

황사 발원지별 서울지역 대기 중 부유분진 특성



이 준 복 >
서울시 보건환경연구원

강 미 혜, 신 덕 영, 정 권, 김 민 영
서울시 보건환경연구원

1. 서론

우리나라는 매년 황사로 인하여 미세먼지의 농도가 높아지는 경향이 있다.

황사는 지구 온난화, 과도한 경지개간과 목축 등 인위적 요인에 의한 사막화로 고비·내몽골, 황토 고원, 만주 등지의 토양이 봄철에 잘게 부서져 미세입자가 발생하고, 이때 강한 저기압으로 인해 생성된 상승기류에 의해 3천~5천 m의 높은 상공으로 올라간 뒤 편서풍과 제트류를 타고 이동하다 풍속이 느려지는 한국과 일본에서 하강하게 된다.

그러나 황사는 한국과 일본에만 영향을 미치는 것이 아니라 강한 서풍기류를 타고 북미지역의 북태평양까지 이동할 만큼 심각한 환경 오염현상으로 간주되고 있으며(David et al., 2001; McKendry et al., 2001), 황사 시 분진의 장거리 이동현상을 체계적으로 규명하기 위한 연구들이 한반도를 중심으로 한 아시아 지역에서 80년대 이래 집중적으로 이루어지고 있다(최규훈 등, 2003).

기존 선행연구들 다수는 황사 발생 시 PM2.5, PM10, TSP 분포 특성 또는 중금속이나 이온성분 특성 등 황사 발생일별 특성에 관한 논문들이나, 발원지를 구분하여 황사의 특성을 평가한 논문은 거의 없다.

따라서 본 논문에서는 서울지역의 2003년에서 2006년까지 발생한 황사의 발원지를 구분하고, 각 발원지에 따른 부유분진의 특성을 평가하였다. 이러한 결과를 통하여 황사 발원지별 대책 수립을 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 자료 수집 및 중금속 분석 방법

2.1 자료 수집방법

기상청에서는 목측과 계기 관측(PM10, 라이다, 위성)을 통하여 황사를 판정하고, 이를 기상청 홈페이지(www.kma.go.kr)에 게시하고 있는데, 본 연구의 황사 발생회수 및 발생시간은 이를 기준으로 하였다. 황사 발생 시 발원지 추정은 기상청의 태풍황사탐페에서 자료 협조를 받았다.

한편, 서울시에서는 27개의 도시대기 측정소에서 TSP, PM10, PM2.5 등 대기 환경기준 항목을 실시간으로 측정하고, 각 측정소의 자료들은 TMS를 통하여 전송 및 데이터베이스(DB)화되어 관리되고 있다. 이 자료들은 먼지의 입경분포를 평가하는 데 사용되었다.

2.2 중금속 분석방법

중금속 분석을 위하여 송파 1(방이동) 측정소의 옥상에서 고용량 공기 포집기(High Volume Air Sampler)를 이용하여 황사 시, 비 황사 시 대기 중 먼지를 포집하였다. 포집된 여지는 EPA Method IO-3.1에 의한 방법으로 전처리 후, ICP-AES (Inductively Coupled Plasma, Spectro,

Germany)를 이용하여 분석하였다.

3. 황사 발생 현황

3.1 연도별 발생 현황

그림 1은 2003년에서 2006년까지의 서울지역 황사 관측일, 관측시간을 나타내었다. 황사 관측일은 2003년부터 2005년까지 증가하다 2006년에 낮아졌으나, 관측시간은 계속해서 증가하는 추세이다. 특히, 2005년에는 황사 관측일이 2004년보다 2배로 증가하였고, 2006년에는 2004년보다 황사 관측시간이 약 2배로 증가하는 등 황사가 매년 급증하는 추세이다. 따라서 황사로 인한 인체 및 생태계의 유해성 문제에 대한 보다 적극적인 연구시도가 필요한 시점이다.

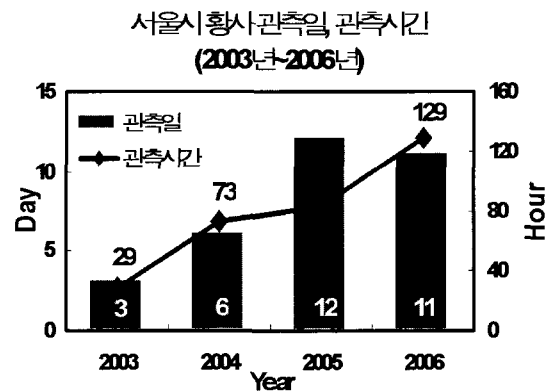


그림 1. 서울지역 황사 관측일, 관측시간

3.2 발원지별 발생 현황

황사의 발원지는 내몽골, 고비, 황토고원, 만주, 타클라마칸이 대표적이며, 각 이동경로는 다음과 같다. 그림 2는 황사의 발원지 및 이동경로를 나타내었다.

- 내몽골→화북→발해만→백령도→중부지방
- 고비→내몽골→화북→발해만→한반도

- 황토고원→산동반도→서해→한반도
- 만주→발해만→서해북부→한반도
- 타클라마칸→내몽골→황토고원→서해→한반도

서울지역의 황사 발원지별 발생횟수 및 발생시간은 그림 3, 표 1에 표시하였다.

발생횟수는 내몽골 > 고비 > 만주 > 황토고원 > 타클라마칸의 순이었으나, 발생시간은 내몽골 > 만주 > 고비 > 황토고원 > 타클라마칸의 순으로, 내몽골이 50%이상을 차지하고 있으며, 타클라마칸이 발생빈도가 가장 적었다. 이를 통하여 내몽골 고원이 우리나라와 비교적 가깝고, 최근 급속한 사막화로 인하여 황사의 주된 발원지가 되고 있음을 확인할 수 있었으

며, 타클라마칸은 이동거리가 길기 때문에 우리나라에 상대적으로 작은 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다.

따라서 가장 황사 발생빈도가 높은 내몽골에서 황사를 원천적으로 저감하는 대책 수립이 요구된다.

4. 미세먼지 특성 평가

4.1 입경분포

그림 4은 황사 기간 측정된 먼지의 중량을 PM10/

황사 발생지역 및 이동경로

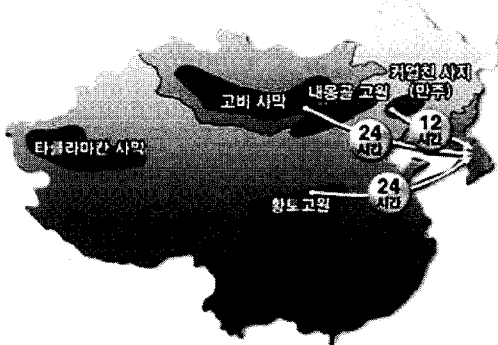
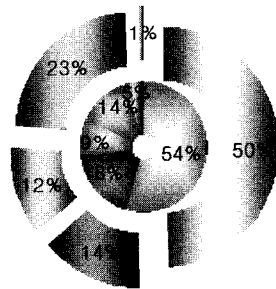


그림 2. 황사 발원지 및 이동경로(출처 : 기상청).

발원지별 황사 발생횟수, 발생시간 (2003년~2006년)



■ 내몽골 ■ 고비 ■ 황토고원 ■ 만주 ■ 타클라마칸

그림 3. 발원지별 황사 발생횟수, 발생시간.

표 1. 서울지역 황사 발원지별 발생일(시간)

발원지	2003		2004		황사 발생일(시간)		
	2003	2004	2005	2006	합계		
내몽골	4.12~13(26)	2.25(7) 3.30~31(25)	4.10(4) 4.14~15(8) 4.20~22(27) 11.6~7(14)	3.13(10) 4.18(5) 4.23~24(29)	17(155)		
고비			4.7(5) 4.28~29(18)	3.11(19) 3.28(3)	5(45)		
황토고원		4.23(12)		4.30~5.1(26)	3(38)		
만주		3.10~11(29)	3.29(7)	4.7~9(37)	6(73)		
타클라마칸	3.27(3)				1(3)		
합계	3(29)	6(73)	12(83)	11(129)	32(314)		

미세먼지 입경분포

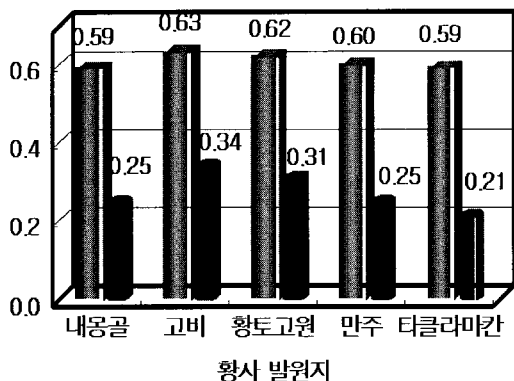


그림 4. 황사 시 미세먼지 입경분포

TSP, PM2.5/PM10의 비를 나타낸 것으로, 황사 시 시간별 TSP, PM10, PM2.5의 평균농도를 자료로 이용하였다.

PM10이 TSP 중 59~63%를 차지하며, PM10 중 주로 2.5~10 μm 입자가 차지하는 것으로 나타났다. 이는 한반도와 일본에서 관측된 황사의 크기는 대략 1~10 μm 정도이며, 3 μm 내외의 입자가 가장 많았다는 선행연구(안문수, 2003; 전영신 등, 2003)와 동일한 결과임을 추정할 수 있다. PM10/TSP, PM2.5/PM10의 비는 각 황사 발원지별 그 경향이 일치하였으며, 고비 > 황토고원 > 만주 > 내몽골 > 타클라마칸의 순이었다. 즉, 우리나라로부터 거리가 먼 발원지인 타클라마칸의 경우 다른 발원지의 황사 먼지보다 TSP 중 PM10이 차지하는 비율이 적으며, 2.5~10 μm 입자로 주로 존재함을 알 수 있다. 이를 통하여 입자의 크기가 작은 먼지에 각종 유해한 물질과 흡착이 용이하여 인체에 악영향을 가중시키기 때문에(Simpson, 1992; John et al., 1990) 타클라마칸의 경우는 다른 발원지보다 인체에 유해성이 적을 것으로 판단되며, 실제 유해 중금속 분석결과 다른 발원지보다 상대적으로 작은 수치를 보였다(표 4).

한편, PM10/TSP 농도 비율은 0.59~0.63으로 최재천 등(1999) 0.69와 최진수 등(1998) 0.68보다 작았고, 김현택 등(2004) 0.38보다 큰 수치를 보였다.

4.2 대기 중 부유분진농도

황사 시 대기 중 부유분진 평균농도는 표 3처럼 TSP, PM10, PM2.5가 각각 만주 > 타클라마칸 > 황토고원 > 내몽골 > 고비의 순으로 나타났다. 그러나, 각 황사 발원지별 부유분진 농도의 표준편차가 너무 크기 때문에 각 발원지별 특성보다는 황사 발생일의 기온, 습도, 풍향, 풍속 등 기상조건의 영향때문일 것으로 사료된다.

TSP, PM10, PM2.5의 상관분석 결과는 표 2와 같다.

표 2. TSP vs PM10, PM10 vs PM2.5 상관관계

발원지	TSP vs PM10	PM10 vs PM2.5
내몽골	0.9697	0.7994
고비	0.9545	*
황토고원	0.9709	*
만주	0.9917	0.9821
P	< 0.05	

* : 유의성 없음(P>0.05).

TSP와 PM10은 발원지와 무관하게 강한 양의 상관을 보이고 있으나, PM10과 PM2.5는 만주와 내몽골은 강한 양의 상관을 보인 반면, 고비와 황토고원은 유의한 상관을 보이지 않았다.

4.3 대기 중 유해 중금속

Al, Ca, Fe 등 토양기원 중금속은 황사 시가 비황사 시보다 높다는 것은 여러 선행연구(김민영 등, 2003; 최금찬 등, 2002; 전병일, 2003; 최성우 등, 1999)에서 발표가 되었고, 인체에 유해성이 적기 때문에 본 논문에서는 인위적 발생 중금속이면서 인체 유해 중금속인 Pb, Cd, Cr, Ni에 대하여 황사시 중금속 농도와 비황사시 중금속 농도의 비((M)AD/(M)NAD)를 표 4에 나타내었다.

표 4에서와 같이 황사 시 유해 중금속 농도는 만주의 경우 다른 발원지보다 전반적으로 높은 경향이 있으며, 타클라마칸은 전반적으로 다른 발원지보다 낮

표 3. 황사 시 서울지역 대기 중 먼지농도

항 목		내몽골	고비	황토고원	만주	타클라마칸
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg. \pm S.D	309 \pm 155	289 \pm 98	335 \pm 198	755 \pm 548	360 \pm 33
	Med.	246	244	247	549	362
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg. \pm S.D	184 \pm 97	178 \pm 48	197 \pm 93	477 \pm 401	214 \pm 18
	Med.	154	165	174	312	217
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg. \pm S.D	42 \pm 16	58 \pm 15	55 \pm 18	119 \pm 109	44 \pm 1
	Med.	39	65	63	69	44
N		155	45	38	73	3

표 4. 발원지별 황사 시, 비황사 시 유해 중금속 농도의 비

발원지	(M) _{AD} /(M) _{NAD}				황사 발생일
	(Pb) _{AD} /(Pb) _{NAD}	(Cd) _{AD} /(Cd) _{NAD}	(Cr) _{AD} /(Cr) _{NAD}	(Ni) _{AD} /(Ni) _{NAD}	
항 목	0.4241	-	1.4013	0.8168	2004.3.30
	1.0548	0.7989	1.5637	1.6307	2005.4.20
	0.6372	0.4669	1.5459	1.1177	2006.3.13
	1.0798	1.3000	1.1121	1.0725	2006.4.18
	0.6755	0.7000	0.9813	0.7826	2006.4.23
황토고원	0.7086	-	1.6429	0.8684	2004.4.23
만 주	0.8328	-	3.6884	1.9756	2004.3.10
	2.9601	8.6000	6.7477	4.6420	2006.4.7
타클라마칸	0.5567	-	0.6670	0.4034	2003.3.27

음을 알 수 있었다. 이것은 본 논문의 미세먼지 입경 분포에서 이미 언급한 바 있다.

따라서, 유해 중금속에 대한 발원지 대책 수립 시 만주를 특히 고려해야 함을 시사하고 있다.

5. 결론

본 연구에서 2003년부터 2006년까지 서울지역에서 관측된 황사의 발원지별 미세먼지 특성에 대하여 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 2005년에는 황사 관측일이 2004년보다 2배로 증가하였고, 2006년에는 2004년보다 황사 관측시간이 약 2배로 증가하는 등 황사가 매년 급증하는 추세이다.
- (2) 황사 발생횟수는 내몽골 > 고비 > 만주 > 황토고원 > 타클라마칸의 순이었으나, 발생시간은 내몽골 >

만주 > 고비 > 황토고원 > 타클라마칸의 순으로 나타났다.

- (3) PM10/TSP, PM2.5/PM10의 값은 거의 비슷하였으며, 고비 > 황토고원 > 만주 > 내몽골 > 타클라마칸의 순이었다.
- (4) 황사 시 대기 중 부유분진 평균농도는 TSP, PM10, PM2.5가 각각 만주 > 타클라마칸 > 황토고원 > 내몽골 > 고비의 순이었다.
- (5) 황사 시 유해 중금속 농도는 만주의 경우 다른 발원지보다 전반적으로 높은 경향이 있으며, 타클라마칸은 전반적으로 다른 발원지보다 낮았다. 이상과 같은 결과로 볼 때, 만주의 경우 황사 발생시간도 많고, TSP, PM10, PM2.5의 농도는 발원지 중 가장 높으며, 유해 중금속 또한 높은 것으로 나타나 발원지에서의 황사 대책 수립 시 최우선 고려대상이 되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. David, M.T., J.F. Robert, and L.W. Douglas(2001). April 1998 Asian dust event: A southern California perspective. *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), pp. 18371~18379
2. John, W., S. M. Wall, J. L. Ondo, and W. Winklmay(1990). Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol. *Atmosphere Environment* 24A, pp. 2349~2359
3. McKendry, I.G., J.P. Hacker, R. Stull, S. Sakiyama, D. Mignacca, and K. Reid(2001). Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), pp. 18361~18370
4. Simpson, R. W.(1992). A statistical analysis of particulate data sets in Brisbane. *Australia Atmosphere Environment* 26B, pp. 99~105
5. 김민영, 조석주, 김광래, 이민환(2003). 황사기간 중 PM2.5, PM10, TSP 농도 특성에 관한 연구. *Journal of Korean Earth Science Society*, V. 24, No. 4, pp. 315~324
6. 김현탁, 전영신, 이상삼(2004). 2003년 봄철 서울의 TSP와 PM10 농도 특성. *한국기상학회지* 40, 5, pp. 587~602
7. 안문수(2003). 황사피해 저감대책. *방재연구* 제5권 제1호, pp. 23~30
8. 전병일(2003). 2002년 부산지역 봄철 황사/비황사시 PM10 중의 중금속 농도 특성. *환경영향평가* 제12권 제2호, pp. 99~108
9. 전영신, 임주연, 최병철(2003). 황사현상과 연무현상에 따른 서울의 봄철 에어로솔 특성. *한국기상학회지* 39, 4, pp. 459~474
10. 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍(2003). 황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구. *한국대기환경학회지* 제10권 제1호, pp. 45~56
11. 최근찬, 유수영, 전보경(2000). 부산지역의 입자상 대기오염물질의 농도특성에 관한 연구. *한국위생학회지* 26(2), pp. 149~150
12. 최성우, 송형도(1999). 대구지역 황사기간중 중금속 농도의 변이특성. *환경과학논집* 제4권 제1호, pp. 1~13
13. 최재천, 조하만, 김지영, 김산, 박기준(1999). 1998년 봄철 서울지역 에어로솔 중 TSP와 PM10의 화학적 특성 비교. *한국기상학회지* 35, pp. 39~46
14. 최진수, 백성옥(1998). 대기중 TSP와 PM10 농도의 관련성. *한국대기보전학회지* 14, pp. 1~10