

폐기물소각시설의 수은배출특성 연구

A Study on the Emission Characteristics of Mercury in Municipal and Industrial Waste Incinerators

석광설* · 홍지형 · 이석조 · 이대균 · 김대곤 · 박지현
국립환경연구원 대기연구부 대기공학과
(2003년 9월 30일 접수, 2004년 3월 25일 채택)

Kwangseol Seok*, Jihyung Hong, Sukjo Lee, Daegyun Lee,
Daigon Kim and Jihyun Park
Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research
(Received 30 September 2003, accepted 25 March 2004)

Abstract

The emission characteristics of mercury in waste incinerators were investigated to get basic data for the policy development on the emission reduction of mercury (Hg). For the study several important factors were analysed from 4 incinerators such as mercury concentration, emission factors and removal rate for control devices. The results are listed below.

Mercury concentrations in the flue gas were $0.39 \sim 5.96 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ in MWI and $2.5 \sim 8.8 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ in IWI. The distributions of gaseous and particulate mercury in flue gas were above 99% and below 1%, respectively. Therefore, in order to remove mercury effectively, it is important to control the gaseous mercury. Mercury concentrations in fly ash collected from control device were found as $16.2 \sim 35.6 \text{ mg}/\text{kg}$ -ash in FF of MWI. Also mercury concentrations at the front and back point of control device of MWI were $33.45 \sim 62.65 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ and $0.88 \sim 3.49 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, respectively. Emission factors were estimated as $3.67 \sim 11.67 \text{ mg}/\text{ton}$ in FF, $2.6 \sim 24.5 \text{ mg}/\text{ton}$ in MWI with SNCR, SDR and FF, $54.9 \sim 192.7 \text{ mg}/\text{ton}$ in IWI with Cyclone and FF. Emissions from Municipal Waste Incinerator were found both in minimum and maximum ranges. Annual mercury emissions emitted from MWI was estimated as 20.0 kg (6.0 ~ 33.9 kg).

Key words : Mercury (Hg), Waste incinerators

1. 서 론

대기 중에 존재하는 미량 유해물질 중 잔류독성이

크고 장기간에 걸쳐 인간과 동식물에 영향을 주는 대표적인 물질이 수은이다. 대부분의 유해중금속들은 집진설비를 이용하여 효과적으로 제어가 가능하지만 수은은 낮은 비점과 높은 휘발성으로 인해 생활폐기물 소각시설에서 약 66%가 방지시설에서 제어되지 않고 대기 중으로 배출되는 것으로 알려져 있어

* Corresponding author
Tel : +82-(0)32-560-7312, E-mail : ksseok@me.go.kr

(Vogg, 1987) 수은배출을 사전에 억제할 수 있는 대책이 필요하다. 특히 연소 배출원으로부터 배출되는 수은은 무시할 수 없을 만큼 많은 양을 대기 중에 배출하고 있는 것으로 알려져, 수은 배출원에 대한 집중적인 조사를 필요로 한다.

국내의 수은 배출특성에 대해서는 소수의 연구자들이 환경대기 중 배출특성에 대하여 연구결과를 제시하고 있으나 실제로 어떤 배출원에서 어느 정도 양의 수은이 방출되는지, 또한 배출원에서의 수은의 형태나 거동 등 어떠한 특성을 가지는지에 대한 관련 연구는 수은 분석방법이 까다로운데다가 방법들 간(흡광광도법, EPA 101A, 온타리오법 등)에 차이가 있고 미량분석이 갖는 어려움으로 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

주요한 수은의 배출원으로는 석탄사용 화력발전소, 폐기물 소각로, 시멘트 킬른 등이며, 인위적 배출량의 90% 이상이 이들 배출시설에서 배출된다(Krishnan *et al.*, 1997). 발전소가 수은 배출량 자체로 가장 큰 배출원이긴 하지만 소각장의 경우에는 발전소에서 사용하는 화석연료보다 폐기물속의 수은 함유 비율이 많기 때문에 배출농도가 높고, 더구나 소각장은 주거지역 인근에 위치하기 때문에 인체에 더 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다(전미경 등, 1999).

이러한 수은의 유해성을 고려할 때 대기로 수은을 배출하는 배출원에 대한 정보를 구축할 필요가 있으며, 방지기술에 대한 조사를 통해 효과적인 수은제어 방법을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 수은을 많이 배출하는 것으로 알려져 있는 폐기물소각시설에 대한 수은의 배출형태와 농도, 배출량 등을 조사하고 폐기물 소각시설에 설치 가동 중인 기존의 집진시설, 흡수시설 등의 수은 저감효과를 분석함으로써 향후 수은배출저감을 위한 정책 검토시 활용할 수 있는 기초자료를 확보하고자 하였다.

2. 연구 및 방법

2.1 전국 생활폐기물 소각 현황

생활폐기물 소각시설에서 발생하는 수은 배출량을 추정하기 위하여 2001년도에 우리나라의 생활폐기물 소각시설에서 처리되고 있는 소각현황을 조사하였다(표 1). 하루에 소각처리 되는 총 생활폐기물의 양은 5,908.5 ton이며, 이중 가연성 폐기물이 5,813.1 ton으로 98.4%를 차지하고 있으며, 불연성 폐기물은 78.3 ton으로 1.3%를, 재활용품은 17.1 ton으로 0.3%를 차지하고 있다. 생활폐기물의 대부분은 지자체에서 수거한 후 급변 조사대상 시설과 같은 대형 생활

Table 1. Current state of municipal waste incineration data in Korea (2001). (Unit : ton/day)

Total	Combustable Refuse							Incombustable Refuse			Recyclable Waste		
	Garbage	Papers	Woods	Rubbers /leathers	Plastics	etc.	Metal /glasses	earth /sand	etc.	Papers	Plastics	etc.	
Total	5,908.5	959.9	1,858.7	977.8	356.5	673.2	987.0	10.5	0.1	67.7	4.7	8.7	3.7
Seoul	738.4	77.9	162.3	178.1	58.4	97.9	163.7			0.1			
Pusan	479.7	85.0	124.3	53.7	14.8	87.5	114.4						
Taegu	482.1	61.6	179.3	72.0	32.0	82.1	55.1						
Inchon	89.3	11.4	16.3	13.8	19.9	8.5	19.4						
Kwangju	303.6	40.5	107.0	43.5	11.9	13.2	87.5						
Taejon	168.5	36.6	35.2	28.6	1.5	15.0	51.6						
Ulsan	323.0	79.8	63.3	84.5	21.1	29.1	45.2						
Kyonggi	2,291.9	423.5	855.9	297.1	151.6	218.0	261.9	10.0	0.1	67.6	2.9	1.6	1.7
Kangwon	50.5	0.2	21.9	14.4	2.4	4.8	6.4				0.4		
Chungbuk	47.3	1.1	15.2	14.6	2.0	5.7	8.7						
Chungnam	194.4	2.4	61.8	37.5	10.2	9.8	72.7						
Chonbuk	7.4	0.0	1.1	5.5	0.1	0.1	0.6						
Chonnam	98.0	8.3	25.3	21.9	5.4	7.5	29.6						
Kyongbuk	134.5	18.9	46.2	26.1	9.5	16.3	17.5						
Kyongnam	492.1	112.6	140.4	82.0	15.7	77.7	52.7	0.5			1.4	7.1	2.0
Cheju	7.8	0.1	3.2	4.5									

*자료출처: 2001 전국 폐기물 발생 및 처리현황 (환경부, 국립환경연구원, 2002)

폐기물 소각시설에서 소각하게 된다.

2.2 조사대상 배출원

본 연구에서는 생활폐기물 및 지정폐기물 소각시설을 대상으로 하였으며, 생활폐기물 소각로 3기, 지정폐기물 소각로 1기에 대하여 조사하였으며, 각 시설의 일반현황에 대하여 표 2에 나타내었다.

2.3 배출특성별 수은 조사항목

조사대상 배출원에서 배출되는 수은 배출농도를 형태별로 분석하기 위하여, 대기오염공정시험방법에 따라 배출구에서 시료를 채취하였으며, 시료는 가스상 및 입자상 수은을 동시에 채취하여 각각을 분석하고 총수은농도를 측정하였다. 또한 비산재 중의 수은농도를 분석하기 위하여, 방지시설에서 포집된 fly-

ash를 현장에서 1 kg을 채취하였으며, 대기오염공정시험법상의 입자상 수은 분석방법과 동일하게 분석하였다.

대상배출원에 설치된 기존 집진시설 및 흡수시설의 수은 저감효과를 고찰하기 위하여, 생활폐기물 소각시설의 방지시설 전·후단에서 대기오염공정시험방법에 따라 시료를 채취하여, 각각의 수은 농도를 비교·분석하였다.

표 3에 조사대상 배출원별 수은분석항목을 나타내었다.

2.4 수은 시험방법

2.4.1 대기오염공정시험방법 (EPA Method 101A)

2.4.1.1 시료 채취방법

시료채취장치는 먼저 채취장치와 유사하여 흡인노

Table 2. Characteristics of measured mercury emission sources.

Source	Capacity	Control device	Fuel
MWI #1	50 ton/day	FF	Municipal waste
MWI #2	250 ton/day	SNCR, FF, SDR	Municipal waste
MWI #3	300 ton/day	FF, SCR	Municipal waste
IWI #1	4.7 ton/hr	Cyclone, FF, Scrubber, Absorption tower	Industrial waste

MWI = Municipal Waste Incinerator; IWI = Industrial Waste Incinerator; FF = Fabric Filter; SDR = Semi Dry Reactor; SCR = Selective Catalytic Reactor; SNCR = Selective Non Catalytic Reactor

Table 3. Mercury analysis items of each emission sources.

Source	Method	Control device	Total Hg	Gaseous	Particulate	Fly ash
MWI #1*	Method 101A	Back	○	-	-	-
MWI #2	Method 101A & Ontario hydro Method	Front & Back	○	○	○	○
MWI #3	Method 101A	Back	○	○	○	○
IWI #1*	Method 101A	Back	○	-	-	-

*: 채취된 수은시료로 총수은만을 분석

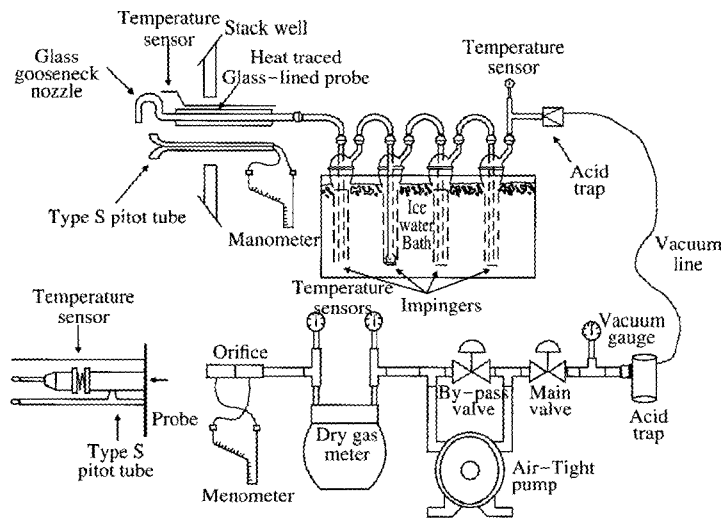


Fig. 1. Mercury sampling train (EPA 101A).

즐, 시료채취관, 피토관, 차압게이지, 임핀저 트레인, 가스 흡인 및 유량측정부 등으로 구성된다(그림 1). EPA Method 101A는 가스상 수은 뿐만 아니라 입자상 수은도 함께 채취하므로 먼지시료를 채취할 때와 마찬가지로 등속흡인을 하였다. 이를 위해 배출가스의 유속, 온도, 압력(동압, 정압), 수분량 등을 측정하여 즉시 등속흡인 유량을 조절하였다. 이 경우 흡인 펌프의 흡인 능력을 감안해 최적의 노출 직경을 선정하고, 필요 유량 확보를 위한 시료채취 시간을 결정하였다.

시료채취관은 석영 유리관을 사용하여 채취시 수분 응축을 방지하기 위해 채취관 출구에서의 가스 온도를 $120 \pm 14^\circ\text{C}$ 로 유지하도록 가열하였다. 흡수액은 4% 과망간산칼륨/10% 황산을 사용하였고, 흡수액 50 ml를 넣은 흡수병 1개와 흡수액 100 ml를 넣은 흡수병 2개로 채취하였다. 사용되는 모든 유리기구는 미리 50% 질산, 물, 8N 염산, 물의 세척단계를 거친 후 최종적으로 증류수로 세척하여 건조시킨 것을 사용하였다. 시료채취가 끝나면 3개의 흡수병에서 채취된 흡수액을 넣은 다음 채취관 노즐, 채취관 연결관, 라이너, 여과지 홀더, 흡수병 등의 세정액을 합하였다. 여과지는 여과지 홀더에서 분리한 다음 100 ml 유리용기에 담고 20~30 ml의 흡수액을 가하였다.

2.4.1.2 분석방법

여과지와 시료 흡수액 각각에 대해 전처리를 행하였다. 100 ml 유리 용기에 담긴 여과지 및 흡수액의 내용물을 각각 250 ml 비이커에 넣고 수욕상(steam bath)에서 액체의 대부분이 증발할 때까지 가열하였다. 20 ml의 진한 질산을 비이커에 넣고 시계 접시로 뚜껑을 덮은 다음 hot plate에서 2시간 동안 70°C 로 가열하였다. 이 용액을 Whatman No. 40 여과지로 여과한 다음 50 ml 용량 플라스크에 넣고 물로 표선을 맞추었다.

시료 흡수액의 전처리에 있어서는 갈색의 이산화망간 입자를 제거하기 위해서 250 ml 용량 플라스크에 담긴 시료 흡수액을 Whatman No. 40 여과지로 여과한 다음 물로 표선을 맞추고, 여과 후 48시간 이내에 분석하였다.

배출원으로부터 등속으로 흡인된 입자상 수은은 여과지에, 가스상 수은은 산성 과망간산칼륨 용액에 채취되고, Hg^{2+} 형태로 채취된 수은을 Hg^0 으로 환원

Table 4. The result of mercury recovery test for Method 101A.

	Conc.	Hg added (μg)	Hg recovered (μg)	Recovery rate (%)
Gaseous Hg	5	1.25	0.841	67.0
	10	2.50	1.895	75.8
	20	5.00	4.420	88.4
	40	10.00	8.260	82.6

기화시켜 원자흡광광도계 (Spectra AA 800, Varian) 파장 253.7 nm로 측정하여 정량하였다.

조작방법은 수은 증공음극 램프로 점등, 안정시킨 후 눈금 실린더를 사용해서 25 ml 증류수를 에어레이션 셀에 첨가하고, 전처리한 시료를 1~10 ml를 적절히 분취하여 넣는다. 병에 테프론으로 코팅된 교반자를 넣고, 에어레이션셀의 bubbler부분에 유리병 부분을 연결한다. Side arm을 통해 염화제일주석 5 ml를 에어레이션셀에 넣고, 15초 동안 용액을 혼합한 다음 기록계를 켜다. 에어레이션셀 출구 마개를 열고 즉시 교반을 시작한 다음 두 개의 연속된 피크 높이가 평균값의 $\pm 3\%$ 이내로 일치할 때까지 검량선 작성에 사용한 절차를 반복한다.

3. 수은 배출특성 조사결과

3.1 수은 회수율 시험

본 연구의 수은 측정결과에 대한 신뢰성과 정확성을 판단하기 위하여 실험실내에서 가스상 및 입자상 수은의 회수율 시험을 실시하였다. 본 회수율 시험은 대기오염공정시험방법에 따라 실시하되, 단지 불필요한 흡수액 양을 줄이기 위하여 회수율 시험의 총량은 250 ml로 하였으며, 가스상 수은과 입자상 수은에 대하여 각각을 분석하였다. 회수율 시험을 위해 가스상 수은의 경우에는 흡수액에, 입자상 수은의 경우에는 여과지에 수은 표준용액을 각각 0 ppb, 5 ppb ($1.25 \mu\text{g}/250 \text{ ml}$ 상당), 10 ppb ($2.5 \mu\text{g}/250 \text{ ml}$), 20 ppb ($5 \mu\text{g}/250 \text{ ml}$), 40 ppb ($10 \mu\text{g}/250 \text{ ml}$)를 첨가하였다.

회수율 시험의 결과를 보면, 가스상 수은의 회수율은 67~88.4% 범위로 나타났으며, 첨가한 수은의 양이 적을 경우 대체적으로 낮은 회수율을 보였다. 이는 적은 양의 수은이 존재할 경우 분석과정에서 비교적 오차가 크게 나타날 수 있음을 의미한다.

Table 5. Actual measurement data of mercury concentration in waste incinerator (2002).

Source	No.	Gaseous Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Particulate Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MWI #1	1	-	-	0.815
	2	-	-	0.394
	3	-	-	1.254
	Avg.	-	-	0.821
MWI #2	1	5.957	0.004	5.961
	2	3.312	0.009	3.321
	3	4.016	0.012	4.028
	Avg.	4.428	0.008	4.437
MWI #3	1	5.685	0.003	5.687
	2	2.552	0.002	2.553
	3	1.277	0.015	1.292
	Avg.	3.171	0.007	3.178
IWI #1	1	-	-	8.800
	2	-	-	4.150
	3	-	-	2.510
	Avg.	-	-	5.158

반면 입자상 수은의 경우에는 첨가한 수은의 양에 상관없이 회수된 수은의 양은 미미하였다. 가스상 수은에 대한 회수율 시험 결과를 표 4에 제시하였다.

3.2 수은 분석결과

대기오염공정시험방법에 준하여 2002년도에 조사한 폐기물 소각시설에서의 수은농도 조사결과를 표 5에 나타내었다. 지정폐기물 소각시설인 IW1 #1의 경우, 총 수은농도가 2.5~8.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 생활폐기물 소각시설의 경우에는, 총 수은농도가 최소 0.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최대 5.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 생활폐기물 소각시설의 평균 수은 농도값은 2.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 생활폐기물 소각시설에 비해 지정폐기물 소각시설에서의 조사 횟수가 적어 단적인 비교는 없으나 조사결과만을 비교했을 때 생활폐기물 소각시설에 비해 지정폐기물 소각시설에서 좀 더 많은 수은이 배출되는 것으로 조사되었다. 일반적으로는 생활폐기물 소각시설의 수은배출농도가 높게 나오는 것으로 보고되고 있는 바 본 연구의 조사결과에서 비교적 낮은 농도를 보인 이유는 최근의 쓰레기 분리수거가 비교적 안정되게 이루어지고 있어 생활폐기물 소각시설에서 소각되는 폐기물에 수은이 과거에 비하여 적게 함유되어 있기 때문인 것으로 사료된다. 이는 폐기물중 수은 함유율이 높아 소각시설에서의 수은 배출 농도

Table 6. Actual measurement data of mercury concentration in waste incinerator (2000).

Source	Gaseous Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Particulate Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Total Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MWI-A	25.31	0.40	25.70
MWI-B	21.61	1.25	22.86

Table 7. Ratio between gaseous and particulate mercury concentration.

Source	No.	Gaseous Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Particulate Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Gaseous Hg ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
MWI #2	1	5.957	0.004	99.93
	2	3.312	0.009	99.74
	3	4.016	0.012	99.70
	Avg.	4.428	0.008	99.79
MWI #3	1	5.685	0.003	99.95
	2	2.552	0.002	99.93
	3	1.277	0.015	98.82
	Avg.	3.171	0.007	99.57

가 높다고 보고한 결과(전미경, 1999)와 상반된다.

본 연구팀이 2000년도에 조사한 생활폐기물 소각시설에서의 수은농도 결과를 보면 2002년에 조사한 결과에 비하여 상당히 높게 나오는 것을 알 수 있다(표 6). MWI-A와 MWI-B는 각각 겨울과 봄철에 조사한 결과를 나타내며, MWI-A의 경우는 25.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, MWI-B의 경우는 22.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

3.3 가스상 및 입자상 수은의 분포

굴뚝에서 배출되는 총수은 중 가스상 수은과 입자상 수은의 배출특성을 분석하기 위하여 각 배출시설별로 가스상 및 입자상 수은 측정시료를 각각 분리하여 채취하였다. 시료채취 및 분석은 대기오염공정시험방법을 이용하였으며, 분석 결과를 표 7에 나타내었다. 표에서 보는 것과 같이, 가스상으로 배출되는 수은의 비율은 99% 이상으로 대부분의 수은이 가스상으로 배출되고 있음을 알 수 있었다. 이는 99% 이상이 가스상으로 배출된다고 보고한(M.B. Chang *et al.*, 1999) 자료와 유사한 수준으로 보여진다.

3.4 비산재 중 수은함유량 조사결과

생활폐기물 소각시설의 방지시설에서 포집된 비산재 중 수은농도 조사결과를 표 8에 나타내었다. 표에서 보면 생활폐기물 소각시설의 여과집진기의 경우

Table 8. Mercury concentration in the fly ash.

Source	Control device	Hg (mg/kg-fly ash)
MWI #2	SDR	1.557
	FF	35.607
MWI #3	Gas cooler	2.864
	FF	16.217

Table 9. Mercury concentrations at the front and back of control device.

Source	Control device	No.	Front (µg/m ³)	Back (µg/m ³)	Efficiency (%)
MWI #2	SNCR, SDR, FF	1	45.67	2.67	94.15
		2	62.65	3.49	94.43
		3	33.45	0.88	97.37
		4	45.71	1.33	97.09
		평균	46.87	2.09	95.54

는 16.2~35.6 mg/kg, 반전식알카리흡수탑(SDR)에서는 1.6 mg/kg, Gas Cooler에서는 2.9 mg/kg로 나타났다.

3.5 방지시설 전단 및 후단에서의 수은농도

기존에 설치 운영되고 있는 방지시설에서의 수은 제거 효과를 알게 되면 수은저감정책을 수립하는데 중요한 기초자료로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 조사대상 시설 중 도시지역에 있으면서 지역 대기질에 직접 영향을 줄 수 있는 생활폐기물 소각시설을 대상으로 저감효율을 조사하였다.

수은 저감효율은 생활폐기물 소각시설(MWI #2)의 방지시설 전단 및 후단에서의 수은 농도를 측정하여 조사하였다. 조사대상 MWI #2는 선택적비촉매반응시설(SNCR), 반전식알카리흡수탑(SDR), 반응식여과집진기(FF) 순으로 방지시설을 설치하여 가스상 및 입자상 오염물질을 제거하고 있었으며, 본 연구에서의 방지시설 전단 측정위치는 반전식알카리흡수탑 전단에서 측정을 하였고, 방지시설 후단 측정위치는 굴뚝과 연결되는 최종 시설인 여과집진기 후단에서 측정을 하였다.

표 9에 방지시설 전단/후단에서 측정한 수은 농도 및 방지시설에 의한 수은 제거효율을 나타내었다. 방지시설 전단에서의 수은농도는 평균 46.87 µg/m³ (33.45~62.65 µg/m³)이었으며, 후단에서의 농도는 평균 2.09 µg/m³ (0.88~3.49 µg/m³)으로써, 반전식알카

리흡수탑과 여과집진기에 의한 총괄수은 제거효율은 95.54%로 비교적 높은 제거효율을 보이고 있다. 따라서 생활폐기물 소각시설 중 방지시설이 비교적 잘 갖추어 있는 시설의 경우에는 배출수은의 상당부분이 방지시설에서 제거될 수 있는 것으로 사료되나, 이는 대규모 소각시설에 국한하여 조사한 결과로써 향후 중소형 소각시설 등 보다 많은 시설에 대한 조사를 통하여 확인해야 할 것으로 사료된다. M.B. Chang *et al.* (1999) 등에 의하면 생석회 세정기 및 여과집진기를 갖춘 폐기물 소각시설의 경우 방지시설 전단에서의 수은 농도가 196 µg/m³, 후단이 119 µg/m³로 제거율이 29.6%로 나타났고, 전기집진기 및 습식세정기를 갖춘 생활폐기물 소각시설의 경우 방지시설 전단이 82.9 µg/m³, 후단이 44.8 µg/m³로 처리효율은 45.9%로 나타났다. 이는 우리나라의 경우 폐기물의 분리수거, 무수은 전전지의 보급 등으로 소각로에 유입되는 폐기물 중의 수은함량이 감소한 결과 방지시설 전단의 수은농도가 낮아진 것으로 판단되며, 후단의 경우 소각로에서의 다이옥신 집중관리 등으로 방지시설에 대한 개선노력의 결과로 판단된다.

4. 수은 배출계수

4.1 배출계수 산정방법

수은 배출원의 배출계수를 산정하기 위하여 측정된 실측조사 결과를 토대로 배출원별 수은 배출계수를 산정하였다. 배출계수는 단위 연료 사용량(ton)당 배출량(mg)으로 제시하였으며, 배출계수 산정방법은 다음 식과 같이 계산하였다. 각 배출원에 대한 배출계수의 단위는 [mg-수은배출량/ton-폐기물의 단위소각량]이다.

$$\frac{\text{Hg 농도}(\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{전조배출가스 유량}(\text{m}^3/\text{hr}) \times 10^{-3}}{\text{연료사용량}(\text{ton}/\text{hr})} \quad [\text{mg}/\text{ton}]$$

4.2 수은 배출계수 산정결과

개별 소각로에 대한 수은배출계수 산정결과, 여과집진기가 설치되어 있는 하루에 50ton의 생활폐기물을 소각하는 시설에서 1ton의 폐기물을 소각할 경우 최소 3.67 mg에서 최대 11.67 mg의 수은이 대기중으로 배출되는 것으로 나타났다. 선택적비촉매반응시설, 반전식알카리흡수탑, 여과집진기가 설치된 시설

Table 10. Emission factors of mercury in waste incinerator.

Source	Capacity	Control device	Fuel	Hg concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EF (mg/ton)
MWI #1	50 ton/day	FF	Municipal waste	0.821 (0.394~1.254)	7.642 (3.67~11.67)
MWI #2	250 ton/day	SNCR, SDR, FF	Municipal waste	1.995 (0.613~5.961)	9.048 (2.6~24.5)
MWI #3	300 ton/day	SCR, FF	Municipal waste	3.177 (1.292~5.687)	12.046 (4.19~22.04)
IWI #1	4.7 ton/hr	Cy., Sc., FF, AT	Industrial waste	5.153 (2.510~8.800)	112.818 (54.9~192.7)

MWI = Municipal Waste Incinerator
 IWI = Industrial Waste Incinerator
 FF = Fabric Filter
 SDR = Semi Dry Reactor
 SCR = Selective Catalytic Reactor
 SNCR = Selective Non Catalytic Reactor
 Cy. = Cyclone
 Sc. = Scrubber
 AT = Absorption tower

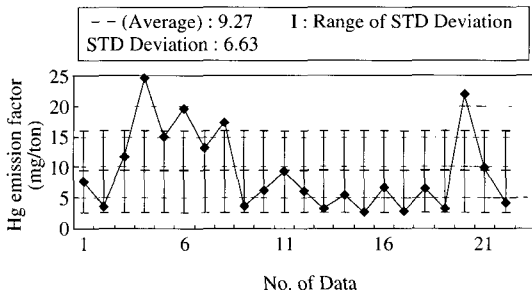


Fig. 2. Statistical data for emission factors of mercury in municipal waste incinerator.

의 경우에는, 1 ton의 생활폐기물을 소각할 경우 최소 2.6 mg에서 최대 24.5 mg의 수은이 배출되며, 선택적 촉매반응시설과 여과집진기가 설치된 시설은 4.19~22.04 mg의 수은이 배출되는 것으로 조사되었다. 한편, 원심력집진기, 여과집진기, 세정집진기 및 흡수탑이 설치된 지정폐기물을 소각하는 시설에서는 1 ton의 폐기물을 소각할 경우 54.9~192.7 mg의 수은이 배출되는 것으로 조사되었는 바, 생활폐기물 및 지정폐기물을 소각하는 시설의 평균적인 수은 배출계수는 각각 9.27과 112.82로 산정되어서 지정폐기물을

Table 11. Statistical data for emission factors of mercury in waste incinerator.

Source	No.	EF (mg-Hg/ton-Muni. or Indu. Waste)			
		Avg.	Estimate range		SD
			Min.	Max	
MWI	22	2.60	9.27	24.50	6.63
IWI	3	112.82	54.95	192.65	71.43

Table 12. EPA AP-42 emission factors of mercury in municipal waste incinerator.

Source	EF (mg-Hg/ton-Municipal Waste)							
	Uncontrolled	Rating	ESP	Rating	SD/ESP	Rating	SD/FF	Rating
MWI	2,800	D	2,800	D	210	B	146	D

주) ESP = electrostatic precipitator; SD = Spray Dryer; FF = Fabric Filter

소각하는 시설이 생활폐기물을 소각하는 시설보다 많은 양의 수은을 배출하는 것으로 나타났다. 표 10에 배출원별로 배출시설 현황, 수은농도 및 배출계수를 제시하였으며, 그림 2에서는 이들 생활폐기물 소각시설에 대한 개별 수은배출계수, 계수의 평균, 표준편차 등을 제시하였고, 표 11에서는 본 연구에서 산정된 폐기물 소각시설에 대한 수은배출계수의 평균 자료를 제시하였다.

미국 EPA의 생활폐기물 소각로에 대한 수은배출계수는 방지시설이 없을 경우와 전기집진기가 설치된 시설의 경우는 2,800 mg/ton으로 수은에 대하여는 전혀 방지효율이 없는 것으로, 반건식 세정기와 전기집진기가 설치된 경우 210 mg/ton으로 약 93%의 제거효율을, 그리고 반건식 세정기와 여과집진기가 설치된 경우에는 146 mg/ton으로 약 95%의 제거효율을 나타내고 있다고 보고하고 있다. 본 연구에서 산정한 배출계수와 비교하여 보면, 본 연구결과가 EPA 배출계수보다 상당히 낮게 조사되었다. 이는 미국과 우리나라의 소각시설, 소각조건, 폐기물 성상 등이 서로 다른 것에 기인한 것으로 사료되는데 특히, 우리나라의 경우 철저한 분리수거 및 수은함유 일반생활용품의 생산이 줄었으며, 대형 생활폐기물 소각시설의 경우 대부분 SDR, FF을 기본으로 채택하고 있으며, 여기에 SNCR 등을 추가로 설치했기 때문으로 사료된다. EPA AP-42에서 제시하고 있는 생활폐

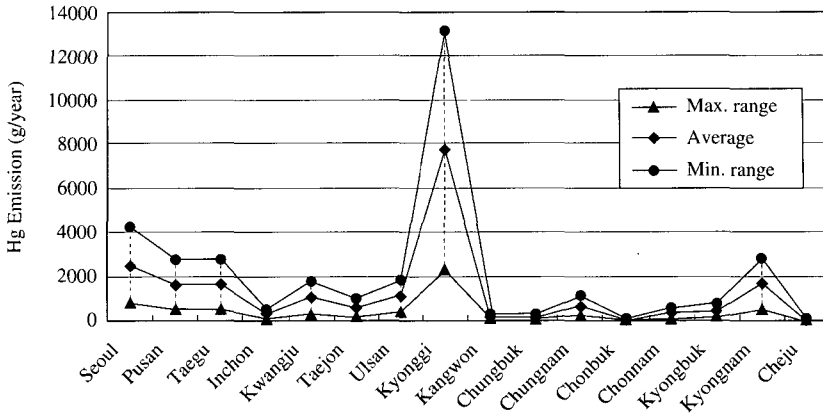


Fig. 3. Estimated mercury emissions emitted from municipal waste incinerator in Korea.

기물 소각시설에 대한 수은배출계수를 표 12에 제시하였다.

4.3 생활폐기물 소각에 따른 수은 배출량 추정

본 연구에서 산정된 수은 배출계수를 이용하여 비교적 측정 데이터가 많은 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 수은의 양을 추정하였다.

본 연구결과의 배출계수를 사용하여, 각 시·도별 일일 및 연간 수은배출량을 추정하였다. 생활폐기물 소각시설로부터 대기로 배출되는 수은의 총량은 연간 평균 20.0 kg (최소 6.0 kg에서 최대 33.9 kg)으로 조사되었다. 지역별로는 경기도가 7.8 kg/yr (2.3~13.2 kg/yr)으로 가장 많은 양의 수은을 배출하고 있으며, 그 다음으로 서울이 2.5 kg/yr (0.8~4.2 kg/yr)을 배출하며, 경상남도가 1.7 kg/yr (0.5~2.8 g/yr) 순으로 배출하는 것으로 조사되었으며, 그림 3에 산정된 배출량 결과를 제시하였다.

5. 결 론

대형 생활폐기물 소각시설 및 지정폐기물 소각시설을 대상으로 입자 및 가스상 수은의 분포, 방지시설의 수은제거 효율 등 수은 배출특성을 조사하여 수은의 배출계수 및 배출량을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폐기물 소각시설에서의 수은농도를 조사한 결

과 배출가스 중 수은 농도는 지정폐기물 소각시설이 2.5~8.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 생활폐기물 소각시설이 0.39~5.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되어, 지정폐기물 소각시설에서 수은 배출농도가 높은 것으로 나타나고 있다.

2) 배출가스 중 입자상 수은과 가스상 수은의 분포를 조사해 본 결과, 수은 배출원에서 배출된 수은은 99% 이상이 가스상으로 배출되고, 나머지가 입자상으로 배출되는 것으로 나타나 배출가스 중 수은의 대부분은 가스상으로 배출된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 수은의 효과적인 제거를 위해서는 가스상 수은의 처리가 중요하다는 결론을 얻었다.

3) 생활폐기물 소각시설의 기존방지시설에 대한 수은 제거효과를 분석한 결과, 방지시설 전단에서의 수은농도는 46.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (33.45~62.65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며, 후단에서의 농도는 2.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.88~3.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 나타나 반건식알카리흡수탑과 여과집진기로 조합된 방지시설에서의 수은제거효율은 95.54%로 조사되었다. 이는 다이옥신의 배출억제 등 소각시설에 대한 적극적인 방지시설의 운영에 의해 배출수은의 상당부분이 제거되고 있음을 보여준다.

4) 생활폐기물 소각시설에 대한 수은배출계수를 산정한 결과 여과집진기가 설치된 시설은 3.7~11.7 mg/ton, 선택적비촉매반응시설, 반건식알카리흡수탑, 여과집진기가 설치된 시설은 2.6~24.5 mg/ton, 선택적촉매반응시설과 여과집진기가 설치된 시설은 4.2~22.0 mg/ton으로 나타났으며, 원심력, 여과, 세정집진기 및 흡수탑이 설치된 지정폐기물을 소각하는 시

설의 배출계수는 54.9~192.7 mg/ton로 나타나 방지 시설의 종류에 따른 차이가 매우 큰 것으로 조사되었다.

5) 생활폐기물 소각시설에서 배출되는 수은의 양을 추정된 결과, 생활폐기물 소각시설로부터 대기로 배출되는 수은의 총량은 연간 평균 20.0 kg/yr (6.0~33.9 kg/yr)으로 조사되었다. 지역별로는 경기도가 7.8 kg/yr (2.3~13.2 kg/yr)으로 가장 많은 양의 수은을 배출하고 있으며, 그 다음으로 서울, 경상남도, 대구 순이었다.

6) 본 연구는 생활폐기물 소각시설 3개 및 지정폐기물 소각시설 1기에서 조사한 결과로써, 향후보다 많은 시설에 대한 추가적인 조사를 통하여 측정결과 의 대표성을 확보할 필요가 있다. 또한, 향후 소각시설에서의 수은 중 구분 및 물질수지 확인에 대한 연구 수행이 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강경희(2000) 대기 배출원의 수은 배출특성에 관한 연구, 건국대학교 대학원 석사학위 논문.
- 국립환경연구원(2002) 유해대기오염물질 배출시설의 중금속 배출계수 개발 최종 보고서.
- 전미경, 박석순(1999) 소각장 환경영향평가지 수은 배출계수에 관한 연구, 환경영향평가, 7(2), 113-126.
- Chang, M.B., H.T. Wu, and C.K. Huang (2000) Evaluation on speciation and removal efficiencies of mercury from municipal solid waste incinerators in Taiwan, *The science of the total environment*, 246, 165-173.
- Krishnan, S.V., B.K. Gullette, and W. Jozewicz (1997) Mercury control in municipal waste combustors and coal-fired utilities, *Environ. Prog.*, 16, 47-53.
- USEPA (1996) National Mercury Emission Trend.
- Vogg, H. (1987) Behavior of metals in the incineration of municipal wastes, *Int Chem Eng*, 4, 65-74.