

중·소형 폐기물 소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌 배출특성

이한국[†] · 문부식* · 이동훈*

한국생활환경시험연구원 · *서울시립대학교 환경공학부

(2005년 10월 28일 접수, 2005년 11월 25일 채택)

A Characteristics of Hg, Pb, As and Se Emitted from Small and Medium Size Waste Incinerator Stacks

Han-Kook Lee[†] · Bu-Shik Moon* · Dong-Hoon Lee*

Korea Environment and Merchandise Testing Institute · *Department of Environmental Engineering, University of Seoul

ABSTRACT : This study was carried out to investigate the emission characteristics of volatile metals(Hg, As, Se) and semi volatile metals such as Pb from small and medium size municipal solid waste incinerators(MSWIs). The concentrations of Hg, Pb, As and Se in emission gas from small size waste incinerators were higher than those of medium size waste incinerators. This is probably due to less air pollutant control devices and high emission gas temperature of the small size waste incinerators relative to the medium size waste incinerators. Emission gas temperature from small and medium size waste incinerators were divided into 2 groups. The first group was about 100°C and the second group in the range of 400~700°C. The concentrations of emission gas at the second group were Hg 70.43 µg/Sm³, Pb 0.94 mg/Sm³, As 9.83 µg/Sm³ and Se 5.05 µg/Sm³. The concentrations of Hg, Pb, As and Se at the first group were lower than those found at the second group. Besides, the removal efficiencies of Hg in medium size waste incinerators were 55.2~95.9%. Emission gas temperature reduction from waste heat boiler(WHB) contribute to control of Hg. Based on above results, we postulate that the temperature of flue gas should play a very important role in volatile metal control in small and medium size MSWIs. In order to improve the volatile metals removal efficiency, the temperature of cooling system must be controlled and the air pollution control device should be operated properly.

Key Words : Municipal Solid Waste Incinerator(MSWI), Hg, Pb, As, Se, Temperature, Waste Heat Boiler(WHE)

요약 : 본 논문은 중소형 규모의 도시고형 폐기물소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌과 같은 휘발성중금속의 방출특성을 조사하는데 있다. 대체로, 소형 도시고형 폐기물소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌이 중형 소각시설에서 배출되는 것 보다 높게 나타났다. 이는 중형소각시설에 비하여 소형소각시설의 빈약한 대기오염제어장치의 가동과 높은 배가스 온도에 기인하는 것으로 판단된다. 중소형 소각시설의 배가스 온도는 2개의 온도그룹으로 나누어지는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 온도그룹은 대략 100°C이고, 두 번째 온도그룹은 400~700°C 정도였다. 2번째 그룹에서의 배가스 중 수은, 납, 비소, 셀렌은 각각 70.43 µg/Sm³, 0.94 mg/Sm³, 9.83 µg/Sm³, 5.05 µg/Sm³였다. 첫 번째 온도그룹에서 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌은 두 번째 온도그룹의 것보다 낮은 특징을 가지고 있다. 한편, 중형소각시설에서의 수은제거효율은 55.16~95.89%로 나타났다. 이러한 수은의 감소는 폐열보일러의 온도저감이 기여를 하고 있었다. 상기 결과로, 중소형 소각시설에서 휘발성 중금속 제어에 중요한 역할을 하는 것은 배가스의 온도가 큰 역할을 한다. 따라서, 휘발성 중금속의 제거효율을 개선하기 위해서는, 냉각시스템의 온도가 제어되고 대기오염제어장치가 잘 운영되어야 한다.

주제어 : 도시고형폐기물소각시설, 수은, 납, 비소, 셀렌, 온도, 폐열보일러

1. 서론

국내 폐기물 관리정책은 폐기물의 발생량 자체를 우선적으로 줄이며, 발생된 폐기물은 환경적으로 안전하고 위생적인 처리를 위한 “자원순환형 폐기물관리체계”를 정착시키는 것에 목표를 두고있다.¹⁾ 이러한 정책으로 2002년도에 “제2차 국가 폐기물관리 종합계획”을 확정하였으며 2011년까지 생활폐기물의 소각비율을 30%로 증가시킬 계획에 있다.²⁾ 그

러나, 소각비율 증가에 따른 유해 배가스 물질과 소각재에 대한 환경문제가 부각되고 있다.³⁾ 이러한 상황에서 국내 가동중인 폐기물 소각시설은 2002년 기준으로 총 6,168 개소 중 대형 소각시설(소각용량 2,000 kg/hr 이상)이 2.1%, 중형 소각시설(소각용량 200~2,000 kg/hr)과 소형 소각시설(소각용량 200 kg/hr 미만)이 97.9%로 중·소형 소각시설의 비율이 큰 것을 알 수 있다.⁴⁾ 대형 소각시설에서 배출되는 대기오염물질을 비롯한 유해중금속은 대기오염 방지시설을 이용하여 효과적인 제어가 가능하다. 그렇지만 중·소형 소각시설은 시설 및 유지관리가 소홀하여 환경문제로 지적되고 있다.⁵⁾ 더욱이, 폐기물 소각시 증기상으로 존재하는 수은, 비

[†] Corresponding author

E-mail: lhkkorea@hanmail.net

Tel: 02-2102-2519

Fax: 02-856-5618

소, 셀렌과 같은 휘발성 중금속⁶⁾과 준휘발성중금속인 납¹⁶⁾과 같은 중금속들은 입자상 물질의 방지설비만으로는 효과적으로 제거할 수 없다고 알려져 있기 때문에 이에 대한 실태 파악 및 대책수립이 시급한 상황에 있다.⁷⁾ 미국, 독일 같은 선진국에서는 폐기물 소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소를 미량 유해물질로 분류하고 있다. 현재 국내 소각시설에서 배출되는 배가스의 수은, 납, 비소 기준치와 비교하여 보다 엄격히 규제하고 있다. 특히, 미국과 일본의 경우는 수은, 납, 비소 뿐만아니라 셀렌의 대기 중 유해성에 대해서도 오래 전부터 인식하고 있어서 석탄화력발전소 및 도시고형폐기물 소각시설의 배가스 모니터링을 꾸준히 하고 있다.^{8,9)} 한편, 우리나라도 선진국들의 소각정책에 발맞추어 2005년부터는 셀렌을 제외한 수은(0.1 mg/Sm^3), 납(대형 0.2 , 중형 1.6 , 소형 5 mg/Sm^3), 비소(0.5 mg/Sm^3)의 기준치가 강화되었다. 그러나, 현재 국내 가동중인 중·소형 소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌과 같은 휘발성 중금속에 대한 배출농도 및 배출량에 대한 자료와 평가는 극히 일부이며, 이에 대한 환경안전성 또한 검증되지 못하고 있다. 더욱이, 실제 가동중인 소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌의 배출형태를 체계적으로 파악하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 환경유해성이 큰 휘발성중금속에 대한 환경안전성을 위한 대책 수립이 중요한 것으로 판단된다.¹⁰⁾ 특히, 휘발도가 가장 큰 수은의 경우는 발암성 및 독성이 매우 높아서 미 EPA 뿐만아니라 대부분의 나라에서는 유해화학물질로 분류하고 법적 가이드라인 마련되는 등 매우 유해한 원소이다. 한편, 이러한 수은을 비롯한 납, 비소, 셀렌은 화력발전소나 폐기물소각시설이 가장 큰 배출원으로 지목되기 때문에 이의 환경 중 측정자료 및 배출특성평가는 매우 중요하리라 생각된다.^{11,12)} 따라서, 본 연구는 국내 가동중인 폐기물 소각시설 중 배출실태 정립이 안된 중·소형 소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌의 배출특성 파악에 목적을 두고 있다. 이러한 배출특성 파악에 있어서는, 실측된 도시고형 폐기물 소각시설 배가스 온도에 따른 휘발성중금속 중 수은, 납, 비소, 셀렌의 배출특성 파악을 하였고, 휘발성중금속 중 휘발성 및 환경유해성이 가장 큰 수은에 대하여 폐열보일러의 수은배출 억제효과를 파악하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 소각시설 개요

본 연구에 선정된 총 50개의 중·소형 폐기물 소각시설은 Table 1에 개괄적으로 특징을 정리하였다. 중·소형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌의 측정분석에 있어서, 수은과 납은 총 50개 소각시설에 대하여 적용하였으며, 비소와 셀렌은 중형 5개 시설(MR1, MR4, MG4, MG6, MG7)과 소형 8개 시설(SR3, SR4, SR5, SG8, SS1, SS2, SS8, SS10)의 분석시료 손실로 총 37개 소각시설을 적용하였다. 중형폐기물 소각시설(소각능력 200-2,000 kg/hr)의 경우 생활

폐기물 소각시설 4개, 사업장 일반폐기물 및 지정폐기물 소각시설에 대하여 각각 8개씩 총 20개 시설을 대상으로 하였다. 소각로의 구조에 따라서 분류하면, 화격자 방식 12개 시설, 로터리 킬른 4개 시설, 열분해 3개 시설, 분무식 1개 시설로서 본 연구대상 소각시설에서는 절반 이상이 화격자 방식을 채택하고 있었다.

중형폐기물 소각시설에서 채택하고 있는 주된 대기오염 방지시설은 싸이클론(Cyclone), 멀티싸이클론(Multi-Cyclone), 반건식/여과집진기(Spray Dryer Absorber/Bagfilter), 전기집진기(Electrostatic Precipitator) 등으로 구성되어 있었다. 중형 폐기물 소각시설은 대체로 3가지 이상의 대기오염 방지시설을 갖추고 있으며, 이 중에서 6가지(냉각설비 포함) 방지시설을 갖춘 소각시설도 3개소였다. 중형폐기물 소각시설의 냉각설비는 1개 시설을 제외한 모든 시설에서 폐열보일러(Waste Heat Boiler) 및 냉각탑(Cooling Tower)이 설치되어 있었다. 소형 소각시설(소각능력 200 kg/hr 미만)은 생활폐기물 소각시설, 사업장 일반폐기물 소각시설, 사업장 지정폐기물 소각시설에 대하여 각각 10개씩 총 30개 시설을 대상으로 하였다. 소형폐기물 소각로 구조는 상연소 22개 시설, 화격자 7개 시설, 분무식 1개 시설로 상연소 방식이 주된 소각로 구조였다. 소형폐기물 소각시설의 주된 대기오염 방지시설은 싸이클론과 여과집진기 등으로 구성되는 편이다. 싸이클론만을 설치한 소각시설은 16개 시설로 절반이상 이었다. 또한, 냉각설비는 총 30개 소각시설 중에서 10개 소각시설만이 갖추고 있었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 시료채취

중소형 폐기물 소각시설 굴뚝 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 시료의 채취는 중형 소각시설에서 2회, 소형 폐기물 소각시설에서 3회씩 실시하였다. 시료채취는 대기오염 공정시험법에 의거하였다. 가스상 및 입자상의 휘발성 중금속을 채취하므로 등속흡인을 확인하면서 시료를 채취하였다(Fig. 1) 시료 채취관은 석영 유리관을 사용하였으며, 시료 채취시 수분 응축을 방지하기 위하여 채취관 출구에서의 가스 온도를 $120 \pm 14^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 그러나, 배가스 온도가 500°C 를 초과하는 경우는 고온용 시료채취관을 사용하여 배가스를 냉각한 후 시료를 채취하였다. 입자상과 가스상의 수은, 납, 비소, 셀렌 흡수액은 산성 과망간산칼륨 용액(4% $\text{KMnO}_4/10\% \text{H}_2\text{SO}_4$)에 채취하였다. 사용하는 모든 유리기구는 50% 질산, 물, 8N 염산, 물의 세척단계를 거친 후 최종적으로 증류수로 세척하여 건조시킨 것을 사용하였다.¹³⁾ 시료채취가 끝나면 250 mL 유리용기에 채취한 흡수액과 채취관 노즐, 연결관, 라이너, 여과지 홀더, 흡수병 등의 세정액을 합하였다. 흡수액에 남아있는 침전물은 8N 염산 25 mL로 세정하여 다른 저장용기에 회수하였다. 여과지는 여과지 홀더에서 분리한 다음 100 mL 유리용기에 담고 20-30 mL의 흡수액을 가하였다.¹⁴⁾

Table 1. Operating conditions of small and medium size waste incinerators

Incinerators	Run Time (hr)	Type	Capacity (kg/hr)	Facilities Process	Waste Type	Incinerator Scale
MR1	13	Stoker	1,500	CC-WHB-AP-CY-SDA/BF-Stack	Residential	
MR2	8	Stoker	1,250	CC-WHB-AP-MC-SDA/BF-Stack		
MR3	8	Stoker	1,000	CC-WHB-CY-SDA/BF-Stack		
MR4	5	Stoker	625	CC-WHB-SDA/BF-Stack		
MG1	24	Stoker	1,200	CC-CT-SDA/BF-Stack	General Industrial	Medium size
MG2	24	Stoker	1,900	CC-WHB-HE-MC-WS-Stack		
MG3	24	Stoker	1,700	CC-WHB-CY-WS-RS-PT-Stack		
MG4	8	Stoker	866	CC-WHB-MC-EP-Stack		
MG5	24	Stoker	400	CC-WHB-CY-SDA/BF-Stack		
MG6	24	Stoker	1,600	CC-WHB-MC-WS-Stack		
MG7	16	Pyrolysis	450	CC-WHB-WS1-WS2-WS3-Stack		
MG8	24	Pyrolysis	400	CC-WHB-MC-BF-WS-PT-Stack		
MS1	24	Rotary kiln	1,950	CC-AP-CT-EP-Stack	Special Industrial	
MS2	24	Stoker	1,830	CC-WHB-SDA/BF-Stack		
MS3	24	Spray combustion	460	CC-WHB-AP-CY-VS-PT-Stack		
MS4	23	Rotary kiln	1,000	CC-WHB-HE-CY-VS-PT-Stack		
MS5	16	Rotary kiln	400	CC-WHB-AP-CY-ST-VS-WS-Stack		
MS6	16	Stoker	500	CC-WHB-AP-CY-SDA/BF-Stack		
MS7	24	Pyrolysis	250	CC-HE-MC-WS1-WS2-Stack		
MS8	24	Rotary kiln	1,700	CC-CT-CY-SDA/BF-WS-PT-Stack		
SR1	8	Fixed bed	130	CC-CY-Stack	Residential	
SR2	4~5	Fixed bed	150	CC-CY-Stack		
SR3	8	Fixed bed	150	CC-WHB-CY-BF-Stack		
SR4	8	Fixed bed	120	CC-CY-WS-Stack		
SR5	8	Fixed bed	120	CC-CY-WS-Stack		
SR6	4	Fixed bed	80	CC-CY-Stack		
SR7	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SR8	8	Stoker	95	CC-CY-Stack		
SR9	6~8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SR10	8	Fixed bed	95	CC-WHB-CY-SDA-BF-Stack		
SG1	8	Stoker	95	CC-HE-BF-Stack	General Industrial	Small size
SG2	24	Fixed bed	195	CC-WHB-BF-Stack		
SG3	10	Fixed bed	120	CC-WHB-CY-WS- BF-Stack		
SG4	4 (2-3 in eekly)	Fixed bed	100	CC-HE-CY-WS-PT-Stack		
SG5	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SG6	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SG7	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SG8	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SG9	8	Stoker	95	CC-CY-Stack		
SG10	5	Stoker	80	CC-CY-Stack		
SS1	5	Stoker	190	CC-WHB-SDA-BF-Stack	Special Industrial	
SS2	6-7	Stoker	190	CC-WHB-SDA-BF-Stack		
SS3	18	Fixed bed	190	CC-CY-SDA-BF-Stack		
SS4	10	Fixed bed	180	CC-WHB-HE-BF-CY-WS-Stack		
SS5	4	Fixed bed	50	CC-CY-WS-Stack		
SS6	24	Spray combustion	125	CC-WHB-AP-WS-Stack		
SS7	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SS8	8	Fixed bed	95	CC-CY-Stack		
SS9	8	Stoker	40	CC-CY-Stack		
SS10	8	Fixed bed	60	CC-CY-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, VS: Venturi Scrubber, RS: Rotary Scrubber

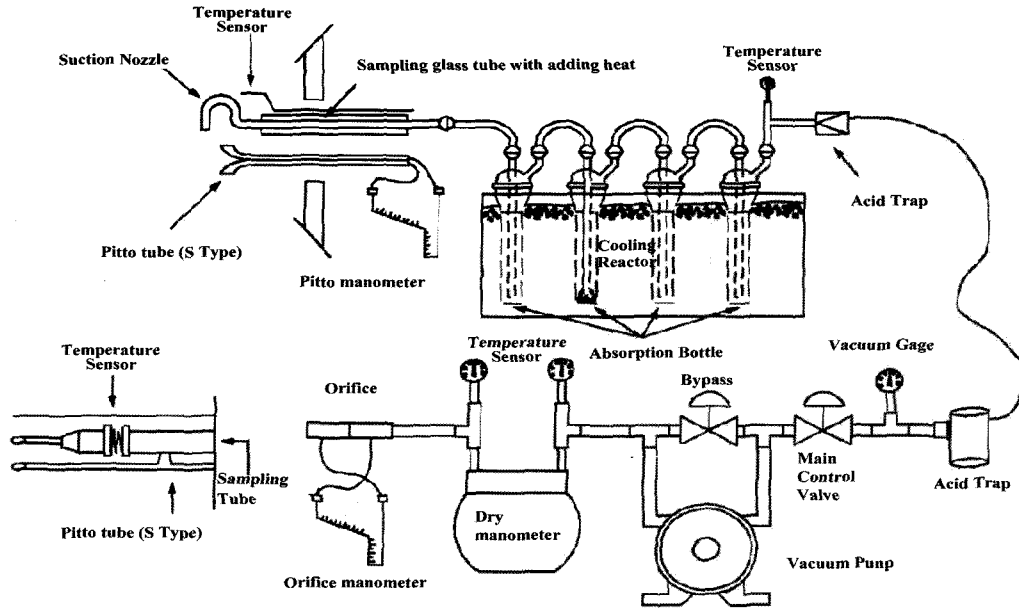


Fig. 1. Sampling train for volatile metals in emission gas.

2.2.2. 시료의 전처리와 분석

채취한 시료의 전처리는 대기오염 공정시험법에 의거하였다. 전처리의 구분은 여지, 흡수액, 염산세정액으로 분류하였다. 100 mL 유리 용기의 채취 완료된 여과지는 250 mL 비이커에 넣고 수용상에서 액체의 대부분이 증발할 때까지 가열하였다. 이후 20 mL의 진한 질산을 비이커에 넣고 시계접시로 뚜껑을 덮은 다음 가열판에서 2시간 동안 70-80℃로 가열하였다. 이 용액은 여과지(Whatman No.40)로 갈색의 이산화망간 입자를 제거하기 위하여 여과지(Whatman No.40)로 여과한 흡수액에 더한후 1,000 mL로 하여 48시간 이내에 분석하였다. 흡수액을 여과한 여과지는 8N 염산 25 mL를 가한 후 최소 24시간 동안 입자를 삭힌다. 염산 세정액의 내용물과 함께 500 mL 용량플라스크에 여과지로 여과 후 증류수로 표선을 맞추었으며, 전처리 완료된 시료는 48시간 이내에 분석하였다. 분석에 사용한 기기는 유도결합플라즈마발광광도계(ICPs-1000IV, Shimadzu)에 HVG(Hydride Vapor Generator)를 이용하여 수은(검출한계 : 0.0001 mg/L), 납(검출한계 : 0.0001 mg/L), 비소(검출한계 : 0.0001 mg/L), 셀렌(검출한계 : 0.0001 mg/L)을 분석하였다.

2.3. 폐열보일러의 수은배출 억제효과

휘발성중금속 중 수은은 납, 비소, 카드뮴 보다 휘발성 및 유해성이 가장 크며, 소각시설에서 발생하는 수은의 환경거동은 온도에 지배적이다.¹⁸⁾ 또한, 소각시설에서 프로세스별 수은의 거동과 및 수은배출특성은 다양한 온도변화에 종속된다. 따라서, 소각시설의 프로세스별 배출되는 수은을 온도변화를 중심으로 파악하는 것이 필요하다. 폐열보일러의 수은배출 억제효과 파악을 위하여 선정된 소각시설은 중형 폐기물 소각시설 중 MR2, MR3, MG5, MG6, MS5로 하였다. 소형 폐기물 소각시설 중에도 폐열보일러(WHE)가 있는

소각시설도 있지만 대체로 소형소각시설들은 소각로 이후 굴뚝까지의 프로세스는 단순한 구성으로 되어 있는 것이 많았다. 더욱이 소형 폐기물 소각시설은 중형 폐기물 소각시설에 비하여 온도 및 배출되는 휘발성 중금속 농도가 매우 크기 때문에 폐열보일러의 수은배출 억제효과를 파악하기 위하여 소형 폐기물 소각시설들은 배제하고 중형 폐기물 소각시설을 중심으로 선정하였다. 중형 폐기물 소각시설 중에 있어서도, 소각시설 종류별, 소각로 방식별로 구분하였고 대표성을 얻기 위하여, 스톡 방식의 생활폐기물 소각시설 2개(MR2, MR3), 사업장일반폐기물 소각시설 2개(MG5, MG6)와 로타리킬른 방식의 지정폐기물 소각시설 1개(MS5)를 선정하였다. 선정된 소각시설에서의 시료채취지점은 온도 변화 폭이 큰 폐열보일러(waste heat boiler, WHE) 전후단과 방지시설 전후단에서 배가스를 각각 2회씩 하였으며, 시험방법은 대기오염공정시험법에 의거한 시료채취 및 전처리로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 중형 폐기물 소각시설에서의 수은, 납, 비소, 셀렌 배출특성

중형 폐기물 소각시설에서 생활폐기물, 사업장일반폐기물, 사업장지정 폐기물 소각시설에서 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 농도를 Fig. 2와 Table 2에 나타내었다. 중형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌의 농도범위는 ND - 8.73 µg/Sm³, ND - 0.29 mg/Sm³, ND - 9.57 µg/Sm³, ND - 0.96 µg/Sm³이며, 평균농도는 각각 2.24±3.06 µg/Sm³, 0.29±0.37 mg/Sm³, 1.0±2.32 µg/Sm³, 0.21±0.28 µg/Sm³로 나타났다. 수은(Hg)의 농도는 생활 폐기물 1.69~10.82 µg/Sm³, 사업장 일반폐기물 ND~0.95 µg/Sm³, 사업장 지정폐기물 ND

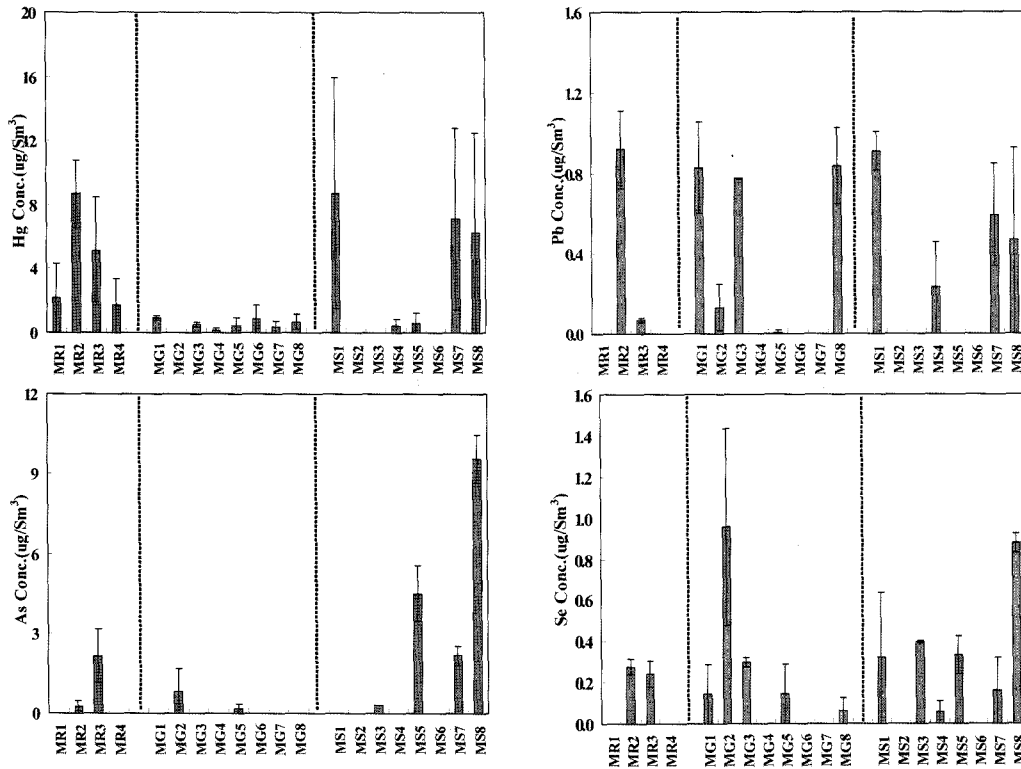


Fig. 2. Concentrations of Hg, Pb, As and Se in emission gas from medium size waste incinerators.

~8.73 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 배출되었다. 평균농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 4.42 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.50 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 2.89 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 생활폐기물 소각시설에서 높게 배출되었다. 이는 생활폐기물 소각시설에 반입되는 폐기물의 수는 함유량이 사업장계 소각시설보다 높은 것으로 사료된다. 이와 같은 결과는 진 등(1999)의 결과와 동일하다. 또한, 1994년과 1995년의 미국 EPA의 자료에서도 수은의 연간배출량은 생활폐기물 소각시설에서 29.6ton/year, 사업장지정 폐기물 소각시설에서 7.1 ton/year의 배출량으로 생활폐기물 소각시설에서 더 높은 배출량을 나타냈다.¹⁵⁾ 납(Pb)의 농도는 생활폐기물 ND~0.92 mg/Sm^3 , 사업장 일반폐기물 ND - 0.84 mg/Sm^3 , 사업장 지정폐기물 ND~0.91 mg/Sm^3 범위로 배출되었다. 평균농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 0.25 mg/Sm^3 , 0.32 mg/Sm^3 , 0.27

mg/Sm^3 로 큰 차이를 보이지 않았으나, 사업장 일반폐기물에서 다소 높게 배출되었다. 비소(As)의 농도는 생활폐기물 ND - 2.15 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 일반폐기물 ND~0.83 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 지정 폐기물 ND~9.57 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 배출되었다. 평균 농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 0.61 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.12 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 2.07 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 사업장 지정폐기물에서 높게 배출되었다. 셀렌(Se)의 농도는 생활폐기물 ND~0.28 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 일반폐기물 ND~0.96 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 지정폐기물 ND~0.88 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 배출되었다. 평균 농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 0.13 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.20 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.27 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 비슷한 농도로 배출되었다. 중형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌은 모두 2005년도에 강화되는 국내 소각시설에서의 배출기준치 이내의 농도로 나타났다.

Table 2. Statistics data of Hg, Pb, As and Se in emission gas from medium size waste incinerators

Unit : Hg, As, Se is $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ except for Pb is mg/Sm^3

	Medium size Total MSWI				Residential MSWI				General Industry MSWI				Special Industry MSWI				
	Ave	Max	Min	Sd	Ave	Max	Min	Sd	Ave	Max	Min	Sd	Ave	Max	Min	Sd	
Medium size MSWI (N=20)	Hg	2.24	8.73	ND	3.06	4.42	8.70	1.69	3.23	0.50	0.95	ND	0.33	2.89	8.73	ND	3.77
	Pb	0.29	0.92	ND	0.37	0.25	0.92	ND	0.45	0.32	0.84	ND	0.41	0.27	0.91	ND	0.35
	As	1.00	9.57	ND	2.32	0.61	2.15	ND	1.04	0.12	0.83	ND	0.29	2.07	9.57	ND	3.43
	Se	0.21	0.96	ND	0.28	0.13	0.28	ND	0.15	0.20	0.96	ND	0.32	0.27	0.88	ND	0.29

note) MSWI : municipal solid waste incinerator

Ave. : average, Max : Maximum, Min : Minimum, Sd : Standard Deviation, ND : Not Detected

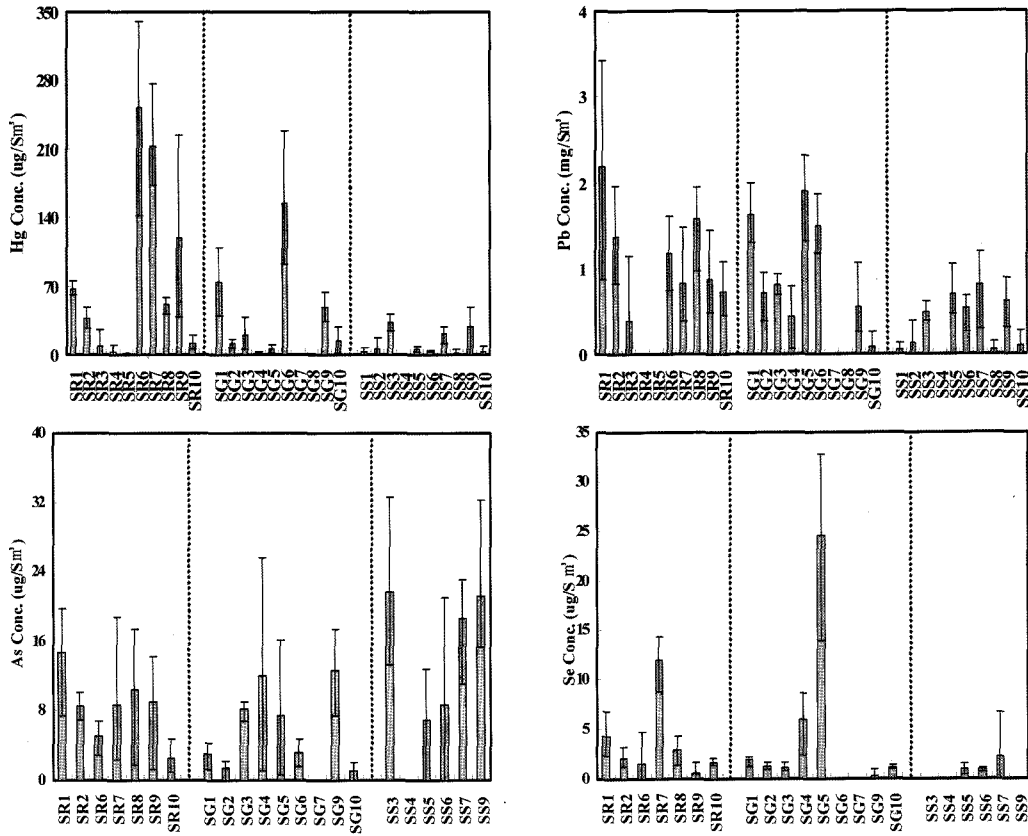


Fig. 3. Concentrations of Hg, Pb, As and Se in emission gas from small size waste incinerators.

3.2. 소형 폐기물 소각시설에서의 수은, 납, 비소, 셀렌 배출특성

소형 폐기물 소각시설에서 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물 소각시설에서 배출되는 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 배출농도를 Fig. 3과 Table 3에 나타내었다. 소형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 평균농도는 각각 39.97 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.69 mg/Sm^3 , 6.38 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 2.19 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 중형 폐기물 소각시설 보다 수은 17.8배, 납 2.4배, 비소 6.4배, 셀렌 10.4배 높게 배출되었다. 이는 중형 폐기물 소각시설과 비교하여 소형 폐기물 소각시설은 Table 1에서와 같이 사이클론만을 갖춘 시설이 전체 30개 시설 중 50%이상으로 방지시설 구성이 단순하고 냉각설비를 갖추고 있지 않은 시설이 많기 때문에 고온의 배가스로 인하여

수은, 납, 비소, 셀렌의 제어가 이루어지지 않은 것으로 사료된다. 수은(Hg)의 농도는 생활폐기물 0.67~252.82 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 일반 폐기물 ND~154.49 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 지정폐기물 ND - 32.94 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 배출되었다. 평균농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 76.44 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 32.96 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 10.37 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 중형 폐기물 소각시설과 같이 생활폐기물 소각시설에서 높게 배출되었다. 납(Pb)의 농도는 생활폐기물 ND~2.18 mg/Sm^3 , 사업장 일반폐기물 ND~1.89 mg/Sm^3 , 사업장 지정폐기물 ND~0.80 mg/Sm^3 범위로 배출되었다. 평균농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 0.91 mg/Sm^3 , 0.76 mg/Sm^3 , 0.45 mg/Sm^3 로 생활폐기물 소각시설에서 다소 높게 배출되었다. 비소(As)의 농도는 생활폐기물 ND~14.72

Table 3. Statistics data of Hg, Pb, As and Se in emission gas from small size waste incinerators

Unit : Hg, As, Se is $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ except for Pb is mg/Sm^3

	Small size Total MSWI				Residential MSWI				General Industry MSWI				Special Industry MSWI				
	Ave	Max	Min	Sd	Ave	Max	Min	Sd	Ave	Max	Min	Sd	Ave	Max	Min	Sd	
Small size MSWI (N=30)	Hg	39.93	252.82	ND	64.06	76.44	252.82	0.67	90.43	32.96	154.49	ND	48.90	10.37	32.94	ND	12.14
	Pb	0.69	2.18	ND	0.62	0.91	2.18	ND	0.69	0.76	1.89	ND	0.69	0.38	0.80	0.04	0.30
	As	6.38	21.58	ND	6.67	5.89	14.72	ND	5.16	4.90	12.66	ND	4.82	8.58	21.58	ND	9.55
	Se	2.19	24.48	ND	4.87	2.52	12.00	ND	3.62	3.62	24.48	ND	7.54	0.42	2.22	ND	0.75

note) MSWI : municipal solid waste incinerator

Ave. : average, Max : Maximum, Min : Minimum, Sd : Standard Deviation, ND : Not Detected

$\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 일반폐기물 ND~12.66 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 지정폐기물 ND~21.58 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 배출되었다. 평균농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 각각 5.89 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 4.90 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 8.58 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 사업장 지정폐기물 소각시설에서 높게 배출되었다. 셀렌(Se)의 농도는 생활폐기물 ND~12.00 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 일반폐기물 ND~24.48 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 사업장 지정 폐기물 ND~2.22 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 범위로 배출되었다. 평균 농도는 생활폐기물, 사업장 일반폐기물, 사업장 지정폐기물에서 2.52 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 3.62 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.42 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 사업장일반 폐기물 소각시설에서 높게 배출되었다. 소형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 셀렌은 생활계(생활, 사업장일반) 폐기물 소각시설에서 높게 배출되고 있었으며, 비소는 사업장계(사업장지정) 폐기물 소각시설에서 다소 높은 배출을 보이고 있었다. 이는 간접적으로 소각시설에 반입되는 폐기물의 수은, 납, 셀렌 함유량은 생활계 폐기물에 높으며, 비소는 사업장계 폐기물에 높게 함유 되어있는 것으로 사료된다.

3.3. 배가스 온도에 따른 수은, 납, 비소, 셀렌 배출특성

중·소형 폐기물의 소각시설 배가스 온도에 따른 수은, 납, 비소, 셀렌의 평균 배출농도를 Fig. 4에 나타내었다. 중·소형 폐기물 소각시설의 방지시설 구성은 Table 1과 같이

중형 폐기물 소각시설은 냉각설비와 대기오염 방지시설을 갖추고 있으나, 소형 폐기물 소각시설은 냉각설비와 대기오염 방지시설을 갖춘 10개 시설과 사이클론만을 갖춘 20개 시설로 구성되어있다. Fig. 4를 보면 중·소형 폐기물 소각시설의 배가스 온도는 냉각설비 유무에 따라서 2개의 그룹으로 배출되었다. 첫 번째 배가스 온도그룹(Group I)은 100~200 $^{\circ}\text{C}$ 이하(대략 100 $^{\circ}\text{C}$)로서 냉각설비와 방지시설을 갖추고 있는 중형 소각시설이 대부분이었다. 두 번째 배가스 온도그룹(Group II)은 400~700 $^{\circ}\text{C}$ (대략 500 $^{\circ}\text{C}$) 범위로써 대체로 냉각설비를 갖추고 있지 않은 소형 폐기물 소각시설이 주된 배출을 보이고 있었다. 저온배가스 온도영역(Group I)에서 수은, 납, 비소, 셀렌의 평균 농도는 각각 9.95 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.43 mg/ Sm^3 , 4.40 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.76 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 이었으며, 고온영역(Group II)에서는 각각 70.43 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 0.94 mg/ Sm^3 , 9.83 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 5.05 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 고온영역에서의 배출농도가 저온영역보다 7.1배, 2.2배, 2.2배, 6.7배 높게 나타났다. 수은의 경우는 고온영역으로 배출되는 소각시설 중 2005년도의 개정되는 배가스 기준치(0.1 mg/ Sm^3)를 초과하는 시설도 나타났다. 대체로, 배가스 온도에 따른 수은, 납, 비소, 셀렌은 배가스 온도가 증가할수록 고농도로 배출되는 것으로 나타났다. 이는 배가스 온도가 400~700 $^{\circ}\text{C}$ 로 높은 경우 수은, 납, 비소, 셀렌과 같은 휘발성중금속류는 대체로 가스상 형태로

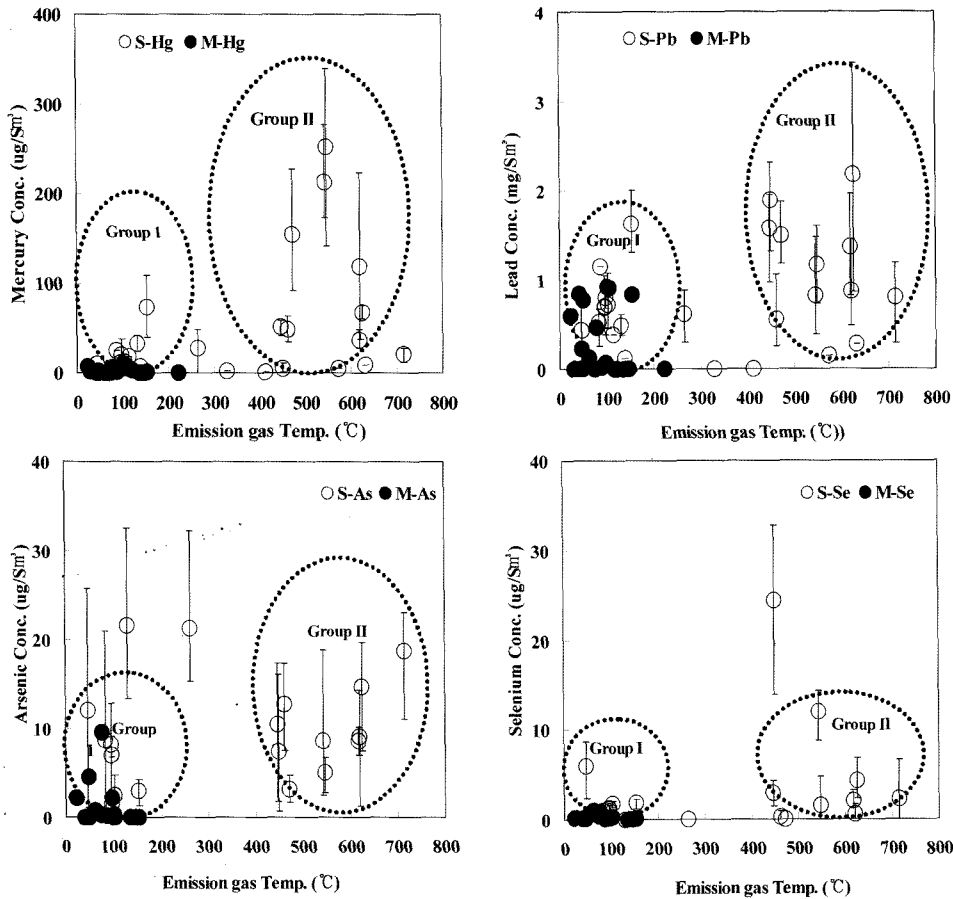


Fig. 4. Volatile metals concentrations(Mercury, Lead, Arsenic and Selenium) VS emission gas temperature in small and medium size waste incinerators.

Table 4. Statistics data for volatile metals(Hg, Pb, As, Se) VS temperature in low temperature(about 100℃) and high temperature(about 500, 400~700℃) flue gas emitted from MSWI

(P) < 0.05

		Hg-Temp.	Pb-Temp.	As-Temp.	Se-Temp.
Low Temp. (about 100℃)	(r)	0.45	0.24	0.32	0.06
	P	0.039	0.4	0.16	0.8
	under level 95%	0.11	0	0	0
	upper level 95%	3.96	54.45	4.91	10.34
High Temp. (about 200~700℃)	(r)	0.46	0.39	0.48	0.27
	P	0.017	0.044	0.011	0.17
	under level 95%	0.29	3.61	4.16	0
	upper level 95%	2.66	256.9	29.38	28.82

Note) Temp. : temperature, (r) : correlation coefficient P : significance level

배출되기 때문에 방지시설에서의 제어가 어려운 것으로 사료된다.¹⁶⁾ Dirk (1996)의 연구에서 수은, 납, 비소가 휘발하기 시작하는 온도는 각각 100℃, 300℃, 500℃로 보고하였으며,¹⁷⁾ 실규모로 소각운전하는 소각장에서 측정된 본 논문에서는 고온영역(400~600℃)에서 검출이 더 높게 이루어진 것으로 나타났다. Ratafia-Brown(1994)에 의하면 셀렌이 휘발하기 시작하는 온도는 각각 200℃로 보고되었다. 따라서, 폐기물 소각시 수은, 납, 비소, 셀렌이 휘발되기 시작하는 온도는 100℃ 내외를 기점으로 휘발하여 가스상으로 전환되고 저농도로 배출하기 시작하여 400~600℃에서 고농도로 배출되는 특성을 나타내고 있다. Table 4에서는 중·소형 폐기물 소각시설 배가스로 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌을 저온영역(대략 100℃)과 고온영역(대략 500℃, 400~700℃)으로 나누어서 통계적 유의성(P<0.05)을 나타내었다. 저온영역(대략 100℃)에서 수은과 온도(Hg-Temp.), 납과 온도(Pb-Temp.), 비소와 온도(As-Temp.), 셀렌과 온도(Se-Temp.)의 상관계수(r)는 각각 0.45, 0.24, 0.32, 0.06으로 셀렌을 제외한 수은, 납, 비소는 일정한 양의 상관성을 보였다. 반면, 고온영역(대략 500℃, 400~700℃)에서는 수은과 온도(Hg-Temp.), 납과 온도(Pb-Temp.), 비소와 온도(As-Temp.), 셀렌과 온도(Se-Temp.)의 상관계수(r)는 각각 0.46, 0.39, 0.48, 0.27로 저온영역보다는 고온영역에서 다소 높은 양의 상관성을 나타내고 있다. 특히, 폐기물소각시설에서 배출되는 휘발성중금속 중 납, 비소, 셀렌보다 수은이 배가스온도와 가장 높은 상관성을 보이며, 그 다음으로는 비소, 납, 셀렌의 순이었다.

3.4. 폐열보일러의 수은배출 억제효과

소각시설에서 폐열보일러의 수은배출 억제효과를 확인하기 위하여 5개의 소각시설(MR2, MR3, MG5, MG6, MS5)을 대상으로 소각로 출구 - 폐열보일러 출구 - 방지시설을 거쳐 굴뚝으로 배출되는 배가스의 수은농도와 온도를 측정하여 각각의 제거효율을 Table 5에 나타내었다. Table 5의 소각시설 방지시설 구성은 소각로 후단에 냉각설비로서 폐열보일러가 있다. 이후에 사이클론, 반건식여과집진기, 습식세

정탑 등이 주된 방지시설로 구성되어 있다. 소각로 출구에서의 수은 농도범위는 3.87~198.03 µg/Sm³로 각각 소각시설 반입 폐기물의 성상에 따라서 넓은 범위로 나타났다. 폐열보일러를 통과한 배가스 온도는 급격히 냉각되어 622~874℃의 범위로 평균 721℃의 배가스 온도감소를 나타내었다. 폐열보일러 출구에서의 수은 농도범위는 3.01~15.97 µg/Sm³로 폐열보일러에서 수은농도의 저감효율(WHB-RE)은 22.22~91.94%으로 평균 62.57%의 높은 저감효율을 나타내었다. 최종적으로 굴뚝으로 배출되는 수은 농도는 0.60~8.70 µg/Sm³로 각 소각시설들의 방지시설 조합을 통한 수은의 제거효율은 35.06~87.13% 범위로 평균 59.09%의 제거효율을 나타내었다. 이러한 높은 제거효율은 배가스 온도가 낮게 유지되면서, 방지시설과 함께 활성탄의 사용으로 높은 제거효율을 보였다. 기존 연구에서의 수은 제거효율은 최저 17%에서 최고 99%로 활성탄 사용시 높은 제거효율을 나타내었으며, 반입 폐기물의 조성, 배가스 특성(온도 및 가스조성), 원소의 종, 비산재, 흡수재/흡착재의 특성, 방지시설의 형태 등에 따라 결정되는 것으로 알려져 있다. 또한, Huang(1996)의 연구에 의하면 황 처리에 사용된 활성탄은 HgS를 형성하여 100%까지 제거하는 것으로 보고되었다.^{18~21)} 각 소각시설에서 다양한 방지시설을 포함한 상태의 전체제거효율(Total RE)은 대체적으로 소각로 출구에서 저농도(3.87 µg/Sm³)로 나타난 MG6시설의 제거효율(55.16%)을 제외하면 55.16~95.89%로 높은 수은제거 효율로 나타났다. Fig. 5에서는 폐열보일러에서 배가스 온도에 따른 수은 제거율과 폐열보일러의 유입농도에 따른 수은제거율을 제시하였다. Fig. 5에서는 폐열보일러에 유입되는 수은농도와 온도감소 폭이 클수록 수은 저감효과가 큰 것을 알 수 있다. Lawrence (1998)²²⁾는 소각시설에서 수은은 온도감소가 이루어질수록 수은제어에 용이하다는 것을 보고한바 있다. 본 실험의 결과에서도 온도 감소에 따른 수은 제거율의 상승을 확인할 수 있었다. 이는, 소각로 출구시 고온의 배가스가 폐열보일러를 통과하면서 급격히 냉각될 때, 폐기물 연소시 발생하는 가스상 또는 원자형태로 존재하는 수은이 입자상의 보일러재 형태로 전환되어 저감되는 것으로 사료된다.

Table 5. Removal efficiencies of Hg from medium size waste incinerators

Incinerator	Facilities Process	CC-output		WHB-output		WHB RE (%)	Stack		APCD RE (%)	Total RE (%)
		Conc. ($\mu\text{g}/\text{Sm}^3$)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Conc. ($\mu\text{g}/\text{Sm}^3$)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)		Conc. ($\mu\text{g}/\text{Sm}^3$)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)		
MR2	CC-WHB-AP-MC-SDA/BF-Stack	198.03	906	15.97	220	91.94	8.70	100	45.54	95.61
MR3	CC-WHB-CY-SDA/BF-Stack	22.00	848	7.89	195	64.14	5.12	97	35.06	76.72
MG5	CC-WHB-CY-SDA/BF-Stack	18.74	1014	6.28	140	66.49	0.92	87	85.35	95.09
MG6	CC-WHB-MC-WS-Stack	3.87	812	3.01	190	22.22	1.73	29	42.35	55.16
MS5	CC-WHB-AP-CY-ST-VS-WS-Stack	14.72	1029	4.70	255	68.08	0.60	48	87.13	95.89
Average		51.47	922	7.57	200	62.57	3.42	72	59.09	83.69

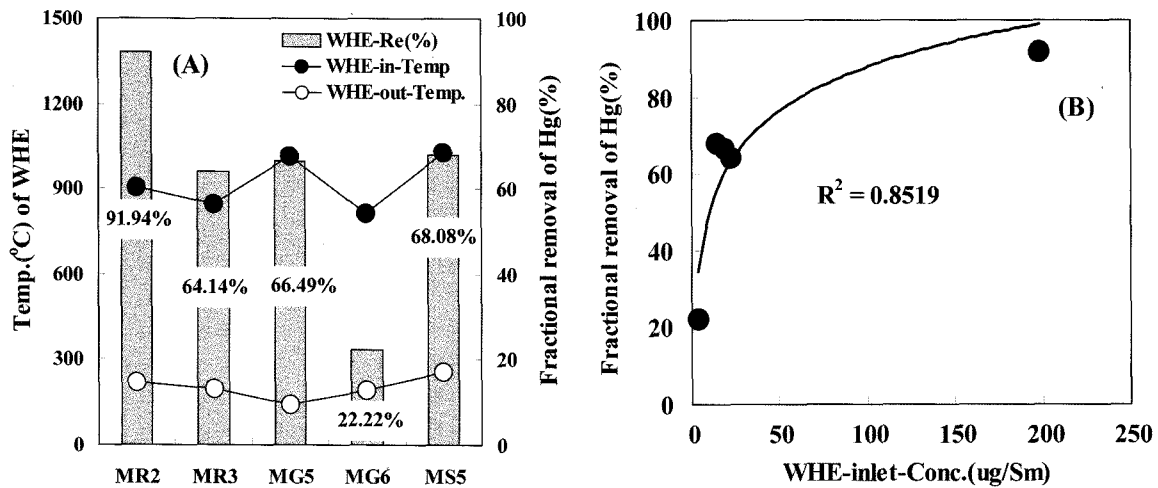


Fig. 5. Removal efficiency of mercury by cooling effect in waste heat boiler.

4. 결론

본 연구에서는 국내 도시고형폐기물 소각시설 중 환경안전성에 대한 평가가 거의 이루어지지 않은 2000 kg/hr 이하의 중·소형 폐기물 소각시설에서 수은, 납, 비소, 셀렌의 배출특성을 평가하였다. 폐기물 소각시설 현장의 측정값을 바탕으로 휘발성 중금속에 가장 큰 영향을 미치는 환경인자로서 배가스 온도에 따른 평가를 하였다. 휘발성과 유해성이 가장 큰 수은의 배출에서 폐열보일러의 억제효과에 대하여 다음과 같은 연구결과를 얻을 수 있었다.

1) 중형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 평균 배출농도는 각각 $2.24 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, $0.29 \text{mg}/\text{Sm}^3$, $1.00 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, $0.21 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 나타났으며, 소형 폐기물 소각시설 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 평균농도는 각각 $39.93 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, $0.69 \text{mg}/\text{Sm}^3$, $6.38 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, $2.19 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 중형 소각시설과 비교하여 높게 배출되었다.

2) 냉각설비를 갖추고 있지 않은 소형 소각시설에서의 배

가스 온도 범위는 $400 \sim 700^{\circ}\text{C}$ (대략 500°C)의 고온으로 나타났다. 냉각설비를 갖추고 있는 중소형 소각시설의 배가스 온도범위는 대략 100°C 내외로 나타났다. 온도가 제어되지 않은 배가스의 수은, 납, 비소, 셀렌 평균농도는 각각 $70.43 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, $0.94 \text{mg}/\text{Sm}^3$, $9.83 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, $5.05 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 온도가 제어된 시설보다 높게 나타났다.

3) 폐열보일러에서의 수은배출 억제효과는 55.2~95.9%로 나타났다. 이는 폐열보일러에서 배가스 온도감소가 클수록 수은제어에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다.

국내 중·소형 폐기물 소각시설에서 배출되는 수은, 납, 비소, 셀렌은 대체로 국내 폐기물 소각시설 배가스 기준치 이내로 배출되었다. 그렇지만, 배가스 온도 제어설비를 갖추지 않은 시설은 온도 제어설비를 갖춘 시설보다 높은 농도로 배출되고 있었다. 따라서, 휘발성 중금속류는 폐기물 소각시 증기상 형태로 배출되기 때문에 소각시설에서 휘발성 중금속류의 제거효율을 높이기 위해서는 일차적으로 배가스 온도 제어를 필수적으로 하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 이상돈, "2002년도 자원순환형 사회구축과 폐기물매립지의 역할문화에 관한 국제심포지움: 국가폐기물정책: 이상과 현실," 심포지움, pp. 15~26(2002).
- 환경부, 환경백서(2003).
- 이한국, 최동혁, 이동훈, "중소형 소각시설 소각재에 의한 중금속 오염도 평가," 한국폐기물학회지, **20**(4), 322~330(2003).
- 환경부, 환경통계연감(2003).
- 이한국, "도시고형폐기물 소각 바닥재의 중금속 용출특성에 미치는 이산화탄소의 영향," 서울시립대학교 박사학위 논문(2004).
- Massimo Chiaradia, Francois Cupelin, "Gas-to-particle conversion of mercury, arsenic and selenium through reactions with traffic-related compounds (Geneva) > Indications from lead isotopes," *Atmosphere Environment*, **34**, 327~332(2000).
- 홍지형 외, "대기배출원의 수은배출특성 조사연구," 국립환경연구원보, **24**, pp. 181~200(2002).
- Clarke, L. B. and Sloss, L. L., "Trace elements-emissions from coal combustion and gasfication," IEA Coal Res. London, **49**, 34~45(1992).
- Vogg, J., Braun, H., Metzger, M., and Schneider, J., "The specific role of cadmium and mercury in municipal solid waste incineration," *Waste Manage. Res.*, **4**(65), 65~74(1986).
- 문부식, "중소형 소각시설의 Hg, Pb, As, Se 배출특성에 대한 연구," 서울시립대학교 석사학위 논문(2004).
- <http://www.epa.gov/mercury/index.htm>.
- 정종수, 이성준, 이교우, 김병화, Jochen Seier, "소각로 배출가스 중 수은화합물의 무기성 및 유기성 흡착제를 이용한 흡착성능 실험," 한국폐기물학회지, **19**(3), 300~308(2002).
- 환경부, 대기오염공정시험법(2004).
- 강경희, "대기 배출원의 수은 배출특성에 관한 연구," 건국대학교 석사학위 논문(2002).
- 전미경, 박석순, "소각장 환경영향 평가시 수은 배출계수에 관한 연구," 환경영향평가, **7**(2), 113~126(1999).
- Ratafia-Brown, J. A., "Overview of trace elements partitioning in flames and furnaces of utility coal-fired boiler," *Fuel Process. Technol.*, **39**(2), pp. 139~157(1994).
- Dirk, V., Alfons, B., Philip, J. S., Gunnar, E., "Thermodynamic behavior of metal chlorides and sulfates under the conditions of incineration furnaces," *Environ. Sci. Technol.*, **30**, pp. 50~56(1996).
- Chu, P., Porcella, D. B., *Water, Air, and Soil Pollution*, **80**, 135~144(1995).
- Huang, H. S, Wu, J. M., Livengood, C. D., "Development of dry control technology for emissions of mercury in flue gas," *Hazardous Waste & Hazardous Materials*, **13**(1), 107~119(1996).
- Kilgroe, J. D., "Control of dioxin, furan, and mercury emissions from municipal waste combustors," *J. of Hazardous Materials*, **47**, 163~194(1996).
- Krivanek, C. S., "Mercury control technologies for MWC's: The unanswered questions," *J. of Hazardous Materials*, **47**, 119~136(1996).
- Lawrence, A. Ruth., "Energy from municipal solid waste: A comparison with coal combustion technology," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **24**, pp. 545~564(1998).