

매립지에 대한 수은의 배출-침적플럭스에 대한 측정: 2001년 가을철 난지도 지역에 대한 연구

김기현* · 김민영** · 이강웅*** · 조석주**

*세종대학교 지구과학과, **서울특별시 보건환경연구원, ***한국의국어대학교 환경학과

The Fluxes of Total Gaseous Hg from a Landfill Site: Measurements from Nan-Ji-Do During Fall 2001

Ki-Hyun Kim*, Min-Young Kim**, Gangwoong Lee*** and Suk-Choo Cho**

**Dept. of Earth Sciences, Sejong University,*

***Seoul Metropolitan Research Institute of Public Health and Environment*

****Dept. of Environmental Sciences, Hankook University of Foreign Studies*

As part of our continuous efforts to elucidate the behavior of total gaseous Hg at strong source area, we conducted micrometeorological measurements of its fluxes from Nan-Ji-Do (NJD) landfill site during the fall period of 2001. Results of our study confirmed that emission of Hg is overwhelmingly dominant over its dry deposition in its frequency; however, its deposition is found to be large in magnitude relative to emission event. The mean fluxes of Hg across soil-air interface of NJD, when computed using the concentration gradients and relevant parameters, were found at 576 ± 436 (during emission: N=142) and -930 ± 1065 ng/m²/h (during dry deposition: N=37). The occurrences of abnormally high exchange rates were mainly due to the combined effects of enormously high gradient values and high transfer coefficients at elevated site. The overall results of our study thus suggested that the site should serve as net source of Hg with emission strength of 6.4 µg/m²/day.

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

1. 서 론

유해오염물질의 배출특성을 연구하는데 있어, 수은과 같이 휘발성이 강한 중금속 성분은 여러 방면에서 유익한 정보를 제공할 수 있다.¹⁾ 대부분의 중금속이 입자상물질에 결합되어, 대기중에 오랜 기간 체류하지 못하고 침적되는 것으로 잘 알려져 있다. 이에 반해, 수은의 경우 강한 화학적 안정성과 높은 휘발성 등으로 인해 1~2 년 단위로 대기에 체류하며, 오랜 기간 대기의 순환에 종속되는 특성을 보인다.²⁾ 따라서 이러한 성분이 지닌 환경거동특성 등을 명확히 규명하는 연구는 유해성분의 대기 거동을 규명하는데 중요한 전기를 제공할 수 있을 것으로 알려져 있다.³⁾ 특히 이들이 지표면에서 배출 또는 침적현상을 연구하는 것은 이들의 환경유동특성을 정의하는데 가장 기본적인 접근수단이라

고 할 수 있다.

수은과 같은 성분의 환경거동을 정밀하게 예측할 수 있는 진일보된 측정방식이 최근 수 년간 빠르게 진전을 보이고 있다.⁴⁾ 이러한 분야에 대한 연구의 급속한 신장은, 기존에 행해진 배출량산정과 관련된 연구들에 내재된 한계점, 주로 실측에 의존하지 않고 수치계산에 비중을 두는 문제점 등을 극복하는데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 실측중심의 연구자료가 축적되어야 하고 또한 이를 통해 수치계산에 대한 검증이 이루어져야 한다는 점을 감안하면, 유해성분이 수직적으로 배출 또는 침적되는 환경거동을 정확하게 규명하는 연구사업은 대단히 중요한 의미를 내재한다.

수은과 같은 유해성분의 배출량 또는 침적량과 같은 플럭스를 산출하는데는 여러 가지 측정방식의 응용이 가능하다.⁵⁾ 일단 수은의 플럭스를 측정하는 방식은 챔

버내부에 공기를 흘려 보내는 동적인 플럭스 챔버(dynamic flux chamber) 또는 공기를 밀폐한 폐쇄형 플럭스 챔버(closed flux chamber) 등을 이용하여 이루어져 왔다.⁶⁾ 이러한 측정방식은 챔버의 제작 및 구동이 경제적이거나 유리한 점에도 불구하고, 측정이 이루어지는 지표환경을 인위적으로 차폐시키므로서 미세한 미기상학적 조건에 변화를 초래한다는 점이 가장 큰 한계점으로 지목되어 왔다.⁷⁾ 따라서 플럭스의 관측목적으로 이러한 고전적인 기법에서 탈피하여, 보다 기술적으로 진일보된 미기상학적 기법으로 진전되기 시작한 것은 불과 지난 수년 이래의 발전상황이다.⁸⁻⁹⁾ 그러나 이와 같은 상황의 전개는 여러 가지 기술적인 제약을 극복하므로써 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(eddy covariance method) 등의 응용에 주력해 왔다. 반면 이러한 기술의 직접적인 응용이 불가능한 극미량 성분의 경우, 보다 변형된 방식의 도입이 불가피하였다. 이와 같은 사실은 pg(picogram=10⁻¹²g) 대의 수은을 정밀하게 감지할 수 있는 계측장비의 개발에도 불구하고, 대기 중에서 수 pptv 수준 이하로 존재하는 수은의 농도변화를 정밀하게 계측하는데는 최소한 수십분 정도의 시간이 요구된다는 기술적인 제약이 반영된 결과라고도 할 수 있다. 그러나 이러한 기술적인 문제는 “수직적인 방향으로 진행되는 스칼라량의 교환에는 차이가 없다”는 원리에 기초한 “변형 보웬기법(modified Bowen Ratio(MBR) method)”과 같은 방식의 적용을 통해 상당 수준 이상으로 극복하는 것이 가능하였다.¹⁰⁾

수은과 같은 미량성분의 플럭스관측에 미기상학적 기법의 응용이 성공적으로 이루어질 수 있다는 사실이 확인됨에 따라 이러한 기법을 응용한 플럭스관측이 광범위하게 확산되고 있는 실정이다. 다수의 연구가 이들의 유동특성을 규명하기가 용이한 오염지역을 중심으로 이루어졌다. 예를 들어, 미국 테네시 주에 과거 원전시설 주변에 대규모로 수은이 방류된 오염토양지역,¹¹⁾ 캘리포니아 주에 자연적으로 수은이 풍부하게 배출되는 광상지역과 여러 비교대상구에 대한 연구,¹²⁾ 독일의 Elbe 강 주변의 오염된 유역을 중심으로 수직적으로 9단계의 농도 profile을 측정하는 연구,¹³⁾ 국내의 경우 폐기물 매립장인 난지도 지역을 중심으로 이루어진 배출량관측¹⁴⁾ 등이 이루어졌다. 이러한 연구들의 결과는 여러 유형의 오염된 환경권역에서, 수은의 배출이 대규모로

이루어지고 있으며, 여러 가지 환경적인 문제를 파생시키고 있다는 사실을 일관성있게 확인시켜주었다. 이와 같이 오염지역에서 이루어지는 수은의 교환현상에 대한 규명과 마찬가지로 청정한 배경환경권역에서 이루어지는 수은의 거동을 규명하는 부분도 수은이 지역적 또는 배경적 교환수지(material exchange balance)를 평가하는데 있어 대단히 중요한 의미를 지닌다. 이미 이러한 목적을 달성하기 위해, 미국 테네시주의 Walker Branch Watershed와 같이 배경 청정도양,⁸⁾ 스웨덴의 Gardsjon 호수와 미국 테네시주의 수림지역,¹⁵⁾ 미국 커네티컷주의 해안지역을 중심으로 한 연구¹⁶⁾ 등이 보고된 바 있다. 이러한 연구들은 기온의 변화가 수은의 배출규모나 강도를 조절하는 중요한 인자로 작용하고, 배경환경에서도 수은의 침적보다는 배출현상이 더 활발하게 이루어진다는 사실 등을 규명하는데 성공하였다.

본 연구진은 난지도 매립장과 같은 주요 오염원에서 나타나는 수은의 환경거동을 연구하기 위해 이미 2000년 봄철기간동안 수은의 교환량을 미기상학적 기법으로 실측하였다.¹⁴⁾ 본 연구에서는 선행연구의 연장선상에서, 수은의 거동을 보다 자세히 규명할 수 있는 DB의 확장은 물론 과거 연구자료의 객관성을 보완하기 위한 목적으로, 2001년 가을 기간동안 수은의 교환량을 동일한 방식으로 측정하였다. 이에 덧붙여 본 연구를 통해, 새로운 측정자료에 기초하여 수은의 교환현상에 내재된 시간적 특성, 계절적인 차이 등에 대해 비교검정을 수행하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 수은의 농도, 농도구배 측정

본 연구는 2001년 가을철에 해당하는 10월 22일부터 30일까지 9일의 기간동안 서울시에 소재한 난지도 매립장의 1공구 지점을 중심으로 179여회에 걸쳐 수은의 농도와 농도구배를 매시간대별로 관측하였다. 이들 자료를 미기상학적기법에 기초하여 수직적인 유동량을 의미하는 플럭스를 산출하는데 활용하였다. 미기상학적기법으로 산출한 교환율이 어떻게 대기화학적 인자들과 연계되는 가를 규명하기 위하여, 기준성 오염물질의 농도분석 및 주기상인자의 관측을 이동차량에 탑재된 분석시스템을 이용하여 동시에 관측하였다. 본 연구기간 중 현장실측된 주요 환경변수들의 변화양상에 대한 정보는 Table 1에 제시하였다. 전체 실험기간 중의 시간별 풍향자료를 Fig. 1에 16방위의 sector별로 비교하였

Table 1. A statistical summary of relevant environmental parameters and pollutants measured during emission and dry deposition events.

	UV mV cm ⁻²	RH %	Wspeed m s ⁻¹	Temp °C	O ₃ ppb	NO ppb	NO ₂ ppb	NO _X ppb	SO ₂ ppb	CH ₄ ppm	N-CH ₄ ppm	THC ppm	CO ppm	PM2.5 µg m ⁻³	PM10 µg m ⁻³
(1) Emission only															
Mean	0.012	65.96	2.401	16.29	0.013	0.042	0.051	0.092	0.005	9.632	1.359	10.99	1.580	149.3	213.9
Medium	0.000	66.50	2.250	15.90	0.007	0.016	0.050	0.073	0.005	6.520	0.720	7.310	1.400	145.5	209.0
SD	0.034	10.80	1.233	2.187	0.014	0.059	0.025	0.073	0.003	8.187	1.576	9.432	1.084	72.51	104.7
Min	0.000	35.00	0.600	12.50	0.000	0.001	0.009	0.009	0.001	2.240	0.020	2.270	0.100	15.00	14.00
Max	0.200	85.00	7.100	21.30	0.054	0.359	0.112	0.426	0.022	43.28	9.150	45.41	4.700	310.0	426.0
N	142	142	142	142	140	139	139	139	139	111	111	111	140	138	138
CI (90%)	0.005	1.501	0.171	0.304	0.002	0.008	0.004	0.010	0.000	1.289	0.248	1.485	0.152	10.22	14.76
(2) Dry deposition only															
Mean	0.111	54.76	2.638	17.96	0.018	0.048	0.052	0.099	0.008	5.668	0.806	6.474	1.049	114.5	161.6
Medium	0.110	53.00	2.600	18.10	0.016	0.024	0.048	0.079	0.008	3.840	0.380	4.230	1.100	110.0	158.0
SD	0.061	10.48	1.074	2.129	0.015	0.057	0.024	0.074	0.004	7.586	1.107	8.579	0.813	56.32	77.36
Min	0.000	37.00	0.900	13.20	0.000	0.001	0.017	0.018	0.002	2.170	0.020	2.190	0.100	26.00	37.00
Max	0.240	77.00	4.900	21.60	0.055	0.251	0.112	0.320	0.020	34.40	4.140	38.53	3.000	246.0	368.0
N	37	37	37	37	37	37	37	37	37	17	17	17	37	37	37
CI (90%)	0.017	2.908	0.298	0.591	0.004	0.016	0.007	0.021	0.001	3.212	0.469	3.633	0.226	15.63	21.47
*Results of z-statistics test:															
Z value	-9.5451	5.7553	-1.1592	-4.2284	-1.9037	-0.5505	-0.2253	-0.5072	-4.2843	1.9852	1.7989	1.9940	3.2786	3.1328	3.3721
P**	0.00E+00	8.67E-09	2.46E-01	2.36E-05	5.70E-02	5.82E-01	8.22E-01	6.12E-01	1.83E-05	4.71E-02	7.20E-02	4.62E-02	1.04E-03	1.73E-03	7.46E-04

*Tests were conducted to examine the significance of differences between two datagroups.

**For data sets with significant differences (such as probability greater 99.99%) are bold-phased.

다. 이 결과에 의하면 실험기간 중 복서풍 또는 남동풍이 집중적으로 발생하였다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 수은의 교환율을 구하기 위해 미기상학적 기법의 응용을 위해 수은의 농도구배를 1과 5 m의 양고도에서 측정하였다. 이와 관련된 분석화학적 기술은 이미 선행연구에서 제시한 바 있다.¹⁴⁾

토양 상층부의 대기 중에 형성되는 수은의 농도구배를 측정하기 위해, 표토면 상의 두 고도(1과 5 m 높이)에서 24시간 연속으로 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 1.0l/min의 유속으로 공기시료를 흡입하여, 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 탈착되었다. 탈착된 수은은 건조공기를 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 1pg대로서, NBS standard 1632a, 1568, 1575 등에 대비한 절대정밀도(accuracy)는 약 3~5%(세가지 표준물질의 평균)를 유지하였다. 1, 2, 3 ng대의 증기상태의 표준시료를 5회씩 기기에 직접 주입하는 방식으로 반복분석하여, 정밀도(precision)를 분석하였다. 그 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 실험실내의 표준시료대신 현장의 공기시료를 가장 현장조건에 가깝게 흡착관으로 채취하여 실험분석한 결과, 약 2% 내외의 정밀도를 유지하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 분석방식의 정밀성이 대단히 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

2.2. 미기상학적 기법의 적용

다양한 미기상학적 방법이 지표면과 대기에서 발생하는 물질과 에너지의 교환량을 측정하는데 적용되고 있다. 가장 보편적인 교환량 측정 방법으로 Eddy

correlation 법, Bulk transfer 법, Gradient 법 등이 있다. Eddy correlation 방법은 적정한 수준의 open fetch가 형성된 넓은 공간에서 특정한 발생원의 영향을 받지 않는조건에서 교환량의 직접적인 측정을 가능하게 한다. 반면 10 Hz 정도의 고속으로 바람, 온도, 화학종의 농도 등에 대하여 동시간적인 측정이 요구되므로, 운영이 까다로운 고가의 관측장비를 관리유지하여야 하는 문제가 있다. 더욱이 화학종의 경우 농도를 10 Hz의 속도로 측정할 수 있는 물질의 종류와 장비가 매우 제한적이므로, 화학종의 교환량을 측정하는데 Eddy correlation 법은 큰 제약을 받고 있다. 따라서 fast sensor의 응용이 곤란한 화학종의 경우, 이러한 방식이 적절하게 응용된 gradient 법을 활용하는 것이 가능하다. 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 산출하므로써, 다음과 같이 간접적인 방식으로 교환량을 계산할 수 있다.

$$\tau = \rho K_m (\partial U / \partial z) \quad (1)$$

$$H = \rho c_p K_h (\partial \theta / \partial z) \quad (2)$$

$$F = K_c (\partial C / \partial z) \quad (3)$$

Eddy diffusivity의 경우, 기상 및 지형조건 등에 따라 변하기 때문에, 다른 방법으로 이를 결정하여 교환량을 산출하는데 이용할 수 있다. 가장 보편적인 방법으로 momentum flux와 sensible heat flux를 Eddy correlation 법으로 구한 뒤, 이들을 gradient법에 적용시킨 방법과 비교하여 각지를 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.¹⁰⁾

$$\tau = -\rho \overline{uw} = \rho K_m (\partial \theta / \partial z) \quad (4)$$

$$H = \rho c_p \overline{\theta w} = \rho c_p K_h (\partial \theta / \partial z) \quad (5)$$

즉

$$K_m = \overline{uw} / (\partial U / \partial z) = K_c \quad \text{또는} \quad (6)$$

$$K_h = (\overline{\theta w} / \partial z) = K_c \quad (7)$$

여기서 구한 K_c 를 이용하고 높이에 따른 수은의 농도구배를 식 (3)에 적용하면 수은의 교환량이 산출된다.

본 연구에서는 Eddy correlation 법으로 sensible

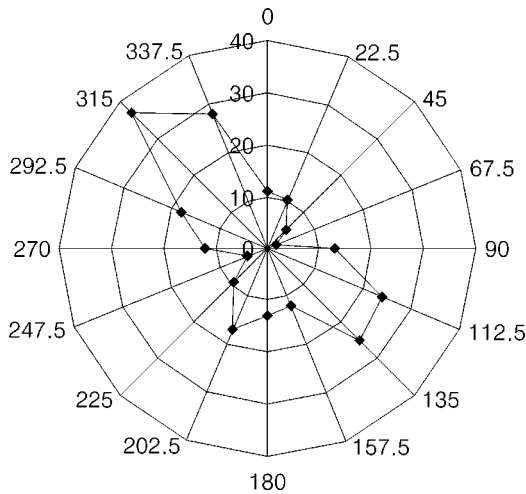


Fig. 1. A plot of windrose pattern for measurement site during the whole measurement period.

heat flux를 산출하고, 높이에 따른 온도의 차이를 이용하여 K_h 를 구하였다. 이를 K_c 로 간주하여 식 (3)에 의하여 Hg의 교환량을 계산하였다. 이를 위하여 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 0.1 초 이상이 되기 때문에 10 Hz의 sampling rate은 본 연구의 목적에 충분한 것으로 평가된다. 본 연구에 사용된 온도계의 정밀도가 0.1°C 이기 때문에 두 높이에서 측정된 온도차이가 0.1°C 이상될 경우에만 K_c 계산에 적용하므로써, 중립조건에서 K_c 가 비이상적으로 큰 값을 취하는 경우를 제거하였다.

Eddy correlation의 정확한 운영을 위해서는 주변 지형 지물에 의한 흐름의 왜곡을 방지하기 위하여 충분한 fetch를 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 모든 방향에서 수 백 m 이상의 fetch를 갖는 평탄지형에서 관측을 실시하여, 공기의 흐름이 항상 수직적으로 laminar하도록 하여 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 평균값인 $\bar{w}=0$ 의 조건을 평가한다. 이 되지 않을 경우 sonic sensor의 수평 alignment가 제대로 맞추어지지 않았거나 지표면이 평탄하지 않는 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.

3. 결과 및 토론

3.1. 농도구배의 검정

수은의 교환현상을 정량화하기 위해 첫 단계로 유동성의 방향을 설정하여야 한다. 이를 위해, 양고도간에 존재하는 미세한 농도차이를 기준으로 배출 (+)이나 건조침적 (-)을 구분한다. 그런데 본 연구에서 발견되는 미세한 농도차이 (또는 농도구배)를 기준으로 방향성을 설정한다는 것이 얼마만큼 의미가 있는가를 검정하는 것이 중요하다. 이를 위해 Kim and Kim(1999)은 다음과 같이 '농도구배의 %값'을 계산하고 활용하였다.

$$\text{Percent gradient (PG)} = \{ |\Delta C_{\text{Hg}_0}| / C_{\text{Hg}_0}(1\text{m}) \} \times 100$$

여기에서 ΔC_{Hg_0} 와 $C_{\text{Hg}_0}(1\text{m})$ 은 각각 두 고도간 수은농도의 차이 및 1 m 고도에서 수은의 농도를 의미한다. 이를 측정방식에 내재된 정밀도와 비교하는 방식으로 방향성의 신뢰도를 간접적으로 평가할 수 있는 기준으로 활용하였다.¹⁷⁾ 그 결과, 배출시 PG의 평균과 표준편차는 $10.5 \pm 4.8\%$ (범위: 0.17~21.7%, N=142)로 나타났다. 반면 건조침적의 경우 평균과 표준편차는 $10.3 \pm 11.3\%$ (범위: 0.36~46.8%, N=37)로 나타났다. 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 95%(총 142개 자료 중 135개)와 건조침적자료의 92%(총 37개 자료중 34개)에 대한 방향성은 유의한 것으로 보인다. 이와 같은 실험자료의 결과를 감안할 경우, 산출된 농도구배의 94.4% 이상은 유의한 수준인 것으로 감안할 수 있다.

3.2. 수은관련 자료의 분포특성

서울시의 난지도지역을 중심으로 수은의 유동특성을 규명하기 위해 2001년 10월말 기간 중 9일동안 수은의

Table 2. Comparison of Hg data sets (concentration, gradient, and flux) measured between two different fetch types from Nan-Ji-Do.

	Hg-L ¹⁾ ng m ⁻³	Hg-U ²⁾ ng m ⁻³	Gradient ng m ⁻³	%Grad. %	K m s ⁻¹	Flux ng m ⁻² h ⁻¹	V _d cm s ⁻¹
Emission only							
Mean	6.39	5.71	0.68	10.5	0.27	576	
Medium	6.22	5.58	0.67	10.9	0.22	436	
SD	2.02	1.80	0.40	4.77	0.20	456	
Min	1.94	1.75	0.01	0.17	0.01	6.29	
Max	14.7	13.9	2.13	21.7	0.83	2296	
N	142	142	142	142	142	142	
CI (90%)	0.28	0.25	0.05	0.66	0.03	63.4	
Deposition only							
Mean	4.99	5.48	-0.49	-10.3	0.53	-930	-4.67
Medium	5.21	5.54	-0.27	-5.25	0.50	-402	-2.29
SD	1.77	1.88	0.54	11.3	0.18	1065	4.86
Min	2.25	2.32	-2.23	-46.8	0.06	-4605	-19.2
Max	10.6	10.9	-0.02	-0.36	0.90	-35.4	-0.23
N	37	37	37	37	37	37	37
CI (90%)	0.49	0.52	0.15	3.14	0.05	296	1.35

^{1,2)}Capital letters L and U denote lower (0.2 m) and upper (2 m) level for the measurements of Hg concentration gradient, respectively.

농도 및 농도구배 관측을 179회에 걸쳐 시간대별로 수행하였다. 관측기간 중에 기온은 12.5~21.6°C의 범위에서 변한 반면, 상대습도는 35~85%를 유지하였다. 대체로 온화한 기온과 습도가 지속된 가을철의 계절적 특성이 확인되었다. 관측자료는 배출과 건조침적으로 각각 구분한 후 농도, 농도구배, 플럭스에 대한 해석을 개별적으로 또는 연계하여 해석하였다. 이중 배출이 142회(79.0%) 그리고 건조침적이 37회(21%) 발견되었다. 이렇게 계산된 수은의 농도구배와 미기상학적으로 구한 교환율계수를 이용하여, 플럭스 자료를 산출하였다.

본 연구기간에 관측된 농도, 농도구배, 플럭스자료의 기본적인 통계치는 Table 2에 제시하였다. 배출이 관측된 총 142개의 자료만을 분리하여 정리하면, 하층(1 m)에서 관측한 수은의 농도는 6.39 ± 2.02 ng/m³(범위: 1.94~14.7 ng/m³), 상층(5 m)에서 관측한 수은의 농도는 5.71 ± 1.80 ng/m³로 나타났다(범위: 1.75~13.9 ng/m³). 반면 건조침적이 관측된 37개 자료의 경우, 하층의 농도가 4.99 ± 1.77 ng/m³, 상층의 농도가 5.48 ± 1.88 ng/m³로 나타났다. 배출과 침적에 따라 고도별 농도차이는 뚜렷하게 나타났다. 배출시 농도구배는 0.68 ± 0.40 ng/m³로 반면 건조침적시에는 이보다 작은 크기의 -0.49 ± 0.54 ng/m³로 나타났다. 그리고 배출 및 건조침적에 대한 플럭스의 평균치는 각각 576 ± 436 ng/m²/h(N=142)

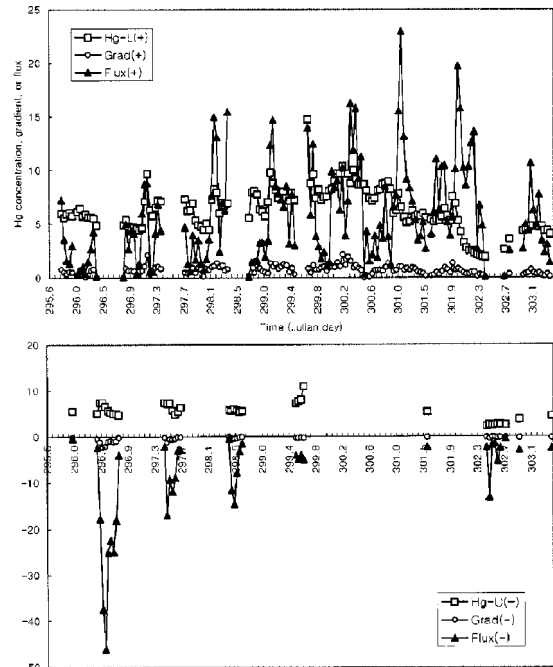


Fig. 2. Temporal variability of Hg concentration, gradient, and flux data. Hg data are divided into (a) emission (upper) and (b) dry deposition events (lower). Units for concentration and gradient are ng m⁻³, while that for flux is 100 times ng m⁻² h⁻¹. Letters, L (-) and U (+), denote the direction of Hg exchange such as upward emission and downward dry deposition, respectively.

와 $-930 \pm 1065 \text{ ng/m}^2/\text{h}$ ($N=37$)로 나타났다. 개별적으로 산출된 배출과 침적 플럭스자료를 총괄적으로 평균하면, 전체 기간 동안 매일당 난지도 상층토양으로부터 $6.35 \mu\text{g Hg/m}^2$ 의 배출이 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

3.3. 농도분포의 시간적 경향성

전체 연구기간 동안 수은의 분포특성을 이해하기 위해 수은자료의 시간적 경향성을 파악하는 것도 중요하다. Fig. 2에는 전체 기간 동안 배출과 침적을 분리하여, 농도, 농도구배, 플럭스를 시간의 함수로 제시하였다. 전체의 4/5에 가까운 배출자료의 경우, 대체로 수은의 농도변화가 실험의 중반부를 지나면서 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 반면 플럭스값의 경우 대단히 변화가 심하게 일어난 것을 확인할 수 있다.

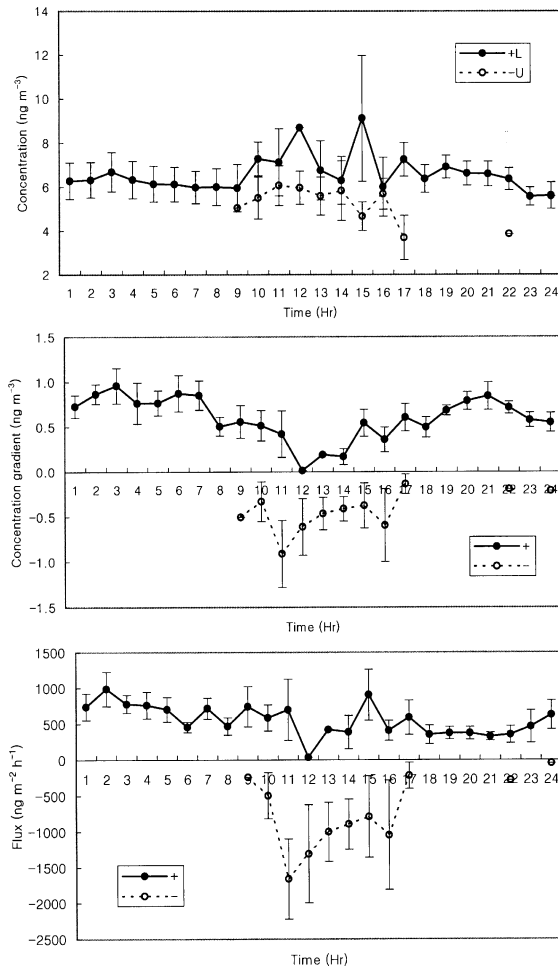


Fig. 3. Diurnal variability of Hg data sets: (a) concentration, (b) gradient, and (c) fluxes. Notations for letters and symbols are identical to Fig. 3.

반면 건조침적과 관련된 시간별 수은의 농도자료는 대단히 제한적으로 발생하면서, 그 경향도 훨씬 불규칙하게 나타났다. 대체로 실험 초반에 높은 플럭스를 보였지만, 시간의 경과와 함께 그 크기가 줄어드는 경향이 두드러졌다. 수은의 환경거동을 보다 세밀하게 분석하기 위해서는 이들의 일주기 경향성을 이해하는 부분이 대단히 중요하다.^{18,19} 이들 자료의 일주기적 경향성을 세밀하게 분석하기 위해, Fig. 3에는 농도, 농도구배, 플럭스를 각각 수직적인 방향별로 구분할 수 있게 분리하여 제시하였다.

일반적으로 수은의 일주기 분포는 두 가지 양상을 취하는 것으로 잘 알려져 있다. 낮 시간대에 상승된 기온 등의 영향으로 활발한 배출이 이루어지고, 이러한 영향이 강하게 나타날 때는 주교야저의 경향이 뚜렷하다.¹⁹ 반면 야간대에 역전층이 형성되고, 공기의 유동이 제한적일 때 고농도의 수은이 야간대에 형성되는 경우도 빈번하게 발견된다.¹⁸ 본 연구기간동안 관측된 자료를 보면, 대체로 전자의 경우와 같이 주간대에 고농도가 형성된 것으로 보인다. 그런데 농도구배와 플럭스 자료간에는 상당한 차이가 뚜렷하다. 배출이나 침적에 상관없이 농도구배자료는 주간대에 상대적으로 낮은 값을 보이는 경향이 강하게 나타난다. 그렇지만 농도구배에서 나타난 이와같은 경향은 플럭스 값에서 상당히 다른 모습을 보인다. 배출의 경우, 어느 정도 불규칙하지만 뚜렷하게 주야간의 경향을 보기 어렵다. 반면 제한적으로 발생하는 침적의 경우, 주로 낮시간대에 강하게 일어나는 경향을 보여 주고 있다. 이와 같은 경향은 일반적으로 배경환경권과 같이 수은의 배출이 낮시간대에 집중되고, 침적이 야간대에 많이 일어난다고 보고된 선행연구의 결과들과

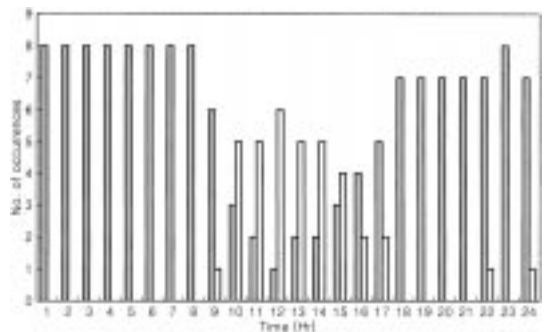


Fig. 4. Plots of frequency distribution of Hg exchange processes. Comparison was made between emission and deposition process on 24-h scale. Emission and deposition are shown as dark and white bar, respectively.

는 상당한 차이를 보이는 것으로 사료된다.⁸⁾ 이와 같은 경향성의 차이는 단순히 자료값의 크기에 대한 비교에서 뿐만 아니라, 발생빈도를 비교한 결과에서도 어느 정도 뚜렷한 추세였다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에 발생빈도를 비교한 결과를 보면, 배출의 빈도가 낮시간대에 절대적으로 감소한 반면, 침적의 빈도는 주로 낮시간대에 집중하였다는 것을 알 수 있다. 이러한 원인을 정확하게 진단할 수는 없지만, 매립장과 같은 대량의 수은을 배출하는 환경의 경우, 일반적으로 자연적 요인들에 의해 조절되는 수은의 교환현상과 어느 정도 차이를 띠는데 따른 결과로 볼 수 있을 듯 하다.

3.4. 난지도지역에서 수은의 거동을 조절하는 인자에 대한 고찰

수은의 농도나 배출율은 여러 가지 환경요인의 작용들에 의해 조절이 된다.⁸⁾ 특히 연구기간 중 수은의 배출이 특정한 발생원에 의해 영향을 받고 있었던가의 여부를 평가하기 위한 가장 기본적인 방편으로, 이들 자료의 분포특성을 풍배에 연계하여 비교해 보았다. Fig. 5에는 관측된 풍향자료에 따라 농도, 농도구배, 플럭스의 분포를 비교하였다. 수은의 농도는 배출시 하단의 자료를 그리고 침적시 상단의 관측자료를 비교하였다. 관측된 결과를 보면, 대체로 농도자료의 경우 배출이나 침적을 막론하고 서풍방향에서 고농도를 띠는 것으로 나타난다. 플럭스 자료의 경우에도 북서풍계열에서 강한 침적의 경향이 나타나는 것으로 확인되었다. 이와 같은 경향은 북서쪽 또는 서쪽에서 일정 규모 침

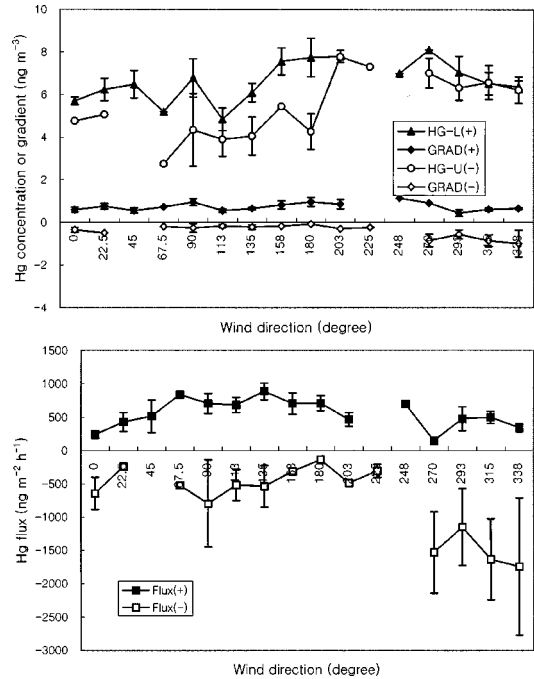


Fig. 5. The effects of wind direction on Hg data sets as a function of wind direction: (a) Hg concentration and gradient; and (b) Hg flux. Letters, L (-) and U (+), denote the direction of Hg exchange such as upward emission and downward dry deposition, respectively.

적현상에 영향을 미칠 수 있는 외부 발생원의 존재가 가능성을 시사하는 것으로 짐작된다.

수은의 농도를 조절하는 요인들을 고찰하기 위해, 동시에 관측된 주변 환경인자와의 상관성분석을 시도하

Table 3. Results of correlation analysis between Hg data sets and relevant parameters determined concurrently from NJD.

	Hg-L(+) ¹⁾	Hg-U(+) ²⁾	Grad(+)	Hg-L(-)	Hg-U(-)	Grad(-)	K(+)	K(-)	F(+)	F(-) ¹⁾
Hg-L(+)	(142)									
Hg-U(+)	0.985**	(142)								
Grad(+)	0.620**	0.476**	(142)							
Hg-L(-)				(37)						
Hg-U(-)				0.958**	(37)					
Grad(-)				-0.054	-0.336	(37)				
K(+)	-0.337**	-0.306*	-0.329**				(143)			
K(-)				-0.398	-0.373	-0.008		(37)		
F(+)	0.243	0.172	0.458**				0.540**		(142)	
F(-)				0.031	-0.245	0.958**		-0.227		(37)
UV	0.062	0.142	-0.331**	-0.041	0.106	-0.506	0.435**	0.545*	-0.046	-0.638**
RH	0.262	0.209	0.384**	0.395	0.456	-0.296	-0.424**	-0.394	-0.027	-0.160
Wspeed	-0.460**	-0.437**	-0.357**	-0.516	-0.486	-0.004	0.638**	0.698**	0.230	-0.186
Temp	0.286*	0.346**	-0.112	0.291	0.245	0.105	0.032	0.146	-0.033	0.000

Table 3. Continued

	Hg-L(+) ¹⁾	Hg-U(+) ²⁾	Grad(+)	Hg-L(-)	Hg-U(-)	Grad(-)	K'(+)	K'(-)	F(+)	F(-) ³⁾
O ₃	-0.272	-0.255	-0.228	-0.335	-0.228	-0.307	0.186	0.158	-0.090	-0.416
NO	0.415**	0.400**	0.297*	0.507	0.480	-0.007	-0.072	-0.338	0.204	0.117
NO ₂	0.734**	0.763**	0.274	0.816	0.750**	0.070	-0.295*	-0.299	0.007	0.166
NO _x	0.588**	0.586**	0.335**	0.656**	0.613**	0.017	-0.161	-0.357	0.167	0.143
SO ₂	0.443**	0.508**	-0.052	0.769**	0.740**	-0.051	0.064	-0.210	0.071	-0.021
CH ₄	0.140	0.118	0.188	-0.011	-0.006	-0.102	-0.543**	-0.321	-0.303	0.044
N-CH ₄	0.259	0.218	0.348*	0.224	0.232	-0.287	-0.525**	-0.353	-0.237	-0.086
THC	0.165	0.139	0.221	0.019	0.024	-0.127	-0.559**	-0.329	-0.303	0.028
CO	0.546	0.504**	0.493**	0.578*	0.521*	0.083	-0.244	-0.183	0.161	0.158
PM2.5	0.816**	0.825**	0.407**	0.920**	0.941**	-0.254	-0.437**	-0.429	-0.007	-0.166
PM10	0.821**	0.832**	0.401**	0.919**	0.936**	-0.241	-0.410**	-0.421	0.000	-0.152

^{1,2)}Capital letters L and U denote lower (0.2 m) and upper (2 m) level for the measurements of Hg concentration gradient, respectively.

In addition, symbols (+) and (-) designate the direction of exchange, up- and downward, respectively. * and ** denote the probability of correlation at 99.9 and 99.99 %, respectively.

였다. Table 3에 제시된 결과를 보면, 수은의 농도가 주변 인자와 가장 빈번하게 높은 상관성을 보이는데 반해, 농도구배나 플럭스자료에서 그 강도나 빈도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 배출이나 침적에서 뚜렷한 구분이 되지 않는 것과는 대조적이다. 특히 풍속이나 기온과 같은 기본적인 기상인자들과는 일관성있게 각각 음, 양의 상관성을 강하게 보여 준다. 수은의 농도가 기온과 강한 양의 상관성을 보이는 것은 대단히 일반적인 현상이다.⁸⁾ 고온의 조건에서 배출이 촉진되기 때문에 농도상승을 유도할 가능성은 상승되는 것으로 설명되지만, 실제로 플럭스값과 같이 배출을 직접적으로 산출한 인자와 기온간에 이와 같은 관계를 직접적으로 확인하기는 쉽지 않다.¹⁴⁾ 기상인자들과의 상관성이 비교적 제한적으로 발견되는데 반해, 대기질을 평가하는 기본적인 오염물질들과는 상당히 높은 상관성이 빈번하게 발견된다. 이러한 관계는 질소산화물, 탄소산화물, 분진성분 등에서 비교적 뚜렷하다. 이러한 비교에서 특히 유의할 점은 수은의 농도와 모든 분진간에는 대단히 높은 상관성이 수은의 수직적 교환방향에 상관없이 일관성있게 나타난다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 분진의 입경크기에 관계없이 그리고 수직적 교환방향에 상관없이 수은과 분진의 농도간에는 대단히 높은 상관관계가 일관성있게 발견된다. 특히 이러한 관계는 배출시의 농도구배에서도 지속적으로 확인된다. 그런데 또 다른 관점에서 유의할 부분은 수은의 농도가 매립장의 주배출물질인 CH₄과 같은 성분과는 뚜렷한 상관성을 발견하기가 쉽지 않다. 난지도와 같은 매

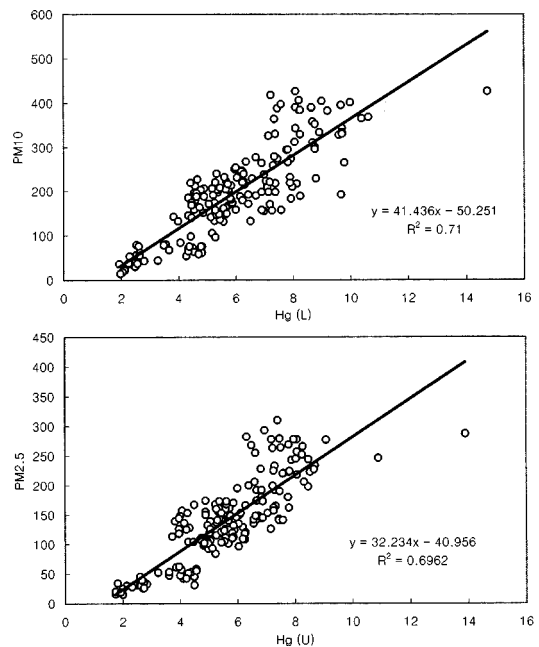


Fig 6. Relationships between Hg concentration and PM concentration levels are compared using the data sets obtained during this study. (A) upper: Hg concentration at 1 m height and PM 10; and (B) lower: Hg concentration at 5 m and PM 2.5.

립시설물에서는 이들 성분이 대규모로 생성된다는 점을 감안하면, 메탄과 수은의 낮은 상관성과 기타 오염물질과 수은의 높은 상관성이 동시에 상존하는 현상은 여러 가지 가능성을 시사한다. 우선적으로 생각할 수

있는 부분은 매립표면 상층부에서 발견되는 수은의 농도가 매립층내에서 진행되는 작용 뿐만이 아니라, 기타 주변지역의 대기질을 악화시키는 여러 가지 일반적인 오염원의 영향에 대해 보다 복합적인 방식으로 교감할 가능성을 시사한다.

4. 결 론

본 연구진은 과거에 난지도를 중심으로 수은의 배출량을 측정된 선행연구의 연장선상에서 그리고 수은의 배출량을 관측하는 기술에 대한 지속적인 응용가능성을 확대하기 위하여, 2001년 가을 기간동안 현장중심의 관측을 수행하였다. 총 연구기간 중 179회에 걸쳐 두 개의 고도에서 (1 및 5 m)에서 수은의 농도를 시간대별로 관측하고 이를 토대로 수은의 직접적인 교환량인 플럭스값을 산출하였다. 본 연구의 결과에 의하면 전체적으로 배출과 건조침적이 각각 142회와 37회로 발견되어, 배출이 침적보다 약 3.8배 정도 빈번하게 발견되었다. 관측된 농도구배 및 플럭스값의 통계적 유의성을 PG값을 이용하여 평가하였다. 그 결과에 의하면, 수직적 방향(배출 또는 침적)에 관계없이 대부분 측정자료(94.4% 이상)의 자료에서 뚜렷하게 수직적인 방향성을 확인하는 것이 가능하였다.

수직방향으로 양분된 교환현상의 자료를 통합하여 보면, 매일 $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^2$ 의 수은이 난지도 표면으로부터 대기중으로 배출이 이루어진 것으로 나타났다. 이런 연구 결과는 이미 선행연구에서 밝힌 바와 같이 난지도의 표면에서는 수은의 침적보다 배출이 활발하게 이루어진다는 점을 뚜렷하게 확인시켜 주었다. 비록 2000년 봄철기간 동안 한시적으로 시행된 선행연구의 결과에서도 이러한 경향이 확인된 바 있다. 그렇지만, 과거 시점에 관측된 결과와 가장 큰 특징은 보다 온화한 기후조건이 유지된 본 실험기간 중 수은의 배출량이 그 당시의 결과보다 구조적으로 일정 수준 높은 값을 보이는 점을 들 수 있다. 그리고 상관분석의 결과에서 나타나는 또 다른 특징은 수은의 농도가 분진성분의 농도와 대단히 강한 양의 상관성을 유지하는 점을 들 수 있다. 과거의 연구에서 이들 변수간 상관성이 이렇게 높게 확인된 경우는 대단히 드문 형편이다. 이러한 특이성을 감안하면, 연구기간 중 수은의 농도는 분진의 발생에 상당 수준 조절되거나 영향을 받았을 가능성을 강하게 시사한다. 이들의 환경거동을 체계적으로 이해하기 위해서는 매립장과 같은 특수환경권역의 성격을

규명하기 위한 연구자료가 지속적으로 축적되어야 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 세계적 선도과학자연구과제의 지원에 의하여 이루어졌습니다(R03-2001-00044).

참고문헌

- 1) W.H. Schroeder and J. Munthe, *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 8909-822.
- 2) B. Hall, *Water, Air and Soil Pollut.*, **1995**, 80, 3-01-315.
- 3) S.E. Lindberg, D. Wallschlager, E.M. Prestbo, N.S. Bloom, J.L. Price and D. Reinhart, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35(23), 4011-4015.
- 4) G.C. Edwards, P.E. Rasmussen, W.H. Schroeder, R.J. Kemp, G.M. Dias, C.R. Fitzgerald-Hubble, E.K. Wong, L. Halfpenny-Mitchell, and M.S. Gustin *J. Geophys. Res.*, **2001**, 106, 5,421-5,435.
- 5) K.-H. Kim, J.H. Paul, M. Barnett and S.E. Lindberg, **1997** Chapter 7. Biogeochemistry of mercury in the air-soil-plant system. In *Metal Ions in Biological Systems*, Volume 34 (edited by Siegel H.) Marcel Dekker Inc, New York, 185-212.
- 6) Z.F. Xiao, J. Munthe, W.H. Schroeder and O. Lindqvist, *Tellus*, **1991**, 43B, 367-279.
- 7) K.-H. Kim and S.E. Lindberg, *Water, Air and Soil Pollution*, **1995**, 80, 1059-1068.
- 8) K.-H. Kim, S.E. Lindberg and T.P. Meyers, *Atmospheric Environment*, **1995**, 29(2), 267-282.
- 9) S.E. Lindberg, K.-H. Kim and J. Munthe, *Water, Air and Soil Pollution*, **1995a**, 80, 383-392.
- 10) T.P. Meyers, M. Hall, S.E. Lindberg and K.-H. Kim, *Atmospheric Environment*, **1996**, 30(19), 3321-3329.
- 11) S.E. Lindberg, K.-H. Kim, T.P. Meyers and J.G. Owens, *Environmental Science and Technology*, **1995b**, 29(1), 126-135.
- 12) M.S. Gustin, G.E. Taylor and T.L. Leonard, *Environ. Sci. Technol.*, **1996**, 30, 2572-2579.
- 13) D. Wallschlager, H.H. Kock, W.H. Schroeder, S.E. Lindberg, R. Ebinghaus and R.-D. Wilken, *Atmospheric Environment* **2000**, 34, 3745-3755.
- 14) K.-H. Kim, M.Y. Kim and G. Lee, *Atmospheric Environment* **2001**, 35(20), 3475-3493.
- 15) S.E. Lindberg, P.J. Hanson, T.P. Meyers and K.-H. Kim, *Atmospheric Environment* **1998**, 32, 895-908.

- 16) X. Lee, G. Benoit and X. Hu, *Atmospheric Environment* **2000**, 34, 4,205-4,213.
- 17) K.-H. Kim and M.-Y. Kim, *Atmospheric Environment* **1999**, 33, 3153-3165.
- 18) D.S. Lee, G.J. Dollard and S. Pepler, *Atmospheric Environment* **1998**, 32, 855-864.
- 19) K.-H. Kim and M.-Y. Kim, *Atmospheric Environment* **2001**, 35(1), 49-59.