

## 황사의 발생 및 예보

최병철

기상청 기상연구소 원격탐사연구실 (cbc@kma.go.kr)

### 황사(黃砂)란?

황사는 그 모래먼지 입자의 크기가 20  $\mu\text{m}$  이하(우리나라에서 관측된 황사의 크기는 일반적으로 1~10  $\mu\text{m}$  정도)로 중국과 몽골의 사막지대 및 황토고원 일대에 강한 바람이나 저기압이 통과할 때 그곳에 있는 작은 모래·황토·먼지 등이 공중으로 비산하여 상층으로 불려 올라가 상층의 강한 편서풍을 타고 멀리까지 날아가 지면부근으로 침적하면서 부유하거나 시정장애를 일으키는 현상을 말한다. 황사는 주로 1~2 km 고도의 기류를 따라 움직이며, 때에 따라 우리나라 상공에서는 4~5 km의 고도에서 관측되기도 하며, 태평양 상공에서는 이보다 더 높은 고도에서 관측되기도 한다.

### 황사의 발원지 및 입자의 성분

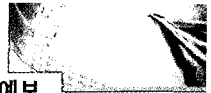
우리나라에 주로 영향을 미치는 황사는 중국 그리고 몽골과 중국의 국경경계지역에 걸친 넓은 건조지역 및 그 주변에 있는 반 건조지역에서 주로 발생한다. 이러한 사막화 지역으로 타클라마칸, 바다인자단, 텐겔, 오르도스, 만주, 몽골고원 등이 있는데, 물과 식물이 부족한 상태에서 바람이 강하게 불어 모래 바람이 빈번히 발생한다. 타클라마칸 사막은 우리나라로부터 멀리 떨어져 있어(약 5,000 km 이상) 우리나라에 그 영향이 적은 편이지만, 만주의 경우

우리나라에 가장 근접한 발원지로서 황사 발원 시 가장 빠르고 강하게 영향을 주고 있다.

황사 발원지 토양의 화학조성은 지역에 따라 편차를 보이고 있으며, 이는 발원지 토양의 차이에서 기인한 것으로 황사 입자의 성분은 흙과 모래의 주성분인 규소, 알루미늄, 철, 칼슘 등 산화물로 되어 있으며, 납, 카드뮴, 구리 등 중금속을 포함할 수 있다. 사막지대에는 석영(규소) 성분이 많고, 황토고원에는 장석(알루미늄) 및 철 성분이 많이 함유되어 있다.

### 황사의 발생 및 이동

모래 먼지가 공중으로 잘 부유하는 조건으로서 강한 바람이 불고, 건조한 흙먼지가 많고, 대기가 불안정하도록 햇빛이 강하게 비칠 것 등이다. 황사 발원지에서는 봄철에 지면이 매우 건조한 상태이므로 강수현상이 있었다더라도 강수가 끝나면 바로 건조한 상태로 되어 상승기류가 발생하면 지면으로부터 모래 먼지가 부유하는 현상이 흔하게 일어나고 있다. 발원지에서의 황사가 심할 경우에는 주변의 동식물이나 심지어는 사람까지도 모래먼지에 파묻혀지는 상태로까지 이어져 황사발생으로 인한 사고가 일어나는 경우도 있다. 주로 고비사막, 오르도스 사막, 황토고원과 만주 등에서 지상 풍속이 약 7 m/s 이상인 경우 지면의 흙먼지가 불려 올라가며, 발원지에서 이러한 먼지가 지상관측 보고 또는 위성영상 분석으

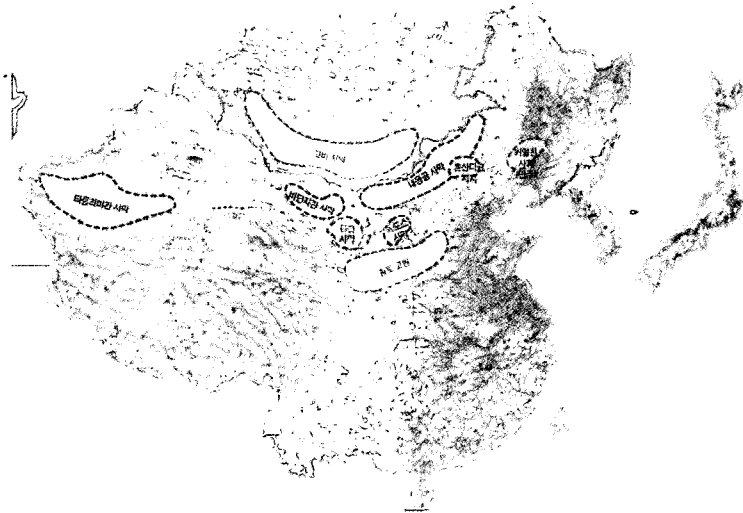


로 황사의 발생을 확인할 수 있다.

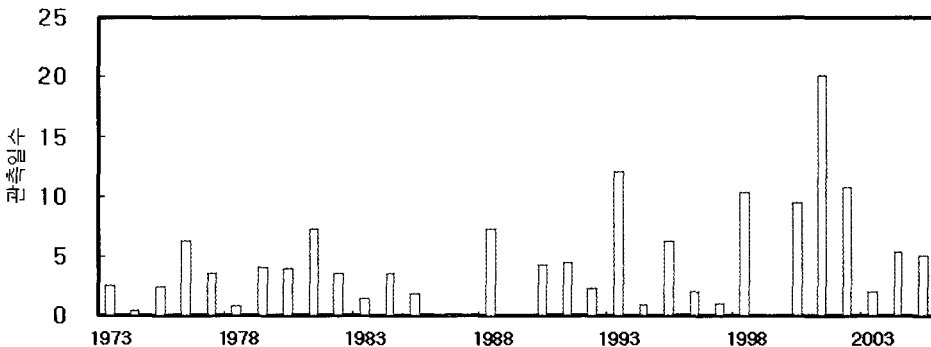
봄철에 저기압의 통과 후 가끔 발생하는 황사현상은 황하 저기압이라는 저압대와 밀접한 관계가 있다. 이것은 황하 유역의 여러 지방에서 발생하는 저기압으로서 봄철(3~5월)에 발생하는 빈도가 가장 많다. 기후학적으로 보면, 황하 저기압이 발생하는 서쪽은 높은 산맥 및 고원들이 있어 강수량이 적고 온도의 연교차가 크며, 매우 건조한 것이 특색이다. 또한 하계에 강수가 집중되고 동계에 대체로 건조하기 때문에 봄철에 함수량이 적은 토양은 식물의 활동으로 발원지의 지면이 부드러워진다. 이런 시기에

저기압이 발생하면 하층에서 수렴 및 한랭한 시베리아 기단의 급격한 변질로 기층은 불안정하게 되어 황사가 부유하게 된다. 황사는 주로 봄철에 많이 나타나지만 2005년 가을 11월 초에는 발원지가 매우 건조한 상태에서 저기압이 발생하여 점차 발달하면서 동진하여 우리나라 백령도에는 황사경보의 기준을 넘는 농도가 기록되었다. 황사가 가을철에 나타나는 경우는 그리 흔하지 않는 경우이나 최근에는 봄철뿐만 아니라 여름철을 제외한 가을철과 겨울철에 나타나는 경우가 있다.

황사가 발생하여 주변에 영향을 줄때, 발원지에서



[그림 1] 황사 발원지 분포



[그림 2] 전국 평균 황사 관측일수(1973-2005)

배출되는 황사량을 100%라고 하면 보통 발원지 황사의 80%는 발원지에 채 침적되고, 나머지 20%는 주변 지역으로 수송되는데, 그중 50%는 장거리 수송되어 한국, 일본, 태평양 등에 침적된다. 즉, 실제로 발원지 황사의 10% 정도가 장거리 이동하는 것으로 알려지고 있다.

### 황사 관측일수

전국 28개 기상관서를 정하여, 28년간(1973~2000년) 조사된 전국 황사 관측일수 평년값은 약 3.6일이다. 월별로는 3월(0.7일), 4월(2.0일) 및 5월(0.9일)의 분포를 보이고 있다. 그림 2는 1973년부터 2005년까지 전국 평균 황사 관측일수를 나타내고 있는데, 보는 바와 같이 과거보다 황사 발생일수가 증가하고 있는 것으로 나타났다. 해마다 황사 관측일수에 기복이 심한 것은 발원지에서의 황사발생조건이 각기 다르기 때문으로 풀이된다. 황사 발원지가 겨울철 강설로 인하여 지표면이 습하고 얼음으로 덮여있다거나 발원지에서의 저기압 발생이 상대적으로 자주 일어나지 않는 경우에는 황사 관측일수가 적게 나타나고 있다.

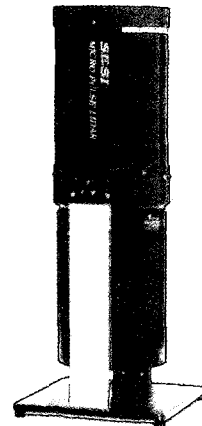
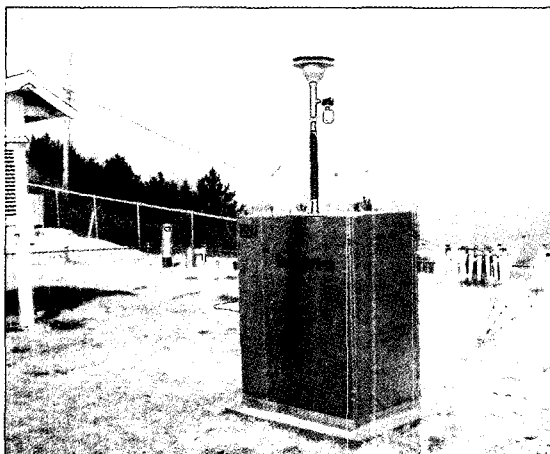
### 황사 관측

황사는 대기 중에 나타나는 기상현상의 일종으로

심할 때는 하늘이 황갈색으로 보이고 햇빛이 흐려지며 노출된 지면이나 지물에 흙먼지가 쌓이는 수도 있다. 황사를 관측하는 장비인 PM<sub>10</sub> (particulate matter 10 μm)은 탄소동위원소 C-14에서 방출되는(베타)선을 이용하여 대기 중의 부유하는 에어러솔 중 직경 10 μm 이하인 입자의 농도(μg/m<sup>3</sup>)를 연속적으로 측정하는 장비이다. 또한, 에어러솔 라이더(lidar: light detection and ranging) 장비는 대기 중으로 일정한 파장의 레이저를 발사하고 대기 중의 에어러솔 등에 의해 후방 산란되는 빛을 측정하고, 이 측정 자료를 분석함으로써 에어러솔 등의 수직분포를 연속적으로 분석할 수 있는 원격탐측 기기로 황사의 이동 고도 및 황사 층의 두께를 측정할 수 있다. 기상청 황사관측망은 현재 PM<sub>10</sub>은 12개소, 에어러솔 라이더는 4개소에 설치되어 있으며, 향후 지속적으로 보강할 예정이다.

### 기상청의 단계별 황사 감시 및 예보업무 수행 절차

- ① 지상 및 위성자료를 활용하여 발원지의 황사 발생 감시
- ② 발원지 황사 발생시 각종 자료 및 모델결과 등을 이용하여 한반도 이동 가능성 분석
- ③ 지상관측자료 및 위성영상으로 발원지 등 계속 추적



[그림 3] 미세먼지 관측용 PM<sub>10</sub> 장비(左) 및 에어러솔 라이더 장비(右)



- ④ 유입되는 황사의 농도가 정보 및 특보 발표 기준 이상으로 예상될 때 황사 예보, 정보, 특보 발표
- ⑤ 지상 관측망 자료를 활용하여 국내 황사 유입 여부 감시
- ⑥ 국내 황사 유입시 보도자료 작성 및 배포

### 황사 일기도

황사 일기도는 3시간 간격으로 들어오는 지상 자료 중에 황사 관측지점, 황사 발원지와 해면기압 등이 기입되며 실시간 황사 관측현황 파악 및 일기도 패턴 확인에 유용한 일기도이다. 황사가 육안으로 관측되는 지점을 빨간색으로 표시하며, 동시에 풍향, 풍속 등 지상상황이 기입되어 있다. 이 일기도는 지상기압계 분석이 되어있어 전 시간 일기도와 비교하여 실황에 의한 황사의 이동과 발생 그리고 소멸 등을 파악하여 상층의 흐름으로 앞으로 황사의 이동 상태를 예측할 수 있다.

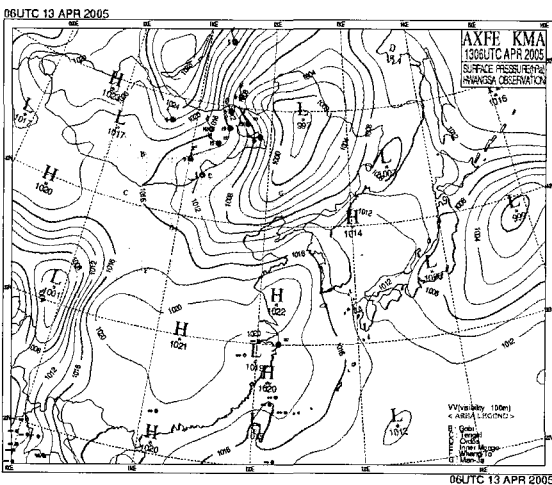
### 황사 추적도를 이용한 예보 기법

발원지로부터 이동해 온 황사가 상층 흐름을 타고 이동한 것이므로 대기 중하층의 유선장과 기압계의 이동, 전 시간의 위치 강도를 분석한 자료를 활용한 황사 추적도를 작성하여 우리나라에 영향을 줄 것인

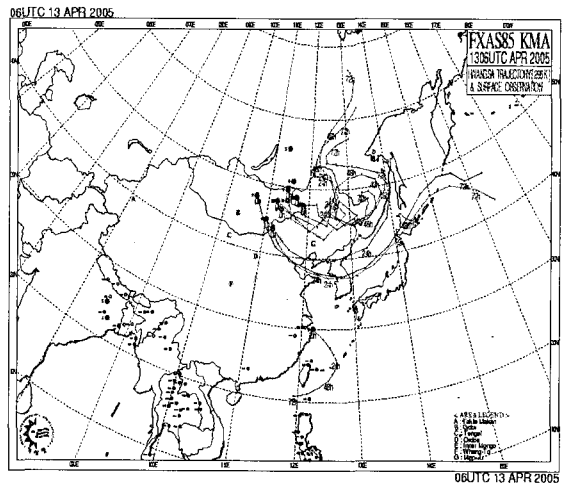
지, 줄 경우에는 어떠한 형태로 영향을 줄 것인지를 분석한다. 이 추적도는 전구모델에서 지상부터 500 hPa 고도까지의 대기 온위를 가지고 상층예상 흐름을 감안하여 시간에 따른 이동 경로를 추적하고 있다. 따라서 전구모델의 예상도 변화에 따라 궤적이 달라지므로 전시간의 추적도와 비교하고 상층흐름의 예상변화를 고려하여 이용하여야 한다. 즉, 이 황사 추적도는 황사 기류의 진행방향을 72시간 예보하여 나타낸 예상 자료이므로 실제 상층 흐름과 다소 차이가 있으므로 시간에 따라 오차 범위가 더 크게 나타난다.

### 황사예보모델

황사 농도 예측을 위해 개발된 황사예보모델은 지역예보모델 기상장 자료를 이용하여 황사의 농도 예보에 사용된다. 현재 기상청의 황사예측모델의 결과는 1일 2회 수행되며, 연직 적분된 미세먼지 농도, 지상의 미세먼지 농도와 각 지역별 연직 농도 및 시간별 예보장을 제공하고 있으며, 황사의 영향 영역 및 농도 예상을 하고 있으나, 지역모델 예보장에 강한 상관관계를 갖고 있음을 유의하여야 한다. 또한 황사예보모델은 48시간 이후의 황사농도를 정량적으로 예측한 자료이나 발원지의 식생 및 지표 정보의 지속적인 개선이 이루어져야 보다 정확한 발생량



[그림 4] 황사일기도(2005. 4. 13. 06 UTC)



[그림 5] 황사 추적도 예(2005. 4. 13. 06 UTC)

의 추정이 가능하다. 그리고 황사발생에 영향을 미치는 기상요소 및 먼지발생 임계값 등을 산정하는 과정이 지속적으로 개선되어야 한다.

### 황사의 위성 영상 분석

위성분석영상에서 황사로 분석되는 영역은 황사 또는 부유물질 등 에어러솔 가능영역을 의미하며, 적외선 파장영역에서 에어러솔에 의해 발생하는 지구장파복사량의 차이를 이용하여 생성한다. 일반적으로 적외선 1채널(11 μm)과 적외선 2채널(12 μm)의 휘도온도차를 이용한다. 황사 분석 영상은 육·해상, 주·야간의 다른 복사 특성에 의해 야간 및 해상에서 약하게 분석되는 경향이 많고, 구름이 존재할 때 분석이 불가능하다.

### 국내 황사관측(PM<sub>10</sub>)자료

황사 추적도, 황사예보모델, 위성 자료 등 최종적으로 분석된 값과 국내 황사관측 자료의 값을 고려하여 적절한 분석에 따라 어떻게 이동하여 왔는지를 판단한다. PM<sub>10</sub> 관측 자료는 발원지로부터 황사가 앞서의 추적과 분석 예측을 통한 이동경로를 거쳐 나타난 황사출현의 가장 구체적이고 정량적인 자료이다. 예로서 황사의 경로가 발원지인 중국으로부터

서해안을 거쳐 중부지방으로 유입되는 경우, 중국 대련의 PM<sub>10</sub> 관측값이 급격히 상승한 후 약 6시간 정도 지나면 백령도의 값이 상승하고, 이후 3~4시간 후 강화의 관측값이 급격히 상승하게 되는데, 이에 따라 황사의 유입여부를 판단할 수 있다.

PM<sub>10</sub> 농도 관측 자료는 절대값보다는 농도의 변화 추이에 주목해야 한다. PM<sub>10</sub> 농도가 갑자기 상승했거나 갑자기 상승한 후 일정한 값이 계속 유지될 경우 황사 가능성이 높다. 발원지에서의 PM<sub>10</sub> 농도값이 갑자기 상승한 경우에는 입자가 비교적 큰 것이 일시적으로 부유하여 높은 값이 기록된 경우이고, 그 후 기록값이 낮아졌다면 발원지에서의 황사 발생은 지속적이지 않은 것으로 유추할 수 있다. 그러나 입자가 작은 것들은 부유하여 상층기류를 타고 이동하고 있을 가능성이 있으므로, 실시간으로 인근지역의 황사 관측값과 위성영상 자료를 분석하고 황사의 이동 여부와 경로를 추적, 감시하여 확인하는 것이 필요하다.

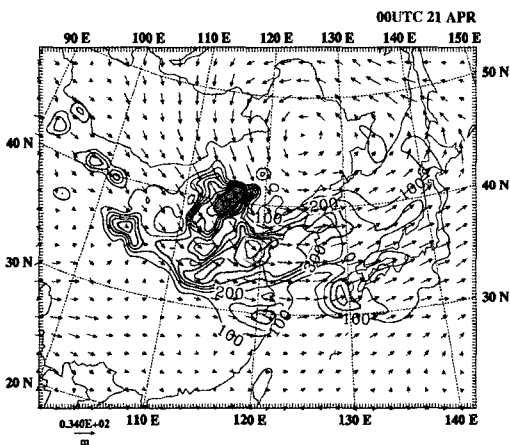
### 황사 예보 및 특보 발표 기준

기상청에서 황사 강도에 따른 예보 기준은 아래와 같다.

- ① 약한 황사: 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도가 200~300 μg/m<sup>3</sup> 정도 예상될 때.
- ② 보통 황사: 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도가 300~500 μg/m<sup>3</sup> 정도 예상될 때.
- ③ 강한 황사: 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도가 500 μg/m<sup>3</sup> 이상.  
단, 1,000 μg/m<sup>3</sup> 이상인 경우 매우 강한 황사로 사용할 수 있다.

또한, 기상청에서 발표하는 황사특보는 황사주의보와 황사경보로 나누어 발표하는데, 그 발표기준은 아래와 같다.

- ① 황사주의보: 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도 500 μg/m<sup>3</sup> 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때.
- ② 황사경보: 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도 1,000 μg/m<sup>3</sup> 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때.



[그림 6] 황사예보모델의 지상예상도 (2005. 4. 21. 00 UTC)



- ③ 황사특보는 아니지만, 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 2시간 이상 지속될 때 기상(황사)정보를 발표한다.

### 2006년 봄철 황사 전망(2006년 3월 8일 기상청 발표)

기상청에서 발표(2006. 3. 8.)된 2006년 봄철 황사 전망에 의하면 금년 봄에는 평년 수준(4일)으로 우리나라에 영향을 끼칠 것으로 예상된다고 발표하였다. 이는 황사의 발원지인 중국 북부내륙 지역과 몽골지역의 봄철 전반부 기온이 평년보다 높게 유지되면서 발원지에서 황사발생 가능성은 높을 것으로 보이지만, 황사의 이동에 영향을 주는 상층 서풍대가 주로 한반도 북쪽을 통과할 것으로 예상하기 때문에 우리나라에 영향을 주는 황사는 평년 수준일 것으로 전망하고 있다.

1990년대까지만 해도 고비사막이나 몽골 황토고원에서 발원한 황사가 우리나라에 주로 영향을 주었으나, 2000년부터는 이 지역보다 훨씬 동쪽에 위치한 내몽골고원과 만주 부근에서 발생하는 황사도 영향

을 미치고 있다. 이에 따라 우리나라에 심한 황사가 나타날 가능성이 점점 커지고 있으며, 실제로 서울 지역의 황사관측일수는 1980년대 3.9일에서 1990년대 7.7일로 증가하였고, 특히 2000년 이후에는 12일로 최근 증가 추세가 나타나고 있다. 또한, 중부와 남부, 서부와 동부 등 지역에 따라 황사발생 편차가 큰 것으로 분석되고 있다.

### 황사관련 홈페이지

- ① <http://www.weather.go.kr> : 열린 기상청 황사 관련 자료실로 황사농도, 황사일기도, 황사위성 영상, 황사모델 예측 결과 등 황사 관련 종합적인 최신자료를 얻을 수 있음.
- ② <http://yellow.metri.re.kr> : 기상연구소(응용기상연구실) 황사관련 홈페이지로 황사와 관련된 풍부한 자료 제공.
- ③ <http://www.jma.go.jp/jp/kosa/index.html> : 일본 기상청의 황사관련 홈페이지로 황사실황, 황사정보, 황사관련 일기도(실황과 예측)와 예측 모델 결과를 제공. ㉔