



## 황사분석 및 예측 가이드선스

■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술팀(내선 1656/1657) ■ 발행일: 2012년 3월 22일(목)

우리나라는 1년에 평균적으로 5.9회(1981~2010, 30년 평균, 봄철은 5.1회)의 황사가 나타나며, 최근 10년(2002~2011)간은 1년 평균 8.4회로 점차 황사가 증가하는 추세이다. 황사는 주로 봄철에 나타나지만, 2009년처럼 9월이나 10월에 나타난 해도 있었다. 이번 호에서는 황사의 발원부터 이동, 우리나라에 영향 미치는 과정까지 단계별 분석방법과 예측방법을 다루고자 한다.

※ 황사주의보는 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지(PM10) 농도  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때, 황사경보는 1시간 평균 미세먼지(PM10) 농도  $800\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 발표

### I. 황사의 발원

황사의 발원여부를 알기 위해서는 발원지에 위치한 관측소의 PM10 농도와 황사일기도를 확인하는 방법이 가장 우선이며, 위성의 황사탐지영상을 이용하여 황사의 발원과 범위를 확인할 수 있다. 정확한 황사 발원을 파악하기 위해서는 황사가 발생하여 이동하기 쉬운 일기 패턴을 이해하는 것도 중요하다.



그림 1. 황사 발원여부 분석에 사용하는 참고자료 (2011.4.29. 00UTC.)

그림 1의 천리안 위성의 황사영상을 보면 고비사막과 내몽골고원에 황사가 나타나고 있다. 지상관측자료와 위성영상에서 황사가 나타나면, 이 지역에 눈이 덮여 있는지 확인 할 필요가 있다. 만약, 눈이 덮여 있는 상황에서 황사가 감지됐다면, 황사가 아니거나, 먼 거리를 이동하지 않고 소멸하는 국지적인 모래폭풍일 수 있으므로 주의해야 한다. 봄철의 경우 눈이 녹고 충분히 가열작용이 있어야 지표토양이 건조해져 먼지입자가 공중으로 쉽게 부양할 수 있기 때문에 850hPa 일기도에서 발원 지역에 기온이  $0^{\circ}\text{C}$  이상인지

도 확인할 필요가 있다. 상대적으로 겨울철의 경우 발원지의 토양이 말라 있어서 0°C이하에서도 황사의 발원이 가능하다. 850hPa 기온을 활용하는 이유는 황사발원지의 해발고도가 약 850hPa 부근이어서 850hPa 이 지표부근에 해당하기 때문이다. 또한, 예측모델(ADAM2)과 위성영상의 비교 분석도 필요하다.

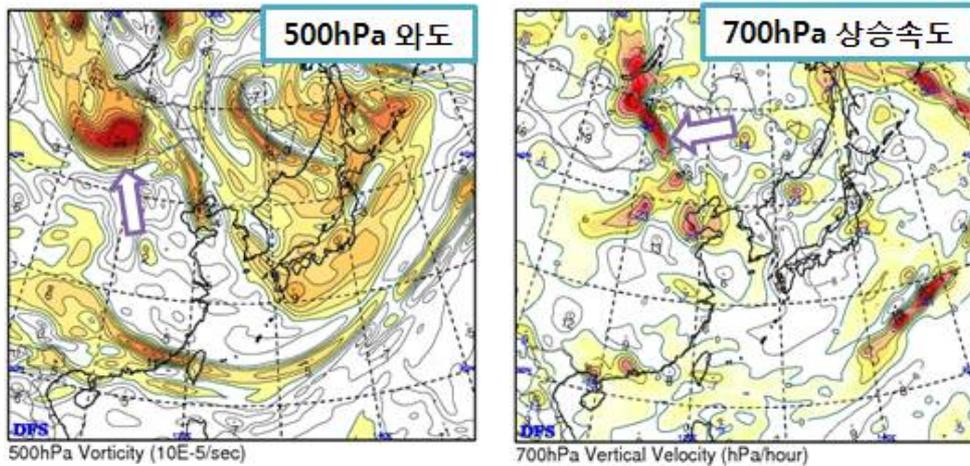


그림 2. 발원된 황사의 이동가능성 분석에 사용한 참고자료(2011. 4. 29. 00UTC).

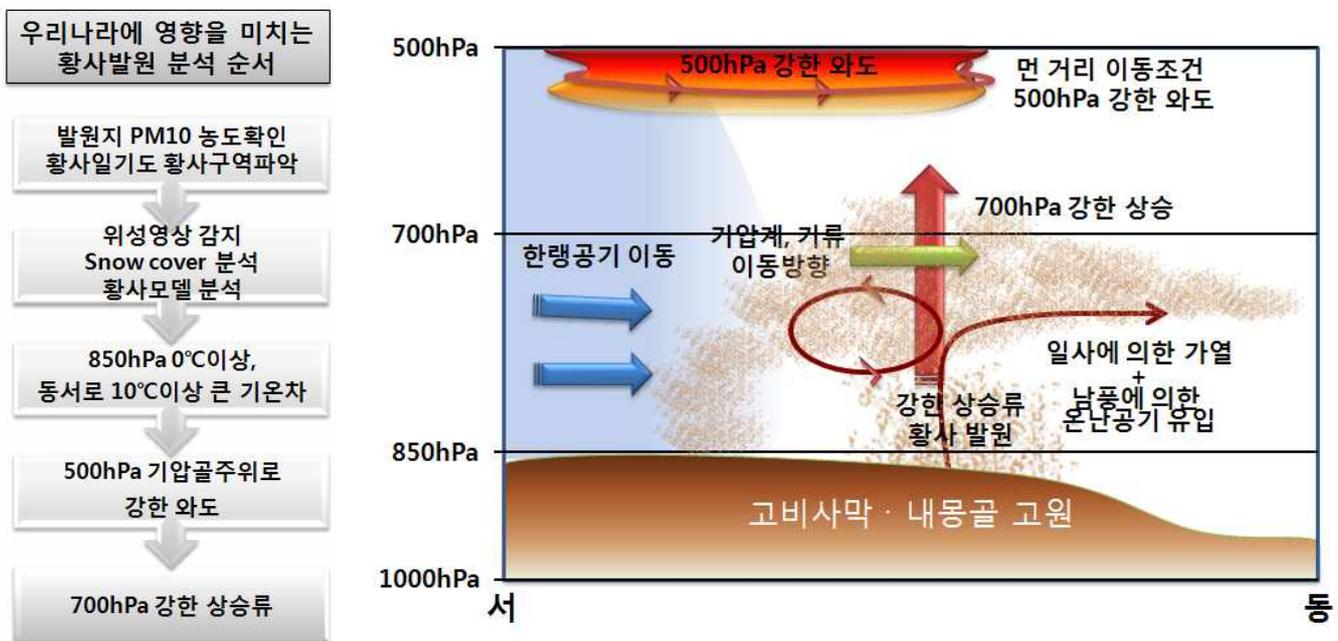


그림 3. 우리나라에 영향을 주는 황사의 발원분석 순서와 모식도

황사가 발원했다면, 이제 우리나라로 이동해 올 가능성이 있는지 검토해야 한다. 발원된 황사가 공중에 부양되어 이동하기 위해선 그림 2와 같이 중층대기(500hPa)에 깊게 발달된 기압골이나 절리저기압(cut-off Low)이 필요하다. 중층대기에 발달한 기압골은 한랭한 공기를 동반하고, 가열된 황사발원지 상공에 접근하면서 상·하층으로 잘 발달된 저기압 시스템을 만든다. 중층대기의 기압골을 중심으로 분포한 강한 와도구역은 하층의 기류를 상승시키고, 황사먼지를 공중에 부양시키는 역할을 한다. 따라서, 700hPa 고도에선 강한 상승역이 그림 2와 같이 분석된다. 그림 3은 황사발원 단계에서 우리나라에 영향을 미치는 황사 발원의 분석순서와 황사발원 모식도이다.

## II. 이동경로 추적

황사는 발달한 저기압 시스템의 강한 상승구역에 실려 이동한다. 이 때, 황사먼지의 분포 높이는 주로 850hPa 부근이며, 700hPa 높이까지도 나타난다. 부유한 황사입자는 중·하층 대기의 지향류를 따라서 동으로 혹은 북에서 남으로 이동하고, 일부는 빠르게 이동하는 한랭전선 후면의 강한 하강류에 들어 지면으로 낙하하면서 사라진다.

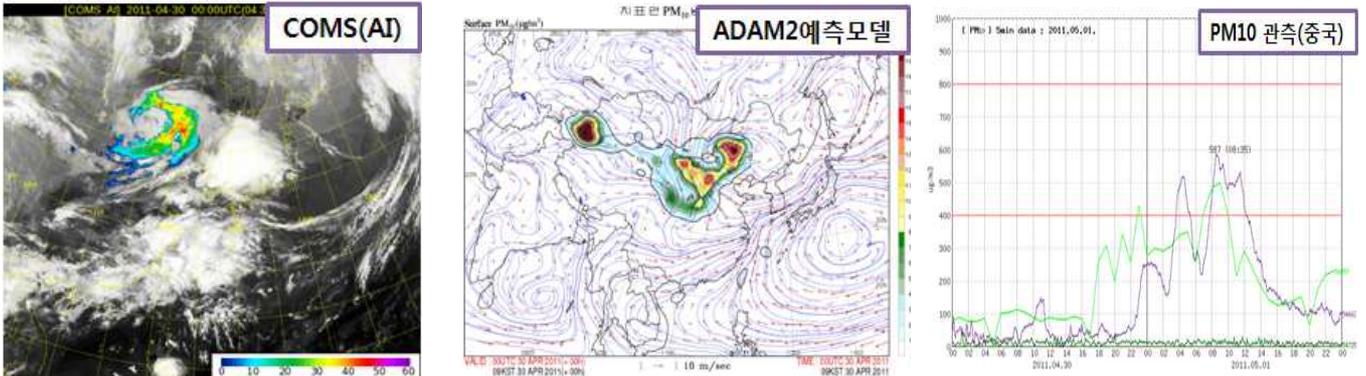


그림 4. 황사발원 후 이동경로 예측에 참고자료들. 위성영상과 850hPa 황사영상은 2011년 4월 30일 00UTC 임.

황사의 이동경로는 그림 4와 같이 위성영상과 관측자료를 이용하여 예측모델과의 비교를 통해 현재의 황사 농도와 이동경로를 예측 할 수 있다. 그렇지만, 예측모델과 현재의 황사먼지 위치가 비슷하더라도 이후 시간의 예측모델결과와 실황은 다를 수 있다. 현재 ADAM2 모델에는 습성침착과 건성침착과정이 모두 포함되어 있지만, 여전히 이동경로의 작은 변화로 복잡한 지형(고원과 평지, 초원과 사막, 해양과 육상 등)을 통과하면서 급변하는 기압계로 인해 부양된 황사농도의 변화가 발생할 수 있다. 급격하게 발달하는 저기압과 함께 황사의 이동속도보다 더 빠르게 한랭전선이 이동하면, 상승기류에 위치한 황사는 한랭전선에 위치한 발달한 비구름에 의한 습성침착으로 지면에 떨어지거나, 강한 하강기류 지역에 들어가면서 지면으로 빠르게 낙하할 수 있다. 따라서, 황사 예보 시에는 황사모델의 불확실성을 감안하여 과거와 현재 일기도 분석을 통해, 저기압과 한랭전선의 이동방향 및 속도 등 기압계의 이동과 변화를 추적하여 예상위치를 계산한 후, 모델예측결과와 비교를 통해 최종 결론에 도달해야 한다. 이 외에도 지속적으로 주변 PM10 관측 값의 감시와 위성영상과 모델예측, 관측 간의 차이를 분석해야한다.

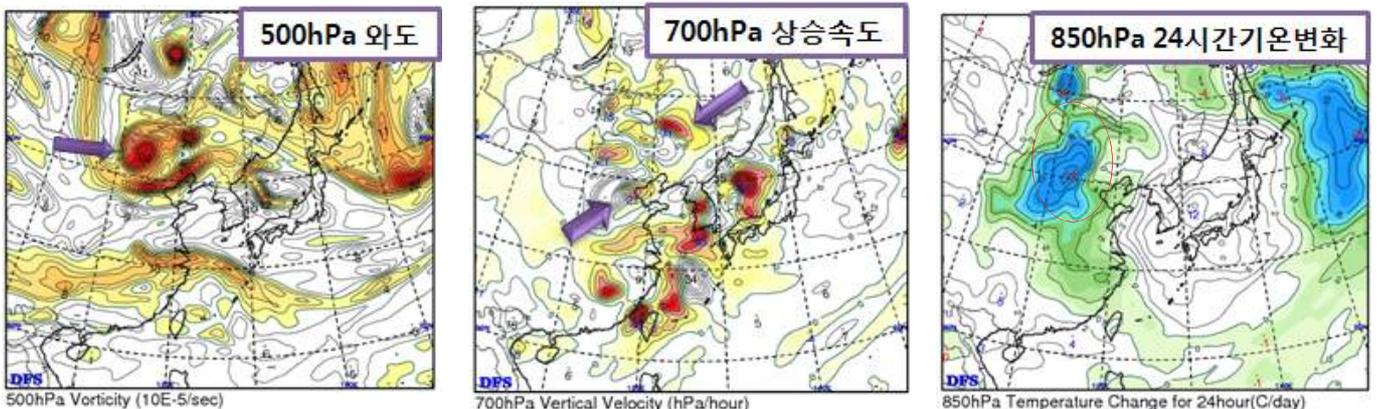


그림 5. 황사의 이동방향 분석에 사용가능한 일기도 분석자료 (2011년 4월 30일 00UTC).

우리나라로 황사가 이동하기 위해서는 발달한 저기압 내에 강한 상승류가 지속적으로 유지되어야 하므로 그림 5처럼 700hPa 상승류의 존재와 강도변화에 유의할 필요가 있다. 한랭전선이 서에서 동으로 이동함에 따라, 기온이 급격히 하강하는 지역이 나타난다. 850hPa 24시간 기온 하강 구역은 한랭전선이 통과하는 지역이므로 황사의 영향을 받기 시작하는 곳으로 판단할 수 있고, 기온 하강 구역의 중심은 하강류가 강하기 때문에 농도가 짙은 황사가 나타날 가능성이 높다. 또한, 500hPa 최대 저기압성 와도지역의 이동 방향은 황사의 이동방향과 거의 일치(이동경로의 일치가 아닌 이동방향의 일치)하므로, 그림 6과 같은 분석절차를 통해 황사의 이동경로, 도달시각, 강도 등을 파악할 수 있다.

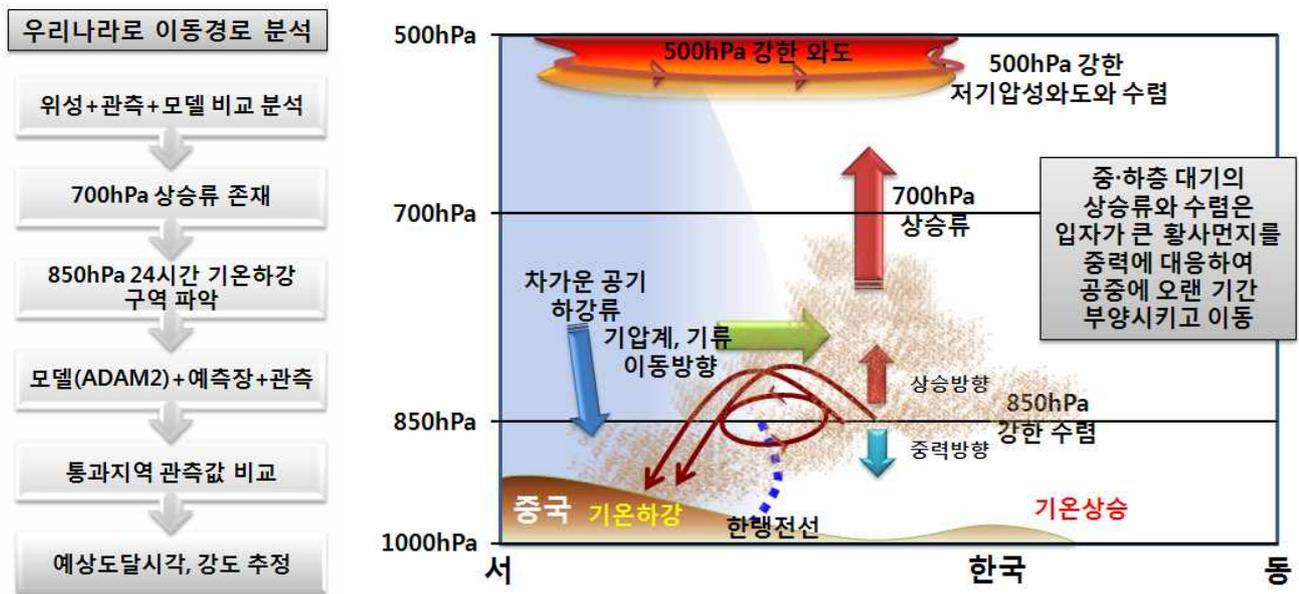


그림 6. 황사의 이동경로 예측 분석 순서와 모식도

### < 천리안 위성의 황사지수영상 >

천리안위성의 황사지수(AI: Aerosol Index)영상은 기존의 적외차(DCD: Double Channel Difference)방법에 맑은 날 적외채널의 차이를 의미하는 배경 적외차라는 개념을 도입하여, 기존 MTSAT 적외차영상이나 적외광학두께지수(IODI: Infrared Optical Depth Index) 영상의 육해상 불연속문제나 해상에서의 과소탐지 오류를 개선하였다.

$$\text{황사지수(AI)} = \text{적외차} - \text{배경적외차} = [(T_{11\mu\text{m}} - T_{12\mu\text{m}}) - (T_{11\mu\text{m}}^* - T_{12\mu\text{m}})]$$

(여기서  $T_{11\mu\text{m}}^*$ 는 10일 중 해당 관측시간의 11 $\mu\text{m}$  채널 휘도온도의 최대값으로 화소마다 별도 계산함)

그러나, 지표온도가 급격히 올라가는 경우 적외차 값이 커지면서 맑은 지역에서 황사를 표출하는 경우와 해양에서 구름과 수증기의 영향을 자주 받는 곳의 경우 배경적외차 경계값(현재 -0.5K보다 작은 경우만 배경적외차로 계산, 그 이상은 적외차만 계산함)로 인해 탐지 오차가 있으므로 주의를 요한다. 이 경우 MODIS 영상이나 MTSAT 황사영상 등 다른 황사영상을 참고하여 황사여부를 검토한다.

참고로, 천리안위성의 snow cover 영상은 2012년 2월 10일부터 COMIS-3에 표출되고 있으며, 천리안 GOCI 컬러합성 영상은 3월말부터 COMIS-3에서 볼 수 있다. MODIS 컬러합성영상은 가시채널을 사용하므로 주간에만 활용할 수 있다.

### III. 황사도달 예측

우리나라로 황사가 유입될 것으로 예상되면, 그림 7과 같이 천리안 황사영상과 500hPa 와도, 850hPa 기온변화선도 등을 이용해서 황사의 중심 이동경로를 파악한다.

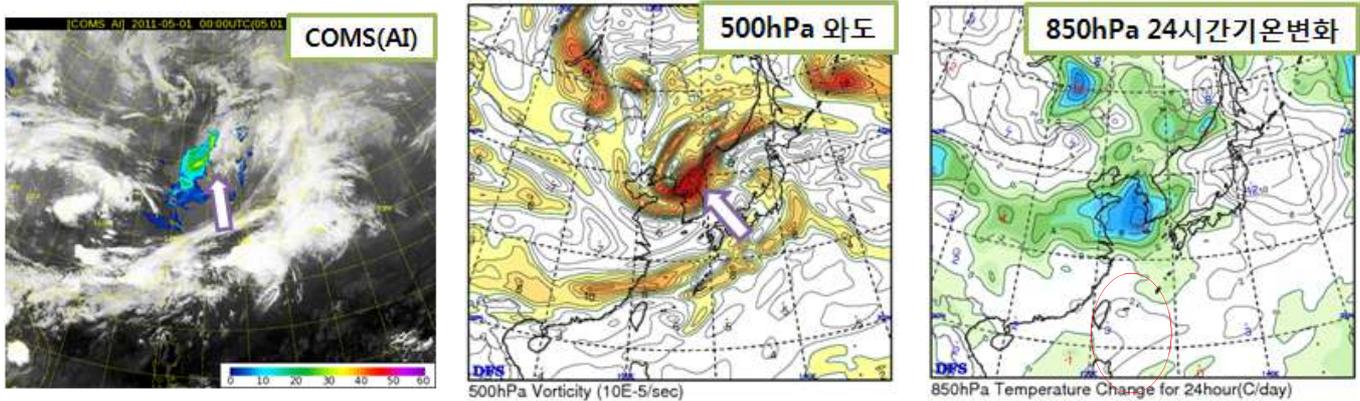


그림 7. 우리나라에 황사 도달 예측에 참고자료(2011. 5. 1. 00UTC)

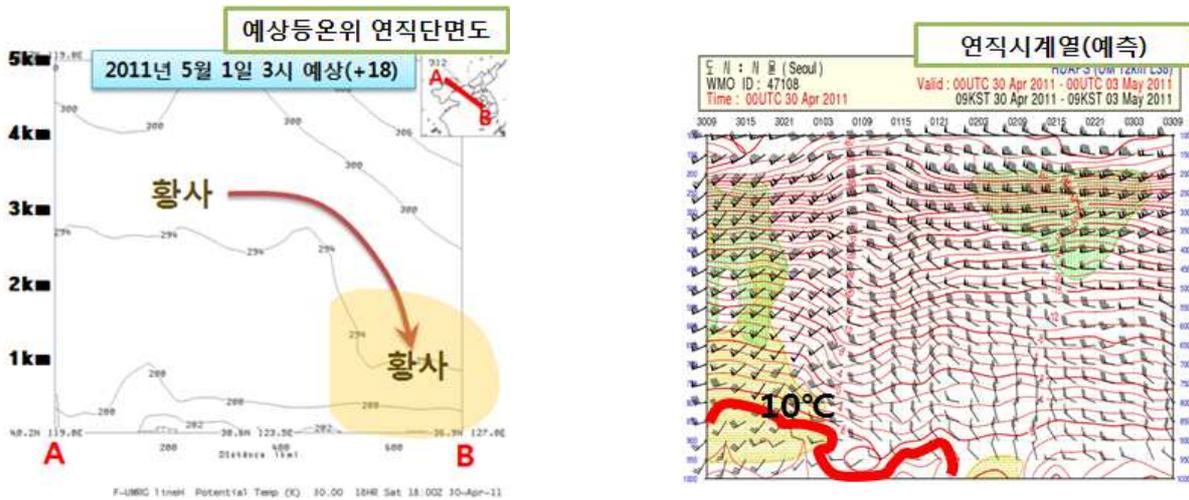


그림 8. 황사 도달 시각 예측에 참고가능한 자료(2011. 4. 30. 00UTC, UM-RDAPS 예측장)

우리나라 서쪽에 위치하는 중국의 PM10 관측값이 기상청의 황사 특보기준을 넘은 경우 황사 특보 발표여부를 고려해야한다. 특보발효 시간은 그림 8과 같이 연직 등온위 분포를 이용하여 갑자기 등온위 고도가 낮아지는 시점을 참고할 수 있다. 등온위 고도면은 기류의 이동방향과 동일하게 설정한다. 연직시계열 예상에서 북서기류와 함께 기온이 850hPa 이하 층에서 급격히 하강하는 시점도 특보 발효시점으로 참고할 수 있다.

황사의 농도는 낮과 밤이 다르다. 만약, 낮 시간에 최대 황사구역이 우리나라로 들어온다면 예상보다 황사 농도가 약할 수 있다. 낮에는 일사에 의한 가열로, 지표부근 대기에 상승기류가 있어 황사먼지의 지표 하강을 막을 수 있기 때문이다. 반면에, 야간은 지표냉각으로 하강기류가 강해져 예상보다 농도가 짙은 황사가 나타날 수 있다. 따라서, 황사 예보시에는 낮과 밤에 따른 차이를 고려해야한다. 황사의 종료시점은 850hPa 기온이 상승하거나, 500hPa 저기압성 와도지역에서 벗어나는 시점을 참고할 수 있으며, 지상 PM10 관측값도 참고할 수 있다. 그림 9는 황사 예측과 정보발표를 위한 분석 순서와 모식도를 요약한 것이다.

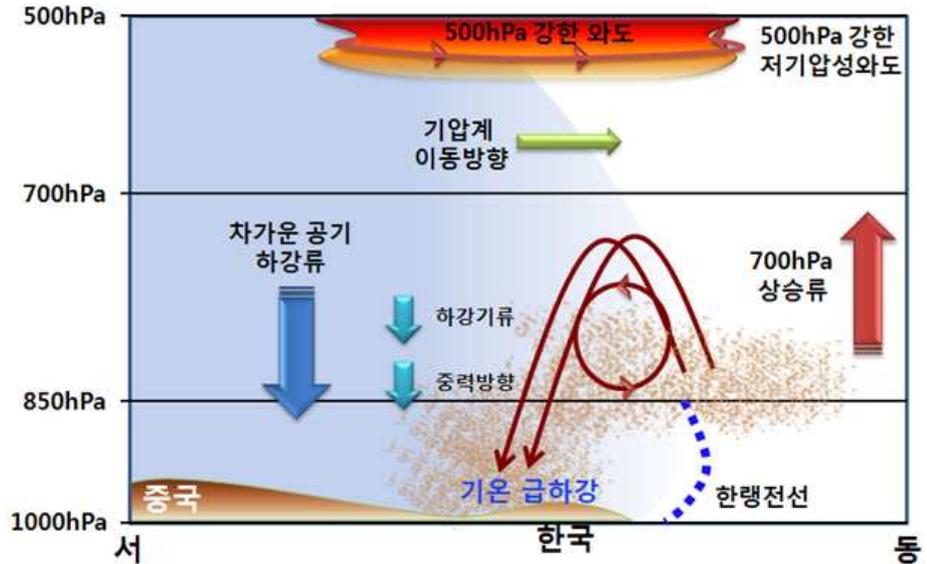
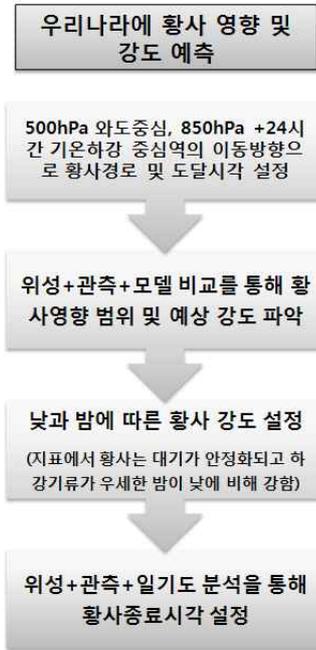
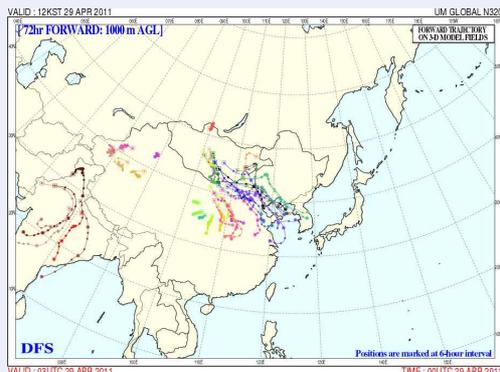


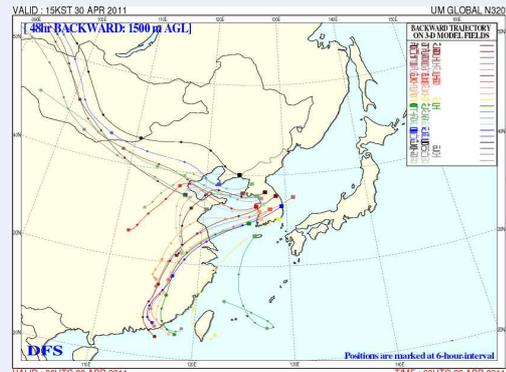
그림 9. 우리나라에 황사 영향 및 강도 예측 분석을 위한 순서 요약과 모식도

### < 황사 전방추적도와 후방추적도 >

전방추적도를 활용하면 황사 발원지에서 발원한 황사가 우리나라로 오는지 여부와 시점을 알 수 있다. 반면에, 후방추적도의 경우 우리나라로 향하는 기류의 기원을 알아 낼 수 있는 장점이 있다. 전방추적도는 매시간 GTS 전문에 있는 황사관측지점의 향후 72시간동안 6시간 간격의 공기 궤적을 수치모델을 이용하여 예측한다. 고도는 1, 3, 5km로 나누어 계산한다. 후방추적도는 국내 15개, 북한 1개, 중국 4개 지점의 후방 48시간의 역궤적을 그린 것으로 100m, 1.5km, 3km, 5km의 4개의 고도로 나누어 예측한다.



2011.4.29 00UTC의 전방추적도(48~72시간 후에 몽골 및 황해중상류 건조지역의 황사가 우리나라로 이동할 수 있음)



2011. 4. 29. 00 UTC에 예측한 4. 30. 06 UTC의 후방추적도 (중부지방은 4월 29일에 발원한 황사의 영향을 받을 수 있음)

### <참고문헌>

기상청, 2011: 위성을 이용한 황사분석, 천리안위성 기상산출물 활용 가이드. 국가위성센터 위성분석팀.  
 기상청, 2011: 황사(土雨, 흄비) 안내 소책자. 국립기상연구소.  
 기상청, 2012: 2012년도 황사예보 가이드언스. 국립기상연구소 황사연구과(예보국 지경노 발표과제, 2012. 3. 5.)  
 기상청, 2012: 황사해외모니터(아르고스). 국립기상연구소 황사연구과  
 정관영, 박순웅, 1995: 한반도로 수송되는 황사의 종관적 특징. *한국기상학회지*, 31(1), 45-63.  
 Chun, Y., H.-K. Cho, H.-S. Chung, and M. Lee, 2008: Historical records of Asian dust (Hwangsang) in Korea. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 823-827.  
 Kim, S.-B., K. Yumimoto, I. Uno, and Y. Chun, 2011: Dust model Intercomparison between ADAM and CFORS/Dust for Asian dust case in 2007 (March 28 - April 3) *SOLA*, 7A, 25-28.  
 Park, S.-U., A. Choe, E.-H. Lee, M.-S. Park, and X. Song, 2010: The Asian dust aerosol model 2 (ADAM2) with the use of normalized difference vegetation index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data. *Theor. Appl. Climatol.*, 101, 1-2, 191-208.  
 Park, S.-U., and E.-H. Lee, 2004: Parameterization of Asian dust(Hwangsang) particle-size distributions for use in dust emission models. *Atmos. Environ.*, 38, 2155-2162.

## 기초탄탄 - 황사란?

### 1. 황사의 정의

- 황사는 아시아대륙의 중국과 몽골의 사막지대, 황하중류의 건조지대, 황토고원, 내몽골고원에 한기를 동반한 저기압이 통과할 때 강한 바람이나 지형에 의해 만들어진 난류로 인하여 다량의 모래먼지가 상층으로 올라가 공중에 떠 있거나 이동하여 지표로 서서히 낙하 하는 현상을 말한다. 우리나라에서는 예로부터 황사를 ‘흙이 비처럼 떨어진다’하여 ‘토우(土雨)’라 하였으며, 국립국어연구원의 우리말사전(1999)에도 ‘흙비’를 ‘바람에 높이 날려 비처럼 떨어지는 모래흙’으로 정의한다.

### 2. 황사 발원지

- 그림 10과 같이 우리나라에 영향을 주는 황사 발원지의 넓이는 사막이 48만km<sup>2</sup>, 황토고원이 30만km<sup>2</sup>에 인근 모래땅까지 합하면 한반도 면적의 약 4배나 된다.
- 특히, 한반도에서 가까운 내몽골고원과 중국북동부(만주)지역에서 발원한 황사는 우리나라로 가장 빨리 이동하여 영향을 줄 수 있다.



그림 10. 우리나라에 영향을 준 황사 발원지

### 3. 황사 관측

- 국내 - 기상청은 황사의 지상농도를 관측하는 부유분진측정기(PM10) 관측소 28개소와 연직분포를 측정하는 라이다 4개소(백령도, 문산, 강화, 군산), 황사와 연무관측을 위한 황사·연무 입자계수기 8개소(백령도, 문산, 서울, 철원, 군산, 흑산도, 광주, 대구)의 관측망을 운영하고 있다.

종 류	특 징
부유분진측정기 (PM10)	· 탄소동위원소 c-14에서 방출되는 베타선을 이용하여 대기 중에 부유하는 입자 중 직경 10 $\mu$ m 이하인 입자의 농도( $\mu$ g/m <sup>3</sup> )를 연속적으로 측정
라이다 (LIDAR)	· 대기 중으로 일정한 파장의 레이저를 발사하고 대기 중 에어러솔 등에 의해 후방 산란되는 빛을 측정하여 에어러솔의 연직분포를 연속적으로 분석할 수 있는 원격탐측 기기 · 황사의 이동 고도 및 황사 층의 두께를 측정
황사·연무 입자계수기	· 직경 10 $\mu$ m, 2.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m 이하 에어러솔의 농도를 동시에 연속적으로 측정 · 황사의 경우 직경 2.5 $\mu$ m 이상의 에어러솔이 증가하는 특성을 이용하여 황사를 탐지함으로써 기존 PM10 관측장비의 문제점을 보완

- 국외 - 몽골 및 중국의 황사관측망으로서, 한·중 공동 황사관측소는 2005년 5개소(주리허, 유스, 후이민, 퉁랴오, 다렌), 2007년 5개소(얼렌하오터, 츠핑, 시핑, 단둥, 칭다오)를, 2007년부터 중국기상청의 황사측정 자료 5개소(하미, 둔황, 동성, 옌안, 우라터중치)를 활용하고 있으며, 황사감시기상탑 3개소(에르덴, 놉곤, 나이만(중국))를 설치하여 운영 중이다.

표 1 황사입자계수기를 이용한 황사와 연무 구분방법

황사	연무
PM2.5/PM10 $\leq$ 40%	PM2.5/PM10 $\geq$ 80%