철, 김인태, 양희철, 김준형, "반건류 상하연소식 소각로에서의 폐플라스틱 시험소각," 대한환경공학회 추계학술연구발표회, pp. 129-132, 1994.
- [4] J. Werther and T. Ogada, "Swage sludge combustion, Progress in Energy and Combustion Science," Vol. 25, pp. 55-116, 1999.
- [5] 한인호, 최광호, 정진우, "사업장폐기물의 순산소 소각기술," 제21회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp. 132-139, 2000.
- [6] 이교우, 이성준, 김병화, 이승우, 정종수, 고발열량 산업폐기물을 처리하는 소형 소각로의 소각 및 배출 특성," 한국연소학회지, Vol.7, pp. 42-48, 2002.
- [7] 이교우, 이성준, 이승우, 황정호, 정종수, "제지슬러지와 고발열량 산업폐기물의 혼합소각시의 가연 열량한계에 관한 실험," 한국폐기물학회지, 제19권, 제7호, pp. 837-845, 2002.
- [8] 배성근, "도시 쓰레기와 하수슬러지의 혼합소각기술," 한국폐기물학회지, 제18권, 제3호, pp.39-48, 2001.