

산업 폐기물 소각시설의 입자상 물질 및 중금속의 배출특성

Emission Characteristics of PMs and Heavy Metals from Industrial Hazardous Waste Incinerators

유종익* · 이성준 · 김기현 · 장하나 · 석정희
석광설¹⁾ · 홍지형¹⁾ · 김병화²⁾ · 서용철
연세대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경연구원 대기연구부,
²⁾한국과학기술연구원 지구환경연구센터
(2002년 2월 15일 접수, 2002년 6월 10일 채택)

Jong-ik Yoo*, Sung-Jun Lee, Ki-Heon Kim, Ha-Na Jang, Jung-Hee Seok,
Kwang-Seol Seok¹⁾, Ji-Hyung Hong¹⁾, Byoung-Hwa Kim²⁾ and Yong-Chil Seo
Department of Environmental Engineering, Yonsei University
¹⁾*Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*
²⁾*Global Environment Research Center, KIST*
(Received 15 February 2002; accepted 10 June 2002)

Abstract

The emission characteristics of particulate matters (PMs) and heavy metals from hazardous industrial waste incinerators were investigated. The particle size distribution (PSD) of PM-10 showed different patterns for two types of incinerators; stoker and rotary kiln. However both types showed bimodal form at inlet of air pollution control devices (APCD) and each peak (mode) is located at smaller than 1 μm and near 10 μm . It could explain the growth of fine PM by nucleation/coagulation/condensation of metal vapors for fine mode. The PSD of PM-10 after APCD was also influenced by APCD types that had different collection mechanisms, and both electrostatic precipitator and bag filter showed less collection efficiency for particles ranged from 0.2 to 0.4 μm and led to a mode in the range of 0.2 to 0.8 μm . However the bag filter showed two modes of PSD, while the electrostatic precipitator had one peak. The PMs and heavy metals emission factors, the representative value of emission quantity for sources, for tested facilities were developed. The emission factor of uncontrolled total PM and PM-10 were 14.7 and 7.05 kg/ton waste, respectively. The emission factors from this study were a little bit different with those from US EPA AP-42. It may thus be appropriate to use these results in the course of developing national emission factors.

Key words : Incineration, Industrial waste, Emission, Particle size distribution, Particulate matter, Heavy metals

* Corresponding author
Tel : 033-760-2846, E-mail : jiyoo@dragon.yonsei.ac.kr

1. 서 론

폐기물 소각 처리 시에 발생하는 오염물질 중 입자상 오염물질의 경우 방지시설을 거쳐 제거되지만 PM-10(공기역학적 직경으로 10 μm 미만의 입자)이나 PM-10내에 포함되어 있는 중금속의 경우에는 제거하기 매우 까다롭다. 소각시설을 포함한 연료연소시설에서 배출되는 입자상 물질의 특성을 파악하기 위해서는 우선 배출되는 입자상 물질의 입도분포를 파악해야 하며 이에 대한 적절한 대응방안을 마련하는 것이 필요하다.

입자상 물질의 배출특성에 관해 US EPA와 Linak *et al.*은 입자상 물질의 생성, 중금속의 휘발, 응축에 의한 중금속의 질량입도 분포특성 등에 대한 여러 연구의 결과를 종합적으로 검토하여 1~3 μm 크기 이하의 입자는 휘발/응집/응축의 경로에 의해, 이보다 더 큰 입자는 분말화(fragmentation) 및 입자비말 동반(particle entrainment) 등의 역학적인 경로에 의해 생성되는 것으로 보고하고 있다(Linak, 2000; US EPA, 2000; Linak *et al.*, 2000; Linak and Wendt, 1993).

Barton *et al.* (1990)은 연소공정에서 중금속이 미세 에어로졸 입자화되는 경로에 대해 고찰하고 그 보건학적 유해성에 대해 설명하였고, 모델연구를 통하여 소각공정에서 각종 중금속의 분배 및 배출농도를 예측하고 여러 형식의 소각공정의 경험적인 자료들과 비교하였다. Fournier and Waterland (1991)는 로터리 킬른 소각로에서 유해중금속의 거동특성을, Eddings and Lighty (1992)와 Rizeq *et al.* (1992)은 고체폐기물 소각과정에서 중금속의 거동에 대한 기초연구를 수행하였다. 또 1990년대 초부터 실제 소각로나 용융로에서 각종 유해중금속의 고온 휘발성 및 분포특성에 대한 실험을 수행하고 그 결과에 대해 고찰하였다(Barton *et al.*, 1994; Eddings *et al.*, 1994; Yeast *et al.*, 1994; Barton and Lighty, 1993). 한편으로는 실제 공정에서의 분포특성에 대한 이론적 모델연구도 병행해서 진행되어 왔는데, Rizeq *et al.* (1992)은 이론적 모델계산에 의해 유해폐기물 소각 공정에서 중금속배출을 계산하고 실제 소각로에서의 결과와 비교하였다.

우리나라의 경우, 이동 배출원에서 배출되는 입자

상 물질에 관련된 연구는 진행된 바 있으나, 고정 배출원에서 배출되는 입자상 물질의 PM-10 농도 및 비율, 중금속 분배특성, 입도분포, 배기가스 중의 무기물질 함량 등과 같은 입자상 물질의 배출특성과 관련된 변수에 대한 연구는 매우 미비하다. 또한, 최근에는 오염물질의 배출량을 정확히 산정/비교하고 규제하기 위해 각 시설에서 배출되는 대기 오염물질의 양을 예측하고, 배출계수와 같은 일반화된 숫자로 표시하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 배출계수는 배출공정에 있어서 공정의 활동도에 대한 오염물질 배출량을 나타낸 것으로 '오염물 kg/ton 원료 사용량' 또는 '오염물 kg/전기 생산량' 등으로 표현한다. 배출계수를 배출원의 특성별로 일반화하기 위한 연구도 추진되고 있다.

Ohlström *et al.* (2000)은 핀란드의 여러 가지 에너지 생산 공정의 사용 원료에 따른 PM-2.5의 배출량을 측정하고 배출계수를 산정하여 공정별로 비교하였으며, Ortiz de Zárate *et al.* (2000)은 야외에서 농업폐기물을 소각할 때 배출되는 TPM(total particulate matter)와 질소산화물의 배출계수를 현장 측정 및 연소실 실험을 통해 산정하고 발표하였다. Floyd and Anthony (1996)는 20개의 폐기물 에너지 설비에 대해 중금속의 배출계수 범위를 조사하였는데 미국의 EPA가 조사한 설비들의 배출계수와 유사한 것으로 보고하였다.

우리나라의 경우, 이동오염원으로부터 배출되는 오염물질과 고정오염원에서 배출되는 일부 가스상 오염물질의 배출계수는 조사된바 있으나(환경부, 2000; 국립환경연구원, 2000a) 고정오염원에서 배출되는 중금속을 포함한 기타 입자상 물질에 대한 배출계수(국립환경연구원, 2000b, 2002)는 현재 개발 초기 단계이다. 따라서 외국에서 개발된 배출계수 사용하는데 있어서 사전 평가가 필요하며 배출계수 개발에 필요한 방법의 정립이 요구된다.

따라서, 본 연구에서는 폐기물 소각시설에서 배출되는 입자상 물질의 방지시설 전단 및 후단의 입도분포를 파악하고 중금속의 배출특성을 파악하였다. 또한, 국내 아직 개발되어 있지 않은 중금속 및 입자상 물질의 배출계수에 대해 배출계수 개발에 필요한 방법을 정립하였으며 입자상 물질 및 중금속의 배출계수를 제시하였다.

2. 실험방법

2.1 대상시설

본 연구의 대상시설은 중형 사업장 지정폐기물 소각시설 3기로서 대상 소각시설의 개략적인 사항을 표 1에 나타냈다. 대상시설의 선정은 산업폐기물 소각로가 밀집된 지역에서 무작위 선정된 것으로 사업장 지정폐기물을 처리하는 유사한 약 10여기의 중형소각로(소각 용량 1 ton/hr 내외) 중에서 3기를 선정하였다.

대상 폐기물은 공업단지 내에서 발생하는 고체상 지정폐기물로서 세 시설 모두 유사한 조성을 보여 주고 있었으나 정확한 유해물질의 함량을 파악하는 것은 업체의 현장 사정으로 공개가 불가능 하였다. 그러나 다양한 종류의 중금속이 포함되어 있을 것으로 판단되었고, 중금속배출에 관한 결과 및 토의 내용에서도 이를 확인할 수 있었다. 폐기물 투입방식은 세 시설 모두 크레인에 의한 연속 투입방식을 채택하고 있었으며 폐기물의 투입량은 매회 정량하여 표 1의 시설 용량과 같도록 하였다. 세 시설 모두 살수탑(water spray tower)을 감온실로 사용하여 배기가스 후처리 장치에 유입되는 배기가스 온도를 약 250~350°C로 유지시키고 있었다.

Table 1. Identifications, capacities and types of tested incinerators.

ID	Capacity (kg/hr)	Incinerator type	Air pollution control devices
IW-1	1,200	Continuous (stoker)	Cyclone, Scrubber, EP
IW-2	1,024	Continuous (stoker)	Dry Scrubber, Bag filter
IW-3	1,500	Continuous (rotary kiln)	Semi-dry Scrubber, EP

2.2 현장측정

중형 소각로의 TPM 및 PM-10 시료 채취는 소각로가 정상 운전상태에 도달한 후 시작하였으며 시설의 실질적인 대기오염방지시설이 시작되는 감온실 후단을 방지시설 전단으로 간주하여 각각 3회 측정하였다. 굴뚝을 방지시설 후단으로 간주하였으며 방지시설 전단 측정시간이 짧고 상대적으로 방지시설의 후단 측정시간이 길기 때문에 전/후단 동시측정을 위해 후단의 경우에는 1회 측정하였다.

본 연구에 사용된 시험법은 우리나라 대기오염공정시험법 3장 2절 1항에 나타나 있는 먼지채취방법을 따랐다. 등속흡인을 유지하기 위해 spread sheet로 구성된 등속흡인 프로그램으로부터 등속계수 95~105%을 유지하여 시료를 채취하였다. stack sampler는 CAE사의 Isokinetic Metering System을 사용하였다.

PM-10의 배출농도와 배출되는 입자상 물질의 입도분포를 측정하기 위한 다단식 충돌 입도분석기(cascade impactor)로서 EPA에서 제안하는 실험방법에 적합한 Andersen Instruments사의 Mark III particle sizing stack sampler를 사용하였으며 EPA Method 201A (Method 201A-Determination of PM-10 Emissions)을 이용하여 시료를 채취하였다.

2.3 측정 분석 및 중금속 분석

TPM과 cascade impactor로 포집한 시료를 중량하기 위해 0.1 mg까지 측정할 수 있는 chemical balance를 사용하였다.

Mark III Cascade impactor를 이용하여 배출되는 입자상 물질의 입도 분포를 계산하기 위해 WinCIDRS (Win Cyclone Impactor Data Reduction System) Software (WinCIDRS, Ver. 4.0 Operations and Data Analysis System for Internal Particle Sizing Device)를 사용하였다. WinCIDRS는 여러 단계의 실험에서 나타난 결과를 정리하는데 사용되며 EPA 5 series cyclone과 EPA의 PM-10, PM-2.5 cyclone sampler의 자료를 분석하는데 주로 사용된다. 이 program은 기본적으로는 제원을 알고 있는 여러 가지의 Cyclone과 Cascade Impactor에 포집된 입자의 입도 분포를 확인할 수 있고, Impactor와 Cyclone에 대한 제원을 입력하면 그 sampler에 포집된 입도의 크기를 결정할 수 있다.

중금속의 분석을 위해 원통여지와 cascade impactor의 시료를 EPA method 3050B를 이용하여 전처리 한 후에 ICP/MS (Varian, Ultramass 700)를 이용하여 대기환경보전법 배출허용기준에서 규제하고 있는 카드뮴, 납, 크롬, 구리, 니켈, 아연, 비소와 그 외 마그네슘과 망간을 분석하였다. 중금속 분석을 위한 시험법 검출 한계는 각각 카드뮴: 0.536, 납: 1.334, 크롬: 4.237, 구리: 4.119, 니켈: 4.649, 아연: 2.393, 비소: 0.362 µg/L이었다. 중금속 분석 시 검량

선 작성 후 공인시료를 측정하여 검량 확인 (calibration check)을 실시하였고 매 10개 시료를 측정 한 후에 공인시료를 다시 측정하여 기기의 안정성을 주기적으로 검토하였다.

2.4 배출계수의 산정

연소시설에서 배출되는 오염물질의 배출계수는 직접 현장 측정을 통해 그림 1의 절차를 따라 산정할 수 있다. 오염물질의 배출농도는 측정값을 이용하였으며 유량은 평균 유속과 측정지점의 단면적을 이용하였다. 그림 1의 절차를 근거로 다음 식을 이용하여 현장 측정 자료로부터 배출계수를 산정하였다.

$$EF_i = C_i \times A_{duct} \times V_{duct} \times \frac{273}{273 + T_s} \times \frac{10332.2 + P_s}{10332.2} \times \frac{100 - W_g}{100} \div F$$

여기서,

EF_i : emission factor for species i, kg/ton

C_i : concentration of species i at sampling point, kg/m^3

A_{duct} : duct area at sampling point, m^2

V_{duct} : flue gas velocity, m/hr

T_s : temperature at sampling point, K

P_s : static pressure at sampling point (inner pressure), mmH₂O

W_g : moisture content in flue gas, %

F : fuel consumption rate, ton/hr

3. 결과 및 고찰

3.1 TPM 및 PM-10의 배출특성 및 배출계수

소각시설에서 측정된 TPM 및 PM-10의 배출농도를 표 2에 나타냈다. 방지시설을 통과하기 이전 (uncontrolled)에 TPM에 대한 PM-10의 비율은 무게비로 평균 45%을 나타냄으로써 감온실에서 이미 큰 입자가 제거되고 비교적 작은 입자가 많은 양을 차지한 것으로 판단되며, 방지시설 통과 이후 (con-

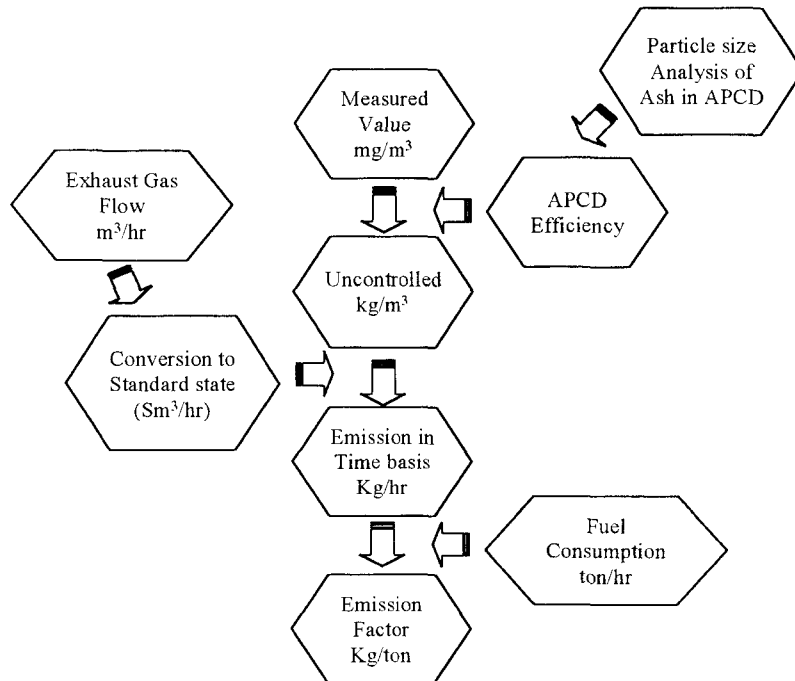


Fig. 1. Procedure of Emission factor Development.

Table 2. TPM and PM-10 concentrations from different sources.

	TPM ¹⁾ (mg/Sm ³)	PM-10 ¹⁾ (mg/Sm ³)	PM-10 /TPM (%)	Emission control	APCD efficiency (%)	
					TPM	PM-10
IW-1	1580.4	942.1	59.6	Uncontrolled	91.8	94.1
	130.3	55.7	42.8	Controlled by cyclone, ST ²⁾ , and EP ³⁾		
IW-2	1901.0	714.8	37.6	Uncontrolled	95.9	98.9
	77.1	7.6	9.9	Controlled by DS ⁴⁾ , BF ⁵⁾		
IW-3	1273.6	483.0	37.9	Uncontrolled	99.0	97.3
	13.2	13.2	100.0	Controlled by SDS ⁶⁾ , EP		

¹⁾ O₂ basis concentration, 12% for incinerators. ²⁾ Spray tower. ³⁾ Electrostatic precipitator. ⁴⁾ Dry scrubber. ⁵⁾ Bag filter. ⁶⁾ Semi dry scrubber.

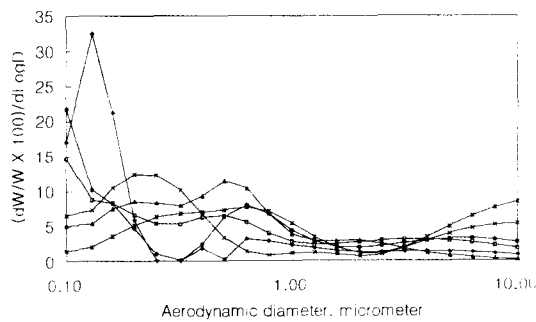


Fig. 2. Particle size distributions of uncontrolled PM-10 from IW-1 and IW-2. (Stoker type incinerator)

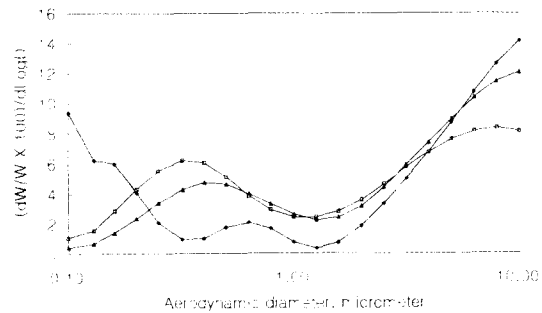


Fig. 3. Particle size distributions of uncontrolled PM-10 from IW-3. (Rotary kiln type incinerator)

trolled) PM-10/TPM은 평균 50.9%로써 집진효율에 따라 매우 다양하게 나타났다. 특히, IW-2의 경우에는 여과집진기의 탈진과정에서 유출된 비교적 큰 입자에 의해 PM-10의 비율이 상대적으로 높은 것으로 나타났으며 입도분포를 통해 확인할 수 있었다. 그러나, 전체적인 집진효율은 양호한 것으로 나타났다.

대상 소각시설에서 배출되는 PM-10의 입도분포를 그림 2-4에 나타냈다. y축 (dW/W × 100)/d logD는 입도 범위 D에서 D-1에 대한 입자의 무게백분율을 나타낸 것으로서 대부분의 입자들은 이봉분포(bimodal) 형태를 나타내고 있다.

IW-1과 IW-2의 stoker식 중형 소각시설에 대해 대기오염방지시설 전단에서 측정된 입자의 크기분포는 시료 채취 위치가 배기가스 온도를 낮추기 위한 감온실 후단으로서 온도범위는 평균 190~225°C였다. 이때, 감온실은 연소실에서 배출되는 가스에 물을 분사하여 냉각시키는 단계로서 분사되는

물의 양이 일정하지 않아 시료 채취 시 온도의 변화가 매우 크게 나타났다. 그림 2에 나타난 바와 같이 입도 분포는 균일하게 나타나지 않았으나 1µm 이상에서 하나의 mode가 나타나고 1µm 이하에서도 하나 또는 그 이상의 mode를 형성하고 있다. 1µm 이하 입자의 분포가 PM-10 전체 입도분포에서 무게비로 평균 약 54%를 차지하고 있다.

이와 비교하여 그림 3에는 소각 처리 용량이 1.5 ton/hr인 kiln식 중형 소각시설에 대해 대기오염방지시설 전단에서 측정된 입자의 크기분포를 나타냈다. 시료 채취 위치는 IW-1, IW-2와 동일하게 감온실 후단으로서 배기가스 온도는 361~373°C이다. 다른 폐기물 소각시설과 비교하여 배기가스 온도가 다소 온도가 높으며 보다 뚜렷한 이봉분포 형태를 나타내고 있다. 즉, 배출가스의 온도가 높을수록 배출되는 입자의 분포는 더욱 뚜렷한 이봉분포 형태를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한, 큰 입자의 비율이 stoker식 소각로 보다 많이 나타났는데 kiln식

소각로는 로 자체가 회전을 하기 때문에 기계적인 작용으로 폐기물내의 회분이 분쇄되어 비산된 것으로 파악된다. 또한, 작은 입자의 비율이 작은 것은 배기가스의 로내 체류시간(3.8초)이 stoker식 소각로(2.1초, 1.4초) 보다 길기 때문에 생성된 작은 입자가 배출되면서 큰 입자의 표면에 부착되기 때문으로 판단된다.

연소환경에서 기계적인 작용과 증속속이나 무기물질이 휘발된 후 핵형성/응축/응집 과정을 거쳐 입자가 성장하는 입자성장이론과 비교하였을 때(Linak and Wendt, 1994; Yang et al., 1994), 시간에 따라 입도의 분포가 작은 입자의 양이 줄어드는 입도 분포 변화를 확인할 수 있었다. 또한 배출시설의

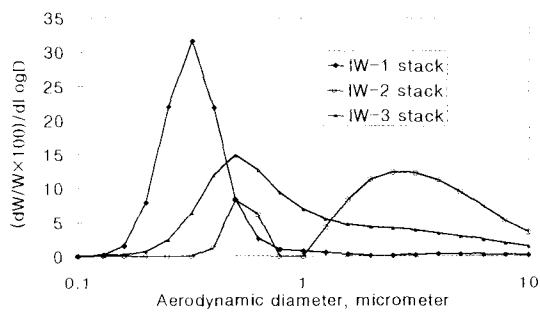


Fig. 4. Particle size distributions of controlled PM-10 from medium size incinerators.

기계적 특성에 따른 입자상 물질의 배출특성을 파악할 수 있었다. 작은 입자의 경우 배기가스가 급격히 냉각되면서 다양하게 응축 및 응집되는 형태를 나타냈지만, 입자가 성장할 수 있는 한계는 1 μ m 이하로 파악되었다.

그림 4에 나타난 바와 같이 방지시설 후단의 입도분포는 전단에서의 형태와는 다르게 나타났다. 방지시설이 전기집진기인 IW-1과 IW-3의 경우 약 0.4~0.8 μ m에서 mode가 나타났으며 여과집진기가 설치된 IW-2의 경우에는 0.4 μ m 부분과 3 μ m 부분에서 각각 mode가 나타났다. 이는 방지시설의 작용 원리에 따른 성능 및 포집 효율이 여과 후 분진의 분포에 영향을 줌을 알 수 있었다. 전기집진기와 여과 집진기의 경우 모두 0.2~0.4 μ m 부분에서 집진 효율이 떨어지는 것으로 보고되고 있는 다른 연구(Bapat, 2001; Kim et al., 2001; Peukert and C. Wadenpohl, 2001)의 결과와도 일치함을 볼 수 있었다. 또한 여과 집진기의 큰 입자 mode는 탈진 시 유출되는 매우 적은 양의 입자가 포함된 것으로 판단된다.

이상에서 살펴보았듯이 입자상 물질의 입경분포는 대부분이 1 μ m 이하와 10 μ m 부근에서 이봉분포를 나타내고 있으며 배기가스의 온도와 방지시설의 형태에 따라 다양한 분포를 나타내고 있었다. 대기 오염 방지시설 전단에서 나타나는 이봉분포에서 작

Table 3. Emission factors for particulate matters from incinerators.

ID	Emission Factor (kg/ton waste)			
	TPM		PM-10	
	Controlled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled
IW-1	7.04E-01	1.04E+01	3.73E-01	6.46E+00
IW-2	7.54E-01	1.68E+01	9.55E-02	7.51E+00
IW-3	1.13E-01	1.69E+01	1.13E-01	7.17E+00
Average above	5.24E-01	1.47E+01	1.94E-01	7.05E+00
50100102 ¹⁾	-	1.72E+01	-	6.35E+00
50200102 ²⁾ /50300102 ³⁾	-	6.80E+00	-	2.59E+00
50100103 ⁴⁾	-	3.63E+01	-	2.00E+01
UK Clinical Waste	-	2.30E+00	-	1.50E+00

¹⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Government, Municipal incineration, Mass burn-Single chamber, Solid waste burned

²⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Commercial/Institutional, Incineration, Single chamber, Solid waste burned

³⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Industrial, Incineration, Single chamber, Solid waste burned

⁴⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Government, Municipal incineration, Refuse derived fuel, Refuse derived fuel burned

은 입자의 mode는 중금속 등의 무기물질이 고온에서 휘발된 후에 응축 및 응집과정을 거쳐 나타나고 큰 입자의 mode는 원료 내에 포함된 회분이 기계적으로 분쇄 (fragmentation)되어 나타나는 것으로 판단된다. 특히 폐기물 소각시설에 대해서는 입자상 물질의 배출에 온도가 큰 영향을 나타내는 것으로 나타났으며 이는 입자상 물질 형성기전 중에 응집과정을 적절히 설명할 수 있는 인자로 판단된다.

중형 소각시설의 입자상 물질 배출계수를 표 3에 나타냈다. 본 연구대상시설과 유사한 외국의 배출계수와 비교하면, TPM에 대한 PM-10의 비율은 65~37%로 다양하게 나타났으며 TPM 및 PM-10

배출계수는 단일 연소실을 가진 도시폐기물 소각시설의 배출계수와 유사하게 나타났다.

3. 2 중금속 배출특성 및 배출계수

중형 폐기물 소각시설에서 배출되는 배기가스 중 중금속 농도를 방지시설 전단에서 측정된 uncontrolled 값과 방지시설 후단에서 측정된 controlled 값을 표 4에 나타냈다. 소각시설에서 배출되는 중금속 종류별 농도는 uncontrolled 값으로 시설별로 다소 차이는 있으나 평균적으로 아연>납>구리>마그네슘>카드뮴>망간>크롬>니켈>비소의 순서대로 나타났다.

Table 4. Emission concentrations of heavy metals from different sources.

	As	Cd*	Cr*	Cu	Ni	Pb*	Zn	Mg	Mn
IW-1	23.7	1869.5	381.3	7741.4	80.0	51937.6	55910.0	1610.5	254.1
IW-2	64.7	2524.5	507.2	13733.7	218.8	70465.6	52150.0	18245.3	991.1
IW-3	165.3	763.4	658.6	15406.9	272.0	20014.5	45638.7	12054.0	628.5
IW-1 stack	2.5	112.9	392.8	841.3	240.5	3066.7	4783.4	40.0	61.1
IW-2 stack	2.3	73.5	370.3	375.0	171.9	1436.1	1955.7	229.8	75.0
IW-3 stack	0.5	24.9	143.9	74.2	41.5	345.9	247.6	77.0	7.1

* Incinerators' emission concentration : O₂ 12% basis for Cd, Cr, and Pb

Table 5. Uncontrolled emission factors for heavy metals from medium incinerators and US EPA databases.

	As	Cd	Cr	Cu	Mg	Mn	Ni	Pb	Zn
IW-1	3.51E-01	1.23E+01	2.52E+00	1.15E+02	2.40E+01	3.78E+00	1.19E+00	3.44E+02	8.32E+02
IW-2	6.40E-01	2.20E+01	4.55E+00	1.33E+02	1.83E+02	1.03E+01	2.20E+00	6.06E+02	5.17E+02
IW-3	2.21E+00	1.04E+01	8.63E+00	2.03E+02	1.59E+02	8.41E+00	3.62E+00	2.67E+02	6.02E+02
Average	1.07E+00	1.49E+01	5.23E+00	1.50E+02	1.22E+02	7.50E+00	2.34E+00	4.06E+02	6.50E+02
50100102 ¹⁾	-	5.26E+00	-	-	-	-	-	8.16E+01	-
50300102 ²⁾	-	3.45E+00	<1.06E-03	<1.16E+00	-	<1.15E+01	-	8.21E-01	-
50100103 ³⁾	2.69E+00	3.97E+00	6.35E+00	-	-	-	1.98E+00	-	-

¹⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Government, Municipal incineration, Mass burn-Single chamber, Solid waste burned

²⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Industrial, Incineration, Single chamber, Solid waste burned

³⁾ Source Classification Code of US EPA : Waste disposal, Solid waste disposal-Government, Municipal incineration, Refuse derived fuel, Refuse derived fuel burned

Table 6. Controlled emission factors for heavy metals from medium incinerators.

	As	Cd	Cr	Cu	Mg	Mn	Ni	Pb	Zn
IW-1	1.80E-02	6.10E-01	2.12E+00	6.01E+00	2.86E-01	4.37E-01	1.72E+00	1.66E+01	3.42E+01
IW-2	3.15E-02	7.19E-01	3.62E+00	5.16E+00	3.16E+00	1.03E+00	2.37E+00	1.41E+01	2.69E+01
IW-3	1.20E-02	2.16E-01	1.25E+00	1.70E+00	1.77E+00	1.62E-01	9.53E-01	3.00E+00	5.69E+00
Avg.	2.05E-02	5.15E-01	2.33E+00	4.29E+00	1.74E+00	5.43E-01	1.68E+00	1.12E+01	2.23E+01

소각시설의 중금속 배출계수를 표 5-6에 나타냈다. 본 연구의 대상인 중형 소각시설의 경우 사업장 지정폐기물과 사업장 일반폐기물을 혼합 처리하고 있으며 표 5에 나타난 바와 같이 특히 납의 경우 외국의 배출계수와 비교하여 본 연구의 배출계수가 약 5~500배 가량의 매우 큰 차이를 보이고 있으며 다른 중금속의 경우에는 비슷한 값을 나타냈다. 표 6에 나타난 바와 같이 controlled 값으로서 산정된 배출계수는 방지시설이 효율에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났으나 납의 경우에는 controlled 값임에도 불구하고 비교적 높은 값을 나타냈다. 따라서, 방지시설을 고려할 때 중금속을 제어하기 위한 방법을 고려해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 유해대기오염물질 배출시설 중 중형 폐기물 소각시설 3기를 선정하여 대기오염 방지시설 전·후단에서 배출되는 입자상 물질을 실측하고 중금속 분석을 실시하여 중형소각로의 입자 및 중금속의 배출계수를 도출하고자 하였으며 각각의 배출특성을 PM-10의 입도분포 및 중금속의 농도로부터 알아 보았다.

연소시설에서 배출되는 PM-10 입자는 모두 이봉분포(bimodal) 형태로서 1 μm 이하, 10 μm 부근에서 각각 mode를 형성하고 있으며 배출가스의 온도가 저하됨에 따라, 가스의 체류시간이 길어짐에 따라 1 μm 이하의 mode는 비율이 적게 나타났다. 이는 온도가 낮아지면서 입자의 운동력이 저하되고 입자 상호간의 응집과 가스상 중금속의 응축, 그리고 기존 입자 표면에 부착 등을 통해 입자가 성장하기 때문이며 가스와 분자충돌의 속도이론으로 설명될 수 있다. 또한 방지시설 후단의 PM-10의 분포는 다른 형태의 방지시설에 대한 집진 원리 및 성능에 영향을 받을 수 있었다. 따라서 모두 0.2~0.4 μm 에서 낮은 효율을 보여 0.4~0.8 μm 범위에서 최고점을 나타내는 대수정규분포를 보였다. 또한 분포도의 mode도 전기집진기는 단일 봉을 보이는 반면 여과집진기는 두개의 봉을 나타냈다.

산업체 발생 지정폐기물 소각로의 먼지 배출계수는 총먼지가 14.7 kg/ton, PM-10이 7.05 kg/ton을 나

타내었고 중금속의 경우는 다양한 값을 보이고 있었다. 전반적으로 미국의 AP-42의 배출계수와 다소 차이를 보이고 있어 우리나라 지정폐기물 중 고형폐기물을 소각하는 시설의 배출계수 개발을 위해 본 연구의 배출계수를 반영하는 것이 타당하나 대표성이 높은 배출계수의 개발을 위해서 추가적인 자료의 확보가 계속되어야 할 것이다

사 사

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업 핵심분야와 국립환경연구원 용역사업에 의하여 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (2000a) 중·소형 연소시설의 질소산화물 배출계수 개발.
- 국립환경연구원 (2000b) 먼 오염배출원의 총먼지 및 PM-10 배출계수 개발(소형 보일러와 소각로를 중심으로).
- 국립환경연구원 (2002) 유해대기오염물질 배출시설의 중금속 배출계수 개발.
- 환경부 (2000) 국립환경연구원, 대기오염물질 배출량(1999).
- Bapat, J.D. (2001), Application of ESP for gas cleaning in cement industry—with reference to India, *Journal of Hazardous Materials*, B81, 285-308.
- Barton, R.G. and J.S. Lighty (1993), Parametric study of vaporization of metal species from solids, *Proc. 1993 Incineration Conf.*, Knoxville, TN, 805-808.
- Barton, R.G., J.S. Lighty, and J.M. Hillary (1994), Interaction of toxic and radioactive metals during thermal treatment of mixed wastes, *Proc. 1994 Incineration Conf.*, Houston, TX, 521-525.
- Barton, R.G., W.D. Clark, and W.R. Seeker (1990) Fate of metals in waste combustor systems, *Combust. Sci. and Tech.*, 74, 327-342.
- Eddings, E.G. and J.S. Lighty (1992) Fundamental studies of metal behavior during solids incineration, *Combust. Sci. and Technol.*, 85, 375-390.
- Eddings, E.G., J.S. Lighty, and J.A. Kozinski (1994), Determination of metal behavior during the incineration of a contaminated montmorillonite clay, *Environ. Sci. Technol.*, 28, 1791-1800.

- Fournier, Jr. D.J. and L.R. Waterland (1991) The Fate of Trace Metals in a Rotary Kiln Incinerator with a Single-Stage Ionizing Wet Scrubber : Volume 1- Technical Results, Report No. EPA/600/2-91/032a. Acurex Corp., Jefferson, AK.
- Hasselriis, F. and A. Licata (1996) Analysis of Heavy Metal Emission Data from Municipal Waste Combustion, *Journal of Hazardous Materials*, 47, 77-102.
- Kim, S.H., H.S. Park, and K.W. Lee (2001) Theoretical model of electrostatic precipitator performance for collecting polydisperse particles, *Journal of Electrostatics*, 50, 177-190.
- Linak, W.P. and J.O.L. Wendt (1993) Toxic Metal Emissions from Incineration: mechanisms and Control, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 19, 145-185.
- Linak, W.P., J.O.L. Wendt (1994) Trace metal transformation mechanisms during coal combustion, *Fuel Processing Technology*, 39, 173-198.
- Linak, W.P. (2000) Metal Partitioning in Combustion Processes, *Environ. Comb. Tech.*, 1, 95-127.
- Linak, W.P., A. Miller, and J.O.L. Wendt (2000) Comparison of Particle Size Distribution and Elemental Partitioning from the Combustion of Pulverized Coal and Residual Fuel Oil, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50, 1532-1544.
- Ohlstrom, M.O., K.E.J. Lehtinen, M. Moisio, and J.K. Jokiniemi (2000) Fine-particle Emissions of Energy Production in Finland, *Atmospheric Environment*, 34, 3701-3711.
- Ortizóde Zárate, I., A. Ezcurra, J.P. Lacaux, and P. Van Dinh (2000) Emission Factor Estimates of Cereal Waste Burning in Spain, *Atmospheric Environment*, 34, 3183-3193.
- Peukert, W. and C. Wadenpohl (2001) Industrial separation of fine particles with difficult dust properties, *Power Technology*, 118, 136-148.
- Rizeq, R.G., W. Clark, and W.R. Seeker (1992) Analysis of toxic metals emissions from waste combustion devices, *Proc. 1992 Incineration Conf.*, Albuquerque, NM, 625-630.
- Yang, H.C., Y.C. Seo, J.H. Kim, H.H. Park, and Y. Kang (1994) Vaporization Characteristics of Heavy Metal Compounds at Elevated Temperatures, *Korean J. of Chem. Eng.*, 11(4), 232-238.
- Yeast, T.F., R.C. Eschenbach, G.D. Pierce, M.B. Arndt, and J. Ginsburg (1994) Volatility studies in a rotating hearth furnace, *American Nuclear Society Meeting*, Washington D.C.