

4D2) 도심과 배경 농도 지역에서 측정된 총 가스상 수은 농도를 이용한 동북아시아의 총 가스상 수은 기여도 평가

Contribution of Total Gaseous Mercury(TGM) from Northeast Asia to Korea using TGM Concentrations measured in Urban and Background Areas, Korea

최은미 · 서용석 · 정영재 · 한진수 · 이승묵
서울대학교 보건대학원 환경보건학과

1. 연구배경 및 필요성

수은은 대기 중에 미량으로 존재하나 긴 체류기간을 가지므로(Hg^0 : 0.5~2년) 한번 배출되면 장거리 이동이 가능하기 때문에 국지적 영향뿐만 아니라 글로벌한 영향을 끼칠 수 있다. 또한 대기 중으로 배출되는 수은은 자연 혹은 인위적 오염원으로부터 무기의 형태로 이루어지며 이는 인체나 생태계에 그리 위협적이지는 않다. 그러나 대기 중 무기 수은이 호수나 바다로 침적되어 수생태계에서 주로 박테리아(황 환원 박테리아)에 의해 메틸수은으로 전환되면 고농도로 축적되어 먹이사슬 상위의 생명체에 큰 위해를 가하게 된다. 이는 대기에서의 무기수은 침적이 생물체 내 메틸수은 축적의 중요한 유입원이라는 사실을 나타내고 있다(Landis and Keeler, 2002).

전 세계적으로 인위적 활동으로 인해 배출되는 수은은 약 2,000 ton yr⁻¹ 내외로 보고되고 있다(Wilson et al., 2006). 이 중 아시아는 전체의 50% 이상을 배출하고 있으며, 특히 중국은 세계 최대의 석탄 소비국(전체 중 30% 차지)이자 세계 최대 수은 배출국(약 30%)이다(Jiang et al., 2006). 대기 중 수은은 주로 3가지 형태로 존재하는데(원소 수은(Gaseous Elemental Mercury: Hg^0), 가스상 2가 수은(RGM: Reactive Gaseous Mercury: Hg^{2+}), 그리고 입자상 2가 수은(HgP)), RGM은 배출원에서 다량이 배출되지만 높은 건식 침적 속도와 용해도로 인해 쉽게 대기 중에서 제거되므로 일반 대기 중에서는 농도가 매우 낮다. 그러나 Hg^0 는 낮은 침적 속도와 용해성으로 인해 대기 중에 대부분을 차지하며(95% 이상) 장거리 이동성이 강하다. 우리나라는 중국과 인접하여 높은 수준의 수은(주로 Hg^0)의 영향을 받을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구는 서울지역과 배경농도 지역인 강화도에서 TGM과 다양한 가스상 물질들과의 관계를 통하여 오염원을 규명하고 기여도를 추정하고자 한다.

2. 연구 방법

본 연구는 2008년 1월부터 2008년 12월까지 서울시 종로구 연건동에 위치한 서울대학교 보건대학원 5층(지상 17 m, 위도 37.514, 경도 127.001)과 강화도 석모리 배경농도 지역(위도 37.422, 경도 126.162)에서 동시에 총 가스상 수은(Total gaseous mercury, TGM)을 측정하였다. TGM 이외의 대기 중의 가스상 물질(CO , NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10})들은 서울과 강화도 지역 대기 측정망 자료를 이용하였다. TGM은 cold vapor atomic fluorescence spectrophotometry (CVAFS) 원리의 Tekran사의 model 2537A로 5분 간격으로 실시간 자동 측정하였으며, 일정한 유량인 1.5 L min⁻¹로 공기를 흡입하여 유입된 수은을 gold trap 카트리지에 흡착하게 한다. 이후 500°C의 열로 탈착된 후 검출기에서 분석되는 방식이다. Teflon sample-line에는 heating tape와 soda lime trap 부착하여 수분으로 인한 손실을 최소화하였다. 기기의 정도관리는 매 24시간 간격으로 automatic permeation source injection을 시행하였으며 매 6개월마다 manual injection을 시행하였다. 기기의 회수율은 일정한 온도(약 16.6°C)에 포화된 수은 시료를 다섯 단계의 양으로 주입하여 99.2%로 나타났고, MDL은 0.04 ng m⁻³으로 나타났다.

특정 지역에서 측정된 물질들 사이에는 일정한 배출비(enhancement ratio)가 존재하는데 다음의 식을 이용하여 우리나라에 영향을 주는 지역을 구분하고 그에 대한 배출 강도를 정량적으로 분석하고자 하였다.

$$\text{Emission Ratio} = Y_0 / X_0 \quad (1)$$

$$Y_{\text{amb}} = Y_{\text{bg}} + KY_0 \quad (2)$$

$$X_{\text{amb}} = X_{\text{bg}} + KX_0 \quad (3)$$

$$Y_{\text{amb}} = X_{\text{amb}} \times Y_0 / X_0 + \text{constant} \quad (4)$$

3. 연구 결과 및 고찰

2008년 서울의 TGM과 CO의 연간 농도는 각각 $3.77 \pm 2.23 \text{ ng m}^{-3}$ 과 $634 \pm 392 \text{ ppbv}$ 이었고, 강화도는 각각 $2.14 \pm 0.89 \text{ ng m}^{-3}$ 과 $473 \pm 271 \text{ ppbv}$ 로 나타났다. TGM과 CO는 계절적, 일변화의 경향이 상당히 유사한 것으로 나타났으며 대기 중의 체류기간이 길다는 점과 습식으로 인한 침적 제거 효율이 상당히 떨어지며 주요 오염원이 화석 연소로 알려져 있어 두 물질의 관계로 고농도 이벤트를 분석하는데 적합하다고 사료되었다(Choi et al., 2009). TGM과 CO의 농도가 매월 평균 이상이면서 10시간 이상 지속된 사례를 일차적으로 분석한 결과 서울과 강화도가 각각 총 89회와 43회로 나타났다. 이에 전체 이벤트의 해당 기간을 HYSPLIT 4 model을 이용하여 back-trajectory를 분석하였다. 5일간의 역궤적을 분석한 결과 서울의 경우 중국의 영향이 55회(62%), 일본 3회(3%), 서해 3회(3%), 북한 1회(1%), 국지적 영향이 27회(30%)로 나타났다. 강화도의 경우는 중국 24회(56%), 일본 2회(5%), 서해 4회(9%), 국지적 영향 13회(30%)로 나타났다. 서울과 강화도 지역 모두 중국의 영향이 가장 큰 것으로 나타나 중국으로 부터의 영향을 상세히 알아보기 위하여 보다 다양한 관점에서 분석을 해 보고자 하였다. 서울지역의 중국 이벤트에 해당하는 TGM의 농도는 $5.20 \pm 2.01 \text{ ng m}^{-3}$, CO의 농도는 $942 \pm 435 \text{ ppbv}$ 이었고, TGM과 CO 사이의 관계를 알아본 결과 $\Delta\text{TGM}/\Delta\text{CO}$ 이 $0.0058 \pm 0.0033 \text{ ng m}^{-3} \text{ ppbv}^{-1}$ 로 나타났다. 강화도는 TGM의 농도가 $2.80 \pm 0.94 \text{ ng m}^{-3}$, CO는 $561 \pm 244 \text{ ppbv}$ 이었고, $\Delta\text{TGM}/\Delta\text{CO}$ 는 $0.0051 \pm 0.0021 \text{ ng m}^{-3} \text{ ppbv}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 중국지역이 다른 지역들의 영향 보다 그 강도가 상당히 크며 중국 지역이 우리나라에 어느 정도 영향을 주고 있는지 알 수 있는 결과이다.

사 사

본 연구는 한국 환경기술진흥원의 차세대 핵심 환경기술개발사업(동북아시아 월경성 수은화학종의 발생원 및 우리나라에 미치는 영향에 관한 종합적 연구, 2007-1200-0050-1)과 한국 과학 재단(다중 매체간 수은 거동의 통합적 이해를 통한 수은 관리기반 구축, 2007-12001-0050-1)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Choi, E.-M., S.-H. Kim, Holsen Thomas M., and S.-M. Yi (2009) Total gaseous concentrations in mercury in Seoul, Korea: Local sources compared to long-range transport from China and Japan, *Environment Pollution*, 157, 816-822.
- Jiang, G.B., J.B. Shi, and X.B. Feng (2006) Mercury Pollution in China—an overview of the past and current sources of the toxic metal. *Environmental Science & Technology*.
- Landis, M.S. and G.J. Keeler (2002) Atmospheric mercury deposition to Lake Michigan during the Lake Michigan mass balance study, *Environ. Sci. & Tech.*, 36, 4518-4524.
- Wilson, S.J., F. Steenhuisen, J.M. Pacyna, and E.G. Pacyna (2006) Mapping the spatial distribution of global anthropogenic mercury atmospheric emission inventories, *Atmospheric Environment*, 40, 4621-4632.