

대기-7 MM5 및 원격탐사 자료를 이용한 황사 예보법

문운섭*, 김유근, 임윤규, 정주희
부산대학교 대기과학과

1. 서론

지난 20년 동안 황사에 대한 많은 연구가 발원지의 기원, 수송 및 침적 메카니즘, 그리고 황사의 광학적 특성과 물리적 특성의 분석을 중심으로 이루어져 왔다. 이들 연구는 주로 위성, 라이다, 그리고 기타 지표관측 원격탐사 자료를 이용하여 황사의 광학적 두께 및 화학성분 분석과, 일기도를 이용한 기상장 분석, 그리고 중규모 기상 모델 (MM5)과 황사 수송 모델을 이용한 황사의 장거리 수송에 집중되어 있었다 (정관영, 박순웅, 1997; Chun et al., 2001). 지금까지 기상장과 관련된 선행연구에 따르면 황사는 주로 동아시아 지역에서 봄에 자주 발생하며, 발원지는 연 강수량이 200mm 이하의 건조 지역인 중국 고비사막과 타클라마칸사막 그리고 황토고원 등으로 잘 알려져 있다 (윤용황, 1990). Wang et al. (2000)은 발원지에서의 황사 발생량은 지표면 마찰속도와 습도의 양에 따라 결정된다고 하였고, 대기중으로 부유된 황사는 한랭전선면에 발생하는 강한 수평기류의 영향을 받아 상층으로 부유되거나 혼합층을 따라 수송되어진다고도 알려져 있다 (정관영, 박순웅, 1995). 또한 Murayama et al. (2001)와 Uno et al. (2001)은 황사의 발생이 절리 저기압 후면에 따른 고기압과 많은 관련이 있다고 보고하였다. 특히 Kim et al. (2002)과 Moon et al. (2002)은 황사의 발생과정으로 상층의 기압골과 절리저기압이 지표면 고기압 및 저기압 발달과 연계되어 파의 정체를 유도하며 상층 Jet에 기인한 대류권계면 접힘 (tropopause folding) 현상과 강한 풍속의 하층으로의 전이와 관련됨을 제시하였다. 게다가 Merrill et al. (1989)과 Kim et al. (2002)은 TOMS 에어로솔 지수 및 기상 위성사진 분석을 통하여 북태평양까지의 장거리 황사수송이 상층 Jet와 한랭전선의 발달과 관계 있음을 보였다.

최근 들어 중국지방의 사막화와 가뭄으로 인해 황사 빈도수가 증가하고 있고, 특히 2002년 봄철에는 사상 최악의 황사 발생량을 기록함으로써 한반도에 큰 피해가 발생하였다. 그로 인해 황사에 대한 사전 예보체계의 필요성과 그 예보기법의 개발이 절실히 요구되었다. 따라서 본 연구에서는 기상위성 및 라이다 등의 원격탐사 자료와 대기질 관측자료, 그리고 MM5의 모의된 결과를 이용하여 한반도에 영향을 미치는 황사의 발생, 수송 및 침적에 관한 메카니즘 규명과 함께 황사예보법을 제시하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

본 연구는 2001 및 2002년에 발생했던 황사사례 분석을 바탕으로 황사예보법의 가능성을 제시하고자 하였다. NOAA, MODIS, TOMS의 인공위성 사진과 마찰속도, 지오포텐셜 고도 및 jet streak을 이용하여 황사의 발생시점과 이동경로 및 수평 수송범위를, 은위

및 등온위 잠재와도와 연직순환을 이용하여 황사의 연직 수송범위와 고도를 추정하였다. 황사발원지에서의 황사발생은 임계마찰속도 (U_{*t})와 관련된다. 임계마찰속도는 발원지의 마찰속도와 습도를 고려한 Belly (1964)에 의해 제안된 다음의 식을 사용하였다.

$$U_{*t} = A \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} \cdot gD} \times (1.8 + 0.6 \log_{10} W) \quad (1)$$

여기서 ρ_p 는 입자의 상대밀도 (2.65 g cm^{-3} : quartz), ρ_a 는 공기의 상대밀도 ($1.22 \times 10^{-3} \text{ gcm}^{-3}$), g 는 중력가속도 (980 cm s^{-2}), D 는 평균 입경, 그리고 W 는 상대습도 (%)이다. 그리고 A 는 0.1로 경험계수이다.

3. 결과

Fig. 1은 최근 2002년 봄에 발생한 2건의 사례분석으로 NOAA 및 MODIS의 적외 위성 관측사진으로 황사의 발생 및 수송 영역과 한랭전선과 관련된 정체를 나타낸다. 또한 Fig. 2는 500 hPa의 지오폠펜셜 고도와 Jet streak (Jet stream의 축을 따른 최대 풍속대)을 나타낸다. 황사 발원지에서의 먼지보라 (dust storm)가 상층 Jet stream과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 상층의 강한 풍속이 하층으로 전이됨에 따라 한기역에서 강한 바람에 의해 먼지보라가 발생한다. 이들 발생영역을 결정하기 위해 500 hPa의 trough에서 Jet streak의 특정 풍속대를 중심으로 인공위성 사진과 비교한 결과 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 강한 풍속역과 황사발생간의 교차상관 및 이동속도를 고려한다면 황사발원지에서의 황사 발생역과 수송경로를 파악할 수 있다.

Fig. 3은 상기 제시된 각 사례에 대한 320K의 등온위면에서 잠재와도를 나타낸다. 등온위 잠재와도는 온위구배에 대한 성층권 및 대류권 공기의 교환과 절대와의 수송을 해석하는데 주로 이용된다. 또한 대류권계면 접힘에 기인한 대류권에서의 온위구조를 파악하고 황사 발원지로부터 수송고도를 결정하기 위한 기초자료로 활용된다. 즉 이들의 발달 및 이동은 300 hPa과 500 hPa 사이 기압골 (trough)과 분리저기압(cut-off low)의 발달 및 이동과 일치하므로 연직단면도를 통한 대류권접힘과 온위의 연직을 파악하여 발원지로부터 황사의 궤적과 그 고도를 추정할 수 있다. 이때 중요한 것은 황사가 발원지로부터 등온위면을 따라 수송된다고 가정한다. Fig. 4는 Fig. 3에서 고려된 잠재와도 (칼라), 온위 (실선), 수평풍 (우측), 그리고 아지균 및 연직 바람벡터의 수직단면도를 나타낸다. 여기서 잠재와도 값 1.6 IPV는 대류권계면으로 황사발생시 그 고도가 매우 하강되어 있음을 보여준다. 특별히 하강된 잠재와도 양측 (혹은 우측)에 혀 모양의 대류권 접힘이 발견된다. 우측의 이들 구조와 그 아래 온위의 연직구조는 황사의 수송과 밀접한 관계가 있다. 황사발원지 (특히 고비사막역 및 황토역)에서 등온위면을 따라 이동한 황사는 지형효과에 의한 산악파의 영향으로 대류권 하층으로 이동하여 앞선 대류권 접힘역까지 이동하게 되며 이곳에서 다량의 황사가 축적 될 수 있다. 이 때 상층의 풍속 강도는 그 고도 및 양을 결정할 수 있다. 상층의 풍속이 강해 하층으로 전이가 강할 경우 한반도에 다량의

황사가 관측되었다. 이들의 결과는 일본에서 관측된 라이다 관측자료와 일치하고 있다. 그리고 우측에 황사가 측정되는 곳은 지상저기압의 한랭전선이 존재하는 곳으로 황사의 이동시간은 이 전선대의 이동과 관련된다. 그 후 황사는 이들 전선대에 기인한 침적과 강수에 의해 제거된다 (위성사진 참고).

4. 결 론

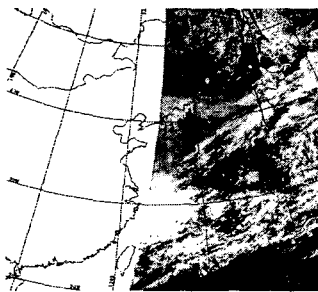
본 연구에서는 원격탐사 및 MM5의 기상요소 (지오폠펜셜 고도, jet streak, 마찰속도 및 습도, 잠재와도, 온위 및 연직 순환풍)를 이용한 황사예보법을 제시하였다. 추후 황사의 양적 예보를 위해 황사 수송 모델의 적용과 이를 이용한 복사강제의 계산이 요구된다.

감사의 글

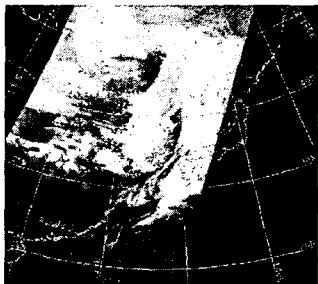
본 연구는 한국과학재단 SRC 지원금에 의해 기후환경시스템 연구센터에서 수행된 것으로 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 윤용황, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26, 111-120.
- 정관영, 박순웅, 1995, 한반도에 황사 출현시의 종관 기상 특징, 한국기상학회지, 31, 45-63.
- 정관영, 박순웅, 1997, 한반도에서 관측된 황사의 수치모의: I. 분진모델 개발과 기초 수치 실험 결과, 한국기상학회지, 33, 179-198.
- Belly, P. Y., 1964, Sand movement by wind, US Army Coastal Eng. Res. Centre Tech. Mem. 1, pp 1-38.
- Chun, Y., Boo, K.O., Kim, J., Park, S.U., Lee, M., 2001, Synopsis, transport, and physical characteristics of Asia dust in Korea, J. Geophys. Res., Vol. 106, 18461-18469.
- Merrill, J. T., Uematsu, M., Bleck, R., 1989, Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific, J. Geophys. Res., Vol. 94, 8584-8598.
- Kim, Y. K., H. W. Lee, Y. S. Moon, S. K. Song, 2001, Long-range Transport Mechanisms of Asian Dust associated with the Synoptic Weather System, J. Korean Envir. Soc., Vol. 10, 197-206.
- Kim, Y.K., H. W. Lee, J. K. Park, Y. S. Moon, 2002, The stratosphere-troposphere exchange of ozone and aerosols over Korea, Atmos. Env., Vol. 36, 449-463.
- Uno, I., Amano, H., Emori, S., Kinoshita, K., Matsui, I., Sugimoro, N., 2001, Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation, J. Geophys. Res., Vol. 106, 18331-18344.
- Wang, Z, Hiromasa Ueda, Meiyuan Huang, 2000, A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, J. Geophys. Res., Vol. 105, 26947-26959.

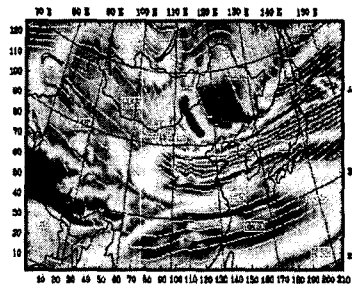


(a)

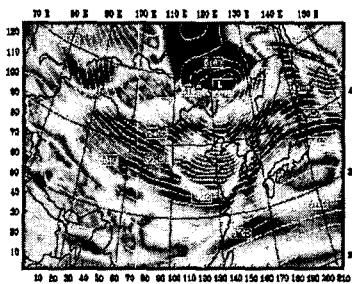


(b)

Fig. 1. Satellite images by KMA at 0140 UTC on 17 (a) and 2329 UTC on 20 (b) March 2002.

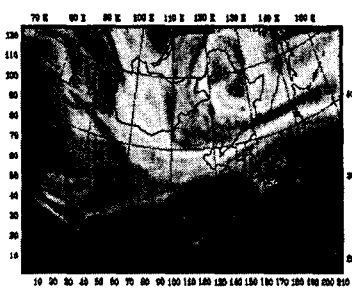


(a)



(b)

Fig. 2. Geopotential height and wind speed at 500hpa simulated by MM5. (a) At 0000UTC on 17, and (b) at 2100UTC on 20 March 2002.

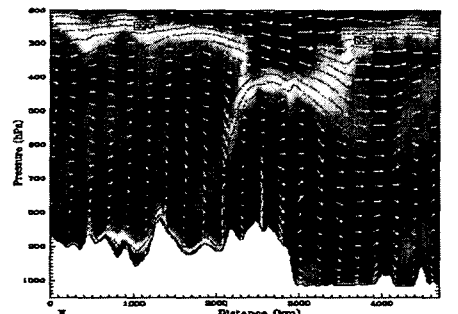


(a)



(b)

Fig. 3. Isentropic potential vorticity at 320K simulated by MM5. (a) At 0000UTC on 17, and (b) at 2100UTC on 20 March 2002.



(a)

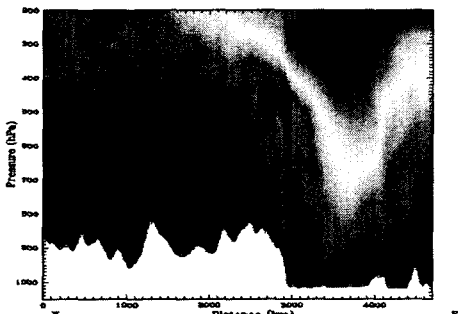


Fig. 4. Vertical cross-section of ageostrophic wind, vertical wind velocity and potential vorticity, and potential temperature between (34N, 135E) and (42.5E, 80E) simulated by MM5. (a) At 0000UTC on 17, and (b) at 2100UTC on 20 March 2002.