



황사예측 가이드언스 & 사례분석

■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술팀(내선 1656/1657) ■ 발행일: 2013년 3월 29일(금)

이번 호에서는 황사 분석과 예보시 숙지해야 할 사항들을 소개하고, 예측에서 벗어났던 사례의 원인 분석을 통해 보다 합리적인 황사 예보방법을 제시하고자 한다. 아울러 2012년 3월에 발간한 '황사분석 및 예측 가이드언스'에서 제시한 상황별 분석자료를 먼저 참고하길 권한다.

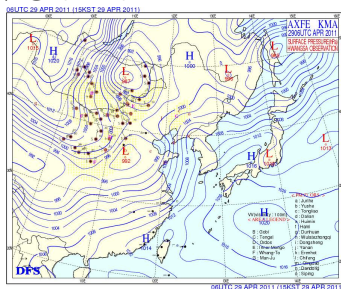
예보관은 각종 황사 관측자료와 위성영상, 예측모델 간의 비교·분석을 통해 황사가 언제, 어디서부터 얼마의 농도로 몇 시간 지속될지 등 황사 예보에 필요한 사항들을 판단해야 한다. 우리나라에 나타나는 강한 황사는 저기압에 동반된 강풍역과 상승기류에 의해 부양된 황사입자들이 저기압(기압골) 통과 후 하강기류에 의해 낙하하면서 발생하는 경우가 대부분이다.

1. 필수 점검 요소

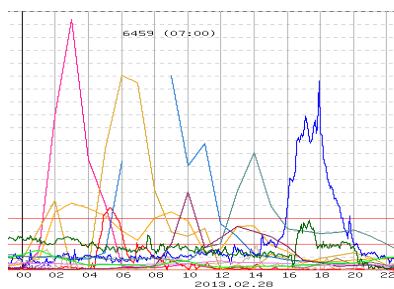
1.1 발원

- ① 황사의 발생범위와 강도는 지상관측(황사현상관측)을 기초로, 황사발원지의 미세먼지(PM10) 관측농도와 지속시간, 지면상태(눈덮임, 강수유무, 기온 등), 각종 위성 분석영상을 종합적으로 분석하여 추정(그림 1)
 - COMS : 에어로솔탐지(AI), GOCI RGB 합성영상
 - MTSAT : 적외광학두께지수(IODI), 에어로솔광학두께(AOD)
 - Aqua/Terra : RGB 합성영상

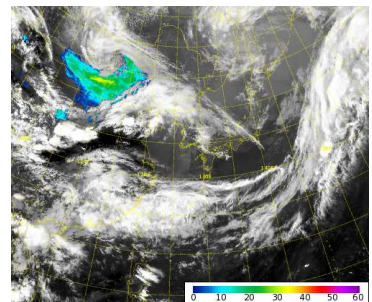
(a) 황사 일기도



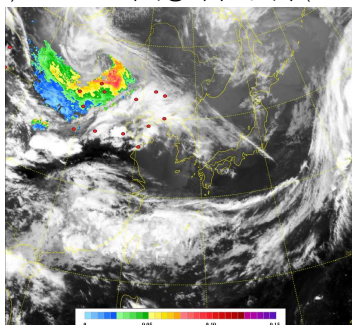
(b) 황사 발원지 미세먼지(PM10) 농도



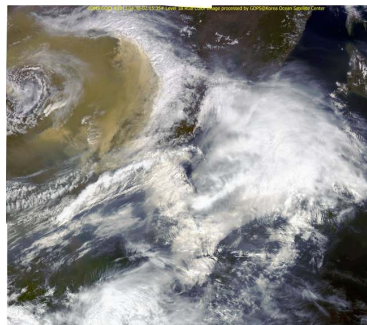
(c) COMS 에어로솔탐지(AI)



(d) MTSAT 적외광학두께지수(IODI)



(e) GOCI RGB 합성영상



(f) MODIS RGB 합성영상

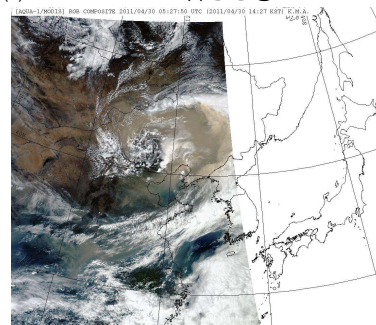


그림 1. 황사 발원시 참고자료들

- ② 황사 발원지의 해발고도는 대부분 1~1.5km로, 황사가 발원하기 좋은 지면 조건(온난건조)이 유지되기 위해서는 가급적 850hPa 이하 고도의 기온이 0℃보다 높아야 하며, 발달하는 저기압 전면(동쪽사면)으로 등온선이 북상하는 형태(warm ridge)를 보여야 함
- ③ 지상에서 관측된 황사가 예측모델에서도 모의되고 있으면 신뢰도가 높음
- ※ 황사의 주요 이동고도가 대류권 하층(3km 이하)이므로, 야간 복사냉각으로 인해 지표와 황사입자 간의 온도차가 줄어들 경우, 적외차 영상에서 농도가 과소표출될 가능성이 높음에 유의

1.2 이동

- ① 황사입자를 부양·이동시키기 위해서는 강한 상승기류가 필요하며, 500hPa에서 V형의 발달한 기압골(양의 와도)이나 절리저기압이 지상 저기압과 상승기류 발달에 중요한 역할을 함
- ② 황사입자는 발달한 저기압을 따라 이동하는 특징이 있으며, 500hPa 최대 양의 와도지역과 고도하강 구역, 700hPa 최대 상승구역, 850hPa 24시간 최대 기온하강구역(한랭전선 후면 하강기류역을 잘 모의)을 통해 황사의 이동경향을 판단할 수 있음

1.3 영향

1.3.1 저기압 중심과 한랭전선 위치

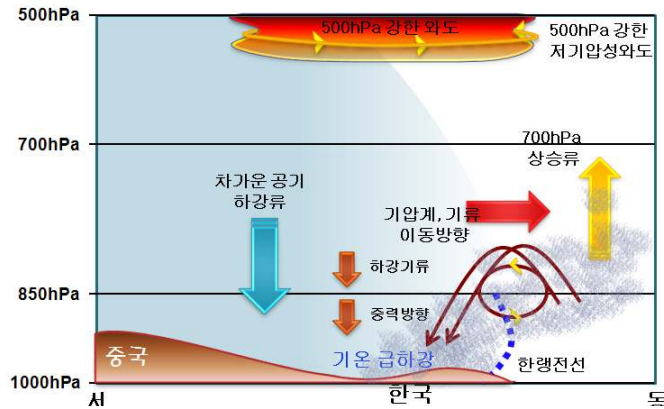
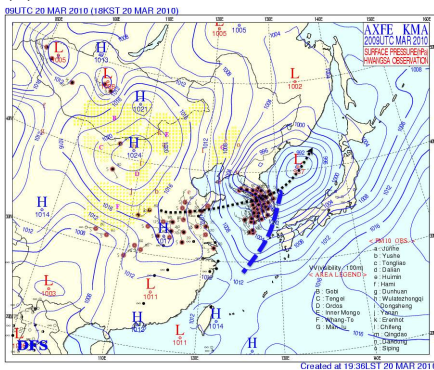
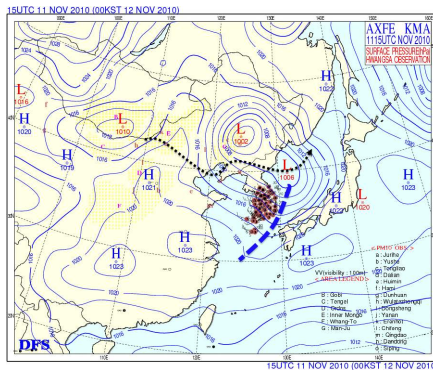


그림 2. 저기압과 함께 동쪽으로 이동 중인 황사입자와 하강기류에 의해 우리나라에서 발생하는 황사 모식도

(a) 2010년 3월 20일 18시



(b) 2010년 11월 12일 00시



(c) 2011년 5월 1일 12시

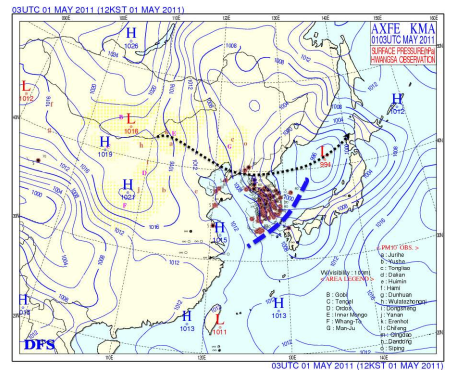


그림 3. 황사경보 기준에 도달했던 대표적인 3개 사례에 대한 지상일기도(검은색 점선: 저기압 중심의 이동경로, 파란색 파선: 한랭전선)

- ① 강한 황사는 발달한 지상저기압에 동반된 한랭전선이 통과하고 몇 시간이 지난 후 하강기류가 강해질 때 나타남(그림 3)
- ② 우리나라에서 주의보 수준 이상의 황사농도를 보였던 대부분의 사례들의 경우 지상 저기압의 중심이 북한을 통과하고 우리나라가 한랭전선의 영향을 받을 때 나타났음
- ③ 일반적으로 우리나라에서는 중국에서 측정된 미세먼지(PM10) 농도의 최대값을 넘기 어려움

1.3.2 실험감시와 특보운영

- ① 황사입자는 강수와 달리 지상으로 낙하하지 않고 상층 대기로 통과하는 경우가 있으며, 연무와 혼재돼 나타나는 경우가 많아 목측(주관적/정성적 관측)만으로는 구분이 어려움
- ② 실험감시의 경우 미세먼지(PM10) 시간평균자료를 활용하되, 지점별/계절별로 마련되어 있는 기준 농도를 바탕으로 특보를 운영
- ③ 황사입자계수기와 다채널(APS, 공기역학입자계수기) 관측자료를 바탕으로 입자크기 간의 비율을 통해 황사(PM2.5/PM10≤40%)와 연무(PM2.5/PM10≥80%)를 구분(그림 4)

(a-1) 황사

: 주로 3~4 μ m의 입자크기를 가지며 자연기원의 토양성분이 많음

(b-1) 연무

: 주로 1 μ m 이하의 미세한 크기이며 인위적 오염물질 성분이 많음

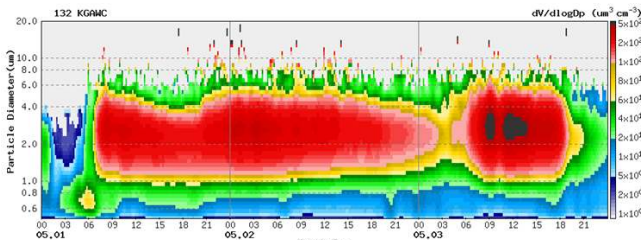
(a-2) 황사입자계수기(종합기상정보시스템→황사→황사연구과)



(b-2) 황사입자계수기



(a-3) 다채널(종합기상정보시스템→황사→다채널)



(b-3) 다채널

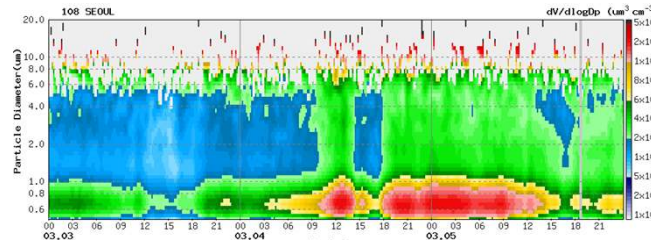


그림 4. 황사와 연무의 구분

- ④ 미세먼지(PM10)의 농도는 중규모 시스템의 지배를 받지만, 지표면 일사량 변화에 따른 일변화(diurnal cycle)도 존재하며, 일반적으로 일사에 의해 혼합층이 깊어지는 낮보다는 대기가 안정화되는 밤에 높아지는 특징이 있음(그림 5)
- ⑤ 최근 5년간 우리나라에서 발생한 황사주의보(400 μ g/ m^3 이상)에 도달한 사례를 대상으로 매 시각 관측된 미세먼지(PM10) 농도(그림 6)를 보면, 주로 밤에 짙은 농도의 황사가 발생하며(최대 발생시각 22시), 이른 아침과 낮에는 상대적으로 약함(최소 발생시각 07시)
- ⑥ 특히 황사경보(800 μ g/ m^3 이상)에 도달한 사례는 밤이 낮에 비해 3배 이상 많아, 야간에 황사가 유입될 것으로 예상될 때는 예측보다 더 짙은 황사가 나타날 수 있음에 유의

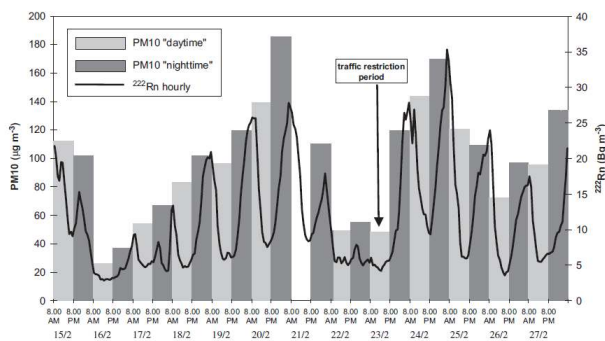


그림 5. 2003년 2/15 ~ 27 이탈리아 Milan에서 관측한 PM10 농도의 일변화. 밝은 회색은 낮시간, 어두운 회색은 밤시간 관측 값을 의미(Vecchi et al. 2007)

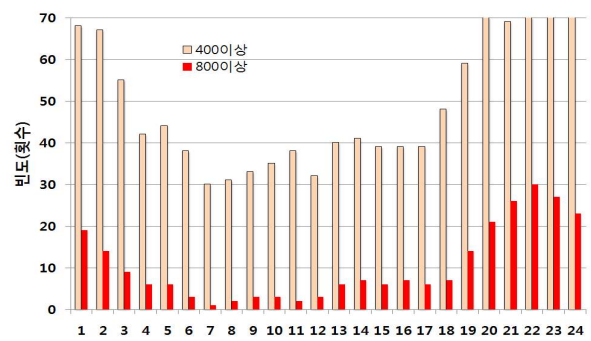


그림 6. 최근 5년(2008~2012)간 29개 황사 관측지점에서 발생한 황사특보 도달사례(총 34일)의 시간대별 발생빈도 그래프 (붉은색은 800 μ g/ m^3 이상 사례)

2. 황사사례분석

2.1 황사에보 없이 관측된 사례 - 겨울철 황사 2010. 1. 25.

(a) 2010년 1월 24일 15시

(b) 2010년 1월 24일 21시

(c) 2010년 1월 25일 04시

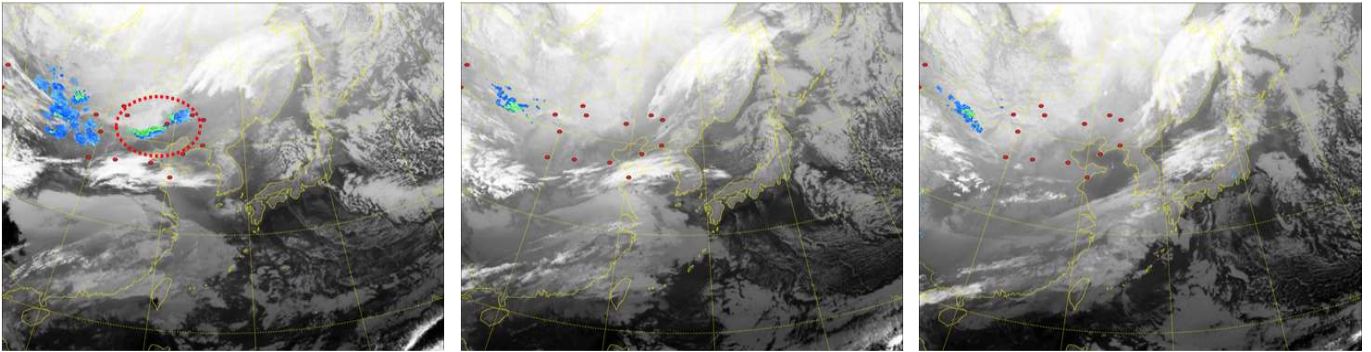


그림 7. 2010년 1월 24~25일 MTSAT-1R 황사영상

2010년 1월 24일 새벽에서 오전 사이 내몽골고원에 위치한 주리허에서 $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 미세먼지(PM10) 농도가 관측되었으나, 위성영상(그림 7)에서 황사역과 강도가 점차 약화되고, 예측모델에서도 황사가 중국내륙에서 모두 침착될 것으로 예상되어 24일 예보에서 25일 우리나라 황사 가능성을 예보하지 않았다. 그러나 그림 8~10과 같이 25일 새벽에 백령도를 시작으로 황사가 관측되기 시작하여 25일 오후에 고산에서 황사관측이 종료(서울, 최대 시간평균 PM10 농도, $319\mu\text{g}/\text{m}^3$)될 때 까지 서쪽지역을 중심으로 황사가 관측되었다.

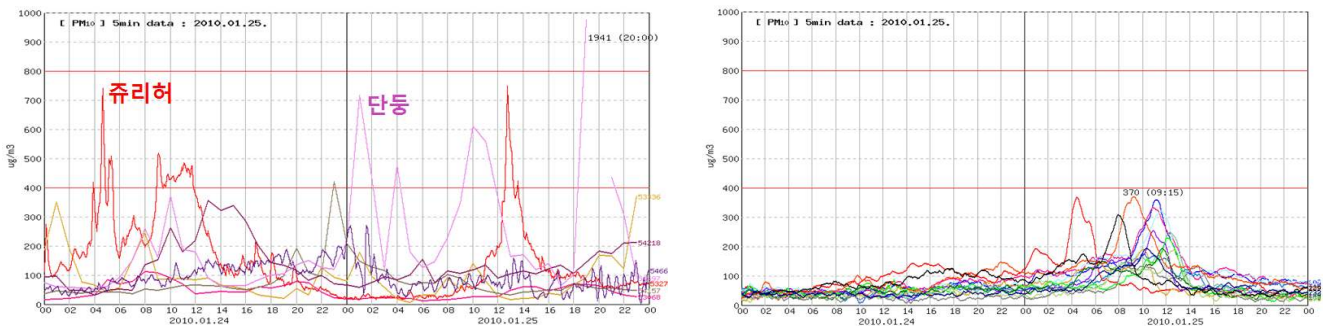


그림 8. 2010년 1월 24~25일 중국 관측망(좌)과 우리나라에서 관측된(우) PM10 농도

주리허에서 황사가 관측된 시각의 보조분석도(그림 11)에서 24일 09시에 발달하는 500hPa의 상층기압골이 몽골서쪽에 위치하고 그 동쪽으로 700hPa에 강한 상승구역이 남북으로 넓게 분포하고 있다. 우리나라에 황사가 관측되기 시작한 2010년 1월 25일 09시에는 500hPa의 상층기압골이 발달하면서 남동진하여 고도하강역이 연해주, 북한과 서해상에 넓게 위치하고 있다.

또한, 같은시각 850hPa 기온하강역도 500hPa 고도하강역과 비슷한 분포를 보여 발원한 황사가 우리나라에 상공으로 유입되었음을 알 수 있고, 한랭전선 통과 후 하강기류에 의해 황사입자가 지상으로 낙하하면서 황사가 관측되었다.



그림 9. 황사 관측망

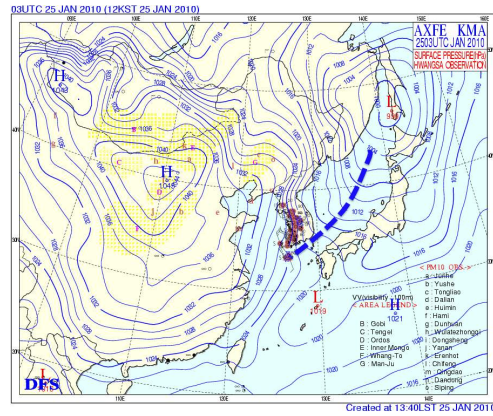
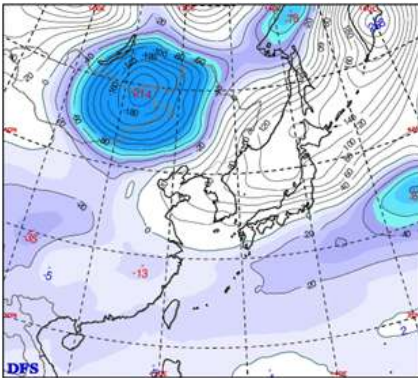
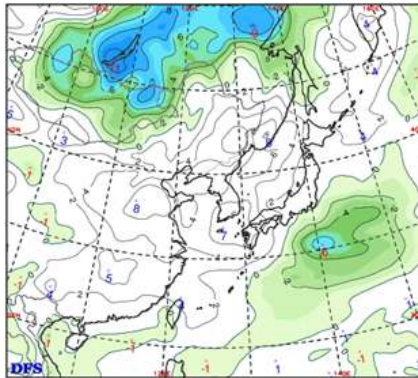


그림 10. 2010년 1월 25일 12시 지상(황사)일기도

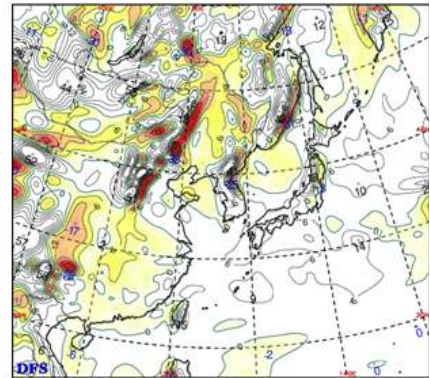
(a) 2010년 1월 24일 09시



500hPa 24시간 고도변화

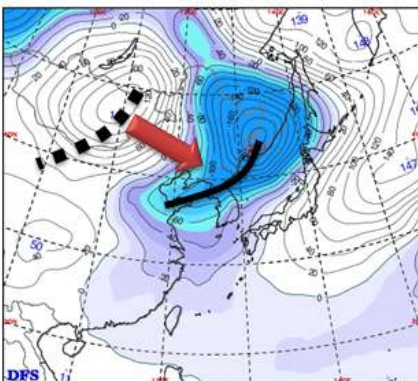


850hPa 24시간 기온변화

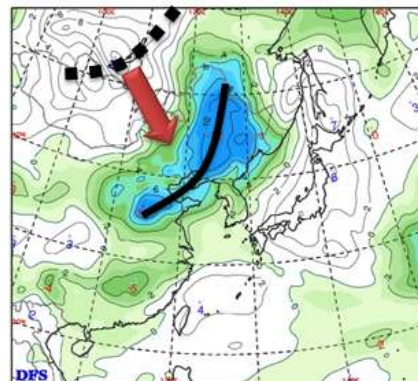


700hPa 상승속도

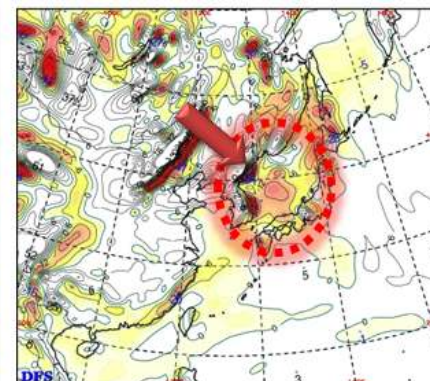
(b) 2010년 1월 25일 09시



500hPa 24시간 고도변화



850hPa 24시간 기온변화



700hPa 상승속도

그림 11. 2010년 1월 24일 09시와 하루 뒤인 25일 09시의 보조선도 변화

< 시사점 및 요약 >

- ① 황사일기도와 미세먼지(PM10) 농도 등 지상관측에서 1개 지점이라도 황사가 관측되었다면 우리나라에 황사가 유입될 가능성에 대한 충분한 검토가 필요함
- ② 황사먼지 입자의 이동고도가 하층대기에 위치하므로 야간에 지표가 냉각되거나 중상층운이 덮일 경우 적외차 위성영상에서 황사 시그널이 사라지는 것으로 잘못 해석될 수 있음
- ③ 황사발원지에 눈이 덮여 있지 않으면서 습기가 없는 마른 지표에서는 영하의 온도에서도 황사가 발원할 수 있음

2.2 황사 예보를 했지만 관측이 안 된 사례

a) 발원지 황사가 하강기류만으로 한반도까지 이동하기 힘든 사례 - 2012. 3. 25.

(a) 2012년 3월 24일 09시생산된 15시 예측장 (b) 2012년 3월 24일 15시 위성영상 (c) 2012년 3월 24일 09시 850hPa 일기도

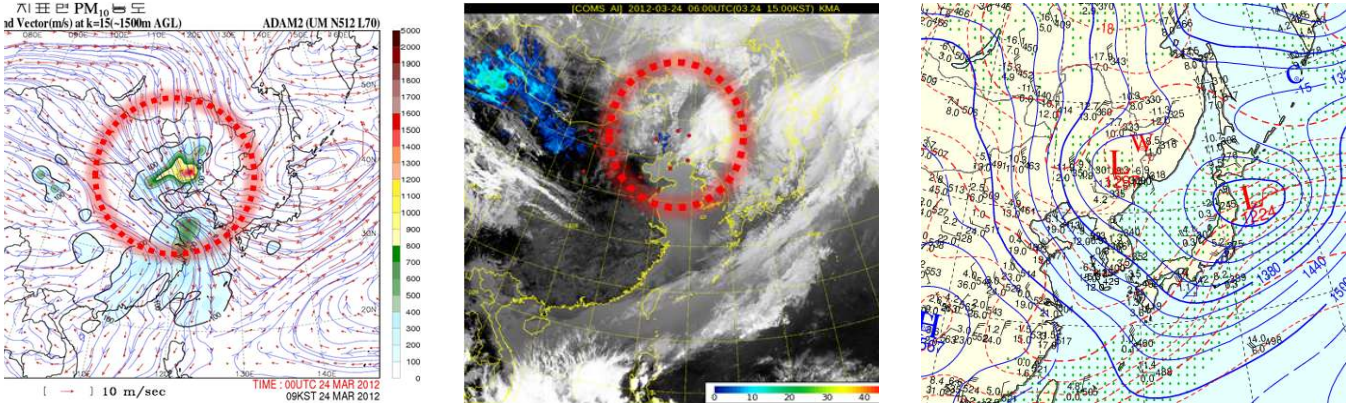


그림 12. 2012년 3월 24일 15시 기준의 예측모델, 위성영상(COMS)과 일기도

2012년 3월 24일 14시에 통라오에서 $541\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 미세먼지(PM10) 농도가 관측되었다. 또한 예측모델(그림 12(a))과 위성영상(그림 12(b))에서도 북중국 일대에 황사 발원이 모의 및 탐지되었고, 대기 하층으로 북서기류가 형성되어 서해상을 따라 우리나라로 황사가 유입될 것으로 예상되었다. 따라서 25일 05시 예보에서 서해안 일부지역에 황사가 나타날 가능성을 언급하였으나 상황에서 황사가 관측되지 않았다.

2012년 3월 24일 09시 일기도(그림 12(c))에서 연해주 부근에 저기압이 위치하여 통라오에 황사가 발원할 수 있는 환경이 조성되어 있고, 미세먼지(PM10) 수치가 $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 유지되어 통라오에서 황사가 발원하였음을 알 수 있다. 그러나 우리나라 부근에 강한 북서기류가 형성되어 있고, 발원한 황사의 농도와 지속시간이 짧아 하강기류만으로 원래 농도의 황사가 우리나라까지 수송되기에는 어려운 조건이다.

그러나 2012년 3월 25일 황사입자계수기농도 분포(그림 13)에서 미세먼지(PM10) 수치가 높지 않으나 황사농도가 일시적으로 높아진 구간이 존재하고, 황사입자계수기농도 비율이 40%이하로 나타나 관측지점별 황사관측기준치에는 미달하지만 옅은 황사가 우리나라에 영향을 준 것으로 판별할 수 있다.

(a) 2012년 3월 24~25일 중국과 국내 PM10 농도 (b) 2012년 3월 24~26일 황사입자계수기농도 (c) 2012년 3월 24~26일 황사입자계수기농도 비율

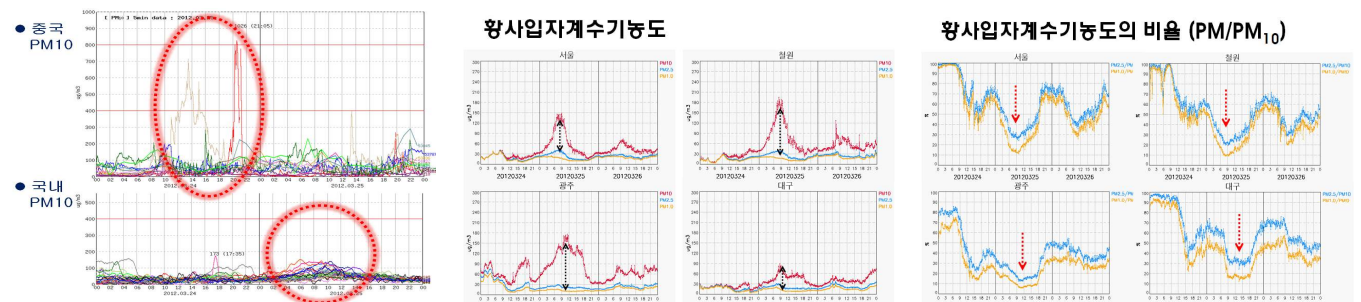


그림 13. 사례기간 동안 (a) 중국과 국내 PM10 농도, (b) 황사입자계수기농도, (c) 황사입자계수기농도의 비율(PM2.5/PM10)

< 시사점 및 요약 >

- ① 중국북부에서 황사가 발원할 경우 이동거리가 짧아 빠른시간내에 우리나라로 수송되어 직접적인 영향을 줄 가능성이 크므로 판단에 신중을 기하여야 함
- ② 발원한 황사가 우리나라로 이동하기 위해서는 하층기류의 특성을 잘 파악해야하는데 기류가 빠르고 강한 경우 지상으로 침착되어 떨어지는 것보다 상층으로 빠르게 이동하면서 확산될 가능성에 유의
- ③ 현재 황사관측기준은 관측자의 목측을 기본으로 하고 있으며, 각 지점별 미세먼지(PM10) 통계값('05~'12, 관측정책과)을 황사관측의 참고자료로 활용하고 있음

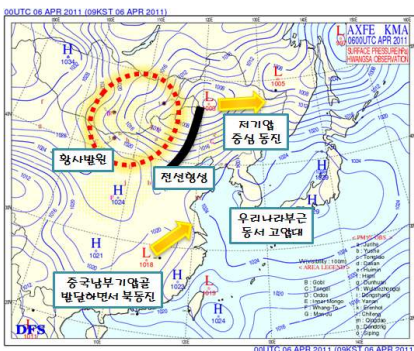
b) 황사 이동경로가 북편하여 황사가 관측되지 않은 사례 - 2011. 4. 8.

2011년 4월 5~6일에 고비사막과 내몽골고원에서 황사가 발원(그림 14(a))하였고, 8일 중부지방을 중심으로 열린 황사가 나타날 가능성을 예보하였다.

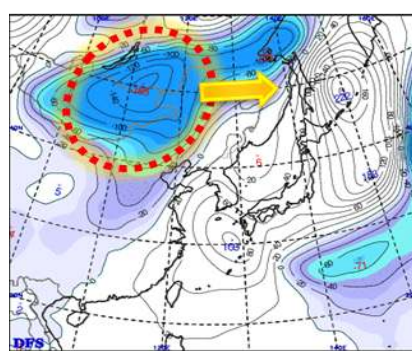
500hPa 고도장(그림 14(b))을 보면, 황사일기도에 나타난 지상저기압의 서쪽에 큰 폭으로 고도하강역이 존재하고 있어 상층기압골에 의해 지상저기압이 발달하면서 황사입자가 장거리 수송될 수 있는 충분한 조건을 갖추고 있다.

그러나 이 저기압은 우리나라쪽으로 남하하지 않고 동진하면서 실황에서 우리나라에 황사가 관측되지 않았다. 그 원인으로서는 8일 황사일기도(그림 14(c))에서 중국남부에서 기압골이 발달하여 북쪽기압골이 남하하지 못하고 연해주 부근을 통과하였다. 황사역도 저기압 이동경로를 따라 중국 북동지역을 통과하여 우리나라에서 황사가 관측되지 않은 것으로 판단된다.

(a) 황사일기도(6일 09시)



(b) 500hPa 24시간 고도변화(6일 09시)



(c) 황사일기도(8일 09시)

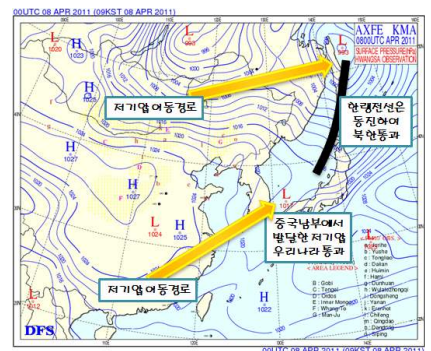


그림 14. 황사가 발원한 2011년 4월 6일 9시 일기도(a~b)와 2일 후인 8일 9시 일기도(c).

< 시사점 및 요약 >

발원지에서 황사가 발원하여 우리나라로 충분히 수송될 수 있는 환경을 갖춘 것으로 예측되더라도, 시간의 흐름에 따라 주변 기압계와의 상호작용에 의해 저기압의 이동과 황사수송경로의 변동 가능성이 있으므로, 지속적인 실황감시를 통해 변화내용을 예보와 정보 등에 신속하게 반영하여야함

<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 가이드스. 국립기상연구소 황사연구과(예보국 지경노 발표과제, 2012. 3. 5)
- 기상청, 2012: 황사해외모니터(아르고스). 국립기상연구소 황사연구과
- 기상청, 2013: 2013년 황사예보 가이드스. 국립기상연구소 황사연구과(예보국 지경노 발표과제, 2013. 2. 26)
- 기상청, 2013: 황사사례분석(2011.4.15~16) 총괄예보관2 (예보국 지경노 발표과제, 2013. 3. 5)
- 기상청, 2013: 황사사례분석(2012.3.29~4.1) 총괄예보관3 (예보국 지경노 발표과제, 2013. 3. 6)
- 기상청, 2013: 황사사례분석(2011.3.19~22) 총괄예보관1 (예보국 지경노 발표과제, 2013. 3. 7)
- 기상청, 2013: 황사사례분석(2011.4.6~9) 총괄예보관4 (예보국 지경노 발표과제, 2013. 3. 8)
- 정관영, 박순용, 1995: 한반도로 수송되는 황사의 종관적 특징. *한국기상학회지*, **31(1)**, 45-63.
- Andrea. R., P. Denise, F. Massimo E., S. Maria, and B. Alessandro, 2007: Documentation of the diurnal cycle of PM10 concentration for the urban site of venice-mestre. The 6th international conference on urban air quality.
- Chun. Y., H.-K. Cho, H.-S. Chung, and M. Lee, 2008: Historical records of Asian dust (Hwangsa) in Korea. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 823-827.
- Kang. J.-Y., Y. T. Tanaka, M. Mikami, and S.-C. Yoon, 2013: A numerical study of the effect of frozen soil on dust emission during an East Asan dust event in December 2009. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **49(1)**, 57-65.
- 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.
- Marcazzan. G. M., E. Caprioli, G. Valli, and R. Vecchi, 2003: Temporal variation of 212Pb concentration in outdoor air of Milan and a comparison with 214Bi. *Journal of Environmental Radioactivity*, **65**, 77-90.
- 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(Hwangsa) particle-size distributions for use in dust emission models. *Atmos. Environ.*, **38**, 2155-.2162.
- Pernigotti. D., A. M. Rossa, M. E. Ferrario, M. Sansone, and A. Benassi, 2007: Influence of ABL stability on the diurnal cycle of PM10 concentration: illustration of the potential of the new veneto network of MW-radiometers and SODAR. *Meteorol. Z., 2007, Fast Track Article*.
- Perrino, C., A. Pietrodangelo, and A. Febo, 2001: An atmospheric stability index based on radon progeny measurements for the evaluation of primary urban pollution. *Atmospheric Environment*, **35**, 5235-.5244.
- Sesana, L., E. Caprioli., and G. M. Marcazzan, 2003: Long period study of outdoor radon concentration in Milan and correlation between its temporal variations and dispersion properties of atmosphere. *Journal of Environmental Radioactivity*, **65**, 147-.160.
- Vecchi. R., G. Marcazzan, and G. Valli, 2007: A study on nighttime-daytime PM10 concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of MILAN(Italy). *Atmospheric Environment*, **41**, 2136-2144.