

4C2) 서울 및 전원지역의 대기 중 수은 농도와 장기 변동패턴 Long-term Variation Patterns of Total Gaseous Mercury in Seoul and Rural Areas

이준복 · 정 권 · 조석주 · 김민영
서울특별시 보건환경연구원

1. 서 론

대기에 존재하는 유해 중금속 중 수은은 납, 카드뮴과 함께 동식물에 잠재적인 위험성이 가장 강한 3대 유해 중금속 성분으로 분류되고 있다(MSC-E, 2002). 대기 중에서 세 가지 형태(TGM(이하 '대기 중 수은'), RGM, Hgp)로 존재하며, 주로 TGM 형태로 전지구적 규모의 지화학적 순환을 하면서 침적 및 화학반응을 통하여 생태계에 유입되기 때문에 대기 중 TGM의 농도는 중요하다.

국내에서도 대기 중 TGM에 관한 연구가 다수 있었다. 특히, 서울시 대기 중 TGM 농도에 관해서는 윤창원 등(2007), 김민영 등(2006), 김한식 등(2005), 김민영과 김기현(2003), 김민영과 김기현(2001), 김승희 등(2005), 최은미 등(2007), 이준복 등(2006)의 논문이 대표적이다. 또한 서울특별시 보건환경연구원, 국립환경과학원, 서울대 보건대학원이 대기 중 TGM 농도 측정방법 마련을 위한 공동연구사업(2006년, 2007년)을 수행한 바 있다. 그러나 대부분 측정기간이 짧고, 장기 패턴에 관한 논문은 아직까지 미흡한 실정이다.

본 논문은 서울 및 전원지역에서 측정된 대기 중 TGM 농도의 장기 변동패턴을 살펴보고, 이를 통하여 수은 관리정책 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구를 위한 측정지점(측정기간)은 서울시 4개소 수은 측정망인 용산(2003. 1. 1~2003. 12. 28, 2006. 1. 6~2007. 12. 31), 노원(2004. 4. 20~2007. 12. 31), 구로, 송파(2004. 4. 1~2007. 12. 31), 안면도 지구대기 감시 관측소(2004. 12. 16~2006. 4. 20), 제주도 고산(2006. 5. 16~2007. 5. 29), 제주대학교(2007. 5. 30~2007. 12. 31)이다.

측정기는 AM-2와 AM-3D(NIC, Japan)이고, 기기의 정도검사 결과는 증기상태의 표준시료 0, 10, 20, 30, 40 μ L를 주입하였을 때 $R^2 \geq 0.999$ 이었으며, 정밀도를 상대표준편차(relative standard deviation (RSD)=standard deviation(SD) \times 100/mean)로 표시할 때 증기상태의 표준시료 20 μ L를 7회 반복 분석한 결과 정밀도(RSD)는 2%이내이고, 정확도(% bias)는 $\pm 1.6\%$ 이내였다. 정도관리는 분기별 1회의 검량선 작성, 월 1회의 drift check를 수행하였다.

측정주기는 한 시간 단위(57분 샘플링, 3분 분석)이고, 상시 실시간으로 측정하였으며, 인용 논문을 포함한 본 논문의 측정주기는 모두 동일하다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 서울의 수은 측정망(4개소)에서 2004년부터 2007년까지 실시간으로 측정된 대기 중 수은 농도의 연평균 추이를 나타낸 것이다. 모든 지점에 대한 연평균 추이는 2004년부터 2006년까지 감소하였으나, 2007년에는 증가하였다. 일본 수은 측정망의 연평균은 2004년 2.3ng/m'(267 지점), 2005년 2.3ng/m'(320 지점), 2006년 2.2ng/m'(302 지점)로(일본 환경성) 서울의 수은 측정망처럼 2006년에 수은 농도가 낮아졌다.

또한 각 지점에서의 연평균 추이도 모든 지점의 연평균 추이와 유사한 경향을 보였다. 이는 김기현과 김민영(2001)의 논문에서 수은의 농도가 광역적으로 유의한 수준으로 유사한 경향을 보여준다는 연구결과와 일치한다.

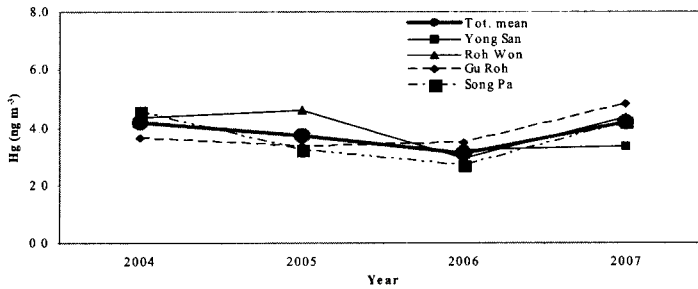


Fig. 1. Annual mean values of Hg concentration at four sites in Seoul.

한편, WHO Regional Office for Europe(2000)은 수은 증기의 LOAEL은 약 $15\sim 30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 불확실성 인자(uncertainty factor) 20을 고려했을 때 목표수준(guideline)이 연평균 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 임을 발표하였다. 또한, 일본의 대기 중 수은농도 기준은 연평균 $40\text{ng}/\text{m}^3$ (일본 환경성)로 규정되어 있다. 본 연구에서는 WHO와 일본의 기준보다 훨씬 낮은 수준이었으나, 수은이 수계 또는 토양에 침적하여 메틸레이션(methylation) 반응 후 생태계에 축적 및 순환되는 것을 고려하면 각 수은 종들에 대한 연구도 본 연구에서처럼 장기간 이루어져야 할 것으로 사료된다.

표 1은 1987, 1988년과 1997년부터 2007년까지 대기 중 수은 농도의 연평균 추이를 나타낸 것이다.

Table 1. Annual mean values of Hg concentration measured in Seoul(unit: ng/m^3).

	Yang Jae	Yong San	Roh Won	Gu Roh	Song Pa
1987	-	15.3±10.2(810)	-	-	-
1988	-	14.0±9.23(1904)	-	-	-
1997	6.60±3.89(1781)	-	-	-	-
1998	5.96±3.42(1627)	-	-	-	-
1999	5.09±3.01(6851)	5.23±3.12(850)	-	-	-
2000	5.16±3.26(7249)	5.39±4.26(1726)	-	-	-
2001	4.61±3.13(6843)	-	-	-	-
2002	6.87±5.10(2819)	-	-	-	-
2003	4.48±2.57(6722)	-	-	-	-
2004	-	-	4.36±1.49(5543)	3.63±1.62(6261)	4.55±1.65(6536)
2005	-	-	4.60±2.74(6661)	3.36±1.32(6649)	3.21±1.65(6212)
2006	-	3.25±1.60(6897)	2.93±1.85(7709)	3.48±1.69(8146)	2.70±1.74(6840)
2007	-	3.35±1.84(7855)	4.36±1.88(7955)	4.83±3.05(7679)	4.17±2.06(7709)

· : 김민영 · 김기현 (2003), ·· : 김민영 · 김기현 (2001)

1990년대 말에는 1980년대 말 시점보다 1/3가까이 대기 중 수은 농도가 감소하였고(김민영과 김기현, 2001), 2000년대 역시 1990년대보다 감소하였으며, 1987년과 1997년, 1997년과 2007년, 1987년과 2007년 사이의 수은 농도 감소율(감소율($\%$)= $(C_{1997}-C_{2007})/C_{1997}\times 100$)은 각각 57%, 37%, 73%였다. 이는 수은의 인위적 배출량이 1990년과 비교하여 1999년에는 45%(EPA, 2005), 2003년에는 57%(UNECE, 2006) 감소했다는 발표와 장기적인 추세가 유사함을 알 수 있다.

또한 김민영 등(1989)은 가정 연료인 연탄 중의 수은 함량은 0.16~0.36ppm으로 평균 0.24ppm이며, 이 중 약 98.9%가 가스상 수은으로 된다고 하였기 때문에 그림 2에서는 연도별 우리나라의 민수용 무연탄(연탄)의 소비량과 대기 중 수은의 농도 추이를 나타내었다. 그 결과는 장기적으로 유사한 경향을 보였으나, 단기적으로는 그 경향이 일치하지 않았다. 이는 상대적으로 최근의 낮은 대기 중 수은농도 및 연탄의 소비량에서는 기상현상, 배출원 변화 등 다른 요인에 의해서도 영향을 받는 것으로 추측된다.

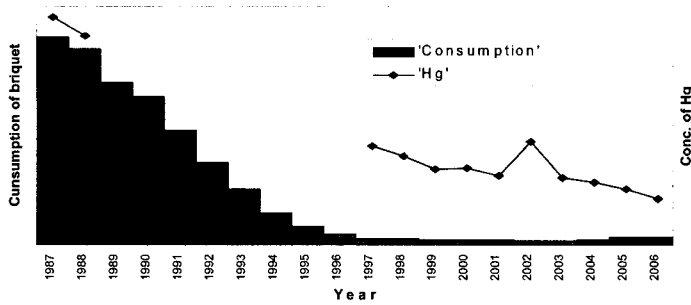


Fig. 2. Annual trend of consumption of briquet and concentration of Hg in Seoul.

서울의 4개소 측정망의 계절별 낮과 밤의 수은 일주기 분포를 표 2에 나타내었다. 대부분 주지야고형의 분포를 나타내었는데, 이는 김민영과 김기현(2003)의 장기(1997~2002) 변동특성과 일치한다. 이에 관하여 김민영 등(2006)은 대부분의 환경조건에서 거의 일관성 있게 보여주는 경향으로 야간대의 역전층 형성이나 혼합고의 변화 등과 같은 단주기적 기상현상에 의해 지표면에 수은의 누적이 이루어지기 쉬운 환경조건이 형성된 결과라고 발표하였다.

Table 2. Diurnal and seasonal patterns of Hg at four sites in Seoul(unit: ng/m³).

Year	Spring		Summer		Fall		Winter	
	Day	Night	Day	Night	Day	Night	Day	Night
2004	4.44±1.72(1941)	4.74±2.02(1948)	4.17±1.62(3149)	4.42±1.87(3151)	3.77±1.25(3015)	4.12±1.47(2999)	3.68±1.19(1064)	3.82±1.36(1073)
2005	3.86±1.35(2958)	4.00±1.52(2943)	4.46±1.85(2855)	4.53±1.90(2836)	3.72±3.37(2122)	3.55±2.21(2137)	2.16±1.30(1954)	2.35±1.51(1969)
2006	2.66±1.21(3830)	2.81±1.39(3853)	3.59±1.61(3289)	3.71±2.42(3288)	2.73±1.52(3878)	3.00±1.67(3909)	2.93±1.56(3966)	3.27±2.19(3993)
2007	3.65±1.50(4259)	3.81±1.87(4295)	4.66±2.20(3759)	4.73±2.59(3817)	3.97±2.11(3690)	4.53±3.17(3693)	3.81±1.96(3863)	4.27±2.65(3895)

즉, 상기 결과들에 의하면 서울의 대기 중 수은 농도의 장기 패턴은 수은 배출량과 단주기적 기상현상에 영향을 받는 것으로 판단된다.

표 3은 반월 산업단지, 안면도, 제주도 고산, 제주 대학교와 각각 동 기간 서울에서 측정된 대기 중 수은 농도를 나타내었다. 반월 산업단지, 안면도, 제주도 고산의 경우 서울보다 높은 농도를 보였으나 제주대학교의 경우에는 서울보다 낮은 농도를 보였다.

Table 3. Comparison for mean values of Hg concentration according to respective sampling sites(unit: ng/m³).

Sites	Period			
	'05.2.28~'05.5.16	'04.2.15~'06.4.20	'06.5.16~'07.5.29	'07.5.30~'07.12.31
Seoul	3.97±1.48(3233) *	3.42±2.01(29165)	3.54±1.92(31907)	4.42±2.47(17689)
Ban Wall	5.62±2.98(1147)	-	-	-
An Myun	-	4.61±2.21(10485)	-	-
Go San	-	-	3.86±1.69(7473)	-
Che Ju Univ.	-	-	-	2.88±1.61(2926)

* : 김민영 등(2006)

이와 유사한 여러 논문이 발표되었다. 반월 산업단지의 경우 김민영 등(2006)은 공단지역의 대기 중 수은은 일반적인 도심 환경권에서 거의 일정한 수준으로 나타나는 수은의 농도 수준보다 어느 정도 구분이 이루어질 수 있을 정도로 배출원의 종류나 강도가 다르게 작용할 것으로 추정하였다. 그러나 최은미(2007) 등은 대부도(2006. 9. 27~12. 30)의 대기 중 수은 농도는 1.89±0.98ng/m³로 도심지역인 서울보

다 인근 시화 반월 공단이나 영흥 화력발전소의 영향을 받을 것으로 예상되나 오히려 더 낮은 농도 분포를 보이고 있다고 발표하였고, 윤창원 등(2007)은 2007년 7월과 8월 사이 시흥과 고성에서 3일 동안 연속 측정된 결과 시흥은 3.755ng/m³, 고성은 2.226ng/m³임을 발표하였다. 또한 천태훈과 이종범(2007)은 2006년 1월동안 서울의 대기 중 수은 농도는 중국에서 수송되어 온 것임을 발표하였다.

한편, 도심권인 서울의 수은 농도보다 안면도, 제주도 고산의 수은 농도가 높고, 제주대학교의 수은 농도가 낮은 것은 향후 더 연구가 진행 되어야겠다.

참 고 문 헌

- 김민영, 홍성민, 최여진, 손장호, 이정순, 김기현 (2006) 공업지역 환경대기 중 수은성분의 농도분포에 대한 조사 : 반월공단을 중심으로, 한국환경분석학회지, 9(1), 41-48.
- 김민영, 김기현 (2003) 서울시 대기 중 수은농도의 장기변동 특성 1997~2002, 한국대기환경학회지, 19(2), 179-189.
- 김민영, 김기현 (2001) 12년 차이를 두고 본 서울 한남동 지역 대기 중 수은의 분포특성과 환경요인의 비교, 한국지구과학회지, 22(3), 237-247.
- 김민영, 박상현, 박성배 (1989) 도시대기의 수은동태와 영향인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(1), 11-21.
- 김승희, 허종배, 서용석, 김현선, 이승목 (2005) 서울시 대기 중 총 가스상 수은 농도 분석에 관한 연구, 한국대기환경학회 2005년 추계학술대회 논문집, 332-333.
- 김한식, 김민영, 김기현 (2005) 도심지역에서의 대기 중 수은의 농도 분포에 관한 연구, 한국대기환경학회 2005 추계학술대회 논문집, 344-346.
- 윤창원, 이치훈, 이주호, 오주성, 김성현 (2007) 시화공단지역과 고성배경농도지역의 수은농도 비교, 한국대기환경학회 2007년 추계학술대회 논문집, 215-216.
- 이준복, 박후경, 이향덕, 정 권, 김주형, 김민영 (2006) 2006년 강 황사 시 서울시 대기 중 총 수은의 농도 특성, 한국대기환경학회 2006년 추계학술대회 논문집, 606-607.
- 일본 환경성 http://www.env.go.jp/air/osen/monitoring/mon_h18/ref/ref05.pdf.
- 천태훈, 이종범 (2007) 수은 장거리수송이 우리나라 중부지방에 미치는 영향, 한국대기환경학회 2007년 추계학술대회 논문집, 457-458.
- 최은미, 김승희, 서용석, 이승목 (2007) 서울시 대기 중 총 가스상 수은의 장거리 이동 기여도 파악, 한국대기환경학회 2007년 추계학술대회 논문집, 217-218.
- 최은미, 허종배, 서용석, 김승희, 이승목 (2007) 안산시 대부도 지역의 대기 중 총 가스상 수은의 농도 및 수은 종의 건식 침적량 특성에 관한 연구, 2007년 환경공동학술대회 논문집, 1743-1746.
- EPA (2005) <http://www.epa.gov/camr/pdfs/slidel.pdf>.
- MSE-E (2002) Modeling of mercury hemispheric transport and depositions, MSC-E Technical Report.
- UNECE (2006) Emissions chapter draft 30 March 2006. (<http://www.unece.org/env/tfhm/third%20meeting/PostOttawa/emissions-chapter-comments-30-march-2006.doc>).