

대형배출원에서의 수은 측정방법 비교 및 배출계수 개발에 관한 연구

A Study on the Comparison of Measuring Methods and Development of Emission Factor on Mercury from Large-Scale Emission Sources

김형천 · 김록호¹⁾ · 김종현 · 임승영 · 강대일 · 홍지형 · 장기원*
국립환경과학원 대기공학연구과, ¹⁾국립환경과학원 대기환경연구과
(2015년 12월 1일 접수, 2016년 2월 25일 수정, 2016년 3월 30일 채택)

Hyung-Chun Kim, Rhok-Ho Kim¹⁾, Jong-Hyeon Kim, Seung-young Lim,
Dae-II Kang, Ji-Hyung Hong and Kee-Won Jang*

Air Pollution Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research*

(Received 1 December 2015, revised 25 February 2016, accepted 30 March 2016)

Abstract

Recently, studies on reducing mercury have been actively conducted worldwide, which include the current status of mercury emissions and mercury control technology. Among the control technology, Sorbent Trap measurement method has been aggressively developed due to its reliability, easiness in measurement and analysis.

The purpose of this study is to evaluate the applicability of the new international measurement method; Sorbent Trap. For this, the study compared the Sorbent trap method (US EPA Method 30B) and the Korean Standard Method for Examination of Air (ES 01408.1) to evaluate their reliability, and developed mercury emission factors.

As the result, the relative standard deviations (% RSD) of the two methods were 3.5~13.4% at Coal-fired Power Plants (CPP), 4.0~18.4% at Cement Kilns (CK), and 3.0~11.3% at Medical Waste Incinerators (MWI). The emissions factors were developed as 14.50 kg/ton at CPP, 45.10 kg/ton at CK, and 1,290.2 kg/ton at MWI.

Key words : Mercury measurement, Sorbent trap, % RSD, Emission factor

1. 서 론

우리나라의 '07년 현재 수은 배출량은 12.81톤으로 세계 9위의 수은 배출국이다(NIER, 2010). 특히 환경

부의 「국민혈중 중금속농도 조사」 결과 우리나라 국민의 수은 인체 노출 수준이 '08년 기준으로 3.80 µg/L로 미국, 독일 등에 비해 약 4~6배 높은 수준으로 조사되었다. 이에 따라 환경부에서는 「수은관리종합대책」을 추진 중이며, 그 일환으로 화력발전소 및 소각시설 등의 수은 배출시설의 배출기준을 강화하였다(NIER,

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7348, E-mail : jangkeewon@korea.kr

2011). UNEP(United Nations Environment Programme, 2013)에 따르면, 수은 화합물의 주요 배출원은 소규모 금 생산시설 37%, 석탄 화력발전시설 24%, 금속 제조 시설(철강 및 비철강) 18%, 시멘트 소성시설 9%로 큰 비중을 차지한다. 특히, 연소시설에서의 배출가스 중 수은 화합물은 입자상 수은(Hg_p), 원소수은(Hg⁰) 및 산화수은(Hg²⁺) 3가지 형태로 존재하지만, 대부분의 입자상 수은은 집진시설에서 제거가 되고, 원소수은 및 산화수은의 형태로 대기 중으로 배출되며 존재한다(Kim *et al.*, 2010). 산화수은은 일반적으로 짧은 체류시간을 보이고 있는 반면, 원소수은은 수용성이 낮고, 상대적으로 반응성이 낮아 1년 이상 장기간 체류시간을 보이고 있다(NIER, 2012). 이러한 이유로 화학종별 분석이 가능한 Ontario Hydro Method (ASTM D6754-02, 1999 이하 OHM)이 연구에 주로 사용되었다. 그러나 OHM 및 국내 대기오염공정시험기준 중 총수은법(ES 01408.1 & US EPA Method 101A) 등 흡수액을 이용한 습식성 방법들은 공통적으로 시료의 준비 및 회수부분이 복잡하여 오차 발생확률이 크게 발생하고, 측정 인력 및 시간이 많이 소요된다는 등 다양한 문제점이 자주 지적되고 있다. 이를 보완하고자 현재 US EPA 등 선진국에서는 습식법을 대신하여 건식법을 이용한 수은 측정방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 국제 흐름에 맞춘 흡착트랩(Sorbent Trap)을 이용한 수은 측정방법(EPA Method 30B, 이하 흡착트랩법)과 총수은법의 재현성 정도를 파악하고자 상대정확도평가(% RSD)를 통한 방법 간 정밀도(pre-

cision)를 파악하였으며, 아울러 주요 수은 배출원에서의 수은 배출특성 및 배출계수를 산정하였다. 이는 수은 측정에 대한 선진기술 도입을 위한 기초자료 제공 및 국가 수은 배출량 산정을 위한 신뢰성 높은 배출계수 개발했다는 점에서 큰 의의가 있다.

2. 연구 방법

2.1 조사대상 시설 선정

국립환경과학원(NIER, 2013)의 연구결과에 따르면, 국내 주요 산업시설에서의 수은 배출 기여도는 그림 1과 같다. 이를 바탕으로 가장 높은 기여도를 차지하는 석탄 화력발전시설(Coal-fired Power Plant, CPP)을 선정하였다. 또한, 본 연구의 주요 목적인 흡착트랩법의 적용성 평가를 위해 수은의 배출농도가 비교적 높으며, 농도 변화가 다양한 시멘트 소성시설(Cement Kiln, CK)과 의료폐기물 소각시설(Medical Waste Incineration, MWI)을 대상 업종으로 선정하였으며, 대상 사업장은 국립환경과학원에서 운영하는 대기배출원관리시스템(Stack Emission Management System, SEMS) DB를 이용하여 시설의 규모 및 오염물질 배출현황을 고려하여 선정하였다.

2.2 대상시설 및 방지시설 현황

본 연구는 유연탄 화력발전시설 1개소, 시멘트 소성 시설 2개소, 의료폐기물 소각시설 1개소를 선정하였다.

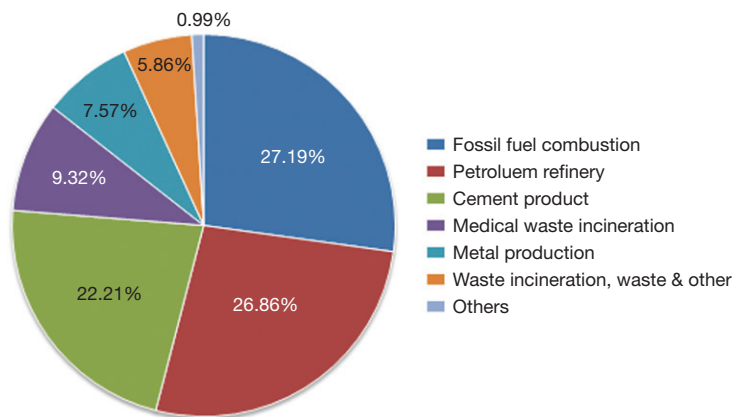


Fig. 1. Relative contributions to estimated emission to air from Anthropogenic sources in 2010.

각 시설에 대한 일반현황 및 방지시설 정보는 표 1과 같다. 유연탄 화력발전시설의 경우 발전용량이 500MW이었으며, 대기오염물질 방지시설은 질소산화물, 먼지 및 황산화물을 처리하기 위해 선택적촉매반응시설(Selective Catalytic Reduction, SCR), 전기집진시설(Electrostatic Precipitator, ESP), 습식배연탈황시설(Wet-Flue Gas Desulfurization, FGD)이 순차적으로 설비되어 있었다. 시멘트 소성시설은 일반적으로 원료 투입량의 60%가 제품(clinker)으로 생산된다. 소성시설의 제품 생산용량은 CK-1이 320 clinker ton/hr, CK-2는 230 clinker ton/hr이다. 원료 물질은 석회석뿐만 아니라 재생주물사, 슬러지, 비산재 등을 사용하며, 폐기물을 연료의 일부분으로 활용하고 있었다. 시멘트 소성시설은 요소수를 투입하여 질소산화물을 제거하는 선택적비촉매반응시설(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR), 산성가스 및 입자상 물질을 처리하기 위한 분무탑

(Spray tower), 먼지 및 비산된 제품을 회수하기 위한 여과집진시설(Bag filter, B/F)로 구성되어 있었으며, 습식유형의 방지시설이라 할 수 있다. 의료폐기물 소각시설의 소각용량은 1.7 ton/hr이며, 폐열 회수과정 등을 통해서 발생하는 황산화물을 처리하기 위한 반건식반응기(Semi Dry Reactor, SDR)과 먼지를 처리하기 위한 여과집진시설, 산성가스 및 다이옥신 등을 제어하기 위한 세정탑(Wet-Scrubber)이 설치되어 있다.

2.3 시료채취 및 분석

시료채취 지점은 모든 방지시설을 거친 최종 배출구에서 총수은법과 흡착트랩법을 이용하여 수은 화합물을 채취하였다. 두 방법별 비교를 위하여 동일한 배출시설의 배출구에서 각 방법별 6회씩 동시 측정하였다. 시료채취 유량은 흡착트랩에 채취되는 수은 예상 농도에 따라 채취유량을 결정하였으며, 총수은법은 1 Sm³ 이상을 채취하였다.

Table 1. APCDs configuration in target facilities.

Facilities	Capacity	APCDs
CPP-1	500 MW	SCR → ESP → FGD
CK-1	320 clinker ton/hr	SNCR → Spray Tower → B/F
CK-2	230 clinker ton/hr	
MWI	1.7 ton/hr	SDR → B/F → Wet scrubber

2.3.1 총수은법 (ES 01408.1 & US Method 101A)

총수은법은 가스상 수은뿐만 아니라 입자상 수은도 함께 채취하므로 먼지시료를 채취할 때와 마찬가지로 등속흡인하였다. 이를 위해 배출가스의 유속, 온도, 압력(동압, 정압), 수분량 등을 측정하였다(Kim et al., 2012a). 입자상 수은은 여과지를 사용하였으며, 가스상

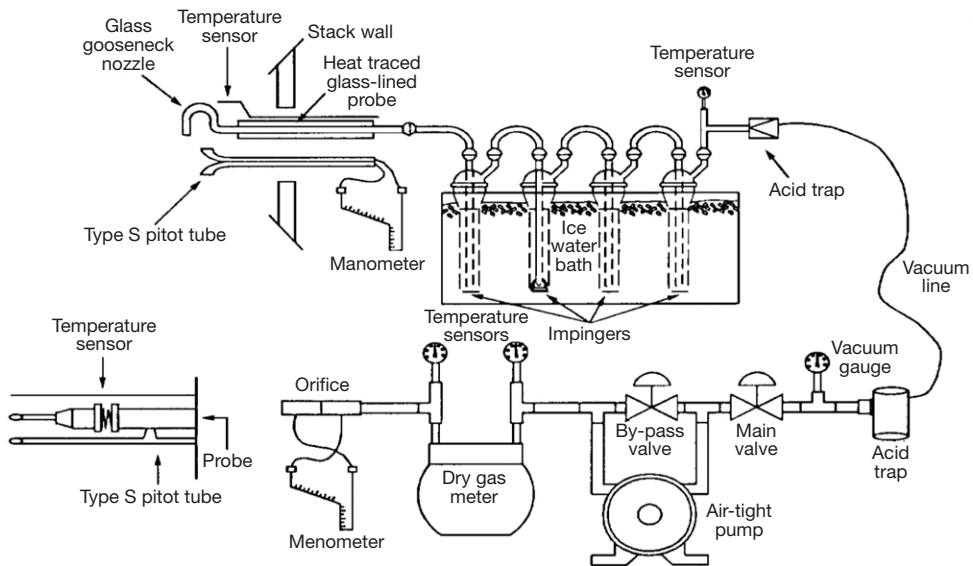


Fig. 2. Sampling device of the Korea Standard Methods for Examination of Air.

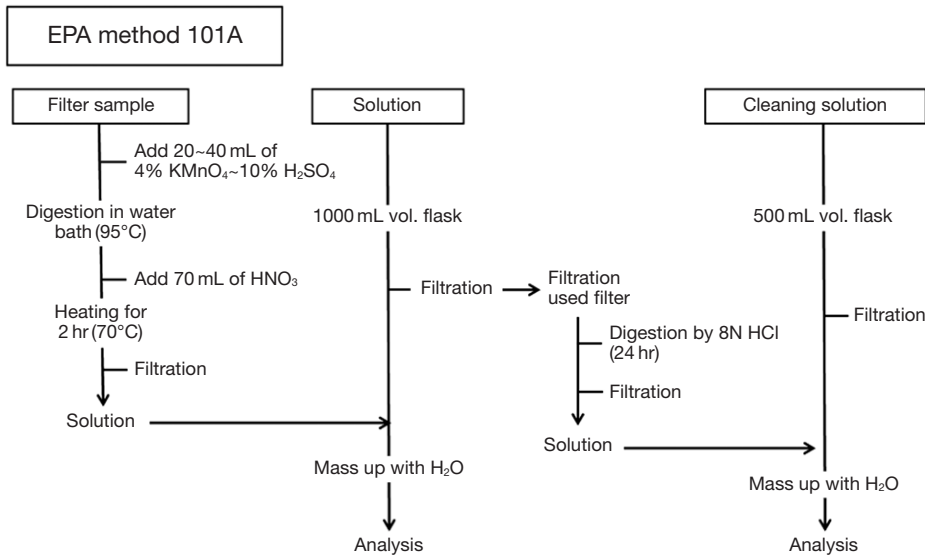


Fig. 3. Procedures for Mercury analysis (U.S. EPA Method 101A).

수은을 포집하기 위한 흡수액은 4% KMnO_4 - 10% H_2SO_4 를 사용하였고, 흡수액 사용량은 50 mL를 넣은 흡수병 1개와 100 mL를 넣은 흡수병 2개로 채취하였다. 시료채취 장비의 구성도 및 시료 전처리 방법은 그림 2와 그림 3과 같다.

2.3.2 흡착트랩법(EPA Method 30B)

흡착트랩법은 연소시설에서의 배출가스 중 가스상 수은을 측정하기 위한 방법이다. 시료채취방법은 US EPA Method 30B(이하 Method 30B)에 준하여 수행하였다. 흡착트랩은 그림 4과 같이 표준물질 첨가트랩(Spiking trap)과 표준물질 무첨가트랩(Un-spiking trap)으로 구분하여 2개가 사용되며, 흡착트랩의 재질은 요오드가 첨착된 활성탄으로 구성되어 있다. 「Un-spiking trap」에서 시료를 채취하고, 「Spiking trap」은 활성탄에 적정량의 표준물질을 첨가하여 전처리 과정에서 시료의 회수율을 산정하여 「Un-spiking trap」의 QA/QC 평가수단으로 활용된다. 또한, 「Un-spiking trap」은 시료채취 부분(Sampling section)과 예비 부분(Back-up section)으로 구분되어 있다. 「Sampling section」은 가스상 수은을 채취하고, 「Back-up section」은 파과(break-through)된 가스상 수은을 채취하기 위한 부분이다. 흡착트랩은 시료채취관에 장착되어 측정지점 내에 직접

삽입되며, 삽입된 흡착트랩은 그림 5와 같이 수은 채취 시스템을 이용하여 시료를 채취하였다. 시료채취 시 총 수은법과 채취시간을 동일하게 설정하여 흡착트랩에 대한 적용성 검토를 실시하였다.

흡착트랩법은 다양한 QA/QC를 통해 측정법의 신뢰도 향상 도모하며, 구체적인 방법은 다음과 같다. 첫째, 「Spiking trap」에 첨가하는 수은 표준물질의 농도는 배출원으로부터의 수은 예상배출농도, 시료채취유량 및 시료채취 시간을 고려하여 결정하며, 예상배출농도 값의 50~150% 농도의 표준물질을 첨가한다. 시료의 채취가 종료된 후 현장회수실험을 통해 「Spiking section」의 수은 회수율이 85~115% 내에 존재하여야 그 값이 측정값으로 유효한 것으로 인정한다. 두 번째, 「Back-up section」(수은이 흡착제의 흡착용량을 초과하는 것을 확인하기 위한 섹션)에서의 수은농도를 측정하여 「Sampling section」에서 흡착된 수은농도 대비 20%를 초과하면 그 값은 유효하지 않는 것으로 판단한다. 세 번째, 한 쌍으로 구성된 각각의 트랩 간의 수은농도 일치성을 확인하여 두 트랩 간 수은농도 차이가 $\pm 10\%$ 를 초과하면 실험을 다시 진행하여야 한다. 이와 같은 QA/QC 조건을 모두 만족하는 시료는 Microwave (C 9000, Ctrl-M Scientific Co.)를 이용하여 EPA Method 3052에 준하여 전처리를 진행하였다. 전처리가 완료된

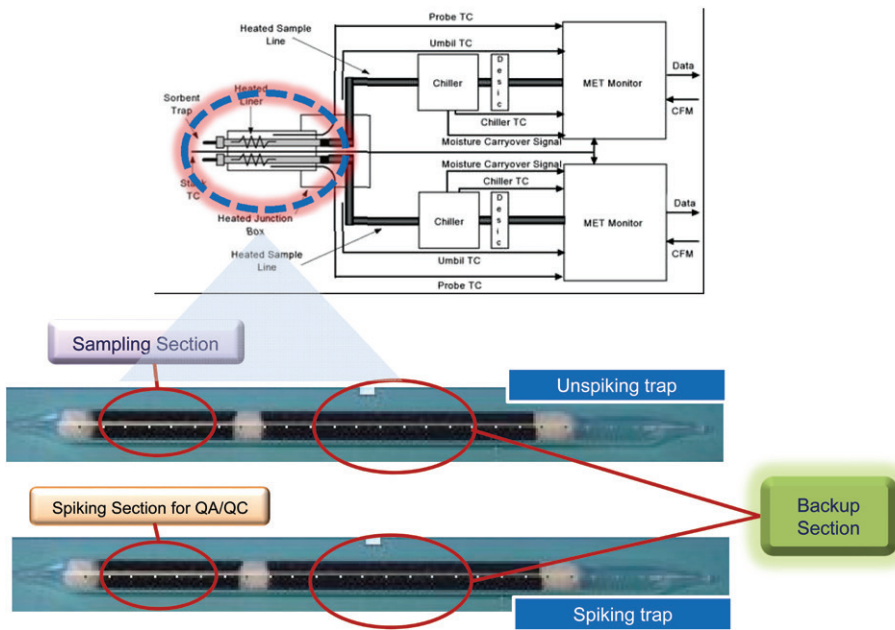


Fig. 4. Sorbent trap of Method 30B.



Fig. 5. Sorbent trap measurement system.

분석시료는 CVAA(Cold Vapor Atomic Absorption) 방식의 수은분석기(AULA-254, Mercury instruments)를 이용하여 분석하였다.

2.4 배출원별 배출계수 도출

본 연구에서 측정된 배출원별 수은 배출농도를 이용하여 배출계수를 도출하였다. 배출원별 수은의 배출계

Table 2. Measured Mercury concentration in flue gas ($\mu\text{g}/\text{Sm}^3$).

Test No.	CPP-1		CK-1		CK-2		MWI-1	
	Method 101A	Method 30B	Method 101A	Method 30B	Method 101A	Method 30B	Method 101A	Method 30B
#1	1.60	1.75	4.57	3.76	19.44	20.60	297.80	310.71
#2	1.33	1.10	8.01	6.59	53.57	57.67	22.61	21.56
#3	1.07	0.98	3.64	2.80	11.32	10.56	7.09	8.17
#4	1.11	1.04	4.93	3.85	49.77	64.66	10.03	9.01
#5	0.79	0.83	5.82	4.50	3.18	3.39	17.79	15.15
#6	0.75	0.83	4.91	3.91	13.28	14.06	31.38	34.00
Avg.	1.11	1.09	5.31	4.24	25.09	28.49	64.45	66.43

수는 식(1)과 같이 산정하였다. 수은농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 실측에 의한 값이며, 유량은 굴뚝의 내경(m)과 유속(m/sec)으로 계산하였다(Jang *et al.*, 2011). 연료연소 및 소각량, 제품생산량은 측정 당시 사용된 대상 시설의 실제용량(ton/hr)이다.

$$\text{수은배출계수}(\text{mg}/\text{ton}) = \frac{\text{수은농도}(\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{건조배출가스유량}(\text{m}^3/\text{hr}) \times 10^{-3}}{\text{연료(소각)사용량}(\text{ton}/\text{hr}), \text{제품생산량}(\text{ton}/\text{hr})} \quad (\text{식 } 1)$$

이후 도출된 배출계수는 국립환경과학원에서 수행된 최근의 연구(NIER, 2008, 2010, 2012)를 중심으로 산정된 배출계수와 비교·분석하였다.

3. 연구 결과

3.1 배출가스 중 수은 화합물 측정 결과

유연탄 화력발전시설 1개소(CPP-1) 및 시멘트 소성시설 2개소(CK-1, CK-2), 의료폐기물 소각시설 1개소(MWI-1)에서 측정방법별 6회에 걸쳐 비교·평가를 실시하였다. 각 시설별 Method 30B 측정결과 모두 QA/QC 항목을 만족하여 유효데이터로 활용하였다. 대상 시설에서의 방법별 수은 배출농도는 표 2와 같다.

CPP-1의 평균 수은농도는 총수은법 1.11 (0.79~1.60) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 1.09 (0.83~1.75) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 으로 측정되었다. 두 방법 간 측정농도는 비슷한 수준이었으며, 대기환경보전법(MOE, 2015)에서 명시한 석탄 화력발전시설의 배출허용기준 50 (6) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 보다 약 45배 낮은 농도 값으로 배출되었다. 두 방법 간 재현성 및 정

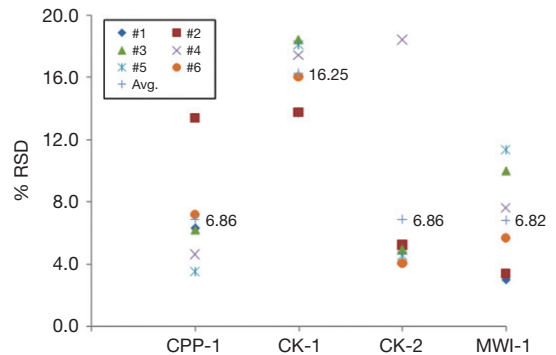


Fig. 6. % RSD between EPA Method 101A and EPA Method 30B.

밀도를 확인하기 위해 상대표준편차(Relative Standard Deviation, % RSD)를 그림 6과 같이 적용하였다. % RSD는 3.49~13.39% 수준으로 평균 6.86%로 산정되었다. % RSD가 낮다는 것은 측정횟수가 거듭될수록 측정값들이 균일하며, 측정값 간의 변이가 작다는 것을 의미한다.

CK-1의 평균 수은농도는 총수은법 5.31 (3.64~8.01) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 4.24 (2.80~6.59) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 측정되었다. 두 방법 간 농도차이는 1.08 (0.81~1.42) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 이며, % RSD는 13.75~18.45%로 본 연구에서의 다른 시설에 비해 높았다. CK-2는 총수은법 25.09 (3.18~53.57) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 28.49 (3.39~64.66) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 으로 분석되었다. CK-1과 비교 시 평균 수은농도가 약 5~6배 차이로 높게 나타났다. 두 방법 간 % RSD는 4.03~18.40% 수준으로 재현성이나 정밀도는 비교적 양호하였다. 시멘트 소성시설의 배출허용기준은 80 (13) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 으로 본 연구에서 수행한 모든 측정결과가 배출

Table 3. Mercury emission factor on this study.

Test No.	Emission factor			
	CPP-1 (mg Hg/ton coal)	CK-1 (mg Hg/ton clinker)	CK-2 (mg Hg/ton clinker)	MWI-1 (mg Hg/ton waste)
1	21.08	10.82	57.26	5,871.12
2	23.13	8.89	60.67	6,125.64
3	17.61	18.93	157.78	445.76
4	14.52	15.58	169.85	425.05
5	14.14	8.61	33.34	139.78
6	12.98	6.63	31.10	161.07
7	14.65	11.66	146.59	197.74
8	13.75	9.09	190.44	177.63
9	10.41	13.76	9.37	350.73
10	10.92	10.65	9.98	298.68
11	9.90	11.61	39.11	618.66
12	10.92	9.25	41.41	670.31
Avg.	14.50	11.29	78.91	1,290.18

허용기준을 초과하지는 않았다. 그러나 대기오염배출 허용기준 강화 정책에 따라 '15년부터 적용되는 특정 대기유해물질 배출량이 연 10톤 이상인 사업장에 대해 50(13) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 의 기준을 적용하게 될 경우, CK-2의 일부 측정 자료는 배출허용기준을 초과하였다. 따라서 투입되는 원료 및 연료 등에 대한 지속적 관리와 배출가스 제어설비 보완 등의 제도마련이 필수적으로 판단된다.

MWI-1의 수은 농도는 총수은법에 의해 측정된 수은 농도가 64.45 (7.09~297.80) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 이었으며, 흡착트랩법에 의해 측정된 결과는 66.43 (8.17~310.71) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 이었다. % RSD는 3.00~11.33%로 비교적 재현성 및 정밀도가 높았다. 그러나, 의료폐기물 성상에 따라 수은농도가 최대 약 40배 이상 차이가 발생할 정도로 각 측정 농도 변화가 크게 나타났다. 본 측정을 하기에 앞서 예비측정을 실시하였음에도 불구하고 예상 농도를 벗어나 QA/QC를 만족하는 흡착트랩법의 6회 측정 결과 값을 얻기 위해 10회 이상 측정을 실시하였다. MWI-1의 수은 평균농도는 대상 업종 가운데 가장 높은 65.44 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 CPP-1에 비해 약 60배 이상의 높은 수준이었다. MWI의 배출허용기준은 80 (12) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 특정대기유해물질 배출량이 연 10톤 이상인 사업장에 대해서는 30(12) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 이다. MWI-1의 일부 측정결과가 배출허용기준을 초과함에 따라 배출허용기준을 준수하는 적절한 방지시설 운용이 요구된다.

더불어 흡착트랩법의 적용성을 검토하였다. 흡착트랩법은 가스상 수은만을 채취·분석한다는 단점이 있지만 선행연구(NIER, 2013)에 따르면, 석탄 화력발전 시설과 시멘트 소성시설에서 입자상 수은은 전기집진 시설이나, 여과집진시설에 의해 대부분의 조대 및 미세 입자가 안정적으로 제거되어 총 수은 농도의 5% 미만의 화학종 분포를 보여 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 의료폐기물 소각시설은 의료폐기물 성상에 따라 수은 배출농도 차이가 크게 나타남에 따라 배출가스 중 수은 농도가 일정하고 저농도에서 측정 신뢰도가 높은 흡착트랩법의 특성으로 인하여 적용이 곤란할 것으로 판단된다.

3.2 배출원별 배출계수 도출 결과

본 연구에서 측정된 배출원별 수은 배출농도를 이용하여 배출계수를 도출하였다. 각 시설마다 측정회수는 총수은법 및 흡착트랩법 각각 6회씩 총 12회이며, 실측을 통하여 도출된 배출계수는 표 3과 같으며, 도출된 배출계수는 방지시설 후단에서 측정된 배출계수(Controlled)이다. 화력발전시설이나 소각시설은 연소 및 소각공정으로 CPP-1은 유연탄이 1 ton 연소될 때 14.50 mg의 수은이 대기 중으로 배출되며, MWI-1은 의료폐기물이 1 ton 소각될 때 1,290.18 mg의 수은이 배출된다. 시멘트 소성시설은 제품생산량에 따른 배출계수를 산정하였으며, CK-1, CK-2는 시멘트(clinker)가 1 ton

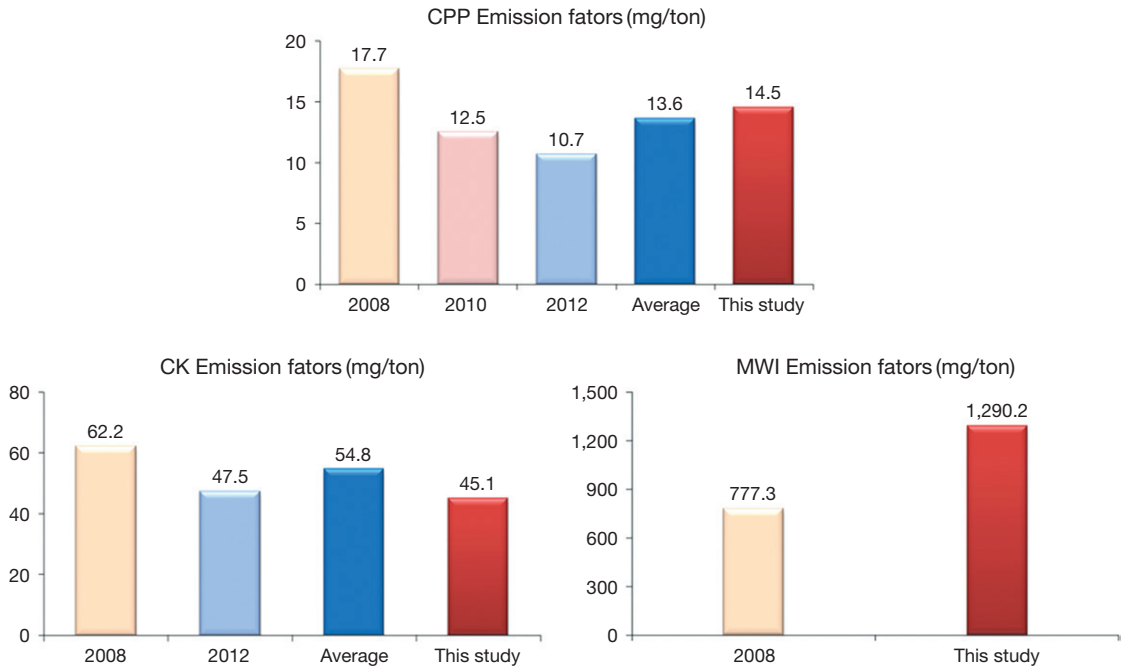


Fig. 7. Mercury emission factor on this study.

생산될 때 각각 11.29, 78.91 mg의 수은이 대기 중으로 배출된다. 측정데이터 및 도출된 배출계수를 US EPA AP-42에서 제시하고 있는 등급을 적용한 결과 측정데이터 등급분류는 시험이 EPA 참고시험법 및 명시된 방법에 의해 이루어진 경우로 A~D등급 가운데 “A”등급이며, 배출계수 등급분류는 측정데이터가 A, B등급인 것으로부터 개발된 배출계수로서 시료의 대표성 및 측정횟수가 다소 부족하여 A~F등급 가운데 “B”에 해당한다(Kim *et al.*, 2012b).

한편, 본 연구에서 도출된 배출계수를 기존의 선행연구(NIER, 2008, 2010, 2012) 배출계수와 비교한 값은 그림 7과 같다. 석탄 화력발전소는 14.5 mg/ton으로 선행연구 결과 13.6(10.7~17.7) mg/ton과 오차 10% 내로 비슷한 배출계수를 보였다. 시멘트 소성시설에서의 배출계수는 기존의 연구에 비해 약 20% 정도 낮은 값을 나타내고 있으나, 비슷한 수준의 배출계수로 판단된다. 또한, 의료폐기물 소각시설의 배출계수는 1,290.2 (139.9~6,125.7) mg/ton의 결과를 얻었다. 의료폐기물 소각시설은 소각물질을 일괄 투입방식으로 연소가 이루어지기 때문에 공정이 일정하지 못하고, 소각물질에

따라 수은 배출농도가 급격히 변화하는 특성을 지녀 많은 선행연구가 이루어지지 못하였으며, 2008년 선행연구와 비교 결과 약 67% 높았다. 하지만, 본 연구의 1회차 고농도로 배출된 측정결과를 제외하면 배출계수는 318.0 mg/ton으로 약 4배 이상으로 작아지며, 선행연구 배출계수의 약 40%에 해당한다. 이를 통해 본 연구에서 도출된 수은 배출계수는 국가 수은 배출량 산정 시 중요한 기초자료로 활용될 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국제 흐름에 맞춘 선진화된 수은 측정방법 도입을 위해 총수은법 및 EPA Method 30B 비교·분석을 하였으며, 수은 다량 배출시설에 대한 배출계수를 산정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대상시설에서의 방법별 수은 배출농도는 다음과 같다.
 - CPP-1: 총수은법 1.11 (0.79~1.60) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 1.09 (0.83~1.75) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$

- CK-1: 총수은법 5.31 (3.64~8.01) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 4.24 (2.80~6.59) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$
 - CK-2: 총수은법 25.09 (3.18~53.57) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 28.49 (3.39~64.66) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$
 - MWI-1: 총수은법 64.45 (7.09~297.80) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 흡착트랩법 66.43 (8.17~310.71) $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$
- 2) 각 방법별 정밀도는 CPP-1, CK-2, MWI-1에서 평균 약 6.8% RSD로 비교적 높은 재현성을 보였으며, CK-2는 약 16.3% RSD로 총수은법이 흡착트랩법에 비해 높은 농도로 분석되었다.
- 3) 배출계수는 CPP-1 14.50 mg/ton, CK-1 11.29 mg/ton, CK-2 78.91 mg/ton 및 MWI-1 1290.18 mg/ton으로 산정되었다.

현재 고정오염원으로부터 배출되는 수은에 대한 배출특성 파악 및 배출계수 개발 등에 대한 연구는 전문성, 경제성 등의 이유로 연구가 많이 부족한 상황이지만, 본 연구 등의 내용을 바탕으로 수은 측정방법 연구 뿐만 아니라, 측정방법 개선을 위한 방해인자 실험, 산추출 및 열탈착 분석방법의 정확도 비교 등의 연구가 활발히 진행되어야 할 것으로 사료된다.

References

- American Society for Testing and Materials (ASTM) (1999) Standard Test Method for Elemental, Oxidized, Particle-Bound, and Total Mercury in Flue gas Generated from Coal-fired Stationary Sources.
- Jang, K.-W., H.-C. Kim, Y.-M. Lee, D.-J. Song, N. Jung, S.-K. Kim, J.-H. Hong, S.-J. Lee, and J.-S. Han (2011) Estimating PM Emission Factor from Coal-Fired Power Plants in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(5), 485-493. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.-C., J.-M. Park, K.-W. Jang, S.-B. Lee, N.-E. Jung, D.-J. Song, J.-H. Hong, S.-J. Lee, and S.-K. Kim (2012a) A Study on the Development of the Mercury Emission Factor from Coal-fired Power Plant, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(2), 172-181.
- Kim, J.-H., J.-M. Park, S.-B. Lee, D. Pudasane, and Y.-C. Seo (2010) Anthropogenic mercury emission inventory with emission factors and total emission in Korea, *Atmos. Environ.*, 44(2010), 2714-2721.
- Kim, S.-K., K.-W. Jang, J.-H. Kim, C. Yoo, J.-H. Hong, and H.-C. Kim (2012b) SRF Combustion Pollutants' Impact on Domestic Emissions Assessments, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 28(6), 656-665.
- Ministry of Environment (MOE) (2015) Clean Air Conservation Act.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2008) A study on Mercury Emissions of Air Pollutants Emissions Sources.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) A study on Intergrated Management of Mercury Using and Emission Facilities(I).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) A study on Intergrated Management of Mercury Using and Emission Facilities(II).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) A study on Intergrated Management of Mercury Using and Emission Facilities(III).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) International Joint Research on Anthropogenic Emission Sources for Preparation of a Global Legally Binding Instrument on Mercury.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2013) Global Mercury Assessment.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (1990) Method 101A-Determination of Particulate and Gaseous Mercury Emissions from Sewage Sludge Incinerators.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2010) Method 30B-Determination of Total Vapor Phase Mercury Emission from Coal-fired Combustion Sources Using Carbon Sorbent Traps.
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (1996) Method 3052-Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices.