

장기간 관측을 통한 황사 현상이 수은의 분포에 미치는 영향 고찰

Inspection on the Influence of Asian Dust on the Distribution of Atmospheric Mercury Observed for a Long Time

이정순*, 김민영¹⁾, 김기현²⁾, 홍성민³⁾, 손장호⁴⁾, 이수철
한국표준과학원 삶의질 표준부 환경그룹, ¹⁾서울시보건환경연구원,
²⁾세종대학교 지구환경과학과 대기환경 연구실,
³⁾극지연구소, ⁴⁾동의대학교 환경공학과
(2006년 8월 28일 접수, 2007년 3월 30일 채택)

Jeongsoon Lee*, Min-Young Kim¹⁾, Ki-Hyun Kim²⁾,
SM Hong³⁾, Z-H Son⁴⁾ and S.-C. Lee
*Environmental Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life,
Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon*
¹⁾*Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment*
²⁾*Department of Earth & Environmental Sciences, Sejong University*
³⁾*Korea Polar Research Institute*
⁴⁾*Department of Environmental Engineering, Dong-eui University, Busan*
(Received 28 August 2006, accepted 30 March 2007)

Abstract

To evaluate the possibly potent role of Asian Dust (AD) on the long range transport of Hg, statistical analyses were carried out using the hourly concentration data of gaseous elemental mercury (Hg) along with relevant environmental parameters. For the purpose of this study, Hg data were collected from Yang-Jae monitoring station in Seoul, Korea during Sept. 1997 to June 2002. During the study period, Hg concentrations in non-AD period ranged from 0.03 to 32.70 ng m⁻³ with a mean 5.27 ± 3.06 ng m⁻³, while those in AD period from 1.79 to 32.60 ng m⁻³ with a mean 5.20 ± 3.06 ng m⁻³. The air quality during AD were typically deteriorated by enhanced PM10 mass concentration (by 2 ~ 5 times) compared to non-AD period, however comparison of the Hg concentration data indicates that they are not critically distinguished between events of AD and non-AD, except for the high minimum level of Hg during AD. The results of correlation and factor analysis also indicated somewhat complex patterns; in the case of AD events, Hg and SO₂ were assorted concurrently into a same factor. Evidence collected from this study thus suggests that long-range transport of Hg, if occurring, is unlikely to raise statistically Hg concentration

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-868-5766, E-mail : leejs@kriss.re.kr

levels such as seen during AD event. However, in nighttime of winter season, Hg concentrations are higher during AD (along with PM10 levels) than non-AD period. Although such observations suggest the effect of long range transport on the enhancement of Hg concentrations, more deliberate analysis may be required to track down the effect of such mechanism in relation with various factors including the air mass transport route.

Key words : Hg, AD, NAD, Transport, PM10

1. 서 론

주로 봄철과 겨울철에 중국으로부터 유입되는 에어로졸은 토양의 구성성분과 인위적으로 발생한 입자의 혼합체로 구성되어 있다. 이들 흙먼지 입자는 대개 중앙아시아의 사막에서 발생하며, 기류를 타고 대기 중에 부영한다. 이들은 이동 경로에 따라, 중국의 동북부에서 발생한 인위적인 에어로졸을 함유한 채, 한국, 일본 등으로 장거리 이동을 경험하기도 한다(Fang *et al.*, 2004; Chun *et al.*, 2001). 결과적으로, 먼지에 화학적 성분을 더한 거대한 공기덩어리의 집합체와 같은 대규모의 흐름으로 나타나기도 한다(Han *et al.*, 2004; Chung *et al.*, 2003; Tan *et al.*, 2000; Jaffee *et al.*, 1999). 이와 같이 거대한 오염물질의 이동은 전 지구적 규모의 환경문제로 부각되고 있다. 특히, 대기 중에서 평균 7일 이상 체류하는 물질들의 경우, 장거리 이동을 통해, 전 지구적인 규모로 확산하는 것도 가능하므로 국가간의 문제로 관심을 받아왔다.

대기 중의 수은은 대부분 기체상의 형태로 존재한다. 높은 휘발성과 화학적인 안정성으로 인하여 수은은 반년에서 2년 정도의 기간 동안 대기 중에서 체류하는 것으로 추정된다(Lin and Pehkonen, 1999; Schroeder and Munthe, 1998). 대기 중 수은의 발생원은 자연적 및 인위적 기원으로 구분할 수 있다(Wong *et al.*, 2006; Jaffee *et al.*, 2005). 전자의 예로는 토양과 대양으로부터의 휘발을 통한 배출을 들 수 있다. 그러나, 총 수은 배출 양의 50에서 75% 정도는 인위적인 발생원, 즉 인간활동과 직간접적인 관련이 있는 것으로 추정된다. 주된 인위적인 오염원으로는 화석 연료의 연소, 도시의 쓰레기 연소, 하수도, 의료쓰레기 소각, 광산, 보일러, 제조공장, 전자제품의 생산과 유기(disposal) 등을 들 수 있다(Streets *et al.*, 2005; Schroeder and Munthe, 1998). 이런 여건을 감안해 볼 때, 중국과 같은 국가는 지구적인 규모의 중요 배출

원으로 간주할 수 있다. 이미 중국은 세계 3위의 에너지 생산국이며, 동시에 최고의 석탄 소비국에 해당한다. 2015년에 중국의 석탄 소비량은 2001년의 시점에 비하여 대략 두 배에 다다를 것으로 추산되고 있다(Wong *et al.*, 2006).

날로 복잡 다양하게 발생하는 오염물질로부터 지구의 대기환경을 보호하기 위하여, 오염물질의 발생 경로를 추적하고 그에 따른 영향을 평가하는 일이 중요하다. 봄과 겨울철에 동아시아 지역에서 빈번하게 발생하는 황사현상은 각종 중금속 류의 유해오염물질들을 이송하는 규모나 경로 등을 밝히는 데 중요한 단서를 제공할 수 있다. 이미 다수의 선행 연구들에서 기상학적 관측, 화학적 조성 분석, 전산모의 등의 방법을 동원하여, 황사현상을 다각도로 분석하였다(Wang *et al.*, 2006; Jaffee *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2004; Munthe *et al.*, 2003). 그러나, 아직까지 기체상으로 존재하는 수은과 황사현상의 관계를 직접적으로 설명할 수 있는 연구 사례는 발견하기가 어려운 상황이다.

본 연구에서는 황사와 같은 먼지의 장거리 이동현상과 기체상 수은의 분포특성과의 연관성을 장기간 관측된 자료를 바탕으로 고찰하고자 하였다. 이와 같은 연구목적에 맞추어, 서울시 양재동 지역을 대상으로 58개월 동안 지속적으로 수집한 시간대별 수은의 농도 자료를 여러가지 통계적인 방법으로 분석하였다. 또한 수은의 농도분포를 해석하기 위하여, 자료를 황사/비황사로 구분한 상태로 다양한 관점에서 비교 분석을 시도하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서 기체상 수은의 농도는 서울시 양재동에 소재한 서울시 보건환경연구원(SMRIPHE)의 3층에 소재한 관측 지점에서 측정하였다. 본 조사대상

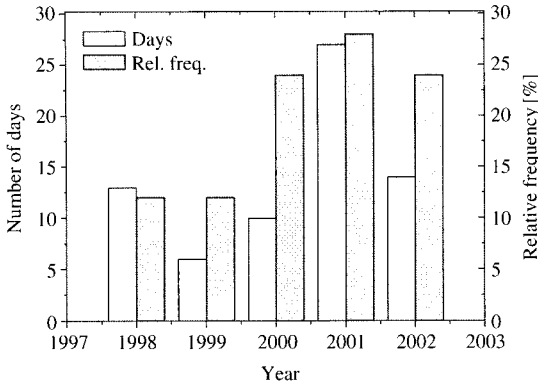


Fig. 1. Comparison of the annual occurrence patterns for the Asian Dust events (1997 to 2002).

지점의 특성이나 관련 정보는 이미 본 연구진의 선행연구를 통해 자세하게 제시한 바 있다(Kim and Kim, 2003, 2001a). 측정 지점의 주변에는 특정한 인위적 오염원이 없고, 공원과 주거지역이 인접해 있다. 이 지역에서 1997년 9월부터 2002년 6월까지 총 58개월의 기간 동안 수은의 농도 자료를 측정하였다. 그리고 수은의 환경거동을 해석하기 위해, 서울시 보건환경연구원에서 동시에 측정한 기상 변수들과 PM10을 비롯한 주요 환경변수들의 자료를 보조적으로 활용하였다.

수은의 분석을 위해 2 m 길이의 테플론 튜빙(30 cm diameter)으로 만든 긴 샘플 트레이를 통해, 외부 공기를 온라인 자동분석기(AM-2 model, the Nippon instrument Co., Japan)로 유입시켜 주었다. 시료의 유입과 동시에 분석 시스템을 구동하는 방식으로, 매 시간대별 수은의 농도 자료를 확보하였다. 채취부 및 검출부로 구성된 수은의 체측시스템에 대한 상세 정보는 선행 연구에 제시한 바 있다(Kim and Kim, 2002, 2001a, b).

기상청은 1980년대 이후 황사의 발생 양상을 체계적으로 관측하고 그에 대한 기록을 남기고 있다. 기상청으로부터 제공되는 자료를 바탕으로 분석기간 동안의 연간 황사의 발생빈도가 그림 1에 나타나있다. 그림 1의 그래프는 해당 년도에 대하여 황사가 며칠 동안 발생했는지, 전체발생일수에 대한 해당년도 상대적인 비율은 어떻게 되는지를 각각 보여준다. 기상청은 황사의 강도를 편의상 0, 1, 2로 목측 시정

Table 1. Summary of Asian Dust Events during the whole study period.

Year	Event day
1997	3/30 (0)
1998	3/28 ~ 30 (0), 4/14 ~ 22 (I), 4 ~ 28 (I)
1999	1/25 ~ 28 (×), 2/27 (0), 4/5 (0)
2000	3/7 (×), 3/23 ~ 24 (I, ×), 3/27 ~ 28 (×), 4/7 ~ 4/8 (I), 4/23 (0), 4/26 ~ 27 (0)
2001	1/2 (I), 3/3 ~ 7 (I), 3/20 ~ 25 (I, ×), 4/7 ~ 12 (I), 4/24 ~ 26 (I, ×), 5/16 ~ 19 (0), 12/13 ~ 14 (0)
2002	1/12 ~ 13 (0), 3/17 ~ 19 (II), 3/21 ~ 23 (II), 4/8 ~ 10 (II), 4/12 (0), 4/16 ~ 17 (0)

The Roman letters of 0, I, and II in the parentheses represent Asian dust strength 0, 1 and 2, respectively. The symbol '×' indicates the period when Hg data were not measured.

을 기준으로 나누어 기록하고 있다(기상청 지상기상 관측지침). 표 1에 제시한 바와 같이, 2001년은 7번의 황사가 총 27일 동안 지속적으로 발생하였다. 2002년에는 총 황사 지속일이 14일로 짧아졌지만, 황사의 강도는 2001년 보다 강해진 경향을 보였다. 특히 그림 1과 표 1을 살펴보면, 본 연구에서 설정한 전체 조사 기간 중 후반기로 갈수록 황사의 빈도나 강도가 상대적으로 높아지는 경향을 보인 점을 지적할 수 있다(표 1). 본 연구에서 관측한 전체 자료를 단순히 황사와 비황사기간으로 구분하였을 때, 각각의 기간동안 PM10의 평균농도는 245.21 (±378.04)과 53.87 (±36.07) $\mu\text{g m}^{-3}$ 를 보였다.

본 연구에서는 한시간 단위로 측정된 수은의 농도를 이용하였다. 그러나 타 지역 관측을 위해 기기를 타지점으로 이동, 또는 기기에 장애가 발생한 경우로 인하여 측정이 중단되기도 하였으며(Kim and Kim, 2003; Kim *et al.*, 2002a), 전체 연구기간 중 한달 이상 분석이 중단된 기간은 다음과 같이 6차례가 있다: (1) 1999년 2월 25일~3월 28일; (2) 4월 24일~5월 27일; (3) 6월 19일~2000년 1월 7일; (4) 1월 24일~3월 26일; (5) 2001년 8월 23일~11월 5일; (6) 2002년 4월 20일~5월 27일. 이와 같이 자료생산이 중단된 경우를 제외한 58개월의 조사기간 동안 총 27,170개의 시간대별 수은의 농도 자료를 확보하였다. 그리고 이들 자료를 토대로 황사가 수은의 농도 분포에 어떤 식으로 영향을 미치는 가에 대해 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조사 대상 지역 수은의 종합적인 분포 특성

그림 2에는 측정 전 기간에 걸쳐 확보한 수은의 농도분포 자료를 일 단위 간격으로 제시하였다. 그림 2의 검은 원은 황사기간 동안 측정된 수은의 하루 평균농도를 가리킨다. 봄과 겨울에 주로 발생한 황사는 주로 서풍의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 계절적으로 볼 때, 봄에는 서풍(23%), 겨울에는 북서서풍(29%)이 우세하게 발생하는 것으로 나타났다. 겨울철 황사는, 비황사기간에 비하여 상대적으로 따뜻하고 건조하며, 높은 풍속의 기상 환경에서 발생하는

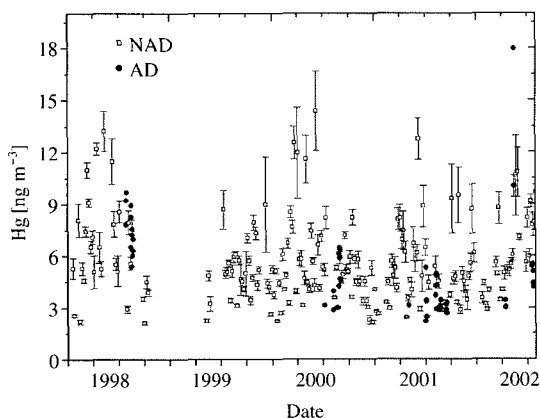


Fig. 2. The temporal variation of Hg concentrations using the daily mean and SD during the entire study period in Yang Jae district of Seoul, Korea (September 1997 to June 2002). Note that circles in the plot represent data observed during the AD period.

특성을 보였다(표 3). 또한 황사가 발생할 경우, 일사량은 상대적으로 빈약했다. 황사기간 동안 수은의 측정 결과는 비황사기간의 결과와 비교하여 볼 때, 눈에 띄는 정도의 큰 차이를 보이지는 않았다.

표 2에는 전체 연구기간 동안 매시간 별로 관측한 수은의 농도자료를 황사와 비황사기간으로 구분한 후, 각각의 자료군들을 개별적으로 분석한 결과를 제시하였다. 비황사기간의 수은 측정치 중, 측정장소의 특수성(인위적 배출원이 없고 인근의 오염원이 없는 공원지역)으로 설명할 수 없는 비정상적으로 큰 값은(상위 0.1%, 27건) 본 연구에서 제외하였다. 전체 연구기간 동안 관측한 수은의 농도 범위는 0.03에서 32.70 ng m⁻³, 평균은 5.27±3.06 ng m⁻³를 기록하였다. 현재의 장기 관측 결과는 동일한 관측 지점에서, 1999년부터 2000년의 기간에 걸쳐 측정된 당 시점의 평균값(5.26±3.27 ng m⁻³: Kim and Kim, 2001a)과 상당히 근접하며, 이는 서울과 같은 대도시 지역에서 현 시점의 평균 농도값은 약 5 ng m⁻³ 수준대가 꾸준히 유지되고 있음을 알려주고 있다(Kim and Kim, 2003, 2001a, 2000). 또한 현재 수은의 농도 값은 과거 인위적 배출원의 기여도가 컸었던 1980년대의 서울에서 측정된 값(10 ng m⁻³ 이상: Kim and Kim, 2002) 보다는 두 배 가량 적다. 그러나, 현재의 농도 수준은 유럽이나 미대륙에서 일반적으로 관측하는 농도 수치보다는 여전히 2~3배 높다(Han et al., 2004b; Munthe et al., 2003; Iverfeldt et al., 1995).

비황사기간 동안에 수은의 농도는 0.03에서 32.70 ng m⁻³의 범위대(N=26,385)를 유지하였다. 그리고 그 평균값은 5.27±3.06 ng m⁻³를 기록하였다. 반면, 황사기간 동안의 농도 범위는 1.79에서 32.60 ng m⁻³으로 비황사기간에 비해 좁게 나타났다(N=758). 그리고 황사기간의 경우 수은의 평균값이 5.20±3.06

Table 2. A statistical summary of Hg concentration (ng m⁻³) data measured from Seoul (September 1998~ June 2002)*.

	All data			AD			NAD		
	All	Daytime	Nighttime	All	Daytime	Nighttime	All	Daytime	Nighttime
Average	5.27	4.85	5.76	5.20	4.93	5.56	5.27	4.85	5.77
SD	3.06	2.50	3.53	3.06	2.33	3.80	3.06	2.51	3.52
Median	4.46	4.27	4.77	4.63	4.49	4.95	4.46	4.25	4.75
Max	32.70	32.30	32.70	32.60	20.60	32.60	32.70	32.30	32.70
Min	0.03	0.03	0.40	1.79	1.79	1.93	0.03	0.03	0.40
N	27,143	14,648	12,495	758	434	324	26,385	14,214	12,171

*All measurements made at hourly intervals

Table 3. A statistical summary of Hg and relevant parameters grouped at different temporal scales (seasonal, daytime/nighttime, and AD/NAD basis).

	(B) NAD															
	(A) AD			Winter			Spring			Summer			Fall			All
	(Nighttime)	(Daytime)	All	(Nighttime)	(Daytime)	All	(Nighttime)	(Daytime)	All	(Nighttime)	(Daytime)	All	(Nighttime)	(Daytime)	All	
Hg ng m ⁻³	9.75±11.15 ¹ (23 ²)	4.03±2.46 (28)	5.20±3.06 (758)	7.04±5.24 (3806)	5.03±2.83 (3227)	5.20±3.06 (758)	5.58±3.64 (3003)	4.98±3.16 (3517)	4.88±2.60 (3974)	4.78±2.78 (7012)	4.80±2.57 (5680)	5.35±3.68 (2940)	5.27±3.06 (26385)			
Temp. °C	0.18±4.47 (60)	2.26±4.55 (62)	11.01±7.31 (756)	0.1±4.63 (5017)	1.79±4.85 (4225)	11.01±7.31 (756)	11.48±5.72 (3766)	14.66±6.55 (4360)	23.39±3.31 (4723)	25.64±3.89 (8551)	15.84±6.90 (4212)	13.79±6.40 (3565)	12.84±10.26 (32864)			
UV MJ m ⁻²	0.12±0.32 (60)	16.5±11.41 (60)	25.9±41.58 (754)	0.5±2.47 (4868)	26.92±23.98 (4068)	25.9±41.58 (754)	0.72±5.02 (3735)	60.08±66.29 (4356)	0.73±10.03 (2412)	67.36±65.42 (8239)	38.75±40.40 (4137)	0.79±0.81 (3405)	26.02±50.87 (31871)			
WS m s ⁻¹	1.56±0.97 (60)	2.45±1.05 (64)	1.85±0.98 (758)	1.4±0.94 (5201)	1.73±0.93 (4351)	1.85±0.98 (758)	1.1±0.79 (3777)	1.7±0.9 (4368)	0.98±0.67 (4736)	1.36±0.69 (8572)	1.44±0.76 (4284)	1.03±0.73 (3628)	1.36±0.86 (33346)			
RH %	52.4±15.79 (60)	47.1±13.18 (63)	53.4±17.87 (757)	58.64±15.4 (5029)	51.41±16.77 (4207)	53.4±17.87 (757)	61.8±20.08 (3777)	51.28±21.05 (4365)	79.29±13.77 (4723)	70.08±16.91 (8551)	61.95±19.97 (4066)	71.45±17.06 (3443)	62.41±20.01 (32606)			
SO ₂ ppb	7.82±3.98 (60)	8.86±5.15 (63)	5.97±3.66 (723)	6.81±3.31 (5122)	7.68±3.69 (4332)	5.97±3.66 (723)	6.16±3.27 (3744)	6.24±3.27 (4334)	3.66±2.21 (4703)	3.62±2.24 (8496)	4.97±2.74 (4309)	4.97±2.74 (3678)	5.62±3.31 (33124)			
NO ppb	44.97±73.54 (60)	44.92±56.8 (60)	22.74±38.68 (683)	53.71±68.19 (4709)	59.5±61.06 (3914)	22.74±38.68 (683)	33.19±47.95 (3728)	34.6±46.92 (4288)	24.29±30.79 (4723)	20.86±22.72 (8527)	51.05±59.18 (4181)	71.00±82.66 (3564)	43.35±57.83 (32087)			
NO ₂ ppb	33.57±13.85 (60)	30.45±17.74 (60)	35.08±16.42 (683)	39.95±15 (4709)	40.01±16.16 (3914)	35.08±16.42 (683)	45.27±19.35 (3728)	41.42±17.73 (4288)	31.13±20.30 (4723)	35.21±17.31 (8527)	40.64±19.04 (4181)	41.27±19.66 (3564)	40.00±18.12 (32087)			
NO _x ppb	78.42±86.06 (60)	75.37±73.41 (60)	57.79±50.22 (683)	93.65±79.54 (4709)	99.5±73.47 (3914)	57.79±50.22 (683)	78.46±59.49 (3728)	76.01±58.43 (4288)	61.43±43.22 (4723)	56.05±32.43 (8527)	91.68±71.62 (4181)	112.27±97.60 (3564)	83.34±69.39 (32087)			
CH ₄ ppm	2.65±0.70 (49)	2.14±0.39 (57)	2.06±0.33 (726)	3.25±4.91 (4051)	3.07±4.4 (3331)	2.06±0.33 (726)	2.15±0.42 (3637)	2.02±0.25 (4207)	2.13±0.53 (4583)	2.00±0.31 (8195)	5.16±7.25 (4043)	4.77±6.60 (3428)	3.05±4.32 (30132)			
NMHC ppm	3.03±3.32 (49)	2.16±2.22 (57)	0.90±1.47 (726)	1.37±1.83 (4051)	1.43±1.81 (3333)	0.90±1.47 (726)	1.49±1.76 (3629)	1.46±1.66 (4203)	1.88±2.01 (4583)	1.51±1.61 (8195)	2.06±3.04 (4043)	2.06±3.04 (3428)	1.53±2.03 (30122)			
THC ppm	3.05±0.85 (49)	2.43±0.57 (57)	2.22±0.44 (726)	3.68±5.84 (4051)	3.49±5.19 (3331)	2.22±0.44 (726)	2.37±0.51 (3637)	2.24±0.36 (4207)	2.38±0.65 (4583)	2.21±0.42 (8195)	5.45±7.54 (4043)	5.95±8.28 (3428)	3.45±5.01 (30132)			
O ₃ ppb	5.00±4.76 (60)	10.72±10.79 (60)	18.43±16.10 (736)	6.45±7.22 (4715)	10.77±9.29 (3930)	18.43±16.10 (736)	14.53±14.96 (3651)	26.3±19.4 (4196)	10.86±12.72 (4723)	27.23±24.51 (8530)	12.75±13.20 (4187)	5.70±8.15 (3569)	14.63±16.91 (31954)			
CO ppm	0.64±0.33 (60)	0.71±0.48 (59)	0.60±0.40 (745)	1.71±3.98 (4766)	1.71±3.61 (3950)	0.60±0.40 (745)	0.68±0.47 (3688)	0.63±0.45 (4222)	0.49±0.36 (4310)	0.40±0.28 (7814)	1.98±4.19 (3601)	2.48±5.36 (4220)	1.27±3.20 (31583)			
PM10 µg m ⁻³	109.73±82.24 (60)	174.84±110.75 (61)	245.21±378.14 (672)	48.73±33.32 (5185)	56.09±34.13 (4280)	245.21±378.14 (672)	60.31±36.62 (3432)	64.89±36.65 (3890)	50.90±35.45 (4114)	51.23±36.70 (7502)	49.81±37.71 (3597)	50.21±35.78 (4204)	53.87±36.08 (30629)			

Superscripts 1 & 2 denote Mean ± SD and the number of measurements.

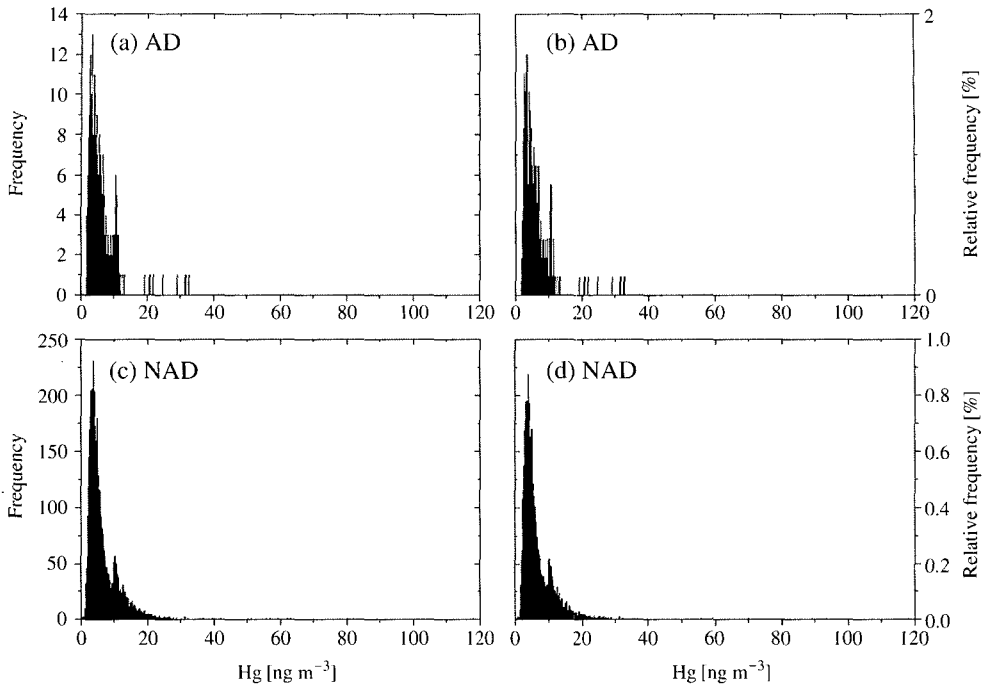


Fig. 3. Absolute (a and c) and Relative (b and d) frequency distribution patterns between AD and NAD periods.

ng m^{-3} 로 전체 자료로 구한 결과에 비해 수치적으로 조금 낮게 나타났다. 그러나, t-test 결과(95% 신뢰수준)로는 양 기간대별 농도차를 유의하게 구분하기는 어려운 수준이었으며 두 집단의 농도분포는 동일하였다(표 참조). T 점정 결과에서 수은과 PM10를 제외한 거의 모든 오염물질의 농도는 NAD 기간에 높은 수준(95% 신뢰수준)을 유지하였다.

그림 3의 빈도분포 조사에는 두기간의 수은의 발생 분포를 동시에 제시하였다. 그림을 살펴보면, 비황사기간의 경우는 수은 농도 $2\sim 6 \text{ ng m}^{-3}$ 의 대역에서 전체 농도 발생의 70% 이상이 발생함을 볼 수 있다. 또한 고농도 영역(예를 들어; $10\sim 20 \text{ ng m}^{-3}$)에서 한 차례 더 농도의 발생 빈도가 상승하는 경향도 볼 수 있다. 이 기간을 통틀어, 20 ng m^{-3} 이상의 범위에서 수은농도가 발생한 횟수는 146회로써 전체 추정자료의 0.7%에 해당한다.

황사기간의 수은 농도는 비황사기간의 결과와는 달리, $1\sim 9 \text{ ng m}^{-3}$ 범위에서 전체농도자료의 90.4%가 존재할 정도로 높은 집적도를 보였다. 황사기간 중에는 비정상적으로 높은 값이라 할 수 있는 20 ng

m^{-3} 이상의 수은의 발생 빈도가 7회로 나타나 전체의 0.9%를 기록하였다. 수은 농도의 최빈값은 황사기간은 3.33 ng m^{-3} (13회), 비황사기간은 3.89 ng m^{-3} (231회)이었다. 한편, 수은의 최소값은 비황사, 황사 각각의 기간에 대하여 $0.03, 1.79 \text{ ng m}^{-3}$ 으로써 황사기간에 높은 수준의 수은이 대기 중에 존재해 있음을 시사한다.

3.2 수은 농도의 시간대별 변화 추이에 대한 고찰

대기 중 수은의 농도분포가 황사에 의해 어떻게 영향을 받는가를 확인하기 위해, 여러가지 기준으로 자료군을 세분화한 조건에서 추가적인 비교를 시도해 보았다. 우선 표 3에는 모든 자료를 일차적으로 황사의 유무, 이차적으로 계절, 삼차적으로 주야의 기준으로 분리한 조건에서 자료의 특성을 비교하였다.

황사는 봄과 겨울철에만 주로 발생하였으므로, 표 3에 대한 세부적인 비교는 봄과 겨울철의 자료에 국한하여 황사 및 비황사기간으로 구분한 조건에서 논의하였다(이 부분에 대한 비교의 기준은 Kim and

Kim (2003)의 사례를 참고하기 바란다). 3.1장에서 이미 언급한 바와 같이, 봄철의 경우, 밤, 낮에 상관없이 황사기간 동안 수은의 농도값이 비황사기간에 비해서 상대적으로 낮게 나타났다. 뿐만 아니라 PM10과 풍속을 제외한다면 거의 모든 변수들도 비황사기간에 비하여 비슷하거나 낮은 수준(70% 이하)을 유지하고 있음을 알 수 있다. 겨울철 황사기간에 측정된 자료들의 특성을 살펴보면, 비황사기간에 비하여 기상조건은 상대적으로 따뜻하고 건조하며 높은 풍속을 보였다. 또한 오염물질의 경우, 비황사기간에 비하여 대부분 낮은 농도로 나타났다. 그러나 PM10의 경우, 황사기간에 보다 높은 농도로 측정되었으며, SO₂와 Hg는 두기간에 대하여 농도의 차이를 발견할 수 없었다(t-TEST).

황사와 비황사기간을 기준으로 수은 농도를 비교할 경우, 겨울 밤 시간대 황사기간에 관측한 수은의

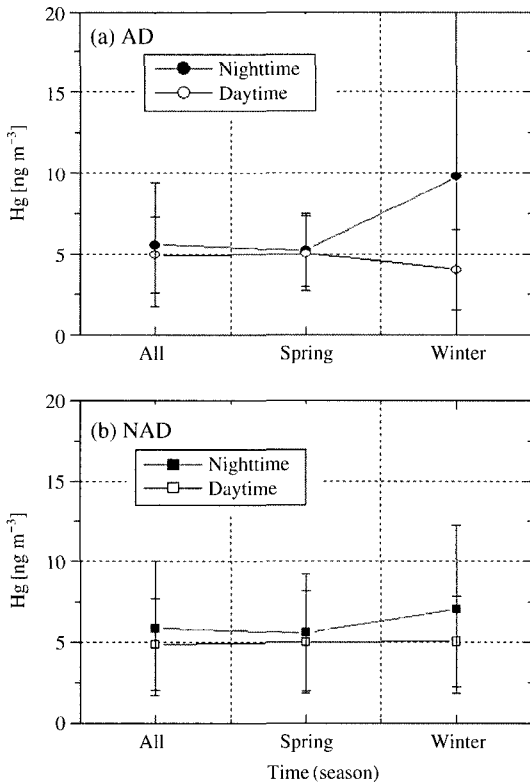


Fig. 4. Comparison of seasonal distribution patterns (mean and standard deviation) of Hg during (A) AD and (B) NAD.

농도가 통계적으로도 대응구의 결과보다 더 높은 것으로 나타났다. 그러나 그 밖의 시간대에는 신뢰구간 내에서 수은의 농도크기를 통계적으로 구별할 수 없었다. 수은의 일주기 농도의 크기를 황사와 비황사기간으로 구분하여 비교하면, 봄철 밤에는 각각 5.23과 5.50 ng m⁻³, 낮에는 5.00과 4.91 ng m⁻³를 기록하였다. 또한 겨울철 밤시간대에는 황사와 비황사기간의 농도가 각각 9.74와 6.91 ng m⁻³로 나타났고, 겨울철 낮 동안에는 4.03과 5.00 ng m⁻³으로 정반대의 양상을 보였다. 결국 전체적으로 야간대와 주간대에 관측한 수은의 농도값 차이를 기준으로 비교하였을 때, 봄철과 겨울철에는 황사의 유무에 상관없이 야간대 수은의 농도가 더 높게 나타났다(그림 4).

그림 5는 황사와 비황사기간에 있어서 수은의 일주기 변화를 다시 2차적으로 계절별 기준을 적용하여 재분류한 것이다. 겨울철 밤시간대를 제외하면 전체적으로 수은의 값은 5~7 ng m⁻³ 사이에 분포하며, 상대적으로 밤시간대 수은의 농도가 높게 나타나는 경향이 뚜렷하다. 이와 같은 결과는 영국(Lee et al., 1998)이나 국내(Kim and Kim, 2002, 2001a)에서 이미 발표한 바 있는 수은의 주저야고 경향성과도 일치한다. 일반적으로 수은의 하루 중 시간대별 농도의 변화 추이는 (1) 배출원의 특성(자연적 혹은 인위적 배출), (2) 대기 경계층과 기상환경과 같은 요인들의 교감과 같은 복합적인 작용에 의해 변화하는 것으로

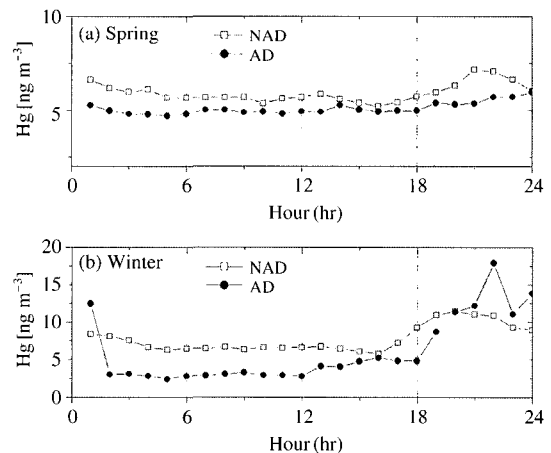


Fig. 5. Diurnal variation of Hg concentration between; comparison is made for both (a) spring and (b) winter seasons AD/NAD events.

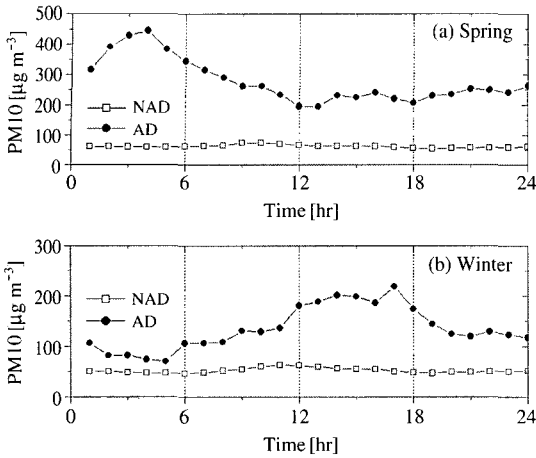


Fig. 6. Diurnal variation of PM10 concentration between; comparison is made for both (a) spring and (b) winter seasons AD/NAD events.

알려져 있다(Kim *et al.*, 2002a; Kim and Kim, 2001b; Lee *et al.*, 1998). 겨울철 비황사기간 동안 수은은 하루 중 2000~2100 LST(local sidereal time)시에 가장 고농도(11.45 ng m⁻³)를 보였다. 이러한 겨울철 밤기간 동안 수은이 상승하는 현상은 서울에서는 전형적인 사례로 볼 수 있다. 이는 난방의 사용과 대류경계층의 감소 등과 같은 요인에 기인하는 것으로 알려져 있다(Kim and Kim, 2001a, b). 황사기간에 수은은 21:00~22:00 시간대에 최고농도(17.86 ng m⁻³)를 기록하였다. 이러한 농도는 비황사기간의 최고농도보다 50% 정도 높은 수치이다.

이상에서와 같이 봄철 낮과 밤, 겨울철 낮 기간에는 수은의 농도가 비황사기간에 비해 황사기간 동안 관측한 값이 더 낮게 나타난다. 이와 같은 현상은 황사입자들이 각종 오염물질의 저장소(Kim and Park, 2001), 황사에 의한 수직대류경계층 내 대기의 수직적 균질성의 향상(Kim *et al.*, 2002a, b), 강한 풍속(Liu *et al.*, 2002) 등의 영향을 일정수준 반영하는 듯하다. 이러한 경향은 입자상 물질(PM10)이 대개 황사기간 동안 일관성 있게 높은 수준의 농도를 유지한다는 점과는 뚜렷하게 구분이 된다.

황사의 발생과 수은의 농도분포에 대하여 살펴볼 때, 수은 농도의 최소값이 비황사기간에 비하여 황사기간이 높다는 점을 제외한다면, 수은의 농도분포가 황사현상에 직접적으로 영향을 받는다고 단정하기는

어렵다. 수은과 황사간의 관계를 조사하기 위한 한가지 방편으로, PM10과 수은간 일별 자료의 상호적 경향성을 분석해 보았다. 비황사기간 동안에 PM10의 농도는 겨울과 가을 밤을 제외하고 50 µg m⁻³을 상회하는 수준의 농도를 보였다(표 3). 양자의 관계를 24시간 주기로 비교하기 위하여, PM10의 시간대별 변화도 동시에 분석하였다(그림 6). 수은과 PM10 간의 상관분석을 시도한 결과에 의하면, 양자는 주로 역상관관계를 형성하는 것으로 나타났다. 즉, 상관계수(r)는 겨울과 봄철의 비황사기간에는 -0.43 (P=0.03483)과 -0.49 (P=0.0149)로써 비교적 강한 역상관관계가 형성되는 것을 보여주었다. 반면, 황사기간에는 -0.05 (P=0.82316)와 -0.34 (P=0.10659)로써 역시 역상관관계를 형성하지만, 그 강도는 현저하게 떨어지는 양상을 보였다. 결과적으로 짧은 일주기의 관점에서 볼 때, PM10의 농도와 수은의 농도 변화는 각각 현저하게 다른 동인들에 의하여 조정되고 있다는 것을 시사한다. 그러나 비황사기간 수은과 풍량과의 관계는 높은 수준의 음의 상관성을 보이고 있음을 주의할 필요가 있다. 즉, 대부분의 다른 오염물질과 같이 바람이 강해질수록 수은의 농도는 낮아졌고, 수은의 경우에도 비황사기간에는 이와 유사한 경향이었음을 의미한다. 다만, 풍속이 비교적 강한 황사기간에는 수은의 비황사기간보다 농도가 비슷하거나 높은 수준으로 분석된 부분은 유의할 필요가 있다.

3.3 황사와 비황사기간 동안 수은의

농도변화에 영향을 주는 요인에 대한 고찰

황사와 비황사기간 동안 수은의 기본적인 분포특성을 평가하기 위하여, 통계적인 방법을 이용하여 수은의 농도자료들을 분석하였다. 먼저, 주위 환경변수들이 수은의 농도분포에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위하여, 두 기간 각각에 대하여 수은과 다른 변수들간의 상관관계를 계산하였다. 표 4(A)는 황사기간 동안, 4(B)는 비황사기간을 대표하는 결과를 제시하였다. 그리고 각각의 결과에서 다시 전체, 낮, 밤으로 세분한 결과를 제시하였다. 황사와 비황사기간에 대한 상관분석의 결과는 비교적 다른 양상으로 결과가 나타났다. 황사기간 동안 수은은(O₃와 PM10을 제외하고) CO를 포함한 거의 모든 변수들과 높은 상관성을 띄고 있다. 그러나 비황사기간 동안에는 N-화합물, SO₂, PM10과도 비교적 좋은 상관

Table 4. Results of correlation analysis between Hg and relevant environmental parameters are compared for both AD and NAD periods; cases with correlations ($P < 10^{-2}$) are marked in bold phase.

(A) AD period

	All			Daytime			Nighttime		
	r	P	N	r	P	N	r	P	N
Temp.	0.175	1.46E-05	609	0.338	7.11E-11	352	0.088	0.16254 (0)	256
UV	-0.215	8.32E-08	607	-0.343	4.3E-11	350	-0.074	0.237355 (0)	256
WS	-0.330	5.59E-17	611	-0.329	2.19E-10	354	-0.364	1.91E-09	256
RH	0.112	0.005602	610	0.149	0.004928	353	0.032	0.615823 (0)	256
SO ₂	0.554	1.27E-47	576	0.619	1.08E-36	334	0.575	1.4E-22	241
NO	0.572	4.35E-48	539	0.332	2.28E-09	309	0.705	9.96E-36	229
NO ₂	0.557	2.77E-45	539	0.581	3.13E-29	309	0.557	4.49E-20	229
NO _x	0.621	7.34E-59	539	0.449	9.46E-17	309	0.729	3.46E-39	229
CH ₄	0.454	1.66E-31	592	0.490	2.76E-22	346	0.427	2.67E-12	245
NMHC	0.231	1.4E-08	592	0.299	1.45E-08	346	0.268	2.1E-05	245
THC	0.480	2.05E-35	592	0.359	5.57E-12	346	0.613	1.15E-26	245
O ₃	-0.113	0.005863	590	0.066	0.227565 (0)	339	-0.272	1.31E-05	250
CO	0.560	1.11E-50	599	0.668	1.25E-45	342	0.499	1.7E-17	256
PM10	-0.070	0.105352 (0)	530	-0.109	0.056164 (0)	309	-0.066	0.330947 (0)	220

(B) NAD period

	All			Daytime			Nighttime		
	r	P	N	r	P	N	r	P	N
Temp.	-0.114	8.38E-73	24882	-0.028	0.001104	13408	-0.144	3.96E-54	11474
UV	-0.100	6.82E-55	24094	-0.070	7.32E-16	13114	0.000	0.979656	10980
WS	-0.189	4.1E-204	25485	-0.120	1.05E-44	13683	-0.206	4E-113	11802
RH	0.013	0.045236	24781	0.016	0.068458	13327	-0.034	0.000267	11454
SO ₂	0.343	0	25308	0.347	0	13548	0.357	0	11760
NO	0.333	0	24264	0.267	2.2E-211	13064	0.368	0	11200
NO ₂	0.385	0	24264	0.392	0	13064	0.383	0	11200
NO _x	0.377	0	24264	0.330	0	13064	0.403	0	11200
CH ₄	0.168	4.1E-148	23480	0.190	4.3E-103	12652	0.149	6.42E-55	10828
NMHC	0.207	1.2E-225	23469	0.232	9E-155	12648	0.185	1.03E-83	10821
THC	0.185	7.1E-180	23480	0.203	2.9E-118	12652	0.169	3.3E-70	10828
O ₃	-0.148	1.4E-118	24285	-0.049	2.07E-08	13062	-0.229	2.6E-133	11223
CO	0.206	1.2E-226	23801	0.221	3.1E-141	12738	0.192	2.04E-92	11063
PM10	0.360	0	23096	0.400	0	12178	0.362	0	10918

r, P, and N denote correlation coefficient, the probability of no correlation, and the number of matching data pairs, respectively. The Roman letter of 0 in the parenthesis (of P column) is used to distinguish the strength of correlations such as: $P > 10^{-2}$.

값을 보이면서, 기타 변수들과도 높은 상관관계를 유지함을 알 수 있다. 그러나 전반적으로 상관계수(r)의 크기는 황사기간에 비하여 상대적으로 낮아졌다. 한편, 황사기간 동안, 수은과 다른 주변 변수들과의 상관성이 높다는 점은 수은이 주변의 오염물질들과 유사한 거동을 보일 가능성이 크다는 것을 시사한다. 이와 같은 상황은 상관관계를 계절별로 세분화하여 분석하였을 경우에도 크게 다르지 않았다.

황사기간 동안 수은의 농도에 영향을 미치는 요인

을 또 다른 각도에서 고찰하기 위하여, 낮과 밤 그리고 겨울과 봄이라는 두가지 시간적 기준에 맞추어 자료를 구분하고 분석하였다. 그리고 이들 8가지 자료군 각각의 경우에 대한 상관관계를 계산하였다 (표 5). 선행연구에 의하면, 수은과 환경변수들 간의 상관관계는 짧은 주기로 변화하는 주위 환경변수들 (일사량, 기온, 오존)과 조금 더 긴 계절적 주기(난방 사용 유무 등)로 변화하는 요인들에 따라 수은의 배출량이나 농도가 영향을 받는 것으로 알려져 있다

Table 5. Results of correlation analysis between Hg and relevant environmental parameters for seasonally and diurnally divided data groups during AD/NAD events; cases with correlations ($|r| > 0.5$ and $P > 10^{-2}$) are marked in bold phase.

(A) AD period

	Spring						Winter					
	Daytime			Nighttime			Daytime			Nighttime		
	r	P	N	r	P	N	r	P	N	r	P	N
Temp.	0.290	9.46E-08	327	0.152	0.020622	233	0.910	1.13E-10	26	0.963	1.7E-13	23
UV	-0.379	1.31E-12	327	-0.296	4.32E-06	233	-0.161	0.4518	24	0.967	5.2E-14	23
WS	-0.288	1.21E-07	327	-0.318	7.23E-07	233	-0.794	4.51E-07	28	-0.828	1.11E-06	23
RH	0.154	0.005172	327	0.042	0.519074	233	0.064	0.751326	27	0.448	0.032142	23
SO ₂	0.591	2.08E-30	308	0.584	2.64E-21	218	0.906	7.98E-11	27	0.942	2.18E-11	23
NO	0.315	5.69E-08	285	0.290	2.33E-05	206	0.933	1.14E-11	25	0.923	3.73E-10	23
NO ₂	0.543	2.74E-23	285	0.625	9.96E-24	206	0.935	7.2E-12	25	0.913	1.2E-09	23
NO _x	0.441	5.66E-15	285	0.447	1.97E-15	206	0.940	3.34E-12	25	0.934	7.7E-11	23
CH ₄	0.285	6.03E-18	325	0.451	4.35E-13	233	0.915	2.6E-09	22	0.871	0.000223	12
NMHC	0.298	4.56E-08	325	0.397	3.25E-10	233	0.857	3.63E-07	22	0.838	0.000672	12
THC	0.299	3.72E-08	325	0.444	1.16E-12	233	0.944	4.17E-11	22	0.872	0.000219	12
O ₃	0.068	0.229758	315	-0.265	5.18E-05	227	-0.753	1.39E-05	25	-0.727	8.65E-05	23
CO	0.672	3.06E-43	319	0.702	6.49E-36	233	0.622	0.001184	24	0.832	8.41E-07	23
PM10	-0.115	0.052711	285	-0.094	0.188101	197	-0.174	0.406518	25	0.428	0.041421	23

(B) NAD period

	Spring						Winter					
	Daytime			Nighttime			Daytime			Nighttime		
	r	P	N	r	P	N	r	P	N	r	P	N
Temp.	-0.084	2.4E-06	3116	-0.117	1.22E-09	2671	0.253	8.85E-46	3054	0.341	7.4E-99	3613
UV	-0.112	4.25E-10	3114	0.000	0.986194	2641	-0.147	1.59E-15	2900	0.051	0.00244	3468
WS	-0.145	4.46E-16	3124	-0.219	1.72E-30	2682	-0.241	3.46E-43	3180	-0.339	8.7E-103	3794
RH	0.129	5.57E-13	3121	0.001	0.961238	2682	0.245	8.34E-43	3036	0.166	6.85E-24	3624
SO ₂	0.294	1.16E-62	3090	0.252	4.6E-40	2670	0.381	5E-107	3088	0.325	2.15E-92	3728
NO	0.245	7.68E-43	3052	0.307	1.5E-58	2633	0.355	1.03E-82	2754	0.459	3.4E-172	3310
NO ₂	0.285	3.61E-58	3052	0.299	1.47E-55	2633	0.423	5.9E-120	2754	0.484	2.4E-194	3310
NO _x	0.284	1.61E-57	3052	0.343	1.37E-73	2633	0.387	2.7E-99	2754	0.484	1.5E-193	3310
CH ₄	0.268	2.88E-50	2984	0.213	1.68E-27	2555	0.240	2.92E-36	2659	0.170	2.17E-22	3217
NMHC	0.103	1.98E-08	2980	0.106	8.58E-08	2548	0.340	9.6E-73	2659	0.295	9.31E-66	3217
THC	0.293	3.51E-60	2984	0.264	5.9E-42	2555	0.258	1.47E-41	2659	0.202	7.37E-31	3217
O ₃	-0.174	1.8E-21	2963	-0.302	3.2E-55	2557	-0.244	1.38E-39	2834	-0.331	5.25E-88	3404
CO	0.231	1.88E-37	2988	0.304	1.92E-56	2595	0.292	7.21E-56	2790	0.235	2.58E-43	3365
PM10	0.297	6.11E-58	2781	0.330	2.38E-63	2443	0.355	1.92E-93	3122	0.424	4.7E-165	3781

r, P, and N denote correlation coefficient, the probability of no correlation, and the number of matching data pairs, respectively.

(Kim *et al.*, 2002a; Kim and Kim, 2001a). 황사기간 동안 수은과 여러 변수들 간의 상관관계의 강도는 향상될 수 있지만, 강한 상관관계를 보이는 항목들의 수는 절대적으로 감소하는 특징도 이런 관점에서 어느 정도 설명할 수 있을 것으로 보인다.

표 5를 살펴보면, 봄철 황사기간 동안 수은은 오존, 기온, RH, PM10을 제외한 기상변수 및 오염물질

들과 높은 상관관계를 형성한다. 황사기간의 결과를 보면, 봄철보다는 약하지만 겨울철에도 수은은 다른 인자들과 양호한 상관관계를 유지하고 있다. 특히 같은 기간에 수은은 다른 인자들에 비해 CO나 SO₂와 비교적 높은 상관관계를 보이고 있다(SO₂는 난방이나 화석연료의 사용으로 배출되는 오염물질). 이미 난방의 사용과 수은의 배출에 대한 관련성을 여러

Table 6. Varimax rotated factor loading matrix for Hg and relevant data determined for seasons and AD/NAD events.

(A) AD period

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5
Spring						Winter				
NO _x	0.919	0.223	0.246	-0.085	0.099	THC	0.972	0.096	0.139	
NO ₂	0.894	0.190	0.121	0.016	0.125	CH ₄	0.943	0.277	0.162	
NO	0.712	0.221	0.394	-0.236	0.029	NO	0.941	0.199	-0.009	
O ₃	-0.649	0.065	0.353	0.354	0.459	NO ₂	0.932	0.283	0.161	
CO	0.608	0.324	0.570	-0.249	-0.083	O ₃	0.918	0.312	0.188	
THC	0.315	0.910	0.134	-0.110	-0.082	NO _x	0.915	0.233	0.151	
NMHC	0.004	0.872	0.098	0.136	0.168	UV	0.914	0.321	-0.015	
CH ₄	0.438	0.745	0.276	-0.167	0.010	PM10	0.914	0.098	0.085	
Hg	0.187	0.291	0.778	-0.315	-0.108	RH	-0.888	-0.249	-0.213	
Temp.	0.104	-0.077	0.711	0.263	0.367	CO	-0.823	-0.345	-0.302	
SO ₂	0.280	0.356	0.683	-0.099	0.263	NMHC	0.796	0.505	0.224	
UV	-0.063	-0.015	-0.022	0.815	0.230	Temp.	0.708	0.318	0.372	
WS	-0.332	-0.039	-0.092	0.787	-0.089	Hg	0.195	0.897	0.181	
RH	-0.009	0.016	0.045	-0.777	0.096	SO ₂	-0.278	-0.806	0.179	
PM10	-0.095	-0.077	-0.132	0.036	-0.914	WS	-0.188	0.015	-0.958	
Eigenvalue	3.481	2.613	2.388	2.375	1.399		9.687	2.461	1.444	
% variance	23.205	17.421	15.920	15.835	9.330		64.582	16.405	9.629	
% accumulated variance	23.205	40.626	56.546	72.381	81.711		64.582	80.988	90.617	

(B) NAD period

Variables	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	
Spring							Winter					
NMHC	0.873	0.027	-0.040	0.043	-0.020	-0.007	SO ₂	0.824	0.143	0.021	-0.024	0.137
NO _x	0.834	0.343	-0.252	-0.074	0.185	-0.005	NMHC	0.771	0.293	0.083	0.000	-0.161
CO	0.804	0.301	-0.128	-0.171	0.160	0.010	PM10	0.599	0.017	0.175	-0.086	0.317
NO ₂	0.804	0.386	-0.096	-0.148	0.150	0.070	CH ₄	0.100	0.978	0.040	-0.018	0.082
NO	0.601	0.102	-0.570	0.148	0.207	-0.200	THC	0.147	0.975	0.052	-0.016	0.075
SO ₂	0.600	0.043	-0.112	-0.046	0.338	-0.391	CO	0.299	0.886	0.149	0.008	0.027
CH ₄	0.213	0.934	-0.177	-0.035	0.141	0.000	O ₃	-0.053	-0.048	-0.816	0.362	0.080
THC	0.472	0.817	-0.191	-0.037	0.173	-0.003	WS	-0.047	-0.009	-0.811	0.235	-0.138
WS	-0.121	-0.150	0.779	-0.012	-0.167	-0.188	NO _x	0.643	0.180	0.667	0.025	0.080
O ₃	-0.305	-0.265	0.653	0.397	-0.093	-0.084	NO	0.604	0.152	0.663	-0.014	0.160
Temp.	-0.107	-0.010	-0.031	0.931	-0.065	-0.027	NO ₂	0.620	0.178	0.635	0.033	0.058
UV	0.024	-0.071	0.548	0.637	0.080	-0.065	UV	0.140	-0.132	-0.195	0.762	0.388
Hg	0.042	0.078	-0.125	-0.107	0.835	0.047	RH	0.057	-0.219	0.215	-0.662	0.339
PM10	0.297	0.183	-0.073	0.090	0.670	-0.036	Hg	0.413	0.144	0.184	-0.507	0.221
RH	-0.029	0.008	-0.176	-0.068	0.040	0.934	Temp.	0.144	0.169	0.093	-0.038	0.877
Eigenvalue	3.949	2.047	1.884	1.540	1.485	1.121		3.138	3.001	2.801	1.474	1.303
% variance	26.330	13.645	12.562	10.269	9.900	7.473		20.920	20.009	18.673	9.827	8.687
% accumulated variance	26.330	39.974	52.536	62.806	72.705	80.178		20.920	40.929	59.602	69.429	78.116

선행연구에서 보고한 바 있다(Fang *et al.*, 2004; Han *et al.*, 2004b; Kim and Kim, 2001a, 2000). 참고로 1980년대 이후, 서울지역의 SO₂ 배출량은 화석 연료의 사용량 감소로 현저히 낮아졌다(Kim and Kim, 2002).

그러나 중국에서는 현재에도 석탄으로 겨울철 난방을 유지하기 때문에, SO₂가 대량으로 발생하는 것으로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2002; Tan *et al.*, 2000). 특히 황사기간 겨울철 밤시간대에

수은과 PM10이 어느 정도 상관관계를 형성하는 점은 흥미롭다. 이러한 상황을 고려할 때, 중국 지역에서 겨울철 황사기간 동안 상대적으로 풍부하게 존재하는 수은이 장거리 이동을 통하여 한반도로 유입되었을 가능성도 완전히 배제할 수 없다. 표 3에서 황사기간의 풍속이 비황사기간의 풍속보다 강하였음에도 불구하고, 황사기간에 SO₂, 수은의 농도가 낮아지지 않았다는 점은 그와 같은 가능성을 시사한다.

요인분석(Factor Analysis: FA)은 서로 관련 있는 변수들을 그룹지어 하나의 요인으로 묶어줌으로써, 변수들 간의 연계성을 판단하는 통계적 기법에 해당한다. 성격이 유사한 변수들을 통계적으로 구분해줌으로써, 고려할 요인의 수를 최소로 줄일 수 있도록 해준다. 이와 같은 방법은 수용점에서 오염물질들에 대한 오염원의 수를 식별하기 위하여, 주로 적용한 방법에 해당한다(Malinowski, 1991). 본 연구에서 수은의 분포에 영향을 미치는 주요인을 산출하기 위하여, 황사의 유무(황사/비황사), 계절(겨울/봄)이라는 두가지 인자를 포괄적으로 반영하는 4가지 자료군에 대해 개별적으로 요인 분석을 실시하였다. 요인분석의 고유치 0.8을 기준으로 연계성의 강약을 분류하였다(표 6). 결과적으로 계절별로 구분한 결과는 각각 3~6가지 요인들이 중요한 것으로 나타났다.

상관분석의 결과와 유사하게, 황사와 비황사 두 기간의 요인분석 결과는 상당히 차별화가 되었다. 우선, 비황사기간 동안은 3가지 요인이 주로 오염물질들(즉, PM10, S-, N-, C-화합물)과 관련 있는 주요 요인들로 봄철에는 52%, 겨울철에는 60%의 변이를 차지하였다(표 6). 그러나, 수은은 위의 세가지 요인들 중에 포함되지 않고, 나머지 잔류 요인들과 함께 분리되었다. 봄철에는 PM10과 함께 9.9%의 분산값으로, 겨울철은 UV, RH와 함께 9.8%의 분산값으로 각각 분류되었다. 이러한 요인분석의 양상을 보면, 수은이 여타 다른 주요오염물질들과 함께 제1요인으로 구분되었던, 선행연구(Kim and Kim, 2001a)의 결과와는 상당히 구분되는 양상이다. 다음으로, 황사기간 동안의 제1 또는 제2요인으로 N-과 C-화합물, PM10 등이 50% 이상의 변이를 설명할 수 있는 것으로 분류되었다. 봄과 겨울철 각각의 경우, 제3 또는 제4, 5 요인은 주로 기상변수들로 나타났다. 황사기간에도 비황사기간의 경우와 비슷하게 수은은 주요소로 분류되지 않았다. 그러나 봄철 황사에서는 온도나 SO₂

와 함께, 그리고 겨울철에는 오직 SO₂가 중요한 변이로 나타났다.

이와 같은 결과를 감안해 볼 때, 수은과 연계된 여러가지 환경변수 또는 기상변수들의 관계를 추정할 수 있는 특정한 근원 인자들을 가려내기에는 쉽지 않은 것으로 보인다. 그러나 황사기간 동안 수은이 SO₂와 같이 일관성 있게 분류되는 점과 같은 특성을 미루어 보면, 두 물질은 황사기간 동안 유사하게 거동할 가능성도 예상할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 58개월의 기간 동안 서울 양재 지역에서 측정한 수은의 시간대별 농도 자료 및 기타 환경변수들의 관계를 황사의 발생 유무와 연계하여 분석한 것이다. 연구기간 중 황사가 발현하였을 때는 PM10의 농도가 평소보다 2~5배 증가로, 대기질의 심각한 변화가 나타났다. 그러나 수은의 일변량은 황사의 유무 또는 봄과 겨울철과 같은 계절적 기준에 따라서 다양한 형태로 차이를 나타내었다. 황사 비황사기간 동안 황사는 각각의 기준에 따라 농도의 변화를 보여주지 않았다. 다만, 황사기간 수은의 최소농도값은 1.79 ng m⁻³로써 비황사기간의 해당값에 비하여 상당히 높은 수준이었다. 황사가 발현한 시점의 겨울철 밤기간 동안에는 수은의 농도도 최고조에 이르렀다. 반면, 이 기간(겨울철 밤시간대의 황사기간)을 제외하면, 황사기간 동안에도 거의 일관성 있게 대부분 오염물질의 농도는(비황사기간 보다) 낮게, 그리고 수은의 농도는 비슷한 수준으로 관측되었다. 결국, 황사의 발생이 전기간 동안(1997~2002년) 통계적으로 유의한 수준의 수은의 농도 상승 효과는 없는 것으로 나타났다.

황사와 비황사기간에 수은의 농도분포 특성을 자세히 알아보기 위하여, 계절간 또는 낮과 밤으로 자료를 분리한 후 비교분석을 시도하였다. 우선 상관분석을 통하여, 황사기간 동안 수은이 특별히 SO₂ 등과(비황사기간에 대비하여) 높은 상관관계를 형성하는 것을 발견할 수 있었다. 계절 차이 및 황사/비황사기간이라는 두 가지 기준으로 나누어 실시한 요인 분석 결과도 이와 유사한 양상을 보여 주었다. 비황사기간에 풍속과 수은이 높은 정도의 역상관관계를

형성하고 있음을 확인하였다. 황사기간 상대적으로 강한 수준의 풍속에도 불구하고 높은 수준의 최소 농도값과 비황사기간과 동등하거나 높은 수준의 농도를 유지하였다는 점은 수은의 장거리 이동을 시사하고 있다.

위와 같이 분석한 결과들로부터, 황사 현상이 수은의 농도분포에 미치는 영향을 다음과 같이 요약 정리하였다.

(1) 황사기간 동안 수은의 농도분포는 비황사 때와 어느 정도 구분이 이루어진다. 황사기간 동안 수은은 1.96~32.60 ng m⁻³의 농도범위에서 관측이 되었다(N=758). 비황사기간에는 0.03에서 32.70 ng m⁻³의 농도범위를 보였다(N=26,385). 그러나 양 기간의 평균값은 모두 5 ng m⁻³ 수준으로 실질적인 차이를 통계적으로 식별하기는 어려웠다. 반면, 겨울철 밤시간대에 황사가 발생하였을 때, 수은의 농도값이 비황사기간에 비하여 PM10 등과 함께 상대적으로 높은 농도값과 변폭을 보여주었다. 반면 N-과 C-화합물을 비롯한 일부 오염물질들은 황사기간에 농도 감소가(풍속의 증가와) 동시에 나타났다.

(2) 수은은 대부분의 주변 환경변수들과 높은 상관관계를 보였지만, PM10과는 역상관 또는 거의 미약한 상관관계를 보였다. 한가지 유의사항으로 겨울철 황사기간 동안 수은이 상대적으로 SO₂와 높은 상관값을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 비황사기간 수은의 농도는 풍속과 높은 수준의 역상관관계를 보였다.

(3) 전체 연구기간 동안 장기적으로 관측한 수은 및 여타 오염물질들의 농도분포를 비교해보면, 황사의 발생으로 인해 상대적으로 신선한 공기가 조사 대상지역에 유입하였으나, 동시에 수은은 1.79 ng m⁻³ 이상의 수준을 유지하고 있음을 통계분석의 결과는 지적하고 있다. 수은의 일주기 분포를 살펴볼 때, 겨울철 밤시간대에 발생한 수은 농도 및 변폭은 황사기간대에 더 크게 나타났다. 그러나, 이러한 개개 황사가 발생할 때, 당시의 상황에 따라 농도분포가 크게 달라질 수 있음을 주목해야 한다.

(4) 요인분석의 결과, 황사기간 동안 수은은 SO₂와 의 동일한 요인군으로 구분되었다.

지금까지의 결과를 살펴볼 때, 황사에 의한 수은의 장거리 이동의 가능성을 구체적으로 설명하기 위해서는, 수은을 여타 중금속(Al, As, Pb, Cd) 성분들과

함께 배출원을 추적하는 화학적 조성분석과 모델분석 등으로 비교하는 것도 고려해 볼 필요가 있다. 이러한 세부적인 분석을 통하여 장거리 이동이 진행되는 동안 수은의 농도분포가 영향을 받는 양상을 보다 객관적으로 평가할 수 있는 연구자료를 확보할 수 있으리라 생각한다.

감사의 글

본 연구는 2006년 한국표준과학연구원의 기관고유사업의 지원에 의하여 연구되었습니다. 제3저자는 본 연구를 부분적으로 지원해 주신 극지연구소에 감사 드리는 바입니다(PP06010).

참고 문헌

Chung, Y.-S., H.-S. Kim, J. Dulam, and J. Harris (2003) On heavy dustfall observed with explosive sandstorms in Chongwon-Chongju, Korea in 2002, *Atmospheric Environment*, 37, 3425-3433.

Chun, Y.S., J.Y. Kim, J.C. Choi, K.O. Boo, S.N. Oh, and M.H. Lee (2001) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2715-2721.

Fang, F., Q. Wang, and J. Li (2004) Urban environmental mercury in Changchun, a metropolitan city in north-eastern china: source, cycle, and fate, *Science of the Total Environment*, 330, 159-170.

Han, Y.-J., M. Thomas, P.K. Hopke, J.-P. Cheong, H. Kim, and S.-M. Yi (2004a) Identification of source locations for atmospheric dry deposition of heavy metals during yellow-sand events in Seoul, Korea in 1998 using hybrid receptor models, *Atmospheric Environment*, 38, 5353-5361.

Han, Y.-J., T.M. Holsen, S.-O. Lai, P.K. Hopke, S.-M. Yi, W. Liu, J. Pagano, L. Falanga, M. Milligan, and C. Andolina (2004b) Atmospheric gaseous mercury concentrations in NewYork State: relationships with meteorological data and other pollutants, *Atmospheric Environment*, 38, 6431-6446.

Iverfeldt, A., J. Munthe, C. Brosset, and J. Pacyna (1995) Long-term changes in concentrations and depositions of atmospheric mercury over Scandinavia, *Water, Air and Soil Pollution*, 80, 227-233.

- Jaffee, D., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karlsdottir, D. Blake, J. Harris, G. Carmichael, and I. Uno (1999) Transport of Asian air pollution to north America, *Geophysical Research Lett.*, 26(6), 711-714.
- Jaffee, D., E. Prestbo, P. Swartzendruber, P. Weiss-penzias, S. kato, A. Takami, S. hatakeyama, and Y. Kajii (2005) Export of atmospheric mercury from Asia, *Atmospheric Environment*, 39, 3029-3038.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2000) The effects of anthropogenic sources on temporal distribution characteristics of total gaseous mercury in Korea, *Atmospheric Environment*, 34, 3337-3347.
- Kim, B.-G. and S.-U. Park (2001) Transport and evolution of a wintertime yellow sand observed in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 3191-3201.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2001a) The temporal distribution characteristics of total gaseous mercury at an urban monitoring site in Seoul during 1999~2000, *Atmospheric Environment*, 35, 4253-4263.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2001b) Some insights into short term variability of total gaseous mercury in urban air, *Atmospheric Environment*, 35, 49-59.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2002) A decadal shift in total gaseous mercury concentration levels in Seoul, Korea: change between the late 1980s and the late 1990s, *Atmospheric Environment*, 36, 663-675.
- Kim, K.-H., M.-Y. Kim, J. Kim, and K.-W. Lee (2002a) The concentrations and fluxes of total gaseous mercury in a western coastal area of Korea during late March 2001, *Atmospheric Environment*, 36, 3413-3427.
- Kim, Y.K., H.W. Lee, J.K. Park, and Y.S. Moon (2002b) The stratosphere-troposphere exchange of ozone and aerosols over Korea, *Atmospheric Environment*, 36, 449-463.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2003) The long term variation of atmospheric mercury in Seoul, Korea from 1997 to 2002, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(2), 179-189.
- Lin, C.-J. and S.O. Pehkonen (1999) The chemistry of atmospheric mercury; a review, *Atmospheric Environment*, 33, 2067-2079.
- Lee, D.S., G.J. Dollard, and S. Pepler (1998) Gas-Phase mercury in the atmosphere of the United Kingdom, *Atmospheric Environment*, 32, 855-864.
- Liu, Shili, F. Nadim, C. Perkins, R.J. Carley, G.E. Hoag, Y. Lin, and L. Che (2002) Atmospheric mercury monitoring survey in Beijing, China, *Chemosphere*, 48, 97-107.
- Malinowski, R.M. (1991) *Factor analysis in Chemistry*, 2nd Edition. Wiley, NewYork, USA.
- Munthe, J., I. Wangberg, A. Iverfeldt, O. Lindqvist, D. Stromberg, J. Sommar, K. Gardfeldt, G. Petersen, R. Ebinghaus, E. Presbo, K. Iarjava, and V. Siemens (2003) Distribution of atmospheric mercury species in Northern Europe: final results from the MOE project, *Atmospheric Environment*, 37 Suppl., S9-S20.
- Schroeder, W.H. and J. Munthe (1998) Atmospheric mercury- An overview, *Atmospheric Environment*, 32(5), 809-822.
- Streets, d.G., J. Hao, Y. Wu, J. Jiang, M. Chan, H. Tian, and X. Feng (2005) Anthropogenic mercury emissions in China, *Atmospheric Environment*, 39, 7789-7806.
- Tan, H., J.L. He, L. Liang, S. Lazoff, J. Sommer, Z.F. Xiao, and O. Lidqvist (2000) Atmospheric mercury deposition in Guinzhou, China, *Science of the Total Environment*, 259, 223-230.
- Wang, Z., X. Zhang, Z. Chen, and Y. Zhang (2006) Mercury concentration in size-fractional airborne particles at urban and suburban in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 40, 2194-2201.
- Wong, C.S.C, N.S. Duzgoren-Aydin, A. Aydin, and M.H. Wong (2006) Sources and trends of environmental mercury emissions in Asia, *Science of the Total Environment*, 649-662.