

국내 수은 연구 동향 및 관리 현황 Mercury Research and Management in Korea

정 종 수 · 심 상 규*
한국과학기술연구원 환경기술연구단
(2009년 1월 8일 접수, 2009년 3월 20일 채택)

Jongsoo Jung and Shang Gyoo Shim*
Center for Environmental Technology Research, KIST
(Received 8 January 2009, accepted 20 March 2009)

Abstract

This paper reviews the current status of mercury research on exposure and contamination, mercury emissions, emission limits and control technologies, long-range transport and deposition research, and mercury management policy in Korea.

According to a monitoring of the Ministry of Environment and the Ministry of Health and Welfare, blood mercury levels among Koreans are 5~8 times higher than those of U.S. and Germany. The most dominant source of exposure to mercury is through dietary intake. Emissions of mercury from coal-fired power plants are estimated 8.93 ton/year in 2004. Emissions of mercury from other important sources, such as waste incineration, steel and cement manufacturing and non-ferrous metal smelting operations are to be further investigated.

A study on long-range transport of mercury suggests that the dry deposition flux over the Yellow Sea was much greater than those for other oceans. As a whole, the amounts of wet depositions of nitrogen and sulfur were 1.9 and 1.5 times larger than the amounts of dry depositions in each species, respectively. Substantial influence from China caused by high emissions in East China and westerly wind was possibly suggested. However, the influence from nitrogen emission in Korea was also confirmed.

Korean Government has already adopted stringent emission limits on mercury for incinerators and boilers in 2005. However, emission limits for coal-fired power plants and non-ferrous metal smelters are rather relaxed. As the above mentioned two sources can be two most important sources of mercury emissions, control strategy for those sources are to be considered.

Key words : Mercury, Exposure, Deposition, Emission limits

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-958-5815, E-mail : sgshim@kist.re.kr

1. 서 론

수은(mercury)은 유해대기오염물질(HAPs, Hazardous Air Pollutants) 중의 하나이다. 유해대기오염물질은 인체에 암을 유발하거나, 기형아 출산 등 심각한 질병을 유발할 수 있으며, 환경 및 생태계에 악영향을 미칠 수 있는 대기오염물질로 정의할 수 있다. 환경 중에서 미량으로 존재하지만 장기적인 노출을 통해 인간의 건강에 악영향을 미치고, 자연생태계도 위협한다. 우리나라에서는 수은 등의 중금속 물질과 벤젠 등 휘발성 유기화합물(VOCs)을 포함하는 총 35종을 대기환경보전법 상 특정대기유해물질로 지정하여 관리하고 있으며, 미국도 1990년 개정된 대기정화법(Clean Air Act)에서 총 188개의 항목을 HAPs 물질로 지정하여 관리하고 있다.

수은화합물은 중금속이지만 증기압이 높기 때문에 상온에서도 증기상으로 존재한다. 대기 중으로 배출된 수은은 장시간 동안 대기 중에 체류하다가 수증 또는 지표면에 건식 또는 습식 침적이 된다. 침적된 수은은 미생물의 활동에 의해 독성이 강한 유기수은인 메틸수은(methylmercury)으로 변환된 후 메틸수은을 섭취한 어류 등의 생물농축(Bio-accumulation)을 통해 최종적으로 인간에게 큰 영향을 미치게 된다. 생물 농축되어 체내로 유입된 수은화합물은 인간의 중추신경, 신장, 간 등에 큰 독성을 보이며 특히 임신부나 가임 여성이 섭취 시 태아의 성장에 치명적인 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Björnberg *et al.*, 2005). 이에 따라 2001년 미국 식품의약품안전청과 환경보호청(US EPA-FDA, 2004)에서는 임신부와 가임여성에게는 참치 등 일부 대형어종의 섭취를 제한하도록 권고하고 있다(US FDA, 2001). 수은은 대기 중에서 증기상으로 1년 이상 장시간 체류하여 거리 이동 되는 특성이 있다. 따라서 수은은 국지적인 오염 측면이 아닌 범지구적 환경오염의 측면에서 관리해야 한다는 주장이 대두되고 있다.

유엔환경계획(UNEP)에서는 수은 화합물을 먹이사슬을 통해 생태계 전반에 유해한 범지구적 오염물질로 규정하고 있다. 2001년 2월 유엔환경계획 집행이사회에서는 수은 및 그 화합물의 지구적 오염상황 및 영향 평가를 위한 Global Mercury Assessment 사업을 결의하였다. 2005년 2월 유엔환경계획 집행이

사회에서는 Global Mercury Assessment 사업의 결과를 수용하여 UNEP Global Mercury Partnership 사업을 추진하기로 결정하였다. Global Mercury Partnership의 일환으로 석탄 연소에 의한 수은의 배출을 줄이기 위한 Reduction of Mercury Release from Coal Combustion Partnership에 대한 논의가 진행되고 있다. 미국, 일본, 유럽연합 등에서는 수은화합물에 대한 유해성과 배출현황 및 제어기술 연구에 많은 투자를 하고 있다. 또한 미국 환경보호국(Environmental Protection Agency)에서 2005년 3월 발표한 수은 대기오염 방지법에 따라 수은화합물에 대한 국가별 환경정책에 새로운 압력으로 작용할 것이다(US EPA, 2005).

본 논문에서는 수은에 대한 국내외 발표 자료를 수집, 정리하여 수은화합물에 대한 국내 정책동향 및 국내 연구기관 등의 연구동향, 주요 수은화합물 배출원 현황 및 배출특성, 수은 제어기술 개발 현황 등을 설명하고자 한다.

2. 수은의 위해성과 국내 현황

2.1 수은의 인체 노출 국내 현황

수은은 금속원소, 무기수은, 유기 화합물 등 3가지 형태로 존재한다. 호흡으로 흡입 시 신장장애를 일으키는 것으로 알려진 무기 수은은 주로 형광등 제조업 등 수은을 사용하는 작업장 등에서 고농도의 수은에 노출 시 문제가 된다. 한편 메틸수은 등의 유기수은은 식품의 섭취를 통해 체내에 유입되며 체내에 축적되어 중추신경 장애 등의 원인이 된다.

환경부를 중심으로 수은의 인체·생태 위해성 평가를 위한 조사·연구 사업이 실시되고 있다. 2005년 환경부와 보건복지부가 공동으로 수행한 국민 혈중 중금속농도 조사 결과(환경부, 2006) 수은의 혈중 평균 농도는 4.34 µg/L로, 미국, 독일 등에 비해 5~8배 높고, 독일 규정상 “민감한 사람에게 영향을 미칠 수 있는 수준”인 15 µg/L을 초과한 사람이 1.8%, 미국 환경보호국 권고기준인 5.8 µg/L를 초과한 가임기 여성이 약 27%를 차지한 것으로 보고되었다. 한편 국립환경과학원이 2004~2005년에 수행한 주민환경오염 노출수준 및 생체지표 모니터링사업 결과 울산 지역 주민의 수은 평균 농도가 8.1 µg/L로 비교적 높게 나타났다(국립환경과학원, 2005).

국립환경과학원에서는 국내에서 수은이 배출되는 것으로 알려진 석탄화력발전소와 생활폐기물 소각 시설 주변지역에 거주하는 주민과 그렇지 않은 대조 지역 주민의 생체시료 중 수은농도를 조사한 결과 뚜렷한 증가영향을 확인하지는 못하였다(김근배 등, 2008).

2.2 수은의 인체 섭취량 및 노출 경로

2005년 발표된 국립환경과학원의 조사 자료(국립환경과학원, 2005)에 의하면 우리나라 성인의 1일 수은 섭취량은 약 18.8 µg/day로 나타났다. 이는 주로 식품(18.719 µg/day)을 통해 섭취되고, 환경으로부터의 유입량은 0.108 µg/day로 추정하고 있다. 이 보고서에 따르면 식품의 섭취에 의한 수은 오염은 주로 어패류(0.27 mg/kg), 곡류(0.007 mg/kg)의 오염에 기인하는 것으로 추정할 수 있다(표 1 참조). 수은 배출원에서 대기 중으로 배출된 수은이 침적을 통해 수계로 유입된 후 수중의 먹이사슬을 통해 식품류로 전달되어 축적되는 것으로 판단된다. 또한 이 보고서에서는 공기 중 평균 수은 농도를 5.3 ng/m³으로 가정하여 숨쉬는 공기로부터 유입량을 0.106 µg/day로 계산하였으며, 물(0.0006 µg/day) 및 토양(0.0002 µg/day) 등을 통해서 섭취되는 양이 매우 적은 것으로 추정하였다.

그러나 사람들이 외부 공기에 노출되는 시간 이상으로 실내에서 활동하는 시간이 길기 때문에 흡기에 의한 수은 섭취량을 대기 중의 평균 농도를 근거로 계산하는 것은 충분하지 않다. 실내 공기 중 수은의 농도에 대한 조사가 필요한 것으로 판단된다. 논문 등을 통해 발표된 실내의 수은 농도는 35~2,022 ng/m³(Garetano *et al.*, 2006), 주택 실내의 수은 평균 농도 6.5~523 ng/m³(Carpi and Chen, 2001)는 외부 대기 중의 농도에 비해 수십~수백 배에 달하는 수준이다. 심지어 병원 실내의 수은 최고 농도는 13.9 µg/m³(Prokopowicz and Mniszek, 2005)에 달한다는 보고도 있다. 수은을 사용하는 실험실 내에서 측정된 최고 수은 농도도 일시적으로는 3,000 ng/m³에 달하는 경우도 관찰되었다. 따라서 실내공기로부터의 수은의 섭취량은 1~30 µg/day (=100~3,000 ng/m³ × 10 m³/day) 수준으로 추정할 수 있으며, 이러한 값은 현재 발표된 식품 섭취에 의한 수은 노출량에 거의 필적하는 수준이므로, 이에 대한 적절한 정책적 대응

Table 1. Mercury contents in food.

	Fish and shell ¹⁾	Tea ¹⁾	Cereal ²⁾	Bean ²⁾	Potato ²⁾
Concentration (mg/kg)	0.27	0.003	0.007	0.005	0.004

¹⁾Korea Food and Drug Administration, 2002

²⁾Korea Food and Drug Administration, 2000

Table 2. Mercury usage in Korea (Ministry of Environment, 2005).

Product or material	Detailed information
Fluorescent lamp	Production 92,000,000 ea, import 69,00,000 ea. (each lamp contains 10~50 mg of mercury)
Mercury battery	Mercury battery, mercury oxide battery (import)
Thermometer, sphygmomanometer	Thermometer (import) 680,000 ea sphygmomanometer (import) 40,000 ea
Medical material	Dental amalgam (import) 1.4 ton

이 필요하다.

2.3 국내의 수은 사용 현황

국내에서 수은은 형광등 생산 등의 용도로 주로 사용되며, 전량 외국으로부터 수입된다. 1999~2002년 사이 연 평균 약 18톤이 수입되어 유통되고 있으며, 주로 귀금속 추출(금, 은 등), 계측기(온도, 압력), 가전제품 및 전기기기, 의료용 재료(치과) 등으로 사용된다(표 2 참조). 조사 결과 2002년 14.5톤의 수은을 수입하였으며, 수은 유통량은 형광등(5.93톤), 시약(6.4톤), 촉매(3.03톤), 기타(3.19톤) 용도로 18.55톤이 유통된 것으로 파악되었다(환경부, 2005). 제품원료용 수은 외에도 형광등, 체온계, 건전지 등 수은 함유 완제품도 수입되어 사용되고 있다. 수은의 사용량 및 제품 중의 수은 함유량 현황 파악에는 관련 정보의 부족으로 애로가 있다.

2.4 국내 및 동아시아 수은 배출량

Pacyna *et al.* (2006)에 의하면 전세계 수은 배출량(2000년 기준)은 2,189.9톤이며 그 가운데 중국은 604.7톤, 북한은 46.0톤이었다. 미국의 환경보호청에서는 중국의 연간 수은배출량은 화력발전소 배출량만 약 600톤으로 전세계의 1/3 수준으로 추정하였다

(US EPA, 2005). 수은의 배출량에 대해서는 아직도 많은 불확실성이 존재한다.

Wu *et al.* (2006)에 의하면 동아시아의 배출량은 중국의 수은 배출량(약 600톤)이 전체의 86%, 일본과 북한은 각각 4%, 한국은 3%를 기여하는 것으로 보고하고 있다. 따라서 중국으로부터의 수은의 장거리 이동에 의한 황해 및 국내의 침적 문제를 간과하기 어렵다. 캐나다 환경청의 지원을 받아 중국의 수은 배출량을 추산하고 있는 Tsinghua 대학의 보고서(Tsinghua University, 2006)에 의하면 2003년 기준으로 석탄의 연소에 의한 수은 배출량은 256.7톤, 비철 금속 제련에 의한 배출량은 320.5톤, 시멘트 산업의 의한 배출량 35.0톤 등 총 695.6톤이었다.

일본의 국립환경연구소는 중국을 포함한 동아시아의 수은 배출량을 200톤 미만으로 발표를 하였다(National Institute for Environmental Studies, 2004). Pan *et al.* (2006)에 의하면 중국의 수은 배출량은 80~200% 과소 추산이 되어 있으며 실제 중국의 배출량은 900~1,500톤이어야 한다고 주장하고 있다.

우리나라에서도 발전소, 소각시설, 제철소, 제련소 등 산업 활동과 형광등, 수은전지, 계측기 등의 제조, 사용, 폐기 과정에서 수은이 발생하여 배출되는 것으로 파악된다. 우리나라의 수은 배출량(2005년 기준) 추정치는 44.87톤이며 일반적으로 제일 큰 배출원으로 알려져 있는 화력발전소(7.72%)보다 비철금속(54.62%), 지정폐기물 소각 시설(24.35%), 철강제조업(10.21%)의 기여가 더 큰 것으로 추정하고 있다(박규식 등, 2008).

국내 수은 주요 점 오염원(배출원) 중 화력발전 부분은 석탄의 사용 증가로 인해 수은의 배출이 지속적으로 증가하고 있는 것으로 판단된다. 환경부의 실태 조사(국립환경과학원, 2004) 결과, 화력발전소로부터 수은 배출농도는 0.08~26.3 $\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 수준으로 외국의 예와 비슷한 수준이다. 그러나 시설 수 및 석탄 사용량의 증가로 화력발전소 수은 배출 총량(2004년 8.63톤 추정)은 지속적으로 증가하는 것으로 추정된다. 화력 발전부문에서의 수은 발생은 석탄 중에 자연적으로 함유되어 있는 수은에 의한 것이므로, 석탄 사용량과 밀접하게 관련이 있으며, 참고로 발전부문의 석탄 사용량은 2000년 21,504천 톤에서 2004년 27,970천 톤으로 4년간 약 30% 증가하였다(국립환경연구원, 2004).

수은이 많이 배출되는 것으로 추정되는 폐기물 소각, 특히 산업 폐기물 소각설비, 석탄을 대량 사용하는 제철설비, 시멘트 소성 설비 및 비철제련시설 등의 수은 배출에 대한 정보는 아직 충분하지 않다.

폐기물 소각의 경우 수은을 함유한 가전제품, 의료 폐기물 등의 소각 시에 수은의 배출이 될 수 있다. 특히 국내의 주요 수은 함유제품인 형광등, 건전지의 회수율이 상당히 낮기 때문에 회수되지 않은 수은 제품의 매립 또는 소각과정에서 수은이 배출될 수 있다. 또한 매립 및 소각과정에서 수은 배출에 대해 특별한 조치를 하고 있는 것이 아니므로 거의 대부분 대기 중으로 배출되는 것으로 판단된다. 국립환경연구원에서 2002년도에 산정한 생활폐기물 소각시설에 대한 수은의 배출량 자료(국립환경연구원, 2002)를 살펴보면 생활폐기물 소각시설로부터 대기로 배출되는 수은의 총량은 연간 최소 6.8~40.1 kg으로 추정되며, 일일 배출량은 18.7~109.8g으로 조사되었다. 생활폐기물에 함유된 수은은 0.47 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 국내에서 사용 중인 무연탄과 비교하여 1.7배, 유연탄 보다는 5.9배 높은 것으로 나타났다. 또한 폐건전지에서는 0.39 $\mu\text{g}/\text{g}$ 의 수은이 함유되어 있는 것으로 조사되었으며, 한편, 폐형광등의 수은 함유량을 분석한 결과 20.66 $\mu\text{g}/\text{g}$ 의 수은이 함유되어 있는 것으로 조사되었다(국립환경연구원, 2002).

2.5 국내 수은 모니터링

수은의 오염에 대해서는 1980년대부터 측정이 이루어졌다(Sohn, 1992). 서울특별시 보건환경연구원이 수행한 대기중 수은 측정에 의하면 1980년대 말의 서울특별시 대부분 지역에서 대기중 수은 농도는 10 ng/m^3 을 초과하였으나 1997년 가을과 1998년 여름의 대기중 수은 농도는 3.94 ng/m^3 , 3.43 ng/m^3 로 상당히 낮아진 것으로 되어 있다(김민영과 김기현, 2001). 서울특별시 보건환경연구원은 1980년대 말부터 측정을 시작하였다. 근년에는 서울특별시 4개소(용산, 노원, 구로, 송파)와 제주도에서 연속적으로 측정하고 있다. 2004년부터 2007년까지 서울특별시 4개소 평균 수은 농도는 4.0 ng/m^3 전후이었다. 이 농도는 일본의 수은 측정망 농도인 2.2~2.3 ng/m^3 의 거의 2배의 값이다. 또한 안면도, 제주도 고산의 경우 서울보다 높은 농도를 보였으나 제주대학교의 경우 서울보다 낮은 농도를 보였다(이준복 등, 2008). 2005

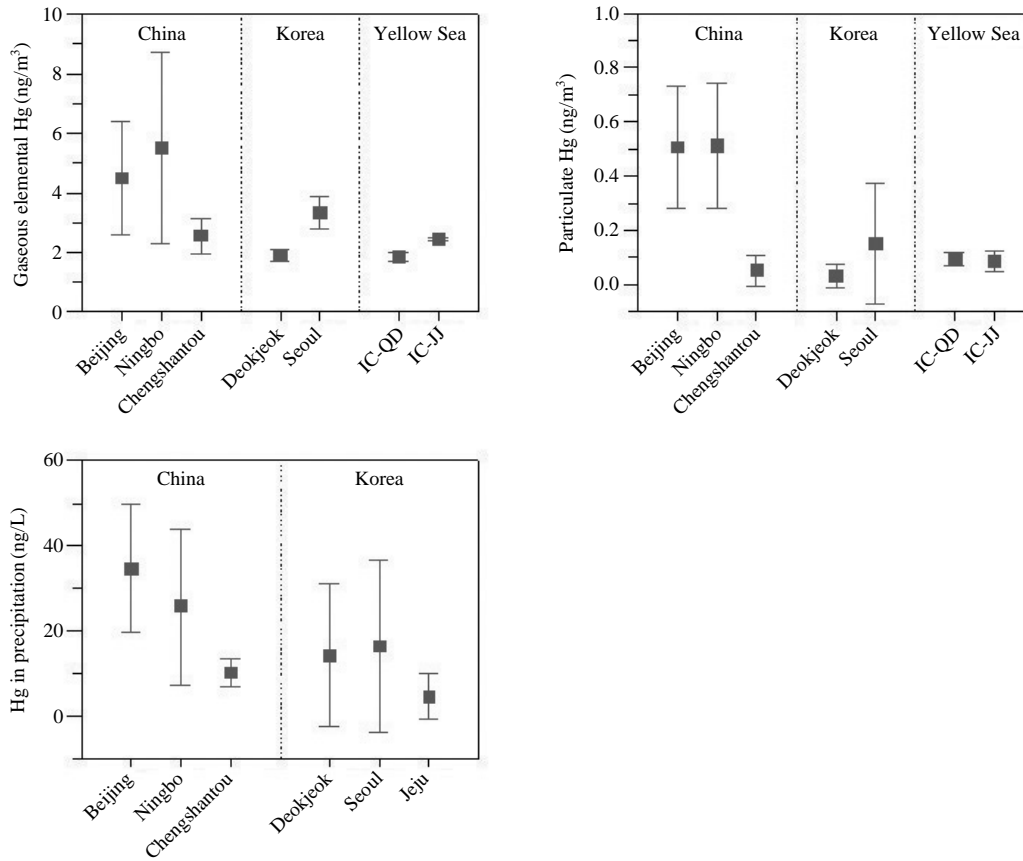


Fig. 1. Hg⁰ (Gaseous elemental mercury) and mercury concentration in particulates and precipitation samples.

년 3월부터 5월까지 안산시 반월공단에서 측정된 대기중 평균 수은 농도는 6.32 ng/m³이었으나 10 ng/m³을 초과하는 데이터가 7.5%에 달하였다(Nguyen *et al.*, 2008). 2000~2008년 기간 동안의 한국, 일본, 중국, 타이완에서의 대기중 수은, 입자에 포함된 수은, 건조침적에 대해서는 Fang *et al.* (2009)에 정리가 되어 있다. 2006년 8월부터 2007년 10월까지 소양호에서 습식 침적을 측정된 결과는 14.56 μg/m²으로 미국 Mercury Deposition Network (MDN)보다 약간 높은 값이었다(안명찬과 한영지, 2008).

2.6 국가간 장거리 이동 및 황해 침적

동아시아 배출량의 많은 부분을 차지하는 중국에 인접한 우리나라는 기상 조건에 따라 중국의 영향을 받을 것을 예상할 수 있다. 현재로는 우리나라의 장

거리 이동 잔류성오염물질 (POPs) 감시대상에 수은이 포함되어 있지 않기 때문에 중국으로부터의 수은의 월경이동 문제에 대한 파악이 어렵다. 심상규 등 (2008)의 연구 결과에 따르면 중국의 북경과 Ningbo의 가스상 수은 농도에 비해 중국 Chengshantou와 한국 덕적도의 수은의 농도가 낮았다. 중국 북경은 서울보다 1.5~4배, 덕적도보다는 2~10배 높은 수준이었다(그림 1).

인천-Qingdao 간 가스상 원소 수은의 평균 농도는 1.8±0.15 ng/m³로 덕적도와 유사한 수준이었다. 황해 중심부에서는 전세계 배경 농도와 유사하게 낮은 수준이며, 청도는 인천의 약 2배 정도로 높았다. 선박 측정을 이용한 황해상의 평균 수은 농도는 가스상 원소 수은 2.1±1.5 ng/m³, 입자상 수은 0.09±0.05 ng/m³로 산출되었다(심상규 등, 2008).

수은은 앞서 언급한 바와 같이 건식 및 습식으로 침적이 된다. Kim *et al.* (2009)의 연구결과에 의하면 황해에 건식 침적속(flux)은 다른 바다의 건식 침적속보다 높게 나타났다. 습식침적은 건식침적보다 질소는 1.9배, 황은 1.5배로 나타났다. 건식 침적은 한국 및 중국 측정소로부터의 데이터와 선박 및 항공기를 이용한 측정치를 사용하였다. 습식 침적은 한국의 측정 데이터를 사용하여 산출을 하였다. 서풍에 의한 중국동부의 영향이 많았으며 질소의 경우 한반도의 영향도 무시할 수 없는 수준으로 나타났다.

3. 수은 오염 관리 현황 및 문제점

3.1 수은 함유 제품·폐기물 규제 관리

수은은 유해화학물질관리법 상 유독물로 지정되어 있어서 매년 배출량 및 유통량 조사를 실시하고 있다. 점 오염원의 배출량은 1999년부터 매년 실시하고 있으며 비점 오염원의 배출량은 2002년부터 4년 주기로 실시하고 있다. 앞서 설명한 대로 우리나라는 2002년 14.5톤의 수은을 수입하였으며, 수은의 총 유통량은 18.55톤이다.

수은 전지는 ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률’상 예치금대상 품목으로 정해져 있으나 24.8%만이 수거되고 있는 실정이다. 한 개 당 약 7~15mg의 수은을 함유하고 있는 형광등도 생산자 책임재활용 제도(EPR: Extended Producer Responsibility)에 의한 자발적 협약체결에도 불구하고 총 생산량 1억 5천만 개 중 17.6%인 2천 6백만 개만 수거 처리되고 있다.

한편 EU에서는 판매 금지되고 있는 수은 계측기 및 치과 치료용 아말감에 대해서는 현재까지는 국내에서는 규제 조치는 없다.

3.2 수은화합물 배출기준

주요 국가의 소각시설 등 연소설비에 대한 수은화합물 배출기준은 미국의 MACT 기준이 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (7% O_2), EU $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (11% O_2), 독일 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (11% O_2) 등으로 상당히 엄격하다. 이에 반해, 우리나라는 2005년 1월 1일 소각시설·보일러의 수은 배출기준을 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (12% O_2)로 강화하였으나, 여전히 외국에 비해서는 상당히 완화된 기준이다. 특히 우리나라

에서는 화력발전설비, 제련설비 등을 포함하는 기타 시설의 경우에는 $5 \text{mg}/\text{m}^3$, 즉 $5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 지나치게 관대한 편이다. 미국 환경보호국에서는 중요한 수은 배출원인 석탄화력 발전시설에 대한 관리를 강화하기 위하여 2005년 3월 Cap and Trade 방식을 도입한 Clean Air Mercury Rule을 공포하여 화력발전소 등의 수은화합물에 대한 관리를 더욱 강화하고 있다. 환경부의 화력발전소 수은 배출 실태 조사(국립환경연구원, 2004) 측정 결과는 $0.08 \sim 26.3 \mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 수준으로, 외국에 비해서도 상대적으로 낮은 편이지만, 총 배출량(2004년 8.63톤)은 지속적으로 증가할 것이다.

국내에서 실시한 배출원별 수은화합물의 배출특성 및 배출량 산정을 위한 자료는 연세대학교, 국립환경과학원, 한국전력연구원 등 몇몇 기관에서 배출량 조사를 실시하고 있으나, 아직까지는 예산 부족 등의 문제로 단편적인 자료에 국한된 실정이다. 이러한 자료의 부족은 수은화합물의 배출특성 파악 및 제어기술 개발의 연구에 가장 큰 장애가 되고 있으며, 체계적인 연구계획과 대표성 있는 배출시설의 목록화(Inventory) 및 배출계수의 개발이 필요하다.

4. 수은 배출제어 기술 현황

4.1 주요 수은 배출원의 배출제어

독일 등을 중심으로 하는 유럽에서는 연소설비, 비철금속산업, 철광석/제철산업, 시멘트산업, 폐기물처리 등에 대한 수은 배출 규제를 강력하게 시행하고 있다. 미국에서도 주요 수은 배출원인 화력발전설비의 수은 배출에 대하여 Cap and Trade의 개념으로 수은화합물의 배출을 2025년까지 현재 수준의 30%로 감축하는 획기적인 목표를 수립하여 수은 배출을 규제함으로써 수은저감기술의 상용화 연구 개발이 본격적으로 수행하고 있다.

연소설비 배출가스 중의 수은화합물은 원소수은(elemental mercury) 또는 산화수은(oxidized) 형태의 가스상이다. 수 분무식의 습식 대기오염방지시설이 설치되어 있는 경우 HgCl_2 등의 산화수은은 수용성이므로 비교적 용이하게 저감할 수 있다. 이에 반하여 비수용성의 가스상 원소 수은은 기존의 대기오염방지시설로는 제거하기 어렵다. 연소 배출가스 중의

수은의 제어기술로는 전기집진기(ESP) 또는 백 필터(Bag filter) 등의 분진제거 설비의 전단에 분말상 침착 활성탄을 직접 분사하여 수은을 흡착제거하는 활성탄 분무법과 수은을 흡착제거하기 위한 입자상 침착활성탄을 충전한 고정상 흡착 설비를 설치하는 방법이 대표적이다(한국과학기술연구원, 2006). 폐기물 소각설비에서 다이옥신 제거설비로 사용되는 분말상 흡착제 분사방식은 수은 제거에도 일부 효과가 있지만, 수은의 경우 가격이 비싼 침착활성탄을 사용하여야 효과적이라는 점과 배출가스의 유량이 큰 발전설비, 제철설비 등에 적용하기에는 막대한 활성탄 사용비용으로 경제적인 부담이 크다. 고정상 흡착설비 방식은 흡착 효율이 상대적으로 높고 흡착제를 장기간 사용할 수 있으므로 경제성이 높다. 그러나 흡착층에서의 압력손실 및 화재 위험 방지 등 기술적 어려움을 해결하여야 한다.

4.2 국내·외 수은제어기술 연구 동향

최근 화력발전시설에 대해 본격적으로 수은 규제를 도입한 미국을 중심으로, 발전소와 소각시설 등의 수은 배출원에 적용 가능한 수은 제어기술에 대해 연구가 활발하게 진행되고 있다.

석탄화력발전설비를 대상으로 하는 수은 제어기술은 크게 세 종류로 분류된다. 첫째는 FGD(Flue Gas Desulfurization)나 NO_x 저감설비 등 발전설비에 기존에 설치되어 있는 대기오염방지시설의 수은 제거 효율을 향상시키고 원소 수은을 비교적 제거가 용이한 산화수은으로 전환시켜 기존 대기오염방지시설을 이용하는 기술이다. 두 번째는 수은 제거효율이 높은 활성탄을 분무하여 수은을 흡착제거하는 흡착제 주입 기술로 수은을 효과적으로 제거할 수 있는 침착 활성탄 또는 저가형 흡착제 개발 등이 기술적 과제이다. 수은에 대한 규제가 현재보다 더욱 강화되면 기준을 맞출 수 있는 기술이다. 마지막으로 기존 대기오염물질과 수은을 동시에 처리할 수 있는 하이브리드 대기오염방지 신기술이다. 이 세 가지 방법은 각각 기술적, 경제적인 면에서 장점과 단점이 있으며, 미국 환경보호국에서는 수은 제거효과가 확실한 활성탄 주입방법을 도입하는 것을 선호하며 수은 배출 규제를 강화하려고 하는 반면, 에너지부(DOE/EPR)에서는 추가 시설비가 적게 소요되고 운전이 쉬운 기존의 FGD를 이용하는 수은 저감기술을 선호하고

있는 것으로 판단된다(한국과학기술연구원, 2006).

석탄화력 발전설비에서 현재 기준에 설치한 대기오염물질방지시설을 이용한 수은 제거 방법은 1) 백 필터 또는 전기집진설비(ESP) 등의 분진 제거설비를 이용하여 비산재(fly ash)를 제거함으로써 비산재에 흡착된 수은을 동시에 제거, 2) 건식 세정설비(dry scrubber)의 알칼리성 흡착제를 사용하여 수은을 흡착, 3) 습식 세정설비(wet scrubber)에서 산화수은을 제거하는 방법 등이 있다. 이러한 설비들의 수은제거 효율은 0~99% 범위를 나타내고 있으며, 가장 높은 수은 제거 효율을 보이는 설비는 백 필터였다(Kilgroe *et al.*, 2001). 그러나 아역청탄(sub-bituminous coal)이나 갈탄을 연료로 사용하는 화력발전 설비에서는 비산재 제거에 의한 수은 흡착 효과가 역청탄(유연탄) 발전설비에 비해 떨어지는 문제가 나타났다. 아역청탄, 갈탄 연소 시 비산재 중의 탄소의 성분 비율이 낮기 때문에 수은 제거효율이 상대적으로 낮은 것으로 추정된다.

국내에서는 저가 수은 흡착제 개발 연구, 흡착탑 이용 수은 제거기술, 플라즈마 이용 수은 산화기술 등의 연구를 수행되어 왔다(Lee *et al.*, 2004; Jurmg *et al.*, 2002). 전력연구원 주관으로 수행한 산업폐기물을 이용한 저가 수은 흡착제 개발 연구는 Pilot 시험을 거쳐 실증시험까지 수행하였으며, 연소 배가스 중 수은을 제거하기 위한 산화촉매 장치 개발 연구 및 에너지기술연구원 등과 공동으로 복합처리장치 개발 연구도 수행하였다(백점인 등, 2003). 그러나 국내 발전설비 등의 현장에 적용 가능한 상용 기술의 개발에는 아직은 미치지 못하고 있으며 미국의 발전소 수은 총량관리 등의 추진일정에 비추어 볼 때 실용 가능한 기술의 적극적인 개발 및 환경부 등 정부의 연구 개발 지원이 절실하다.

4.3 향후 기술개발 전망

현재로는 활성탄 투입법이 수은배출 제어에 적용 가능한 최고기술(Best Available Technology)로 판단된다(한국과학기술연구원, 2006). 다만 수은에 대해서는 충분한 흡착력을 확보할 수 있도록 일반 활성탄이 아닌 황 침착 활성탄 등을 사용하여야만 한다는 점, 수은의 제거효율을 높이기 위해서는 수은 배출량 또는 농도에 비해 많은 양의 활성탄을 투입하여야 하므로 경제적인 부담이 매우 크다는 점(중대

형 소각설비의 경우 황성탄 투입비용이 월 1억 원 이상의 수준임), 백 필터에서 포집한 황성탄에 수분이 함유되어 배출되므로 별도의 무해화 처리를 하여야 한다는 점이 앞으로 기술적으로 해결하여야 할 점이다.

현재의 황성탄 주입방법의 흡착제로 사용되고 있는 황성탄을 대체할 수 있는 보다 효과적이고 경제적인 흡착제 기술의 개발이 요구된다. 현재 현재의 흡착제를 대신할 수 있는 물질로 탄소나노튜브 등이 거론되고 있으나 아직은 지나치게 값이 비싸 후처리 시설에 사용할 수 있는 수준은 아니며, 향후 좀더 저렴하게 탄소나노튜브를 생산하는 기술이 개발될 것으로 기대하고 있다. 또한 흡착 물질에 촉매 성능을 부여하는 방안도 검토해 볼 필요가 있다.

5. 결 론

본 논문은 수은에 대한 국내·외의 발표 자료 등을 수집, 분석하여, 수은에 대한 국내 정책 및 국내 연구기관 등의 연구동향, 주요 수은 배출원 현황 및 배출특성, 수은제어기술 개발 현황 등을 정리한 것으로, 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 국민 혈중 중금속농도 조사 결과 혈중 수은 평균 농도는 4.34 $\mu\text{g/L}$ 로, 미국, 독일 등에 비해 5~8배 높은 것으로 보고되었다.

2) 우리나라 성인의 1일 수은 섭취량은 약 18.8 $\mu\text{g/day}$ 에 달한다. 이는 거의 대부분 식품을 통해 섭취되고, 환경으로부터의 유입량은 0.108 $\mu\text{g/day}$ 로 크지 않은 것으로 추정하고 있다. 그러나 실내 공기로부터 호흡으로 유입되는 양을 무시하기 어려우므로 실내 공기중 수은의 농도 측정과 이에 대한 역학 조사가 시급하다.

3) 우리나라를 포함하는 동아시아의 수은 배출량 분야에는 많은 불확실성이 존재한다. 수은은 석탄연소 시설에서 많이 배출되는 것으로 알려져 있지만 비철금속 제련 분야, 폐기물 소각 부분 등에서 석탄연소보다 더 많이 배출되는 것으로 보고되고 있다.

4) 화력발전소 수은 배출농도는 0.08~26.3 $\mu\text{g/S m}^3$ 수준으로 외국과 비슷한 수준이다. 그러나 시설 수 및 석탄 사용량의 증가로 화력발전소 수은 배출 총량(2004년 8.63톤)은 지속적으로 증가하는 것으로

추정된다.

5) 황해에 대해서 건식 및 습식 침적에 대한 연구 결과 중국의 영향이 상당한 것으로 나타났다. 질소의 경우에는 한반도의 영향도 무시할 수 없는 수준으로 나타났다.

6) 우리나라는 소각시설 수은 배출기준을 100 $\mu\text{g/m}^3$ (12% O_2)로 강화하였으나, 화력발전설비, 제련설비 등을 포함하는 기타시설의 경우에는 5,000 $\mu\text{g/m}^3$ 이하로 지나치게 관대하다. 총 배출량 면에서 큰 부분을 차지하고 있는 것으로 생각되는 화력발전소 및 제련설비 등에 대한 저감대책이 필요하다.

7) 저감이 상대적으로 용이한 수용성 산화수은에 비하여 가스상 원소 수은은 기존의 대기오염방지시설로는 제거하기 어렵다. 소각설비에 적용하는 황성탄 분무 방식에서는 원소상 수은을 제거할 수 있는 첨착 황성탄의 사용이 필요하다. 석탄화력발전설비의 경우에는 FGD나 NO_x 저감설비 등 발전설비에 기존에 설치되어 있는 대기오염방지시설의 수은 제거 효율을 향상시키는 방식으로 저감 목표를 달성할 수 있을지 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원(2002) 대기 배출원의 수은 배출특성 조사 연구, 국립환경연구원 대기연구부.
- 국립환경연구원(2004) 유해대기오염물질 배출량 조사 및 대기 모니터링(II): 고정오염원에서의 유해대기오염물질 배출원 조사(II).
- 국립환경과학원(2005) 수은의 인체노출 및 건강영향에 관한 연구(I).
- 김근배(2008) 수은의 인체노출과 건강영향에 대한 국내연구 현황, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp. 281-284.
- 김민영, 김기현(2001) 대기 중 수은의 지역적 분포특성에 대한 비교연구, 한국대기환경학회지, 17(1), 39-50.
- 박규식, 이상협, 이주형, 김정훈, 서용철(2008) 인위적 배출원에서 발생하는 수은화합물 배출특성 및 배출량 산정, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp. 289-294.
- 백점인, 안희수, 장경룡(2003) 수은 신흥촉매의 원소 수은 흡착특성, 화학공학의 이론과 응용, 9(2), 1891.
- 심상규, 김진영, 진현철, 권운용(2008) 황해 수은 침적 예측을 위한 실측 및 모니터링, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp. 303-304.

- 안명찬, 한영지 (2008) 대기 중 수은의 습식 침적 평가: 소양호를 중심으로, 한국대기환경학회지, 24(6), 693-703.
- 이준복, 정 권, 조석주, 김민영 (2008) 서울 및 전원지역의 대기 중 수은 농도와 장기변동 패턴, 한국대기환경학회 2008 춘계학술대회 논문집, pp. 285-288.
- 한국과학기술연구원 (2006) 나노기술을 이용한 유해염소화 물질 및 중금속의 분해 기술 개발, 2006년 기관 고유사업 연구보고서.
- 환경부 (2005) 수은관리종합대책.
- 환경부 (2006) 국민 혈중 중금속농도 조사결과 발표자료.
- Björnberg, K.A., M. Vahter, B. Berglund, B. Niklasson, M. Blennow, and G. Sandborgh-Englund (2005) Transport of methylmercury and inorganic mercury to the fetus and breast-fed infant, *Environmental Health Perspectives*, 113(10), 1381-1385.
- Carpi, A. and Y.F. Chen (2001) Gaseous elemental mercury as an indoor air pollutant, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 4170-4173.
- Fang, G.C., Y.S. Wu, and T.H. Chang (2009) Comparison of atmospheric mercury (Hg) among Korea, Japan, China and Taiwan during 2000~2008, *J. Hazardous Materials*, 162, 607-615.
- Garetano, C., M. Gochfeld, and A.H. Stern (2006) Comparison of indoor mercury vapor in common areas of residential buildings to outdoor levels in a community where mercury is used for cultural purposes, *Environ. Health Perspect*, 114(1), 59-62.
- Jung, J., T.G. Lee, G.W. Lee, S.J. Lee, B.H. Kim, and J. Seier (2002) Mercury removal from incineration flue gas by organic and inorganic adsorbents, *Chemosphere*, 47(9), 907-913.
- Kilgroe, J.D., C.B. Sedman, R.K. Srivastava, J.V. Ryan, C.W. Lee, and S.A. Thorneloe (2001) Control of mercury emission from coal-fired electric utility boilers: Interim Report.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, S.B. Lee, K.-C. Moon, S.-G. Shim, G.N. Bae, and S.-C. Yoon (2009) Atmospheric deposition of nitrogen and sulfur in the Yellow Sea Region: Significance of long-range transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution* (in printing).
- Korea Food and Drug Administration (2000) A study on the scientific standardization of heavy metals in foods (II), *Annual Report*, 4, 51-58.
- Korea Food and Drug Administration (2002) The monitoring of heavy metals in foods, *Annual Report*, 6, 76-82.
- Lee, S.J., Y.C. Seo, J.S. Jung, and T.G. Lee (2004) Removal of gas-phase elemental mercury by iodine- and chlorine-impregnated activated carbons, *Atmospheric Environment*, 38(29), 4887-4893.
- National Institute for Environmental Studies (2004) EAGrid-2000; The East Asian Air Pollutant Emissions Grid Database 2000.
- Nguyen, T.H., K.-H. Kim, M.-Y. Kim, C.-H. Kang, and S.G. Shim (2008) Mercury in air in an area impacted by strong industrial activities, *Chemosphere*, 71, 2017-2029.
- Pacyna, E.G., J.M. Pacyna, F. Steenhuisen, and S. Wilson (2006) Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000, *Atmospheric Environment*, 40(22), 4048-4063.
- Pan, L., J.H. Woo, G.R. Carmichael, Y.G. Tang, H.R. Friedli, and L.H. Radke (2006) Regional distribution and emissions of mercury in east Asia: A modelling analysis of Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-ASIA) observations, *J. of Geophys Research-Atmosphere*, 111, D07109.
- Prokopowicz, A. and W. Mniszek (2005) Mercury vapor determination in hospitals, *Environmental Monitoring and Assessment*, 104(1-3), 147-154.
- Sohn, D.H. (1992) Mercury pollution in Korea, *Annual Conference of the Korea Air Pollution Research Association*, 2(1), 7-13.
- Tsinghua University (2006) Improve the estimates of anthropogenic mercury emissions in China.
- US EPA (2005) Clean Air Interstate Rule.
- US FDA-EPA (2004) What you need to know about mercury in fish and shellfish.
- Wu, Y., S. Wang, D.G. Streets, J. Hao, and J. Jiang (2006) Trends in anthropogenic mercury emissions in China from 1995 to 2003, *ES & T*, 40, 5312-5318.