

## 공업지역 환경대기 중 수은성분의 농도분포에 대한 조사 - 반월공단을 중심으로 -

김민영<sup>1</sup> · 홍성민<sup>2</sup> · 최여진<sup>3</sup> · 손장호<sup>4</sup> · 이정순<sup>5</sup> · 김기현<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>서울시 보건환경연구원, <sup>2</sup>한국해양연구원 부설 극지연구소, <sup>3</sup>세종대학교 지구과학과 대기환경연구소,  
<sup>4</sup>한국표준과학연구원, <sup>5</sup>동의대학교 환경공학과

## Gaseous Elemental Mercury in Industrial Areas - Ban Wall Industrial Complex -

M.-Y. Kim<sup>1</sup>, S. Hong<sup>2</sup>, Y.J. Choi<sup>3</sup>, Z.H. Shon<sup>4</sup>, J.S. Lee<sup>5</sup>, and KH Kim<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Korea Polar Research Institute, <sup>3</sup>Department of Earth Sciences, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>4</sup>Environment measurement Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)

<sup>5</sup>Dept. of Environmental Engineering, Dong-Eui Univ.,

The concentration of gaseous elemental mercury (Hg) was measured concurrently with relevant environmental parameters from a monitoring station located in the central area of the Ban-Wall industrial complex during March to May 2005. The concentration of Hg measured at hourly intervals during this study period was averaged to be  $6.32 \pm 8.59 \text{ ng m}^{-3}$  ( $N=1,160$ ). The observed concentration levels are thus found to be higher than those values measured typically at other urban locations (like Seoul) by approximately 20%. Using these data, the temporal variability of Hg was evaluated and compared across diurnal and monthly scales. The diurnal variability of Hg, characterized as the dominance of afternoon time period, suggests that its behavior is affected by man-made activities in the area. To learn more about the factors affecting Hg distributions in the study area, the results were also examined by such statistical methods as correlation and factor analysis. The results of those analyses generally suggest that the processes affecting Hg emissions and distributions in the study area should be distinguished from those important in other urban environments investigated previously.

**Key words :** Mercury, Temporal, Anthropogenic, Industrial, Source signatures

### 1. 서 론

석탄과 같은 화석연료의 사용 또는 폐기물의 소각과 같은 산업활동들은 단순히 이산화탄소와 같은 일상적인 오염물질을 대규모로 배출하는 역할 뿐만 아니라 동시에 수은이나 다이옥신과 같은 유해물질을 배출하는 주요 배출원으로 작용한다는 점에서 여러 가지 주목을 받고 있다.<sup>1)</sup> 이러한 발생특성으로 인해, 대기 중에 존재하는 수은은 여타 중요 대기오염물질들과 같이 여러 가지 오염현상의 지표로 활용하기도 한다.<sup>2,3)</sup> 특히, 이들 성분의 대부분이 대기 중에서 원소성 수은의 형태

로 강한 휘발성을 지니며, 긴 대기체류시간을 유지한다는 점으로 인해, 일반적인 가스상 오염물질들의 대기화학적 특성으로부터 여러 가지 면에서 차별화가 가능한 특성을 지니고 있다.<sup>4,5)</sup> 예를 들어, 중국과 같이 대규모 산업배출원을 형성한 곳으로부터 배출된 수은이 태평양을 건너 미국과 같이 원거리의 수용원에 침적한다거나 또는 이러한 수용원 지역의 대기질을 저하시키는 요인으로 작용한다는 것이 증명되기도 한다. 따라서 수은은 이러한 월경성 오염의 지표로서 국제적인 환경분쟁의 요인으로 까지 지목받기도 한다.

수은의 배출자료를 중요한 대기질의 평가기준으로 활

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

용할 수 있다는 점을 인식하면서, 국내외에서 많은 과학자들이 대기환경의 수은에 대한 연구를 시도하였고 또 시도 중에 있다. 국내에서도 서울시 양재지역과 같이 주택가 주변 지역, 한남동과 같이 교통의 영향이 강한 지역, 강화도와 같이 비교적 청정한 지역 등을 대상으로 가스상 수은의 분포특성을 지속적으로 조사하였다.<sup>6-10)</sup> 이러한 연구의 결과, 도심권 환경대기 중 수은의 농도분포가  $5 \text{ ng m}^{-3}$  수준 그리고 배경영역권에서  $2-3 \text{ ng m}^{-3}$  수준을 유지한다는 것을 확인할 수 있었다.<sup>8,10)</sup> 그리고 이러한 농도분포는 구미지역에서 일반적으로 보고되는  $1-2 \text{ ng m}^{-3}$  보다는 훨씬 높은 수준이다. 그렇지만, 과거 석탄연료의 사용이 정점에 달하였던 80년대 말 시점에 서울지역에서  $10 \text{ ng m}^{-3}$ 에 가까운 평균농도가 쉽게 발견된 점을 감안하면, 그 보다는 수 배 이상으로 농도의 저감이 이루어졌다는 것을 알 수 있었다. 실제 이처럼 상당한 수준의 수은농도는 대규모로 석탄연료를 사용하고 있는 중국의 주요 산업도시에서 지금도 쉽게 발견할 수 있다.

비록 환경대기 중 수은의 농도분포특성을 조사하기 위해 많은 연구들이 시도되었지만, 아직까지 산업시설 또는 그 영향권에 속한 지역을 대상으로 조사한 연구 결과는 흔하지 않다. 많은 중소기업들로 구성된 반월공업단지는 염색, 기계, 전자, 도금 산업 등 국가경제의 기반이 되고 있는 공산품을 생산하고 있다. 그러나, 각종 환경오염을 유발할 수 있는 시설물들이 난립한 관계로 인해, 오염물질 또는 악취의 발생원이라는 문제점도 동시에 지적받고 있다.<sup>11)</sup> 실제로 이들 지역에서는 주거지역과 인접한 공단시설물로부터 발생하는 악취 및 부유물질들로 인해, 인근 주민들이 여러 가지 환경민원이 지속적으로 제기하고 있다. 이를 감안하여, 이미 많은 연구진이 산업시설 및 인근지역을 대상으로 악취성분의 농도분포나 배출특성을 다양한 관점에서 진단하였다.

본 연구에서는 반월공업단지에서 배출되는 환경오염물질 중 가스상 수은의 농도분포특성을 진단하기 위하여 2005년 봄철기간 동안 가스상 수은의 농도분포를 연속측정방식으로 조사하였다. 이를 기반으로 향후 공단지역의 전반적인 대기질 평가에 활용이 가능한 기초자료를 확보하기 위한 기반을 확보하고자 하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 2005년 3월 28일부터 5월 16일까지

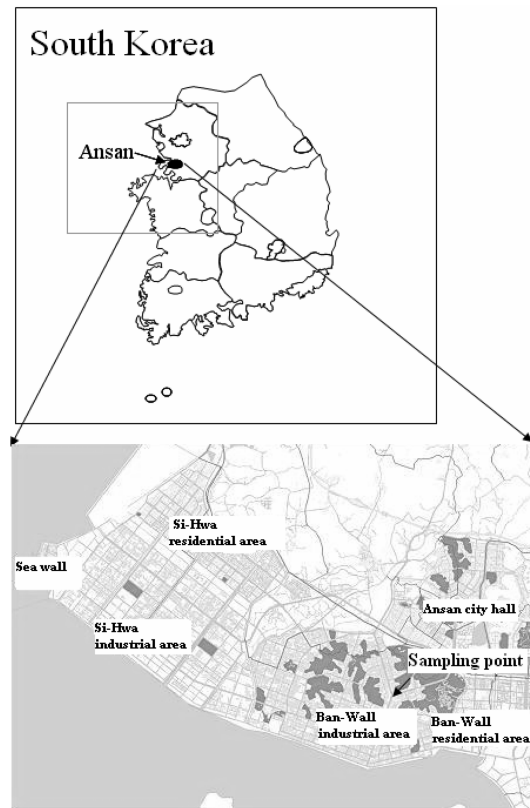


Fig. 1. A geographical location of the study site in Ansan city, Korea.

약 50일의 기간에 걸쳐, 안산시 원시동에 소재한 관측점 (Fig. 1)을 중심으로 수은의 시간대별 농도분포를 측정하였다. 수은의 농도관측이 이루어진 원시동 지역은 반월공단 내부에 소재한 지점으로서, 전형적인 공단지역의 특성을 조사할 수 있는 위치에 존재한다. 본 연구에서는 매 시간단위로 기체상 수은의 농도분포를 연속관측을 실시하였기 때문에, 측정이 이루어진 봄철기간 전체 및 일주기별 (24시간 주기) 분포특성에 대한 평가가 가능하다. 수은의 채취/분석을 위한 외기시료의 유입을 유도하기 위해, 건물의 3층에서 건물 밖으로 2 m 정도 떨어진 위치에 스테인리스관 (stainless steel) 지지대를 설치하여 활용하였다. 이 관 내부에 실제로 공기시료를 분석시스템 내부로 유입할 수 있도록 테플론 (Teflon) 튜빙을 관입하여, 바깥쪽 외기시료를 실내에 장착된 on-line 수은 분석시스템에 주입시켜 주었다. 주입된 시료를 이용한 분석의 세부적인 내용은 이미 본 연구진의 선행연구에서 자세하게 제시한 바 있다.<sup>8,9)</sup>

수은의 농도측정은 Nippon Instrument Co. (NIC, Japan)가 제작한 순간자동측정기 Mercury Analyzer,

AM-2 모델을 이용하였다. 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 (non-dispersive double beam) 비불꽃형 원자흡광분석기 (flameless atomic absorption method)에 의해 최종적으로 농도의 검출이 이루어졌다. AM-2를 이용한 시료 채취 유량은 1.0 l/min을 유지하였고, 시료분석을 위한 운반기체는 수은성분의 유입을 차단하는 금흡착트랩을 거쳐 기기외부의 수은이 배제된 건조한 공기를 유입하는 방식으로 사용하였다. 검출기로 유입된 수은은 253.7 nm의 파장에서 약 1 pg대의 절대검출한계를 보여주었다. 증기형 수은의 표준시료가 존재하지 않기 때문에, 측정의 정확도를 산출하기 위한 한 방법으로 NIST SRM 1632a, 1568, 1575 등을 대응하였다. 그 결과, 정확도는 3~5% 대로 나타났다.<sup>8)</sup> 그리고 시료분석의 정밀도를 산출하기 위해 1, 2, 3 ng대의 증기상태의 표준시료를 각각 5회씩 기기에 직접 주입하는 방식으로 반복 분석하였다. 정밀도를 상대표준오차 (relative standard error (RSE) = standard error (SE) × 100/Mean)로 표시하면, 실험에 사용된 AM-2 기기는 각각 평균 0.5% 대의 오차를 보이는 것으로 나

타났다.<sup>8)</sup>

Table 1에는 전체 연구기간 동안의 환경조건 및 오염물질의 농도분포를 평가할 수 있는 환경변수들의 분석 결과를 요약하였다. 연구기간인 봄철 3개월 동안 기온은 평균 14.2°C를 유지하였고, 풍속은 2.35 m s<sup>-1</sup>을 기록하였다. 풍향발생 빈도경향을 비교한 결과에 의하면, 주로 편서풍에 강하게 영향을 받는 한반도 지역의 구조적인 특성과 유사하게 주로 남서풍 계열의 발생이 가장 뚜렷하게 나타났다.

### 3. 결과 및 토론

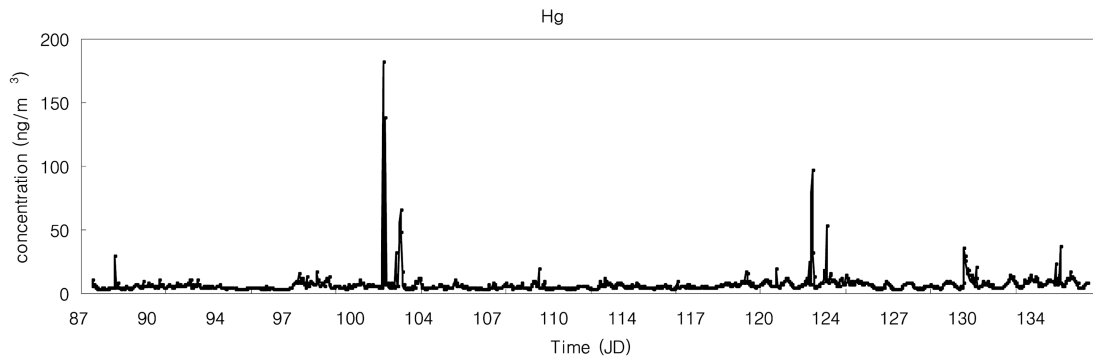
#### 3.1. 전체 결과에 대한 고찰

본 연구에서 수은의 농도측정은 상시 관측의 성격으로 2005년 봄철 기간 50여일에 걸쳐 실시하였다 (2005년 3월 28일-5월 16일). 전체 연구기간 동안 관측한 수은의 농도 분포특성을 쉽게 비교하기 위해, Fig. 2에는 시간 별 자료를 이용하여, 시간의 함수로 수은의 농도분포를 제시하였다. Table 1에는 전체 연구기간 동안 관측한 모든 자료를 이용하여, 계산한 통계량을 제시하였다. 이 기간 동안 관측한 1160개의 시간 별 관측자료에 대한 평균은 6.32±8.59 ng m<sup>-3</sup>의 수준을 유지하였다. 이러한 결과는 이미 본 연구진이 선행연구들

**Table 1.** A statistical summary of gaseous elemental mercury (GEM) monitoring made in Ansan city during spring 2005.

Parameter	Hg	Hg*	SO <sub>2</sub>	PM10	O <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	WS	Temp.
Unit	(ng/m <sup>3</sup> )	(ng/m <sup>3</sup> )	(ppb)	(μg/m <sup>3</sup> )	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(m/sec)	(°C)
Mean ±SD	6.32 ± 8.59	5.62 ± 2.98	9.52 ± 11.2	114 ± 71.9	33.3 ± 14.9	10.7 ± 17.0	23.2 ± 15.3	33.9 ± 28.8	748 ± 327	2.35 ± 1.24	14.2 ± 5.29
(Mindian)	(4.79)	(4.77)	(6.00)	(99.0)	(34.0)	(6.00)	(20.0)	(27.0)	(700)	(2.20)	(14.1)
Min~Max	2.32~181	2.32~29.1	1.00~134	9.00~556	3.00~94.0	2.00~211	3.00~90.0	5.00~287	100~2100	0.10~8.00	2.70~31.5
(N)	(1160)	(1147)	(1152)	(1160)	(1156)	(1105)	(1105)	(1105)	(1156)	(1158)	(1154)

\*After excluding exceptionally high Hg values (i.e., above 30 ng m<sup>-3</sup>)



\* Julian days (JD) of 87 and 134 denote 28 March and 14 May 2005, respectively.

**Fig. 2.** A plot of temporal variability of Hg measured during spring 2005 (28 March to 16 May 2005).

을 통해, 제시한 서울시와 같은 지역들에서 측정된  $5 \text{ ng m}^{-3}$ 의 농도보다는 20% 정도가 높은 수준에 해당한다.<sup>8)</sup> 그런데 Table 1에 비교로 제시한 바와 같이, 수은의 농도가 극단적인 고농도의 발생에 의해서 영향을 받는다는 점을 감안하여, 추가적인 비교를 시도해 보았다. 이들 극단치를 정의하기 위해, 전체 자료의 1.1% (N=11)에 해당하는 임의의 기준  $30 \text{ ng m}^{-3}$ 로 고농도를 분리한 채로 비교해 보았다 (Fig. 3). 그 결과 평균과 표준편차가  $5.62 \pm 2.98 \text{ ng m}^{-3}$ 로 서울시 양재지역에 대한 평균치에 비해 5% 정도 높은 수준으로 차이가 줄어드는 경향을 확인할 수 있다.

이 결과를 보면, 산업단지에서 나타나는 수은의 농도가 도심환경의 일반적인 농도보다는 일정 수준 높게 존재한다는 것을 추정할 수 있다. 그리고 이러한 농도가 발생하는 상당 부분은 부분적으로 발견되는 고농도 현상의 빈도나 강도가 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 공단지역에서 관측되는 고농도의 수은의 관측치는 한반도의 도심지역, 비교적 청정한 공기질을 유지하는 배경지역들과는 구분이 된다. 비교적 최근에 서해안의 강화도지역에 대한 조사에서 수은의 농도는  $3.72 \text{ ng m}^{-3}$  수준으로 본 연구의 결과에 비해 대략 40% 정도 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.<sup>10)</sup>

본 연구에서 관측한 결과는 비교적 최근에 구미지역을 중심으로 보고된 여러 관측결과들과도 상당히 뚜렷한 차이를 보인다. 예를 들어, Nadim 등<sup>12)</sup>이 미국의 커네티컷 주에 위치한 8개 지점을 중심으로 3년에 걸쳐 수은의 농도를 관측하였다. 그 결과를 보면, 전체 지역에 대한 평균농도가  $2.06 \text{ ng m}^{-3}$ 를 유지하는 것을 볼 수 있다. 특히 인구가 밀집한 내륙지역에 해당하는 Waterbury에서  $3.76 \text{ ng m}^{-3}$ 의 고농도를 기록한 데 반해, 여타 지역에서는 이보다 거의 50% 낮은 수준의 농

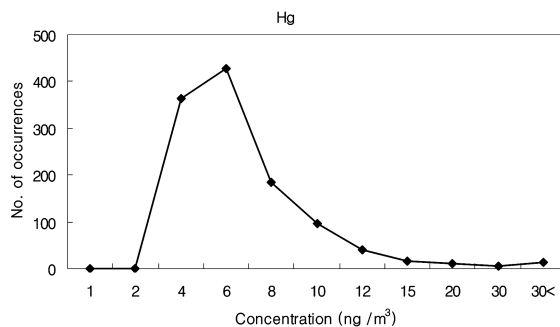


Fig. 3. A plot of frequency distribution pattern of Hg concentration measured from the study area.

도로 발견되었다. 특히 산업화 및 공업화가 가장 심각하게 이루어진 지역을 대표하기 위해 설정된 Bridgeport에서도  $2.1 \text{ ng m}^{-3}$ 를 기록하였다. Ebinghaus 등<sup>13)</sup>은 북반구의 배경농도를 대표할 수 있는 Ireland의 Mace Head 지역을 조사하였다. 이 지역의 경우, 95년~01년 기간의 평균농도가  $1.75 \text{ ng m}^{-3}$ 를 초과하지 않는다는 것을 보여 주었다. 결과적으로 안산과 같은 대도시 지역에서 나타나는 수은의 농도 수준은 구미지역, 한반도의 청정지역, 서울과 같은 도심지역의 농도분포들과 비교해도 현격한 차이가 존재한다고 볼 수 있다.

### 3.2. 수은의 시간적 농도분포 특성

본 연구에서는 봄철 3개월의 기간 동안 수은의 농도를 관측하였다. 이러한 점을 감안하여, 본 연구결과를 24시간 규모의 일주기 또는 월 주기와 같이 다양한 시간적 기준에서 비교 평가하는 것이 가능하다. Fig. 2에는 전체 조사기간 동안 관측한 개별자료를 시간의 함수로 제시하였다. 전체 기간 동안의 경향을 보면, JD 101일인 4월 18일 저녁 8시에 최고농도인  $181 \text{ ng m}^{-3}$ , 그리고 동일 저녁 11시에  $138 \text{ ng m}^{-3}$ 의 두 번째 고농도가 기록되었다. 그 다음으로는 JD 122일인 5월 2일에 세 번째 높은 값인  $95.9 \text{ ng m}^{-3}$ 의 농도를 관측하였다. 비록 드물기는 하지만, 이처럼 눈에 띄는 고농도가 몇 차례 더 관측되었다. 그러나 이들 일부 고농도 발생 사례를 제외하면, 전반적으로  $6 \text{ ng m}^{-3}$  정도에 가까운 비교적 일정한 수준에서 농도가 지속적으로 유지되었다고도 볼 수 있다. 전체 경향에 대한 비교에 이어서, Fig. 4에는 전체 기간의 평균값과 함께 모든 월별 평균치를 비교할 수 있게 제시하였다. 이러한 결과를 보면, 3월에  $5 \text{ ng m}^{-3}$  수준의 농도에서 점차 증가하여, 5월에는  $8 \text{ ng m}^{-3}$  수준에 근접할 정도로 월평균 농도가 점차 상승하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 조사대상지역에서 인위적 발생원의 역할이 중

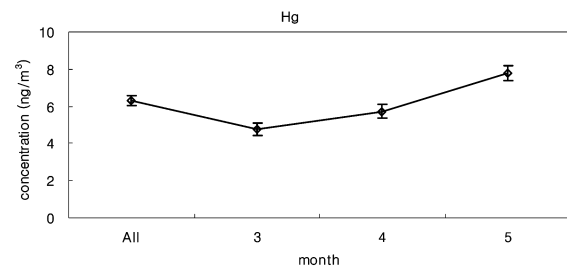


Fig. 4. Comparison of month-to-month variations of Hg during the study period.

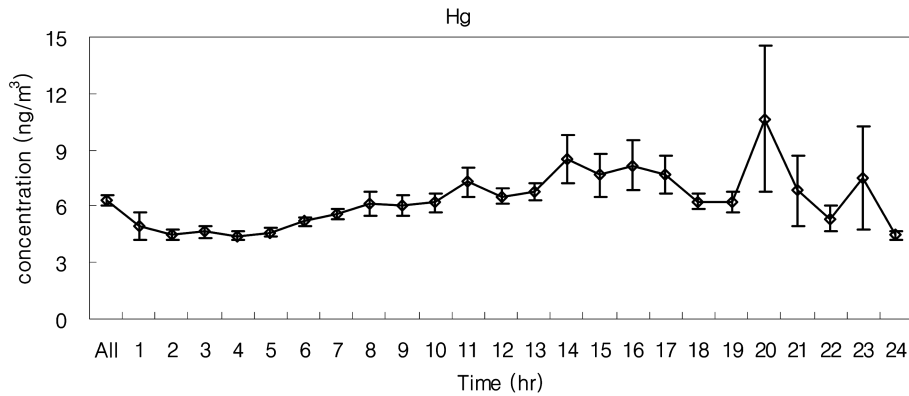


Fig. 5. Evaluation of diurnal variations of Hg in the study period.

요하지만, 기온상승과 같은 자연적 요인도 수은의 농도 변화에 어느 정도 영향을 미칠 수 있다는 것으로 볼 수 있을 것이다.

Fig. 5에는 수은의 일주기 농도분포를 비교할 수 있게, 전체 분석결과로부터 시간대 별 평균농도를 구한 결과를 제시하였다. 이 결과를 보면, 이른 오전 대에 가장 낮은 농도 대를 유지하다가, 점차 농도가 증가하여, 오후와 저녁시간 대에 가장 고농도를 형성하는 경향을 발견할 수 있다. 결과적으로 오후 2시경부터 오후 9-11시까지 주간과 야간 대에 걸쳐서 고농도가 형성되는 경향을 확인할 수 있다. 일주기 비교에서 늦은 저녁 시간대에 고농도가 나타나는 양상은 앞서 언급한 바와 같이 이 시간대에 극단적인 고농도가 검출된 영향을 상당 부분 반영하고 있다. 주간과 야간대의 차이를 평가하기 위해, Table 2에는 주야간을 분리한 결과를 제시하였다. 이러한 방법에 의하면, 주간대의 농도가 야간

대에 비해 20% 가까이 높다는 것을 알 수 있다. 그리고 통계적인 유의성을 평가한 결과를 보면, 그러한 차이가 수은은 물론 다수의 환경변수들에서도 뚜렷하다는 것을 알 수 있다.

참고로 과거에 보고된 연구결과들을 보면, 수은의 일주기분포는 주로 야저형 또는 주저 야고형의 특성을 취하는 것을 알 수 있다. 전자의 경우, 여름철과 같이 비교적 높은 기온이 유지되는 조건에서 수은의 배출이 활발하게 이루어질 때, 발생할 가능성이 크다는 것을 보여 주었다.<sup>9)</sup> 그러나 일반적으로 대부분의 조사결과를 보면, 후자의 발생 가능성이 크다는 것을 알 수 있다.<sup>14)</sup> Lee et al.<sup>14)</sup>은 이러한 현상의 기본적인 메커니즘을 야간대의 역전층 형성이나 혼합고의 변화 등과 같은 단주기적 기상현상에 의해 지표면에 수은의 누적이 이루어지기 쉬운 환경조건이 형성된 결과로 설명하였다. 그러나 안산지역의 경우, 일반적으로 낮 시간대에 높은

Table 2. A comparison of Hg concentration levels between day and night time periods.

Parameter	Hg	Hg*	SO <sub>2</sub>	PM10	O <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	WS	Temp.
Unit	(ng/m <sup>3</sup> )	(ng/m <sup>3</sup> )	(ppb)	(μg/m <sup>3</sup> )	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(ppb)	(m/sec)	(°C)
Day											
Mean ±SD	6.83 ±5.49	6.38 ±3.32	9.22 ±9.18	117 ±74.9	35.8 ±15.2	13.1 ±18.7	23.5 ±14.1	36.5 ±29.5	730 ±322	2.78 ±1.23	16.2 ±5.27
(Mindian)	(5.58)	(5.51)	(7.00)	(101)	(36.0)	(8.00)	(21.0)	(30)	(700)	(2.50)	(15.7)
Min~Max	2.46~64.4	2.46~29.1	1.00~78.0	15.00~556	4.00~94.0	2.00~211	3.00~90	5.00~287	100~2100	0.10~8.00	2.70~31.5
(N)	(621)	(614)	(616)	(623)	(617)	(589)	(589)	(589)	(617)	(630)	(626)
Night											
Mean ±SD	5.73 ±11.1	4.74 ±2.24	9.86 ±13.1	112 ±68.3	30.3 ±14.0	7.94 ±14.2	22.8 ±16.6	30.8 ±27.6	768 ±332	1.85 ±1.03	11.9 ±4.25
(Mindian)	(4.14)	(4.14)	(6.00)	(96.0)	(31.0)	(3.00)	(19.0)	(22.0)	(700)	(1.6)	(11.8)
Min~Max	2.32~181	2.32~23.1	1.00~134	9.00~477	3.00~68.0	2.00~113	3.00~80.0	5.00~167	200~2000	0.30~5.90	3.00~25.0
(N)	(539)	(533)	(536)	(537)	(539)	(516)	(516)	(516)	(539)	(528)	(528)
*After excluding exceptionally high Hg values.											
t	2.19	9.65	0.96	1.19	6.31	5.05	0.75	3.32	1.98	13.8	15.1
P	2.89E-02	2.95E-21	3.37E-01	2.33E-01	3.86E-10	5.09E-07	4.52E-01	9.42E-04	4.80E-02	5.00E-40	5.62E-47

농도를 보이지만, 야간 대에도 극단적인 고농도의 발생으로 인한 영향이 드물지 않게 나타나는 것을 알 수 있다. 이처럼 독특한 일주기 경향은 산업단지에서 비교적 늦은 시간까지 조업을 하는 여건 등과 어느 정도 관련이 있을 것으로 추정된다.

### 3.3. 수은의 농도분포를 조절하는 인자들에 대한 조사

본 연구에서 관측한 수은과 주요 환경변수들의 분석 결과를 토대로 수은의 농도분포에 영향을 미치는 인자들을 평가해 보고자 하였다. Fig. 6에는 특정 배출원의 존재 유무가 수은의 농도분포에 영향을 미치는 가의 여부를 확인하기 위한 가장 기본적인 방법의 하나로, 수은의 농도를 풍향의 함수로 비교해 보았다. 낮과 밤시간을 기준으로 이러한 결과를 비교하면, 전반적으로 서풍계열에서 고농도가 발생하는 경향을 보이는 편이다. 그러나 대체로 서풍계열에서 상대적으로 고농도가 나타나는 경향은 앞서 언급한 바와 같이, 극단적인 고농도 성분들이 전반적으로 평균치를 상승시킨 영향도 일부 반영하는 것으로 사료된다. 이러한 결과에 의하면, 극단적인 고농도를 배출하는 배출원이 주로 관측점의 서쪽 방향에 존재할 가능성이 크다고 볼 수 있을 것 같다.

Table 3에는 수은과 동시에 관측한 변수들을 이용하여, 상관분석을 한 결과를 제시하였다. 전체적인 상관분석의 결과를 비교해 보면, 수은은 질소산화물과 같은 일부 기준성 오염물질들에 상대적으로 높은 상관성을 띄는 것으로 나타났다. Table 3에 제시한 결과에서 볼 수 있듯이, 일반적으로 기준성 오염물질들 간에 높은 상관성을 유지한다는 점을 확인할 수 있다. 따라서 이

러한 점을 감안하면, 수은의 배출은 질소산화물과 같은 경우를 제외한 대다수의 기준성 물질의 배출과 연관성이 낮을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 이들 기준성물질 대신, 풍속과 음의 상관성, 기온과 양의 상관성이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 풍속과의 관계는 간헐적으로 발견할 수 있지만, 기온이 강한 양의 상관성을 보이는 경우는 일반적으로 쉽게 나타난다. 일반적으로 기온이 상승할수록 휘발성이 강한 수은과 같은 오염물질들의 배출이 촉진되는 현상은 잘 알려져 있다.

수은의 농도분포를 결정짓는 발생원 별 기여도를 간접적으로 구분하기 위해, 표 4에 제시한 바와 같이 요인분석을 통해 발생원 별 기여도를 간접적으로 추정하고자 하였다. 수은의 농도와 함께 관측한 다수의 환경변수를 이용하여 이러한 통계분석을 시도한 바에 의하면, 몇 가지의 경향성을 확인할 수 있다. 특히 36%의 변인을 설명할 수 있는 제 1 요인의 경우, 질소산화물들의 발생이 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 제 2, 제 3 요인의 경우, 각각 기온과 같은 자연적 요인, 이산화황과 같은 오염물질이 중요한 변인으로 나타났다. 전반적으로 요인분석의 결과에서 수은의 이들 인자와 일정 수준 이상으로 연계성을 추정하기는 어려운 것으로 나타났다. 결과적으로 이러한 결과는 과거 본 연구진이 서울시 양재지역과 같이 일반적인 도심환경에서 볼 수 있는 경향과는 어느 정도 구분이 된다.<sup>8,9)</sup> 보다 장기적으로 많은 자료를 확보한 양재지역의 경향성을 분석한 결과에 의하면, 낮 시간대에는 주로 대부분의 오염물질들이 주요인으로서 밀접한 연관성을 보였다. 그렇지만, 밤시간 대에는 수은이 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM 10과 같은 일부 성분들과 함께 제 2 요인을 지배하는

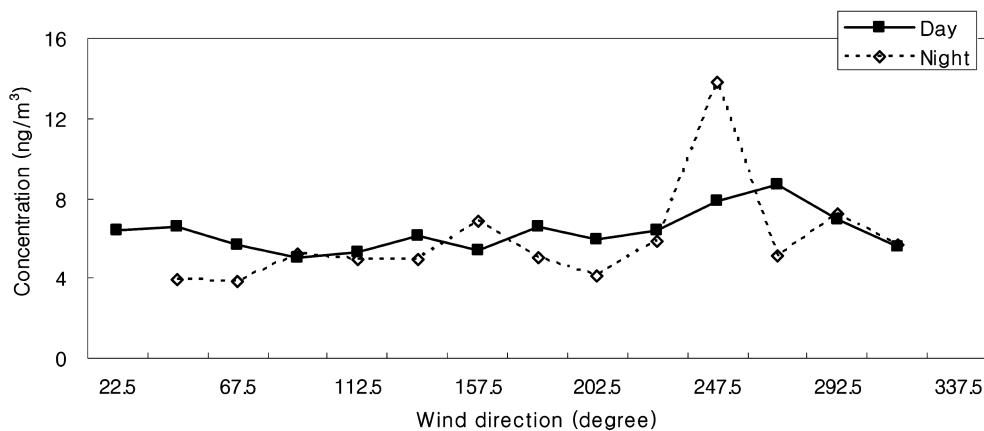


Fig. 6. Comparison of Hg concentration levels in relation to wind occurrence pattern.

**Table 3.** Results of correlation analysis between Hg and the other relevant environmental parameters.

		Hg	SO <sub>2</sub>	PM10	O <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NOX	CO	WS	Temp
Hg	r	1									
	P										
	N	1160									
SO <sub>2</sub>	r	0.013	1								
	P	6.54E-01									
	N	1115	1152								
PM10	r	0.037	0.217 <sup>II</sup>	1							
	P	2.21E-01	1.29E-13								
	N	1122	1145	1160							
O <sub>3</sub>	r	-0.050	0.009	-0.129 <sup>I</sup>	1						
	P	9.30E-02	7.54E-01	1.21E-05							
	N	1118	1152	1149	1156						
NO	r	0.063	0.151 <sup>I</sup>	0.195 <sup>II</sup>	-0.378 <sup>II</sup>	1					
	P	3.90E-02	5.22E-07	7.06E-11	6.93E-39						
	N	1069	1101	1098	1105	1105					
NO <sub>2</sub>	r	0.199 <sup>I</sup>	0.302 <sup>II</sup>	0.283 <sup>II</sup>	-0.555 <sup>II</sup>	0.589 <sup>II</sup>	1				
	P	3.83E-10	1.11E-24	1.22E-21	1.99E-90	3.76E-104					
	N	1069	1101	1098	1105	1105	1105				
NOX	r	0.137 <sup>I</sup>	0.250 <sup>II</sup>	0.265 <sup>II</sup>	-0.518 <sup>II</sup>	0.903 <sup>II</sup>	0.879 <sup>II</sup>	1			
	P	6.83E-06	3.74E-17	4.08E-19	5.16E-77	0.00E+00	0.00E+00				
	N	1069	1101	1098	1105	1105	1105	1105			
CO	r	-0.034	0.229 <sup>II</sup>	0.228 <sup>II</sup>	-0.148 <sup>I</sup>	0.418 <sup>II</sup>	0.347 <sup>II</sup>	0.431 <sup>II</sup>	1		
	P	2.56E-01	3.94E-15	4.50E-15	4.29E-07	7.14E-48	1.24E-32	3.41E-51			
	N	1118	1152	1149	1156	1105	1105	1105	1156		
WS	r	-0.105	0.031	-0.078	0.405 <sup>II</sup>	-0.163 <sup>I</sup>	-0.345 <sup>II</sup>	-0.281 <sup>II</sup>	-0.197 <sup>II</sup>	1	
	P	4.50E-04	3.03E-01	7.95E-03	3.52E-46	5.67E-08	7.69E-32	3.32E-21	1.87E-11		
	N	1120	1136	1144	1140	1091	1091	1091	1140	1158	
Temp	r	0.141 <sup>I</sup>	0.030	-0.101	0.342 <sup>II</sup>	0.078	0.078	-0.005	-0.400 <sup>II</sup>	0.244 <sup>II</sup>	1
	P	2.44E-06	3.10E-01	6.17E-04	1.49E-32	9.73E-03	9.74E-03	8.61E-01	5.66E-45	3.88E-17	
	N	1116	1132	1140	1136	1087	1087	1087	1136	1154	1154

Superscripts I and II denote that correlation is significant at P values smaller than 10<sup>-5</sup> and 10<sup>-10</sup>, respectively.

**Table 4.** Varimax rotated factor loading matrix for Hg and other parameters measured from Ansan city during spring 2005.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Communalities
Hg	0.157	0.388	-0.437	0.366
SO <sub>2</sub>	0.316	0.364	0.526	0.509
PM10	0.403	-0.024	0.252	0.226
O <sub>3</sub>	-0.648	0.305	0.428	0.697
NO	0.807	0.143	0.068	0.676
NO <sub>2</sub>	0.873	0.261	-0.126	0.845
NOX	0.937	0.221	-0.025	0.928
CO	0.579	-0.275	0.531	0.693
WS	-0.469	0.359	0.383	0.495
Temp	-0.223	0.858	-0.128	0.803
% of Variance	36.0	14.6	11.8	
Eigenvalue	3.602	1.455	1.181	

주인자로 나타났다. 이러한 분석을 계절별로 확대할 경우, 봄철 주간대나 겨울철 야간 대 등을 제외하고 일관성 있게 발견되었다.

#### 4. 결 론

국내에서 가장 대표적인 공단지역이라고 할 수 있는 반월공단을 대상으로 대기 중 수은의 분포특성을 파악하고자 하였다. 이러한 조사목적을 달성하기 위해, 2005년 3월에서 5월까지 봄철기간 동안 안산시 원시동 지역에서 수은의 농도를 시간단위로 연속관측을 실시하였다. 본 연구자료를 토대로 공단지역의 수은농도분포에 대한 평가를 시도하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 일반적인 예상과 같이 반월지역의 수은농도는 6 ng m<sup>-3</sup>를 초과하는 수준으로서 국내의 일반적인 청정지역에서 발견하는 3 ng m<sup>-3</sup> 전후, 서울과 같은 도심환경

권역에서 나타나는  $5 \text{ ng m}^{-3}$  수준과는 뚜렷하게 구별되었다. 특히 임의의 배출원이 기능할 경우, 수은의 농도는 일상적인 수준을 수 십배 이상 초과하는  $100 \text{ ng m}^{-3}$  를 초월하는 수준의 농도도 간헐적으로 관측되었다. 그러나 이와 같이 특정한 기간 대를 제외하면, 대체로 평균농도에 가까운 일정한 수준의 농도분포를 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 봄철 3개월 기간 동안 연속으로 수은의 거동을 관측하였다는 점을 감안하여, 일주기, 월주기 등으로 자료를 주기 별로 분류하여 농도분포의 특성을 비교하였다. 24시간을 기준으로 일주기의 변화를 분석한 결과에 따르면, 일반적인 경향과 달리 오후 시간부터 이른 저녁시간까지 지속적으로 고농도가 유지되는 경향을 보였다. 이러한 현상은 도심 대기 질에서 수은의 분포를 조절하는 인자들과 공단지역의 인자들 간에는 어느 정도 차이가 존재할 수 있음을 시사한다. 특히 상관분석이나 요인분석과 같은 통계적인 방식으로 수은의 농도변화에 영향을 미치는 주요 인자들의 관계를 분석해 보았다. 그 결과에 의하면, 수은의 농도가 일부 질소산화물들의 농도분포와 어느 정도 연관성을 가지는 것으로 나타났다. 그러나 전반적으로 기준에 대도시를 중심으로 연구한 결과에서 기준성 대기오염물질들과의 밀접한 관계를 시사하는 경향을 보였던 것과 달리, 안산지역의 결과는 독립적인 경향성을 보이는 것으로 나타났다. 본 연구는 공단지역을 대상으로 수은의 농도분포를 최초로 측정하였다. 현재의 연구는 봄철 기간 동안 제한적으로 관측한 결과에 국한되기 때문에, 기존의 선행연구에서 장기적으로 분석한 결과로부터 경향성을 확인하는 것과는 어느 정도 차이가 난다. 그러나 현재의 연구결과에 의하면, 공단지역의 대기 중 수은은 일반적인 도심환경권에서 거의 일정한 수준으로 나타나는 수은의 농도수준보다는 어느 정도 구분이 이루어질 수 있을 정도로 배출원의 종류나 강도가 다르게 작용할 것이란 점을 추정케 한다.

## 감사의 글

본 연구의 수행을 지원한 극지환경연구소 (Korea Polar Research Institute, KORDI)의 연구사업 (Grant PP06010)에 감사 드리는 바이다.

## 참고문헌

- Schroeder, W. H. and J. Munthe, *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 809-822.
- Slemr, F and H.E. Scheel, *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 845-853.
- Blanchard, P, F.A. Froude, J. B. Martin, H. Dryfhout-Clark, and J.T. Woods, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 3735-3743.
- Fitzgerald, W. F., *Water, Air and Soil Pollution*, **1995**, 80, 245-254.
- Hall, B., *Water, Air and Soil Pollution*, **1995**, 80, 301-315.
- Kim, K.-H. and M.-Y., *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 3153-3165.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim, *Atmospheric Environment*, **2000**, 34, 3337-3347.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim, *Atmospheric Environment* (submitted).
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35(1), 49-59.
- Kim, K.-H., M.-Y. Kim, J. Kim, and G. Lee, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36(21), 63-77.
- Kim, K.-H., Jeon, E.-C., Choi, Y.-J. and Koo, Y.S., The emission characteristics and the related malodor intensities of gaseous reduced sulfur compounds (RSC) in a large industrial complex, *Atmospheric Environment*, **2006**, In Press.
- Nadim, F., C. Perkins, S. Liu, R.J. Carley, and G.E. Hoag, *Chemosphere*, **2001**, 45, 1033-1043.
- Ebinghaus, R., H.H. Kock, A.M. Coggins, T.G. Spain, S.G. Jennings, and C. H. Temme, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 5267-5276.
- Lee, D. S., Dollard, G. J., and Pepler, S., *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 855-864.