

석탄 화력발전시설에서의 수은 배출계수 개발에 관한 연구

A Study on the Development of the Mercury Emission Factor from Coal-fired Power Plant

김형천 · 박정민 · 장기원 · 이상보 · 정노을 · 송덕종 · 홍지형 · 이석조 · 김상균*

국립환경과학원 대기공학연구과

(2012년 1월 11일 접수, 2012년 2월 21일 수정, 2012년 3월 20일 채택)

Hyung-Chun Kim, Jung-Min Park, Kee-Won Jang, Sang-Bo Lee, Noel Jung,
Deok-Jong Song, Ji-Hyung Hong, Suk-Jo Lee and Sang-Kyun Kim*

Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research

(Received 11 January 2012, revised 21 February 2012, accepted 20 March 2012)

Abstract

Mercury is one of the most hazardous air pollutants. Recently, mercury has been a concern in domestic and overseas because it has lethal toxicity, long distance transport, persistence and bioaccumulation in the environment. Stationary combustion sources such as coal-fired power plants, waste incinerators, and cement kilns are the major sources of mercury emissions. The objectives of this study were to measure the concentration for mercury from coal-fired power plants and to calculate emission factor to estimate its emission. The results showed that the mercury concentrations in the flue gas were 1.63 ~ 3.03 mg/Sm³ in anthracite-fired power plants (average 2.32 mg/Sm³) and 1.95 ~ 3.33 mg/Sm³ in bituminous-fired power plants (average 2.6 mg/Sm³). Mercury emission factor was estimated as 25.74 mg/ton for anthracite-fired power plants and 12.48 mg/ton for bituminous-fired power plants. Because actual measurements are limited in quantity, it is desirable to refine our estimates by extending the actual measurements.

Key words : Coal-fired power plant, Mercury speciation, Emission factor

1. 서 론

최근 먼지, 황산화물 및 질소산화물 등과 같은 일 반대기오염물질에 대한 관리목표를 달성한 선진 각국에서 '삶의 질'에 대한 개선욕구가 커지는 추세이다. 따라서 국민건강에 직접적인 영향을 미치는 유해

대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants, HAPs)에 대한 적절한 관리 체계의 구축에 관심이 집중되고 있다. HAPs는 환경 중에 미량으로 존재하지만 직접적·장기적 노출로 인하여 인간의 건강에 악영향을 미치며, 동·식물을 포함한 자연생태계에 위협을 주는 물질이다. 또한 대기질 관리에 있어서 가장 관심을 받는 환경오염물질이기도 하다. 수은은 특정유해대기오염물질 35종 중 하나로 미국 EPA의 Integrated Risk Assessment System에서는 수은을 발암 가능성

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7347, E-mail : nierkum@korea

이 있는 B등급의 물질로 구분하고 있다(Jung and Shim, 2009; NIER, 2006). 또한 UNEP에서는 수은화합물을 ‘전 지구적 오염물질(Global atmospheric pollutants)’로 규정하고 있다(Park *et al.*, 2010). 이처럼 최근 미국을 비롯한 주요 선진국에서 수은의 유해성에 관한 연구결과를 발표하면서 지구적 차원에서의 수은 저감을 위한 배출현황 파악과 제어기술연구를 활발히 진행하고 있다.

수은화합물의 대부분은 인위적 배출원에서 배출된다(Pudasainee *et al.*, 2009). UNEP(2008)에서 발행한 “Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment”에 수록된 2005년 주요 부문별 수은화합물 배출원 자료에 의하면 전 세계 수은 총 배출량은 1,930 ton이다. 이 가운데 화석연료를 연소시키는 화력발전시설이 878 ton으로 가장 크고, 금의 추출 및 가공공정, 비철금속의 가공공정, 시멘트 소성로 순 이었다. 또한 나라별 배출량은 우리나라가 32.2 ton으로 전 세계에서 9번째로 높은 수은 배출국가에 해당한다(UNEP, 2008). 이러한 인위적 배출원에서 배출되는 수은화합물은 원소수은(Hg^0)과 산화수은(Hg^{2+})의 형태로 구분할 수 있다(Yudovich *et al.*, 2005). 산화수은의 경우, 체류시간은 수일 미만의 짧은 수명을 지니고 있는 반면, 원소수은의 경우 1년 이상의 긴 체류시간을 지닌다(Li *et al.*, 2009). 원소수은은 용해성과 반응성이 낮지만, 휘발성이 높기 때문에 기존 대기오염방지시설로 처리가 어려운 것으로 알려져 있다. 이에 따라 인위적 배출원으로부터 배출되는 수은화합물을 효과적으로 제어하기 위해서는 방지시설에 따른 배가스 중에 배출되는 수은화합물의 화학종(speciation)에 대한 거동을 연구할 필요가 있다.

석탄은 어떠한 에너지원보다도 많은 양의 수은을 함유하고 있다(Park *et al.*, 2008). 따라서 본 연구에서는 석탄을 사용하는 화력발전시설을 대상으로 연료종류(무연탄, 유연탄)에 따라 각각 2개 시설을 선정

하였다. 선정된 시설에서 수은화합물의 화학종별 배출특성을 파악, 배출계수를 개발 및 배출량을 산정하는 연구를 수행하였다.

2. 연구 및 방법

2.1 사업장 선정 및 연구내용

2009년 기준 우리나라에 설치되어 있는 총 발전설비 용량은 77,662 MW, 총 발전량은 454,317 GWh이며, 이 중 화력발전시설의 비중이 약 64%를 차지하고 있다(KEPC, 2009). 화력발전은 화석연료인 석탄, 석유, 가스 등을 연소시켜 발생하는 열 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 발전 방식이다(Jang *et al.*, 2011). 화력발전 가운데 석탄을 연료로 사용하는 시설이 차지하는 비율은 69.3%로 가장 높다. 따라서 국립환경과학원의 대기배출원조사 시스템인 SEMS(Stack Emission Management System) D/B를 이용하여 오염물질 배출량 상위 사업장을 무연탄과 유연탄으로 나누어 각각 2개 시설을 선정하였다. 선정된 화력발전시설에서 대기오염공정시험방법(미국 EPA Method 101A와 동일)과 Ontario Hydro Method(OHM)를 이용하여 배출가스 중 수은 농도를 측정하였다. 이를 이용하여 배출계수를 도출하고 수은 배출량을 산정하였다. 또한 OHM을 통해 수은화합물의 화학종별(Hg^0 , Hg^{2+} , Hg_g) 분석을 실시하였다. 이는 수은의 배출제어에 따른 방지시설 설계, 독성, 생물농축, 대기 중에서의 거동과 변환 등을 설명하는데 필수적이다.

2.2 연구대상 시설

본 연구에서 선정된 석탄화력발전시설의 발전용량, 방지시설 등과 같은 일반 사항은 표 1과 같다. 모든 시설이 120 MW 이상의 대형 발전시설용 보일러로서 안정적인 스팀생산이 이루어지고 있다. 무연탄을 사용하는 시설(Coal-fired Power Plant #1, CPP#1)

Table 1. General information of the target coal-fired power plant.

Coal type	Site	Stack no.	Generating facilities (MW)	Gross generation (MWh)	Fuel usage (ton/day)	Control device (APCD)
Anthracite	CPP#1	2	200	1,534,500	2,150	ESP
	CPP#2	1	120	777,936	1,300	ESP, FGD
Bituminous	CPP#3	5	500	4,304,443	4,670	SCR, ESP, FGD
	CPP#4	8	500	4,628,132	4,500	SCR, ESP, FGD

은 연료의 열량과 품질이 균일하지 못해 연료의 완전 연소를 위해 유동층 연소방식을 사용하고 있다. CPP#2는 무연탄의 낮은 발열량을 보완하기 위하여 유연탄을 혼소하고 있다. 또한 탈황설비(Wet Flue-Gas Desulfurization, FGD)가 별도로 설치되어있지 않은 CPP#1의 경우 무연탄 연소와 동시에 분말형태의 소석회를 분사하여 황산화물을 제어하는 방식의 노내건식탈황설비를 사용하고 있다(NIER, 2010). 석탄 화력발전시설의 주요방지시설은 질소산화물을 제어하기 위한 선택적 촉매 환원시설(Selective Catalytic Reduction, SCR), 먼지를 저감하기 위한 전기집진기(Cold-side Electrostatic Precipitator, ESP)와 황산화물을 제어하기 위한 배연탈황시설을 운영한다.

2.3 시료채취 및 분석

2.3.1 시료채취

배출가스의 시료채취는 대기오염공정시험방법과 OHM 두 방법을 이용하여 굴뚝에서 3회 이상 채취하였으며, 각 시설별 방지시설과 시료채취지점은 그림 1과 같다. 또한 배출가스 중 수은 농도에 영향을 줄 수 있는 연료용 석탄과 물질수지 고려를 위한 비산재 및 바닥재에 관해서도 배출가스 시료채취 시간에 맞추어 전기집진기와 발전시설에서 채취하였다.

시료갯수는 일일 3회씩, 3일 동안 총 9개를 채취하였다.

대기오염공정시험방법과 OHM은 시료채취장치의 구성이 거의 동일하지만 흡수액에서 차이를 보인다. 대기오염공정시험방법의 경우 가스상 수은은 4% 과망간산칼륨과 10% 황산으로 구성된 흡수액을 사용하여 채취하며, 입자상 수은은 여과지에 채취하여 분석한다. 이들의 농도를 각각 측정된 후 합산함으로써 하나의 총수은값을 도출할 수 있다. 한편 OHM은 가스상 수은을 원수은(Hg^0)과 산화수은(Hg^{2+})으로 분리하여 채취할 수 있도록 3개의 흡수액을 사용한다. 산화수은을 채취하기 위하여 1N 염화칼륨을 사용하고, 원수은을 채취하기 위하여 5% 질산과 10% 과산화수소, 4% 과망간산칼륨과 10% 황산을 사용한다. 이러한 방법을 통하여 OHM은 수은화합물의 화학종별 분석이 가능하다. 두 방법의 시료채취장치의 구성도는 그림 2, 3과 같다. 시료채취 방법은 두 방법 모두 입자상 수은을 채취하기 때문에 등속흡인을 하였으며, 각각 최소 $1 Sm^3$, $2 Sm^3$ 이상의 유량으로 채취하였다. 수은의 경우 미량의 농도로 배출되므로 배출시설을 사전조사하여 충분한 유량을 채취하였다.

2.3.2 시료의 전처리 및 분석

시료의 전처리는 두 방법 모두 여과지와 흡수액을

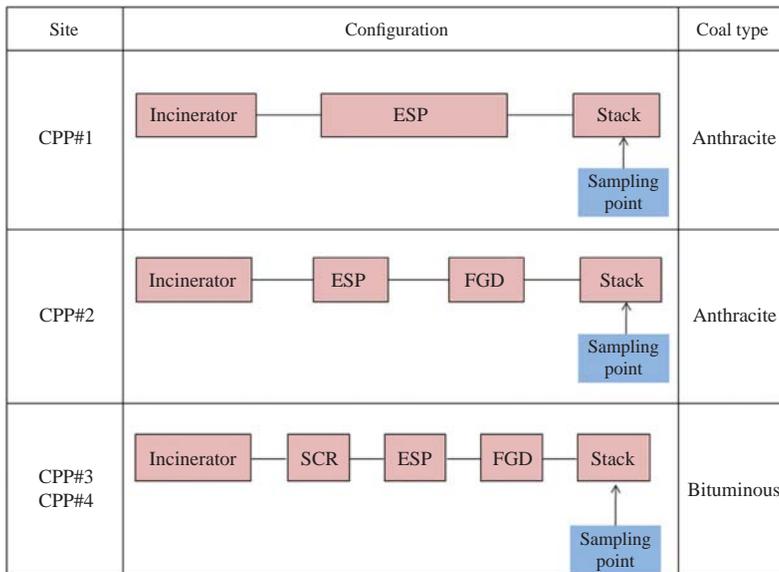


Fig. 1. Schematic diagram of APCDs and sampling point in flue gas emission system.

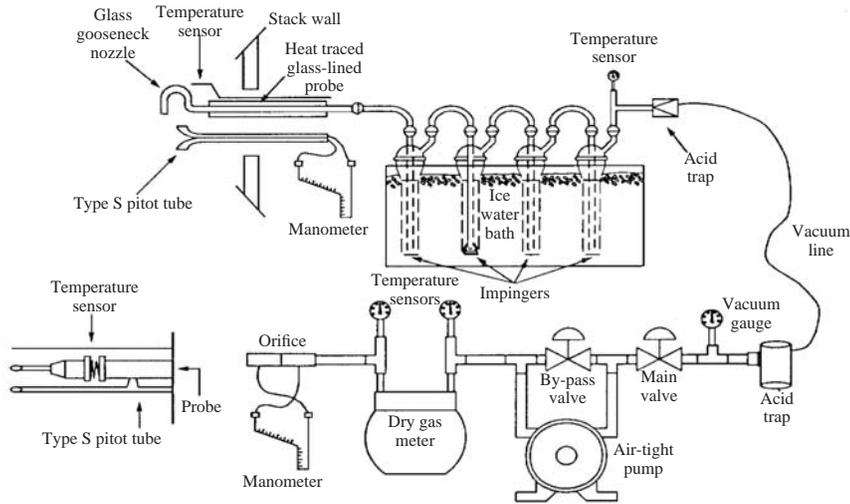


Fig. 2. Sampling device of the Korea Standard Methods for Examination of Air.

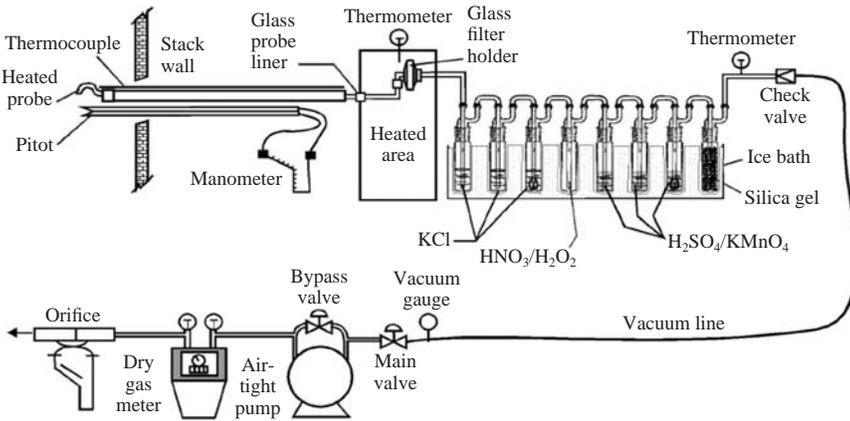


Fig. 3. Sampling device of the Ontario Hydro Method.

구분하여 전처리하였으며, OHM의 경우 화학종별 분석을 위해 흡수액을 3가지로 나누어 전처리하였다. 각 방법의 전처리 과정은 그림 4, 5와 같다. 또한 고체상물질인 석탄, 비산재 및 바닥재는 대한 분석을 위해 그림 6과 같은 미국 EPA 7471A 방법으로 전처리하였다. 전처리가 완료된 시료는 수은분석기(Mercury instruments, AURA-254, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석시 정도관리를 위해 OHM에서 제시하고 있는 검정곡선 작성 방법에 따라 표준시료를 0.02, 0.1, 0.5, 2.0, 5.0 µg/L로 제조하고, 각각 1 mL씩 분취

하여 분석하였다. 그 결과, 검정곡선의 R² 값이 0.999 이상을 유지하였다. 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)는 0.05 µg/L의 동일한 시료 7개를 준비하여 각 시료를 전처리 및 분석하였으며 0.03 µg/L 값을 나타냈다. 정확도(Accuracy) 및 정밀도(Precision)는 1 µg/L의 동일한 시료 5개를 준비하여 각 시료를 전처리 및 분석하였으며, 정확도와 정밀도를 구하는 식은 (1), (2)와 같다.

$$\text{정확도}(\%) = \frac{X_m}{X_i} \times 100 \quad (1)$$

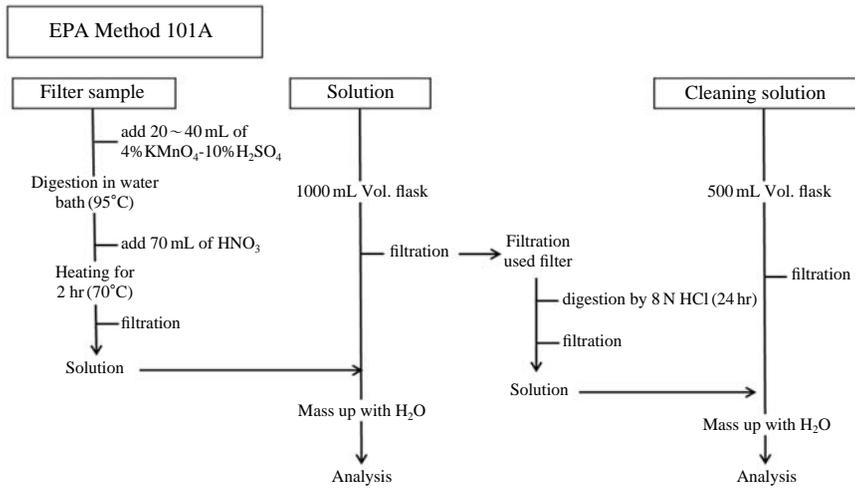


Fig. 4. Procedures for Mercury analysis (U.S. EPA Method 101A).

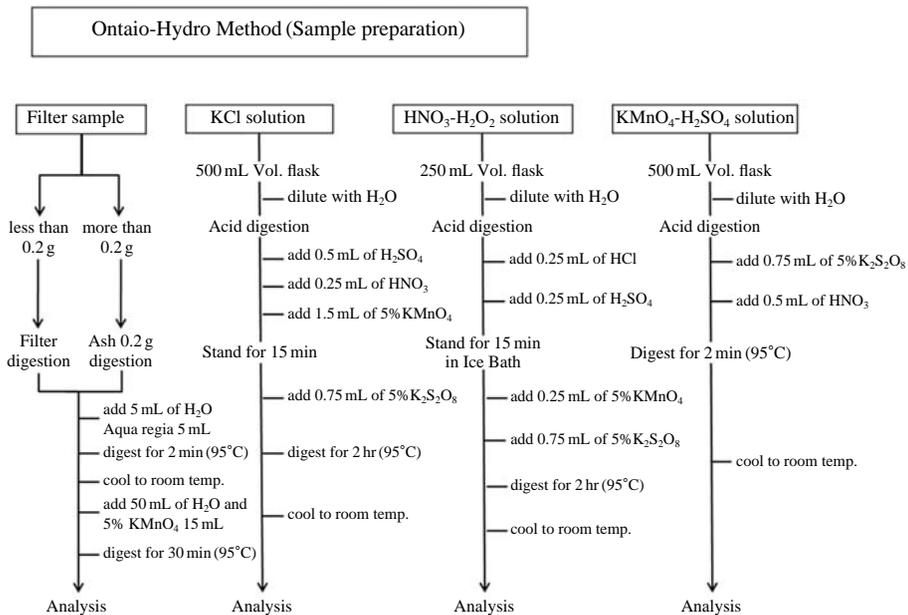


Fig. 5. Procedures for Mercury analysis (Ontario Hydro Method).

$$\text{정밀도 (\%)} = \text{RSD} = \frac{S}{X_m} \times 100 \quad (2)$$

X_m = 평균측정농도 값,
 X_i = 제조농도 또는 이론농도, S = 표준편차
 평균측정농도 값은 $0.967 \mu\text{g/L}$ 이고, 표준편차는

0.0195 로 정확도는 96.7% , 정밀도 (RSD)는 2.02% 를 기록하였다.

2.4 배출계수 및 배출량 산정

배출원별 수은의 배출계수는 식 (3)과 같이 산정하였다. 수은농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 실측에 의한 값이며, 유량

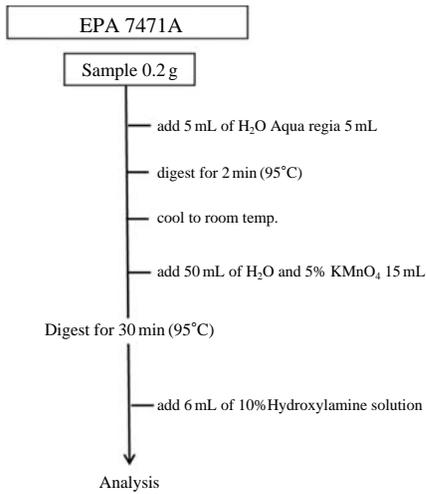


Fig. 6. Procedures for Mercury analysis (U.S. EPA Method 101A).

은 굴뚝의 내경 (m)과 유속 (m/sec)으로 계산하였다. 연료사용량은 측정 당시 사용된 대상 시설의 연료사용량 (ton/hr)이다.

$$\text{수은배출계수 (mg/ton)} = \frac{\text{수은농도 } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{건조배출가스유량 } (\text{m}^3/\text{hr}) \times 10^{-3}}{\text{연료사용량 (ton/hr)}} \quad (3)$$

석탄 화력발전시설에서의 수은배출량 산정은 도출한 배출계수 (mg/ton)와 연료사용량 (ton/yr)을 적용하여 식 (4)와 같이 계산하였다.

$$\text{수은배출량 (ton/yr)} = \text{수은배출계수 (mg/ton)} \times \text{연료사용량 (ton/yr)} \quad (4)$$

3. 연구결과

3.1 석탄, 비산재 및 바닥재 중 수은 함유농도

대상 배출시설에서 배출가스 중 수은농도에 영향을 줄 수 있는 석탄, 비산재 및 바닥재에 대한 수은 함유 농도를 분석한 결과는 표 2, 3과 같다. 시료 분석은 대표성과 신뢰성을 고려하여 배출가스 시료 측정 시간에 맞추어 3회 채취하였다 (동일 시료 각 3회 분석). CPP#1에서는 베트남, 북한산의 값싼 저질 무연탄을 사용하였으며, 분석결과 CPP#2에서 사용하는

Table 2. Mercury content in Coal sample.

Site	Country of origin	Mercury/Coal (μg/g)			Coal type
		Max.	Min.	Avg.	
CPP#1	KOR-1 ^a	3.81	2.31	3.16	Anthracite
	KOR-2 ^b	3.97	1.98	2.77	
	VNM ^c	3.72	1.6	2.67	
	PRK ^d	2.8	1.47	2.11	
CPP#2	KOR-3 ^e	0.91	0.78	0.83	Anthracite
	AUS ^f	0.16	0.12	0.15	Bituminous
	IDN ^g	0.15	0.12	0.14	
CPP#3	IDN	0.13	0.11	0.12	Bituminous
	AUS	0.13	0.12	0.13	
	COL ^h	0.13	0.12	0.12	
	RUS ⁱ	0.14	0.13	0.14	
	USA ^j	0.13	0.12	0.12	
	CAN ^k	0.14	0.13	0.14	
CPP#4	IDN	0.18	0.13	0.15	Bituminous
	AUS	0.16	0.13	0.14	
	ZAF ^l	0.14	0.13	0.13	
	RUS	0.14	0.13	0.14	

^aJang-Sung, Korea.

^bKyung-Dong, Korea.

^cVietnam.

^dDemocratic People's Republic of Korea.

^eUnknown, Korea.

^fAustralia.

^gIndia.

^hColombia.

ⁱRussian Federation.

^jUnited States of America.

^kCanada.

^lRepublic of South Africa.

Table 3. Mercury content in Ash.

Site	Mercury/Fly ash (μg/g)			Mercury/Bottom ash (μg/g)		
	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.
CPP#1	11.15	6.34	8.89	0.57	0.36	0.44
CPP#2	1.33	1.09	1.17	0.52	0.38	0.47
CPP#3	0.86	0.64	0.72	0.53	0.33	0.42
CPP#4	1.17	0.74	0.94	0.47	0.39	0.43

무연탄보다 수은 함유농도가 2~4배 높게 분석되었다. 무연탄의 수은 함유농도차이는 비산재 분석결과로 이어져 CPP#1의 비산재 수은 함유농도가 CPP#2에 비해 약 10배 높게 분석되었다. 유연탄 사용시설인 CPP#3, CPP#4는 유연탄, 비산재 및 바닥재는 모두 비슷한 수은 함유농도를 보였으며, 비산재에 비해 바닥재가 낮은 수은 함유농도를 나타냈다. 이는 수은

화합물 대부분이 미량 금속과는 대조적으로 휘발성이 매우 높기 때문에 연소 배출가스 중에서 대부분 증기 상으로 존재하며, 150°C 정도의 저온에서도 석탄으로부터 휘발될 수 있기 때문에 바닥재의 수은 함유농도가 비산재에 비하여 낮은 농도를 보인다 (Kevin and Zygarlicke, 1996).

3.2 배출가스 중의 수은 농도

각 배출시설에서의 배출가스 중 수은 농도는 표 4와 같다. 측정횟수는 각 발전시설에서 2가지 측정방법으로 3회 이상씩 측정하였으며, 무연탄-화력발전시설(2)에서 7회, 유연탄-화력발전시설(2)에서 6회를 측정하였다. 각 시설별 배출되는 수은 농도는 무연탄을 사용하는 배출시설 가운데 CPP#1에서의 평균농도가 2.60 µg/Sm³로 CPP#2 평균농도 1.97 µg/Sm³보다 높았다. 유연탄을 사용하는 배출시설의 경우 CPP#3에서 3.08 µg/Sm³로 CPP#4의 2.28 µg/Sm³보다 높은 수준이었다. 연료별 배출 수은 농도는 무연탄을 사용하는 시설 CPP#1~2의 평균 농도가 2.32 µg/Sm³로 유연탄을 사용하는 시설 CPP#3~4의 2.68 µg/Sm³보다 농도가 낮았다. 이는 대기환경보전법에서 제시하는 고체연료를 사용하는 발전시설에 관한 수은화합물

배출허용기준 100 (6) µg/Sm³보다 현저히 낮은 농도 값이다.

화력발전시설에서의 배출되는 수은 중 분포는 연료의 조성과 공정조건에 의하여 달라진다 (Prestbo and Bloom, 1993). 따라서 본 연구는 OHM방법을 통하여 수은화합물의 화학종별 분석을 하였다. 분석 결과 Hg_p 0.5~2.0%, Hg²⁺ 6.7~31.3%, Hg⁰ 66.7~92.2%의 분포로 배출되었으며 그림 7과 같다. 한 편 본 연구에서 도출된 화학종별 결과의 신뢰도 수준을 파악하고자 미국 EPA ICR (Information Collection Request)의 Mercury Information Collection Request Part III에서 제시하는 화력발전시설에서 배출되는 수은 화학 종분포 현황을 비교하였다. 화학종별로 각각 Hg_p 0.4%, Hg²⁺ 15.2%, Hg⁰ 84.4%를 제시하고 있으며, 이는 본 연구 결과와 유사한 수준임을 알 수 있다. 방지 시설에서 수은 화학종별 제거의 경우 Hg_p는 먼지 및 중금속과 마찬가지로 전기집진시설에서 95% 이상 제거되며, Hg²⁺는 수용성이어서 FGD와 같은 습식 스크러버에 의해 효율적으로 제거된다. 반면, Hg⁰은 증기압이 높고 물에 잘 녹지 않기 때문에 제거가 어렵기 때문에 산화반응을 통해 Hg²⁺로 변환시켜 제거하는 것이 효과적이다. 대표적인 산화반응형태에 의한

Table 4. Measured Mercury concentration in flue gas.

Coal type	Site	Test no.	Concentration (µg/Sm ³)				Method
			Hg _p	Hg ²⁺	Hg ⁰	Hg _T	
Anthracite	CPP#1	1	0.04	0.09	2.25	2.38	OHM
		2	0.01	0.21	1.89	2.11	OHM
		3	-	-	-	3.03	101A
		4	-	-	-	2.88	101A
		Avg.	-	-	-	2.60	-
Anthracite	CPP#2	1	0.03	0.43	1.90	2.36	OHM
		2	0.03	0.31	1.57	1.91	OHM
		3	-	-	-	1.63	101A
		Avg.	-	-	-	1.97	-
		Sub-avg.	-	-	-	2.32	-
Anthracite	CPP#3	1	0.05	1.01	1.83	2.89	OHM
		2	0.07	0.84	2.12	3.03	OHM
		3	-	-	-	3.33	101A
		Avg.	-	-	-	3.08	-
		Sub-avg.	-	-	-	2.68	-
Bituminous	CPP#4	1	0.01	0.45	1.74	2.20	OHM
		2	0.01	0.59	1.35	1.95	OHM
		3	-	-	-	2.70	101A
		Avg.	-	-	-	2.28	-
		Sub-avg.	-	-	-	2.68	-

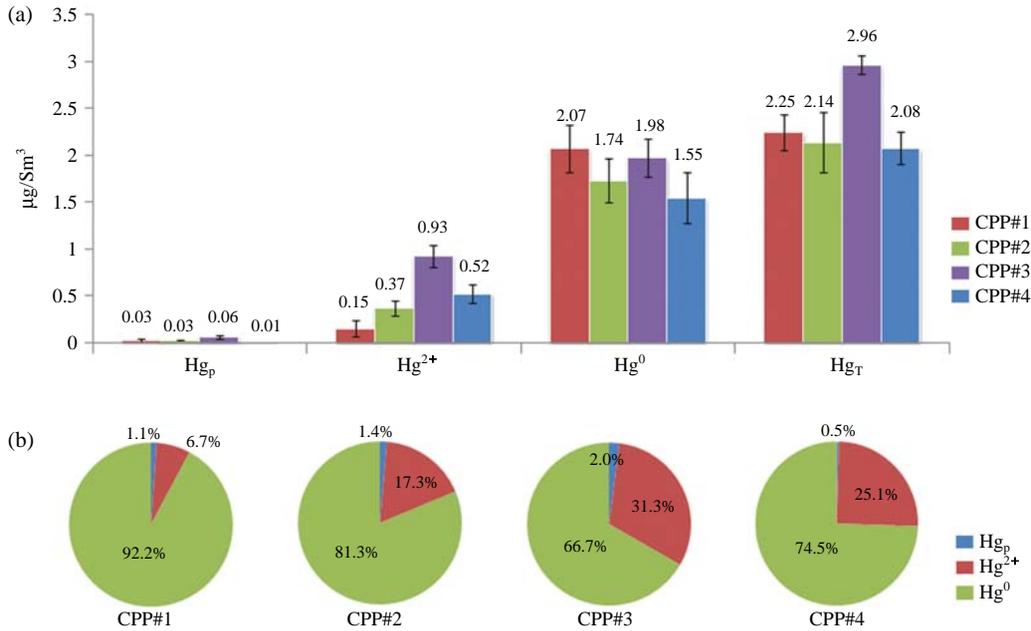


Fig. 7. (a) Concentration of mercury released from each facilities unit, (b) Relative composition of Hg species released from each facilities unit.

결과로써는 CPP#3~4에서 Hg²⁺이 CPP#1~2보다 높은 분포를 보였다. 이유는 CPP#3~4에는 SCR이 설치되어 있어 SCR을 거치면서 수은의 산화반응을 통해 Hg²⁺이 생성되었기 때문이다(Thomas *et al.*, 2008).

3.3 배출계수 도출 및 배출량 산정

본 연구를 통해 도출된 배출계수는 방지시설 후단에서 측정된 (Controlled) 배출계수로써 표 5와 같다. 도출된 배출계수는 무연탄과 유연탄 사용시설 각각 25.74 mg/ton, 12.48 mg/ton으로, 무연탄 사용시설이 유연탄 사용시설에 비해 약 2배 높게 산정되었다. 국·내외 배출계수 비교시 NIER (2002)에서 제시한 유연탄 배출계수는 12.2 mg/ton으로 본 연구에서 도출한 배출계수 값과 유사한 수준이다. 또한 최근에 발표된 Kim *et al.* (2010)은 무연탄 25.8 mg/ton, 유연탄 17.6 mg/ton으로 가장 유사한 배출계수 값을 나타낸다. 한편, 미국 EPA에서 제시하고 있는 무연탄, 유연탄 배출계수는 각각 65 mg/ton, 49.8 mg/ton이다. 이 배출계수는 연료의 성상, 연소조건, 방지시설 유형 및 성능 등의 국가적 특성이 고려되지 않아 본 연구 결과와 비교할 때 최대 3배 이상 높은 값을 나타내는

Table 5. Mercury emission factor on this study.

Coal type	Site	Test No.	This study (mg/ton)	Reference (mg/ton)
Anthracite	CPP#1	1	24.02	
		2	23.93	
		3	30.62	227.3 ^a
		4	32.45	25.8 ^b
CPP#2	1	25.47	65.0 ^c	
	2	23.38		
	3	19.83		
Sub-avg.			25.74	
Bituminous	CPP#4	1	7.43	
		2	7.83	
		3	8.60	12.2 ^a
	CPP#5	1	16.43	17.6 ^b
		2	13.97	49.8 ^c
3	20.63			
Sub-avg.			12.48	

^aNIER (2002), Emission Characteristics of Mercury in Air Emission Source

^bKim *et al.* (2010)

^cUS EPA-42

것으로 사료된다. 측정데이터 및 도출된 배출계수를 미국 EPA AP-42에서 제시하고 있는 등급을 적용한

결과 측정데이터 등급분류는 시험이 EPA 참고시험법 및 명시된 방법에 의해 이루어진 경우로 A~D 등급 가운데 “A”, 배출계수 등급분류는 측정데이터가 A, B등급으로 시료의 대표성이나 측정횟수가 다소 부족하여 A~F 등급 가운데 “B”에 해당한다.

본 연구에서 도출된 배출계수를 적용하여 배출량 산정시 낮은 수준의 신뢰도를 나타낼 것으로 사료된다. 그러나 석탄 화력발전시설의 배출량 수준을 개략적으로나마 가능할 수 있는 척도로 활용하였다. 배출량 산정 결과 무연탄 사용시설에서 69.2 kg/yr, 유연탄 사용시설에서 887.2 kg/yr가 배출되는 것으로 산정되었다. 석탄 화력발전시설에서 대기로 배출되는 수은량은 956.4 kg/yr로 '09년 산정한 국가 수은배출량(NIER, 2009)의 약 10%의 양에 해당되는 것이다. 그러나 현재 화력발전시설에 대한 수은 배출량 산정은 대기로 배출되는 배출계수만 연구되고 있어서, 타 매체로 배출되는 수은 배출량은 산정하기가 어려운 실정이다. 추후 수은의 국제적·통합적 관리를 위해서는 UNEP에서 제공하는 수은 각 매체별 배출계수를 검토하고 국내 실정에 맞는 배출계수를 개발해야 된다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수은화합물의 주요 인위적 배출원인 화력발전시설을 대상으로 수은의 배출특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 대상시설에서의 수은은 대기배출허용기준보다 현저히 낮은 (3% 미만) 농도로 배출되었다. 무연탄 사용시설의 평균 농도는 $2.32 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$, 유연탄 사용시설의 평균농도 $2.68 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 이었다.
- 2) 화학종별 분포도의 경우 Hg_p 는 0.5~2.0%, Hg^{2+} 는 6.7~31.3%, Hg^0 는 66.7~92.2%를 보였으며, 이는 ICR에서 제시하는 Hg_p 0.4%, Hg^{2+} 15.2%, Hg^0 84.4%와 비슷한 수준이었다.
- 3) 배출계수는 무연탄 사용시설에서 25.74 mg/ton, 유연탄 사용시설 12.48 mg/ton으로 산정되었으며, 무연탄 사용시설에서 약 2배 높게 산정되었다.
- 4) 본 연구를 통해 도출된 배출계수를 이용하여 석탄 화력발전시설에서의 배출량을 산정한 결과 무연탄 사용시설에서 69.2 kg/yr, 유연탄 사용시설에서

887.2 kg/yr로 산정되었으며, 이는 09년 국가 수은 배출량의 10%에 해당하는 양이다.

현재 석탄 화력발전소에서의 수은 배출특성에 관한 연구는 활발히 진행되고 있으나 수은 배출특성에 관한 정확하고 신뢰성 높은 기초자료가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 석탄 화력발전시설에서의 수은 화학종분포도와 배출계수를 도출함으로써 수은배출량 산정에 있어서 기초자료를 제공했다는 점에서 큰 의의가 있다. 향후 데이터의 신뢰성을 위하여 측정횟수를 좀 더 확보할 예정이다.

참 고 문 헌

- Gale, T.K., B.W. Lani, and G.R. Offen (2008) Mechanisms governing the fate of mercury in coal-fired power systems, *Fuel Processing Technology*, 89, 139-151.
- 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, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 485-493. (in Korean with English abstract)
- Jung, J.-S. and S.-G. Shim (2009) Mercury Research and Management in Korea, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 25(2), 99-107. (in Korean with English abstract)
- Kevin, C.G. and C.J. Zygarricke (1996) Mercury Speciation in Coal Combustion and Gasification Flue Gases, *Environmental Science & Technology*, 30(8), 2421-2426.
- Kim, J.-H., J.-M. Park, S.-B. Lee, D. Pudasainee, and Y.-C. Seo (2010) Anthropogenic mercury emission inventory with emission factors and total emission in Korea, *Atmospheric Environment*, 44, 2714-2721.
- Korea Electric Power Corporation (2009) Statistics of Electric Power in Korea, KEPC Official Press Release No. 2009-08460528-0020.
- Li, P., X.B. Feng, G.L. Qui, L.H. Shang, and Z.G. Li (2009) Mercury pollution in Asia, *Journal of Hazardous Materials*, 168, 591-601.
- NIER (2002) Emission Characteristic of Mercury in Air Emission Sources No. 2002-05-644.
- NIER (2006) Development of analytical methods for Organomercury and Studies of field applications in the environment (I) No. 2006-45-827.

- NIER (2009) Stationary sources of mercury emission research.
- NIER (2010) A Study on Integrated Management of Mercury Using and Emission Facilities (I) No. 2010-14-1189.
- Park, J.-M., S.-B. Lee, H.-C. Kim, D.-J. Song, M.-S. Kim, M.-J. Kim, Y.-H. Kim, S.-H. Lee, J.-C. Kim, and S.-J. Lee (2010) Emission Characteristics of Mercury in Zn Smelting Process, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 507-516. (in Korean with English abstract)
- Park, K.-S., J.-H. Lee, J.-H. Kim, S.-H. Lee, and Y.-C. Seo (2008) A Study on Emission Characteristics of Mercury from Coal Combustion at a Lab-scale Furnace, *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*, 24(2), 238-248. (in Korean with English abstract)
- Prestbo, E.M. and N.S. Bloom (1993) 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*, 93TA-32.05.
- Pudasainee, D., J.-H. Kim, and Y.-C. Seo (2009) Mercury emission trend influenced by stringent air pollutants regulation for coal-fired power plants in Korea, *Atmospheric Environment*, 43, 6254-6259.
- UNEP (2008) Technical Background Report to the Global Atmospheric Mercury Assessment.
- Yudovich, Y.E. and M.P. Ketris (2005) Mercury in coal: a review: Part 1. Geochemistry, *International Journal of Coal Geology*, 62, 107-134.