Jour. Korean Earth Science Society, v. 22, no. 6, p. 480–490, December 2001

2001년 봄철 황사기간 중 서해안지역에서 관측한 대기 중 수은의 환경유동특성 연구

김민영[1] · 신재영[1] · 조석주[1] · 김 준[2] · 이강웅[3] · 김기현[4,*]

[1]서울시 보건환경연구원
[2]연세대학교 대기과학과,
[3]한국외국어대학교 환경학과,
[4]세종대학교 지구정보과학과, 143-747 서울시 광진구 군자동 98

Environmental Mobilization Characteristics of Total Gaseous Mercury in the Western Coast of Korea During the Yellow Sand Period, 2001

Min-Young Kim[1] · Jae-Young Shin[1] · Suk-Choo Cho[1] · Joon Kim[2]
Gangwoong Lee[3] · Ki-Hyun Kim[4,*]

[1]Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment
[2]Department of Atmospheric Science, Yonsei University
[3]Department of Environmental Sciences, Hankook University of Foreign Studies
[4]Department of Geoinformation Sciences, Sejong University

Abstract: The soil-air exchange processes of Hg were investigated from the Hari area of Kang Hwa Island during the late March 2001. In the course of our study, we determined the concentration gradients of Hg and combined these gradient data with micrometeorological components to derive its fluxes. Results of our study indicate that the concentration levels of Hg in the study area are notably lower than those typically found in urbanized areas of Korea. However, the computed fluxes were seen to be significantly larger for relatively remote areas, reaching over 200 ng/m^2/hr. Comparison of environmental conditions shows that the concentrations of most pollutant species including NO_x and PM were significantly higher during emission, while meteorological conditions were characterized by high temperature and low humidity. Results of correlation analysis also indicate that such pollutants as hydrocarbons, nitrogen oxides, and PM generally exhibit strong positive correlations with Hg-related parameters during emission events, while such relationships were reversed during dry deposition events. The results of our present study suggest the possibility that the concentrations and fluxes of total gaseous Hg observed during deposition events can be influenced by the processes that are also important for the fine, rather than coarse, size fraction of particles.

Key words: regional background, soil-air exchange, emission, dry deposition, mercury

요 약: 2001년 3월말 기간을 중심으로 강화도 하리지점에서 대기 중 수은의 토양-대기간 교환율의 측정을 시도하였다. 본 연구에서 수은의 농도구배를 측정하고 이를 미기상학적 인자와 결합하는 방식으로 수은의 플럭스값을 산축하였다. 본 연구의 결과에 따르면, 강화지역의 수은 농도는 일반적으로 도심환경에서 발견되는 수준보다는 현저하게 낮은 수준인 것을 확인할 수 있었다. 그러나 측정된 플럭스값은 200ng/m^2/h에 근접하여 일반적으로 청정한 환경에서 발견되는 수준을 훨씬 초과하는 것으로 나타났다. 연구기간 동안 관측된 주요 환경변수들의 분포경향을 비교해 보면, NOx와 PM 등을 포함하는 대부분의 변수들은 배출시의 농도가 침적시의 농도에 비해 높게 나타났다. 반면 기상학적 요인들은 이러한 경향성이 고온 또는 저습도에서 뚜렷하게 확인되었다. 상관분석의 결과에 따르면, 배출시에 대부분의 오염인자들이 수은과 강한 양의 상관성을 보여주었지만, 침적시에는 그러한 경향이 역전되는 것으로 나타났다. 특히 흥미로운 사실은 침적시에 수은관련 변수들은 미세입자와 어느 정도 연계성을 띠는 것을 확인시켜 주었다.

주요어: 지역배경, 토양-대기간 교환율, 배출, 침적, 수은

*E-mail: khkim@sejong.ac.kr

서 론

대기-지표면간에 오염물질이 교환되는 현상을 연구하는데 있어, 수은과 같이 휘발성이 강한 중금속 성분은 여러 가지 중요한 의미를 지니고 있다. 일단 이들의 플럭스를 측정하는 방식이 전통적인 챔버형에서 탈피하여, 보다 기술적으로 진일보된 미기상학적 기법을 응용하기 시작한 것은 불과 지난 수년이래의 발전상황이다(Kim *et al.*, 1995; Lindberg *et al.*, 1995). 그러나 이와 같은 상황의 전개는 여러 가지 기술적인 제약을 극복하므로서 가능하였다. 대체로 이 때까지 미기상학적 기법의 응용이 이산화탄소나 수증기와 같은 일반적인 성분들의 순간적인 농도변화를 파악할 수 있는 순간센서(fast sensor)의 활용과 이에 기초한 에디공분산 방식 등의 응용에 주력해 왔다. 반면 이러한 기술의 직접적인 응용이 불가능한 수은과 같은 극미량성분에 대한 플럭스의 관측은 보다 변형된 방식의 도입이 불가피하였다. 이와 같은 사실은 pg(picogram = 10^{-12}g) 대의 수은을 정밀하게 감지할 수 있는 계측장비의 개발에도 불구하고, 대기 중에서 수 ppt 이하의 수준으로 존재하는 수은의 농도변화를 정밀하게 계측하는데는 최소한 수십분 정도의 시간이 요구된다는 기술적인 제약이 반영된 결과라고도 할 수 있다. 그러나 이러한 기술적인 문제는 "수직적인 방향으로 진행되는 스칼라양의 교환에는 차이가 없다"는 원리에 기초한 "변형 보웬기법 (modified Bowen Ratio(MBR) method)"과 같은 방식의 적용을 통해 상당 수준 이상으로 극복하는 것이 가능하였다 (Meyers *et al.*, 1996).

수은과 같은 미량성분의 플럭스관측에 미기상학적 기법의 응용이 성공적으로 이루어질 수 있다는 사실의 확인에도 불구하고, 아직까지 이러한 기법의 응용은 비교적 제한적으로 시도되고 있다. 미국 테네시주의 청정지역(Kim *et al.*, 1995) 및 대규모 토양오염지역(Lindberg *et al.*, 1995), 캘리포니아 주의 광산지역을 위시한 여러 비교대상지역에 대한 연구(Gustin *et al.*, 1996) 등이 국외지역을 중심으로 발표된 바 있다. 이러한 국외지역의 추세와 유사하게 국내에서도 이러한 연구가 최근들어 어느 정도 활성화되고 있는 실정이다. 예를 들어, 서울의 도심이나 난지도지역을 중심으로 수은의 농도분포특성이나 교환율실측에 대한 연구결과들이 보고된 바 있다(Kim and Kim, 1999; Kim *et al.*, 2001). 그러나 국내에서 시도된 기존 연구들은 주로 인위적 오염원의 영향에 직접적으로 노출된 상황들을 대변하기 때문에, 배경대기에서 이루어지는 수은의 환경거동을 설명하는데 상당히 제약적이다.

2001년 3월 후반 기간(2001. 3. 20 ~ 27)에 국내에서 활동하는 다수의 미기상학 분야의 연구자들에 의해 "강화도지역을 중심으로 한 플럭스 동시관측사업"을 시도하였다. 본 연구진은 대기-지표면간 수은의 교환현상에 대한 DB의 지속적인 확장을 위한 노력의 일환으로 본 사업에 참여하게 되었다. 비록 본 연구가 제한된 기간동안 이루어지기는 하였지만, 보다 더 큰 관점에서 보면, 본 연구기간은 제주도 고산과 같은 수퍼싸이트(super site)를 위시한 범아시아권역의 네트워크망을 통해 시도된 ACE-ASIA project의 집중연구기간(2001년 3 ~ 4월)에 포함되기도 한다. 따라서 이러한 국제적 연구사업과 자료의 공유체제를 확보하고자 하는 부분도 본 연구사업의 부수적 목적에 해당한다(참고로 ACE-ASIA 연구사업은 다수국가의 연구진들이 참여하여, 아시아권역에서 발생하는 에어로솔들이 지구환경의 변화에 미치는 영향을 집중적으로 연구하고 규명하자는데 그 목적을 두고 있다.). 또한 본 연구는 강화도라는 비교적 청정한 대기질이 유지될 것으로 기대되는 사이트를 선정하여 집중분석을 수행하므로서, 수은과 관련된 국내 연구 중에서도 (특히 도심권과 같이 인위적 오염원의 영향권에 종속된 지점을 대신하여) 지역적 배경대기환경권역에서 수은의 환경유동특성을 관측한 드문 연구사례로 규정할 수 있다.

연구 방법

연구대상지역의 특성

본 연구는 강화도 하리지역을 중심으로 이루어졌다. 연구대상인 강화도는 서해안에 인접한 도서지역이고, 더욱이 측정지점인 하리는 주변 지역에 특정한 인위적 오염원이 존재하지 않는다. 실제 관측은 미기상학적 측정이 용이한 하리지역의 광활한 농경지를 중심으로 이루어졌다. 본 연구기간 중 수은의 환경거동을 설명하는데 긴요한 주요 기상인자 및 환경변수들에 대한 계측은 이동차량에 탑재된 장비를 통해 현장실측하였고, 이들 변수에 대한 거동양상은 Table 1에 간략하게 요약하였다. 전체 실험기간 중의 시간별 풍향의 발생빈도를 비교한 결과에 의하면, 전체적으로

Table 1. A statistical summary of basic environmental parameters determined concurrently during the whole study period.

(A) The concentrations of both gaseous and particulate pollutants (B) Basic meteorological parameters

	SO_2 ppb	NO ppb	NO_2 ppb	NO_x ppb	CH_4 ppm	NMHC ppm	THC ppm	O_3 ppb	CO ppm	PM2.5 μg m^{-3}	PM10 μg m^{-3}	TEMP °C	UV MJ m^{-2}	RH %	WS m s^{-1}
Mean	2.55	2.18	7.34	9.51	1.67	0.49	2.14	40.9	1.66	132	274	6.50	0.04	46.0	3.57
Median	2.00	1.00	5.00	6.00	1.65	0.38	1.99	41.0	0.30	110	217	6.35	0.00	44.0	2.95
SD	2.33	2.36	7.71	9.65	0.08	0.34	0.38	12.4	3.48	87.4	233	4.15	0.06	19.0	2.54
Min	1.00	1.00	1.00	2.00	1.44	0.09	1.61	18.0	0.00	34.0	42.0	−1.60	0.00	18.0	0.10
Max	14.0	15.0	47.0	62.0	2.25	1.96	3.57	74.0	21.2	476	1244	16.5	0.23	94.0	11.2
N	164	164	164	164	165	165	165	167	167	164	164	168	168	168	168

실험기간 중 계절풍의 종관패턴과 같이 북풍이 주를 이루었다는 것을 알 수 있었다. 그러나 이들 자료를 다시 주야간대로 분리하면, 낮시간대에는 북서 그리고 밤시간대에는 북동방향이 상대적으로 많은 발생빈도를 보였다.

측정이 이루어진 전체 기간중, 상당한 기간동안 황사현상이 관측되었다. 실험의 첫날인 3월 20일에 짧게 발견된 후, 21일에 다시 관측되었다. 그리고 22일에 다시 나타나 3월 25일까지 연속적으로 관측되었다. 개략적으로 전체 실험기간의 60% 이상의 시간대에서 황사현상이 발현한 것으로 나타났다. Table 1에 제시된 바와 같이 전체기간 중 시간대별 평균풍속은 3.57±2.54m s^{-1}(범위: 0.1 ~ 11.2m s^{-1}, N = 168)로 기록될 만큼 강한 풍속이 유지되었다. 그리고 기간 중 황사현상이 빈번하게 발생한 영향으로 인해, 관측된 분진시료의 매시간대별 연속분석결과도 PM2.5와 PM10의 시간평균치가 각각 132와 274μg m^{-3}를 기록할 정도로 대단히 높은 수준이 유지되었다는 것을 알 수 있다.

수은의 농도와 농도구배 측정

강화도 하리지역의 광활한 평야지역을 중심으로 대기 중 수은의 농도구배 및 미기상학적 인자들에 대한 측정을 2001년 3월 20일부터 27일까지 8일간 매시간 간격으로 수행하였다. 수은의 농도, 농도구배, 플럭스의 측정은 기본적으로 이미 난지도를 중심으로 한 선행연구(Kim and Kim, 2000a, b, c; Kim *et al.*, 2001)의 관측방식을 준용하였다. 토양 상층부의 대기중에 형성되는 수은의 농도구배와 플럭스를 측정하기 위해, 지표면으로부터 1과 5m 높이에서 매시간대별(24시간 연속으로) 총 164회에 걸쳐 측정을 수행하였다. 각각의 높이를 대표하는 농도의 측정은 Nippon Instrument Co.가 제작한 순간자동측정기 Mercury Analyzer, AM-2 모델 2대를 동시에 가동하여 실시간 동시측정을 시도하였다. 본 기기는 내장된 유량조절계에 의해 약 1.0l/min의 유속으로 공기시료를 흡입하여, 기기 본체와 연결된 흡 · 탈착장치를 이용하여 수은시료를 연속적으로 분석하였다. 기기의 채취부로부터 50여분 동안 흡착이 이루어진 수은은 나머지 10여분의 기간동안 자동적으로 탈착시스템에서 탈착되고, 건조공기를 carrier gas로 사용하는 비분산형 이중빔식(nondispersive double beam) 비플레임화 원자흡광분석기(flameless atomic absorption method)에 의해 253.7nm의 wavelength에서 검출되었다. 본 기기에 의한 수은의 절대검출한계는 약 1pg대로서, NBS standard 1632a, 1568, 1575 등에 대비한 절대정밀도(accuracy)는 약 3 ~ 5%(세가지 표준물질의 평균)를 유지하였다. 1, 2, 3ng대의 증기상태의 표준시료를 5회씩 기기에 직접 주입하는 방식으로 반복분석하여 정밀도(precision)를 분석한 결과(relative standard error(RSE = SE*100/Mean) 값으로), 2대의 AM-2 기기는 평균 0.35 ~ 0.64% 범위의 오차를 보였다. 보다 현실적으로 실험실내의 표준시료대신 현장의 공기시료를 가장 현장조건에 가깝게 흡착관으로 채취하여 실험분석한 결과, 약 1% 내외의 정밀도를 유지하는 것으로 확인되었다.

미기상학적 기법의 적용

두 높이에서 측정된 오염물질의 농도구배로부터 플럭스를 산출하기 위해서는 오염물질의 수송에 관여하는 난류 교환 계수(K)를 산정하는 것이 필요하다. 그런데 스칼라간의 난류 수송 기작이 같다고 가정하면, 열에 대한 난류교환계수(K_H) 등을 계산하면, 수은의 플럭스를 추정하는데 활용할 수 있다. 본 연구기간 중 수은의 농도구배 측정 지점으로부터 100m 이내의 거리에 10m 높이로 설치한 4개의 타워에서 풍속, 온도, 현열, 잠열, 이산화탄소, 운동량 플럭스 등을 에디공분산 방법으로 측정하였다. 관측 장소는 수평적으로 균일하다고 가정할 수 있으므로, 10m 타워에서

산출된 난류 교환 계수를 수은의 플럭스 산출에 이용하였다.

10m 타워에서의 관측은 1, 3, 6.4, 9m를 포함하는 4개의 높이에서 플럭스산출과 관련된 변수들의 측정이 이루어졌다. 수은의 농도구배가 관측된 1~5m 높이의 열에 대한 평균 난류 교환계수를 추정하기 위해, 다음과 같이 3m에서 관측한 현열 플럭스를 동시에 두 개의 고도, 6.4와 1m에서 구한 평균 온도들과의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$K_H/K_M = K_{Hg}/K_M = \Phi_m/\Phi_H,$$

여기서 H, M, Hg는 각각 현열, 모멘텀, 수은에 해당한다. 이 때, 현열 플럭스 및 온도는 초음파 풍속계로부터 측정된 값을 사용하였다. 이러한 방법은 간단하지만, 1~6.4m층의 열에 대한 평균 난류 계수가 1~5m층을 대표하는 값을 과대평가할 수 있고, 3m는 두 지점의 기하학적 평균($\sqrt{(1\times6.4)} = 2.53$) 보다 높기 때문에 다소 정확성이 결여될 수 있다. 따라서 이보다 정확한 교환 계수를 도출하기 위해, "운동량에 기초한 난류 교환 계수(K_M)"를 추가적으로 활용할 수 있다. 운동량에 기초한 방법은 모닌-오브코프 상사법칙(Monin-Obukhov similarity theory: M-O 법칙)이 만족된다는 가정 하에, 열에 대한 난류 교환 계수와 운동량에 대한 난류 교환 계수의 관계를 고려한다. 이러한 방법을 응용하여 간접적으로 K_H를 산출하고, 첫 번째 방법으로 산출한 방식과 비교하여 정확한 값을 산출하는 데 활용할 수 있다.

M-O 법칙이 만족된다는 전제하에서, K_M과 K_H간에는 다음의 관계식이 성립한다(Kaimal and Finnigan, 1994).

$$\Phi_m = (1 + 16|z/L)^{-1/4}, \quad -2 \le z/L \le 0$$
$$(1 + 5\ z/L), \quad 0 \le z/L \le 1$$
$$\Phi_H = (1 + 16\ z/L)^{-1/2}, \quad -2 \le z/L \le 0$$
$$(1 + 5\ z/L), \quad 0 \le z/L \le 1.$$

위의 관계를 이용하면, 2, 4, 5m에서 KH를 추정할 수 있으며, 직접 관측된 1과 3m 값과 함께 산술 평균하면, 1~5m층을 대표하는 평균 K_H를 추정할 수 있다. 여기서 z(m) 측정 높이, L(m)은 M-O 길이이다.

이를 위해 우선 $K_H = ku_*z/\Phi_H$의 관계를 계산한다. 여기서 본 칼만상수(Von Karman constant), k = 0.4, $u_*(ms^{-1})$ 마찰속도, z = 측정 높이이다. 이를 이용하면 2, 4, 5m에서의 u*로부터 K_H를 구할 수 있다. u_*는 1, 3, 6.4, 9m의 4고도에서 직접 관측된 값으로 회구식을 이용하여 2, 4, 5m에서의 값을 추정하여 사용하였다. L 값 역시 네 지점에서 실측한 값을 이용하여 회귀식으로 추정하여 사용하였다. 따라서 $-2 \le z/L \le 1$인 경우, 세 높이(2, 4, 5m)에서의 K_H를 추정할 수 있다. 이를 바탕으로 첫 번째 방법으로부터 구한 값과 비교해보면

$$K_H(\text{the 2nd method}) = 0.52K_H(\text{the 1st method}) + 0.16,\ r^2 = 0.72$$

1~5m층에 대한 평균 K_H를 산출하기 위해 1과 6.4m의 양고도에서 관측한 온도와 3m의 현열 플럭스를 이용할 경우(첫 번째 방법), 1~5m층의 5지점에 대해 직/간접적으로 산출된 평균 K_H를 약 20~30% 정도 플럭스가 과대평가될 수 있음을 의미한다.) 두 번째 방법의 경우, 1~9m 사이의 u_*의 차이는 7%(이웃한 두 지점간의 차이는 4% 이내) 이내, L의 차이는 7~22% 이내이다. 비록 상대적으로 L의 차이가 크지만, 이웃한 관측 지점에서의 차이는 평균적으로 10%, 이내이다. 따라서 M-O 법칙이 만족된다면, 두 번째 방법으로 K_H를 구하는 것이 불확실성을 줄여줄 수 있다. 또한 난류 교환 계수는 높이에 비례하기 때문에, 가급적 농도가 측정되는 층에서 평균 난류 교환 계수를 추정하는 것이 중요하다. 첫 번째 방법이 1~6.4m층에 대한 평균 K_H 값이란 점을 감안하면, 1~5m층에 대한 평균 K_H 값보다 커지게 된다.

농도구배의 검정

수은의 교환현상은 지상으로부터 대기로의 배출(+) 또는 대기로부터 지상으로 건조침적(-)과 같이 수직적인 방향성을 부여할 수 있다. 따라서 교환현상의 방향을 관측이 이루어진 양고도간 농도차이의 양(+)·음(-) 유무를 기준으로 활용하여 배출이나 건조침적으로 구분할 수 있다. 그런데 본 연구에서 발견되는 미세한 농도차이(또는 농도구배)를 기준으로 방향성을 설정한다는 것이 얼마만큼 의미가 있는 가를 검정하는 것이 중요하다. 이를 검정하기 위한 한 가지 방편으로 본 연구진은 선행연구에서 다음과 같은 접근방식을 활용하였다(Kim and Kim, 1999). 우선 1차적으로 '농도구배의 % 값'을 계산하였다.

$$\text{Percent gradient (PG)} = \{|\Delta C_{Hgo}|/C_{Hgo}\ (\text{Lower height of 1 m})\} \times 100$$

여기서 C_{Hgo}와 $C_{Hgo}(1m)$은 각각 1과 5m, 두 고도간 수은농도의 차이 및 하층(1m) 고도의 농도를 의미한다. 이를 측정방식에 내재된 정밀도와 비교하는 방식으로 방향성의 신뢰도를 평가할 수 있는 간접적인 기준으로 활용하였다(Kim and Kim, 1999). 그 결과, 배출시 PG의 평균과 표준편차는 16.6 ± 8.9%(범위: 0.74 ~ 43.7%, N = 129)로 나타났다. 반면 건조침적의 경우 평균과 표준편차는 12.0 ± 9.6%(범위: 0.79 ~ 36.3%, N = 31)로 나타났다. 배출 및 건조침적에 대한 PG 값의 빈도분포를 비교한 결과, 방향성에 상관없이 대부분의 농도자료가 상당히 높은 농도구배 퍼센트값을 취하고 있다는 것을 알 수 있다. 그런데 실제로 표준시료를 이용하여 채취 및 분석에 사용된 측정기기의 상대정밀도를 계산하면, 1% 수준을 유지한다. 만약에 각각의 고도에서 최대 1%의 오차가 있다면, 양 고도의 농도구배에서 나타날 수 있는 최대 오차는 대략 2%를 넘지 않을 것이다. 따라서 양고도간의 농도차를 기준으로 계산하는 농도구배의 신뢰성을 검정할 수 있는 개략적인 기준으로 PG 값 2%를 설정할 경우, 배출자료의 총 95%(총 129개 자료 중 123개)와 건조침적자료의 90%(총 31개 자료중 28개)에 대한 수직적인 방향성의 부여는 유의한 것으로 볼 수 있을 것이다.

결 과

본 연구에서는 강화도 하리지역을 중심으로 2001년 3월말 시점의 8일간에 걸쳐 수은의 농도 및 농도구배를 시간대별로 관측하였다. 관측기간은 Table 1에 제시된 바와 같이, 일반적인 봄철 기상특성과 같이 비교적 낮은 평균기온과 평균습도가 지속되었지만, 반면 강한 황사의 빈번한 발현과 함께 높은 풍속과 고농도의 분진이 상시 관측되었다. 이러한 환경적 영향이 수은의 농도관측에도 상당 수준 영향을 미쳤으리라는 것을 짐작할 수 있다. 본 연구자료에 대한 세부적인 해석을 통해 이러한 연계성의 정도를 어느 정도 자세하게 진단할 수 있었다.

관측자료는 배출과 건조침적으로 각각 구분한 후 농도, 농도구배, 플럭스에 대한 해석을 개별적으로 또는 연계하여 해석하였다. 배출의 빈도가 건조침적에 비해 월등히 우월하다는 점을 감안하여, 배출을 중심으로 전체적인 수은자료의 시간적 경향성을 파악하는 것도 의미가 있을 것으로 보인다. Fig. 1에는

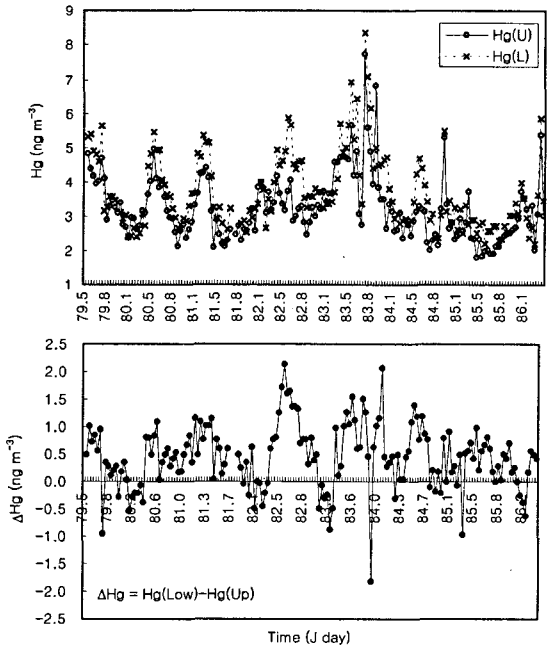

Fig. 1. Temporal variabilities of Hg concentration and concentration difference between two heights measured during the whole study period. Julian day 79 corresponds to 20 March 2001.

매 시간별로 관측된 수은의 농도(하층 1m 기준), 농도구배, 교환율을 시간의 함수라는 관점으로 비교하였다. 수은자료의 시간적인 경향성을 분석한 결과, 하단을 기준으로 최대농도(8.35ng/m^3)는 3/24일 17시, 농도구배의 최대치(2.14ng/m^3)는 3/23일 13시에 나타났다. 제한적으로 산출된 플럭스의 경우, 3/22일 10시에 최고값인 562ng/m^2/h이 나타났다. 건조침적의 경우, 자료의 수가 훨씬 제한적이다. 시간에 따른 건조침적의 경향성은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 단 건조침적의 경우, 하층에 비해 상층 농도의 경향성을 파악하는 것이 중요하다. 이를 감안하여, 상층의 농도, 농도구배, 플럭스를 시간의 함수로 제시하였다. 건조침적은 실험 첫날인 3월 20일 18시경부터 발견되었다. 그리고 3/21일에는 3시부터 9시까지 총 6회나 집중적으로 발견되었다. 그리고 다시 3/22일 21시부터 3/23일 7시까지, 3/24일 자정 이후, 3/25일 저녁 시간대 등 총 31회에 걸쳐 발견되었다. 이처럼 건조침적은 짧은 기간동안 집중적으로 발생하는 경향성이 강하게 확인되었다. 침적관련 자료의 시간대별 최대농도(6.84ng/m^3) 및 농도구배(−1.82ng/m^3)는 모두 3/24일 21시에 발견되었다. 전체적으로 황사가 나타난

시간이 약 60% 이상 지속되었기 때문에, 황사의 간접적인 지표인 분진의 농도와 수은의 농도 또는 플럭스간에서 직접적인 연관성을 확인하는 것은 쉽지 않았다.

농도구배의 산출이 가능하도록 양 고도에서 동시에 관측이 이루어진 164회의 측정 중, 상하고도에서 동일한 농도값이 관측되어 교환의 방향을 설정할 수 없는 경우가 4회 발생하였다. 따라서 수직방향의 교환현상이 확인된 160회의 측정만을 분리하면, 배출이 129회(80.6%), 건조침적이 31회(19.4%)로 배출이 압도적으로 지배적인 경향이란 것을 확인할 수 있었다. 이렇게 산출된 농도구배를 난류교환계수와 연계하여, 플럭스 자료를 산출하는데 사용하였다. 그런데 플럭스의 경우, 관측시스템의 문제로 인해 3월 21일 14시에서 3월 23일 6시까지 32개의 자료를 산출하는데 국한되었다. 플럭스가 관측된 32개의 자료는 다시 30회(93.7%)가 배출, 2회(6.3%)가 건조침적으로 구분되었다. 침적플럭스의 경우, 극도로 제한적인 2회의 자료만 산출되어 통계적으로 의미있는 자료를 구할 수 없었다.

Table 2. A statistical summary of Hg related parameters which include concentration, concentration gradient, and fluxes measured at Kang Hwa island during March 2001.

A. Hg-related					
	ΔHg^1 ng m^{-3}	$Hg(L)^2$ ng m^{-3}	$Hg(U)^3$ ng m^{-3}	K^4 m^2 s^{-1}	$Flux^5$ ng m^{-2} h^{-1}
A. All data					
Mean	0.45	3.72	3.26	0.42	196.95
Median	0.49	3.40	3.12	0.44	178.18
SD	0.59	1.10	0.93	0.18	150.23
Min	−1.82	2.21	1.82	0.07	−12.72
Max	2.14	8.35	7.72	0.76	562.34
N	164	164	166	36	32
B. Upward emission					
Mean	0.67	3.89	3.21	0.45	211
Median	0.60	3.58	2.98	0.46	187
SD	0.43	1.15	0.96	0.16	145
Min	0.03	2.21	1.82	0.10	14.9
Max	2.14	8.35	7.72	0.76	562
N	129	129	131	33	30
C. Downward deposition					
Mean	−0.38	3.07	3.45	0.11	−9.17
Median	−0.28	3.05	3.23	0.11	−9.17
SD	0.37	0.57	0.82	0.06	5.03
Min	−1.82	2.39	2.49	0.07	−12.7
Max	−0.03	5.02	6.84	0.16	−5.61
N	31	31	31	2	2

*Superscripts 1 through 5 denote Hg concentration gradient, Hg concentration at lower level (1 m), Hg concentration at upper level (5 m), turbulent transfer coefficient used for the derivation of flux, and Hg fluxes, respectively.

Table 2에 제시된 바와 같이 관측된 농도, 농도구배, 플럭스자료의 기본적인 통계치를 보다 엄밀하게 확인해 보면 대략 다음과 같다. 배출이 관측된 총 129개의 자료만을 분리해 볼 경우, 수은의 농도는 하층(1m)에서 관측한 3.89 ± 1.15ng/m^3(범위: 2.21 ~ 8.35ng/m^3), 상층(5m)에서 3.21 ± 0.96ng/m^3(범위: 1.82 ~7.72ng/m^3)로 나타났다 . 단순히 평균값의 크기만을 비교해도, 양고도간에 상당한 차이가 존재하는 것을 알 수 있다. 반면 건조침적이 관측된 31개 자료의 경우, 하층의 농도가 3.07 ± 0.57ng/m^3, 상층의 농도가 3.45 ± 0.82ng/m^3로 나타났다. 다시 배출발생시 시간대별로 발견된 농도구배값을 이용하여 평균을 계산하면, 0.67 ± 0.43ng/m^3로 나타났다(N = 129). 총 발생빈도가 배출에 비해 현격하게 떨어진 건조침적의 경우, 농도구배의 평균치는 −0.38 ± 0.37ng/m^3(N = 31)로 나타났다. 그리고 배출 및 건조침적으로 구분된 160개의 자료 중에서 최종적으로 플럭스가 산출된 자료만을 보면, 배출 및 건조침적에 대한 플럭스의 평균치는 각각 211 ± 145ng/m^2/h(N = 30)와 −9.17 ± 5.03ng/m^2/h(N = 2)로 나타났다. 단순히 구배나 플럭스자료의 비율분포만을 감안해서 비교해 보면, 플럭스의 경우 상대적으로 침적경향을 보인 자료의 유실이 큰 것으로 추정되었다. 이러한 제한성을 감안하여, 수은의 수직적인 교환현상과 관련된 자료의 해석은 주로 농도구배를 위주로 시도하고, 플럭스값은 보조적으로 활용하였다.

토 론

측정이 이루어진 시점은 황사가 집중적으로 발생한 봄철의 짧은 기간동안에 집중되어, 측정지점을 중심으로 한 수은의 환경거동을 대표성있게 설명하는데는 어느 정도 제한이 따를 것으로 보인다. 그러나 본 연구는 상대적으로 수은의 환경거동과 관련된 정보가 부족한 국내 상황을 감안할 때, 강화도와 같이 비교적 청정한 대기질을 유지할 것으로 예상되는 지역에 대한 농도분포나 교환현상의 추이를 설명할 수 있는 기초 자료를 제시한다는 점에서 나름대로 큰 의의를 지닐 것으로 사료된다. 일단 기존에 많은 연구가 행

해진 지역들에 대한 결과를 보면, 강화지역에서 발견된 농도분포의 절대적 또는 상대적 의미를 고찰할 수 있다. 비교적 최근에 집중적인 관측이 이루어진 서울시내 주요 도심인 한남지역(Kim and Kim, 2001a) 또는 주거지역인 양재지역(Kim and Kim, 2001b) 등에서는 거의 일관성있게 5ng m^{-3}를 약간씩 상회하는 높은 수준의 농도가 관측되었다. 마찬가지로 산악지점을 포함한 여타 국내지점에서도 이에 근사한 농도수준인 것으로 나타나, 대부분의 내륙지점에서는 5ng m^{-3}를 초과하는 수준의 농도가 보편적인 것으로 보고된 바 있다(Kim and Kim, 2001c). 이러한 점을 감안할 때, 실험기간동안 강화도지역에서 관측된 3ng m^{-3}를 상회하는 수준의 관측결과는 연구지역의 농도분포가 최소한 도심지역 등에서 발견되는 수준보다는 현저하게 낮게 유지될 수 있다는 가능성을 시사한다. 그러나 이러한 농도수준도 여전히 북미 또는 유럽에서 발견되는 수은의 배경농도인 1 ~ 2ng m^{-3}에 비해서는 현저하게 높은 수준이다. 따라서 강화도지역의 농도가 국내지역의 대표적인 배경농도에 가까운 수준이라고 가정한다면, 우리 나라의 수은농도는 아직까지 국외지역에서 관측되는 것에 비해 훨씬 높은 상태란 것을 알 수 있다.

비록 실험기간 후반의 상당 부분에서 자료의 유실이 있었지만, 강화지역에서 관측된 수은의 플럭스는 수은의 수직적인 교환율의 크기나 규모를 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다. 배출의 경우, 평균 211 ± 145ng/m^2/h(N = 30)로 높은 수준을 유지하지만, 침적의 경우 상대적으로 20여배 이하에 달하는 −9.2 ± 5.0ng/m^2/h(N = 2)의 수준을 보였다. 이와 같은 낮은 침적률은 상대적으로 침적플럭스의 유실이 크게 나타나서 침적의 경향을 체계적으로 대표하지 못한데 따른 결과로 사료된다. 실제 전체적인 자료가 확보된 농도구배값을 비교해 보면, 배출시의 구배값인 0.67ng/m^3에 비해 두 배 정도 낮은 −0.38ng/m^3의 수준으로 나타났다. 이러한 사실에 근거해서 보면, 비록 배출보다 빈도는 낮아도, 그 강도는 개략적으로 두 배 정도 낮은 −100ng/m^2/h의 수준을 유지할 것으로 기대할 수 있을 듯 하다.

시간대별로 관측이 이루어졌다는 점을 감안하면, 수은의 농도 또는 농도구배 등이 24시간 규모의 단주기에서 어떠한 변화를 경험하였는 가를 확인하는 것이 가능하다. Figs. 2와 3에 제시된 농도나 농도구배의 일주기를 보면 대략 기존의 연구들에서 발견한 경향성과 유사한 결과를 확인할 수 있다. 농도의 경

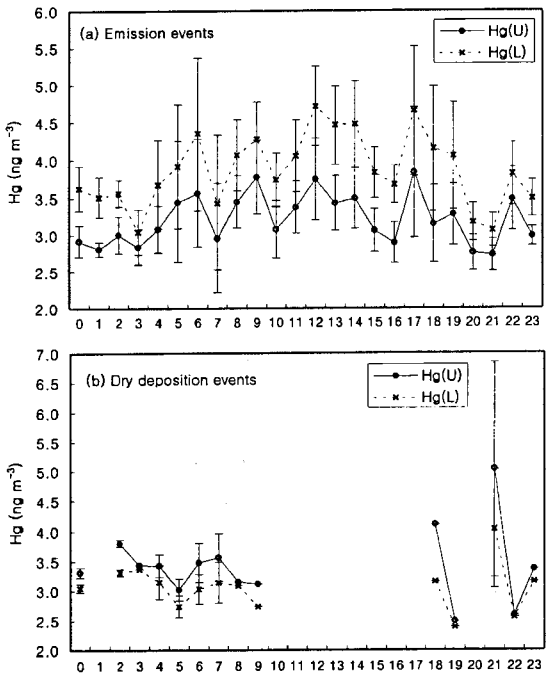

Fig. 2. Diurnal variabilities of Hg concentrations is compared for data sets after being divided into emission and dry deposition events.

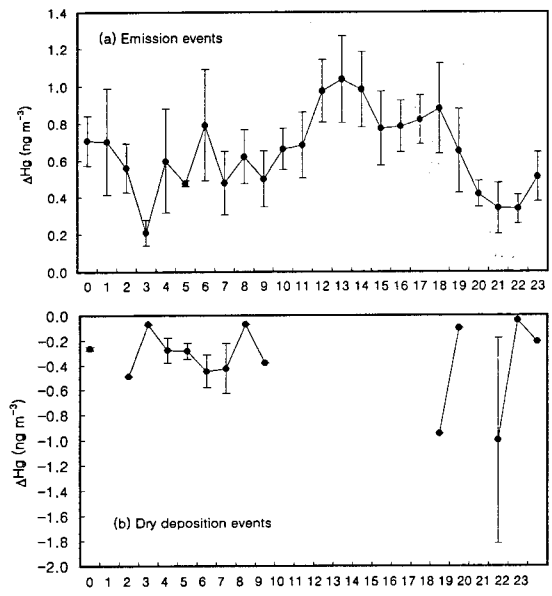

Fig. 3. Dirunal variabilities of Hg concentration gradients are compared for data sets after being divided into emission and dry deposition events.

Table 3. Results of correlation analysis between Hg-related parameters vs. all the relevant parameters determined during the whole study period. (For units, refer to Table 2)

Em data		ΔHg	Hg(L)	Hg(U)	Flux	SO_2	PM10	NO	NO_2	NO_x	CH_4	NMHC	THC	O_3	CO	UV	RH	WS	TEMP	PM2.5
ΔHg	r	1	0.576	0.235	0.778	0.306	0.108	0.350	0.447	0.442	0.389	0.402	0.468	0.156	0.053	0.339	−0.110	−0.067	0.332	0.307
	P	·	6.6E-13	7.3E-03	4.1E-0.7	4.6E-04	2.3E-01	5.4E-05	1.4E-07	0.2E-07	6.3E-06	2.8E-06	3.0E-08	7.7E-02	5.5E-01	8.3E-05	2.1E-01	4.5E-01	1.2E-04	4.7E-04
Hg(L)	r		1	0.930	0.190	0.502	0.036	0.467	0.629	0.615	0.345	0.607	0.658	0.243	−0.042	0.225	0.141	−0.291	0.394	0.234
	P		·	3.3E-19	3.2E-01	1.8E-09	6.9E-01	3.1E-08	5.4E-16	4.6E-15	7.2E-05	1.6E-14	2.2E-18	5.5E-03	6.4E-01	1.0E-02	1.1E-01	8.3E-04	3.8E-06	8.4E-03
Hg(L)	r			1	−0.135	0.458	−0.014	0.378	0.546	0.528	0.226	0.508	0.538	0.220	−0.090	0.121	0.224	−0.320	0.314	0.128
	P			·	4.8E-01	5.3E-08	8.8E-01	1.0E-05	1.9E-11	1.1E-10	1.0E-02	7.5E-10	4.5E-11	1.1E-02	3.1E-01	1.7E-01	1.0E-02	2.0E-04	2.6E-04	1.5E-01
Flux	r				1	0.010	0.435	−0.016	0.030	0.010	−0.380	0.028	0.009	0.080	0.072	0.153	0.075	0.281	0.043	0.320
	P				·	9.6E-01	2.1E-02	9.3E-01	8.8E-01	9.6E-01	3.8E-02	8.8E-01	9.6E-01	6.7E-01	7.0E-01	4.2E-01	6.9E-01	1.3E-01	8.2E-01	9.6E-02
SO_2	r					1	0.005	0.485	0.725	0.697	0.384	0.438	0.492	0.629	−0.004	0.404	−0.251	0.128	0.651	0.239
	P					·	9.5E-01	6.7E-09	3.4E-19	3.4E-19	6.9E-06	2.1E-07	3.3E-09	2.7E-16	9.7E-01	2.0E-06	4.1E-03	1.5E-01	4.7E-18	6.8E-03
PM10	r						1	0.175	0.115	0.135	−0.077	0.166	0.155	0.098	0.405	0.195	−0.015	0.300	0.313	0.885
	P						·	4.9E-02	1.9E-01	1.3E-01	3.8E-01	6.1E-02	8.1E-02	2.7E-01	1.9E-06	2.7E-02	8.6E-01	5.5E-04	3.0E-04	3.3E-19
NO	r							1	0.773	0.862	0.403	0.581	0.631	0.005	0.368	0.538	−0.333	−0.021	0.543	0.402
	P							·	3.1E-19	3.1E-19	2.1E-06	3.2E-13	2.0E-16	9.5E-01	1.7E-05	3.8E-11	1.1E-04	8.1E-01	2.2E-11	2.5E-06
NO_2	r								1	0.988	0.561	0.676	0.752	0.202	0.079	0.399	−0.224	−0.185	0.560	0.412
	P								·	3.1E-19	3.6E-12	3.3E-19	3.3E-19	2.1E-02	3.7E-01	2.6E-06	1.0E-02	3.5E-02	3.4E-12	1.3E-06
NO_x	r									1	0.547	0.682	0.755	0.163	0.153	0.450	−0.261	−0.153	0.580	0.428
	P									·	1.7E-11	3.3E-19	3.3E-19	6.4E-02	8.1E-02	7.7E-08	2.7E-03	8.3E-02	3.0E-13	4.8E-07
CH4	r										1	0.251	0.445	0.078	0.107	0.331	−0.265	−0.121	0.246	0.193
	P										·	4.0E-03	1.1E-07	3.8E-01	2.3E-01	1.2E-04	2.4E-03	1.7E-01	4.8E-03	2.9E-02
NMHC	r											1	0.972	0.108	0.064	0.213	−0.063	−0.200	0.368	0.330
	P											·	3.1E-19	2.2E-01	4.7E-01	1.5E-02	4.7E-01	2.2E-02	1.6E-05	1.4E-04
THC	r												1	0.117	0.092	0.250	−0.098	−0.236	0.421	0.365
	P												·	1.8E-01	3.0E-01	4.2E-03	2.7E-01	6.9E-03	6.0E-07	2.3E-05
O_3	r													1	0.109	0.072	−0.182	0.368	0.594	0.162
	P													·	2.1E-01	4.1E-01	3.7E-02	1.4E-05	2.8E-14	6.6E-02
CO	r														1	0.220	−0.328	0.286	0.369	0.441
	P														·	1.1E-02	1.2E-04	8.8E-04	1.3E-05	1.7E-07
UV	r															1	−0.298	0.288	0.428	0.356
	P															·	5.2E-04	8.1E-04	3.0E-07	3.5E-05
RH	r																1	−0.343	−0.327	−0.156
	P																·	5.6E-05	1.3E-04	7.8E-02
WS	r																	1	0.212	0.160
	P																	·	1.5E-02	6.9E-02
Temp.	r																		1	0.480
	P																		·	8.4E-09
PM2.5	r																			1
	P																			·

*r and P denote correlation coefficient and probability of no correlation, respectively.

우, 측정고도의 차이에 불문하고, 대체로 주간대에 높은 농도가 유지되는 반면 야간대에는 어느 정도 저하되는 상황을 확인할 수 있다. 특히 침적은 주로 오후시간대를 제외한 이른 아침이나 늦은 저녁 시간대에 집중적으로 일어났다는 점을 알 수 있다. 이와 같은 시간적인 의존성은 수직방향대별로 구분된 자료에서 농도나 농도구배의 발생빈도를 비교한 결과에서도 거의 일관성있게 확인할 수 있다.

앞에 농도자료의 비교에서와 마찬가지로 강화지역에서 발견되는 농도구배, 플럭스자료를 평가하기 위해, 과거의 연구결과들과 직접적으로 비교해 보았다. 이를 위해 본 연구와 유사한 성격을 지닌(미기상학적 기법을 직간접적으로 연계하였다는 점에서), 과거 국내외에서 관측된 연구결과들과의 비교를 시도해 보았다. 일반적으로 청정한 조건이 유지되는 배경환경권역에서 관측된 결과들은 수 ng/m^2/h 정도의 크기로 배출 또는 침적의 교환율이 발견되는 것으로 보고된 바 있다. 이러한 연구결과는 미국 테네시주의 Walker Branch Watershed(WBW)를 중심으로 관측을 실시한 Kim *et al.*(1995), Sweden의 Lake Gardsjon(LG)을 중심으로 Lindberg *et al.*(1998)이 측정한 결과 등에서 일관성있게 확인 된 바 있다. 이에 반해 인위적 또는 자연적 발생의 유무를 떠나 어느 정도 뚜렷한 배출원의 영향권에 종속된 환경에서는 배출 또는 침적 유무를 떠나 대략 100 ~ 수 백 ng/m^2/h 규모의 교환율이 나타나는 것으로 발견된 바 있다. 이러한 점을 감안하면, 관측이 이루어진 강화도지역의 교환율은 전형적으로 오염원에 영향을 받는 곳에서 발견되는 수준과 유사하다고 할 수 있다.

수은의 농도변화나 교환현상에 영향을 미치는 요인들을 분석하기 위해, 수은관련변수들과 주변 환경요인들과의 상관성을 분석해 보았다. 모든 자료를 배출과 침적조건으로 양분한 후, 각 자료군에 대해 상관분석을 한 결과를 보면, 각각의 수직적 방향으로 수은의 교환이 이루어지는데 중요한 역할을 하는 인자들을 어느 정도 구분할 수 있다. 특히 Table 3에 제시된 것과 같이, 배출이 주도적으로 이루어지는 조건에서, 각 인자들과의 상관관계를 분석한 결과를 보면 다음과 같다. 강한 상관성을 유지하는 짝들이 대단히 빈번하게 발견된다는 것을 알 수 있다. 이런 점을 감안하면, 그 중에서도 특히 메탄을 위시한 탄소화합물, 질소산화물과 같은 가스상물질들 외에도 미세입자들이 수은의 플럭스나 농도변화에 민감한 영향을 행사

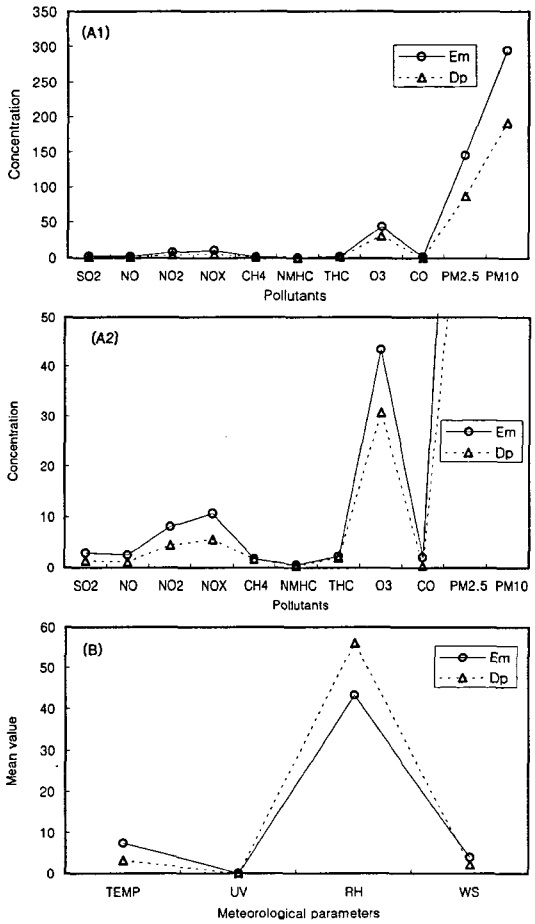

Fig. 4. Comparison of the mean values in relevant environmental parameters between emission and dry deposition events.

할 잠재성이 클 것으로 판단되었다. 반면 건조침적이 이루어지는 상황에서는 앞서 발견된 주요 인자들이 대체로 강한 음의 상관성을 유지하는 것으로 나타났다. 각각의 방향으로 수은의 교환이 이루어질 때의 환경인자들의 상대적인 관계를 확인하면, 교환현상의 방향성이 이들 인자의 변화에 민감하게 영향받을 수 있다는 점을 확인할 수 있다. Fig. 4에 제시된 양 방향으로 구분된 자료들의 평균치를 비교해 보면, 배출시에 관측된 질소산화물과 오존, 그리고 입자상성분의 농도가 침적시에 비해 확연하게 높은 수준을 유지한다는 것을 알 수 있다. 반면 기상인자들의 경우, 배출시에는 침적시에 비해 상대적으로 고온과 저습한 조건이 지배적이었다는 것을 짐작할 수 있다. 반면 의외로 풍속과 같은 인자는 특별한 차이를 구분할

수 가 없다. 과거의 연구결과에 의하면, 풍속의 증가가 수은의 배출을 촉진하는 경향성을 발견한 적도 있다(Kim and Kim, 1999).

배출이 지배적으로 나타나는 현상 그리고 고정적인 오염원이 부재한 상황에서 높은 교환율이 나타나는 현상의 원인은 여러 가지 요인들에 복합적으로 영향을 받은 것으로 보인다. Table 1에 제시된 관측기간의 환경변화의 경향을 보면, 일반 도심환경에서보다 현저히 낮은 수준의 질소산화물 농도 등이 두드러진 데 반해, 간헐적으로 발생한 화전의 영향을 반영하는 고농도의 일산화탄소, 그리고 상당히 높은 수준의 분진이 지속되었다는 것을 알 수 있다. 비록 Table 3에서 분석한 상관분석 등에서 직접적인 관계를 확인하기는 어렵지만, 실험기간 중 지속된 강한 바람과 같은 기상학적 요인들도 복합적으로 높은 수은의 배출을 유지하는데 일정 수준 이상으로 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

결 론

본 연구에서는 미기상학적 측정방식을 동원하여 비교적 청정한 조건이 유지되는 것으로 알려진 강화도 지역을 중심으로 수은의 농도관측과 함께 연직방향의 교환율을 측정하였다. 연구대상지역의 농도수준이 수도권을 위시한 여타 환경대기권에서 관측한 결과들에 비해 현저하게 낮은 농도인 3ng m^{-3}을 초과하는 수준을 유지한다는 사실을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 수준의 농도는 여전히 국외지역에서 관측되는 1 ~ 2ng m^{-3} 수준의 농도에 비해서는 높은 것으로 사료된다. 그리고 이러한 사실의 확인은 국내에 존재하는 배출원들의 강도가 구미지역에서 보다 훨씬 더 강한 수준이란 것을 짐작할 수 있다. 특히 연직방향의 교환은 주로 배출이 절대 지배적으로 진행되는 현상(빈도 비교시 배출이 80% 정도 우세 함)이란 점이 확연하게 드러났다. 그리고 그러한 배출규모는 일반적으로 청정한 지역에서 예상되는 수준보다는 오염된 지역에서 발견되는 높은 수준의 배출규모(약 200ng/m^2/hr)를 유지하는 것으로 나타났다. 이러한 여건들을 보다 세부적으로 보면, 건조침적에 비해 배출이 일어날 때는 주로 오염물질들이 고농도를 이루고, 기상적인 조건이 고온저습한 조건이 유지되었던 것으로 나타났다. 또한 상관분석의 결과를 보면, 상반된 경향이 강하게 나타났다. 배출조건에서는 질소산화물이나 입자상물질 등 다수의 인자들이 수은의 농도나 농도구배 등과 강한 양의 상관관계를 유지하는 반면, 침적시에는 이들과의 조건이 반대로 전환되는 경향성이 확인되었다. 본 연구를 통해 상대적으로 청정한 공기질을 유지하는 환경권에 대한 수은의 교환현상을 집중적으로 비교할 수 있었다. 이러한 연구결과는 국내 여타 지점에 비해 비교적 낮은 수준의 농도가 유지되지만, 플럭스의 크기는 오염지역과 유사한 수준으로 높게 나타났다. 특히 연구기간이 황사가 빈번히 관측되는 기간이었고, 황사와 연관된 여러 가지 오염성분들의 농도증가가, 수은의 강한 배출규모와 일치할 수 있다는 점 등을 감안할 때, 본 연구는 황사와 같은 환경현상이 수은의 배출에 직 간접적으로 어떠한 영향을 미칠 수 있는 가를 연구할 수 있는 기초자료를 확보할 수 있는 기회를 제공하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

Gustin, M.S., Taylor, G.E., and Leonard, T.L., 1996, Atmospheric concentrations associated with geologically and anthropogenically enriched sites in central western Nevada. Environmental Science and Technology, 30, 2572–2579.

Kaimal, J.C. and Finnigan, J.J., 1994, Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. Oxford University Press. 289 p

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., 2001a, A decadal shift in total gaseous mercury concentration levels in Seoul, Korea: Changes between the late 80s and late 90s. Atmospheric Environment. Submitted.

Kim, K.-H. and Kim, M.Y., 2001b, The temporal distribution characteristics of total gaseous mercury from an urban monitoring site in Seoul during 1999 to 2000. Atmospheric Environment, 35(25), 4253–4263.

Kim, M.-Y. and Kim, K.-H., 2001c, Regional distribution characteristics of total gaseous mercury in air - measurements from urban and mountainous sites in Korea Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 17(1), 39–50.

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.

Kim, K.-H., Kim, M.Y., and Lee, G., 2001, The soil-air exchange characteristics of total gaseous mercury from a large scale municipal landfill area. Atmospheric Environment, 35(20), 3475–3493.

Lindberg, S.E., Kim, K.-H., Meyers, T.P., and Owens, J.G., 1995, Micrometeorological gradient approach for quantifying air/surface exchange of mercury vapor: Tests over contaminated soils. Environmental Science and Technology, 29(1), 126–135.

Lindberg, S.E., Hanson, P.J., Meyers, T.P., and Kim, K.-H., 1998, Air/surface exchange of mercury vapor over forests: The need for a reassessment of continental biogenic emissions. Atmospheric Environment, 32, 895–908.

Meyers, T.P., Hall, M., Lindberg, S.E., and Kim, K.-H., 1996, Use of the MBR technique to measure fluxes of trace species. Atmospheric Environment 30(19), 3321–3329.

2001년 8월 20일 원고 접수
2001년 10월 27일 수정원고 접수
2001년 12월 1일 원고 채택