

서울시 대기 중 총 가스상 수은의 농도 및 특성 분석

이용미[†] · 허종배* · 이승묵*

국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과, *서울대학교 보건대학원 환경보건학과
(2008. 1. 18. 접수/2008. 2. 16. 채택)

Atmospheric Total Gaseous Mercury (TGM) Concentration and Characteristics in Seoul, Korea

Yong-Mi Lee[†] · Jong-Bae Heo* · Seung-Muk Yi*

Air Pollution Cap System Division, Environmental Cap System Research Department National
Institute of Environmental Research

*Department of Environment and Public Health, School of Public Health, Seoul National University
(Received January 18, 2008/Accepted February 16, 2008)

ABSTRACT

The objectives of this study were to measure ambient TGM concentrations in Seoul Korea, to determine the temporal variation of TGM, and to analyze the relationships among TGM, meteorological data and PM2.5 measured at the same time. Ambient TGM and PM2.5 concentrations were measured at the roof of the Graduate School of Public Health building in Seoul, Korea for the period of January to October 2004. Average TGM concentration was 3.43 ± 1.17 ng/m³. The average TGM was at a low concentration similar to those of background sites in other countries. The temporal variations and meteorological phenomena of TGM were not statistically significant. There was a positive link between TGM and PM2.5. It didn't indicate that reduction of Hg²⁺ to Hg⁰ had occurred in liquid water contained in smog as in a previous study, but it shows that PM2.5 and TGM could be emitted from the same sources such as power plants and combustion engines. Also, the strong correlation between TGM and SO₂ concentrations indicated that the source of TGM was from fossil fuel combustions including coal combustion. Specifically, SO₂ and SO₄²⁻ concentrations correlated to TGM concentrations could be linked to TGM emitted from local and regional sources as well.

Keywords: Mercury, TGM, PM2.5, correlation, source, Seoul, Korea

I. 서 론

수은은 인위적 오염원과 자연적 오염원에서 배출되어 여러 가지 화학적 변화와 이동 과정을 통해 환경 내 모든 매체에 영향을 주는 물질이다. 이러한 수은의 특성으로 미국에서는 여러 가지 연구를 통해 법적으로 규제하고 있으며 기존 연구에서는 수은 오염이 증가함에 따라 물고기를 통한 메틸화된 수은에 의한 인간의 건강 영향이 일어난다고 밝히고 있다(Clarkson, 1995). 이러한 연구 결과를 통해 메틸수은의 축적으로 인한 중추 신경 마비나 언어 장애, 심장 질환 등 여러 가지

만성, 급성 피해의 발생 가능성이 알려져 있다. 이러한 수은의 위해성 때문에 U.S. FDA(Food and Drug Administration)와 U.S. EPA(U.S. Environmental Protection Agency)에서는 현재 임신 중이거나 수유기 및 가임기에 있는 여성을 대상으로 특정 어류 섭취를 제한해야한다는 권고문을 발표함으로써, 특정 어류에 포함된 수은이 먹이 연쇄 반응으로 인하여 태아에 영향을 줄 수 있는 위험한 수준에 이르렀음을 말해주고 있다.

대기 중 TGM(Total Gaseous Mercury)은 인위적 수은 배출의 주요한 형태로서 95% 이상의 구성비를 차지하는 Hg⁰와 높은 용해도와 침적율을 보이는 3% 미만의 RGM(Reactive Gaseous Mercury)으로 구성되어 있다. 이렇게 수은은 화학적 특성과 수은 종에 따라 침적 현상과 전 지구적 순환에 영향을 미친다. 또한 수은은 환경 중 다매체의 거동이 가능한 물질로써 대기 중 수은은 수체와 토양 등으로 거동하여 1, 2가의 이온성

[†]Corresponding author : Air Pollution Cap System Division, Environmental Cap System Research Department, National Institute of Environmental Research
Tel: 82-32-560-7524, Fax: 82-32-568-1658
E-mail : ymlee79@me.go.kr

수은으로 변화하여 유기 및 무기 화합물을 형성하고 생물체내의 축적을 통하여 독성을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 무기수은의 경우 생물학적 과정에서 메틸화되어 먹이사슬을 통한 인간 건강에 위해를 일으키는 물질로 전 세계적인 관심이 집중되고 있다.

이렇게 수은에 대한 관심은 날로 높아가고 있지만 국내뿐만 아니라 국외에서도 수은 연구는 부족한 실정이다. 특히, 대기, 수체, 토양과 생물체 내에 수은의 거동 원리는 복잡하고 일정하지 않아 수은 연구에는 보다 많은 노력이 필요하다. 특히, 우리나라의 경우 미국, 유럽 등지와 함께 수은의 주요 배출지역인 동북아시아 지역에 속해 있으며(Pacyna *et al.*, 2002), 세계적으로 수은의 함유가 많은 생선의 섭취량은 높지만 수은에 대한 연구는 미국, 유럽 등과 비교하여 극히 드물기 때문에 지속적인 수은 측정 자료의 축적과 수은의 거동에 대한 연구가 시급하다고 하겠다.

따라서 본 연구에서는 서울시 종로구 연건동에 위치한 서울대학교 보건대학원 6층 옥상에서 TGM(total gaseous mercury)을 주기적, 지속적으로 포집하여 서울시 대기 중의 수은 농도를 측정함으로써 대기 중 총 가스상 수은의 농도 및 그 특성을 파악하였다. 그리고 같은 위치에서 동시에 측정된 성분별 PM_{2.5} 농도와 기상자료를 토대로 TGM과의 연관성을 살펴보았다. 이러한 연구를 통해 대기 중 총 가스상 수은의 농도 분포 및 특성을 이해하고 더 나아가 다른 물질간의 상관성을 토대로 오염물질간의 유사한 특성을 유추해 볼 것이다. 또한 본 연구를 통해 우리나라의 수은 관리의 기반을 마련하고 기존의 연구 간의 활발한 교류를 통해 수은의 거동 및 오염원의 특성 연구에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

II. 연구방법

1. 포집 방법

TGM의 시료의 포집은 2004년 1월 말부터 10월까지 서울대학교 보건대학원 6층 옥상에서 주기적으로 이루어졌다. 시료 포집 방법은 The U.S. EPA Lake Michigan Mass Balance Methods Compendium(1994)을 이용하였다. 공기 중의 가스 상의 수은 포집은 금으로 코팅된 모래나 비드로 채워진 샘플러에 수은을 결합하는 방법을 이용하였다. 두 개의 gold sand traps를 연결하여 0.3 Lpm의 유량으로 TGM를 포집하는데, 이때 전단에서 파과 현상으로 인한 영향을 배제하기 위해 두 번째 gold sand trap을 설치하였다(Fig. 1). 이

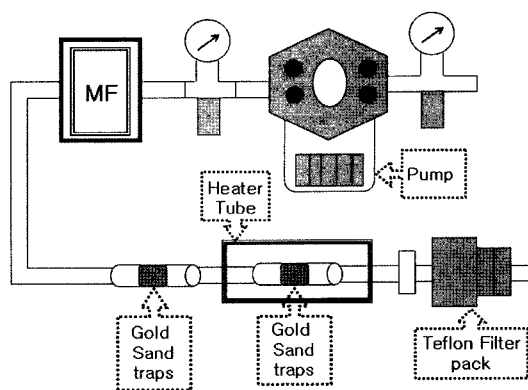


Fig. 1. Diagram of TGM sampling system.

두 개의 trap 전단에는 500°C로 3시간 이상동안 가열 처리한 Quartz glass fiber filter를 넣은 Teflon 필터 팩을 장착하여 입자상의 수은을 제거한다. 공기 중의 가스 상의 수은을 포집하기 위해서는 외기보다 높은 온도로 유지하기 위해 대부분의 포집이 일어나는 첫 번째 gold sand trap에 가열판을 장착하여 30~40°C로 유지시켜 주어야 한다. 전단의 gold sand trap을 외기 온도보다 높게 유지시키는 이유는 수증기가 gold sand trap에 흡착되어 포집 기능이 저하되는 것을 방지하기 위해서이다. 시료 포집기에는 유량 조절기를 부착하여 0.3 Lpm으로 포집 유량을 일정하게 유지시키도록 하였고, 포집 공기 부피를 측정하는 dry gas meter를 이용하여 시료를 포집하는 총 유량을 측정하였다. 그리고 매 6개의 시료마다 1개의 field blank를 분석하여 실험에서의 오차를 줄이도록 하였다. 정량·정성(QA/QC) 방법은 다음 장에 자세히 기록하였다. 이상의 포집 방법은 Lake Michigan Loading Study 과정을 참고했으며 이것은 가스상 수은의 포집에 있어서 99% 이상의 효율을 보이는 방법으로 알려져 있다.

2. TGM 분석 방법

포집된 총 가스상 수은은 CVAFS(Cold vapor atomic fluorescence Spectrometer) 분석기(Brookstrand model III)를 이용하여 수은이 없는 아르곤 가스를 흘려 넣어 253.7 nm의 파장에서 들뜬 상태에서 분석한다. 이러한 분석 방법 역시 U.S. EPA Lake Michigan Mass Balance Methods Compendium(U.S. EPA, 1994)을 활용하였다. 이 분석 기기는 고정 트랩과 주입구, 포집된 gold sand trap 그리고 아르곤 가스(Ultra High Purity)로 구성되어 있다(Fig. 2).

검량선은 수은으로 포화된 밀폐된 병 내에 5개의 서로 다른 부피를 취하여 매일 시료 분석 시에 함께 분

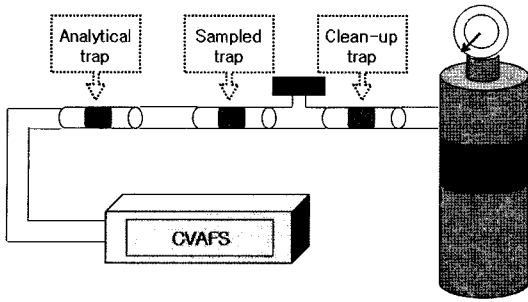


Fig. 2. Diagram of TGM analysis system.

Table 1. Amount of mercury injected for calibration curve

| Injection volume (μl) | Mass (Ng) |
|-----------------------|-----------|
| 0 | 0 |
| 20 | 0.198 |
| 50 | 0.495 |
| 100 | 0.990 |
| 200 | 1.98 |

*Flask Temperature = 16.6°C, Vapor Density = 9.912 Ng/m³

석하게 된다. 각각의 일정 부피의 수은은 포화된 병속의 공기에서 gas tight syringe(Hamilton사)을 이용하여 분취하였다.

표준 시료를 취할 때, 폐쇄된 공간 내에서 99.999% 이상의 순도를 갖는 금속화된 수은 약 2~3 ml를 120 ml의 플라스크에 포화시킨 후 취하게 된다. 수은으로 포화된 플라스크는 16.6°C로 유지되는 항온수조(circulating water bath)에 넣어 온도를 일정하게 유지시켜야 한다. 이렇게 일정 온도로 유지시키는 이유는 수은의 질량 환산을 위해 일정 온도의 밀도와 부피를 이상 기체 방정식에 적용하여 환산하기 때문이다. 표준 시료에 사용할 수은이 들어있는 플라스크는 수은의 표면을 산화시킬 수 있는 산소를 제거하기 위해 N₂ 가스를 이용한다. 수은을 주입한 후 gold sand trap을 500°C로 가열한 후 CVAFS 분석기로 흘려준다. 검량선 작성을 위해 총 5개의 부피(0 μl, 20 μl, 50 μl, 100 μl, 200 μl)를 취하여 Table 1과 같이 16.6°C에서 각각의 부피에 따른 질량으로 환산하였다. 검량선은 R²가 0.9995 이상일 때 사용하며 각 점을 검량선에 대입한 값이 참값에서 5% 이내의 오차만을 수용한다.

포집된 trap은 3분간 가열하여 모든 형태의 수은을 element(Hg⁰) 형태로 전환시키고 고정 트랩에 45~50 ml/min의 유량으로 포집한 후 가스 흐름을 이용하여 CVAFS 분석기에서 분석한다. 온도는 수은이 흡착된 트랩에서 모두 원자가 수은(Hg⁰)의 형태로 나올 수 있는 정도를 사용한다. 이때 온도는 500°C로서 HgCl₂와

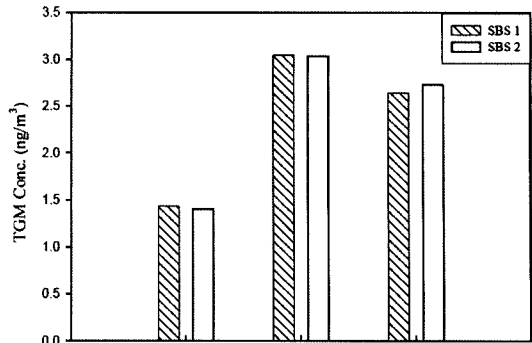


Fig. 3. Comparisons of side by side samples.

HgBr₂를 포함한 reactive gaseous mercury 일부와 elemental mercury를 흡착시키기에 충분한 온도이다.

3. QA/QC(Quality Assurance and Quality Control)

앞에서 밝힌 바와 같이, TGM 분석 시에는 검량선의 r² 값이 0.9995 이상으로 검량선의 각 점이 참값 범위에서 약 5% 내에 존재시에 받아들였다. 분석 중 검량선의 변화를 알아보기 위해 분석 기기의 안정성을 측정하기 위해 6개의 시료 분석마다 control standard를 측정하였다. 흔히, one point라고 하는 이 방법은 표준시료의 기지의 농도를 취하여 분석한 값이 참값과 5% 범위 이내에 있는지 확인하는 방법이다. 본 방법은 EPA의 Standard Methodology에 명시된 방법을 사용하였다. 전반적인 정확도는 같은 위치에서 측정한 서로 다른 샘플의 상대적인 차이를 측정된 것으로 흔히 side by side으로 불리는 방법을 활용하였다. 본 방법은 현재 시료 포집이 이루어지는 곳에 두 개의 포집기를 설치하여 시료를 포집한 후에 분석 결과가 같은지 비교해 보는 것이다. The Lake Michigan Mass Balance Methods compendium에 따르면 10% 이하에 오차를 받아들이며 본 연구에서는 세 개의 side by side의 측정 결과 Fig. 3과 같이 1.85±1.46%의 차이만을 나타내고 있었다. 그리고 6개의 샘플 포집 후에는 field blank를 통해 실험 시의 오차를 줄였는데, 본 연구에서는 0.0103±0.005 ng(n=6)으로 분석된 시료값의 평균 2% 이내로 나타났다. 검출한계(MDL)은 측정된 field blank 값의 3배에 표준편차를 더한 값으로 본 연구에서는 0.058 ng/m³였다.

III. 결과 및 고찰

TGM의 분석 결과를 살펴보면, 전체 평균 농도는 3.43±1.17 ng/m³(평균±표준 편차)으로 나타났고, 최고

농도는 7.63 ng/m³(2월)이고 최저 농도는 1.43 ng/m³(3월)이었다.

위의 Fig. 4에서와 같이 TGM의 가장 큰 부분을 차지하는 Hg⁰가 반응성이 거의 없기 때문에 대기 중에 장기간 체류하여 확산, 혼합됨으로 일반적 농도 분포에는 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있어(U.S. EPA, 1997, Lee, 1998) 국외의 배경농도인 1~4 ng/m³(Slemr *et al.*, 1992, Lin *et al.*, 1999)와 유사한 수준으로 분석되었다. 또한 김 등(2005)에서는 2004년도 서울시의 주요지점에서 측정된 결과로 구로 3.60 ng/m³,

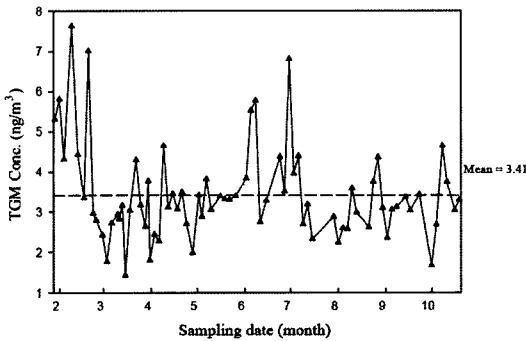


Fig. 4. Distribution of TGM concentration by sampling date.

Table 2. TGM concentration each month (ng/m³)

| Month | Classification | TGM | Month | Classification | TGM |
|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|
| Feb. | Mean | 4.526 | Jul. | Mean | 3.241 |
| | Max | 7.629 | | Max | 4.392 |
| | Min | 2.431 | | Min | 2.331 |
| | Std. | 1.895 | | Std. | 0.785 |
| Mar. | Mean | 2.799 | Aug. | Mean | 3.095 |
| | Max | 4.298 | | Max | 4.362 |
| | Min | 1.432 | | Min | 2.246 |
| | Std. | 0.826 | | Std. | 0.684 |
| Apr. | Mean | 3.025 | Sept. | Mean | 3.206 |
| | Max | 4.655 | | Max | 3.435 |
| | Min | 1.986 | | Min | 2.364 |
| | Std. | 0.802 | | Std. | 0.38 |
| May | Mean | 3.325 | Oct. | Mean | 3.183 |
| | Max | 3.817 | | Max | 4.649 |
| | Min | 2.885 | | Min | 1.671 |
| | Std. | 0.274 | | Std. | 1.003 |
| Jun. | Mean | 4.483 | Total | Mean | 3.411 |
| | Max | 6.813 | | Max | 7.629 |
| | Min | 2.746 | | Min | 1.308 |
| | Std. | 1.416 | | Std. | 1.198 |

방이 4.57 ng/m³ 그리고 상계 4.38 ng/m³ 등으로 밝힌 바 있으며 이 값은 본 연구 결과에 비해 약간 높은 값이었으나 이것은 본 연구에서 고농도가 나타나는 기간인 겨울철 농도(김 등, 2003)가 제외되었기 때문으로 사료되었다. 본 연구의 월별 분석 자료는 Table 2와 같다. Fig. 4 및 Table 2에서는 1월의 자료를 제외하였는데 이것은 한 개의 시료로 1월을 대표할 수 없기 때문이다. 1월 29일은 비교적 높은 값으로 5.31 ng/m³으로 나타났다.

각 분석 자료를 일별로 나타낸 Fig. 4와 같이, 2월과 6, 7월 중 비교적 고농도의 값이 많이 나타났으며 그 외에는 유사한 수준을 나타내고 있었다. 이러한 현상은 Fig. 5의 월별 box plot에서 더욱 잘 나타난다.

특히, 2월과 6월은 평균 농도가 높을 뿐만 아니라 농도의 분포 또한 넓게 나타났다. TGM의 농도는 계절적인 특성이 없이 일정 일에만 높았으며 이러한 고농도의 TGM에는 영향을 미치는 인자가 있을 것으로 사료되어 기상과 대기 상태 그리고 다른 주요 대기 오염물질에 따른 TGM 농도의 분포 차이를 분석해 보았다. 우선 기상 현상 및 대기 상태에 의한 분석을 위해 총 74개의 시료를 특별한 기상현상이 나타나지 않은 날(53

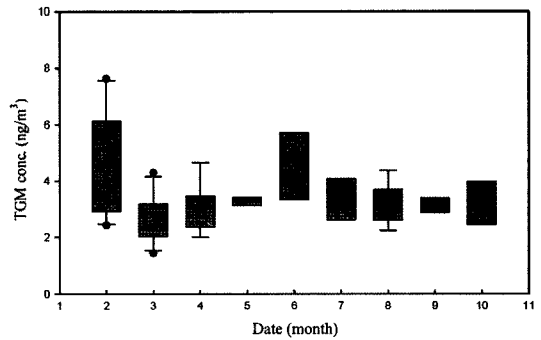


Fig. 5. Box plot of TGM concentration each month.

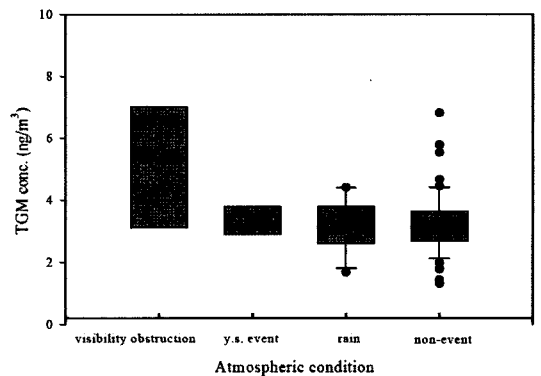


Fig. 6. Box plot of TGM distribution by atmospheric condition.

일), 강우일(11일), 가시거리가 감소하는 시정장애일(7일) 그리고 황사일(3일) 등으로 나누었다(Fig. 6).

위의 분류에 따른 TGM 농도 값의 차이를 살펴본 결과, non-event시와 강우 시에는 각각 $3.24 \pm 3.13 \text{ ng/m}^3$ 과 $3.13 \pm 0.68 \text{ ng/m}^3$ 의 농도 분포를 나타내는데 t-test를 통한 분석 결과 p-value가 0.74로 차이가 없는 것으로 나타났고, 이것은 TGM이 습식 침적이 되는 비율이 낮다는 기존의 연구 결과와 유사한 결과였다. 그리고 황사시의 분석 결과 황사 시 농도는 $3.380 \pm .21 \text{ ng/m}^3$ 으로 나타났으며 non-event와의 t-test 결과 p-value가 0.81로 역시 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 기존의 연구에서 장거리 이송에 의한 TGM의 영향과는 반대되는 사실이나 본 연구에서 측정된 황사일 수는 3일에 불과하며 2004년은 예년에 비해 비교적 황사의 강도가 낮았던 제한 인자로 인하여 기존 연구들과 상이한 차이를 보인 것으로 사료된다. 반면, 시정 장애가 발생하였을 때와의 비교 분석에서는 $5.23 \pm 3.10 \text{ ng/m}^3$ 으로 non-event와는 큰 차이를 보이며 t-test 결과, p-value가 0.01 이하로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러므로 대기 중 TGM의 농도는 시정 장애

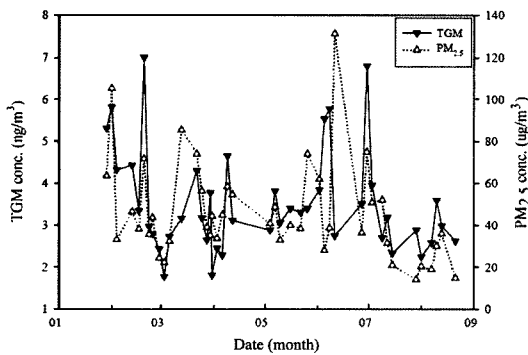


Fig. 7. Distribution of TGM and PM_{2.5} concentration.

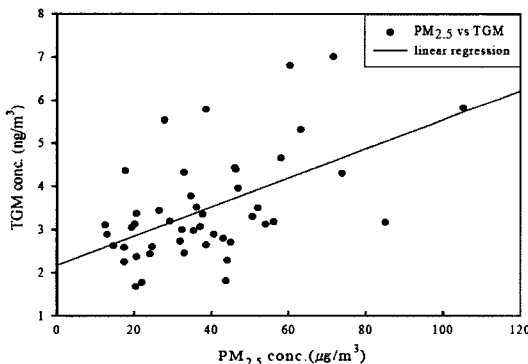


Fig. 8. Relationship between TGM and PM_{2.5} concentration.

의 요인간의 영향 인자가 있을 것으로 보고 다각적인 분석을 해보았다. 시정 장애 시에는 상대 습도가 높게 나타나고 최근의 연구를 통해 상대 습도가 높은 날의 PM_{2.5}의 농도가 높은 것으로 보고된 바 있다(이 외, 2004). 따라서 TGM과 PM_{2.5}와의 관계 그리고 TGM과 water vapor mixing ratio와의 관계를 통해 시정장애와의 연관성을 간접적으로 분석해 보았다.

우선, PM_{2.5}와의 관계를 살펴보면(Fig. 7, 8), TGM과 PM_{2.5}의 분포와 선형회귀분석 결과 두 물질은 상관관계가 있는 것을 알 수 있는데, Pearson 상관계수가 0.548이며 p-value가 0에 가까운 유의한 결과를 나타냈다. 회귀분석으로 인한 선형회귀직선은 $y = 0.034x + 2.167$ 로 양의 상관관계임을 알 수 있었다. 그러나 이것으로는 TGM과 PM_{2.5}의 오염 원인이나 성상의 차이 등의 여러 가지 제한인자로 인해 직접적인 연관성을 파악하기 어렵다. 따라서 이러한 점은 보완하기 위해 여러 가지 기상 인자에 대한 분석을 실시하였다.

본 연구에서 기상 인자로는 같은 위치에서 측정된 기상 자료를 활용하였다. TGM 농도는 온도, 상대 습도 등과 연관성을 보이지 않았다. 본 분석에서는 상대 습도 뿐만 아니라 water vapor mixing ratio를 이용하여 상대습도와와의 관계를 연구하였는데, mixing ratio는 수증기의 양과 건조 공기 양의 비를 나타내는 것으로 이 값은 온도의 차보다 수증기의 변화로서 달라지는 값이다. 따라서 수체에서 수은의 환원 작용에 대한 기여도를 알아보기 위해 Hg⁰ 농도와 water vapor mixing ratio의 관계를 알아 본 결과 유의하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 시정장애와의 연관성은 전반적인 오염 물질 증가로 인한 영향일 것으로 사료된다. 이때, PM_{2.5}와의 연관성은 오염원의 연관성으로 설명할 수 있을 것인데, PM_{2.5}의 경우 주로 인위적 오염원에서 배출되며, 화석 연료의 연소나 소각 시설 그리고 각종 산업에서 배출 되어 TGM의 주요 오염원과 일치하고 있다. 이것

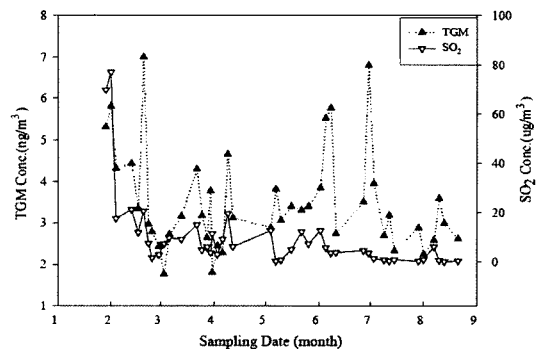


Fig. 9. Distribution of TGM and SO₂ concentrations.

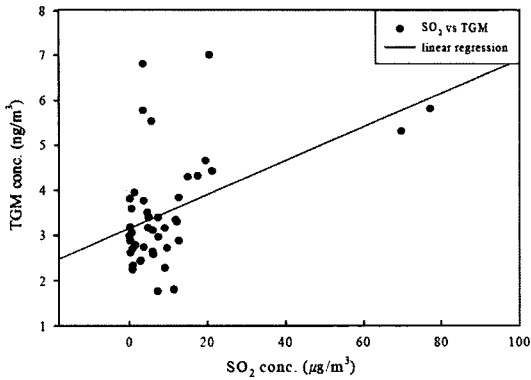


Fig. 10. Relationship between TGM and SO₂ concentrations

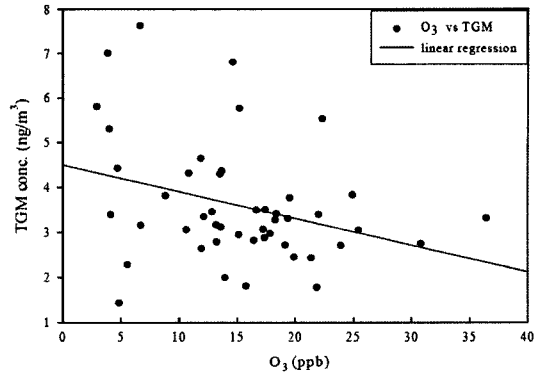


Fig. 12. Relationship between TGM and O₃ concentrations.

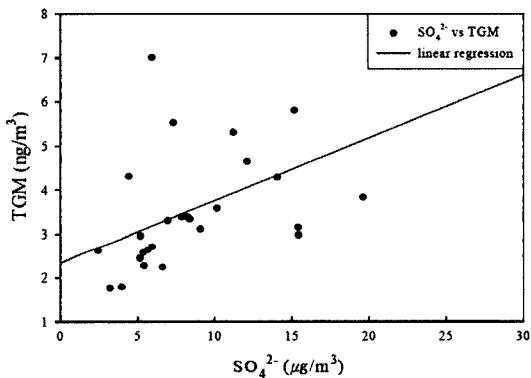


Fig. 11. Relationship between TGM and SO₄²⁻ concentrations.

은 PM를 구성하는 성분 중 TGM과 가장 유사한 오염원을 나타내는 SO₂의 상관성 분석 결과에서도 잘 나타나고 있다(Fig. 9). TGM과 SO₂와의 상관관계를 살펴보면, Pearson 계수는 0.473이고 p-value가 0.02로서 유의한 상관성을 갖고 있음을 알 수 있었다(Fig. 10). 본 결과는 TGM도 화석 연료를 이용한 발전소 등과 강한 정의 상관관계가 있음을 나타낸 기준은 많은 연구와 같은 결과이다(Blanchard *et al.*, 2002, Han, 2003). 그러나 SO₂는 주변 지역의 화석 연료 연소 배출원을 대표하는 지표로서 장거리 오염원의 영향을 파악하기 위해서 SO₄²⁻와의 상관성 연구도 실시하였다. 이때, TGM은 기상 인자에 대해 안정한 특성이 있으나 SO₄²⁻의 경우 기상인자의 영향이 큼으로 강우나 황사 등의 특정 현상을 배제한 27일의 동일 위치의 시료들을 비교 분석한 결과, Pearson 계수가 0.528, p-value가 0.01이하로 상관성이 있는 것으로 분석되었다(Fig. 11). 따라서 TGM도 SO₄²⁻와 같이 장거리 이송에 의한 영향을 많이 받는 물질임을 알 수 있었다. 기존의 연구에서도 PM_{2.5} 구성물질 중 2차 오염물질(에어로졸)과

TGM의 오염원 연관성이 상관관계를 갖고 있다고 밝힌 바 있다(Blanchard *et al.*, 2002).

TGM의 경우 산화 반응을 통해 Hg(II)로 변화되는데 이때 주요한 산화제로 O₃을 들 수 있다. 따라서 TGM의 농도는 O₃에 의해 감소하는 경향이 있음은 알려져 있는데, 본 연구에서도 TGM을 측정할 가까운 지점에 상시측정망 자료를 이용하여(종로구 이화동) TGM 농도와 O₃과의 연관성을 알아보았다(Fig. 12). 그 결과 회귀 직선 식은 $y = -0.6x + 4.506$ 으로 p-value는 0.023으로 유의한 음의 상관관계를 나타내고 있었다. 특히 본 연구에서 오존의 경우 낮은 농도에서 더욱 뚜렷한 음의 상관관계를 보였는데, 이것은 TGM의 농도가 산업이나 주거 지역의 영향이라는 것을 보여주고 있다고 밝힌 바 있다(Blanchard *et al.*, 2002).

V. 결 론

본 연구에서는 인위적으로 배출되는 대기 중 수은의 주요한 정상인 TGM의 농도를 측정하였고 대기오염 물질 및 기상 자료 간의 상관성을 분석하여 TGM의 농도 및 그 특성을 살펴보았다. 본 연구를 위한 TGM 자료는 서울시 종로구에 위치한 서울대학교 보건대학원 6층 옥상에서 2004년 1월 말부터 10월까지 주기적으로 측정하였고 같은 위치, 같은 시간에 측정된 대기오염도 및 기상 자료를 활용하여 상관성을 분석하였다.

TGM은 비교적 안정한 물질로서 계절 및 황사 현상이나 강수, 온도, 습도 등의 기상 인자와는 상관성이 낮게 나타났다. 그러나 시정 장애와 같이 대기 안정으로 인한 전반적인 오염물질 농도 상승으로 특정일에 비교적 고농도가 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 대기 자동측정망의 오존 농도와의 연관성 분석 시 음의 상

관관계를 통해 오존의 산화 작용으로 TGM의 주요 구성 물질인 Hg⁰의 감소에도 영향받는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 오존 농도가 낮을 때 더욱 뚜렷한 음의 상관관계를 보였는데, 이것은 TGM의 농도가 주변 산업이나 주거 지역 등의 인위적 오염원의 영향에 의한 것으로 사료된다. 그리고 동일한 위치에서 채취한 PM_{2.5}와의 연관성 분석 시에서도 기상 인자 등의 기타 영향을 배제한 결과 발전시설 및 소각 시설과 같은 연소시설 등의 유사 오염원의 영향이 있을 것으로 분석되었다. 특히, TGM과의 유사 오염원을 갖는 것으로 알려진 황산화물의 경우 SO₂ 뿐만 아니라 SO₄²⁻와의 상관성을 통해 주변의 지역적 영향과 함께 장거리 이송에 의한 영향이 함께 존재함을 알 수 있었다. 따라서 서울시 주변 지역 내의 오염원뿐만 아니라 수은의 주요한 배출원으로 알려진 중국이나 해양의 재배출과 같은 제어가 어려운 부분의 영향도 있는 것으로 사료된다.

지금까지의 연구 결과에서 나타난 바와 같이 TGM은 장거리 이송에 의한 영향이 큰 물질로서 제거 기술 보다는 배출원 목록 관리 및 배출원 제어 측면에 더 많은 주의를 기울여야 할 것이다. 그리고 수은은 종에 따라 거동 특성과 영향이 다르므로 speciation을 통한 국내와 국제적 측면의 연구가 함께 필요할 것이다. 또한, 본 연구는 총 가스상 수은의 연구뿐만 아니라 여러 연구와의 교류를 통해 다양한 대기오염물질간의 특성 연구, 간접적인 수은 배출원 파악 및 분포 특성 연구 등의 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 수은의 대기-수체 간 거동 평가 연구(과제번호 : R01-2004-000-10890-0)로 지원된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Blanchard, P., Froude, F. A., Martin, J. B., Dryfhout-Clark, H. and Woods, J. T. : Four years of continuous total gaseous mercury(TGM) measurements at sites in Ontario, Canada. *Atmospheric Environment*, **36**, 3735-3743, 2002.
- Brooks Rand Environmental Research and Development : Model III CVAFS for Mercury Operation Manual, Brooks Rand LLC, 2-28, 2003.
- Han, Y. J. : Mercury in New York State - Concentrations and Source Identification Using Hybrid Receptor Modeling, Clarkson University, 2003.
- Hinds, W. C. : Aerosol Technology - Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles, Second Edition, Wiley Interscience, 278-283, 1999.
- Keeler, G. and Landis, M. : Lake Michigan Mass Balance Methods Compendium - Standard Operating Procedure for Analysis of Vapor Phase Mercury, University of Michigan Air Quality Laboratory, pp.2-405-2-419, 1994.
- Kellerhals, M., Beauchamp, S., Belzer, W., Blanchard, P., Froude, F., Harvey, B., McDonald, K., Pilote, M., Poissant, L., Puckett, Schroeder, B.K., Steffen, A. and Tordon, R. : Temporal and spatial variability of total gaseous mercury in Canada - results from the Canadian Atmospheric Mercury Measurement Network (CAMNet), *Atmospheric Environment*, **37**(7), 1003-1011, 2003.
- Lee, D. S., Dollard, G. J. and Pepler, S. : Gas-phase mercury in the atmosphere of the United Kingdom. *Atmospheric Environment*, **32**(5), 855-864, 1998.
- Lin, C. J. and Pehkonen, S. O. : The chemistry of atmospheric mercury: A review. *Atmospheric Environment*, **33**, 2067-2079, 1999.
- Mason, R. P. and Sullivan, K. A. : Standard Operating Procedure for Mercury Analysis, SOP for mercury analysis, **2**, chap. 4, 2.447-2.451, 1996.
- Moore, C. J. : A Review of Mercury in the Environment (Its Occurrence in Marine Fish), Office of Environmental Management Marine Resources Division South Carolina Department of Natural Resources, 2000.
- Office of Air Quality Planning and Standards and Office of Research and Development : Mercury Study Report to Congress - Volume III - Fate and Transport of Mercury in the Environment, U.S. EPA, EPA-452/R-97-005, 1997.
- Pacyna, J. M., Pacyna, E. G., Steenhuisen, F. and Wilson, S. : Mapping 1995 global anthropogenic emissions of mercury. *Atmospheric Environment*, **37**, 109-117, 2003.
- Pacyna, E. G. and Pacyna, J. M. : Global emission of mercury from anthropogenic sources in 1995, *Water, Air and Soil Pollution*, **137**, 149-165, 2002.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N. : Atmospheric Chemistry and Physics - from Air Pollution to Climate Change, Wiley Interscience, 16-23, 1998.
- 김기현, WH Schroeder, 김민영, 홍성민, 손장호 : 극지 환경 수은의 대기화학과 환경적 의미. 한국지구과학회, **24**(5), 420-427, 2003.
- 김한식, 김민영, 김기현 : 도심지역에서의 대기 중 수은의 농도 분포에 관한 연구, 한국대기환경학회, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 344-346, 2005.