

# 황사 발생시 서울 대기 미세먼지의 농도 변화

김민영

서울시보건환경연구원(mykim@seoul.go.kr)

## 황사란?

황사(Yellow Sand, Asian dust, sand storm) 현상이란 중국, 몽고, 만주 사막지대, 황하 중류의 황토지대 등지에서 발생한 미세한 토양입자가 대기 중에 운반되어 낙하하는 자연현상으로 계절적으로는 주로 봄에 발생한다.

해빙기인 봄에는 발원지의 건조한 토양이 부서지면서 공중에 떠다니기 쉬운 20  $\mu\text{m}$  이하의 모래먼지가 되는데, 강한 상승기류와 바람이 불면서 다량의 먼지가 고도 3~5 km 또는 10 km까지 올라가 공중에 부유하게 된다.

황사는 알칼리 성분을 포함하고 있어 산성비와 산성 토양을 중화시키고, 해양 프랑크톤에 무기염류를 제공하며 마그네슘 등의 성분이 식물 성장을 촉진시킨다는 긍정적인 측면도 있다는 견해도 있으나, 시

정장애, 호흡기·눈 장애, 강수 및 토양에의 영향, 기타 정밀기기의 오작동 우려, 옷, 차량, 건물 등을 더럽히고 식물의 생장에 장애를 주는 등 인체 및 생활은 물론 항공 및 정밀산업에 많은 영향을 미친다.

지난 2002년 4월의 대형 황사의 경우 초등학교 등 4,373개의 학교가 휴교를 했으며 항공기 164편이 결항되었는데, 당시 서울의 미세먼지 농도는 시간 최고 2,070  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 로 연평균 76  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 의 27배를 기록하였다.

## 서울 황사 발생 현황

1960년 이후 최근 2005년까지 서울의 황사 발생 현황을 보면 60년대 평균 2.3일에서 90년대 7.7일로 3배 이상 증가했으며 최근 5년까지 평균은 13일로 60년대 대비 무려 5.6배에 이르렀다. 표 1은 최근 5년간 황사 발생일을 나타낸 것이다.

<표 1> 최근 5년간 황사 발생일

| 년도         | 일수 | 기 간  |
|------------|----|--|
| 2001       | 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       | 16 | 1.12~1.13, 3.17~3.19, 3.21~3.23, 4.8~4.12, 4.16~4.17, 11.11~11.12    |
| 2003       | 3  | 3.27, 4.12~4.13  |
| 2004       | 6  | 2.25, 3.10~3.11, 3.30~3.31, 4.23                                     |
| 2005       | 12 | 3.29, 4.7, 4.10, 4.14, 4.15, 4.20~4.21, 4.22, 4.28~4.29, 11.6~11.7   |
| 2006.3월 현재 | 2  | 3.11, 3.13   |

발생시기는 주로 봄철이지만 늦가을과 겨울철에도 나타나는 등 점차 계절과 무관하게 발생하고 있다. 전체 발생일수 중 봄철에 발생한 황사 비율은 약 90%이며 여름의 경우 황사 발생이 전혀 없는 반면에 1999년 1월, 2001년 1월/12월, 2002년 1월/11월, 2005년 11월에 이례적으로 황사가 발생한 바 있다.

한편 1990년 이후 서울의 황사 발생 일수를 살펴보면 2001년의 경우 발생일수가 27일로 최고를 기록하였다.

### 황사 발생시 미세먼지 농도

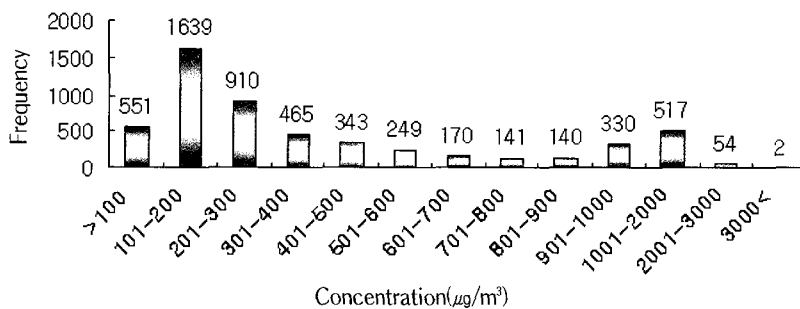
황사 크기가 20  $\mu\text{m}$  보다 큰 입자는 구르거나 조금 상승하다가 부근에 떨어지고, 그 이하 크기 입자는 부유하여 상층까지 올라가게 된다. 우리나라에서 관측되는 황사의 크기는 약 1~10  $\mu\text{m}$  정도이며 3  $\mu\text{m}$  내외의 입자가 가장 많다. 따라서 미세먼지로 분류되는 PM<sub>10</sub>(입자 크기가 10  $\mu\text{m}$  이하일 경우)과 PM<sub>2.5</sub>(입자 크기가 2.5  $\mu\text{m}$  이하일 경우)에 대한 조사 연구가 필요하다.

황사 발생시 미세먼지 농도는 현저히 증가한다. 2000년에서 2002년까지 황사시와 비황사시의 미세

먼지(PM<sub>10</sub>) 평균농도를 비교해 보면, 황사가 발생할 때에 PM<sub>10</sub> 농도가 2000년 2배, 2001년 2.4배, 2002년 5.3배 증가하여 황사의 영향이 증대되고 있음을 알 수 있다.

황사가 서울시 전체 먼지농도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 PM<sub>10</sub>에 대하여 황사기간을 제외한 연간 평균 농도와 황사기간을 포함한 연평균농도를 비교하여 상대적인 비를 계산하였다. 2000년도는 황사의 기여도가 전체 평균 농도에 미치는 영향이 1.6%로 낮았으나 2002년에는 23.1%로 연평균농도에 미치는 영향이 매우 높아졌음을 알 수 있다. 또한 황사 빈도 및 황사일수가 가장 많았던 2001년도 보다 2002년이 대기 중 농도에 미치는 황사의 영향이 큰 것으로 나타났다. 이는 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 고농도 발생빈도 및 최고농도에서도 2002년의 황사영향이 매우 컸음을 확인할 수 있다. 이에 따라 황사발생횟수도 중요하지만 평균농도 및 최고농도 그리고 지속시간도 인체 건강이나 환경에 미치는 영향에서 볼 때 매우 중요한 사항으로 고려되어야 할 것이다.

2000년에서 2002년까지 발생한 황사 기간 중 관측한 PM<sub>10</sub>의 농도범위별 출현빈도는 그림 1과 같이 이산형 분포(bi-modal)를 나타냄을 알 수 있다. 500



[그림 1] 서울 황사시 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 농도범위별 출현빈도(2000~2002년)

<표 2> 황사시와 비황사시 PM<sub>10</sub> 평균 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 비교

| 2000년 |      | 2001년 |      | 2002년 |      |
|-------|------|-------|------|-------|------|
| 황사시   | 비황사시 | 황사시   | 비황사시 | 황사시   | 비황사시 |
| 126   | 64   | 158   | 67   | 347   | 65   |

$\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 고농도의 출현빈도는 총 4608개의 측정치중 15.2%인 700시간을 나타내었다.

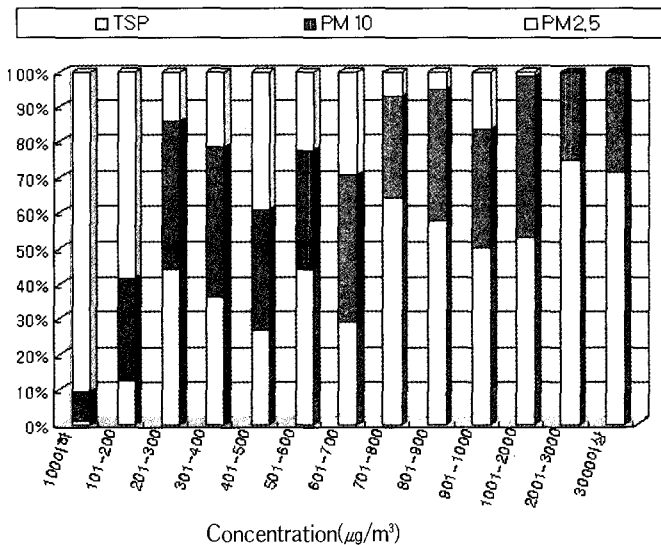
이렇듯 황사 발생시 먼지농도는 비황사시에 비해 매우 높은 비율로 올라가지만 단순히 고농도 황사만이 문제가 되는 것은 아니다. 즉 고농도 황사 발생시 먼지의 농도는 높지만 큰 입자영역의 분포도 커 침적 등으로 쉽게 제거되지만 저농도 황사는  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 입경을 가진 미세먼지가 대부분으로 인체유해성 및 시정장애 측면에선 오히려 저농도 황사일 때가 더 위험요인이 가중됨을 알 수 있다. 이러한 특성을 확인하기 위해 2002년 1월~11월까지 발생한 황사를 대상으로 서울의 도심 지역이며 각 입경별 측정기가 설치된 한남동에서 관측된 총 199시간(199회)의 입경별 먼지농도를 계급별 누적 분포와 7회 걸친 황사에 대한 각 회별 평균으로 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 도식하였다(그림 2). 저농도에서  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 고농도까지의 먼지농도를 13개 단계로 구분하여 누적분포로 표시한 것이다. 황사시 비교적 저농도인  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하인 경우, 입경  $2.5 \mu\text{m}$  이하가 전체 90% 이상의 비율을 차지하며 고농도일수록 TSP 점유 비율이 높게 나타났다. 입경  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 먼지는  $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$  단계까지 평균 39%였으며, 그 이상의 고농도 단계에서는 매

우 낮은 점유비율을 보였다. 반대로 총먼지의 경우 고농도 계급일수록 매우 높은 점유율로 강한 황사(고농도)는 주로 입경  $2.5 \mu\text{m}$  이상의 먼지를 수송하는 것을 알 수가 있다.

### 황사 발생시 시정 변화

황사 입자는 태양 복사를 산란 및 흡수하여 시정을 감소시킨다. 2002년 황사시 시정과 입경별 먼지농도와의 관계를 그림 3에 나타냈다. 먼지농도가 고농도일수록 시정은 낮은 거의 반비례하는 형태를 보이며, 입경별 변동특성은 매우 유사하다.

총 180회 관측된 시정거리와 같은 시간대의 입경별 먼지농도는 평균시정 7.1 km, PM<sub>10</sub>  $482 \pm 424 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub>  $163 \pm 143 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 5 km 이하의 시정 악화 현상도 82회로 전체 관측시정 중 45.6%를 차지하고 있다. 1 km대의 심각한 시정장애 현상도 20회로 전체 관측시정 중 11.1%로 나타났다. 1 km대 시정 악화시 평균먼지농도는 PM<sub>10</sub>  $1,250 \pm 259 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , PM<sub>2.5</sub>  $399 \pm 134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 각 입경별로 매우 높은 농도를 보였다. 황사기간 동안에는 특정한 입경이 아닌 전 입경에서 시정악화 원인을 제공하고 있다.



[그림 2] 황사시 한남지역의 입경별 분포(2002년)

### 황사 발생시 미세먼지의 화학성분

중국의 황하유역과 몽고 사막 등에서 편서풍을 타고 우리나라를 비롯하여 일본, 하와이까지 장거리로 이동되는 황사는 발원지에서의 토양성분 이외에도 이동하는 동안 오염된 지역의 공기 속에 잔류하는 가스상 물질을 추가하게 되는데, 중국 동부지역에 위치한 공업지대의 대기오염물질을 동반하여 한반도로 이동할 수 있다.

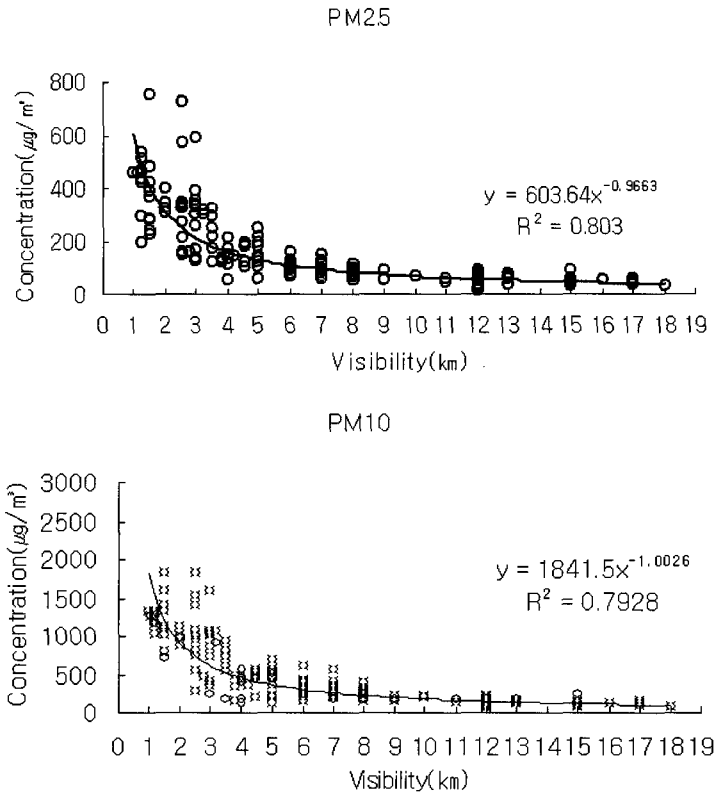
사막지대는 석영(규소)이 많고 황토지대는 장석(알루미늄)이 주성분이며 철 성분도 많이 함유되어 있다. 특히 납, 카드뮴, 크롬 등 유해 중금속이 포함되는 경우가 있는데, 이는 중국의 공업화 과정에서 나타난 환경오염에 의한 것이다.

평상시 필터에 포집한 먼지의 색깔은 매연 등의 영향으로 검정색인데 반해 황사시에는 필터에 포집한

먼지의 색깔이 황갈색이다.

2002년 1월 12일부터 3월 18일까지 발생한 8일간의 황사와 동일한 시기 황사 발생 전후의 비황사 기간의 대기중의 미세먼지(PM<sub>10</sub>)를 채취하여 분석한 결과 황사 발생시 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 철(Fe) 등의 토양기원 원소는 대략 6배에서 9배나 높았고 크롬(Cr), 마그네슘(Mg), 망간(Mn) 및 바나듐(V) 또한 2.6배에서 7.5배나 높게 나타났다. 반면, 비소(As), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 니켈(Ni) 등의 중금속 성분은 큰 차이를 나타내지 않았으며, 납(Pb), 셀레늄(Se), 아연(Zn) 등의 대기오염 중금속 성분은 오히려 낮게 나타나고 있었다.

비황사시의 알루미늄(Al)과 칼슘(Ca)의 농도비(Ca/Al)는 비황사시에 0.73~1.04로 매우 높은 반면에, 황사시는 0.45~0.72의 범위로 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 발원지의 토양 중에 함유되어 있는



[그림 3] 황사시 시정과 입경별 먼지농도와와의 관계(2002년)

두 가지의 성분 중 칼슘보다 알루미늄의 영향이 크게 작용하고 있음을 나타내는 것이다.

또한 다환방향족 탄화수소(PAH) 농도는 황사기간 중에 140% 정도 높게 나타났으며, 특히 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 중 benzo(b)fluoranthene, chrysene, benzo(k)fluoranthene 등 3종류의 PAH가 통계적으로 유의한 차이를 나타내고 있었다. 황사가 기류이동으로 중국의 여러 산업지대를 경유할 때 변이원성 내지 발암성분인 이들 오염물질이 황사발생 중에 황사 입자에 흡착되어 우리나라에까지 영향을 미치게 된다는 것을 반증하는 것이다.

### 황사 대책

최근 서울의 황사 발생현황에서 알 수 있듯이 그

발생 빈도와 정도가 심화되고 있어 시급한 대책 수립이 요구되고 있다. 정부는 황사피해방지 종합대책을 수립하고 추진하는 등 대책을 마련하고 있으나, 황사는 기상학적 현상에 의해 발생하는 자연적 측면이 강하여 대책 수립에 한계가 있다.

따라서 중국과 몽골이 황사의 발원국임과 동시에 최대의 피해국으로서 국내적으로도 심각한 환경문제를 야기하므로 사막화 방지노력 선행이 중요하므로, 한국과 일본 등 인접 피해국도 중국과 몽골의 사막화 방지노력이 성공할 수 있도록 사막의 녹화기술 등 기술적 지원, 국제사회의 협조요청 등 국제 협력을 적극 추진할 필요가 있다.

아울러 황사로 인한 국민피해를 예방하고 최소화하기 위해 황사관련 조사 연구와 관측 예보 기능의 강화가 필요하다. ㉔