

봄철 황사의 발생과 대기 중 중금속 성분의 농도 변화 -납성분을 이용한 사례 연구

The Influence of the Asian Dust on the Springtime Distribution of Airborne Lead

김기현* · 강창희¹⁾ · 이진홍²⁾ · 최금찬³⁾ · 윤용훈⁴⁾

세종대학교 지구환경과학과, ¹⁾제주대학교 화학과, 690-756, ²⁾충남대학교 환경공학과,
³⁾동아대학교 환경공학과, ⁴⁾기상연구소

(2004년 10월 10일 접수, 2004년 12월 10일 채택)

Ki-Hyun Kim, Chang-Hee Kang¹⁾, J.-H. Lee²⁾, KC Choi³⁾ and YH Youn⁴⁾
*Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University, ¹⁾Dept. of Chemistry,
Cheju National University, ²⁾Dept. of Environmental Engineering, Chungnam
National University, ³⁾Dept. of Environmental Engineering, Donga University, ⁴⁾METRI*

(Received 10 October 2004, accepted 10 December 2004)

Abstract

The analysis of Pb in both PM_{2.5} and PM₁₀ fraction of aerosols was made consecutively for every spring season during four year period of 2001 through 2004. To diagnose the impact of the Asian Dust (AD) on metal concentration levels, we compared our Pb measurement data after dividing the whole data sets into AD and NAD period. The results of our analysis indicated that the concentrations of coarse particles increased significantly during the AD period, whereas an increase in the fine counterpart was of moderate degree. However, when Pb concentrations between AD and NAD were compared, the patterns were quite different. From all particle fractions, the Pb concentrations of NAD were slightly or moderately higher than those of AD. The overall results of our study suggest that an increase in particle concentrations during the AD period can cause a rather slight reduction in Pb concentration levels; this can be explained by the dilution effect associated with the increase of Pb-depleted coarse particles.

Key words : Lead (Pb), PM_{2.5}, PM₁₀, Coarse particle, Fine particle, Asian dust

1. 서 론

인구 밀도와 에너지 소비량의 급격한 증가로 인해,

동아시아 지역은 다량의 대기오염물질들을 배출하는 핵심 배출원 지역으로 부각되고 있다 (Zhang and Arimoto, 2000; Carmichael *et al.*, 1997). 오염물질들에 대한 배출원으로서의 기여도를 감안할 때, 이 지역은 이미 북미, 유럽과 함께 지구상의 3대 축을 형성하는 단계에 이르렀다. 기존에 행해진 다수의 연구

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-3277-2832, E-mail : khkim@sejong.ac.kr

결과들은 동아시아 국가들 중에서도 급속한 공업화가 진행 중인 중국이 가장 큰 역할을 하고 있다는 사실을 확인시켜 주고 있다(McKendry *et al.*, 2001; Perry *et al.*, 1999). 참고로 비교적 많은 연구가 시도된 SO₂와 같은 오염물질의 지역적 배출기여도를 비교하면, 동아시아 지역의 팔목할 신장추세를 확인할 수 있다. 1990년에 동아시아의 배출규모는 2,900 만 톤으로서 유럽과 미국을 합한 구미지역의 배출규모인 5,100만톤에 비해 훨씬 작은 수준을 보였다(Kato and Akimoto, 1992). 그렇지만, 2010년 아시아 지역의 예상치는 7,500만 톤 수준으로 구미지역의 5,500만 톤을 초월할 것으로 예상되고 있다(Bhatti *et al.*, 1992).

일반적으로 산업화가 이루어진 대부분의 지역과 같이 한반도의 오염문제는 자체적인 배출원과 함께 중국과 같은 외부 오염원의 영향에 동시에 종속된다. 앞서 언급한 바와 같이, 중국대륙은 편서풍을 따라 자체적으로 발생한 오염물질들을 상당 수준 이송시키기 때문에, 지속적인 장거리 배출원으로서의 기능을 작용하고 있다(Chun *et al.*, 2001; Lin, 2001; Chung and Youn, 1996; Kai *et al.*, 1988). 이와 같은 현상은 실제로 황사 등의 영향으로 분진의 배출, 이송, 침적 등이 집중적, 연쇄적으로 발생하는 봄철기간에 보다 많은 사람들이 체감하는 여러 가지 가시적이고 물질적인 피해를 초래하는 것으로 잘 알려져 있다(Kim *et al.*, 2002, 2003, 2004; Kim and Kim, 2003). 따라서 황사의 발생이 실질적으로 여러 가지 유해 성분들의 분포특성에 어떠한 영향을 미치는 가를 정확하게 파악하는 것은 중요한 의미를 지닌다.

본 연구진은 2001년부터 매년 황사현상이 집중적으로 발생하는 봄철기간 3, 4, 5월에 분진시료의 채취 및 금속성분의 농도분포를 집중적으로 조사하였다. 본 연구에서는 2001, 2002, 2003, 2004년의 4년간에 걸쳐 확보한 금속성분의 농도분포 자료를 토대로, 황사의 발생이 유해 중금속의 농도분포에 어떠한 영향을 미치는 가를 세밀하게 분석하였다.

2. 연구 방법

입자상 물질 및 이들과 결합된 중금속성분들의 채취는 서울시의 북동지역에 위치한 광진구 군자동의

세종대학교 내 6층 건물 영실관 옥상에서 이루어졌다(원래 5층 건물이었으나, 2003년에 6층 건물로 증축함). 연구대상지역인 세종대학교는 동쪽으로 어린이대공원, 서쪽과 북쪽은 주거지역, 남쪽에는 상업지역이 위치해 있다. 학교 밖에는 큰 규모의 도로가 어느 정도 인접한 거리에 있어 대중교통수단에 주로 사용되는 연료의 영향 및 여러 가지 인위적 배출원의 영향권에 일정 수준 노출되어 있다.

시료 채취는 2001년부터 2004년까지 매년 봄철 3월에서 5월까지의 봄철 기간 동안 규칙적으로 분진 시료의 채취 및 분석을 수행하였다. 본 연구에서 시료의 채취는 PM_{2.5}와 PM₁₀ 시료를 각각 1 m³/h의 유속으로 오전 10시 전후로 24시간씩 연속 채취를 실시하였다. 시료채취에 사용된 필터는 비교적 금속의 불순물이 적고, 여과효율이 99.95%로 알려진 0.5 μm pore size 테플론 필터를 사용하였다. 시료채취 전후에 필터를 테시케이터 내에서 48시간 이상 항량한 다음, 사용 전후에 칭량을 실시한 후, 여지에 채취된 입자상 물질과 중금속 성분들을 동시에 분석하였다.

에어로졸에 결합된 납과 기타 금속 성분들에 대한 분석은 EPA Method 3051A의 방법에 따라 마이크로파 분해장치(CEM microwave digestion system, Model MARS-5)를 사용하여 산용액으로 용출시켰다. 시료가 채취된 필터를 테플론 용기에 넣고 진한 질산 9 mL와 진한 염산 3 mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 10분 동안 온도를 175°C로 올리고, 다시 이 온도에서 5분간 유지시켜 총 15분간 시료를 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 필터(Whatman, 0.45 μm PVDF syringe filter)를 이용하여 불용물질을 거른 후 최종적으로 50 mL가 되도록 초순수로 표충하였다. 이 용액을 분석용 시료로 사용하여, 납을 위시한 각종 금속성분들에 대한 함량을 ICP-AES (ThermoJarrellAsh, Model IRIS-DUO) 방법으로 분석하였다. ICP-AES의 분석은 분석대상물질의 함량에 대한 높낮이를 기준으로 고농도 성분들(Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S)과 농도가 낮은 저농도 성분들(Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd)로 분리 실시하였다. 보다 세부적으로 고농도 성분들은 Radial Plasma Torch법, 저농도 성분들은 Axial Plasma Torch법으로 분석하였고, Simultaneous Mode를 이용하였다. 이러한 시스템을 적용할 경우, 납성분의 검출한계는 ~500 ng 수준으로, 실제 공기

시료에 적용할 경우, 약 20 ng m^{-3} 에 해당한다. 분석 방법의 QA/QC는 CRM의 분석 및 타 연구실과의 교차분석 등을 통해 확보하였다. 그리고 기기의 검출 한계를 위시한 분석화학적 정보는 Kim *et al.* (2003)에서 상세하게 제시한 바 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간적 경향성의 비교 연구

본 연구진은 2001, 2002, 2003, 2004년의 4년 기간 동안 3, 4, 5월의 봄철 동안에 비연속적으로 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 시료를 채취 분석하였다. 이 기간 동안 24시간 주기로 채취된 분진시료를 금속성분 중심으로 분석하였다. 본 연구에서는 이들 분석결과 중에서 납성분을 중심으로 황사와 비황사 기간의 경향성을 다양한 관점에서 비교하고, 황사의 발생이 납성분의 농도분포에 어떠한 영향을 미치는가를 진단하고자 하였다. 황사와 비황사의 구분은 기상청에서 제시한 서울지역의 황사발생 자료로부터 구분을 하였다.

그림 1에는 4년 동안 관측한 결과를 토대로, 분진 성분과 이들 분진성분에 함유된 납성분의 농도를 비교하였다. 이러한 비교에 여러 가지 의미를 부여하기 위해, 모든 관측대상의 농도는 단순히 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 의 구분 대신, 미세 (fine = $\text{PM}_{2.5}$), 조대 (coarse = PM_{10} - $\text{PM}_{2.5}$), PM_{10} 의 영역으로 3등분한 후 비교분석하였다. 그림 1에는 3영역의 농도들에 대한 연도별 평균치를 단순히 비교하였다. 그리고 그림 2에는 미세와 조대 영역에 국한하여, 황사(Asian Dust: AD)와 비황사 기간(Non-Asian Dust: NAD)로 구분한 후 비교하였다. 이렇게 세분화된 PM의 관측자료를 비교해 보면, 2003년과 2004년도에는 미세영역의 농도가 조대영역에 비해 크게 나타났다. 일반적으로 황사의 발생이 조대영역분진의 농도변화에 더 민감하게 작용한다는 점을 감안할 필요가 있다. 따라서 이러한 경향은 2001년과 2002년도에 황사의 빈도나 강도가 강하게 나타난 데 반해, 2003년과 2004년도에는 그러한 빈도나 강도가 현저하게 떨어진 현상의 영향을 어느 정도 반영하는 것으로 보인다. 본 연구진이 실제로 분진성분들을 관측한 날 중 황사를 경험한 날은 2001~2004년 기간중 연도별로 10, 10, 1, 3회에 해당한다. 따라서 황사의 발생빈도를 감안할 경우, 본

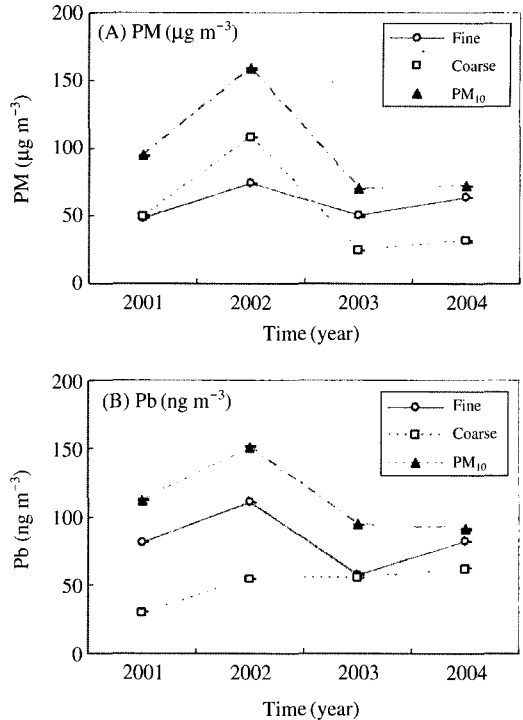


Fig. 1. Temporal changes in the annual mean concentrations of PM and Pb during the whole study period.

연구자료 중 AD자료는 2001년과 2002년의 영향이 전체의 83% 수준으로서 가장 크게 반영되었다고 볼 수 있다. 그리고 이에 반해, 황사가 발생하지 않은, NAD 자료는 총 125회 분석이 이루어졌다. 전체 자료에 대한 AD:NAD 비율은 1:5 수준에 해당한다. 표 1에 제시된 것과 같이, 황사의 발생여부가 납의 연도별 농도분포에서도 어느 정도 차별화되는 경향을 확인할 수 있다. 예를 들어, 황사가 빈번했던 초기 2년에는 미세영역에 납의 농도가 더 크게 나타났지만, 황사가 드물게 나타난 최근 2년에는 조대영역에 비해 근소한 수준이지만 더 낮게 나타났다.

그림 2의 분진농도를 보면, 일부 예외적인 경우를 제외하면, 황사기간대의 분진농도가 비황사 기간대에 비해, 현저하게 높다는 것을 알 수 있다. 그러나 미세 입자의 경우, 그런 경향성이 비교적 뚜렷하지 않다. 따라서, 이런 효과들이 복합적으로 작용한 결과, 후반기 2년 동안에는 비황사 기간의 농도가 더 높게 나타나도록 작용한 것으로 보인다. 그리고 이러한 비교

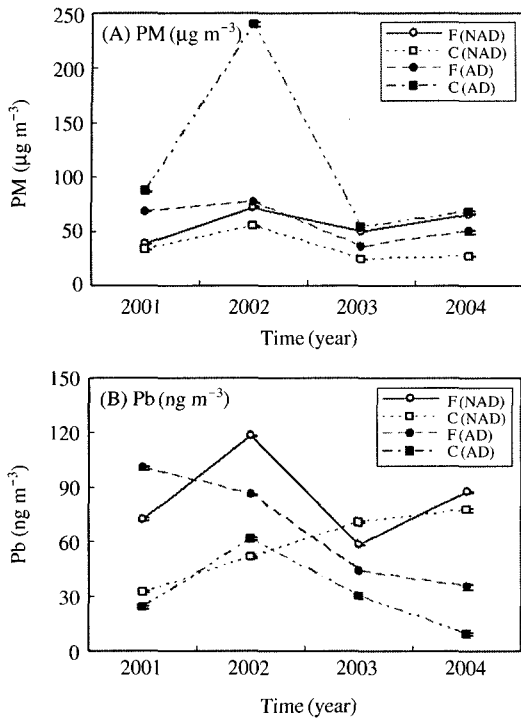


Fig. 2. Same as Fig. 1, but the patterns are compared more specifically for both AD/NAD and Fine/Coarse data pairs.

를 적용한 납의 경우, 경향성이 더욱 더 복잡하게 나타난다. 그러나 조대입자의 경우, 2002년을 제외한 모든 해에 비황사 기간의 납농도가 황사기간에 비해 큰 것으로 나타났다.

3. 2 전체 결과에 대한 비교

앞에서 설명한 바와 같이 분진이나 납성분에서 나타나는 여러 가지 시간적인 경향성을 보다 체계적으로 설명하기 위해, 이들 자료를 다양한 기준으로 비교해 보았다. 표 1에는 본 연구대상 지역에서 4년간 관측한 부유분진과 납의 입경별 평균농도를 조사한 것이다. 전체 연구기간 중 PM_{10} 에 함유된 납의 농도는 $115 \pm 74.7 \text{ ng m}^{-3}$ 로서, 기존에 본 연구진이 일부 산업화 지역에서 관측한 결과들에 비해 대략 1/2 수준에 가까운 것으로 나타났다. 예를 들어, 대전공단이나 수원의 경희대 지역 등에서 PM_{10} 또는 TSP시료로부터 관측한 결과가 240 ng m^{-3} 수준인 것으로 보고된 바 있다(Kim et al., 2002, 1997). 반면 다양한 환

경권역을 조사한 Kim and Song (1997) 에 의하면, 비교적 청정한 초지역에서 88 ± 60 , 산업단지 지역에서 $326 \pm 307 \text{ ng m}^{-3}$ 인 것으로 보고한 바 있다.

표 1에는 모든 봄철의 전체 자료를 취합한 결과와 이를 다시 황사 및 비황사로 구분한 결과를 동시에 제시하였다. 분진의 농도를 대표할 수 있는 PM_{10} 을 기준으로 보면, 비황사 기간의 납농도가 $111 \pm 77 \text{ ng m}^{-3}$ 인 데 반해, 황사기간에는 $109 \pm 59.5 \text{ ng m}^{-3}$ 로 미세한 감소의 경향을 확인할 수 있다. 그러나 입경영역별로 보면, 결과는 조금 더 복잡해진다. 황사의 유무에 상관없이, 미세입경 영역(fine particle fraction)의 납농도는 조대입경 영역(coarse particle fraction)보다 더 높은 수준의 농도를 보인다. 그러나 기간별로 구분할 경우, 양자간의 관계는 조금 더 동적으로 변하는 것을 알 수 있다. 비황사기간 중 조대영역에 대비한 미세 영역의 납농도 우위(87:57) 수준으로 적당히 차별화가 된다. 황사기간보다 조금 더 높게 나타난다. 그렇지만, 황사기간 중에는 그 차이가 82:40 정도로 두 배 수준으로 확대되는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 조대영역의 납농도가 미세영역에 비해 낮게 나타나지만, 황사기간 중에는(비황사 기간에 비해) 상대적인 감소의 폭이 현저하게 두드러진다. 실제 황사기간 중 조대영역의 분진 농도가 비황사기간에 비해 4배 이상 크다는 점을 감안하면, 황사를 통해 중국대륙으로부터 유입되는 조대영역의 분진들은 상대적으로 납성분이 결핍되었음을 시사한다.

표 1에 제시된 바와 같이 Pb/PM비를 이용해서, 분진에 함유된 납의 순도를 직접적으로 비교하면 의미 있는 결과를 확인할 수 있다. 그 결과에 따르면, 황사의 유입이 실질적으로 납농도의 희석효과를 유도하였다는 것이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 비황사 기간 중에는 조대입자의 Pb/PM비가 2.38×10^{-3} 인 데 반해, 황사 기간에는 그 비가 0.74×10^{-3} 로서 약 3배 가까이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이와 같이 황사의 발생이 실제로 금속성분의 농도를 떨어지게 할 가능성에 대해서, 본 연구진은 이미 선행연구의 결과를 통해 시사한 바 있다. 동일한 관측지점에서 2001년 봄철 기간 동안 관측한 결과를 토대로, Kim et al. (2003)은 Zn, Cr, Cu, Co, Mo, Cd과 같은 금속성분들이(본 연구에서 관측한 납의 결과와 유사하게) 황사에 의한 희석효과로 상대적인 농도저감이 진행될 수 있다는 점을 확인한 바 있다.

Table 1. A statistical summary of PM and Pb measurement data obtained consecutively during every spring period between 2001 and 2004. Comparison is initially made for the whole data sets between different particle fractions and then extended to both subdivided groups of AD and NAD period.

PM ($\mu\text{g m}^{-3}$)			Pb (ng m^{-3})			Pb/PM*		
Fine	Coarse	PM ₁₀	Fine	Coarse	PM ₁₀	Fine	Coarse	PM ₁₀
[1] All								
60.3±81.6 (45.5)	55.4±110 (29.1)	98.2±122 (73.8)	86.2±62.5 (68.2)	49.5±44.3 (41.5)	115±74.7 (88.3)	1.76±1.33 (1.40)	1.73±3.04 (0.96)	1.72±3.35 (1.19)
5.90~846 (149)	1.16~1006 (124)	6.21~1073 (147)	20.9~317 (120)	3.17~253 (77)	20.5~347 (123)	0.06~7.16 (116)	0.03~23.6 (69)	0.04~35.7 (117)
[2] AD								
68.0±42.6 (55.5)	149±215 (87.3)	213±234 (128)	81.5±40.8 (79.1)	39.6±41.9 (26.3)	109±59.5 (114)	1.48±0.91 (1.09)	0.74±1.54 (0.30)	68.0±42.6 (55.5)
25.1~218 (24)	20.3~1006 (23)	78.1~1073 (23)	24.9~183 (21)	3.17~148 (19)	31.8~222 (22)	0.38~4.00 (21)	0.04~6.72 (19)	25.1~218 (24)
[3] NAD								
58.8±87.2 (42.9)	34.1±45.9 (26.1)	76.9±69.3 (65.8)	87.2±66.3 (63.9)	56.9±54.9 (46.3)	111±77.0 (81.0)	1.82±1.40 (1.50)	2.38±3.71 (1.41)	1.87±3.53 (1.29)
5.90~846 (125)	1.16~420 (101)	6.21~587 (124)	20.9~317 (99)	3.60~306 (60)	20.5~347 (109)	0.06~7.16 (95)	0.03~23.6 (52)	0.28~35.7 (103)

*Pb/PM ratios should be multiplied by a factor of 10^{-3} because of differences in their concentration levels.

4. 결 론

본 연구에서는 4년간 연속적으로 관측한 자료를 토대로 황사의 발생유무가 납성분의 농도분포에 미치는 영향을 비교진단하였다. 본 비교분석의 결과에 의하면, 다음과 같은 결론의 유추가 가능하다. 황사기간 중에는 비황사 기간에 비해 모든 입경영역에 포함되는 분진들의 유입 수준이 증가한다. 그런데, 특히 조대영역 분진들의 유입이 미세영역에 비해 2배 이상 클 정도로 더욱 더 두드러지게 나타난다. 그러나 황사현상을 타고 유입되는 이들 대부분의 조대입자들은 납이 극단적으로 결핍된 상태를 보인다. 따라서 조대 영역의 경우, 분진의 절대량이 두드러지게 증가하는 외부 여건에도 불구하고, 비황사 기간에 비해 납성분의 농도 자체는 현저하게 떨어지는 경향을 보이는 것으로 나타난다. 결과적으로 황사 기간 중 조대입자의 유입이 두드러지게 증가하는 현상이 뚜렷하지만, 이들은 납성분의 결핍이 현저한 상황에서 한 반대로 유입된다. 따라서 농도의 증감이란 관점에서 볼 때, 황사현상의 발생이 유해성분인 납의 농도를 미미한 수준으로 저하시키거나 별다른 영향을 미치

지 않는다고 결론지을 수 있다. 그러나 전체 연구가 이루어진 4년 중 전반기 2년에는 황사가 두드러지게 빈번하게 나타나고, 후반기 2년에는 거의 발생하지 않았기 때문에 이러한 경향성에 대한 연구는 보다 더 지속적인 형태로 관측되고 해석되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 산학협동재단이 지원하는 연구과제의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

Bhatti, N., D. Streets, and W. Foell (1992) Acid rains in Asia. *Environ. Manage.* N.Y., 16, 541-562.
 Carmichael, G.R., M.-S. Hong, H. Ueda, L.-L. Chen, K. Murano, J.K. Park, H. Lee, Y. Kim, C. Kang, and S. Shim (1997) Aerosol composition at Cheju Island, Korea. *J. Geophys. Res.* 102(5), 6047-6061.
 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.
- Chung, Y.S. and M.B. Yoon (1996) On the occurrence of Yellow Sand and atmospheric loading, *Atmospheric Environment*, 30 (13), 2387-2397.
- Kai, K., Y. Okada, O. Uchiño, I. Tabata, H. Nakamura, T. Takasugi, and Y. Nikaidou (1988) Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986, *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 457-472.
- Kato, N. and H. Akimoto (1992) Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: Emission inventories. *Atmos. Environ.*, 26A, 2997-3017.
- Kim, K.-H. and M.Y. Kim (2003) The effects of Asian Dust on particulate matter fractionation in Seoul, Korea during spring 2001. *Chemosphere*, 51 (8), 707-721.
- Kim, K.-H. and D.W. Song (1997) The concentrations of lead in urban and nonurban atmospheres of Won Ju city, Korea. *Water, Air and Soil Pollution* 98 (3-4), 225-273.
- Kim K.-H., D.-S. Kim, and T.-J. Lee (1997) The temporal variabilities in the concentrations of airborne lead and its relationship to aerosol behavior. *Atmospheric Environment* 31 (20), 3449-3458.
- Kim, K.-H., J.-H. Lee, and M.S. Jang (2002) Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea, *Environmental Pollution*, 118, 41-51.
- Kim, K.-H., G.-H. Choi, C.-H. Kang, J.-H. Lee, J.-Y. Kim, Y.-H. Youn, and S.-R. Lee (2003) The chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events. *Atmospheric Environment* 37 (6), 753-765.
- Kim, K.-H., B.-J. Choi, S.-T. Yun, and S.-J. Hwang (2004) Studies of spatial and temporal distribution characteristics of TSP-bound trace metals in Seoul, Korea, *Environmental Pollution*, 127 (3), 323-333.
- Lin, T.-H. (2001) Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: observed evidence and simulation, *Atmospheric Environment*, 35, 5873-5882.
- McKendry, I.G., J.P. Hacker, R. Stull, S. Sakiyama, D. Mignacca, and K. Reid (2001) Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18361-18370.
- Perry, K.D., T.A. Cahill, R.C. Schnell, and J.M. Cahill (1999) Long-range transport of anthropogenic aerosols to the National Oceanic and Atmospheric administration baseline station at Mauna Loa Observatory, *Hawaii Journal of Geophysical Research*, 104 (D15), 18521-18533.
- Zhang, X. and R. Arimoto (1993) Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: Concentrations, sources and atmospheric deposition on the losses plateau, *Atmospheric Environment*, 27A (13), 2051-2067.