

## 대기 중 수은의 시간적 농도분포를 이용한 인위적 생성원의 영향에 대한 해석

### Examinations of the Influences of Anthropogenic Sources on the Temporal Distribution Characteristics of Airborne Hg

김기현 · 김민영<sup>1)</sup> · 김지영

세종대학교 지구과학과, <sup>1)</sup>서울시보건환경연구원

#### 1. 서 론

대기오염물질의 시간적 변화경향성이 지닌 환경학적인 의미를 해석하는 것과 관련된 여러 가지 복잡한 요인에도 불구하고, 특정한 오염물질의 시간적 농도분포경향을 정확하게 평가하고 예측하는 일은 아직도 환경오염에 대처하기 위한 가장 기본적인 수단으로 간주할 수 있다. 대기오염에 대한 인류의 대처노력이 가시화하면서, (위에서 언급한 오염물질들과는 달리) 지속적인 증가양상을 보여오던 일부 오염물질의 경우 그 시간적 분포양상의 해석에 여러 가지 혼란스런 요인들이 동시에 발견되는 경우도 종종 목격할 수 있다. 이와 같은 사례는 강한 환경유동성을 보이는 수은과 같이 발생원의 형태나 종류가 비교적 빠른 속도로 변화하는 물질들에서 쉽게 발견되는 것으로 파악된다 (Schroeder, 1998).

지역적인 규모로 볼 때, 수은의 농도는 지난 100년간 연평균 0.6%의 증가율을 보였고, 그 결과 현재 대기중에서 발견되는 농도는 지난 100년 전에 비해 3배 정도 증가한 것으로 예상된다 (Fitzgerald, 1995).

유럽이나 구미지역의 과학자들이 수은의 시간적인 농도분포의 경향을 일찍부터 연구분석한데 반해, 아시아지역에서는 이러한 연구자료를 발견하기가 쉽지 않다. 한국의 경우, 1980년대부터 수은의 분포에 대한 연구가 활기를 띠면서, 자료의 축적이 이루어지기 시작하였다. 특히 80년대 말의 시기에는 수은의 중요한 발생원으로 간주되는 무연탄류의 사용이 급감하므로써, 수은의 농도분포특성이 변화할 수 있는 중요한 계기가 마련되었다. 참고로 1980년대 초반에 유연휘발유의 사용이 금지되므로써, 그 시점을 기준으로 대기 중 납성분의 농도분포가 획기적으로 변하게 되었다는 것은 잘 알려진 사실이다 (e.g., Kim et al., 1997). 본문에서는 1987/1988년에 걸쳐 서울의 중요 지점들을 중심으로 광범위하게 측정된 수은의 농도자료를 이용하여, 그 기간대의 농도분포가 지닌 절대적 및 상대적 의미를 분류하고 파악하고자 시도하였다.

#### 2. 연구방법

본 연구에서는 80년대 말 서울을 중심으로 한 6개 지역의 측정점으로부터 광범위하게 측정된 농도자료와 90년대말 서울 남부의 양재지역으로부터 측정된 농도자료를 이용하여 수은의 농도분포를 시공간적으로 비교하고, 이러한 농도자료를 이용하여 인위적 발생원의 영향을 검증하고자 하였다. 우선 80년대 말의 측정은 1987년 9월부터 1988년 12월까지 6개의 측정점으로부터 총 23회의 실험을 통해 측정된 자료를 이용하였다. 매 회의 실험은 짧게는 6일에서 길게는 42일에 걸쳐 행해졌는데, 1회의 실험은 평균 10일과 표준편차 7.5일을 기록하였다. 이중에서도 대부분의 실험은 89년에 청사의 이전이 이루어지기 전까지 서울시보건환경연구원이 위치해 있던 한남동지역을 중심으로 이루어졌다.

80년대 말에 측정이 된 6개의 측정점 중 4개의 지점은 서울시에 위치하고, 2개의 측정점은 서울시 외곽에 위치한다. 80년대 말의 시점을 기준으로 각 지점들의 특성을 요약하면, 대략 다음과 같다. 서울시에 위치한 4개 지점중 한남동은 서울시의 가장 중심부에 인접한 주요 교통로로서 과도한 교통량이 기록되고, 주변에 밀집한 상업 및 주거시설로부터 상당량의 오염물질이 배출될 것으로 예상된다. 구로지역은 대규모 공단이 형성되어, 한남동과 마찬가지로 대기질이 상당히 악화된 것으로 예상된다. 그외 잠실과 방이동 지점은 서울시의 중동부에 인접한 2개의 측정점으로 주변에 대규모 체육시설과 아파트단지 등이 발달된 곳으로 비교적 양호한 상태의 오염이 예상되는 지역이다. 서울 외곽에 위치한 측정점 중 남서울 공원은 서울과 인접한 남측지역으로 대규모 놀이공원, 주거단지 등이 형성된 곳이다. 이에 반

해, 원당지역은 상대적으로 인구밀집도가 떨어지고 비교적 전원적인 조건이 형성된 지점이다. 90년대 말에 측정이 이루어진 양재는 현재의 서울시 보건환경연구원이 위치한 곳으로, 전원 및 주거지역이 공존하는 지역이다.

수은의 농도측정은 일본의 Nippon Instrument Co. (NIC)가 제작한 Mercury Analyzer, AM-1 모델 (87/88년 측정)과 이를 변형개발한 AM-2 모델 (97/98년 측정)을 활용하였다. 87/88년의 경우 AM-1을 이용하여 30분 간격으로 측정을 실시하였고, 97/98년의 경우 보다 높은 정밀도가 요구되는 농도구배의 측정목적을 위해 그보다 긴 한 시간 간격으로 측정이 이루어졌다.

### 3. 결과와 토론

#### 80년대 말의 농도분포

6개의 측정지점으로부터 구한 80년대 말의 농도분포는 비록 단일 측정점이지만, 양재동으로 대표되는 90년대말의 농도에 비해, 확연하게 구분이 될 정도로 큰 수치를 보여주고 있다. 이와 같은 차이가 일어나게 된 원인은 화석연료의 사용양상이 변화한데 따른 결과로 어느 정도 설명이 가능한데, 이러한 부분에 대한 설명은 후장에서 설명하고자 한다. 본 장에서는 80년대 말의 자료로부터 나타나는 각 측정지점별 공간적 농도분포의 특성을 보다 자세히 다루었다. 각 지역에서 발견된 농도는 대체로 지역의 특성에 일치하는 농도분포의 경향성을 보여 주었다. 모든 측정지점 중 한남동지점에서 가장 높은 농도가 나타났다. 공단이 형성된 구로지역에서 가장 높은 농도가 나타나지 않은 것은 어느 정도 예상을 벗어 나지만, 여전히 구로의 농도는 아주 높은 수준을 유지하였다. 그 다음 남서울지점이 3번째로 높은 농도가 나타났고, 방이와 잠실이 거의 유사한 농도를 보이며 4, 5번째로 나타났다. 그리고 가장 오염도가 낮을 것으로 예상되는 원당지점에서 예상과 일치하게, 가장 낮은 농도가 발견되었다. 비록 원당지점의 농도가 여타지역에 비해 현저하게 낮지만, 이 경우를 제외하면, 대체로 서울시내외에 위치한 모든 측정점에서 거의 유사한 농도가 유지되는 것으로 나타났다. 이와 같은 분포특성은 화학적으로 안정되고 긴 체류시간을 갖는 수은의 대기화학적 특성과 상당히 일치하는 것으로 보인다.

#### 계절적으로 구분한 일주기 농도분포의 특성

만약 수은의 농도가 난방연료 등의 사용에 영향을 받는다면, 이와 같은 특성은 계절적으로 난방연료의 사용이 집중되는 겨울철에 발견될 것이다. 이와 같은 전제를 확인하기 위한 방편으로, 가장 많은 측정이 이루어진 한남동 지역의 자료를 계절별로 구분한 후, 각각의 계절별 자료군을 이용하여 일주기로 일어나는 농도분포의 변화양상을 비교하였다. 봄과 가을에는 오전시간대에 짧게 그리고 여름철에는 오후시간대에 일중 고농도대가 길게 형성되는 것이 확인되었다. 이에 반해, 겨울철에는 여타 계절에 비해 전반적으로 높은 농도가 형성되는 것은 물론이거니와 오후시간대에 길게 형성되는 고농도대외에도 난방연료의 사용이 집중되는 저녁 및 새벽시간대에도 고농도의 피크가 형성되는 것이 뚜렷하게 확인된다.

#### 계절적으로 구분한 수은농도의 상대적 빈도분포

난방연료의 사용이 고농도의 수은이 발생하는 현상과 얼마만큼 연계되어있는 가를 확인하기 위한 또 다른 한 가지 방편으로, 수은의 빈도분포가 계절별로 어떠한 양상을 취하는 가를 비교분석해 보았다. 계절의 변화에도 불구하고 한남동 지역에서 발견되는 수은의 농도분포는 대단히 일정하게 규칙적인 양상을 취한다는 점을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 전체 농도대에서 뿐만 아니라 고농도대에서도 뚜렷하게 확인이 된다. 그 다음 한 가지 특이한 사실은 가장 고농도대인  $200 \text{ ng/m}^3$  ( $24 < < 200 \text{ ng/m}^3$ )에서도 거의 예외없이 상당히 고빈도가 나타난다는 것이다. 이와 같은 빈도분포가 계절적으로 유사하게 반복된다는 점에 착안하여, 각 농도대별 절대 발생빈도수를 이용하여, 상관관계를 분석하여 보았다. 인접한 계절간에 대단히 높은 상관성이 형성된다는 사실을 뚜렷하게 확인할 수 있다.

이와 같이 빈도분포에 대한 분석결과는 측정이 이루어진 10 여년 전의 시점에 수은의 농도분포가 인위적 또는 자연적 생성원에 어떻게 영향을 받았는가를 이해하는 데도 어느 정도 도움이 되는 것 같다. 우선적으로  $15 \text{ ng/m}^3$  이하의 농도에서는 거의 봄 > 여름 > 가을~겨울의 순으로 농도발생빈도가 변화

하는 것을 알 수 있다.

#### 80년대 말과 90년대 말의 농도분포에 대한 비교

80년대 말의 연구가 광범위한 지역의 농도분포를 파악하는데 치중한 반면, 90년대 말의 경우는 이와 같은 용도보다 교환율의 측정 등에 응용을 하기 위한 목적으로 자료의 축적이 시도되었다. 따라서 본문에 사용된 두 기간대의 농도자료는 단순히 시간적으로 10년의 차이, 선정된 측정장소에 따른 공간적인 차이 등에 덧붙여, 측정고도의 차이, 측정기술의 차이 등과 같이 여러 가지 요인의 차이가 공존한다고 할 수 있다. 비록 이와 같은 여러 가지 차이점들로 인해 모든 자료를 수평적으로 비교하기가 쉽지는 않으나, 이들 자료로부터 어느 정도 의미있는 해석을 유추하는 것도 가능한 것으로 보인다.

우선 90년대의 측정이 이루어진 양재동 지역은 주거 및 전원지역이 잘 형성된 곳이라는 점이다. 이곳에서 측정된 농도는 비교적 깨끗한 곳임에도 불구하고, Kim and Kim (in press)의 비교에서 지적된 바와 같이, 여타 외국의 측정지역에 비해 상당히 높은 수준의 농도라는 점을 지적하지 않을 수 없다. 그럼에도 불구하고, 이 지역의 농도는 80년대 말에 측정된 모든 지역의 평균농도보다 월등하게 낮은 수준이다. 고농도가 지속된 한남동을 위시한 주거지역의 농도는 양재지역의 농도보다 약 4배 정도 높은 수준이다. 그리고 80년대 말의 자료로부터 가장 인위적인 생성원의 영향이 배제된 것으로 보이는 원당 지역에서 측정된 자료조차, 90년대 말의 양재지역 농도보다 여전히 60% 정도 더 높은 농도이다. 빈도분포에 대한 분석결과를 보아도, 이러한 차이가 어느 정도 구조적으로 안정된 부분이라는 것을 알 수 있다. 비록 양재지역의 자료가 여름, 가을에 국한되지만, 80년대의 결과를 분석한 것과는 달리 고농도대의 존재를 확인하기가 어렵다.

#### 발생원으로서 화석연료의 중요성과 의의

석탄과 같은 화석연료의 사용은 오늘날 가장 중요한 수은의 배출원으로 간주되고 있다. 구미지역을 중심으로 한 연구결과들에 의하면, 이러한 사실이 뚜렷하게 확인된다 (Pacyna et al., 1995). 유럽지역의 경우, 석탄사용으로부터 파생되는 수은의 양이 여타 생성원에 의해 발생하는 양보다 크다는 것이 보고된 바 있다. 특히 폴란드와 같은 나라에서는 석탄의 사용이 전체 발생량의 75% 정도를 차지하는 것으로 추정되었다 (Hlawiczka, 1994). 따라서 국내에서 10여년의 기간동안 대기 중 수은의 농도가 가시적으로 저감된 사실을 설명하기 위해, 에너지경제연구원 등에 의해 제시된 자료를 토대로 동기간 동안 석탄의 사용경향에 대한 분석을 실시하였다. 무연탄, 유연탄, LPG 등의 사용량의 연추이를 비교해 보면, 유연탄이나 LPG 외에도 대부분의 유류 사용경향에서도 대체로 뚜렷한 사용량의 증가세가 확인된다. 이에 반해 무연탄의 경우는 완전히 상반된 경향을 보여준다. 특별히 무연탄의 사용이 유연탄에 비해 고농도의 수은을 방출하는 사실을 뚜렷하게 설명하려면 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 그러나 비교기간 중 유연탄의 사용이 꾸준히 증가한데 반해, 반대로 무연탄의 사용이 지속적으로 감소하였고, 그러한 경향이 수은의 농도저감과 일치한다는 사실은 무연탄의 사용이 대단히 중요한 수은의 발생원이란 점을 시사하는 것으로 사료된다.

#### **4. 결 론**

80년대 말과 90년대 말의 농도분포자료를 이용하여, 국내의 대기환경에서 관측되는 수은의 농도가 얼마만큼 변하였고, 또한 어떤 요인에 의해 그러한 변화가 주도되었는가를 점검해 보았다. 본 연구의 결과에 의하면, 80년대 말의 수은농도는 90년대 말의 농도에 비해 현격한 차이를 보이고 있다는 것을 쉽게 파악할 수 있다. 그와 같은 차이는 짧은 주기로 변화하는 수은의 분포특성이나 넓은 범위에서 발견되는 수은의 상대적인 빈도분포특성으로부터 일관성 있게 확인할 수 있다. 특히 이와 같은 현상들은 같은 기간동안 급격하게 감소한 석탄연료의 사용량과 직접적인 연관성이 있을 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- Fitzgerald, W. F., 1995, Is mercury increasing in the atmosphere? The need for an atmospheric mercury network (AMNET). *Water, Air and Soil Pollution*, 80, 245-254.
- Hlawiczka, S., 1994, Report on Heavy Metals Emission in Poland for 1990, The Institute for Ecology of Industrial Areas, Katowice, Poland.
- Kim, K.-H. and Kim, M.-Y. (in press) The exchange of gaseous mercury across soil-air interface in a residential area of Seoul, Korea *Atmospheric Environment*.
- Kim, K.-H., Kim, D.-S. and Lee, T.-J. (1997) The temporal variabilities in the concentrations of airborne lead and its relationship to aerosol behavior. *Atmospheric Environment*, 31(20), 3449-3458.
- Pacyna, J. M. and Keeler, G. J. (1995) Sources of mercury in the Artic. *Water, Air and Soil Pollution*, 98(3-4), 621-632.
- Schroeder, W. H. and Munthe, J. (1998) Atmospheric mercury - An overview, *Atmospheric Environment*, 32(5), 809-822.