

미기상학적 기법을 응용한 난지도지역의 수은교환율 측정연구

Mercury Fluxes from the Nan-Ji-Do Area of Seoul –Application of Micrometeorological Methods

김민영 · 김기현¹⁾ · 이강웅²⁾ · 정일현³⁾
서울특별시 보건환경연구원, ¹⁾세종대학교 지구과학과,
²⁾한국외국어대학교 환경학과, ³⁾단국대학교 화학공학과
(2000년 6월 28일 접수, 2000년 11월 16일 채택)

Min-Young Kim, Ki-Hyun Kim¹⁾, Gangwoong Lee²⁾ and Il-Hyun Jung³⁾
Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment

¹⁾Corresponding author Dept. of Earth Sciences, Sejong University,
²⁾Dept. of Environmental Sciences, Hankook University of Foreign Studies
³⁾Dept. of Chemical Engineering, Dan Guk University

(Received 28 June 2000; accepted 16 November 2000)

Abstract

Through an application of micrometeorological methods, we conducted measurements of Hg fluxes from Nan-Ji-Do which is well known as one of the major local areal sources in Seoul metropolitan area during March/April of 2000. In the course of our study, we determined the concentration gradients of total gaseous Hg (between 20 and 200 cm heights) and combined these data with micrometeorological components to derive its fluxes. It turned out that emission from and dry deposition to soil surfaces occurred at the ratio of 72 : 27 from a total of 271 hourly measurements. The validity of measured concentration gradients (or resulting fluxes) was evaluated in terms of percent gradient. Accordingly, about more than 95% of gradient data derived were statistically significant.

The mean fluxes of Hg across soil-air interface, when computed using the concentration gradients and relevant parameters, were found at 253 (during emission) and -846 ng/m²/h (during dry deposition). The occurrences of abnormally high exchange rates appear to be the combined effects of enormously high gradient values and high transfer coefficients. While the emissions of Hg occurred constantly during the whole study periods, the occurrences of dry deposition events were observed most intensively during very limited time periods (3/29 and 4/3). The results of our study clearly indicate that the studied area is a strong local areal source, while exhibiting great potential as a major sink simultaneously.

Key words : areal source, emission, dry deposition, mercury, micrometeorological, Nan-Ji-Do

1. 서 론

오늘날 대기오염과 직간접적으로 관련된 여러 연구 분야중에서, 분석학적 측면이 강조되는 분야에서 여러 가지 새로운 양상의 전개가 이루어지고 있다. 특히 오염물질의 검출한계를 저감하고자 하는 노력과 관련기술의 개발은 단순히 과거에는 검출한계 이하 또는 존재하지 않던 것으로 간주되던 오염물질들이 실제로는 극미량대의 농도수준에서 존재하고 있다는 사실을 확인시켜 주는 계기로 작용하였다. 이에 덧붙여 이러한 기술의 개발은 주요 오염물질들을 채취 또는 검출하는데 소요되는 시간적인 제한성을 초월할 수 있게 해 주었다. 이러한 변화로 인해, 일부 미량 또는 극미량성분들의 경우 수초 또는 수분단위의 짧은 시간대에서 일어나는 농도변화를 높은 신뢰수준으로 감지하는 것이 가능하게 되었다. 이와 같은 대기질 분석 분야의 급속한 기술발전은 급기야 오염물질의 교환현상을 정량적으로 파악할 수 있는 미기상학적인 기법과의 연계를 촉진하는 동인으로 작용하였다(Businger, 1986). 따라서 이러한 여전의 전개는, 마침내 미량물질의 배출 또는 침적과 같은 현상을 보다 정량적인 관점에서 설명하는 것을 가능하게 하였다.

아직까지 오염물질의 플러스산출에 직접적인 응용이 가능한 미기상학적 기법의 응용은 화학적 분석이 용이한 일부 주요 오염성분에 국한되고 있지만, 이와 같은 한계를 극복하기 위한 노력이 여타 화합물들에까지 점차 확대되고 있는 추세이다. 이와 같은 추세에 맞추어 볼 때, 수온의 교환율을 정량화하기 위한 시도는 여러 가지 의미를 내포하고 있다. 비록 수온은 대기환경권역에서 넓게 산재한 채로 발견되지만, 환경권 대기 중에는 수 ng/m^3 의 극미량 농도대에서 존재한다. 그러나 이와 같이 극도로 낮은 농도에도 불구하고 여타 중금속성분들과 달리 수십분 또는 시간 단위내에서 수온을 정밀·정확하게 정량하는 것이 가능하다(Schmolke *et al.*, 1999). 결과적으로 수온의 농도구배자료를 미기상학적인 시그널에 직접적으로 통합하는 것이 가능하게 되었다(Kim *et al.*, 1995). 이처럼 수온과 같은 중금속성분에 대한 미기상학적인 기법의 응용은 극미량성분의 교환율을 연구하는데 있어 중요한 전기를 제공하였

다. 이러한 기술의 진전은 상대적으로 정밀한 측정이 용이하지 않은 휘발성유기화합물의 배출/건조침적량을 산정하는 단계로 까지 발전하였다(Zhu *et al.*, 1999).

수온과 같이 특수한 오염성분의 경우, 이미 수 년 전부터 구미지역을 중심으로 미기상학적 기법 등을 동원하여 양질의 교환율 자료를 확보하기 위한 노력이 시도되었다. 1995년 이래 미국의 테네시주의 수림지역을 중심으로 수온의 교환율을 측정하기 위한 노력이 여러 차례 시도된 바 있다(Lindberg *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1995). 국내의 경우에도 이와 같은 선진 분석기술을 응용하여, 수온의 교환율을 실측하고자 하는 노력이 최근에 어느 정도 활성화되고 있는 실정이다. Kim and Kim(1999)은 서울시 보건환경연구원이 위치한 양재지역을 중심으로 수온의 농도와 농도구배를 실측한 바 있다. 이들은 풍 속자료로부터 유추한 교환율계수를 이용하여, 개략적인 배출 또는 침적규모를 추정한 바 있다. 그 외에 정일현과 김기현(1998)도 미기상학적기법과 직 접적으로 연계하여(양재지역을 중심으로) 수온의 교환율을 측정한 바 있다.

본 연구진은 2000년 3월과 4월의 일부 기간대에 걸쳐 대규모 면오염원에 해당하는 난지도를 중심으로 수온의 농도, 농도구배, 교환율을 연속으로 측정하였다. 본 논문에서는 난지도를 중심으로 시도된 수온의 교환율 측정방식을 소개하고, 본 연구를 통해 산출된 기초적인 교환율자료를 중심으로 대규모 면오염원에서 진행되는 수온의 교환현상을 논하였다.

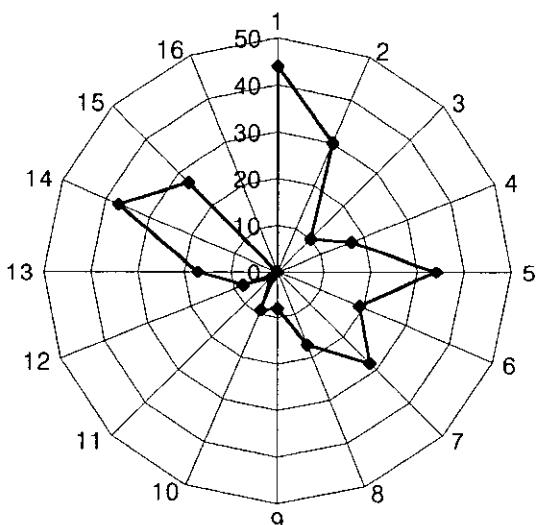
2. 연구방법

2.1 수온의 농도, 농도구배 측정

본 연구는 수온의 농도 및 농도구배의 측정에 집중된 선행연구(Kim and Kim, 1999)의 한계를 극복하고 미기상학적기법을 직접적으로 적용하기 위하여, 미기상학적인 인자들에 대한 동시관측을 수행하였다. 수온의 농도나 미기상학적기법으로 산출한 교환율이 어떻게 대기화학적 인자들과 연계되는 가를 규명하기 위하여, 이동차량을 이용하여 기준성 오염물질의 농도분석 및 주기상인자의 관측을 동시에 수행하였다. 본 연구기간 중 이동차량에 탑재된 장

Table 1. A statistical summary of relevant environmental parameters measured from Nan-Ji-Do site during March and April 2000.

	UV mVcm ⁻²	RH %	Wspeed ms ⁻¹	Temp °C	O ₃ ppb	NO ppb	NO ₂ ppb	NO _x ppb	SO ₂ ppb	CH ₄ ppm	NMHC ppm	THC ppm	CO ppm	PM10 μg m ⁻³
Mean	0.18	48.1	1.32	8.17	11.1	42.0	34.5	76.5	6.78	4.78	0.46	5.23	0.67	55.3
Medium	0.01	46.5	1.28	7.80	6.00	25.0	33.0	60.0	6.00	4.78	0.24	5.20	0.50	48.5
SD	0.26	15.9	0.74	3.75	14.80	45.3	15.0	56.2	3.62	3.81	0.52	4.20	0.45	30.5
Min	0.00	19.0	0.08	-0.20	0.00	1.00	7.00	9.00	0.00	0.39	0.02	0.43	0.10	6.00
Max	1.09	96.0	3.50	17.50	76.0	279	81	340	24	13.60	3.85	15.20	3	201
N	307	310	310	310	305	305	305	305	307	304	304	304	305	302
CI(90%)	0.02	1.49	0.07	0.35	1.40	4.28	1.42	5.31	0.34	0.36	0.05	0.40	0.04	2.90

**Fig. 1.** Frequency plot of wind direction measured from Nan-Ji-Do, Seoul during the whole study periods (March~April 2000). The total number of wind occurrences for each of 16 windsectors is compared at hourly intervals.

비를 통해 현장실측된 주요 환경변수들의 변화양상에 대한 정보는 표 1에 제시하였다. 그림 1에는 전체 실험기간 중의 시간별 풍향자료를 이용하여, 16 방위로 구분된 sector별 절대 발생 개수를 보여준다. 전체적으로 실험기간 중 북풍, 동풍, 북서풍이 집중적으로 발생하였다.

본 연구에서는 미기상학적 기법의 응용을 통해, 수은의 교환율을 실측하고자 하였다. 수은의 농도구배측정과 관련한 분석화학적 측면에 대한 기술은 이미 Kim and Kim (1999)에서 자세하게 제시한 바 있으므로, 본문에서는 이를 간략하게 소개하고자 한

다. 대기 중 수은의 농도구배 및 미기상학적 인자들에 대한 측정은 서울시 마포구에 위치한 초대형 매립장, 난지도의 2공구지점으로부터 2000년 3월 22일부터 4월 4일까지 14일간 매시간당 간격으로 시행되었다. 토양 상층부의 대기 중에 형성되는 수은의 농도구배를 측정하기 위해, 표토면 상의 두 고도, 20과 200 cm 높이에서 24시간 연속으로 총 271회 측정을 수행하였다. 각각의 높이를 대표하는 농도의 측정은 Nippon Instrument Co.가 제작한 순간자동측정기 Mercury Analyzer, AM-2 모델 2대를 동시에 이용하여 실시간 동시측정(real-time simultaneous measurements)을 시도하였다. 본 기기는 내장된 유량조절계에 의해 약 1.0 l/min의 유속으로 공기시료를 흡입하고, 기기 본체와 연결된 흡·탈착장치를 이용하여 수은시료를 연속적으로 채취·분석하는 방식으로 운용하였다. 수은의 농도를 매시간 단위별로 산출하기 위해, 기기의 채취부로부터 50여분동안 흡착이 이루어진 수은은 나머지 10여분의 기간동안 자동적으로 탈착시스템에서 탈착되고, 전조공기를 carrier gas로 사용하는 비분산형 이중빔식(nondispersive double beam) 비플레임화 원자흡광분석기 (flameless atomic absorption method)에 의해 253.7 nm의 wavelength에서 검출되었다. 본 기기에 의한 수은의 절대검출한계는 약 1 pg대로서, NBS standard 1632a, 1568, 1575 등에 대비한 절대정밀도(accuracy)는 약 3~5%(세가지 표준물질의 평균)를 유지하였다. 1, 2, 3 ng대의 증기상태 표준시료를 5회 씩 기기에 직접 주입하는 방식으로 반복분석하여, 정밀도(precision)를 분석한 결과 (relative standard error (RSE = SE*100/Mean) 값으로), 2대의 AM-2 기기는 평균 0.64% (범위: 0.29~1.27%)와 0.35% (범위: 0.08~0.64%)의 오차를 보였다. 보다 현실성있게 실

험실내의 표준시료대신 현장의 공기시료를 가장 현장 조건에 가깝게 흡착관으로 채취하여 실험분석한 결과, 약 1% 내외의 정밀도를 유지하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 분석방식의 정밀성이 대단히 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 미기상학적 기법의 적용

지표면과 대기에서 발생하는 물질과 에너지의 교환량을 측정하기 위해서 다양한 미기상학적 방법이 개발 적용되고 있다. 교환량 측정을 위한 여러 가지 방법 중에서 가장 보편적으로 이용되는 방법으로 Eddy correlation법, Bulk transfer법, Gradient법 등이 있다. 이 중에서 가장 이상적이고 직접적인 방법은 Eddy correlation방식으로 평가되고 있으며. 이를 이용한 surface stress (τ), sensible heat flux (H), chemical flux (F)의 측정은 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

$$\tau = -\rho \bar{uw} \quad (1)$$

$$H = \rho C_p \bar{\theta w} \quad (2)$$

$$F = \bar{Cw} \quad (3)$$

Eddy correlation법의 경우 open fetch를 형성하는 넓은 공간에 특정한 발생원의 영향을 받지 않는다는 조건이 만족될 경우, 교환량을 직접적으로 측정 할 수 있다는 장점이 있다. 반면 10 Hz 정도의 고속으로 바람, 온도, 화학종의 농도 등에 대하여 동시간에 측정하는 것이 요구된다. 그리고 이로 인해, 운영이 까다로운 고가의 관측장비를 관리유지하여야 하는 문제가 있다. 더욱이 화학종의 경우 농도를 10 Hz sampling rate으로 측정할 수 있는 물질의 종류와 장비가 매우 제한적이므로, 화학종의 교환량을 측정하는데 있어 Eddy correlation 법은 큰 제약을 받고 있다.

Bulk transfer법의 경우에는 drag (C_D), heat (C_H), chemical (C_c) transfer coefficient을 알고 있을 경우, 일정한 높이에서의 평균 풍속, 평균온위(potential temperature), 평균농도 등을 가지고 교환량을 산출할 수 있다. 그러나 transfer coefficient, θ_0 , C_o 가 모두 roughness height의 함수이며, 이를 결정하는 것이 용이하지 않아서, 실제로 교환량의 산출에 적용되는 예가 많지 않다.

$$\tau = \rho C_D U^2 \quad (4)$$

$$H = \rho c_p C_H (\theta - \theta_o) \quad (5)$$

$$F = C_c U (C - C_o) \quad (6)$$

Gradient법의 경우 교환량의 계산은 다음과 같이 진행한다. 일반적으로 두 높이 이상에서 풍속, 온도, 농도를 측정하여 각각의 gradient를 구하고, 모멘텀, 열, 화학종에 대한 eddy diffusivity(각각 K_m , K_h , K_c)를 산출하므로서, 다음과 같이 교환량을 계산할 수 있다.

$$\tau = \rho K_m (\partial U / \partial z) \quad (7)$$

$$H = \rho c_p K_h (\partial \theta / \partial z) \quad (8)$$

$$F = K_c (\partial C / \partial z) \quad (9)$$

Eddy diffusivity의 경우 기상 조건과 지형에 따라 매우 다르기 때문에, 간접적인 방법으로 Eddy diffusivity를 결정하여 교환량을 산출해야 한다. 가장 보편적으로 이용되는 방법으로 momentum flux와 sensible heat flux를 Eddy correlation법으로 구한 뒤, 이를 Gradient법을 적용시킨 방법과 비교하여 각자를 만족하는 K_m 과 K_h 를 산출한다. 이를 다시 K_c 에 적용하는 방법이 가장 많이 활용되고 있다. 이와 같은 방법을 modified Bowen ratio(MBR)법이라고 한다.

$$\tau = -\rho \bar{uw} = \rho K_m (\partial U / \partial z) \quad (10)$$

$$H = \rho c_p \bar{\theta w} = \rho c_p K_h (\partial \theta / \partial z) \quad (11)$$

즉

$$K_m = \bar{uw} / (\partial U / \partial z) = K_c \quad \text{또는} \quad (12)$$

$$K_h = \bar{\theta w} / (\partial \theta / \partial z) = K_c \quad (13)$$

여기서 구한 K_c 를 이용하고 높이에 따른 수온의 농도구배를 식(9)에 적용하면, 수온의 교환량을 산출할 수 있다.

본 연구에서는 Eddy correlation법으로 sensible heat flux를 산출하고, 높이에 따른 온도의 차이를 이용하여 K_h 를 구하였다. 이를 K_c 로 적용하여 식(9)에 의하여 Hg의 교환량을 계산하였다. 이를 위하여 높이 2 m에서 sonic anemometer(Campbell)와 platinum fast temperature probe를 10 Hz의 sampling rate에서 관측하여, 30분 평균으로 sensible heat flux를 Eddy correlation 방식으로 산출하였다. 일반적으로 물질과 에너지의 교환에 결정적인 기여를 하는 eddy의 일반적인 시간규모가 0.1초 이상이 되기 때문에 10 Hz

의 sampling rate은 본 연구의 목적에 충분한 것으로 평가된다. 본 연구에 사용된 온도계의 정밀도가 0.1°C 이기 때문에 두 높이에서 측정한 온도차이가 0.1°C 이상될 경우에만 K_c 계산에 적용하여, 중립조건에서 K_c 가 비이상적으로 큰 값을 취하는 효과를 제거하였다.

Eddy correlation법의 정확한 운용을 위해서는 주변 지형 지물에 의한 흐름의 왜곡을 방지하기 위하여, 충분한 fetch가 요구된다. 본 연구에서는 모든 방향에서 약 500 m 이상의 fetch를 갖는 평탄지형에서 관측을 실시하여 공기의 흐름이 항상 수직적으로 laminar하도록 한 후, 지표면으로부터 수직적인 교환량의 산출이 이루어지도록 하였다. 평균적인 공기의 흐름이 지표면에 수평적인 것을 확인하기 위하여 가장 일반적으로 사용되는 것으로 평균 교환량 산출이 이루어지는 시간동안, 수직적인 풍속의 평균 값인 $\bar{w}=0$ 를 만족하는 가를 평가하는 방법이 있다. $\bar{w}=0$ 이 되지 않을 경우, sonic sensor의 수평 alignment가 제대로 맞추어지지 않았거나 지표면이 평坦하지 않다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 거의 모든 방향의 바람으로부터 $\bar{w}=0$ 에 가까운 값을 갖는 것으로 확인되어, sensor 장착과 측정 위치가 이상적으로 배열되었음을 알 수 있었다. 식(9)를 이용한 MBR법에 따른 수온의 교환량을 산출하기 위하여, 0.2와 2 m에서 수온의 농도구배를 관측하였다. 본 연구가 수행된 난지도 상부의 경우 표층 복토 작업으로 인해, 거의 모래질이 평탄면으로 이루어져 있어 surface roughness height는 몇 cm 이내의 낮은 값을 갖을 것으로 예상되어, 20 cm에서부터 측정을 시작하였다. 실제로, 전체 관측기간동안 surface roughness를 계산한 결과 $5 \pm 13 \text{ cm}$ 로 산출되어, 충분히 roughness height를 벗어난 지점에서 측정한 것으로 판단되었다.

3. 결과 및 토론

3. 1 농도구배의 검정

수온의 교환현상은 지상으로부터 대기로의 배출(+) 또는 대기로부터 지상으로의 전조침적(-)과 같이 수직적인 방향성을 부여할 수 있다. 이와 같은 교환현상의 방향을 설정하기 위해, 양고도간에 존재하는 미세한 농도차이의 양(+) · 음(-) 유무를 기

준으로 배출이나 전조침적을 구분하는 것이 가능하다. 그렇지만 본 연구에서 발견되는 미세한 농도차이 또는 농도구배를 기준으로 방향성을 설정한다는 것이 얼마만큼 의미가 있는가를 검정하는 것이 중요하다. 이를 검정하기 위한 한 가지 방편으로 Kim and Kim (1999)은 단계적인 접근방식을 활용하였다. 우선 다음과 같이 '농도구배의 %값'을 계산하였다.

$$\text{Percent gradient (PG)} = \{ |\Delta C_{HgO}| / C_{HgO} (20 \text{ cm}) \} \times 100$$

여기에서 ΔC_{HgO} 와 $C_{HgO} (20 \text{ cm})$ 은 각각 두 고도간 수온농도의 차이 및 20 cm 고도에서 수온의 농도를 의미한다. 이를 측정방식에 내재된 정밀도와 비교하는 방식으로 방향성의 신뢰도를 간접적으로 평가할 수 있는 기준으로 활용하였다(Kim and Kim, 1999). 그 결과, 배출시 PG의 평균과 표준편차는 $19.9 \pm 14.8\%$ (범위: $0.52 \sim 77.1\%$, $N=195$)로 나타났다. 반면 건조침적의 경우 평균과 표준편차는 $14.5 \pm 21.3\%$ (범위: $0.72 \sim 145\%$, $N=73$)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 계산한 결과, 1% 보다 낮은 수준을 유지한다는 것이 확인되었다. 만약에 각각의 고도에서 최대 1%의 오차가 있다면, 양 고도의 농도구배에서 나타날 수 있는 최대오차는 대략 2%를 넘지 않을 것이다. 따라서 양고도간의 농도차를 기준으로 계산하는 농도구배의 신뢰성을 검정할 수 있는 엄격한 기준으로 PG 값 2%를 설정할 경우, 배출자료의 총 96%(총 195개 자료 중 187개)와 건조침적자료의 92%(총 73개 자료 중 67개)에 대한 방향성은 유의한 것으로 결론지을 수 있다. 이와 같은 실험자료의 결과를 감안할 경우, 산출된 농도구배의 95% 이상은 유의한 수준인 것으로 판정할 수 있다.

3. 2 수온관련 자료의 분포특성

본 연구에서는 서울시의 난지도지역을 중심으로 3월 22일부터 4월 4일까지, 총 14일 동안 수온의 농도 및 농도구배 관측을 271회에 걸쳐 시간대별로 수행하였다. 관측기간은 대체로 낮은 기온과 습도가 지속된 전형적인 이른 봄의 계절적 특성을 보였다.

Table 2. A statistical summary of Hg concentration, gradient, and flux data measured from Nan-Ji-Do during March and April 2000.

	All data		Emission only				Deposition only				Flux terms				
	Hg(L) ng m ⁻³	Hg(U) ng m ⁻³	Hg(L) ng m ⁻³	Hg(U) ng m ⁻³	Gradient ng m ⁻³	%Grad. %	Hg(L) ng m ⁻³	Hg(U) ng m ⁻³	Gradient ng m ⁻³	%Grad. %	K(+) m s ⁻¹	K(-) m s ⁻¹	Flux(+) ng m ⁻² h ⁻¹	Flux(-) ng m ⁻² h ⁻¹	Vd cm s ⁻¹
Mean	4.34	3.97	4.16	3.39	0.77	19.9	4.78	5.44	-0.66	14.5	0.100	0.199	253	-846	3.65
Medium	4.07	3.82	3.89	3.12	0.67	16.0	4.49	5.37	-0.39	9.27	0.091	0.154	194	-432	2.20
SD	1.40	1.74	1.40	1.44	0.54	14.8	1.20	1.52	0.94	21.3	0.107	0.162	224	1,114	4.75
Min	2.00	0.73	2.00	0.73	0.02	0.52	2.91	3.30	-6.62	0.72	0.002	0.021	3.60	-3,625	15.7
Max	9.47	11.2	9.47	8.00	2.71	77.1	9.16	11.2	-0.03	145	0.611	0.514	1011	-9.11	0.07
N	271	271	195	195	195	195	73	73	73	73	73	22	73	22	22
CI(90%)	0.14	0.17	0.17	0.17	0.06	1.75	0.23	0.30	0.18	4.16	0.021	0.059	43.7	409	1.74

관측자료는 배출과 전조침적으로 각각 구분한 후 농도, 농도구배, 플럭스에 대한 해석을 개별적으로 또는 연계하여 해석하였다. 이중 배출이 195회(72.0%) 그리고 전조침적이 73회(26.9%) 발견되었다. 그리고 상하고도에서 동일한 농도값의 발현으로 인해 교환의 방향성을 설정할 수 없는 경우가 3회 발견되었다. 이렇게 산출된 농도구배와 교환율계수를 이용하여, 플럭스 자료를 산출할 수 있었다. 그런데 플럭스의 경우, 3월 29일 19시 이후의 교환율계수(K)자료를 (컴퓨터 바이러스문제로 인해) 유실하므로서 실제 95개의 자료를 산출하는것으로 마감지었다. 플럭스가 관측된 95개의 자료는 다시 73회(77%)가 배출, 22회(23%)가 전조침적으로 구분되었다. 단순히 구배나 플럭스자료의 비율분포만을 감안해서 비교해 보면, 플럭스의 경우 상대적으로 침적경향의 자료유실이 큰 것으로 나타났다.

본 연구기간에 관측된 농도, 농도구배, 플럭스자료의 기본적인 통계치는 표 2에 제시하였다. 배출이 관측된 총 195개의 자료만을 분리하여 정리하면, 하층(20 cm)에서 관측한 수은의 농도는 4.16 ± 1.40 ng/m³(범위: 2.0~9.47 ng/m³), 상층(200 cm)에서 관측한 수은의 농도는 3.39 ± 1.44 ng/m³로 나타났다(범위: 0.73~8.00 ng/m³). 단순히 평균값의 크기만을 비교해도, 양고도간에 상당히 현격한 차이를 알 수 있다. 반면 전조침적이 관측된 73개 자료에 대한 전체적인 분포특성은 다음과 같다. 전조침적의 경우, 하층의 농도가 4.78 ± 1.20 ng/m³, 상층의 농도가 5.44 ± 1.52 ng/m³로 나타났다. 그런데 고도별 농도차를 보다 세부적으로 파악하기 위해 고도별 농도의 빈도분포를 비교하면, 배출이 일어날 때 상하층간의 농도차이가 구조적으로 유지되고 있다는 것을 확인

할 수 있다. 배출시에는 하층의 농도가 3~4 ng/m³에서 60회 이상으로 가장 빈번하게 발견되는데 반해, 고층(200 cm)에서는 이보다 낮은 2~3 ng/m³에서 50회 이상 발견되었다. 이와 같이 고도별 발현회수가 최대로 나타나는 농도대의 차이는 전조침적의 경우에도 뚜렷하게 구분되었다.

배출발생시 시간대별로 발견된 농도구배값을 이용하여 평균을 계산하면, 0.77 ± 0.54 ng/m³로 나타났다(N = 195). 전조침적의 경우, 총 발생빈도가 배출에 비해 현격하게 떨어졌다. 전조침적시에 농도구배의 평균치는 -0.66 ± 0.94 ng/m³ (N = 73)로 나타났다. 그리고 배출 및 전조침적으로 구분된 268개의 자료중에서 최종적으로 플럭스가 산출된 자료만을 분리하면, 총 96개로 나타났다. 배출 및 전조침적에 대한 플럭스의 평균치는 각각 253 ± 224 ng/m²/h (N = 73)와 -846 ± 1114 ng/m²/h (N = 22)로 나타났다.

3.3 농도분포의 시간적 경향성

배출의 빈도가 전조침적에 비해 월등히 우월하다는 점을 감안하여, 배출을 중심으로 전체적인 수은자료의 시간적 경향성을 파악하는 것도 의미가 있을 것으로 보인다. 그림 2에는 매 시간별로 관측된 수은의 농도(하층 20 cm 기준), 농도구배, 교환율을 시간의 함수라는 관점으로 비교하였다. 수은자료의 시간적인 경향성을 분석한 결과, 최대농도(9.47 ng/m³)는 3/22일 16시에 그리고 농도구배의 최대치(2.71 ng/m³)는 3/25일 오전 9시에 발견되었다. 플럭스는 3/29일 18시까지 산출되었는데, 최대플럭스는 3/24일 16시에 1011 ng/m²/h으로 나타났다. 전조침적의 경우, 자료의 수가 훨씬 제한적이다. 시간에 따른 전조침적의 경향성은 그림 3에 제시하였다. 단 전조침

적의 경우, 하층에 비해 상층 농도의 경향성을 파악하는 것이 중요하다. 이를 감안하여, 상층의 농도, 농도구배, 플러스를 시간의 함수로 제시하였다. 전조침적은 실험 첫날인 3월 22일 자정무렵(23시)부터 발견되었다. 그리고 3/29일에는 02시부터 19시까지 총 17회나 집중적으로 발견되었다. 그리고 다시 4/3일 오전 8시부터 실험이 종료된 4/4일 오전 11시까지 28시간동안 21회에 걸쳐 집중적으로 발견되었다. 이처럼 전조침적은 짧은 기간동안 집중적으로 발생하는 경향성을 보였다. 침적관련 자료의 시간대별 최대 농도(11.2 ng/m^3) 및 농도구배(-6.62 ng/m^3)는 모두 3/29일 16시에 발견되었다. 침적플러스의 최대치($-3625 \text{ ng/m}^2/\text{h}$)는 그 한 시간 뒤인 17시에 나타났다. 이처럼 특이한 침적의 경향성에 대해서는 본 연구전의 후속논문 등을 통하여 보다 심층적인 분석을 피하고자 한다.

수은관련자료들간의 동질성 유무에 대한 여부는 배출자료에서 어느 정도 확인할 수 있다. 그림 2에

의하면, 농도와 농도구배의 상대적 변화경향성이 어느 정도 밀접한 관계를 띠고 있다는 점을 알 수 있다. 이미 과거에 Kim and Kim(1999)은 배출시 수은의 농도구배가 상층에 비해 하층대기의 농도분포에 상당히 밀접한 관련을 지니고 있다는 사실을 확인시켜 준 바 있다. 이 것은 배출원에 가까운 저층고도의 경우 배출현상에 직접적으로 노출되므로, 그 영향에 민감하게 반응할 것이란 점을 추정할 수 있다. 반면 상층의 경우 배출원으로부터 먼 거리로 인해 그 효과가 희석되므로, 배출원의 시그널이 상대적으로 저감된데 따른 결과로 볼 수 있다. 마찬가지로 전조침적의 경우, 상층대기의 농도변화가 침적의 경향을 설명하는데 효과적이다(Lindberg *et al.*, 1995a, b).

3.4 난지도지역의 농도, 농도구배, 플러스

비록 재한적이지만, 2000년 3월과 4월의 연구기간동안 271회에 걸쳐 측정된 수은의 농도, 농도구배, 플러스자료를 평가하기 위한 한 가지 방편으로

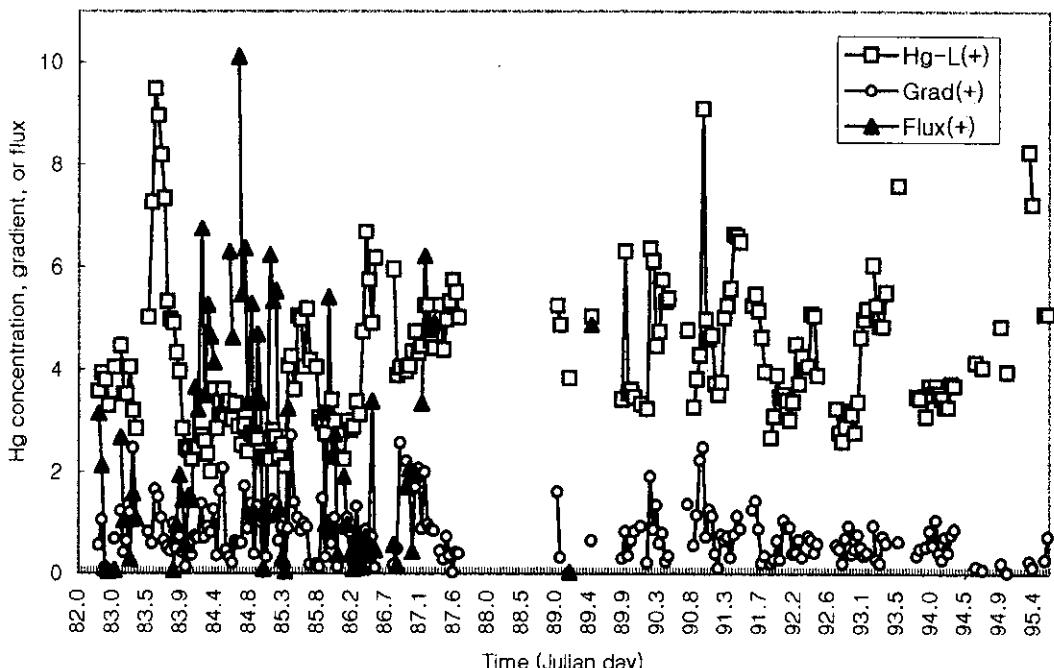


Fig. 2. Temporal patterns of Hg data sets measured during emission events (March ~ April 2000). Data for concentration, gradient, and fluxes are presented as a function of time (Julian day). Julian day 82 corresponds to 22 March 2000. Units for concentration and concentration gradients are ng/m^3 , while that for fluxes is $100 \text{ ng/m}^2/\text{h}$. Capital letters U and L denote heights of mercury measurements that are upper (200) and lower (20 cm) levels, respectively. In addition, symbols (+) and (-) denote emission and dry deposition events, respectively.

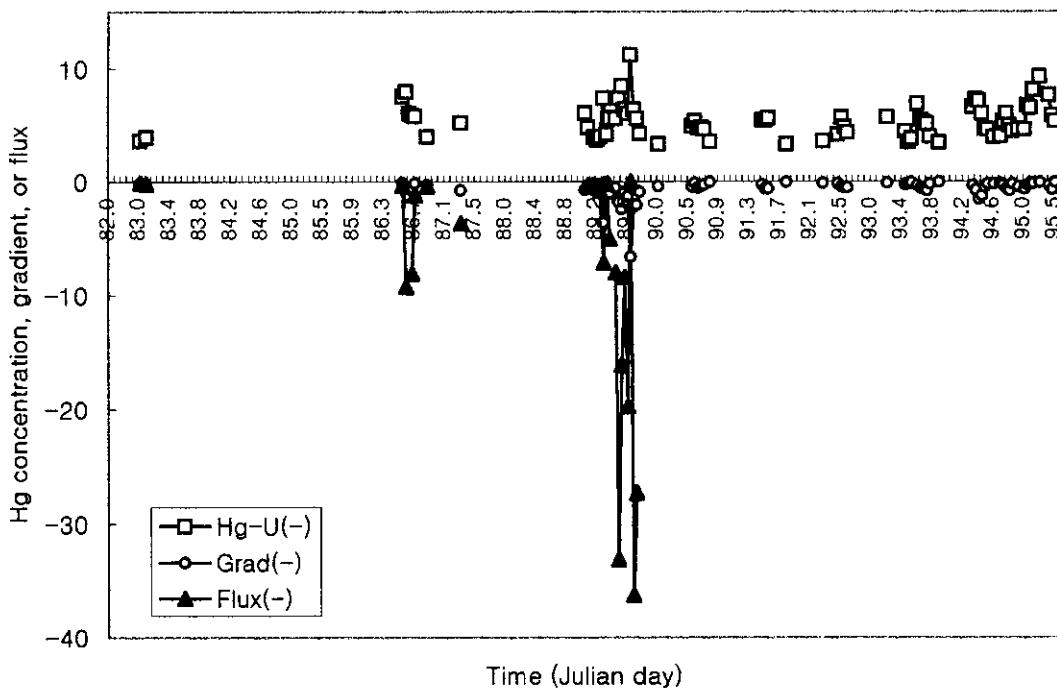


Fig. 3. Temporal patterns of Hg data sets measured during dry deposition events (March~April 2000): Other conditions are identical to those of Fig. 4. The off-scaled datapoint for deposition flux corresponds to $-17,316 \text{ ng/m}^2/\text{h}$.

과거의 연구결과들과 비교하는 것도 의미가 있을 것으로 보인다. 이를 위해 본 연구와 유사한 성격을 지닌(미기상학적 기법을 직간접적으로 연계하였다 는 점에서), 과거의 3가지 연구결과와의 비교를 시도하였다. 지표면을 중심으로 수은의 농도구배나 플럭스를 관측한 연구는 대단히 제한적이므로, 과거에 연구가 이루어진 2개의 청정지역과 1개의 비청정지역을 비교의 대상으로 선택하였다. 전자의 경우로 미국 테네시주의 Walker Branch Watershed (WBW) 를 중심으로 Kim *et al.* (1995)가 측정한 결과와 Sweden의 Lake Gardsjon (LG)을 중심으로 Lindberg *et al.* (1998)이 측정한 결과를 활용하였다. 그리고 본 연구의 결과와 상대적으로 유사성이 큰 후자의 예로 Kim and Kim (1999)이 서울시 양재동지역에서 관측한 결과를 활용하였다.

연구대상지역을 중심으로 수은관련자료를 비교한 결과를 그림 4에 제시하였다. 그림 4a에는 배출시와 전조침적을 중심으로 농도자료를 분류한 후, 이들을 다시 토양에 가까운 하층부와 토양으로부터 떨어진

상층부로 구분한 결과를 제시하였다. WBW나 LG 와 같이 비교적 청정한 지역의 경우 분류방식에 차이없이 대부분의 농도가 2.0 ng/m^3 에 인접해 있다는 것을 확인할 수 있다. 반면 본 연구대상인 난지도 (NJD)와 마찬가지로 양재동(YJ)지역의 경우, 양고도에서 발견되는 농도의 절대값이 외국의 청정지역에 비해 훨씬 크고, 각 지점에서 발견되는 고도간의 농도차이도 상당히 크다는 것을 확인할 수 있다. 단순히 농도의 크기만을 기준으로 볼 때, 대규모 면모염원으로 간주되는 NJD의 농도자료에 비해 YJ지역의 농도가 배출이나 전조침적을 포함한 모든 경우에 가장 높은 농도치를 보이고 있다는 점이 확인된다.

그림 4b의 농도구배를 이용한 결과비교에서도 이와 유사하게 WBW나 LG에서 작은 규모의 구배가 발견된다. 그렇지만 YJ나 NJD에서는 배출이나 침적의 방향에 상관없이 모두 1 ng/m^3 를 초과하는 높은 농도구배의 형성이 이루어지고 있다는 점이 확인된다. 물론 농도자료와 마찬가지로 YJ지역의 결

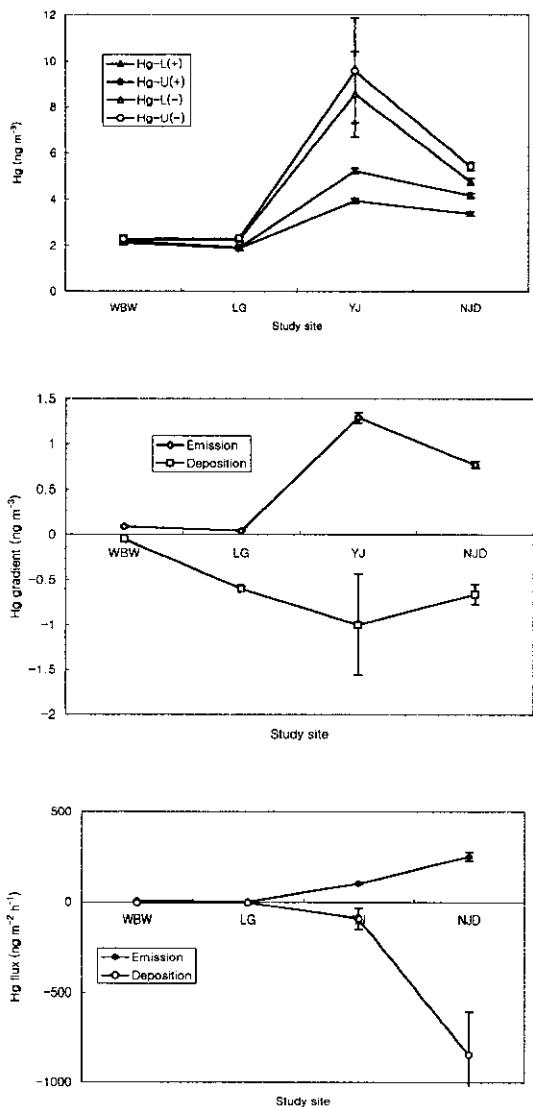


Fig. 4. Comparison of Hg-related data sets of present study with those of previous studies. Figures for upper, middle, and lower position represent data for concentration, gradient, and flux, respectively. The symbols for study sites denote as follows: (1) Walker Branch Watershed (WBW)-Kim *et al.* (1995), (2) Lake Gardsjon (LG)-Lindberg *et al.* (1998), (3) Yang Jae (YJ)-Kim and Kim (1999), and (4) Nan-Ji-Do (NJD)-present study. Capital letters U and L denote heights of mercury measurements that are upper (200) and lower (20 cm) levels, respectively. In addition, symbols (+) and (-) denote emission and dry deposition events, respectively.

과치가 NJD의 결과를 상회하는 것으로 나타났다. 그런데 플럭스값을 중심으로 보면(그림 4c), 여타 3 지역에 비해 NJD지역의 배출 또는 침적의 규모가 월등히 앞서있다는 사실을 확인할 수 있다. 특히 NJD 지역에서 3/29 및 4/3일의 양일간 짧은 기간동안 집중적으로 발현한 대규모침적으로 인해, 대기로부터 지표로 향하는 침적플럭스의 평균이 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ 의 수준에 근접하고 있다는 점은 여러 가지 사실을 시사한다(강력한 배출원인 난지도에서 발견되는 수은의 평균배출율이 대략 $250\text{ ng}/\text{m}^2/\text{h}$ 에 달하는데 반해, 건조침적률은 이를 3.4배 정도 초과하는 $-846\text{ ng}/\text{m}^2/\text{h}$ 의 수준이다). 이와 같은 결과가 3/29일 및 4/3일 양일간에 집중한 건조침적의 영향이라는 점을 감안하면, 국지적(또는 장거리에 위치한) 오염원들의 영향을 받는데 따른 것으로 보인다. 특히 침적이 일어나는 조건과 배출이 일어나는 시점에 하층 20 cm 고도의 농도를 비교해 보면, 약간의 차이는 있지만 양측 모두 유사한 수준의 평균농도인 $4.16 \sim 4.78\text{ ng}/\text{m}^3$ 를 유지한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 하층고도에서 비교적 균질한 경향성을 보이는 것은 배출시에 토양의 영향과 침적시 외부발생원의 영향이 각각 중요하게 작용할 수 있다는 점을 확인 시켜준다. 그리고 방향에 상관없이 작은 크기의 농도구배값을 갖는 NJD 지역에서 YJ에 비해 큰 플럭스값을 갖는 것은 주로 연구기간중 발견된 NJD지역의 높은 교환계수(K)값에 영향을 받은 것으로 보인다. NJD 지역에서 큰 교환계수가 발견되는 것은 교환율의 측정이 용이하게끔 상하좌우로 막힘이 없이 형성된 준이상적인 평지지역에다가 주위보다 95 m 이상 높이에 위치한 지역적인 특성을 잘 반영한 태 따른 결과로 사료된다.

4. 결  론

본 연구에서는 MBR이라는 미기상학적 측정방식을 동원하여 대규모 면오염원인 난지도를 중심으로 수은의 교환율을 측정하였다. 총 연구기간 중 271회에 걸쳐 상하고도에서 (20 및 200 cm)에서 관측한 시간대별 농도자료는 농도구배 및 플럭스의 산출에 활용되었다. 관측결과에 의하면 전체적으로 배출과 건조침적이 각각 195회와 73회 발견되어 72:27의 비율을 유지하였다. 관측된 농도구배 자료의 유의성

은 PG값을 이용하여 평가되었는데, 수직적 방향(배출 또는 침적)에 관계없이 대부분 측정자료(95% 이상)의 방향성은 유의한 것으로 평가되었다.

플렉스자료는 평균값을 산출할 경우, 배출시에 253, 전조침적시에 $-846 \text{ ng/m}^2/\text{h}$ 에 달할 정도로 대규모로 진행된다는 점이 확인되었다. 이와 같은 교환율의 규모는 국내외를 막론하고 이때까지 발표된 자료중 상당히 높은 침적량인 것으로 판정된다. 이와 같은 결과는 주로 큰 농도구배값과 교환율계수의 영향을 동시에 반영한 결과로 사료된다. 본 관측에서는 높은 배출율과 함께, 이를 훨씬 상회하는 침적율이 관측되었다. 이와 같이 대규모의 배출이 발견되는 결과는 연구대상지역인 난지도지역이 수온의 대규모 면오염원으로서 작용한다는 사실을 확인시켜 준다. 또한 본 연구기간중 발견된 대규모의 침적율은 관측지점에 인접한 배출공 등으로부터 배출된 수온의 직접적인 영향을 받은 침적의 시그널을 보이는 것으로 예상된다. 그러나 실제로 이러한 현상은 일상적으로 진행되는 현상이라기 보다는, 특히 제한적인 조건에서 제한적인 기간대에 집중적으로 발생하기 때문에, 전체적으로 난지도 지역이 갖는 강한 배출성향을 왜곡할 수도 있다. 특히 배출현상은 전 기간대에 걸쳐 고르게 발생하는데 반해, 전조침적의 경우 짧은 기간동안 집중적으로 발생하기 때문에 이와 같은 혼재된 시그널은 조심스럽게 해석하여야 할 것이다. 앞으로 이와 같은 대규모 오염원을 중심으로 진행되는 수온의 양방향간 교환율을 보다 체계적으로 정리하기 위한 노력이 다각도로 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의해 이루어졌습니다(KRF-2000-015-DP0453).

참 고 문 헌

정일현, 김기현 (1998) 서울시의 주거지역을 중심으로 한

- 토양-대기간 가스상 수온의 교환율측정. 한국환경위생학회지 24(4), 154-165.
- Businger, J.A. (1986) Evaluation of the accuracy with which dry deposition can be measured with current micrometeorological techniques. *J. Clim. Appl.* 25, 1100-1124.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (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., S.E. Lindberg, and T.P. Meyers (1995) Micrometeorological measurements of mercury vapor fluxes over background forest soils in eastern Tennessee. *Atmospheric Environment* 29(2), 267-282.
- Lindberg, S.E., K.-H. Kim, T.P. Meyers, and J.G. Owens (1995a) 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., K.-H. Kim, and J. Munthe (1995b) The precise measurement of concentration gradients of mercury in air over soils: A review of past and recent measurements. *Water, Air and Soil Pollution* 80, 383-392.
- Lindberg, S.E., P.J. Hanson, T.P. Meyers, and K.-H. Kim (1998) Air/surface exchange of mercury vapor over forests: The need for a reassessment of continental biogenic emissions. *Atmospheric Environment* 32, 895-908.
- Schmolke, S., W.H. Schroeder, J. Munthe, H.H. Kock, D. Schneeberger, and R. Ebinghaus (1999) Simultaneous measurements of total gaseous mercury at four sites on a 800 km transect: Spatial distribution and short time variability of total gaseous mercury over central Europe. *Atmospheric Environment* 33, 1725-1733.
- Zhu, T., D. Wang, R.L. Desjardins, and J.I. Macpherson (1999) Aircraft-based volatile organic compounds flux measurements with relaxed eddy accumulation. *Atmospheric Environment* 33, 1969-1979.