

서울시 한남동과 경기도 과천시 지역을 중심으로 한 대기 중 수은의 분포특성 연구

김기현^{1,*} · 김민영²

세종대학교 지구과학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 98
서울시 보건환경연구원 환경연구실, 137-130 서울시 서초구 양재동 202-3

Distribution Characteristics of Atmospheric Mercury from Two Monitoring Stations: Inside and Outside of Seoul Metropolitan City, Korea

Ki-Hyun Kim¹ · Min-Young Kim²

¹Department of Earth Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

²Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-130, Korea

Abstract: The concentration of gaseous mercury (Hg) was measured at hourly intervals along with relevant environmental parameters from two monitoring stations (Hannam and Kwachun) in Seoul metropolitan city during September 1999 to July 2000. Irrespective of the environmental and areal differences in the two locations, the concentrations of observed Hg levels were remarkably compatible each other. The results showed that the mean Hg level in Hannam was measured to be $5.34 \pm 3.92 \text{ ngm}^{-3}$ ($N=2576$), while that of Kwachun was $5.25 \pm 2.53 \text{ ngm}^{-3}$ ($N=1992$). Using these measurement data, we inspected Hg distribution and behavior at various time scale. When the data were analyzed at 24 hr scale, the distribution patterns for the two areas were distinguished by enrichment in either night (Hannam) or day (Kwachun). The patterns for seasonal distributions were also opposing each other such as the occurrences of peak during winter (Hannam) or summer (Kwachun). In order to analyze the factors affecting Hg distributions between two sites over different time scale, we conducted both correlation and factor analysis on both all data sets and on seasonally divided data groups. Whereas Hg exhibits strong correlations with such parameters as PM (particulate matter), SO_2 , and NO_2 , its relationship with meteorological parameters was not significant enough in many cases. The results of factor analysis also indicated that the Hg levels are tightly associated with most pollutants, explaining the largest portions of statistical variance. According to our study, we conclude that patterns of Hg distributions can exhibit variable patterns depending on local source processes which we expect to be diverse among different areas.

Key words: seasonal distribution, source processes, gaseous mercury, statistical variance

요약: 1999년 9월부터 2000년 7월까지 서울시 한남동과 경기도 과천시 두 지역을 중심으로 대기 중 수은의 농도를 시간대 별로 관측하였다. 두 지역의 여러 가지 여건 차이에도 불구하고, 양 지역의 농도는 각각 $5.34(N=2576)$, $5.25\text{ngm}^{-3}(N=1992)$ 를 기록하였다. 본 자료를 이용하여 양 지역의 농도 분포 특성을 비교하였다. 24시간 주기로 볼 때, 한남동 지역은 야간대에 그리고 과천 지역은 주간대에 높은 강도를 띠는 것으로 나타났다. 계절적으로는 한남동 지역에서 겨울 그리고 과천 지역에서는 여름에 최고농도를 기록하였다. 양 지역에서 수은의 농도를 조절하는 요인을 여러 가지 통계적 기법으로 고찰하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 연구 지역의 대기중의 수은 분포는 지역적 발생원의 차이에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어: 수은, 주기적, 인위적 배출원, 도심환경, 체류시간, 배출원의 흔적

서론

수은의 배출은 대개 석탄연료를 사용하는 발전시설

또는 쓰레기소각시설 등을 중심으로 이루어지는 것으로 보고된 바 있다(Pacyna, 1998). 이들 특정 배출원에 대한 관리가 비교적 잘 이루어지고 있는 구미지역의 경우, 배경대기환경을 중심으로 이루어진 다수의 연구결과들은 수은의 농도가 대개 $1 \sim 3\text{ngm}^{-3}$ 의

수준에서 균질한 분포특성을 유지하는 것으로 밝히고 있다(Slemr and Langer, 1992; Kim *et al.*, 1995; Lee *et al.*, 1998). 이러한 구미지역의 상황과 달리, 아시아지역의 경우 훨씬 다른 양상을 보여 주고 있다. 국내 주요 측정점들을 중심으로 이루어진 다수의 연구들은 도심 또는 산악지역을 막론하고 거의 유사한 수준의 농도인 $5ngm^{-3}$ 을 초과할 정도로 높은 수준의 농도가 지속되는 것으로 밝히고 있다(김민영·김기현, 2001). 이러한 선행연구들의 결과에 의하면, 특정한 배출원의 영향에 직접적으로 노출되기 쉬운 도심지역은 물론 비교적 청정한 조건을 유지할 것으로 기대되는 산악지역에서까지 거의 유사하게 높은 수준의 농도가 유지되는 것으로 파악되었다.

대기 중에 존재하는 수은은 주로 반응성이 약하고 화학적으로 안정된 원소성 수은의 형태로 존재한다. 이러한 화학적 특성으로 인해, 수은은 1년을 초과하는 상대적으로 긴 대기체류시간을 갖는다. 그러나 이들의 발생을 주도하는 여러 가지 배출원의 배출특성이 빠르게 변화하는 관계로 인해, 대략 수년 정도의 시간적 규모로 관측된 농도변화의 양상도 대단히 동적인 것으로 파악되고 있다(Schroeder and Munthe, 1998). 국내의 여러 관측점에서 발견된 수은의 농도변화도 이와 같은 수은의 배출특성 및 그로부터 유추된 농도분포의 특성과 잘 일치하는 것으로 보인다. 실제로 오늘날 발견되는 수은의 농도는 과거 80년대 말의 시점에 관측된 수은의 농도분포양상에 비하면, 훨씬 경감된 수준이라는 것을 알 수 있다(Kim and Kim, 2000). 서울 및 경기의 주요 관측점을 중심으로 1988년을 전후로 시도된 당시 시점의 관측결과에 따르면, 대부분의 도심관측점에서 $10ngm^{-3}$ 을 상회하는 고농도가 지속되었던 것으로 보고되었다. 이처럼 고농도가 지속되었던 것은 당 시점에 주로 사용되었던 석탄연료의 연소와 밀접한 관련이 있는 것으로 추정되고 있다.

앞서 밝힌 바와 같이 수은의 농도분포가 지닌 여러 가지 지화학적 의미를 도출하기 위한 가장 기본적인 방편으로, 농도분포의 시간적인 변화경향성을 정확하게 파악하는 것이 중요한 의미를 지닌다. 본 연구에서는 이미 과거 1980년대 말에 관측이 이루어졌던 주요 관측점에 속하는 한남과 과천지역을 중심으로 1999년 9월에서 2000년 7월까지의 기간동안 수은의 시간대별 농도분포를 수차례의 집중관측기간동안 연속분석하였다. 그리고 이와 같은 농도자료에 대

한 통계적 분석을 통해 수은의 농도를 조절하는 요인들에 대해 분석하였다. 본 연구를 통해 이루어진 관측결과는 과거시점에 고농도가 지속되었던 지점들에 대비한 현 시점의 농도변화양상을 구체적으로 파악할 수 있는 기회를 제시한다. 또한 본 연구는 여타 지역을 중심으로 이루어진 현 시점의 농도관측 결과들간의 상호비교를 수행할 수 있는 기준을 설정하고 제시한다는 의미가 있다.

연구 방법

본 연구진은 1999년 9월 17일부터 2000년 7월 25일까지 약 10여 개월의 기간에 걸쳐, 서울시 한남동과 과천시의 두 개 측정점을 중심으로 각각 7회씩 집중적으로 수은의 시간대별 농도를 측정하였다(Table 1). 수은의 농도관측이 이루어진 한남동 지역은 서울도심의 교통중심지역으로서의 의미를 갖고, 과천은 남서울공원등 휴양시설이 발달된 지역이다. 본 연구에서는 측정이 매 시간단위로 10여 개월에 걸친 장기간에 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 채취/분석은 건물의 3층에서 건물 밖으로 2m 정도 떨어진 유입관을 이용하여, 바깥쪽 외기 시료를 실내에 장착된 on-line 수은 분석시스템에 주입하여 분석하는 방식으로 이루어졌다. 수은의 분석과 관련된 세부적인 내용은 이미 본 연구진의 과거 연구에서 자세하게 제시한 바 있다(Kim and Kim, 1996, 1999, 2000, 2001).

수은의 농도는 Nippon Instrument Co.가 제작한 순간자동측정기 Mercury Analyzer, AM-2 모델을 이

Table 1. A timetable for intensive measurements of Hg concentrations from Hannam and Kwachun stations during 1999 through 2000.

Experiment No.	Hannam Station		Kwachun Station	
	Start	End	Start	End
1	99-9-17	99-9-29	99-10-1	99-10-11
2	99-10-27	99-11-19	99-11-19	99-11-20
3	00-1-17	00-2-10	99-11-27	99-12-6
4	00-2-16	00-2-26	99-12-11	99-12-31
5	00-3-2	00-3-14	00-1-1	00-1-17
6	00-6-9	00-6-26	00-5-24	00-6-7
7	00-7-10	00-7-25	00-6-26	00-7-10

용하여 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) 반불꽃형 원자흡광분석기(flameless atomic absorption method)에 의해 최종적으로 농도의 검출이 이루어졌다. AM-2를 이용한 시료채취 유량은 1.0l/min을 유지하였고, 시료 분석을 위한 운반기체는 수은성분의 유입을 차단하는 금속착트랩을 거쳐 기기외부의 건조한 공기를 유입하는 방식으로 사용하였다. 검출기로 유입된 수은은 253.7nm의 파장에서 약 1pg대의 절대검출한계를 보여주었다. 증기형 수은의 표준시료가 존재하지 않기 때문에, 측정의 정확도를 산출하기 위한 한 방법으로 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, 3ng대의 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).

결 과

본 연구에서 수은의 농도측정은 집중관측의 성격으로 연구개시일인 1999년 9월 17일부터 2000년 7월 25일까지 지속되었다. 위 기간중 한남과 과천지점에서 7회씩의 집중측정을 통해, 각각 2576개와 1992개의 관측자료가 확보되었다. 위에서 언급한 전체 실험 기간동안 양 지점에서 관측된 모든 시간별 자료를 이용하여, 산출한 일평균농도의 시간적 추이를 Fig. 1에 제시하였다. 수은의 농도분포와 동시에 관측된 관련 환경변수자료의 기본적인 통계량을 연도별로 분류한 결과를 Table 2에 제시하였다. 이 중에서도 특히 많은 관측이 이루어진 한남지역에서 수은의 관측과 동시간대에 이루어진 주요 기상인자들의 연도간 변화추이는 Table 2에서도 확인이 가능하다. 한남지역의 경우, 대체로 많은 관측이 여름(또는 그에 가까운 기온대)보다 겨울기간에 주로 이루어졌기 때문에 낮은 평균기온이 주를 이루는 경향이 24시간 주기에서도 발견이 된다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 주 풍향의 경우는 계절별로 다양하게 나타나는 편이다. 특히 봄, 여름에는 남서풍 계열이, 가을에는 북동풍이, 겨울에는 북서풍계열이 우세하였던 것으로 보인다.

한남지역의 경우, 전체 기간 중 수은은 $5.34 \pm 3.92 \text{ ngm}^{-3}$ 의 평균값을 보였고, 가장 낮은 농도인 0.56에

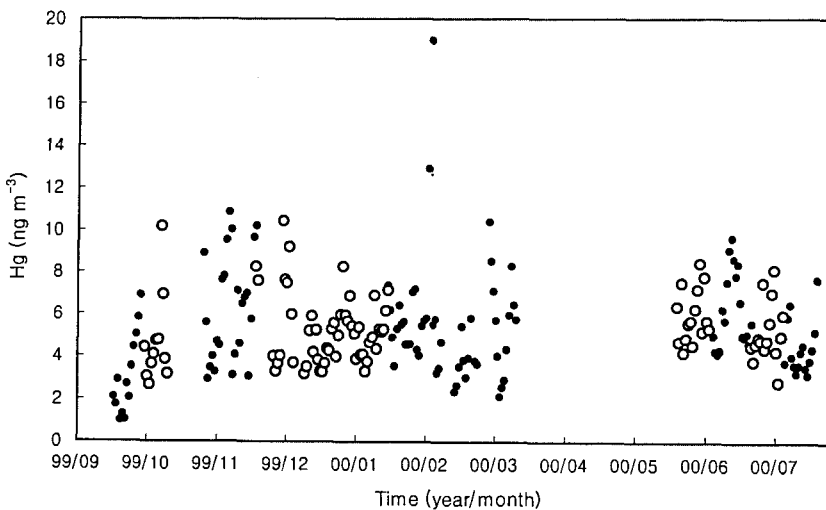


Fig. 1. A plot of long-term distribution patterns of Hg in Hannam and Kwachun district of Seoul, Korea. The daily mean concentrations of Hg were derived using hourly concentration data obtained for the whole measurement periods between January 1999 through determined August 2000. Filled and empty circles represent the data for Hannam and Kwachun, respectively.

Table 2. A statistical summary of elemental concentration data determined from Hannam and Kwachun during 1999 to 2000.

	All data	Annual		All data	Annual	
		1999	2000		1999	2000
		Hannam			Kwachun	
Hg (ng m ⁻³)	5.34±3.92 (N = 2576) R = 0.56 ~ 80.1	5.23±3.12 (N = 850)	5.39±4.26 (N = 1726) R = 1.04 ~ 80.1	5.25±2.53 (N = 1992) R = 1.72 ~ 44.1	5.18±3.00 (N = 943) R = 1.72 ~ 44.1	5.32±2.03 (N = 1049) R = 1.93 ~ 17.2
Temp. (°C)	8.45±9.15 (N = 6707)	8.24±8.11 (N = 2320)	8.55±9.65 (N = 4387)	19.1±7.52 (N=3450)	4.86±0.41 (N = 169)	19.8±6.97 (N = 3281)
UV (MJ m ⁻²)	18.2±32.3 (N = 6895)	12.4±19.1 (N = 2517)	21.5±37.4 (N = 4378)	-	-	-
RH (%)	66.6±19.8 (N = 6899)	71.9±17.8 (N = 2512)	63.6±20.2 (N = 4387)	-	-	-
Wspeed (m s ⁻¹)	1.18±0.84 (N = 6891)	0.97±0.74 (N = 2516)	1.30±0.87 (N = 4375)	1.41±1.33 (N = 5545)	0.56±0.37 (N = 1725)	1.79±1.43 (N = 3820)
SO ₂ (ppb)	6.28±2.90 (N = 6762)	5.37±2.48 (N = 2483)	6.81±2.99 (N = 4279)	7.57±3.54 (N = 6094)	6.05±3.28 (N = 2079)	8.36±3.41 (N = 4015)
NO (ppb)	43.3±48.4 (N = 6734)	64.4±60.4 (N = 2436)	31.3±34.7 (N = 4298)	45.2±71.2 (N = 6098)	62.1±62.5 (N = 2079)	36.4±73.7 (N = 4019)
NO ₂ (ppb)	41.3±21.2 (N = 6734)	42.2±17.2 (N = 2436)	40.7±23.1 (N = 4298)	32.9±16.0 (N = 6098)	35.0±15.8 (N = 2079)	31.8±16.0 (N = 4019)
NOX (ppb)	84.5±62.1 (N = 6734)	107±73.2 (N = 2436)	72.0±50.8 (N = 4298)	78.1±77.7 (N = 6098)	97.1±74.1 (N = 2079)	68.3±77.8 (N = 4019)
CH ₄ (ppm)	2.31±0.39 (N = 6077)	2.37±0.33 (N = 2379)	2.27±0.42 (N = 3698)	-	-	-
NMHC (ppm)	0.61±0.48 (N = 6077)	0.84±0.55 (N = 2379)	0.47±0.35 (N = 3698)	-	-	-
THC (ppm)	2.92±0.73 (N = 6077)	3.21±0.78 (N = 2379)	2.74±0.63 (N = 3698)	-	-	-
O ₃ (ppb)	15.8±14.8 (N = 6801)	8.89±9.21 (N = 2503)	19.8±16.0 (N = 4298)	20.6±20.4 (N = 5110)	12.5±11.1 (N = 1883)	25.4±22.9 (N = 3227)
CO (ppm)	1.15±0.67 (N = 6589)	1.29±0.84 (N = 2291)	1.07±0.54 (N = 4298)	0.71±0.57 (N = 5754)	1.09±0.69 (N = 2078)	0.49±0.33 (N = 3676)
PM10 (µg m ⁻³)	65.6±47.9 (N = 2492)	-	65.6±47.9 (N = 2492)	-	-	-

서 가장 높은 80.1ngm⁻³의 범위까지 약 100배 이상 (2 orders of magnitude)의 농도범위를 보였다. 과천 지역의 경우, 5.25±2.53ngm⁻³의 농도로 한남과 유사한 평균값이 발견되었으나, 농도범위는 1.72~44.1ngm⁻³로 상대적으로 좁게 나타났다. 연도별 농도는 양지역에서 모두 2000년도의 결과가 경미하게 높은 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 결과는 주로 1999년의 자료가 가을기간에 집중되고 있어, 정확하게 연도별 경향성을 분류할 수 있는 기준으로 보기에는 곤란하다. 수은자료의 농도분포에 대한 자세한 정보는 Fig. 3의 빈도분포를 이용하여서도 어느 정도 파악할 수 있다. Fig. 3a에 제시된 바와 같이 한남지역은 주로 2~4(32.7%) 그리고 과천은 4~6ngm⁻³(41.7%)의 영역에서 가장 발생빈도가 높다는 것을 알 수 있다. 양

지역 모두 2~6ngm⁻³ 영역에서 전체 자료의 64~74%의 자료가 집중되어 있지만, 특이한 사실은 고농도를 띠는 자료의 수도(절대적인 관점에서) 상당 규모에 달한다는 점이다. 실제로 이러한 부분을 구체적으로 확인하기 위해, Fig. 3b에 단순히 10ngm⁻³을 초과하는 모든 자료만을 비교해 보았다. 이러한 고농도는 양지역에서 각각 5.2와 3.6%를 차지할 정도로 일정한 부분을 차지하였다. 특히 양제지역의 경우, 50ngm⁻³을 초과하며 최대값인 80.1ngm⁻³까지의 영역에서 발견되는 고농도가 총 5회에 걸쳐 확인되었다. 반면 과천지역의 경우, 앞에서 언급한 바와 같이 고농도의 크기가 상대적으로 좁은 범위대에서 발견되었다. 실제로 이와 같은 고농도치의 발견에 대한 자료처리는 어느 정도 주의를 요한다. 실제로 과거에 발표된 연구들은

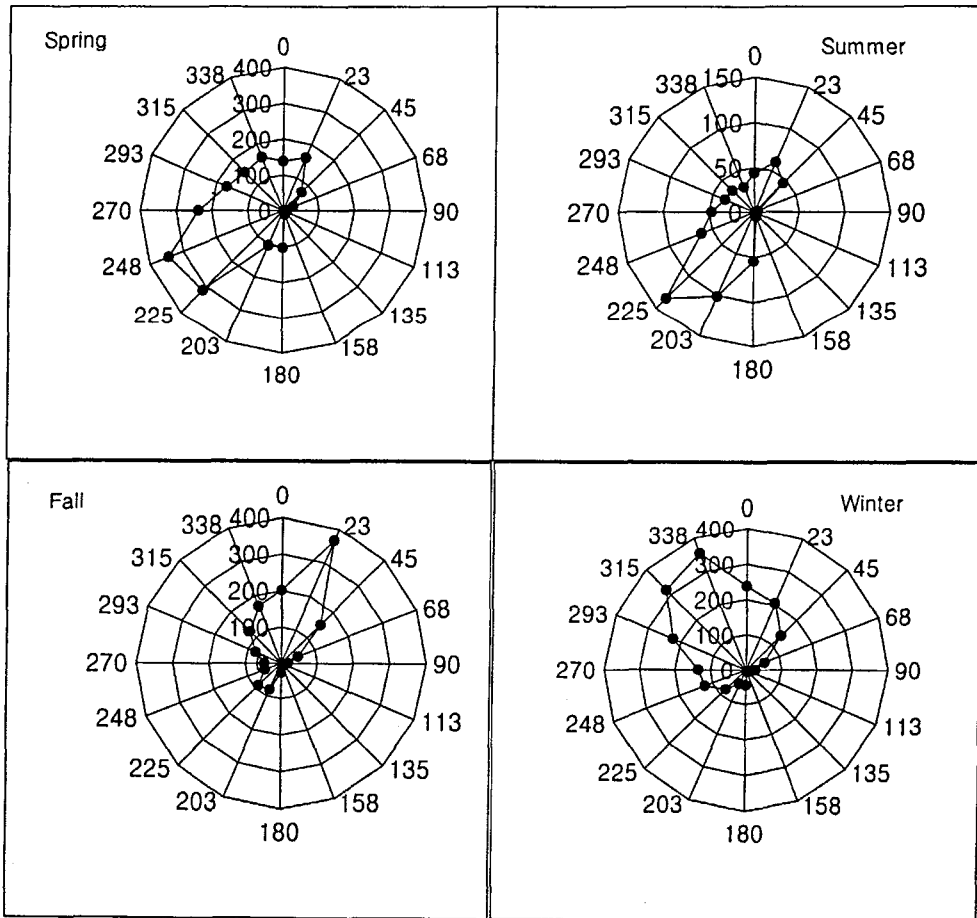


Fig. 2. Seasonal variability of windrose pattern at Han Nam monitoring site.

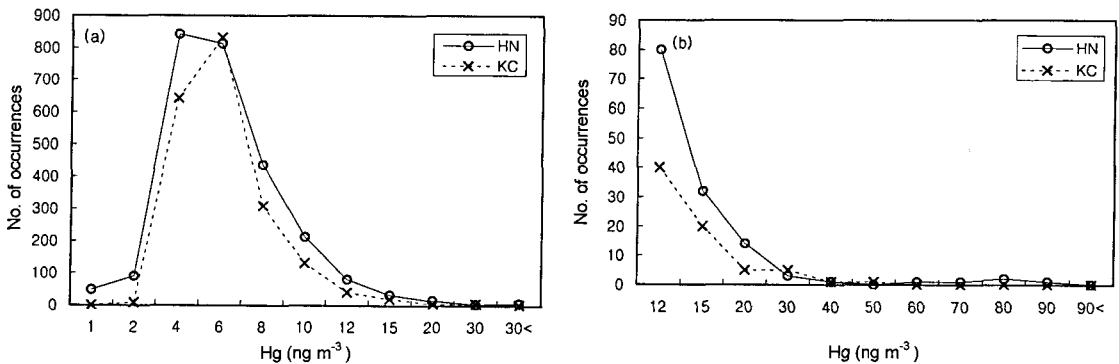


Fig. 3. Plots of frequency distribution patterns for Hg determined from Han Nam and Kwa Chun. (a) the upper figure shows the Hg concentration in the whole range of measurements; and (b) the lower figure focuses only on the Hg concentration in the upper bound range such as above 10 ng m^{-3} .

자료해석의 편의상 전체적인 농도분포경향으로부터 상당히 왜곡된 자료를 이상치(outlier: OL)로 간주하여 자료해석에서 배제하는 경우도 드물지 않았다

(e.g., Kim *et al.*, 1995; Kim and Kim, 1999). 그러나 본 연구에서는 Fig. 3의 빈도분포에서 나타난 것처럼 이들 일부 고농도의 존재가 일관성이 있고 또

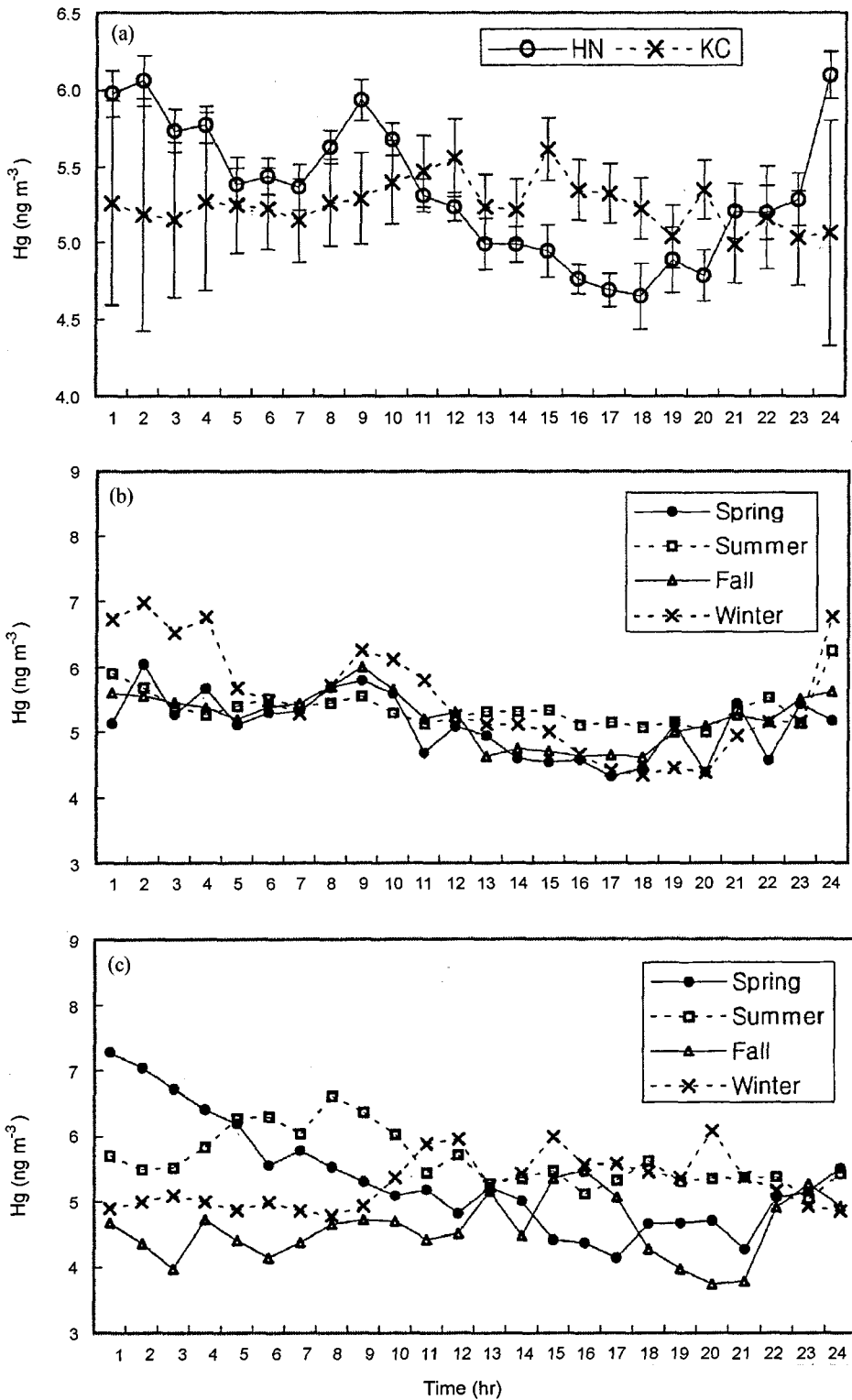


Fig. 4. Comparison of diurnal distribution patterns at varying intervals. Cases are compared using all data (a) or seasonally divided data groups (both b and c). Figures b and c represent Hannam and Kwachun site, respectively.

한 이들이 전체 자료의 상당 부분을 차지한다는 근거에 준하여, 모든 자료를 대상으로 자료의 경향성을 해석하고자 하였다.

토 론

주야간대를 주기로 한 단주기 농도변화

Fig. 4a에는 전체 측정기간 중 관측이 된 수은의 농도자료를 이용하여 이들의 일주기 경향성을 비교분석하였다. 전체 자료를 분석한 결과에 따르면 양 지역의 농도분포 경향성에는 어느 정도 차이가 발견된다. 한남동 지역의 경우, 오전 9시경에 뚜렷한 피크가 나타나는 것을 제외하고는 대체로 주저야고의 형태를 보였다. 한남동 지역에서 발견되는 오전시간대의 피크 형성현상은 Fig. 4b에 제시한 바와 같이 모든 계절별로도 일관성있는 것으로 판명되었다. 반면 과천의 경우, 다른 계절에 비해 상대적으로 예외적인 경향으로 보이는 봄철 기간을 제외하고는 대체로 주간대의 농도가 야간대에 비해 약간 높은 것과 같이 나타났다. Fig. 4c에 나타난 것처럼 24시간 주기의 변화는 계절별로 상당히 불규칙한 양상을 보인다는 것을 알 수 있다. 그리고 한남지역에서는 최저와 최고농도간의 차이도 2ngm^{-3} 를 초과할 정도로 차이가 크게 나타났지만, 과천지역에서는 봄철에 상당히 큰 차이가 나는 경우를 제외하고는 그런 경향을 파악하기에는 곤란할 정도로 경향이 복잡하게 나타났다. 이처럼 복잡한 일주기 경향성을 단순하게 비교하기 위해, Fig. 5에는 계절별로 분류한 자료를 다시 주야간의 차이만을 확인하기 쉽게 주야간대별로 분류해 보았다. 이와 같은 비교에 따르면, 양 지역간에는 여전히 큰 차이가 나타난다. 한남동 지역은 구조적으로 4 계절 모두 야간대의 농도가 높다는 것이 뚜렷하고, 과천지역은 봄철을 제외하고는 완전히 반대의 경향이 지배적이라는 것을 알 수 있다. 따라서 양 지역에서 발견되는 수은의 분포특성은 전체적으로 유사한 농도대를 유지한다는 점에도 불구하고, 미시적으로는 대단히 뚜렷한 차이가 존재한다는 것을 알 수 있다. 특히 전체적으로 양지역 모두 유사한 농도분포가 유지되는 현상은 수은의 공간적 혼합이 균질하게 이루어져 있다는 가능성을 시사하지만, 부분적으로 시간적 경향성에서 차이가 나타나는 것은 지역별 생성원의 차이 등이 다른데 따른 결과로 볼 수 있을 듯 하다.

이미 과거에 이루어진 많은 연구의 결과들은 수은

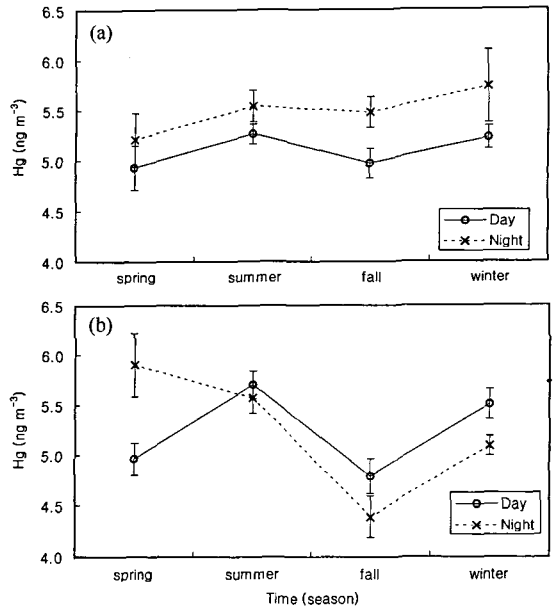


Fig. 5. Comparison of day-night distribution patterns of Hg from both monitoring sites: (a) Hannam area and (b) Kwachun area.

이 다양한 일주기의 경향성을 보일 수 있다는 사실을 확인시켜 주었다. 영국의 시골지역을 중심으로 장기적인 관측을 수행한 Lee *et al.*(1998)의 결과는 여름철이나 겨울철 모두 주저야고의 경향이 뚜렷하다는 것을 보여 주었다. 반면 양재 지역을 중심으로 가을(1997년)과 여름(1998년)의 관측을 수행한 Kim and Kim(2001)의 선행연구는, 가을철에는 주고야저가 강한데 반해, 여름철에는 그와 반대로 주저야고의 경향이 강하다는 것을 확인한 바 있다. 인위적인 배출원의 영향이 미미한 곳에서 관측을 수행한, Lee *et al.*은 대체로 주저야고의 경향을 역전층의 형성과 그에 따른 영향으로 결부지은 바 있다. 예를 들어, 지표면은 수은의 배출원으로 작용하고 배출은 주간대에 활발하게 이루어지지만, 야간대에 형성되는 역전층의 영향으로 인해 수직적 방향의 공기흐름이 정체되면, 상대적으로 야간대에 고농도가 지속되는 것으로 설명하였다. 따라서 낮시간대에 고농도가 나타나는 현상은 다음과 같은 조건에서 가능할 것이다. 예를 들어, 낮시간대에 활발하게 수은의 배출이 이루어진 상태에서, 이를 유지할 수 있게 야간대에 역전층이 형성되지 않거나 또는 그 영향이 상대적으로 미미할 경우, 정반대의 경향을 보일 수 있는 것으로 보인다(Lee *et al.*, 1998). 따라서 본 연구에서 관측된 한남과 과천

의 결과는 과거의 연구들에서 발견한 수은의 일주기 분포특성을 모두 반영하는 것으로 보인다. 특히 양 지역에서의 관측이 거의 유사한 기간대에 이루어졌다는 점을 감안하면, 수은의 일주기 분포는 수은의 자체적인 배출특성, 기상학적 요인, 관측대상지역의 지형학적 또는 환경학적인 특성 등과 복합적으로 어우러져 결정되는 것으로 보인다. 특히 본 연구에서 한 가지 주목할 점은 과거 및 최근까지 수은농도관측이 이루어진 국내 주요 측정점, 양재 지역의 자료와 뚜렷하게 구분되는 경향이 존재한다는 부분을 들 수 있다. Kim and Kim(submitted) 등의 연구결과에 의하면, 최근까지도 양재동과 같은 주거지역에서는 수은의 주 배출원인연료사용이 집중되는 겨울철 야간대에 고농도가 일관성있게 나타나는 것을 확인한 바 있다. 물론 이러한 겨울철 야간대의 특이한 경향은

(수은의 주요 배출원으로 간주되는) 무연탄이 주된 난방연료로 사용되던 1980년대 말의 시점에 한남을 위시한 서울의 여러 지역에서 광범위하게 나타난 경향이기도 하다.

계절별 농도변화의 양상

Table 3과 Fig. 6에는 전체 측정기간 중 관측된 수은 및 관련변수자료를 월별 및 계절대별로 분류하여 제시하였다. 이미 앞에서 계절별 및 일주기별로 구분한 경향분석에서 어느 정도 나타난 바와 같이, 양 지점의 계절별 경향성은 상당히 차이가 나타난다. 단순히 계절별로 구분한 자료군의 평균농도크기를 비교할 경우, 다음과 같이 요약할 수 있다. 우선 한남에서는 “겨울 > 여름 > 가을 > 봄”의 순서로 평균농도의 서열이 나타난 데 반해, 과천의 경우 “여름 > 봄 > 겨울 > 가을”의

Table 3. A statistical summary (mean) of elemental concentrations divided on annual and seasonal basis at Hannam and Kwachun.

	Seasonal				Seasonal			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
	Hannam				Kwachun			
Hg (ng m ⁻³)	5.07±2.67 (N = 239)	5.37±2.36 (N = 734)	5.23±3.12 (N = 850)	5.51±5.82 (N = 753)	5.33±2.09 (N = 173)	5.65±2.25 (N = 487)	4.59±2.49 (N = 343)	5.28±2.70 (N = 989)
	R=1.04~13.2	R=2.14~25.7	R=0.56~18.3	R=1.65~80.1	R=2.77~14.2	R=1.93~16.4	R=1.72~24.2	R=2.60~44.1
Temp. (°C)	10.9±5.82 (N = 2204)	22.0±3.31 (N = 744)	12.0±6.54 (N = 1576)	-1.21±4.12 (N = 2183)	13.7±5.16 (N = 1418)	24.5±3.85 (N = 1863)		4.86±0.41 (N = 169)
UV (MJ m ⁻²)	23.1±36.5 (N = 2202)	37.4±57.6 (N = 743)	14.0±20.8 (N = 1773)	10.1±15.2 (N = 2177)				
RH (%)	61.9±21.7 (N = 2204)	72.7±16.7 (N = 744)	74.7±17.9 (N = 1768)	62.7±17.5 (N = 2183)				
Wspeed (m s ⁻¹)	1.33±0.89 (N = 2204)	0.91±0.58 (N = 744)	0.88±0.69 (N = 1772)	1.37±0.88 (N = 2171)	2.21±1.66 (N = 1343)	1.70±1.35 (N = 1739)	0.53±0.36 (N = 1365)	1.05±0.72 (N = 1098)
SO ₂ (ppb)	7.13±2.95 (N = 2194)	5.04±3.01 (N = 719)	4.83±2.27 (N = 1765)	7.05±2.62 (N = 2084)	7.84±2.53 (N = 1415)	9.83±3.45 (N = 1862)	5.43±2.68 (N = 1361)	6.43±3.47 (N = 1456)
NO (ppb)	30.9±34.0 (N = 2195)	25.0±33.6 (N = 742)	59.8±55.8 (N = 1696)	49.2±53.3 (N = 2101)	19.9±25.9 (N = 1418)	47.5±100 (N = 1863)	61.3±59.2 (N = 1361)	51.9±59.1 (N = 1456)
NO ₂ (ppb)	43.0±17.3 (N = 2195)	52.4±38.9 (N = 742)	41.8±17.4 (N = 1696)	35.2±16.2 (N = 2101)	34.1±16.4 (N = 1418)	29.0±15.9 (N = 1863)	35.0±16.3 (N = 1361)	34.8±14.6 (N = 1456)
NOX (ppb)	73.9±47.0 (N = 2195)	77.4±65.0 (N = 742)	102±67.8 (N = 1696)	84.4±67.0 (N = 2101)	54.0±37.5 (N = 1418)	76.5±102 (N = 1863)	96.3±70.2 (N = 1361)	86.6±70.8 (N = 1456)
CH ₄ (ppm)	2.28±0.47 (N = 1828)	2.20±0.5 (N = 550)	2.37±0.34 (N = 1737)	2.30±0.29 (N = 1962)				
NMHC (ppm)	0.36±0.21 (N = 1828)	0.37±0.21 (N = 550)	0.82±0.53 (N = 1737)	0.73±0.52 (N = 1962)				
THC (ppm)	2.65±0.62 (N = 1828)	2.57±0.61 (N = 550)	3.19±0.79 (N = 1737)	3.03±0.67 (N = 1962)				
O ₃ (ppb)	22.9±15.2 (N = 2195)	25.6±22.0 (N = 742)	9.11±9.94 (N = 1763)	10.5±8.17 (N = 2101)	27.6±21.9 (N = 1326)	26.5±25.2 (N = 1506)	12.7±11.8 (N = 1361)	12.6±9.29 (N = 917)
CO (ppm)	0.99±0.45 (N = 2192)	0.94±0.44 (N = 742)	1.27±0.87 (N = 1552)	1.29±0.69 (N = 2103)	0.46±0.23 (N = 1418)	0.41±0.21 (N = 1531)	1.07±0.61 (N = 1361)	0.93±0.72 (N = 1444)
PM10 (µg m ⁻³)	59.9±38.5 (N = 2007)	89.1±70.6 (N = 485)						

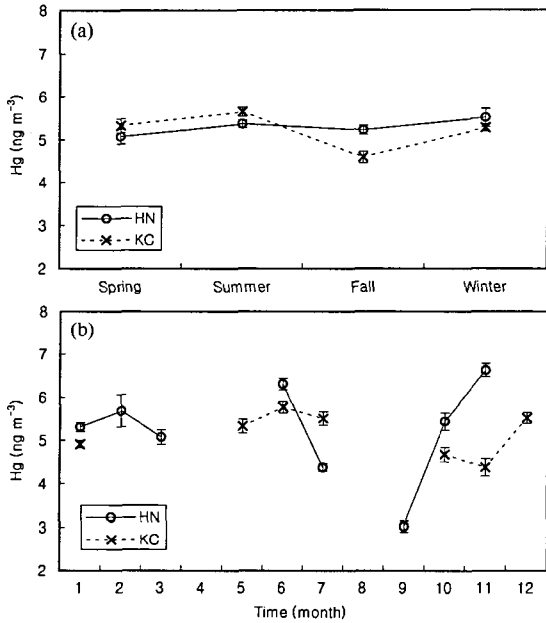


Fig. 6. Comparison of temporal distribution patterns of Hg in (a) seasonal and (b) monthly scales.

순으로 나타났다. (여기서 계절의 구분은 봄 (3~5), 여름(6~8)과 같이 3개월 단위로 구분해 주었다.) 한남지역의 농도자료는 석탄연료의 사용과 같은 인위적인 배출원의 영향을 직접적으로 받는 지역에서 주로 발견되는 경향과 가깝다(Kim and Kim, 2000). 반면 과천시지역의 경우, 여름철에 상대적으로 높은 농도가 발견되는 경향은 대단히 예외적으로 보인다. 그러나 과천시지역의 가을철 자료를 제외하면 대부분의 경우, 지역을 막론하고 5ngm⁻³를 일정 수준 상회할 정도로 계절적인 농도 차이의 수준이 대단히 미미하다. 그리고 보다 시간간격을 줄여서, 월별단위로 그 경향성을 비교해 보면, 한남지역에서는 농도변화가 대단히 유동적이란 것을 알 수 있다. 한남지역에서는 9, 10, 11월의 가을 기간동안에 농도변화가 대단히 큰 폭으로 나타났다.

실제 계절별 농도분포의 차이를 설명하기 위한 방편으로 각 계절별로 분류된 자료군의 빈도경향을 비교하는 것도 의미가 있을 것으로 보인다. 수은의 계절별 농도분포를 보다 자세히 이해하기 위해, Fig. 7에는 양 지점의 발생빈도를 계절별로 비교해 보았다. 양 지역 모두 봄, 여름, 겨울철에 4~6ngm⁻³ 대의 영역에서, 발생빈도가 가장 높게 나타났지만, 가을철에는 상대적으로 낮은 2~4ngm⁻³의 낮은 농도대에서

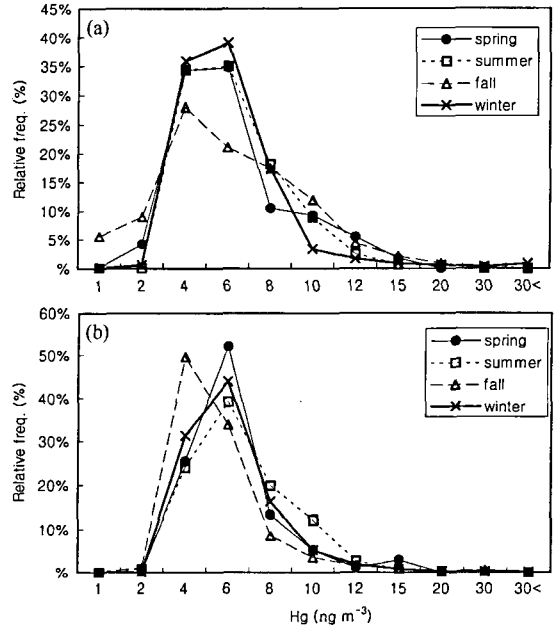


Fig. 7. Comparison of relative frequency distribution patterns among seasonally divided Hg datagroups: (a) Hannam area and (b) Kwachun area.

피크가 나타났다. 또한 계절별 평균치의 비교에서 각각 겨울철(한남동)과 여름철(과천)에 가장 높은 농도가 나타나는 현상은 앞서 일주기분포 특성의 양상과 마찬가지로 양 지역간의 농도를 조절하는 여러 가지 인자들에 내재된 특성의 차이를 잘 반영하는 것으로 보인다. 특히 상대적으로 낮시간대에 높은 농도를 보여 준 과천시지역에서 겨울보다 여름철에 높은 농도를 보인 것은 이 지역의 농도분포가 상대적으로 기온과 같은 요인에 더 민감하게 영향을 받고 있으리라고 추정케 한다. (앞에서 이미 설명한 바와 같이 수은의 농도를 조절하는 요인들은 지역적으로 큰 차이를 보일 수 있다는 점을 유의할 필요가 있다.) 수은의 배출은 기온의 상승에 따라 증가할 수 있다는 점이 과거 여러 연구결과에서 확인된 바 있다(Kim et al., 1995; Carpi and Lindberg, 1998).

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 의미

Table 4. Results of correlation analysis.

	All data	Spring	Summer	Fall	Winter	All day	Spring	Summer	Fall	Winter	All night	Spring	Summer	Fall	Winter
	Hannam all 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	-	-
	Kwachun all data					Kwachun day					Kwachun night				
Temp.	0.02	-0.15	-0.11	-	0.37	0.03	0.11	-0.08	-	0.28	0.02	-0.26	-0.34	-	0.44
UV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wspeed	-0.04	-0.11	-0.09	0.02	-0.10	-0.06	0.04	-0.14	-0.03	-0.11	-0.05	-0.15	-0.09	0.07	-0.17
SO ₂	0.40	0.17	0.44	0.34	0.45	0.40	0.40	0.50	0.38	0.44	0.39	0.06	0.27	0.36	0.46
NO	0.30	0.46	0.29	0.24	0.39	0.27	0.57	0.33	0.11	0.33	0.37	0.34	0.28	0.40	0.51
NO ₂	0.43	0.24	0.56	0.30	0.47	0.44	0.38	0.59	0.37	0.46	0.44	0.11	0.54	0.30	0.51
NOX	0.36	0.42	0.50	0.28	0.42	0.34	0.56	0.54	0.18	0.37	0.41	0.27	0.51	0.41	0.52
CH ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NMHC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
THC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O ₃	-0.04	-0.25	-0.06	0.03	-0.13	-0.02	-0.11	-0.07	0.15	-0.12	-0.25	-0.36	-0.30	-0.26	-0.24
CO	0.32	0.53	0.48	0.32	0.43	0.29	0.55	0.53	0.20	0.36	0.38	0.48	0.55	0.51	0.53
PM10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

를 지닐 것으로 보인다. 통계적인 의미를 부여하기 위해, 전체 관측자료를 중심으로 그리고 이들을 다시 계절별로 구분한 자료군을 이용하여, 상관분석과 요인분석을 수행하였다. 통계분석의 결과는 Table 4와 5에 제시하였다. Table 4에는 계절별로 그리고 주야별로 구분한 자료군을 이용하여, 각 자료군에 대해 개별적으로 수행한 상관분석의 결과를 제시하였다. 이러한 결과에 의하면, 수온과 여타 변수와의 관계는 계절별로 또는 주야간대별로 상당히 유동적인 관계를 유지한다는 것을 알 수 있다. 특히 개별 변수의 측정이 규칙적으로 이루어진 한남지역의 자료를 보면, 과거 양재지역의 연구결과 등과 유사한 경향성이 나타난다. 대체로 풍속을 포함하는 기상요인과는 대부분 음의 상관관계를 유지하는데, 이러한 경향성이 일사량과 같은 여타 기상요인들에서도 어느 정도 꾸준하게 나타난다. 반면 오존을 제외한 대부분의 대기오염 물질들과는 대체로 강한 양의 상관성을 유지하는 것

으로 나타난다. 주야간을 기준으로 볼 때는, 야간대에 비해 주간대에 수온과 비교를 이룬 대부분의 짝들에서 강한 상관성의 발현이 압도적으로 빈번하게 나타난다. 계절적인 기준으로 까지 확대해서 볼 때는, 겨울철 야간대에 가장 상관성의 강도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이와 같은 비교에서 특히 두드러진 현상은 봄철의 주야간대를 제외하고는 수온과 기온의 상관성이 대체로 약하고, 특히 가을철에는 주야간대 모두 강한 음의 상관성을 띠는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 배경대기환경을 중심으로 수행된 기존의 연구에서 빈번하게 발표된 양자간의 강한 관계(e.g., Kim *et al.*, 1995; Carpi and Lindberg, 1998)와는 상치되는 결과라고 할 수 있다. 이러한 현상은 기온의 변화외에도 여타 환경변수들의 영향이 수온의 농도분포를 결정짓는데 복합적으로 작용할 수 있다는 점을 투정케 한다. 둘째로 수온과 오존의 경우, 대체로 음의 상관성이 뚜렷하게 지속되었다는 점을 들

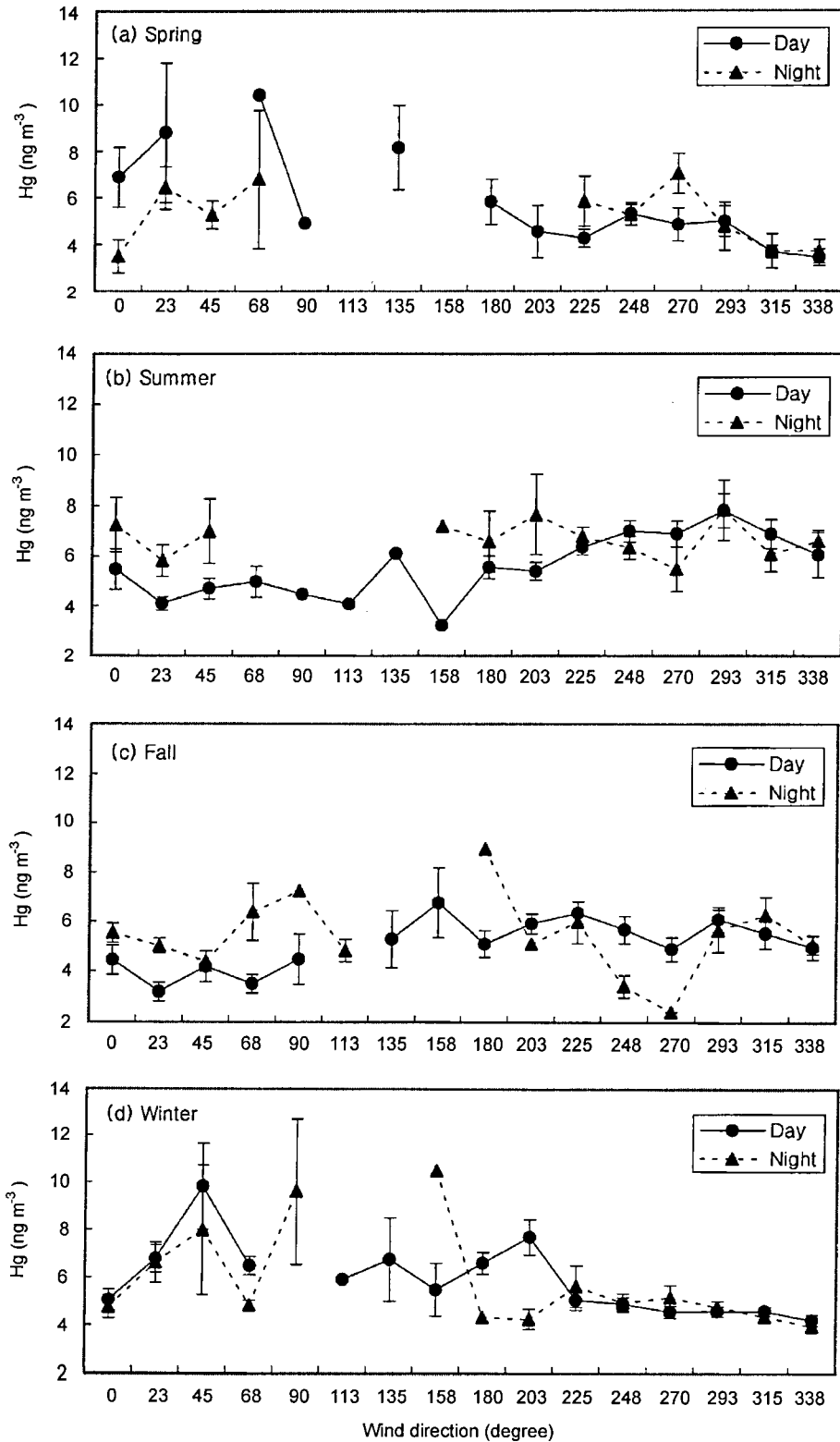


Fig. 8. The effect of seasonal windrose patterns on observed Hg concentrations (Hannam site only).

Table 5. Results of varimax rotated factor analysis of Hg and relevant parameters determined from Hannam and Kwachun areas during 1999 to 2000. (a) The analysis was made using both all data sets and diurnally divided data groups

	All data				Comm.	Daytime				Comm.	Nighttime				Comm.
	1	2	3			1	2	3			1	2	3		
1. Hannam															
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				
2. Kwachun															
Hg	0.13	0.74		0.57		0.79		0.63	0.65	0.29	0.12	0.53			
Temp.	-0.75	0.36		0.69	-0.75	0.25		0.63	-0.26	0.86		0.81			
UV	-	-		-	-	-		-	-	-		-			
RH	-	-		-	-	-		-	-	-		-			
WS	-0.63			0.40	-0.56			0.31		0.13	0.89	0.82			
SO ₂	-0.28	0.81		0.73	-0.20	0.80		0.67	0.20	0.90		0.86			
NO	0.83	0.22		0.74	0.78	0.35		0.74	0.72	-0.46	-0.33	0.83			
NO ₂	0.57	0.62		0.71	0.49	0.67		0.69	0.72	0.26	-0.40	0.75			
NOX	0.86	0.45		0.94	0.77	0.59		0.95	0.84	-0.24	-0.41	0.94			
CH ₄	-	-		-	-	-		-	-	-		-			
NMHC	-	-		-	-	-		-	-	-		-			
THC	-	-		-	-	-		-	-	-		-			
O ₃	-0.74	0.15		0.58	-0.77			0.59	-0.35		0.76	0.70			
CO	0.84	0.32		0.82	0.75	0.47		0.79	0.80	-0.36	-0.31	0.87			
PM10	-	-		-	-	-		-	-	-		-			
Eigenvalues	4.07	2.11			3.53	2.48			3.06	2.12	1.92				
CV (%)*	45.2	68.6			39.2	66.7			34.0	57.6	78.9				

수 있다. 이러한 현상은 고농도대의 오존에서 수은의 농도가 감소한다는 사실을 간접적으로 시사하는 것으로 보인다. 그렇지만 이미 과거 양재지역을 중심으로 한 본 연구진의 연구결과에서, 고농도의 오존이 발생하기 쉬운 조건에서도 단순히 고농도 오존의 존재만으로 수은이 파괴되는 현상을 완전하게 설명하기는 어렵다는 점을 대기반응의 모사를 통해 증명한 바 있다(Kim and Kim, 2001).

이러한 경향성을 보다 세부적으로 이해하기 위해서는 수은의 농도를 결정짓는 발생원별 기여도를 구분

해 보는 것이 의미있을 듯 하다. Table 5에 제시된 바와 같이 요인분석을 통해 발생원별 기여도를 추정할 수 있다. 다수의 변수에 대한 통계분석이 가능한 한남지역의 자료를 중심으로, 낮과 밤대로 분리한 요인분석의 결과를 비교한 바에 의하면(Table 5), 몇 가지 뚜렷한 경향성이 발견된다. 일단 주야에 상관없이 결과가 대부분 유사하고, 특히 주야 모두 수은이 여타 오염물질과 함께 모든 변이를 가장 잘 설명할 수 있는 제 1 요인으로서의 관계를 형성한다는 점이다. 이러한 결과는 주택가인 양재지역 등에서 확

인된 결과와는 상당 수준 차이가 있다. 양재지역을 중심으로 장기 집중관측한 Kim and Kim(submitted)의 결과는 낮 시간대에는 주로 대부분의 오염물질들이 주요인으로서 연관성이 밀접하게 나타나고, 밤 시간대에는 수은이 SO₂, NO₂, PM 10과 같은 일부 성분들과 함께 제 2요인을 지배하는 주인자로 나타났다. 이러한 분석을 계절별로 확대할 경우, 봄철 주간대나 겨울철 야간대 등을 제외하고 일관성있게 발견되었다. 이에 반해 한남지역의 경우, 기상자료의 결측이 많아 동일한 선상에서 비교가 용이하지 않으나, 대체로 오염물질들과 수은이 동시에 밀접한 관련이 형성되는 경향성은 어느 정도 추정할 수 있을 것으로 보인다.

결 론

여러 가지 시간적 및 공간적 규모로 진행되는 수은의 농도분포특성을 비교분석하기 위해, 서울시 한남동과 과천시에 위치한 두 가지 관측점으로부터 1999년 9월부터 2000년 7월까지 약 11개월의 기간에 걸쳐 간헐적인 집중관측을 통해 매시간대별 수은의 농도관측을 수행하였다. 본 연구자료를 이용하여 수은의 주기별 농도분포의 특성을 비교한 결과, 수은의 분포특성이 주기별로 다양한 양상을 취한다는 사실을 확인할 수 있었다. 일주기의 변화를 분석한 결과에 따르면, 양 지점간에는 현저한 차이가 존재하는 것이 확인되었다. 한남지역의 경우, 일관성있게 주저야고의 경향이 강하게 나타났는데 반해, 과천지역의 경우 그 반대로 주고야저의 경향이 강하였다. 이러한 현상은 양 지점간에 수은의 발생과 소멸을 조절하는 환경요인들간에 상당한 차이가 있음을 시사한다. 계절별 규모로 진행되는 농도변화의 경향성을 보면, 한남에서는 겨울, 과천에서는 여름에 최고 농도를 기록하였다. 이와 같은 계절적 경향성은 각 지역에서 발견된 일주기의 경향성과 상당히 유사성을 띠는 것으로 보인다. 수은의 농도자료를 이용한 일반적인 주기별 경향성의 연구에 덧붙여, 통계적인 방식으로 수은의 농도 변화에 영향을 미치는 주요 인자들의 관계를 분석해 보았다. 전체 자료 또는 계절별로 구분된 자료군에 대해 상관분석 또는 요인분석 등을 수행한 결과는 거의 일관성있게, 분진, SO₂, NO₂ 등의 오염물질들과의 밀접한 관계를 시사하는 반면, 상대적으로 기상인자들과의 약한 상관성의 가능성을 시사하였다. 특히 기온이나 오존 등과의 관계는 이미 과거에 양재지역

등을 중심으로 이루어진 주거지역의 경향성과는 뚜렷하게 구분이 되는 새로운 경향성의 존재를 보여주는 것으로 나타났다. 이와 같은 가능성은 요인분석의 결과에서 뚜렷하고 지속적으로 확인되었다. 본 연구결과는 수은의 농도가 광역적으로 유의한 수준으로 유사성을 보여 주지만, 개별 지역적 규모의 발생원의 영향 등에 따라 복잡한 시간적 주기의 경향성을 도출할 수 있다는 점을 시사한다.

감사의 글

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

참고문헌

- 김민영 · 김기현, 2001, 대기 중 수은의 지역적 분포특성에 대한 비교연구: 한반도의 도심과 산악지역을 중심으로. 한국대기환경학회지 (계재예정).
- 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.
- 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., 2001, 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., 2001, The temporal distribution characteristics of gaseous mercury from an urban monitoring site of Seoul during 1999 to 2000. *Atmospheric Environment* (submitted).
- 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.

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 mer-

cury - 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.

2001년 2월 7일 원고 접수
2001년 5월 31일 수정원고 접수
2001년 6월 9일 원고 채택