

# 황사, 기후변화와 지구환경에 어떠한 영향을 줄까?



**주**로 봄철에 우리나라에 영향을 미치는 황사는 바람에 불려 올라간 미세한 모래먼지가 대기 중으로 확산되면서 떨어지는 현상이다. 최근에는 황사가 가을과 겨울철에도 심심찮게 나타나면서 ‘봄의 불청객 황사’란 표현을 쓰기도 애매하게 되었다.

국제적으로는 이러한 먼지현상이 중국, 몽골 등 아시아 지역에서 발생하면 아시아 먼지로 부르고, 사하라 사막 지역에서 발생하면 사하라 먼지로 불린다. 그리고 비단 이틀 지역뿐 아니라 중동이나 호주, 미국의 서부지역 등 지구 상의 여러 지역에서 황사와 같은 바람에 의한 먼지현상이 발생한다.

전지구적으로 발생하는 이러한 먼지현상을 통칭하는 표현으로는 바람의 신 에올러스(Aeolus)에서 유래된 에올리안 더스

트(Aeolian Dust) 또는 미네랄 더스트(Mineral Dust)라는 표현이 흔히 사용되고 있다(본 고에서는 지역에 따른 구분 없이 이들 모두를 우리에게 친숙한 황사로 표현을 통일한다).

## 임계값 초속 6~7m 이상 바람이 황사 발생

황사는 식생이 거의 없는 건조한 지역 즉, 땅이 푸석푸석한 상태에서 강한 바람이 불 때 잘 발생한다. 토양이 어느 정도의 습기를 머금고 있으면 미세한 토양입자들이 서로 엉겨 붙게 되어 강한 바람이 불어도 먼지가 공중으로 쉽게 불려 올라갈 수 없게 된다. 황사 발원지에 눈이 덮여있을 때도 황사가 잘 발생하지 못한다. 모래먼지가 공중으로 불려 올라가기 위한 풍속의 임계값(threshold)이 있는데, 이러한 임계값은 사막지역의 여러 환경



글 김지영  
기상청 예보국  
국가태풍센터 기상연구관  
aceasia@korea.kr

글쓴이는 경북대학교 지구과학 교육과 졸업 후 천문기상학과에서 석사학위를, 서울대학교 지구환경과학부에서 박사학위를 받았다.



조건에 따라 다르지만 보통 초속 6~7m 이상 세기의 바람이 불어야 황사가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다.

황사 발원지에서 임계값 이상의 바람이 불게 되면 토양에서 요동(disturbance)이 일어나게 되고 지표토양의 일부가 부유하게 된다. 부유된 먼지의 일부는 재침적되지만 상당한 부분은 대기 상층의 기류에 의해 장거리 이동하면서 많은 부분은 해양에 침적된다. 또 일부는 식물의 잎 표면에 침적되거나 사람이나 동물의 호흡기를 통해 흡입되어 인체나 동식물에 영향을 주게 된다. 황사를 구성하고 있는 주요 성분은 대부분이 지각의 토양성분으로서 규소, 알루미늄, 철, 칼슘 등을 포함하는 산화물들이다.

지표로부터 배출되는 먼지의 총량을 추정한 연구결과를 종합해 보면, 다소의 불확실성을 내포하고 있지만 전 지구적으로 매년 약 10억~30억 톤(즉, 1,000~3,000 Tg/yr) 정도의 먼지가 대기 중으로 배출되고, 그 중 5억~10억 톤은 사하라 사막지역에서 발생되는 것으로 추정되고 있다. IPCC(기후변화 정부간 위원회) 제4차 보고서에 수록된 아시아 지역의 먼지발생량 추정연구 결과에 따르면 매년 8억 톤이 배출되어 그 중 30%는 사막지역에 침적되고, 20%는 주변지역으로 수송되며, 나머지 50%는 태평양 지역 등으로 장거리 수송되는 것으로 보고된 바 있다.

대기 중으로 배출되는 황사의 많은 부분은 자연 기원에 의해 발생하지만 그 중 약 30%는 사막화나 토양의 난개발 등에 따른 인위적인 요인으로 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 인위적인 요인에 의해 배출된 황사는 인위적인 기후변화와도 깊은 연관

성을 가지게 된다.

### 기후변화에 영향 미치는 에어러솔

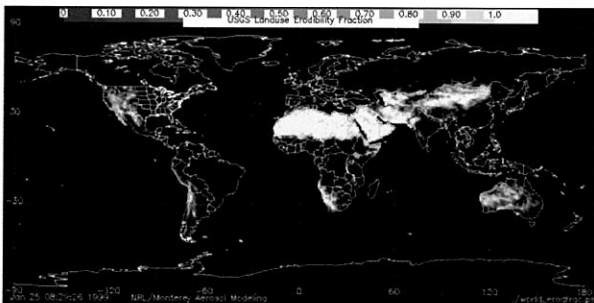
황사와 같이 대기 중에 부유하는 에어러솔은 지구로 들어오는 태양 빛을 산란 또는 흡수하는 과정(직접 복사효과라고 한다)을 통해 기후 변화에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 또한 에어러솔은 구름응결핵으로 작용하여 구름의 생성과 수명에도 영향을 주게 된다(이를 간접 복사효과라고 한다). 잘 알려진 바와 같이 구름은 햇빛을 반사시키는데 중요한 역할을 하기 때문에 기후변화 연구에 있어 이러한 에어러솔의 작용과 영향은 매우 중요한 부분에 속한다.

구름의 생성과 수명에 에어러솔이 미치는 효과는 구름이 일단 만들어지고 잘 발달해야 비가 내리게 되므로 수문학적인 순환과도 밀접하게 연관되어 있고 그 중요성 또한 더욱 크다고 할 수 있다. 황사와 같은 토양기원의 미세한 입자는 흡습성은 좋은 편이 아니기 때문에 구름응결핵으로서의 역할은 작지만 대기 온도가 낮은 상층에서는 아주 좋은 빙정핵으로 작용하는 것으로 알려져 있다.

에어러솔(또는 기후변화를 야기하는 원인물질)이 대기 중에 있을 때와 없을 때의 지구-대기 시스템의 복사량 차이를 복사강제력이라 한다. 즉 어떤 인위적 물질이 새롭게 작용함에 따라 자연스런 에너지의 전달과정에 어느 정도의 변화가 생겼는가를 보는 것이다. 복사강제력은 온실가스 등 기후변화를 일으키는 원인물질이 어느 정도로 강하게 복사 수지에 영향을 주는가를 비교할 수 있는 척도로 사용된다.

IPCC 4차 보고서에 따르면 산업혁명(1750년을 기준함) 이후에 인위적으로 배출된 황사에 의한 복사강제력은  $-0.10 \text{ W/m}^2$ (오차범위는  $\pm 0.20 \text{ W/m}^2$ )으로 추정되고 있다. 이는 3차 보고서에서 제시된  $-0.60 \sim +0.40 \text{ W/m}^2$  범위의 추정치와 비교해 볼 때 황사에 의한 인위적 복사강제력 추정치의 오차 범위가 줄어들고 추정이 더 정확해진 것으로 평가할 수 있다.

황사는 전 지구적인 생지화학적 순환에도 중요한 역할을 하고 있다. 생지화학적 순환이란 어떤 화학적 요소가 지구 상의 생물권, 지권, 대기권, 수권 등을 통해 이동하는 하나의 거대한 순환 경로를 의미한다. 생지



▶▶ 전통적으로 알려진 황사의 주요 발원지역. 사하라 사막으로부터 중국북부 및 몽골까지 이어진 지역에서 주로 발원하는 것으로 알려져 있다(출처: 미국 해군연구소).

화학적 순환으로 탄소, 산소, 질소, 물 등 물질의 순환과 재사용이 이루어지게 된다. 특히 토양기원의 먼지는 해양 생태계에 영양염류를 제공하는 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 거대한 대륙의 지표에 쌓여있던 모래 먼지가 바람에 의해 수천~수만 km 이상을 날아가 바다에 침적되면 플랑크톤의 생장에 중대한 역할을 한다. 이러한 과정은 해양생태계를 비롯한 다양한 자연환경시스템에 연쇄적인 영향을 주게 된다.

### 기상예보보다 어려운 황사 예보

황사의 발원지에서 멀지않은 특정지역(특히 인구가 밀집된 대도시 지역)에 심한 황사가 나타날 경우 상당한 피해와 영향이 나타날 수 있다. 일단 황사가 불어닥치게 되면 대기 중의 먼지 농도(예를 들어 입자의 크기가  $10\mu\text{m}$  이하인 에어로솔의 단위체적당 질량농도를 나타내는  $\text{PM}_{10}$ )가 평소의 수십 배 정도로 높아지고 일시적으로는 거의 100배 정도까지 치솟을 수 있다. 이러면 짙은 미세먼지가 호흡기나 눈에 들어가 일상 생활은 물론 각종 야외활동에 영향을 초래한다. 또한 낮아진 가시거리로 항공기의 결항과 더불어 자동차 운전 등 교통에도 부정적 영향을 미치고, 반도체나 정밀기계의 제품 불량률이 높아지는 등 산업적으로도 다양한 영향을 준다.

기상청에서는 황사에 따른 피해예방과 대국민 황사 정보 서비스 차원에서 황사 감시 및 예보 업무를 수행하고 있다. 중국과 몽골의 황사 발원지와 경유지(15개소) 및 우리나라(28개소)에 설치된 장비를 이용한 지상네트워크 관측과 더불어 인공위성 및 라이다(LIDAR, 국내 4개소)를 이용한 황사의 원격탐사 방법을 사용하여 황사 감시를 하고 있다.

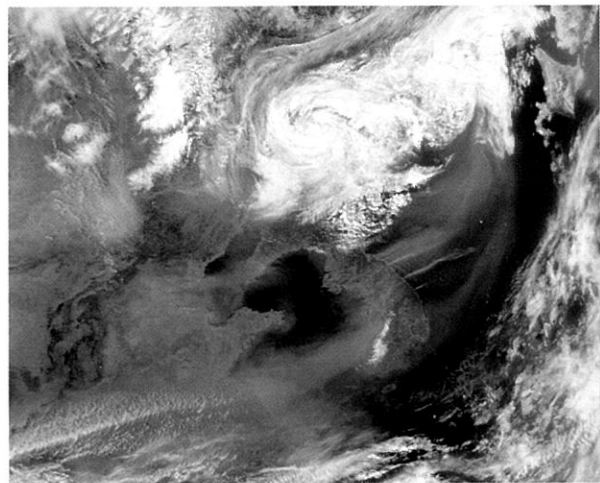
라이다는 레이저빔을 하늘로 쏘아 올려 황사입자에 반사되어 되돌아오는 반사파를 분석함으로써 황사의 유무, 고도별 분포, 농도 등을 측정하는 장비다. 정지궤도 및 극궤도 위성을 이용한 황사 관측은 넓은 공간적 범위에 걸쳐 분포하는 황사를 단번에 관측할 수 있다는 장점이 있다. 특히, 천리안 위성의 적외선 채널을 이용한 황사 탐지는 동아시아 대륙 전 영역에 대해 황사의 동태를 24시간 체계로 빈틈없이 감시하는데 중

요하게 활용되고 있다. 또한 몇 년 후에 다목적 기상전용 항공기가 도입되면 항공기에 황사 관측 장비를 탑재하여 황사의 공간 분포와 물리 화학적 특성을 더욱 더 정밀하게 관측할 수 있게 될 것이다.

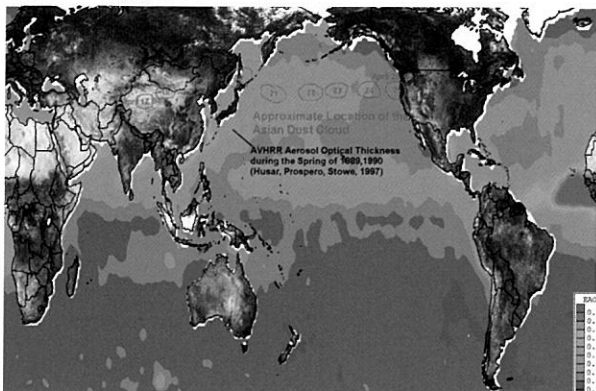
황사의 감시와 더불어 황사예보는 황사 대비에 있어 빼놓을 수 없는 중요한 요소다. 기상청은 2002년 4월부터 황사특보제를 신설하여 실시하고 있고 매년 2월 하순에 황사에 대한 계절전망을 발표하고 있다. 황사에 대한 단기간 예보는 기상청의 황사 전용 모델에 의한 예측 결과가 주로 사용된다. 황사를 수치적으로 모델링하는 기술은 일반적인 기상예보에 비해 한 단계 더 어려운 기술에 속한다.

황사가 우리나라에 언제 어느 정도의 강도를 가지고 영향을 미칠 것인가를 예보하기 위해서는 일단 황사 발원지의 지표 상태에 대한 정확한 자료가 황사예측 모델 속에 입력돼야 한다. 또한 황사발원지의 지상 풍속에 대한 정확한 예측을 통해 대기 중으로 부유하는 먼지 양을 정확하게 추정할 수 있어야 한다. 이때 먼지의 부유량(먼지 플럭스로 정의되며 단위시간당 단위면적당 입자 크기별로 부유되는 황사의 양을 의미)을 추정하는 계산식도 실제적으로 충분한 정확성을 가져야 한다.

일단 부유된 먼지의 입자 크기별 양이 결정되면 그 다음부터는 수송, 침적, 세정에 대한 모의과정이 중요하다. 이때 크기가 큰 먼지입자들은 발원지 주변이나 수송 도중에 쉽게 중력 침강하여 제거되는 과정이나



▶▶ 2000년 4월 7일 관측된 심한 황사 사례의 위성영상. 광범위한 황사 띠가 한반도 상에 걸쳐져 있다.(출처: 미국 항공우주국).



▶ 태평양을 건너 미국 본토까지 날아간 황사. 1998년 4월 17일 발원하여 8일 후인 4월 25일에 도착한 것으로 추정됨. 대륙 간 오염물질의 장거리 수송의 전형적인 사례로 간주됨 (출처: 미국지구물리학회).

저기압 속에서 생성된 강수에 의해 황사의 일부가 세정되는 과정이 계산과정에 포함되어 있다.

황사를 포함한 기류의 이동속도와 방향을 정확하게 예측하는 것 또한 황사예보의 매우 중요한 요소다. 이러한 모든 예측 요소들은 기상청이 사용하고 있는 슈퍼컴퓨터에 탑재된 기상예측모델과 황사예측을 위해 운영되고 있는 별도의 황사예측 전용 모델을 통해 계산하고 있다.

마지막으로 황사가 우리나라 쪽으로 이동하는 것이 정확하게 예측되었다고 하더라도 황사입자가 지표에 도달할 정도로 낮게 이동해야만 지상관측 장비에 검출될 수 있고 실제 시민들이 황사의 영향권에 든 것을 체감할 수 있게 된다. 많은 양의 황사가 한반도 쪽으로 이동하더라도 대기 상층으로만 통과하고 지상에 도달하지 않았을 경우에는 설령 황사가 지나갔다 하더라도 황사의 직접적인 영향을 받은 것으로 간주하기 어렵기 때문이다. 이와 같이 황사의 단기예보는 여러 가지의 예측 요소들이 동시에 만족돼야 하기 때문에 강수예보 등 일반적인 기상예보보다 예보 정확도가 낮은 경향이 있고 예보하기에 더욱 어려운 측면이 있다.

#### 황사예보, 예측기술한계 충분히 이해해야

이에 덧붙여 기상예보에 있어 슈퍼컴퓨터의 역할에 대해 간략하게 언급하고자 한다. 기상청의 일기예보가 틀릴 때면 비난 여론 가운데 슈퍼컴퓨터가 등장하는 것을 자주 보게 된다. 슈퍼컴퓨터는 아주 빠른 연산

기능을 가진 초대형계산기이며, 수치예보 업무에 있어 핵심적인 역할을 하는 것이 사실이다. 하지만 슈퍼컴퓨터는 우리가 필요로 하는 정보를 위해 연산기능을 제시간 내에 끝내고 결과를 산출해 주면 제 임무를 다하는 것이다.

정확한 기상 예측정보의 생산을 위해서는 앞서 언급한 바와 같이 수치예보 모델이 정교해야 되고 이러한 모델에 입력되는 초기 자료 및 이를 가공해서 넣을 수 있는 처리과정(보통 자료동화라고 부름)이 잘 이루어져야 한다. 또한 슈퍼컴퓨터를 통해 계산된 예측의 결과들을 경험이 많은 예보관들이 최종적으로 판단하여 예보를 내는 과정 또한 매우 중요하다. 따라서 궁극적인 기상예보의 정확도는 이러한 일련의 과정이 정확하게 진행됐을 때 종합적으로 향상될 수 있다.

황사의 장기예보는 황사 발원지의 기후상태(기온, 강수량, 눈 덮임 등), 저기압 활동, 종관적인 기압배치에 따른 예상 기류의 이동방향 등을 고려하여 우리나라에서의 황사 발생 예상 가능일수를 삼분위(평년에 비해 많음, 보통, 적음)로 나누어 발표하고 있다. 황사의 장기예보는 다음 계절에 예상되는 황사의 예상 빈도를 예측하는 것이므로 단기예보에 비해 예측의 불확실성이 더욱 큰 게 현실이며, 이는 현재의 대기과학적 예측 기술수준의 한계와도 맞물려 있다. 따라서 기상청에서 발표하는 황사예보 정보를 효과적으로 활용하기 위해서는 이러한 예측 기술의 한계를 충분히 이해하고 활용하는 것이 중요하다.

올해 봄철에 대한 기상청의 황사 전망은 평년과 비슷한 수준의 황사가 발생할 것으로 예상되었다. 과거 통계자료를 볼 때 우리나라는 4월에 황사가 가장 빈번하게 발생하는 것으로 알려져 있다. 황사를 포함한 기류가 중국 내륙의 산업 밀집 지역을 통과할 때는 황산염, 질산염, 검댕 등 미세한 대기오염 물질들이 함께 이동해 오는 경우가 많다. 황사를 전후한 먼지의 화학성분 연구 결과에 따르면 종관적인 기상조건에 따라 다를 수 있지만 대기오염 물질이 황사가 도달하기 반일 정도 이전에 농도의 최대치가 나타난 사례도 보고되고 있다. 따라서 일단 황사가 예보되면 야외활동을 자제하고 개인의 건강과 위생관리를 철저히 할 것을 권한다. **ST**