

2001년 봄철 서울시 북동부지점에서 관측한 중금속성분의 농도분포

김기현^{1,*} · 최규훈¹ · 강창희²

¹세종대학교 지구정보과학과 대기환경연구소, 143-747, 서울특별시 광진구 군자동 98

²제주대학교 화학과, 690-756, 제주시 아라1동

The Metallic Composition of PM2.5 and PM10 in a Northeast Region of Seoul During the Spring 2001

Ki-Hyun Kim^{1,*} · Gyo-Hoon Choi¹ · Chang-Hee Kang²

¹Department of Geoinformation Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

²Department of Chemistry, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

Abstract : The analysis of heavy metals associated with both PM2.5 and PM10 fraction of aerosols was made from a northeast region of Seoul during the spring period of 2001. The mean concentrations of fine (PM2.5), coarse (PM10-PM2.5), and PM10 fraction were observed as 49.3 ± 29.2 , 50.5 ± 35.0 , and $95.5 \pm 46.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively during this study period. According to the results of enrichment factor (EF) analysis between different particle fractions, major elements (including Fe, Ca, Na, and K) were found to exhibit EF values of less than 10. However, heavy metal components (like Zn and Pb) showed very high EF values. Comparison of fine/coarse (F/C) concentration ratio showed that Zn, Cr, Pb, and Ni have higher ratio values than others. The metallic composition of particles was also compared on both absolute and relative terms. The results of our analysis showed an evidence that the increase in the total metallic contents is prominent during the spring period due mostly to the Asian Dust event.

Keywords : heavy metal, PM2.5, PM10, Coarse particle, Fine particle, Asian Dust

요약 : 본 연구는 서울시 북동지역의 군자동에 위치한 세종대학교를 중심으로 2001년 봄철 3월에서 4월까지 PM2.5와 PM10을 채취하여, 이들과 결합된 중금속 성분들에 대한 농도분포의 특성을 살펴보았다. 전체 관측기간 동안 산출된 PM2.5, PM10, 조대입자 영역(PM10-PM2.5)의 평균농도는 49.3 ± 29.2 , 95.5 ± 46.1 , $50.5 \pm 35.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 연구대상지역의 중금속 오염도를 살펴보기 위해 부화계수(enrichment factor: EF)를 비교한 결과, 미세 및 조대입자 모두에서 Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo 등의 중금속 성분들의 EF값이 수십, 수백의 범위에 달할 정도로 오염의 수준이 심각하다는 것을 확인할 수 있었다. 미세/조대입자 영역간에 형성되는 농도비를 비교한 결과, Zn, Cr, Pb, Ni 등이 미세입자 영역에서 뚜렷하게 더 높은 농도를 보이는 것으로 확인되었다. 중금속 농도에 대해 보다 세부적인 분석을 실시한 결과, 중금속 성분들의 농도는 상당 수준 증가하는데, 이와 같은 증가는 황사의 영향을 상당 수준 받는 것으로 나타났다.

주요어 : 중금속, PM2.5, PM10, 조대입자, 미세입자, 황사, 오염원

서 론

산업활동의 발달로 인한 화석연료의 사용 등과 같은 인위적 오염원의 증가는 이들을 통해 배출되는 오염물질들의 이동·확산·침적이 국지적인 규모를 초월하여 광역적인 규모로 확대되는 현상을 촉진하는 것으로 나타나고 있다. 궁극적으로 이러한 현상의 확

대는 동·식물 생태계의 파괴를 초래할 뿐만 아니라, 인간생존을 위협할 수 있는 요소로 간주되는 실정이다. 특히 우리가 속해있는 동북아시아 지역은 황사와 같은 대기오염물질의 장거리 이동현상이 주기적인 형태로 발생하는데, 이러한 현상의 발생은 중국과 몽골의 사막지대인 타클라마칸, 바다인자단, 텐겔, 오르도스, 고비지역, 만주지역과 황하중류의 황토지대인 황토고원 등이 그 기원지로 알려져 있다(Joussaume, 1990; Kai *et al.*, 1988). 이와 같은 황사현상은 봄철

*Corresponding author: khkim@sejong.ac.kr

의 강한 일사로 가열된 표층 황토와 사막모래가 건조한 공기 속으로 비산되면서 대류에 의해 대기 중으로 확산되는 형태로 발달한다(Iwasakai *et al.*, 1988). 우리나라는 중위도의 편서풍지대에 위치하여 봄철에는 강한 서풍기류의 영향을 많이 받으므로, 중국에서 발생한 황사의 제 1차 침전지역이 되고 있다(Chung, 1986).

황사가 나타날 때, 시정이 악화되는 현상은 황사를 통해 유입되는 분진이 가시광선을 소산시키기 때문이다. 또한 그 부유물이 육안으로 관측되는 것으로 미루어, 그 크기가 최대 수 마이크로미터의 범위에 이른다는 것을 짐작할 수 있다. 더욱이 중국 동부해안 지역의 급속한 공업화 추진으로 황사의 기류가 이 지역을 통과 할 경우, 공업지대에서 방출되는 중금속 오염물질 뿐만 아니라, 여러 가지 유해성 대기오염물질이 결합된 채로 장거리 수송에 종속될 가능성도 배제할 수 없다(Gao *et al.*, 1990). 분진은 입자의 크기가 작을수록 상대적으로 표면적이 증가하여 각종 중금속과 유해 대기오염물질과의 흡착이 용이해진다(Simpton, 1992; John *et al.*, 1990; Hindy, 1982). 황사의 유입은 황토성분의 증가를 통해 대기 중 분진성분의 조성을 변화시킬 뿐 아니라, 인체에 악영향을 미칠 수 있는 잠재적인 위해요소를 가중시킬 수 있다.

본 연구에서는 중금속 성분의 발생특성을 연구하기 위해, 2001년 봄철 기간 중 PM2.5와 PM10 성분을 채취하여 이들에 함유된 중금속 성분을 집중적으로 분석하였다. 본 논문에서는 이들 자료를 토대로 분진과 이들의 중금속 성분의 절대적 및 상대적 관계를 설명하기 위해 환경거동을 세밀하게 조망하고자 하였다.

연구방법

입자상 물질 및 이들과 결합된 중금속성분들의 채취는 서울시의 북동지역에 위치한 광진구 군자동의 세종대학교 내 5층 건물 영실관 옥상에서 이루어졌다. 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.

시료채취는 2001년 3월 19일부터 같은 해의 4월 30일까지 봄철 황사현상이 빈번하게 발생한 총 47일

의 기간 중 주중 29일을 택하여 수행하였다. 본 실험은 24시간 연속측정을 기준으로 PM2.5와 PM10 시료를 각각 1m³/h의 유속으로 총 29회 채취 후 분석하였다. 시료채취에 사용된 필터는 비교적 금속의 불순물이 적고, 여과효율이 99.95%로 알려진 0.5µm 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.

에어로졸의 금속 및 황 성분의 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 9mL와 진한 염산 3mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 10분 동안 온도를 175°C로 올리고, 다시 이 온도에서 5분간 유지시켜 총 15분간 시료를 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 불용물질을 거른(Whatman, 0.45µm PVDF syringe filter) 후 최종적으로 50mL가 되도록 초순수로 표충하였다. 이 용액을 분석용 시료로 사용하여, 각종 금속 및 황(S) 성분에 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. 그리고 분석시 ICP의 기기조건 및 각 성분들의 검출한계는 Table 1에 제시하였다.

결과 및 고찰

전체 결과에 대한 비교

시료채취 기간 동안 발생한 연구지점의 기상조건은 다음과 같이 나타났다. 온도의 경우는 10.1±5.0°C, 풍속은 2.1±0.5m/s로 나타났다. 상대습도는 56±15%로, 일반적으로 봄철의 경우 60%를 웃도는 상대습도를 유지한다는 점을 감안하여 상대적으로 적게 관측되었다. Table 2는 본 연구대상 지역에서 관측기간 동안 부유분진의 평균 농도치와 중금속 성분들의 평

Table 1. Instrumental conditions and detection limits (3σ) of ICP-AES for the analysis of metals and sulfur in this study.

Instrument	Thermo Jarrel Ash, Model IRIS-DUO	Operation Mode	Simultaneous mode
Plasma Type	Radial, Axial	RF Frequency	40.68 MHz
Auxiliary Flow	0.5 l/min	RF Power	1150 W
Nebulizer Flow	28.06 psi	Pump Rate	130 rpm
Nebulizer Pressure	35 psi, 28 psi	Air Flow Rate	Outer=16.0 l/min Inner=0.5 l/min Nebulizer=28.06 psi

Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (ppm)
Al	396.152	0.044
Ca	317.933	0.021
K	766.490	0.068
Ti	334.941	0.001
Ba	233.527	0.002
Zn	213.586	0.001
Cr	267.716	0.003
Cu	324.754	0.003
Co	228.616	0.001
Cd	214.438	0.001
Fe	259.837	0.009
Na	588.995	0.028
Mg	202.582	0.012
Mn	257.610	0.0002
Sr	346.446	0.003
V	309.311	0.001
Pb	220.353	0.021
Ni	221.647	0.002
Mo	202.03	0.002
S	182.034	0.031

균농도를 조사한 것이다. 먼저 부유분진들의 농도분석 결과를 살펴보면, PM_{2.5}의 경우는 $49.3 \pm 29.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (N=29), PM₁₀은 $95.5 \pm 46.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (N=28), 조대입자 영역(Coarse particle: PM₁₀-PM_{2.5})에서는 $50.5 \pm 35.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (N=28)으로 PM₁₀과 조대입자의 농도가 PM_{2.5}의 평균농도보다 대략 2, 4배 정도 높은 수준을 유지하였다. 각각의 부유분진들에 포함된 중금속 성분들의 평균농도에 대한 통계치는 Table 2에 제시된 것과 같이 확인되었다. Fe의 경우 암석의 풍화와 같은 토양에 기인하여 자연적으로 발생하는 것과 석탄, 중유의 연소, 산화철의 비산 등과 같은 인위적인 오염원으로부터 발생하는 것으로 구분할 수 있다(정용 등, 1987). 이 지역에서는 PM_{2.5}에서 $743 \text{ng}/\text{m}^3$, 조대영역에서 $1615 \text{ng}/\text{m}^3$ 의 농도로 후자가 전자보다 약 2배 이상의 고농도를 나타냈다. Na은 해염, 농작물 소각, 유리 제조업 등에 의해 주로 발생하는 성분

으로(Hopke *et al.*, 1985), 연구대상 지역에서는 각각 309, 399 ng/m^3 으로 확인되었다. K의 주요 오염원으로는 토양, 노천 소각, 유리 제조업, 석탄의 연소, 알루미늄 생산, 해염 등으로(Hopke *et al.*, 1985), 연구지점에서는 각각 435, 610 ng/m^3 이었다. Zn는 기름연료의 사용, 자동차 타이어 마모, 브레이크 라이닝 마모, 윤활유와 같은 자동차류의 오염원에 의한 영향을 크게 받는데(Hopke *et al.*, 1985), 각기 163, 146 ng/m^3 의 농도로 나타났다. 또한 Cr은 각각 13.7, 9.93 ng/m^3 의 농도를 보였다. Pb의 경우, 96.4, 29.7 ng/m^3 의 농도값을, Cd은 각각 4.62, 3.28 ng/m^3 으로 나타났다. 이와 같은 분석의 결과에 따르면, 토양과 같은 자연적인 배출원에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려진 주요 원소성분들(예를 들어, Al, Fe, Ca, Na, K)은 조대와 미세영역간 농도차가 2, 3배 정도로 현격하게 나타났다. 이에 반해, 자동차를 위시한 여러 가지 인

Table 2. Statistical summary of PM and the associated constituents and parameters determined during Asian dust period of 2001 in the study area. All measurements are made on a daily basis for a total of 29 days.*

Parameters	Mean	Med	SD	MAX	MIN	Mean	Med	SD	MAX	MIN	Mean	Med	SD	MAX	MIN
	(1) Fine					(3) Coarse particle (PM10-PM2.5)					(2) PM 10				
PM**	49.3	40.8	29.2	166	14.1	50.5	39.4	35.0	139	18.9	95.5	75.9	46.1	212	48.6
Al	691	378	822	3480	57.3	1853	1398	1303	5060	630	2490	1745	2031	8218	778
Fe	743	510	565	2639	309	1615	1270	974	4114	629	2321	1760	1473	6160	999
Ca	565	288	580	2387	170	1836	1575	1018	4717	831	2336	1841	1455	6435	1032
Na	309	286	150	691	115	390	296	291	1296	1.80	699	575	375	1787	265
K	435	302	354	1655	45.8	610	472	387	1672	186	1038	719	661	2566	362
Mg	231	96.2	267	1131	53.2	588	424	446	1859	232	806	504	696	2800	301
Ti	33.7	20.1	29.5	122	9.97	98.7	80.8	57.0	262	36.5	129.9	103.0	82.13	351	51.3
Mn	39.0	29.7	22.8	106	14.8	56.8	42.5	36.5	152	18.6	94.2	78.5	55.7	248	39.9
Ba	20.8	22.0	9.19	42.6	4.63	38.3	37.7	15.6	63.0	11.3	58.4	53.4	20.7	95.1	25.7
Sr	7.91	7.61	4.75	21.5	0.00	9.99	8.30	6.14	25.6	0.81	17.8	5.0	8.85	45.3	8.81
Zn	163	137	125	644	25.8	146	104	134	652	9.44	302	279	160	795	89.1
V	7.62	5.86	4.33	19.4	2.41	10.3	9.52	6.40	25.7	1.20	17.6	14.0	9.74	45.0	5.91
Cr	13.7	11.8	10.1	58.8	2.78	9.93	8.60	8.84	39.7	1.53	18.8	17.2	7.01	36.8	10.0
Pb	96.4	67.2	72.9	357	0	29.7	30.4	13.8	52.3	3.17	124	111	65.8	327	31.2
Cu	27.8	25.6	14.1	54.3	5.39	22.4	22.7	8.50	39.54	7.03	50.1	47.1	18.2	92.6	19.9
Ni	19.6	13.7	14.3	51.4	1.77	29.2	25.5	14.7	67.5	0.61	47.8	45.2	19.9	97.0	25.1
Co	2.09	1.62	1.41	4.91	0.00	2.41	2.47	1.43	5.29	0	4.32	4.09	0.99	6.66	2.80
Mo	3.75	3.56	1.58	8.31	1.25	2.89	3.48	1.67	5.31	0.19	6.50	6.30	1.14	9.42	4.54
Cd	4.62	4.40	2.25	9.97	0.77	3.28	3.42	1.64	7.45	0.58	7.66	7.66	1.57	11.0	4.65
S	1504	1292	953	5604	705	337	312	233	963	11.4	1867	1558	1081	6192	1056

*Note that N=29 for all measurements.

**The unit of PM is $\mu\text{g m}^{-3}$, while all the rest are ng m^{-3} .

위적인 오염원에 상대적으로 민감한 영향을 받는 것으로 알려진, V, Cr, Pb, Cd 등과 같은 저농도 중금속 성분들은 상대적으로 큰 농도차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

각 분진 내에 포함된 다양한 성분들의 농도분포가 상당 수준의 차이를 보인다는 점을 감안하여, 모든 자료들을 유사한 기준에서 비교하기 위해, Fig. 1에 각 성분들의 평균농도, 최대·최소값 등을 로그 스케일로 도시한 후 비교하였다. 본 그림에 의하면 이들 중금속의 농도분포는 PM2.5 내에서 $\text{Co} < \text{Mo} < \text{Cd} < \text{V} < \text{Sr} < \dots < \text{K} < \text{Ca} < \text{Al} < \text{Fe} < \text{S}$ 의 순이었으며, PM10은 $\text{Co} < \text{Mo} < \text{Cd} < \text{V} < \text{Sr} < \dots < \text{K} < \text{S} < \text{Fe} < \text{Ca} < \text{Al}$ 으로 나타났다. Coarse particle의 경우는 $\text{Co} < \text{Mo} < \text{Cd} < \text{Cr} < \text{Sr} < \dots < \text{Mg} < \text{K} < \text{Fe} < \text{Ca} < \text{Al}$ 의 순으로 저농도를 유지하는 성분들은 비슷한 순위를 유지하는 것으로 나타났으나 고농도의 성분들에서는 다소 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 이는 연구대상지역이 봄철을 맞아 교내·외에의 잦은 공사를 통해 토양과 입자상 물질들의 발생과 재비산에 의한 영향 및 황사기간에 중국에서 유입된 Aerosol에

의한 영향을 동시에 받는데 따른 결과로 생각해 볼 수 있다.

초미세먼지에 해당하는 PM2.5는 호흡성 분진 중에서도 PM10이나 조대입자영역(Coarse particle)의 경우보다 표면적이 커 체내의 폐포에 용이하게 침착하여 인체에 상대적으로 더 큰 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Simpson, 1992). 즉 조대입자와 미세입자 내에 포함된 각각 중금속들의 분율비를 통해 미세입자 (PM2.5)에서 훨씬 높은 농도를 보이는 중금속 성분들의 일반적인 분포특성을 보다 자세하게 파악하는 것은 중요한 의미를 지닐 것이다. 미세/조대입자 농도비가 1보다 작을 경우에는 조대입자 내에서 중금속 농도가 높고, 1보다 클 경우는 미세입자 내에서 중금속 농도가 높음을 나타낸다. 이들 F/C 농도비를 살펴보면, 미세입자에 더 높은 농도를 보이는 중금속 성분들은 Zn, Cr, Pb, Ni 등으로 구분되는데, 이들의 분율비는 각각 1.70, 2.35, 5.83, 2.61로 나타나 인위적 오염원의 영향에 민감한 성분임이 확인되었다. 즉, 이들 성분들은 모두 인위적 배출원 (자

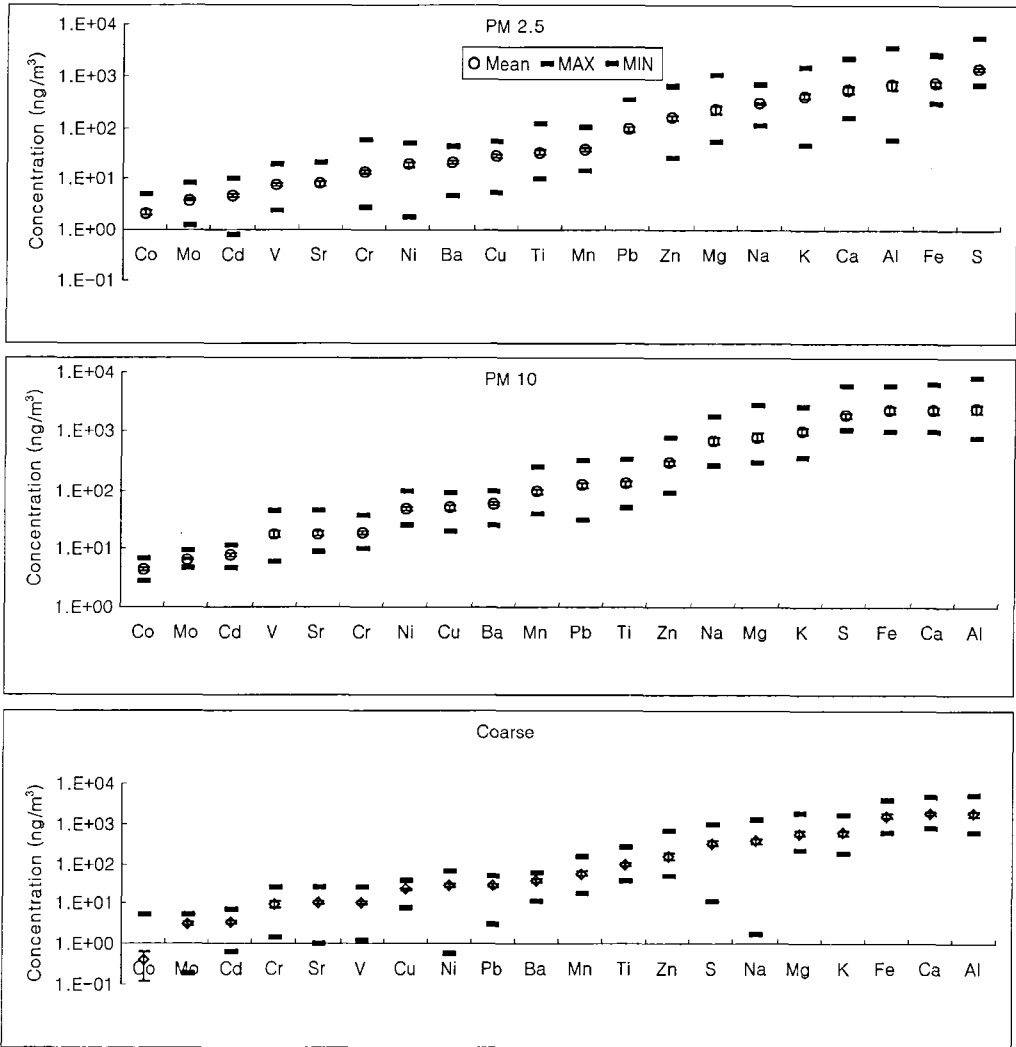


Fig. 1. Comparison of the concentrations of each component is made for both PM2.5, PM10 and coarse particle (PM10-PM2.5). Considering the wide range of distribution, the data are plotted on a logarithmic basis.

동차의 배기가스나 타이어 마모, 브레이크 라이닝 마모 등과 같은)에 의한 영향을 적절한 수준으로 반영하는 것으로 판단된다. 이미 도로 분진에 의한 중금속 오염상태에 관해 선행연구(김경웅 등, 1996)에서도, Zn과 Pb 등은 교통량이 많은 지역의 토양평균농도가 각각 214, 52 $\mu\text{g/g}$ 로 전원지역에서의 농도 각각 (107, 28 $\mu\text{g/g}$)에 비해 2배 정도 큰 것으로 확인된 바 있다. 다만 연료의 정제 및 연소로 인해 발생되는 V는 분율비가 0.97로 기타 인위적 오염원에 기인하는 중금속 성분들에 비해 다소 낮게 나타났다. 즉, V를 제외한 대부분의 주요 중금속 성분들은 분율비가 1 이상으로 분포하였으며, 주요 원소들은 그 비가 1보

다 낮게 나타나는 양분적인 경향성이 뚜렷하게 확인된다. 이에 반해 물리적 반응이나 기계적인 반응에 더 민감하여, 지각성분의 주요 구성원으로 분류되는 Al, Fe, K, Mg 등은 상대적으로 분율비가 1보다 작게 나타났다.

모든 중금속 성분들의 농도분포 양상을 보다 세밀하게 알아보기 위해, 각각의 중금속 성분들에 대한 상대적인 발생양상을 비교하기 위해 빈도분포 곡선을 Figs. 2, 3에 제시하였다. 이 그림들은 각 성분들을 유사한 기준에서 비교하기 위해 전체 농도를 11개 계급으로 구분한 후 상호 비교분석을 실시하였다(즉, 이들 자료를 동일한 계급구간으로 구분하기 위해, 각

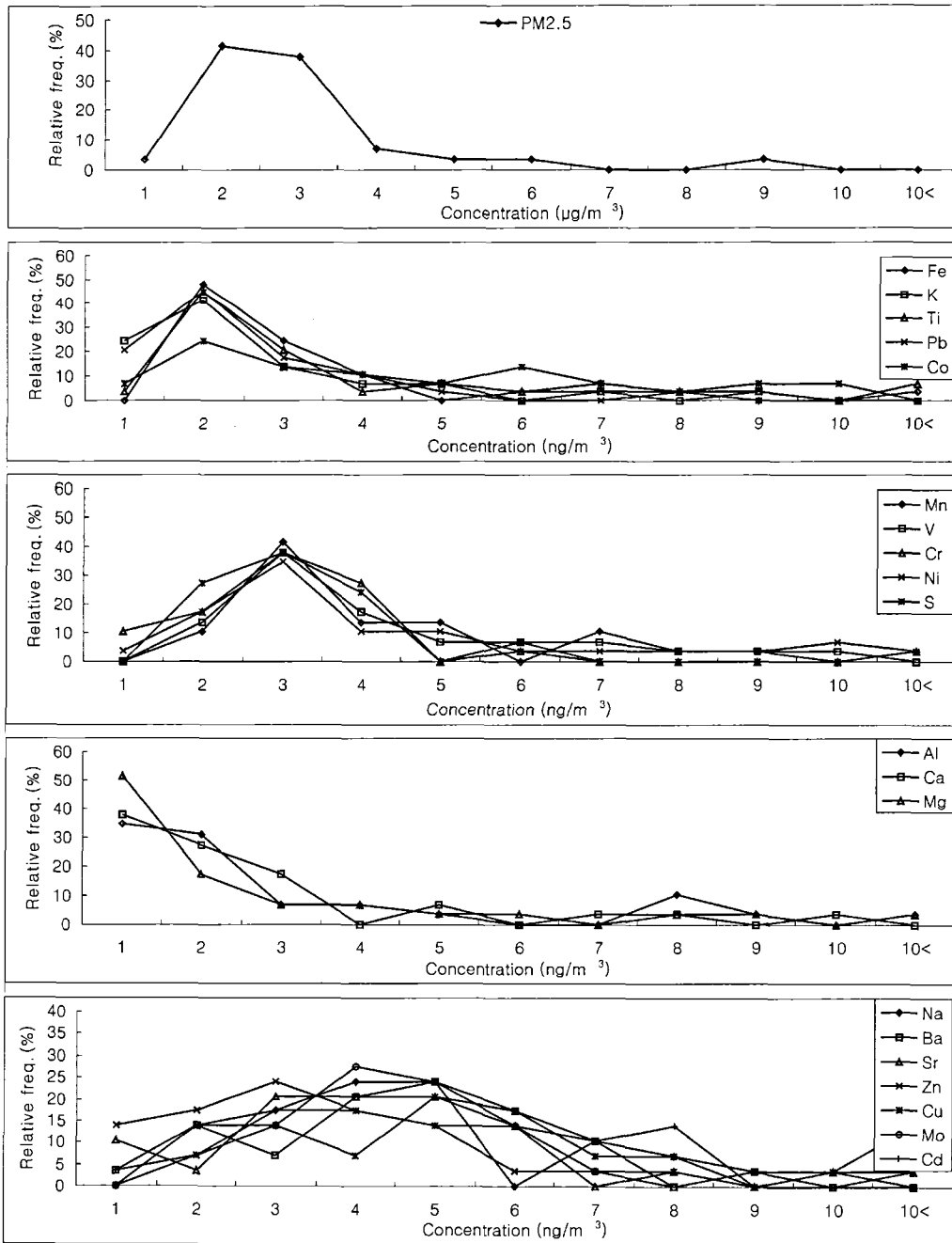


Fig. 2. Comparative analysis of frequency distribution patterns of elemental components of fine particle (PM 2.5).

성분들의 농도값에 일정한 factor를 환산하였다 (Table 3)). 먼저 Fig. 2에 의하면 PM2.5를 비롯한 Fe, K, Ti, Pb, Co 또는 Mn, V, Cr, Ni, S 등은 상대적으로 낮은 농도영역에서 가장 많은 빈도수를 보여 이들 성분들은 저농도에서 정규분포에 가까운 양상을

보이고 있다. 그리고 Al, Ca, Mg 등은 가장 낮은 농도대에서 정점을 보여 하나의 group을 형성하는 것으로 나타났다. 반면에 기타 중금속 성분들은 뚜렷한 정점을 보이지 않은 상태에서 고루 분포하는 양상을 보이고 있다. Fig. 3의 조대입자에서는 Al, Fe, Ca,

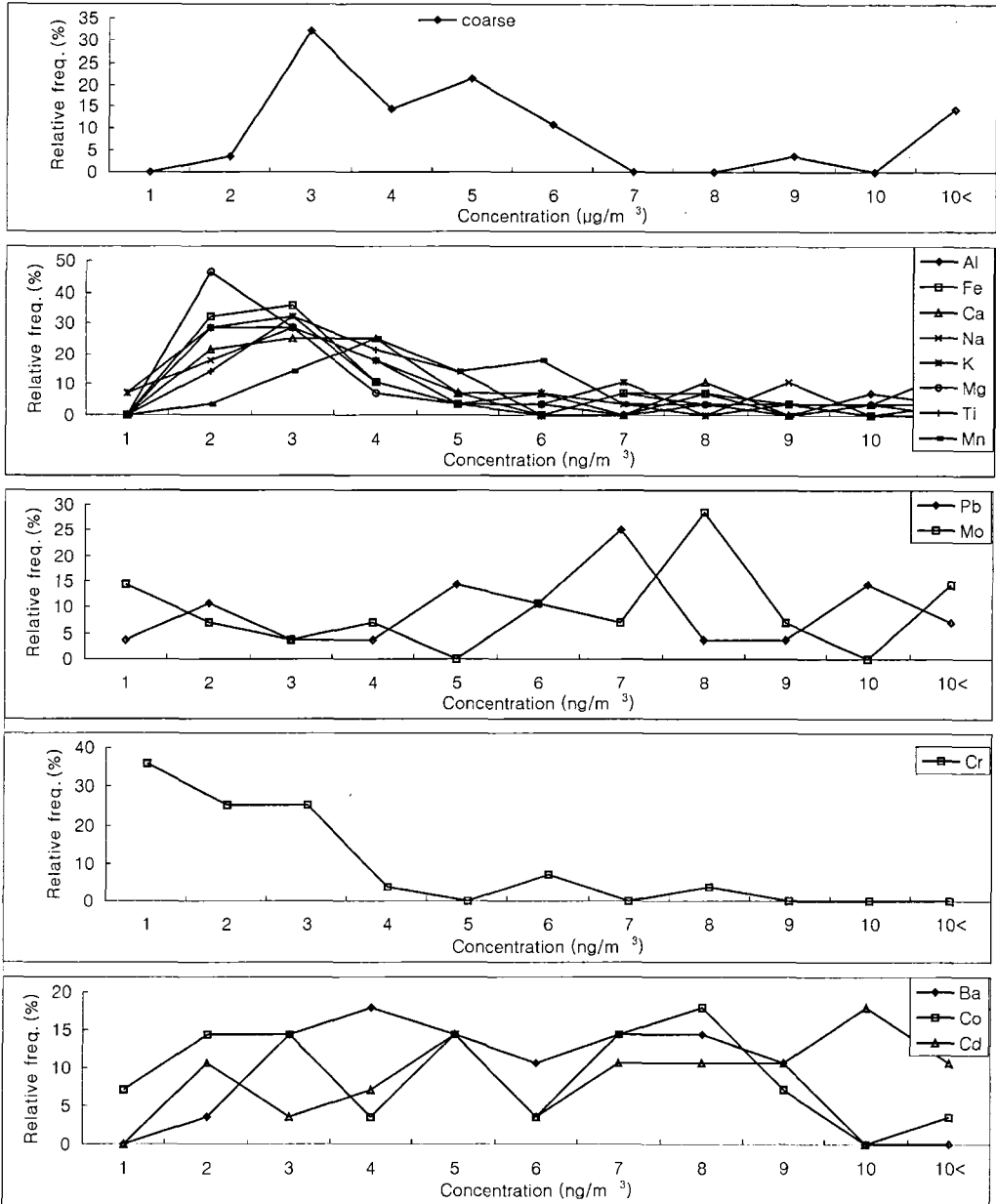


Fig. 3. Comparative analysis of frequency distribution patterns of elemental components of coarse particle (PM10-PM2.5).

Na, K 등이 낮은 농도대에서 많은 빈도수를 보이는데 반해, Pb, Mo 등은 고농도에서 많은 빈도경향을 확인할 수 있다. 또한 Cr은 가장 낮은 영역에서 최고의 빈도수를 보이다가, 점차 감소하는 경향성을 보였다. 반면, 기타 Ba, Co, Cd 등은 전체 계급구간에서 고루 분포하고 있었다. 이들 자료를 토대로 공통적으

로 확인할 수 있는 것은 자연적인 오염원에 기인하는 중금속 성분들은 상대적으로 저농도에서 많은 발생 빈도수를 보이고 있다는 것이다. 이에 반해 인위적으로 발생되는 성분들의 경우는 고농도에 편중되어 있거나, 전체 구간에서 고루 퍼져있는 경향을 보인다는 것이다.

Table 3. Concentrations of metals on the x-axis are arbitrarily adjusted by the following factors.

	PM 2.5	PM 10	Coarse
PM**	20	20	10
Al	250	1000	500
Fe	250	500	500
Ca	250	500	500
Na	75	200	100
K	200	200	200
Mg	100	250	200
Ti	10	25	25
Mn	10	20	10
Ba	5	10	7.5
Sr	2	5	2.5
Zn	50	50	50
V	2	5	2.5
Cr	5	5	5
Pb	50	25	5
Cu	5	10	5
Ni	5	10	7.5
Co	0.5	0.75	0.5
Mo	1	1	0.5
Cd	1	1	0.5
S	500	500	100

중금속 농도의 공간적인 분포양상

본 연구에서 관측된 금속성분의 농도분포가 지닌 의미를 체계적으로 이해하기 위해, 국내에서 중금속 성분들의 농도분포경향을 분석한 이전의 연구결과들과 본 연구결과와의 비교를 시도하였다. 이러한 비교는 미세영역군의 자료를 발견하기가 쉽지 않아 PM10 영역을 중심으로 이루어졌다. Table 4에는 그 결과를 제시하였다. 주로 토양성분에 연계된 Fe의 경우 비교 대상지점들에 비해 최고 대비 최저농도의 차이가 3 배 정도가 나타나는 것을 비롯하여 Mn, Ti, Ba 등의 경우도 연구대상지점에서 상대적으로 고농도를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 Table 4에 나타난 것과 같이 Cr은 대전의 공단지역과 상업지역인 서울의 신촌지역에 비해서는 저농도를, 주거지역인 원주와 서울의 불광동 지점보다는 고농도를 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 연구대상지역인 세종대 지점은 Cr 농도에 있어 공단·상업지역과 주거지역의 중간수준에 위치하고 있었다. 이는 건축자재, 철/시철 관련 금속산업이 밀집된 공단지역(대전)과 대규모의 차량통행이 빈번하게 이루어지는 서울의 신촌에서 Cr의 배

Table 4. Comparison of elemental components of PM10 among different studies conducted in Korea.

Study area	Tae Jon	Tae Gu	Won Ju	Seoul(shinchon)	Seoul(Bulgwang)	Kyung Gi(Yongin)	Seoul (Kun Ja)
Study period	1997-1999	1990-1991	1991-1995	1986	1987-1988	1993	2001
Land use type	industrial	urban	residential	commercial	residential	commercial	residential
Reference	1	2	3	4	5	6	7
Al							2490
Fe	1633	1071	1969	1374	873		2321
Ca							2336
Na						7750	699
K						1539	1038
Mg							806
Ti	32.6						130
Mn	50.3	50	45	32	61		94.2
Ba	27.6						58.4
Sr							17.8
Zn	240			976	351	540.7	302
V	13.1			174	169		17.6
Cr	25.1		8	25	5.8	18.8	18.8
Pb	243	134	149	271	174	377.2	124
Cu	41.1	16	469	46	133		50.1
Ni	37.9		19	75	38		47.8
Co	1.53						4.32
Mo							6.50
Cd	3.24		2	4	9.5	8.7	7.66
S							1867

References: (1) Kim *et al.* (2002); (2) Baek *et al.* (1997); (3) Kim *et al.* (1997); (4) Chung *et al.* (1987); (5) Lim *et al.* (1989); (6) Lee *et al.* (1996); and (7) This study.

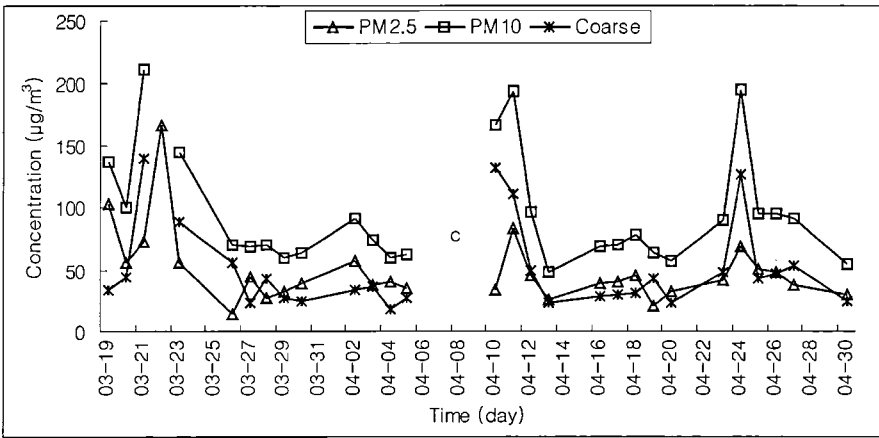


Fig. 4. Plot of temporal variation of two PM types determined during this study period.

출이 많이 이루어진데 따른 결과로 사료된다. 이에 반해 주거지역으로 대표되는 원주와 서울의 불광동 지점들에서 관측된 Cu는 연구대상지점을 비롯하여 기타 지점들보다 높게 측정되어, Cr과 전혀 반대되는 경향을 보여주었다. Pb의 경우 133ng/m³으로 상대적으로 모든 비교대상지점에 비해 낮은 농도치를 보여주었다. 이 같은 결과는 기타 비교대상지점들보다는 본 연구지점의 배출원이 상대적으로 약한 것으로 간주된다. 또한 Cd은 서울의 불광동 지점과 경기도 용인 지점에 비해서는 낮은 농도를 보이지만, 그 외의 지점들에 비해서는 비교적 높은 농도를 보여주고 있다. 이와 같은 사실들을 종합하여 볼 때, 본 연구지점은 주로 자연적인 오염원에 의한 영향을 받는 원소 성분들은 대체로 높은 농도를 보여주지만, 인위적인 오염원을 통해 배출되는 중금속 성분들은 어느 정도 오염원과 지역적 특성과의 연계성을 제시할 수 있는 것으로 사료된다.

중금속의 시간적인 분포특성

전체 관측기간 동안 부유분진과 중금속 성분들의 시간적인 분포특성을 알아보기 위해 시간의 함수로 분진의 농도분포를 도시하였다(Fig. 4). 부유분진과 마찬가지로 대부분의 중금속 성분들은 황사 발생시 (3/20~3/25, 4/7~4/12, 4/24~4/26, 기상청), 농도값들이 급격히 증가하여 황사의 영향을 비교적 뚜렷하게 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 Ba, Cu, Mo, Cd 등은 황사기간에 고농도를 보이는 경향성도 보이지만, 황사가 발생하지 않은 기간에도 고농도를 유지하는 것으로 나타났다. 황사기간과 비황사기간의 농도차이

를 간편하게 분석하고자, 앞서 분류한 황사대 비황사 기간을 구분한 후, 기간대별 농도분포를 단순하게 비교해 보았다. 황사기간 동안 Al이 비황사기간에 비해 모든 영역 내에서 대략 3, 4배의 높은 농도차이를 나타낸 것을 비롯하여 대부분의 중금속 성분들과 부유분진의 경우 Al과 비슷한 경향을 확인할 수 있었다. 즉 이렇게 황사기간에 뚜렷한 고농도의 경향을 보이는 성분들은 확연히 구분할 수 있었다. 이에 반해 Cr, Pb, Cu, Co, Mo, Cd, S 등을 위시한 일부 성분들은 실질적으로 각 분진성분의 황사/비황사 증가비의 변화에 비해 오히려 더 감소하거나 변화가 미미한 경우도 확인된다. 즉, 이들 성분들은 황사현상의 발생자체가 특별히 질적으로 이들의 고농도를 초래하였다기보다는 황사의 발현에 따른 분진량의 증가현상으로 인해, 결과적으로 금속성분의 농도가 증가하였다는 것을 유추할 수 있다. 그런데 실제로 황사가 발생하는 환경조건에서, 황사의 침적대상지역에서 장거리 이동과 관련없이 국부적으로 분진의 발생량이(강한 풍속 등에 영향받아) 상당 수준 증가할 수도 있다. 이러한 점을 감안하면, 일부 금속성분의 농도가 증가하는 현상은 단순히 외부오염원의 영향만으로 국한하는 것은 곤란할 것으로 보인다. 이러한 연구 결과는 이미 최성우, 송형도 (1999) 등이 실시한 연구에서도 확인된 바 있다. 그 결과에 의하면, 비황사기간 중 자연 발생원에 의한 Al, Fe의 평균농도는 PM10에서 411, 289ng/m³인 것에 비해 황사기간에 보인 농도는 569, 425ng/m³으로 증가하였다. 반면 Zn, Pb 등과 같이 인위적 오염원에 민감하게 영향을 받는 성분들은 황사가 발생한 기간에도 비슷한 농도를 유지하거나

비행사기간에 높게 측정된 바 있다.

연구지역의 중금속 오염정도에 대한 고찰

본 연구대상지역에서 관측된 중금속 성분의 오염도 또는 농도분포를 다양한 관점에서 분석하기 위해, 각각에서 주로 기원하는 것으로 알려진 AI을 기준으로 설정하여 각 성분들에 대한 부화계수(Enrichment Factor: EF)를 산정해 보았다. 대략 EF값이 수십(또는 수백)을 초과할 때 부화의 정도가 심각하다고 인정할 수 있다(Perry *et al.*, 1999; Zhang and Arimoto, 1993). 이를 통해 세종대 지점으로 유입되는 분진의 오염경향을 어느 정도 판단할 수 있는 기준을 제시할 것으로 기대된다. 먼저 부유분진의 입경영역에 상관없이 EF값이 공통적으로 10 미만의 수치를 나타낸 성분들을 살펴보면, 대부분 토양입자에서 풍부하게 존재하는 Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, Sr 등의 성분들로 확인되어, 그 오염의 정도가 미미한 것으로 나타났다. 또한 개별적으로 Mn, Ba, Cd 성분들은 조대입경과 PM10 내에서 EF값이 낮게 나타났으며, 석유계 연료의 연소 등을 통해 주로 배출되는 V도 이와 유사하게 나타났다. 그리고 Cr과 Co 성분들 역시 EF값이 미세영역에서 두드러지게 높게 나타나, 전형적인 중금속 성분의 부화경향을 보여주었다.

연구대상지역에서 EF값이 수백을 초과할 정도로 심각한 수준을 유지하는 성분들은 PM 2.5에서 Zn, Mo, Cr, Pb, Cu, Ni 등이, Coarse fraction 중에는 Zn, Mo 성분으로 나타났다. 이중 Zn, Mo 성분은 각각의 부유분진들 모두에서 높게 측정되어 기름연료의

사용과 자동차 타이어의 마모, 브레이크 라이닝 마모 등이 중요한 배출원으로 작용하였을 것으로 기대된다. 또한 Pb의 경우도 EF값이 PM2.5 내에서 1441로 가장 높은 수치를 나타내는 것은 물론 근대입자영역에서도 96.7로 우려할 만한 EF값이 측정되었다. 이러한 결과는 세종대 지점에 큰 도로가 인접해 있고, 학교 주변에 많은 인쇄소가 편중되어 있다는 점 등이 어느 정도 반영된 것으로 분석되어진다. 이러한 관측결과는 인체에 직접적으로 투과될 수 있는 PM2.5 내에서는 EF값이 수십, 수백을 초과하는 성분들이 가장 집중적으로 분포하고 있다는 점을 확인할 수 있다. 연구대상지역에서 발생원의 형태에 따라 나타나는 EF값의 차이를 더 세밀하게 알아보기 위해, 과거의 연구결과들과도 비교해 보았다(Table 5). 이들 자료에 의하면, Fe이 부산에서 1.5, Mn이 부산과 대전에서 각각 2.8, 2.03을 보이는 것을 비롯하여, 본 연구대상지역과 유사하게 자연 발생적인 성분들은 낮은 EF값을 유지하고 있었다. 이에 반해 Pb의 경우, 부산, 대전, 서울(흑석동) 지점들에서는 283, 718, 484의 결과를 보여 연구대상지역에서의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 반면 Cd은 부산, 대전, 서울(흑석동) 지점에서 713, 407, 92.1로 연구대상지역에서 보여주는 16.4(PM2.5), 3.78(Coarse fraction)과 같은 EF값은 여타 지역에 비해 상당히 낮은 수준이란 것을 확인할 수 있었다.

중금속 농도를 조절하는 인자

연구대상지역인 세종대 지점은 상업지역, 주거지역,

Table 5. Comparison of EF value ratio among different studies.

Study area	Pusan	Tae Jon	Seoul(Heukseok)	Present
Study period	1996	1997-1999	1989-1991	study
Reference	1	2	3	
Fe	1.5			2.39
Ti			0.3	1.55
Mn	2.8	2.03	1.7	5.8
Ba		2.18		4.57
V			2.1	11.1
Zn	131	113	175	184
Cr			0.8	25.4
Pb	283	718	484	294
Cu	32	30.6		94.7
Ni	9.1	16		244
Co	12	2		19.3
Cd	713	407	92.1	3.8

References: (1) Yang *et al.* (1999); (2) Kim *et al.* (2002); (3) Son *et al.* (1993).

자동차 도로에 의한 영향이 동시에 복합적으로 작용할 수 있어, 중금속 성분들의 농도변화는 풍계의 변화에 영향을 받을 것으로 예상되므로 풍향에 따른 농도변화를 살펴보았다. 우선 관측기간 동안 풍계의 변화를 살펴보면, 남동풍 계열이 매우 우세하게 나타나는 것으로 확인되었다. 이러한 분석에 의하면 PM2.5와 PM10의 경우, 동풍계열의 풍계가 나타날 때 서풍계열보다 대부분의 중금속 농도가 높게 측정되었다. 반면 조대영역은 서풍이 불어올 때 더 높은 농도가 나타났다. 이는 관측지점의 동쪽에 이들 성분의 분포에 직접적인 영향을 미치는 오염원의 존재를 추정할 수 있을 것이나 조대영역에서는 서풍의 풍계가 불어올 때 고농도를 보이는 양상을 보이는 것으로 보아 이에 대한 세밀한 연구가 필요할 듯 싶다. 또한 동풍계열의 풍계시 남풍이 불었을 때보다 상대적으로 고농도의 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히 K, Pb, S의 농도는 동풍풍계시 다른 풍계시보다 그 농도차이가 매우 높게 유지되고 있다. 이러한 점을 감안하면, Pb의 경우 연구지점의 동쪽에 위치한 도로에 자동차의 배기가스를 위시한 여러 가지 오염원의 영향에 민감하게 영향을 받는데 따른 결과로 사료된다. 또한 동풍계열시 Na과 S가 높게 측정되는 것은 기타 부유분진과 유사하게 이루어지고 있었다. 즉 이와 같은 결과를 보면, 연구대상지역이 서풍이 나타날 때 유입되는 황사현상과 같은 대규모적인 오염물질의 이동에도 어느 정도 영향도 받지만 이 지역의 중금속 성분의 농도는 주변환경의 영향에 의해서도 일정한 수준으로 진행되고 있다는 것을 유추할 수 있다.

오염물질들간의 상호 연관성과, 기상인자들이 오염물질들에 미치는 영향 등을 살펴보기 위해 PM2.5와 PM10에 대해 주변인자들과의 상관성 여부를 분석하였다. 대부분의 기상인자들과 분진성분들은 음의 상관성을 보이는 것이 확인된다. 특히 일반적으로 잘 나타나는 것과 같이 풍속의 증가에 따른 분진농도의 증가는 발견하기 쉽지 않다. 그러나 대신 일사량과 강한 음의 상관성이 나타나는 것이 모든 PM에서 일관성 있게 확인된다. 주로 야간대에 고농도가 나타나는 것은 대기의 안정도 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다(EPA, 1997). 이에 반해 일부 성분들은 기온이나 일사량과 강한 음의 상관관계를 보였다. 특히 일사량의 경우, PM2.5는 Na, K와 같은 주성분은 물론 V, Ni, Co, Mo, Cd 등과 강한 음의 상관성을

보였지만, PM10은 Na, K 외에 중금속 성분과는 강한 상관성을 확인하기 쉽지 않다. 기온의 경우, Co, Mo, Cd 등이 일사량과 강한 음의 상관성을 보인 반면, PM10에서는 그런 관계가 대단히 약해진다. 이처럼 기상인자와 금속성분들의 관계는 PM10보다는 극미세영역인 PM2.5에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 일반적으로 TSP와 같이 조대영역을 포함하는 분진성분이 풍속 등에 민감하게 반응하는 것과는 상당히 다른 양상을 보이는 것으로 사료된다.

기상인자들을 제외한 원소성분들간의 관계를 보면, 상관성의 강도에 상관없이 대부분의 경우에서 모두 양의 상관성을 띤다. 특히 분진의 크기에 상관없이 대부분의 주성분들은 PM2.5나 PM10 모두에서 Al, Fe, Ca, Na, K, Mg와 같은 주성분에서 강한 양의 상관성을 보였다. 이러한 결과는 지각의 구성성분으로 비교적 함량이 높아 토사 및 도로먼지의 재비산과 연계된 성분으로 상관성이 매우 높은 것으로 사료된다(최성우, 송형도, 1999). 그리고 이 뿐만이 아니라, Ti, Mn, Ba, Ni, Co, V 등과 같은 미량성분들도 주성분과 유사하게 서로 강한 양의 상관성을 보였다. 그러나 다수의 유해한 중금속 성분들에서는 이러한 관계를 확인하기가 쉽지 않다. 특히 PM2.5보다는 PM10에서 이러한 관계가 더 희소하게 나타난다. 그런데 유의할 부분은 인위적 오염원의 영향을 민감하게 반영하는 Zn, Pb, Cu간에는 상호간에 상당히 높은 상관성이 분진의 크기에 관계없이 일관성 있게 나타난다. 이들 성분들은 자동차를 위시한 일부 인위적 오염원들에게 거의 유사한 방식으로 배출원의 영향에 종속되는 것으로 사료된다(정용 등, 1987).

결론

서울시 북동부에 소재한 군자동지역을 중심으로 2001년 봄철 기간을 택하여 부유분진 및 중금속 성분들의 분포양상을 살펴보았다. 본 연구의 결과에 의하면, 지각을 구성하는 주요성분들에 비해 인체에 상대적으로 악영향을 미치는 미세먼지(PM2.5) 내에서 주요 중금속 성분들(예를 들어, Zn, Cr, Pb, Ni 등)이 고농도 상태를 유지한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 연구지역에서의 성분들에 대한 오염도를 살펴보기 위한 방편으로 EF값을 비교한 결과에서도 이와 같은 경향성이 뚜렷하게 일관성 있게 나타났다.

비록 봄철 기간 중 황사의 발생이 이들의 절대적

인 농도값이 대체로 증가하였다는 것을 확인할 수 있었지만, 이러한 변화는 성분별로 상당한 질적인 차이를 지녔다. 대체로 주성분 등에서는 분진총량의 증가비에 근사한 수준 또는 그 이상으로 농도의 증가가 확인되는데 반해, 일부 금속성분들은 이러한 경향과는 동떨어진 결과를 보여 주었다. 즉, 황사의 발생에 따른 분진농도의 증가부분에 비해 금속성분의 증가비는 상대적으로 미미하게 나타났다. 이와 같은 결과는 결과적으로 황사전체가 모든 금속성분의 증가를 유도하는 유일한 원인으로 볼 수는 없다는 것을 간접적으로 시사하는 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템연구센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 김경용, 명재훈, 안주성, 1996, 대전지역 도로분진 및 실내 분진의 중금속 오염. 한국자원공학회지, 65-68.
- 김기현, 1997, 원주시의 4대 측정망을 중심으로 한 대기중 금속의 공간적 및 장단기적 분포경향에 대한 비교연구. 한국지구과학회지, 18(3), 191-197.
- 백성욱, 송희봉, 권택규, 민경섭, 1997, 대규모 지하주차장의 실내공기 오염도조사. 1997, 춘계학술연구발표회.
- 손동현, 신혜숙, 정성윤, 정원태, 1993, ICP법에 의한 도시 대기중 중금속 농도 측정-중앙대학교를 중심으로. 한국 대기보전학회지, 9(3), 222-229.
- 양한섭, 전은주, 김영일, 옥근, 1999, 대기 에어로졸의 체류 시간과 화학조성. 한국환경과학회지, 8(1), 51-59.
- 이혜분, 김동술, 이준홍, 1996, PM-10 내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가. 한국대기보전학회지, 12(5), 555-566.
- 임영욱, 정용, 1989, 호흡성분진중의 중금속 오염도에 관한 조사연구. 한국대기보전학회지, 5(1), 68-78.
- 정용, 장재연, 주의조, 1987, 도시 대기 중 중금속에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 3(2), 18-26.
- 최성우, 송형도, 1999, 대구지역 겨울철 황사기간 중 중금속 농도의 변이특성. 환경과학논집, 4(1), 1-13.
- Chung, Y.S., 1986, Air pollution detection by satellites. The transport and deposition of air pollutant over ocean. Atmospheric Environment, 20, 617-630.
- EPA, 1997, Guidance for network design and optimum site exposure for PM2.5 and PM10. 454/R-99-022
- Gao, Y., Nakajima, T., and Tanaka, M., 1990, The coarse particle aerosols in the free troposphere around Japan. Journal of Geophysical Research, 95, 14039-14047.
- Hindy, W.C., 1982, Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. John Wiley & Sons, Inc U.S.A, 424 p.
- Hopke, P.K., 1985, Receptor Modeling in Environmental Chemistry, John & Sons, Inc, U.S.A, 322 p.
- Iwasaki, Y., Yamamoto, M., Imasu, R., and Ono, A., 1988, Transport of Asian dust (KOSA) particles: Importance of weak KOSA event on the geochemical cycle of soil particles. Tellus, 40B, 494-503.
- John, W., Wall, S.M., Ondo, J.L., and Winklmay, W., 1990, Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol. Atmospheric Environment. 24A(9), 2349-2359.
- Joussaume, 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., Okada, Y., Uchino, O., Tabata, I., Nakamura, H., Takasugi, T., and Nikaidou, Y., 1988, Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986. Journal of Meteorological Society of Japan, 66, 457-472.
- Kim, K.H., Lee, J.H., and Jang, M.S., 2002, Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea. Environmental Pollution, 118(1), 41-51.
- Perry, K.D., Cahill, T.A., Schnell, R.C., and Cahill J.M., 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.
- Zhang, X. and Arimoto, R., 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.

2002년 3월 6일 원고 접수
2002년 7월 20일 수정원고 접수
2002년 7월 20일 원고 채택