

## 4C4)

## 수은 제어기술 국내·외 연구 동향

### Mercury Control Technology Status and Research Trend

정 중 수

한국과학기술연구원(KIST) 환경기술연구단장

#### 1. 서 론

석탄 화력발전소, 도시폐기물 소각시설, 산업폐기물 소각시설 등의 연소설비는 수은화합물의 주요 배출원이다. 이들 외에도 제철설비, 시멘트 킬른 등 석탄을 연료로 사용하는 설비에서는 석탄 중에 포함되어 있는 수은의 대기 중으로의 배출을 피할 수 없다. 발전과 제철용으로 주로 수입되는 석탄은 0.05~0.5ppm 정도의 수은을 함유하고 있다. 2004년 현재 국내 석탄 소비량은 총 7,400만 톤으로, 석탄을 통해 국내에 유입되는 수은의 양은 대략 10~20톤 수준으로 추산된다. 형광등 생산 등의 용도로 산업용으로 수입되는 수은 수입량(연간 약 10톤)과 합산해 보면 국내의 연간 수은 총 유입량은 20~30톤 정도로써 미국의 연간 수은 배출량추정치인 약 158톤(1997년 미국 EPA 보고서)과 비교하면 인구 1인당으로 비슷한 수준이다. 우리나라의 석탄 사용량 등은 지속적으로 증가하고 있으므로, 석탄의 사용에 따른 대기 중으로의 수은의 배출을 저감하기 위한 정책 방안은 이제 피할 수 없는 현실적인 문제이다.

미국을 비롯하여 각국에서는 수십 년간의 방대한 조사 및 측정 자료를 바탕으로 수은화합물의 배출원을 목록화(Inventory)하였고, 각각의 수은 배출원에 대한 연간 배출량에 대한 조사를 꾸준히 실시하고 있다. 미국 EPA에서 작성한 1997년 의회보고서인 "Mercury Study Report to Congress"에 따르면, 인위적 배출원으로부터의 수은 배출량은 매년 158톤(1995년 추정치)이며, 석탄 화력발전소, 도시폐기물소각로, 병원폐기물소각로 등의 연소설비가 전체 수은 배출량의 87%를 차지하고 있다. 미국 EPA에서는 대형 발전시설에서 발생하는 수은화합물 배출관리를 강화하기 위하여 2005년 3월 수은에 대한 별도의 관리법인 Clean Air Mercury Rule를 제정하여 공포하였다. 이러한 수은 특별법 제정 이전에 십여년 전부터 EPA를 중심으로 각각의 화력 발전소에서 배출되는 수은화합물의 농도를 지속적으로 조사하는 한편 발전소에 설치된 전기집진기, 건식/습식 배연탈황장치, 질소산화물 저감장치(SCR/SNCR) 등에서의 수은 제거효율 및 처리기술 등에 대한 검토 연구가 이루어져 왔다.

유럽에서는 독일 등을 중심으로 연소설비, 비철금속산업, 철광석/제철산업, 시멘트산업, 폐기물처리 등에 대한 수은 배출 규제를 강력하게 시행하고 있다. 한편 미국에서는 Cap and Trade 개념으로 2025년 수은화합물의 배출을 현재의 수은 배출 수준의 30%로 감축하는 목표를 수립하여 수은 배출 규제를 시작함으로써 수은저감기술의 상용화 연구 개발이 본격적으로 수행되고 있다. 전세계적으로는 아시아의 수은 배출량이 전세계 배출량의 56%를 차지하는 것으로 추정되며, 수은 배출의 증가는 주로 중국, 인도, 한국 및 북한의 석탄 사용 증가에 주 원인이 있는 것으로 해석하고 있다.

연소설비 배출가스 중의 수은화합물은 원소수은(elemental mercury) 또는 산화수은(oxidized) 형태의 가스상이다.  $HgCl_2$  등의 산화수은은 수용성이므로 수 분무식의 습식 대기오염방지시설에서 비교적 용이하게 저감할 수 있지만, 이에 반하여 원소 수은은 비수용성의 가스상이기 때문에 기존 방식의 대기오염방지시설로는 제거가 어렵다. 연소배출가스 중의 수은의 제어기술로는 황성탄 분무법, 즉 전기집진기(ESP) 또는 백 필터(Bag filter) 등의 분진제거 설비의 전단에 분말상 침착 황성탄(Particulate Activated Carbon)을 직접 분사(Injection)하여 흡착제거하는 방법과 대기오염방지시설(Air Pollution Control Devices, APCDs)의 후단에 입상상 침착황성탄(Granular Activated Carbon)을 충전한 고정상 흡착 설비(Fixed bed)를 설치하는 방법이 대표적이다. 폐기물 소각설비에서는 다이옥신 제거를 위해 널리 사용되는 분말상 흡착제 분사방식은 수은 제거에 효과가 있다는 것이 입증되어 있지만, 막대한 황성탄 사용비용으로 경제적인 부담이 커서, 특히 배출가스의 유량이 큰 발전설비, 제철설비 등에서는 적용하기 어렵다. 이에 반해 고정상 흡착설비 방식은 흡착 효율이 상대적으로 높고 흡착제를 장기간 사용할 수 있어

서 경제성이 높다는 장점이 있으므로, 흡착 층에서의 압력손실 및 화재의 위험 등의 기술적 어려움을 해결하면 향후 적용 가능성이 높은 기술이다.

## 2. 수은제어기술에 대한 국외 연구 동향

발전시설에 대해 본격적으로 수은 규제를 도입한 미국을 중심으로 발전소와 소각시설 등 주요 수은 배출원에 적용 가능한 수은 제어기술에 대해 많은 연구가 수행되고 있다. 발전설비를 대상으로 하는 수은 제어기술은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 하나는 기존의 FGD나 NO<sub>x</sub> 저감설비 등 기존에 설치되어 있는 대기오염방지시설을 이용하고 이 시설의 수은 제거효율을 향상시키는 동시에 원소 수은을 비교적 제거가 용이한 산화수은으로 전환시키는 기술이다. 두 번째는 수은 제거효율이 높은 활성탄 또는 다른 흡착제를 사용하는 활성탄 흡착탑 주입(Activated Carbon Injectin) 기술과 기타 Low-cost sorbent의 개발로 수은 규제가 더욱 강화될 경우의 기준을 맞추기 위한 연구이다. 마지막으로 기존 대기오염물질과 수은을 동시에 처리할 수 있는 기술로 hybrid 대기오염방지기술이다. 이 세 가지 방법은 각각 기술적, 경제적인 장·단점이 있으며, EPA에서는 활성탄 주입방법을 선호하고 있는 반면, DOE/EPRI에서는 시설비가 적게 소요되고 운전이 쉬운 기존의 FGD를 이용하는 수은 저감기술을 선호하고 있는 것으로 알려져 있다.

석탄화력 발전설비에서 현재 사용 중인 대기오염물질방지시설은 약 0~99%의 수은 제거효율을 나타내고 있으며, 가장 높은 수은 제거 효율을 보이는 설비는 백 필터(Fabric Filter)이다. 수은 제거를 위한 전용 처리 설비는 현재 거의 설치되지 않았으므로 현재 설치되어 있는 대기오염물질 제거설비를 사용하여 배출가스 중의 수은 성분을 제거한다. 즉, 1) 비산재(fly ash)에 흡착된 수은을 분진 제거설비에서 동시에 제거, 2) 건식 세정설비(dry scrubber)의 알칼리성 흡착제를 사용하여 수은을 흡착, 3) 습식 세정설비(wet scrubber)에서 산화 수은을 제거하는 방법 등이 있다.

비산재 제거에 의한 수은 흡착에는 역청탄(유연탄) 발전설비가 아역청탄(sub-bituminous coal)이나 갈탄을 연료로 사용하는 화력발전 설비보다 좀더 나은 효과를 나타냈다. 이 결과는 아역청탄이나 갈탄은 연소 배출가스 중에 포함된 비산재 중의 탄소(carbon) 성분의 비율이 상대적으로 낮기 때문에 낮은 수은 제거효율을 보이며, 배출가스 중 원소 수은의 비율이 상대적으로 높다.

생활폐기물(Municipal Solid Waste, MSW) 소각설비도 중요한 수은 배출원이다. 생활폐기물의 구성 성분 중 주요 수은 배출원으로 추정되는 성분은 수은 배터리, 조명기구류, 전선류, 개폐기가류, 수은 온도계 등이 있으며, 수은함유량이 0.025% 미만으로 규제가 실시되고 있어서 배터리와 페인트 잔류물 등의 수은 배출은 현저히 감소하고 있다. MSW 구성 성분 중 수은 배출원을 세분화하여 살펴보면 배터리는 Alkaline, mercuric oxide 등이 주요 수은 배출원이었으나 '95년 이후 무수은 배터리가 생산되면서 최근에는 수은 배출량이 거의 없다고 보고되고 있다. 형광등, 가로등 등 조명기구류(Electric Lighting) 등을 중심으로 MSW는 두 번째로 가장 많은 수은을 배출하고 있으며, 특히 형광등의 경우 미국 내 수은 배출량 약 26tons으로 전체 수은 배출량의 3.7%를 차지하고 있다. 형광등의 경우 2%만 재활용되고 98%가 폐기물이 되어 13%는 폐기물 소각장(Municipal Solid Combustors)으로 보내지고 이 중 소각설비에 수은배출 저감을 위한 제어장치가 없는 경우 90% 이상 기화되어 대기 중으로 배출되고, 나머지 형광등 폐기물은 매립되는 것으로 추정된다.

## 3. 국내 연구 동향

국내의 주요 수은 배출원으로 생각되는 화력발전소 수은 배출 실태 조사를 실시(국립환경과학원, 2004)한 결과, 화력발전소 배출가스 중의 수은 농도는 0.08~26.3 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$  수준으로 '04년 기준 총 수은 배출량은 8.63톤으로 추정되며, 석탄화력발전소의 지속적인 증가로 수은 배출량도 지속적으로 증가할 것이다.

수은 배출원으로 중요한 생활폐기물 소각시설도 국립환경연구원에서 '02년도에 산정한 생활폐기물 소

각시설에 대한 수은 배출량 자료를 살펴보면 생활폐기물 소각시설로부터 대기로 배출되는 수은의 총량은 연간 최소 6.8~40.1kg으로 추정되며, 일일 배출량은 18.7~109.8g으로 조사되었다. 생활폐기물(RDF)에 함유된 수은은 0.47 $\mu$ g/g으로 국내에서 사용 중인 무연탄과 비교하여 1.7배, 유연탄보다는 5.9배 높은 것으로 나타났다. 또한 폐건전지에서는 0.39 $\mu$ g/g의 수은이 함유되어 있는 것으로 조사되었으며, 한편, 폐형광등의 수은 함유량을 분석한 결과 20.66 $\mu$ g/g의 수은이 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 이러한 측정자료를 검토해 볼 때 생활폐기물 소각설비에서도 수은 배출을 제어할 수 있는 기술의 개발이 앞으로 꾸준히 진행되어야 할 필요가 있을 것이다.

국내에서는 한국전력연구원 주관으로 산업폐기물을 이용한 저가 흡착제 개발을 위한 Pilot 시험을 거쳐 실증시험을 추진 중이며 연소 배기가스 중 수은을 제거하기 위한 산화촉매 장치 개발 연구 및 에너지기술연구원 등과 공동으로 복합처리장치 개발 연구도 추진 중에 있다. 또한 KIST 등에서도 Low-cost mercury sorbent 연구, 흡착탑을 이용한 수은 제거기술 등의 연구를 수행하고 있다. 아직은 국내 발전설비 등의 현장에 적용 가능한 기술 개발에는 미치지 못하고 있으며 미국 EPA의 발전소 수은 총량관리 등의 추진일정에 비추어 볼 때 실용 가능한 기술의 좀 더 적극적인 개발 및 환경부 등 정부의 연구 개발 지원이 절실하다.

국내에서 실시된 배출원별 수은화합물의 배출특성 및 배출량 산정을 위한 자료는 연세대학교, 국립환경연구원, 전력연구원 등 몇몇 기관에서 배출량 조사를 실시하였으나 아직까지는 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.

기존에 수행된 연구결과에 따르면 석탄화력 발전소, 유해폐기물 소각로, 제철소 등의 주요 연소설비의 수은배출 농도는 외국의 유사 사례와 유사한 수준이다. 발전시설 등 수은화합물 배출원에서의 제어기술 분야는 촉매 등을 이용한 제어기술 등에 대한 연구가 전력연구원 등 관련 연구기관 및 대학연구소 등에서 꾸준히 연구하고 있다.

#### 4. 향후 연구 및 기술개발 전망

현재로는 활성탄 투입법이 효과적인 수은배출 제어에 최고 수준의 적용 가능한 기술(Best Available Technology)로 판단된다. 다만 수은에 대해서는 충분한 흡착력을 확보할 수 있도록 일반 활성탄이 아닌 고가의 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(중대형 소각설비의 경우 활성탄 투입비용이 월 1억원 이상의 수준임), 백 필터에서 포집한 활성탄에 수은이 함유되어 배출되므로 별도의 무해화 처리를 하여야 한다는 점이 앞으로 기술적으로 해결하여야 할 점이다.

현재의 활성탄 주입방법에서 흡착제로 사용되고 있는 활성탄(activated carbon)이 다이옥신 및 수은의 양에 비해 과량으로 투입하고 있음을 고려하면, 본 기술은 적은 양의 전구체 물질을 투입한다는 경제성 측면에서 효과적이므로 상업적인 성공의 가능성이 있는 것으로 판단된다. 다만, 보다 효과적이고 경제적인 기술로서의 완성도가 요구된다. 현재 현재의 흡착제를 대신 할 수 있는 물질로 탄소나노튜브 등이 거론되고 있으나 아직은 지나치게 값이 비싸므로 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.

또한 발전설비용 수은 제거기술로서는 앞으로 다음과 같은 연구가 수행되어야 한다.

- 1) 전기 집진기(ESP)만 설치되어 있는 석탄화력 발전설비에서의 수은 저감 기술
- 2) 아역청탄과 갈탄 연소 발전설비로부터 배출되는 오염물질을 저렴하게 저감 시킬 수 있는 흡착 물질(adsorbent)의 개발
- 3) 아역청탄과 갈탄 연소 발전설비에서 배출되는 수은의 저감 기술

- 4) 석탄 혼합에 따른 수은의 화학종 분포(speciation)와 저감에 대한 연구
- 5) 연소 공정 개선을 통한 비산재 저감 효과에 대한 평가
- 6) 습식 배연탈황 시스템(wet FGD system)에서의 원소 수은 산화법의 개선

#### **참 고 문 헌**

- 유종익 (2005) 수은제어전략, KOSEN Expert Report.
- 환경부 (2006) 수은관리 종합대책 보고서.
- Conti, J. et al. (2005) Analysis of alternative mercury control strategies, EIA, DOE, SR/OIAF/2005-01.