

## 폐기물소각시설의 수은 배출 특성

박정민<sup>†</sup> · 정노을 · 조명란 · 강경희 · 이상보 · 이상학<sup>1</sup> · 홍지형 · 이석조

국립환경과학원 대기공학연구과, <sup>1</sup>경북대학교 화학과

## Characteristics of Mercury emitted from Waste Incinerators

Jung-Min Park<sup>†</sup>, Noh-Ul Jung, Myeong-Ran Jo, Kyung-Hee Kang, Sang-Bo Lee,  
Sang-Hak Lee<sup>1</sup>, Ji-Hyung Hong, Suk-Jo Lee

*Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research*

*<sup>1</sup>Department of Chemistry, Kyungpook National University*

Received April 13, 2012/Accepted June 30, 2012

In this study, mercury emissions from waste incineration(municipal, hazardous, medical, sludge) in Korea, were measured. Hg contained in waste vaporizes during waste incineration and is emitted through the stack. Waste incinerators(municipal, hazardous, medical, sewage sludge) are recognized as a major source of Hg emission into the atmosphere. However, waste composition varies widely depending on economic condition, technologies in use, management practices, handling and treatment of such wastes. On an average, Hg emission concentrations from municipal waste incineration ranged from 13.50 to 36.50  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$  and 1.96 to 4.71  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ , at inlet and outlet of APCDs, respectively. This corresponds to removal efficiency of 84.4%. Small-capacity incinerators showed higher Hg emissions, in general. Hg emission concentrations from hazardous waste incineration ranged from 67.33 to 563.16  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$  and 120.97 to 129.68  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ , at inlet and outlet of APCDs, respectively. The municipal wastes contain relatively less Hg, compared to hazardous wastes, leading to lower Hg concentration in flue gas emission. Average Hg emission concentrations from medical waste incineration were 475.95  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$  and in the range of 123.87 to 51.48  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ , at inlet and outlet of APCDs, respectively. While, average Hg emission concentrations from sewage sludge incineration were 251.23  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$  and 16.66  $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ , at inlet and outlet of APCDs, respectively. Hg emission factors estimation for waste incineration was based on the sampling concentration of Hg, flue gas exhaust rate and waste burned. Waste types varied, depending on different type of incinerators: municipal, hazardous, medical waste. Hg sources are to be continued to be measured in the future to have a clear scenario of Hg emission from the country and to apply for effective control measures.

**Key words:** mercury emission, waste incineration, Hg emission factor

### 1. 서 론

UNEP(유엔환경계획, United Nations Environment Program)을 중심으로 한 국제사회는 2000년부터 수은의 위해성 및 전 지구적 오염 상황을 인지하기 시작하였으며, 수은 화합물을 '전 지구적 오염물질'로 규정하였다. 2009년 2월 제25차 UNEP 집행위원회에서는 국제수은협약 체결 논의를 시작하기로 결정하였으며, 수

은협약이 발효되기 이전까지 수은배출저감을 위한 자발적 파트너쉽 사업을 병행하기로 하였다. 우리나라는 세계 9위의 수은 배출국으로서 국내 수은 사용·배출현황, 환경오염현황 조사 및 특성파악에 대한 연구가 필요하다. 특히 환경부의 국민혈중 중금속농도 조사결과, 우리나라 국민의 수은 인체노출 수준이 4.34  $\mu\text{g}/\text{L}$ (06년) 및 3.80  $\mu\text{g}/\text{L}$ (08년)으로 미국 0.82  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 독일 0.58  $\mu\text{g}/\text{L}$ 에 비해 4~5배 높은 수준으로 수은의 노출 및 위해

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-32-560-7340, E-mail: ilikepaul@korea.kr

성 저감대책 마련이 요구되며, 이에 따라 환경부에서는 수은관리종합대책(06)을 추진하고, 화력발전소 및 소각 시설 등의 수은 배출시설의 배출기준을 강화하였다.

미국 EPA의 보고서에 따르면, 수은 화합물의 주요 배출원은 석탄 화력발전소, 도시 폐기물 소각로 등의 연소설비이며, 미국 전체 연간 수은 배출량의 약 87%가 이러한 연소설비에서 배출된다고 보고하고 있다. 또한 인위적으로 배출되는 가스상 수은화합물 중 원소상태의 수은은 용해성이 없고, 휘발성이 높으며 반응성이 낮기 때문에 기존 대기오염방지시설로 처리가 어려운 것으로 알려져 있다. 이에 따라 인위적 배출원으로부터 배출되는 수은화합물을 효과적으로 관리하기 위해서는 방지시설에 따른 수은 화학종(speciation)별 배출 제어에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 석탄화력발전소와 함께 주요 수은 배출원으로 지목되어 있는 폐기물 소각시설(생활폐기물, 지정폐기물, 의료폐기물, 하수슬러지)을 대상으로 수은의 배출현황 및 특성을 파악하고자 하였다. 국내 생활 및 사업장 폐기물 소각시설은 총 952개이며 시설용량은 1,107 ton/hr이다. 2006년 1월 1일부터 시간당 소각능력 25 kg 이상 200 kg 미만의 소각시설도 다이옥신 배출기준 적용을 받게 됨에 따라 많은 소각시설의 폐쇄가 이루어져 2007년도 1,372개소 대비 420개소가 감소하였다. 지정폐기물 소각시설은 일반소각 94개소(시설용량 287,360 kg/hr), 고온소각 19개소(시설용량 339,189 kg/hr), 열분해 4개소(시설용량 4,705 kg/hr), 고온용융 1개소(시설용량 957.6 kg/hr)이다. 의료폐기물은 일반소각 18개소로 시설용량은 18,245 kg/hr이다. 하수슬러지 소각시설은 18개소가 있으며 전용소각시설은 난지하수처리시설 등 15개시설이다. 시설용량은

33,336 kg/hr이다. 이러한 시설들 중 용량, 지역, 방지 시설 등을 고려하여 대상시설을 정하였다. 집진시설, 흡수시설 등의 수은 저감효과를 분석함으로써 기준강화, 방지시설의 설치 등 향후 수은 저감 정책수립시 활용할 수 있는 기초자료를 확보하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 연구대상 시설 및 시료채취 지점

본 연구의 대상 시설은 생활폐기물, 지정, 의료폐기물, 하수슬러지 소각 시설이며 생활폐기물 3개소, 지정폐기물 2개소, 의료폐기물 2개소, 하수슬러지 소각시설 1개소이다. 해당 사업장은 국립환경과학원에서 운영하고 있는 SEMS D/B를 이용하여, 소각시설 용량, 배출량, 방지시설 현황 등을 고려하여 선정하였다. Table 1에 대상 시설 현황을 표시하였다.

### 2.2. 시료채취 및 분석

시료채취 지점으로는 각 방지시설의 전단과 후단의 배출가스를 등속흡인하여 채취하였다.

#### 2.2.1. 배출가스 시료채취

우리나라 수은 화합물 측정방법은 대기오염공정시험 기준 - 배출가스 중 금속화합물 - ES 01408 배출가스 중 수은화합물에 나타나 있다. 국내에서 사용하는 측정방법의 경우, 수은화합물의 총 수은만을 측정하는 방법이다. 따라서 인위적 수은의 배출원별 배출 특성을 평가하기 위해 US EPA의 Ontario Hydro Method로 수은화합물을 화학종별 ( $Hg^0$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Hg_p$ )로 구분하여 측정하였다. 시료채취장치의 구성은 대기오염

**Table 1.** Characterization of Waste incinerators(municipal, hazardous, medical, sewage sludge)

source type		Feedstock (ton/hr)	APCDs
Municipal waste	M-1	12.5	⇒ SCR → BF →SDA ⇒
	M-2	1.6	SNCR ⇒ SDA→ BF ⇒
	M-3	1.5	SNCR ⇒ SDR → BF ⇒
Hazardous waste	H-1	3.8	SNCR ⇒ VS → SDR → BF → SDA ⇒
	H-2	3.5	SNCR ⇒ VS → SDR ⇒ BF ⇒ SDA ⇒
Medical waste	I-1	2	SNCR ⇒ VS → SDR ⇒ BF ⇒ SDA ⇒
	I-2	1	SNCR ⇒ SDR → BF → SDA ⇒
Sewage sludge	S-1	3.8	SNCR ⇒ SDA → SDS → WS ⇒

\*BF: Bag Filter, SCR: Selected Catalytic Reduction, SDA: Spray Dry Absorber, SDR: Semi Dry Reactor, SDS: Semi Dry Scrubber, SNCR: Selected Non-Catalytic Reduction, WS: Wet Scrubber. VS: Venturi scrubber

\*\*⇒: sampling point

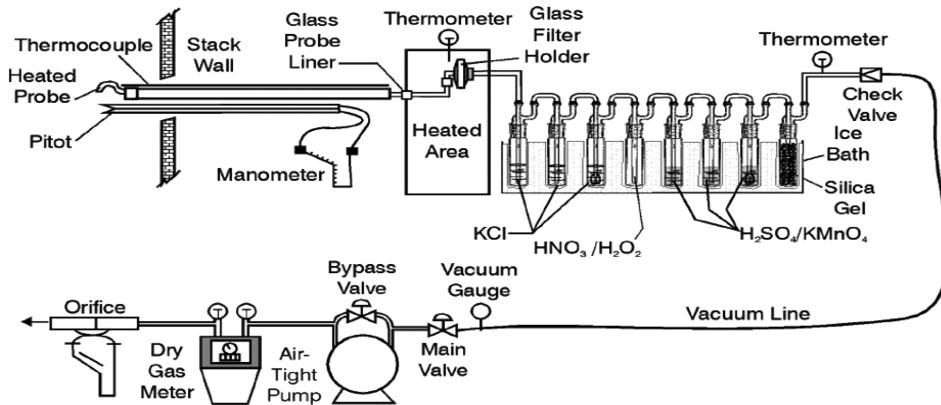


Fig. 1. Sampling device of the Ontario Hydro method.

공정시험법과 거의 동일하지만 Ontario Hydro 방법은 8개의 임핀저를 장착할 수 있는 트레인으로 구성한다 (Fig. 2). 이 때 산화수은과 원소수은을 분리하여 채취할 수 있도록 흡수액을 구분하여 사용한다. 산화수은을 흡수하기 위하여 임핀저 1~3번에는 1M의 염화칼륨 흡수액 100 mL를 넣고, 원소수은을 흡수하기 위하여 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(4번 임핀저), KMnO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(5~7번 임핀저) 흡수액을 사용한다. 또한 입자상 수은을 채취하기 위하여 여과지(Whatman 2814432)를 사용한다. 시료채취 장치의 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 시료채취는 대기오염공정시험기준에 준하여 등속흡인을 하여 채취하였으며 시료채취가 끝난 후 7개의 임핀저의 흡수액을 3개의 용기에(1~3번, 4번 5~7번 임핀저) 담았다. 여과지는 여과지 홀더에서 분리하여 용기에 담아 보관하였다. Fig. 2에 시료회수용기별 시료회수 방법에 대하여 자세히 나타내었다. 시료는 전소액 2회씩 채취하

였으며 각 시료당 채취 유량은 2 이상으로 하였다.

### 2.2.2. 시료의 전처리 및 분석

대기오염공정시험기준과 동일하게 여과지와 시료 흡수액 각각에 대해 전처리를 하였다. 또한 시료 흡수액은 산화수은과 원소수은을 분리하여 분석하기 위하여 임핀저 1~3번, 4번, 5~7번 각각에 대하여 전처리를 개별적으로 처리하였다. 각 흡수액별 전처리 과정은 Fig. 3에 나타내었다. 전처리를 완료한 시료에 대한 분석은 수은분석기(Mercury instruments, AULA-254, USA)를 이용하여 분석하였다. OHM에서 제시하고 있는 검정곡선 작성 방법에 따라 표준시료를 제조하여 분석한 결과, 검정곡선의 R<sup>2</sup>값이 0.999 이상을 나타내었다. 방법검출한계는 0.06 µg/L의 표준시료를 준비하여 8회 반복 측정된 결과, 0.04 µg/L이었으며 %RSD는 1.89%였다.

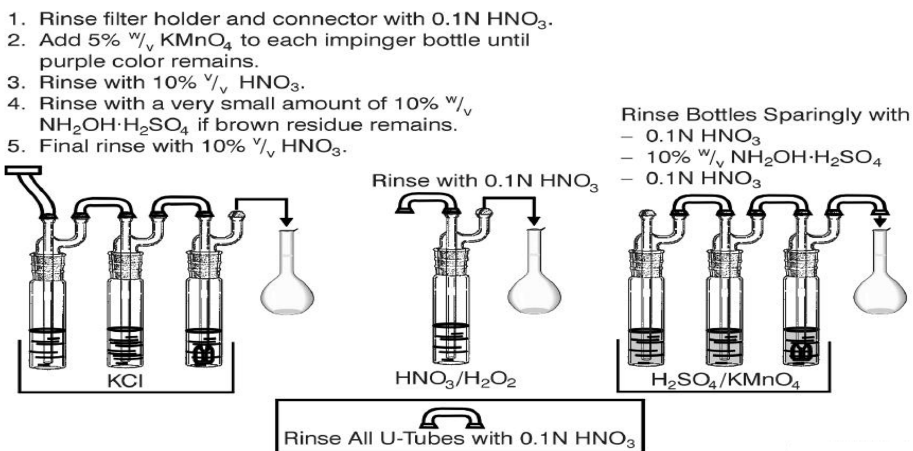


Fig. 2. Recovery procedures of the Ontario Hydro method.

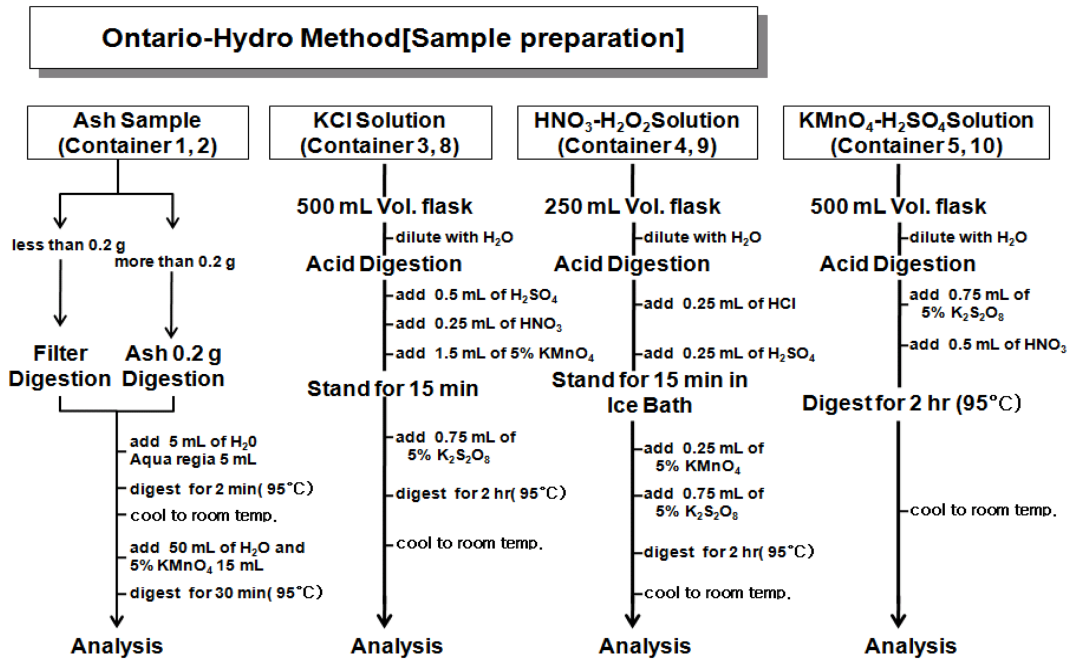


Fig. 3. Procedures for mercury analysis.

2.2.3. 배출계수 산정

소각시설별 수은의 배출계수를 산정하기 위하여 측정한 실측결과를 토대로 배출계수를 산정하였다. 배출계수는 폐기물 소각량(ton)당 수은 배출량(mg)으로 제시하였으며 배출계수산정방법은 아래 식과 같이 계산하였다.

$$\frac{\text{물질농도}(\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{건조배출가스유량}(\text{m}^3/\text{hr}) \times 10^3}{\text{폐기물 소각량}(\text{ton}/\text{hr})}$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 국내 폐기물 발생량 및 처리 방법

수은 배출량 산정을 위한 활동도자료 확보를 위해 환경부 통계자료를 이용하였다. 그 결과, 국내 폐기물 발생량(2008년 기준, 지정폐기물 제외)은 359,296 ton/day이며 폐기물 구성비는 생활폐기물 14.5%, 사업장배출시설계폐기물 36.4%, 건설폐기물 49.1%로서 건설폐기물이 가장 큰 비율을 차지하고 있었다. 지정폐기물의 총 발생량은 총 3,501,980 ton/year이며 이 중 사업장 지정폐기물은 3,411,163 ton/year, 의료폐기물은 90,817 ton/year이었다.

발생폐기물의 처리방법은 매립, 소각, 재활용, 해역배

출 등이 있으며 폐기물의 종류에 따라 차이는 있지만 재활용이 82.3%로 주를 이루고 있다. 생활폐기물은 재활용률이 59.8%, 소각 19.9%, 매립 20.3%이며 사업장 폐기물은 재활용이 70.8%, 매립 18.6%, 소각 5.3%였다. 건설폐기물은 재활용양이 172,110 ton/day로 97.5%를 차지하였으며 소각은 0.8%, 매립은 1.7%로 발생폐기물의 대부분이 재활용되고 있었다. 지정폐기물은 폐산, 폐알칼리, 폐유, 폐유기용제, 폐합성고분자화합물, 분진, 오니 등으로 구성되어 있으며 이 중 폐산, 폐유기용제, 폐유 등은 재활용률이 높은 폐기물로 각각 발생량의 90.7%, 732.%, 67.8%가 재활용된다. 오니류와 분진은 매립비율이 높으며 각각 76.0%, 60.0%이다. 의료폐기물의 주된 처리방법은 소각으로써 그 비율은 92.1%이다(Fig. 4).

2008년 하수도통계에 의하면 하수슬러지는 전국 433개 하수처리시설에서 3,027,829 ton/year 발생하였으며 해양배출로 처리되는 양이 1,427,561 ton/year(47.1%)으로 가장 많으며 재활용 746,055 ton/year(24.6%), 육상매립 440,783 ton/year(14.6%), 소각 409,936 ton/year(13.5%)으로 처리되는 것으로 나타났다.

3.2. 배출가스 중 총 수은 농도 및 제거율

각 배출원에서의 총 수은농도와 수은과 먼지 제어를

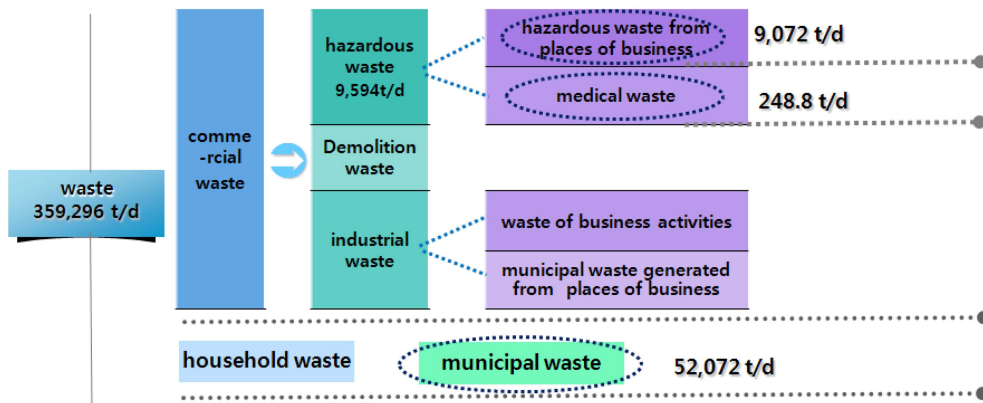


Fig. 4. Types of waste.

위한 방지시설 효율을 Table 2에 나타냈다. 생활폐기물 소각시설의 경우 동일시간에 동일한 성상의 폐기물이 투입되는 것이 아닌 다양한 성상의 폐기물들이 투입됨으로써 다양한 화학적 반응과 수은이 포함된 물질들에 의한 영향으로 인하여 수은이 배출된다. 본 연구결과와 2002년 국립환경과학원 연구 자료와 비교하면, 생활폐기물소각시설의 수은 배출 농도와 큰 차이를 보인다. 2002년 자료에 의하면 생활폐기물 소각시설의 전단 평균농도는  $133.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 후단의 경우  $34.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과 보다 후단 기준으로 7~17배 높았다. 소각용량별로는 소각용량이 대형인 M-1 시설의 전단이  $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 후단은  $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 소각용량이 각각 1.6 ton/hr과 1.5 ton/hr인 M-2, M-3시설은 전단은  $23.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $36.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 후단은  $4.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 소형 소각로가 수은 농도가 높았다. 배출가스 총량에서는 기여도가 적지만 훨씬 더 많은 시설의 숫자를 감안하면 중소형 소각로에 대한 관리 기준 강화도 필요한 것으로 판단된다. 폐기물소각용량, 방지시설의

종류 및 배열 구조와 효율의 차이 등 복합적인 이유로 인하여 시설 간의 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다.

지정폐기물 소각시설의 수은화합물 배출 농도를 살펴보면, 전단에서의 총 수은 농도는 H-1 시설이  $67.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , H-2시설이  $563.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 그리고 후단에서의 총 수은 농도는 H-1 시설이  $7.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , H-2시설이  $120.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. H-2 시설의 경우 배출허용기준이 초과되어 이에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

의료폐기물을 소각하는 I-1, I-2시설의 전단 총 수은 농도는 I-1 시설이  $612.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , I-2시설이  $136.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 후단의 총 수은 농도는 I-1 시설이  $129.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , I-2시설이  $40.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 하수슬러지 소각 시설인 S-1은 전단  $251.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 후단  $16.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 지정폐기물과 의료폐기물의 경우 소각로에 투입되는 폐기물의 성상이 일정치 않고, 동일 시간에 동일한 성상의 폐기물이 투입되는 것이 아니기 때문에 수은화합물의 배출특성을 예측하기 힘들며 배출농도의 변

Table 2. Hg concentration across APCDs and control device efficiency for Hg and TSP reduction

		Hg concentration		Control device efficiency	
		Inlet ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Outlet ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Hg (%)	TSP (%)
Municipal waste	M-1	13.50	1.96	85.5	93.3
	M-2	23.42	4.71	79.9	94.2
	M-3	36.50	4.5	87.7	95.5
Hazardous waste	H-1	67.33	7.14	89.4	98.6
	H-2	563.16	120.97	78.5	85.9
Medical waste	I-1	612.44	129.68	78.8	96.5
	I-2	136.74	40.24	70.6	98.3
Sewage sludge	S-1	251.23	16.66	93.4	99.4

화 폭 또한 큰 것으로 판단된다.

방지시설 전·후단에서의 수은 평균 제거율은 생활폐기물 소각시설 84.4%, 지정폐기물 소각시설 84.0%, 의료폐기물 소각시설 74.07%였으며 하수슬러지 소각시설은 93.4%였다. 먼지의 평균 제거율은 생활폐기물 소각시설 94.3%, 지정폐기물 소각시설 92.3%, 의료폐기물 소각시설은 97.4%였으며 하수슬러지 소각시설은 99.4%로서 수은의 평균 제거율에 비해 높은 효율을 보였다. 방지시설 전·후단에서의 수은의 종별 분포비를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다. 수은의 배출을 최소화하기 위해서는 배출가스 중 수은의 성분비에 관한 지식을 아는 것이 중요하다. 원소수은은 연소기의 고온구역에서 열역학적으로 안정된 형태를 갖는다. 원소수은은 환원조건에서 지배적이지만 연소 배출가스의 온도가 감소함에 따라 산화수은 화합물을 형성하기 위해 반응을 시작한다. 최근의 수은 성분비에 관한 분석결과에 따르면 대개 50% 이상의 원소수은이 배출가스중의 산화성 물질과 반응하는 것으로 나타났다. 산화는 산화수은 화합물이 대개 수용성이어서 습식 스크러버에 의해 효율적으로 제거되고 국부적으로 침적되기 때문에 아주 유리하다. 그러나 원소수은은 증기압이 높고 물에 잘 녹지 않기 때문에 제거하기가 어렵고 전 지구적인 대기 순환을 형성하기 쉽다.

생활폐기물 소각시설의 경우 전단에서 입자상 수은이 전단에서 72.6%~75.6%, 산화수은은 23.2%~25.4%, 원소수은은 3% 미만이었다. 후단에서는 산화수은이 M-1시설 94.4%, M-2시설 69.4%, M-3시설 82.8%로 많은 비를 차지하였다. 지정폐기물 소각시설과 의료폐기물 소각시설은 생활폐기물 소각시설에 비해 전단에서 산화수은이 차지하는 비가 높은 것으로 나타났으며 후단의 경우는 지정폐기물 소각시설인 H-1과 H-2의 원소수은이 각각 22.5%, 32.1%로 다른 소각시설에 비해 높은 분포비를 나타냈다. 하수슬러지 소각시설인 S-1은 전단에서 87%를 차지하였던 산화수은의 대부분이 제거되고 후단에서는 원소수은이 99%를 차지하는 것으로 나타났다. 화학종별 방지시설 수은 제거는 입자상수은은 먼지, 미량금속들과 마찬가지로 기존의 집진장치를 통해 95%이상 제거 되고, 산화수은은 수용성이어서 FGD와 같은 습식스크러버에 의해 효율적으로 제거된다. 반면, 원소수은은 증기압이 높고 물에 잘 녹지 않기 때문에 제거가 어렵다. 폐기물 내 염소성분과의 관계를 살펴보면 염소함량량이 가장 높은 지정폐기물 소각시설에서 산화수은이 가장 높은 분포를 나타냈고 다

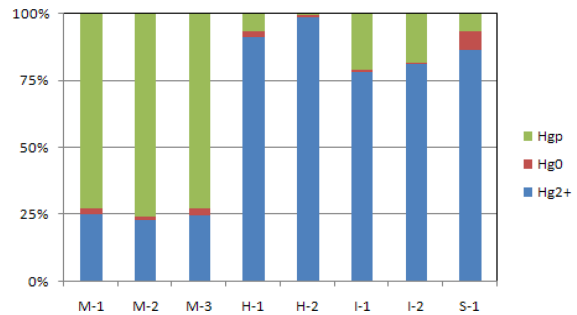


Fig. 5. Hg speciation of inlet at each incinerator.

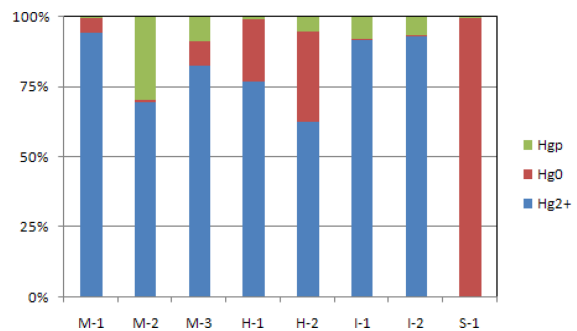


Fig. 6. Hg speciation of outlet at each incinerator.

른 폐기물에 비해 염소 성분이 낮았던 생활폐기물 소각시설이 산화수은의 분포가 적음을 알 수 있다. 이는 유입되는 폐기물 내의 산화성 물질이 수은종별 분포에 관여함을 나타내며 연소조건, 온도, 폐기물의 성상 등 다양한 요소들의 조절을 통하여 산화수은을 제어할 수 있다면 방지시설 운영에 있어서도 도움이 되리라고 판단된다.

### 3.3. 폐기물 소각시설의 배출계수 산정 및 배출량

국내 폐기물 소각시설에 대한 수은 배출계수는 2002년 국립환경과학원에서 수행한 “대기 배출원의 수은 배출특성 조사연구”에서 처음으로 개발되었다. 그 후 과학원에서는 수은의 정확한 배출량 산정을 위하여 수은 배출계수 개발을 위한 연구를 계속 수행하였다. 미국의 경우 배출계수를 EPA 산하 OAQPS(Office of Air Quality Planning and Standards)에서 AP-42를 통해 제안하고 있다. AP-42는 배출계수 산정에 있어 측정데이터의 등급(A~D)과 배출계수 등급(A~F) 분류를 하고 있다. 본 연구에서 제안한 배출계수 등급은 측정데이터는 “A”, 배출계수는 “B” 등급에 해당한다. 배출계수의 대표성 확보를 위해서는 추후 측정횟수를 늘려야 할 필요가 있다. 또한 해당 시설의 측정자료를 일반화

하기 위한 계산과정에서 적용하는 값들의 충분한 대표성 확보를 위해 보다 더 많은 측정이 필요하다.

본 연구에서 산정한 각 폐기물 소각시설의 배출계수 (Table 3)는 생활폐기물 소각시설의 경우 방지시설 전단에서 665.0 mg/ton이며 후단에서는 52.7 mg/ton이었다. 지정폐기물 소각시설은 전단이 3,649.5 mg/ton이며 후단은 475.5 mg/ton이었으며 의료폐기물은 전단과 후단 각각 8,453.2 mg/ton, 2,469.8 mg/ton으로 조사되었다. 하수슬러지 소각시설의 경우 2006년도에 조사한 결과와 함께 평균하였으며 전단은 2,663.4 mg/ton, 후단은 20.4 mg/ton이었다. 후단의 배출계수는 의료폐기물, 지정폐기물, 생활폐기물, 하수슬러지 순으로 각각 2,469.8 mg/ton, 475.5 mg/ton, 52.7 mg/ton, 20.4 mg/ton이었다.

본 연구의 배출계수는 AP-42, Pacyna *et al.*의 자료에 비해 모든 시설의 값이 낮은 것으로 나타났다. Table 3에서 제시한 배출계수를 이용하여 국내 소각시설의 수은 배출량을 산정하고자 하였다. 각 배출원의 배출량 산정을 위해 2008년 <전국폐기물 발생 및 처리현황>, <전국 지정폐기물 발생 및 처리현황>, 2008년 <하수도통계> 자료를 활동도로 사용하였으며 또한 활동도 비교를 위해 생활, 지정, 의료폐기물 소각시설의 경우 SEMS에 각 배출원에서 수록한 자료를 이용하여서도 배출량을 산정하였다. 폐기물 소각과정을 통해 대기로 배출되는 수은의 양은 지정폐기물이 0.26 ton이었으며 다음은 의료폐기물로 0.21 ton이었다. 생활폐기물과 하수슬러지는 각각 0.20 ton과 0.01 ton으로 산정되었으며 폐기물 소각과정에서 나오는 수은의 총 양은 0.67 ton이었다. 그러나 SEMS에서 제공하는 활동도를 이용한 결과 4.57 ton으로 활동도에 따라 배출량에 상당한 차이가 있었다. 향후 국가 수은 배출량 산정시

활동도 선정에 대해서도 면밀히 검토해야 한다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 주요 수은 배출원인 폐기물 소각시설의 수은 배출특성, 화학종별 거동, 환경매체로의 분배, 배출량 평가를 위해 생활폐기물 소각시설 3개소, 지정폐기물 소각시설 2개소, 의료폐기물 소각시설 2개소, 하수슬러지 소각시설 1개소를 대상으로 배출가스, 소각재, 폐수 등에 대해 분석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 굴뚝 배출가스의 수은농도 조사결과, 생활폐기물 소각 시설은 1.96~4.71 µg/Sm<sup>3</sup>이었으며, 지정폐기물 소각시설은 7.14~120.97 µg/Sm<sup>3</sup>, 의료폐기물 소각시설은 40.24~129.68 µg/Sm<sup>3</sup>, 하수슬러지 소각시설은 16.66 µg/Sm<sup>3</sup>이었다. 방지시설 전·후단에서의 수은의 speciation의 분포는 소각 폐기물 성상에 따라 다양한 양상을 보였으며 생활폐기물 소각시설은 전단에서 입자상 수은이 73%였으며 후단에서는 산화수은이 83%였으며 지정과 의료폐기물은 전단과 후단에서 산화수은의 분배가 지배적이었다. 하수슬러지 소각시설은 전단에서 산화수은이 87%로 가장 많은 비율로 존재하였으나 후단에서는 원소수은이 99%로 나타났다. 수은의 평균적인 제거 효율은 생활폐기물 소각시설이 84.4%이며 지정폐기물 소각시설은 84.0%, 의료폐기물 소각시설은 74.1%였으며 하수슬러지 소각시설은 93.4%였다. 먼지의 평균 제거 효율은 생활폐기물 소각시설이 94.3%이며 지정폐기물 소각시설은 92.3%, 의료폐기물 소각시설은 97.4%였으며 하수슬러지 소각시설은 99.4%로써 수은의 평균 제거 효율에 비해 상당히 높은 효율을 보이고 있었다. 수은이 기존 일반대기오염물질 제거를 위해 설치한 방지시설에서 제어 되지 않고 배출되고 있어 이에 대한 제거기술 연구가 필요할 것으로 판단된다. 배출계수는 생활폐기물 소각시설의 경우 방지시설 전단에서 665.0 mg/ton, 후단에서는 52.7 mg/ton이었으며 지정폐기물 소각시설은 전단이 3,649.5 mg/ton이며 후단은 475.5 mg/ton이었다. 의료폐기물은 전단과 후단 각각 8,453.2 mg/ton, 2,469.8 mg/ton이었다. 하수슬러지 소각시설은 전단 2,663.4 mg/ton, 후단 20.4 mg/ton이었다. 폐기물 소각과정을 통해 배출되는 수은의 양은 지정폐기물이 0.26 ton으로 가장 많았으며 다음은 의료폐기물로 0.21 ton이었다. 생활폐기물과 하수슬러지는 각각 0.20 ton과 0.01 ton으로 산정되었으며

**Table 3.** Emission factor for Hg

Source type		EF (mg/ton)		
		In thisstudy	AP-42	Pacyna <i>et al.</i>
Municipal waste	Uncontrolled	665.0	2,800	-
	Controlled	52.7	1,700	1,000
Hazardous waste	Uncontrolled	3,649.5	-	-
	Controlled	475.5	-	-
Medical waste	Uncontrolled	8,453.2	-	-
	Controlled	2,469.8	8,000	-
Sewage sludge	Uncontrolled	2,663.4	-	-
	Controlled	20.4	30	5,000

수은의 총 배출량은 0.67 ton이었다. 국제수은협약 대응을 위한 정확한 국내 배출원의 수은 배출량 산정을 위해서는 추가로 물질수지 산정과 배출원의 데이터 개수를 확보하기 위한 측정을 실시해야 할 것으로 판단된다. 이들을 추가한다면 특성을 파악하는데 있어 더욱 정확하고 신뢰성 있는 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 국립환경과학원, 대기 중 수은의 측정방법 평가 및 실태조사(I), **2006**.
2. UNEP, Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment. **2005**.
3. Deepak Pudasainee, Jeong-Hun Kim, Yong-Chil Seo, Mercury emission trend influenced by stringent air pollutants regulation for coal-fired power plants in Korea, *Atmospheric Environment*, **2009**, 43, 6254-6259.
4. 국립환경과학원, 수은 사용·배출시설 통합관리 방안 연구(II), **2011**.
5. <http://sems.nier.go.kr>.
6. 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황, **2008**.
7. 환경부, 전국 지정폐기물 발생 및 처리현황, **2008**.
8. 환경부, 하수도통계, **2008**.
9. 국립환경과학원, 대기배출원에서의 수은 배출특성 조사 연구, **2002**.
10. Landis, M. S.; Lewis, C.W.; Stevens, R.K.; Keeler, G.J.; Dvonch, J.T.; Tremblay R.T. Ft. McHenry tunnel study: Source profiles and mercury emissions from diesel and gasoline powered vehicles. *Atmos Environ*. **2007**, 41 8711-8724.
11. Dabrowski, J. M.; Ashton, P. J.; Murray, K.; Leaner, J. J.; Mason, R. P, Anthropogenic Mercury Emissions in South Africa: Coal Combustion in Power Plants. *Atmospheric Environment*, **2008**, 42, 6620- 6626.
12. Lee, S.J.; Seo, Y.C.; Jurng, J.; Hong, J.H.; Park, J.W.; Hyun, J.E.; Lee, T.G. Mercury emissions from selected stationary combustion sources in Korea. *Sci Total Environ*. **2004**, 325, 155-161.
13. Prestbo, E. M., N.S. Bloom, Recent Advances in the Measurement of Mercury species in Combustion Flue gas using solid phase adsorption and cold vapor atomic fluorescence spectroscopy, *Journal of the Air & Waste Management Association* for Presentation at the 86th Annual meeting & exhibition, **1993**, 93TA-32.05.
14. 국립환경과학원, 소각시설의 최적가용기술 및 최적환경관리방안 도출 연구, **2005**.
15. 국립환경과학원, 고정오염원에서의 유해대기오염물질 배출원 조사(II), **2006**.
16. Pacyna, E.G., J.M Pacyna, Global emission of atmospheric mercury anthropogenic sources in 1995, *Water, Air and soil pollution*, **2002**, 137, 149-165.