

## 난지도지역의 수은배출특성 연구: 배출공 내부의 농도와 배출공을 통한 수은플럭스의 관측

### Studies of Hg Concentrations and Fluxes in the Ventpipes Determined from a Large Landfill Site

김민영·김기현<sup>1),\*</sup>·조석주

서울시 보건환경연구원, <sup>1)</sup>세종대학교 지구과학과 대기환경연구실

(2001년 5월 14일 접수, 2001년 7월 20일 채택)

Min-Young Kim, Ki-Hyun Kim<sup>1),\*</sup> and Suk-Joo Cho

Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment, Seoul, Korea

<sup>1)</sup>Atmospheric Environment Laboratory, Department of Earth Sciences, Sejong University, Seoul, Korea

(Received 14 May 2001; accepted 20 July 2001)

#### Abstract

The analysis of vent-emitted Hg concentrations and relevant environmental parameters was made from the inlet of 42 ventpipes in Nan-Ji-Do area of Seoul during September/October of 2000. Using these data, the fluxes of Hg from the ventpipes were also derived. The mean concentration of Hg, computed using the data sets collected from 42 ventpipes, was  $420 \pm 619 \text{ ng m}^{-3}$  with the range of  $3.45 \sim 2,952 \text{ ng m}^{-3}$ . Because of large differences in concentration levels between two sectors 1 and 2 and between plain and slope areas, evaluation of the data was made by dividing them into four different categories such as plain areas of sectors 1 and 2 (and/or slope areas of sectors 1 and 2). When this classification was applied, the computed fluxes were highly different among each group with the generally enhanced fluxes in plain area relative to slope area. The computed fluxes were then used to make comparative analysis of different source processes in the study area.

**Key words** : Mercury, Nan-Ji-Do, ventpipes, emission, methane

#### 1. 서론

많은 국가에서 이미 온실가스 배출을 감소하기 위한 여러 가지 계획을 세우고 있다. 대형매립시설물들의 매립층 내부에서 여러 가지 화학적 또는 생

화학적 반응이 진행되고, 이러한 반응의 결과물로 다양한 생물성 기원의 오염물질들이 대기 중으로 배출될 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 대부분의 매립시설물 등에서 주요 현안으로 등장하는 메탄과 같은 온실기체의 배출문제는 현존하는 기술의 적용만으로도 충분히 배출저감효과를 기대할 수 있는 것으로 알려지고 있다. 이러한 기술을 적용하여, 현재 인위적으로 배출되는 메탄의 규모를 10~20%

\* Corresponding author

Tel : +82-(0)2-3408-3233, E-mail : khkim@sejong.ac.kr

정도 줄일 경우, 메탄의 농도를 90년 대 수준 또는 그 이하로 회귀·유지하는 것이 가능하다고 한다 (Hogan *et al.*, 1991). 이러한 문제에 대한 일반 시민들의 인식 수준이 향상되는 현상과 함께, 매립지와 같이 가장 중요한 메탄의 발생시설물들에 대한 배출관리의 필요성이 넓게 확산되고 있다 (US EPA, 1993). 이들 시설물은 단지 메탄과 같은 오염물질의 배출원으로서 작용만이 중요한 것이 아니라, 여타 주요 오염물질들의 배출에도 상당히 기여도가 클 것으로 예상되는 배출원이라고 할 수 있다 (Pacyna, 1998). 이들 존재의 심각성을 감안하여, 미국의 대기청정법 등에 따르면, 일정 수준 이상의 모든 매립시설물들은 휘발성 유기화합물들에 대한 배출관리를 규정하고 있다 (US EPA, 1996). 마찬가지로 거의 대부분이 증기상태로 존재하는 수은과 같이 유해한 중금속 성분도 여타 가스상 오염물질과 함께 매립지 시설물에서 상당 수준 배출이 이루어질 수 있다는 점이 확인된 바 있다 (김민영 등, 2001).

서울시를 동서로 관통하는 한강변을 따라 서울시의 중서부 쪽에 위치한 난지도는 비위생방식으로 매립된 세계 최대규모의 매립시설물에 해당한다. 매립지의 규모나 시설물의 관리형태 등과 관련된 독특성으로 인해 난지도지역은 물, 토양, 대기오염과 관련된 여러 가지 현상을 연구하는데 중요한 관심의 대상으로 떠오르고 있다. 최근에는 난지도지역을 중심으로 진행되는 대기오염현상의 다양한 측면을 연구하기 위해, 수은과 같은 중금속 또는 벤젠, 톨루엔, 자일렌을 위시한 VOC 화합물질 등에 대한 농도 분포를 관측한다거나 또는 미기상학적인 기법을 동원하여 이들 오염물질의 플럭스를 관측하려는 시도가 수 차례 이루어졌다 (Kim *et al.*, 2001; 김민영 등, 2001).

이러한 선행연구들의 결과는 여러 종류의 미량기체가 지닌 분포특성을 규명하는데 크게 기여하였다. 대체로 이들 오염물질의 농도는 도심권 일반대기에서 발견되는 수준보다 수 배 높은 농도로 나타났다. 대규모 오염원에서 이 정도 수준의 농도가 발견되는 현상은 95m의 높은 고도를 이루는 난지도 지역이 지속적으로 발생하는 높은 풍속의 바람 등에 의해 원활한 혼합조건이 유지되는데 따른 결과로 보인다. 반면 이들의 플럭스를 관측한 결과에 의하면, 이질적인 화학종에 따라 배출이나 침적의 양

상이 다양하게 해석될 정도로 크게 차별화되는 양상이 두드러졌다. 예를 들어, 수은과 같이 반응성이 낮고 안정된 화학물질은 특별한 기상조건을 제외하고 대체로 배출이 압도적으로 주를 이루는 경향성을 보였다 (Kim *et al.*, 2001). 이처럼 일반적인 조건에서는 수은의 교환이 배출위주로 나타나는 경향은 이미 과거의 많은 연구들에서 뚜렷하게 확인된 결과들과 일맥상통한다 (Kim *et al.*, 1995; Lindberg *et al.*, 1995). 반면 관측점이 풍하지역으로 작용할 경우 (배출공에서 발원한 오염물질들이 관측점으로 직접적인 영향을 미치게 될 경우), 수은과 같은 오염물질들이 대규모로 침적하는 현상이 뚜렷하게 확인되었다. 이와 같은 발견은 동일한 지점이 풍하지역으로 작용하는가의 여부에 따라 미기상학적 관측의 결과가 다양하게 해석될 수 있다는 점을 입증해주는 사례라고 볼 수도 있을 것이다. 수은의 경우와 달리, 동시에 관측된 VOC 성분들의 교환현상에 대한 관측결과는 오염물질의 물리화학적 특성에 따라 배출과 침적의 경향성이 다양한 형태로 나타날 수 있다는 것을 확인시켜 주었다 (김민영 등, 2001). 이와 같은 결과들을 취합해 볼 때, 각 물질의 배출원이 유사한 성격을 가졌으리라는 배출원의 특성에도 불구하고, 이들의 배출이나 침적의 양상 및 규모가 상호간에 큰 차이를 보일 정도로 복잡하게 조율될 수 있다는 점이 확인되었다.

본 연구진이 난지도에서 수행한 기존 선행연구들의 목표는 난지도라는 대형오염시설물에서 이루어지는 오염물질의 교환량이나 교환규모를 미기상학적 기법을 동원하여 실측하는데 많은 비중을 두었다. 그런데 실제로 난지도지역에서 이루어지는 오염물질들의 배출현상을 단위 면적 규모로 볼 때, 가장 중요한 배출원의 하나로 이들 배출공을 통한 배출로 예상된다. 대부분 지하 매립층 깊숙이 관통된 (40~60m) 배출공들에 대한 자체 교환율을 실측하므로써, 난지도 지역의 배출규모 추정에 대한 기존의 상이한 접근방식들에 대한 점정의 기초를 수립하는 것이 어느 정도 가능할 것으로 보인다. 특히 최근까지 난지도의 상층토양에 수차례 복토가 이루어지고 비닐막 등이 피복되었다는 점을 감안하면, 이들 배출공으로부터 배출되는 부분은 질적으로 또는 양적으로 중요한 기여를 할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 선행연구의 일환으로 미기상학적기법을

통해 예측한 수은의 교환수지에 대한 이중적인 검증의 기준을 확보하기 위해, 2000년 가을 기간동안 난지도 내에 존재하는 상당수의 배출공에서 배출되는 주요 오염물질의 농도와 배출규모를 실측하였다. 본 연구에서는 이들 배출공 관측자료를 토대로 난지도지역에서 배출되는 수은의 규모와 전체적인 물질수지에 대한 기여도 등을 평가할 수 있는 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구 대상 배출공의 선택과 분석대상

난지도는 1979년 3월부터 1993년 12월의 기간동안 가동이 이루어진 세계 최대 규모의 비위생식 매립시설물에 해당한다. 난지도의 순매립면적만을 기준으로 하면, 1.9 km<sup>2</sup> 그리고 총면적은 2.72 km<sup>2</sup>에 해당한다. 매립에 따른 난지도의 고도는 95 m(실매립고는 85 m)를 형성하고, 총매립량은 부피기준으로 약 0.92 km<sup>3</sup>에 달한다. 전체 매립지는 1, 2 공구로 분리되는데, 각각 1.62, 1.09 km<sup>2</sup>의 면적을 유지한다. 제1매립지는 도시일반쓰레기, 산업폐기물, 하수슬러지 등이 주를 이루는 반면, 제2매립지는 도시일반쓰레기와 산업폐기물이 주를 이룬다. 양 매립지에 대한 매립이 완료된 후, 매립층 내부에 유독성 가스들이 누적되어 발생할 수 있는 문제를 방지하거나 또는 배출가스의 회수를 원활화하기 위한 목적으로 양대 매립공구에 총 106개의 배출공을 설치해 둔 상태이다. 이를 자세히 분류하면, 1, 2공구에 설치된 배출공의 수는 각각 58, 48개에 달한다. 1매립지의 경우, 평지면에 총 32개, 사면에 26개의 배출공이 배치되었다. 반면 2매립지의 경우, 각각 23, 25개의 배출공이 배치되어 있다. 개별 배출공은 내경 15 cm의 크기에 40~60 m의 깊이로 매립층을 관통하고 있다.

본 연구에서는 2000년 9월 20일에서 10월 4일까지 약 2주간의 기간동안 양공구 지역에 존재하는 총 106개의 배출공 중 42개(전체의 약 40%)를 대상으로 택하여, 배출공의 입구로부터 배출되는 가스상 수은의 농도를 실측하였다. 실제 배출공의 선택은 1공구에서 29개(경사면의 4개공과 평지면의 25개공) 그리고 2공구에서 13개(경사면의 5개공과 평지면의 8개공)를 택하여 분석에 임하였다. 2공구의

경우, 개별 배출공에 대해 replicate 시료를 1차례 분석하는 것을 원칙으로 하였다. 이에 반해, 1공구의 경우 개별 공구에 대해 2시간 간격으로 5회 이상씩의 수 차례 연속분석을 원칙으로 하였다. 농도변화의 시간적 경향을 파악하기 위한 1공구의 연속분석은 최소 5회에서 최대 23회까지 수행하였다(따라서 아래에 제시될 본 연구자료의 세부적인 해석은 경우에 따라 1공구, 특히 이 중에서도 가장 많은 자료가 확보된 평지면을 중심으로 다루어진 경우가 많다).

배출공 내부에서 수은의 농도를 조절하는 요인을 파악하기 위하여, 각각의 배출공에 대한 실험관측시에 수은의 농도 외에도 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, 수분함량을 포함하는 고농도 화학성분의 농도와 배출공 내부의 온도 및 배출구의 배출속도(풍속)도 동시에 관측하였다. 배출공으로부터 배출되는 수은의 플럭스는 동시에 관측한 수은의 농도와 배출공 출구의 배출속도를 이용하여 계산하였다. 그리고 배출공 중심의 실험분석에 덧붙여 배출공으로부터 상당한 수준으로 이동차량의 거리를 유지하며, 수은을 위시한 기타 기준성 오염물질과 기본적인 기상인자를 포함하는 주요 환경변수의 변화를 동시에 실측하였다. 이동차량에는 수은은 물론 일반적인 대기질의 변화를 파악할 수 있는 모든 관측시스템이 탑재되었다.

### 2.2 수은농도의 분석

대기 수은의 분석은 국제적인 연구단체들의 공동 비교실험 등에서 객관성을 확인할 수 있을 정도로 객관성의 폭이 큰 분석기술로 인식되고 있는 실정이다(Ebinghaus *et al.*, 1999). 본 연구에서 활용된 대기 중 수은의 농도측정과 관련된 분석화학적 측면에 대한 기술은 이미 Kim and Kim(1999, 2001a, b) 등에서 자세하게 제시한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 배출공 내부에 존재하는 높은 농도의 수은을 계측하는 부분이 집중적인 관심대상에 해당하므로, 본문에서는 이를 간략하게 소개하고자 한다. 배출공으로부터 유출되는 수은의 농도분석을 위해, 이미 본 연구진이 연속관측 등에 활용한 AM-2(Nippon Instrument Co., Japan)라는 on-line 시스템을 현장분석에 맞게 변형을 가한 후 현장실측에 직접 투입하였다. AM-2 시스템으로 배출공 내부의 공기가 유입될 수 있게, 테플론관을 연결한 후 이를 배출공

상단 수 cm 깊이의 중심부에 주입하여 약 60분 단위로 수은의 농도를 관측하였다. 본 기기는 내장된 유량조절계에 의해 약 1.0 l/min의 유속으로 공기시료를 흡입하여, 기기 본체와 연결된 흡·탈착장치를 이용하여 수은시료를 연속적으로 채취·분석하였다. 각각의 배출공에 존재하는 수은의 농도를 매시간 단위별로 산출하기 위해, 기기의 채취부로부터 50 여분 동안 수은의 흡착이 이루어졌다. 그리고 다시 흡착된 수은은 10여분의 기간동안 자동적으로 탈착시스템에서 탈착되고, 건조공기를 carrier gas로 사용하는 비분산형 이중빔식 (nondispersive double beam) 비플레임화 원자흡광분석기 (flameless atomic absorption method)에 의해 253.7 nm의 wavelength에서 검출되었다. 본 실험기간 중 고농도의 수은(약 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이 발견되는 배출공의 존재를 감안하여, 과다 배출에 따른 breakthrough 문제를 고려하지 않을 수 없다. 이를 위해, 최초의 분석에서 입방미터당  $\mu\text{g}$  대의 농도가 나타나는 시료의 경우, 시료채취에 소모되는 시간을 1/3로 줄여서 분석을 수행하였다.

배출공 내부의 수은농도를 관측하는 것과 동시에 고정된 위치에 이동차량을 배치한 후, 내부에 탑재된 제2의 AM-2 기기를 이용하여 배출공과 관련된 측정과 무관하게, 난지도의 일반 대기 중에 함유된 수은농도를 전체 실험기간동안 지속적으로 관측하였다. 이렇게 관측된 일반적인 농도자료는 배출공 내부로부터 관측되는 농도변화와의 연계성을 설명

하는데 유용한 기본자료로 활용하였다. 본 AM-2 기기가 지닌 수은의 절대검출한계는 약 1 pg대, NBS standard 1632a, 1568, 1575 등에 대비한 절대정밀도(accuracy)는 약 3~5% (세가지 표준물질의 평균)를 유지하는 것으로 밝혀진 바 있다 (Kim and Kim, 1999, 2001a, b). 정밀도(precision)를 계량하기 위하여, 증기상태의 표준시료를 1, 2, 3 ng대의 농도에서 5회씩 기기에 직접 주입하는 방식으로 반복분석하여 상대표준오차 (relative standard error (RSE = SE\*100/Mean))를 도출하였다. 그 결과, 2대의 AM-2 기기는 평균 0.64% (범위: 0.29~1.27%)와 0.35% (범위: 0.08~0.64%)의 정밀도를 보였다. 보다 현실성있게 실험실내의 표준시료대신 현장의 공기시료를 가장 현장조건에 가깝게 흡착관으로 채취하여 실험분석할 경우, 그 결과는 어느 정도 저하되는데 약 2% 내외의 정밀도를 유지하는데는 문제가 있는 것으로 확인되었다. 대체로 이와 같이 낮은 수준의 정밀도는 본 분석방식의 우수성을 입증하는 증거라고 할 수 있다.

### 3. 결 과

그림 1에는 전체 연구기간동안 난지도의 일반 대기 중에서 관측된 수은의 일중 농도분포를 제시하였다. 일반 대기 중 수은의 농도는 약 3~6  $\text{ng}/\text{m}^3$ 의 범위에서 변화하는 것이 확인되었다. 연구 기간 중

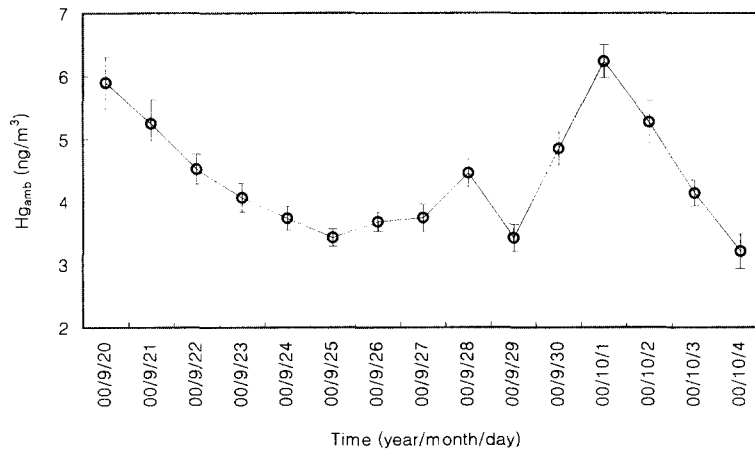


Fig. 1. The day-to-day variability of Hg concentration levels determined from ambient air at the Nan-Ji-Do (NJD) site during Sept./Oct. 2000.

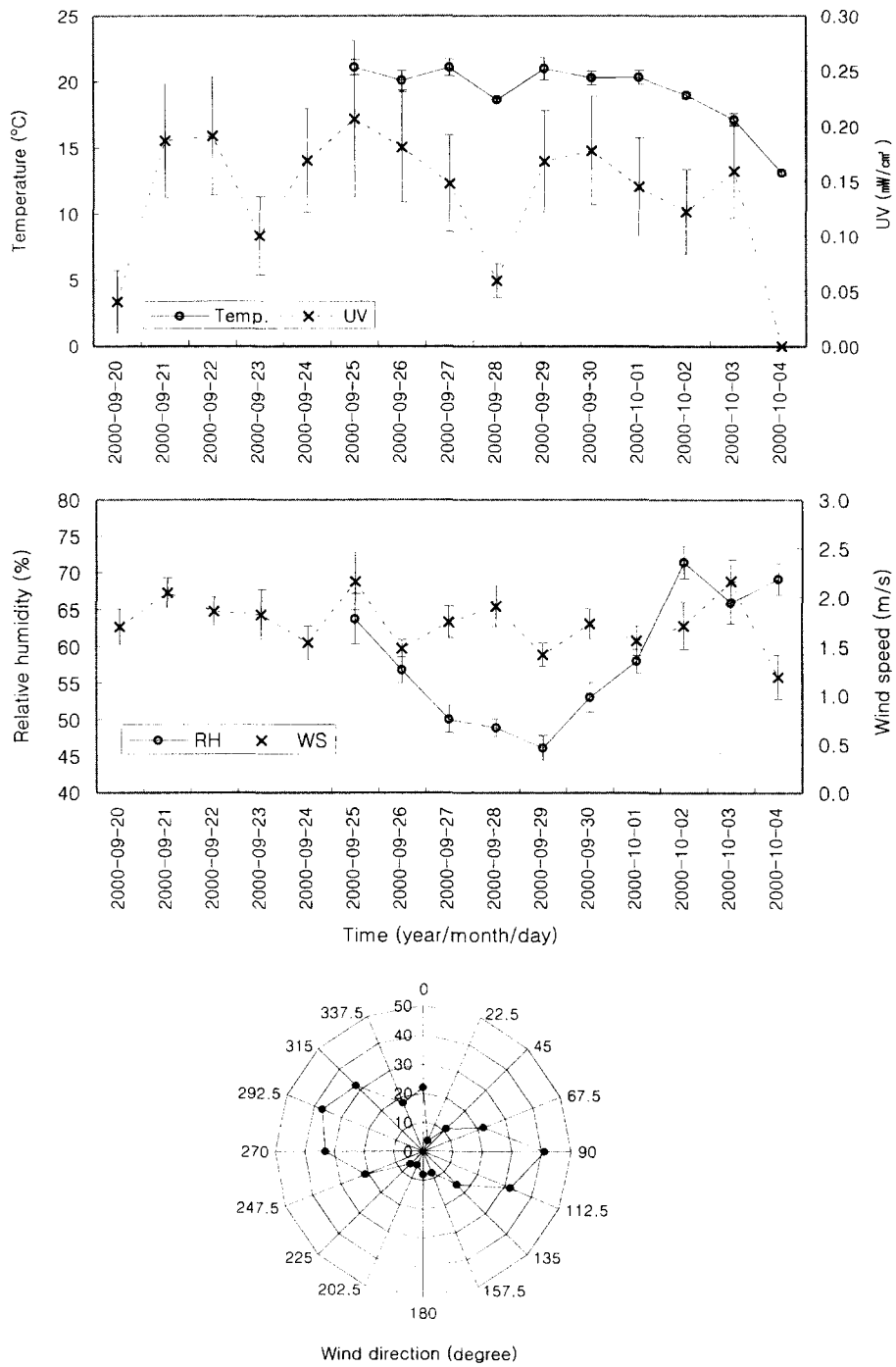


Fig. 2a. The distribution of meteorological parameters measured during the whole study period. Except for wind direction, the data are presented using the daily mean values: (a) upper: temperature and irradiance (UV); (b) middle: relative humidity (RH) and wind speed; and (c) lower: wind direction.

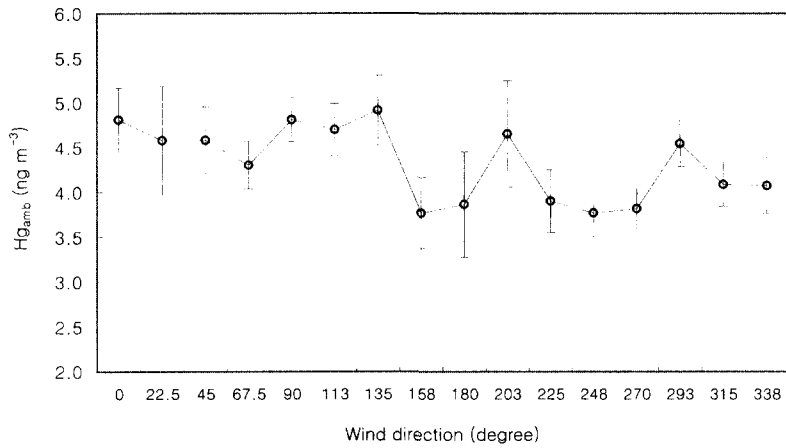


Fig. 2b. The concentrations of ambient Hg determined during the whole study period are plotted as a function of wind direction.

이동차량에 탑재된 계측장비를 이용하여 현장실측한 주요 기상변수들의 변화 양상에 대한 정보를 그림 2에 제시하였다. 그림 2에는 전체 실험기간동안 기온, 일사량, 상대습도, 풍속의 일주기별 변화양상과 함께 풍향의 발생경향을 제시하였다. 전체 실험기간 중에는 초가을의 기간대에 알맞게 20°C 내외의 적당히 높은 온도와 1.5~2m/sec의 풍속이 유지되었다. 반면 일평균 일사량이나 상대습도의 경우, 그 변화의 폭이 비교적 크게 나타났다. 시간대별 풍향자료를 이용하여, 16 방위로 구분된 sector당 바람의 절대 발생 개수를 비교하면, 연구기간동안 바람의 발생은 동풍과 서풍이 주를 이루는 것으로 나타났다.

전체 연구기간동안 42개의 배출공으로부터 총 238회 수은의 농도관측이 이루어졌는데, 이 들 결과를 요약해보면 평균은  $420 \pm 619 \text{ ng m}^{-3}$  그리고 범위는  $3.45 \sim 2952 \text{ ng m}^{-3}$ 로 나타났다. 전체 결과를 보면, 배출공 내부에서 발생하는 수은의 농도는 최소, 최대값 간에 약  $10^3$ 배 정도의 차이가 날 만큼 분포의 폭이 대단히 크고 넓다는 것을 알 수 있다. 총 42개의 조사대상 배출공 중 제2공구에 위치한 13개의 배출공은 전급한 바와 같이 단순히 1회의 측정이 이루어졌고, 반면에 제1공구에 위치한 나머지 29개의 배출공에서는 최소 6회 이상의 연속측정을 수행하였다. 따라서 아래에 제시된 토론부에서는 배출공 수은농도에 대한 다양한 통계적 해석은 배출

공의 수은분포를 설명하는데 가장 대표성이 강할 것으로 사료되는 1공구의 평지면에서 확보된 자료를 토대로 하였다.

#### 4. 토 론

##### 4.1 난지도 배출공의 분포와 그에 따른 수은 농도

총 42개의 배출공으로부터 관측된 수은의 농도는 지역별 분포의 특성을 뚜렷하게 구분하기 어려울 정도로 복잡한 양상을 취하였다. 예를 들어, 전체 배출공의 농도 분석결과 중에서, 1공구의 평지면에 대해서 가장 집중적으로 많은 분석이 이루어졌다는 점을 감안하여, 1공구의 결과들을 단순히 평면적으로 비교해 보았다. 그 결과 농도분포는 특별한 방향성이나 경향성을 찾기 어렵게 고농도와 저농도가 산만하게 분포되었다는 것을 확인할 수 있었다. 자료의 세부적인 해석에서는 우선 전체자료의 분포가 대단히 넓은데 반해, 그들 자료로부터 뚜렷한 경향성을 발견하기 어렵다는 현실적인 여건을 감안하지 않을 수 없었다. 따라서 전체 자료는 앞서 연구방법에서 분류한 바와 같이, 크게 공구별 및 경사의 유무별로 분류한 4가지 그룹으로 구분하였다. 본 연구에서는 이러한 지형적 특성에 기초한 분류방식을 토대로 농도나 플럭스의 분포특성을 비교 및 분석하고자 하였다.

전체 연구기간동안 배출공으로부터 관측한 개별 항목들과 그에 맞추어 외기로부터 관측한 성분들의 요약결과를 표 1과 2에 4가지 그룹으로 분류한 후, 통계적인 분석을 하였다. 이와 같은 분류방식에 의하면, 공구별 그리고 경사차이에 의한 기준으로 관측된 일부 자료에서 상당히 다양한 차이나 경향성이 존재할 수 있다는 점을 확인할 수 있었다. 우선 배출공 출구의 농도를 비교하면, Hg의 경우 다음과

같은 경향성이 확인된다: 1) 공구를 불문하고, 사면에 비해 평면상에 위치한 배출공의 농도가 확연히 높게 나타난다; 2) 1공구지역의 농도분포는 2공구지역에 비해 분포의 변이가 더 크게 나타난다(CV 값 등의 비교); 3) 대체로 2공구의 농도가 1공구의 대응 지형에 대비해 높은 수치를 취하는 것으로 나타난다(참고로 1공구 사면의 경우, 평균값이 1개 배출공의 극단적인 높은 수치로 상향되었다는 점을 감안

**Table 1. A summary of Hg and relevant parameters measured simultaneously from both the inlet of ventpipes in NJD site during Sept. ~ Oct. 2000.**

Vent	Hg <sub>vent</sub> ng m <sup>-3</sup>	H <sub>2</sub> O %	CH <sub>4</sub> %	CO <sub>2</sub> %	EV* m/s	T <sub>vent</sub> °C	Hg flux µg/m <sup>2</sup> /h
Sector 1-Plain	450±715	17.1±6.37	52.3±15.4	25.7±4.40	1.01±0.77	32.5±9.59	2102±3950
	4.59~2646(25)	9.62~38.1(25)	7.2~72.4(25)	14.3~33.4(25)	0.21~3.44(25)	18.8~64.5(25)	7.23~16904(25)
Sector 1-Slope	301±555	13.9±2.04	45.4±15.6	35.9±17.0	0.25±0.09	24.9±1.75	246±432
	11.9~1134(4)	11.2~15.6(4)	25.2~57.8(4)	23.7~61.0(0)	0.17~0.38(4)	22.6~26.4(4)	11.1~894(4)
Sector 2-Plain	569±476	17.8±2.66	49.9±7.13	30.3±3.18	1.71±1.51	37.0±8.49	5648±9449
	66.9~1536(8)	15.8~23.8(8)	37.6~58.4(8)	27.8~37.2(8)	0.42~5.10(8)	27.8~53.8(8)	188~28201(8)
Sector 2-Slope	235±251	20.8±4.38	50.2±17.7	27.4±5.46	0.57±0.72	32.9±10.1	332±382
	81.6~681(5)	15.1~25.6(5)	19.8~63.6(5)	18.3~32.7(5)	0.12~1.85(5)	24.8~49.5(5)	75.0~997(5)

\* denotes exit velocity (or wind speed at the inlet of ventilation pipe).

**Table 2. A statistical summary of Hg concentration levels and other environmental parameters in the ambient air of NJD site during Sept./Oct. 2000. Data are compared among four different categories divided on the basis of sector and tiltedness.**

Ambient	Hg <sub>amb</sub> ng/m <sup>3</sup>	T <sub>amb</sub> °C	UV mW/cm <sup>2</sup>	RH %	WS m/s	SO <sub>2</sub> ppb	NO ppb	NO <sub>2</sub> ppb
Sector 1-Plain	4.22±1.00	20.6±2.77	0.16±0.17	52.3±9.67	1.62±0.42	3.78±1.82	32.1±28.8	38.7±11.9
	2.56~6.54(25)	16.0~26.1(14)	0.00~0.58(24)	37.3~73.8(14)	0.85~2.63(24)	1.25~8.00(24)	4.50~115(24)	20.5~61.0(24)
Sector 1-Slope	3.68±0.97	15.7±2.00	0.00±0.00	70.7±5.92	1.59±0.44	4.98±2.57	6.62±3.09	23.6±10.4
	2.90~5.09(4)	13.3~18.1(4)	0.00~0.01(4)	63.5~76.3(4)	1.07~2.08(4)	2.20~7.50(4)	3.33~10.8(4)	11.0~35.8(4)
Sector 2-Plain	4.19±1.46	20.4±0.81	0.32±0.218	2.8±4.89	3.00±1.02	4.86±3.93	18.6±18.6	29.7±11.5
	2.60~6.32(7)	19.2~21.7(8)	0.00~0.57(7)	72.0~88.0(8)	0.80~4.20(8)	1.00~10.0(7)	3.00~51.0(7)	20.0~48.0(7)
Sector 2-Slope	3.76±0.52	20.5±0.76	0.38±0.13	49.2±12.6	3.60±0.72	4.80±1.64	7.80±1.10	11.0±1.87
	3.16~4.49(5)	19.5~21.3(5)	0.18~0.53(5)	32.0~63.0(5)	2.70~4.40(5)	3.00~7.00(5)	6.00~9.00(5)	9.00~14.0(5)

Ambient	NOx ppb	CH <sub>4</sub> ppm	NHMC ppm	THC ppm	O <sub>3</sub> ppb	CO ppm	PM10 µg/m <sup>3</sup>
Sector 1-Plain	70.7±36.6	8.00±2.82	1.87±0.92	9.87±3.51	18.6±11.6	1.63±1.18	55.8±27.4
	25.2~176(24)	1.75~13.4(23)	0.20~3.02(23)	1.95~16.4(23)	0.86~38.7(24)	0.50~4.42(24)	28.6~157(23)
Sector 1-Slope	30.2±13.4	8.25±1.31	0.75±0.37	9.00±0.94	14.7±4.82	2.88±0.90	
	14.3~46.8(4)	7.32~9.18(2)	0.49~1.02(2)	8.34~9.67(2)	11.2~21.5(4)	1.68~3.58(4)	
Sector 2-Plain	48.1±30.0	5.19±1.58	0.78±0.23	5.97±1.67	29.0±13.3	0.56±0.44	
	25.0~98.0(7)	4.05~7.69(5)	0.46~1.02(5)	4.54~8.50(5)	6.00~41.0(7)	0.10~1.40(7)	
Sector 2-Slope	18.8±2.59	4.91±1.14	0.90±0.53	5.81±0.92	39.0±2.55	0.28±0.13	
	15.0~22.0(5)	3.82~6.09(3)	0.44~1.48(3)	5.27~6.87(3)	36.0~42.0(5)	0.10~0.40(5)	

하였다). 이와 같이 4개 그룹의 농도에 대한 상대적인 경향성의 존재는 기온이나 배출풍속과 같은 물리적인 변수는 물론 이들을 조합하여 산출한 플럭스 수치에서도 뚜렷하게 확인된다. 우선 배출속도나 기온은 사면에 비해 평지가 높고, 1공구에 비해 2공구가 더 높게 나타난다. 마찬가지로 농도와 배출속도를 감안하여 산출하는 플럭스는 사면쪽보다 평지면 쪽에서 높은 이들 개별 함수의 배가적인 경향으로 인해, 사면에 대비해서 평지면의 플럭스 크기가 약 10배 가까운 수준으로 증가한다는 것이다.

이러한 관측결과로부터 대략 다음과 같은 사실의 추정 가능성이 있다. 우선 사면의 경우, 매립층 내부를 관통하는 배출공의 끝 부분과 매립층 바닥면과의 거리가 짧기 때문에, 매립층 내부에서 생성된 후, 이를 통해 배출되는 가스의 온도나 배출속도 등이 상대적으로 떨어질 수 있을 것으로 추정된다. 이러한 측면의 영향은 수은의 농도나 플럭스에도 곧바로 영향을 미치는 것으로 보인다. 또한 1공구지역의 매립이 먼저 완료되었다는 점과 양공구의 매립내용물이 어느 정도 차이를 지니고 있다는 점을 감안하면, 1, 2공구지역의 결과들 간에 차이가 나타나는 현상은 어느 정도 설명될 수도 있을 듯 하다. 그러나 이러한 경향성의 비교에서 한 가지 유의할 사실은 수은과 같은 극미량기체의 경우와 달리, 이들과 동시에 관측이 이루어진 수분, 이산화탄소, 메탄 등을 포함하는 주 성분들은 수은에서 발견되는 것과 같은 뚜렷한 경향성을 파악하기 어려웠다는 점이다. 아마 이들 성분의 경우, 상대적으로 또는 절대적으로 워낙 큰 규모로 생성되고 배출되기 때문에 매립층 내부의 순환이나 유출 등이 수은과 같이 극미량 성분에서 나타나는 경향성과는 큰 차이를 보이는 것으로 예측된다. 특히 이러한 현상은 수은과 여타 주요 성분들간 화학적 특성의 차이 그리고 이들이 매립층 내부에서 생성되는 메커니즘의 차이 등을 반영하는 것으로 보인다.

#### 4.2 난지도 배출공으로부터 관측된 자료의 빈도분포특성과 시간적 경향성

배출공을 중심으로 관측된 자료의 특성을 파악하기 위한 한 가지 방편으로 제 1공구의 평지로부터 관측된 주요 변수들에 대한 빈도분포를 조사하였다(그림 3). 메탄이나 이산화탄소와 같은 성분의 경우,

정규분포곡선의 형태에 어느 정도 근접하는 듯한 곡선의 형태를 취하였지만, 여타 성분들의 경우 상당히 불규칙한 발생빈도를 취하였다. 수은의 경우, 농도나 플럭스값 모두 가장 극단적인 형태에 가까웠다. 농도의 경우 대략  $70 \text{ ng m}^{-3}$ 대까지 발생빈도가 현저히 줄어들다가 다시 고농도대에서 발생빈도가 급격하게 늘어 나는 것이 확인되었다. 이러한 빈도분포 분석의 결과는 배출공에서 수 백  $\text{ng m}^{-3}$  대의 높은 농도로 발견되는 수은의 존재가 이상치의 발현이라기 보다는 실질적인 현상을 반영하리란 가능성을 시사한다. 플럭스의 경우에도 수은의 농도분포와 어느 정도 일맥상통하게, 가장 낮거나 높은 수치대에서 빈도발생의 폭이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

배출공에서 발견되는 수은이나 기타 관련 변수들의 측정이 연속적으로 이루어진 경우가 많다는 점을 감안하여, 이들 자료에 대한 시간적 경향성의 존재유무를 확인하는 것도 중요한 의미를 지닐 것으로 보인다. 일단 이들 자료로부터 시간적 변이의 존재유무 또는 크기를 파악하기 위한 가장 기본적인 방편으로 각각의 배출공에서 관측된 연속자료를 이용하여, 농도의 상대표준오차(relative standard error: RSE)를 계산하고 비교해 보았다. 총 29개의 배출공으로부터 구한 개별 평균 RSE값은 최소 0.22에서 최대 22.6%에 달할 정도로 범위가 넓게 나타나지만, 실제로 평균값은 6.83%에 달할 정도로 비교적 안정적인 것으로 나타났다. 즉 대부분의 배출공에서 발견되는 수은의 시간적 농도변화 수준은 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 24시간의 규모로 관측이 이루어진 자료군들을 이용하여, 배출구의 농도에 대한 일주기분포를 그림 4a에 제시하였다. 앞서 RSE 값으로 비교한 결과와 같이 시간에 따른 농도의 변화가 크지 않다는 점에도 불구하고, 뚜렷한 경향성을 제시하기에는 곤란할 정도로 각각의 배출공 농도의 변화경향성은 복잡하다. 그림 4b에는 기타 환경변수 및 수은의 플럭스를 유사하게 일주기의 형태로 비교하였다. 대체로 메탄이나 이산화탄소와 같은 성분들은 시간적인 변화가 미미한 형태로 나타났다지만, 기타 인자들의 경우 불규칙한 양상이 뚜렷하게 확인되었다.

#### 4.3 난지도 배출공의 배출을 조절하는 인자들 각각의 배출공에서 진행되는 수은의 배출을 보다



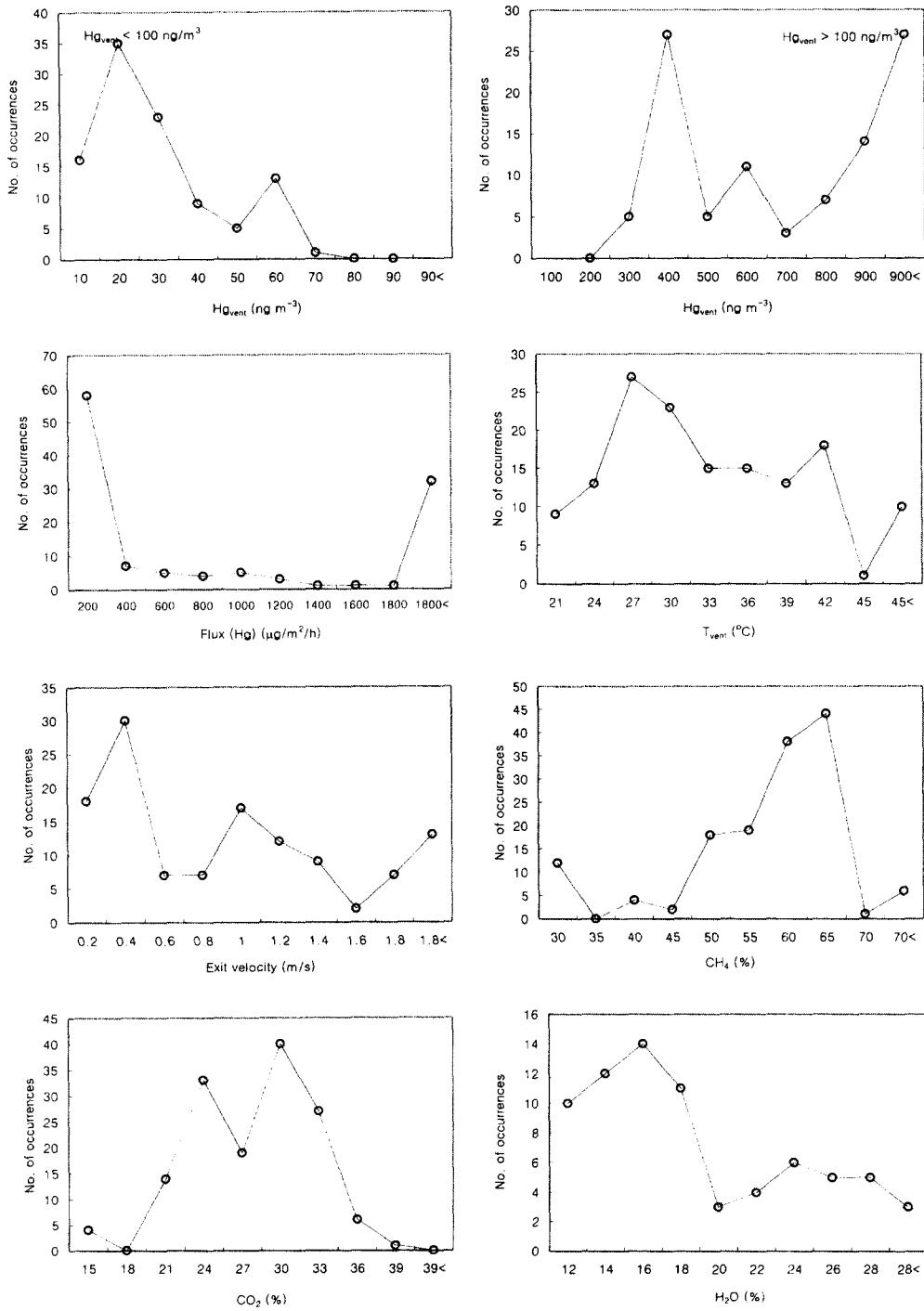


Fig. 3. Plots of frequency distribution for Hg concentrations and various environmental parameters measured concurrently in the NJD study site during Sept./Oct. 2000.

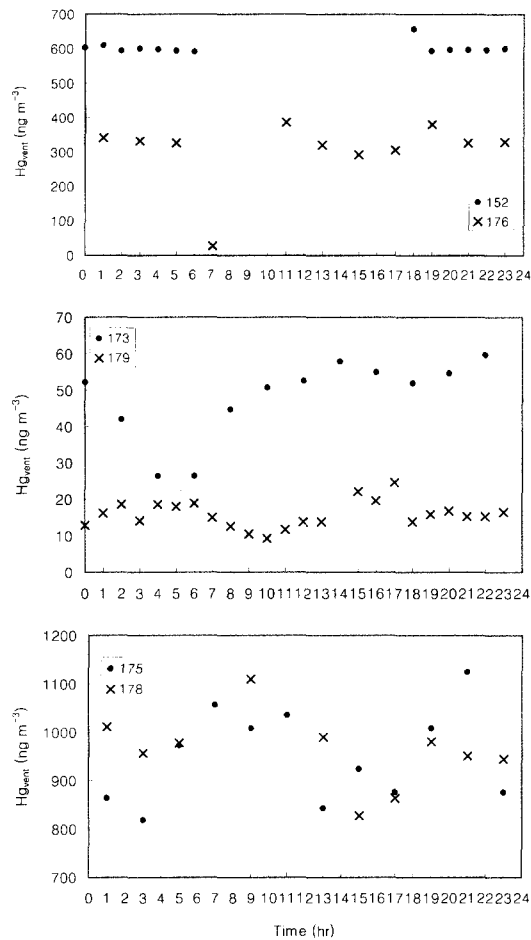


Fig. 4a. The check of diurnal variability for Hg concentrations measured from the inlet of many different ventpipes. Numbers in the legend box denote the designated number for each ventpipe in the NJD study area.

체계적으로 설명하기 위해, 수은의 농도나 플럭스와 동시에 관측된 인자들간의 상관성 유무나 강도 등을 통계적인 방식을 이용하여 비교분석하였다. 상관성의 강도를 비교하기 위해, 분석대상간에 상관성이 존재하지 않을 확률, P값이  $10^{-2}$  또는  $10^{-3}$ 을 기준으로 개별 변수들의 짝을 비교해 보았다. 우선 표 3에 제시된 상관분석의 결과를 보면, 배출공의 출구에서 관측된 수은의 농도는 배출속도나 기온과 같은 변수들과 상당히 민감한 관계라는 것을 짐작할 수 있다. 그리고 배출속도와 온도간에도 서로 상당히 높

은 상관성이 존재한다는 것을 보여 준다. 그외 눈에 띄는 부분들은 메탄과 같은 성분이 온도와 강한 역상관관계를 형성하면서 이산화탄소와는 강한 양의 상관성을 띠는 부분들을 들 수 있다.

주로 배출공의 출구로부터 관측된 변수들 간에는 강한 상관성의 존재가 빈번하게 발견되는데 반해, 이들 자료에 대비한 외기의 분석자료들에 대한 상관성분석결과는 상당히 큰 차이를 보인다. 당연히 예측이 가능한 결과일 수도 있지만, 이들의 경우에도 상관성이 고저에 따라 그 의미를 자세히 분석해 볼 필요도 있을 것이다. 배출공에서 관측된 수은의 경우, 외기의 수은농도와는 거의 상관성이 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 외기의 측정은 주로 한 지점에서 이루어진 반면, 배출공의 측정은 오염물질을 배출하는 현상이 곧바로 식별이 될 정도로 심각하다는 점 외에도 여러 지점을 대표하기 때문에 특별히 큰 상관성을 찾을 수 없는 것이 적절할 지도 모르겠다. 반면 보다 공간적으로 대표성이 높은 일사량의 경우, 배출공의 수은농도와 상당히 강한 상관성을 형성하고 있다는 것을 알 수 있다. 아마 배출단계에서 외기의 일사량 등이 어느 정도 수은의 배출에 영향을 미칠 수 있는 역할을 하는 것으로도 보인다. 그외 수은과 마찬가지로 PM의 경우에도 기온이나 배출속도와 강한 상관성을 유지한다는 것을 확인할 수 있다. 단 이 경우에는 양의 상관성이라기 보다 음의 상관성을 보인다는 점이 특이하다.

#### 4. 4 난지도 배출공으로부터 수은의 배출규모

난지도에서 이루어지는 수은 및 여타 미량기체의 배출규모를 추정하기 위해, 이미 본 연구진은 선행연구의 일환으로 2000년 4월의 기간동안 미기상학적 기법을 동원하여 플럭스를 관측하였다. 그 결과에 기초하여 수은의 배출규모를 연간 6kg 내외의 규모로 추정할 바 있다(Kim et al., 2001). 이와 같은 접근은 난지도 전체가 하나의 균질한 평면을 이룬다는 전제하에, 이와 같은 지표면을 가로지르는 수은의 교환현상을 난류의 교환과 연계하여 광역적 규모의 배출량 또는 침적량을 산출하는 방식에 근거한다. 그런데 이와는 달리 본연구에서의 접근방식은 실제로 배출의 가장 중요한 발생원으로 간주되는 개별 배출공의 상당 수(40% 이상)에서 농도와 플럭스를 실측하는 방식을 사용하였기 때문에, 배출

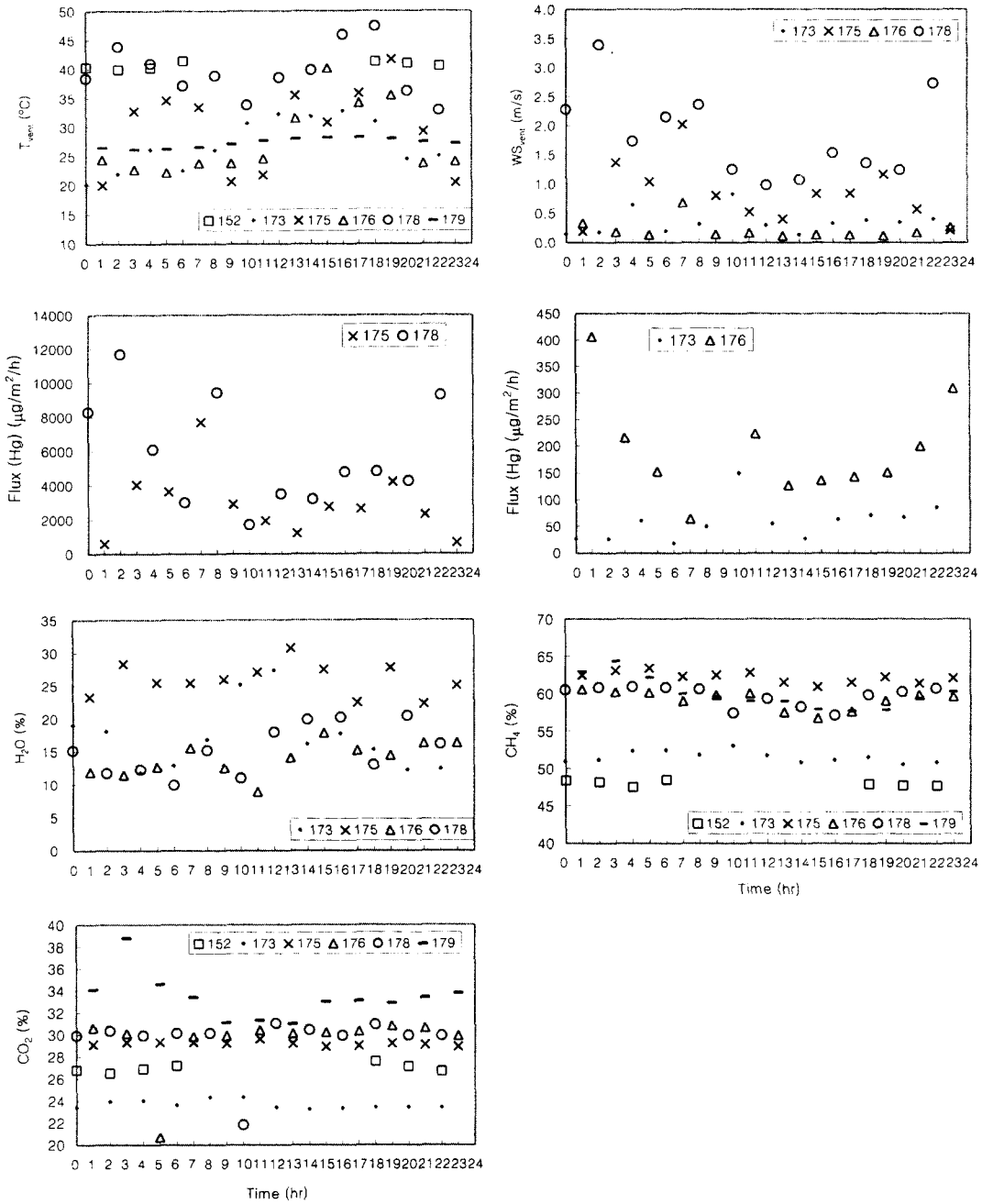


Fig. 4b. Same as Fig. 4a but for different parameters measured concurrently.

공 자체로부터 방출되는 수은의 양을 상당히 현실적으로 추정하는 것이 가능할 것으로 보인다. 그런

데 표 1A에 제시된 바와 같이, 평지와 사면간에 존재하는 농도나 플럭스의 차이가 워낙 크기 때문에,

Table 3. Results of correlation analysis between Hg - related parameters and the relevant environmental parameters in N.J.D site during Sept./Oct. 2000.

	Hg <sub>vent</sub>	H <sub>2</sub> O	EV <sub>vent</sub>	Hg flux	T <sub>vent</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Hg <sub>gmb</sub>	T <sub>air</sub>	UV	RH	WS	SO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CH <sub>4</sub>	NHMC	THC	O <sub>3</sub>	CO	PM10
Hg <sub>vent</sub>	r	0.32	0.31	0.87	0.35	-0.22	0.05	-0.02	0.07	0.22	-0.04	-0.05	0.03	0.09	-0.08	0.04	0.00	-0.02	-0.01	-0.06	0.00	-0.16
P		7.1E-03	6.8E-04	5.2E-19	2.3E-05	1.1E-02	5.6E-01	7.7E-01	4.5E-01	2.6E-03	6.8E-01	4.9E-01	6.6E-01	2.5E-01	2.7E-01	6.1E-01	9.6E-01	8.2E-01	9.2E-01	3.9E-01	9.5E-01	4.6E-02
H <sub>2</sub> O	r		0.11	0.30	-0.15	-0.01	0.08	-0.25	0.13	-0.21	0.08	0.22	0.11	0.21	0.15	0.15	-0.15	-0.28	-0.20	-0.04	0.16	-0.02
P			7.5E-01	3.9E-01	1.1E-02	2.1E-01	9.6E-01	5.2E-01	4.2E-01	3.0E-01	5.0E-01	5.0E-01	7.5E-02	3.7E-01	8.9E-02	2.2E-01	5.2E-01	2.2E-01	3.9E-01	7.6E-01	2.0E-01	8.9E-01
EV <sub>vent</sub>	r		0.58	0.31	0.11	0.20	-0.16	0.12	0.02	-0.19	0.02	-0.15	0.04	-0.08	0.00	-0.25	0.01	-0.01	-0.01	0.02	-0.27	-0.17
P			4.0E-12	5.3E-04	2.2E-01	2.9E-02	8.3E-02	4.7E-01	7.9E-01	7.9E-01	1.4E-01	7.9E-01	1.4E-01	6.7E-01	3.8E-01	9.7E-01	4.2E-02	9.4E-01	9.7E-02	9.3E-01	8.2E-01	5.1E-03
Hg flux	r		0.30	0.30	-0.05	0.24	-0.05	0.29	0.14	-0.09	-0.03	-0.11	0.01	-0.04	-0.01	-0.19	-0.16	-0.20	-0.03	-0.03	-0.17	-0.17
P			9.4E-04	5.7E-01	9.3E-03	6.0E-01	6.6E-02	1.6E-01	6.6E-02	1.6E-01	5.9E-01	7.7E-01	3.0E-01	9.5E-01	6.8E-01	9.3E-01	1.3E-01	2.2E-01	2.2E-01	1.2E-01	7.9E-01	7.6E-01
T <sub>vent</sub>	r		-0.67	-0.26	-0.17	-0.28	0.04	-0.20	0.04	-0.20	0.04	-0.15	0.01	-0.20	-0.06	-0.11	-0.24	-0.15	0.07	0.04	-0.35	-0.35
P			2.0E-19	1.6E-03	4.8E-02	2.9E-02	5.9E-01	1.2E-01	6.3E-01	1.1E-01	1.1E-01	1.1E-01	2.1E-02	4.9E-01	2.1E-02	4.9E-01	3.3E-01	2.5E-02	1.8E-01	4.1E-01	6.4E-01	1.0E-04
CH <sub>4</sub>	r		0.66	0.07	0.22	0.02	0.09	0.05	0.00	-0.09	0.12	-0.03	-0.01	0.07	0.01	0.03	0.01	0.07	0.01	0.03	-0.05	0.10
P			2.0E-19	4.3E-01	8.4E-02	8.5E-01	4.7E-01	5.7E-01	9.9E-01	5.7E-01	3.0E-01	1.8E-01	7.3E-01	9.1E-01	9.1E-01	5.0E-01	9.4E-01	7.1E-01	5.9E-01	7.1E-01	5.9E-01	2.6E-01
CO <sub>2</sub>	r		0.13	0.25	0.09	0.11	0.03	-0.03	-0.02	0.14	0.03	-0.36	0.57	0.46	0.13	-0.24	0.05	-0.22	0.34	0.57	0.10	0.57
P			1.5E-01	4.7E-02	3.2E-01	4.1E-01	7.4E-01	7.1E-01	8.0E-01	1.0E-01	1.0E-01	7.3E-01	4.1E-01	4.1E-01	2.8E-02	2.2E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	3.1E-01	2.1E-01	2.1E-01
Hg <sub>gmb</sub>	r		-0.49	-0.32	0.40	-0.17	0.18	0.36	0.36	0.57	0.46	0.13	-0.24	0.05	-0.22	0.34	0.57	0.46	0.13	-0.24	0.05	0.57
P			1.1E-07	9.6E-06	2.4E-05	2.0E-02	5.8E-07	3.3E-17	4.7E-11	1.3E-01	4.1E-03	5.7E-01	2.5E-03	3.8E-06	2.3E-15	3.8E-06	2.3E-15	3.8E-06	2.3E-15	3.8E-06	2.3E-15	3.8E-06
T <sub>air</sub>	r		0.77	-0.48	-0.01	0.01	-0.41	-0.36	-0.43	-0.34	-0.03	-0.29	0.65	-0.39	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08	-0.08
P			7.6E-19	1.1E-07	9.0E-01	9.5E-01	1.1E-05	1.1E-04	3.1E-06	4.0E-04	7.6E-01	2.3E-03	1.1E-14	2.8E-05	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01	4.8E-01
UV	r		-0.59	0.03	0.02	-0.10	-0.31	-0.18	-0.32	-0.16	-0.31	0.42	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28
P			1.8E-11	6.8E-01	7.6E-01	1.6E-05	1.6E-05	9.2E-02	9.2E-05	5.8E-02	1.7E-04	2.4E-09	7.4E-05	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04	3.6E-04
RH	r		-0.11	-0.09	-0.15	-0.02	-0.13	0.24	0.08	0.22	-0.15	0.30	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
P			2.7E-01	3.5E-01	1.1E-01	8.4E-01	2.0E-01	1.2E-02	4.4E-01	2.1E-02	1.2E-01	1.6E-03	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01	1.9E-01
WS	r		0.16	0.16	0.16	0.18	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
P			1.7E-01	9.2E-01	6.0E-01	9.3E-01	6.8E-01	4.0E-01	5.8E-01	4.1E-01	1.6E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02	3.8E-02
SO <sub>2</sub>	r		0.61	0.97	0.23	0.14	0.23	-0.58	0.12	-0.09	0.12	-0.09	0.12	-0.09	0.12	-0.09	0.12	-0.09	0.12	-0.09	0.12	-0.09
P			5.4E-20	5.4E-20	6.0E-03	9.9E-02	6.6E-03	4.9E-19	1.2E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01	2.7E-01
NO	r		0.79	0.21	0.07	0.19	-0.50	0.13	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
P			5.4E-20	5.4E-20	1.3E-02	3.8E-01	2.1E-02	2.5E-13	8.6E-02	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07	1.0E-07
NO <sub>2</sub>	r		0.25	0.13	0.24	-0.60	0.13	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
P			2.9E-03	1.1E-01	3.8E-03	5.4E-20	7.7E-02	4.4E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01	4.5E-01
NO <sub>x</sub>	r		0.57	0.98	-0.51	0.21	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
P			1.6E-13	2.1E-19	6.8E-11	1.6E-02	5.8E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01
CH <sub>4</sub>	r		0.72	-0.39	0.14	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
P			2.1E-19	1.9E-06	1.1E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01
NHMC	r		1.7E-11	1.5E-02	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01
P			4.1E-04	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01
THC	r		-0.53	0.21	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
P			2.1E-19	1.9E-06	1.1E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01	7.0E-01
O <sub>3</sub>	r		1.7E-11	1.5E-02	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01	7.2E-01
P			-0.26	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
CO	r		4.1E-04	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01	1.2E-01
P			2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01
PM10	r		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
P			2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01	2.0E-01

이와 같은 추정은 공구간에 그리고 평지와 사면간의 차이를 고려하여, 표에 분류된 바와 같이 각각 4개의 compartment에 대해 독자적으로 총 배출규모를 산정해 보았다. 즉, 각 compartment를 대표하는 플럭스 값에 총 배출공의 수와 배출공의 내면적을 곱하여, 4개의 구분된 지역에서 배출되는 수은의 양을 각각으로 계산해 보았다. Slope-1, -2와 Plain-1, -2에서 계산된 배출규모는 각각 4.0, 5.1, 41.6, 80.4 g/yr로서 전체 난지도지역의 배출량은 연간 130 g 정도의 수준으로 추정이 된다. 이 정도의 배출규모는 이미 미기상학적으로 추정된 배출규모인 ~6kg에 비해 수십배 정도로 현저히 낮은 수준에 해당한다.

이와 같은 직간접적인 방식의 괴리가 발생한 현상의 요인으로는 여러 가지 인자들을 주목할 수 있을 것으로 보인다. 우선적으로 고려해야 할 요인들은 다음과 같다. 우선 배출공을 통해 이루어지는 수은의 배출이 난지도에서 이루어지는 수은의 전체적인 배출규모의 얼마만큼을 설명할 수 있는가의 여부를 정확하게 따져 보는 것이 중요하다. 일단 배출공을 통하지 않은 수은의 유출은 매립층을 바깥으로 포장하고 있는 토양면으로 새어나가는 부분이 중요할 수 있을 것이다. 그런데 상층 평면토양의 경우, 수차레의 복토와 비닐피막층을 이용한 누출억제 등으로 인해 그러한 배출의 규모나 강도가 강하지는 않을 것으로 보인다. 그러나 경사면의 경우, 이러한 사후조치가 상대적으로 약하기 때문에 토양사이를 뚫고 배출되는 양이나 규모가 상당히 크게 나타날 수도 있을 것이다. 물론 이와 같은 가능성 등을 확인하기 위해서는 보다 더 많은 보완연구가 따라야 할 것이다. 두 번째로는 수은의 배출규모를 미기상학적인 기법에 근거하여 추정할 경우, 그와 같은 추정량은 얼마나 정확한 것일까라는 부분에 대해 의문을 제기하지 않을 수 없다. 이미 본 연구진의 선행연구 (Kim *et al.*, 2001)에서 확인한 바와 같이 기상조건의 변화에 따라 이웃한 배출원의 영향이 직접적으로 작용하여, 연구대상지역에서 수은의 침적이 주도적으로 바뀌는 양상을 증명한 바 있다. 연구대상지역이 순수하게 미기상학적인 기법을 응용하고 그로부터 정확한 배출량을 추정하기에는 여러 가지 확인하고 넘어가야 할 사항들이 산적한 것으로 보인다. 이런 부분들에 대한 검정이 완전하게 이루어지게 될 때까지는, 이러한 방식으로 추정한 계

산치의 활용은 보다 조심스럽게 접근하여야 할 것으로 보인다. 그리고 마지막으로 이질적인 양 방식 모두, 아직까지는 제한된 기간에 한정적인 시험을 행한 수준이므로, 양 방식 모두 객관적인 자료를 제시하기 위해서는 계절적 또는 시간적인 요인 등의 변화를 포괄적으로 평탄화할 수 있을 정도로 DB의 구축이 이루어져야 할 것이다. 비록 아직까지는 확인해 보아야 할 부분들이 많이 남아있지만, 배출공을 중심으로 실측한 결과는 최소한 배출공을 통한 배출규모를 추정하는 부분에 한해서는 상당히 가치 있는 자료를 제공한 것으로 사료된다. 우선적으로 각 배출공 내부에서 검출되는 수은의 농도가 주로 24시간 이내의 짧은 주기의 시간적 요인에 영향이 미미하다는 점을 감안하면, 이러한 배출양 또는 규모의 추정치는 연구기간 동안의 양상을 어느 정도 발 반영하였으리라 추정된다.

### 5. 결 론

본 연구진은 난지도의 배출공에 대한 실측을 중심으로 수은의 배출규모를 연구하였다. 그리고 이러한 연구자료를 토대로 대규모 배출원에서 진행되는 수은의 교환현상과 물질수지에 대한 정량적인 평가를 제시할 수 있는 기초연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 관측한 배출공을 통한 수은의 배출규모는 실제 과거에 본 연구진이 미기상학적 기법에 기초하여 측정된 전체 난지도 지역의 배출규모보다는 상당히 작은 규모로 나타나, 배출공을 통한 수은의 배출이 이를 제외한 여타 배출경로를 통해 배출되는 부분보다 그 절대적 기여도가 작을 수 있다는 가능성을 어느 정도 확인하는 것이 가능하였다. 또 하나의 가능성은 일단 실질적으로 배출공의 기여도가 상당 수준에 달할 것이란 전제하에서, 어느 한 쪽, 예를 들어 미기상학적 기법을 동원하여 측정된 토양-대기면간의 교환율 또는 배출공을 통해 측정된 배출 규모 등이 어느 정도 과대 또는 과소 추정되었을 가능성이다. 제한된 측정횟수나 제한된 자료를 이용하여 이와 같은 가능성을 확실하게 확인하기에는 아직 곤란한 것으로 보인다. 그러나 향후 이러한 분야의 연구를 보다 시간적 및 공간적 규모에서 확장하여 배출원별 기여도에 대한 정확한 정량적 기여도의 추이를 평가할 수 있을 때까지는 여러

가지 가능성을 동시에 인정할 수 밖에 없을 것으로 보인다.

### 사 사

본 연구자료의 통계적 처리와 분석을 도와 준 김나영 양에게 감사드린다. 본 연구과제는 2000년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-015-DP0453).

### 참 고 문 헌

- 김민영, 이강용, 김기현 (2001) 미기상학적 기법을 이용한 난지도 매립지에서 방향족 화합물의 Air/Soil 교환량 산정. 한국대기환경학회지 (투고 중).
- Ebinghaus, R., S.G. Jennings, W.H. Schroeder, T. Berg, T. Donaghy, J. Guentzel, C. Kenny, H.H. Kock, K. Kvietkus, W. Landing, T. Muhleck, J. Munthe, E.M. Prestbo, D. Schneeberger, F. Slemr, J. Sommar, A. Urba, D. Wallschlagel, and Z. Xiao (1999) International field intercomparison measurements of atmospheric mercury species at Mace Head, Ireland. *Atmospheric Environment*, 33, 3063-3073.
- EPA (1993) Anthropogenic methane emissions in the United States; Office of air and radiation: Washington, DC; EPA 430-R-93-003.
- EPA (1996) Standards of performance for new stationary sources and guidelines for control of existing sources: Municipal solid waste controls. Fed. Regist., 61(49), March 12.
- Hogan, K.B., J.S. Hoffman, and A.M. Thompson (1991) *Nature*, 354, 18.
- 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. and M.-Y. Kim (2001a) Some insights into short-term variability of total gaseous mercury in urban air. *Atmospheric Environment*, 35(1), 49-59.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2001b) The temporal distribution characteristics of gaseous mercury at an urban monitoring site in Seoul during 1999 to 2000. *Atmospheric Environment* (in press).
- 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.
- Kim, K.-H., M.Y. Kim, and G. Lee (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., K.-H. Kim, T.P. Meyers, and J.G. Owens (1995) Micrometeorological gradient approach for quantifying air/surface exchange of mercury vapor: Tests over contaminated soils. *Environmental Science and Technology*, 29(1), 126-135.
- Pacyna, J.M. (1998) Emission inventories of atmospheric mercury from anthropogenic sources. In Baeyens, W., Ebinghaus, R., Vasiliev, O., eds. *Global and regional mercury cycles: sources, fluxes and mass balances*. Netherlands: Kluwer Acad. Publishers, 161-177.