

고 발열량 산업폐기물을 처리하는 소형 소각로의 소각 및 배출 특성

이교우* · 이성준* · 김병화* · 이승우** · 정종수**

Combustion and Emission Characteristics of High Calorific Industrial Waste Burned in a Small-scale Incinerator

Gyo Woo Lee*, Sung Jun Lee*, Byung Hwa Kim*, Seung Woo Lee**,
and Jongsoo Jurng**

Abstract

Experiments on burning process of the industrial wastes were performed on a nozzle-type grate in the industrial waste incinerator with a capacity of 160 kilograms per hour. The temporal variations of temperatures and concentrations of the exhaust gas were measured and analyzed. The synthetic leather waste with the moisture content less than 2% was used.

The experimental results show that the CO concentration in the exhaust gas exceeds the limit, 600 ppm, and the gas temperature fluctuates too much when 8 kg of waste was supplied every 3 minutes, equivalent to the capacity of 160kg per hour. That is a typical burning mode of this high-calorific industrial waste. When the smaller unit waste input, 6kg per every 2 min 15 seconds was supplied, we could reduce the fluctuations of the furnace temperature and improve the exhaust emissions, especially the CO concentration.

Key Words: Small industrial waste incinerator, Incineration, Combustion characteristics, Emission characteristics

1. 서론

2000년 환경부에서 밝힌 우리나라의 1999년 폐기물 관련 통계를 보면 사업장 폐기물은 1일

103,893 톤이 발생하며, 그중 약 6.1%인 6,338 톤이 소각 처리되고 나머지는 매립(18.5%), 재활용(69.2%) 혹은 해양투기(6.2%)되고 있다. 사업장 폐기물은 성상별로 구분해보면 폐합성수지류, 종이, 목재류, 오니류 등이다[1]. 대부분의 처리 사업장에서는 폐기물의 성상에 따라 고상(solid waste)과 액상(liquid waste) 및 슬러지

* KIST 지구환경연구센터

*† 연락저자, jjurng@kist.re.kr

** (주)동방공업

상(sludge waste)에 대하여 별도의 설비를 운영하고 있다.

국내에서 산업폐기물의 소각에 관한 연구결과들이 발표되고 있는데, 서용칠 등[3]은 페타이어, 페플라스틱, 폐섬유 등을 소각하는 단일 원통형의 소각로에서 공기조절을 통한 소각특성 연구에서 배출가스 및 분진농도를 조사하여 연소 초기에 소각로 내의 소각상태의 불안정으로 인한 CO가 급격하게 증가하는 결과를 보여주고 있으며, 서용칠 등[4]은 반건류식 상하연소식 소각로에서의 페플라스틱 시험소각을 통해서 역시 투입초기에 과도한 CO 배출특성이 나타나지만 정상상태에서는 CO 배출기준을 만족시킴을 보여주고 있다. 한편, 정진우 등[5]은 로타리킬른 소각로를 이용한 폐고무 소각에서 산소부화 효과를 살펴보았는데, 일반 공기를 사용할 경우 CO 배출량이 부분적으로 200ppm을 훨씬 초과함을 보여주고 있으며 30% O₂를 사용할 경우 CO 배출량이 기준 이하로 현저히 감소함을 보여주고 있다. Werther and Ogada[6]는 하수슬러지(sewage sludge)의 다양한 처리 및 배출가스 특성에 관하여 포괄적으로 정리하였다. 한편, 도시폐기물 소각로를 통한 슬러지의 혼합소각은 일반적으로 10% 가량의 혼합소각 비율을 적정한 선으로 보고 있다[2].

소각로의 배출가스 규제치는 CO, NO_x, SO_x 등이 각각 12% O₂ 기준으로 600, 200, 300

ppm이며, 이는 향후 소각설비 규모에 따라 차등 강화될 예정이다[10].

본 연구실에서는 보다 저렴한 비용으로 슬러지상 폐기물을 처리하는 방안으로 일반 도시폐기물(municipal solid waste)에 비하여 발열량이 두세 배 가량 큰 합성피혁류의 산업폐기물과 수분 함량의 과다하여 발열량이 상대적으로 낮은 슬러지상 폐기물의 혼합소각을 최종목표로 하고 있다. 이를 위해서는 먼저 산업폐기물 소각로의 일반적인 연소 및 배출가스 특성 이해가 필수적이며 슬러지 혼합 이전에 소각상태의 평가 기준을 설정하기 위하여 고상(solid) 산업폐기물만으로 일련의 실험이 진행 중이다.

본 논문은 향후 계획하고 있는 산업폐기물과 슬러지상 폐기물의 혼합소각 실험에 선행하여, 산업폐기물 단독 소각시의 로내의 연소상태, 배출가스 농도 등 여러 면에서 최적의 소각이 가능한 조건을 찾기 위한 실험결과를 소개하고 있으며, 조정 가능한 실험인자로 폐기물의 단위 투입량, 투입 주기, 연소공기 총량, 공기 배분율을 선정하였다. 최적의 상태를 판별하는 인자로 연소실 내부 온도, 2차 연소실 출구 온도를 비롯한 각 부의 온도와 굴뚝 전단에서 샘플링한 배기가스 농도 중에서 특히 CO 생성량과 잔류 산소량을 측정하였다. 이러한 실험을 하는 목적은 대상폐기물인 합성피혁류의 연소특성이 일반 도시폐기물과는 달리 투입 후 휘발분의 급격

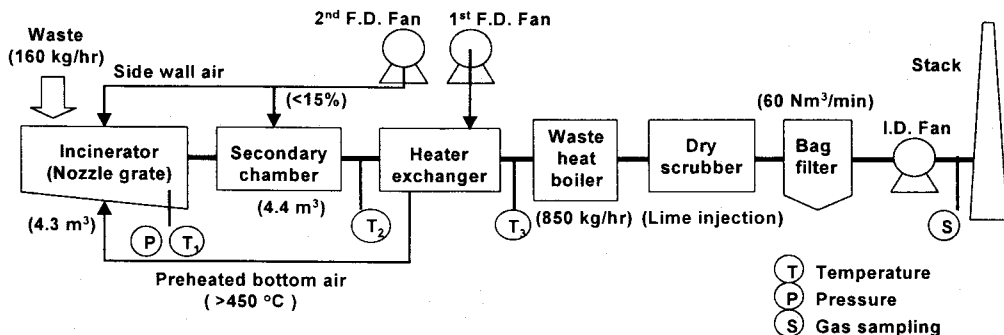


Fig. 1 Schematic of the incineration facility

한 증발과 연소가 발생하여 잔류산소량의 변화가 심하고 아울러 CO 생성량에도 큰 영향을 미치기 때문이다.

2. 소각 및 후처리공정 개요

실험에 사용한 대상 소각로는 천안에 위치한 X사의 산업폐기물 소각로로서, 처리규모는 시간당 160kg/hr 이다. X사는 인조 합성피혁 제품을 생산하는 업체로서, 배출되는 폐기물은 폐합성섬유, 폐합성수지, 폐합성피혁 등이 주를 이룬다. Fig. 1은 소각로 및 후처리설비 전체를 보여주는 공정도이며, 처리공정은 노즐화격자 소각로, 2차 연소실, 바닥공기 예열용 열교환기, 보일러, 건식세정기, 백필터 등으로 구성되었다. 이중분으로 단속되는 램 푸셔 방식의 투입설비가 사용되었다. 연소실과 2차 연소실은 각각 4.3, 4.4m³의 용적을 가지고 충분한 체류시간(2초 이상)을 가지도록 설계되었다. 연소실은 건조단, 연소단, 후연소단으로 구분된 구조이며, 각 단(stage)에서의 폐기물 이송은 주기적으로 작동하는 슬라이더를 통해서 이루어진다. 2차 연소실과 폐열보일러 사이에 바닥공기를 예열할 수 있는 열교환기를 설치하여 약 450℃ 이상으로 승온하여 열을 회수하였다. 배출가스의 후처리 설비로는 소석회 분말을 분사하는 건식세정탑과 백필터를 사용하였다[8,9].

한편, 서론에서 언급하였듯이 본 설비는 일반 산업폐기물과 슬러지 폐기물의 혼합소각을 목표로 건설되었으며, 이를 위하여 기존의 화격자와는 다른 개념의 노즐 화격자(nozzle grate)를 설치하였다. Fig. 2에 노즐 화격자를 포함한 로내의 구조를 도식적으로 표시하였다. 세라믹 재질(캐스터블)의 화격자 내부에 그림과 같은 노즐을 설치하여 공기를 공급하고 슬라이더를 이용하여 다음 단으로 폐기물을 이송한다. 이러한 노즐 화격자는 기존의 금속 재질의 화격자와 비교할 때 시공 및 보수비용이 절감되고 부분적인

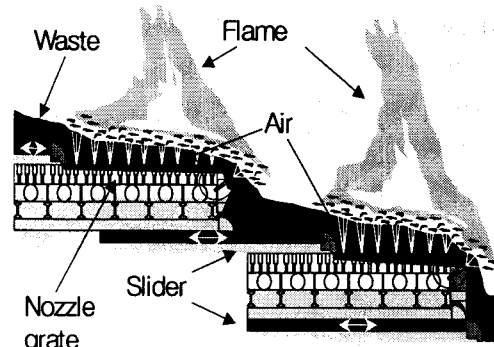


Fig. 2 Schematic of the nozzle grate system

보수가 가능하며, 또한 보다 높은 온도의 예열 공기를 사용하여 건조단에서 수분이 많은 폐기물을 효과적으로 건조할 수 있는 등의 장점이 있다. 반면 로내에 고속으로 주입되는 공기에 의한 분진발생 증가로 인한 후처리 설비의 부담 가중 등이 우려되기도 한다[10]. 하지만 바닥공기와 벽면공기의 적절한 배분이 이루어진다면 로내에서의 휘발분과 공기의 빠른 혼합 및 체류시간에 도움이 될 수 있음을 실험을 통해서 확인하였다. 현재 이러한 방식의 화격자 소각로는 국내의 경우 처음으로 건설되었으며, 특히 슬러지 혹은 생활폐기물 등의 고수분의 폐기물에 적용된 사례는 외국에서도 없었다. 일반적으로 본 대상 소각로와 같이 시간당 처리용량이 200kg 이하인 소형의 소각로에서는 회분식(batch type) 소각로가 많이 사용되지만, 본 연구에서는 하루 8시간 가량 소각하는 준 연속식 소각 및 향후의 혼합소각을 위하여 화격자 방식을 택하였으며, 유지보수 등의 비용을 고려하여 가장 경제적이고 판단된 노즐화격자를 채용하였다.

일반 금속화격자를 사용하는 경우 폐기물 종류에 따라 다르기는 하지만 용융 낙하물, 화격자 틈새 재 발생 문제, 금속제 화격자의 열변형, 부식, 마모 등이 특히 문제가 되는데, 본 연구에서 채택한 노즐화격자는 설치 및 유지보수 측면의 비용 외에도 이러한 단점들을 해결할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 측정 장치 및 실험조건

각 부분의 온도, 압력, 샘플링 프로브의 위치는 Fig. 1에 표시되었는데, 연소실 내부 온도는 연소단 후반부 상단에 설치된 R-type 열전대를 통해서 측정하며, 2차 연소실 출구의 온도는 보일러 입구부분에서 역시 R-type 열전대를 통해서 측정된다. 후연소단 후반부 하단에 화격자에서 2cm 높이에 K-type 열전대로 폐기물 층 혹은 내부 온도가 검출된다. 로내 압력은 연소실 내부 온도 측정 지점 근처에서 대기압과의 차압으로 측정되며(Series T100, Hisco SI), CO 농도와 잔류산소량은 굴뚝입구에서 연소분석기(KM-9006, Kane-May Co.)를 이용하여 샘플링하고 분석된다. 각 지점에서의 열전대의 전압과 압력센서의 전류는 보상선을 통해서 각각의 모듈과 A/D Converter(ADAM-4520, Advantech Co.)를 거쳐 PC에 저장된다. 한편 송풍기로부터 연소실로 유입되는 공기량은 열선유속계(TSI Co.)로 구해진 속도를 통해서 구하였다.

본 실험의 목적은 향후 계획하고 있는 슬러지 혼합소각에 선행하여 고상 폐기물에 대하여 연소 상태, 배출가스 농도 등 여러 면에서 최적의 소각이 가능한 조건을 찾고자 하는 것이며, 조정 가능한 시험변수로는 폐기물 단위 투입량, 투입 주기, 공기 총량, 공기 배분율로 제한하였다. 폐기물 투입량은 시간당 160kg이며, 열량으로 환산하면 시간당 약 85만 kcal(160kg/hr x 5343 kcal/kg, 저위발열량 기준)가 투입된다.

Table 1에 각각의 실험 경우의 조건들을 나열하였다. 세 경우의 시간당 총 폐기물 투입량은 160kg으로 고정하고, 단위투입량과 투입주기를 변화시켰다. 이는 서론에서 지적한 대로 대상 폐기물의 급격한 휘발 연소로 인한 산소 부족에 기인하는 것으로 보이는 CO의 발생량을 줄이고 적절한 기준을 설정하기 위한 것이

Table 1. Experimental conditions

	Case #1	Case #2	Case #3
단위 투입량(kg)	8	6	4
투입주기(sec.)	180	135	90
시간당 폐기물 총 투입량(kg/hr)	160		
1차송풍기(바닥) 공기량(Nm ³ /hr)	850		
2차송풍기(벽면) 공기량(Nm ³ /hr)	790		
투입공기 총량(Nm ³ /hr)	1640		

Table 2. Proximate and ultimate analysis of the industrial waste

구분	공업분석 (wt%)	가연분의 원소분석 (wt%)		건기준 고위 발열량	습기준 저위 발열량
		C	H		
합성 피혁	수분	1.87	59.09	5928.9 kcal/kg	5342.7 kcal/kg
			8.76		
	휘발분	81.11	29.56		
			1.98		
	고정탄소	11.62	0.12		
		0.49			
	재	5.40			

다. 유속계를 사용하여 실측한 연소공기 유량은 1차 송풍기와 2차 송풍기를 통해서 각각 850, 790Nm³/hr가 공급된다. 1차 송풍기의 공기는 모두 연소실 바닥을 통해서 연소실로 공급되고, 2차 송풍기를 통한 공기는 연소실의 측벽을 통해 공급된다. 소각로는 충분한 시간을 가지고 승온 및 축열이 되었으며 각 Case에 대해서 두 시간 가량의 소각을 통해서 각 부분의 온도 분포 및 배출가스 성분 등에서 충분히 정상상태(steady state)에 도달하였다고 판단될 때 데이터를 기록하기 시작하였다.

3.2. 투입 폐기물의 성분분석 및 특징

본 실험에서는 대상 폐기물을 폐 합성 피혁만으로 제한하였으며, TGA(thermo-gravimetric

analyzer, LECO-601, U.S.A.) 분석을 통한 공업분석 결과, Table 2에 제시한 바와 같이 수분 함량은 2% 미만이며, 총 가연성분이 93% 정도로 매우 높은 것이 특징이다. Bomb calorimeter (LECO-AC350, U.S.A.)를 통해 구한 건기준 고위발열량(H_h)으로부터 다음 식을 이용하여 수분의 증발열(약 600kcal/kg)을 고려하여 습기준 저위발열량(H_l)을 구하였다. 여기서 H와 w는 각각 삼성분 중의 수분량 및 건기준 수소의 원소 분석치이다[11].

$$H_l = H_h \times (1-w) - 600 \times \{(9H \times (1-w) + w)\}$$

구해진 폐기물의 발열량은 5,300kcal/kg 이상으로 일반 도시폐기물에 비하여 매우 높았다. 원소분석치를 사용한 Dulong 식[12]에 의한 저위 발열량은 약 5,600kcal/kg으로 계산되었다. 기업체에서 배출되는 합성피혁 폐기물은 일반적으로 폭 1~2m 가량의 롤(roll) 형태이므로 실제 소각에서는 이 폐기물을 50cm 정도의 적절한 길이로 잘라서 투입용 비닐 봉투에 담은 후 소각로에 투입하였다. 본 실험의 대상 소각로의 투입설비는 푸셔 형태의 슬라이더를 사용하고 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 단위 투입량 및 투입 주기 변화에 따른 소각 및 배출 특성

먼저 8kg 단위로 3분 간격으로 투입하여 각 부분의 온도 및 로내 압력 그리고 배출가스 조성 등을 확인하여 적절한 투입여부를 검토하였다.(Case #1) 또한 6kg 단위로 2분 15초 간격으로 투입하였으며(Case #2), 마지막으로 4kg 단위로 1분 30초 간격으로 투입하였다.(Case #3) 이때 공기유량 등의 다른 조건들은 고정하였고 단지 단위 투입량만을 변화시켰다.

Fig. 3은 8kg의 단위 투입을 3분 간격으로 할

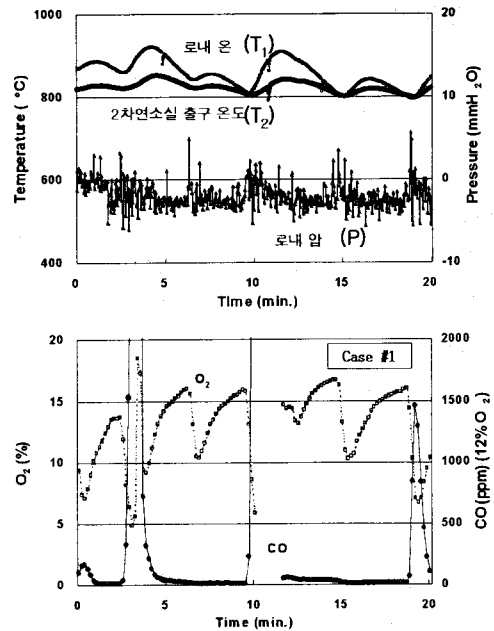


Fig. 3 Temporal variations of temperatures and emissions of the incinerator(Case #1)

때의 연소로 내의 온도, 2차 연소실 출구 온도(보일러 입구 온도), 로내 압력 그리고 굴뚝입구에서 측정된 잔류산소와 CO 농도를 원 데이터(raw data) 형태로 보여주고 있다. 먼저 눈에 띄는 것은 각 부분의 온도가 투입 주기와 동일한 주기로 변화하는 것이다. 연소로 내의 온도는 800~1000°C의 범위에서 폐기물의 투입 및 휘발분의 연소에 연계되어 비교적 크게 변동하고 있으며, 2차 연소실 출구의 온도는 로내의 온도에 비해서 변동폭이 작다. 로내 압력은 평균적으로 약 -3.5 mmH₂O를 유지하고 있다. 잔류산소량은 7~17% 정도의 범위에서 매우 큰 변동을 보이고 있다. CO 농도 역시 배출 규제치인 600ppm을 초과하기도 한다.

이러한 결과는 폐기물 투입 후 다량의 가연성분이 발생하는 상태는 연소 공기량이 부족하고 가스와 공기의 혼합이 충분하지 못하여 미연분이 다수 배출되는 것으로 생각된다. 그러나 평균적으로는 잔류산소량이 높은 것으로 미루

여 가연분이 다량으로 발생하는 순간에만 공기량이 부족한 것이므로, 공기량을 가변적으로 공급하거나 단위 투입량을 작게 하여야 한다. 그러나, 중소형 규모의 소각로에서 연소 공기량을 가변적으로 조절한다는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 본 연구에서는 단위 투입량을 조절하는 방안을 사용하였다.

실험 결과를 개괄적으로 비교하기 위하여 Table 1의 실험조건에 대한 raw data로부터 평균과 표준편차를 구하여 Fig. 4와 5에 나타내었다. 먼저 Fig. 4에서는 각 경우의 로내 온도와 2차 연소실 출구온도를 비교하였다. 총 투입열량이 같으므로 온도에 큰 차이가 없어야 하는데 그림에서 보면 약간의 기울기가 보인다. 하지만 이는 충분히 가능한 오차 이내로 볼 수 있으며, 두 온도는 매 Case에서 일정 수준으로 유지된다고 볼 수 있다.

Fig. 5에서는 잔류산소농도와 CO 배출량을 역시 평균과 표준편차(error bar)로 나타내었다. Fig 3에서 보듯이 CO의 변동폭이 큰 경우는 표준편차(error bar)가 매우 크게 나타난다. 6kg의 폐기물을 2분 15초 간격으로 투입한 Case #2를 앞선 Fig. 3의 8kg을 3분 간격으로 투입한 Case #3 경우와 비교하면 차이가 현저히 나타나고 있다. raw data 상으로는 투입 주기를 변경함에 따라 로내 온도의 변동주기가 바뀌는 것을 알 수 있고, 로내 온도는 900℃ 이상으로 유지되며 온도 변동폭도 줄어들었음을 볼 수 있다. 2차 연소실 출구의 온도는 820℃ 정도를 유지하고 있다. 로내 압력은 8kg 때와 마찬가지로 - 3.5 mmH₂O를 유지한다. 잔류 산소량과 CO 생성량을 보면 8kg과의 차이가 더욱 분명하다. 잔류 산소는 6~14% 선을 유지하며 CO 생성량은 대체적으로 규제치 이내의 값을 나타냈다. 4kg 폐기물을 1분 30초 간격으로 투입한 Case #3의 로내 온도는 평균적으로 900℃ 이상을 유지하며 변동은 6kg 때보다도 더욱 작다. 2차 연소실 출구의 온도는 810~820℃ 선을 유지하고 있다.

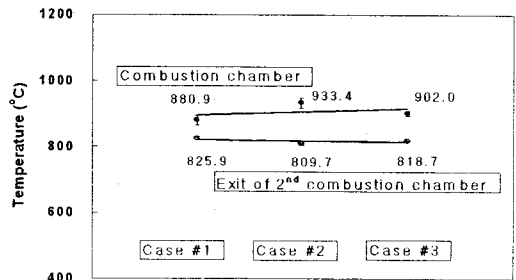


Fig. 4 Averaged temperatures with several input conditions

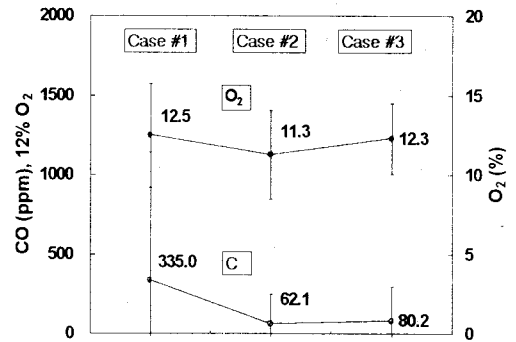


Fig. 5 Averaged emissions and standard deviations with several input conditions

로내 압력은 거의 유사하게 유지되고 있다. 그러나 잔류산소는 6kg의 경우에 비해서 오히려 약간 증가하고 CO 배출량도 특별히 달라진 것은 없다. 이러한 평균 잔류산소농도가 약간 높아지는 현상의 원인의 하나로 생각할 수 있는 것은 폐기물 투입설비의 투입구가 이중으로 차단되어 있기는 하지만 로내가 음압(negative pressure)인 상태에서 투입 푸셔가 움직일 때 외부 공기가 일부 들어가므로 투입이 빈번할수록 외부공기의 유입이 증가되는 것으로 생각된다.

5. 결론 및 향후계획

이상의 결과를 바탕으로 본 소각로에 대해서는 적절한 투입방식으로, Case #2인 단위 투입량 6kg, 투입주기 2분 15초로 결정하였다. 단위

투입량을 더 줄인 경우(Case #3) CO 배출량이 나 잔류 산소농도 면에서 특별히 나가지지 않은 반면, 푸셔 형태인 투입설비에 기계적인 부담을 줄 수 있기 때문에 6kg 단위 투입이 적절하다. 연구에서 얻어진 결론은 일반화하기에는 제약이 많은 Case study이다. 공기공급 총량 및 벽면과 바닥의 배분비율에 따라서 결과가 다르게 나올 수 있으므로, 향후 계속적인 데이터의 축적이 필요하다. 또한, 일반적으로 2차 연소실은 미연분의 완전연소를 위하여 2차 공기 분사와 함께 보조버너를 가동하기도 한다. 하지만 본 소각설비의 경우 2차 공기량 및 분사 위치 등에 대한 조정이 불가능한 형태로서 이에 대한 개선을 모색 중이다. 이는 배출가스 중의 미연 성분 및 가스상 오염물질의 저감을 위해서 반드시 필요한 부분이다. 대상 폐기물과 같은 가연 성분이 많고 투입 초기에 급격한 휘발연소 특성을 보이는 산업폐기물 소각에서 발생할 수 있는 문제를 단위 투입량과 투입주기 등의 폐기물의 투입을 조절하여 개선하였고, 이를 근거로 슬러지 폐기물의 혼합소각을 준비중이다. 투입 초기에 급격한 연소가 일어나는 본 대상 폐기물에 고수분 함량의 저발열량의 슬러지를 함께 소각한다면 소각상태가 양호해질 수 있을 것으로 기대하고 있다. 현재 시행되고 있는 소각시설의 세부 검사기준에 의하면 시간당 200kg 미만의 처리용량을 갖는 시설은 시간당 3회 측정하여 평균치를 산정하고 있다. 그러나 폐기물의 성상이 본 연구에서와 같이 급격한 연소를 유발한다면 시간당 3회 측정은 검사자의 주관적인 판단이 없는 측정이 불가할 것으로 사료된다. 일정시간 연속측정으로 배출가스 성분의 시간변화를 측정하고 평균치를 구하여야 한다.

참 고 문 헌

1. 환경부, “'99 전국 폐기물 발생 및 처리 현황,” 행정간행물, 2000.
2. 배성근, “도시쓰레기와 하수슬러지의 혼합소각기술,” *한국폐기물학회지*, 제18권 제3호, 2001, pp. 39-48.
3. 서용칠, 김인태, 안병길, 김준형, “단일 연소실 공기제어 소각로의 특성연구,” *한국폐기물학회지*, 제6권 제2호, 1989, pp. 129-135.
4. 서용칠, 민경대, 양희철, 김준형, “반건류 상하연소식 소각로에서의 폐플라스틱 시험소각,” 대한환경공학회 추계학술연구발표회 논문초록집, 1994, pp. 129-132.
5. 정진우, 한인호, 손성섭, “로타리킬른 소각로를 이용한 폐고무 소각에서의 산소부화 효과,” *한국폐기물학회지*, 제17권 제8호, 2000, pp. 994-1000.
6. Werther, J., and Ogada, T., “Sewage Sludge Combustion,” *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 25, 1999, pp. 55-116.
7. 연구보고서, “소각신기술의 개발동향 및 적정도입방안 등에 대한 연구,” 환경부 정책연구개발사업, 2000.
8. 이승우, 한승관, 이경태, 정중수, 이교우, 이성준, “노즐 화격자 방식 산업폐기물 소각로의 설계 및 성능평가,” *춘계 폐기물 관련학회 공동학술대회 논문집(1)*, 2001, pp. 171-174.
9. 이교우, 이성준, 정중수, 이승우, “중소형 연속식 산업폐기물 소각로의 폐기물 투입에 따른 소각 및 배출 특성,” *춘계 폐기물 관련학회 공동학술대회 논문집(1)*, 2001, pp. 167-170.
10. 연구보고서, “폐기물 소각로에 관한 연구,” UCU0227-6505-6, 1999.
11. 연구보고서, “환경설비 성능평가 기준 제정에 관한 연구,” 산업자원부 기술표준원, 2001.
12. 연구보고서, “소각시설의 효율적 설치 운영에 관한 연구,” 한국환경기술개발원, 1996.