

황사기간 중 PM_{2.5}, PM₁₀, TSP 농도 특성에 관한 연구

김민영 · 조석주* · 김광래 · 이민환

서울특별시보건환경연구원, 137-130 서울특별시 서초구 양재동 202-3

The Behaviour of Dust Concentrations During Sand Storm in Seoul Area

Min-Young Kim · Seog-Ju Cho* · Kwang-Rae Kim · Min-Hwan Lee

Seoul Metropolitan Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-130, Korea

Abstract: The characteristics of particles were evaluated through the measurement data of PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP instruments located in air quality monitoring stations installed and operated by Seoul Metropolitan city. The data of particulate mass on the filter was collected by a high volume air sampler during the sand storm period. The number of days of sand storm in Seoul showed a different pattern from 1990 to November 2002, We can see a trend of increased occurrence and duration of sand storms. The ratio of PM₁₀ to TSP was shown as 52.9% and 59.4% during the sand storm period in 2000 and 2001, respectively. It was indicated that the particles larger than 10 μ m increased by approximately 10% in sand storm periods compared to no sand storm period. While PM₁₀ size fraction reached 71.4% in 2002, the contribution of sand storm to total particulate concentration was estimated to be 11.9% for PM_{2.5}, 23.1% for PM₁₀, 19% for TSP in 2002, respectively and sand storms highly correlated with annual total particulate concentration.

Keywords: sand storm, PM₁₀, TSP, heavy metals, ionic components

요약: 서울시에서 설치하여 운영중인 대기질 측정소의 입자상물질을 대표하는 PM_{2.5}, PM₁₀, TSP와 황사기간 중 고용량공기포집기로 채취한 먼지성분을 분석, 평가하였다. 1990년도부터 2002년 11월까지 서울에서 관측된 황사일수는 2000년 이후 발생빈도가 증가하였으며 황사지속시간도 길어지는 경향을 보였다. PM₁₀/TSP 비율은 황사시 2000년, 2001년도에 각각 52.9%, 59.4%로 비황사시에 비해 PM₁₀의 비율이 약 10% 정도 낮은 것으로 미루어 황사시 10 μ m 이상의 입경이 큰 입자 영향이 컸던 반면에 2002년 황사시에는 PM₁₀의 영향이 오히려 크게 나타나 PM₁₀이 TSP 중의 71.4%에 달하였다. 황사가 전체 먼지농도에 미치는 기여율은 2002년도에 PM_{2.5} 11.9%, PM₁₀ 23.1%, TSP 19%로 가장 높은 기여도를 보여 황사가 전체 먼지농도에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있었다.

주요어: 황사, PM₁₀, TSP, 중금속, 이온성분

서론

중국과 몽고의 사막지대나 황화중류의 황토지역 등에서 저기압이 통과할 때 한랭전선 후면에서 부는 강한 바람이나 지형에 의해 만들어진 난류 등에 의한 영향으로 상층으로 날려 올라가 공중에 부유하고 이송되는 먼지를 황사현상(Asian Dust or Sand Storm)으로 총칭하고 있다(Lin, 2001). 국내에서도 매

년 봄철이면 거의 주기적으로 발생하며, 공기질 저하 또는 시정악화와 같은 결과를 초래하는 가시적인 현상으로 받아들여지고 있다(Chung and Yoon, 1996). 한반도에서 황사현상은 일반적으로 유라시아 대륙의 중심부인 중국내륙의 서부건조지역인 타크라마칸사막, 고비사막 등으로 알려져 있었으나 중국의 산업화 및 산림, 녹지의 훼손으로 인한 건조지역의 확대로 인하여 새롭게 내몽고고원과 북경 북서쪽의 훈센다크 등도 2차 발원지로 주목받고 있다. 1차 발원지인 경우 보통 2~5일을 이동하여 한반도에 영향을 주나, 2차 발원지인 경우 1~2일 이내에 영향을 주는 것으로 최근 연구에서 밝혀지고 있다(인회진 등, 2002). 황사

*Corresponding author: stoncho@empal.com

Tel: 82-2-570-3373

Fax: 82-2-570-3364

가 주로 봄에 발생하는 원인은 식생대가 없는 지표와 수일간 맑은 날이 지속될 경우 지표 부근의 기온이 크게 상승할 때 찬 성질을 띤 기단이 통과하게 되면 대기가 열적으로 불안정하므로 쉽게 황사가 부유할 수 있는 조건이 된다(전영신 등, 2000). 최근 3~4년간 서울의 황사발생일은 그 빈도를 더하고 있고, 황사의 영향 또한 매우 크게 나타나는 양상으로 변화하고 있다. 이처럼 황사는 먼지와 관련된 가장 직접적인 자연현상을 대변하기 때문에, 결과적으로 에어로졸의 발생 및 이송과 관련된 여러 가지 현상을 규명하는데 중요한 단서를 제공할 것이다.

본 연구는 서울시에서 설치하여 운영 중인 대기질 측정소 중 입자상물질을 대표하는 $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP를 모두 갖춘 측정소의 측정결과와 별도로 황사기간 중 고용량공기포집기로 채취한 여지 중의 먼지를 분석하여 평가하였다. 이들 지역으로부터 관측된 자료를 이용하여 황사와 관련된 먼지의 분포특성을 도출하기 위하여 입경별 먼지간의 상대적 또는 절대적인 관계에 대한 의미를 해석하였다. 이들 자료는 궁극적으로 황사가 진행되는 단계에서 황사의 구성인자들이 지닌 특성을 규명할 수 있는 여러 가지 단서를 제공할 것으로 기대된다.

연구방법

현재 전국에 설치운영 중인 대기질 측정망 중 유일하게 $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP성분을 매시간 간격으로 상시관측 중인 서울시의 15개 측정지점인 구의동, 성수동, 궁동, 남산타워고층관측점 등을 연구대상으로 선택하였다. 이들 지점은 서울시를 대표하는 주요 대기오염 관측지점이며 이들 자료에 대한 상세한 분석을 위해 연구의 대상시기를 2000년부터 2002년 11월까지 최대 24,700여개의 시간대별 자료가 이용되었다. 측정망의 입자상물질 측정기기는 β 선 흡수방식이며 각 입경별로 분립장치가 따로 설치되어 있다. 기기의 측정 range는 $0\sim 10mg/m^3$ 로 6개의 range로 구성되어 있으며, 최소표시단위는 $1\mu g/m^3$ 이며 반복재현성(3회)은 $\pm 2\%$ 이내, 제로 및 스펀드리프트는 각 $\pm 2\%$ 이내, 직선성은 $100\mu g/m^3$ 이하의 농도에서는 $\pm 10\mu g/m^3$ 이며, $100\mu g/m^3$ 이상의 농도에서는 $\pm 10\%$ 이다. 기기의 계측과 관련된 교정은 측정기기에 내장되어 있는 등가막(standard film)에 의하여 자동 교정된다. 또한 측정된 자료는 서울시보건환경연구원 TMS를 통하여 자동

전송되어 검색을 거쳐 DB화 되며 SAS에 의한 통계적인 처리를 거쳐 사용하였다.

중금속 및 이온성분 분석은 서초구 양재동의 서울시보건환경연구원 3층 옥상에 설치된 TSP, PM_{10} High volume air sample sampler(TSP: Model UV-1H, wedding사, PM_{10} : Model TE8011, andersen사)를 사용하였으며 기준유량장치인 Roots meter와 오리피스를 이용하여 유량교정을 받은 부속유량계를 사용하여 정확한 흡입유량을 산출하였다. 여지는 Quartz microfibre filters(QM-A, $20.3cm \times 25.4cm$, Whatman)를 사용하였다. 시료의 전처리는 전체 여지 중 2"크기의 아크릴 Puncher를 이용하여 4장을 분취하고 Teflon Vessel에 세라믹 가위로 적당한 크기로 세절하여 넣은 후 왕수(질산 : 염산 = 1 : 3) 10ml, 초순수 30ml를 가하였다. Teflon Vessel를 Microwave(Q45, Tekton Inc.)에 장착한 후 Power 30%에서 20분, 50%에서 20분, 70%에서 40분의 조건으로 분해시켰다. 분해 시료를 No 5c 여지(100mm, Advantec)로 여과한 후 초순수로 Vessel를 세척한 후 여과액은 hot plate에서 거의 날려보낸 다음 질산(2+98)을 가하여 최종액을 25ml로 하여, 원자흡광광도계(Polarized atomic absorption spectrophotometry, Z-5000, Hitachi) 및 ICP Spectrometer(Spectro Ciros ccp, Spectro)를 이용하였다. 시정거리는 기상청 서울관측소에서 황사기간 내 매 시간 관측한 자료를 인용하였다. 평상시 3시간 단위로 관측하나 황사기간은 시간대별 관측이 이루어지며 관측방법은 숙련된 기상요원에 의해 목측법으로 관측하고 있다.

결과 및 토의

서울에서 관측된 황사일수 및 기간

1990년부터 2002년 11월까지 서울에서 관측된 황사일수는 그림 1과 같으며 해에 따라 매우 다른 출현 빈도를 보이나 최근 몇 년 동안은 황사일수 및 총 황사지속시간도 매우 증가하는 추세를 보이고 있다. 즉 1994년에는 황사가 발현하지 않은 해도 있었지만 2001년도에 발생빈도 7회, 발생일 27일, 발생시간 581시간이라는 황사 관측이래 모든 요인에서 가장 높게 나타났다. 2002년 11월까지의 발생빈도도 예년에 비해 높게 기록되었으며 특히 지금까지 거의 관측되지 않았던 11월 황사현상도 발현되었다. 황사의 증가는 중국의 산업화 및 산림, 녹지의 훼손으로

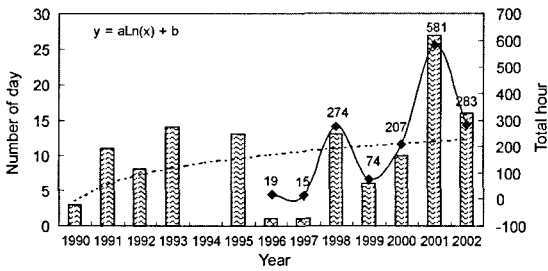


Fig. 1. Sand storm events in Seoul during 1990-2002.

인한 건조지역의 확대, 기상변화에 의한 영향으로 볼 수 있다.

황사기간은 기상청 방재기상센터에서 제공한 서울의 황사일을 기준으로 하였으며 조사기간 내에 황사 발생은 최근 3년간의 경우, 표 1에 보여지듯 봄철에 주로 발생되지만 2001년은 겨울철인 1월 2일과 12월 13, 14일과 같이 한 겨울에도 발생하는 양상을 보였으며, 2002년도 역시 1월과 특이하게 11월에 황사현상이 출현하였다. 이것은 황사발생의 계절적 특성이 점점 사라지는 것으로 이는 전 지구적 기상 이변의 일 부분으로 추정된다. 현재까지 황사 관측이래 여름철 황사현상은 없었으며 약 95% 이상이 아직도 봄철에 발생한다. 본 연구에서 이용한 비황사 기간의 자료는 황사기간을 제외한 15개소 측정망의 자료를 평균하였으며, 필요시 분석 자료를 비교하기 위하여 황사기간을 포함하는 평균치를 사용하였다.

황사 먼지의 입경분포 특성

(1) 먼지의 입경별 분포 및 비율

먼지의 입경별 분포비율을 파악하기 위하여 15개소의 대기질 측정망에서 측정된 자료를 황사기간(표 1의 기간)과 비황사기간(표 1의 기간을 제외한 기간)으로 구분하여 표 2에 PM₁₀/TSP, PM_{2.5}/TSP, PM_{2.5}/PM₁₀의 상대적인 비율을 표현하였다. 황사시 TSP 및 PM₁₀의 평균농도가 2002년도에 각각 486µg/m³, 347µg/m³으로 3년간 평균농도 중 가장 고농도이며, 최근 3년간 황사기간 중 TSP 및 PM₁₀ 농도의 증가가 현저하였음을 알 수 있다. 반면에 비황사 기간의 평균농도는 3년간이 매우 유사한 농도를 보였다. PM₁₀과 TSP 비율은 황사시 2000년, 2001년도에 각각 52.9%, 59.4%로 비황사시에 비해 PM₁₀의 비율이 약 10% point 정도 낮은 것으로 미루어 황사시 10µm이상의 입경이 큰 입자 영향이 컸던 반면에 2002년 황사시에는 PM₁₀의 영향이 오히려 크게 나타나 PM₁₀이 TSP의 71.4%에 달하였다. PM_{2.5}/TSP 비율과 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율은 비황사시에 비하여 각각 약 10% point 및 20% point 정도 낮은 것으로 나타났다. 따라서 2002년 황사는 10µm 이하의 입경분포를 갖는 입자에 의한 영향을 예년에 비하여 많이 받고 있고 이의 영향도는 경년변화가 큼을 시사한다.

(2) 황사시 PM_{2.5}, PM₁₀, 및 TSP 농도

그림 2는 황사기간 중(2000. 1~2002. 11) 관측한

Table 1. Sand storm events observed in resent three years in Seoul

year	frequency	day	Period
2000	6	10	3.7, 3.23~3.24, 3.27~3.28, 4.7~4.8, 4.23, 4.26~4.27
2001	7	27	1.2, 3.3~3.7, 3.20~3.25, 4.7~4.12, 4.24~4.26, 5.16~5.19, 12.13~12.14
2002	7	16	1.12~1.13, 3.17~3.19, 3.21~3.23, 4.8~4.10, 4.12, 4.16~4.17, 11.11~11.12

Table 2. Comparison of aerosol concentrations measured as PM_{2.5}, PM₁₀ and TSP between sand storm and normal period.

Year/Item	2000				2001				2002			
	Sand Storm		Normal		Sand Storm		Normal		Sand Storm		Normal	
	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max
TSP (µg/m ³)	238	2565	98	710	266	1207	100	1907	486	4394	100	2332
PM ₁₀ (µg/m ³)	126	993	64	511	158	980	67	735	347	3311	65	1558
PM _{2.5} (µg/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	-	129	1239	37	364
PM ₁₀ /TSP (%)	52.9		65.3		59.4		67.0		71.4		65.0	
PM _{2.5} /TSP (%)	17.7*		40.0*		22.3*		41.0*		26.5		37.0	
PM _{2.5} /PM ₁₀ (%)	35.3*		61.3*		41.7*		62.3*		37.2		56.9	

*Average value for only 4 stations that were measured PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP

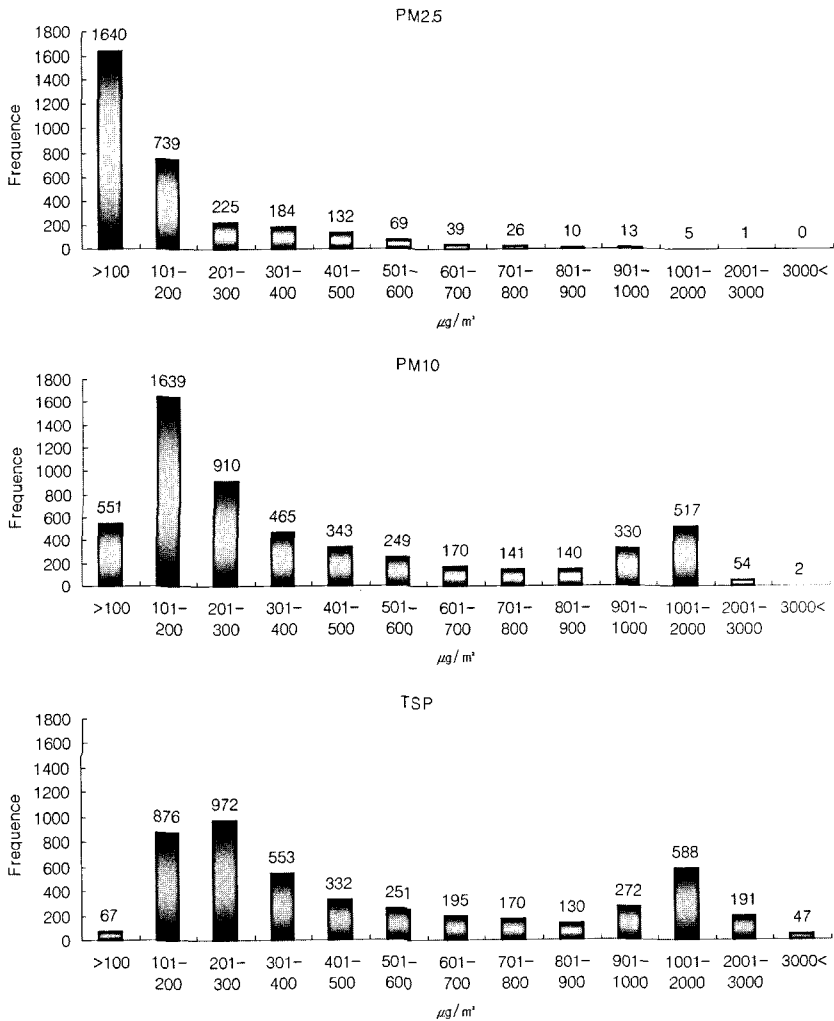


Fig. 2. Sand storm frequencies observed in Seoul (2000~2002)

PM_{2.5}, PM₁₀, TSP의 계급별 출현빈도를 나타낸 것이다. PM₁₀과 TSP의 농도범위별 출현빈도를 도시하면 대체로 bi-modal분포를 나타냄을 알 수 있다. 반면에 PM_{2.5}는 지수형과 유사한 모양을 나타내고 있다.

500µg/m₃이상의 고농도의 출현빈도는 TSP 경우 총 3546회 중에서 746회로서 21%를, PM₁₀은 총 4608개의 측정치중 15.2%인 700시간을, PM_{2.5}는 총 3064회 가운데 144회를 기록하여 4.7%를 나타내었다.

황사시 시정 변화

황사 입자는 태양 복사를 산란 및 흡수하여 시정을 감소시키므로(정용승 등 2000) 2002년 자료를 중심으로 황사시에 시정과 입경별 먼지농도와의 관계를

그림 3에 나타냈다. 먼지농도가 고농도 일수록 시정이 낮은 반비례하는 형태를 보이며, 입경별 변동특성은 매우 유사하였다. 이 결과는 1997~2000년에 관측한 황사시 TSP, PM₁₀ 농도와 시정과의 관계를 연구한 자료와 매우 유사하며 이 연구에서는 시정에 의한 황사 농도 예측 가능성을 제시한 바 있다(정용승 등 2000). 본 연구에서 총 180회 관측된 시정거리와 같은 시간대의 입경별 먼지농도의 관계는 평균시정 7.1km이며 이때 평균먼지농도는 TSP 695±570.58 µg/m³, PM₁₀ 482±424.43µg/m³, PM_{2.5} 163±143.44 µg/m³(Mean±SD)로 나타났으며, 5km 이하의 시정 악화 현상도 82회로 전체 관측시정 중 45.6%를 차지하며, 1km대 악천후 시정도 20회로 전체 관측시정

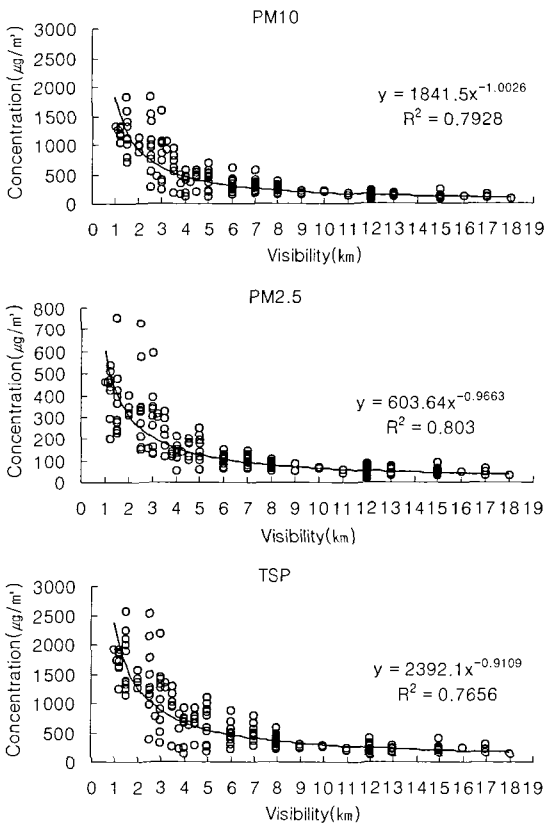


Fig. 3. Distribution of dust concentrations and visibility during Sand storm events in Seoul (2002)

중 11.1%로 나타났다. 1km대 시정 시 평균먼지농도는 TSP 1,732±364.48µg/m³, PM₁₀ 1,250±259.16 µg/m³, PM_{2.5} 399±134.26µg/m³(Mean±SD)으로 시정이 악화될수록 각 입경별 평균먼지농도도 매우 높아지는 경향을 보였다. 시정이 5km 이하에서 입경별 % 비율은 PM₁₀/TSP 71.1%, PM_{2.5}/TSP 24%로 표 2에서 비율과 유사하여 황사기간동안 특정한 입경에 의한 시정악화 현상이 아닌 전 입경에서 시정악화 원인을 제공하고 있음을 알 수 있다.

황사의 먼지농도 기여도

황사가 서울시 전체 먼지농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 표 3에서와 같이 TSP 및 PM₁₀ 그리고 PM_{2.5}에 대하여 황사기간을 제외한 연간 평균 농도와 황사기간을 포함한 연평균농도를 비교하여 상대적인 비를 계산하여 평가를 하였다. 2000년도는 황사의 기여도가 전체 평균 농도에 미치는 영향이 PM₁₀ 및 TSP가 각각 1.6%, 1.02%로 낮았으나 2002년에는 각각 23.1%, 19%로 연평균농도에 미치는 영향이 매우 높아졌음을 알 수 있다. 특히 PM_{2.5}의 경우에도 2002년도에 황사가 11.9%의 영향을 준 것으로 나타났다. 또한 황사빈도 및 황사일수가 가장 많았던 2001년도 보다 2002년도가 연평균먼지농도에 미치는 황사의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이는 1000µg/m³의 고농도 발생빈도 및 최고농도(2002년 4394µg/m³)에서도 2002도에는 황사영향이 매우 컸음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 황사발생횟수 못지 않게 평균 농도 및 최고농도 그리고 지속시간도 인체건강이나 환경에 미치는 영향에서 볼 때 매우 중요한 사항으로 고려되어야 할 것이다.

황사성분에 대한 평가

황사와 비황사 분진의 화학성분 분석은 2002년 1월 12일 및 3월 16일 3월 18일에서 3월 23일까지 총 8일간의 황사시와 황사 전후의 각 2일 내지 5일 동안의 비황사 기간 총 10일 동안 매일 대기 중 급속 성분 및 이온성분 농도를 분석하여 평가하였다.

(1) PM₁₀, 및 TSP중의 금속원소농도

PM₁₀과 TSP중에 함유된 원소농도를 황사기간 및 비황사기간으로 구분하여 조사한 결과는 표 4 및 표 5와 같다.

황사현상 발현시 토양기원 원소인 Al, Ca, Fe등의 대기중 농도는 비황사시 보다 각각 9.1배, 6.2배, 7.3배씩 높았고(PM₁₀ base), Cr, K, Mg, Mn, Sr 및 V의

Table 3. The dust concentrations affected by sand storm

Year	Annual mean			Average value except sand storm period			Affected rate		
	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP	PM _{2.5}	PM ₁₀	TSP
2000	-	65	99	-	64	98	-	1.6%	1.02%
2001	-	71	114	-	67	100	-	6.0%	14%
2002.Oct	47	80	119	42	65	100	11.9%	23.1%	19%

Table 4. Concentrations of metal elements in PM₁₀ and TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Sampling period	Size	Al	Ca	Cr	Fe	K	Mg	Mn	Na	Sr	V
Jan. 10-11/02	PM ₁₀	1.68±0.97	1.41±0.74	0.007±0.002	1.66±0.63	0.87±0.34	0.51±0.29	0.05±0.02	0.73±0.32	0.008±0.004	0.005±0.002
14-15/02											
Mar 12-15/02	TSP	3.16±1.55	2.84±1.27	0.010±0.002	2.93±1.02	1.30±0.50	0.89±0.48	0.07±0.03	0.98±0.48	0.014±0.007	0.007±0.003
25-26/02 (10days)											
Jan. 12/02	PM ₁₀	15.17±18.14	8.79±10.82	0.017±0.016	12.05±14.6	3.743±4.43	3.82±4.08	0.246±0.257	1.87±1.22	0.051±0.060	0.022±0.023
Mar 16/02											
18-23/02	TSP	26.19±35.6	15.53±20.9	0.029±0.031	21.4±29.28	5.65±6.02	5.73±0.48	0.38±0.44	2.69±2.20	0.082±0.109	0.036±0.044
(8days)											
sand storm	PM ₁₀	9.1	6.2	2.6	7.3	4.3	7.5	5.2	2.6	6.1	4.6
normal		TSP	8.3	5.5	2.9	7.3	4.4	6.5	5.3	2.7	5.8

Table 5. Concentrations of metal elements in PM₁₀ and TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Sampling period	Size	As	Ba	Cd	Cu	Ni	Pb	Sc	Zn
Jan. 10-11/02	PM ₁₀	0.010±0.006	0.07±0.02	0.003±0.001	0.10±0.04	0.007±0.002	0.11±0.06	0.01±0.01	0.21±0.06
14-15/02									
Mar 12-15/02	TSP	0.011±0.006	0.09±0.02	0.003±0.001	0.32±0.06	0.01±0.003	0.11±0.06	0.011±0.01	0.25±0.06
25-26/02 (10days)									
Jan. 12/02	PM ₁₀	0.011±0.008	0.10±0.07	0.003±0.002	0.11±0.05	0.013±0.010	0.08±0.06	0.006±0.007	0.17±0.09
Mar 16/02									
18-23/02	TSP	0.014±0.008	0.15±0.13	0.002±0.002	0.31±0.10	0.020±0.019	0.09±0.06	0.006±0.009	0.21±0.09
(8days)									
sand storm	PM ₁₀	1.12	1.39	0.95	1.13	1.17	0.77	0.61	0.82
normal		TSP	1.26	1.57	0.90	1.00	2.10	0.75	0.54

Table 6. Concentration ratio between Al and Ca in PM₁₀ and TSP particles.

Concentration ratio (Ca/Al)					
Date	Non-sand storm		Date	Sand storm	
	PM ₁₀	TSP		PM ₁₀	TSP
Jan. 10	0.98	1.21	Jan. 12	-	-
11	0.73	0.85	Mar. 16	0.50	0.51
14	1.04	0.99	18	0.53	0.60
15	-	1.43	19	0.72	0.77
Mar. 12	0.77	0.82	20	0.59	0.61
13	0.88	0.82	21	0.60	0.59
14	0.92	1.06	22	0.45	0.50
15	0.76	0.67	23	-	0.56
25	0.83	0.93			
26	0.77	0.84			
Ave±SD	0.83±0.11	0.93±0.22	Ave±SD	0.58±0.13	0.59±0.09

대기중 농도는 비황사시 보다 2.6배~7.5배정도(PM₁₀ base)의 고농도를 나타내었다. 그러나 As, Ba, Cd, Cu, Ni등의 원소성분은 황사, 비황사기간 간에 큰 차이를 나타내지 않았으며, Pb, Se, Zn등의 원소성분은 각각 0.77, 0.61, 0.82배로 비황사기간이 높은 것으로 나타나 이들 원소가 인위적 오염물질임을 입증한다.

(2) 대기 중 Al 및 Ca농도비

표 6은 황사 발현시와 비황사 기간중의 Al과 Ca농도비(Ca/Al)를 나타낸 것이다.

비황사시의 농도비가 0.73~1.04로 매우 높게 나타났으며 평균은 0.83±0.11(mean±sd)로 나타났다. 한편 대도시 및 공업도시에서 일반적으로 대기중의 Ca 농도가 높고 Ca/Al 농도비가 큰 것으로 보고한 바 있다(Tanaka 등, 1989).

반면에 황사시의 Ca/Al 농도비는 0.45~0.72의 범위를 나타내어 비황사시에 비하여 매우 낮았으며 평균은 0.58±0.13이었다. 각 발생원중 Al의 중량농도는 황사의 발원지인 중국 타클라마칸사막의 토양 중에 6.8% 함유된 것으로 보고(Tanaka 등, 1989)하고 있고, 일본의 토양 중에는 6.6%(Tanaka 등, 1986), 우리나라의 토양 중에는 평균 8.3% 정도 함유된 것으로 조사(이승우, 2000)되어 이들 발생원 중의 Al의 중량농도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 황사시와 비황사시 비교에서 비교금속인 Al은 9.1배, Ca 6.2배로 나타난 바와 같이 황사시 우리나라에 영향을 미치는 금속은 발원지에 포함되어 있는 Ca보다는 Al의 영향이 크게 작용하여 Ca/Al 비가 낮게 나타나고 있는 것으로 보인다.

(3) 지각농축인자를 이용한 발생원 평가

한 원소가 어떤 기원 입자에 속하는지를 판단하는 방법으로 각 기원의 지시원소와 그 원소 비율을 이용한 농축인자(enrichment factor, E.F)를 계산하여 각 기원에 대해 상대적인 농축 정도를 갖고 판단하는 방법이 있다(신은상 등, 2002). 이는 각 기원의 지시원소와 상관계수를 이용하여 가능하다. 지각농축인자 방법(crustal enrichment factor method)은 지각과 비지각(non-crustal) 배출원의 강도를 평가하기 위해서 사용하는 방법이다. 그림 3은 지각에서의 금속 성분을 이용하여 아래 식으로부터 계산한 농축인자를 PM₁₀에 대한 황사시와 비황사시로 나타낸 것이다. 지각 구성물질에 대한 기준 원소로 Si가 적당하나 분석 방법이 보다 간단한 Al을 많이 이용하고 있다. X의 농축인자는

$$E.F_{crust} = (X/Al)_{aerosol} / (X/Al)_{crust}$$

로 정의된다. 여기서 (X/Al)_{crust}은 Talyer에 의한 지각의 평균조성을 이용하여 계산하였다. E.F값이 1에 가까우면 그 성분들은 지각 즉 토양이 지배적인 배출원이며, 1이상의 E.F값을 갖는 성분들은 비지각 배출원들(non-crustal sources) 즉 인위적 오염원이 크게 기여함을 의미한다(Gao et al., 2002, 신은상 등, 2002).

그림 4는 황사시와 비황사시의 각 금속성분에 대한 E.F값을 log Scale로 나타내었다. 여기서 보면 18종 금속 모두에서 황사시가 비황사시에 비해 E.F값이 낮아 황사시 토양성분의 영향이 있음을 알 수 있다. 비황사 기간에는 상대적으로 인위적 오염원에 기

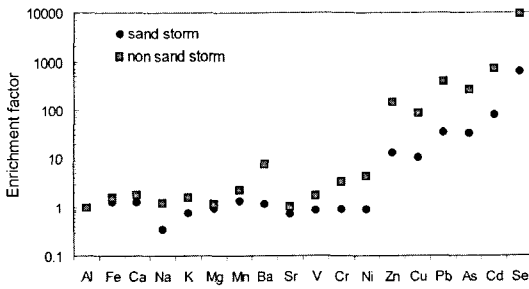


Fig. 4. Enrichment factor of heavy metals in PM₁₀

인하는 금속 성분의 E.F값이 높은 형태를 보이고 있다. E.F값이 5이하인 금속은 황사시 및 비황사시 주로 토양기원인 12개 항목이며, 5이상의 값은 황사시와 비황사시에 동일하게 Zn, Cu, Pb, As, Cd, Se로 황사시기에 관계없이 인위적 배출원에서 발생 기여도가 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 2000년에 비황사 기간에 대구지역에서 조사한 자료와 유사하다(최성우, 2000). E.F값이 5이상인 금속도 황사시와 비황사시를 비교하면 황사시가 매우 낮은 농축성을 보이는데 이는 황사에 의해 농축계수를 산정하는 기본 원소인 Al의 농도가 높아졌기 때문이다.

(4) PM₁₀, 및 TSP중의 이온성분 농도

PM₁₀, TSP중에 함유된 이온성분농도를 황사기간 및 비황사기간으로 구분하여 분석한 결과는 표 7과 같다.

먼지농도의 경우 황사기간시 PM₁₀농도는 비황사시보다 3.2배, TSP농도는 이보다 높은 4.2배이며, PM₁₀ 중의 Na⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺농도의 황사/비황사비는 각각 3.3배, 2.7배, 2.6배를 나타내었다. TSP는 각각 3.1배, 2.4배, 1.7배를 나타내 PM₁₀과 큰 차이가 없었으나 Ca⁺⁺농도에서 상대적으로 낮은 값을 보였다.

NH₄⁺농도는 PM₁₀과 TSP 모두 0.5배로서 황사시 매우 낮은 분포를 보이는 바 이는 황사에 의해 전체 농도가 크게 증가하여 상대적으로 낮아지는 경향으로 보인다. 기타 대기 중 이온성분들은 황사발생에 대한 영향이 없는 것으로 나타났다.

(5) PM₁₀ 중 총 화학성분 비율

PM₁₀ 중 화학성분 비를 황사기간과 비황사 기간으로 구분하여 그림 5에 나타내었다. 비황사시에 먼지 성분 중 분석대상 무기화학성분의 총량은 54%를 차지하였으며, NO₃⁻와 SO₄²⁻ 이온 성분 합이 35%로

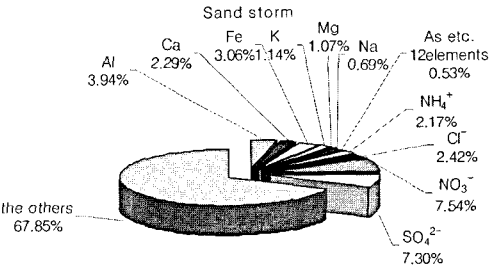
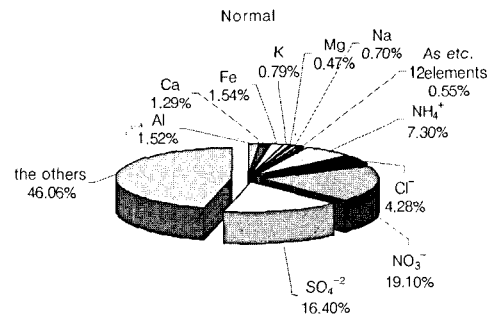


Fig. 5. Average chemical composition of PM₁₀ during sand storm period and normal period in Seoul Area.

매우 높은 비율을 유지하였다. 반면에 황사기간의 화학성분은 먼지 성분 중 32.2%의 비율을 보였다. 이 중 NO₃⁻와 SO₄²⁻ 이온 성분 합이 14.8%로 비황사시보다 절반 이하로 현저하게 감소하였으며, 상대적으로 Al, Ca, Fe, K 등 토양기원 성분은 증가하였다. 전체 먼지성분 중 화학성분비가 각각 54%, 32.2% 나타난 것은 본 연구에서 분석하지 못한 SiO₂, Ti 등 주요 토양성분과 탄소, 유기화학성분, 기타 미량물질 등으로 추정된다. 황사시 전체 화학성분 비율 및 산성물질인 NO₃⁻와 SO₄²⁻ 이온 성분이 감소한 것은 SiO₂, Al 등 토양성분의 증가에 의한 상대적인 감소 비율이며 특히 SiO₂의 경우 토양 중 비율이 다른 분석물질보다 매우 높은 것을 감안 할 때 이러한 감소 원인에 대한 설명이 가능하다.

결론

서울시 대기질 측정망의 먼지 측정자료를 이용하여, 경년변화, 입경별 분포, 중량농도, 시정과의 관계를 황사와 비황사기간으로 구분하여 연구하였으며 황사의 먼지성분에 대한 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 1990년도부터 2002년 11월까지 서울에서 관측

Table 7. Concentrations of ionic components in PM₁₀ and TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Sampling period	Size	Dust	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Jan.10-11/02 14-15/02	PM ₁₀	106±27	0.60±0.43	0.17±0.10	1.34±0.75	7.8±3.2	1.05±0.88	0.17±0.17	4.3±1.5	20.8±8.9	17.8±7.7
Mar 12-15/02 25-26/02 (10days)	TSP	152±40	0.86±0.54	0.26±0.12	2.74±1.35	8.1±2.9	1.22±0.80	0.35±0.31	5.3±1.9	22.9±10.5	19.9±7.6
Jan. 12/02 Mar 16/02 18-23/02 (8days)	PM ₁₀	343±	1.98±1.0	0.47±0.27	3.44±2.01	4.2±4.4	1.25±0.84	0.24±0.13	5.3±2.1	15.0±13.2	17.2±12.5
	TSP	634±	2.68±1.93	0.63±0.48	4.57±3.13	4.1±3.8	1.35±0.86	0.34±0.24	7.0±2.9	15.3±12.7	21.5±17.5
sand storm	PM ₁₀	3.2	3.3	2.7	2.6	0.5	1.2	1.4	1.2	0.7	1.0
normal	TSP	4.2	3.1	2.4	1.7	0.5	1.1	1.0	1.3	0.7	1.1

된 황사일수는 해에 따라 매우 다른 출현빈 도를 보이나 2000년 이후 발생빈도가 증가하였으며 황사지속시간도 길어지는 경향이 있다.

2. PM₁₀/TSP 비는 황사시 2000년, 2001년도에 각각 52.9%, 59.4%로 비황사시에 비해 PM₁₀의 비율이 약 10% point 정도 낮은 것으로 미루어 황사시 10μm이상의 입경이 큰 입자 영향이 컸던 반면에 2002년 황사시에는 PM₁₀의 영향이 오히려 크게 나타나 PM₁₀이 TSP 중의 71.4%에 달하였다.

3. 황사가 전체 먼지농도에 미치는 기여율은 2002년도에 PM_{2.5} 11.9%, PM₁₀ 23.1%, TSP 19%로 가장 높은 기여도를 보였다.

4. 황사현상 발현시 토양기원 원소인 Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Sr 및 V의 대기중 농도는 비 황사시보다 4.3배~9.1배정도(PM₁₀ base)의 고농도를 나타내었다.

5. 먼지농도의 경우 황사기간시 PM₁₀농도는 비황사시보다 3.2배, TSP농도는 이보다 높은 4.2배이며, PM₁₀중의 Na⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺농도의 황사/비황사비는 각각 3.3배, 2.7배, 2.6배를 나타내었다.

참고문헌

김기현, 김민영, 신재영, 최규훈, 강창희, 2002, PM_{2.5}, PM₁₀, TSP의 시간대별 관측결과에 기초한 황사기간 중 먼지의 분포특성에 대한 고찰: 서울시 4대 관측점을 중심으로 한 2001년 봄철 황사기간에 대한 사례 연구. 한국대기환경학회지 18(5), 419-426.

김기현, 최규훈, 강창희, 2002, 2001년 봄철 서울시 북동부 지점에서 관측한 중금속성분의 농도분포. 한국지구과학회지, 23(6), 514-525.

신은상, 최민규, 성우영, 정용삼, 2002, 서울지역의 PM₁₀ 중 미량원소의 특성 평가. 한국대기환경학회지, 18(5), 636-672.

이승우, 2000, 산유입에 대한 산성 산림토양의 중화반응과 유기물층의 역할. 충남대학교 농학박사학위논문, p 75.

인희진, 이은희, 박순웅, 2002, 2002년 봄철에 관측된 황사 사례에 대한 수치모의. 한국대기 환경학회 추계학술대회, 91-92.

전영신, 김지영, 부경은, 김남욱, 2000, 겨울철 황사의 특징. 한국대기환경학회지, 16(5), 487-497.

정용승, 김학성, 박기현, 전종갑, 첸 수젠, 2000, 1997~2000년에 관측된 황사의 농도와 부 하량 및 시정: 위성과 기상분석. 한국기상학회지, 36(5), 583-600.

최성우, 송형도, 2000, 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구, 한국대기환 경학회지, 16(5), 469-476

田中 茂, 田島?典, 橋本芳一, 1986, ?砂現象時による大? aerosolの化?組成の?化. 日本化? ?誌, 5, 713-719.

Chung, Y.S., and M.B. Yoon, 1996, On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings. Atmospheric Environment, 30, 2387-2397.

Lin, T.H., 2001, Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: observed evidence and simulation. Atmospheric Environment, 35, 5873-5882.

S. Tanaka, T.Onoue, Y. Hashimoto, and T. Otoshi, 1989, The influence of the soil dust transported from Asian Continent by Kosa phenomenon on the atmosphere in Japan by using the results of NASN data for 10years, J. Japan Soc. Air Pollut. 24(2), 119-129.

2003년 1월 22일 원고 접수
 2003년 4월 19일 수정원고 접수
 2003년 5월 24일 원고 채택