

## 슬러지용 소형 사이클론 소각 시스템의 연소특성에 대한 연구

박우철<sup>1\*</sup>, 이현창<sup>1</sup>

### A Study on the Combustion Characteristics of the Small Scale Cyclone Incinerate System for Sludge

Woo-Cheul Park<sup>1\*</sup> and Hyun-Chang Lee<sup>1</sup>

**요약** 본 연구에서는 수분 함유량이 높은 하수 슬러지 처리를 위한 열 건조기를 포함하는 100kg/hr급 소용량 사이클론 소각시스템의 소각 성능을 평가하였다. 국내에서 발생하는 하수 슬러지의 물성치를 바탕으로 소각시스템을 설계하였다. 슬러지 수분 정도, 슬러지 투입량, 보조연료량 등 동작조건의 변화에 따른 성능실험을 통하여 소각시스템의 특성을 분석하였다. 정상 운전 시 전체시스템의 압력 손실은 700mmAq로 비교적 적게 나타났으며, 소각기 내부의 연소에 의한 온도분포도 1000℃미만으로 유지되었다. 수분 86.1%의 슬러지 100kg을 소각하는 경우 4.7l/hr 정도의 보조 연료가 필요하다. 소각기 내부의 온도가 1000℃ 미만으로 유지되기 때문에 측정된 대부분의 NOx는 연소과정에 발생된 열적인 NOx 보다는 슬러지 중에 포함된 N 성분의 산화에 의하여 발생하는 연료적 NOx인 것으로 예측된다. 배출된 소각재의 성분 분석 결과, 소각재 속에는 유기물이 전혀 검출되지 않았으며, 이로부터 소각기에서 완전 연소가 이루어진 것으로 예상된다.

**Abstract** The performance of the small scale cyclone incinerate system (100kg/hr) to process the sewage sludge containing high moisture is evaluated. The incinerate system design is based on properties of the domestic sewage sludge. The combustion characteristics of the incinerate system is tested and analyzed with the various operation conditions of the moisture level, the sludge feed rate and the auxiliary fuel feed rate. The pressure loss of the whole system is appeared relatively small of 700mmAq under the normal operating condition and the temperature distribution of the incinerator internal combustion is maintained less than 1000C. Auxiliary fuel of 4.7 l/hr is required to incinerate 100kg sludge which include 87% moisture. Because the inside temperature of the incinerator is maintained less than 1000℃, it is predicted that the most NOx measured is produced not from the heat during the combustion process but from the oxidation of the N ingredient in the sludge. From the component analysis of ash, the organic matter is not entirely detected. Accordingly, it is estimated that the complete combustion has been accomplished in the incinerator.

Key Words : Cyclone incinerator, sewage sludge, Combustion

### 1. 서론

환경의 질적인 개선에 관한 요구가 증가하고 있으며, 이에 대하여 주요 하천의 수질 오염을 방지하기 위하여 기초 시설을 점진적으로 확충하고 있다. 이러한 기초 시설 중에서 하수 처리장(sewage treatment plant)은 가장 시급한 사업으로서 대도시는 하수처리장이 거의 완비되었으며, 최근에는 중소도시로 대상이 확대되어 가고 있어

2003년 말 현재 우리나라에 설치된 하수종말처리장시설은 242개소로 처리 시설 용량은 20,847,745m<sup>3</sup>/일이다[1].

하폐수를 정화 처리함으로써 수중의 부유물이 액체로부터 분리되어 발생하는 찌꺼기를 일반적으로 슬러지(sludge)라 한다. 하수 슬러지의 처리 방법 중 소각은 매립과 더불어 가장 오래된 처리법 중의 하나로서 대량으로 처리할 수 있는 가장 신뢰성 있는 방법이다[2]. 소각 방식으로는 화격자 연소방식, 킬른 연소방식, 액상분무 연소방식, 유동층 연소 방식 등이 있으며 선진국에서는 이미 실용화되어 널리 보급되고 있다[3].

<sup>1</sup>강원대학교 기계자동차공학부

\*교신저자: 박우철(wcpark@kangwon.ac.kr)

국내에 설치된 슬러지 소각기는 대부분 유동상형으로 국내 현실에 맞는 1ton/hr 미만의 소각 용량으로는 효율성이 저하되기 때문에 수집, 운반하여 소각할 수밖에 없다. 그러나 하수 슬러지는 수분 함유량이 높은 특성으로 인하여 부패 및 전염성이 있어 장기간 저장이 곤란하고 운반 시 과도한 운송비가 소요되기 때문에 발생지에서 소각 처리하는 것이 효율적이라고 생각된다. 따라서 국내 하수처리장의 현실에 맞는 소용량의 소각시스템의 개발이 필요하다[4,5,6].

소형 소각로는 설치, 이동과 철거가 용이하고 설치비용과 유지관리비용이 싸며 사용상 간편한 장점이 있지만, 연소과정에서의 온도, 배출가스의 온도 및 가스량이 쉽게 변한다. 또한, 연소실이 대형 소각로에 비하여 훨씬 작기 때문에 온도 저하와 국부적인 산소 부족 등으로 완전 연소가 쉽게 이루어지지 않아 매연이 발생하는 경향이 있다. 그리고 연소실이 소형이며, 제작비의 문제로 현재 국내에서 생산되고 있는 소형 소각로는 화격자가 없는 연소실을 그대로 사용하거나 화격자를 설치하더라도 고정식 화격자를 사용하기 때문에 불완전 연소로 인한 매연 및 유해가스의 발생이 더욱 심각하다고 할 수 있다[7].

하수종말처리장에서 발생하는 슬러지는 수분 함유량이 매우 높아(수분 75~80%), 폐열을 이용한 건조의 전처리 과정을 거치면 효율적인 소각이 가능하며, 운전비용을 절감할 수 있기 때문에 적절한 건조기의 선택이 필요하다. 소각 폐열을 이용한 슬러지 건조기로서 전제되어야 할 성능은 건조효율을 높임으로서 폐열의 이용을 극대화할 수 있는 구조로 되어야 하며, 건조과정 중에서 유기물이 증발되어 연료화로 될 수 있는 탄화수소의 배출을 최대한 억제하여야 한다. 이를 위해서는 수분의 증발을 극대화하면서 슬러지의 건조기내 체류시간을 가능한 억제할 수 있는 특성이 있어야 한다. 일반적으로 슬러지 열 건조기는 킬른형 건조기, 원반 건조기, 기류 건조기 등이 있으며, 회전 킬른형 방식이 대용량에 적합하여 많이 사용되고 있으나, 수분 함유량이 많은 슬러지 경우 건조실 내부에 부착되는 영김현상 등 여러 문제점을 가지고 있다[8,9,10].

본 연구에서는 소용량 소각처리에 비교적 효율적인 하수 슬러지 처리를 위하여 사이클론 방식의 열 건조 시스템이 포함된 소용량 소각 사이클론 시스템을 개발하였으며, 소각시스템의 주요 구성품인 소각기, 건조기의 개발을 위하여 계산과 실험을 병행하여 보완하는 방식을 취했다. 그리고 기타 건조슬러지의 포집기, 후처리기와 슬러지 공급기 등은 기존에 개발된 유사부품의 설계인자를 조사하여 적용하였다. 슬러지 수분 정도, 슬러지 투입량, 보조 연료량, 연소 공기량 등의 사용조건 변화에 따른 소

각 시스템의 압력 변화, 온도 변화 배출가스 성분 등의 성능실험을 수행하였으며 성능실험을 통하여 개발된 소각시스템의 연소 특성을 분석하였다. 친환경적인 소형 소각 시스템을 개발하는데 유용한 기초 설계 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 소각 시스템

### 2.1 연소 재료

소각기를 설계하기 위하여 먼저 소각기의 열정산을 수행하여야 하며, 이를 위하여 소각 대상인 슬러지의 열량 및 보조 연료의 열량을 계산하여야 한다. 열 및 물질수지 분석을 위해서는 슬러지 소형분의 정확한 원소조성을 근거로 하는 것이 열 및 물질 수지분석의 정확도를 높일 수 있는 방법이며 일정한 성상의 슬러지에 대해 열 및 물질 수지분석과 에너지 회수 계산을 위한 연구들은 많이 수행되어 왔다[11, 12]. 그러나 국내 슬러지 발열량이 1,000 ~ 6,000(kcal/kg-건조 고형분)임을 감안하면 이에 대한 모든 원소 조성을 구한다는 것은 매우 힘들다. 본 연구에서는 슬러지의 함수율과 발열량만을 활용하여 적용 가능한 소각시스템을 예측하고자 하였다. 이는 다양한 슬러지 성상에 따라 적용 가능성이 큰 소각 시스템을 쉽게 구해낼 수 있는 방식이다. 따라서 발열량을 근거로 이론 공기량 및 이론 가스량을 구하는 기존의 방법들은 연료를 기준으로 작성되어 있고 저위발열량을 기준으로 한 관례로 슬러지 고형분에 그대로 적용하기는 곤란하다.

이를 해결하기 위해 국내 슬러지 성상 및 성분을 기준으로 슬러지 고형분의 단위 중량 소각 시 이론 공기량과 연소 가스량을 산출하였다.

본 연구에서는 국내 하수종말처리장 등에서 발생하는 슬러지의 평균 물성치[13]를 기준으로 소각시스템을 설계하였다. 건조기에서 수분량이 5%로 감소하는 것을 설계 기준으로 하면 소각기로 유입되는 원소분석 값은 표 1과 같이 된다. 위의 성분을 바탕으로 Dulong[14]의 식을 이용하여 구한 저위 발열량은 1961kcal/kg이며, 이를 근거로 소각기의 열정산(heat balance)을 구한 결과는 표 2와 같다.

표 1. 슬러지의 성분(wt.%)

C	H	O	N	S	Cl	재	수분
0.176	0.033	0.16	0.032	0.016	0	0.53.4	0.05

표 2. 열입력과 열출력의 계산 결과

입력(kcal/hr)		출력(kcal/hr)	
슬러지 현열	40,870	건배기가스량(슬러지)	30,428
		습배기가스량(슬러지수분)	3,223
		건배기가스량(보조연료)	32,894
보조연료 공급열	50,000	습배기가스량(보조연료수분)	2,253
		소각재 방출열	3,898
		기타	18,174
합계	90,870	합계	90,870

### 2.2 슬러지 소각시스템

사이클론 방식의 소각기는 화염이 매우 안정적이고, 전환효율이 높아 수년 전부터 연소과정에 이용되어 왔을 뿐만 아니라, 높은 연소강도 때문에 폐수슬러지, 회분함량이 많은 석탄, 저발열량 가스, 황 함유량이 많은 오일과 같은 낮은 등급의 연료의 소각에 매우 효과적인 소각기로 입증되었다. 사이클론 소각기는 원심력의 원리로 불연성 물질 등은 연소실 하부의 배출구로 방출되는 구조로 유동매체를 사용하지 않으며, 설치 면적이 적고 기계적 구동부가 없기 때문에 장치가 간단하고 설치비가 저렴한 이점을 가지고 있다. 또한 대부분의 슬러지는 회분을 많이 포함하고 있기 때문에 소각 시 후처리의 부하가 증대될 우려가 있지만 사이클론 소각기는 소각기 자체가 집진기 역할을 하므로 집진기의 부하를 최소한으로 할 수 있는 특징이 있다.

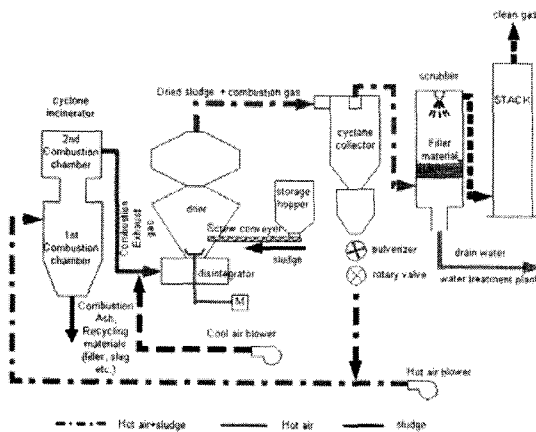


그림 1. 슬러지 소각 시스템의 공정 흐름도

제안된 소각 시스템은 그림 1과 같이 크게 건조기와 소각기로 분리 구성되어 있다. 소각기에서 배출된 고온의

연소가스는 외부공기와 혼합되어 적정 온도와 적정 풍량으로 공급되어 수분 함유량이 높은 슬러지의 건조에 이용된다. 탈수 케이크 형태로 된 슬러지는 스크루 컨베이어를 통하여 건조기에 투입되며, 건조된 슬러지는 포집기에 의하여 열풍과 건조물이 분리된다. 건조 슬러지는 연소용 공기와 함께 소각기에 공급되는 구조로 되어 있다.

건조실에 투입된 수분 함유량이 높은 슬러지(수분 70~80%)는 고속으로 회전하는 분쇄기에 의하여 미립화되어 표면적이 증대되어 수분의 증발시간을 최소화 할 수 있게 하였다. 사이클론 포집기에서 포집된 건조 슬러지는 연소용 공기와 함께 사이클론 소각기에 공급되게 하였다.

소각기에서는 점선방향으로 공급된 연소용 공기와 건조 슬러지가 선회하면서 소각이 이루어지게 하였다. 1차 연소실에서 발생될 수 있는 미연 가스는 2차 연소실에서 일정시간 체류하게 하여 완전 연소가 이루어지게 하였다.

건조기에서 건조된 슬러지는 포집기에 의하여 가스로부터 분리되며, 가스는 세정장치를 통하여 stack으로 방출된다. 따라서 건조된 슬러지의 포집율이 나빠지게 되면 대기오염의 원인 및 후처리 장치의 부하가 증대될 뿐 아니라 건조 슬러지의 연료로서의 효율적 이용이 어려워지기 때문에 건조 슬러지의 포집율을 높이는 것이 필요하다. 본 연구에서 사용된 포집기는 응축의 우려가 적은 사이클론 포집기를 사용하였다. 악취 제거 및 제진을 위하여 소각 시스템에서의 후처리 장치는 Packing Tower를 이용하였다.

앞의 열 정산을 근거로 설계 제작된 소각시스템의 주요 제원을 표 3에 나타내었다.

표 3. 슬러지 소각 시스템의 제원

구분	치수	
소각기	용량	100kg/hr
	직경	487.61721.9mm
	1차 연소실 체적	0.182m <sup>3</sup> (487.6mm×974.2mm)
	2차 연소실 체적	0.0941m <sup>3</sup> (487.6mm×504mm)
	입구 직경	55mm
	열부하 버너	500,000kcal/ m <sup>3</sup> hr 경유용 버너
건조기	입구 직경	192mm
	1차 건조기 체적	0.11 m <sup>3</sup> m(644890mm)
	2차 건조기 출구 직경	91mm
	건조기 출구 유속 열용량	20m/s 1000kg m <sup>3</sup> /hr
포집기	형식	Conventional cyclone
	내부 직경	400mm
	길이	1.6m

### 3. 계측장치의 구성

소각실험에 사용된 탈수 슬러지는 아산 하수종말처리장에서 발생된 것이며, 소각 용량은 100kg/hr을 기준으로 성능실험을 하였다. 시스템의 특성 및 최적운전 조건을 도출하기 위하여 연소용 공기량, 보조 연료량, 건조에 사용되는 열풍온도 등을 변수로 하여 가스 분석, 소각기 내부 온도와 각 배관의 압력 손실을 측정하였다.

본 연구에서 제안한 시스템은 열용량이 비교적 커서 초기 점화 시부터 안정적 운전 상태에 도달하기까지 운전특성이 많이 변하기 때문에 실험상의 오차가 생길 수 있다. 따라서 본 성능 실험에서는 초기 점화부터 안정조건에 도달할 때까지 충분한 시간을 둔 후 계측을 수행하였다.

성능 실험을 위하여 다음 그림 2와 같이 온도센서, 압력센서 그리고 유량 센서를 구성하였다. 시스템의 열정산 등을 위한 각 부품의 온도를 측정하기 위하여 소각기내에는 R-type 열전대, 건조기의 입구는 K-type, 건조기 출구와 사이클론 포집기에는 T-type 열전대를 각각 사용하였다. 소각기 내부의 온도를 측정하기 위하여 측 방향으로 10cm 간격으로 설치되어 있는 측정구로부터 R-type 열전대를 이동시켜 가면서 측정하였다. 부품 및 배관의 압력 손실 및 공급 공기유량의 측정과 건조기내의 건조물 측정에 의한 이상 현상을 감시하기 위하여 각 위치에 차압센서를 설치하였다. 차압센서와 온도센서로부터의 신호는 모두 컴퓨터에서 모니터링 할 수 있게 하였다.

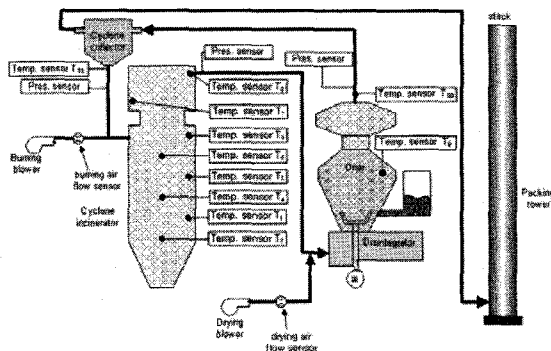


그림 2. 소각-건조 시스템의 개략도 및 센서의 배치

보조연료로 사용하는 경유의 유량을 예상하기 위하여 공급 압력 변화에 따른 유량의 변화를 측정하였으며, 공기유량은 차압방식의 하나인 벤투리계를 사용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 소각 시스템의 차압 실험

본 연구에서 제안한 소각 시스템은 부가적인 기계적 이송장치 없이 공기나 가스의 유동에 의하여 슬러지가 이송되기 때문에 배관 및 각 부품의 압력손실에 대한 정보는 시스템의 운용상 반드시 필요하다. 특히 본 시스템에서 선택한 기류식 건조기는 고속의 열풍에 의하여 건조된 슬러지가 배출되는 구조로써 열풍유속이 감소되면 슬러지가 건조기 하부에 축적되고 건조기 후방에 있는 포집기의 포집 효율이 저하하게 된다. 그러나 열풍유속을 증가시키기 위해서 건조기 출구 배관의 직경을 크게 하면 압력손실이 커지게 된다. 따라서 적절한 구경의 배관 선정은 시스템의 운용상 중요하다.

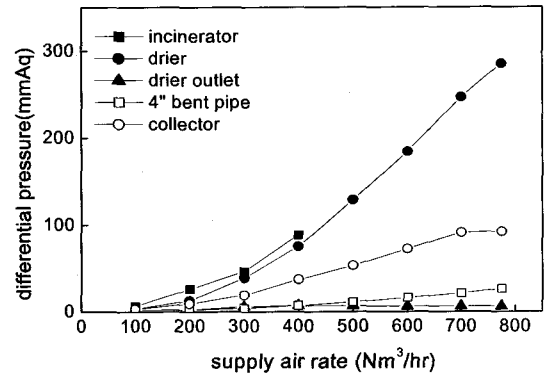


그림 3. 소각 시스템의 측정 위치에 따른 압력손실

그림 3은 슬러지의 공급 없이 보조연료만을 연소시키는 경우의 공급하는 공기량의 변화에 따른 소각 시스템의 각각의 위치에 있어서의 압력 손실을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 제안된 소각 시스템의 여러 부품들 중 건조기 본체에서 가장 큰 압력의 차이가 나타나고 있다. 이것은 미립화기(disintegrator) 틈새로부터 공기가 분출되는 방식인 기류식 건조기의 특징으로 지속적인 보완이 필요하다고 생각된다. 온도를 보정하면 100kg/hr 용량의 슬러지를 정상적으로 소각하는 경우에 공급 공기량을 최대 1000m<sup>3</sup>/hr 정도일 것으로 가정하여도 시스템 전체의 압력손실은 약 700mmAq 미만일 것으로 예측할 수 있으므로 송풍기에 의한 동력은 다른 소각기에 비하여 크지 않음을 알 수 있다.

그림 4는 수분 함유량이 81.6%인 슬러지의 공급량을 93kg/hr로 하고, 연소 공기량 345Nm<sup>3</sup>/hr, 보조 연료량 8.23ℓ /hr으로 하였을 경우에 있어서 건조 공기량 변화에 따른 시스템의 각 위치에서 측정된 압력 차이를 나타낸

것이다. 앞에서 살펴 본 비연소의 상태와 마찬가지로 건조 공기량이 증가함에 따라 각 위치에 있어서의 압력 차이가 점차적으로 크게 나타나고 있다. 그러나 슬러지의 연소에 따른 압력증가로 인하여 각 부품에서의 압력차이가 크게 나타나고 있다. 그리고 포집기에서 나타나는 압력손실은 예열할 때는 정압이었다가 슬러지 투입 후에는 음의 압력이 나타나고 있는데 이는 슬러지의 수분이 연소하면서 물로 응축되면서 압력이 발생되기 때문인 것으로 생각된다.

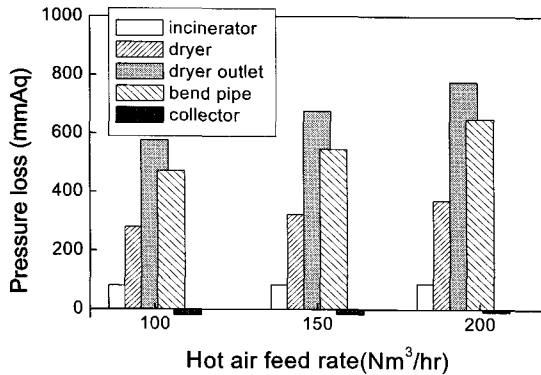


그림 4. 수분함유량 81.6%의 슬러지(96kg/hr)를 연소하는 경우 연소 공기량에 따른 압력 손실

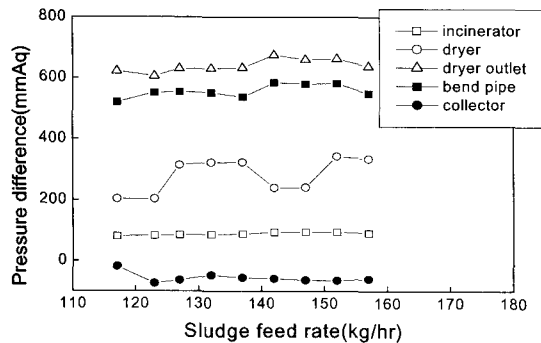


그림 5. 슬러지 공급량에 따른 소각 시스템의 압력 손실 (82.5% 슬러지 수분 함유량)

그림 5는 슬러지 공급량에 따른 시스템 각 위치에서의 압력 차이를 나타낸 것이다. 슬러지 공급량은 117kg/hr에서 157kg/hr까지 서서히 증가시켰으며, 연소공기량 360Nm³/hr, 보조 연료량 9.114 l/hr, 건조공기량 140Nm³/hr으로 소각-건조 조건을 동일하게 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 슬러지 투입량 증가에 따른 소각기에서의 압력 차이는 거의 나타나지 않고 있으나 건조기에서는 압력 차이의 변화가 크게 나타나고 있다. 이는 소각기 내부에서의 연소 과정에 의한 압력 변동인 것으로

생각되며 슬러지 투입량에 따른 보조 연료량과 건조 공기량 등 연소와 연관된 인자들에 대한 검토가 필요하다 고 생각된다. 앞에서의 경우에 마찬가지로 포집기에서는 음의 압력이 나타나고 있어 공급하는 슬러지의 수분함유량이 높은 경우에 있어서 슬러지 공급량, 연소 공기량, 건조 공기량에 대한 검토가 반드시 있어야 할 것으로 생각 된다.

## 4.2 온도특성

### 4.2.1 소각 시스템의 온도

그림 6은 연소용 공기량을 250 Nm³/hr, 열풍온도를 조절하기 위한 건조용 공기량을 150Nm³/hr, 보조연료를 4.01l/hr로 일정하게 유지한 상태에서 수분 함유량이 다른 슬러지를 소각하는 경우 소각 시스템의 각각의 위치에서의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 그림에 나타난 바와 같이 수분 함유량이 72%인 경우 슬러지의 공급량이 증가될수록 소각로 중심부분에서 온도가 상승하는 것을 알 수 있는데 이는 슬러지 공급량이 적은 경우에는 연소 영역이 벽면 근처에 존재하지만 공급량이 많아질수록 연소 영역이 확대되기 때문인 것으로 생각된다. 또한 슬러지가 공급되는 부분(Ts)은 온도가 급격히 낮아지는 것을 알 수 있는데, 이는 슬러지가 충분히 연소되지 않고 있기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 건조기 내로의 슬러지 공급량이 증가할수록 사이클론 집진기의 온도가 낮아지는데, 이것은 증발 잠열의 손실 증대에 의한 열풍 온도의 저하로 생각된다. 슬러지 공급량이 120kg/hr 이상이 되면 집진기의 온도가 수분의 응축온도에 접근함을 알 수 있다. 위 결과로부터 소각시스템은 슬러지 100kg당 보조 연료의 양은 3.3l/hr정도이면 소각기 내부 온도가 900C정도로 유지될 수 있고, 집진기의 온도가 수분의 응축온도 이상으로 되어 충분히 정상적인 소각이 가능할 것으로 예상된다. 그림 6(b)는 수분함유량이 86.1%로 높은 슬러지를 소각하였을 경우의 소각시스템의 온도 변화를 나타낸다. 이 경우의 보조 연료의 양은 슬러지의 수분 함유량이 높은 관계로 정상적인 소각이 이루어질 수 있도록 5.21l/hr로 하였다. 수분 함유량이 높은 경우, 슬러지 공급량이 증가할수록 건조기 출구의 온도가 급격히 저하되는 것을 알 수 있는데, 이것은 슬러지의 수분 함유량이 높아 증발 잠열량이 많아지고 또한 상대적으로 건조된 슬러지의 고형분이 적기 때문에 소각기로부터 발생하는 열량이 적기 때문으로 생각된다. 수분 86.1%의 슬러지 100kg을 소각하는 경우 보조연료의 양은 4.7l/hr정도가 소비될 것으로 예측된다. 따라서 알려진 바와 같이 소각 대상 하수 슬러지의 수분을 가능한 낮추어 공급

하면 보조 연료량이 적게 소비될 것으로 생각된다.

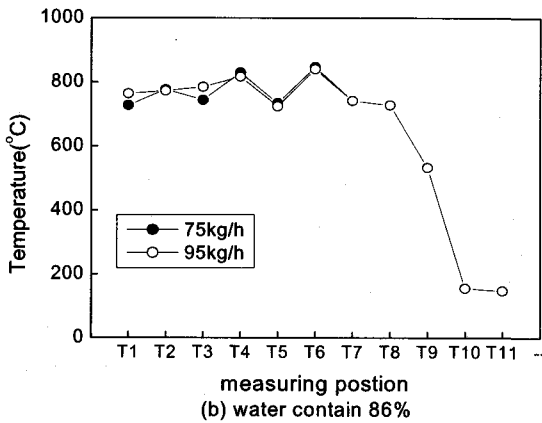
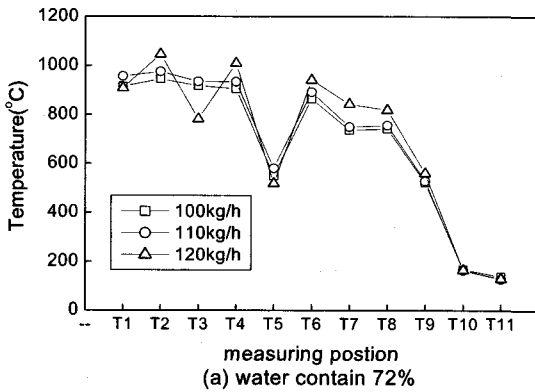


그림 6. 슬러지 공급량의 변화에 따른 소각 시스템의 온도 분포

그림 7은 수분 함유율이 72%인 슬러지를 보조 연료량의 공급량을 변화시켜 연소한 소각한 경우의 소각시스템의 온도분포이다. 슬러지의 공급량은 100kg/hr, 연소공기량은 250Nm<sup>3</sup>/hr으로 일정하게 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 보조 연료의 공급량의 변화에 따른 온도 분포의 변화는 특정한 경향을 나타내지 않고 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 실험에 사용된 슬러지의 경우 비교적 수분의 함유율이 적기 때문에 저위 발열량이 높아 보조연료량의 변화가 소각기 내부의 온도 분포에 직접적인 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 일차 연소실의 출구부분(T<sub>3</sub>)의 온도에 많은 영향을 미칠 수 있는데 온도의 차이는 위에서 언급한 연료가 많으면 반응영역이 연소실 중심부로 확대되기 때문으로 예상된다.

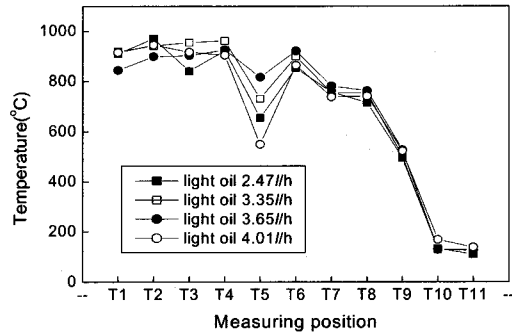


그림 7. 보조 연료량의 변화에 따른 소각 시스템의 온도 분포

#### 4.2.2 소각기 내부의 온도

그림 8은 경유만을 연소하는 경우에 있어 연소용 공기량의 변화에 따른 소각기 내부의 온도 변화 분포를 확인하기 위해 나타낸 그림이다. 앞에서 확인한 바와 같이 공기량이 증가할수록 소각기 내부의 온도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 연소용 공기량의 변화에 대한 온도 변화보다는 보조 연료 공급용 노즐이 있는 소각기의 윗부분에서의 온도 증가가 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 연료와 공기의 스월에 의해 강렬한 화염이 발생하기 때문인 것으로 예측할 수 있으며, 이는 육안으로 확인할 수 있다. 따라서 연소용 공기량의 변화보다는 소각기 내부의 노즐의 위치가 더욱 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 경향은 연소용 공기량의 공급량이 적을수록 더욱 확연히 나타난다.

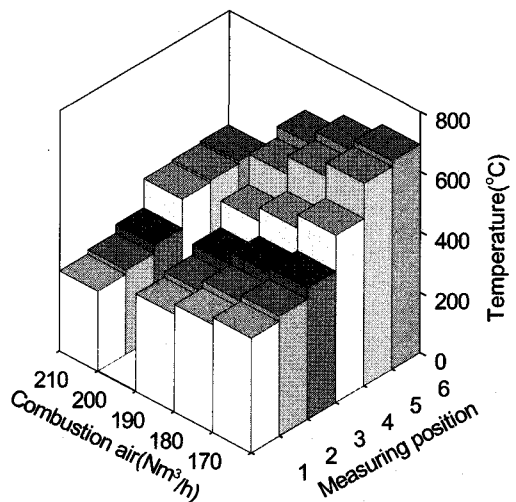


그림 8. 연소 공기량 변화에 따른 소각기 중심에서의 온도 분포(경유연소)

그림 9는 슬러지와 경유를 혼합하여 연소 시키는 경우에 있어서 공급하는 공기량에 따른 소각기 중심부에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 경유만을 연소하는 경우와는 다르게 중심부에서는 공급하는 공기량에 따른 온도분포의 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 이는 슬러지의 연소에 의한 발열량의 증가로 인하여 온도 상승이 공기 공급량에 의한 온도 차이를 초과하기 때문이다. 그림에 나타난 바와 같이 하부로 갈수록 온도가 높게 나타나고 있는데, 이는 미처 연소되지 않은 슬러지의 입자들이 유동하면서 자중에 의해 소각기의 내부로 가라앉아 밀집된 상태에서 늦게 연소하기 때문인 것으로 생각된다.

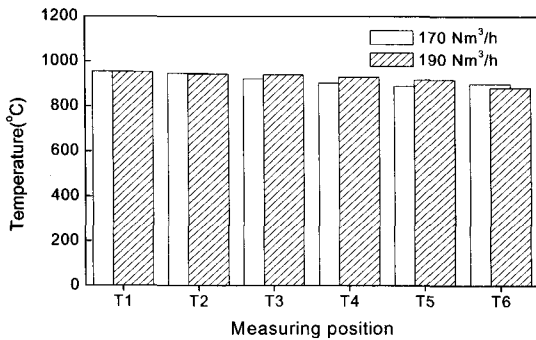


그림 9. 연소 공기량 변화에 따른 소각기 중심부의 온도 분포(슬러지(100kg/hr+경유(4.731ℓ /hr))

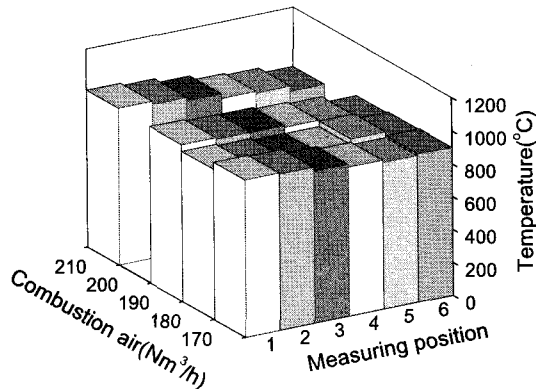


그림 10. 공기량의 변화에 따른 소각기 중심에서의 온도 변화(슬러지+경유)

그림 10은 슬러지와 경유를 혼합 연소하는 경우 공급하는 공기량의 변화에 따른 소각기 중심에서의 온도변화를 나타낸 것이다. 경유만을 연소하는 경우와는 달리 공급하는 공기량이 증가할수록 온도는 높게 나타나고 있으며, 소각기의 하부의 온도분포가 상부의 온도보다 높게 나타나고 있다. 슬러지의 혼합 연소 시 경유만을 연소시킬

때보다 소각기 내부가 200℃ 이상 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 슬러지 혼합 연소 시에도 소각기 내부 온도가 1000℃ 이상이 되는 부분이 적은 것으로 미루어 연소에 의한 NOx의 발생은 거의 없을 것으로 예상된다. 그리고 국부적인 저온부와 국부적인 고온부가 발견되지 않은 것으로 미루어 비교적 소각 효율은 높을 것으로 생각된다.

### 4.3 과잉공기비에 대한 배기 가스

그림 11은 소각기에서 최적 연소용 공기량 조건을 도출하기 위하여 과잉 공기비에 대한 CO, NOx 발생 결과이다. 이 경우 공급하는 슬러지의 수분 함유량은 82.4%이며, 연소 공기량은 360Nm<sup>3</sup>/hr, 건조 공기량은 140Nm<sup>3</sup>/hr으로 일정하게 유지하였고, 보조 연료는 9.114 ℓ/hr로 일정하게 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 연소가 집중적으로 이루어지는 소각기에서는 높은 과잉공기비를 나타내며 CO의 농도도 낮게 나타나고 있어 배기 가스를 측정하기 위하여 정한 실험 조건에서는 원활한 연소가 이루어지는 것으로 예측할 수 있다. 또한 건조기 출구에서 측정된 배기가스도 소각기의 경우보다는 약간 높은 CO의 분포를 나타내고 있으나 NOx의 농도는 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 건조하기 위해 공급한 열풍에 의해 건조기 내의 슬러지와외의 반응에 의해 농도가 증가한 것으로 생각된다.

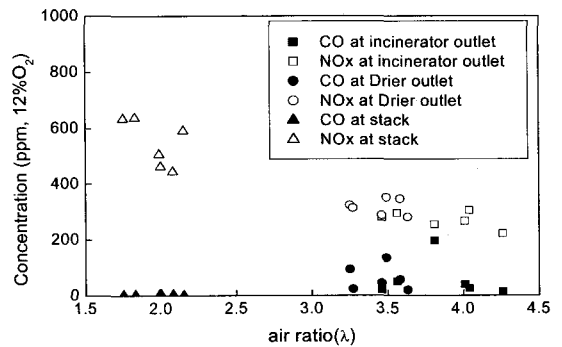


그림 11. 과잉 공기비에 따른 배기 가스 성분

소각과 건조 과정을 거치고 대기 중으로 배출되는 굴뚝에서의 공기 과잉률은 매우 낮게 나타나며 이때의 CO의 농도도 매우 낮게 나타나 제안된 소각 시스템의 원활한 소각을 예측할 수 있다. 그러나 NOx의 경우 환경기준치인 200ppm을 넘게 나타나고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 소각기 내부의 온도가 1000℃ 미만으로 유지되기 때문에 측정된 대부분의 NOx는 연소과정에 발생된 열적인 NOx 보다는 슬러지 중에 포함된 N 성분의 산화에 의

하여 발생하는 연료적 NO<sub>x</sub>인 것으로 예측할 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 연료에 의해 발생하는 연료적 NO<sub>x</sub>는 과잉 공기비에 비례하여 증가하기 때문에 가능한 낮은 공기비에서 연소가 이루어지도록 연소 조건을 결정할 필요가 있다.

#### 4.4 소각재 성분

성능 실험에서 배출된 소각재를 한국환경수도연구소에 성분 의뢰한 결과, 소각재 속에는 유기물이 전혀 검출되지 않았으며, 이로부터 소각기에서 완전 연소가 이루어진 것으로 예상된다. 기타 인체에 유해한 중금속은 전혀 없었으며 구리만 규정치 이하로 발생되었다. 따라서 하수종말처리장의 하수슬러지는 도로포장재, 매립지의 복토재, 농지 개량재 등으로 충분히 재활용이 가능할 것으로 생각된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 수분함유량이 높은 100kg/hr급 슬러지 소각기를 개발하기 위하여 국내에서 발생하는 탈수케이크의 물성치를 바탕으로 소각시스템을 설계, 제작하였고, 슬러지의 각 조건에 대하여 소각 성능실험을 하였다. 본 소각시스템은 특성상 가스나 공기에 의하여 슬러지가 운송되는 구조로 되어 있어 기계적 동력비가 절감되는 반면에 송풍기의 압력 손실 등이 우려되기 때문에 시스템 전체에 대한 차압실험을 별도로 수행하였다. 수분 80%의 하수 슬러지의 경우 소각 시 보조연료량은 100kg 소각 시 4ℓ 정도의 연료량이 필요하며 건조기에서 배출되는 100℃ 미만의 열풍에너지를 슬러지 호퍼나 컨베이어 등에 공급하면 보조연료의 사용량을 더 낮출 수 있을 것으로 생각된다. 본 소각시스템은 정상 운전 시 전체시스템의 압력 손실은 700mmAq로 비교적 적으며 따라서 송풍기용 동력비는 높지 않을 것으로 생각된다. 약간의 높은 NO<sub>x</sub>의 분포가 나타나지만, 대부분의 NO<sub>x</sub>는 연소과정에 발생된 열적인 NO<sub>x</sub> 보다는 슬러지 중에 포함된 N 성분의 산화에 의하여 발생하는 연료적 NO<sub>x</sub>인 것으로 예측된다. 소각된 재의 성분분석 결과에서 유해한 성분이 검출되지 않아, 소각재는 도로포장재, 매립지의 복토재, 농지 개량재 등으로 충분히 재활용이 가능할 것으로 생각된다. 본 연구를 통하여 확보한 설계인자를 활용하여 소형의 소각시스템을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

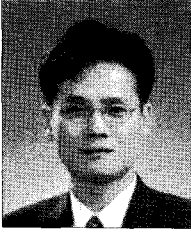
### 참고문헌

- [1] 배 재근, "2003년도 슬러지처리 현황 및 정책적 제언", www.biocycle.org, No.31, 2004
- [2] Jun, H. B., Kim, Y. H. and Kim, R., "Sludge Minimization by Using Dewater and Thermal Treatment in the Water Treatment Plant", J. of Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol.2, No.1, pp. 87-98, 1994
- [3] 전 영남, 김 시옥, 백 원석, "바이오 가스 소각용 저공해 사이클론 소각기 개발을 위한 수치 해석적 연구", 한국대기환경학회지, 제8권, 제5호, pp.401-410, 2002
- [4] 정병길, 고현웅, 박광현, 김대용, 박재홍, 하상안, "하수슬러지 소각을 위한 Microwave 건조에 관한 연구", 한국폐기물학회 추계학술연구회발표논문집, pp. 267-273, 2005
- [5] 정홍렬, "하수슬러지의 건조/소각 기술 및 운용사례", 한국폐기물학회, 심포지움, 제2권, pp.133-176, 2004
- [6] 박주식, 김성완, 최상일, "하수 슬러지 용융 소각", 한국폐기물학회, 춘계학술연구회발표논문집, pp.369-372, 2002
- [7] 한돈희, 하대성, "연소효율이 우수한 소형 소각로의 개발", 한국환경보건학회지, 제26권, 제3호, pp. 81-85, 2000
- [8] 황진우, 배재근, 고현백, 고병산, "하수슬러지성상에 따른 건조-소각을 위한 슬러지 성분분석 연구", 한국 폐기물학회지, Vol. 19, No. 3, pp.283-291, 2002
- [9] Hwang, J., Lee, K. B., Kang, W. B. and Shin, C. S., "Heat treatment: a study on the dry condition analysis of sewage sludge", *Proceedings of Korea Solid Wastes Engineering Society*, pp. 366-369, 2005
- [10] 김상수, 김용진, "고효율 슬러지 처리기술, 슬러지 열 건조 시스템의 개발", 한국기계연구원, pp.1-3, 1997.
- [11] 원양수, 이철희, 최성필, "하수슬러지 성분 및 소각 특성에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 제 14권, 제 1호, pp. 43-53, 1997.
- [12] 김광수, 지재성, "자가연소를 위한 하수처리장 슬러지의 적정 성상", 한국폐기물학회지, 제 13권, 제 5호, pp.671-678, 1996
- [13] Won, Y. S., Lee, C. H., and Choi S. P., "Characteristics of Composition and Incineration of Sewage Sludge", J. of Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol.14, No.1, pp. 43-53, 1997
- [14] Gary L. Borman and Kenneth W. Ragland, "Combustion Engineering", MacGraw Hill, 2005



**박 우 철(Woo-Cheul Park)**

[정회원]



- 1987년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

지능형 구조물 및 시스템 설계 및 정밀 제어, 진동 및 소음 제어, 친환경기계설비

**이 현 창(Hyun-Chang Lee)**

[정회원]



- 1981년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1989년 5월 : Univ. of Maryland 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 5월 : Old Dominion Univ. 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

System ID, 시스템 설계, 진동 및 소음 제어, 구조해석, FEM