

황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구

The Influence of the Asian Dust on the Metallic Composition of Fine and Coarse Particle Fractions

최규훈 · 김기현* · 강창희¹⁾ · 이진홍²⁾
세종대학교 지구환경과학과 대기환경연구실,
¹⁾제주대학교 화학과, ²⁾충남대학교 환경공학과
(2002년 7월 31일 접수, 2002년 12월 10일 채택)

Gyoo-Hoon Choi, Ki-Hyun Kim*, Chang-Hee Kang¹⁾ and Jin-Hong Lee²⁾
Dept. of Earth and Environmental Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea
¹⁾*Dept. of Chemistry, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea*
²⁾*Dept. of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea*
(Received 31 July 2002, accepted 10 December 2002)

Abstract

In this study the distribution patterns of the metallic components were analyzed both before and after the Asian Dust (AD) events at 2001 by comparing the chemical composition of metallic components in terms of various statistical methods. According to the AD/NAD concentration ratio of metallic components, the main components of crustal soils were exhibiting the values above 1.0; but opposite results were seen dominantly for hazardous metallic components. Examination of fine-to-coarse (F/C) ratios of metallic components showed higher values for major anthropogenic components including Pb (5.83), Ni (2.61), etc. Comparison of our measurement data with those obtained within and across the Korean peninsula indicated that the metallic distribution patterns of the study area can be distinguished from previous studies. The results of our analysis, when investigated in relation with air mass movement patterns, indicated evidence of the direct influence of AD events and anthropogenic processes.

Key words : Asian Dust, Fine particulates, Coarse particulates, PM10, Source

1. 서 론

황사의 발생은 발원지의 주변지역에 해당하는 한

국이나 일본과 같은 곳에만 영향을 미치는 것이 아니라(강한 서풍의 기류를 타고) 북미지역의 북태평양까지 이동할 만큼 심각한 환경오염현상으로 간주되고 있다(David *et al.*, 2001; McKendry *et al.*, 2001). 황사의 발생 및 심각한 피해에 대한 공감대를 바탕으로 본진의 장거리 이동현상을 체계적으로 규명하

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

기 위한 연구들이 한반도를 위시한 아시아지역에서 80년대 이래 집중적으로 이루어지고 있다 (Fang *et al.*, 2002; Chun *et al.*, 2001; Lin, 2001; Choi *et al.*, 1999; Chung *et al.*, 1996; Joussaume, 1990; 이민희 등, 1986).

황사현상은 중국과 몽골의 사막지대인 타클라마칸, 바다인자단, 텐겔, 오르도스, 고비지역, 만주지역과 황하중류의 황토지대인 황토고원 등으로부터 기원하는 것으로 알려져 있다 (Joussaume, 1990; Kai and Okada, 1988). 황사 분진은 대략 20 m/s를 초과하는 서풍을 타고 광역적 규모로 분산, 이동된다. 또한 이렇게 발생하는 황사는 매년 대기 중으로 대략 800 Tg 정도의 분진을 유입시킨다 (Xiao, 1998; Zhang, 1995). 이 중 30%는 발원지 주변에서 재침적되며, 20% 정도는 발원지에서 국지적인 규모로 이동하는 것으로 알려져 있다. 그리고 나머지 50% 정도가 북동아시아지역을 위시하여 대륙규모의 장거리 이동에 종속되어 광역적인 환경오염 현상으로 진행된다 (Xiao, 1998; Zhang, 1995).

본 연구진은 선행연구의 일환으로 2001년 춘계기간 동안 대기분진 중 금속성 성분의 분포특성을 분석하고 발표한 바 있다 (김기현 등, 2002). 본 연구에서는 황사의 제1차 침적지역으로 알려진 한반도지역을 중심으로 황사의 발현유무가 중금속의 농도분포에 미치는 영향을 보다 세부적으로 알아보기 위하여 황사와 비황사기간에 대해 상대적인 분포특성의 비교를 시도하였다. 이를 위해, 서울의 북동부 지역에 위치한 관측점을 중심으로, 2001년 봄철기간 동안 집중적으로 관측한 중금속 성분들 (PM_{2.5}, PM₁₀) 분포특성을 세밀하게 분석하였다.

2. 연구방법

시료채취는 봄철 황사현상이 빈번하게 발생한 2001년 3월 19일부터 5월 1일까지 (총 47일) 기간 중에서 주중 29일 (또는 29회의 시료채취)을 택하여 세종대학교 내 5층 건물 영실관 옥상에서 수행하였다. 본 연구는 1일 24시간 주기로 PM_{2.5}와 PM₁₀ 시료를 각각 1 m³/h (또는 16.67 L/min)의 유속으로 연속 채취하는 것을 원칙으로 하였다. 시료채취에 사용된 필터는 비교적 금속의 불순물이 적고, 여과

효율이 99.95%로 알려진 0.5 μm pore size 테플론 필터 (Advantec MFS, Inc. Japan)를 사용하였다. 시료채취 전후에 필터를 데시케이터 내에서 48시간 이상 항량한 다음, 사용 전후에 칭량을 실시하였다. 여지에 채취된 입자상 물질과 중금속 성분들을 동시에 분석하였다.

입자상 물질에 결합된 금속 및 황 성분은 EPA Method 3051A의 방법에 따라, 마이크로파 분해장치 (CEM microwave digestion system, Model MARS-5)를 사용하여 산용액으로 용출시켰다. 분석과 관련된 과정을 조금 더 상세하게 설명하면, 다음과 같다. 시료가 채취된 필터를 테플론 용기에 넣고 진한 질산 9 mL와 진한 염산 3 mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 10분 동안 온도를 175°C로 올렸다. 다시 이 온도에서 5분간 유지시켜 총 15분간 시료를 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 불용물질을 거른 (Whatman, 0.45 μm PVDF syringe filter) 후 최종적으로 50 mL가 되도록 초순수로 표충하였다. 이 용액을 분석용 시료로 사용하여, 각종 금속 및 황 (S) 성분에 대한 함량을 ICP-AES (Thermo Jarrell Ash, 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 분리한 후 실시하였다. 보다 세부적으로 고농도 성분들은 Radial Plasma Torch법, 저농도 성분들은 Axial Plasma Torch법을 이용하여, Simultaneous Mode로 분석하였다. 그리고 분석시 ICP의 기기조건 및 각 성분들의 검출한계는 이미 본 연구의 일반적인 부분을 기술한 선행 연구논문에서 상세하게 제시하였다 (김기현 등, 2002).

3. 결과 및 토론

3.1 황사와 비황사기간의 농도비교

본 연구기간 동안 채취된 총 29일의 시료들 중에서 실질적으로 황사의 발생이 관측된 기간은 기상청이 제시한 총 11일 (3/20~3/23, 4/9~4/12, 4/24~4/26), 비황사기간은 이를 제외한 총 18일로 분류할 수 있다. 이러한 기간설정을 토대로 미세 (PM_{2.5}), 조대입자 (PM₁₀-PM_{2.5}), PM₁₀ 영역별로 관측한 분

진의 질량농도를 “황사/비황사”비로 계산해 보면, 각각 1.7, 2.6, 2배로 나타나 모든 영역에서 황사의 영향이 나타나는 것을 알 수 있다(그렇지만 비황사 기간 동안 각 영역 입자들의 농도는 일정한 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다). 본 연구에서 관측한 각 입경영역별 중금속 성분들의 농도분포를 표 1에 제시하였다. 표 1에 의하면 모든 영역의 입자들에서 유해한 중금속 성분들의 경우 대체로 저농도를 유지하지만, 지각기원의 성분들은 절대적으로 높은 농도를 유지하는 경향이 확인된다. 성분들의 농도를 황사, 비황사기간(그리고 전체 기간)으로 구분하였을 경우, 대부분 성분들의 농도는 황사>비황사의 순서로 나타났다. 특히 인위적인 오염원에서 발생하는 성분들(Mo, Cr, Cu, Pb 등)은 각 기간별 농도의 차이가 미미하지만, 자연적인 기원 성분들은 상대적으로 그 차이가 큰 것으로 확인되었다.

본 연구대상지역에서 관측한 중금속 성분들이 황사의 영향에 얼마나 노출되어 있는지를 평가하기 위한 한 가지 방편으로 황사(AD)기간에 대비한 비황사(NAD) 기간의 비를 이용한 성분별 농도비를 환산하여 보았다(그림 1a). 즉 이를 통해 ‘AD/NAD’비

가 1을 초과할 경우, 황사에 의한 영향이 일정 수준 이상 작용하였을 가능성을 유추할 수 있다(그러나 상대적으로 그 비가 1을 초과하지 않을 경우, 황사의 유입이 중금속의 농도에 뚜렷한 영향을 미친다고 단정하기는 곤란할 것이다). 이러한 기준에 따른 자료의 비교결과에 의하면, Na, K, S를 제외한 대부분의 지각기원의 성분들에서(비황사기간에 비해) 황사기간에 그 농도가 증가한 것으로 나타났다. 미세입자 영역과 PM10 영역의 경우, 이러한 차이가 더 확연하게 나타나고 있었다. 좀 더 세밀히 살펴보면, Al의 경우 AD/NAD 비값이 미세입자와 조대입자 내에서 각각 약 6과 3.5로 나타났다. 그리고 여타 주요 성분들의 경우에도 Al과 비슷한 경향을 확인할 수 있었다. 이에 반해 Cr, Pb, Cu, Mo, Cd를 위시한 위해성 금속성분들의, AD/NAD의 농도비는 대부분 1 미만으로 나타났다. 따라서 이들 성분은 상대적으로 비황사기간에(미세하지만) 더 높은 농도를 유지할 가능성을 시사하였다. 즉, 이들 성분들은 황사의 발생이 이들의 함량에 절대적 영향을 미치지 않는다는 것을 유추할 수 있다. 반면 부유분진 자체의 농도나 자연적으로 발생하는 금속성 성분들

Table 1. A statistical summary of fine PM fraction and the associated constituents determined during the Asian Dust period of 2001. All measurements are made on a daily basis for a total of 29 days.*

Parameters	All	AD	NAD	Parameters	All	AD	NAD	Parameters	All	AD	NAD
Fine	49.3	68.2	39.3	Coarse	50.5	86.9	33.2	PM10	95.5	144	72.5
Al	691	1514	258	Al	1853	3353	1143	Al	2490	4790	1400
Fe	743	1310	444	Fe	1615	2701	1100	Fe	2321	3960	1544
Ca	565	1117	274	Ca	1836	2940	1313	Ca	2336	3916	1587
Na	309	381	271	Na	390	611	285	Na	699	999	556
K	435	676	308	K	610	1028	411	K	1038	1712	720
Mg	231	472	103	Mg	588	1064	363	Mg	806	1523	466
S	1504	1320	1601	S	337	493	263	S	1867	1874	1864
Ti	33.7	64.4	17.6	Ti	98.7	163	68.0	Ti	130	223	85.6
Mn	39.0	60.1	27.9	Mn	56.8	98.1	37.2	Mn	94.2	156	65.1
Ba	20.8	28.4	16.9	Ba	38.3	50.8	32.4	Ba	58.4	77.6	49.3
Sr	7.91	11.4	6.09	Sr	9.99	14.7	7.74	Sr	17.8	26.2	13.7
Zn	163	187	150	Zn	146	171	134	Zn	302	372	270
V	7.62	11.6	5.55	V	10.3	17.3	7.04	V	17.6	28.3	12.6
Cr	13.7	16.2	12.4	Cr	9.93	11.9	8.99	Cr	18.8	19.5	18.5
Pb	96.4	107	90.9	Pb	29.7	23.5	32.6	Pb	124	133	120
Cu	27.8	28.6	27.3	Cu	22.4	23.1	22.1	Cu	50.1	53.0	48.7
Ni	19.6	32.8	12.7	Ni	29.2	38.7	24.7	Ni	47.8	69.8	37.4
Co	2.09	2.70	1.77	Co	2.41	2.91	2.17	Co	4.32	5.39	3.82
Mo	3.75	3.63	3.82	Mo	2.89	2.79	2.93	Mo	6.50	6.43	6.54
Cd	4.62	5.18	4.33	Cd	3.28	2.75	3.53	Cd	7.66	7.73	7.63

* Note that N=29 for fine and N0=28 for coarse and PM10. ** The unit of PM is $\mu\text{g m}^{-3}$, while all the rest are ng m^{-3} .

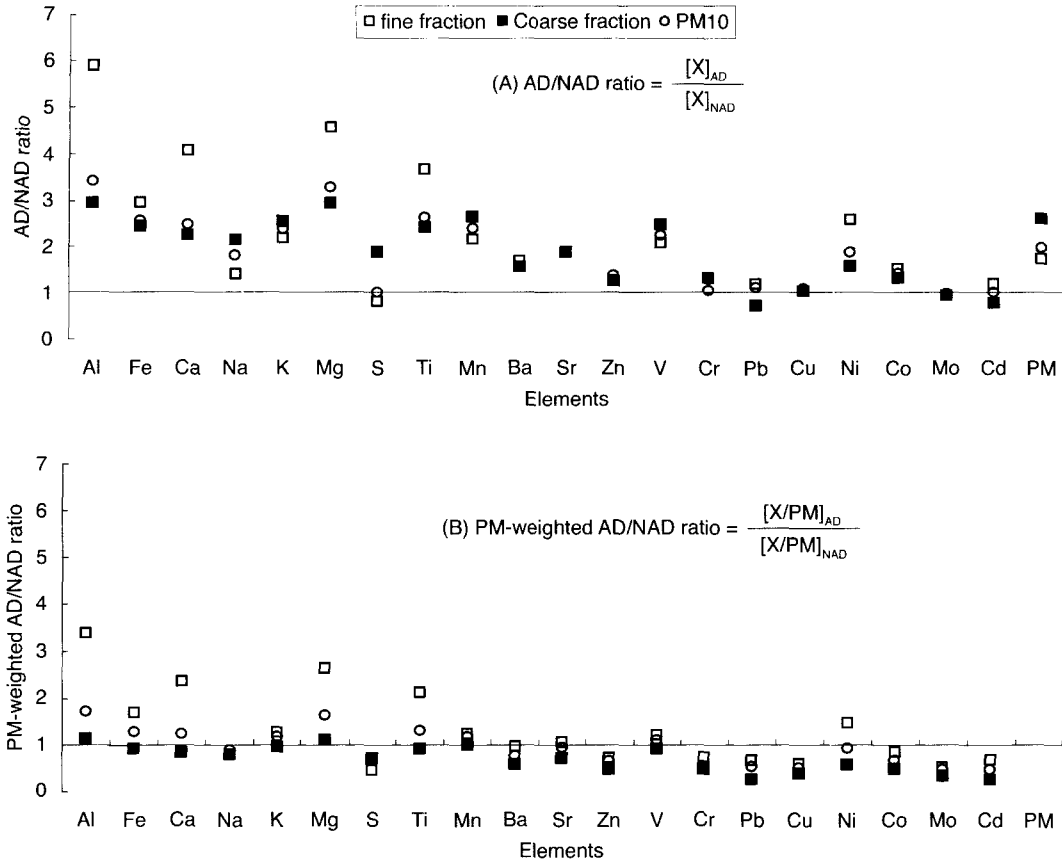


Fig. 1. Computation of the concentration ratios between Asian Dust and Non-Asian Dust period. Comparison is made for fine, coarse, and PM10 fractions. Concentrations are compared: (A) directly using the values represently both AD and NAD periods; and (B) after normalization using the PM concentrations for each period.

은 황사 발현시 그 농도가 급증하는 경향을 보이는 점을 감안하면, 이들 성분들이 황사의 영향에 가장 민감한 것으로 사료된다. 이민희 등(1993), 최성우와 송형도(1999)의 선행연구에서도 황사와 비황사기간을 비교한 결과, 이와 유사한 금속성분의 분포특성을 확인한 바 있다.

황사시 분진의 유입량이 과다하게 증가하는데 따른 영향을 배제하고, 단순히 금속농도의 변화를 파악하기 위해 다음과 같이 추가적인 분석을 시도하였다. 이를 위해, 분진 채취시 결정된 PM 농도를 이용하여 금속성분의 농도를 1차적으로 표준화(normalization)시킨 다음, AD/NAD의 농도비를 비교하였다(그림 1b). 그 결과 앞서 단순히 AD/NAD

의 농도비를 비교한 경우보다 토양기원의 비값이 상대적으로 더 감소하였다. 본 연구결과에 따르면, 인위적인 오염원에 의해 발생하는 유해성분들은 대체로 그 비가 1보다 낮게 나타나, 황사의 발생이 이들의 상대적 농도를 오히려 감소시키는 방향으로 작용하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 미세/조대 입경별 농도비를 이용한 황사대 비황사의 비교

PM2.5는 이보다 입경이 큰 PM10보다 상대적 표면적이 크기 때문에 체내의 폐포에 용이하게 침착할 수 있다(Simpson, 1992). 따라서 인체에 상대적으로 더 큰 악영향을 미칠 수 있는 잠재성을 내재

하고 있다. 이런 점을 감안할 때, 입경 영역별 중금속 성분들의 분포비율을 파악하는 것은 중금속 성분의 분포특성을 규명하는데 중요한 의미를 지닐

Table 2. A comparison of fine-to-coarse (F/C) ratio of PMs and their elemental components.*

Parameters	All data (N=28)	Asian Dust (N=9)	Non-Asian Dust (19)
PM	1.13±0.59 (1.14) ¹ 0.25~3.00 ²	0.78±0.33 (0.75) 0.26~1.24	1.30±0.62 (1.32) 0.25~3.00
Al	0.29±0.16 (0.24) 0.07~0.73	0.41±0.17 (0.43) 0.20~0.73	0.23±0.12 (0.17) 0.07~0.48
Fe	0.43±0.11 (0.42) 0.27~0.75	0.46±0.14 (0.42) 0.30~0.75	0.42±0.09 (0.41) 0.27~0.59
Ca	0.25±0.10 (0.23) 0.13~0.56	0.32±0.12 (0.33) 0.18~0.56	0.21±0.06 (0.21) 0.13~0.35
Na	0.98±0.70 (0.72) 0.30~3.38	0.77±0.39 (0.57) 0.30~1.28	1.08±0.80 (0.76) 0.39~3.38
K	0.77±0.48 (0.73) 0.06~2.54	0.72±0.26 (0.73) 0.28~1.20	0.79±0.56 (0.73) 0.06~2.54
Mg	0.31±0.14 (0.28) 0.14~0.68	0.39±0.15 (0.40) 0.17~0.68	0.28±0.12 (0.26) 0.14~0.68
S	10.6±20.7 (4.74) 1.18~108	3.33±1.59 (3.24) 1.18~6.20	14.1±24.6 (4.90) 2.01~108
Ti	0.30±0.10 (0.27) 0.15~0.54	0.36±0.10 (0.35) 0.23~0.54	0.27±0.09 (0.25) 0.15~0.46
Mn	0.72±0.29 (0.67) 0.41~1.83	0.60±0.11 (0.60) 0.41~0.75	0.78±0.33 (0.74) 0.42~1.83
Ba	0.61±0.44 (0.50) 0.15~2.40	0.54±0.14 (0.52) 0.31~0.73	0.65±0.53 (0.46) 0.15~2.40
Sr	1.25±1.89 (0.89) 0.00~10.0	0.90±0.56 (0.90) 0.39~2.21	1.42±2.29 (0.77) 0.00~10.0
Zn	1.70±1.94 (1.17) 0.14~8.72	2.30±2.83 (1.22) 0.14~8.72	1.34±1.10 (1.13) 0.22~3.53
V	0.97±0.87 (0.66) 0.27~3.92	0.63±0.12 (0.63) 0.47~0.81	1.14±1.02 (0.68) 0.27~3.92
Cr	2.35±2.66 (1.09) 0.10~10.2	2.62±3.40 (1.00) 0.29~10.2	2.20±2.27 (1.42) 0.10~8.50
Pb	5.83±11.0 (2.60) 0.67~55.1	10.6±18.1 (4.37) 1.37~55.1	3.59±4.71 (2.49) 0.67~20.6
Cu	1.32±1.11 (1.07) 0.35~6.37	1.38±0.56 (1.55) 0.59~2.17	1.30±1.31 (1.05) 0.35~6.37
Ni	2.61±10.1 (0.52) 0.05~54.2	0.96±0.73 (0.69) 0.29~2.26	3.39±12.3 (0.52) 0.05~54.2
Co	2.05±4.10 (0.58) 0.14~19.3	3.48±6.30 (0.67) 0.14~19.3	1.13±1.29 (0.56) 0.18~4.68
Mo	3.29±6.14 (0.89) 0.25~23.5	4.42±7.57 (0.86) 0.58~23.5	2.65±5.34 (0.91) 0.25~21.7
Cd	2.12±2.58 (1.16) 0.16~11.7	2.31±2.29 (1.22) 0.72~7.00	2.03±5.76 (1.01) 0.16~11.7

*For the computation of ratio, the concentrations of coarse and fine fraction were used by the concentration difference between the two fractions (PM10-PM2.5) and the concentration of PM2.5, respectively. Superscripts ① and ② denote "Mean±SD (Median)" and "Range", respectively.

것이다. 이러한 비교목적을 달성하기 위해, 미세/조대입자 영역의 농도비 (Fine-to-Coarse (F/C) ratio)를 계산하였다. 입경영역별 개별성분의 평균농도에 대비한 F/C 분율비를 비교해 보면 (표 2), 미세입자 영역에서 고농도를 보이는 Zn, Cr, Pb, Ni 등의 분율비는 각각 1.70, 2.35, 5.83, 2.61로 나타나 (상대적으로 인위적 오염원의 영향에 민감한) 유해성 중금속들이 높은 F/C비를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향의 결과는 국내의 수원지역에서 실시한 PM3.3/TSP (이태정과 김동술, 1992)이나 대구지역의 PM10/TSP (최성우와 송형도, 1999), 또는 Greece와 같은 국외 지역의 PM3을 기준으로 구분 (Manoli *et al.*, 2002)하여 제시한 선행연구들에서 확인한 결과와도 일치하는 것으로 확인되었다. 즉, 이는 국내·외의 도심권 환경에 산재한 여러 유형의 인위적 오염원의 영향을 반영하는 결과로 해석할 수 있다. 또한 전체 관측기간을 황사, 비황사기간으로 구분하였을 경우에도 (일부 성분들에서 다소 정도의 차이는 있었지만) 대부분의 성분들이 전체 자료와 유사하게 나타났다. 황사의 유입기간에 그 분율비가 상승하는 성분으로 Zn, Cr, Pb, Co, Mo, Cd을 들 수 있다. 그 중에서도 Pb의 경우, 이러한 차이가 대단히 뚜렷하였다. 특히 발암성 유해성분인 Cr, Cd 등의 경우는 황사, 비황사기간의 구분없이 미세입자 내에 높게 관측되어, 이들 성분들의 잠재적 유해성에 대해 환기할 필요가 클 것으로 사료된다. 이에 반해 물리적 반응이나 기계적인 작용에 민감하게 반응하여, 지각성분의 주요 구성원으로 분류되는 Al, Fe, K, Mg 등은 일반적으로 예상할 수 있는 것과 같이 기간의 구분없이 분율비가 1보다 작게 나타났다 (이태정 등, 1992).

황사의 유입으로 각 입경영역별 분진농도의 절대량이 증가한다는 점을 감안하여, 황사의 발생에 따른 분진입경별 농도변화를 상세시킨 조건에서 F/C 분율비를 비교하는 것도 중요한 의미를 지닐 수 있다. 단순 분율비의 비교에서는 다수의 유해한 금속 성분들의 분율비가 1을 초과하였던 것에 비해, 표준화된 분율비의 비교에서는 상대적으로 이들의 비값이 감소하여, 분진의 질량농도가 이들의 관계에도 상당히 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 기타 지각기원의 성분들은 두 가지 산출방법에서 황사와 비황사기간의 구분없이 일정 수준을 유지하였다. 즉 이러한 결과는 황사의 발생으로 인해 분진의

과다유입 및 영역별 유입량의 차별화가 일어나고, 이는 다시 다수 유해한 중금속 성분들의 상대적 분율비를 희석하는 효과를 보이는 것으로 나타났다.

3.3 황사와 연관된 공간적인 금속 농도분포의 비교

2001년 황사 발생기간 동안 중금속 성분들에 대한 한반도 내부의 공간적인 농도분포 양상을 파악하기 위해, 본 연구와 유사한 방식으로 ‘분진/금속’에 대한 분석이 수행된 여타 연구자료와의 비교분석을 실시하였다. 이를 위해 ACE-ASIA의 Web DB (<http://saga.pmel.noaa.gov/aceasia>)에 등재된 (한반도 남서부의 광주지역에서 광주과학기술원의 주관으로 관측된) 미세먼지의 농도자료를 활용하였다(표 3a). 즉 이와 같은 비교분석을 통해, 두 관측지점의 농도 분포에 황사의 영향이 어느 정도, 그리고 어떤 형태로 반영되는가를 상대적인 관점에서 평가해 보고자 하였다. 전체 기간 동안 양 지역에서 관측한 중금속 성분들의 평균농도에 대한 상호비교를 시도한 결과, 주요 지각성분들의 경우 비교대상지역인 광주에서 높은 농도를 보였다(S 성분의 경우, 광주지역에서 연구대상지역보다 대략 1.7배의 고농도를 보였다.) 반면에 인위적 기원의 성분들은 연구대상지역에서 상대적으로 고농도를 보였다. 결과적으로 금속 성분들의 종류에 따라 농도분포가 양분되는 특징을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 황사, 비황사기간으로 구분한 결과에서도 거의 유사하게 나타났다. 이러한 차이는 연구지역의 시료 채취가 서울의 도심권에서 수행되었지만, 비교대상지역은 상대적으로 전원환경에 가까운 조건에서 이루어졌다는 차이점을 반영하는 것으로 우선 생각해 볼 수 있을 것이다. 그리고 또 하나 간과할 수 없는 요소는 두 도시간의 산업화 정도의 차이도 금속들간 분포특성을 차별화 하는데 일정 수준 기여하였을 것으로 사료된다. 이에 덧붙여 각 기간별 구분없이 전체 관측자료에서도 금속별 농도분포가 양분화되는 것으로 보아, 두 지역의 국지적 오염원들간에도 상당한 차이가 존재할 가능성을 무시할 수 없을 것이다.

국내 관측점들간의 비교를 벗어나 보다 광역적인 규모로 중금속 성분의 농도분포 양상을 살펴보기 위해, 많은 관측이 규칙적으로 장기간에 걸쳐 이루어진 일본지역의 관측지점들에 대한 비교분석을 추

가적으로 시도해 보았다. 비교대상지점으로 일본 National Air Surveillance Network (NASN)에서 설정한 관측소들 중 대도시에 속하는 5지점(Sapporo, Sendai, Tokyo, Nagoya, Osaka)을 택하였다(Var *et al.*, 2000) 이들 자료는 NASN에서 1974년부터 1996년까지 SPM 내에 포함된 중금속 성분들의 장기간 관측 자료를 토대로 환산한 평균치를 활용하였다. 본 연구에서 관측된 자료가 일본의 관측점들과 같이 장기적 경향성을 대표할 수 없지만, 두 국가간의 농도분포를 대략적으로 진단하는데는 좋은 참고자료로 활용할 수 있을 것이다. 표 3에 제시된 결과를 보면, 모든 비교대상지역에서 해염입자와 같이 해양성 기원의 영향을 반영하는 Na이 연구지역의 비황사기간 평균농도보다 모두 높게 나타나, 일본의 지형적인 특성이 어느 정도 나타난 것으로 사료된다. 그러나 Tokyo의 Na, Zn, Pb 성분, Osaka의 Zn, V, Cr, Pb을 제외하면 본 연구지역 각 성분들의 농도가 자연적·인위적 성분의 구분없이 고농도를 유지하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 일본지역의 입자영역(TSP)에서 발견되는 농도가 연구지역의 PM10 영역보다 높다는 점을 감안한다면, 상대적 오염도는 더 심각한 수준임을 확인할 수 있었다. 또한 황사기간 동안 Hong Kong 내의 두 지점을 택하여 비교분석 한 결과(Fang *et al.*, 1999)에서는 지각기원 성분들은 본 연구대상지역에서 낮게, 인위적 성분들은 높게 나타나는 등 양분적인 경향을 확인할 수 있었다.

3.4 유적선 분석과 중금속의 발생경향에 대한 비교

금속원소성분의 농도변화가 공기계의 이동과 어떠한 연계성을 지니는가를 파악하기 위해, 본 연구기간 동안 최초 공기가 생성되어 장거리 이동에 의해 연구대상지점으로 유입되는 공기계의 이동경향에 대한 분석을 실시하였다. 이와 같은 분석의 결과에 의하면, 다음과 같이 크게 세 가지 유형의 경향성을 확인할 수 있었다(그림 2): (A) 중국의 산둥반도를 거쳐 연구대상지역으로 공기가 유입되는 기간: (B) 일본에서 동해를 거쳐 유입되는 기간: (C) 몽고고원에서 북한을 거쳐 유입되는 기간. 각 유형별 발생빈도는 중국의 산둥반도, 북한, 동해를 거쳐오는 경우가 각각 6, 19, 4일로 나타났다. 이들 세 가지

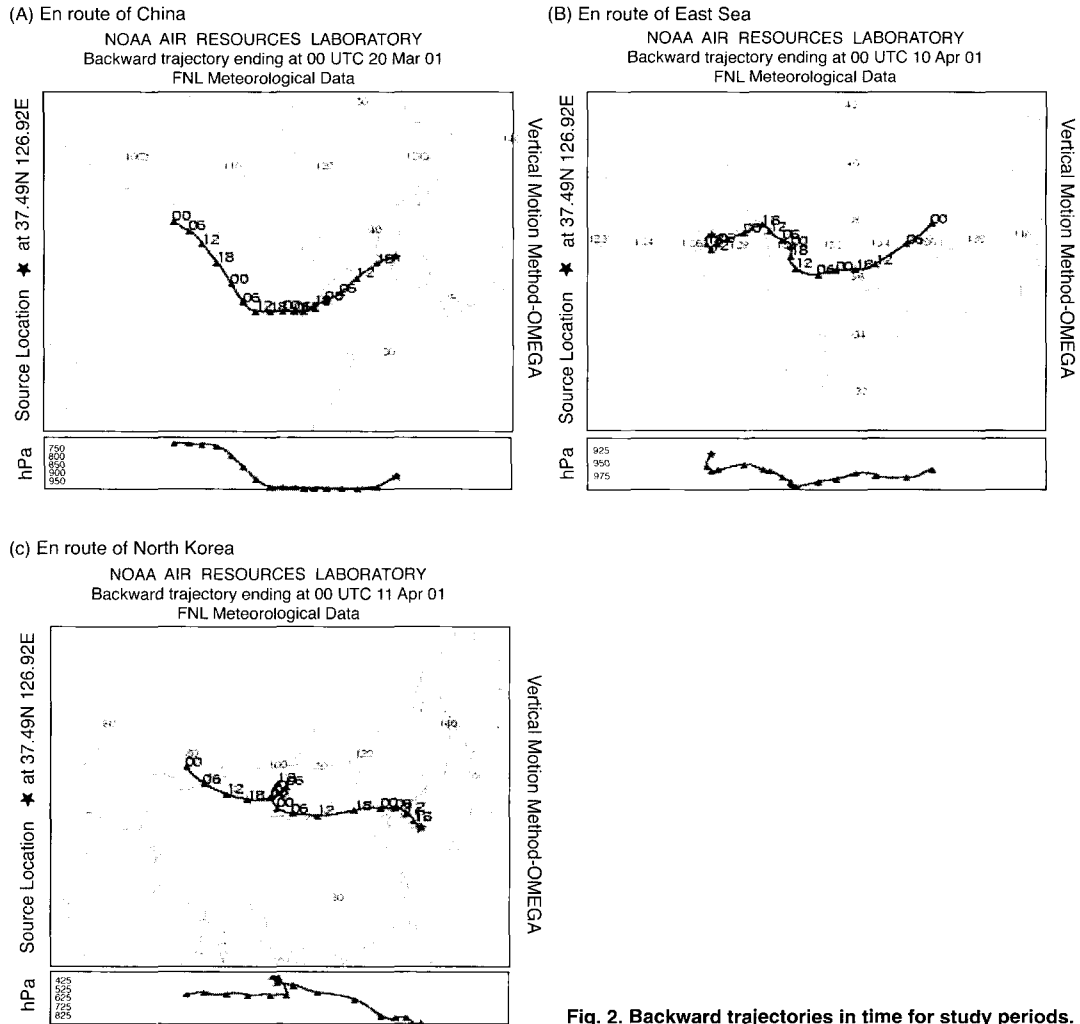


Fig. 2. Backward trajectories in time for study periods.

유형에서 발생빈도가 가장 높은 북한을 거쳐 유입되는 기간을 기준으로 설정하여, 각 기간 동안에 확인된 성분들의 농도분포를 표준화하여 금속성분의 농도분포를 비교하였다. 먼저 미세입자 영역의 경우, 유해 중금속 성분에서는 공기계의 이동경향과 농도분포간에 큰 차이를 보였다. 우선 중국에서 유입되는 경우(Al, Fe, Zn, Cr, Ni 등을 제외한) 대부분의 금속이 가장 높은 농도를 보였다. 그 뿐만 아니라 각 성분의 평균농도와 비교하였을 경우에도 상대적으로 높은 농도를 유지하였다. 그러나 동해안을 거쳐 유입될 경우, 해염입자와 연관된 성분들(Al, Fe, K, Ti)은 대륙을 중단하여 유입되었을 경우보다

고농도를 유지하였다. 반면 오염원들이 인위적 작용에 민감한 성분들(Zn, Cr, Pb, Co, Mo, Cd 등)의 경우는 가장 낮은 농도를 보여 매우 양분적인 경향을 확인할 수 있었다.

조대입자 영역에서는 동해안을 거쳐 유입되었을 경우, 높은 농도치를 보이는 성분들(Mg, Ti, Mn, Sr, V, Pb, Co, Mo, Cd, PM)이 가장 많이 분포한 점이 특징적이었다. 또한 이 기간 성분들의 평균농도는 Na, K, Ba, Zn, Cr을 제외한 대부분의 성분들이 전체 연구기간 동안의 평균농도보다 높은 값을 유지하여 매우 이례적이었다. 즉, 인위적 성분들이 미세입자 영역에서 이 기간에 가장 낮은 농도를 보였던 것에

Table 3. A comparison of concentration for elemental component among fine and coarse particle of different studies.

(a) Parameters	(1) This study (fine particle)			(2) Kwang Ju (fine particle)		
	All	AD	NAD	All	AD	NAD
Al	691	1514	258	777	2300	382
Fe	743	1310	444	681	1538	459
Ca	565	1117	274	525	1467	280
Na	309	381	271	337	490	297
K	435	676	308	545	1192	377
Mg	231	472	103	289	762	166
S	1504	1320	1601	2557	2840	2484
Ti	33.7	64.4	17.6	19.8	64.2	8.23
Mn	39.0	60.1	27.9	68.2	57.1	71.2
Ba	20.8	28.4	16.9	10.3	5.57	11.7
Sr	7.91	11.4	6.09	3.95	10.2	2.26
Zn	163	187	150	90.7	96.6	89.0
V	7.62	11.6	5.55	5.22	8.69	4.33
Cr	13.7	16.2	12.4	5.57	7.31	5.12
Pb	96.4	107	90.9	48.2	52.9	47.8
Cu	27.8	28.6	27.3	9.71	10.1	9.61
Ni	19.6	32.8	12.7	4.44	4.77	4.35
Co	2.09	2.70	1.77	1.18	0.94	1.24
Mo	3.75	3.63	3.82			
Cd	4.62	5.18	4.33	2.54	2.02	2.68

(b) Study area	This study (PM10)			(1) Japan (TSP)					(2) Hong Kong (TSP)	
	All	AD	NAD	Sapporo	Sendai	Tokyo	Nagoya	Osaka	HKUST	Lantau
Al	2490	4790	1400	908	626	429	440	555		
Fe	2321	3960	1544	625	514	677	418	941	5183	7585
Ca	2336	3916	1587	672	570	469	329	542	2759	4236
Na	699	999	556	729	704	637	622	921		
K	1038	1712	720							
Mg	806	1523	466							
S	1867	1874	1864						4292	6020
Ti	130	223	85.6	53.3	42.5	40.2	34.2	51.7		
Mn	94.2	156	65.1	16.8	18.6	40.1	26.4	50.7		
Ba	58.4	77.6	49.3							
Sr	17.8	26.2	13.7							
Zn	302	372	270	149	182	299	196	328		
V	17.6	28.3	12.6	5.19	4.00	8.90	9.59	14.3	16.2	18.2
Cr	18.8	19.5	18.5	2.61	3.63	6.09	5.85	43.7		
Pb	124	133	120	43.9	39.2	125	71.5	174	81.5	110
Cu	50.1	53.0	48.7	20.9	11.4	30.2	15.5	20.9	48.0	28.1
Ni	47.8	69.8	37.4	3.81	2.84	5.63	5.58	8.70	6.7	10.9
Co	4.32	5.39	3.82						1.6	2.3
Mo	6.50	6.43	6.54							
Cd	7.66	7.73	7.63						2.3	3.0

*References: (1) Figen *et al.* (2000); (2) Fang *et al.* (1999).

반해, 조대입자 영역에서는 상대적으로 고농도를 보였다. PM10 영역에서는 중국을 통해 유입되었을 경우, 높은 농도를 보이는 성분들이 다수 분포하였다. 이와 같이 고농도의 발생은 해염성분과, 인위적으로

발생되는 유해성분들(Ba, Sr, Cr, Pb, Cu, Mo, Cd)이 고르게 분포하여 이 기간의 공기계의 이동경향을 어느 정도 반영하는 것으로 보인다. 그리고 또 한가지 유추할 수 있는 사실은 입자영역의 크기가 커질

수륙 각 공기체를 대표하는 기간의 농도차이 폭이 가장 민감하게 보이는 것으로 사료된다. 적어지고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 미세입자 영역에서 각 공기체의 유입에 따른 오염원의 영향을 과거 황사가 발현과 연계된 중금속 성분들의 장거리 이동에 관한 연구결과를 살펴보면, Ma *et al.*

Table 4. VARIMAX rotated factor loading matrix for element parameters among of fine and coarse particle of studying area.

Variables	(1) AD				(2) NAD				(3) All			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Al	0.932								0.879			
Fe	0.959					0.784			0.923			
Ca	0.934					0.873			0.915			
Na												
K	0.779					0.897			0.806			
Mg	0.937					0.825			0.931			
S			0.797			0.795				0.596	0.477	
Ti	0.915					0.733			0.886			
Mn	0.977					0.878			0.956			
Ba	0.807					0.607		0.521	0.818			
Sr	0.685								0.765			
Zn				0.724		0.602		0.613				0.615
V	0.980					0.800			0.965			
Cr		0.654					0.796					
Pb		0.547				0.901				0.828		
Cu			0.761			0.599		0.464		0.571	0.468	
Ni	0.885						0.542		0.597	0.900		
Co		0.729				0.582	0.702					
Mo		0.940				0.765				0.838		
Cd		0.964					0.586			0.676		
% variance	48.9	19.8	16.6	5.93	47.3	18.0	9.42	7.07	49.6	19.2	10.9	5.94
Eigenvalue	9.78	3.96	3.33	1.19	9.45	3.60	1.89	1.41	9.92	3.83	2.17	1.19

Variables	(1) AD				(2) NAD				(3) All			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Al	0.965					0.731			0.969			
Fe	0.981				0.804				0.985			
Ca	0.987				0.710	0.575			0.969			
Na	0.734					0.675			0.734			
K	0.934					0.805			0.877			
Mg	0.949				0.790				0.957			
S	0.715					0.509		0.629	0.637			
Ti	0.768				0.809				0.947			
Mn	0.842				0.936				0.966			
Ba			0.800		0.684				0.624			
Sr	0.808				0.507				0.793			
Zn			0.890				0.626				0.699	
V	0.856				0.897				0.944			
Cr			0.793		0.703						0.600	
Pb				0.767	0.663							0.593
Cu												0.569
Ni					0.764							
Co		0.910			0.749					0.820		
Mo		0.859			0.721					0.905		
Cd		0.883			0.768					0.863		
% variance	44.2	23.3	13.1	7.98	45.3	20.9	8.60	6.74	48.6	20.6	8.22	6.86
Eigenvalue	8.84	4.65	2.62	1.60	9.06	4.18	1.72	1.35	9.73	4.12	1.64	1.37

(2001)이 1999년 조대입자 영역의 S 성분이 비황사 기간에 비해 대략 5배 이상 부화 정도가 높게 나타나고, Ca, Si, Al 성분들도 조대입자 주 구성인자란 점을 확인시켜준 바 있다. 이와 같은 경향은 Fang *et al.* (1999)이 1996년 Hong Kong에서 관측한 황사의 장거리 이동에 관한 분석결과와도 유사하다. 부가적으로 Zn 성분은 황사시에도 그 농도가 비황사기간의 농도보다 차이를 나타내지 않아, 이 성분은 황사의 이동과는 무관하게 국지적인 오염원의 영향을 받고 있음을 시사한다. 또한 Chun *et al.* (2001)이 1998년에 Mongolia에서 기원한 황사현상이 관측되었을 경우, 1 μm 의 입자는 비황사기간에, 상대적으로 1~10 μm 의 입자에서는 황사기간에 과부화되는 양분적인 경향의 가능성을 발표한 바 있다. 즉 미세입자의 경우는 인위적인 작용에 쉽게 종속되는 반면, 조대입자는 중국의 사막지대로부터 직접적인 이동에 종속되는 분진과 강한 연계성을 띠고 있다고 유추할 수 있다. 즉 이들 연구결과를 장거리 이동과 연계하여 보면, 황사현상은 중국 사막지대 자체에서 발생하는 조대입자 및 이들과 직접적으로 결합된 지각기원의 성분들이(황사의 영향권 내에 있는) 중국의 주변국가들에 과부화되는 현상을 부추기는 것으로 사료된다.

3.5 요인분석을 이용한 황사/비황사의 배출원 특성 비교

연구대상지역의 중금속 성분들에 대한 분포특성이 주로 어떤 배출원과 연계되어 있는가의 여부를 파악하기 위한 한 가지 방법으로 각 입자영역별 전체, 황사, 비황사기간으로 구분하여 통계처리 프로그램인 SPSS를 이용하여 요인분석(factor analysis)을 수행하였다. 우선 황사기간 동안의 자료에 국한하여 분석결과(표 4)를 정리하면 다음과 같다. 우선 미세입자 영역에서는 지각기원에 의한 토양의 재비산과 같은 자연적 요인과 함께 V, Ni을 통해 기름연료의 연소에 의한 요인이 중요한 것으로 나타났다. 제2요인으로는 자동차에 의한 영향(Co, Mo, Cd)이 반영되었으며, 제3요인은 연구대상지역에 소규모의 형태로 군집된 제련소의 영향이 S, Ni 성분들에 의해 반영되는 것으로 나타났다. 또한 Zn 성분이 독립적인 요인으로 부각되는 것도 특징적이었다. 조대입자 영역의 경우, 제1요인은 지각기원에 의한 토양의 영

향, 제2요인으로는 자동차와 같은 교통수단인 것으로 확인되었다. 그리고 도로와 공사현장에서 발생하는 먼지의 재비산이 제3요인으로 확인되었다.

비황사기간만을 추출하여 분석한 결과는, 미세입자 영역에서 지각기원과, Zn, V, Pb, Mo 등과 같이 자동차에 의한 영향을 반영하는 인자들이 제1요인으로, 기름연료의 연소에 의한 영향(Cr, Ni, Co, Cd)이 제2요인으로 확인되었다. 조대입자 영역은 미세입자 영역의 제1요인이 나타났으며, 제2요인으로는 지각의 토양성분의 영향이 재부각 되었다.

각 기간별로 구분하여 제시한 요인분석 결과, 황사기간과 전체 기간의 요인결과가 모든 입자영역에서 유사한 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 연구지역에 황사에 의한 영향이 일정 수준 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 미세입자와 PM10 영역에서 기름연료의 연소와 같은 인위적 오염원(거주지역)의 영향도 동시에 작용하는 것으로 보아, 국지적 오염원도 연구지역에 일정 수준 이상으로 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 서울시 북동부에 소재한 세종대학교를 중심으로 2001년 황사가 발생한 전후 기간을 중심으로 부유분진 및 중금속 성분들의 분포양상을 비교분석 하였다. 우선 황사/비황사기간의 농도비를 비교한 결과, Al, Fe를 위시한 주원소성분들이 중금속성분들에 비해 훨씬 높은 농도비를 보였다. 이러한 결과를 보면, 황사시 지각성분의 유입률이 유해한 중금속류보다 훨씬 두드러졌음을 알 수 있었다. 각 성분의 fine/coarse비를 비교한 결과, Pb를 중심으로 대부분의 중금속이 미세입자 영역에서 높은 농도분포양상을 확인할 수 있었다. 그렇지만 황사시 PM의 유입량을 감안할 경우, 미세입자의 중금속 함량이 심각하게 높은 수준은 아니었다. 각 공기계의 이동경향에 따른 금속성분의 상대적 분포특성을 비교해 보면, 공기계가 동해나 북한지역을 거쳐오는 것보다는 중국방면으로부터 유입될 때 미세입자와 PM10 영역에서 다수의 성분들이 더 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 금속성분의 농도분포를 체계적으로 설명하기 위해서는 이들의 농도분

포를 공기계의 유입특성과 연계하여 분석하는 것이 중요한 것으로 보인다. 이들 분석결과에 의하면 유해한 금속성분들의 상대적 함량이(황사에 의해 분진 자체의 농도가 증가한다는 점을 감안할 경우) 특별히 과다한 수준에 도달하지는 않았다. 그렇지만 중국의 급진적인 공업화가 지속적으로 진행되고 있으므로, 이러한 환경오염 현상을 해결하기 위한 철저한 준비가 요구되고 있다.

즉, 중국 동해안에 밀집되어 있는 공업단지 자체에서 배출되는 오염물질들의 목록과 양에 대한 지속적인 분석이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 세계적 선도과학자 연구과제의 지원으로 이루어졌습니다. 광주지역의 금속자료를 비교활용하도록 해주신 김영준 교수님 및 광주과학기술원 관계자 분들에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

김기현, 최규훈, 강창희 (2002) 2001년 봄철 서울시 북동부 지점에서 관측한 중금속성분의 농도분포, 한국지구과학회지, 23(6), 514-525.

김종석, 안승구 (1992) 중금속의 위해성 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 269-276.

이민희, 한의정, 원양수 (1986) 황사현상이 우리나라에 미치는 영향, 한국대기보전학회지, 2(3), 34-44.

이태정, 김동술 (1992) X-선 형광분광법을 이용한 대기부유분진중 중금속의 농도분포에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(1), 20-28.

이혜분, 김동술, 이진홍 (1996) PM-10내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가. 한국대기보전학회지, 12(5), 555-566.

정성욱, 전병일, 이봉현, 박종길, 문덕환, 김민수, 박홍재 (1996) 경남 김해지역의 동계 대기 중 중금속 분포와 특성. 한국환경과학회지, 5(4), 453-462.

최성우, 송형도 (1999) 대구지역 겨울철 황사기간 중 중금속농도의 변이특성, 환경과학논집, 4(1), 1-13.

Artaxo, P., P. Oyola, and R. Martinez (1999) Aerosol composition and source apportionment in Santiago de

Chile, Nuclear Instruments and Method Physics Research, B150, 409-416.

Balachandran, S., B.R. Meena, and P.S. Khillare (2000) Particle size distribution and its elemental composition in the ambient air of Delhi, Environment International, 26, 49-54.

Bilos, C., J.C. Colombo, C.N. Skorupka, and M.J. Rodriguez Presa (2001) Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina, Environmental Pollution, 111, 149-158.

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.

David, M.T., J.F. Robert, and L.W. Douglas (2001) April 1998 Asian dust event: A southern California perspective, Journal of Geophysical Research, 106 (D16), 18371-18379.

EPA (1997) *Guidance for network design and optimum site exposure for PM2.5 and PM10*, 454/R-99-022.

Fang, G.-C., C.-N. Chang, Y.-S. Wu, S.-C. Lu, P. P.-C. Fu, S.-C. Chang, C.-D. Cheng, and W.-H. Yuen (2002) Concentration of atmospheric particulates during a dust storm period in central Taiwan, Tainchung, The Science of the Total Environment, 287, 141-145.

Fang, M., M. Zheng, F. Wang, K.S. Chim, and S.C. Kot (1999) The long-range transport of aerosols from northern China to Hong Kong—a multi-technique study, Atmospheric Environment, 33, 1803-1817.

Gao, Y. and J.R. Anderson (2001) Characteristics of Chinese aerosols determined by individual-particle analysis, Journal of Geophysical Research, 106(D16), 18037-18045.

Joussaaume, S. (1990) Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, Journal of Geophysical Research, 5 (D2), 1909-1941.

Kai, K., Y. Okada, O. Uchino, 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.

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.W., Y.J. Kim, and S.J. Oh (2001) Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 5157–5167.
- Lin, T.-H. (2001) Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: observed evidence and simulation, *Atmospheric Environment*, 35, 5873–5882.
- Ma, C.J., M. Kasahara, R. Holler, and T. Kamiya (2001) Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period, *Atmospheric Environment*, 35, 2707–2714.
- Manoli, E., D. Voutsas, and C. Samara (2002) Chemical characterization and source identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece, *Atmospheric Environment* 36, 949–961.
- 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.
- Simpton, R.W. (1992) A statistical analysis of particulate data sets in Brisbane, Australia *Atmospheric Environmental*, 26B(1), 99–105.
- Solomon, P., E. Cowling, G. Hidy, and C. Furiness (2000) Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe, *Atmospheric Environment*, 34, 1885–1920.
- Turner, B.R. and D.B. Smith (1997) A playa deposit of pre-Yellow Sands age (upper Rotliegend/Weissliegend) in the Permian of northeast England, *Sedimentary Geology*, 114, 305–319.
- Var, F., Y. Narita, and S. Tanaka (2000) The concentration, trend and seasonal variation of metals in the atmosphere in 16 Japanese cities shown by the results of National Air Surveillance Network (NASN) from 1974 to 1996, *Atmospheric Environment*, 34, 2755–2770.
- Xiao, Y.Z. (1998) A core project of the international geosphere-biosphere programme, 6–10.
- Zhang, D. (1995) Paleoclimate and environmental records available from Chinese historical documents. In: Mikami, T., Matsumoto, E., Ohata, S., Sweda, T. (Eds), *Paleoclimate and Environmental Variability in Austral-Asian Transect during the Past 2000 years*. Nagoya University, Japan, 20–26.
- 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.