

황사에 기인한 제주지역 대기 에어로졸 금속 성분의 농도 변화 및 특성 조사

김 원 형, 강 창 희, 양 경 희, 한 성 빈, 정 덕 상
제주대학교 자연과학대학 화학과

요 약

1998년부터 2001년까지 제주도 고산에서 대기 에어로졸을 채취, 분석하여 봄철 황사기간 동안의 금속성분 농도와 특성을 조사하였다. 분석기간동안의 평균 농도는 S>Na>Al>Ca>Fe>K>Mg>Zn>Pb>Ti>Mn>V>Ba>Sr>Cu>Ni>Cr>Mo>Cd>Co의 순이었으며, 특히 Al, Ca, Fe, K, Ti, Ba, Sr의 농도가 황사기간에 각각 10.5, 9.9, 10.3, 5.6, 5.1, 6.5, 5.6배 증가하였다. 대부분의 토양성분들, 특히 Al, Fe, Ca 금속성분은 높은 상관성을 보였으며, 농축인자에 의한 조사결과 Ca, Fe, Cd, Ti, K, Mg 금속 성분들은 주로 토양으로부터 기인하는 반면 Pb, Mn, Ni, Cu, V, Cr, Co, Zn, Na 성분들은 다른 요인에 기인하였다. 요인분석 결과 고산지역의 에어로졸은 토양의 영향을 주로 받고 있으며 그 다음으로는 인위적 및 해염의 영향을 받는 것으로 조사되었다. 풍향별 분석으로부터 대부분의 에어로졸 금속 성분들이 주로 북서계열 풍향의 영향을 받고 있으며 이는 한반도뿐만 아니라 중국 대륙으로부터의 장거리 유입 가능성을 시사하고 있다.

1. 서 론

중국 북서부 지역의 건조한 사막지역에서 주로 봄철에 발생하는 황사는 매년 3~5월에 편서풍을 타고 2,000km 이상의 장거리를 이동하여 한국, 일본, 멀리는 하와이까지 이동한다(전영신 등, 1999). 이러한 황사는 대기 중에 부유하며 대기복사 체계에 영향을 주는 한편 기관지염, 천식, 안질, 알레르기 등의 질환을 유발하기도 하며, 다양한 염 물질이나 중금속 등을 흡착하여 대기 농도를 변화시키고, 대기 중 아황산 가스를 황산으로 산화시키는 촉매의 역할을 하기도 한다. 우리 나라에서 관측되어지는 봄철 황사 자체는 자연 발생적인 현상이지만, 이 시기에 측정된 여러 대기 오염물질의 농도 변화는 중국으로부터 장거리 이동되는 대기오염물질의 영향을 좀 더 가시적이고 구체적으로 확인할 수 있는 근거 자료로 이용될 수 있다. 중국으로부터

터 한반도로 유입되는 오염물질을 지상측정과 항공 관측 자료 등을 종합, 분석한 바에 의하면, 봄철과 겨울철에 우리 나라에서 배출되는 양의 최고 150%를 넘는 막대한 양의 아황산 가스가 중국으로부터 유입되고 있으며, 그 중 80% 정도까지 한반도에 침적되는 것으로 추정되고 있다(문길주 등, 1998; Zhang and Iwasaka, 1999; Guttikunda et al., 2003). 우리 나라에는 매년 3~5월에 여러 차례 황사가 관측되는데 평상시 $10\sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 먼지농도가 황사로 인하여 $100\sim 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하며, 그 중 황사의 주성분인 Si, Al, Ca, K, Na 등의 농도가 크게 상승한다. 특히 1993년 4월 23~26일 사이에 발생한 황사의 경우 5천톤 정도의 황사가 우리 나라에 침적되는 것으로 조사되어 향후 한반도에서의 심각한 대기 오염에 대한 우려를 제기하고 있다(문길주 등, 1997).

제주도는 한반도의 남단에 위치하고 있으면서 자

체 오염원이 거의 없는 국내의 청정지역 중의 하나이다. 또한 중국과 일본 사이에 위치하여 동북아시아 지역의 배경 대기 감시를 위한 최적지로 평가받고 있으며, 2001년 봄에 실시된 ACE-Asia 에어로졸 국제 공동 관측 프로그램의 지상 네트워크 관측을 위한 슈퍼사이트로 지정되어 국제 공동 관측이 실시된 바 있기도 하다(<http://saga.pmel.noaa.gov/aceasia>). 본 연구는 1998년부터 2001년까지 4년 동안 제주도 서쪽에 위치한 고산 측정소에서 대기 에어로졸을 채취하여 그 속에 포함되어 있는 금속 성분들을 분석하고 농도 변화와 아울러 성분들의 특성을 조사하기 위해 행해졌으며, 특히 황사와 비황사 기간동안의 특성 차이를 비교하여 제주 지역 대기 에어로졸에 미치는 황사의 영향을 알아보는데 그 목적을 두었다. 본 연구의 결과는 제주도 대기질의 자체 평가는 물론, 장거리 이동에 의해 주변국으로부터 유입되는 오염물질의 영향을 평가하는데도 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험 방법

2-1. 측정소 설비 및 측정 기기

본 연구를 위한 대기 에어로졸 시료는 제주도 북제주군 한경면 고산리 소재 수월봉(33°28'N, 127°17'E, 해발 78 m)에 설치된 측정소에서 채취되었다. 고산 측정소는 제주도 서쪽 끝 지점에 위치하며 이동오염원, 점 및 면 오염원에 의한 영향을 거의 받지 않는 제주도 내에서도 가장 청정한 지역이다. 측정소 컨테이너 내부에는 습기 및 온도에 의한 기기 오작동을 방지하고 각종 측정장비들을 탑재하여 지속적으로 가동할 수 있도록 에어컨과 제습기를 설치하여 항상, 항상을 유지하고, 전원은 AVR을 사용하여 안정화시켰다.

시료 채취를 위해서 일본 Kimoto Electric 제품인 high volume tape sampler(model 195A)를 사용하였으며, 이 sampler는 roll type의 PTFE(polytetrafluoroethylene) 필터(Sumitomo Electric, 100mm×10m)로 시료를 연속적으로 채취할 수 있는 자동

시스템으로, 시료의 채취시간을 임의로 조절할 수 있는 timer가 내장되어 있다. High volume tape sampler는 측정소의 컨테이너 내부에 탑재하였고, 흡입관(길이 6m, 내경 38mm인 flexible hose)은 컨테이너 측면을 관통시켜 지상 약 5m 높이의 에어로졸이 포집될 수 있도록 설치하였다. 에어로졸의 금속 및 황 성분(Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S, Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd)은 ICP-AES(Thermo Jarrell Ash, model IRIS-DUO)를 사용하여 분석하였다. ICP-AES는 Simultaneous mode 가능형인 동시에 Radial/Axial Plasma 선택형이며 40.68MHz의 RF frequency를 조사할 수 있도록 구성되어 있다. 한편 채취된 에어로졸의 금속 성분은 에어로졸 필터를 혼산 용액에 침적시키고 마이크로파 분해장치(미국 CEM사의 model MAR-5)을 사용하여 용출시켰다.

2-2. 에어로졸 시료의 채취 및 분석

본 연구를 위한 에어로졸 시료는 high volume tape sampler와 PTFE 필터를 사용하여 24시간 단위로 1998년 1월부터 2001년 12월까지 4년간 채취하였으며, 1998년에 144개, 1999년에 115개, 2000년에 104개, 2001년에 125개로 본 연구기간 동안 도합 488개의 시료를 채취하였다. 시료 채취용 필터는 테프론 재질(PTFE)의 롤테이프형(100mm×10m)으로 한 개의 롤테이프가 완전히 감길 때마다 sampler로부터 필터를 분리하여 에어로졸에 함유된 황 및 금속 성분을 분석하였다. 또한 시료 채취시 공기의 유속은 대략 170L/min이 되도록 조절하였으며, 총 공기의 유량은 기록계의 기록지에 표시된 유속 및 시간을 대조하여 계산하였다.

PTFE 필터는 시료가 채취된 부분을 원형으로 잘라내고 다시 2등분하여 한쪽 부분을 비닐봉지에 밀봉하여 -20℃ 냉동고에 보관하였다가 대략 3개월 간격으로 동시에 금속 성분의 분석에 사용하였다. 에어로졸의 금속 및 황 성분은 EPA Method 3051A의 방법으로 마이크로파 분해장치를 사용하여 혼산 용액으로 용출시켰다. 시료가 채취된 필터는 테프론 vessel에 넣고 진한 질산 9mL와 진한 염

산 3mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 10분 동안 온도를 175 °C로 올리고, 다시 이 온도에서 5분간 유지시켜 총 15분간 시료를 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 0.45µm 필터로 여과하여 불용성 입자를 거른(Whatman, 0.45µm PVDF syringe filter) 후 초순수를 사용하여 최종적으로 용량플라스크에서 50 mL로 표충하여 ICP분석용 시료로 사용하였다.

ICP-AES 분석을 위해서 농도가 비교적 높은 고농도 성분들(Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S)과 농도가 낮은 미량 성분들(Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd)로 분류하여 고농도 성분들은 Radial Plasma Torch법으로, 미량 성분들은 Axial Plasma Torch법으로 동시 mode를 이용하여 분석하였다. 그러나 이처럼 여러 성분들을 동시 mode법으로 함께 분석했을 때 검출한계가 불량하거나 데이터의 재현성 또는 정밀도가 낮은 성분들, 그리고 QC 과정에서 문제가 있는 성분들은 각 성분별로 분리하여 sequential mode로 재분석 과정을 거쳤다. 그리고 최종 농도는 시료 용액을 3회 반복하여 ICP에 주입하여 측정한 결과를 평균하여 최종 데이터로 삼았다. ICP 분석시 표준용액은 AccuStandard

사의 ICP용 1000 ppm 용액을 초순수와 혼산용액으로 희석하여 조제하였으며, 희석용매는 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시료의 전처리 과정과 동일한 비율로 HNO₃과 HCl을 혼합한 용액을 사용하였다. 검량선 작성시에 사용한 표준용액은 시료의 농도 범위에 따라 고농도 성분들은 각각 0.1, 1.0, 5.0 µg/mL 용액, 미량 성분들은 0.01, 0.1, 1.0 µg/mL 용액을 조제하여 사용하였으며, 모든 성분들에 대해 3-point calibration을 적용하였다. 금속 및 황 성분 분석시의 ICP 기기 조건을 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 금속 성분에 대한 연도별 조성 비교

제주 지역 대기 에어로졸을 구성하는 성분 중 S와 함께 19개 금속(Na, Al, Ca, Fe, K, Mg, Zn, Ti, Pb, Mn, V, Ba, Sr, Cu, Ni, Cr, Mo, Co, Cd)성분에 대해 농도를 분석하여 그 결과를 Table 2와 Figure 1 ~ 3에 나타내었다. 1998년부터 2001년

Table 1. Instrumental conditions and detection limits(3σ) of ICP-AES for metals and sulfur analyses.

Thermo Jarrel Ash, Model IRIS-DUO					
Operation Mode :		Simultaneous mode	RF Power :		1150 W
Plasma Type :		Radial, Axial	Ar Flow Rate :		Outer = 16.0 L/min Inner = 0.5 L/min Nebulizer = 28. 35 psi
RF Frequency :		40.68 MHz	Pump Rate :		130 rpm
Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (ppm)	Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (ppm)
Al	396.152	0.0027-0.0045	Fe	259.837	0.0024-0.0051
Ca	317.933	0.0009-0.0012	Na	588.995	0.0036-0.0240
K	766.490	0.0015-0.0042	Mg	202.582	0.0051-0.0135
Ti	334.941	0.0015-0.0090	Mn	257.610	0.0002-0.0003
Ba	233.527	0.0033-0.0036	Sr	346.446	0.0015-0.0033
Zn	213.856	0.0003-0.0015	V	309.311	0.0012-0.0060
Cr	267.716	0.0027-0.0054	Pb	220.353	0.0057-0.0153
Cu	324.754	0.0024-0.0027	Ni	221.647	0.0006-0.0084
Co	228.616	0.0015-0.0027	Mo	202.030	0.0009-0.0039
Cd	214.438	0.0018-0.0033	S	182.034	0.0189-0.0423

Table 2. Annual mean concentrations of sulfur and metal components in 1998-2001.

component	1998		1999		2000		2001		4-year total mean	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.		
$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	Al	1.12	2.57	0.42	0.34	0.55	0.86	0.87	1.68	0.74
	Fe	0.79	1.46	0.39	0.44	0.50	0.62	0.75	1.69	0.61
	Ca	0.94	2.23	0.54	0.57	0.59	0.64	0.76	1.66	0.71
	Na	1.35	0.97	1.31	0.91	1.48	1.12	1.39	1.28	1.38
	K	0.62	0.97	0.28	0.28	0.39	0.36	0.58	0.96	0.47
	Mg	0.49	0.84	0.33	0.26	0.48	0.37	0.46	0.75	0.44
	S	1.96	1.62	1.76	1.19	2.24	1.69	1.64	1.37	1.90
	(ng/m^3)	Ba	7.5	11.6	4.6	4.5	5.9	7.5	6.7	11.9
Cd		0.7	0.4	0.6	0.4	1.3	0.8	0.9	0.8	0.9
Co		0.8	1.0	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.9	0.7
Cr		2.4	4.2	2.9	3.2	2.9	4.9	2.8	3.4	2.8
Cu		3.5	3.3	3.9	3.7	4.7	3.6	3.7	4.0	4.0
Mn		24.4	32.5	17.2	16.1	17.8	21.9	22.8	33.8	20.6
Mo		1.2	0.8	1.1	0.8	1.0	0.7	0.8	0.7	1.0
Ni		3.4	3.0	2.8	1.9	4.9	4.6	4.2	4.5	3.8
Pb		37.7	52.2	46.9	46.1	41.5	43.9	31.9	38.3	39.5
Sr		6.2	8.3	3.8	3.2	4.9	4.1	5.4	7.9	5.1
Ti		40.0	51.4	31.7	30.4	30.0	38.0	42.0	65.3	35.9
V		8.9	11.5	7.5	4.3	7.3	6.4	9.0	12.9	8.2
Zn		46.9	40.1	39.5	48.3	45.8	46.4	37.3	47.5	42.4

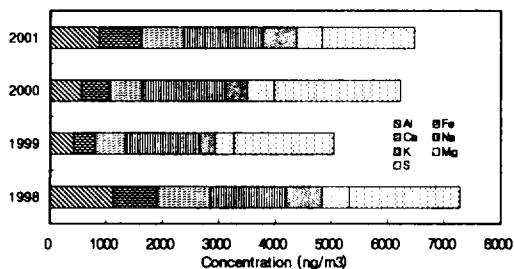


Figure 1. Comparison of annual concentrations of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S.

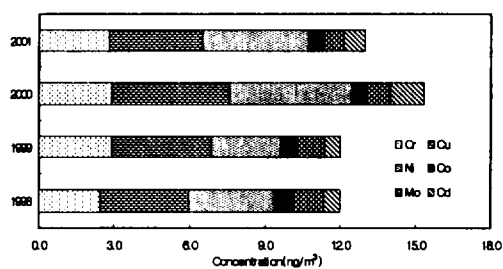


Figure 3. Comparison of annual concentrations of Cr, Cu, Ni, Co, Mo, Cd.

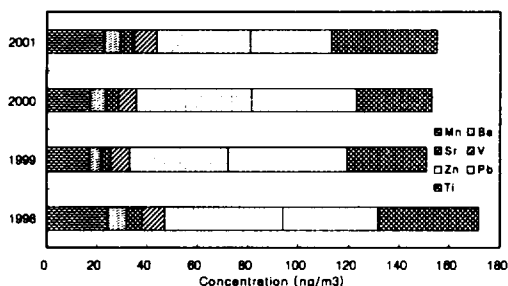


Figure 2. Comparison of annual concentrations of Mn, Ba, Sr, V, Zn, Pb, Ti.

까지 에어로졸 금속 성분들의 4년간 평균농도를 비교해 본 결과 $S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Sr > Cu > Ni > Cr > Mo > Cd > Co$ 의 순으로 나타나 주로 인위적 발생기원을 갖는 S의 농도가 가장 높았고, 다음으로 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg 등의 토양 및 해염 성분들이 대체적으로 높은 농도를 보였다.

제주 지역 대기 에어로졸의 S 성분은 4년간의 평균농도가 $1.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 1998년, 1999년, 2000년,

2001년에 각각 연 평균 1.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2000년에 가장 높은 농도 값을 나타내었다. 또한 토양의 지표성분인 Al은 4년간의 평균농도가 0.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 1998년, 1999년, 2000년, 2001년에 각각 연 평균 1.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1998년에 가장 높은 농도를 보였으며 다음으로는 2001년에 높게 나타났다. 또 Ca은 1998년, 1999년, 2000년, 2001년에 각각 연 평균 0.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4년간 평균농도가 0.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe은 각각 연 평균 0.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4년간 평균농도가 0.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, K는 각각 연 평균 0.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4년간 평균농도가 0.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보여 토양성분들인 Al, Ca, Fe, K 모두 1998년에 가장 높은 농도를 나타냈으며 다음으로 2001년, 2000년, 1999년의 순으로 농도를 보였다. 한편 해염의 주요 성분인 Na과 Mg의 농도는 1998년, 1999년, 2000년, 2001년에 Na가 각각 연 평균 1.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로

4년간 평균농도가 1.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg는 각각 연 평균 0.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4년간 평균농도가 0.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보여 연도별 농도변화의 추세에 특별한 경향을 찾을 수 없었다. 4년간의 농도변화를 살펴보면 제주 지역 에어로졸에 포함된 토양성분과 해염성분은 둘 다 1999년에 가장 낮은 농도를 보였고, 2000년과 2001년 두 해를 비교하면 토양성분은 2000년에 비해서 2001년에 농도가 증가한 반면 해염성분은 반대의 경향을 나타냈다. 에어로졸에 상대적으로 미량 존재하는 성분들에 대해서는 농도단위를 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대신에 ng/m^3 로 나타내었으며, 이들 성분 중에서 주로 토양성분에 해당하는 Zn, Pb, V, Cu, Cr, Ni 등의 금속 성분들은 연도별로 뚜렷한 경향을 보이지 않았으나 Mn와 Ba는 Al, Ca, Fe, K 성분들처럼 1998년에 이어 2001년, 2000년, 1999년의 순서로 농도의 변화를 보였다.

Table 3. Seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components in 1998-2001.

component	Spring		Summer		Fall		Winter	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Al	1226.2	2221.3	309.7	222.4	377.2	265.7	435.2	373.1
Fe	1077.2	1778.4	134.9	119.8	284.0	216.2	432.8	362.9
Ca	1168.0	2014.1	161.6	140.8	345.6	284.5	600.6	508.8
Na	1607.1	1432.3	1027.9	557.2	1219.1	764.5	1520.3	973.1
K	651.2	921.3	150.4	170.4	309.3	349.5	583.3	809.2
Mg	625.0	843.6	205.1	154.3	315.2	237.9	434.6	330.4
S	2227.6	1761.7	1594.5	1518.1	1463.0	1017.8	1978.0	1049.9
Ba	8.1	13.5	1.9	1.6	3.4	2.3	5.4	4.4
Cd	1.0	0.9	0.8	0.6	0.7	0.5	1.2	0.8
Co	0.9	1.1	0.3	0.2	0.6	0.5	0.5	0.4
Cr	4.2	5.8	1.4	1.0	1.9	1.4	2.2	1.1
Cu	4.7	4.4	3.2	3.2	4.0	3.5	3.2	2.2
Mn	32.0	37.9	6.2	5.2	13.2	11.0	17.5	13.7
Mo	1.2	0.9	0.6	0.5	1.0	0.6	0.8	0.5
Ni	5.6	4.9	2.6	4.0	2.7	1.7	3.2	2.1
Pb	49.1	54.8	15.6	22.8	32.6	32.3	46.4	36.7
Sr	7.4	8.8	1.9	1.1	3.3	1.6	5.0	3.5
Ti	59.8	68.2	9.7	9.1	19.7	15.1	30.6	27.3
V	12.6	13.5	4.5	2.4	4.6	2.8	6.3	4.1
Zn	52.6	57.9	20.5	25.2	37.8	32.3	42.7	41.9

3-2. 금속 성분에 대한 계절별 조성 비교

제주 지역 대기 에어로졸의 금속 성분들에 대한 계절별 조성 변화를 알아보기 위해서 각 금속 성분들의 농도를 Table 3과 Figure 4 ~ 6에 계절별로 비교하여 나타내었다. 19종의 주요 금속 성분들과 황성분의 농도는 계절별로 봄에 S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Sr > Ni > Cu > Cr > Mo > Cd > Co. 여름에 S > Na > Al > Mg > Ca > K > Fe > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Cu > Ni > Ba. Sr > Cr > Cd > Mo > Co. 가을에 S > Na > Al > Ca > Mg > Fe > K > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Cu > Ba > Sr > Ni > Cr > Cd > Mo > Co. 그리고 겨울에 S > Na > Ca > Mg > Fe > K > Al > Pb > Zn > Ti > Mn > V > Ba > Sr > Ni > Cu > Cr > Cd > Mo > Co의 순으로 나타났으며, 이 중 황 성분이 모든 계절에 걸쳐 가장 높은 농도를 보였다. 황 성분의 계절별 평균농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철의 평균농도가 각각 2227.6, 1594.5, 1463.0, 1978.0 ng/m³로 봄철이 가장 높고 가을에 가장 낮은 농도를 보이고 있다. 일반적으로 다른 대부분의 성분들이 봄철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 보이는 경향이 있으나, S의 경우 이와는 다른 결과를 나타내었다. 이는 대기 에어로졸 시료 채취시의 국지적인 영향과 대기의 이동, 기상 조건 등 여러 가지 가능한 인자들을 종합적으로 검토하여 보다 확실한 원인을 파악함으로써 자세한 설명이 가능할 것으로 보인다. 토양성분들과 함께 인위적 요인에 기인하는 금속 성분들도 대부분 봄, 겨울, 가을, 여름 순으로 농도가 나타나고 있으며, 특히 Al은 여름에 비해서 봄철 농도가 4배 높고, Ca는 7배, Fe는 무려 8배나 봄철에 높은 농도를 보여 대부분의 금속 성분이 여름철 농도에 비해 봄철 농도가 2.5~8 배 가량 높게 나타났다. 이는 제주 지역이 봄철에 주로 북서풍 계열의 바람이 불고 편서풍의 영향으로 인하여 중국 대륙으로부터 다량의 부유 분진이 장거리 이동하여 유입되고 있는 것으로 보여진다. 금속 성분의 봄철 농도 증가는 특히 중국의 황사현상에 의해 더욱 심해진다고 판단된다.

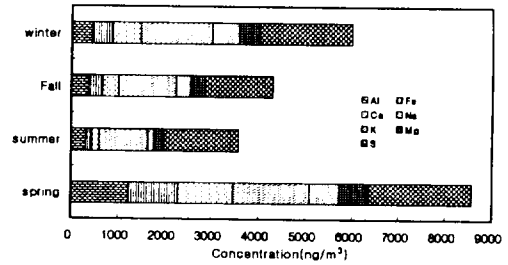


Figure 4. Comparison of seasonal concentrations of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S.

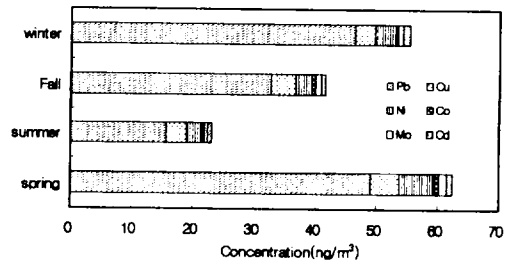


Figure 5. Comparison of seasonal concentrations of Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd.

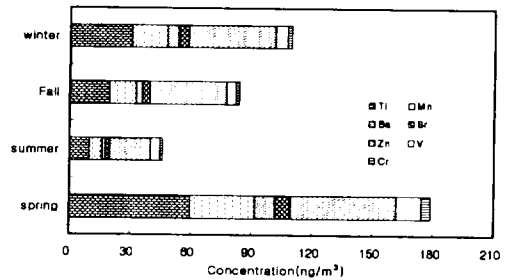


Figure 6. Comparison of seasonal concentrations of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr.

3-3. 황사 영향에 의한 금속 성분 조성 비교

매년 3월부터 5월까지 봄철에 중국 내륙지역에서 발생하는 황사는 대기 상층부의 편서풍을 타고 장거리 이동하여 한국, 일본을 거쳐 멀리 북태평양까지 진출하며, 제주 지역에서 관측되는 황사는 근원지에서 대략 2~3일 전에 발생된 것이다. Table 4는 본 연구가 수행된 1998년 초부터 2001년 말까지 제주, 목포, 군산, 서울에서 관측된 황사일을 나타낸 것이다. 이들 지역에서의 봄철 황사 발생은 일

Table 4. List of Yellow Sand event days in 1998-2001.

	1998	1999	2000	2001
Jeju	March 29, 30	January 25, 26	March 23, 24, 26, 27, 28, 29	March 3, 4, 6, 7, 10, 11, 20, 21, 22, 23, 24
	April 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 29		April 7, 8, 10, 21, 26, 27	April 10, 11, 12, 13, 14, 25, 26 May 16, 17, 18
Mokpo	March 28, 29	January 25, 26, 27, 28	March 23, 24, 26, 27, 28, 29	March 3, 6, 7, 20, 21, 22, 23, 24
	April 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	February 27	April 7, 8, 10, 23, 26, 27	April 10, 11, 12, 24, 25 May 16, 17
Kunsan	March 28	January 25, 26, 27, 28	March 7, 23, 24, 26, 27, 28, 29	March 3, 4, 5, 6, 7, 20, 22, 23, 24, 25
	April 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 29	February 27	April 7, 8, 10, 12, 23, 26	April 9, 10, 11, 12, 13, 14, 24, 25
			May 4	May 3, 16, 17, 18
Seoul	March 28, 29, 30	January 25, 26, 27, 28	March 7, 23, 24, 27, 28	March 3, 4, 5, 6, 7, 20, 22, 23, 24, 25
	April 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 28	February 27	April 7, 8, 23, 26, 27	April 7, 8, 9, 10, 11, 12, 24, 25, 26 May 16, 17, 18, 19
		April 5		

수에 있어서 약간씩 차이가 있긴 하나 황사 발생 시기는 거의 동일한 것으로 보인다.

본 연구기간 동안 채취한 에어로졸의 각 금속 성분들의 농도에 대한 분석 결과를 황사 기간과 비황사 기간으로 나누어 비교하였으며, 그 결과를 Table 5와 Figure 7 ~ 9에 보였다. 이들 중 주로 토양성분인 Al, Fe, Ca, K는 황사시의 농도가 비황사시에 비해 각각 10.5배, 10.3배, 9.9배, 5.6배 정도 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 또한 미량의 토양 성분들인 Ti, Ba, Sr 농도는 비황사시에 비해 황사시 각각 5.1배, 6.5배, 5.6배 증가하였다. 반면에 인위적 기원의 금속 성분들인 Pb, Zn, V, Cd, Cr 농도는 황사시에 각각 2.1배, 2.5배, 5.1배, 2.2배, 4.3배 증가하였고, 비교적 해양의 기여도가 큰 Na, Mg 성분은 그 농도가 황사시에 각각 2.4배, 5.9배 증가하여, 인위적 기원과 해양 기원의 성분들에 비해

토양 기원의 금속 성분들이 상대적으로 높은 농도 증가 경향을 보였다. 인위적 오염 기원의 S 성분인 경우 황사와 비황사시에 그 농도가 각각 3.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비황사시에 비해 황사시에 1.9배 정도 더 높은 것으로 조사되었다. 일반적으로 S는 토양

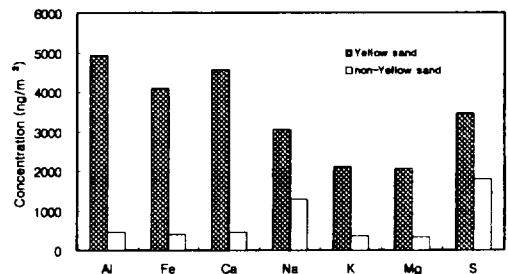


Figure 7. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand periods in 1998-2001.

Table 5. Comparison of metal concentrations between Yellow(Y) Sand and Non-Yellow(NY) Sand periods in 1998-2001.

component	Y		NY		Y/NY	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.		
(μg/m ³)	Al	4.93	3.96	0.47	0.59	10.49
	Fe	4.10	3.11	0.40	0.50	10.25
	Ca	4.57	3.56	0.46	0.57	9.93
	Na	3.06	2.01	1.30	0.95	2.35
	K	2.09	1.56	0.37	0.51	5.64
	Mg	2.06	1.38	0.35	0.32	5.89
	S	3.46	1.87	1.79	1.41	1.93
	(ng/m ³)	Ba	30.5	21.0	4.7	5.8
Cd		1.9	1.2	0.9	0.7	2.16
Co		2.4	1.8	0.5	0.5	4.80
Cr		10.3	6.2	2.4	3.3	4.28
Cu		9.2	6.6	3.7	3.2	2.49
Mn		93.6	47.2	16.0	18.2	6.85
Mo		1.6	1.1	0.9	0.7	1.78
Ni		12.7	4.2	3.5	3.3	3.65
Pb		77.1	59.7	36.5	42.0	2.11
Sr		22.4	12.8	4.0	3.6	5.59
Ti		150.5	82.6	29.3	38.0	5.13
V		33.8	20.6	6.6	5.8	5.10
Zn		94.8	79.8	38.5	41.7	2.47

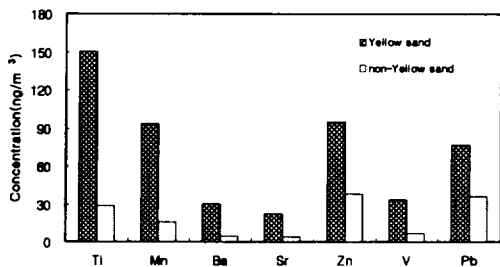


Figure 8. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Pb concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand periods in 1998-2001.

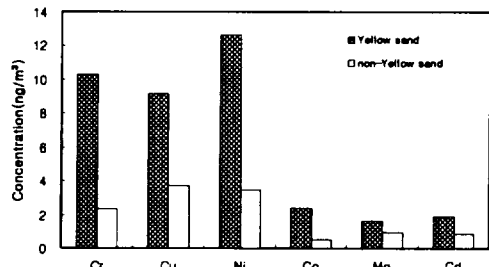


Figure 9. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo, Cd concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand periods in 1998-2001.

에는 거의 존재하지 않는 성분으로 황사 입자 표면 에 흡착된 황산염의 성분으로 존재한다고 보여진다. 따라서 이러한 S의 황사시 농도 증가는 황사가 중국 내륙지역으로부터 장거리 이동되는 과정에서 이동 경로에 있는 지역에서 발생한 다량의 황화합물을 흡수 또는 반응한 상태로 제주 지역 대기에 유입되었을 가능성을 보여주는 결과이다.

3-4. 금속 성분의 풍향별 조성 비교

제주도 지역은 자체 오염원이 거의 없는 국내에서도 가장 청정한 곳 중의 하나이다. 또한 제주도는 중국과 일본의 중앙에 위치하여 동북아 지역 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 관측하기에 아주 적합한 곳으로 평가되고 있다. 따라서 제주도 지역

의 에어로졸에 포함된 각 성분의 농도를 풍향별로 비교하면 어느 정도 이들 성분들의 유입경로를 판단할 수 있는 근거가 될 수 있다. 본 연구기간 동안 채취한 488개 시료의 황 및 금속 성분들에 대해 풍향별로 농도를 비교하여 그 변화를 Figure 10 ~ 11

에 나타내었다. 이 때 풍향은 850 hPa 즉, 고도 약 1500 m에서의 고층기상자료를 이용하였다.

대기 에어로졸의 주요 금속 성분들에 대해 풍향별 농도 변화를 조사해 본 결과 토양의 주요 성분인 Al, Fe, Ti, Ca 등이 주로 270° ~ 330°의 서풍 계

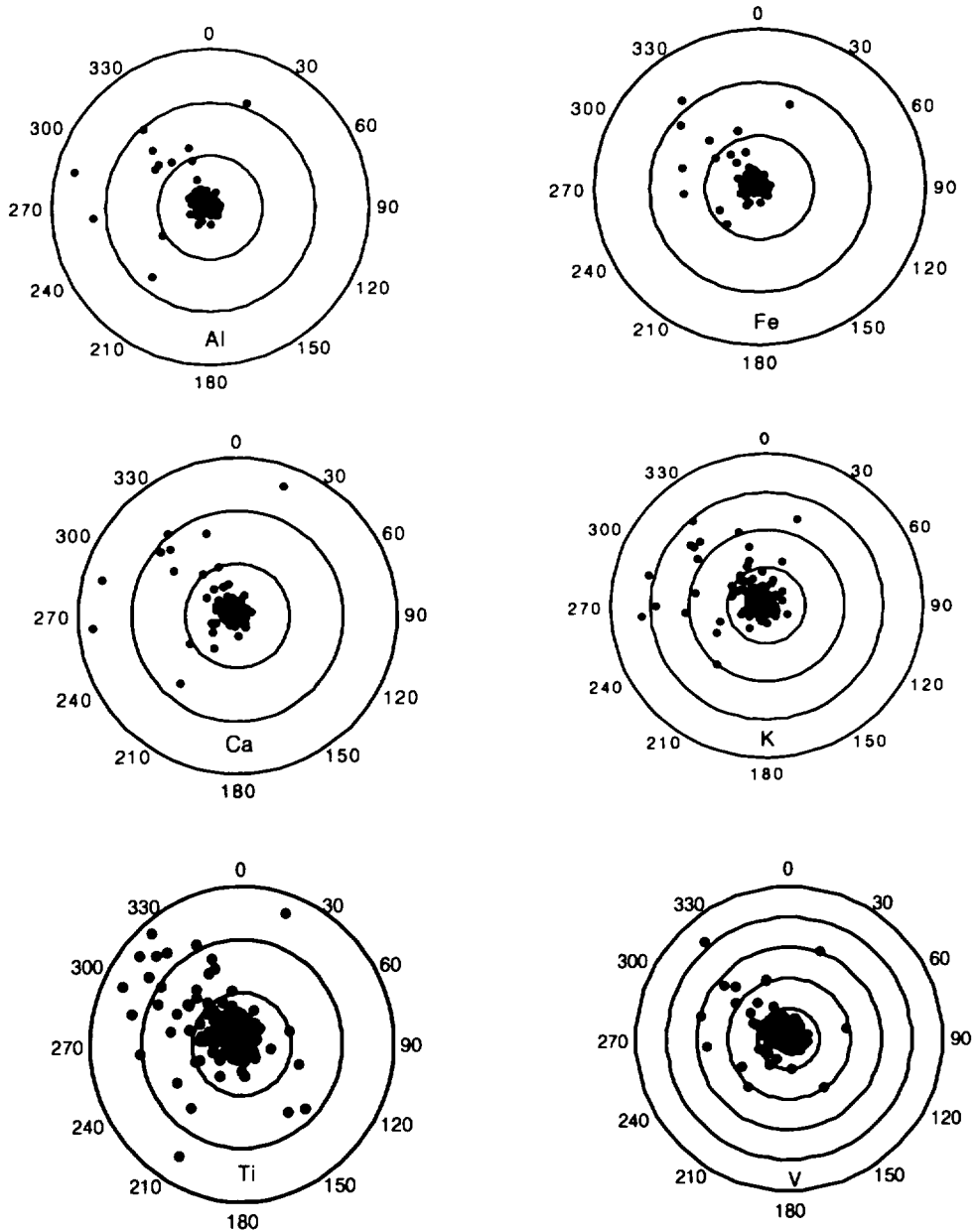


Figure 10. Scattering of Al, Fe, Ca, K, Ti, V concentrations as a function of the wind direction.

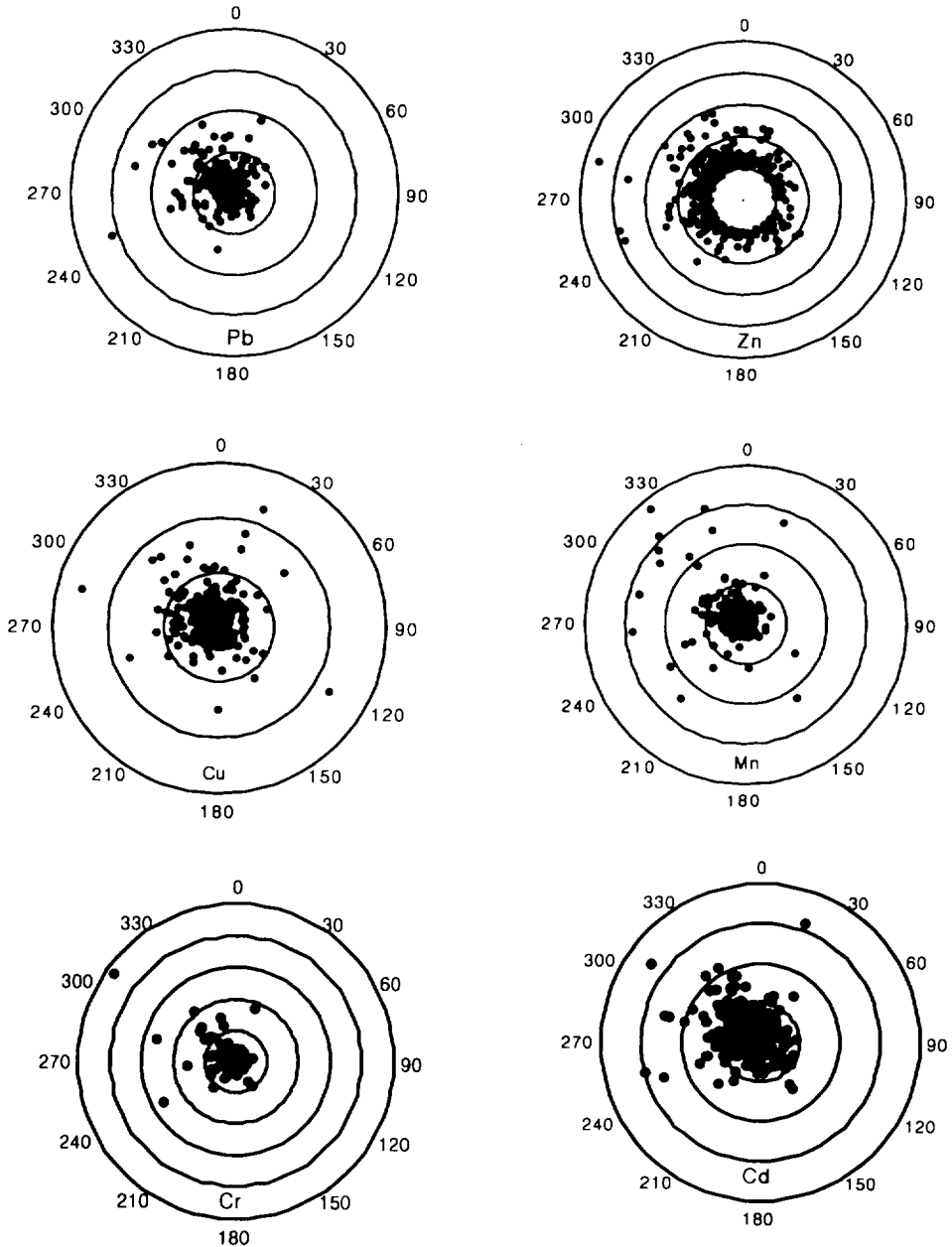


Figure 11. Scattering of Pb, Zn, Cu, Mn, Cd, Cr concentrations as a function of the wind direction.

열 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 또 인위적 기원으로 알려진 Pb, Zn, V의 경우 240° ~ 330°의 서풍계열에서 높은 농도를 나타냈고, Zn은 풍향에 의한 뚜렷한 변화를 보이지 않았

지만 일부가 서풍계열에서 높은 농도를 보여 황사 기간에 농도가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 토양과 인위적 기원을 동시에 나타내는 K은 남동풍 풍향에 비해 270° ~ 290° 서풍 계열일 때 높은 농도를

나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 종합해 보면 제주도 고산 지역의 대기 에어로졸은 자체적인 오염보다는 타 지역에서 장거리 이동된 오염물질들이 상당량 대기 중에 유입되고 있는 것으로 보인다. 특히 북태평양 쪽에서 이동하는 남풍일 때에 비해 중국과 한반도의 대륙 쪽으로부터 이동하는 북서풍 계열의 풍향일 때 여러 대기오염물질들이 장거리 이동되어 제주지역 대기질에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 제주 지역의 연간 풍향을 보면 주로 봄철에는 북서풍 계열의 바람이 많이 불고, 여름에는 이와 반대로 남동풍 계열이 우세한 것으로 나타나고 있다. 또 가을에는 대체적으로 북동풍 계열의 바람이 많고, 겨울에는 북풍 계열의 바람이 많이 부는 것으로 나타나고 있다(Carmichael et al., 1997). 그리고 연간 평균적으로는 편서풍의 영향으로 북서풍 계열의 바람이 가장 많은 것으로 조사되고 있다. 이러한 점을 고려하면 제주의 대기질은 중국과 한반도 내륙에서 이동하는 대기오염물질의 영향에 따라 크게 좌우되는 것으로 판단된다.

3-5. 성분들간의 상관 관계 비교

제주 지역 대기 에어로졸의 금속 성분들의 발생 기원을 확인하고 에어로졸 특성을 조사하기 위하여 각 성분들간의 상관성을 비교하여 Table 6에 나타내었다. 이들 중 Al과 Ca 간의 상관계수가 0.96으로 가장 높은 상관관계를 나타내었으며 Al과 Fe 간의 상관계수는 0.94, Ca와 Fe 간의 상관계수는 0.95로 매우 양호한 상관성을 보여, 이들 Al, Ca, Fe 금속 성분들이 동일 기원인 토양으로부터 유래되고 있음을 입증하였다. 또한 Al과 그 외 토양성분들인 Ba, K, Mg, Sr, Ti, Mn 간의 상관계수들도 0.8 이상의 값을 보여 이들 금속 성분들이 동일한 발생 기원과 경로로 제주 지역 대기에 유입되고 있음을 보여준다. 반면에 인위적 기원의 성분들인 경우 S와 Pb 간의 상관계수가 0.76으로 가장 높게 나타났으나, 나머지 성분들간에는 상대적으로 낮은 상관성을 보여 다른 발생 기원에 비해 토양성분들의 상관성이 매우 높다는 결과를 얻을 수 있었다.

Table 6. Cross correlation coefficients for metal components of aerosols.

	Al	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	Pb	S	Sr	Ti	V	Zn
Al	1																			
Ba	0.91	1																		
Ca	0.96	0.93	1																	
Cd	0.37	0.48	0.42	1																
Co	0.78	0.81	0.80	0.42	1															
Cr	0.67	0.67	0.66	0.49	0.63	1														
Cu	0.45	0.56	0.50	0.45	0.56	0.40	1													
Fe	0.94	0.94	0.95	0.43	0.80	0.67	0.50	1												
K	0.79	0.80	0.82	0.39	0.66	0.54	0.53	0.80	1											
Mg	0.90	0.89	0.93	0.43	0.76	0.65	0.50	0.93	0.82	1										
Mn	0.88	0.96	0.89	0.47	0.81	0.68	0.59	0.91	0.78	0.87	1									
Mo	0.33	0.48	0.40	0.54	0.51	0.40	0.62	0.39	0.41	0.38	0.47	1								
Na	0.51	0.54	0.56	0.45	0.50	0.56	0.29	0.59	0.44	0.67	0.55	0.35	1							
Ni	0.64	0.74	0.65	0.57	0.62	0.63	0.60	0.69	0.60	0.65	0.78	0.47	0.45	1						
Pb	0.31	0.50	0.41	0.53	0.37	0.35	0.63	0.38	0.53	0.38	0.52	0.70	0.28	0.51	1					
S	0.41	0.53	0.47	0.54	0.47	0.48	0.63	0.16	0.55	0.40	0.54	0.61	0.39	0.56	0.76	1				
Sr	0.88	0.94	0.93	0.49	0.81	0.69	0.54	0.93	0.81	0.92	0.93	0.48	0.62	0.72	0.51	0.57	1			
Ti	0.76	0.78	0.73	0.46	0.71	0.69	0.41	0.81	0.62	0.77	0.83	0.35	0.63	0.71	0.35	0.42	0.79	1		
V	0.90	0.93	0.90	0.46	0.80	0.73	0.53	0.93	0.74	0.88	0.92	0.40	0.25	0.76	0.41	0.51	0.92	0.82	1	
Zn	0.33	0.49	0.41	0.54	0.40	0.36	0.67	0.40	0.50	0.39	0.52	0.66	0.29	0.50	0.82	0.68	0.50	0.34	0.42	1

3-6. 토양 영향에 대한 성분 조성 비교

흡착 또는 반응된 상태로 제주 지역 대기 에어로졸에 함유된 금속 성분들이 토양의 영향을 어느 정도 받는지 알아보기 위해서 Al을 토양의 지표성분으로 삼아 다음 식과 같이 토양 농축인자 (Enrichment Factor)를 구하였다(김원형 등, 2003).

$$EF = \frac{(C_x / C_{Al})_{aerosol}}{(C_x / C_{Al})_{crust}}$$

위 식에서 $(C_x / C_{Al})_{crust}$ 는 지각 성분의 조성을 기준으로 하며, 계산된 농축인자의 값이 1에 가까울수록 토양의 유입이 큼을 의미하고 1보다 클수록 토양이 아닌 다른 요인에 의해 에어로졸에 유입되고 있음을 의미한다(Taylor and McLennan, 1985). 그러나 최만식 등(1989)에 의하면 각 성분들에 대해 계산된 농축인자 값은 일반적으로 지표성분에 따라 다소 차이를 보일 수 있기 때문에 EF 값이 3 ~ 5이하의 성분들은 토양성분과 같은 기원을 갖고 그 이상의 값을 나타내면 다른 기원에 의해 유래된 성분으로 추정한다. 본 연구기간 동안 각 금속 성분들의 전체 평균농도와 계절별 평균농도로부터 구한 농축인자를 Table 7에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 토양 발생기원의 Ca와 Fe경우 농축인자의 전체 평균은 각각 2.6과 1.9를 나타내어 이들 성

분들이 대체적으로 토양에서 유입되고 있음을 나타내었고, 계절별로는 대략 1.0 ~ 3.7의 범위를 보여 대부분 토양의 영향을 받지만 겨울철에는 토양이 아닌 다른 영향도 함께 받는 것으로 보여진다. 나머지 성분들의 경우 Cd, Ti, K, Mg 등이 비교적 작은 토양농축인자 값을 보여 이들 성분들이 주로 토양으로부터 유래되고 있는 반면, Pb, Mn, Ni, Cu, V, Cr, Co, Zn, Na 등의 금속 성분들은 이보다 큰 EF 값을 보여 토양보다는 다른 요인에 의해 제주 지역 대기 에어로졸에 유입되고 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 또한 계절별로 비교한 결과에서는 대부분의 성분들이 겨울철에 큰 EF 값을 나타내었는데 이는 본 연구가 이루어진 고산 측정소가 청정한 지역이면서 해안가에 바로 근접하고 있어 겨울철에 강한 북풍의 영향으로 타 계절에 비해 해양의 영향을 많이 받은 것으로 그 원인을 해석할 수 있다.

3-7. 금속 성분에 대한 발생 기원 조사

대기 에어로졸은 고체, 액체의 입자 또는 그 집합체로 토양 먼지, 해염 입자, 화산재 등의 자연발생 물질과 산업활동에서 파생되는 황산염, 질산염, 검댕과 같은 인위적 발생의 물질 등으로 그 발생 기원이 다양하며, 또한 입자의 크기도 0.001 ~ 100 μm 에

Table 7. Annual and seasonal comparisons of soil enrichment factor for the metal components.

x	$(C_x / C_{Al})_{crust}$	$(C_x / C_{Al})_{aerosol} / (C_x / C_{Al})_{crust}$				
		Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
Na	0.3595	5.2	3.6	9.2	9.0	9.7
Mg	0.1654	3.6	3.1	4.0	5.1	6.0
Ca	0.3731	2.6	2.6	1.4	2.5	3.7
Fe	0.4353	1.9	2.0	1.0	1.7	2.3
Mn	0.0075	54.8	29.0	22.2	38.9	38.3
Co	0.0001	8.6	7.3	10.0	15.9	11.7
Ni	0.0002	25.8	22.8	42.0	35.8	36.8
Zn	0.0009	7.6	5.7	8.8	13.4	13.1
Cd	0.0012	1.0	0.7	2.1	1.5	2.3
K	0.3483	1.8	1.5	1.4	2.4	3.8
Pb	0.0002	265.5	200.2	251.9	432.1	533.1
Cu	0.0003	17.8	12.8	34.4	35.3	24.5
Ti	0.0093	1.3	1.3	0.8	1.4	1.9
V	0.0007	15.7	14.7	20.8	17.4	20.7

이르는 등 광범위하다(Chun et al., 2001; Willeke and Baron, 1993; Seinfeld and Pandis, 1998). 본 연구에서는 제주 지역 에어로졸의 금속 성분 특성과 그 발생 기원을 확인해 보기 위하여 통계 프로그램(SPSS)을 이용한 요인분석(factor analysis)을 실시하였다(Seto et al., 2000; Lee et al., 2001; Olsen et al., 1990; Crawley and Sieveering, 1986). 요인분석은 변수들간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로서 대개 여러 변수들간의 상관 matrix에서 인자의 적재값이 클수록 변수들간의 발생 기원이 유사하다고 추정되어진다. 이 때 최적인자의 수는 주로 최소고유값을 기준으로 고유값 1 이상으로 결정하는 것이 일반적이지만, 스크리 검정이나 선행이론법에 의할 경우 고유값이 1 이하일지라도 어느 정도 유의성을 나타낸다고 본다(원태현과 정성원, 1999). 본 연구에서는 1998년부터 2001년까지 4년간의 에어로졸 금속 성분의 농도 분석 결과에 대해 요인분석을 실시하여 그 발생 기원을 조사하였으며, 최적인자의 수는 고유값 (eigenvalue) 1 이상으로(황인조와 김동술, 1998; 김종수 등, 1996) 각각에 대해 3개의 인자를 추출하였다. Varimax 회전법을 이용하여 산출한 4년간 분석 데이터의 요인분석 결과를 Table 8에 나타내었다. 추출된 3개의 인자는 전체 인자 중 80.3%의 설명력을 보였고, 그 중 첫 번째 인자가 63.7%의 설명력을 보여 Al, Ba, Ca, Co, Fe, Mg, Mn, Sr, Ti, V 성분이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 토양입자의 구성 성분들로서 제주도 고산지역 대기 에어로졸이 토양 성분들의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 두 번째 인자로는 Mo, Pb, S, Zn, Cd 등이 높은 적재값을 나타내 11.5%의 설명력을 보였다. 이들 성분들은 대부분 자동차, 난방 연료, 산업 공단 등의 발생 기원을 갖는 성분들로 이는 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있음을 의미한다. 세 번째 인자에는 Cu만이 약간 높은 적재값을 나타내며 5.1%의 비교적 낮은 설명력을 보였는데 이에 대한 적절한 해석을 하는데 어려움이 따랐다. 특히 본 연구에서는 에어로졸에 포함된 수용성 이온 성분들에 대한 분석 결과를 포함시키지 않음으

Table 8. Results of factor analysis for aerosol metal components in 1998-2001.

component	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Al	0.936	0.121	0.183
Ba	0.901	0.326	0.090
Ca	0.924	0.213	0.136
Cd	0.308	0.650	-0.572
Co	0.804	0.289	-0.009
Cr	0.715	0.261	-0.012
Cu	0.318	0.423	0.767
Fe	0.948	0.198	0.061
K	0.743	0.364	0.177
Mg	0.924	0.206	0.060
Mn	0.890	0.351	0.042
Mo	0.238	0.791	0.085
Na	0.635	0.181	-0.095
Ni	0.676	0.455	-0.114
Pb	0.200	0.895	0.114
S	0.329	0.783	0.083
Sr	0.900	0.334	0.103
Ti	0.841	0.183	0.019
V	0.927	0.246	0.017
Zn	0.218	0.870	0.052
Eigenvalue	12.7	2.3	1.0
Variance (%)	63.7	11.5	5.1
Cumulative (%)	63.7	75.2	80.3

로 말미암아 해염 성분에 의한 영향을 충분히 고려하지 못하였다. 이를 포함시킨다면 세 번째 인자가 해염 영향에 의한 성분으로 나타날 수 있을 것으로 여겨지며 예전의 연구 결과들이 이러한 예상을 뒷받침해 주고 있다(Kang et al., 2001). 결국 전체적으로 제주지역의 대기 에어로졸은 주로 토양의 영향을 가장 크게 받고 있으며, 그 다음으로 인위적 요인의 영향과 함께 해염의 영향도 어느 정도 받고 있는 것으로 추정된다.

4. 결 론

제주도 고산 측정소에 high volumn air sampler를 설치하여 1998년 1월부터 2001년 12월까지 4년간 대기 에어로졸을 채취하고 금속 성분을 분석하

였고, 그 결과로부터 봄철 황사의 영향에 의한 제주지역 대기 에어로졸의 특성을 다각도로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 금속 및 황 성분의 연평균농도를 비교해 본 결과 S>Na>Al>Ca>Fe>K>Mg>Zn>Pb>Ti>Mn>V>Ba>Sr>Cu>Ni>Cr>Mo>Cd>Co의 순으로 인위적 발생기원을 나타내는 S의 농도가 가장 높았고, 다음으로 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg 등의 해염 및 토양 성분들이 대체적으로 높은 농도를 보였다.
- 2) 계절별 농도변화를 비교해 본 결과 S 성분은 봄, 여름, 가을, 겨울철 평균농도가 각각 2227.6, 1594.5, 1463.0, 1978.0 ng/m³로 봄철에 가장 농도가 높았고, Na, Al, Ca, Fe, K, Mg의 토양 기원의 성분들도 이와 유사한 경향을 보였다.
- 3) 황사와 비황사시의 성분별 농도 차이를 조사해 본 결과 S 농도는 비황사시에 비해서 황사시에 1.9배 가량 더 높았고, 토양기원의 Al, Ca, Fe, K 성분은 각각 10.5, 9.9, 10.3, 5.6배, 그리고 Ti, Ba, Sr 성분은 각각 5.1, 6.5, 5.6배의 농도증가를 보였다. 반면에 Na와 Mg은 각각 2.4, 5.9배, Pb, Zn, V, Cd, Cr은 각각 2.1, 2.5, 5.4, 2.2, 4.3배의 농도증가를 보여 토양 성분들에 비해 상대적으로 낮은 증가 추세를 보이고 있는 것으로 확인되었다.
- 4) 풍향에 따른 각 금속 성분들의 농도 변화를 조사해 본 결과 대부분의 성분들이 북서풍 바람일 때 농도가 증가하는 경향을 보였고, 특히 북태평양 쪽에서 이동하는 남풍일 때에 비해 중국과 한반도의 대륙 방향으로부터 이동하는 북서풍 계열의 풍향일 때 대기오염물질들이 장거리 이동되어 제주지역 대기질에 크게 영향을 주는 것으로 추정된다.
- 5) 에어로졸 금속성분들 사이의 상관성을 조사한 결과 토양 성분인 Al, Fe, Ca간에 가장 높은 상관성을 보였고, 다음으로 대부분의 토양 성분들 간에 상호 상관성이 높았으며, 인위적 기원의 성분들의 경우 S와 Pb만이 비교적 높은 상관성을 보였다.
- 6) A1을 지표로 토양 농축인자를 조사해 본 결과

Ca, Fe 외에도 Cd, Ti, K, Mg 등의 성분들이 주로 토양으로부터 유래되고, Pb, Mn, Ni, Cu, V, Cr, Co, Zn, Na 등은 토양보다는 다른 요인에 의해 제주 지역 대기 에어로졸에 유입되고 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다.

- 7) 에어로졸 금속성분들의 발생기원을 확인하기 위해 요인분석을 실시한 결과 4년간 전체적으로 토양의 영향이 가장 크고, 그 다음으로 인위적 영향이 크며 해양 영향은 매우 낮게 나타났다. 에어로졸에 포함된 수용성 성분들에 대한 분석 결과가 함께 고려된다면 해양의 영향도 어느 정도 높게 나타날 것이라 여겨진다.

참고문헌

- 김원형, 강창희, 신찬성, 고선영, 홍민선 (2003), 제주도 한라산 1100 고지 대기 에어로졸의 조성 및 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 145-156.
- 김중수, 이화진, 김성홍, 정종필 (1996), Spss/PC+ 바로쓰기: 요인분석, 흥진출판사, 88-152.
- 문길주 등 (1997), 동북아 대기오염 장거리 이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(II), 국립환경연구원 연구보고서, BSG0549-5940-9.
- 문길주 등 (1998), 동북아 대기오염 장거리 이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(III), 국립환경연구원 연구보고서, BSG0557-6191-9.
- 원태현, 정성원 (1999), 한글 SPSS 통계조사분석, SPSS 아카데미, 고려정보산업, 370-375.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 (1999), 황사시 서울과 안면도의 대기중 에어로졸 수중농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.
- 전영신, 부경은, 김지영, 이미혜, 최재천, 신도식, 정관영, 김남욱, 이영복, 박기준, 민희경, 조경숙 (1999), 황사현상과 관련된 에어로졸 특성 연구, 기상연구소, MR990A20.
- 최만식, 조성록, 이동수 (1989), 서해안 분진의 화학적 조성 및 기원에 대한 연구(1), 한국대기보전학회지, 5(2), 72-83.
- 황인조, 김동술(1998), Submicron 부유분진의 화학

- 적 조성 및 분포에 관한 연구. 한국대기보전학회지. 14(1), 11-23.
- 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 (D5), 6047-6053.
- Chun Y., J. Kim, J. C. Choi, K. O. Boo, M. H. Lee and S. N. Oh (2001). Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea. *Atmospheric Environment*, 35(15), 2715-2721.
- Crawley J. and H. Sieveering (1986). Factor analysis of the MAP3S/RAINE precipitation chemistry network: 1976-1980. *Atmospheric Environment*, 20, 1001-1013.
- Guttikunda S. K., G. R. Carmichael, G. Calori, C. Eck and J. H. Woo (2003). The contribution of megacities to regional sulfur pollution in Asia. *Atmospheric Environment*, 37, 11-22.
- Huebert B. and T. Bates (1998). ACE-Asia Project prospectus. The 2nd ACE-Asia Planning Meeting, Nov. 10-13, Cheju.
- Kang C. H., W. H. Kim, C. G. Hu, Y. P. Kim, S. G. Shim and M. S. Hong (2001). Composition Analysis and Characteristics of Aerosols Collected at Kosan Site in Cheju Island, Korea during 1992-1999. Paper No. K-0099, The 12th World Clean Air & Environment Congress and Exhibition, Seoul, Korea.
- Lee J. H., Y. P. Kim, K. C. Moon, H. K. Kim and J. B. Lee (2001). Fine Particles Measurement at Two Background Sites in Korea between 1996 and 1997. *Atmospheric Environment*, 35, 635-643.
- Olsen A. R., E. C. Voldner, D. S. Bigelow, W. H. Chan, T. L. Clark, M. A. Lulis, P. K. Misra and R. J. Vet (1990). Unified wet deposition data summaries for North America: data summary procedures and results for 1980-1986. *Atmospheric Environment*, 24A, 661-672.
- Seinfeld J. H. and S. N. Pandis (1998). *Atmospheric chemistry and physics - From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, p1326.
- Seto S., M. Oohara and Y. Ikeda (2000). Analysis of precipitation chemistry at a rural site in Hiroshima Prefecture, Japan. *Atmospheric Environment*, 34, 621-628.
- Taylor S. R. and S. M. McLennan (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Sci., Cambridge, Mass., p46.
- Willeke K. and P. A. Baron (1993). *Aerosol Measurement - Principles, Techniques, and Application*. Van Nostrand Reinhold, p876.
- Zhang D. and Y. Iwasaka (1999). Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in spring of 1995 and 1996. *Atmospheric Environment*, 33, 3213-3223.

Metal Components Characteristics of Atmospheric Aerosols in Jeju Affected by Yellow Sand Effect

Won-Hyung Kim, Chang-Hee Kang, Kyung-Hee Yang,
Sung-Bin Han, Duk-Sang Jeong
Department of Chemistry, Cheju National University

Abstract

The atmospheric aerosols have been collected at Gosan in Jeju during 1998 to 2001, and their metal components have been analyzed in order to investigate the characteristics and concentration variations during the Yellow Sand periods. The mean concentrations of metal components including sulfur were in the order of S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Sr > Cu > Ni > Cr > Mo > Cd > Co. The soil originate Al, Ca, Fe, K were increased as 10.5, 9.9, 10.3, and 5.6 times, respectively, during Yellow Sand periods, and Ti, Ba, Sr were also increased as 5.1, 6.5, and 5.6 times, respectively. Most of the soil components, in particular, Al, Fe, Ca, showed high correlation coefficients. The enrichment factors show Ca, Fe, Cd, Ti, K, Mg in aerosols are originated mostly from the soil, whereas the metals such as Pb, Mn, Ni, Cu, V, Cr, Co, Zn, and Na are from other possible sources rather than soil. The factor analysis shows the metals of the aerosols at Gosan are originated primarily due to the soil, followed by anthropogenic and somehow sea-salt factors. The wind direction study showed most of the aerosol metal components increased with the northwest wind, indicating the possible transportation of air pollutants from China as well as the Korean peninsula.