

12년 차이를 두고 본 서울 한남동 지역 대기 중 수은의 분포특성과 환경요인의 비교

김민영¹ · 김기현^{2,*}

¹서울시 보건환경연구원 환경연구실, 137-130 서울시 서초구 양재동 202-3

²세종대학교 지구정보과학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 98

Changes of Total Gaseous Mercury Concentration Levels and the Associated Environmental Conditions in Seoul, Korea

Min-Young Kim¹ · Ki-Hyun Kim^{2,*}

¹Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-130, Korea

²Department of Geoinformation Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

Abstract: The concentrations of gaseous mercury (Hg) determined between two different time periods of the late 1980s and the late 1990s were compared to account for the effects of changes between source/sink relationships of atmospheric Hg in an urban area. The Hg concentration levels were different remarkably between the two time periods due possibly to changes in source/sink relationships. The results showed that the Hg levels in the former period were measured to be $14.4 \pm 9.56 \text{ ngm}^{-3}$ (N=2714), whereas those of the latter period were characterized by approximately three-fold decreased values of $5.34 \pm 3.92 \text{ ngm}^{-3}$ (N=2576). Using two independent measurement data sets, we examined the patterns of Hg distribution at different time scales. When analyzed over 24 hour scale, these data sets exhibited two distinctive distribution patterns. The former period showed enhanced concentration levels during daytime, while the latter period showed relative depletion during daytime. The patterns of the two data sets were also examined over seasonal scale. The results of two different time periods consistently showed the occurrences of maximum seasonal values during winter. The former period was characterized by seasonal patterns of fuel consumption with excessive Hg levels during winter. Conversely, no distinctive trend was apparent for the latter period with slight changes in concentration levels across seasons. In order to analyze the factors affecting Hg distributions between two different periods, we conducted both correlation and factor analysis on both all data sets and on seasonally divided data groups. The results of these analyses consistently indicate that the Hg concentration levels for two different time periods are regulated by distinctive source processes that are characteristic of each period.

Key words: gaseous mercury, distribution patterns, fuel consumption, factor analysis

요약: 1980년대 말 시점과 1990년대 말 시점을 비교구간으로 설정하여 서울 한남동지역에 대한 대기중 수은의 농도 분포변화양상을 비교해 보았다. 긴 시간 동안 발생원과 소멸원이 지닌 관계의 변화와 같은 영향에 의해, 양 기간대의 농도분포는 절대적 및 상대적 관점에서 모두 뚜렷한 차이를 보여 주었다. 80년대말 시점의 농도가 $14.4 \pm 9.56 \text{ ngm}^{-3}$ 인 데 반해, 90년대 말 시점에는 이보다 1/3 가까이 감소한 $5.34 \pm 3.92 \text{ ngm}^{-3}$ 를 유지하였다. 두 기간대에 관측된 농도 및 주변환경변수를 여러 가지 주기별로 수은의 농도분포양상을 비교해 보았다. 24시간 주기 또는 계절별로도 양기간대의 농도분포는 뚜렷한 차이를 보여 주었다. 과거 시점에는 낮 시간대에 고농도가 발생하는 현상이 빈번한데 반해, 현 시점에서는 이러한 양상을 확인하기가 어려웠다. 또한 계절적으로 겨울철에 고농도가 집중되는 현상은 과거나 현재나 유사하지만, 과거의 경우 겨울철 고농도가 여타 계절에 비해 확인됐던데 반해, 최근의 분석결과는 계절간 차이가 상당 수준 줄어 들었다는 것을 보여 주었다. 이들 자료를 이용하여, 여러 가지 통계분석을 실시한 결과, 양 기간대에 현저하게 차이가 나는 농도분포는 주로 각 기간대별로 수은의 농도를 조절하는 주생성원의 성격이 현저하게 다른 데 따른 가능성이 강할 것으로 사료된다.

주요어: 시간적인 분포, 인위적인, 도심환경, 체류시간, 발생원의 근거, 수은

서론

공기 중에 존재하는 수은은 높은 안정성, 물에 대한 낮은 용해도, 높은 휘발성 등의 특질을 갖는 가스상 원소성 수은(gaseous elemental mercury)으로 대표된다(Schroeder and Munthe, 1998). 수은에 내재된 이러한 물리화학적 특징은 수은이 긴 수명 또는 긴 대기체류시간을 유지할 수 있는 가장 기본적인 요인으로 작용한다. 이러한 특징으로 인해, 수은은 항상 넓은 공간적 범위에서 비교적 균질한 농도특성을 취할 뿐 아니라(Slemr and Langer, 1992), 국경간 또는 대륙간을 초월하는 장거리이동이 가능한 핵심 중금속 성분으로 분류되기도 한다(Lindqvist *et al.*, 1991). 먼 거리를 이동한 원소성 수은은 다시 생지화학적 순환의 일환으로 수환경계 또는 토양환경계에 재유입되어 보다 강한 독성을 띠는 유기수은(methylated mercury species)의 형태로 전환이 이루어진다(Lee *et al.*, 2000). 특히 인위적 오염원으로부터 동떨어진 수생태계의 어류군에서 흔히 보고되는 유기수은성분의 생체내 축적(bioaccumulation)과 같은 현상은 2, 3단계의 먹이사슬, 궁극적으로는 인간을 위시한 환경생태계에 심각한 오염을 초래하는 문제로 대두되고 있다. 이러한 수은의 특성은 수은을 “전지구적 규모의 오염물질(Mercury as a Global Pollutant)”로 분류하게 하는 가장 기본적인 요인으로 작용한다고 할 수 있다(Ebinghaus *et al.*, 1999).

대기환경 중에 존재하는 수은의 환경거동 또는 환경유동(environmental mobilization) 등을 설명하기 위한 과거의 연구들 중에서 많은 부분은 수은에 내재된 여러 가지 환경화학적 특성을 시간적 및 공간적 규모의 변화특성에 결부짓거나 또는 다양한 지표환경계간의 유동특성에 연계하여 해석하려고 노력하였다(Kim *et al.*, 1995; Kim and Kim, 1999; Carpi and Lindberg, 1998). 수은의 농도분포가 시간적으로 나타내는 변화특성은 시간적 규모에 따라 다양하다. 이 중에서도 특히 수년 규모의 비교적 긴 시간적 주기를 두고 볼 때는, 순간적인 시간규모에 민감하게 변화를 유도할 수 있는 환경변수들과의 관계와 달리, 배출을 억제하는 기술이나 규제수준 등의 변화와 같이 생성원(또는 소멸원)의 변화 등을 위시한 보다 거시적 요인의

경향성에 민감하게 반응한다(Schroeder and Munthe, 1998).

수은의 배출은 대개 석탄연료를 사용하는 발전시설 또는 쓰레기 소각시설 등을 중심으로 이루어지는 것으로 보고되고 있다(Pacyna, 1998). 따라서 석탄연료를 대규모로 사용한 1980년대 말 시점의 서울지역은 인위적 오염원의 영향에 직접적으로 관련된 도심환경권에서 수은의 시간적 공간적 농도변화가 어떠한 형태로 발전할 수 있는 가를 조사할 수 있는 귀중한 단서를 제공하였다(Kim and Kim, 2000). 과거 시점에 대한 본 연구진의 기존 연구결과는 당 시점에 나타난 수은의 농도분포는 수은의 최대 발생원으로 간주할 수 있는 석탄연료 등의 사용의 직접적인 영향과 관련이 있다는 것이 여러 가지 관점에서 증명할 수 있었다(Kim and Kim, 2000). 그로부터 10여년이 지난 오늘날의 시점은 여러 가지 발생원의 변화 등과 같은 요인에 따라 농도분포의 특성에 많은 차이가 나타날 것으로 기대된다. 특히 오늘 날 서울을 위시한 한반도내의 다수 관측점에서 꾸준히 5 ngm^{-3} 전후의 농도가 관측된다는 사실을 감안할 때(Kim and Kim, 2001b), 최소한 그 농도의 절대적인 수준이 현저하게 감소하였다는 것은 인정할 수 있다. 본 연구에서는 10여년을 초과한 현 시점에 다시 한번 서울의 한남동 지역에 대한 농도관측을 수행하고, 이들 자료를 과거시점의 자료와 비교하므로써, 양 기간대의 농도분포가 어떠한 요인들에 의해 조절되고 있는 가를 판단할 수 있는 기본적인 근거를 제시하고자 한다.

연구 방법

수은의 분석은 두 개의 기간대에 집중적으로 이루어졌다. 1차로, 1980년대 말의 측정은 1987년 9월부터 1988년 10월까지 이루어졌다. 2차로, 1990년대 말의 측정은 1999년 9월부터 2000년 7월까지 다시 유사한 방식으로 한남동 지역의 농도를 관측하였다. 양 기간대에 걸쳐 수은의 농도관측이 이루어진 한남동 지역은 서울의 도심을 대표하는 지역으로서, 교통의 중심지역이다. 한남동 측정소는 한남대교 북쪽 1.8km 지점에 위치한 주거지역에 위치하고 있다. 측정지점

은 최초의 측정이 이루어진 80년대 말 당시에는, 서울시보건환경연구원으로 사용된 건물이었다. 현재의 측정소 주위에 높은 건물들이 있고, 자동차 배출가스가 주요염원으로 추정되는 지역이다. 북쪽으로 200여 m에 남산 공원 녹지가 이어져 있고 측정소 동측으로는 언덕이 형성되어 다소의 녹지축이 존재한다. 현재 측정소는 한강관리사업소로 사용되고 있는데, 채취 위치는 지상 6m(2층 높이)에 위치하고 있고 시료채취는 3m 길이의 스테인레스관을 주입구로 사용하였다. 본 연구지점은 환경부의 대기질관리 주요 대상지점이기 때문에, 본 연구에서 관측된 수은의 농도자료는 기상 자료는 물론 대기질 자료와 곧 바로 연계하여 활용할 수 있다는 장점이 있다.

양 관측 기간 중 수은의 농도는 약 10여일 또는 그 이상의 기간으로 설정된 집중측정을 통해, 총 14회(87~88년)와 7회(99~00)에 걸쳐 관측되었다(Table 1). 매 집중관측시 수은의 농도는 매 시간단위로 분석이 이루어졌다. 따라서 수은의 일주기별(24시간주기), 계절별(사계절에 대해) 기준 등으로 분류하여, 각 지점의 기간대별 분포특성을 절대적 및 상대적 관점에서 비교하고 해석할 수 있는 기반을 확보하고자 하였다. 수은의 관측은 바깥쪽 외기시료를 실내에 장착된 on-line 수은 분석시스템에 주입하여 분석하는 방식으로 이루어졌다. 수은의 분석과 관련된 분석 화학적 QA/QC 등은 이미 본 연구진의 과거연구에서 자세하게 제시한 바 있다(Kim and Kim, 1999, 2000, 2001a, b).

Table 1. A timetable for intensive measurements of Hg concentrations from Han Nam stations during 1987 through 1988 and 1999 through 2000.

Experiment No.	Hannam 87-88		Hannam 99-00	
	Start	End	Start	End
1	87-9-18	87-9-28	99-9-17	99-9-29
2	87-10-13	87-10-19	99-10-25	99-11-19
3	87-10-24	87-10-28	00-1-17	00-2-10
4	87-11-23	87-12-1	00-2-16	00-2-26
5	87-12-21	87-12-28	00-3-2	00-3-14
6	88-1-25	88-2-1	00-6-9	00-6-26
7	88-2-13	88-2-22	00-7-10	00-7-25
8	1988-03-12	1988-03-21		
9	1988-04-11	1988-04-18		
10	1988-05-21	1988-05-27		
11	1988-06-08	1988-06-27		
12	1988-07-16	1988-07-25		
13	1988-09-12	1988-09-20		
14	1988-10-22	1988-10-28		

수은의 농도는 Nippon Instrument Co.가 제작한 순간자동측정기 Mercury Analyzer, AM-2 모델을 이용하여 매시간 간격으로 측정하였다. AM-2 내부에는 거의 일정한 수준으로 대기시료를 흡입하여, 수은을 흡착채취하고, 흡착된 수은을 열탈착하여 검출기로 이송하는 Au amalgamation 방식을 조합한 “채취/열탈착” 시스템을 갖추고 있다. 이송된 수은은 비분산형 이중빔식(nondispersive double beam) 반분광형 원자흡광분석기(flameless atomic absorption method)에 의해 최종적으로 농도의 검출이 이루어졌다. AM-2를 이용한 시료채취 유량은 1.0l/min을 유지하였고, 시료 분석을 위한 운반기체는 건조한 공기를 사용하였다. 검출기로 유입된 수은은 253.7nm의 파장에서 약 1pg 대의 절대검출한계를 보여주었다. 증기형 수은의 표준시료가 존재하지 않기 때문에, 측정의 정확도를 산출하기 위한 한 방편으로 NIST SRM 1632a, 1568, 1575 등을 이용하여 분석을 시도하였다. 그 결과, 정확도는 3~5% 대로 나타났다(Kim and Kim, 1999). 그리고 시료분석의 정밀도를 산출하기 위해 1, 2, 3ng 대의 증기상태의 표준시료를 각각 5회씩 기기에 직접 주입하는 방식으로 반복분석하였다. 정밀도를 상대표준오차[relative standard error (RSE)=standard error(SE)*100/mean]로 표시하면, 실험에 사용된 2대의 AM-2 기기는 각각 평균 0.35~0.64% 대의 오차를 보이는 것으로 나타났다(Kim and Kim, 1999). (참고로 1980년대 말 시점에는 본 기기의 선행 모델인 AM-1을 이용하여 분석이 이루어졌다. 구형기기도 거의 유사한 수준의 분석능을 갖는 것으로 파악되었다.)

결 과

이미 과거 10여년 전 시점에 수은의 농도분포가 지닌 특성을 설명하기 위해, 1987년 9월부터 1988년 10월 시점까지 1년여에 걸쳐 한남동 지역을 중심으로 수 차례 수행된 집중관측결과를 분석한 바 있다(Kim and Kim, 2000). 본 연구에서는 이들 자료에 직접적으로 대비할 수 있는 현시점의 농도자료를 확보하기 위해, 1999년 9월부터 2000년 7월 시점까지 다시 유사한 방식으로 한남동 지역의 농도를 관측하였다. 80년대 말 시점의 경우, 총 14회의 집중 측정기간동안 총 2714회의 시간대별 수은의 농도가 측정되었고, 90년대말의 경우 총 7회의 기간동안 2576회의 측정

이 이루어졌다(Table 1). 이들 기간을 편리하게 구분하기 위해 편의상, 전자와 후자를 각각 I과 II 기간으로 명명하고자 한다. 양 기간대를 구분하며, I 기간대는 총 14개, II 기간대는 총 7개의 집중측정기간으로 구성되었다. 그러나 양 비교 기간대에 모두 유사한 규모의 자료수가 확보되었다.

양 기간동안 한남지역에서 관측된 수온과 관련 변수의 관측결과에 대한 통계량은 Table 2에 제시되었다. 수온분석을 위한 양 관측기간 중 동시에 관측된 기온, 일사량, 상대습도, 풍속 등의 주 기상인자를 전체자료로부터 그리고 계절별로 분리하여 비교해 보았을 때, 대단히 유의한 차이가 뚜렷하게 나타났다. 기온과 일사량은 거의 모든 계절에 걸쳐 I 기간대가 II 기간대에 비해 뚜렷하게 높게 나타났는데 반해, 풍속이나 상대습도는 그 반대의 경향이 뚜렷하였다. 풍향자

료를 분석한 결과도 계절별로, 주 풍향이 다양하게 나타나는 편이고 양 기간대에 일관성을 발견하기가 쉽지 않았다. 이러한 복잡함은 10여년을 초과하는 기간동안 주변지역의 지형·지물 등의 변화와 같은 요인의 영향도 어느 정도 반영하는 것으로 보인다.

토 론

양 기간대의 농도분포 특성

Table 1에 제시된 바와 같이 양 기간대에 관측된 농도는 평균치로 대략 3배 정도의 현격한 차이를 보였다. I 기간대의 경우, $14.4 \pm 9.56 \text{ ng m}^{-3}$ 의 농도로 발견되었으나, 농도범위는 4.73 ~ 113 ng m^{-3} 로 나타났다. 반면 II 기간대의 경우, 전체 기간 동안 수온의 농도가 1/3 수준인 $5.34 \pm 3.92 \text{ ng m}^{-3}$ 의 평균값을 보였다.

Table 2. A statistical summary of gaseous Hg concentration data determined from Hannam during the late 1980s and late 1990s (mean±SD, N=number of observations, R=minimum~maximum).

	All data	Annual		All data	Annual	
		1987	1988		1999	2000
		1987 ~ 1988			1999 ~ 2000	
Hg (ng m ⁻³)	14.4±9.56 (N=2714) R=4.73 ~ 113	15.3±10.2 (N=810) R=4.73 ~ 112.7	14.0±9.23 (N=1904) R=5.09 ~ 109	5.34±3.92 (N=2576) R=0.56 ~ 80.1	5.23±3.12 (N=850) R=0.56 ~ 18.3	5.39±4.26 (N=1726) R=1.04 ~ 80.1
Temp. (°C)	14.1±10.6 (N=8546)	10.7±8.40 (N=2506)	15.5±11.1 (N=6040)	8.45±9.15 (N=6707)	8.24±8.11 (N=2320)	8.55±9.65 (N=4387)
UV (MJ m ⁻²)	29.7±48.3 (N=6623)	14.8±24.4 (N=2343)	37.8±55.7 (N=4280)	18.2±32.3 (N=6895)	12.4±19.1 (N=2517)	21.5±37.4 (N=4378)
RH (%)	48.5±19.4 (N=8481)	53.9±18.8 (N=2512)	46.3±19.2 (N=5969)	66.6±19.8 (N=6899)	71.9±17.8 (N=2512)	63.6±20.2 (N=4387)
Wspeed (m s ⁻¹)	0.67±0.67 (N=8589)	0.74±0.77 (N=2519)	0.64±0.63 (N=6070)	1.18±0.84 (N=6891)	0.97±0.74 (N=2516)	1.30±0.87 (N=4375)
SO ₂ (ppb)	6.57±5.12 (N=5721)	7.20±5.27 (N=2367)	6.12±4.96 (N=3354)	6.28±2.90 (N=6762)	5.37±2.48 (N=2483)	6.81±2.99 (N=4279)
NO (ppb)	61.8±53.4 (N=8559)	84.4±59.8 (N=2512)	52.4±47.5 (N=6047)	43.3±48.4 (N=6734)	64.4±60.4 (N=2436)	31.3±34.7 (N=4298)
NO ₂ (ppb)	21.9±15.1 (N=8559)	15.1±10.4 (N=2511)	24.7±15.8 (N=6048)	41.3±21.2 (N=6734)	42.2±17.2 (N=2436)	40.7±23.1 (N=4298)
NOX (ppb)	83.7±57.5 (N=8558)	99.5±62.9 (N=2511)	77.1±53.7 (N=6047)	84.5±62.1 (N=6734)	107±73.2 (N=2436)	72.0±50.8 (N=4298)
CH ₄ (ppm)	1.96±0.58 (N=5236)	1.84±0.51 (N=2364)	2.06±0.62 (N=2872)	2.31±0.39 (N=6077)	2.37±0.33 (N=2379)	2.27±0.42 (N=3698)
NMHC (ppm)	0.64±0.64 (N=5237)	0.79±0.75 (N=2364)	0.51 ± 0.50 (N=2873)	0.61±0.48 (N=6077)	0.84±0.55 (N=2379)	0.47±0.35 (N=3698)
THC (ppm)	2.60±0.93 (N=5236)	2.64±1.00 (N=2364)	2.57±0.86 (N=2872)	2.92±0.73 (N=6077)	3.21±0.78 (N=2379)	2.74±0.63 (N=3698)
O ₃ (ppb)	10.2±15.8 (N=8218)	6.81±14.0 (N=2357)	11.6±16.3 (N=5861)	15.8±14.8 (N=6801)	8.90±9.21 (N=2503)	19.8±16.0 (N=4298)
CO (ppm)	2.54±2.60 (N=8070)	3.32±3.26 (N=1925)	2.29±2.31 (N=6145)	1.15±0.67 (N=6589)	1.29±0.84 (N=2291)	1.07±0.54 (N=4298)
PM10 (µg m ⁻³)	143±96.6 (N=8022)	142±93.5 (N=2437)	143±98.0 (N=5585)	65.6±47.9 (N=2492)		65.6±47.9 (N=2492)

그리고 농도의 범위는 가장 낮은 수준인 0.56에서 가장 높은 80.1ngm^{-3} 까지 농도차가 약 100배 이상(2 orders of magnitude)의 범위대에서 발견되었다. 양 측정기간 중 관측된 수은의 농도자료를 이용하여, (a) 전체 자료의 빈도분포와 (b) 10ngm^{-3} 를 초과하는 고농도대만을 선별분리한 결과를 동시에 비교하였다. I 기간대에는 $8\sim 10\text{ngm}^{-3}$ 대에서, 그리고 II 기간대에는 $2\sim 4\text{ngm}^{-3}$ 대에서 최고빈도가 나타나는 것이 뚜렷하다. 평균값의 비교에서 나타난 것과 마찬가지로 최대 발현빈도대도 최소 2배 이상의 차이가 나는 것이 뚜렷하다. 이러한 차이는 고농도대를 분리해서 비교한 결과에서 더욱 선명하게 확인되었다. 10ngm^{-3} 대의 농도자료를 비교하면, I 기간대의 자료수가 II 기간대에 비해 대략 5배 이상으로 많은 것으로 나타났다. 이와 같이 10여년의 기간동안 절대 농도가 현격하게 급감한 현상은 현 시점의 발생원이 과거 시점과 뚜렷한 차이가 있다는 점을 시사하는 것으로 보인다. 특히 80년대 말의 시점에 발견된 고농도가 주로 당시에 많이 사용된 석탄연료와 같이 인위적 발생원으로부터 발생하였다는 점을 감안하면, 현 시점에 관측되는 수은의 농도분포는 여러 가지 가능성을 시사한다. 특히 중요한 사실은 아직도 일정 규모의 석탄 연료가 무연탄의 형태로 일부 가구에서 사용된다는 점을 감안하면, 현 시점의 농도에 결정적으로 영향을 미치는 발생원은, 과거 시점의 석탄연료와 같이 하나의 요인이 절대적인 기여도를 보이는 경향과는 구분이 될 수 있을 것으로 보인다. 참고로 무연탄 사용량이 정점을 이루었던 1986년 경에는 2500만 톤에 육박하였고, 오늘날에 가까운 1990년대 후반에는 수 백만톤의 규모로 소요량이 줄어들었다(Kim and Kim, 2000). 그리고 이러한 비교에서 중요한 사실은 과거 I 기간대에 비해 1/3 수준의 농도가 감소한 현 시점의 5ngm^{-3} 수준의 농도는 아직까지 국외 여러 관측점에서 관측되는 2ngm^{-3} 내외의 배경농도와는 현격한 차이가 있다는 점을 들 수 있다. 특히 서울과 같은 대도시지역의 여타 관측점에서 발견된 농도수준이나 또는 비교적 청정할 것으로 예상되는 산악지역에서의 농도도 거의 유사한 수준의 농도를 보이고 있다는 점은 한반도 지역에서 수은의 농도에 영향을 미치는 요인들이 지역차에 큰 상관없이 대략 유사한 특성을 보이는 것으로 사료된다. 특히 이러한 결과는 현 시점에도 많은 석탄을 사용하는 중국대륙 등에서 발견되는 경향성과 어느 정도 유사점과 차이점을 동

시에 보인다는 점에 주목할 필요가 있다. Tan *et al.*(2000)의 연구결과에 의하면, 산업지역인 Guizhou 지역 등에서는 과거 우리 나라에서 석탄사용량이 정점을 이루었던 시점의 농도를 보이는 반면, 이로부터 먼 거리에 위치한 청정지역에서는 구미지역에서 발견되는 낮은 수준의 농도가 존재한다는 점을 확인하여 주었다.

주야간대를 주기로 한 단주기 농도변화

양 기간대에 수은의 농도분포특성을 보다 세밀하게 분석하기 위해, 이들 자료를 다양한 각도로 해석해 보았다. 우선 Fig. 1에는 양 기간대의 자료를 이용하여, 24시간 주기의 경향성(과 주야간의 경향성)을 각각 분리하여 비교해 보았다. 양 기간대의 일주기 분포는 정반대의 경향성을 보인다는 것을 확인할 수 있다. I 기간대에는 여타 계절에 비해 특히 겨울철에 농도변화의 폭이 크다는 것을 알 수 있고, 여기에 덧붙여 주로 낮시간대에 농도가 높게 나타나는 경향이 강하다는 것이 확인된다. 반면 II 기간대에는 오전 9 시경에 어느 정도 오전시간대의 피크형성이 목격되지만, 거의 일관성있게 주간대의 농도가 야간대에 비해 떨어진다는 것을 알 수 있다.

수은의 일주기 분포특성에 대한 고찰은 이미 본 연구진의 과거 연구에서 자세하게 다룬 바 있다(Kim and Kim, 2001a). I 기간대의 경우, 주로 낮시간대에 온도의 증가와 함께 수은의 배출이 촉진되고, 그에 따른 농도증가의 경향을 반영하는 것으로 해석할 수 있다. 반면 II 기간대에는 낮시간대에 활발하게 지표 생성원에 의한 배출이 이루어져도, 야간대에 역전층 등의 형성 등으로 인해 낮은 고도권에 수은의 농도가 축적된 데 따른 결과로 해석하는 것이 가능하다(Lee *et al.*, 1998; Kim and Kim, 2001a). I과 II 기간대의 농도분포경향이 이처럼 뚜렷하게 구분되는 현상을 전적으로 위와 같은 요인만으로는 설명하기 곤란하다. 이러한 현상이 각각의 시점에 주도적으로 나타나는 이유는 어느 정도 기상적인 요인과 연계하여 해석하는 것이 가능할 것으로 보인다. 예를 들어, I 기간대에는 고온, 고일사량이 지속되어, 일반적으로 높은 휘발성을 지닌 수은의 배출에 유리한 여건이 자연스럽게 유지되었을 것으로 보인다. 반면 II 기간대에는 상대적으로 저온, 저일사량이 지속된데다가, 고풍속(과 고습도)의 조건이 유지되어 낮 시간대에 수직적인 확산이 쉽고 또한 고습조건에서 생성된 입자

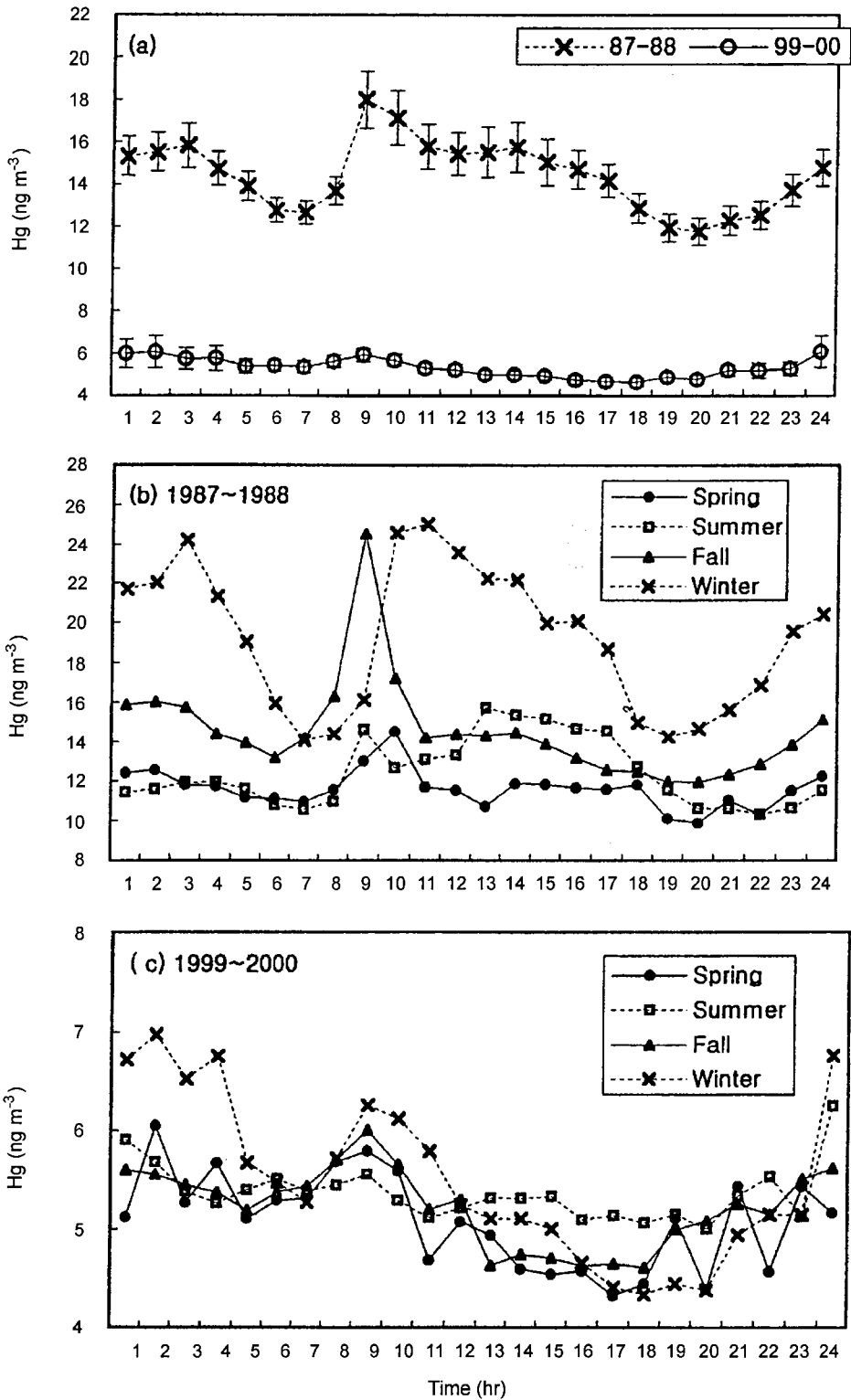


Fig. 1. Comparison of diurnal variation patterns of gaseous Hg between two different periods of late 80s and 90s. Seasonal effects can also be checked concurrently: (a) using all data sets, (b) 1987~1988 data only, and (c) 1999~2000 data only.

상물질들에 의한 scavenging 등을 통해 지표면으로 침적되기 쉬웠을 것으로 보인다. 따라서 상대적으로 낮시간대에 고농도를 유지하기가 용이하지 않았을 것으로 보인다.

또 다른 관점에서 이와 같은 결과를 자세히 보면 대단히 의외적인 경향성도 눈에 띈다. 특히 무연탄의 사용 등이 절대적으로 중요한 배출원의 역할을 하였을 것으로 판단되는 I 기간대의 자료에서, 연료의 사용량이 증가하는 야간대에 비해, 주간대에 고농도를 유지하는 현상은 대단히 의외적인 결과이다. 이러한 결과는 II 기간대의 결과와 강한 대조를 이룬다. 오히려 II 기간대에는 무연탄 등이 여타 대체연료의 사용으로 줄어든 시점임에도 불구하고, 오히려 야간대의 농도가 더 높게 나타난다. 과거의 연구에서 무연탄의 사용이 수은의 농도분포에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있다는 정황이 여러 차원에서 확인되었지만, 이처럼 일관성있게 상반된 경향성은 수은의 농도가 우리가 현 시점에서 고려하지 못하는 기타 요인들에 의해서도 영향을 받을 수 있다는 가능성을 여러 관점에서 시사한다.

계절별 농도변화의 양상

Fig. 2에는 전체 측정기간 중 관측된 수은 및 동시

에 관측된 관련 변수의 자료를 월별 및 계절대별로 분류하여 제시하였다. 이미 앞에서 보다 짧은 주기의 일주기대에 대한 경향분석에서 어느 정도 나타난 바와 같이, 양 지점의 계절별 경향성에서도 어느 정도 차이가 발견된다. 단순히 계절별로 구분한 자료군에서 평균농도의 크기를 비교할 경우, 다음과 같이 요약할 수 있다. 우선 I 기간대에는 “겨울 > 가을 > 여름 > 봄”의 순으로 감소하는 것으로 나타났다. 계절간 농도는 대체로 뚜렷한 차이를 보여 주었다. 특히 일반적으로 예측할 수 있다시피, 연료의 소모가 집중되는 가을, 겨울을 거치며 농도가 증가하는 경향이 뚜렷하다. 이와 같은 겨울철의 고농도는 특히 12월과 1월이라는 2개월 기간에 집중적으로 증가한 농도에 따른 결과란 것을 확인할 수 있다. 반면 II 기간대에는 “겨울 > 여름 > 가을 > 봄”의 순서로 평균농도의 서열이 정해졌다. 그러나 이 기간의 계절별 농도는 거의 5ngm^{-3} 를 약하게 상회할 정도로 계절적인 농도차이의 수준이 대단히 미미하다. 그런데 II 기간의 자료를 보다 시간간격을 줄여서, 월별단위로 그 경향성을 비교해 보면, 계절적인 농도분포간에도 어느 정도 차이가 존재할 수 있음을 알 수 있다. 특히 이 기간중 9, 10, 11월의 가을철 동안에는 농도변화가 상당히 큰 폭으로 진행되었음이 확인된다. 양 기간대의 결과를 포괄적으로 비교해 보면, 양측 모두 겨울철에 고농도의 경향이 가장 강하다는 것을 알 수 있다. 그러나 내면적으로는 이러한 경향에 큰 차이가 존재한다는 것을 짚고 넘어 갈 필요가 있다. 전자의 경우, 석탄연료의 사용이 확실하게 주도적인 발생원의 역할을 하였기 때문에, 이들의 사용이 집중되는 기간과 그렇지 않은 기간의 차이가 확연하게 나타난 것으로 보인다. 반면 후자의 경우, 상대적으로 농도의 변화를 야기할 수 있는 발생원의 역할이 계절적으로 거의 큰 변화가 없거나 또는 그러한 차이가 있어도 구분하기 어려울 정도로 그 차이는 뚜렷하지 않은 것으로 보인다.

실제 양 기간 중 관측된 자료로부터 계절별 농도분포의 차이를 설명하기 위한 한 가지 방편으로, 계절별로 분류된 자료군의 빈도경향을 비교하는 것도 의미가 있을 것으로 보인다. 수은의 계절별 농도분포를 보다 자세히 이해하기 위해, 양 기간의 농도자료를 이용하여 발생빈도를 계절별로 비교해 보았다. II 기간대의 경우, 모두 봄, 여름, 겨울철에 $4\sim 6\text{ngm}^{-3}$ 대의 영역에서, 발현빈도가 가장 높게 나타났지만,

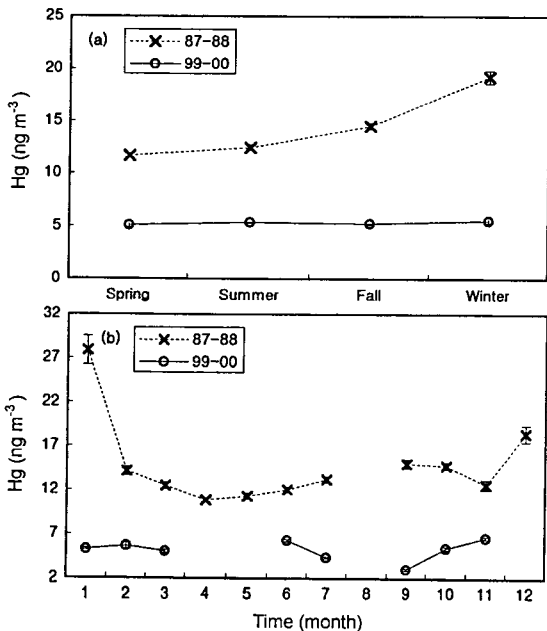


Fig. 2. Comparison of temporal distribution patterns of Hg in terms of (a) seasonal and (b) monthly basis.

가을철에는 상대적으로 낮은 2~4ngm⁻³의 낮은 농도대에서 피크가 나타났다. 이처럼 II 기간대의 농도변화는 빈도의 피크를 이루는 농도대의 변화가 미미하다는 것을 알 수 있다. 반면 I 기간대의 경우, 빈도분포의 경향이 봄, 여름에는 8~10, 가을에는 15~20, 겨울에는 20~30ngm⁻³대에서 최고빈도를 보이는 것과 같이 대단히 동적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

수은의 시간적 농도변화를 조절하는 요인들

본 연구에서 1년여 기간동안 관측한 수은의 농도 자료를 이용하여 수은의 농도분포를 비교하고 해석하였다. 이러한 농도자료가 지닌 의미를 보다 통계적인 관점에서 설명하기 위해, 수은의 농도가 어떤 요인들에 조절받고 있는 가를 해석하는 것도 중요한 의미를 지닐 것으로 보인다. 통계적인 의미를 부여하기 위해, 전체 관측자료를 중심으로 그리고 이들을 다시

계절별로 구분한 자료군을 이용하여, 상관분석과 요인분석을 수행하였다. 상관분석의 결과는 Table 3에 제시하였다. 표에는 계절별로 그리고 주야별로 구분한 자료군을 이용하여, 각 자료군에 대해 개별적으로 수행한 상관분석의 결과를 제시하였다. 양 기간대의 상관분석결과는 현격한 차이를 보여 주고 있다. 과거 시점의 경우, 수은의 농도가 일부 오염인자와 강한 상관성을 띠는 것이 현격하게 나타났다. 예를 들어, 수은, CH₄, NMHC, THC, CO, PM 10 등 탄소나 먼지류와 강한 상관성을 취하는 것으로 나타났다. 그리고 과거시점의 자료를 보면, 특히 밤과 낮시간대에도 상당 수준의 차이가 발견된다. 낮에는 여름철 기간동안 탄소류와 밀접한 관계를 유지할 수 있다는 가능성을 보여준데 반해, 밤 기간대에는 상당 수 많은 여타 오염물질들과도 밀접한 상관관계를 보여 주고 있다. 이에 반해 오늘날 시점의 자료를 보면, 계절이나 주야간대라는 시간의 틀에 큰 상관없이 거의 유사한

Table 3. Results of correlation analysis between Hg concentrations and relevant environmental parameters: comparison of late 80s and 90s.

	All data	Spring	Summer	Fall	Winter	All day	Spring	Summer	Fall	Winter	All night	Spring	Summer	Fall	Winter
	Hannam 87-88 data					Hannam day					Hannam night				
Temp.	-0.09	0.03	0.17	0.04	0.14	-0.10	0.09	0.22	0.10	-0.15	-0.10	-0.10	-0.01	-0.10	0.46
UV	-0.02	0.41	0.06	0.04	-0.36	0.02	0.38	0.07	0.04	-0.41	-0.14	-	-	-	-
RH	0.02	-0.14	-0.06	0.05	0.09	-0.03	-0.18	-0.06	0.11	-0.12	0.11	-0.08	-0.01	-0.01	0.42
Wspeed	-0.13	-0.17	-0.08	-0.22	-0.12	-0.12	-0.21	-0.15	-0.16	-0.14	-0.18	-0.13	0.01	-0.31	-0.16
SO ₂	0.14	0.23	0.16	0.08	0.21	0.07	0.33	0.09	0.02	0.31	0.18	0.13	0.28	0.16	0.14
NO	0.33	0.17	0.04	0.37	0.36	0.17	0.11	-0.09	0.25	0.13	0.56	0.30	0.25	0.61	0.66
NO ₂	-0.05	-0.01	-0.09	0.16	-0.01	-0.04	-0.06	-0.21	0.20	0.16	-0.07	0.08	0.09	0.13	-0.22
NOX	0.29	0.13	0.01	0.37	0.35	0.14	0.06	-0.14	0.27	0.15	0.50	0.27	0.23	0.58	0.62
CH ₄	0.19	0.17	0.60	0.22	0.25	0.16	0.19	0.62	0.11	0.16	0.20	0.18	0.71	0.38	0.20
NMHC	0.28	0.23	0.78	0.12	0.53	0.02	0.05	0.67	-0.05	0.27	0.49	0.64	0.88	0.33	0.59
THC	0.31	0.24	0.68	0.21	0.53	0.11	0.14	0.66	0.04	0.27	0.48	0.42	0.80	0.44	0.59
O ₃	-0.08	-0.02	-0.03	-0.04	-0.09	-0.03	0.06	0.04	0.02	-0.06	-0.28	-0.27	-0.26	-0.30	-0.32
CO	0.40	0.40	0.12	0.35	0.40	0.20	0.21	-0.01	0.19	0.13	0.67	0.67	0.33	0.66	0.78
PM10	0.27	0.16	0.34	0.30	0.32	0.19	0.05	0.20	0.21	0.21	0.38	0.34	0.48	0.44	0.46
	Hannam 99-00 data					Hannam day					Hannam night				
Temp.	0.01	0.47	0.25	-0.37	0.08	0.05	0.44	0.38	-0.36	0.11	0.02	0.64	0.30	-0.36	0.11
UV	-0.03	-0.07	-0.12	-0.11	-0.05	-0.01	-0.08	-0.11	-0.09	-0.08	-	-	-	-	-
RH	0.10	0.40	0.09	0.01	0.15	0.08	0.40	0.01	-0.11	0.35	0.12	0.40	0.13	0.08	0.13
Wspeed	-0.25	-0.42	-0.05	-0.30	-0.26	-0.25	-0.45	0.06	-0.18	-0.54	-0.27	-0.45	-0.15	-0.40	-0.24
SO ₂	0.39	0.76	0.65	0.70	0.21	0.62	0.75	0.83	0.70	0.54	0.32	0.78	0.46	0.73	0.20
NO	0.38	0.57	0.58	0.64	0.28	0.51	0.50	0.62	0.60	0.54	0.34	0.61	0.55	0.67	0.29
NO ₂	0.38	0.75	0.69	0.63	0.31	0.61	0.73	0.82	0.63	0.65	0.32	0.77	0.57	0.66	0.30
NOX	0.43	0.66	0.72	0.69	0.30	0.67	0.61	0.84	0.67	0.60	0.36	0.69	0.59	0.70	0.31
CH ₄	0.24	0.37	-0.10	0.68	0.23	0.30	0.38	-0.21	0.66	0.40	0.23	0.36	-0.06	0.70	0.25
NMHC	0.37	0.69	0.48	0.78	0.14	0.57	0.72	0.53	0.74	0.39	0.32	0.66	0.45	0.81	0.13
THC	0.37	0.61	0.06	0.79	0.23	0.53	0.64	0.00	0.76	0.51	0.33	0.60	0.06	0.82	0.22
O ₃	-0.14	-0.38	-0.16	-0.36	-0.21	-0.08	-0.35	-0.04	-0.26	-0.49	-0.23	-0.48	-0.36	-0.48	-0.18
CO	0.39	0.76	0.73	0.56	0.33	0.57	0.76	0.84	0.58	0.64	0.34	0.76	0.61	0.59	0.36
PM10	0.71	0.60	0.68	-	-	0.74	0.65	0.75	-	-	0.70	0.57	0.66	-	-

수준으로 뚜렷한 경향성을 보여 주었다. 특히 1980년 대 말에 제한된 성분들과 강한 상관성을 보여 주었던 과거 시점의 결과와는 극명한 차이를 보여 준다. 특히 계절별 또는 주야별 차이없이 대부분의 화학오염물과 강한 상관관계의 짝들을 형성하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 양기간대별 상관분석의 결과에 대한 차이에 대한 원인의 일부는 다음과 같은 관점에서 설명하는 것도 가능할 것으로 보인다. 예를 들어, 1980년대말에는 주로 무연탄과 같은 거의 독점적인 발생원의 기능이 무척 큰 요인으로 작용하였다.

오늘날에도 특정한 한 개 또는 두 개 정도 발생원의 역할이 여전히 중요할 수 있겠지만, 본 연구에서 발견된 여러 가지 정황에 따르면, 수은의 농도는 전반적으로 대기질 저하를 유도하는 주요인 (기준성 오염물질 외) 들에 의해 조절되는 것으로 보인다.

이러한 경향성을 보다 세부적으로 이해하기 위해서는 수은의 농도를 결정짓는 발생원별 기여도를 추정해 보는 것이 의미있을 듯 하다. Table 4에 제시된 바와 같이 요인분석을 통해 발생원별 기여도를 추정할 수 있다. 양 기간대를 중심으로 행해진 요인분석

Table 4. Results of varimax rotated factor analysis of Hg and relevant parameters determined from Hannam. Analysis was made using both all data sets and diurnally divided data groups.

	All data				Comm.	Daytime				Comm.	Nighttime				Comm.
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
1. Hannam 1987 ~ 1988															
Hg	0.58	0.55	0.22		0.70		0.40		0.72	0.67	0.74	0.37	-0.21		0.74
Temp.	0.30	-0.70	0.51		0.84	-0.91			0.17	0.87	0.11	-0.88			0.81
UV		-0.16	0.81		0.69	-0.65	-0.18	-0.16	0.26	0.54	0.20		0.55	-0.37	0.48
RH	0.30	0.12	-0.65	0.11	0.54	0.43	0.36	0.29	-0.19	0.44		0.18	0.14	0.76	0.64
WS	-0.50		0.13		0.28			-0.30	-0.64	0.51	-0.26	0.19		-0.74	0.66
SO ₂		0.62	-0.19		0.43	0.63	0.18		0.15	0.45	0.16	0.62		0.16	0.44
NO	0.80	0.37	-0.14	0.21	0.85	0.23	0.89	0.17	0.17	0.90	0.90	0.14	0.25		0.89
NO ₂	0.46	-0.59	0.21	0.30	0.69	-0.65	0.49	0.21	-0.18	0.75	0.23	-0.72	0.35	0.15	0.72
NOX	0.87	0.18		0.28	0.87		0.94	0.22		0.94	0.89		0.32	0.13	0.92
CH ₄	0.15		-0.11	0.91	0.87		0.18	0.89		0.83			0.80	0.22	0.69
NMHC	0.21	0.80	-0.24	0.27	0.82	0.67	0.19	0.31	0.17	0.61	0.44	0.79	0.25	0.16	0.91
THC	0.24	0.61	-0.24	0.68	0.95	0.49	0.24	0.78	0.17	0.93	0.38	0.64	0.56	0.23	0.93
O ₃	-0.10	-0.23	0.76	-0.13	0.65	-0.64	-0.24	-0.18	0.39	0.65	-0.22	-0.35	-0.25	-0.41	0.39
CO	0.49	0.75			0.82	0.57	0.58		0.32	0.76	0.70	0.55		0.10	0.81
PM10	0.81		-0.18	0.12	0.70	0.19	0.81	0.11	0.17	0.73	0.75	-0.23	0.19	0.28	0.74
Eigenvalues	3.41	3.39	2.24	1.65		3.78	3.44	1.87	1.50		3.80	3.44	1.80	1.73	
CV (%)*	22.8	45.3	60.3	71.3		25.2	48.2	60.6	70.6		25.3	48.3	60.2	71.7	
2. Hannam 1999 ~ 2000															
Hg	0.76	0.42	-0.18		0.79	0.82	-0.26	0.30		0.83	0.71	0.45	0.26		0.77
Temp.	0.22	0.92	0.11		0.90	0.26	-0.89	0.25		0.93	0.19	0.90	0.18		0.88
UV	0.04	0.30	0.72		0.61		-0.54	-0.40		0.45	-	-	-		-
RH	0.25	0.47	-0.64		0.69	0.25	-0.17	0.80		0.74	0.23	0.59	0.45		0.60
WS	-0.21	-0.30	0.75		0.69	-0.24		-0.80		0.70	-0.15	-0.28	-0.85		0.81
SO ₂	0.74	-0.21	0.14		0.61	0.73	0.24	-0.22		0.64	0.77	-0.16	-0.11		0.64
NO	0.75	-0.32	-0.29		0.75	0.59	0.58	0.28		0.76	0.81	-0.20	0.31		0.78
NO ₂	0.82	0.32	-0.11		0.78	0.85	-0.22	0.22		0.82	0.84	0.26	0.18		0.81
NOX	0.91	-0.02	-0.24		0.89	0.87	0.21	0.30		0.90	0.90		0.28		0.89
CH ₄	0.12	-0.96	0.00		0.93		0.91	-0.32		0.94	0.15	-0.94			0.91
NMHC	0.78	-0.30	-0.01		0.70	0.68	0.48			0.70	0.83	-0.14			0.71
THC	0.37	-0.90	-0.01		0.94	0.25	0.90	-0.28		0.95	0.43	-0.86			0.92
O ₃	-0.19	0.47	0.68		0.72		-0.69	-0.42		0.66	-0.45	0.45	-0.57		0.73
CO	0.92	-0.01	-0.27		0.92	0.87	0.27	0.29		0.91	0.89	0.10	0.35		0.93
PM10	0.69	0.55	-0.03		0.77	0.76	-0.37	0.24		0.78	0.64	0.66			0.85
Eigenvalues	5.47	4.00	2.22			5.09	4.23	2.37			5.68	3.86	1.69		
CV (%)*	36.5	63.1	77.9			34.0	62.2	77.9			40.6	68.2	80.3		

*denotes cumulative variance.

의 결과는 앞서 상관분석의 결과와 같이 양 기간대의 분포특성이 지닌 차이를 여러 관점에서 다시 확인시켜 준다. 1980년대 자료의 경우, 수은이 주요인으로 나타난 경우가 첫 번째로 질소산화물 등과 함께 하는 양식으로, 또는 SO₂나 NMHC 등과 밀접한 관계를 가진 것으로 판단된다. 특히 낮시간대에는 수은의 농도가 오존과 짝을 이루는 경향이 발견되기도 한다. 반면 1990년대 자료의 경우, 다수의 오염인자와 함께 단일한 주요인으로 발견되는 경향이 상대적으로 강하게 나타난다. 이러한 비교의 대부분은 앞서 언급한 바와 같이, 양 기간대의 발생원이 지닌 특성을 가장 구체적으로 설명하는 데 주요한 요인으로 간주할 수 있을 것으로 보는 것으로 생각된다.

결 론

여러 가지 시간적 및 공간적 규모로 진행되는 수은의 농도분포특성을 비교분석하기 위해, 서울시 한남동에 위치한 관측점으로부터 1980년대 말의 시점과 1990년대의 말의 시점에 약 12년의 간격을 두고 수은의 농도분석을 수행하였다. 본 연구자료를 이용하여 수은의 두 시기별 농도분포의 특성을 비교한 결과, 수은의 분포특성이 시기별로 다양한 양상을 취한다는 사실을 확인할 수 있었다. 일주기의 변화를 분석한 결과에 따르면, 양 기간대에는 현저한 차이가 존재하는 것이 확인되었다. 1980년대 말의 경우, 일관성있게 주저야고의 경향이 강하게 나타났는데 반해, 1990년대 말의 경우 그 반대로 주고야저의 경향이 강하였다. 이와 같은 원인의 일부는 과거 시점의 관측이 낮시간대에 전반적으로 고온, 고일사량의 조건이 충족되어 수은의 배출이 이루어지기에 유리한 조건이었던데 반해, 현 시점의 결과는 상대적으로 낮기 간대에 저온, 저일사량 등의 조건이 강해 배출의 빈도나 강도면에서 불리하였을 것으로 사료된다. 따라서 비록 양기간대 모두, 배출이 주도적으로 이루어졌다고 가정해도, 후자의 경우 그러한 경향이 쉽게 희석되었을 가능성을 강한 것으로 나타났다.

수은의 농도자료를 이용한 일반적인 주기별 경향성의 연구에 덧붙여, 통계적인 방식으로 수은의 농도변화에 영향을 미치는 주요 인자들의 관계를 분석해 보았다. 상대적으로 무연탄의 사용과 같은 단일 발생원의 역할이 중요하였을 것으로 간주되는 과거 시점에는 일부 제한적인 인자들과의 관계가 뚜렷한 것으

로 나타났다. 반면 오늘날의 경향성은 시간적 규모에 상관없이 대부분의 화학적 오염인자들과 강한 관계를 형성하는 것이 판명되었다. 이와 같은 연구결과에 의하면, 오늘날의 시점에는 특정한 발생원의 기능보다는 전반적으로 대기질의 저하를 유도하는 요인들이 고르게 수은의 발생원으로 작용하고 있으리라는 점을 강하게 시사하였다. 이와 같은 연구결과는 여러 가지 사실을 확인시켜준다. 시간적 규모로 진행되는 수은의 농도변화가 24시간 정도의(일주기와 같은) 짧은 주기의 시간적 관점에서 볼 때는 일사량과 같은 환경변수 또는 기상학적 요인 등에 민감하게 반응하고, 10여년의 긴 주기로 볼 때는 석탄의 사용량 변화와 같은 발생원(소멸원 등의 관계)에 민감하게 반응한다는 사실을 구체적으로 확인시켜주는 사례라고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었다(KRF-2000-015-DP0453).

참고문헌

- Carpi, A. and Lindberg, S.E., 1998, Application of a Teflon dynamic flux chamber for quantifying soil mercury flux: Tests and results over background soil. *Atmospheric Environment*, 32, 873-882.
- Ebinghaus, R., Jennings, S.G., Schroeder, W.H., Berg, T., Donaghy, T., Guentzel, J., Kenny, C., Kock, H.H., Kvietskus, K., Landing, W., Muhleck, T., Munthe, J., Prestbo, E.M., Schneeberger, D., Slemr, F., Sommar, J., Urba, A., Wallschlager, D., and Xiao, Z., 1999, International field intercomparison measurements of atmospheric mercury species at Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment*, 33, 3063-3073.
- Kim, K.-H. and Kim, M.-Y., 1996, Preliminary measurements of atmospheric mercury in mountainous regions of Korea. *Journal of Environmental Science and Health*, 31, 2023-2032.
- Kim, K.-H. and Kim, M.-Y., 1999, The exchange of gaseous mercury across soil-air interface in a residential area of Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*, 33, 3153-3165.
- Kim, K.-H. and Kim, M.-Y., 2000, The effects of anthropogenic sources on temporal distribution characteristics of total gaseous mercury in Korea. *Atmospheric Environment*, 34, 3337-3347.

- Kim, K.-H. and Kim, M.-Y., 2001a, Some insights into short-term variability of total gaseous mercury in urban air. *Atmospheric Environment*, 35(1), 49–59.
- Kim, K.-H. and Kim, M.-Y., 2001b, The temporal distribution characteristics of gaseous mercury from an urban monitoring site of Seoul during 1999 to 2000. *Atmospheric Environment* (in press).
- Kim, K.-H., Lindberg, S.E., and Meyers, T.P., 1995, Micrometeorological measurements of mercury vapor fluxes over background forest soils in eastern Tennessee. *Atmospheric Environment*, 29(2), 267–282.
- Lee, D.S., Dollard, G.J., and Pepler, S., 1998, Gas-phase mercury in the atmosphere of the United Kingdom. *Atmospheric Environment*, 32, 855–864.
- Lee, Y.H., Bishop, K.H., and Munthe, J., 2000, Do concepts about catchment cycling of methylmercury and mercury in boreal catchments stand the test of time? Six years of atmospheric inputs and runoff export at Svartberget, northern Sweden, *The Science of the Total Environment*, 260, 11–20.
- Lindqvist, O., Johansson, M., and Aastrup, A. *et al.*, 1991, Mercury in the Swedish environment - recent research on causes, consequences, and corrective methods. *Water, Air and Soil Pollution*, 55, 1–262.
- Pacyna, J.M., 1998, Emission inventories of atmospheric mercury from anthropogenic sources. In Baeyens, W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O., eds. *Global and regional mercury cycles: sources, fluxes and mass balances*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 161–177.
- Schroeder, W.H. and Munthe, J., 1998, Atmospheric mercury - an overview. *Atmospheric Environment*, 32, 809–822.
- Slemr, F. and Langer, E., 1992, Increase in global atmospheric concentrations of mercury inferred from measurements over the Atlantic Ocean. *Nature*, 355, 434–436.
- Tan, H., He, J.L., Liang, L., Lazoff, S., Sommer, J., Xiao, Z.F., and Lindqvist, O., 2000, Atmospheric mercury deposition in Guizhou, China. *The Science of the Total Environment*, 259, 223–230.

2001년 3월 5일 원고 접수
 2001년 5월 16일 수정원고 접수
 2001년 6월 9일 원고 채택