

연구논문

2005년 봄철 부산 서부지역 PM₁₀, PM_{2.5}의 금속성분 특성

전 병 일

신라대학교 환경공학과

(2007년 7월 19일 접수, 2007년 9월 3일 승인)

The Metallic Elements of PM₁₀ and PM_{2.5} in Western Region of Busan in the Springtime of 2005

Byung-Il Jeon

Department of Environmental Engineering, Silla University

(Manuscript received 19 July 2007; accepted 3 September 2007)

Abstract

The PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols were collected at Busan from March to May, 2005, and the concentrations of some metallic elements were analysed to study their characteristics. The mean concentration of PM₁₀ was $66.5 \pm 23.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a range of 22.2 to 118.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The mean concentration of PM_{2.5} was $46.1 \pm 17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with a range of 9.7 to 83.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The ratio of PM_{2.5}/PM₁₀ was 0.69 at Busan. The distribution of metallic elements for PM₁₀ and PM_{2.5} were Cd<Ni<Cr<Ti<Sr<...<Al<K<Fe<Si<Na and Cd<Cr<Ti<Ni...<K<Al<Si<Fe<Na, respectively. The mean mass concentrations of Asian dust and non Asian dust in PM₁₀ were 94.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 63.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. And The mean mass concentrations of Asian dust and non Asian dust in PM_{2.5} were 56.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 45.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The mean values of crustal enrichment factors for five elements (Cd, Cu, Pb, V and Zn) were all higher than 10, possibly suggesting the influence of anthropogenic sources. The soil contribution ratios for PM₁₀ and PM_{2.5} were 20.5% and 19.4, respectively.

Key words : PM₁₀, PM_{2.5}, metallic elements, crustal enrichment factor, Asian dust

1. 서론

비산먼지, 황사, 해염입자 등의 자연적 발생원과 산업체, 차량, 가정 난방 및 발전시설 등에서 배출

되는 인위적 발생원으로부터 부유먼지는 대기 중으로 배출된다. 최근, 부유먼지는 자체적인 조절의 필요성뿐만 아니라 잠재적 인체피해에 대한 요구로 인해 폭넓게 연구되고 있다(Schwartz *et al.*,

1996; Borja-Aburto *et al.*, 1998). 거대입자는 인체흡입 시에 코의 섬모나 기도 등에 걸려 폐 깊숙이 침투되지 못하지만, 입경 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지는 인체에 대한 직접적인 피해뿐만 아니라 금속, 유기물, 산, 이산화질소 그리고 기타 오염물질 등과 결합하여 2차 오염물질로 변한 후 인체흡입시 기관지 또는 폐포 부위에 도달, 침착하기 쉽기 때문에 건강상의 피해를 유발한다. 부유먼지의 입자 크기가 감소할수록 표면적이 증가하기 때문에 인위적 오염원에서 발생하는 독성 금속성분들과 같은 다양한 오염물질과의 흡착이 용이해져 인체에 미치는 영향도 증가하게 된다(John *et al.*, 1990; Simpson, 1992; Dockery *et al.*, 1993).

최근의 연구결과에 의하면, PM_{10} 기준치 이하 먼지농도에서도 단기(1일~5일 이하)와 장기(1년~수년) 노출에 따른 인체 건강상의 피해가 있음이 입증되었고, 조기사망, 어린이와 천식환자의 폐기능 감소, 허파조직과 구조 그리고 호흡기 계통의 방어기작의 이상변화를 지적하였다(서울시정개발연구원, 2004). 우리나라의 먼지측정은 1984년 주요도시의 총먼지(TSP) 오염도를 측정하면서 시작되었고, 1995년부터 인체에 미치는 영향이 큰 미세먼지(PM_{10})를 측정하기 위하여 TSP측정기를 PM_{10} 측정기로 교체하기 시작하였으며, 2001년 1월 교체를 완료하고 미세먼지 관리체제로 전환하였다(환경부, 2006).

국내에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 동시에 연구한 사례는 주로 서울을 포함한 수도권 지역과 부산, 대구 등 대도시를 중심으로 수행되었다. 최규훈 등(2003)은 서울지역에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 이용하여 황사와 비황사 기간의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 중 중금속 농도의 분포를 밝힌바 있고, 김병화와 김동술(2000)은 수원지역에서 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 을 포집하여 화학적 조성을 연구하였다. 부산지역에서는 최금찬 등(2000)이 입자상물질을 조대입자와 미세입자로 분류 포집하여 농도의 특성을 고찰한 바 있고, 전보경 등(2001)이 $\text{PM}_{2.5}$ 를 포집하여 이온 및 미량 금속성분의 화학적 성분을 조사하였다. 그리고 전병일 등(2005)이 2004년 봄철 자료를 이용하여 부산시의 PM_{10} 과

$\text{PM}_{2.5}$ 의 특성을 고찰한 바 있다. 우리나라는 봄철에 황사(전종갑 등, 1999; 정용승 등, 2001; 전영신 등, 2003)와 같은 자연적 발생원의 영향을 많이 받으며, 황사 발원지의 기상 및 지표면의 상태에 따라서 대기 중 미세먼지의 농도가 달라진다. 김현탁 등(2004)은 서울지역에서 봄철 TSP와 PM_{10} 의 질량농도와 중금속 농도를 황사시와 비황사시의 차이를 비교한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 2005년 봄철(3월, 4월, 5월) 부산지역에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 질량농도 특성과 금속성분의 화학적 조성을 고찰하는 것이 본 연구의 목적이다.

II. 측정 및 분석방법

먼지의 시료채취는 Fig. 1과 같이 부산시 사상구 괘법동 백양산 기슭에 위치한 신라대학교 공학관 6층 옥상에서 실시하였으며, 측정지점 주변은 북북동에서 남남서로 뻗어있는 백양산으로 둘러싸여 있으며 남서쪽으로 나지막한 작은 계곡이 있다. 측정지점으로부터 남서쪽 약 3km 떨어진 지역에 사상공업지역이 위치하고 있으나 최근, 많은 공장이 타 지역으로 이주하여 점오염원의 영향이 많이 소멸하였다. 다만, 대형 유통단지가 입지함에 따라 자동차 통행량의 증가가 뚜렷하여 선오염원에 의한 영향이 증가되고 있는 실정이다. 측정지점 주위의 점오염원은 사상지역에서 남쪽으로 5km 떨어진 신평·장

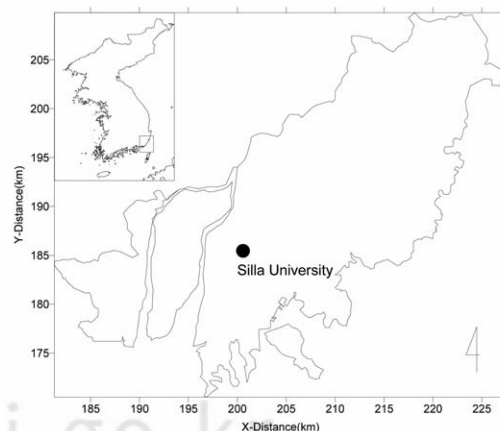


Fig. 1. PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ monitoring site in Busan

림공단에 분포하며, 남서풍이 유입될 경우에 신평·장림공단과 사상지역에서 오염물질이 이루어 본 측정지점에 영향을 미칠 수도 있다.

PM₁₀과 PM_{2.5}의 측정은 2005년 봄철(3, 4, 5월)로 측정일수는 총 34일이며, 강우가 없는 날만을 대상으로 하였다. 측정시간은 24시간으로 당일 오전 9시에 측정을 개시하여 익일 오전 9시에 종료하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 측정은 Mini Volume Air Sampler(미국 Air Metrics사 제품)를 사용하였으며, 흡인유속은 5.0l/min으로 조정하여 47mm Membrane Filter(Gelma Sciences)에 24시간 PM₁₀과 PM_{2.5} 시료를 흡인 포집하였다. 이 포집장치는 진공도가 높고 유량이 크며, 운반이 용이하고 맥동이 없이 고르게 작동하는 것이 특징이며 관성 충돌방식에 의해 10 μ m이하와 2.5 μ m이하의 입자를 분리하는 시료도입방식을 사용하고 있다. 시료포집장치는 MINI PUMP(Model MP-603T)로 최대 흡기량 5l/min(무부하시)의 펌프로 광범위한 유량변화가 가능하며 유해가스와 일반가스의 포집에도 사용할 수 있다.

PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도를 측정하기 위하여 여과지를 항온(20 $^{\circ}$ C), 항습(50%) 조건하에서 건조장치(automatic dry/up desiccator, SIBATA DUV-12)에 최소 2일간 건조하고, 감도가 0.01mg인 전자저울(Saritorious microbalance,

Germany)로 먼지시료 채취 전·후의 무게를 칭량한 후의 중량차로서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도를 구하였다. 그리고 PM₁₀과 PM_{2.5} 중의 미량 금속 성분을 정량하기 위하여 대기오염공정시험법(대기오염연구회, 2000)에 의거하여 질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법(먼지가 포집된 여과지를 비커에 옮기고, 1.3M 질산과 2.23M 염산의 혼합액(1:1)을 6.0 ml 가한 다음 초음파 추출기에서 28KHz로 2시간 동안 추출하였다. 초음파 처리가 끝나면 비커를 꺼내어 식힌 다음 여과지(Whatman, No.5A)를 이용하여 시료 용액을 여과하고, 종류수로 최종액량이 20 ml가 되도록 하여 최종액의 질산-염산 농도가 0.31M 질산과 0.67M 염산의 혼합액(1:1)이 되도록 한다)으로 전처리 한 후 ICP/AES(ICP-IRIS, Thermo Jarrell Ash Co., USA)를 이용하여 Al, Ca, Fe, Mg, K, Na, Si, Sr, Ti, V 그리고 Zn을 분석하였으며, ICP/MS를 이용하여 Cd, Cr, Cu, Mn, Ni 그리고 Pb를 정량하였다.

III. 결과 및 고찰

1. PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도와 화학적 조성

Fig. 2는 2005년 봄철 부산광역시 대기오염자동 측정망 중의 하나인 감전동 동사무소(사상공업지역

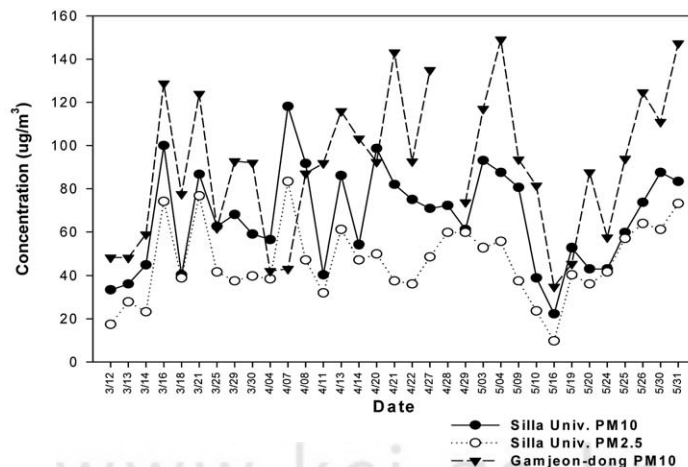


Fig. 2. Daily mean concentration(μ g/m³) of PM₁₀ and PM_{2.5} at Gamjeondong and Silla university from March 12 to May 30, 2005

내에 위치) 옥상에서 수집된 일평균 PM₁₀의 농도 자료와 본 연구에서 측정된 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 질량농도를 일별로 나타낸 것이다. 감전동 측정소는 본 연구지점과 가장 가까운 지역에 위치한 부산시의 자동차기오염측정소로서 지역용도는 공업지역으로 분류되고 있다. 측정대상일 34일 중에서 대부분 감전동의 PM₁₀ 농도가 본 연구지역에서 측정된 PM₁₀ 농도보다 높게 나타났는데, 이는 감전동측정소 주변의 산업장과 자동차배출량에 의한 영향으로 판단된다. 본 측정지점은 사상공업지역과 교통량이 많은 지역으로부터 멀리 떨어져 있고 주변이 산으로 둘러싸여 있어 상대적으로 감전동지역보다는 깨끗한 지역이라고 할 수 있다.

Table 1은 본 연구지역인 신라대학교 공학관 옥상에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도와 먼지시료 중에 포함된 각 금속원소의 평균값, 최소값, 최대값 그리고 표준편차를 나타낸 것으로, PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량 농도는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Si, Sr, Ti, V 및 Zn의 17개 항목은 ng/m^3 으로 나타내었다. 먼지 PM₁₀의 질량농도는 평균 $66.5 \pm 23.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 전병일 등(2005)의 연구에서 보인 58.2 ± 29.5

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 다소 높았고, 최대 $118.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 $22.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 측정자료 중 최대농도는 4월 7일로, 이날은 전국적으로 황사가 강하게 발생한 날이었으나, 부산지역의 황사강도는 약하였다. 최저농도는 5월 16일에 나타났다. PM_{2.5}의 질량 농도는 평균 $46.1 \pm 17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대 $83.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 $9.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 측정자료 중 최대농도는 황사가 약하게 형성된 4월 7일에 나타났고, 최저 농도는 5월 16일로 PM₁₀과 동일하였다.

2005년 봄철 부산지역의 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 비는 0.69로 PM₁₀ 중에 약 70%가 PM_{2.5} 인 것으로 나타났다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 인체에 유해한 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지의 기여율을 알 수 있다는 면에서 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 대한 기존 연구의 예를 보면, 비교적 청정지역인 제주도 고산에서 2002년 3월 2일부터 4월 11일까지 측정된 자료에서 황사시에 0.404, 비황사시에 0.503으로(공주부 등, 2002), 황사시에 낮은 값을 나타내었다. 부산지역의 경우, 김상렬 등(1999)이 1999년 5월에서 8월까지 측정된 결과에 의하면 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.70으로 본 연구의 결과와 비슷한 값을 나타내었다. 또한 전보경 등

Table 1. Statistical data of elemental concentration (ng/m^3) in PM₁₀ and PM_{2.5} at Busan

Elements	PM ₁₀ (N=34)				PM _{2.5} (N=34)			
	Mean	Min.	Max.	S.D.	Mean	Min.	Max.	S.D.
Mass($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	66.5	22.2	118.1	23.0	46.1	9.7	83.3	17.2
Al	1413.1	448.0	2797.2	599.2	839.3	96.0	1769.4	365.7
Ca	691.5	232.8	2413.3	454.8	213.0	27.7	672.2	166.4
Cd	1.4	0.4	3.7	0.7	1.1	0.3	3.2	0.6
Cr	9.4	3.2	45.8	7.4	5.0	1.0	18.5	3.2
Cu	33.1	10.3	91.3	17.2	19.8	0.9	47.4	9.4
Fe	1743.8	252.0	4322.2	750.6	1438.3	120.5	3883.0	648.0
K	925.7	425.3	1916.0	349.4	576.9	182.8	1363.3	262.9
Mg	273.9	131.4	768.3	128.7	135.4	81.4	295.0	47.8
Mn	58.1	8.9	123.8	26.1	40.4	4.3	96.4	20.9
Na	2773.7	498.3	6282.7	1176.6	1741.0	165.0	4626.1	787.4
Ni	9.1	0.8	26.7	5.4	5.6	0.4	17.6	3.5
Pb	55.8	7.7	150.0	31.3	47.6	6.2	125.7	26.7
Si	2059.1	897.2	6725.0	1157.8	1311.7	214.8	4744.4	833.4
Sr	25.0	12.3	72.0	13.5	17.2	7.4	44.6	8.5
Ti	20.8	5.1	47.2	11.7	7.2	0.9	26.1	4.8
V	52.1	5.8	213.3	42.6	46.1	0.8	188.9	39.7
Zn	489.1	133.3	1429.6	294.2	289.7	63.9	696.3	146.4

(2000)에 의하면 1998년 1, 2월과 1999년 8, 9월에 측정된 부산의 하단동의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.616, 보수동에서의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.719로 나타났다. 김기현 등(2002)이 서울시에서 2001년 봄철 황사 기간에 측정된 결과를 보면, PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.516으로 비교적 낮게 나타났는데, 이는 당시 연구 지역에서 잦은 공사에 의한 토양과 입자상물질의 발생과 재비산에 의한 영향 및 황사기간 중에 중국에서 유입된 에어로졸에 의한 영향을 동시에 받은 데 따른 결과라고 하였다. 외국의 사례를 보면, 레바논의 베이루트의 해안지역에서의 측정 예를 보면 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.336으로 PM_{2.5} 농도의 기여율이 매우 낮았다(Shaka and Saliba, 2004). 타이완의 교외지역과 농촌지역에서 낮과 밤의 측정 예를 보면, 교외지역의 낮에 0.70, 밤에 0.63, 그리고 농촌지역의 낮에 0.56, 밤에 0.72로서 지역과 시간에 따라 값의 차이가 나타났다(Fang *et al.*, 1999). 흥

공의 산업과 농촌지역에서 측정된 예를 보면, 산업 지역에서는 0.78, 농촌지역에서는 0.53이 나타나(Ho, *et al.*, 2003), 산업지역에서 배출된 오염물질과 자동차 배기가스에 의해 PM_{2.5}농도가 높게 나타났다.

Table 2는 본 연구에서 PM₁₀ 중 금속성분들의 봄철 월별농도와 2001년부터 2004년까지 동일한 지점에서 측정된 PM₁₀농도 및 금속성분농도 그리고 타 지역의 연구결과를 비교한 것이다. 2001년의 경우(황용식과 전병일, 2003) 봄, 여름, 겨울의 해당 월을 대표하는 14일을 선택해 측정된 것으로, PM₁₀농도가 비교적 높은 98.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 2002년의 경우(전병일, 2003)는 봄철 12일을 선택해 측정하였으며, 12일 중 황사발생일이 6일이나 포함되어 있어, PM₁₀농도가 상당히 높은 219.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 2003년의 경우(전병일과 황용식, 2005)는 3월에 9일, 4월에 10일 그리고 5월

Table 2. Monthly variation of elemental concentrations (ng/m³) in PM₁₀ aerosol. A parenthesis shows study period

Elements	This study(2005)				Busan ^{a)} (2001)	Busan ^{b)} (2002)	Busan ^{c)} (2003)	Busan ^{d)} (2004)	Seoul ^{e)} (2001)	Milan ^{f)} (2003)
	March	April	May	Spring						
Mass	58.8	75.0	63.1	66.5	98.2	219.8	53.8	72.9	95.5	81.4
Al	1550.4	1566.1	1144.3	1413.1	759.2	3660	449.6	1078.9	2490	840
Ca	700.8	863.5	498.2	691.5	1115.1	5670	919.3	1917.5	2336	1880
Cd	1.5	1.4	1.3	1.4	2.7	1.42	8.4	2.1	7.66	
Cr	10.4	11.0	7.1	9.4	5.5	8.34	9.0	11.3	18.8	13
Cu**	47.1	29.4	26.7	33.1		26.26	25.9	44.7	50.1	72
Fe	1841.3	1803.7	1605.9	1743.8	749.8	3710	453.3	1468.3	2321	1830
K*	1020.8	1040.8	729.6	925.7	1230.8	2780	1006	1159.8	1038	660
Mg	253.2	332.0	226.4	273.9	330.6	2220	237.2	394.3	806	
Mn	56.9	62.5	54.2	58.1	17.2	173.74	60.7	65.2	94.2	45
Na**	3736.5	2629.0	2208.5	2773.7	786.8	3240	1246	2602.2	699	
Ni*	12.0	10.0	5.9	9.1	8.6	12.60	16.0	12.7	47.8	10
Pb	62.1	58.2	48.5	55.8	39.1	30.35	218.0	83.3	124	71
Sr**	3217.2	1788.2	1484.1	2059.1	362.0	8420	793.1			2430
Sr***	38.7	24.2	15.5	25.0					17.8	
Ti	23.0	24.2	15.5	20.8					130	87
V***	102.4	44.4	22.7	52.1					17.6	10
Zn**	727.1	494.1	305.2	489.1	302.6	571.78	330.0	388.7	302	180

* P<0.05, ** P<0.01, *** P<0.001

a) 황용식과 전병일(2003), mean of 14 samples (PM₁₀) during the spring, summer and winter

b) 전병일(2003), mean of 12 samples (PM₁₀) during spring

c) 전병일과 황용식(2005), mean of 29 samples (PM₁₀) during the spring

d) 전병일 등(2005), mean of 25 samples (PM₁₀) during the spring

e) 김기현 등(2002), mean of 29 samples (PM₁₀) during spring

f) Vecchi *et al.*(2007), mean of 25 daytime samples (PM₁₀) during winter

에 10일로 총 29일간 측정된 것으로서 주중에 2일, 주말에 1일로 1주일에 3일 측정하는 것을 원칙으로 해서 측정된 것으로, 비교적 봄철을 대표하는 PM₁₀ 농도로 판단되며, PM₁₀ 농도는 비교적 낮은 53.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 2003년은 이례적으로 우리나라에 황사발생일이 없는 해로 기록된 해이기도 하다. 2004년(전병일 등, 2005)은 2003년과 비슷한 방법으로 측정되었으며, 평균 PM₁₀ 농도는 72.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2004년 봄철 황사발생일은 3일(3월에 2일, 4월에 1일)로서 황사의 강도는 약하였다. 서울지역의 경우(김기현 등, 2002)는 2001년 3월 19일부터 4월 30일까지 주중 29일을 선택해 측정된 것으로 PM₁₀ 농도가 95.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내어 대중교통수단에 의한 연료의 영향과 여러 가지 인위적 배출원의 영향 그리고 황사에 의한 영향에 의해 높은 농도를 나타낸 것으로 보인다. Milan의 경우(Vecchi, *et al*, 2007)는 이탈리아 북부의 산업지역으로 교통량과 인구유동이 많은 도시이며, 2003년 1월과 2월에 측정되었고 평균농도는 81.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비교적 높은 농도를 나타내었다.

2005년 봄철 부산지역의 PM₁₀ 중의 금속성분 농도의 분포는 Cd<Ni<Cr<Ti<Sr<... <Al<K<Fe<Si<Na으로 나타났다. 본 연구와 동일한 계절에 측정된 2002년, 2003, 2004년의 경우도 이와 유사한 결과를 보였으며, 본 연구지역은 해염에 의해 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 토양기원인 Al, Ca, Fe, Si 및 Ti는 봄철(3~5월) 중에서도 5월보다는 3~4월에 높은 농도를 보였다. 특히, Al의 경우는 부산지역의 2003년과 2004년보다는 높은 농도를 나타내었고 서울지역보다 낮게, Milan보다는 높게 나타났다. Ca의 경우 토양기원과 각종 건축물 및 건설 공사장으로부터 기인될 수 있는 성분으로서, 다른 해에 비해 상당히 낮은 농도를 나타내었으며, 서울지역과 Milan보다도 낮았다. Fe의 경우는 다른 해보다 높은 농도를 나타내었으나, 서울지역과 Milan보다는 다소 낮게 나타났다. 토사 및 도로변 먼지가 기원인 동시에 철강공업에서 기인되는 Mn은 58.1 ng/m^3 로 부산지역(2003년, 2004년)의 봄

철(60.7 ng/m^3 , 65.2 ng/m^3)보다는 다소 낮았으나, 서울지역의 봄철(94.2 ng/m^3)보다는 낮았다.

Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V 및 Zn은 인위적 기원으로서 연구지역의 대기오염을 평가하는데 중요한 지표로 활용할 수 있다. Cd은 월별(3~5월) 유의성은 보이지 않았으며, 부산지역의 과거 4년의 농도에 비해 비교적 낮은 값을 나타냈으며, 서울지역의 봄철(7.66 ng/m^3)보다는 상당히 낮았다. Cr은 봄철(3~5월) 동안 5월보다는 3~4월에 다소 높게 나타났으나 유의한 차이는 없었으며, 부산지역과는 비슷한 농도를 보였으며, 서울지역과 Milan의 봄철(18.8 ng/m^3 , 13 ng/m^3)보다는 다소 낮았다. Cu는 3월(47.1 ng/m^3), 4월(29.4 ng/m^3) 및 5월(26.7 ng/m^3)의 순으로 유의한 차이($P<0.01$)를 보였으며, 봄철 평균농도는 33.1 ng/m^3 으로서 부산지역 2004년의 봄철 평균농도(44.7 ng/m^3)보다는 다소 낮게 나타났다. Ni은 3월, 4월 및 5월 순으로 높았으며, 평균농도는 9.1 ng/m^3 로서 서울지역보다는 상당히 낮게 나타났다. 또한 Pb는 봄철(55.8 ng/m^3) 동안에는 3월이 가장 높았으나 유의한 차이는 없었으며, 부산지역 2001년, 2002년에 비해서는 높았으나, 2003년, 2004년 그리고 서울지역, Milan보다 낮았다. 차량의 타이어나 라이닝의 마모에 기인하는 Zn은 3월, 4월 및 5월의 순으로 나타났으며, 월별로 유의한 차이($P<0.01$)를 보였다. 평균농도는 489.1 ng/m^3 로서 2003, 2004년의 330.0 ng/m^3 , 388.7 ng/m^3 에 비해 높은 농도를 나타내었으며, 서울지역과 Milan보다도 높은 농도를 나타내었다.

K의 경우 해양뿐만 아니라 건초의 소각에 의해서 농도의 차이를 보이는 것으로, 봄철 평균농도는 925.7 ng/m^3 이었다. 전병일 등(2005)은 부산지역의 서쪽에 위치한 김해평야에서 농업활동에 따른 다량의 미세입자가 유입되어 봄철 고농도 현상을 보인다고 지적하였다. 이러한 현상은 부산지역의 강하먼지(황용식, 2003)에서도 확인된 바 있다. 해염입자의 유입을 평가할 수 있는 Na는 3월이 가장 높았으며, 월별(3~5월)로 유의한 차이($P<0.01$)를 보였다. 2005년 봄철 평균농도는 2773.7 ng/m^3 로

서울지역 699 ng/m³의 약 4배로 측정지점이 해양의 영향을 많이 받고 있다는 것을 상징적으로 보여 주고 있다. 또한 Mg의 경우 4월(332.0 ng/m³)에 가장 높았으며, 봄철(3~5월) 평균농도는 273.9 ng/m³로서 서울지역 806 ng/m³의 34%에 불과하였다. PM₁₀의 질량농도와 토양기원인 Al, Ca, Fe, Si 및 Ti 중 Si(P<0.01)를 제외하면 월별 유의한 차이는 없었다. 해양기원인 Na는 봄철(3~5월)의 월별 분포에서 유의한 차이(P<0.01)를 보였으나, Mg는 유의한 차이를 보이지 않았다. 또한 인위적 기원에서 Cd, Cr 및 Pb는 월별로 유의한 차이는 발견하지 못하였으나, Cu, Ni, Sr, V 및 Zn은 유의한 차이(P<0.05 이상)를 보였으며, 3월에 가장 높았다. 2005년의 봄철 금속성분과 2004년을 비교하면, Al, Fe, Na, Zn 성분이 2004년에 비해 높은 농도를 나타내었다.

Table 3은 PM_{2.5} 중의 미량 금속성분들의 2005

년 봄철 월별 분포와 동일한 지점에서의 2004년 봄철 PM_{2.5} 농도와 금속성분 특성 그리고 제주, 서울, 북경과 마드리드에서의 금속성분 특성을 나타낸 것이다. 부산지역 2005년 PM_{2.5} 농도는 46.1 µg/m³로 2004년 동일한 지점에서 측정된 33.3 µg/m³보다 높은 농도를 나타내었다. 제주의 경우(한진석 등, 2004)는 2002년 3월 20일부터 4월 6일까지 9일간 측정된 자료로 측정기간 중 황사의 발생이 없는 시기의 자료로 PM_{2.5}의 농도는 비교적 낮았다. 그러나 황사기인 4월 8일부터 10일까지 측정된 PM_{2.5}농도는 45.66 µg/m³로 비교적 높은 값을 나타내었다. 서울의 경우(김기현 등, 2002)는 Table 3에서와 설명한바 같으며, PM_{2.5} 농도는 49.3 µg/m³로 비교적인 높은 농도를 나타내었다. 북경의 경우(He *et al.*, 2001)은 교통량이 많은 도심부에서 측정된 것으로 2000년 봄철의 PM_{2.5}농도는 88.6 µg/m³로 부산에 비해 약 2배정도 높은 농도

Table 3. Monthly variation of elemental concentrations (ng/m³) in PM_{2.5} aerosol

Elements	This study(2005)				Busan ^{a)} (2004)	Jeju ^{b)} (2002)	Seoul ^{c)} (2002)	Beijing ^{d)} (2000)	Madrid ^{e)} (2003)
	March	April	May	Spring					
Mass	42.0	48.5	46.7	46.1	33.3	23.83	49.3	88.6	34.14
Al	795.4	892.1	815.0	839.3	540.0	304	691	1370	720
Ca	234.0	239.0	168.9	213.0	682.4	33	565	1710	660
Cd	1.1	1.1	1.1	1.1	1.4	0.60			
Cr	7.1	4.5	3.8	5.0	7.4		13.7		2
Cu*	26.7	17.8	16.7	19.8	23.8	2.48	27.8	28	41
Fe	1666.5	1392.2	1317.1	1438.3	834.5	222	743	1520	570
K	624.2	641.1	471.8	576.9	790.2	360	435	2570	210
Mg	128.9	149.4	125.2	135.4	108.1	117	231	310	90
Mn	38.1	41.9	40.5	40.4	35.7	9.21	39.0	90	8
Na*	2376.2	1462.7	1566.1	1741.0	1894.4	320	309		130
Ni	7.3	5.9	4.0	5.6	8.2		19.6	4	2
Pb	51.4	50.2	41.8	47.6	54.2	26.82	96.4	260	99
Si	1698.6	1174.2	1170.4	1311.7				4080	1800
Sr***	26.2	15.9	12.0	17.2		33.28	7.91		
Ti	8.1	7.6	6.1	7.2		6.18	33.7		21
V***	93.6	39.0	18.1	46.1		10.16	7.62		3
Zn*	400.9	268.8	229.0	289.7	230.2	31.23	163	425	59

* P<0.05, ** P<0.01, *** P<0.001

a) 전병일 등(2005), mean of 25 samples (PM_{2.5}) during the spring

b) 한진석 등(2004), mean of 9 samples (PM_{2.5}) during spring

c) 김기현 등(2002), mean of 29 samples (PM_{2.5}) during spring

d) He *et al.*(2001), mean of 13 samples (PM_{2.5}) during the spring

e) Artinano *et al.*(2003), mean of 38 samples (PM_{2.5}) during the annual

를 나타내었다. 마드리드의 경우(Artinano *et al.*, 2003)는 1999년 6월부터 2000년 5월까지 1년간 1주일에 1회 측정된 것으로 PM_{2.5}농도는 34.14 µg/m³을 나타내었다.

2005년 봄철 부산지역의 PM_{2.5} 중의 금속성분은 Cd<Cr<Ti<Ni...<K<Al<Si<Fe<Na으로 나타나 PM₁₀과 비슷한 경향을 나타내었다. 전병일 등(2005)은 토양기원인 Al, Ca, Fe 및 Si는 봄철에 가장 높은 농도를 보였다고 언급하였으며, 이는 봄철에는 장거리 수송에 의한 황사 및 미세입자가 대기 중 질량농도의 주된 요인으로 작용할 수 있다. Al과 Ca의 평균농도는 제주지역(한진석 등, 2004)과 북경보다 낮았으며, 특히 북경의 Ca은 부산지역(전병일 등, 2005)보다 상당히 높았는데, 이는 황사와 같은 토양성분의 영향을 많이 받은 것으로 보인다. 토양성분인 Ti의 봄철 평균농도는 7.2 ng/m³로서 제주지역보다 2.43배 낮았다. 그러나 Fe와 Mn은 제주지역, 서울지역 그리고 마드리드보다 높게 나타났으나, 북경에 비해서는 낮았다. Mg의 평균농도는 135.4 ng/m³로

서 부산지역보다는 높고 제주지역보다는 낮게 나타났으며, 월별로 유의한 차이는 보이지 않았다. K의 경우 제주지역보다 높은 농도를 보였다. 특히 인위적 기원인 Cu(P<0.05), Sr(P<0.001), V(P<0.001) 및 Zn(P<0.05)로서 모두 3월에 가장 높게 나타났으며 평균농도는 제주지역보다 높았다. Cu의 봄철 평균농도는 19.8 ng/m³로서 제주지역보다 4.42배 높게 나타나 인위적인 오염도가 높았다. Ni은 월별로 유의한 차이는 없었으며, 평균농도는 5.6 ng/m³로서 제주지역보다는 높았으나 부산지역보다는 낮았다. Pb의 평균농도는 47.6 ng/m³로서 30.61 ng/m³를 보인 제주지역보다 높았으나, 부산지역보다는 다소 낮았다. Cd, Cu, Ni, Pb, V 및 Zn은 청정지역인 제주지역보다 높게 나타나 인근 공단지역 각종 차량에 의한 이동 오염원의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다(전병일 등, 2005). Cu와 Pb은 각각 19.8 ng/m³과 47.6 ng/m³로 서울, 북경, 마드리드보다 낮은 농도를 나타내었다.

Table 4는 본 연구기간의 황사시와 비황사시의

Table 4. Elemental concentration(ng/m³) in M₁₀ and PM_{2.5} aerosols for Asian dust(AD) and non Asian dust(NAD) at Busan.

Elements	This study						Seoul ^{a)}					
	PM ₁₀ (N=34)			PM _{2.5} (N=34)			PM ₁₀ (N=28)			PM _{2.5} (N=29)		
	All	AD	NAD	All	AD	NAD	All	AD	NAD	All	AD	NAD
Mass	66.5*	94.9	63.7	46.1	56.9	45.1	95.5	144	72.5	49.3	68.2	39.3
Al	1413.1	1954.6	1360.7	839.3	1117.6	812.4	2490	4790	1400	691	1514	258
Ca	691.5	1601.1	603.5	213.0	450.5	190.0	2336	3916	1587	565	1117	274
Cd	1.4	1.7	1.3	1.1	1.4	1.1	7.66	7.73	7.63	4.62	5.18	4.33
Cr	9.4	9.2	9.5	5.0	5.9	4.9	18.8	19.5	18.5	13.7	16.2	12.4
Cu	33.1	39.1	32.5	19.8	21.7	19.6	50.1	53.0	48.7	27.8	28.6	27.3
Fe	1743.8	2108.1	1708.6	1438.3	1501.1	1432.2	2321	3960	1544	743	1310	444
K	925.7	1179.4	901.1	576.9	654.1	569.4	1038	1712	720	435	676	308
Mg	273.9	486.9	253.2	135.4*	199.8	129.2	806	1523	466	231	472	103
Mn	58.1	78.0	56.2	40.4	49.1	39.5	94.2	156	65.1	39.0	60.1	27.9
Na	2773.7	3013.1	2750.6	1741.0	1753.2	1615.2	699	999	556	309	381	381
Ni	9.1	11.0	8.9	5.6	6.7	5.5	47.8	69.8	37.4	19.6	32.8	12.7
Pb	55.8	72.4	54.2	47.6	59.5	46.4	124	133	120	96.4	107	90.9
Si	2059.1	2150.0	2050.3	1311.7	1333.3	1309.6						
Sr	25.0	31.1	24.4	17.2	18.4	17.1						
Ti	20.8	37.1	19.2	7.2	16.0	6.4						
V	52.1	61.6	51.2	46.1	56.6	45.0						
Zn	489.1	548.1	483.4	289.7	331.5	285.7	302	372	270	163	187	150

* P<0.05, P<0.01, P<0.001

a) 최규훈 등(2003)

The unit of PM is µg/m³.

PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도 및 미량금속 성분들의 농도 분포를 나타낸 것이다. PM₁₀의 질량농도는 황사시(94.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 비황사시(63.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 1.49배 높게 나타났으며 유의한 차이($P < 0.05$)가 있음을 확인하였다. 그러나 PM_{2.5}의 경우 황사시(56.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 비황사시(45.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 1.26배 높았으며, 유의한 차이는 없었다. 이는 최규훈 등(2003)의 서울지역 연구보다 황사시 농도가 다소 낮았다. 최규훈 등(2003)에 의하면, 'AD/NAD' 비가 1을 초과할 경우 황사에 의한 영향이 일정수준이상 작용하였을 가능성을 유추할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 금속성분의 'AD/NAD' 비가 1이하의 경우는 전혀 없었으며, 인위적인 오염원에서 발생하는 성분들인 Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, V 등이 비교적 1에 가까운 값을 보여 황사의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 이는 최규훈 등(2003), 최성우와 송형도(1999)의 연구에서도 이와 유사한 금속성분의 분포특성을 확인 바 있다. 지각기원성분들인 Al, Ca의 농도는 비황사시에 비해 황사시에 높은 값을 나타내었다.

PM₁₀과 PM_{2.5} 중의 Ca 및 Ti는 토양기원으로서 황사시기에 현저하게 증가하는 성분으로 황사시와 비황사시에 유의한 차이($P < 0.05$ 이하)를 보였다. 그리고 PM₁₀과 PM_{2.5} 중 Mg의 경우 황사시기에 각각 486.9 ng/m^3 과 199.8 ng/m^3 로서 황사/비황사의 비는 각각 1.92배와 1.55배로서 PM₁₀에서 많은 차이를 보였다. 이들은 황사시기와 비황사시기에 유의한 차이($P < 0.05$)를 보였다. 특히 최규훈 등(2003) 서울지역 연구에서 밝힌 PM₁₀의 황사/비황사의 비가 3.27배를 보여 본 연구보다 높은 경향을 보였다. 또한 도로변의 토사 등에서 기인되는 Mn의 경우 PM₁₀에서만 황사시와 비황사시에 유의한 차이($P < 0.01$)를 보였다. 그러나 인위적인 오염원으로 볼 수 있는 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sr, V 및 Zn은 황사시와 비황사기간에는 유의한 차이를 보이지 않았다. 인위적인 오염원은 오염시기에 높았으나, 황사 전후의 차이가 뚜렷하지 않음을 밝힌 한진석 등(2004)의 제주도 고산지역 결과와 유사하게 나타났다. 따라서 황사시와 비황사시에는 PM₁₀의 질량농

도와 미세입자(PM₁₀과 PM_{2.5}) 중 토양기원인 Ca 및 Ti와 해양기원인 Mg의 조성비율에서 유의한 차이($P < 0.05$ 이하)를 보였다.

2. 지각농축계수

1) PM₁₀과 PM_{2.5}의 지각농축계수

Table 5는 PM₁₀과 PM_{2.5}로부터 구한 각종 금속 성분들의 지각농축계수를 부산지역(전병일, 2003; 전병일 등, 2005)과 대구지역(최성우와 송형도, 2000), 제주지역(최만식과 박은주, 1999) 그리고 소백산(최만식 등, 1995)과 비교하였다. 대기부유분진 중 각 원소의 농도를 기준으로 각 원소의 지각농축계수를 계산하여 나타낸 것이다. 기준물질을 Al로 하고 각 원소의 지각 구성비는 식 (1)을 사용하여 구하였다.

$$EF = \frac{[x/Al]_{\text{sample}}}{[x/Al]_{\text{crust}}} \quad (1)$$

여기서, $[x/Al]$ 은 대기부유분진 중 또는 토양 중의 원소 x와 Al의 농도비를 나타낸다(황용식과 전병일, 2003). Al은 토양입자 유래의 전형적인 원소이기 때문에 EF값이 높을수록 인위적인 발생원 유래의 원소라고 할 수 있다. Cd은 PM₁₀을 대상으로 한 부산지역과 대구지역보다도 낮았다. 이는 본 연구가 봄철을 대상으로 수행하였기 때문에 대기 중의 토양성분인 Al이 상대적으로 높게 존재하기 때문으로 판단된다. 또한 TSP를 대상으로 한 제주지역과 소백산의 지각농축계수보다는 낮았다. PM₁₀ 중 Ni의 경우 대구지역보다 15.2배 낮게 나타났으며, 부산지역(전병일, 2003)보다는 1.8배 낮았다. PM₁₀ 중 Zn은 대구지역과 유사하였으나 제주지역 및 소백산지역과 같은 청정지역에서 측정된 TSP 중의 지각농축계수보다 높게 나타났다. 또한 10이상의 지각농축계수를 보인 인위적 기원인 Cd, Cu, Pb 및 V는 PM₁₀보다는 PM_{2.5}에서 높게 나타났으며, 미세입자 영역에서 높은 화학적 조성을 보였다고 지적한 전병일 등(2005)의 연구와 일치하였다.

Table 5. Comparison of crustal enrichment factors between PM₁₀ and PM_{2.5}

Elements	This study		Busan ^{a)}		Busan ^{b)}	Daegu ^{c)}	Jeju ^{d)}	Mt Soback ^{e)}
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}				
Al	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ca	1.1	0.6	4.4	3.2	3.3	2.1	2.87	
Cd	390.0	545.2	1266.9	1547.8	1455.3	3696.2	1156	827
Cr	5.4	4.8	12.8	15.9	5.9	10303.9		
Cu	34.6	34.8	76.8	84.8				
Fe	2.0	2.8	2.1	2.0	1.6	2.4	1.9	0.94
K	2.1	2.2	4.5	5.2	5.1			
Mg	0.8	0.6	1.7	1.0	1.7	2.6	0.85	
Mn	3.5	4.1	6.4	7.0	1.9	3.6	2.2	1.33
Na	5.0	5.3	6.1	7.0	2.6	26.9	1.02	
Ni	7.0	7.2	22.5	26.0	12.3	106.7	4.1	2.5
Pb	247.0	354.5	636.1	785.6	322.2	1175.3	621	675
Si	0.4	0.5	0.1	0.1	0.1			
Sr	3.8	4.5						
Ti	0.3	0.2						
V	22.2	33.0						
Zn	402.0	400.9	533.9	615.4	462.9	426.5	62	50.0

- a) 전병일 등(2005), Busan, E.F. of 87 samples (PM₁₀ and PM_{2.5})
- b) 전병일(2003), Busan, E.F. of 14 samples (PM₁₀)
- c) 최성우와 송형도(2000), Daegu, E.F. of 84 samples (PM₁₀)
- d) 최만식과 박은주(1999), Jeju Sungsan, E.F. of 76 samples (TSP)
- e) 최만식 등(1995), Mt. Soback, E.F. of 22 samples (TSP)

2) 월별 지각농축계수

Fig. 3은 본 연구지역에서 2005년 봄철의 월별 지각농축계수를 나타낸 것이다. 대기먼지시료에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 중 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, Si 및 Ti의 지각농축계수는 10이하로서 토양입자에 많이 함유된 자연발생원에 의한 것으로 추정된다. 봄철(3~5월)을 월별로 구분하여 살펴본 결과 Cd, Cu,

Pb, V 및 Zn은 평균 지각농축계수가 10이상으로서 인위적인 기원으로 나타났다. PM₁₀ 중 Cu, V 및 Zn은 3월에 가장 높은 지각농축계수를 보였으며, Cd은 5월에 가장 높게 나타났다. 전병일 등(2005)은 PM_{2.5} 중 인위적 기원의 지각농축계수는 4계절 중 봄철에 가장 낮게 나타났고 하였으며, 봄철 중에서도 Cd, Cu, Pb, V 및 Zn은 3월에 가장 높은 지각농축

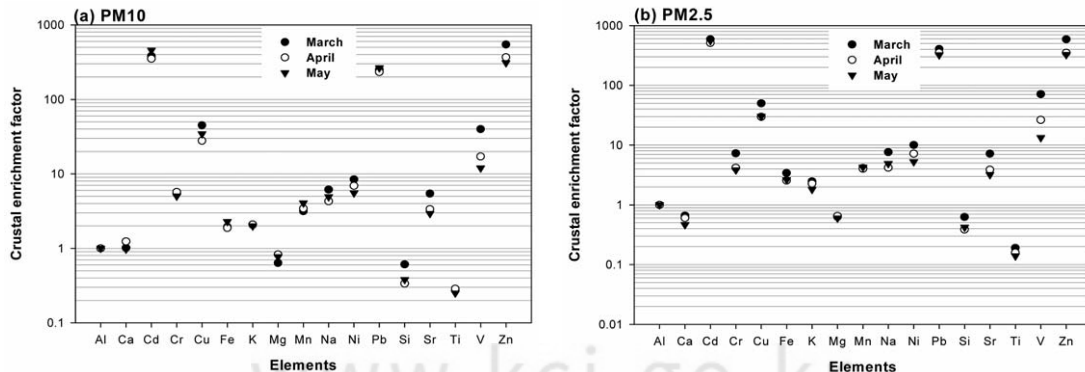
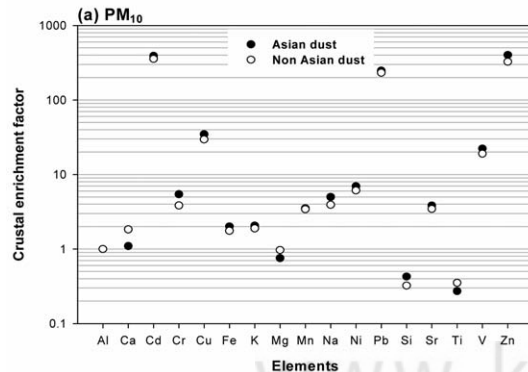


Fig. 3. Monthly comparison of enrichment factor of each element in PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols

계수를 보였다. 먼지의 계절적 차이는 한반도 전역에서 관측될 수 있는 현상으로 북서 계절풍의 영향을 받으며 주변 지역의 대기오염에 따라서 큰 차이를 줄 수 있다(최만식과 박은주, 1999). 연구 지역의 서쪽에 인접한 사상공단과 서남쪽에 위치한 신평·장림 공단으로부터 인위적 기원의 미세입자가 서풍계열의 바람을 타고 측정지점으로 이동되었음을 간접적으로 알 수 있었다(전병일 등, 2005).

3) 황사/비황사시의 지각농축계수

Fig. 4는 본 연구지역에서 2005년 봄철에 황사시와 비황사시의 미세입자(PM₁₀과 PM_{2.5}) 중 미량 금속성분의 지각농축계수를 나타낸 것이다. PM₁₀과 PM_{2.5} 중 Ca, Fe, K, Mg, Mn, Si 및 Ti는 비황사시 뿐만 아니라 황사시에도 지각농축계수가 10이하로서 자연발생원에 기인하는 것으로 추정된다. 특히, PM₁₀과 PM_{2.5}에서 인위적 기원을 갖는 Cd, Cu, Pb, V 및 Zn은 지각농축계수가 10이상으로서 황사시와 비황사시에 유사한 경향을 보였다. 전병일 등(2005)은 인위적 기원인 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 황사/비황사 값은 PM₁₀의 경우 평균 18.5%이었으며, PM_{2.5}의 경우 29.8%로서 황사시 지각농축계수가 감소함을 보였다고 지적하였다. 그러나 본 연구의 결과에서는 위와 같은 차이가 통계적으로 유의한 수준에서 나타나지 않았고, 이는 시료 채취 기간 중 미약한 황사가 부산지역에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다.



3. 토양입자의 기여율

대기 중 미세먼지에서의 토양기여율 계산은 대기 중에 부유하는 토양입자의 양을 정량적으로 구하기 위해 토양입자의 지표원소를 이용하여 토양입자의 농도와 토양기여율을 다음식과 같이 계산하였다(신은상 등, 2002; Salma *et al.*, 2001; Chan *et al.*, 1997).

$$C = \left(\frac{C_{Soil}}{C_{PM_{10}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$C_{soil} = 1.16(1.90c(Al)+2.15c(Si)+1.67c(Ti)+1.41c(Ca) + 2.09c(Fe)) \quad (3)$$

여기서, C_{soil}은 PM₁₀ 중 토양입자의 농도, c(i)는 금속성분 i의 농도, C는 토양기여율, C_{PM10}은 대기 중 PM₁₀의 농도를 나타낸다.

Fig. 5는 2005년 부산지역 월별 토양입자의 기

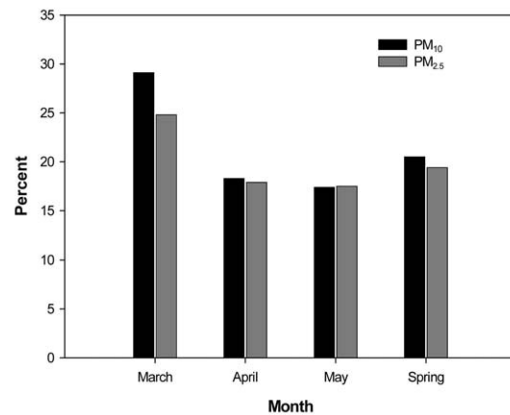


Fig. 5. Monthly predicted contributions of soil to PM₁₀ and PM_{2.5} in Busan

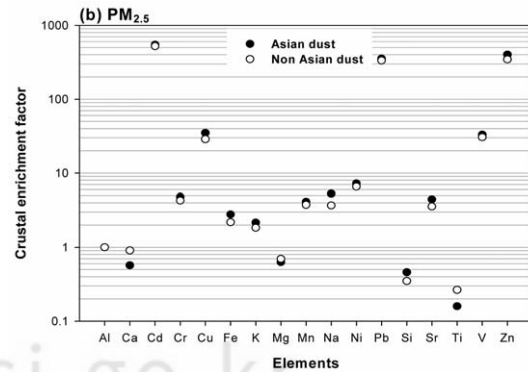


Fig. 4. Comparison of enrichment factors during Asian dust and non Asian dust for each element in PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols

여율을 나타내었다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 봄철(3~5월) 토양입자의 기여율은 각각 20.5%와 19.4%이었으며, 3월(PM₁₀=29.1%, PM_{2.5}=24.8%)에 가장 높은 기여율을 나타내었다. 2004년 봄철 부산지역(전병일 등, 2005)의 PM₁₀(18.2%)보다는 높았고 PM_{2.5}(20.0%)보다는 약간 낮게 나타났다.

IV. 결론

2005년 봄철 부산시의 신라대학교 공학관 6층 옥상에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도와 금속성분의 화학적 성분을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2005년 봄철 부산지역의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 평균 질량농도(강수일 제외)는 각각 $66.5 \pm 23.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $46.1 \pm 17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 최고농도는 각각 $118.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $83.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 평균 질량농도의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.69이었다.
2. PM₁₀ 중의 금속성분 농도의 분포는 Cd<Ni<Cr<Ti<Sr<...<Al<K<Fe<Si<Na이었으며, PM_{2.5} 중의 금속성분은 Cd<Cr<Ti<Ni.....<K<Al<Si<Fe<Na으로 나타났다.
3. 황사시와 비황사시의 PM₁₀의 질량농도는 각각 $94.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $63.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 황사시의 농도가 1.5배 높았으며, PM_{2.5}의 질량농도는 각각 $56.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $45.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 1.3배 높았다.
4. 10이상의 지각농축계수를 보인 인위적 기원인 Cd, Cu, Pb, V 및 Zn은 PM₁₀보다는 PM_{2.5}에서 다소 높게 나타났으며, 미세입자 영역에서 높은 화학적 조성을 보였다.
5. PM₁₀과 PM_{2.5}의 봄철(3~5월) 토양입자의 기여율은 각각 20.5%와 19.4%였으며, 3월에 가장 높았다.

참고문헌

공주부, 한진석, 문광주, 안준영, 정다위, 이석조, 김정은, 김영준, 2002, 제주도 고산에서의

- PM_{2.5}/PM₁₀ 성분 특성 분석, 한국대기환경학회 2002 추계학술대회 논문집, 147-148.
- 김기현, 최규훈, 강창희, 2002, 2001년 봄철 서울시 북동부지점에서 관측한 중금속성분의 농도 분포, 한국지구과학회지, 23(6), 514-525.
- 김병화, 김동술, 2000, 수원지역 대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16(2), 89-101.
- 김상렬, 정장표, 이승묵, 1999, 부산시의 PM_{2.5} 특성과 지역기준치 달성도 평가, 한국대기환경학회 1999 추계학술대회 논문집, 28-29.
- 김현탁, 전영신, 이상삼, 2004, 2003년 봄철 서울의 TSP와 PM₁₀ 농도 특성. 한국기상학회지, 40(5), 587-602.
- 대기오염연구회, 2000, 환경분석을 위한 대기환경시험법, 동화기술, 514pp.
- 서울시정개발연구원, 2004, 서울시 미세먼지 배출량 조사·분석 및 관리방안 연구, 188pp.
- 신은상, 최민규, 선우영, 정용삼, 2002, 서울지역의 PM₁₀ 중 미량원소의 특성 평가, 한국대기환경학회지, 18(5), 363-372.
- 전병일, 2003, 2002년 부산지역 봄철 황사/비황사시 PM₁₀ 중의 중금속 농도 특성, 환경영향평가, 12(2), 99-108.
- 전병일, 황용식, 이혁우, 양아름, 김현정, 설재환, 강영진, 김택훈, 장현석, 2005, 2004년 부산지역 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 중의 금속농도 특성, 한국지구과학회지, 26(6), 573-583.
- 전보경, 김창환, 최금찬, 2000, 부산지역 PM_{2.5}와 PM₁₀ 입자조성에 관한 연구, 한국대기환경학회 2000 추계학술대회 논문집, 143-144.
- 전보경, 서정민, 최금찬, 2001, 부산지역 PM_{2.5}의 이온 및 미량 금속성분의 화학적 특성, 한국환경위생학회지, 27(4), 63-71.
- 전영신, 조경숙, 김영화, 이종국, 2003a, 만주에서 발원한 황사 현상, 한국기상학회지, 39, 251-263.

- 전종갑, 이상욱, 권민호, 정용승, 1999, 황사의 장기 리 수송과 관련된 대기 순환 유형의 분류, 한국기상학회지, 35, 575-586.
- 정용승, 김학성, 낮짜가도르지 엘, 적데어 디, 첸 수젠, 2001, 1997~2000년에 발생한 황사에 관한 연구, 한국기상학회지, 37, 305-316.
- 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍, 2003, 황사와 비 황사기간의 중금속 농도 분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구. 한국대기환경학회지, 19(1), 45-56.
- 최금찬, 유수영, 전보경, 2000, 부산지역의 입자상 대기오염물질의 농도특성에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 26(2), 41-48.
- 최만식, 박은주, 1999, 제주도 대기 분진 중 미량금속의 농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(6), 727-738.
- 최만식, 이선기, 최재천, 이민영, 1995, 소백산 대기 중 입자상 물질의 화학적 특성에 관한 연구 (II)-금속원소의 계절적인 변화와 기원을 중심으로, 한국대기보전학회지, 11(2), 191-198.25).
- 최성우, 송형도, 1999, 대구지역 겨울철 황사기간 중 중금속농도의 변이특성, 환경과학논집, 4(1), 1-13.
- 최성우, 송형도, 2000, 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구, 한국대기환경학회지, 16(5), 469-476.
- 한진석, 김영성, 문광주, 안준영, 김정은, 류성운, 김영준, 공부주, 이석조, 2004, 2001년 11월 오염시기와 2002년 봄 황사시기 제주도 고산에서의 미량원소 농도 변화. 한국대기환경학회지, 20(2), 143-151.
- 환경부, 2006, 환경백서, 792pp.
- 황용식, 전병일, 2003, 부산 서부지역 대기 중 PM₁₀ 농도와 화학적 조성 분석, 한국환경과학회지, 12(6), 627-633.
- Artinano, B., P. Salvador, D. G. Alonso, and X. Querol, 2003, Anthropogenic and natural influence on the PM₁₀ and PM_{2.5} aerosol in Madrid (Spain), *Analysis of high concentration episodes, Environmental Pollution*, 125, 453-465.
- Borja-Aburto, V. H., Castillejos, M., Gold, D. R., Bierzwinski, S., and D. Loomis, 1998, Mortality and ambient fine particles in southwest Mexico city, 1993-1995, *Environmental Health Perspective*, 106(12), 849-855.
- Chan, Y. C., R. W. Simpson, G. H. Mctainsh, P. D. Vowels, D. D. Cohen, and G. M. Baily, 1997, Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Brisbane, Australia, *Atmos. Environ.*, 31(2), 3773-3785.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Splenger, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris Jr., B. G., and F. E. Speizer, 1993, An association between air pollution and mortality in six US cities, *The New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759.
- Fang, G. C., C. N. Chang, Y. S. Wu, P. P. Fu, D. G. Yang, and C. C. Chu, Characterization of chemical species in PM and PM aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan, *Atmos. Environ.*, 1999, 203-212.
- He, K., F. Yang, Y. Ma, Q. Zhang, X. Yao, C. K. Chan, S. Cadle, T. Chan, and P. Mulawa, 2001, The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China, *Atmos. Environ.*, 35, 4959-4970.
- Ho. K. F., S. C. Lee, C. K. Chan, J. C. Yu, J. C. Chow, and X. H. Yao, 2003, Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong

- Kong, *Atmos. Environ.*, 37, 31-39.
- John, W., Wall, S. M., Ondo, J. L., and W. Winklmay, 1990, Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol, *Atmospheric Environment*, 24A, 2349-2359.
- Salma, I., Maenhaut, W., Zemplen-Papp, E., and G. Zaray, 2001, Comprehensive characterisation of atmospheric aerosols in Budapest, Hungary: Physicochemical properties of inorganic species, *Atmospheric Environment*, 35, 4367-4378.
- Schwartz, J., Dockery, D. W., and L. M. Neas, 1996, Is daily mortality associated specifically with fine particles? *Journal of Air and Waste Management Association*, 46, 927-939.
- Shaka, H. and N. A. Saliba, 2004, Concentration measurements and chemical composition of PM_{10-2.5} and PM_{2.5} at a coastal site in Beirut, Lebanon, *Atmos. Environ.*, 38, 523-531.
- Simpson, R. W., 1992, A statistical analysis of particulate data sets in Brisbane, *Australia Atmospheric Environment*, 26B, 99-105.
- Vecchi, R., Marcazzan, G., and G. Valli, 2007, A study on nighttime-daytime PM₁₀ concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of Milan (Italy), *Atmos. Environ.*, 41, 2136-2144.

최종원고채택 07. 09. 10