

DRUM impactor를 이용한 대기 입자상 물질 중 원소성분의 입경분포 특성 : 제주도 고산지역의 2002년 봄철 (3.29 ~ 5.30) 측정 연구

Size Distributions of Trace Elements in Airborn Particulates Collected using Drum impactor at Gosan, Jeju Island : Measurements in Springtime 2002

한진석 · 문광주* · 류성윤¹⁾ · 안준영 · 공부주 · 홍유덕 · 김영준¹⁾
인천시 서구 경서동 종합환경연구단지 내 국립환경연구원 대기화학과, ¹⁾광주과학기술원
(2003년 9월 9일 접수, 2004년 8월 2일 채택)

J.S. Han, K.J. Moon*, S.Y. Ryu¹⁾, J.Y. Ahn, B.J. Kong, Y.D. Hong and Y.J. Kim¹⁾
Dept. of Atmospheric Chemistry, National Institute of Environmental Research,
¹⁾ADEMRC, Kwangju Institute of Science and Technology

(Received 9 September 2003, accepted 2 August 2004)

Abstract

Size-segregated measurements of aerosol composition using 8-stage DRUM impactor are used to determine the transport of natural and anthropogenic aerosols at Gosan site from 29 March to 30 May in 2002. Separation of ambient aerosols by DRUM impactor offers many advantages over other standard filtration techniques. Some of the most important advantages are the ability to segregate into details by particle size, to better preserve chemical integrity since the air stream doesn't pass through the deposit, to collect samples as a function of time, and to have a wide variety of impaction surfaces available to match analytical needs.

Although the transport of Yellow sand is a well-known phenomenon in springtime, the result of measurement shows that not only soil dust but also anthropogenic aerosols, including sulfur, enriched trace metals such as Pb, Ni, Zn, Cu, Cr, As, Se, Br, are transported to Gosan in springtime. This study combines the size- and time-resolved aerosol composition measurements with isentropic, backward air-mass trajectories in order to identify some potential source regions of anthropogenic aerosols. As a result, during the NYS period, the average concentration of PM₁₀ was 46 µg/m³, Si, Al, S, Fe, Cl, K, Ca were higher than 1,000 ng/m³ and Ti was about 100 ng/m³. The concentrations of Zn, Mn, Cu, Pb, Br, Rb, V, Cr, Ni, As, Se ranged between 1 and 70 ng/m³. More than 50% of typical soil elements, such as Al, Si, Fe, Ca, Ti, Cr, Cu, Br, were distributed in a coarse particle range (5.0 ~ 12 µm). In other hand, anthropogenic pollutants, such as S, N, Vi, were mainly distributed in a fine particle range (0.09 ~ 0.56 µm). During the YS period, PM₁₀ increased about 8 times than NYS period, and main soil

* Corresponding author
Tel : +82 - (0)32-560-7358, E-mail : iamian@hanmail.net

elements, such as Al, Si, S, K, V, Mn, Fe also doubled in coarse particle range (1.15 ~ 12 µm). But Zn, As, Pb, Cu and Se, which distributed in the fine aerosols (0.09 ~ 0.56 µm), were on the same level with or decreased than NYS period. Finally, except the YS period, coarse particles (2.5 ~ 12 µm) are inferred to be influenced by soil, coal combustion, waste incineration, ferrous and nonferrous sources through similar pathways with Yellow Sand. But fine particles have different sources, such as coal combustion, gasoline vehicle, biomass burning, oil or coal combustion, nonferrous and ferrous metal sources, which are transported from China, Korea peninsula and local sources.

Key word : DRUM impactor, Size distribution, Trace element

1. 서 론

아시아는 자연적 혹은 인위적으로 발생한 입자상 물질의 주요 발생원이고, 우리나라는 동북아시아의 편서풍지대 중심에 위치하고 있으므로, 오염물질의 장거리 이동의 영향에 대한 연구가 필요하다. 이때 입자의 입경분포와 그 조성은 지역규모의 대기오염 물질의 장거리 이동 정도와 영향을 결정하는 중요한 인자이다(김용표, 1999). 특히 입자상 물질 내 원소 성분들의 입경분포는 이러한 입자상 물질들이 외부 지역으로부터 이동되었을 가능성을 밝히는데 좋은 자료를 제공한다. 예를 들면, 다양한 화학성분들은 장거리 이동되어 온 입자 내에서는 매우 유사한 입경분포를 가지는 것으로 알려져 있다(Han *et al.*, 2003; Hillamo *et al.*, 1993). 우리나라에서는 일부 도심지역 및 제주도 고산에서 다단 임팩터를 사용한 입자의 입경분포와 그 조성을 측정할 예가 있으나(김용표, 1999; 이종훈 등, 1995) 주로 질량농도 및 수용성 이온성분에 대해 48시간 혹은 72시간 간격으로 비연속적인 측정을 수행하였다. 원소 성분의 입경분포에 대한 연구 예(최규훈 등, 2003)도 있지만, 이 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀ 측정을 통한 대략적인 입경분포 파악에 머물렀고, 그 결과 입자영역의 크기가 작아질수록 공기계의 유입에 따른 오염원의 영향을 민감하게 보이는 것으로 나타나, 입자상 물질의 구체적인 오염원 추정을 위해서는 보다 세분화된 입경분포가 측정되어야 할 필요가 있다(Han *et al.*, 2003).

본 연구에서 사용된 DRUM (Davis Rotating Unit for Monitoring) impactor의 경우 이와 같은 기존의 입자상 물질 채취방법에 비해 많은 장점들을 가지고

있다. 그 중 가장 중요한 장점들로는 입자의 크기를 보다 세분화시켰다는 점과, 유입공기가 채취된 입자를 지속적으로 통과하면서 발생할 수 있는 화학적 변화를 방지할 수 있고, 짧은 시간 간격으로 연속측정이 가능하며, 필요에 따라 다양한 기질을 사용하여 입자상 물질의 질량뿐 아니라, 이온성분, 원소성분 등 여러 성분들에 대한 분석을 수행할 수 있다는 점이다(Cahill and Wakabayashi, 1993). 따라서 본 연구에서는 입자상 물질 내 원소성분의 입경분포를 자세히 파악하여 이에 대한 오염원을 추정하기 위해, 8-stage DRUM impactor를 사용하여, 총 19종의 원소에 대해 3시간 간격 연속 측정을 실시하였다. 측정은 한반도 지역의 배경 농도와 동북아시아 지역에서의 대기오염물질의 이동을 연구하는데 좋은 조건을 갖추고 있는 고산 측정소에서 이루어졌다(김용표, 1996b). 2002년 3월 말부터 5월 말까지 고산에서 대기 중 입자상 물질 내 원소성분들의 연속적인 입경분포 측정결과를 바탕으로, 1)황사(Yellow Sand, YS)와 비황사시(Non-Yellow Sand, NYS) 각 원소성분들의 입경별 농도수준을 파악하고, 2)비황사시의 원소성분간의 상관관계를 검토하며, 3)원소성분들의 입경별 시계열과 역학적 분석을 통해 인위적 오염성분들의 유입가능성을 살펴보고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 시료 채취 지점

제주도는 한반도 남해 연안에서 약 100 km 정도 남쪽에 위치하고, 섬 전체 면적의 55.3%가 주거지를 비롯한 농경지 및 과수원으로 이용되고 있고, 그 외

에 대부분이 목장 및 관광지, 유흥지, 산림 및 목야지로 이용 및 보호되고 있어 인위적 배출원이 거의 없는 청정지역이다(최만식 등, 1999). 이 지역은 우리나라에서도 가장 오염이 적은 지역에 해당하면서 중국, 한국, 일본의 경계지역에 위치하여 대기오염물질의 장거리이동 연구에 적합하다. 본 연구를 위한 시료 포집은 2002년 3월 29일부터 5월 30일까지 제주도의 서쪽 끝에 위치한 고산에서 실시되었다.

2. 2 시료 채취 및 분석 방법

입경별 원소성분의 측정을 위해 8-Stage DRUM Impactor를 사용하여 대기 중 입자상 물질을 3시간 간격으로 연속 채취하였다. 이때 DRUM impactor의 각 단별 절단입경은 0.09, 0.26, 0.34, 0.56, 0.75, 1.15, 2.5, 5.0, 12 μm 이다. 본 연구에서 사용된 장비는 Cahill *et al.* (1985)에 의해 기술된 초기 DRUM 장비와는 달리 원형 오리피스가 아닌 슬릿형 분사구를 가지며 공기유량이 5 L/min에서 10 L/min으로 증가된 형태를 사용하였다. 가동되는 동안, 입자상 물질들은 3시간에 약 1 mm씩 이동하는 회전하는 원통에 썬워진 아피존 그리스(Apiezon grease)로 코팅된 필름막 위에 포집되고, 그 결과 3시간 간격의 분석 자료를 얻을 수 있다(Reid *et al.*, 2003). 포집된 필름은 California Davis 대학의 DELTA 그룹에서 SXRF (Synchrotron X-ray fluorescence)를 사용하여 분석되었다. S-XRF 테이터는 4~18 kV 에너지를 가지는 백광을 사용하여 Lawrence Berkeley National Laboratory에서 ALS (Advanced Light Source) Line 10.3.1으로 분석하였다(Graham *et al.*, 2002). DRUM 필터의 S-XRF를 이용한 분석방법은 기존의 연구들(Reid *et al.*, 1994)에서와 같고, 요약하면 다음과 같다. 필름에 포집된 시료는 주사면적이 $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ 인 빔으로 스캔되고, X-ray는 시료로부터 5 cm 떨어진 위치에서 Si (Li) X-ray detector에서 검출된다. 빔은 시료의 각 지점에서 약 30초간 주사된 뒤 다음 지점으로 이동하여 연속적으로 분석이 이루어진다. 이와 같은 운전조건하에서 전이금속성분들에 대해 대략 0.1 ng/m^3 의 감도를 나타낸다. 원자번호가 10 이상인 원소성분들에 대한 분석결과의 정리는 이미 잘 알려져 있는 국제적인 XRF 코드인 AXIL을 사용하여 오프라인에서 수행되었다. Na부터 Cu까지의 원소성분에 대한 농도가 측정되었으나, Na와 같은 가벼운 원소들의

Table 1. XRF analysis conditions*

X-rays tube : Voltage	: 4~18 kV
Detection : Detector	: Si (Li) x-ray detector
	Analysis line : L 10.3.1 (Advanced Light Source)
	Sensitivity : ~0.1 ng/m ³

* : Analyzed by Delta Group in Univ. of California Davis

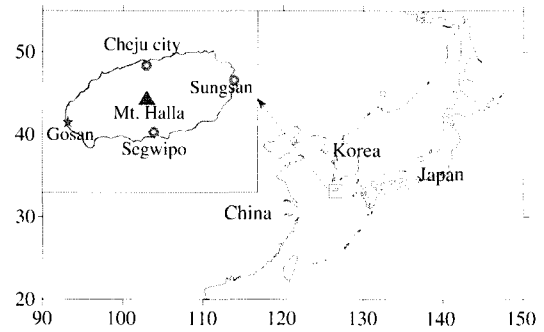


Fig. 1. Location of Gosan sampling site.

경우 낮은 X-ray 에너지를 방출하므로, 간섭에 의한 측정오차가 매우 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 측정오차가 큰 가벼운 원소성분들을 제외한 S, Si, Al, Fe, Ca, Cl, Cu, Zn, Ti, K, Mn, Pb, Ni, V, Se, As, Rb, Cr, Br의 19종의 원소를 분석 대상으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 측정기간 중 기상과 대기오염도

측정기간 중 고산 기상대에서 측정된 이 지역의 대기오염도와 풍향, 풍속, 기온, 상대습도, 강우와 같은 기상자료는 그림 2와 같았다. 풍향은 주로 남동 및 남서풍이 우세하였으며, 평균 풍속은 6.53 m/s였다. 4월 20일과 5월 3일, 7일에는 비교적 많은 강우가 있었던 것으로 나타났고, 측정기간 동안의 평균 기온은 15.0°C로 측정초기에 비해 점차 올라가는 추세에 있고, 평균 상대습도는 78.92%로 비교적 잦은 강우의 영향을 받아 높게 나타났다. 그리고 기상청 목측자료에 의하면, 4월 8일부터 10일까지와 4월 17일 경에 제주도에서 황사(YS)가 관측되었다. 황사시 PM_{10} 평균농도는 $378 \mu\text{g/m}^3$ 으로 비황사시의 46

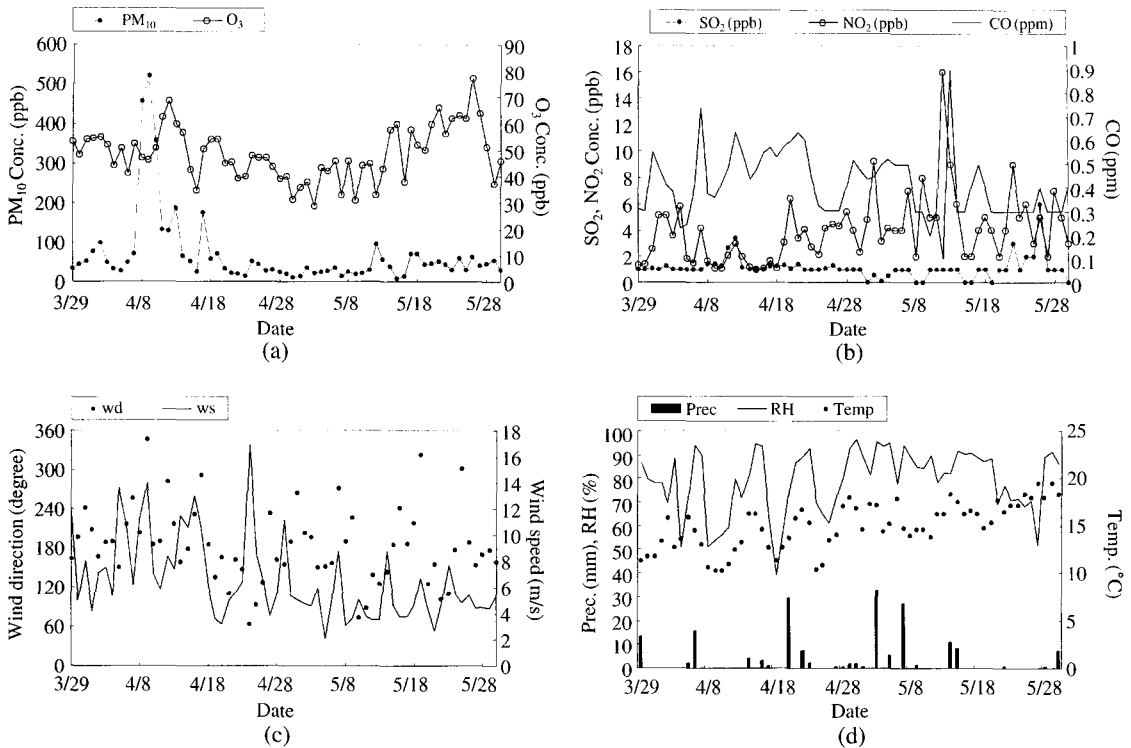


Fig. 2. Air quality and meteorological characteristics measured by Gosan observatory at Gosan in Jeju during the measurement period (a) PM₁₀, (b) SO₂, CO, O₃, (c) Wind speed, Wind.

μg/m³보다 8.2배 증가하였고, 이 시기의 풍향은 주로 북서풍으로 최대 풍속이 12 m/s 정도로 매우 빠르게 나타났다. SO₂와 CO, O₃의 경우 각각 1.32 ppb, 0.43 ppm, 48.57 ppb로 비황사기간에 비해 1.19, 1.04, 1.00 배로 비슷한 수준을 유지한 반면, NO₂의 경우 1.34 ppb로 오히려 황사기간에 0.32배로 크게 감소한 것으로 나타났다. 비황사 기간(NYS) 중 4월 2일과 5월 12일 경에는 NO₂와 O₃의 농도가 증가하여 이 시기에 광화학 반응이 활발히 일어났음을 알 수 있고, 4월 12일과 5월 26일 경에는 PM₁₀을 비롯한 모든 오염성분의 뚜렷한 증가가 나타나, 이 시기에 외부로부터 오염물질이 유입된 것으로 보인다.

3. 2 비황사 기간의 입경별 농도분포

측정기간 총 63일 중 황사가 발생한 기간은 기상청이 제시한 총 4일(4/8~4/10, 4/17)이고, 황사기간을 제외한 비황사 기간동안 각 원소성분의 입경별 농도는 표 2와 같았다. 비황사기간의 경우 Si가 2,768

ng/m³, Al 2,487 ng/m³, S 2,148 ng/m³, Fe 1,727 ng/m³, Cl 1,547 ng/m³, K 1,125 ng/m³, Ca 1,113 ng/m³로 모두 1,000 ng/m³ 이상 수준이었고, 이외에 원소성분들은 Ti는 약 100 ng/m³, Zn, Mn, Cu, Pb, Br, Rb, V, Cr, Ni, As, Se 들은 1~70 ng/m³ 수준으로 나타났다. 이때 Al, Si, Fe, Ca, Ti, Cr, Cu, Br과 같은 토양 성분들은 1단에 전체 농도의 50% 이상 분포하는 것으로 나타났고, K, Mn, Zn, As, Rb 성분들도 조대영역인 1단~3단에 전체 농도의 60% 이상 분포하였다. S, Br, Pb의 전체 농도 중 30% 정도가 4단에 분포하였고, S와 V, Ni의 경우, 미세입자 영역인 6단과 8단에 20% 전후의 농도 분포를 나타냈다. 이로부터 조대입자 보다는 미세입자가 인위적 오염성분들의 영향을 더 많이 받는 것을 알 수 있다.

3. 3 황사 기간의 입경별 농도분포

황사기간 동안에는 표 3에 나타나 있듯이 Si가 11,815 ng/m³로 10,000 ng/m³ 수준으로 가장 높았고,

Table 2. Size-segregated average concentrations of trace elements during NYS period. (ng/m³)

Stage	Al	Si	Fe	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr
1	1452 ± 1753 (58.4%)	2768 ± 2957 (54.9%)	881 ± 654 (51.0%)	267 ± 192 (12.4%)	979 ± 768 (63.3%)	414 ± 345 (36.8%)	599 ± 564 (53.8%)	131 ± 76.0 (53.4%)	1.90 ± 1.60 (30.5%)	2.38 ± 1.60 (50.3%)
2	418 ± 336 (16.8%)	891 ± 646 (17.7%)	391 ± 342 (22.7%)	98 ± 49 (4.6%)	359 ± 285 (23.2%)	187 ± 141 (16.6%)	249 ± 223 (22.3%)	52.8 ± 35.0 (21.6%)	0.91 ± 0.83 (14.5%)	0.90 ± 0.68 (19.0%)
3	403 ± 484 (16.2%)	830 ± 886 (16.5%)	317 ± 404 (18.4%)	297 ± 264 (13.8%)	187 ± 207 (12.1%)	219 ± 208 (19.5%)	193 ± 218 (17.4%)	40.8 ± 43.1 (16.7%)	0.91 ± 0.89 (14.5%)	0.87 ± 1.35 (18.4%)
4	129 ± 198 (5.2%)	289 ± 394 (5.7%)	91 ± 138 (5.3%)	641 ± 688 (29.9%)	9.9 ± 10.8 (0.6%)	153 ± 150 (13.6%)	45.2 ± 67.1 (4.1%)	12.1 ± 16.1 (5.0%)	0.62 ± 0.49 (9.9%)	0.30 ± 0.31 (6.4%)
5	46 ± 74 (1.9%)	98 ± 145 (1.9%)	27 ± 42 (1.6%)	161 ± 116 (7.5%)	3.1 ± 3.0 (0.2%)	49.5 ± 38.9 (4.4%)	16.5 ± 25.0 (1.5%)	4.1 ± 5.4 (1.6%)	0.17 ± 0.12 (2.7%)	0.13 ± 0.14 (2.7%)
6	25 ± 52 (1.0%)	64 ± 121 (1.3%)	12 ± 28 (0.7%)	537 ± 554 (25.0%)	4.9 ± 5.4 (0.3%)	76.4 ± 103 (6.8%)	6.1 ± 14.4 (0.5%)	1.9 ± 3.1 (0.8%)	1.12 ± 1.22 (17.9%)	0.06 ± 0.10 (1.3%)
7	8 ± 19 (0.3%)	20 ± 38 (0.4%)	5 ± 10 (0.3%)	62 ± 42 (2.9%)	1.4 ± 1.2 (0.1%)	16.2 ± 18.1 (1.4%)	3.0 ± 6.3 (0.3%)	1.0 ± 1.3 (0.4%)	0.13 ± 0.13 (2.1%)	0.02 ± 0.04 (0.5%)
8	5 ± 6 (0.2%)	80 ± 74 (1.6%)	2 ± 4 (0.1%)	85 ± 40 (4.0%)	1.4 ± 1.6 (0.1%)	9.0 ± 8.0 (0.8%)	1.3 ± 2.1 (0.1%)	1.1 ± 0.5 (0.5%)	0.50 ± 0.28 (8.0%)	0.07 ± 0.17 (1.4%)
Total	2487 (5.38%)*	5039 (10.9%)*	1727 (3.74%)*	2148 (4.65%)*	1546.6 (3.35%)*	1124.5 (2.43%)*	1113.3 (2.41%)*	244.2 (0.53%)*	6.25 (0.01%)*	4.72 (0.01%)*

Stage	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Br	Rb	Pb
1	16.1 ± 13.1 (42.3%)	1.03 ± 0.73 (26.4%)	32.1 ± 137.5 (84.9%)	30.0 ± 78.7 (42.5%)	1.04 ± 1.47 (27.9%)	0.15 ± 0.161 (13.4%)	11.2 ± 13.2 (68.4%)	3.27 ± 4.75 (32.8%)	9.63 ± 11.4 (30.1%)
2	7.98 ± 7.58 (21.0%)	0.42 ± 0.29 (10.7%)	0.97 ± 0.68 (2.6%)	4.64 ± 2.64 (6.6%)	0.55 ± 0.66 (14.7%)	0.11 ± 0.14 (10.1%)	1.25 ± 1.29 (7.6%)	2.07 ± 3.42 (20.7%)	2.42 ± 1.98 (7.6%)
3	8.29 ± 12.6 (21.8%)	0.51 ± 0.37 (13.1%)	1.16 ± 1.04 (3.1%)	13.6 ± 14.6 (19.2%)	0.69 ± 0.77 (18.5%)	0.23 ± 0.22 (20.2%)	0.93 ± 1.15 (5.7%)	2.63 ± 5.83 (26.4%)	5.98 ± 5.57 (18.7%)
4	3.49 ± 4.47 (9.2%)	0.31 ± 0.21 (7.9%)	1.10 ± 0.93 (2.9%)	13.3 ± 12.4 (18.8%)	0.65 ± 0.54 (17.4%)	0.31 ± 0.29 (27.4%)	1.26 ± 0.86 (7.7%)	1.02 ± 1.47 (10.2%)	10.0 ± 12.4 (31.3%)
5	0.91 ± 1.11 (2.4%)	0.15 ± 0.14 (3.9%)	0.28 ± 0.22 (0.7%)	2.59 ± 1.68 (3.7%)	0.20 ± 0.13 (5.3%)	0.07 ± 0.04 (6.4%)	0.22 ± 0.10 (1.3%)*	0.37 ± 0.37 (3.7%)	1.50 ± 1.75 (4.7%)
6	0.91 ± 2.15 (2.4%)	0.46 ± 0.49 (11.6%)	0.45 ± 0.70 (1.2%)	4.12 ± 8.41 (5.8%)	0.39 ± 0.65 (10.5%)	0.17 ± 0.23 (15.2%)	1.10 ± 1.92 (6.7%)	0.26 ± 0.40 (2.6%)	2.13 ± 5.16 (6.7%)
7	0.23 ± 0.36 (0.6%)	0.15 ± 0.16 (3.9%)	0.20 ± 0.17 (0.5%)	0.91 ± 0.48 (1.3%)	0.10 ± 0.06 (2.6%)	0.04 ± 0.02 (3.6%)	0.18 ± 0.11 (1.1%)	0.19 ± 0.11 (1.9%)	0.21 ± 0.32 (0.6%)
8	0.11 ± 0.14 (0.3%)	0.89 ± 2.16 (22.6%)	1.54 ± 3.32 (4.1%)	1.51 ± 1.79 (2.1%)	0.12 ± 0.06 (3.1%)	0.04 ± 0.02 (3.7%)	0.21 ± 0.10 (1.3%)	0.18 ± 0.03 (1.8%)	0.13 ± 0.15 (0.4%)
Total	38.02 (0.08%)*	3.92 (0.01%)*	37.77 (0.08%)*	70.67 (0.15%)*	3.73 (0.01%)*	1.12 (0.00%)*	16.34 (0.04%)*	9.97 (0.02%)*	32.01 (0.07%)*

1: 5.0~12 μm, 2: 2.5~5.0 μm, 3: 1.15~2.5 μm, 4: 0.75~1.15 μm, 5: 0.56~0.75 μm, 6: 0.34~0.56 μm, 7: 0.26~0.34 μm, 8: 0.09~0.26 μm
 () : percentile of concentration of each stage to total concentration (*) : contribution of each elements to PM₁₀ mass concentration

Al 6,334 ng/m³, S 4,487 ng/m³, Fe 3,595 ng/m³, K 2,340 ng/m³, Ca 2,168 ng/m³로 약 1,000 ng/m³ 이상 수준, Ti는 약 100 ng/m³ 수준, Mn, Pb, Zn, Rb, Br, V, Cu, As, Cr, Ni, Se은 2~100 ng/m³ 수준으로 높게 나타났다. 이 값은 비황사기간에 비해, Al, Si, S, K, V, Mn, Fe 성분들은 2배 이상 높은 농도이다. 이때 Al, Si, Fe, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Rb, Cl 성분들은 주로 1단과 3단의 조대영역에 전체 농도의 50% 이상 분포한 반

면, S와 Zn, As, Pb, Cu, Se은 미세입자인 4단과 6단에서 최대 농도를 나타내었다. 이로부터 이 두 원소군은 서로 다른 오염원의 영향을 받았을 것으로 사료되며, 이 중 전자의 경우 주로 토양성분으로 이 시기에 있었던 황사의 영향을 받아 조대영역에서의 농도가 높게 나타난 것으로 보인다. 이때 V, Ni, Br의 경우에는 1단과 6단에 50% 이상 존재하여, 조대입자 영역에서는 황사의 영향을 받고, 미세입자 영역에서

Table 3. Size-segregated average concentrations of trace elements during YS period. (ng/m³)

Stage	Al	Si	Fe	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr
1	3487±2040 (55.1%)	6164±3453 (52.2%)	1431±624 (39.8%)	237±113 (5.3%)	930±211 (71.5%)	706±312 (30.2%)	862±238 (39.7%)	181±76.8 (41.6%)	3.61±1.67 (27.9%)	2.77±1.45 (38.3%)
2	532±165 (8.4%)	1069±295 (9.1%)	436±121 (12.1%)	48±26 (1.1%)	152±93.9 (11.7%)	204±52.9 (8.7%)	242±57.8 (11.2%)	54.6±14.5 (12.5%)	1.12±0.31 (8.6%)	0.83±0.25 (11.5%)
3	1099±674.2 (17.3%)	105±1261 (17.8%)	1021±588 (28.4%)	558±408 (12.4%)	178±68.1 (13.7%)	526±307 (22.5%)	712±559 (32.8%)	111±63.0 (25.6%)	2.12±1.25 (16.4%)	1.89±1.11 (26.2%)
4	635±524 (10.0%)	1262±1005 (10.7%)	391±299 (10.9%)	1225±871 (27.3%)	9.6±4.9 (0.7%)	408±299 (17.4%)	182±135 (8.4%)	49.2±35.5 (11.3%)	1.39±0.81 (10.7%)	0.76±0.54 (10.5%)
5	317±276 (5.0%)	613±516 (5.2%)	176±148 (4.9%)	265±213 (5.9%)	4.6±2.9 (0.4%)	162±120 (6.9%)	100±83.4 (4.6%)	22.8±19.1 (5.2%)	0.46±0.29 (3.6%)	0.43±0.27 (6.0%)
6	175±176 (2.8%)	408±395 (3.5%)	87±76 (2.4%)	2001±2040 (44.6%)	22.2±20.2 (1.7%)	275±282 (11.8%)	40.0±32.9 (1.8%)	9.3±7.0 (2.1%)	3.60±3.12 (27.8%)	0.42±0.40 (5.8%)
7	64±63 (1.0%)	130±121 (1.1%)	36±34 (1.0%)	80±45 (1.8%)	2.3±1.0 (0.2%)	39.2±29.1 (1.7%)	21.1±20.5 (1.0%)	4.7±4.0 (1.1%)	0.20±0.09 (1.5%)	0.09±0.09 (1.2%)
8	26±29 (0.4%)	63±57 (0.5%)	16±17 (0.4%)	73±45 (1.6%)	1.5±0.7 (0.1%)	17.9±12.3 (0.8%)	9.4±10.7 (0.4%)	2.6±2.2 (0.6%)	0.46±0.24 (3.5%)	0.03±0.04 (0.5%)
Total	6334 (1.68%)*	11815 (3.13%)*	3595 (0.95%)*	4487 (1.19%)*	1299.8 (0.34%)*	2339.7 (0.62%)*	2168.3 (0.57%)*	435.6 (0.12%)*	12.95 (0.00%)*	7.23 (0.00%)*
ΔYS	+3847.5	+6775.6	+1867.7	+2339.0	-246.81	+1215.2	+1055.0	+191.4	+6.70	+2.51

Stage	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Se	Br	Rb	Pb
1	29.1±13.2 (32.7%)	0.99±0.54 (22.4%)	1.08±0.56 (12.0%)	6.03±1.30 (8.0%)	0.78±10.1 (9.3%)	0.01±0.01 (0.6%)	3.96±1.48 (28.6%)	4.39±2.13 (14.9%)	15.1±11.9 (19.4%)
2	9.50±2.93 (10.7%)	0.34±0.11 (7.7%)	0.61±0.26 (6.8%)	2.14±0.70 (2.8%)	0.53±0.24 (6.3%)	0.13±0.06 (5.6%)	0.40±0.19 (3.0%)	1.65±1.20 (5.6%)	1.62±1.29 (2.1%)
3	24.3±15.0 (27.2%)	0.77±0.47 (17.5%)	1.72±0.86 (19.2%)	13.0±6.01 (17.3%)	2.72±2.21 (32.5%)	0.46±0.34 (19.6%)	1.01±0.47 (7.5%)	14.4±9.77 (48.9%)	9.88±11.3 (12.7%)
4	11.7±8.67 (13.1%)	0.48±0.21 (10.4%)	1.53±0.89 (17.1%)	18.3±9.64 (24.2%)	1.12±1.11 (13.4%)	0.49±0.35 (21.2%)	1.87±0.34 (13.9%)	4.14±3.82 (14.1%)	22.6±32.3 (29.0%)
5	4.66±3.79 (5.2%)	0.27±0.22 (6.0%)	0.68±0.45 (7.5%)	3.65±1.87 (4.8%)	0.79±0.69 (9.4%)	0.14±0.08 (6.2%)	0.33±0.08 (2.5%)	2.36±2.25 (8.0%)	1.99±2.38 (2.6%)
6	8.19±8.30 (9.2%)	1.36±1.19 (30.7%)	2.79±2.73 (31.1%)	29.8±30.2 (39.4%)	2.04±2.01 (24.4%)	1.00±0.98 (43.0%)	5.49±5.00 (40.7%)	1.80±1.87 (6.1%)	25.8±27.5 (33.2%)
7	1.18±1.00 (1.3%)	0.08±0.02 (1.7%)	0.21±0.09 (2.3%)	1.48±0.63 (2.0%)	0.22±0.16 (2.6%)	0.04±0.03 (1.8%)	0.27±0.09 (2.0%)	0.42±0.33 (1.4%)	0.60±0.46 (0.8%)
8	0.56±0.53 (0.6%)	0.16±0.06 (3.7%)	0.35±0.20 (3.9%)	1.19±0.43 (1.6%)	0.17±0.11 (2.0%)	0.04±0.03 (1.9%)	0.27±0.07 (2.0%)	0.24±0.07 (0.8%)	0.34±0.31 (0.4%)
Total	89.18 (0.02%)*	4.42 (0.00%)*	8.97 (0.00%)*	75.61 (0.02%)*	8.36 (0.00%)*	2.32 (0.00%)*	13.50 (0.00%)*	29.37 (0.01%)*	77.89 (0.02%)*
ΔYS	+51.16	+0.50	-28.80	+4.94	+4.62	+1.19	-2.85	+19.40	+45.88

1: 5.0~12µm, 2: 2.5~5.0µm, 3: 1.15~2.5µm, 4: 0.75~1.15µm, 5: 0.56~0.75µm, 6: 0.34~0.56µm, 7: 0.26~0.34µm, 8: 0.09~0.26µm (): percentile of concentration of each stage to total concentration (*): contribution of each elements to PM₁₀ mass concentration ΔYS: difference of concentration between YS and NYS period

는 인위적 오염원의 영향을 받은 것으로 보이며, 이로부터 한 원소성분이라도 입경영역별로 서로 다른 오염원의 영향을 받을 수 있음을 확인할 수 있다.

관측된 중금속 성분들이 황사의 영향에 얼마나 노출되어 있는지를 평가하기 위해 황사기간에 대한 비

황사기간의 성분별 농도비를 계산한 결과 그림 3과 같이 나타났다. 이때 전체 입경영역은 각 원소성분들의 8단에서의 입경분포 경향을 바탕으로, 비교적 다른 분포경향을 나타내어 서로 다른 오염원의 영향을 받았을 것으로 추정되는 초대 영역(2.5~12µm)과

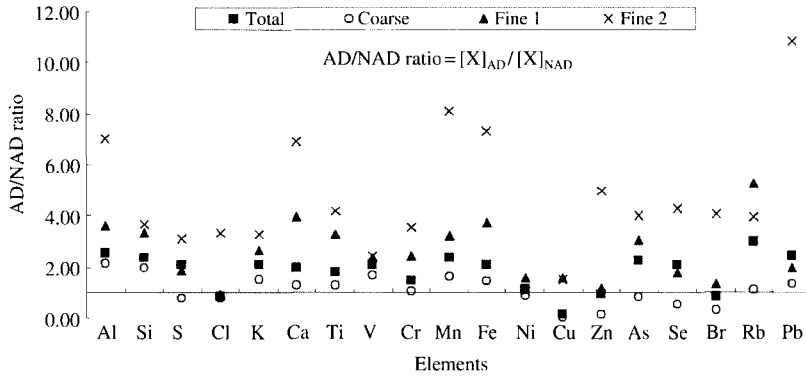


Fig. 3. The concentration ratios between Yellow sand and Non-Yellow sand period.

미세 영역 1 (0.56~2.5 μm), 미세 영역 2 (0.09~0.56 μm)의 세 입경영역으로 나누어 그 차이를 살펴보았다. 그 결과, YS/NYS비가 1을 초과할 경우 황사에 의한 영향이 일정 수준 이상 작용했다고 볼 수 있으므로, 대부분의 토양기원 성분들이 황사의 영향을 받은 것으로 나타난 반면, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br과 같은 인위적 오염성분들은 이 값이 1 미만으로 나타나 오히려 비황사기간에 더 높은 농도를 나타내는 것으로 나타났다(최규훈 등, 2003). 단 이때 황사기간에 각 원소성분들의 농도증가 경향은 미세영역 1 과 미세영역 2에서 평균 2.59, 4.62배로 조대입자 영역에서의 1.11배에 비해 뚜렷하게 나타나는데, 이는 미세입자의 질량 및 원소성분의 절대 농도가 조대입자에 비해 훨씬 작기 때문에 상대적으로 증가비가 크게 나타난 것으로 보인다. 황사시 각 성분들의 절대 농도치의 증가는 표 3에 나타나 있듯이 토양성분인 Al, Si, Fe, K, Ca의 경우 황사에 의해 절대 농도가 1,000 ng/m³ 이상 증가한 반면, 인위적 오염성분으로 추정되는 Cu, Zn, As, Se, Pb의 경우 농도의 변화가 거의 없거나 감소하는 것을 확인할 수 있다.

3. 4 비황사 기간 동안의 원소성분간 상관관계

전체 측정기간 중 비 황사기간에 대해 각 입경영역별 미량원소성분들 간의 상관관계를 계산하여 그림 4에 요약하였다. 이때 채워진 사각형은 양의 상관관계, 속이 빈 사각형은 음의 상관관계를 나타내며, 사각형의 크기는 두 성분간 상관관계의 절대값을 의미한다. 그 결과 세 입경영역에서 원소성분간 상관성

이 다르게 나타난 것을 확인할 수 있다. 우선 조대입자영역 (2.5~12 μm)에서는 Al, Si, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Rb가 높은 상관성을 나타내었고, 이외에도 Cr과 Ni, Cu와 Zn, As와 Se이 개별적으로 상관성이 높게 나타났다. 이때 Al을 포함하는 원소군은 주로 토양 성분들인 반면, Cr과 Ni의 경우 도금 및 합금, 광석 체련과정에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있고, Cu와 Zn, As와 Se는 각각 소각시 배출물질과 석탄 연소 배출원의 지표원소이다(신은상 등, 2002). 이와는 달리 미세입자 영역 1 (0.56~2.5 μm)에서는 Al을 포함한 토양성분들과는 별개로 Ni, Zn, Pb, Cu, As, Se 성분들 사이의 상관성이 높게 나타났다. 이때 Ni, Zn, Cu는 폐기물 소각의 지표원소이고, Pb의 경우 자동차 배출원의 지표원소로 알려져 있다(신은상 등, 2002; 최만식 등, 1999). 마지막으로 미세 영역 2 (0.09~0.56 μm)에서는 토양성분 외에 S, Cl, K, V, As, Se의 상관성이 높게 나타나, 생체연소(S, Cl, K) 및 석탄연소(As, Se) 배출원의 영향을 받았을 것으로 추정된다(신은상 등, 2002; 나덕재 등, 2000). 이와 같이 전체 입경영역에서 공통적으로 토양구성 성분들간의 상관관계수가 높게 나타났으나, 그 외에 영향을 미친 인위적 오염성분들 간의 상관관계는 차이를 나타내, 입경영역에 따라 영향을 미치는 배출원이 서로 다름을 짐작할 수 있다.

3. 5 입경별 원소성분들의 시계열

측정된 원소 성분들의 변화 특성을 살펴보기 위해 조대 영역(Stage 1, 2, 2.5~12 μm), 미세 영역 1(Stage

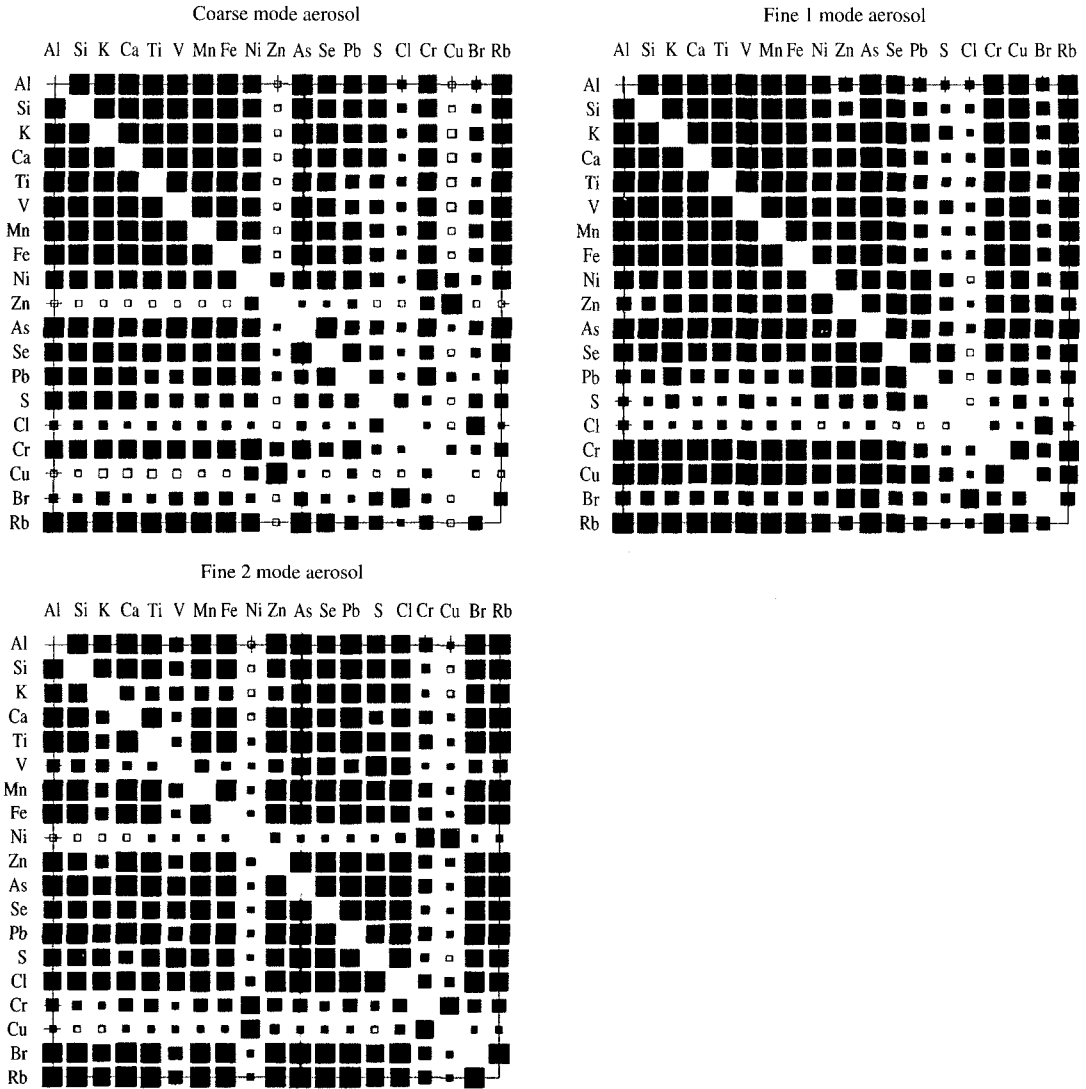


Fig. 4. Correlation matrix for major trace elements in three size ranges; Solid symbols denote a positive correlation and open symbols denote a negative correlation. The size of symbols is proportional to the absolute value of the correlation coefficient.

3, 4, 5, 0.56~2.5 μm), 미세 영역 2 (Stage 6, 7, 8, 0.09~0.56 μm)에 대한 원소성분들의 시계열을 그림 5에 나타내었다.

시계열을 살펴보면 우선 같은 원소성분이라도 입경범위에 따라 서로 다른 거동을 나타내어 서로 다른 배출원의 영향을 받음을 시사하였다. 우선 초대입자 영역에서는 원소간 상관계수 계산결과에서와 같

이, Al과 K, Ni과 Cr, Cu와 Zn, As과 Se의 시계열 형태가 유사하게 나타났다. Al과 K의 경우 황사가 있었던 4월 8일부터 10일까지와, 17일을 제외하고, 4월 1일부터 3일 사이와 4월 13일 경에 최대 피크를 나타내어, 이 시기에 토양성분이 다량 유입되었음을 짐작할 수 있다. 이때 4월 1일부터 3일 사이와 4월 13일 경에는 Ni과 Cr, As과 Se도 높게 나타났으며, 5월

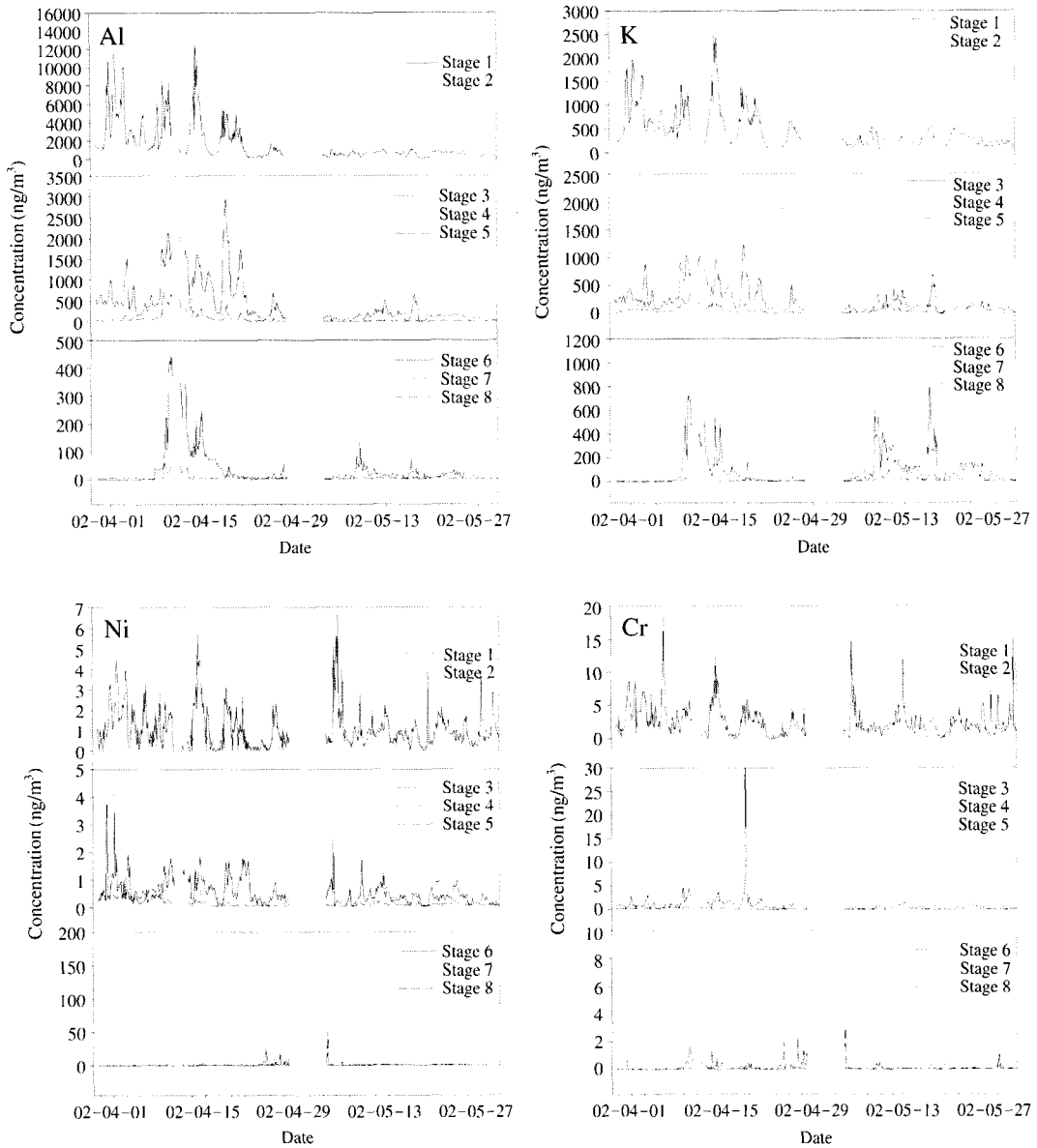


Fig. 5. Size-segregated time series of trace elements ((a) Al, (b) K, (c) S, (d) Pb, (e) Ni, (f) Zn, (g) Cr, (h) Cu, (i) As, (j) Se).

5일 경에는 Ni과 Cr, As과 Se과 함께 Cu와 Zn가 최대 농도를 나타내었다. 5월 12일과 29일 경에는 Ni과 Cr만이 고농도를 나타내었다. 이때 Ni, Cr, As, Se의 경우 4월 28일 이전에는 토양성분인 Al과 유사한 거동을 나타내어, 이 시기에는 토양성분들과 함께 도금 및 광석제련, 폐기물 소각, 석탄연소 배출원과 관

련된 오염물질이 함께 이동된 것으로 보이고, 5월 5일과 12일, 29일 경에는 폐기물 소각, 금속 제련산업에 기인한 인위적 오염물질만이 유입된 것으로 짐작된다. 미세입자영역 1에서는 Al과 K, Ni와 Zn, As과 Se이 0.9 이상의 높은 상관계수와 함께 유사한 시계열을 가졌다. 이때 황사기간을 제외하고, Al과 K는 4

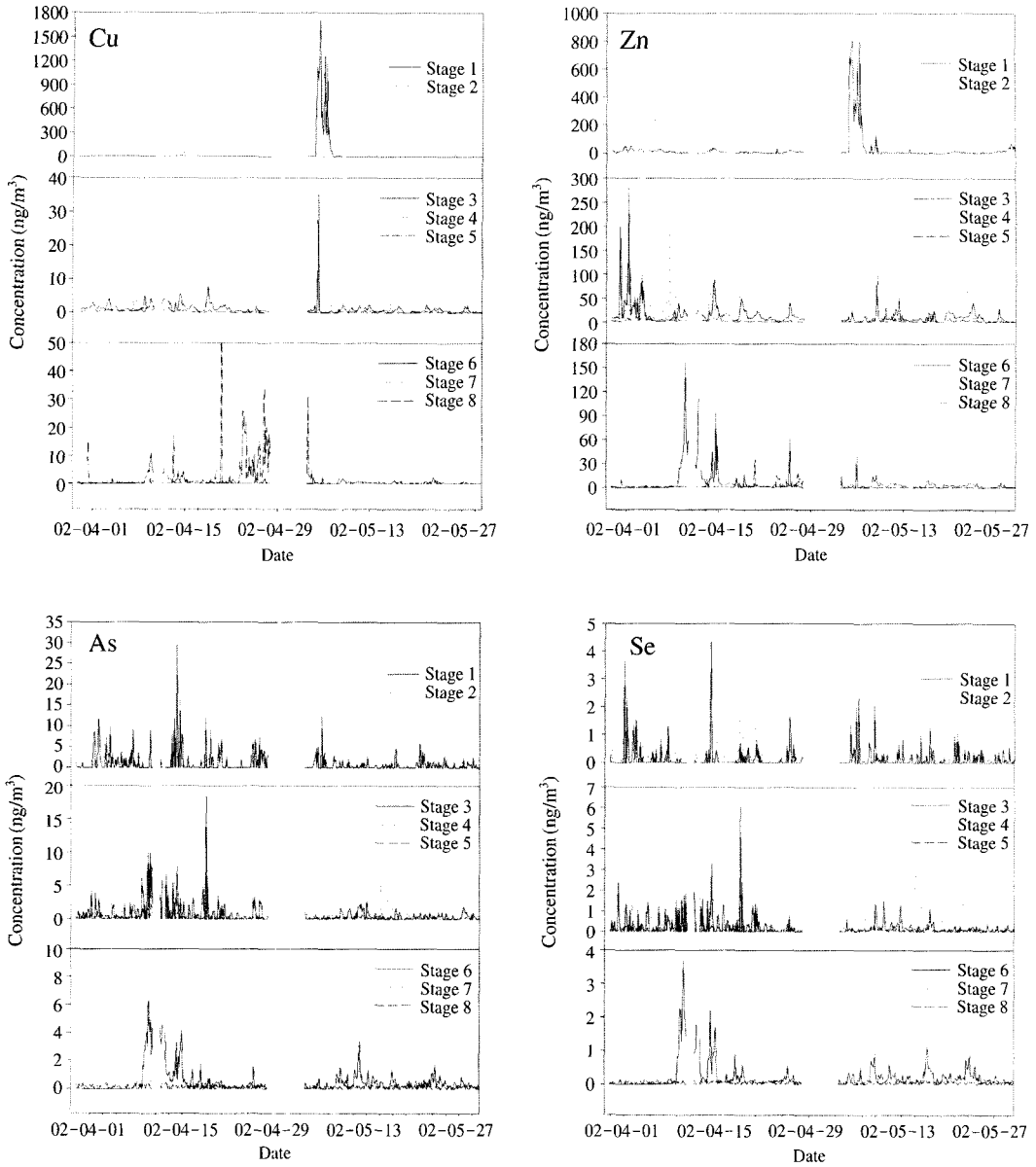


Fig. 5. Continued.

월 3일과 13일, 5월 15일과 17일 경에, Zn와 Ni는 4월 1일, 7일, 13일, 5월 17일, 22일경에 높게 나타났고, As과 Se의 경우, 4월 13일 5월 15일 경에 피크를 나타내었다. 따라서 4월 28일 이전과 5월 15, 17일에는 조대영역에서와 마찬가지로 토양성분과 인위적 오염성분이 함께 이동해 온 반면, 5월 22일 경에는

폐기물 소각 및 자동차 배출원으로부터 인위적 오염 성분들만 이동해 온 것으로 추정된다. 마지막으로 미세입자영역 2에서는 4월 28일 이전에, Ni과 Cu를 제외한 나머지 원소들의 시계열이 유사한 형태를 나타낸 반면, 그 이후에 K는 5월 8일, 17일, 22일 경에, As과 Se는 5월 22일 경에 피크를 나타내어 서로 다

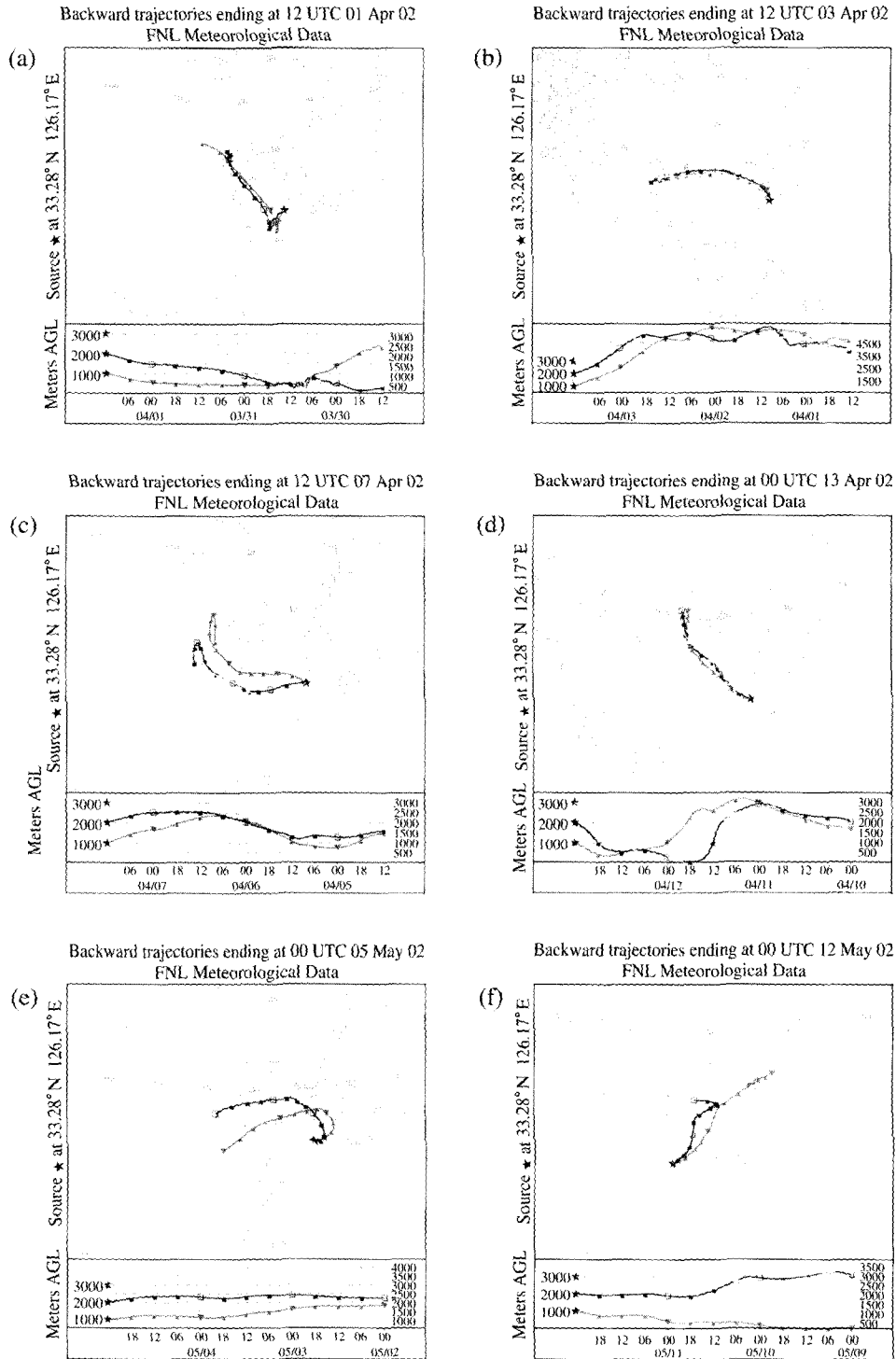


Fig. 6. 3 day isentropic backward trajectories for intensive cases ((a) 1 April, (b) 3 April, (c) 7 April, (d) 13 April, (e) 5 May, (f) 12 May, (g) 15 May, (h) 17 May, (i) 22 May, (j) 29 May 2002)

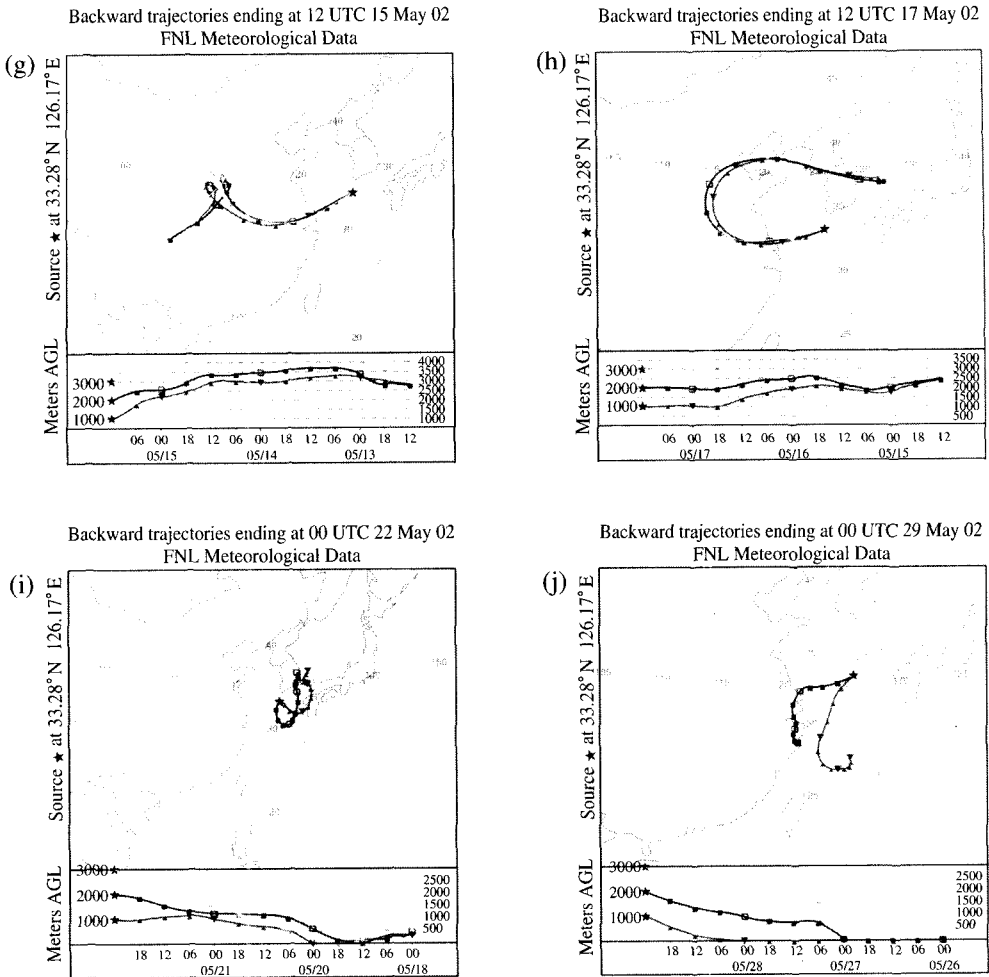


Fig. 6. Continued.

르게 거동하였다. 특히 4월 26일 경에는 Zn와 Ni, As, Se이 피크를 나타내어, 이 시기에 금속 제련 및 석탄연소에 기인한 오염물질이 유입되었을 것으로 추정된다(신은상 등, 2002). 이때 입자 크기가 작을 수록 장거리 이동가능성이 커지므로 측정기간 동안 Biomass burning, 금속 제련, 석탄연소에 기인한 오염 성분들이 황사와 함께, 혹은 개별적으로 장거리 이동되었을 가능성이 있는 것으로 나타났다.

3.6 오염원 유입 사례에 대한 역궤적 분석

오염원의 유입이 예상되는 시기인 2002년 4월 1일, 3일, 7일, 13일과 5월 12일, 15일, 17일, 22일, 29일

에 대해 입자상 물질 이동 경로를 살펴보기 위해 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT 모델을 사용하여 3 일간의 역궤적을 추적하였다. 그 결과 그림 6에서와 같이 대부분의 경우 중국 산둥반도를 포함하는 동부 해안지역과 우리나라 서남해안을 거쳐 공기계가 유입된 것으로 나타났다. 이 중 4월 1일의 경우 우리나라의 풍하측인 일본에서 황사가 관측된 시기이고, 4월 3일과 13일의 역궤적은 비행시간인테도 불구하고 황사시와 유사한 이동경로와 풍속을 나타내었다. 그러나 이 시기의 성분측정결과는 황사시와는 다른 결과를 나타냈다. 우선 황사시간과 유사하게 조대 입자 영역에서 상당량의 토양성분이 존재하였으나,

이와 함께 이러한 토양성분들과는 낮은 상관계수를 가지면서 개별적으로 As과 Se, Al과 K, Ni과 Zn과 같은 몇몇 특정 원소성분간 상관계수가 매우 높게 나타나 토양 외의 인위적 오염원에 기인한 다양한 오염성분들이 함께 존재하는 것으로 나타났다. 특히 이 경우, Fe/Al 농도비가 조대영역에서 0.48, 미세영역 1에서 0.79, 미세영역 2에서 0.56으로, 중국 황토에서의 Fe/Al 비인 0.6(신은상, 2002)과 비슷한 값을 나타내어, 황토성분의 유입 가능성을 확인할 수 있으나, 이 경우 Br/Pb의 비가 미세입자영역 2에서 0.37로 일반적인 자동차 배출원에서의 0.2~0.4사이 값(신은상, 2002)을 나타내어, 인위적 오염성분도 상당부분 포함하고 있는 것으로 나타났다. 반면 5월 5일과 12일, 29일의 역계적은 산둥반도와 한반도 남서해안, 한반도 남동해안, 중국 동부해안에서 공기체가 유입된 것으로 나타났으나, 측정결과에서는 단지 조대영역에서만 Cu와 Zn, 또는 Ni과 Cr 같은 특정 오염성분들이 크게 증가하는 것으로 나타나, 이 시기에는 원거리 지역으로부터의 오염물 유입이 발생한 것이 아니라, 폐기물의 소각이나 유류 연료의 연소와 같은 지역오염원에 의해 영향을 받았을 것으로 추정된다. 이때 이 시기의 Fe/Al 비가 조대영역에서 1.08, 미세영역 1에서 0.88로, 제주지역 토양성분의 Fe/Al 비인 1.08과 현무암에서의 Fe/Al 비 0.88과 동일한 값을 나타내어 추정결과를 뒷받침한다(최만식, 1999). 그 밖에 4월 7일과 5월 15일, 17일, 22일에 대한 역계적 분석결과, 중국 동부해안을 거쳐 공기체가 유입되는 경우, 주로 미세입자영역 1에서 As나 Se, Ni, Zn, Pb와 같은 석탄연소나 철 및 비철금속 관련산업 배출원과 관련된 오염성분의 증가가 관찰된 반면, 한반도 남동 해안을 거쳐 이동하는 경우에는 풍속에 따라 조대 또는 미세입자 영역 1에서 주로 철 및 비철금속 관련산업에 기인하는 오염성분인 Ni, Pb, Zn 등이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 미세입자영역 2에서 생체연소 시 발생하는 주요 오염성분인 K, S, Cl도 유입되는 것으로 나타났는데, 이는 농사가 시작되는 봄철의 계절적 특성에 의한 것으로 생각된다.

3. 결 론

제주도 고산에서의 원소성분의 입경분포 특성을 살펴보기 위해 2002년 3월 29일부터 5월 30일까지

DRUM sampler를 이용한 입경별 원소성분의 연속 측정을 수행하였다. 그 결과 원소성분의 측정기간 평균농도는 황사시에는 Si가 10,000 ng/m³ 수준으로 가장 높았고, Al, S, Fe, K, Ca, Cl은 약 1,000 ng/m³, Ti는 약 100 ng/m³ 수준, Mn, Pb, Zn, Rb, Br, V, Cu, As, Cr, Ni, Se은 2~100 ng/m³ 수준으로 나타났다. 이때 Si, Al, Fe, Cl, K, Ca, Cu, Ti, Cr, Mn, Rb는 주로 5.0~12 μm과 1.15~2.5 μm에서 높은 농도를 나타낸 반면, S, Zn, Se, As, Pb는 0.75~1.15 μm과 0.34~0.56 μm에서 농도가 높았다. 이때 V, Ni, Br은 5.0~12 μm과 0.34~0.56 μm에서 높은 농도를 나타내어, 앞의 두 원소군들의 중간적인 성격을 가진 것으로 나타났다. 이외는 달리 비황사시에는 Si, Al, S, Fe, Cl, K, Ca 모두 1,000 ng/m³ 수준이었고, Ti는 약 100 ng/m³, 나머지 원소들은 1~70 ng/m³ 수준으로 황사기간에 비해 토양 성분들의 양이 크게 감소한 것으로 나타났다. 관측된 원소성분들이 황사의 영향을 받는 정도를 평가하기 위해 황사기간에 대한 비황사기간의 성분별 농도비를 계산한 결과, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br과 같은 인위적 오염성분들의 경우, 1 미만으로 나타나 오히려 비황사기간에 더 높은 농도를 나타내는 것으로 나타났다.

비황사기간 중 입경별로 유사한 거동을 하는 미량 원소 성분들의 그룹을 찾아 영향을 미치는 오염원을 추정하기 위해 원소성분간 상관관계를 살펴본 결과, 각 입경영역에 따라 인위적 오염성분들 간의 상관관계가 다르게 나타나, 입경별로 영향을 미치는 배출원이 서로 다른 것으로 추정되었다. 또한 각 원소성분의 시계열에서 입경범위에 따라 서로 다른 거동을 나타내어, 같은 원소성분이라도 입경범위에 따라 다른 배출원의 영향을 받을 수 있는 것으로 나타내었다.

비황사기간에 대한 시계열과 역계적을 분석한 결과, 조대입자(2.5~12 μm)의 경우 주로 토양, 석탄연소, 폐기물 소각, 비철금속산업 배출원 등 인위적 오염원의 영향을 받은 것으로 추정되고, 이는 주로 황사시와 유사한 이동경로를 거쳐 빠른 속도로 유입되는 것으로 나타났다. 미세영역 1(0.56~2.5 μm)의 입자들은 철강 및 비철금속 관련산업, 석탄연소, 자동차 배출원의 영향을 주로 받은 것으로 추정되며, 이러한 오염성분들은 중국 동부 해안지역과 한반도 남동해안지역으로부터 유입되는 것으로 나타났다. 마지막으

로 미세영역 2 (0.09~0.56 μm)에서는 주로 중국 동부 해안지역에서 이동해온 생체 연소, 기름 및 석탄 연소, 철강 및 비철금속산업 배출원 등의 오염성분에 영향을 받은 것으로 나타났다.

이와 같이 DRUM impactor를 사용한 원소성분의 연속측정은 각 성분별 입경별 농도분포와 시계열에 대한 보다 자세한 정보를 제공하여, 역제적 결과와 함께 오염물의 장거리 이동가능성 및 배출원 추정에 유용한 정보를 제공하는 것으로 나타났다. 앞으로 이러한 측정자료의 충분한 축적과 종합적인 해석을 통해, 원소성분의 입경별 분포 특성을 명확히 파악하고, 보다 정확하게 대기오염물질의 배출원을 추적할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업인 “미량독성 유해물질의 장거리 이동특성과 영향평가 기술”(과제번호 2001-44001-8)지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

강병욱 (1998) 수용모델을 이용한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 배출원 추정, 박사논문, 건국대학교
 국립환경연구원 (1987) 대기중 입자상물질의 생성 및 동태에 관한 연구.
 국립환경연구원 (1986) 대기중 Aerosol 동태에 관한 조사연구.
 김용표, 배귀남, 지준호, 진현철, 문길주 (1999) 제주도 고산에서의 에어로솔 입경분포별 조성: 1998년 4월 측정 연구, 한국대기환경학회지, 15 (5), 677-685.
 김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경윤, 허철구 (1996b) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구 (I) 입자상 오염물질의 이동, 한국대기보전학회지, 12 (1), 79-90.
 나덕재, 이병규 (2000) 산업도시 대기 중 PM_{10} 의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구, 한국대기환경학회지, 16 (1), 23-25.
 신은상, 최민규, 선우영, 정용삼 (2002) 서울지역의 PM_{10} 중 미량원소의 특성 평가, 한국대기환경학회지, 18 (5), 363-372.

이종훈, 백남준, 김용표, 문길주 (1995) 1993년 8월의 서울지역 시정 연구, 한국대기보전학회지, 11 (3), 291-298.
 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍 (2003) 황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구, 한국대기환경학회지, 15 (1), 45-56.
 최만식, 박은주 (1999) 제주도 대기 분진 중 미량금속의 농도 특성, 한국대기환경학회지, 15 (6), 727-738.
 Cahill, T.A. and P.Wakabayashi (1993) Compositional Analysis of Size-Segregated Aerosol Samples. *Measurement Challenges in Atmospheric Chemistry*, American Chemical Society, New York, pp. 211-228.
 Gladney, E.S., J.A. Samll, G.E. Gordon, and W.H. Zoller (1976) Composition and Size distribution of In-Stack Particulate Material at a Coal-Fired Power Plant, *Atmospheric Environ*, 10: 1071-1077.
 Graham B., G. Patrick Grant, Dawn Ueda, Steve S. Cliff, Kevin D. Perry, Thomas A. Cahill (2002) The Use of STIM and PESA to Measure Profile of Aerosol Mass and Hydrogen Content, Respectively, across Mylar Rotating Drums Impactor Samples, *Aerosol Science and Technology*, 36: 642-651.
 Hillamo, R.E., V.M. Kerminen, W. Maenhaut, J.L. Jaffrezo, S. Balachandran, and C.I. Davidson (1993) size distributions of atmospheric trace elements at Dye 3, Greenland-I. Distribution characteristics and dry deposition velocities, *Atmospheric Environment* 27A, 2787-2802.
 Han, J.S., K.J. Moon, J.Y. Ahn, and Y.D. Hong, (2003) Characteristics of Ion Components and Trace Elements of Fine Particles at Gosan, Korea in Spring-time from 2001 to 2002, *Journal of Environmental Monitoring and Assessment* (permitted to publish).
 Reid, E.A., J.S. Reid, M.M. Meier, M.R. Dunlap, S.S. Cliff, A. Broumas, K. Perry, and H. Maring (2003) Characterization of African dust transported to Puerto Rico by individual particle and size segregated bulk analysis, *Journal of Geophysical Research*, 108 (D19), 8591.
 Reid, J.S., T.A. Cahill, and M.R. Dunlap (1994) Geometric/Aerodynamic Equivalent Diameter Ratios of Ash Aggregate Aerosols Collected in Burning Kuwaiti Well Fields, *Atmospheric Environment*, 28 (13), 2227-2234.
 Hillamo, R.E., V.M. Kerminen, W. Maenhaut, J.L. Jaffrezo, S. Balachandran, and C.I. Davidson (1993) Size distributions of atmospheric trace elements at Dye

3, Greenland-I. Distribution characteristics and dry deposition velocities, *Atmospheric Environment* 27A, 2787-2802.

Xin-Hua Song, Alexandr V. Polissar K/ Hopke (2001) Sources of fine particle composition in the north-eastern US, *Atmospheric Environment*, 35:5277-5286.

Chan, Y.C., R.W. Simpson, G.H. McTainsh, P.D. Vowles,

D.D. Cohen, G.M. Bailey (1999) Source apportionment of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane (Australia) by receptor modelling, *Atmospheric Environment*, 33:3251-3268.

Zhang, Y. and G.R. Carmichael (1999) The role of mineral aerosol in tropospheric chemistry in East Asia-A model study, *Journal of Applied Meteorology* 38, 353-366.