

황사현상의 발생과 대처방안

조 주 영 | 기상청 관측담당관실 과장

E-Mail : jycho@kma.go.kr

1. 머리말

최근 몇 년 전부터 우리나라의 황사발생 빈도가 높아지고, 그 발생강도도 심하여 국민들의 건강을 크게 위협하고 있을 뿐만 아니라, 반도체 산업 등 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 심각한 영향을 주고 있다. 이로 인해 정부차원에서의 황사에 대한 예방 대책과 사전 예측방안이 필요하게 되었다.

정부는 2002년 4월 처음으로 황사에 대한 특보제를 도입하게 되었고, 환경부와 기상청으로 이원화되었던 황사업무를 기상청에서 주관하면서 기상청은 황사관측자료의 단일화, 예보제 신설 및 관측망 확충계획을 수립한 바 있다. 이 조치에 의하면 PM₁₀(입자직경이 10 μ m 이하인 입자)의 농도를 사용하여 황사 정보와 특보 발표 기준을 설정하였고, 종래의 지상에서만 관측되는 황사를 연직으로 관측하는 라이더(LIDAR, Light Detection Radar)를 도입하여 입체적인 양적 황사관측이 가능하도록 하였다.

또한, 황사의 발원지인 중국 북부지역의 사막화를 방지하기 위한 노력으로 황사의 피해지역인 우리나라와 일본은 민간지원과 국가적인 협력으로 나무를 심는 작업도 진행 중이다. 우리나라 기상청은 황사의 정확한 예측을 위해 우리나라에 영향을 주는 중국의 황사발원지역을 현장 답사하여 지역적

특성을 조사하고, 그곳의 황사 발생을 사전에 인지할 수 있도록 황사관측 장비 설치지역을 선정하고 우리나라의 한국국제협력지원단인 KOICA의 자금으로 황사관측장비를 2004년 하반기부터 설치할 예정이다.

2. 황사 현상과 발원지

2.1 황사(黃砂) 현상이란?

황사는 중국북부지역의 사막지대와 황하 중류의 황토지대에 주로 건조기에 해당하는 봄철에 저기압이 통과하면 이에 동반되는 한랭전선에 의한 강한 바람이나 지형에 의해 만들어진 국지적 난류에 의해 1) 다량의 황색 먼지가 상층으로 불려 올라가 공중에 부유하거나, 2) 이 먼지가 장거리 이동하면서 도중에서 서서히 지표로 하강하는 먼지나 현상을 말한다.

발원지에서 황사가 발생하려면 강한 바람이 발생할 뿐만 아니라 이를 상공으로 불려 올라가게 하는 상승류가 동반되어야 한다. 그렇다면 이렇게 불려 올라간 황색먼지가 모두 우리나라로 이동해오는 것일까? 이것은 대기의 상공에서 바람의 방향과 연관되어 있다. 즉, 황사가 발생한다 하더라도 상승의 기류 흐름이 한반도로 향하지 않을 경우에는 발원지에서 아무리 강한 황사라 해도 다른 지역으로 이동하여 우리나라에 영향을 주지 못한다.

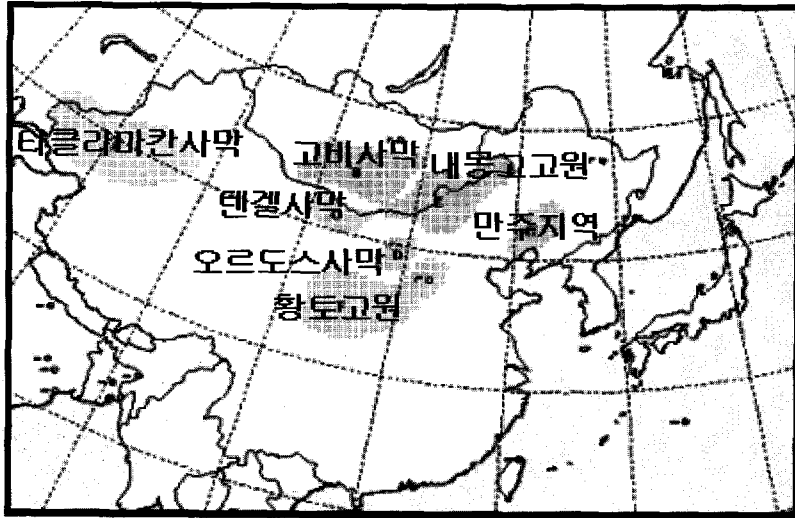


그림 1. 우리나라에 영향을 주는 황사 발원지

우리나라의 황사현상 발생을 예측하는데 중요한 것은 발원지의 정보뿐만 아니라, 이를 우리나라로 수송해 오는 기압계의 형태를 예측하는 것이다. 이와 같은 관점에서 올 봄 황사예측에 대한 환경부와 기상청의 주장이 서로 다른 것은 기상청은 발원지 정보 뿐만 아니라 황사를 이동시키는 기압계의 흐름 정보를 분석한 것을 근거로 한 것이기 때문이다.

2.2 황사의 발원지

우리나라에서 발생하는 황사현상의 발원지는 그

림 1과 같이 중국북부의 사막지대로 타클라마칸사막, 고비사막, 텐겔사막, 오르도스사막, 내몽고 고원 및 만주지역이며, 황토지대는 황하중류의 황토고원이다.

2.3 황사이동 소요시간과 고도

황사가 발원지로부터 우리나라에 도착하는데 소요되는 시간과 이동고도는 대기의 상층 기류의 속도와 발원지의 위치에 따라 다르나, 평균적으로 표 1과 같다.

표 1. 발원지에서 우리나라로 황사의 이동 소요시간과 고도

| 황사 발원지 | 소요 시간(일) | 이동 고도(km) |
|---------------------------|----------|-----------|
| 만주지역 | 0.3 ~ 3 | 1 ~ 3 |
| 황토고원 | 2 ~ 4 | 1 ~ 4 |
| 고비사막, 오르도스사막, 텐겔사막, 내몽고고원 | 3 ~ 5 | 1 ~ 5 |
| 타클라마칸 사막 | 4 ~ 8 | 4 ~ 8 |

이중 만주지역은 우리나라에 가장 근접한 지역으로 여기서 발생한 황사는 짧게는 8시간만에 북한을 거쳐 남한에 영향을 주는 가장 가까운 발원지이다. 또한, 타클라마칸 사막은 우리나라에서 5000km 정도 멀리 떨어져 있어 이동거리가 최장으로 우리나라에 드물게 영향을 준다. 우리나라에 주로 영향을 주는 황사 발원지는 황토고원, 중국북부의 사막지역인 고비사막, 오르도스사막, 텐젤사막, 내몽고고원지역으로 이동고도는 1~5km 정도로 이 지역에 기압골(지상에 저기압)이 발달하여 통과 시 발생하게 된다.

2.4 우리나라에서 황사현상 발생조건

우리나라에 황사현상은 다음과 같은 3가지 조건이 충족될 때 발생하는 것으로 알려져 있다.

첫째, 발원지의 강수량이 적어 건조한 상태를 유지하고 풍속이 강한 기상조건이 되어야 한다. 이는 주로 겨울과 봄에 해당하나 겨울철의 경우 적설로 황사발생이 억제되며, 봄철에는 해빙으로 인해 겨우내 동결한 토양이 녹으면서 부유하기 적당한 20 μm 이하 크기의 먼지가 다량으로 발생할 수 있도록 지표면에 식물이 거의 없는 시기이다. 이 시기에 발생하는 먼지의 양은 연 배출량의 절반 이상이며 호조건이다.

둘째, 발원지에서 발생된 황사가 우리나라로 이동하려면 고도 5.5km에서의 상층 기압골 위치가 발해만 부근에 위치하여 강한 편서풍(북서풍 내지 서풍)을 타고 우리나라로 유입될 수 있는 조건이 되어야 한다. 기압골의 위치가 남쪽으로 처질 경우, 남부지방이나 제주도에 황사가 발생한다. 이렇게 발생한 황사는 강한 경우 동해와 일본을 거쳐 하와이나 미국 서해안 지방까지 이동한다.

셋째, 한반도로 이동하는 황사가 대기 상층의 기류 흐름이 매우 강한 경우, 지표면으로 하강하지 못

하고 대부분 동쪽으로 이동한다. 그렇다면 한반도로 이동해온 황사가 지표면으로 하강하려면 역시, 기압계의 도움을 받아야 한다. 마치 황사가 대기 상층으로 상승하기 위해 저기압의 강한 상승기류의 도움을 받았듯이, 하강에 필요한 고기압의 하강류가 필요하다. 봄철에는 이동성 고기압의 영향을 자주 받기에 황사현상 발생에 적합한 기상조건이라 할 수 있다.

2.5 황사 발원지의 배출량 배분

황사 발원지에서 강한 바람에 의해 대기 상층으로 불어 올려진 황사량의 전체를 100으로 볼 때, 보통 30 정도가 발원지에서 재 침적되고, 20 정도는 주변지역으로 수송되며, 50 정도는 장거리 수송되어 우리나라, 일본, 태평양, 미국 서해안 지역 등에 침적된다.

2.6 황사의 크기 및 구성성분

발원지의 특성에 따라 다르나 20 μm 보다 큰 입자는 구르거나 조금 상승하다 부근지역으로 낙하하고, 그 이하 크기는 부유하여 대기 상층으로 올라간다. 사막지대에는 큰 모래가 많으며 황토지대는 작은 토양으로 이루어져 있으며, 한반도와 일본에서 관측된 황사입자의 크기는 1~10 μm 정도로 1 μm 입자는 수년동안 10 μm 입자는 수 기산에서 수 일 정도 공중에 부유할 수 있게 된다.

그림 2는 우리나라에서 2000년 3월 22일 황사발생 시에 관측한 입자 직경별 농도로, 1~10 μm 범위의 입자크기로 구성되며 이중 3 μm 내외의 황사입자가 가장 많은 것으로 나타났다.

우리나라에 영향을 주는 황사의 주성분은 Si, Al, Ca, K, Na로서, 황사 발생시에 이 성분에 대한 농도가 높아지나, 황사기간 중 2~10 μm 범위에서 SO_4^{2-} , NO_3^- 의 입자농도가 평상시보다 훨씬 높게

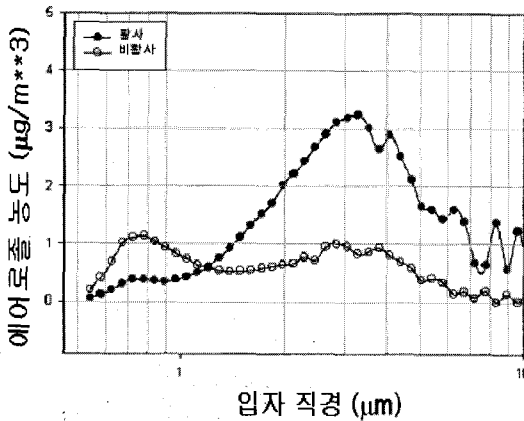


그림 2. 황사와 비황사시 에어로졸 직경별 농도

나타나는데(2001년 4월 ACE-ASIA 집중관측기간 동안 국립환경연구원에서 분석한 결과), 이는 황사의 이동과정에서 산성우의 주 원인이 되는 아황산가스 등과 같은 오염물질이 황사입자의 표면에 흡착하여 반응한 결과로 나타났다.

2.7. 발생 시 현상과 영향

황사가 발생하면 그림 3과 같이 대기 상태는 시야가 흐려지고 하늘이 황갈색으로 변하여 시정이 악화되며, 침적이 시작되면 고운 먼지형태로 지표면이나 물체에 쌓이며(건성침적) 강수가 있을 경우 대기중에 부유하는 황사가 비와 함께 내려 흠비가 되어 자동차 등에 침적된다.

황사가 미치는 영향은 그림 4와 같이

- 1) 태양빛을 차단하고 산란시켜 시정을 악화시키며,
- 2) 복사열 흡수로 냉각 효과를 일으켜 지구 대기의 전체 열수지에 영향을 미치고,
- 3) 구름 생성을 위한 응결핵을 증가시키며,
- 4) 농작물, 활엽수의 기공을 막아 생육에 장애를 일으키며,
- 5) 호흡기와 안 질환을 일으켜 마스크 착용, 학교

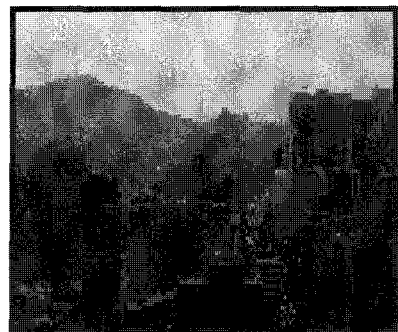


그림 3. 황사발생 시 시정악화 및 침적현상 (조선일보 홈페이지에서 인용)

의 휴교, 호흡기 및 안질환 환자 급증으로 병원 내 원환자 급증 등을 초래하며,

6) 빨래, 음식물, 사람, 동물피부 등에 침강 및 부착하여 더럽혀 세척이 필요하며,

7) 항공기 엔진손상과 이착륙시 시정악화로 운행



그림 4. 황사 발생시 사회 전반에 걸친 영향(시계방향으로 마스크 착용, 학교 휴교, 항공기 운항중단, 호프기 및 안질환환자 급증, 가축우리 세척 등 (조선일보 홈페이지에서 발췌)

중단이 증가하며,

8) 반도체 등의 정밀산업에 손상을 주어 불량품 양산으로 인한 공장 가동을 중단시키는 등 사회 전반에 대해 영향을 주게 된다.

3. 최근 황사발생 빈도

지난 30년간(1971~2000년) 우리나라 전국에 걸쳐 발생한 황사 관측일수는 봄철의 경우 평균 약 3.3일로서, 구 30년간(1961~1990년)의 평균값인 약 2.6일에 비해 약 0.7일 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 중국북부지역의 급속한 사막화의 진행이 가장 큰 요인이다.

최근 10년간(1994~2003)의 우리나라의 주요 7대 도시(서울, 강릉, 대전, 대구, 전주, 광주, 부산)의

연별 총 황사발생 빈도는 2000년대에 들어와서 그림 5와 같이 2001~2002년에 발생빈도가 급격하게 증가하여 2002년 3월 22일에는 사상 최대강도의 황사발생으로 학교 휴교령이 내려지는 등 사회전반에 걸친 영향이 막대하였다. 2002년에는 1995년과 1998년보다 약 2배 이상 황사가 자주 발생하였으며, 평상시 보다 황사발생시에 농도가 2~10배 정도 높게 나타났다.

한편 7개 주요 도시 중 서울의 최근 10년간의 황사 발생일을 월별로 분석한 결과, 그림 6과 같이 다른 도시와 동일하게 3~4월에 주로 발생하며 가장 발생빈도가 많은 월은 4월로 이를 백분율로 환산하면 4월이 49%, 3월이 30%로 3~4월의 발생빈도가 전체의 80% 정도를 차지한다. 11~2월에도 빈도는

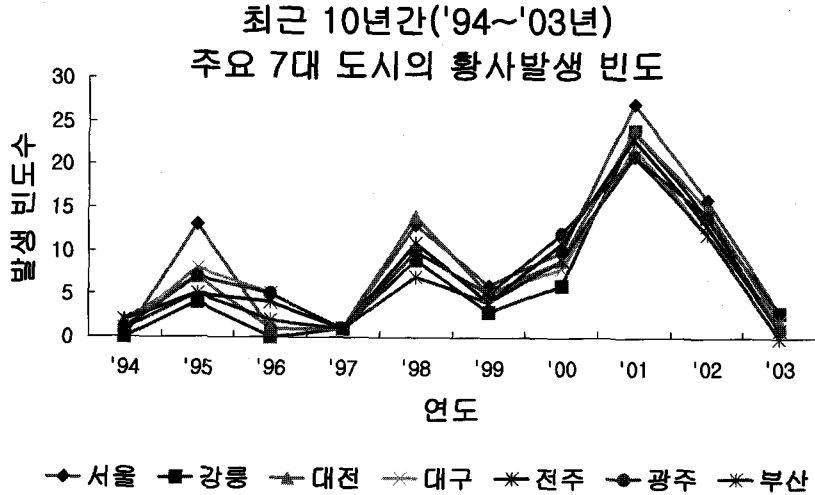


그림 5. 최근 10년간 연간 황사발생 빈도 수

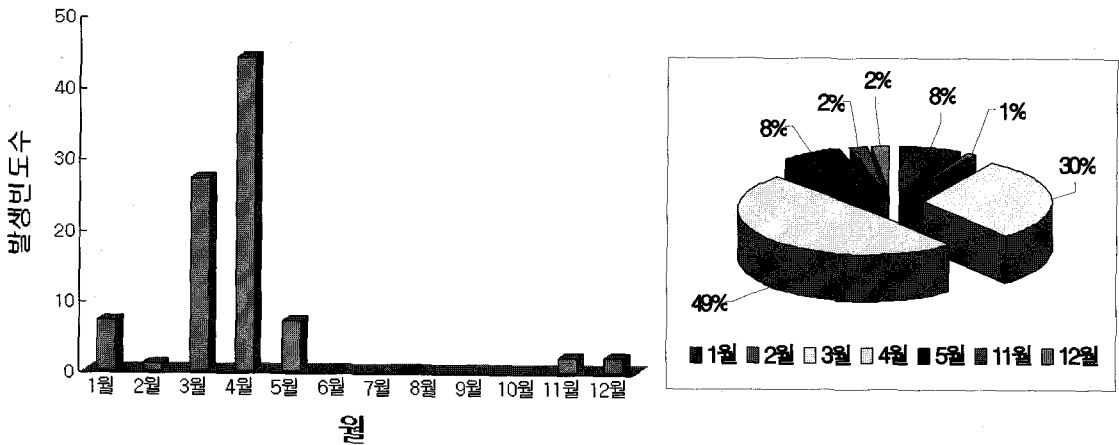


그림 6. 서울의 최근 10년간(1994~2003년) 월별 황사발생 빈도 및 백분율

작지만 늦가을과 겨울에도 황사 현상이 관측되며, 6~10월은 우기 및 강수로 인한 습한 토양 상태로 황사발생 조건이 되지 못해 전혀 발생되지 않는 것으로 나타났다.

4. 황사 관측망

급증하는 황사 발생빈도와 황사강도의 심화로 황사현상은 사회적으로 큰 문제로 대두되게 되었다.

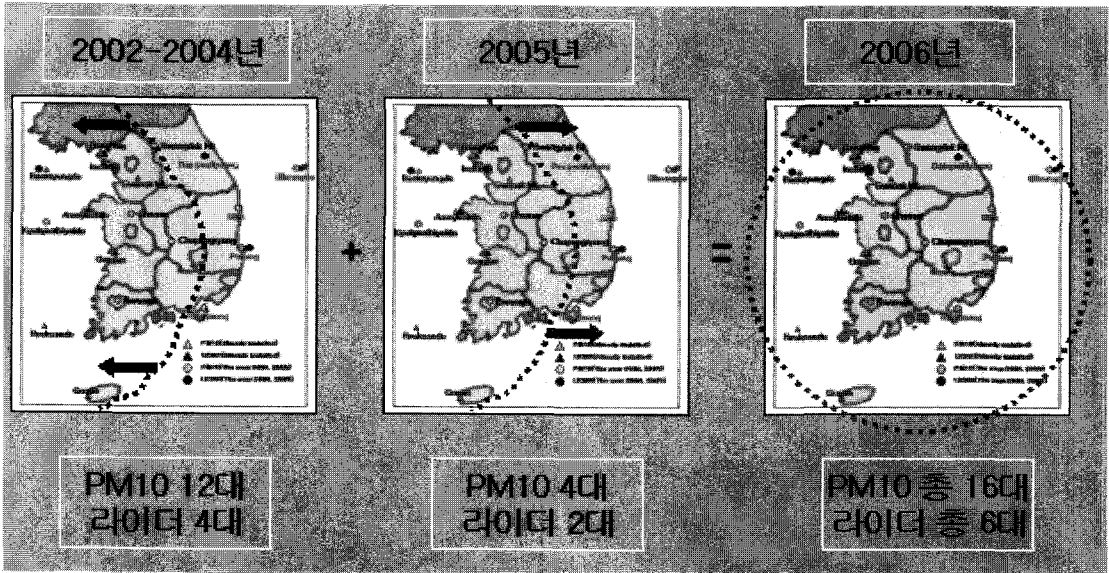


그림 7. 기상청의 황사관측망 확충계획도(2003~2006년)

중전의 황사 현상에 대한 장점보다는 중국의 산업화에 따라 대량생산된 오염물질이 황사와 함께 우리나라로 이동해 오면서, 인체에 미치는 영향과 산성비 등과 같은 중금속 물질의 함유로 인한 오염문제가 심각한 사회문제로 부각되었다.

이에 따라, 정부에서는 2002년 4월부터 도입된 황사특보제를 실시하면서, 중전의 황사 발생 유무에 대한 판정을 황사의 강도를 도입하여 강, 중, 약의 3단계로 구분하는 체계를 마련하였다. 이 기준에 부합된 황사특보제를 운영하기 위해, 황사를 양적으로 관측할 수 있는 ‘황사관측망의 확충’이 필요하게 되었다. 기상청은 “황사특보제 운영을 위한 종합대책”을 마련하고, 기존의 TSP 관측체계에서 PM₁₀ 농도관측으로 전환하고 기상청의 황사관측망의 확충과 기존의 환경부 대기오염측정망을 공동 활용하는 종합 황사관측체계를 구축하였다.

기상청 황사관측망은 대기 상층의 황사의 양적

분포를 측정할 수 있도록 계획되어 있다. 2002년 TSP와 안면도에 유일하게 연구용으로 PM₁₀ 1대와 라이더 1대가 설치되었던 것을 관측망 확충계획 아래, 2003년부터 2006년까지 연차적으로 지상관측용으로 PM₁₀ 장비를 14대로 교체 및 신규설치하고, 상층 관측용으로 라이더 5대를 신규 설치하도록 하였다. 아울러 중국발원지의 황사발생 정보를 사전 관측하도록 황사의 길목에 PM₁₀과 TSP 장비를 각각 6대, 라이더를 1대 설치 지원하여 한·중 황사공동업무를 수행하는 기반을 마련한 바 있다.

이 계획에 따라 그림 7과 같이 2004년까지는 서쪽지방을 중심으로 황사관측 선도망을 구축하고, 2005년에는 동쪽에 황사의 양적관측망을 완료하여 2006년부터는 전국에 걸쳐 PM₁₀ 16대와 라이더 6대를 사용하여 황사의 입체 관측망이 운영되게 된다.

기상청에서는 환경부의 기존 대기오염관측망과의 중복 설치를 방지하고 관측공백이 없는 국가적

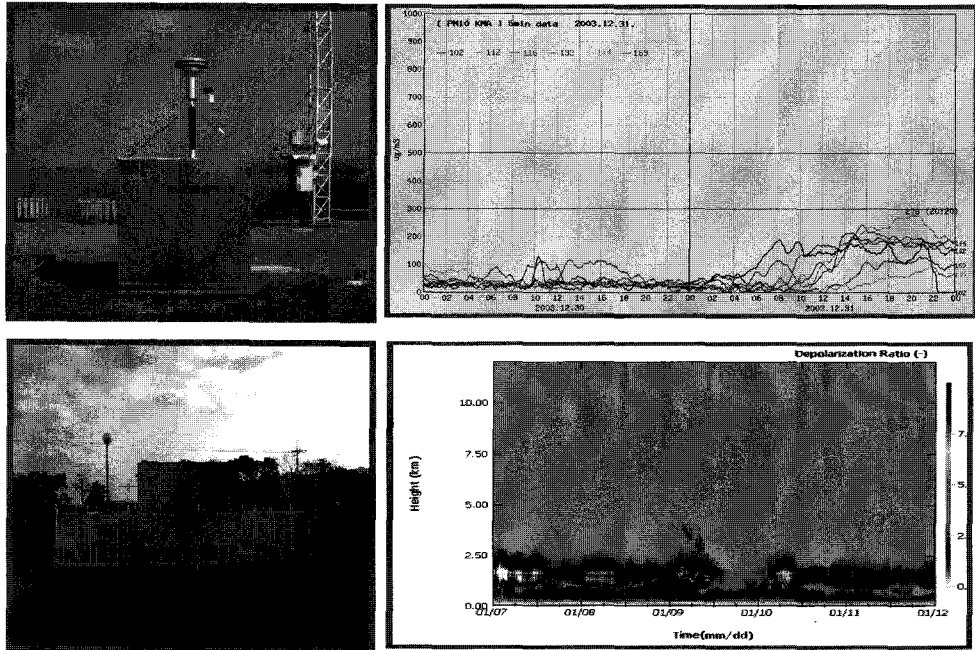


그림 8. 기상청 황사관측장비 PM₁₀(상단)과 라이더(하단)의 관측자료

인 황사관측망 운영을 위해, 황사유입이 시작되는 서해안지역과 동쪽지방의 이동 길목에 설치계획하고, 도심지역에서는 환경부의 207개소로 구성되는 대기오염관측망의 관측장비에서 관측된 요소 중 하나인 PM₁₀값을 활용하여 황사발생시 특보기준 자료로 활용하고 있다.

그림 8은 기상청에서 현재 사용중인 지상의 황사 관측장비인 PM₁₀과 대기 상층의 황사분포를 측정하는 라이더장비가 생산하는 자료이다. PM₁₀의 경우 현재 7개 지점(백령도, 강화, 관악산, 군산, 흑산도, 제주도 고산, 안면도)에서 5분간으로 PM₁₀의 농도가 시계열로 표출되며 PM₁₀ 값이 100 미만이면 보통 대기 상태이고 100~200 정도로 증가하면 황사의 진위여부인지 지역적인 오염원의 배출에 의한 것인지 확인하게 된다. 200 이상이 되고 지역적

오염원이 없는 경우, 황사의 발생으로 판단하는 것이 보통이다. 라이더의 경우 소산계수와 비 편광도를 사용하여 대기 중의 황사입자 존재 층을 파악하게 된다.

중국의 황사감시를 정량적으로 수행하기 위해, 한반도에 유입되는 황사 발원지와 이동경로상에 위치한 중국내 6개 기상관측소에 한국국제협력단(KOICA) 지원사업으로 총 123만불(중국 60만불 분담)을 투자하여 한·중 공동 황사관측망을 구축한다. 황사발원지인 고비사막 부근에 주일하, 만주 지역에 퉁리아오, 황토고원부근인 유세 그리고 황사의 이동경로인 베이징, 헤민, 대련에 황사관측장비를 설치한다. 설치될 장비는 PM₁₀ 6대, TSP 6대, 라이더 1대이다.

표 2. 기상청의 황사정보 및 특보발표 기준

| 황사정보 | 황사주의보 | 황사경보 |
|---|---|--|
| 황사로 인해 1시간 평균 미세 먼지 농도 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 | 황사로 인해 1시간 평균 미세 먼지 농도 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 | 황사로 인해 1시간 평균 미세 먼지 농도 $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 |

표 3. 기상청의 황사강도예보 기준

| 약한 황사 | 보통 황사 | 강한 황사 |
|--|---|---|
| 황사로 인해 1시간 평균 미세 먼지 농도가 $200\sim 300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 | 황사로 인해 1시간 평균 미세 먼지 농도 $300\sim 500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 | 황사로 인해 1시간 평균 미세 먼지 농도가 $500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상. 단, $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우 매우 강을 사용할 수 있다. |

5. 황사특보 운영체계

기상청은 3단계로 구분하여 황사의 특보를 운영하고 있다. 표 2와 같이 황사로 인해 평균 미세먼지 농도를 기준으로 2시간 이상 지속되는 경우 단계별 조치를 취하게 된다.

또한 황사의 강도 예보도 함께 하도록 신설되어 3단계로 나누어 약한 황사, 보통 황사, 강한 황사로 구분하여 표 3과 같은 기준으로 발표한다.

위와 같이 규정된 기준에 따라, 기상청의 황사 전담예보관은 일별 황사의 현황과 전망에 대한 분석 자료를 만들어 황사예보에 활용한다. 또한, 중국의 황사발생에 대한 사전인지를 위해 2004년부터 황사 발생이 최성기에 이르는 3~5월에 한국과 중국은 각각 1인씩 양국에 파견하여 관측 및 예보분야의 협력체계를 구축하게 된다.

6. 기상청의 황사분석 및 예측과정

황사를 예측하기 위해서는 현재 발생하는 황사에

대한 실시간 모니터링과 이를 활용한 정량적 황사 예측모델을 효율적으로 운영하는 것이 바람직하다. 기상청에서는 황사예측을 위해 2~5일부터 중국 황사발원지에서의 황사발생과 강도를 위성사진, 지상 일기도, 황사이동예측모델의 예측자료, 언론의 보도 등을 통해 모니터링하고 기압계 흐름을 인지하여 우리나라로 이동이 확실시 되면, 우리나라 서단에 설치된 PM_{10} 과 라이더 장비를 활용하여 실시간으로 입체적 감시와 하늘상태에 대한 관측을 강화한다.

위성자료를 이용한 황사감시에는 그림 9와 같이 GOES-9과 MODIS 위성자료를 활용하고 있다. 이 그림에서 보면 GOES-9의 이미지 중 노랑색이 강한 황사지역이며, 파랑색은 상대적으로 약한 황사지역이다. 또한, MODIS 위성은 GOES-9에 비해 해상도가 매우 좋아 먼지의 발생을 자세히 관찰할 수 있는 장점이 있다.

또한, 중국지역의 황사현상의 발생과 기압계 형태를 파악하기 위해, 3시간 간격으로 관측되는 지

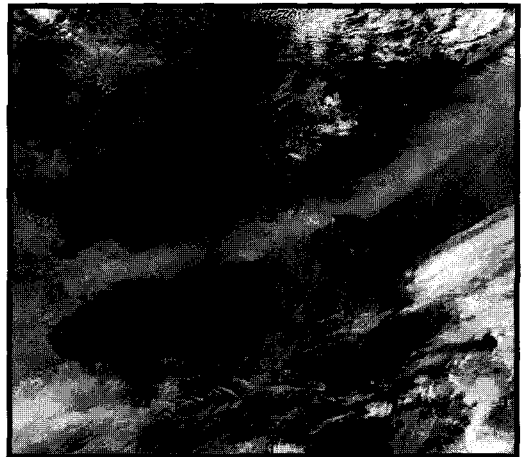
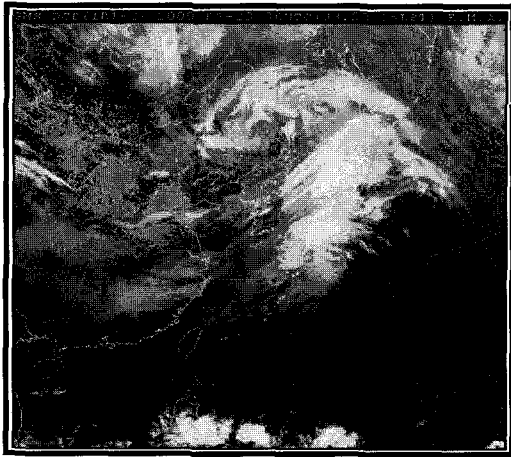


그림 9. GOES-9(좌)과 MODIS(우) 위성자료를 이용한 황사현상 모니터링

상자료를 이용해 기압계 분석과 아울러 황사현상이 관측된 지역을 함께 표기하여 우리나라로의 이동여부를 판단할 수 있도록 그림 10과 같이 지상일기도와 72시간까지의 이동경로 예측도를 활용한다.

7. 중국의 사막화와 대응

황사의 방지를 위한 노력으로 중국북부 지역의 사막화 확대를 억제하는 일이 급선무이다. 사막화

된 중국북부지역은 모래사막이 48%, 매우 작은 자갈로 이루어진 사막이 30%, 사막화된 토지가 22%이다. 중국의 사막화된 면적은 남한면적의 약 15배로 중국국토의 16% 정도를 차지하고 있다.

중국의 사막화는 1980년대부터 급속히 진행되어, 연 1,000~2,100km² 정도로 과대한 벌채로 인한 삼림파괴(32.4%), 과도한 방목(29.4%), 과도한 개간(23.3%), 수자원 개발(8.6%), 광산·공장 등의 건

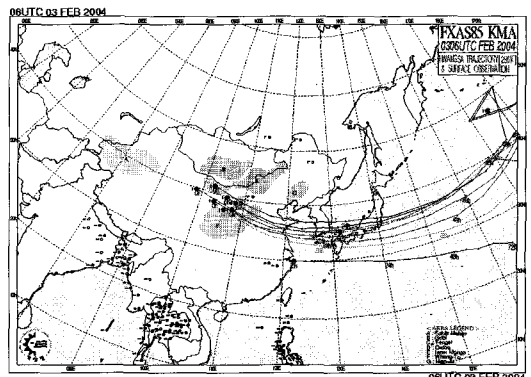
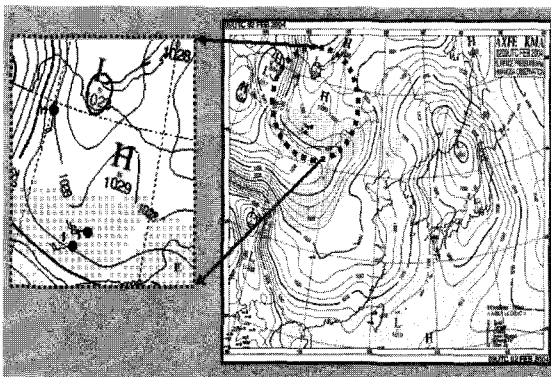


그림 10. 황사 분석용 지상일기도(좌)와 72시간까지의 이동경로 예측도(우)

설(0.8%) 등의 인위적인 원인과 바람작용으로 확대되는 것으로 조사되고 있다.

중국북부지역은 토양자체가 3~5 μ m의 작은 먼지 입자로 풍화되기 쉬운 장석으로 구성되며 탄산칼슘 등이 다량 함유된 알칼리성 토양으로 되어 있다. 또한 연간 강수량도 400mm 이하이며 특히 고비사막은 30mm 정도인 매우 건조지역이다.

중국 북부지역의 사막화 진행을 억제하기 위해 에너지 사용방법을 개선하고(벌채억제), 식생의 파괴를 감소시키고, 사막화의 확대방지로 인공방호림의 조성, 사토 경작지를 황토로 복토하는 등 토지 개량 등으로 사막화의 억제 및 감소 노력을 하고 있다. 또한, 국제적인 관심으로 특히 우리나라와 일본은 사막화 방지대책에 참여하고 황사의 국제간 공동연구체계를 유지하고 있다.

8. 향후 계획

황사예보 및 특보능력을 향상시키기 위하여 우선, 국내와 중국지역의 관측망 확충을 통한 황사발원지의 정보획득과 실시간 모니터링이 중요하다.

앞에서 언급한 바와 같이, 중국지역과 국내에 2005년까지 황사관측 장비를 확충하여 종합적인 황사입체관측망을 구축할 예정이다.

또한 황사의 발원지로부터의 이동 경로와 강도에 보를 수행하기 위해서는 현재 운영중인 황사예측용 수치모델의 정량적인 황사예보와 이동경로 예측성이 개선되어야 한다. 이를 위해, 발원지 지역의 황사의 양적 객관화를 위해 바람과 황사의 배출량관계 파악을 하려면 발원지 부근에서의 집중관측이 실시되어야 한다. 또한 황사 수치모델의 예측성 검증에 위해 필요하다. 올해, 중국에 황사관측장비가 설치되면 이를 수행할 계획이다.

아울러, 국내에서 관측되는 황사의 양적 객관화를 위하여 PM₁₀ 장비와 라이더를 이용하여 황사에 대한 객관적 기준 설정이 필요하다. 이렇게 하기 위해서는 관측자료에 대한 품질검사 기준의 설정이 필요하여 이를 올해에 개발할 예정이다. 그리고, 실시간으로 입전될 예정인 중국의 황사관측자료를 현재의 황사모니터링시스템에 추가시켜 국내외의 종합 황사모니터링시스템도 구축 운영하게 된다.