

폐기물 소각시설 배가스에서의 수은 배출특성

이한국[†]

한국생활환경시험연구원 기획전략팀

The Characteristics of Mercury Emission from Municipal Solid Waste (MSW) Incinerator Stack

Han-Kook Lee[†]

Planning and Strategy Department, Korea Environment & Merchandise Testing Institute
(Received Sep. 8, 2004/Accepted Nov. 27, 2004)

ABSTRACT

This study was carried to investigate the emission characteristics of mercury from domestic and industrial MSW (municipal solid waste) incinerator stacks. The mercury concentration levels of flue gas from 32 MSW incinerators stacks selected were above the criteria level ($5 \mu\text{g}/\text{S m}^3$). MSWI facilities exceeding the criteria levels in Korea are due to the poor units comparison of combustion chamber(CC)-cyclone(CY)-stack. So, the mercury from MSW incinerators stack were suspected to contaminate the natural system unless the MSW incinerators were properly controlled. Meanwhile, the relationship between mercury concentration and temperature of flue gas in MSW incinerator stacks were examined at two temperature ranges (Group A : $29.85\sim 327.63^\circ\text{C}$, Group B : $446.9\sim 848.15^\circ\text{C}$). The mercury concentration in flue gas with high temperature range was higher than that of flue gas with low temperature range. This mean that the temperature of flue gas plays an important role in mercury control in MSW incinerator. The emission characteristics of mercury was also evaluated by using the correlation matrix between the mercury and NO_x , PM_{10} , moisture (MO.) at both low temperature and high temperature flue gas ranges. The mercury concentration was mainly affected by NO_x , PM_{10} , moisture (MO.) at low temperature range, while the mercury concentration at high temperature flue gas was mainly affected by NO_x , moisture (MO.). From these results, it was suggested that the temperature of cooling system and the air pollution control device should be properly regulated in order to control mercury of flue gas in MSWI incinerator.

Keywords: municipal solid waste(MSW), incinerator, mercury, flue gas, temperature, correlation coefficient matrix

I. 서 론

최근 우리나라 폐기물 처리방법은 많은 부지를 요하는 매립 지향 주위에서 재활용과 소각으로의 정책전환이 이루어지고 있다. 특히, 재활용에 의한 폐기물처리보다 소각의 역할이 커지고 있는데, 정부의 2차 국가폐기물관리 종합계획에 따르면 2011년에는 소각률 30%까지 계획하고 있으므로¹⁾ 소각에 의한 환경문제점이 커지리라 예상할 수 있다. 현재 국내에서 가동중인 폐기물 소각시설은 2002년 기준으로 총 6,168개 시설로서 생활폐기물 소각시설(1,912개소)은 31.0%이고 사업장

폐기물 소각시설은(4,256개소)은 69%로 생활폐기물 소각시설에 비하여 사업장 폐기물 소각시설의 비율이 크다.²⁾ 점오염원인 소각시설에서 배출되는 환경오염물질로는 굴뚝으로 배출되는 배가스와 소각재(바닥재, 비산재)로 구분할 수 있다. 소각시설 배가스에서 배출되는 환경오염물질로는 SO_x , NO_x , CO, HCl과 같은 전형적인 대기오염물질과 다이옥신(PCDD/DFs) 등이 있으며, Hg, Pb, As와 같은 휘발성이 큰 중금속도 있다. 대체로, 폐기물 소각시 증기상으로 존재하는 수은과 같은 휘발성 중금속은 입상상 물질의 방지시설 설비만으로는 효과적으로 제어할 수 없다고 알려져 있기 때문에 이에 대한 실태 파악 및 대책수립은 시급한 상황이라 할 수 있다.³⁾ 수은은 대기 중에 존재하는 미량 유해물질 중 잔류독성이 크고 장기간에 걸쳐 인간과 동식물에 영향을 주는 대표적인 물질로서 인체 및 생태계에 직·

[†]Corresponding author : Planning and Strategy Department, Korea Environment & Merchandise Testing Institute
Tel: 82-2-2102-2616, Fax: 82-2-866-8626
E-mail : lhkkorea@hanmail.net

간접적인 영향을 미치고, 신경독성 물질로서 생물의 성장장애 및 생물농축을 일으킨다.^{4,5)} 수은의 배출원은 도시 폐기물, 하수슬러지, 산업폐기물 및 병원폐기물 등의 소각로와 석탄화력 발전소 등이 있다. 그 중 도시 지역에서의 가장 큰 수은 배출원으로는 분리배출되는 폐형광 등과 미지의 수은이 포함된 폐기물 소각시설은 중요한 수은 배출원이다.^{6,7)} Kevin C. 등에 의한 소각시설 배가스의 수은 종(species) 특성을 보면,⁸⁾ 석탄연소 시설에서 발생하는 수은은 크게 제 1수은(mercurous, Hg₂⁺²), 제 2수은(mercuric, Hg⁺²), 원자수은(elemental mercury, Hg⁰)의 형태로 배출되며, 주로 HgCl₂(g), HgO(s, g), Hg⁰(g)의 HgSO₄(s) 등으로 구성지을 수 있다. 이러한 수은 종(species)의 구분은 석탄소각시설에서의 수은 배출 종(species)이지만 폐기물 소각시설에서의 수은 종(species)도 석탄연소시설에서 배출되는 수은 종(species)과 유사할 것으로 판단하고 있다.⁹⁾ 한편, 쓰레기 소각시설에서 수은배출의 근원은 투입 폐기물 함유 정도에 지배받으며, 소각시설의 구조형태, 방지시설 설비, 배가스 온도 등에 따라서 환경으로 방출되는 양의 차이도 있게된다.¹⁰⁾ 미국 및 독일과 같은 선진국에서는 폐기물 소각시 방출되는 수은에 대하여 미량 유해물질로 분류하고 있으며, 현재 국내 소각시설에서 배출되는 배가스의 수은 기준치와 비교시 보다 엄격한 규제를 하고 있다. 그러나, 현재 국내 가동중인 폐기물 소각시설에서 배출되는 수은에 대한 배출농도 및 배출량에 대한 자료와 평가는 극히 일부로서 매우 부족하다. 또한, 실제 가동중인 소각시설에서 배출되는 수은의 배출형태를 체계적으로 파악하지 못하고 있는 실정

이다. 더욱이, 환경유해성이 큰 수은과 같은 휘발성중금속에 대한 환경안전을 위한 대책 수립은 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구는 국내 가동중인 생활쓰레기 소각시설과 사업장 폐기물 소각시설에서 배출되는 수은의 배출실태를 조사하였다. 그리고, 배가스 온도에 따른 수은 배출특성 연구를 하였다. 이러한 연구결과는 소각시설에서 배가스 수은 배출 및 제어에 기초적인 자료를 제공할 것으로 판단된다.

II. 실험 방법 및 재료

1. 소각시설의 개요

본 연구에 선정된 총 32개 소각시설을 Table 1~Table 2에 생활 폐기물 소각시설과 사업장 폐기물 소각시설로 나누어서 나타내었다. 생활폐기물 소각시설은 14개 시설을 선정하였으며, 사업장 폐기물 소각시설은 18개 시설을 대상으로 하였다. 그 중 사업장 폐기물 소각시설은 지정폐기물 소각시설은 제외하였으며, 사업장에서 발생하는 일반 폐기물을 소각하는 시설을 중심으로 선정되었다. 선정된 생활 폐기물 소각시설을 소각로의 구조에 따라서 분류하면, 5개의 화격자 소각로 시설 이외에 나머지 9개 소각시설은 고정상 방식의 소각 시설로서 선택된 생활폐기물 소각시설은 대체로 고정상 소각로 방식의 구조로 이루어져 있다. 생활폐기물 소각시설에서 채택하고 있는 주된 대기오염 방지시설은 싸이클론(Cyclone, 이하 CY), 멀티 싸이클론(Multi-Cyclone, 이하 MC), 반건식/여과 집진기(Spray Dryer Absorber/Bagfilter, 이하 SDA/BF) 등으로 구성되어 있

Table 1. Operating conditions of domestic MSW (municipal solid waste) incinerators

Incinerators	Run time (hr)	Furnace type	Capacity (kg/hr)	Facilities process
D1	8	Fixed bed	130	CC-CY-Stack
D2	4~5	Fixed bed	150	CC-CY-Stack
D3	8	Fixed bed	150	CC-WHB-CY-BF-Stack
D4	8	Fixed bed	120	CC-CY-WS-Stack
D5	8	Fixed bed	120	CC-CY-WS-Stack
D6	4	Fixed bed	80	CC-CY-Stack
D7	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack
D8	8	Stoker	95	CC-CY-Stack
D9	6~8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack
D10	8	Fixed bed	95	CC-WHB-CY-SDA-BF-Stack
D11	13	Stoker	1,500	CC-WHB-AP-SDA/BF-Stack
D12	8	Stoker	1,250	CC-WHB-AP-MC-SDA/BF-Stack
D13	8	Stoker	1,000	CC-WHB-CY-SDA/BF-Stack
D14	5	Stoker	625	CC-WHB-SDA/BF-Stack

note) CC: Combustion Chamber, WHB: Waste Heat Boiler, WS: Wet Scrubber CT: Cooling Tower, CY: Cyclone, SDA: Spray Dryer Absorber, BF: Bag Filter, AP: Air Pre-heater, MC: Multi Cyclone

Table 2. Operating conditions of industrial MSW (municipal solid waste) incinerators

Incinerators	Run Time (hr)	Furnace Type	Capacity (kg/hr)	Facilities Process
I1	8	Stoker	95	CC-HE-BF-Stack
I2	24	Fixed bed	195	CC-WHB-BF-Stack
I3	10	Fixed bed	120	CC-WHB-CY-WS- BF-Stack
I4	4 (2-3 in weekly)	Fixed bed	100	CC-HE-CY-WS-PT-Stack
I5	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack
I6	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack
I7	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack
I8	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack
I9	8	Stoker	95	CC-CY-Stack
I10	5	Stoker	80	CC-CY-Stack
I11	24	Stoker	1,200	CC-CT-SDA/BF-Stack
I12	24	Stoker	1,900	CC-WHB-HE-MC-WS-Stack
I13	24	Stoker	1,700	CC-WHB-CY-WS-RS-PT-Stack
I14	8	Stoker	866	CC-WHB-MC-EP-Stack
I15	24	Stoker	400	CC-WHB-CY-SDA/BF-Stack
I16	24	Stoker	1,600	CC--WHB--MC--WS--Stack
I17	16	Pyrolysis	450	CC-WHB-WS1-WS2-WS3-Stack
I18	24	Pyrolysis	400	CC-WHB-MC-BF-WS-PT-Stack

note) CC: Combustion Chamber, WHB: Waste Heat Boiler, WS: Wet Scrubber CT: Cooling Tower, CY: Cyclone, SDA: Spray Dryer Absorber, BF: Bag Filter, HE: Heat Exchanger, AP: Air Pre-heater, MC: Multi Cyclone, EP: Electrostatic Precipitator, PT: Packing Tower, RS: Rotary Scrubber

다. 생활폐기물 소각시설 중 소각규모에 따른 구분으로서, 중형 소각시설(D11-D14)은 적어도 3가지 이상의 대기오염 방지시설을 갖추고 있고, 냉각설비로 폐열보일러(Waste Heat Boiler, 이하 WHB)를 설치하고 있는 시설은 D3, D10, D11, D12, D13, D14 등이다. 사업장 폐기물 소각시설에서의 소형(I1-I18) 소각시설의 소각로 구조를 보면 화력소각로 9개, 고정상 소각로 7개, 열분해 소각로 2개로 구성되어 있다. 사업장 폐기물 소각시설의 주된 대기오염 방지시설은 CY와 BF등으로 구성되어 있으며, CY만을 설치한 소각시설은 6개 시설로 구성되어 있다. 한편, 사업장 폐기물 중 중형 소각시설(I11-I18)은 MC, WS, SDA/BF 등으로 구성되어 있고 냉각설비는 총 1개 시설(I11)만이 갖추고 있다.

2. 실험방법

1) 시료채취 및 분석

소각시설 배가스의 수는 시료 채취는 대기오염 공정시험법에 따라 수행하였으며,¹¹⁾ 시료채취장치는 흡인노즐, 시료채취관, 피토폰, 차압게이지, 임핀저 트레인, 가스 흡인 및 유량측정부 등으로 구성되어 있다. 시료채취는 가스상 및 입자상의 휘발성 중금속을 채취하므로 동·정압을 측정하고, 오리피스 차압을 조절하여 등속

흡인을 확인하면서 시료를 채취하였다. 시료 채취관은 석영 유리관을 사용하였으며, 시료 채취시 수분 응축을 방지하기 위하여 채취관 출구에서의 가스 온도를 $120 \pm 14^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 입자상과 가스상의 수는 흡수액은 산성 과망간산칼륨 용액(4% $\text{KMnO}_4/10\% \text{H}_2\text{SO}_4$)에 채취하였으며, 사용되는 모든 유리기구는 50% 질산, 물, 8N 염산, 물의 세척단계를 거친 후 최종적으로 증류수로 세척하여 건조시킨 것을 사용하였다. 시료채취가 끝나면 250 ml 유리용기에 채취한 흡수액과 채취관 노즐, 연결관, 라이너, 여과지 홀더, 흡수병 등의 세정액을 합하였다. 여과지는 여과지 홀더에서 분리한 다음 100 ml 유리용기에 담고 20~30 ml의 흡수액을 가하였으며, 채취한 배가스 시료의 전처리는 대기오염 공정시험방법에 의해 실행하였다. 배가스의 전처리가 완료된 시료의 수는 분석에 사용한 기기는 유도결합플라즈마 발광광도계(ICPs-1000IV, Shimadzu)로서 수소 증기화 장치인 HVG(hydride vapor generator)를 연결하여 분석하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 도시고형폐기물 소각시설 배가스의 수는

Fig. 1은 도시고형폐기물 소각시설 배가스에서 배출

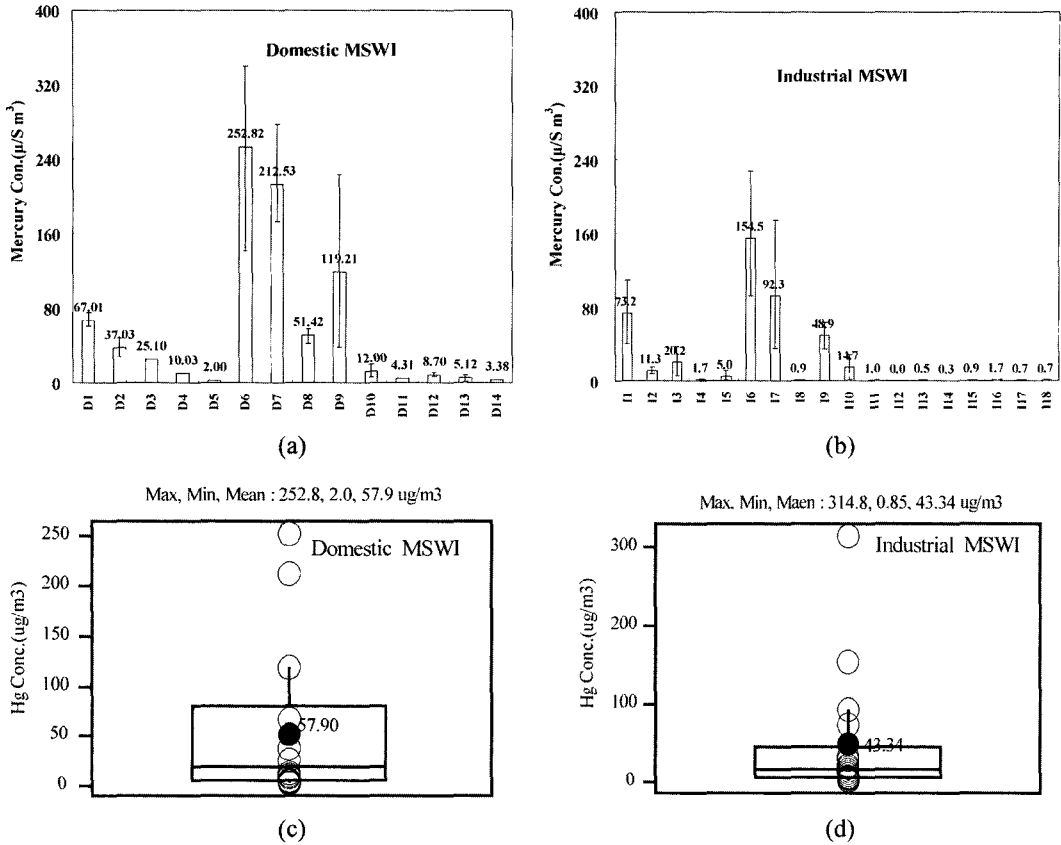


Fig. 1. Mercury concentration in emission gas from domestic and industrial MSWI (municipal solid waste incinerator) stacks.

되는 수은 농도를 나타내고 있다. Fig. 1의 (a)와 (b)는 각각 생활폐기물 소각시설과 사업장 일반폐기물 소각 시설에서 배출되는 수은농도를 나타내었다. Fig. 1(a)의 생활폐기물 소각시설에서 D5, D11, D14 소각시설을 제외한 대부분의 소각시설 배가스 수은 농도는 현 기준치(5 µg/S m³)를 초과하고 있다. 그 중에서도 D1, D2, D3, D4, D6, D7, D8, D9는 우리나라 대기오염 방지시설 기준치에 비하여 2배~50배 정도 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면, Fig. 1(b)의 사업장 폐기물 소각시설에서는 I1, I2, I3, I6, I7, I9, I10을 제외한 대부분의 소각시설은 현 기준치(5 µg/S m³)를 초과하지 않고 있다. 대기오염방지시설 기준치(5 µg/S m³)를 초과한 소각시설인 I1, I2, I3, I6, I7, I9, I10의 배가스 수은 농도는 각각 73.2 µg/S m³, 11.3 µg/S m³, 20.2 µg/S m³, 154.5 µg/S m³, 92.3 µg/S m³, 48.9 µg/S m³, 14.7 µg/S m³로 Fig. 1(a)의 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 수은 농도보다는 대체로 낮았다. 배가스 수은 농도가 높은 소각시설의 경우는 소각로-사이클론

-굴뚝으로 연계되는 매우 단조로운 소각시설로 구성되어 있으며, 다양한 대기오염방지시설들로 결합되어 있는 소각시설들은 배가스 수은 농도가 낮았다. Fig. 1의 (c)와 (d)는 생활폐기물 소각시설과 사업장 일반폐기물 소각시설에서 배출되는 수은농도 값을 BOX whisker plot으로 나타내었다. Box whisker plot은 도수분포의 한 형태 표현으로 많은 자료를 순서대로 나열한 후 분석자료에 대한 최소값, 최대값, 일사분위수, 중위수, 삼사분위수 등 5개 이상의 값을 한 눈에 볼 수 있도록 정리해서 설명하는 그림이다.¹²⁾ 상자의 하단선, 중간선, 상위선이 각각 일사분위수, 중위수, 삼사분위수에 해당하며, 각 그림의 중앙 수치는 해당 폐기물 소각시설 배가스 수은의 평균값을 나타내고 있다. Fig. 1(c)는 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 수은의 최대값, 최소값, 평균값으로 각각 252.78 µg/S m³, 2.0 µg/S m³, 57.9 µg/S m³로 나타났다. Fig. 1(d)는 사업장 일반폐기물 소각시설에서 배출되는 수은의 최대값, 최소값, 평균값으로 각각 314.8 µg/S m³, 0.85 µg/S m³,

Table 3. Correlation matrix between mercury and typical air pollutants from MSWI stack

[N=32]	Hg	Temp.	NOx	SO ₂	HCl	MO.	PM ₁₀	O ₂	CO ₂	CO
Hg	1									
Temp.	0.498	1.000								
NOx	-0.421	-0.174	1.000							
SO ₂	-0.040	-0.120	-0.290	1.000						
HCl	-0.085	0.217	0.372	-0.130	1.000					
MO.	-0.368	-0.032	0.419	-0.120	0.037	1.000				
PM ₁₀	0.254	0.211	-0.300	-0.107	-0.164	-0.249	1.000			
O ₂	0.190	-0.084	-0.582	0.064	-0.060	-0.498	0.241	1.000		
CO ₂	0.011	0.246	0.380	0.001	-0.007	0.308	-0.108	-0.898	1.000	
CO	-0.004	-0.012	-0.337	0.745	-0.155	-0.214	0.099	0.094	0.118	1

note) Temp.: temperature, MO.: moisture

43.34 µg/S m³로 나타났다. 일반적으로, 소각시설에서 배출되는 수은 발생근원은 소각시설로 반입되는 폐기물에 혼합된 것에 근원을 들 수 있다. 따라서, 생활폐기물 소각시설에서의 수은배출이 사업장 일반폐기물 소각시설에서의 수은배출 보다 대체로 높게 나타나는 것으로 판단되었다. 즉, 사업장 일반폐기물 소각시설로 반입되는 폐기물 보다 생활폐기물 소각시설로 반입되는 폐기물의 수은 함유량이 큰 것으로 사료된다.

2. 배가스 수은과 대기오염물질과의 관계

Table 3은 선정된 32개 소각시설에서 배출되는 수은과 그 때 배출되는 대기오염물질과의 관계를 95% 신뢰수준의 상관계수 행렬로 나타내었다. 자연계에서 일어나는 여러 환경인자는 복잡한 현상을 이루므로 폐기물 소각시설에서 수은배출에 대한 상관현상의 파악으로서 이러한 통계적 분석기법 중 변수를 종속변수와 독립변수로 분리하지 않고 변수 전체를 대상으로 어떤 변수들끼리 서로 같은 분산의 구조를 가지는 것을 살펴보는 요인분석 기법을 사용하고자 하였고 그중 상관계수 행렬을 이용하였다. Table 3에서 보면, 폐기물 소각장 배가스에서 수은이 배출될 때 온도(Temp.)와의 상관계수(γ)는 0.498로 높은 양의 상관성을 보이며, NOx와의 상관계수(γ)는 -0.421로 음의 상관성을 보이며, 수분(MO.)과의 상관계수(γ)는 -0.368로 다소 낮은 음의 상관성으로 나타났다. 한편, 미세입자(PM₁₀)와의 상관계수(γ)는 0.254로 낮은 상관성을 보이며, SO₂, HCl과의 상관계수(γ)는 각각 -0.040, -0.085로 상관성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 대체로, 폐기물 소각시설에서 수은 배출시 온도(Temperature, Temp.), NOx, 수분(Moisture, MO.), PM₁₀ 등이 영향을 미치는 인자들로 판단되었다.

3. 배가스 온도가 수은배출에 미치는 영향

1) 온도에 따른 소각장의 수은 배출특성

폐기물 소각시설 배가스에서의 수은배출 및 억제는 폐기물 조성, 배가스의 특성(예로서, 온도, 가스조성 등), 기상 또는 고상에서의 수은 종(species) 형성, 대기 오염방지시설의 종류 등이 있다.¹³⁾ 중금속 중 휘발성이 가장 큰 수은의 경우는 배가스의 온도가 직접적인 영향을 미치는 물리적인 인자로 판단할 수 있다. 이는 Table 3에서 나타내고 있듯이, 소각시설 배가스 수은과 배가스 온도, 대기오염물질과의 상관계수행렬에서 Hg-Temp.($\gamma=0.498$)의 상관계수로도 판단할 수 있다. Fig. 2의 (a)는 선택된 소각시설에서의 배가스 수은농도와 그때의 배가스 온도를 나타내었다. 배가스 수은 농도와 온도분포를 보면 유사한 경향을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)에서는 생활폐기물 소각시설에서 배가스 온도에 따른 수은농도 분포로서, 배가스 온도에 따른 수은 배출은 2개의 온도그룹인 저온영역(43.7°C~195.55°C)과 고온영역(327.63°C~800°C)으로 나누어졌다. Fig. 2(c)는 사업장 일반폐기물 소각시설에서 배가스 온도에 따른 수은농도로서 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 수은 경향과 유사하게 저온영역(29.85°C~222.10°C)과 고온영역(411.17°C~449.37°C) 2그룹으로 나누어 졌다. 즉, 도시고형 폐기물 소각시설 배가스의 수은배출은 배가스 온도에 따라서 배출농도비 주된 배출온도 영역이 형성되는 것을 알 수 있었다.

2) 배가스 온도영역에 따른 수은배출 특성

Fig. 3은 배가스 온도에 따른 생활폐기물 소각시설과 사업장 일반폐기물 소각시설 배가스 수은농도를 동일 그래프에 나타내었다. 생활폐기물 소각시설과 사업장 일반폐기물 소각시설의 구분 없이 Fig. 3(a)에는 Group A(저온영역, 29.85°C~222.10°C)와 Group B(고온영역,

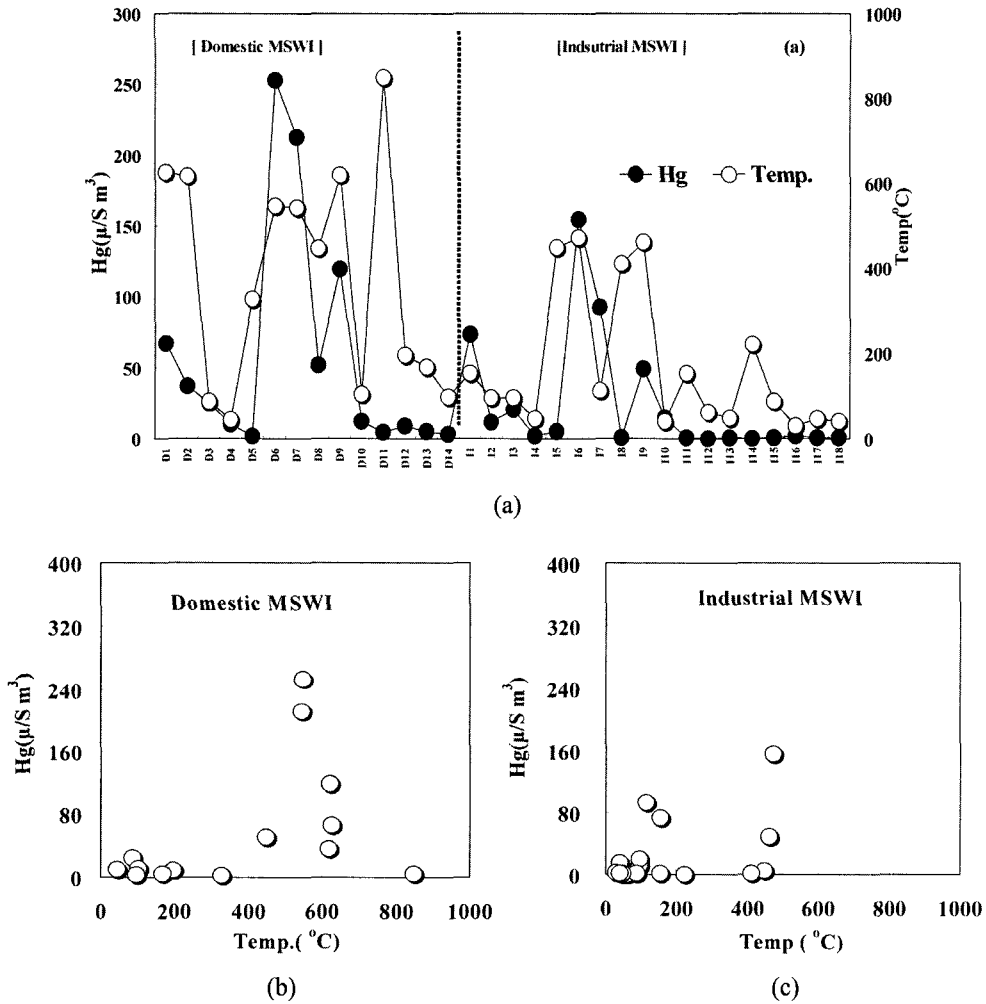


Fig. 2. Mercury concentration emitted from MSWI stacks according to flue gas temperature.

446.9 $^{\circ}\text{C}$ ~848.15 $^{\circ}\text{C}$)로 2개의 온도영역으로 나눌 수 있다. 한편, Fig. 3의 (a)를 바탕으로 Group A와 Group B의 온도구간에 대하여 BOX whisker plot을 Fig. 3의 (b)와 (c)에 나타내었다. 저온배가스 온도영역인 Group A에서의 최대값, 최소값, 평균값은 각각 92.3 $\mu\text{g}/\text{S m}^3$, 0 $\mu\text{g}/\text{S m}^3$, 13.0 $\mu\text{g}/\text{S m}^3$ 였으며, Group B에서의 최대값, 최소값, 평균값은 각각 252.2 $\mu\text{g}/\text{S m}^3$, 0.85 $\mu\text{g}/\text{S m}^3$, 86.7 $\mu\text{g}/\text{S m}^3$ 이었다. 대체로, 배가스 온도 구간이 저온 영역에서 고온영역으로 전환될수록 수은 농도가 높은 것으로 나타났다. 즉, 배가스 온도제어는 수은 배출 억제에 중요한 인자임을 알 수 있었다.

3) 저온 및 고온 배가스구간에서 수은배출에 영향을 미치는 대기오염물질

Fig. 4는 저온 배가스 온도구간(Group A)에서 수은

배출시 NOx, HCl, PM₁₀과 같은 대기오염물질과 수분(MO., moisture)의 변화를 나타내었고, Table 4는 저온 배가스 온도구간에서 수은 배출시 NOx, HCl, PM₁₀과 같은 대기오염물질, 수분(moisture, MO.)과의 관련성을 상관계수행렬로 나타내었다. 저온 배가스 온도구간에서 수은배출에 영향을 미치는 대기오염물질로서 NOx, HCl, PM₁₀, 수분(MO.)과의 상관계수(γ)는 각각 Hg-NOx($\gamma = -0.587$), Hg-HCl($\gamma = -0.064$), Hg-PM₁₀($\gamma = 0.634$), Hg-MO.($\gamma = -0.39$)로 나타났다. 즉, 저온 배가스 온도구간에서 수은 배출시 NOx와 수분(MO.)은 음의 상관성을 지니며, 미세입자(PM₁₀)와는 높은 양의 상관성을 나타내고 있다. Fig. 5는 고온 배가스 온도구간(Group B)에서 수은 배출시 NOx, HCl, PM₁₀, MO.를 나타내었고, Table 5는 Fig. 5의 측정값을 이용하여 저

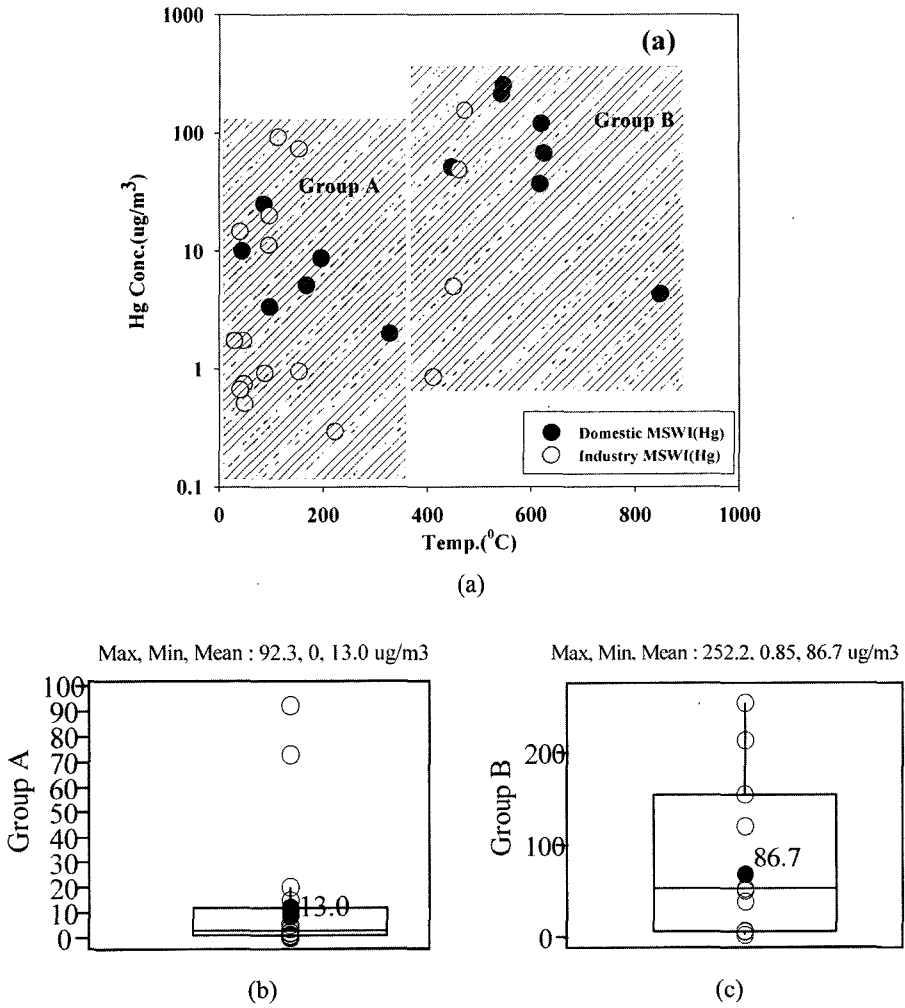


Fig. 3. Low [Group A] and high [Group B] concentration of mercury emitted from MSWI stack according to flue gas temperature.

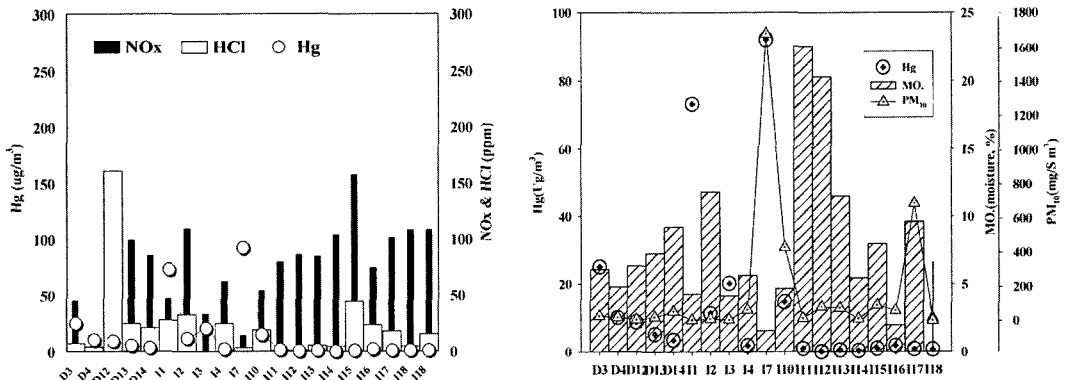


Fig. 4. Mercury, air pollutants(NO_x, HCl, PM₁₀) and MO, emitted from MSWI stacks at Group A (flue gas with low temperature, 29.85°C~222.10°C).

Table 4. Correlationship matrix among mercury, air pollutants (NOx, HCl, SO₂, CO₂, CO, PM₁₀), and MO. emitted from MSWI stacks at Group A (flue gas with low temperature)

	Hg	NOx	MO.	PM ₁₀	HCl	SO ₂	CO ₂	CO
Hg	1							
NOx	-0.587	1.000						
MO.	-0.390	0.304	1.000					
PM ₁₀	0.634	-0.351	-0.239	1.000				
HCl	-0.064	0.359	-0.134	-0.141	1.000			
SO ₂	0.009	-0.314	-0.230	-0.136	-0.182	1.000		
CO ₂	-0.378	0.402	0.422	-0.392	-0.056	0.120	1.000	
CO	0.148	-0.421	-0.262	-0.038	-0.058	0.794	0.074	1

Note) Temp. : temperature, MO. : moisture

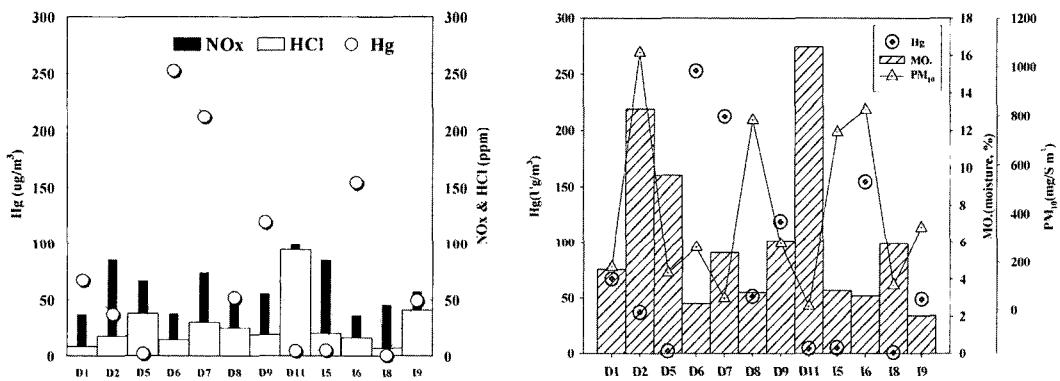


Fig. 5. Mercury, air pollutants (NOx, HCl, PM₁₀) and MO. emitted from MSWI stacks at Group B (flue gas with high temperature, 446.9°C~848.15°C).

Table 5. Correlationship matrix among mercury, air pollutants (NOx, HCl, SO₂, CO₂, CO, PM₁₀), and MO. emitted from MSWI stacks at Group B (flue gas with high temperature)

	Hg	NOx	MO.	PM ₁₀	HCl	SO ₂	CO ₂	CO
Hg	1							
NOx	-0.433	1.000						
MO.	-0.423	0.711	1.000					
PM ₁₀	-0.094	0.055	-0.120	1.000				
HCl	-0.287	0.653	0.635	-0.337	1.000			
SO ₂	0.096	-0.026	0.181	0.156	0.349	1.000		
CO ₂	-0.080	0.514	0.325	0.272	0.035	-0.433	1.000	
CO	-0.129	0.013	0.020	0.541	-0.502	-0.111	0.507	1

Note) Temp.: temperature, MO.: moisture

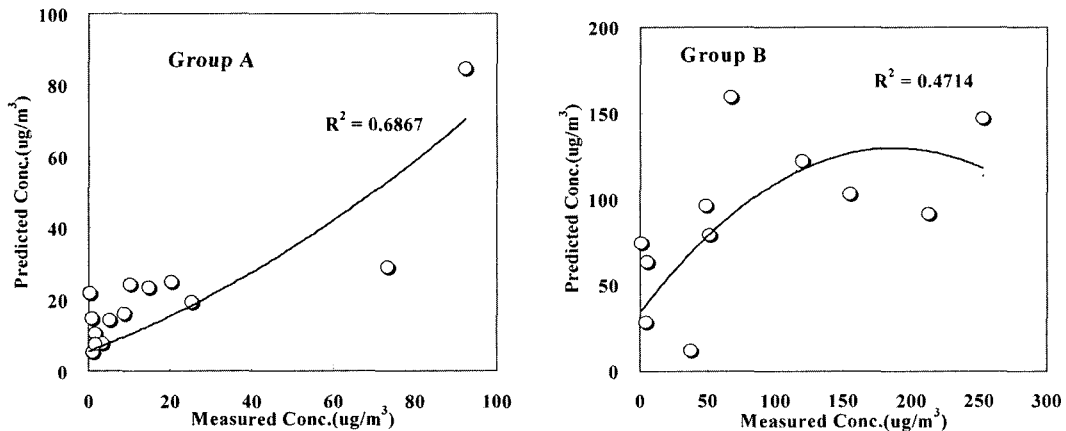
온배가스 온도구간에서 배가스 수은과의 상관계수행렬을 나타내었다. 여기서 NOx, HCl, PM₁₀과의 상관계수(γ)는 각각 Hg-NOx(γ=-0.433), Hg-HCl(γ=-0.287), Hg-MO.(γ=-0.433), Hg-PM₁₀(γ=-0.09)로 나타났다. 상관계수행렬 분석결과 고온 배가스 온도구간(Group B)

에서 수은 배출에 높은 영향을 미치는 환경인자로는 NOx, 수분(MO.)이 있었다. 대체로, 저온 배가스 온도구간(Group A)에서의 수은은 미세입자(PM₁₀)의 존재에 영향을 받으며, 부적절한 소각시설 운영에 따른 배가스 온도 상승시 고온 배가스 온도구간(Group B)에서의 수

Table 6. Multiple regression formulas using Temp., NO_x, PM₁₀, MO. for Group A and Group B

	$Y(\text{Me}) = Y_0 + a \text{Temp.} + b \text{NO}_x + c \text{MO.} + d \text{PM}_{10} + e \text{HCl}$					
	Y_0	a	b	c	d	e
Group A [N=20]	23.90	0.14	-0.282	-0.810	0.03	-0.04
Group B [N=12]	35.20	0.322	-0.607	-9.949	-0.026	-0.59

note) Me: mercury, Temp.: temperature, MO.: moisture

**Fig. 6.** Plots of measured versus predicted mercury concentration in Group A and Group B by using multi-regression formulas.

은배출은 미세입자(PM₁₀)와의 관련성은 거의 없고 수분(MO.)과 NO_x에 영향을 받는 것으로 판단되었다.

4. 대기오염물질(NO_x, PM₁₀, HCl)과 MO.를 이용한 배가스 수은 예측

Table 6은 폐기물 소각시설 배가스 수은에 영향을 미칠 대기오염물질(NO_x, PM₁₀, HCl)과 수분(MO.)을 이용하여 저온(Group A) 및 고온(Group B) 배가스 영역에서 배가스 수은농도와와의 관련성을 다중회귀식으로 나타내었다. Fig. 6은 Temp., NO_x, PM₁₀, MO.와 같은 환경인자를 이용한 수은 배출농도 예측값을 나타내었다. 저온 배가스 영역인 Group A에서 측정된 배가스 수은과 다중회귀식을 이용한 예측값과의 상관성으로 결정계수는(r^2) 0.6867이었고, 고온 배가스 영역인 Group B에서는 0.4714로서 선택된 환경인자들은 배가스 수은 예측에 의미 있는 인자로 판단하였다. 따라서, 도시고형 폐기물 소각시설 배가스 온도영역을 저온(29.85~ 222.10°C) 및 고온(446.9~848.15°C) 구간으로 나누어볼 때, 그때 배가스의 NO_x, PM₁₀, HCl, MO.와 같은 환경인자는 수은 배출에 영향을 미치는 중요한 인자들임을 알 수 있었다. 이러한 환경인자들을 바탕으로 얻어진 폐기물 소각시설 배가스 수은예측을 위한 다중회귀식의 적용은 소각시설의 수은 제어에

유용한 자료로 판단되었다.

IV. 결 론

자연환경 중에서 수은의 유해성은 오랜시간 여러 연구자들로부터 많이 알려져 있다. 특히, 폐기물 소각시설에서의 수은배출은 생활환경으로 유입되는 으뜸 배출원이다. 폐기물 소각시설의 수은배출 특성 결과는 다음과 같다.

1. 선택된 32개의 생활폐기물 소각시설과 사업장 일반폐기물 소각시설에서의 배가스 수은은 현행 대기오염방지시설 배가스 수은기준(5 $\mu\text{g/S m}^3$)을 초과하는 소각시설이 많았는데, 이러한 소각시설은 배가스 온도제어가 제대로 이루어지지 않은 것에 기인하였다. 대체로, 대기오염방지시설 배가스 수은기준을 초과하는 소각시설의 구조는 연소실-원심력집진기-굴뚝과 같은 대기오염방지시설로서 매우 단순한 구성으로 되어 있었다.

2. 도시고형 폐기물 소각시설 배가스 시설로 배출되는 수은은 저온영역(Group A, 29.85°C~327.63°C)과 고온영역(Group B, 446.9°C~848.15°C)에 따른 수은배출 구간이 형성되었다. 특히, 고온 배가스 온도영역(Group A)에서의 수은 배출농도가 저온 배가스 온도영역(Group B) 보다 높은 수은농도를 나타내고 있었다.

3. 폐기물 소각시설 배가스 수은에 영향을 미치는 대기오염물질을 상관관계수행열을 이용하여 평가하였을 때, 저온 배가스 온도영역에서는 NO_x, PM₁₀, 수분 (Moisture, MO.) 등의 관련성이 있었으며, 고온 배가스 온도영역에서는 NO_x, 수분(Moisture, MO.) 등이 관련성이 있었다.

따라서, 폐기물 소각시설에서 수은과 같은 유해성이 큰 중금속이 배가스로 배출되는 것을 방지하기 위하여 다양한 구조의 대기오염방지시설의 설치가 필요하며, 배가스 온도를 낮추기 위한 냉각탑과 같은 시설의 설치로 저온 배가스 온도유지는 중요한 사항이라 할 수 있다.

참고문헌

1. 환경부 : <http://www.me.go.kr/>, 2004. 7. 15일 현재.
2. 문부식 : 중소형 소각시설의 Hg, Pb, As, Se 배출특성에 대한 연구. 서울시립대학교 일반대학원 석사학위논문, 2004.
3. 홍지형, 이대균, 석광설, 김대곤, 이석조, 이덕길, 차준석, 박지현, 장세경 : 대기 배출원의 수은배출특성 조사연구. 국립환경연구원보, **24**, 181-200, 2002.
4. Annau, Z. and Cuomo, V. : Mechanisms of neurotoxicity and their relationship to behavioral change. *Toxicology*, **49**, 219-225, 1988.
5. 정종수, 이성준, 이교우, 김병화, Jochen Seier : 소각로 배출가스 중 수은화합물의 무기성 및 유기성 흡착제를 이용한 흡착성능 실험. 한국폐기물학회지, **19**(3), 300-308, 2002.
6. 김기현, 김민영 : 서울시 한남동과 경기도 과천시 지역을 중심으로 한 대기 중 수은의 분포특성 연구. 한국지구과학회, **22**(3), 233-236, 2001.
7. Pirrone, N., Keeler, G. J. and Nriagu, J. O. : Regional differences in worldwide emissions of mercury to the atmosphere. *Atmospheric Environment*, **30**(17), 2981-2987, 1996.
8. Kevin, C. G. and Christopher, J. Z. : Mercury speciation in coal combustion and gasification flue gases. *Environmental Science & Technology*, **30**(8), 2421-2426, 1996.
9. Schroeder, W. and Munthe, J. : Atmospheric mercury - An overview. *Atmospheric Environment*, **32**(5), 809-822, 1998.
10. Anthony, C. : Mercury from combustion sources: A review of the chemical species emitted and their transport in the atmosphere. *Water, Air and Soil Pollution*, **98**, 241-254, 1997.
11. 환경부 : 대기오염공정시험법. 1993.
12. Kilgroe, J. : Control of dioxin, furan, and mercury emissions from municipal waste combustors. *Journal of Hazardous Materials*, **47**, 163-194, 1996.
13. Kilgroe, J. : Control of dioxin, furan, and mercury emissions from municipal waste combustors. *Journal of Hazardous Materials*, **47**, 163-194, 1996.