

## 2A3) 2002년 봄철 황사현상의 종관기상학적 및 광학적 특성비교 Comparison of synoptic meteorological and optical features of Asian dust during springtime in 2002

송삼근·김유근·문윤섭<sup>1)</sup>

부산대학교 대기과학과 <sup>1)</sup>기상연구소 국가지정연구실

### 1. 서론

동북아시아의 최대 환경문제로 부각된 황사는 중국의 건조지대에서 발생되어 중위도 편서풍 기류를 따라 풍하측에 위치한 한반도와 일본, 심지어 북태평양을 가로질러 북미까지 장거리 수송되기도 하며 그 피해 정도는 시·공간적으로 상당히 심각한 수준에 이르고 있다(Jaffe et al., 1999; Husar et al., 2001; Hacker et al., 2001). 따라서 지난 20여 년 동안 황사 현상이 발생한 사례일을 중심으로 많은 관련 연구가 수행되어 왔으며, 또한 황사 발원지에서의 배출량과 황사의 물리적, 화학적, 그리고 광학적 특성을 분석하기 위하여 지상 대기질 관측, lidar, sun photometer, 인공위성 등의 기기를 통한 다양한 자료가 이용되었다(Gao et al., 1992; Xiao et al., 1997). 한편, 최근에는 이러한 황사의 특성뿐만 아니라 발생, 수송, 침적과정과 관련된 기상요소 및 종관기상학적 특성을 비교·분석하는 실질적인 연구방향과 이를 바탕으로 한 황사현상의 장거리수송모델 및 배출량 산정과 관련된 연구가 진행되고 있다.

먼저, 종관기상학적 특성분석의 선행연구로, Hayasaka et al.(1990)은 Tibetan 고원의 동쪽에 위치한 건조지대에서 대기의 강한 경압성에 의해 발생한 전선의 교란(disturbance)으로 먼지입자가 부유하기도 하며, 이때 따뜻한 기류의 상승운동이 중위도 편서풍에 동반되어 풍하측 지역인 일본 및 태평양으로 수송되고 있음을 밝혔다. 아울러 Chang et al.(1996)은 황사의 발생 및 수송과정의 시간 변화는 저기압 시스템의 종관규모 운동과 일치함을 보였다. 또한 중국의 발원지에서 수송되어 온 황사는 절리와도(cut-off vortex) 후면의 강한 하강기류를 따라 지표부근으로 유입되고 있음을 TSP 농도 분포와 비교하여 분석하였다(Uno et al., 2001; Murayama et al., 2001). 반면, 발원지에서의 황사 배출량과 관련된 선행연구로는, 식생 분포 정도, 토양 수분 함유, 그리고 지상 풍속의 함수를 모델에 적용하여 배출량 산정에 기여한 바 있으며(Tegen et al., 1994), 토양 내 입자의 크기, 지표 거칠기, 지표 습도 등을 입계마찰 속도의 함수로 선정하여 이를 수치모델에 적용시켜 배출량을 산정하기도 하였다(Chang et al., 1996; Wang et al., 2000; Ginoux et al., 2001). 즉 황사의 발생과 수송 과정 등을 규명하기 위한 기존의 먼지입자의 특성 및 배출량 추정연구 등과 병행하여 대기 상·하층의 종관기상장 및 모델을 통한 분석연구 또한 중요하게 인식되고 있음을 나타낸다. 하지만, 국내에서의 연구는 대부분이 관측자료의 부족으로 인해 상당히 미흡한 상태이며 일부 관련 연구에서도 정성적인 분석에 국한되어 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Kim et al.(2001)의 근집분석을 통한 종관기상장의 분류패턴을 바탕으로 2002년 봄철에 발생한 황사발생일 중 가장 심한 영향을 주었던 3월 21일과 4월 8일의 사례에 따른 종관기상장 및 광학적 특성비교와 지상 및 상층의 먼지농도자료를 이용한 황사강도를 비교·분석하고, 이에 MM5 모델링을 통한 황사사례별 종관기상학적 특성을 검증하고자 한다.

### 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 2002년 3월과 4월에 발생한 황사사례를 선택하여 종관기상학적 및 광학적 특성을 비교·분석하기 위해 일본기상청에서 발행한 지상 및 상층의 인쇄일기도와 NOAA-16 Band에서 관측한 인공위성 자료, SeaWIFS의 에어로솔 광학두께(aerosol optical depth) 등을 이용하였다. 또한 실질적으로 지상부근의 황사 영향을 추정할 수 있는 PM10 농도와 운저고도 이상의 자유대기에서 황사의 분포특성을 알 수 있는 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 에어로솔 지수(Aerosol Index) 자료를 이용하여 대기 상·하층의 황사영향을 분석하였다. PM10 자료의 경우, 한반도 주요 5 도시인 서울(27개 지점), 인천(10개 지점), 광주(4개 지점), 대구(6개 지점), 부산(9개 지점)의 환경부 산하 대기오염 측정소의 농도 자료를 평균하였으며, TOMS 에어로솔 지수(Aerosol Index)는 Earth Probe(EP) 위성의 TOMS에서 관측된 에어로솔 지수값으로서, 먼지와 연기(dust and smoke)를 동시에 설명하고 있는 +0.7 이상의 값을 적용하였다(<http://toms.gsfc.nasa.gov/aerosols/aerosols.html>). 상기의 자료를 통해 분석된 종관기상학적 특성을 보다 명확하게 이해하고, 검증하기 위하여 중규모 기상장 모델인 MM5와 RIP(Read/Interpolate/Plot) 프로그램을 이용하여 사례일의 기상요소 즉 수평풍속, 지위고도, 잠재와도 등을 분석하

였다. 초기 기상장 입력자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 대 상일의 전지구 기후자료(CDAS: Climate Data Assimilation System)를 이용하였고, 대상영역은 위도 20-60°N, 경도 80-150°E이며 격자간격은 60 km 정도의 해상도를 가진다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 사례일의 황사관측

2002년 3월과 4월에 발생한 한반도 내 황사사례를 중심으로 NOAA-16에서 관측한 인공위성 자료를 이용하여 황사의 이동경로 및 영향을 분석하였다. Fig. 1a의 한반도 내 가장 심한 황사영향을 주었던 3월 21일은 한반도 전역에 황사입자가 분포하고 있지만, Fig. 1b의 4월 8일은 발원지로부터 한반도 북쪽으로 먼저 수송되고 이후로 점차 남하하는 이동경로를 나타낸다.

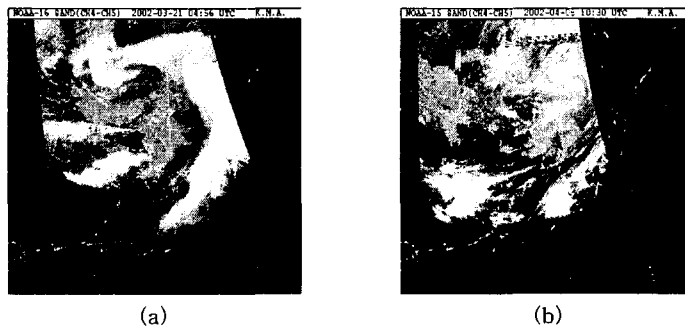


Fig. 1. Satellite images supported by KMA at (a) 1400 LST on 21 March 2002 and (b) 1930 LST 8 April 2002.

#### 3.2 사례일의 중관기상장 분석

황사현상이 발생한 사례일의 일기도를 분석한 결과, 2002년 3월 사례는 한반도의 상층에 강한 제트류와 함께 기압골이 위치하고, 이때 빠른 속도로 이동하는 단파골의 Kicker 효과로 인해 이미 발달된 기압골의 이동속도가 빨라짐과 동시에 한랭이류(cold advection)에 의한 하강기류 또한 단기간에 많은 영향을 주면서 한반도를 통과하는 패턴이다. 2002년 4월 사례는 한반도 상층의 강한 기압골과 온도구배로 인하여 한랭이류(cold advection)가 생성되고, 지표 부근에서는 한반도 우측의 전선을 동반한 저기압 세력을 따라 대륙성 고기압이 한반도 쪽으로 확장되는 중관 기압패턴을 나타내며, 이러한 기압골의 영향이 두세 번 연속되는 특징을 나타내어 지상에서의 황사강도에 큰 영향을 줄 수 있다고 사료된다. 이것은 또한 Kim et al.(2001)의 군집분석에 의한 중관기상장 분류패턴과 일치함을 알 수 있었다.

#### 3.3 사례일의 지상 및 상층 농도분석

Fig. 2a는 3월의 가장 높은 농도 및 장기간 발생한 황사 사례일을 중심으로 약 일주일 동안 한반도 주요 대도시(서울, 인천, 광주, 대구, 부산)에서 관측된 시간별 PM<sub>10</sub> 농도의 평균값을 나타낸다.

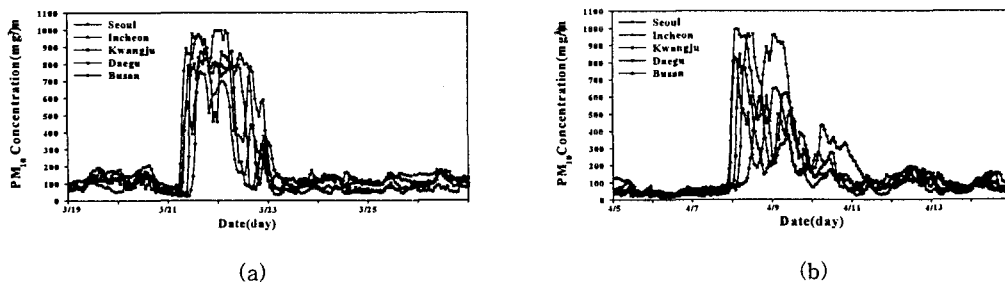


Fig. 2. Hourly surface concentration of particulate matter (PM<sub>10</sub>) observed at monitoring sites in major five cities on (a) 19-26 March 2002 and (b) 5-14 April 2002.

21일 오후부터 증가하고 있는 PM<sub>10</sub> 농도는 약 1000  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 의 최고 농도값을 나타내고 (Fig. 2a) 있지

만, 이는 관측자료 수신처리부의 한계로 인해 그 이상의 값은 자료처리가 어렵기 때문이며, 실제 최고 농도값은 위의 관측값보다 훨씬 높은 값을 나타내었음을 추정할 수 있다. 그리고 22일 저녁부터는 황사의 소멸로 인한 농도감소로서 약  $100 \mu\text{gm}^{-3}$  정도의 일정한 농도값을 유지하고 있었다. Fig. 2b의 4월 사례는 3월 사례와는 달리 7일 야간부터 시작하여 약 5일(8-12일) 동안 약  $1000 \mu\text{gm}^{-3}$  이상의 농도값을 나타내다가 점차 조금씩 감소하는 농도변화를 보이고 있다.

#### 3.4 사례일의 모델링을 통한 비교분석

본 연구에서는 Kim et al.(2001)의 군집분석을 통한 중관기상장의 분류패턴을 바탕으로 2002년 봄철에 발생한 황사현상 중 가장 심한 영향을 주었던 3월 21일과 4월 8일의 사례에 따른 중관기상장 특성의 검증을 위하여 중규모 기상장 모델인 MM5 모델을 이용한 수평풍속, 지위고도, 잠재와도, 연직속도 등을 분석하였다.

### 감사의 글

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템연구센터의 지원으로 이루어졌다.

### 참고 문헌

- Chang, Y.S., R.L. Arndt, and G.R. Carmichael, 1996, Mineral base-cation deposition in Asia, *Atmos. Env.*, 30(13), 2417-2427.
- Gao, Y., R. Arimoto, J.T. Merrill, and R.A. Duce, 1992, Relationship between the dust concentration over eastern Asia and the remote North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 97, 9867-9872.
- Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J.M. Prospero, B. Holben, O. Dubovik, and S.J. Lin, 2001, Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, *J. Geophys. Res.*, 106(D17), 20255-20273.
- Hacker, J.P., I.G. McKendry, and R.B. Stull, 2001, Modeled downward transport of a passive tracer over Western North America during an Asian dust event in April 1998, *Amer. Meteor. Soc.*, 40, 1617-1628.
- Hayasaka, T., T. Nakajima, and M. Tanaka, 1990, The coarse particle aerosols in the free troposphere around Japan, *J. Geophys. Res.*, 95(D9), 14039-14047.
- Husar, R.B., D.M. Tratt, B.A. Schichtel, S.R. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gasso, T. Gill, N.S. Laulainen, F. Lu, M.C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B.N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G.C. Feldman, C. McClain, R.J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W.E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto, and W.C. Malm, 2001, Asian dust events of April 1998. *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18137-18330.
- Jaffe, D.A., and Coauthors, 1999, Transport of Asian air pollution to North America. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 711-714.
- 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. *Environmental Sciences*, 10(S-4), 197-206.
- Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Aro, B.J. Sohn, J.G. Won, S.C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, and Y. Iwasaka, 2001, Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18345-18359.
- Tegen, I., and I. Fung, 1994, Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport and optical thickness, *J. Geophys. Res.*, 99(D11), 22897-22914.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui, and N. Sugimoto, 2001, Trans-Pacific Yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18331-18344.
- Wang, Z., H. Ueda, and M. Huang, 2000, A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, *J. Geophys. Res.*, 105(D22), 26947-26959.
- Xiao, H., G.R. Carmichael, J. Durchenwald, D. Thornton, and A. Bandy, 1997, Long-range transport of SO<sub>x</sub> and dust in East Asia during the PEM B experiment. *J. Geophys. Res.*, 102, 28589-28612.