

2002년 부산지역 봄철 황사/비황사시 PM10 중의 중금속 농도 특성

전 병 일

신라대학교 환경공학과

(2003년 4월 7일 접수, 2003년 4월 21일 승인)

Characteristics of Heavy Metallic Elements of PM10 for Yellow sand and Non-Yellow sand during Springtime of 2002 at Busan

Byung-Il Jeon

Department of Environmental Engineering, Silla University

(Manuscript received 7 April 2003; accepted 21 April 2003)

Abstract

We collected and analyzed PM10 samples to account for the characteristics of heavy metallic elements for yellow sand and non-yellow sand during springtime of 2002 at Busan, The mean PM10 mass concentration for springtime of 2002 was $219.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ with the maximum $787.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and the minimum $19.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The mean concentration of metallic elements contained in PM10 are shown as follows : Si>Ca>Fe>Al>Na, respectively. The ratio of mean PM10 mass concentration for yellow sand($362.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) to that for non-yellow sand($48.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was 7.5, the significant positive correlation ($P<0.05$) was found between yellow sand and non-yellow sand. The metallic elements concentration ratios of yellow sand to the non-yellow sand were over 10 times for Al, Ca, Mg, 4~8 times for Fe, Si, Mn. But the concentration of Na, Cu, Zn for non-yellow sand was higher than those of yellow sand. The crustal enrichment factor of Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, K, Mn, Na, Ni for yellow sand was higher that of non-yellow sand over 10 times, and concentration rate of soil particles of yellow sand was increased 2.3 times that of non-yellow sand.

Key words : yellow sand and non-yellow sand, heavy metallic elements, crustal enrichment factor, concentration rate of soil particles

I. 서론

황사의 주요 발원지는 연강수량이 400 mm이하인 사막이 대부분인 중국의 서북 건조지역으로, 타클라마칸 사막은 중국 사막 총면적의 52%를 차지하는 최대의 사막(1,000 km×400 km)이며, 고비사막은 연평균 강수량이 30 mm정도로 매우 건조하고 바람이 강한 지역이다. 최근 황사(Asian dust)는 동아시아 지역에서 태평양을 가로질러 하와이까지 수송되면서 국제적으로 중요한 이슈가 되고 있으며, 아프리카 사하라 사막에서 발생한 사하라 먼지(Sahara dust)가 대서양을 가로질러 플로리다반도에서 관측됨으로서 세계적인 문제로 대두되고 있다.

부산의 황사발생일은 매년 10일 이내로 머물렀으나, 2001년에 갑자기 증가하여 사상최대인 연간 21일이나 발생하였으며, 또한 시기적으로도 가장 빨리 발생해서(1월 2일) 가장 늦게까지(5월 19일) 황사현상이 나타난 해로 기록되었다. 특히 2002년 3월 21일에는 부산 시내 12개 대기오염자동측정지점 가운데 부유분진의 측정한계치인 $1,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 도달한 곳이 범천동, 감전동, 덕천동, 신평동, 연산동 등 8개 지점으로 나타나, 극심한 피해를 가져다주었다. 그에 따라, 서울을 비롯한 수도권권의 초·중등학교가 사상 초유의 휴교사태가 발생하는 등 매우 심각한 수준에 도달하였고, 급기야 정부에서는 황사경보제를 제정하였고, 같은 해 4월 8일에는 황사경보제에 의거하여 부산, 경남지역에 처음으로 황사경보가 발령된 바 있다.

최근에는 황사의 농도뿐만 아니라, 황사 중에 포함된 중금속의 농도에 대한 관심이 고조되고 있다. 황사의 성분은 규소, 알루미늄, 칼슘, 칼륨, 나트륨, 니켈 등 광물성 물질과 유기물, 황산염 등으로 구별될 수 있고, 광물성 물질은 황사 발원지에서 직접 수송되며, 나머지는 이동 과정에서 덧붙여진 것으로 분석된다. 황사시 중금속 농도

는 지방환경청 및 지방자치단체에서 별도로 시료를 채취하여 분석하고 있으며, 황사와 일반먼지에 포함된 중금속 농도는 큰 차이가 있다(박현미 등, 1991; 이민희 등, 1994).

황사와 관련된 에어로졸의 화학적 및 중금속에 대한 연구는 최재천(1999a, 1999b, 1999c, 2000)에 의해 1998년 봄철의 서울과 안면도의 측정자료를 이용하여 체계적으로 조사 연구된 바 있다. 신은상과 김희강(1992)은 서울시의 부유먼지에 미치는 황사의 영향에 대해서 연구한 바 있고, 이민희 등(1993)은 황사현상시 대기 에어로졸 중의 무기물질의 동태에 대해 전국 4개 도시의 측정자료를 이용하여 분석한 바 있다. 그리고 박민하 등(2001)과 최규훈 등(2002)은 제주 고산에서 황사 중에 함유된 중금속에 대한 조사를 하였고, 최성우와 송형도(2000)은 대구지역에서 미량 중금속에 대해서, 오진만과 김득수(2001)는 군산지역에서 측정된 부유분진에 포함된 중금속에 대해서 조사한 바 있다. Kim *et al.*(2003)은 2001년 봄철 서울에서 측정된 황사/비황사 시 미세입자와 거대입자의 화학적 조성에 대해서 연구한 바 있다. 부산지역의 황사 발생시 중금속 성분에 대한 연구는 최금찬 등(2000)에 의해 수행된 바 있는데, 특히 중국에서 유입된 니켈이 타 계절보다 4~5배 높다고 하였다. Var *et al.*(2000)은 일본의 16개 도시에서 측정된 금속원소의 계절별 변화를 분석한 결과 황사기간인 봄철의 농도가 타 계절의 농도보다 월등히 높다고 하였으며, Yang(2002)은 타이완에서 PM10 농도의 공간적, 시간적 변화를 황사와 결부하여 연구한 바 있다.

본 연구에서는 2002년 봄철 부산지역에서 Low Volume Air Sampler 중의 하나인 MINI-VOL을 이용하여 대기 중의 PM10을 측정하고, 그 중에 함유된 중금속을 황사시와 비황사시로 나누어, 그 특성을 고찰함으로써 황사발생시 어떤 성분의 영향이 많은지를 체계적으로 밝히는데 있다

II. 시료채취 및 분석

시료채취 지점은 Fig. 1과 같이 부산시 사상구 패법동 백양산 기슭에 위치한 신라대학교 자연관 6층 옥상에서 실시하였으며, 채취지점의 주위는 백양산으로 둘러싸여 있으며 남서쪽으로 계곡이 있고 약 3 km 떨어진 지역에 사상공업지역이 위치하고 있으나, 최근에는 많은 공장이 타 지역으로 이주하여 점오염원의 영향이 많이 소멸한데 비해, 대형 유통단지가 들어섬에 따라 자동차의 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 유입하여, 본 측정지점에 영향을 미칠 수 있다.

PM10의 측정은 2002년 3월 5일, 18일, 21일, 4월 8일, 9일, 10일, 17일, 18일, 25일, 5월 8일, 13일, 20일로 총 12일 실시하였으며, 이 중 황사발생일은 3월 18일, 21일, 4월 8일, 9일, 10일, 17일로 모두 6일이다. 측정시간은 24시간으로 당일 오전 9시에 측정을 개시하여 익일 오전 9시에 종료하였다. PM10측정은 Mini Volume Air Sampler(미국 Air Metrics사 제품)를 사용하였으며, 흡인유속은 5.0

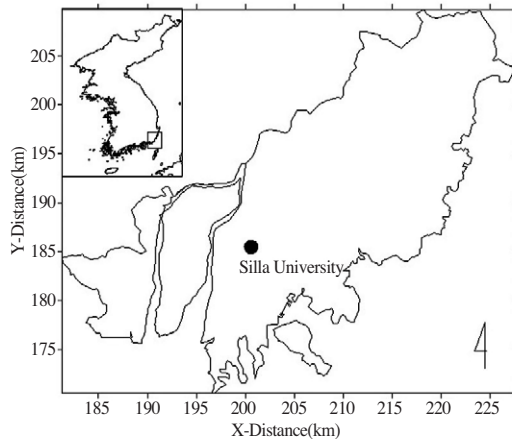


Fig. 1. PM10 sampling site at Busan.

l/min으로 조정하여 47mm Membrane Filter (Gelma Sciences)에 24시간 PM10 시료를 흡인 포집하였다. 이 포집장치는 진공도가 높고 유량이 크며, 운반이 용이하고 맥동이 없이 고르게 작동하는 것이 특징이며 관성충돌방식에 의해 10 μ m 이하 되는 입자를 분리하는 시료도입방식을 사용하고 있다. 시료포집장치는 MINI PUMP(Model MP-603T)로 최대 흡기량 5 l/min(무부하시)의 pump로 광범위한 유량변화가 가능하며 유해가스 및 일반가스의 sampling에 사용할 수 있다.

PM10 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 7.5 ml 가한 다음 초음파 추출기에서 28 KHz로 2시간 동안 추출한다. 초음파 처리가 끝나면 비커를 꺼내어 식힌 다음, 여과지(Whatman, No. 5A)를 이용하여 시료 용액을 여과하고, 증류수로 최종액량이 25 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, Cu, Fe, K, Mg, Na, Si 그리고 Zn를 분석하였으며, AAS(Perkin Elmer 4100ZL, Flameless method)을 이용하여 Cd, Cr, Mn, Ni 그리고 Pb를 정량하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 부산지역의 황사발생 현황

Table 1은 1988년부터 2002년까지 15년간 부산 지역에서 발생한 황사발생일의 월별, 연도별 분포를 나타낸 것이다. 1989년과 1992년에는 황사가 발생하지 않았으며, 2001년에 21일로 가장 많이 발생하였으며, 1993년과 2002년에 10일로 두 번째

였으며, 2000년이 9일로 그 다음이었다. 뚜렷하게, 최근의 황사 발생빈도가 증가하는 경향이 있으며, 표에는 없지만 발생빈도뿐만 아니라 황사발생시 나타나는 먼지의 강도 즉 부유분진 농도가 급격히 상승하는 추세에 있다(전병일 등, 2002). 월별로 볼 때, 4월이 45일로 전체의 51%를 차지하여 가장 발생빈도가 높았으며, 3월이 24일(27%), 5월이 13일(15%) 순이었다. 특히 1999년 이후 동계인 1월과 12월에도 황사가 발생하였는데, 이는 황사발원지의 이상기후와 기류의 남하 등에 의한 것으로 추측하고 있으나, 구체적인 이유에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다(Kim and Park, 2001; 전병일 등, 2002).

2. 2002년 봄철의 PM10 농도 특성

Fig. 2는 본 연구의 측정지점과 가장 가까운 지역에 있는 부산광역시 소재의 대기오염자동측정망인 감전동 측정소의 2002년 3월 1일부터 5월 31일까지의 일평균 PM10 농도를 나타낸 것이다. 부산지역에서 2002년의 황사발생일은 3월 17일, 18일, 21일, 22일, 23일, 4월 8일, 9일, 10일, 11일, 17일로 3월과 4월에 각각 5일씩 발생하였다. 그림에서 보는 바와 같이 우리나라의 대기환경기준인 24시간 평균치 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 날이 대부분 황사가 발생한 날이었다. 다만 황사 발생 마지막 날인 3월 23일(140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 4월 11일(143 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 그리고 4월 17일(134 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 황사발생

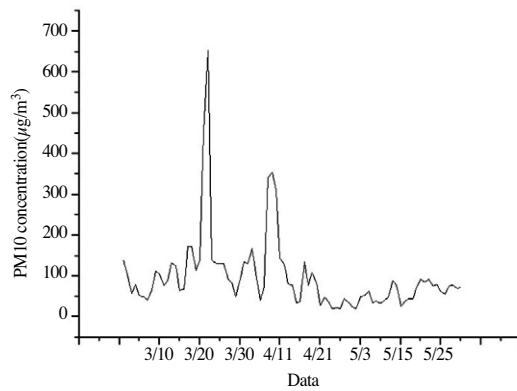


Fig. 2. Daily mean concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of PM10 at Gamjeondong(Busan) from March 1 to May 31, 2002.

일이었음에도 불구하고 대기환경기준 이하의 농도를 나타내었다. 최대농도발생일은 3월 22일로 654 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 기준치의 약 4.4배를 기록하였으며, 3월 21일이 453 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4월 9일이 354 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 전반적으로 2002년 봄철의 PM10 농도는 황사발생일에 기준치를 초과하는 높은 농도를 나타내었으며, 그 외의 경우는 비교적 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 농도를 나타내었다.

3. 봄철 금속 원소의 농도 특성

Table 2는 본 연구지역인 신라대학교 6층 옥상에서 측정된 PM10 중에 포함된 각 금속원소의 평균값, 최소값, 최대값 그리고 표준편차를 나타낸 것이며, Al, Ca, Fe, K, Mg, Na 및 Si의 7개 항

Table 1. Number of days occurred Yellow sand days in Busan during 15 years(1988~2002).

Year Mon.	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	Total
1												4		2		6
2																·
3			1					2		1	3		5	7	5	24
4	7		6			8	1	3			4		4	7	5	45
5				5		2			2					4		13
12														1		1
Total	7	·	7	5	·	10	1	5	2	1	7	4	9	21	10	89

목은 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb 및 Zn의 7개 항목은 ng/m^3 으로 나타내었다. 먼저 PM 10의 질량농도는 평균 219.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대 787.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 19.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 최대농도는 3월 21일 09시부터 22일 09시까지 측정된 날에 나타났으며, 감전동의 3월 21일 농도 453 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 매우 높은 값을 나타내었다. 이는 감전동의 측정값은 21일 0시부터 22일 0시까지의 농도로 본 연구의 측정시간과는 9시간정도의 차이가 있기 때문으로 보인다.

토양의 지표원소인 Al의 평균농도는 3.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 최대농도와 최소농도는 각각 11.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 그리고 Ca의 평균농도는 5.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대농도와 최소농도는 각각 31.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Fe는 암석의 풍화와 같은 토양에 기인하여 자연적으로 발생하는 것과 석탄, 중유의 연소, 산화철의 비산 등과 같은 인위적인 오염원으로부터 발생하며, 평균농도는 3.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대농도와 최소농도는 각각 10.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. K는 토양, 노천소각, 유리제조업, 석탄의 연소, 알루미늄생산, 해염에 의

해 발생하며, 평균농도는 2.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대농도와 최소농도는 각각 5.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Mg의 평균농도는 2.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대농도와 최소농도는 각각 9.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Na는 해염, 농작물 소각, 유리제조업 등에서 발생하며, 평균농도는 3.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대농도와 최소농도는 각각 4.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 그리고 Si의 평균농도는 8.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대농도와 최소농도는 각각 24.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

Cd은 내식성이 강해 니켈, 알루미늄 등의 합금, 전기도금에 널리 사용되며, 금속의 용접, 반도체, 자동차 엔진, 항공기, 축전지, 색소, 살충제 및 유리제조 등에 광범위하게 활용되어 발생할 수 있고, 평균농도는 1.42 ng/m^3 , 최대농도와 최소농도는 3.98 ng/m^3 , 0.20 ng/m^3 이었다. Cr은 크롬철 생성, 광석제련과정, 화학 및 내화공정, 도금 및 합금, 화학연료의 연소 등에서 발생하며, 평균농도는 8.34 ng/m^3 , 최대농도와 최소농도는 18.89 ng/m^3 , 0.35 ng/m^3 이었다. Cu는 제련소, 도금공장 및 농약제조공업이 주요오염원이며, 평균농도는 26.26 ng/m^3 , 최대농도와 최소농도는 각각 55.56

Table 2. Descriptive statistics of metallic elements in PM10 for springtime, 2002 at Busan.

Elements	Factors				Units
	Mean	Minimum	Maximum	Std. Dev.	
Mass	219.82	19.44	787.50	236.99	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Al	3.66	0.11	11.28	4.52	
Ca	5.67	0.28	31.80	9.30	
Fe	3.71	0.26	10.45	4.14	
K	2.78	1.19	5.31	1.27	
Mg	2.22	0.21	9.07	2.93	
Na	3.24	0.41	4.44	1.05	
Si	8.42	1.01	24.41	8.24	
Cd	1.42	0.20	3.98	1.07	ng/m^3
Cr	8.34	0.35	18.89	5.92	
Cu	26.26	2.52	55.56	17.62	
Mn	173.74	11.11	604.17	192.95	
Ni	12.60	2.11	28.56	9.44	
Pb	30.35	5.56	54.17	17.01	
Zn	571.78	166.67	1047.22	224.94	

ng/m³, 2.52 ng/m³이었다. 그리고 Mn의 평균농도는 173.74 ng/m³, 최대농도와 최소농도는 각각 604.17 ng/m³, 11.11 ng/m³이었다. Ni은 석탄이나 유류의 연소, 니켈 제련 및 도시 폐기물 소각 등에서 주로 발생하며, 평균농도는 12.60 ng/m³, 최대농도와 최소농도는 각각 28.56 ng/m³, 2.11 ng/m³이었다. Pb은 자동차의 배기가스, 석탄의 연소, 인쇄소, 페인트제조, 유연휘발유 연소와 같은 오염원에 의해 발생하며, 평균농도는 30.35 ng/m³, 최대농도와 최소농도는 각각 54.17 ng/m³, 5.56 ng/m³이었다. Zn은 기름연료의 사용, 자동차 타이어 마모, 브레이크 라이닝 마모, 윤활유와 같은 자동차에 의한 영향으로 발생하며, 평균농도는 571.78 ng/m³, 최대농도와 최소농도는 각각 1047.22 ng/m³, 166.67 ng/m³이었다.

4. 황사시와 비황사시의 금속 농도의 특성

Table 3은 2002년 봄철 부산지역과 다른 연구에서 측정된 황사시(Yellow sand : Y)와 비황사시(Non-Yellow sand, NY)의 PM10의 농도 그리고 금속원소의 농도와 비를 나타낸 것이다. PM10의 농도는 황사시와 비황사시에 각각 362.7 µg/m³과 48.3 µg/m³으로 황사시가 비황사시에 비해 7.5배 높은 농도를 나타내었으며, 유의한 상관(P<0.05)을 보였다. 2002년 부산시 감전동의 3월, 4월, 5월의 평균농도가 각각 130.9 µg/m³, 103.7 µg/m³, 58.6 µg/m³이었으며, 3, 4, 5월의 평균농도가 98.8 µg/m³으로 나타난 것과 비교하면 황사시의 농도는 매우 높은 것으로 나타났다. PM10 중 금속농도의 황사시와 비황사시의 농도를 보면, Al, Ca, Mg이 황사시가 비황사시보다 10배 이상의 농도를 나타내었다. Fe, Si, Mn은 4~8배 정도를 나타내었으며, Na, Cu, Zn은 비황사시가 황사시보다 더 높은 농도를 나타내었다. 따라서 Na, Cu, Ni, Zn을 제외한 금속성분은 황사시에 더 높은 농도를 나타내었고, Al은 가장 높은 증가를 나타내었

다. 또한 Al, Fe, Mg, Si 및 Mn은 황사시와 비황사시 간에 유의한 상관(P<0.05)을 보였다. 특히 산업활동에 의해 발생되고 신경계통 등에 영향을 주어 인체의 위해성이 높은 Pb은 Y/NY=1.43으로 나타났으며, 일반토양에 많이 포함되어 있고 인체의 위해성이 낮은 Al, Ca, Fe, Mn 등은 황사시가 비황사시보다 매우 높게 나타났다. 해염에 의한 영향을 많이 받는 Na은 비황사시의 농도가 황사시보다 높은 것으로 나타나, 비황사시에 유입된 기류는 해양으로부터의 영향이라고 판단된다. 석탄이나 유류의 연소, 니켈 제련 및 도시폐기물의 소각 등에서 주로 배출되는 Ni의 경우, 비황사시와 황사시의 농도가 유사한 분포를 보여 황사에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

또한 표에서 보는 바와 같이, Kim *et al.*(2003)에 의하면, 2001년 봄철 서울의 경우에 Al, Mg은 황사시의 농도가 비황사시보다, 각각 3.4, 3.3배 높게 나타났으며, Cd, Cr, Cu, Pb 등은 황사시와 비황사시와 비교하여 별다른 변화를 보여 주지 못하였다. 최재천 등(1999c)에 의하면, 1998년 봄철 서울의 경우에 Cr, Zn을 제외한 모든 금속원소들은 농도값의 차이는 있으나, 황사시에 대부분 증가하였고, 체내에 축적되면 피해가 큰 중금속보다는 알칼리 계통의 금속성분 증가가 뚜렷하였다. 고산의 경우 황사시와 비황사시의 농도비는 Al, Ca, Fe, Ni 등이 3이상을 보였고, 타 원소들 역시 1보다 큰 값을 가져 황사현상으로 인한 농도의 증가 가능성을 확인하였다(박민하 등, 2001). 부산광역시 보건환경연구원(환경부, 2002)에서 측정된 2001년의 황사시 중금속농도 측정 결과, Cr이 8.3 ng/m³, Cu가 198.5 ng/m³, Fe가 2.68 µg/m³, Mn이 120.5 ng/m³, Ni이 9.1 ng/m³, Pb이 84.5 ng/m³이었다는 보고가 있다. 따라서 본 연구에서 측정된 농도와 보건환경연구원의 자료와 비교하면, Cr, Ni은 비슷한 농도를 나타내었고, Cu와 Pb은 2001년도 황사시의 농도가 높았으며, Fe와 Mn은 본 연구의 2002년 봄철 농도가 높게 나타났다.

Table 3. The comparison of metallic elements concentration between Yellow sand(Y) and Non-Yellow sand(NY) for PM10 this study and different site.

		$\mu\text{g}/\text{m}^3$								ng/m^3						
		Mass*	Al*	Ca	Fe*	K	Mg*	Na	Si*	Cd	Cr	Cu	Mn*	Ni	Pb	Zn
This study	Y	362.73	6.40	9.75	6.16	3.32	3.83	2.93	13.09	1.35	10.06	25.93	277.8	12.79	35.19	500.6
	NY	48.33	0.37	0.77	0.77	2.12	0.29	3.60	2.81	1.50	6.28	26.67	48.9	12.38	24.56	657.2
	Y/NY	7.5	17.5	12.7	8.0	1.6	13.2	0.8	4.7	0.9	1.6	1.0	5.7	1.0	1.4	0.8
Seoul ^{a)}	Y	144	4.79	3.92	3.96	1.71	1.52	1.0		7.73	19.5	53.0	156	69.8	133	372
	NY	72.5	1.40	1.59	1.54	0.72	0.47	0.56		7.63	18.5	48.7	65.1	37.4	120	270
	Y/NY	2.0	3.4	2.5	2.6	2.4	3.3	1.8		1.0	1.1	1.1	2.4	1.9	1.1	1.4
Seoul ^{b)}	Y	86.9	3.56	2.55	2.56		1.04	0.72		2.8	8.7	42.4	72.8	9.5	91.0	183.8
	NY	61.1	1.20	0.84	0.90		0.26	0.44		2.3	8.6	37.1	31.5	6.5	63.5	208.3
	Y/NY	1.42	2.97	3.04	2.86		3.99	1.66		1.20	1.01	1.14	2.31	1.47	1.43	0.88
Gosan ^{c)}	Y		1.36	1.55	1.64	0.89	0.59	3.43		1.56	4.02	11.2	36.7	25.1	45.5	79.1
	NY		0.39	0.5	0.45	0.37	0.27	1.45		1.73	3.43	5.92	13.6	7.97	21.5	58.3
	N/NY		3.5	3.1	3.6	2.4	2.2	2.4		0.90	1.17	0.97	2.70	3.15	2.12	1.36

^{a)}From Kim et al.(2003), ^{b)}From 최재천 등(1999c), ^{c)}From 박민하 등(2001), * P<0.05

5. 지각 농축계수

Fig. 3은 대기부유분진 중 각 원소의 농도를 기준으로 각 원소의 지각농축계수(Enrichment factor, EF)를 계산하여 나타낸 것이다. 기준물질을 Al로 하고 각 원소의 지각 구성비는 식(1)을 사용하여 구하였다.

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

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. 즉 EF값이 1에 가까우면 그 원소의 기원이 지표원소와 동일함을 의미하고, 10이하이면 지각물질 조성의 변화와 연계하여 설명할 수 있고, 10이상인 경우에는 인위적인 오염원의 영향이라고 할 수 있다(Watson, 1988). 대기먼지시료에서 측정된 Na, K, Ca, Mg 및 Fe의 EF값은 Al과 거의 비슷한 1에 가까워 이러한 원소들은 토

양입자에 많이 함유된 자연발생원에 의한 것으로 추정된다. 평균 지각구성 성분과 특정 시료 채취 장소들의 지각(토양)성분 사이에는 유의한 차이가 존재하므로 올바른 참고자료를 선택하는 것이 매우 중요하다(Berg et al, 1994).

2002년 봄철의 경우 Cd, Cu, Pb 및 Zn은 10 이상의 높은 지각농축계수를 보여 인위적인 오염원의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 또한 이들 원소들과 Cr, K, Mn, Na 및 Ni은 황사시보다는

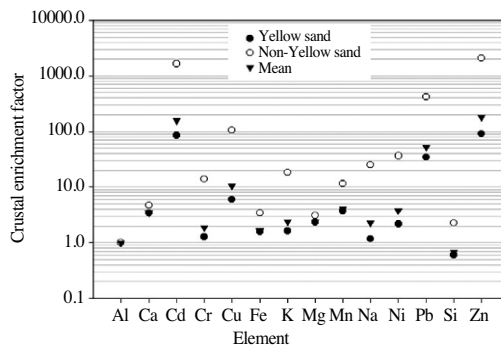


Fig. 3. Enrichment factor of each element related to crustal composition and normalized by Al at Busan.

비황사시에 10 이상의 높은 지각농축계수를 보였다. 이는 측정지점의 서쪽에 위치한 사상공단과 서남쪽에 위치한 해양으로부터 오염물질 및 해염 입자와 같은 에어로졸이 유입되어 영향을 주는 것으로 판단된다.

6. 토양입자의 기여율

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

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

여기서, C_{soil} 은 먼지 중 토양입자의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_{PM10} 은 부유분진의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_{Al} 은 부유분진 중의 Al의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), 0.0813은 토양 중 Al의 질량농도비를 나타낸 것이다.

토양입자의 영향을 더 명확히 산정하기 위해 황사시와 비황사시의 구분하여 구한 결과, 황사시는 21.7%, 비황사시는 9.3%로 2.3배의 차이를 보였다. 서울시의 경우, 최재천 등(1999b, 1999c)에 의하면 1998년에 황사시는 58.5%와 45.7%, 비황사시는 28.8%, 33.7%이었고, 신은상과 김희강(1992)에 의하면 황사시 약 60%, 비황사시 약 28%로 조사된 바 있는데, 이들과 비교하면 본 연구에서는 매우 낮은 값을 나타내었다. 또한 비교적 중국과 가까운 안면도에서의 황사시 88.1%, 비황사시 18.5%에 비해서도 부산지역은 현저히 낮은 값을 나타내고 있다. 안면도를 제외한 기타지역에서 황사시는 비황사시에 비해 토양의 기여율이 2배 정도 증가함을 알 수 있으며, 이러한 영향은 인접 국가(중국, 러시아, 몽고 등)에서 장거리 수송된 것으로 생각된다(최재천 등, 1999a). 따라서 부산

지역의 경우 타 지역에 비해 토양의 기여율이 작지만, 황사시에는 비황사시보다 많은 토양의 영향이 있는 것으로 나타났다.

7. 각 금속원소간의 상관관계

Table 4는 통계프로그램을 이용하여 각 금속원소간의 상관관계를 조사하여 나타낸 것이다. PM10의 질량농도와 토양성분인 Al, Ca, Fe, Mg, Mn과는 0.7이상의 유의한 상관성($P<0.05$)을 나타내었으며, 특히 Ca, Mg, Mn는 0.88이상의 매우 높은 상관성을 보였다. 그러나 Na, Ni, Zn과는 유의 상관을 나타내었고, 인위적인 오염물질인 Pb과도 0.65의 상관성을 나타내어, 최재천 등(1999c)의 연구결과와는 대조적인 현상을 나타내었다.

Al은 Ca, Cr, Fe, K, Mg, Mn 및 Si와는 0.7 이상의 유의한 상관($P<0.05$)을 보였으며, Cd, Cu, Na, Ni 및 Zn와는 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다. Ca은 Mg와 Mn, Fe는 Mg, Mn, Si, 그리고 K은 Si, Mg은 Mn과 매우 높은 상관성을 나타내었다. 특히 인위적인 기원에 바탕을 둔 Mn이 Al, Ca, Fe, Mg 등 인위적 및 토양에 기원을 둔 물질과 동시에 높은 상관성을 갖는 것은 특이한 현상이라고 할 수 있다. 또한 인위적인 오염이 기원인 Ni은 Cd, Cr, Cu 및 Pb와 유의한 상관($P<0.05$)을 보여 인접한 사상공단으로부터 기인될 수 있음을 시사하였으며, 그 외 성분과는 거의 상관성이 없었다. Pb은 Cd, Cr, Cu 및 Ni과 유의한 상관($P<0.05$)을 보였고, 그 외의 금속성분과는 상관성이 없었다. Mn을 제외한 인위적인 기원을 둔 원소들은 토양에 기원을 둔 성분과는 거의 상관성이 없었고, 토양에 기원을 둔 성분들 간에는 높은 상관성을 나타내었다(최재천 등, 1999c). 따라서 오염원의 형태에 따라서 금속성분들이 독립적인 변화양상을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

Table 4. The correlation matrix between each metallic elements in PM10.

	mass	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Si	Zn
mass	1.00														
Al	0.72*	1.00													
Ca	0.90**	0.71*	1.00												
Cd	0.08	0.14	0.07	1.00											
Cr	0.33	0.75*	0.35	0.68*	1.00										
Cu	0.14	0.23	0.14	0.90**	0.71*	1.00									
Fe	0.76**	0.99**	0.76**	0.19	0.75**	0.27	1.00								
K	0.34	0.87**	0.34	0.18	0.78**	0.26	0.84**	1.00							
Mg	0.89**	0.89**	0.95**	0.10	0.55	0.18	0.92**	0.61*	1.00						
Mn	0.89**	0.91**	0.92**	0.22	0.64*	0.31	0.94**	0.64*	0.99**	1.00					
Na	-0.20	0.19	0.14	0.01	0.20	0.11	0.18	0.37	0.17	0.16	1.00				
Ni	0.44	0.40	0.54	0.70*	0.66*	0.81**	0.46	0.22	0.51	0.58	0.13	1.00			
Pb	0.65*	0.45	0.51	0.75**	0.63*	0.70*	0.51	0.24	0.51	0.60	-0.34	0.74*	1.00		
Si	0.57	0.97**	0.54	0.17	0.81**	0.24	0.96**	0.94**	0.78**	0.81**	0.21	0.33	0.38	1.00	
Zn	-0.34	0.02	-0.21	0.81**	0.63*	0.74**	0.03	0.23	-0.13	-0.02	0.36	0.47	0.32	0.12	1.00

* P<0.05, ** P<0.01

IV. 결 론

2002년 부산지역의 봄철 황사시와 비황사시의 금속성분의 특성을 고찰하기 위해 MINI-VOL을 이용하여 PM10을 측정된 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 2002년 봄철의 PM10 농도는 황사발생일의 경우에 기준치를 초과하는 높은 농도를 나타내었으며, 그 외의 경우는 비교적 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 농도를 나타내었다.

2. PM 10의 질량농도는 평균 219.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최대 787.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 최소 19.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, Si(8.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>Ca(5.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>Fe(3.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>Al(3.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)>Na(3.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 등의 순으로 나타났으며, Cd(1.42 ng/m³)으로 가장 낮았다.

3. PM10의 농도는 황사시와 비황사시에 각각 362.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 48.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 황사시가 비황사시에 비해 7.5배의 농도를 나타내었으며, 유의한 상관(P<0.05)을 보였다. Al, Ca 및 Mg은 황사시가 비황사시보다 10배 이상의 농도를 보였으며, Fe, Si 및 Mn은 4~8배 정도를 나타냈고, Na, Cu 및

Zn은 비황사시가 황사시보다 더 높은 농도를 나타내었다. 특히 황사시 Al은 가장 높은 증가를 보였으며, Al, Fe, Mg, Si 및 Mn은 황사시와 비황사시 간에 유의한 상관(P<0.05)을 보였다.

4. Cd, Cu, Pb, Zn, Cr, K, Mn, Na 및 Ni은 황사시 보다는 비황사시에 10 이상의 높은 지각농축계수를 나타내었으며, 토양입자의 기여율은 황사시(21.7%)가 비황사시(9.3%)보다 2.3배 증가하였다.

참고문헌

- 대기오염연구회, 2000, 환경분석을 위한 대기환경 시험법, 동화기술, 514pp.
- 박민하, 김용표, 강창희, 2001, 황사/비황사의 입자 조성 변화: 1993~1996년 봄철 고산 측정 자료, 한국대기환경학회지, 17(6), 487-492.
- 박현미, 이용근, 이동수, 1991, 봄철 우리나라 대기 분진의 화학조성에 관하여(황사 때 더욱 낮아지는 서울대기의 중금속 오염도), 1991년 한국대기보전학회 학술연구발표요지집, 44~48.

- 신은상, 김희강, 1992, 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보전학회지, 8(1), 52-57.
- 오진만, 김득수, 2001, 군산지역 부유분진의 계절적 농도변화와 화학적 조성에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 17(6), 475-485.
- 이민희, 平井英二, 宮崎元一, 丁子哲治, 全浩, 1994, 황사현상시 황사입자가 우리나라 환경에 미치는 영향, 1994년 한국대기보전학회 추계요지집, 27-29.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 김상균, 1993, 황사현상시 대기 에어로졸 중 무기물질의 동태, 한국대기보전학회지, 9(3), 230-235.
- 전병일, 박재립, 박종길, 2002, 1999년 1월의 황사 발생시 부산지역의 부유분진 특성, 한국환경과학회지, 11(10), 1,081-1,087.
- 최규훈, 김기현, 최여진, 김미경, 강창희, 김민영, 이진홍, 김지영, 2002, 2001년 황사기간 중 서울과 제주 고산지역 중금속성분의 분포 특성에 대한 비교연구, 한국대기환경학회 2002 춘계학술대회 논문집, 149-150.
- 최금찬, 유수영, 전보경, 2000, 부산지역의 입자상 대기오염물질의 농도특성에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 26(2), 41-48.
- 최성우, 송형도, 2000, 대구지역 부유분진 중 미량 금속성분의 발생원 특성연구, 한국대기환경학회지, 16(5), 469-476.
- 최재천, 오성남, 박기준, 2000, 1998년 서울의 봄철 에어러솔 중 이온성분과 금속원소에 관한 연구, 한국기상학회지, 36(5), 551-560.
- 최재천, 조하만, 김지영, 김산, 박기준, 1999a, 1998년 봄철 서울지역 에어러솔 중 TSP와 PM10의 화학적 특성 비교, 한국기상학회지, 35(1), 38-46.
- 최재천, 조하만, 박기준, 김산, 1999b, 서울과 안면도에서 관측된 에어러솔의 화학적 특성 비교, 한국기상학회지, 35(3), 396-404.
- 최재천, 조하만, 전영신, 박기준, 1999c, 1998년 봄철 서울에서 관측된 에어러솔의 금속 성분에 관한 연구, 한국기상학회지, 263-271.
- 황용식, 2003, 부산지역 강하먼지의 화학적 조성 과 대기환경적 특성, 부산대학교 박사학위 논문, 250pp.
- 환경부, 2002, 3·4월 황사시 중금속 분석결과 발표, 환경부 보도자료, 2pp.
- Berg, T., Royset, O., and E. Steinners, 1994, Trace elements in atmospheric precipitations at Norwegian background stations(1989-1990) measured by ICP-MS, Atmos. Environ., 28, 3519-3536.
- Kim, Byung-Gon and Soon-Ung Park, 2001, Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea, Atmos. Environ., 35, 3191-3201.
- Kim, Ki-Hyun, Choi, Gyoo-Hoon, Kang, Chang-Hee, Lee, Jin-Hong, Kim, J. Y., Youn, Y. H., and S. R. Lee, 2003, The chemical composition of fine and coarse particle in relation with the Asian Dust events, Atmos. Environ., 37, 753-765.
- Var, F., Narita, Y., and S. Tanaka, 2000, The concentration, trend and seasonal variation of metals in the atmosphere in 16 Japanese cities shown by the results of National Air Surveillance Network(NASN) from 1974 to 1996, Atmos. Environ., 34, 2,755-2,770.
- Watson, J. G., 1988, Transections receptor models in air resources management, An international specialty conference, San Francisco, California, 491pp.
- Yang, K. L., 2002, Spatial and seasonal variation of PM10 mass concentration in Taiwan, Atmos. Environ., 36, 3403-3411.