

## 2004년 부산지역 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) 중의 금속 농도 특성

전병일<sup>1,\*</sup> · 황용식<sup>2</sup> · 이혁우<sup>3</sup> · 양아름<sup>3</sup> · 김현정<sup>3</sup> · 설재환<sup>3</sup> · 강영진<sup>3</sup> · 김택훈<sup>3</sup> · 장현석<sup>3</sup>

<sup>1</sup>신라대학교 환경공학과, 617-736 부산시 사상구 계법동 산1-1

<sup>2</sup>인제대학교 부산백병원 산업의학교실 및 산업의학연구소, 614-735 부산시 부산진구 개금동 633-165

<sup>3</sup>상영실과학교통학교, 611-089 부산시 인제구 인산동 3-5

## Characteristics of Metallic Elements Concentration of Fine Particles (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) at Busan in 2004

Byung-Il Jeon<sup>1</sup>, Yong-Sik Hwang<sup>2</sup>, Hyeok-Woo Lee<sup>3</sup>, Ah-Reum Yang<sup>3</sup>, Hyun-Jung Kim<sup>3</sup>, Jae-Hwan Seol<sup>3</sup>, Young-Jin Kang<sup>3</sup>, Taek-Hoon Kim<sup>3</sup>, and Hyun-Seok Jang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

<sup>2</sup>Institute of Industrial Medicine and Department of Environmental Occupational Medicine, Busan Paik Hospital, Inje University, Busan 614-735, Korea

<sup>3</sup>Jangyongsil Science High School, Busan 611-089, Korea

**Abstract:** PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols were collected at Busan from March, 2004 to December, 2004, and the concentrations of some metal elements were chemically analyzed to study their characteristics. The mean concentration of PM<sub>10</sub> was 58.2 µg/m<sup>3</sup> with a range of 8.3 to 161.1 µg/m<sup>3</sup>. The mean concentration of PM<sub>2.5</sub> was 29.3 µg/m<sup>3</sup> with a range of 2.8 to 65.3 µg/m<sup>3</sup>. The mean mass concentrations of Asian dust and non Asian dust in PM<sub>10</sub> were 121.5 µg/m<sup>3</sup> and 56.0 µg/m<sup>3</sup>, respectively. The mean values of crustal enrichment factors for six elements (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) were all higher than 10, possibly suggesting the influence of anthropogenic sources. The crustal enrichment factors of some heavy metal elements in non-Asian dust (NAD) were higher than those in Asian dust (AD), possibly due to anthropogenic emissions transported from industries around this area by westerly wind. The soil contribution ratios for PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were 15.2% and 17.5% on the whole, and those of AD/NAD for PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were 1.9 and 2.1, respectively.

**Keywords:** PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, metallic elements, crustal enrichment factor, Asian dust

**요 약:** 부산지역에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중의 금속 성분 농도를 파악하기 위하여 2004년 3월부터 2004년 12월까지 조사하였다. PM<sub>10</sub>의 평균농도는 58.2 µg/m<sup>3</sup>, 농도범위는 8.3-161.1 µg/m<sup>3</sup>이었으며, PM<sub>2.5</sub>의 평균농도는 29.3 µg/m<sup>3</sup>, 농도범위는 2.8-65.3 µg/m<sup>3</sup>였다. PM<sub>10</sub>의 평균 질량농도는 황사시 121.5 µg/m<sup>3</sup>, 비황사시 56.0 µg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 10 이상의 지각농축계수를 보인 성분은 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn로서 인위적기원을 받은 것으로 추정된다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 미량금속 성분의 지각농축계수는 황사시보다 비황사시에 높게 나타났으며, 인근의 공단지역으로부터 인위적 오염물질이 수송된 것으로 추정된다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 토양입자의 평균 기여율은 각각 15.2%와 17.5%였다. 토양기여율의 황사/비황사비는 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>에서 각각 1.9와 2.1로 나타났다.

**주요어:** PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 금속원소, 지각농축계수, 황사

## 서 론

입자크기가 10 µm 이상인 거대입자는 바람에 날려 올라간 토양의 먼지 및 해염을 비롯한 자연적인 원

인으로부터 발생된 것이 대부분이며, 10 µm 미만의 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차 배출가스 및 화학물질의 제조과정 등과 같은 인위적인 발생원에 의한 것과 SO<sub>2</sub>나 VOC<sub>s</sub> 등이 응축과정을 거쳐 가스상 물질에서 입자상 물질로 변환된 2차 분진으로 생성되는 것이 일반적이다. 거대입자는 인체유입 시에 코의 점막나 기도 등에 걸려 폐 깊숙이 침투되지 못하

\*Corresponding author: bijeon@silla.ac.kr  
Tel: 82-51-309-5056  
Fax: 82-51-309-5652

지만, 미세먼지의 경우, 그 자체로서 인체피해 뿐만 아니라 금속, 유기물, 산, 이산화질소 그리고 기타 오염물질 등과 결합하여 2차 오염물질로 변환 후 인체 흡입시 기관지 또는 폐포 부위에 도달, 침착하기 쉽기 때문에 건강상의 피해를 유발한다. 한 예로 미국 151개 대도시의 성인 55만 명을 대상으로 조사한 결과에 의하면, 미세먼지 오염수준 순위가 최상위인 도시는 최하위의 도시보다 사망률이 17%나 높은 것으로 분석되었다. 또한 미국의 캘리포니아 주에서는 자동차의 미세먼지로 인하여 인구 100만명 당 약 1,000명 정도가 매년 암에 걸려 추가 사망하는 것으로 추정되고 있다(김운수, 1997).

10 $\mu$ m 미만인 PM<sub>10</sub>에 관한 국내의 연구는 서울을 포함한 수도권에서 많은 연구가 수행되었다. 최규훈 등(2003)은 황사와 비황사 기간의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 중금속 농도의 분포를 밝히려 하고, 최재천 등(1999a, 1999b, 1999c)은 봄철 황사 발생시에 PM<sub>10</sub>에 포함된 중금속과 이온성분의 특성을 고찰한 바 있으며, 김병화와 김동술(2000)은 수원지역에서 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>을 포집하여 화학적 조성을 연구하였다. 대구지역에서는 최성우와 송형도(2000) 그리고 최진수와 백성욱(1998)에 의해 비량금속성분의 발생원 특성과 PM<sub>10</sub> 농도에 대해 연구하였으며, 군산지역에서는 오진만과 김득수(2001)가 PM<sub>10</sub>의 계절적 농도변화와 화학적 조성, 김성전(1999)은 기후상대가 PM<sub>10</sub> 및 일부 금속원소에 미치는 영향에 대해 연구한 바 있으며, 울산지역에서는 나덕재와 이방규(2000)에 의해 대기 중 PM<sub>10</sub> 농도와 금속원소 특성이 연구된 바 있다. Triantafyllou(2001)는 그리스의 산업지대에서 고농도 PM<sub>10</sub>이 나타난 날을 대상으로 종관기상학적 조건을 조사하였으며, McKendry(2000)는 캐나다의 Lower Fraser Valley에서 고농도 PM<sub>10</sub> 발생일에 기상학적 조건의 시간, 공간적인 변화를 연구하였고, Yang(2002)은 타이완에서 PM<sub>10</sub> 농도의 공간적, 시간적 변화를 체계적으로 연구한 바 있다.

본 연구지역인 부산에서는 최금찬 등(2000)이 워차 상물질을 조대입자와 미세입자로 분류 포집하여 농도의 특성을 고찰한 바 있고, 전보경 등(2001)이 particulate sampler로 PM<sub>2.5</sub>를 포집하여 이온 및 비량금속성분의 화학적 조성을 조사한 바 있으며, 정장표 등(2001)은 PM<sub>10</sub>의 화학적 성분을 낮과 밤으로 나누어 그 특성을 고찰하였으며, 황용식과 전병일(2003)은 부산 서부지역에서 대기 중 PM<sub>10</sub> 농도와 화학적

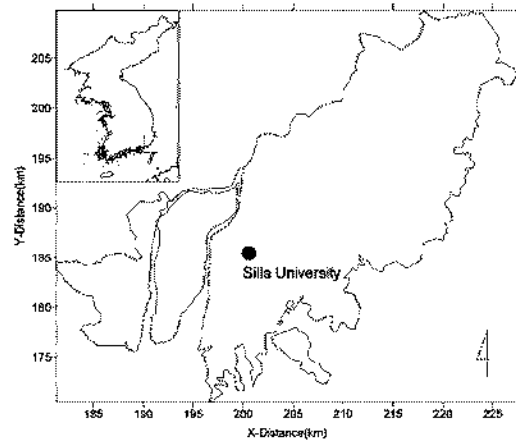


Fig. 1. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> monitoring site in Busan.

특성을 분석한 바 있다. 본 연구에서는 2004년 3월부터 2004년 12월까지 부산지역 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도 특성과 화학적 조성을 고찰하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 측정 및 분석방법

먼지의 시료채취 지점은 Fig. 1과 같이 부산시 사상구 패림동 백양산 기슭에 위치한 신라대학교 공학과 6층 옥상에서 실시하였으며, 측정지점의 주위는 백양산으로 둘러싸여 있으며 남서쪽으로 계곡이 있고 약 3km 떨어진 지역에 사상공업지역이 위치하고 있으나 최근, 많은 공장이 타 지역으로 이주하여 점오염원의 영향이 많이 소멸한데 비해, 대형 유통단지 개발에 따라 자동차 통행량의 증가가 뚜렷하여 선오염원에 의한 영향이 증가되고 있다. 측정지점 주위의 특별한 점오염원은 사상지역에서 남쪽으로 5km 떨어진 신평·장림공단에 많이 분포하고 있고, 남서풍이 유입될 경우에는 신평·장림공단과 사상지역에서 오염물질이 이류하여, 본 측정지점에 영향을 미칠 수 있다.

PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 측정은 2004년 3월 30일부터 12월 14일까지 총 87일이다. 측정일은 강우가 없는 날만을 대상으로 선택하였으며, 해당 일의 대표성을 확보하기 위해 노력하였다. 측정시간은 24시간으로 당일 오전 9시에 측정을 개시하여 익일 오전 9시에 종료하였다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 측정은 Mini Volume Air Sampler(미국 Air Metrics사 제품)를 사용하였으며,

Table 1. QA/QC results using NIST SRM

Parameter	ICP/AES		ICP/MS	
	Al	Ca	Ni	Pb
NIST SRM (2783, #38) (ng/g)	23210±530	13200±1700	68±12	317±54
This study (ng/g)	22040	13100	66	316
Recovery (%)	95.0	99.2	97.1	99.7

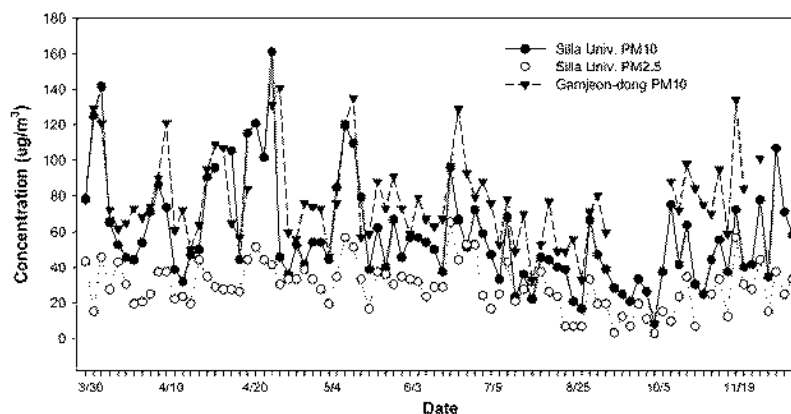


Fig. 2. Daily mean concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at Gamjeon-dong and Silla university from March 30 to December 14, 2004.

흡인유속은 5.0 l/min으로 조정하여 47 mm Membrane Filter(Gelma Sciences)에 24시간 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 시료를 흡인 포집하였다. 이 포집장치는 진공도가 높고 유량이 크며, 윤반이 용이하고 맥동이 없이 고르게 작동하는 것이 특징이며 관성충돌방식에 의해 10  $\mu\text{m}$  이하와 2.5  $\mu\text{m}$  이하 되는 입자를 분리하는 시료도입 방식을 사용하고 있다. 시료포집장치는 MINI PUMP (Model MP-603T)로 최대 흡기량 5 l/min(무부하시)의 pump로 광범위한 유량변화가 가능하며 유해가스와 일반가스의 sampling에 사용할 수 있다.

PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도를 측정하기 위하여 여과지를 황온(20°C), 황습(50%) 조건하에서 건조장치(automatic dry/upt desiccator, SIBATA DUV-12)에 최소 2일간 건조하고, 잔도가 0.01 mg인 전자저울(Sartorius microbalance, Germany)로 변지시료 채취 전·후의 무게를 칭량한 후의 중량차로서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도를 구하였다. 그리고 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중의 비량 금속 성분은 대기오염공정시험법(2000)에 따라 질산-염산 혼합액을 사용하여 초음파 추출법으로 전처리 후 정량분석하였다. 먼지가 포집된 여과지를 비커에 넣고, 1.3 M 질산과 2.23 M 염산 혼합액(1:1) 6.0 ml를 가한 다음, 2시간 동안 초음파 추출(28 KHz)

하였다. 초음파 처리가 끝난 용액은 여과(Whatman, No. 5A) 후 증류수를 사용하여 최종부피가 20 ml가 되도록 희석하였고, 이 때 용액의 질산과 염산 농도는 각각 0.31 M, 0.67 M이다. 이와 같은 방법으로 전처리를 끝낸 시료 용액을 사용하여 ICP/AES(Thermo Jarrell Ash, ICP-IRIS)로 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Zn 성분을 분석하였고, 또 ICP/MS(Perkin Elmer, Elan 6100)로 Cd, Cr, Cu, Mn, Pb를 정량분석하였다.

또한 ICP/AES를 이용한 Al, Ca, Fe, K, Mg, Na 및 Zn의 정량분석시 검출한계는 각각 3, 8, 3, 20, 7, 15 및 4  $\mu\text{g}/\text{l}$ 이었다. 그리고 ICP/MS를 이용한 Cd, Cr, Cu, Mn 및 Pb의 정량분석시 검출한계는 각각 0.09, 0.2, 0.2, 0.07 및 0.04 ng/l이었다. 각 금속 성분들의 정도를 관리하기 위하여 NIST SRM 2783(#38)을 이용하였으며, Table 1에 그 결과를 수록하였다.

## 결과 및 고찰

### PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도와 화학적 조성

Fig. 2는 부산광역시 대기오염자동측정망 중의 하나인 감전동 동사무소(사상공단 내에 위치함) 옥상에서 수집된 PM<sub>10</sub>의 일별 자료와 본 연구에서 측정된 PM<sub>10</sub>

**Table 2.** Statistical data of elemental concentrations ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) in  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  aerosols at Busan

Elements	$\text{PM}_{10}$ (N=87)				$\text{PM}_{2.5}$ (N=87)			
	Mean	Min.	Max.	S.D.	Mean	Min.	Max.	S.D.
Mass ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	58.2	8.3	161.1	29.5	29.3	2.8	65.3	13.2
Al	720.5	238.9	3441.7	592.0	416.6	172.2	1755.6	238.8
Ca	1402.4	519.4	6666.7	1051.7	600.6	294.4	1977.8	306.0
Cd	2.2	0.3	14.1	1.7	1.6	0.3	11.6	1.3
Cr	11.3	2.5	34.4	6.0	8.1	1.1	22.9	4.4
Cu	37.4	7.2	143.3	25.0	23.9	3.6	108.6	16.0
Fe	949.8	130.6	3877.5	730.5	517.3	39.2	2914.4	516.5
K	1044.0	161.1	5911.1	783.6	692.7	63.9	1888.9	298.1
Mg	321.4	86.1	1565.8	260.6	103.1	35.0	515.8	73.7
Mn	53.6	6.7	123.6	28.9	34.0	3.6	73.6	18.5
Na	1730.1	133.3	11066.7	1766.0	1146.0	11.1	8844.4	1258.1
Ni	15.0	3.1	113.6	12.5	10.0	1.9	23.9	4.3
Pb	73.3	11.7	241.4	38.4	52.3	9.4	150.0	27.2
Zn	331.2	52.8	881.7	268.2	220.7	20.6	612.1	124.5

및  $\text{PM}_{2.5}$  질량농도를 일별로 나타내었다. 2004년의 연구기간 중 황사발생은 3월 30일, 31일과 4월 23일이었으며, 황사의 강도는 다소 낮았다. 삼전동과 신라대의  $\text{PM}_{10}$ 의 측정자료는 0.67의 유의한 상관( $p < 0.001$ )으로서 자료의 해석에 있어 유사성이 확인되었다.

Table 2는 본 연구지역인 신라대학교 공학관 옥상에서 측정된  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 의 질량농도와 먼지 시료 중에 포함된 각 금속원소의 평균값, 최소값, 최대값 그리고 표준편차를 나타낸 것으로,  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 의 질량 농도는  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, Al, Ca, Cd, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, 및 Zn의 13개 항목은  $\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 나타내었다. 먼저  $\text{PM}_{10}$ 의 질량농도는 평균  $58.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최대  $161.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최소  $8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 측정자료 중 최대농도는 부산지역에 황사가 약하게 형성된 2004년 4월 23일 09시부터 23일 09시까지 측정된 날에 나타났으며, 최저농도는 2004년 10월 5일로 나타났다.  $\text{PM}_{2.5}$ 의 질량 농도는 평균  $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최대  $65.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 최소  $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 측정자료 중 최대농도는 2004년 6월 22일로 나타났고, 최저 농도는 2004년 10월 5일로  $\text{PM}_{10}$ 과 동일하였다.

$\text{PM}_{10}$  중 Al의 평균농도는  $720.5 \text{ng}/\text{m}^3$ 이며, 최대농도와 최소농도는 각각  $3441.7 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $238.9 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었고, Ca의 평균농도는  $1402.4 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $6666.7 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $519.4 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Fe는 암석의 풍화와 같은 보양에 기인하여 자연적으로 발생하는 것과 석탄, 중유의 연소, 산화철의 비산 등과 같은 인위적인 오염원으로부터 발생하며, 평균농도는  $949.8 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $3877.5 \text{ng}/$

$\text{m}^3$ ,  $130.6 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. K과 Mg의 평균농도는 각각  $1044.0 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $321.4 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $5911.1 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $161.1 \text{ng}/\text{m}^3$ 과  $1565.8 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $86.1 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Na의 평균농도는  $1730.1 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대  $11066.7 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최소  $133.3 \text{ng}/\text{m}^3$ , 이었다. Zn의 평균농도는  $331.2 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $881.7$ ,  $52.8 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. 이는 산업도시인 울산지역을 중심으로 조사한 나덕재와 이명규(2000)의  $49.5 \text{ng}/\text{m}^3$ 보다 높은 농도를 보였다. Cd의 평균농도는  $2.2 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $14.1 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $0.3 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Cr의 평균농도는  $11.3 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는  $34.4 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $2.5 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Mn의 평균농도는  $53.6 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $123.6 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $6.7 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Ni의 평균농도는  $15.0 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $113.6 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $3.1 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Pb의 평균농도는  $73.3 \text{ng}/\text{m}^3$ , 최대농도와 최소농도는 각각  $241.4 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $11.7 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다. Cu의 평균 농도는  $37.4 \text{ng}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 최대농도와 최소농도는 각각  $143.3 \text{ng}/\text{m}^3$ 과  $7.2 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었다.

$\text{PM}_{2.5}$  중의 보양기원으로 볼 수 있는 Al, Ca 및 Fe의 평균농도는 각각  $416.6 \text{ng}/\text{m}^3$ ,  $600.6 \text{ng}/\text{m}^3$ , 및  $517.3 \text{ng}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 이들 성분의 최대농도를 보인 것은 2004년 4월 18일 이었다. 해양기원으로 볼 수 있는 Na와 Mg의 평균농도는 각각  $1146.0 \text{ng}/\text{m}^3$ 과  $103.1 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었으며, Na의 최대농도는  $8844.4 \text{ng}/\text{m}^3$ 으로서 2004년 4월 18일이었다. K의 평균농도는  $692.7 \text{ng}/\text{m}^3$ 이었으며, 최대농도는  $1888.9 \text{ng}/\text{m}^3$ 으로서 2004년 4월 18일이었다.

Table 3. Seasonal variation of elemental concentrations (ng/m<sup>3</sup>) in PM<sub>10</sub> aerosols

Elements	This study					Busan <sup>a</sup>	Seoul <sup>b</sup>	Seoul <sup>c</sup>	Daegu <sup>d</sup>	Milan <sup>e</sup> (Italy)
	Spring	Summer	Fall	Winter	Mean					
Mass <sup>***</sup>	72.9	47.9	41.5	67.7	58.2					
Al <sup>***</sup>	1078.9	379.5	465.7	700.0	720.5	759.2	1322	1800	326.3	1420
Ca <sup>***</sup>	1917.5	837.0	1055.8	1720.8	1402.4	1115.1	893	1280		1415
Cd	2.1	2.7	2.0	2.2	2.2	2.7		2.4	3.0	
Cr	11.3	9.4	12.7	16.2	11.3	5.5	6.3	8.6	41.0	7
Cu	44.7	26.8	36.9	34.8	37.4					
Fe <sup>***</sup>	1468.3	524.4	501.0	931.4	949.8	749.8	1001	1320	530.5	1835
K	1159.8	805.4	1136.1	891.0	1044.0	1230.8	851			480
Mg <sup>***</sup>	394.3	190.4	249.4	792.2	321.4	330.6		460		
Mn <sup>**</sup>	65.2	39.6	47.1	61.3	53.6	17.2	34.5	42.0	13.5	35
Na <sup>***</sup>	2602.2	901.8	1253.1	919.4	1730.1	786.8	559	510		
Ni	12.7	20.2	13.4	14.2	15.0	8.6	33.6	7.3	32.0	5
Pb	83.3	63.6	68.1	64.0	73.3	39.1	248	70.5	58.3	215
Zn <sup>*</sup>	388.7	329.6	253.1	205.3	331.2	302.6	323	202	118.5	213

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$

<sup>a</sup>신병일 (2003), mean of 14 samples (PM<sub>10</sub>) during the spring, summer and winter

<sup>b</sup>신은상 등 (2002), mean of 60 samples (PM<sub>10</sub>) during the annual

<sup>c</sup>최재천 등 (1999c), mean of 45 samples (PM<sub>10</sub>) during the spring

<sup>d</sup>최성우의 송형호 (2000), mean of 84 samples (PM<sub>10</sub>) during the annual

<sup>e</sup>Marcazzan et al. (2001), mean of 47 samples (PM<sub>10</sub>) during the winter and summer

Table 3은 본 연구에서의 PM<sub>10</sub> 중 금속성분들과 타 지역의 연구결과를 비교한 것이다. 영양기원인 Al, Ca 및 Fe은 봄철(3~5월)에 가장 높은 농도를 보였다. 특히, Al의 경우 봄철의 농도는 서울지역(최재천 등, 1999c)보다 낮게 나타났다. 평균농도는 부산지역(전병일, 2003)과 유사하였으나, 대구지역(최성우와 송형호, 2000)보다 높았다. Ca의 경우 영양기원과 각종 건축물 및 건설 공사상으로부터 기인될 수 있는 성분으로서, 봄철의 경우 서울지역(최재천 등, 1999c)보다 높게 나타났으나, 평균농도는 Milan(Marcazzan et al., 2001)과 유사하였으며, 서울지역(신은상 등, 2002)보다는 높았다. Fe의 경우 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 서울지역(최재천 등, 1999c)보다 다소 높게 나타났다. 평균농도는 대구지역보다 높고 서울지역(최재천 등, 1999c)과 유사하였다. 토사 및 도로면 먼지가 기원인 동시에 철강공업에서 기인되는 Mn은 봄철(65.2 ng/m<sup>3</sup>)이 가장 높았고, 여름철(39.6 ng/m<sup>3</sup>)에 가장 낮았으며, 평균농도는 부산지역(전병일, 2003), 서울지역(최재천 등, 1999c; 신은상 등, 2002) 및 대구지역보다는 높게 나타났다.

Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn은 인위적 기원으로서 연구지역의 대기오염을 평가하는데 중요한 지표로 활용할 수 있다. Cd은 여름철(6~8월)에 가장 높게 나타났

으며, 봄철의 경우 서울지역(최재천 등, 1999c)보다는 다소 낮았으나 지역별로 큰 편차를 보이지는 않았다. Cr은 겨울, 가을, 봄 및 여름철 순으로 조사되었으며, 봄철의 경우 서울지역(최재천 등, 1999c)보다는 다소 높았으나 평균농도는 부산지역(전병일, 2003), 서울지역(신은상 등, 2002)과 Milan(Marcazzan et al., 2001)보다는 다소 높았으며, 대구지역과는 많은 차이를 보였다. Cu는 봄철(44.7 ng/m<sup>3</sup>), 가을철(36.9 ng/m<sup>3</sup>), 겨울철(34.8 ng/m<sup>3</sup>) 및 여름철(26.8 ng/m<sup>3</sup>) 순으로 나타났다. Ni은 여름, 겨울, 가을 및 봄철 순으로 높게 나타났으며, 평균농도는 서울지역(신은상 등, 2002)과 대구지역보다는 낮게 나타났다. 또한 Pb는 봄철(83.3 ng/m<sup>3</sup>)에 가장 높았고, 여름철(63.6 ng/m<sup>3</sup>)에 가장 낮았다. 봄철의 경우 서울지역(최재천 등, 1999c)(70.5 ng/m<sup>3</sup>)보다 다소 높게 나타났다. 평균농도의 경우 73.3 ng/m<sup>3</sup>로서 서울지역(신은상 등, 2002)보다는 낮았으나, 대구지역보다는 높았다. 이는 다른 지역에 비하여 인위적인 오염원의 영향을 직계 받는 것으로 생각되지만, 봄철의 고농도는 인근 도로와 공단지역으로부터 이류 되었음을 알 수 있었다. 여름철의 저농도는 많은 강수의 빈도에 의하여 대기가 세정되어 미세입자의 일부가 제거됨으로서 다른 계절에 비하여 낮게 나타난 것으로 볼 수 있다. 차량의 타이어나 라이닝의 마모에 기인하는

Table 4. Seasonal variation of elemental concentrations (ng/m<sup>3</sup>) in PM<sub>2.5</sub> aerosols

Elements	This study					Mean	Jsju <sup>a</sup>
	Spring	Summer	Fall	Winter	Mean		
Mass**	33.3	30.3	20.8	27.8	29.3	29.82=17.07	
Al***	540.0	280.2	347.7	375.7	416.6	935=1699	
Ca	682.4	467.2	599.0	610.4	600.6	275=559	
Cd	1.4	1.9	1.6	1.8	1.6	0.65=0.51	
Cr**	7.4	6.4	11.0	10.9	8.1		
Cu*	23.8	16.7	32.1	27.0	23.9	4.48=6.75	
Fe***	834.5	238.4	255.5	407.8	517.3	633=1108	
K**	790.2	503.5	724.8	716.7	692.7		
Mg***	108.1	75.7	95.3	258.6	103.1	254=394	
Mn	35.7	27.2	37.1	42.5	34.0	20.45=24.16	
Na***	1894.4	441.0	704.0	288.9	1146.0		
Ni**	8.2	11.0	12.1	10.1	10.0	1.3	
Pb	54.2	45.0	57.2	53.8	52.3	30.61=21.66	
Zn	230.2	231.6	199.9	167.1	220.7	44.20=35.50	

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ <sup>a</sup>한진석 등 (2004)

Zn은 봄철(388.7 ng/m<sup>3</sup>), 여름철(329.6 ng/m<sup>3</sup>), 가을철(253.1 ng/m<sup>3</sup>) 및 겨울철(205.3 ng/m<sup>3</sup>) 순으로 나타났으며, 평균 농도(331.2 ng/m<sup>3</sup>)는 부산지역(전병일, 2003) 및 서울지역(신은상 등, 2002)과는 유사한 분포를 보였으나, 대구지역과 Milan(Marazzan et al., 2001)보다는 높았다. K의 경우 해염뿐만 아니라 건축의 소자에 의해서 많은 농도의 차이를 볼 수 있다. 특히, 봄, 가을, 겨울 및 여름철 순으로 조사되어 봄철(1159.8 ng/m<sup>3</sup>)과 가을철(1136.1 ng/m<sup>3</sup>)에 높은 농도를 보였다. 이는 인구지역의 서쪽에 위치한 김해 평야에서 농업활동에 따른 다량의 미세입자가 유입되어 고농도 현상을 보인 것으로 추정된다. 이러한 현상은 부산지역의 상하먼지(황용식, 2003)에서도 확인된 바 있다. 평균농도는 서울지역(신은상 등, 2002)과 Milan(Marazzan et al., 2001)보다 높게 나타났다. 해염입자의 유입을 평가할 수 있는 Na는 봄, 가을, 겨울 및 여름철 순으로 나타났으며, 평균농도는 부산지역(전병일, 2003)과 서울지역(신은상 등, 2002)보다 높았다. 또한 Mg의 경우 겨울, 봄, 가을 및 여름철 순으로 나타났으며, 평균농도(321.4 ng/m<sup>3</sup>)는 부산지역(전병일, 2003)과 유사하였으며, 서울지역(최재천 등, 1999c)보다는 다소 낮았다. PM<sub>2.5</sub>의 질량농도와 영양기원인 Al, Ca, Fe 및 Si, 해양기원인 Mg과 Na는 계절별 분포에서 유의한 차이( $p < 0.001$ )를 보였으나, 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Ni 및 Pb는 계절별로 유의한 차이는 발견하지 못하였다.

Table 4는 PM<sub>2.5</sub> 중의 미량 금속성분들의 계절별

분포를 나타낸 것이다. 영양기원인 Al, Ca 및 Fe은 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 여름철에 가장 낮았다. 이는 봄철에는 상거리 수송에 의한 황사 및 미세입자가 대기 중 질량농도의 주된 요인으로 작용할 수 있으며, 여름철의 저농도는 강수에 의한 미세입자의 세정효과에 기인하는 것으로 판단된다. Al의 평균농도는 제주지역(한진석 등, 2004)보다 낮았으나, Ca의 경우 평균농도는 600.6 ng/m<sup>3</sup>로서 제주지역에 비하여 높게 나타났다. Fe의 경우 봄철은 높았으나, 평균농도는 제주지역에 비하여 다소 낮았다. 또한 해양기원인 Na의 경우 봄철이 가장 높았고, 겨울철이 가장 낮았다. Mg는 겨울철에 가장 높고, 여름철에 가장 낮게 나타나 PM<sub>2.5</sub>과 유사한 경향을 보였다. 특히 Mg의 평균농도는 103.1 ng/m<sup>3</sup>로서 제주지역 인구보다 낮게 나타났으며, 지역별 계절별 편차를 많이 보였다. K의 경우 봄철과 가을철에 높게 나타나 PM<sub>2.5</sub>과 같은 경향을 보였다. 특히 인위적 기원인 Cr, Cu 및 Ni은 가을철에 가장 높았고, Cd과 Zn은 여름철에 가장 높았다. Cd, Pb 및 Zn은 계절별로 유의한 차이를 보이지 않았으며, Cr( $p < 0.01$ ), Cu( $p < 0.05$ ) 및 Ni( $p < 0.01$ )은 계절에 따른 유의한 차이를 보였다. Pb의 평균농도는 52.3 ng/m<sup>3</sup>로서 30.61 ng/m<sup>3</sup>를 보인 제주지역보다 높았다. Cd, Cu, Ni 및 Zn은 청정지역인 제주지역보다 높게 나타나 인근 공단지역 및 각종 차량에 의한 이동 오염원의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

**Table 5.** Elemental concentrations (ng/m<sup>3</sup>) in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols for Asian dust and non Asian dust at Busan

Elements	This study						Seoul <sup>a</sup>					
	PM <sub>10</sub> (N=87)			PM <sub>2.5</sub> (N=87)			PM <sub>10</sub> (N=28)			PM <sub>2.5</sub> (N=29)		
	All	AD	NAD	All	AD	NAD	All	AD	NAD	All	AD	NAD
Mass	58.2 <sup>c</sup>	121.5	56.0	29.3	33.5	29.2	95.5	144	72.5	49.3	68.2	39.3
Al	720.5 <sup>c</sup>	2641.3	651.9	416.6 <sup>c</sup>	974.7	396.6	2490	4790	1400	691	1514	258
Ca	1402.4 <sup>c</sup>	4499.4	1291.8	600.6 <sup>c</sup>	1404.5	571.9	2336	3916	1587	565	1117	274
Cd	2.2	1.3	2.3	1.6	0.9	1.6	7.66	7.73	7.63	4.62	5.18	4.33
Cr	11.3	13.4	11.3	8.1	9.7	8.1	18.8	19.5	18.5	13.7	16.2	12.4
Cu	37.4	26.9	37.8	23.9	12.7	24.3	50.1	53.0	48.7	27.8	28.6	27.3
Fe	949.8 <sup>c</sup>	2808.3	883.4	517.3 <sup>c</sup>	1353.8	487.5	2321	3960	1544	743	1310	444
K	1044.0	1017.6	1044.9	692.7	559.9	697.4	1038	1712	720	435	676	308
Mg	321.4 <sup>c</sup>	1068.7	294.7	103.1 <sup>c</sup>	288.3	96.5	806	1523	466	231	472	103
Mn	53.6 <sup>c</sup>	96.0	52.1	34.0	42.3	33.7	94.2	156	65.1	39.0	60.1	27.9
Na	1730.1	2514.0	1702.1	1146.0	1812.1	1122.2	699	999	556	309	381	381
Ni	15.0	9.9	15.2	10.0	7.0	10.1	47.8	69.8	37.4	19.6	32.8	12.7
Pb	73.3	63.1	73.7	52.3	46.9	52.3	124	133	120	96.4	107	90.9
Zn	331.2	287.6	332.8	220.7	198.9	221.5	302	372	270	163	187	150

<sup>a</sup> $p < 0.05$ , <sup>b</sup> $p < 0.01$ , <sup>c</sup> $p < 0.001$

<sup>d</sup>최규훈 등 (2003)

\*The unit of PM is  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Table 5는 본 연구기간의 황사시(3월 30일, 31일, 4월 23일)와 비황사시의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도 및 비량금속 성분들의 농도 분포를 나타낸 것이다. PM<sub>10</sub>의 질량농도는 황사시(121.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 비황사시(56.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 2.17배 높게 나타났으며 유의한 차이( $p < 0.001$ )가 있음을 확인하였다. 그러나 PM<sub>2.5</sub>의 경우 황사시(33.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 비황사시(29.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )보다 1.15배 높았으며, 유의한 차이는 없었다. 이는 최규훈 등(2003)의 서울지역 연구에서도 유사한 경향을 보였다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중의 Al, Ca, 및 Fe은 토양기원으로서 황사시기에 현저하게 증가하는 성분으로 황사시와 비황사시에 유의한 차이( $p < 0.01$  이하)를 보였다. 그리고 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 Mg의 경우 황사시기에 각각 1068.7 ng/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 288.3 ng/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 황사/비황사의 비는 각각 3.63배와 2.99배로서 PM<sub>10</sub>에서 많은 차이를 보였다. 이들은 황사시기와 비황사시기에 유의한 차이( $p < 0.001$ )를 보였다. 특히 최규훈 등(2003) 서울지역 연구에서 밝힌 PM<sub>10</sub>의 황사/비황사의 비가 3.27배를 보여 유사한 경향을 보였다. 또한 도로변의 보사 등에서 기인되는 Mn의 경우 PM<sub>10</sub>에서만 황사시와 비황사시에 유의한 차이( $p < 0.01$ )를 보였다. 그러나 인위적인 오염원으로 볼 수 있는 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn은 황사시와 비황사간에는 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 PM<sub>10</sub>의 질량농도와 미세입자(PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>) 중 토양기원인 Al, Ca, Fe 및 Mg의 조성비율에서 유의한 차이( $p < 0.01$ )를 보였다.

#### 지각농축계수

##### (1) PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 지각농축계수

Table 6은 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>로부터 구해진 각종 금속 성분들의 지각농축계수를 다른 지역과 비교하였다. 대기부유분진 중 각 원소의 농도를 기준으로 각 원소의 지각농축계수를 계산하여 나타낸 것이다. 기준물질은 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. Al은 토양입자 유래의 전형적인 원소이기 때문에 EF값이 높을수록 인위적인 발생원 유래의 원소라고 할 수 있다. 지각농축계수가 1.0보다 크면 일반적으로 지각이외의 오염원을 갖는다. Kaya와 Tunçel(1997)은 지각농축계수가 10.0보다 작을 때는 지역별 토양성분과 Mason's Compilation 간의 화학적 구성 사이의 차이가 존재하

Table 6. Comparison of crustal enrichment factors between PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>

Elements	This study		Busan <sup>a</sup>	Daegu <sup>b</sup>	Jeju <sup>c</sup>	Mt. Soback <sup>d</sup>
	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>				
Al	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Ca	4.4	3.2	3.3		2.1	2.87
Cd	1266.9	1547.8	1455.3	3696.2	1156	827
Cr	12.8	15.9	5.9	10303.9		
Cu	76.8	84.8				
Fe	2.1	2.0	1.6	2.4	1.9	0.94
K	4.5	5.2	5.1			
Mg	1.7	1.0	1.7		2.6	0.85
Mn	6.4	7.0	1.9	3.6	2.2	1.33
Na	6.1	7.0	2.6		26.9	1.02
Ni	22.5	26.0	12.3	106.7	4.1	2.5
Pb	636.1	785.6	322.2	1175.3	621	675
Zn	533.9	615.4	462.9	426.5	62	59.0

<sup>a</sup>전병일 (2003), Busan, E.F. of 14 samples (PM<sub>10</sub>)  
<sup>b</sup>최성우와 송형도 (2000), Daegu, E.F. of 84 samples (PM<sub>10</sub>)  
<sup>c</sup>최만식과 박은주 (1999), Jeju Sungsan, E.F. of 76 samples (TSP)  
<sup>d</sup>최만식 등 (1995), Mt. Soback, E.F. of 22 samples (TSP)

므로 그 기원을 분명하게 나타내지는 못한다고 지적하였다. Cd은 PM<sub>10</sub>을 대상으로 한 대구지역(최성우와 송형도, 2000)보다는 낮았으나, 부산지역(전병일, 2003)과 유사하였다. TSP를 대상으로 한 제주지역(최만식과 박은주, 1999)과 소백산(최만식 등, 1995)의 지각농축계수보다는 높았다. PM<sub>10</sub> 중 Ni의 경우 대구지역보다 4.7배 낮게 나타났으며, 부산지역보다는 1.8배 높았다. PM<sub>10</sub> 중 Zn은 대구지역보다 다소 높았다. 특히 Cd, Ni 및 Zn과 같은 인위적 기원의 중금속은 TSP를 중심으로 제주지역과 소백산에서 조사된 지각농축계수보다 높게 나타나 최성우와 송형도 (2000)의 연구에서 보인 PM<sub>10</sub>과 TSP의 차이와 마찬가지로 이들 성분들은 PM<sub>10</sub>과 같은 미세입자 영역에서 많은 조성을 보였다. 따라서 10이상의 지각농축계수를 보인 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn은 PM<sub>10</sub>보다는 PM<sub>2.5</sub>에서 높게 나타났으며, 미세입자 영역에서 많은 화학적 조성을 보였다.

(2) 계절별 지각농축계수

Fig. 3은 계절별 지각농축계수를 나타낸 것이다. 대기면지시료에서 측정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 Ca, Fe, K, Mg, Mn 및 Na의 지각농축계수는 10이하로서 토양 입자에 많이 함유된 자연발생원에 의한 것으로 추정된다. 봄철(3~5월), 여름철(6~8월), 가을철(9~11월) 및 겨울철(12~2월)로 구분하여 살펴본 결과 Cd, Cr, Cu,

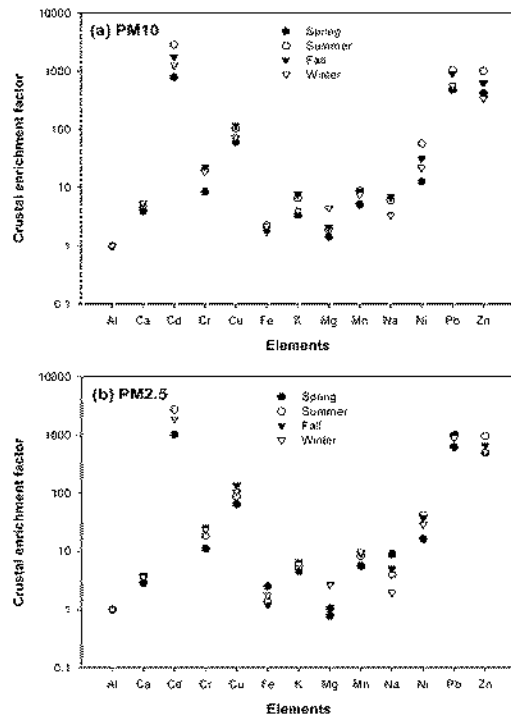


Fig. 3. Seasonal comparison of enrichment factors for each element in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols.

Ni, Pb 및 Zn은 평균 지각농축계수가 10 이상으로서 인위적인 기원으로 나타났다. PM<sub>10</sub> 중 Cd, Ni, Pb



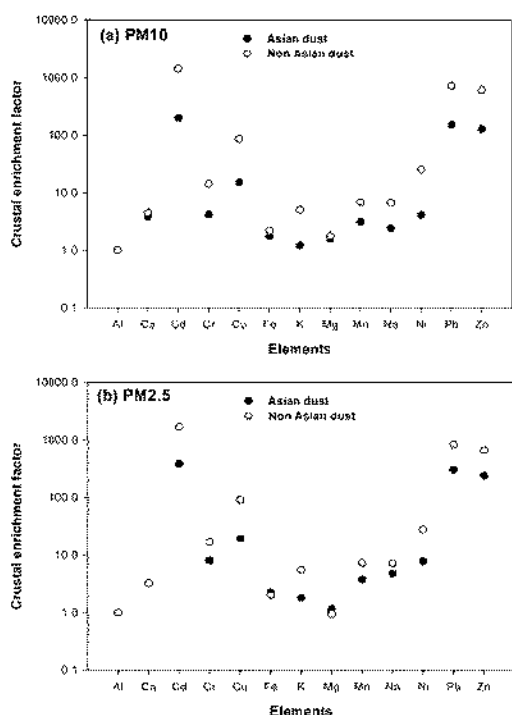


Fig. 4. Comparison of enrichment factors during Asian dust and non Asian dust for each element in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols.

및 Zn은 여름철에 가장 높은 지각농축계수를 보였으며, 겨울철에 가장 낮은 Zn을 제외하면 봄철에 가장 낮게 나타났다. 또한 Cr과 Cu는 가을철에 가장 높았으며, 봄철에 가장 낮았다. PM<sub>2.5</sub> 중 인위적 기원인 Cd, Ni 및 Zn은 여름철에 가장 높은 지각농축계수를 보였고, 봄철에 가장 낮았다. 그리고 Cr, Cu 및 Pb은 가을철에 가장 높고 봄철에 가장 낮았다. 연구 지역의 서쪽에 인접한 사상공단과 서남쪽에 위치한 신령·장림공단으로부터 인위적 기원의 미세입자가 서풍계열의 바람을 타고 측정지점으로 이동되었음을 간접적으로 알 수 있었다. 이러한 먼지의 계절적 차이는 한반도 전역에서 관측될 수 있는 현상으로 북서 계절풍의 영향을 받으며 주변 지역의 대기오염에 따라서 큰 차이를 줄 수 있다(최판식과 박은주, 1999).

(3) 황사/비황사의 지각농축계수

Fig. 4는 황사시와 비황사시의 미세입자(PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>) 중 비광금속성분의 지각농축계수를 나타낸 것이다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 Ca, Fe, K, Mg 및 Mn은 비황사시 뿐만 아니라 황사시에도 지각농축계수가 10

이하로서 자연발생원에 기인하는 것으로 추정된다. 그러나 Cr과 Ni는 비황사시에는 지각농축계수가 10 이상을 보였으나, 황사시에는 10이하로서 시차 같은 토양성분의 농도가 상대적으로 증가하는 원인에 기인하는 것으로 판단된다. 특히, 인위적 기원을 갖는 Cd, Cu, Pb 및 Zn은 지각농축계수가 10 이상이지만 황사시기에 다소 감소하는 경향을 보여 Table 5에서 살펴본 황사시와 비황사시 이들 성분들의 농도변화는 유의한 차이가 없음을 확인할 바 있다. 따라서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 비광금속성분의 지각농축계수는 황사시보다 비황사시에 높게 나타났으며, 인위적 기원인 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 황사시/황사 비는 PM<sub>10</sub>의 경우 각각 13.9, 17.6, 21.2 및 21.3%였으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우 각각 23.1, 21.3, 36.4 및 36.5%로 나타났다. 황사시 이들 인위적 기원의 지각농축계수는 PM<sub>10</sub> 보다는 PM<sub>2.5</sub>에서 증가함을 보였다.

토양입자의 기여율

(1) 계절별 토양입자의 기여율

대기 중에 부유하는 토양입자의 양을 정량적으로 구하기 위하여 토양입자의 지표원소인 알루미늄(Al)을 이용하여 황사로부터 유래된 토양입자의 농도를 추정하였으며, 토양 기여율은 식 (2)를 이용하였다(황용식, 2003).

$$C = \frac{C_{soil}}{C_{PM10}} \times 100 = \frac{C_{Al}/0.0813}{C_{PM10}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, C<sub>soil</sub>은 먼지 중 토양입자의 농도(mg/m<sup>3</sup>), CPM<sub>10</sub>은 PM<sub>10</sub> 또는 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도(mg/m<sup>3</sup>), CAI은 PM<sub>10</sub> 또는 PM<sub>2.5</sub> 중의 Al의 농도(mg/m<sup>3</sup>), 0.0813은 토양 중 Al의 농도이다.

Fig. 5는 계절별 토양입자의 기여율을 나타내었다. 계절별 토양입자의 기여율은 PM<sub>10</sub>의 경우 봄철(18.2%), 가을철(13.8%), 겨울철(12.7%) 및 여름철(9.7%) 순으로 조사되었으며, 평균 기여율은 15.2%로 나타났다. PM<sub>2.5</sub>의 경우 가을철(20.6%), 봄철(20.0%), 겨울철(16.6%) 및 여름철(11.4) 순으로서 평균기여율은 17.3%로 나타났다. 따라서 PM<sub>10</sub>보다는 PM<sub>2.5</sub>의 토양입자의 기여율이 높았으며, 봄철과 가을철이 높고 여름철에 가장 낮았다.

(2) 황사와 비황사시 토양입자의 기여율

Table 7은 황사와 비황사시 토양입자의 기여율을

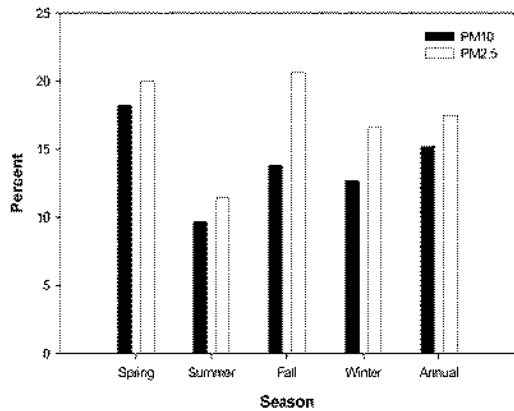


Fig. 5. Seasonally evaluated soil contributions to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in Busan.

나타내었다. PM<sub>10</sub>의 황사시 토양입자의 기여율은 26.7%로서 전병일(2003)의 2002년 봄철 부산지역의 황사·비황사시의 토양입자의 기여율 조사에서 밝힌 황사시(21.7%)의 토양기여율보다 높게 나타났으나 서울지역(최재천, 1999c; 김현탁 등, 2004; 신은상과 김희강, 1992)의 연구보다 낮았다. 또한 PM<sub>2.5</sub>의 황사시(35.8%)와 비황사시(16.7%)는 PM<sub>10</sub>보다 높았다. 황사·비황사 비는 PM<sub>10</sub>에서 1.9를 보여 부산지역(전병일, 2003)과 서울지역(최재천, 1999c; 김현탁 등, 2004; 신은상과 김희강, 1992)보다 다소 낮았으나, PM<sub>2.5</sub>에서는 2.1로 나타났다. 따라서 토양기여율의 황사·비황사비는 PM<sub>10</sub>보다 PM<sub>2.5</sub>에서 높게 나타났다.

### 결론

2004년 3월부터 1년간 부산시내에서 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 에어로졸을 채취하여 중량농도를 측정하고 화학적 조성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. PM<sub>10</sub>의 질량농도는 평균 58.2 μg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 최고농도는 황사기간에 161.1 μg/m<sup>3</sup>로서 연간 기

준치인 30 μg/m<sup>3</sup>를 초과하였다. 또한 Na > Ca > K > Fe > Al 순으로서 높은 조성을 보였고, Cd가 가장 낮은 농도를 보였다. PM<sub>2.5</sub>의 질량농도는 평균 29.3 μg/m<sup>3</sup>로 나타났으며, 최고농도는 65.3 μg/m<sup>3</sup>이었다. 또한 Na > K > Ca > Fe > Al 순으로서 높은 조성을 보였다.

2. PM<sub>10</sub>의 질량농도와 토양기원인 Al, Ca 및 Fe, 해양기원인 Mg과 Na는 계절별 분포에서 유의한 차이(p < 0.001)를 보였으나, 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Ni 및 Pb는 계절별로 유의한 차이는 발견하지 못하였다.

3. PM<sub>10</sub>의 질량농도는 황사시(121.5 μg/m<sup>3</sup>)가 비황사시(56.0 μg/m<sup>3</sup>)보다 2.17배 높게 나타났으며 유의한 차이(p < 0.001)가 있음을 확인하였다. 그러나 PM<sub>2.5</sub>의 경우 황사시(33.5 μg/m<sup>3</sup>)가 비황사시(29.2 μg/m<sup>3</sup>)보다 1.15배 높았으며, 유의한 차이는 없었다. 황사시와 비황사시에는 PM<sub>10</sub>의 질량농도와 미세입자(PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>) 중 토양기원인 Al, Ca, Fe, 및 Mg의 조성비율에서 유의한 차이(p < 0.01)를 보였다.

4. 10 이상의 지각농축계수를 보인 인위적 기원인 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn은 PM<sub>10</sub>보다는 PM<sub>2.5</sub>에서 높게 나타났으며, 미세입자 영역에서 많은 화학적 조성을 보였다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중 비광금속성분의 지각농축계수는 황사시보다 비황사시에 높게 나타났다. 그리고 인위적 기원인 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 황사·비황사 비는 PM<sub>10</sub>의 경우 각각 13.9%, 17.6%, 21.2% 및 21.3%였으며, PM<sub>2.5</sub>의 경우 각각 23.1%, 21.3%, 36.4% 및 36.5%로 나타났다. 황사시 이들 인위적 기원의 지각농축계수는 PM<sub>10</sub> 보다는 PM<sub>2.5</sub>에서 증가함을 보였다.

5. 토양입자의 평균기여율은 PM<sub>10</sub>(15.2%)보다는 PM<sub>2.5</sub>(17.5%)에서 높았으며, 봄철과 가을철이 높고 여름철에 가장 낮았다. 토양기여율의 황사·비황사비는 PM<sub>10</sub>(1.9)보다 PM<sub>2.5</sub>(2.1)에서 높게 나타났다.

Table 7. Evaluated soil contributions during the Asian dust and non Asian dust to PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in Busan

	This study		Busan <sup>a)</sup>	Seoul <sup>b)</sup>	Seoul <sup>c)</sup>	Seoul <sup>d)</sup>
	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>				
Asian dust	26.7% (N=3)	35.8% (N=3)	21.7% (N=6)	58.7% (N=3)	58.5%	60.0%
Non Asian dust	14.3% (N=84)	16.7% (N=84)	9.3% (N=82)	24.4% (N=66)	28.8%	28.0%
ADNAD ratio	1.9	2.1	2.3	2.4	2.0	2.1

<sup>a)</sup>전병일(2003)  
<sup>b)</sup>김현탁 등(2004)  
<sup>c)</sup>최재천 등(1999c)  
<sup>d)</sup>신은상과 김희강(1992)

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 2004년 과학고 영재교육 내실화 지원사업 중 R&E 프로그램과제로 수행되었습니다. 연구비 지원을 해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김병화, 김동술, 2000, 수원지역 대기 중 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16 (2), 89-101.
- 김성현, 1999, 기후상태가 PM<sub>10</sub> 및 일부 금속원소 농도에 미치는 영향, 한국환경위생학회지, 25 (2), 39-47.
- 김윤수, 1997, 서울시 미세먼지 저감 및 관리방안, 서울시 정책개발연구원, 178 p.
- 김현탁, 진영신, 이상삼, 2004, 2003년 봄철 서울의 TSP와 PM<sub>10</sub> 농도 특성, 한국기상학회지, 40 (5), 587-602.
- 나덕재, 이병규, 2000, 산업도시 대기 중 PM<sub>10</sub>의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구, 한국대기환경학회지, 16(1), 23-35.
- 대기오염연구회, 2000, 환경분석을 위한 대기환경시험법, 동화기술, 514 p.
- 신은상, 김희강, 1992, 서울시에서의 대기 부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보존학회지, 8, 52-57.
- 신은상, 최민규, 선우영, 정용삼, 2002, 서울지역의 PM<sub>10</sub> 중 미량원소의 특성 평가, 한국대기환경학회지, 18 (5), 363-372.
- 오진만, 김득수, 2001, 공산지역 부유분진의 계절적 농도변화의 화학적 조성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 17 (6), 475-485.
- 신병일, 2003, 2002년 부산지역 봄철 황사·비황사시 PM<sub>10</sub> 중의 중금속 농도 특성, 환경영향평가, 12 (2), 99-108.
- 신보경, 서정민, 최금찬, 2001, 부산지역 PM<sub>2.5</sub>의 이온 및 미량 금속성분의 화학적 특성, 한국환경위생학회지, 27 (4), 63-71.
- 정장표, 이승득, 윤항욱, 2001, 부산시 PM<sub>10</sub>의 화학적성분에 대한 낮과 밤의 농도 특성, 대한환경공학회지, 23 (3), 353-362.
- 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍, 2003, 황사의 비황사기간의 중금속 농도 분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구, 한국대기환경학회지, 19 (1), 45-56.
- 최금찬, 유수영, 신보경, 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, 최재현, 이연영, 1995, 소백산 대기 중 입자상 물질의 화학적 특성에 관한 연구(II)-금속원소의 계절적인 변화의 기원을 중심으로, 한국대기보존학회지, 11 (2), 191-198,25.
- 최성우, 송형도, 2000, 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구, 한국대기환경학회지, 16 (5), 469-476.
- 최재현, 오성남, 박기준, 2000, 1998년 서울의 봄철 에어로졸 중 이온성분과 금속원소에 관한 연구, 한국기상학회지, 36 (5), 551-560.
- 최재현, 조하만, 김지영, 김산, 박기준, 1999a, 1998년 봄철 서울지역 에어로졸 중 TSP와 PM<sub>10</sub>의 화학적 특성 비교, 한국기상학회지, 35 (1), 38-46.
- 최재현, 조하만, 박기준, 김산, 1999b, 서울과 안산시에서 관측된 에어로졸의 화학적 특성 비교, 한국기상학회지, 35 (3), 396-404.
- 최재현, 조하만, 진영신, 박기준, 1999c, 1998년 봄철 서울에서 관측된 에어로졸의 금속 성분에 관한 연구, 한국기상학회지, 35 (2), 263-271.
- 최진수, 백성욱, 1998, 대기 중 TSP와 PM<sub>10</sub> 농도의 관련성, 한국대기보존학회지, 14 (1), 1-10.
- 한신석, 김영성, 문광주, 안준영, 김정은, 류성윤, 김영준, 공부주, 이석조, 2004, 2001년 11월 오염시기와 2002년 봄 황사시기 제주도 고산에서의 미량원소 농도 변화, 한국대기환경학회지, 20 (2), 143-151.
- 황용식, 2003, 부산지역 강하현지의 화학적 조성과 대기환경적 특성, 부산대학교 박사학위논문, 250 p.
- 황용식, 신병일, 2003, 부산 서부지역의 대기 중 PM<sub>10</sub> 농도의 화학적 조성 분석, 한국환경과학회지, 12 (6), 627-633.
- Kaya, G. and Tuncel, G., 1997, Trace element and major ion composition of wet and dry deposition in Ankara, Turkey, Atmospheric Environment 31 (23), 3985-3998.
- Marczagan, G.M., Vaccaro, S., Valli, G., and Vecchi, R., 2001, Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particulate matter in the ambient air of Milan (Italy), Atmospheric Environment, 35, 4639-4650.
- McKendry, I.G., 2000, PM<sub>10</sub> levels in the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada: An overview of spatiotemporal variations and meteorological controls, Journal of the Air and Waste Management Association, 50, 443-452.
- Triantafyllou, A.G., 2001, PM<sub>10</sub> pollution episodes as a function of synoptic climatology in a mountainous industrial area, Environmental Pollution, 112, 491-500.
- Yang, K.L., 2002, Spatial and seasonal variation of PM<sub>10</sub> mass concentration in Taiwan, Atmospheric Environment, 36, 3403-3411.

2005년 5월 25일 원고 접수  
2005년 6월 13일 수정원고 접수  
2005년 7월 18일 원고 채택