

황사의 지속시간에 따른 대기 중 농도변동 및 종관기상장 특성

Characteristics of Concentration Variations and Synoptic Conditions by the Lasting Time of Asian Dust

김 유 근* · 송 상 근 · 강 재 은
부산대학교 대기과학과

(2003년 12월 2일 접수, 2004년 6월 11일 채택)

Yoo-Keun Kim*, Sang-Keun Song and Jae-Eun Gang
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

(Received 2 December 2003, accepted 11 June 2004)

Abstract

We determined Asian dust days by constructing the standard of Asian dust using PM_{10} concentrations ($\geq 150 \mu\text{g m}^{-3}$, 24-hr average) and TOMS aerosol index (≥ 0.7) for 5 years (1998–2002), and grouped into long-lasting cases (LLCs, ≥ 4 days) and short-lasting cases (SLCs, ≤ 2 days) concerning the mean lasting time (about 3 days) of Asian dust. Further we performed the specific analyses associated with concentration variations and synoptic conditions by using PM_{10} and TOMS data, weather maps during the dusty cases (LLCs and SLCs). As a result, the LLCs (9 cases) had large variations of PM_{10} concentration as the mean of $131.1 \mu\text{g m}^{-3}$ and the maximum mean of $379.8 \mu\text{g m}^{-3}$, and showed dominant features the continuous passage of deep trough caused by blocking effect and weak trough (56%, 5 cases) over Korea. The SLCs (11 cases) had relatively small variations of PM_{10} concentration as the mean of $133.3 \mu\text{g m}^{-3}$ and the maximum mean of $247.2 \mu\text{g m}^{-3}$, and showed passage of one weak trough (64%, 7 cases) over Korea. Thereafter, the case studies (April 7–13, 2002 of LLC and March 23–24, 2000 of SLC) performed by the simulation of MM5 with meteorological variables of the horizontal wind, potential temperature, isentropic potential vorticity, and helped to better understand the features of synoptic conditions in connection with the concentration variations for each case.

Key words : Asian dust, Concentration variations, Synoptic conditions, Lasting time, Trough

1. 서 론

최근 중국 내 기후변화에 따른 황사 발원지의 확대와 발생량의 증가로 인해 한반도 내 황사의 피해

정도는 점차 커져가고 있으며, 특히 2002년 봄철에는 사상 최악의 황사 발생량을 기록함으로써 한반도 전역에 극심한 피해를 가져왔다. 또한 발원지에서 편서풍을 따라 이동해 오는 황사는 중국의 북동부 공업지대에서 배출되는 여러 오염물질과 함께 수송됨으로써 풍하측 지역에 위치한 우리나라와 일본 등에서의 피해정도는 매우 심각하다.

* Corresponding author
Tel : +82- (0)51-510-2282, E-mail : Kimyk@pusan.ac.kr

한반도 내 유입되는 이러한 황사는 발원지에서의 배출량 정도와 황사를 포함한 기류의 이동 모습에 따라 그 지속시간이 달라질 수 있다(전종갑 등, 1999; 이재규, 1993; 윤용황, 1990). 황사 배출량은 발원지의 지표성질 및 여러 기상학적 요인 변화와 관련되어 다양한 연구가 이루어져 왔으며(Zender *et al.*, 2003; In and Park, 2002; Ginoux *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2000), 기류의 이동에 따른 황사 지속시간의 분석연구로는 윤용황(1990)이 20년 간의 통계자료를 통하여 발원지로부터 한반도에 도달하는데 소요되는 평균 시간과 함께 한반도에서의 황사 지속시간에 관한 연구를 하였다. 또한 이재규(1993)는 황사의 지속시간이 상층 기압골의 뒤를 이어 동반되는 고기압의 위치, 발달정도, 이동속도 그리고 고기압의 확장에 따른 기류의 이동과 풍속에 의존하며, 고기압이 동반하고 있는 기단의 안정도와 관련됨을 밝혔다. 그 이후로 전종갑 등(1999)은 500 hPa 고도의 저기압 이동속도와 연직 구조의 형태에 따라 한반도 내 황사의 지속시간이 결정됨을 제시하였다. 이 외에도 사례분석을 통해 지상의 기상장 특성과 함께 한반도 상공에서의 황사 통과량을 비교 분석한 바 있으며(정관영과 박순용, 1998), 또한 특정 사례에 있어 동아시아 내 상층 기압골의 blocking 현상에 따른 황사의 수송과정을 기상장 모델 결과를 이용하여 분석하였다(Moon *et al.*, 2002).

이와 같이 황사의 지속시간과 관련된 선행연구는 황사의 발생현황과 수송과정, 이동량 및 침적량 추정 등과 관련하여 황사사례에 대한 기상학적 특성을 이해하는데 많은 도움을 주었다. 그러나 대부분이 황사의 특정사례를 대상으로 한 관측 결과 및 수치모의 분석 연구로 장기간에 걸친 황사의 지속시간과 관련된 발생 현황 및 기상장 특성에 관한 연구는 수행되지 못하였다. 아울러 최근 황사의 발생 및 피해정도가 커짐에 따라 이에 관한 관심이 고조되어 황사의 양적 변화와 그 지속시간에 관한 보다 근원적인 분석이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근 5년(1998~2002년) 동안 한반도 내 대기 상·하층의 황사 영향을 모두 고려한 황사 사례일을 선정한 후 그 지속시간에 따라 장기와 단기 사례로 분류하고자 한다. 분류된 사례들을 대상으로 지속시간에 따른 황사의 연도별, 월별 발생현황 및 상층과 하층의 농도 변동 특성, 그리고 그와 연관된 중관기상 특성을 분

석하고, 장·단기 각각의 특정사례를 제시하여 MM5 모델링을 통해 수평과 연직으로의 중관기상장 특성들을 보다 면밀히 분석하고자 한다.

2. 자료 및 방법

한반도 내 황사현상에 대한 기준이 명확하게 제시되어 있지 않아 사례일 선정에 어려움이 있어, 기존의 기상청에서 발표된 사례를 참고하여 최근 5년(1998~2002년) 동안 주요 대도시에서 관측된 PM₁₀ 농도자료와 한반도 상공에 분포한 TOMS(Total Ozone Mapping Spectrometer) 에어로솔 지수를 이용하여 황사 사례일의 기준을 선정하였으며, 지속시간에 따른 장·단기 사례를 분류하여 발생현황과 농도 변동, 그리고 중관기상장의 특성들을 분석하였다.

본 연구에 이용된 PM₁₀ 농도는 한반도 주요 대도시인 서울(27개 지점), 대전(3개 지점), 광주(4개 지점), 대구(6개 지점), 부산(9개 지점)의 환경부 산하 대기질 측정소에서 수집된 시간별 평균자료이며, 우리나라 대기환경기준치인 일평균 150 μg m⁻³ 이상의 값을 적용하여 도시별 관측지점의 평균값이 기준치를 초과하는 도시가 2 곳 이상인 날을 황사 사례일로 선정하였다. 또한 TOMS 에어로솔 지수는 EP(Earth Probe) 위성에서 관측되고 있는 양(+)과 음(-)의 에어로솔 지수 중 +0.7 이상의 값을 적용하여 황사 사례일을 선정하였다. EP 위성은 하루 중 대략 오전 11시경에 한반도 상공을 통과하면서 관측되고 있으며, 약 1.5 km(운저 고도)에서 대기 상층까지의 흡습성 에어로솔(dust, biomass burning 등)을 주요하게 감지하는 것을 기본으로 하고 있다(<http://toms.gsfc.nasa.gov/aerosols/aerosols.html>). 따라서 본 연구에 적용된 황사의 기준은 대기 상층과 하층에 나타난 황사의 영향을 모두 고려하여 선정한 것으로, 이는 정용승 등(2001)의 TSP, PM₁₀ 농도분포와 시정과의 비교분석을 통해 황사의 기준 및 사례를 선정한 것과는 다소 차이를 볼 수 있었다.

한편 황사 사례일의 중관기상장 특성분석을 위해 지상 및 상층 500 hPa의 일기도를 이용하였으며, 분류된 장·단기 사례의 주요 중관패턴 특징인 상층 기압골 이동 모습을 보다 효과적으로 비교 분석하기 위해 NOAA/ARL의 web(<http://www.arl.noaa.gov/>)

Table 1. Long- and short- lasted cases based on the duration (day) in Asian dust days for 5 years (1998-2002).

Long- lasted case			Short- lasted case		
Case Number	Date	Duration (days)	Case Number	Date	Duration (days)
1	March 27 ~ 30, 1998	4	1	April 26, 1998	1
2	April 13 ~ 22, 1998	10	2	April 28, 1998	1
3	April 3 ~ 6, 1999	4	3	February 26, 1999	1
4	April 11 ~ 15, 2000	5	4	March 19, 2000	1
5	March 4 ~ 8, 2001	5	5	March 23 ~ 24, 2000	2
6	March 19 ~ 25, 2001	7	6	January 2, 2001	1
7	April 5 ~ 14, 2001	10	7	March 1 ~ 2, 2001	2
8	May 2 ~ 5, 2001	4	8	April 24 ~ 25, 2001	2
9	April 7 ~ 13, 2002	4	9	April 27, 2001	1
			10	December 13, 2001	1
			11	January 12, 2002	1

ready-bin/ar/plot1a.pl)상에서 FNL 입력자료를 이용하여 500 hPa의 지위고도 분포를 그려보았다.

또한, 특정 장·단기 사례에 대한 기상장의 시·공간적 이해를 돕기 위해 MM5 수치모의를 수행하였다. 수치모의의 초기 입력자료는 NCEP에서 제공하는 대상일의 전지구 재분석자료인 CDAS 자료이며, 대상영역은 위도 10~60°N, 경도 90~140°E이고 수평으로 84×84 격자로 60 km의 해상도를, 연직으로 23개의 σ 층을 가진다. 수치모의된 기상요소로는 500 hPa 등압면에서의 수평 풍속과 함께 발원지에서 한반도까지의 온도 및 온위, 그리고 IPV (Isentropic potential vorticity)의 연직분포이다. IPV는 상층 공기의 안정도를 나타내는 하나의 지수로 볼 수 있으며 (Bluestein, 1993), 일반적으로 1.5 PVU 이상의 IPV가 대기 하층에 분포하게 된다면 이는 상층의 공기가 하층까지 영향을 주었음을 나타내며, 이때 상층에 분포한 황사가 하향수송 및 침적될 수 있음을 보여준다 (Kim *et al.*, 2001).

3. 지속시간에 따른 황사 발생현황, 농도변동, 기상분석

3.1 발생현황

표 1은 대상기간 동안 본 연구의 선정기준에 따라 분류된 장·단기 사례를 나타낸다. 지속시간이 1일인 경우가 8회(28%), 2일인 경우가 3회(10%), 3일인 경우가 9회(31%), 4일인 경우가 4회(14%), 그리고 5

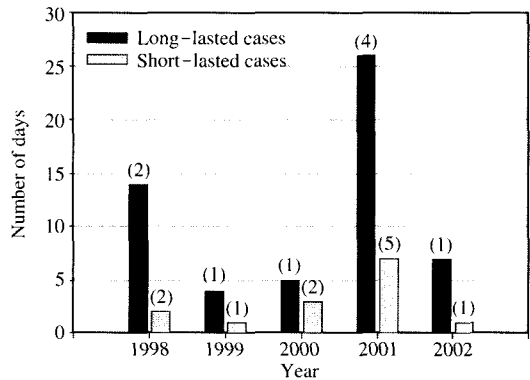


Fig. 1. Yearly variations of the number of Asian dust days in long- and short- lasted cases. The values in the parentheses indicate the number of cases.

일 이상인 경우가 5회(17%)의 분포를 보였으며 평균 지속시간은 약 3일(3.36일)이었다. 이는 기상청에서 발표한 황사 사례(1988~2002년)의 평균 지속시간(2.91일)과 유사하게 나타났다. 따라서 평균 지속시간인 3일을 기점으로 1~2일의 지속시간을 단기 사례로, 4일 이상의 지속시간을 가질 때 장기 사례로 분류하였다.

그림 1은 대상기간인 최근 5년 동안 한반도 내 발생한 장·단기 황사의 사례 수와 발생 일수를 나타낸다. 장기와 단기 사례 모두 2001년에 각 26일(4회)과 7일(5회)의 황사 발생으로 5년 중 가장 많은 발생 일수와 사례 수를 보인 반면, 1999년은 각 1번의 사례로 4일과 1일의 가장 적은 발생 일수를 나타내

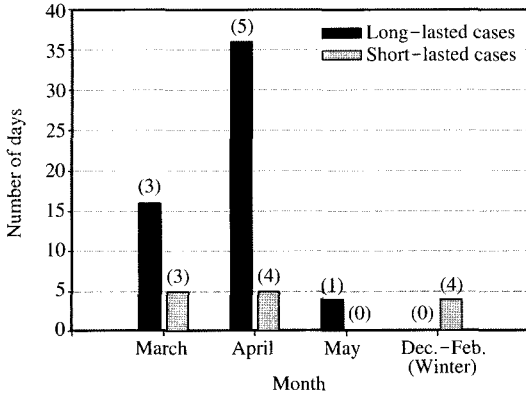


Fig. 2. Same as Figure 1, but for monthly variations.

고있다. 연도에 따라 그 특성을 살펴보면, 장기와 단기 사례는 1998년에 각 2번의 사례로 14일과 2일의 발생 일수를 보인 후, 1999년부터 2001년까지 발생 일수가 증가하는 경향을 나타낸다. 2002년에는 장기 7일(1회)과 단기 1일(1회)의 적은 발생 일수(사례 수)를 보인다. 특징적으로 장기 사례의 경우 1998년과 2001년에 각 10일의 지속시간을 가진 사례가 있었다.

그림 2는 장·단기 황사 사례의 월별 발생현황을 나타낸다. 봄철 중 4월에 가장 많은 발생 일수(장기 36일, 단기 5일)와 사례 수(장기 5회, 단기 4회)를 나타내며, 이는 기상관측소에서 제공한 30년(1967~1996년) 사례를 바탕으로 봄철 황사의 지속시간을 월별로 분석한 진종갑 등(1999)의 연구결과와 유사하였다. 또한 장·단기 황사 사례시 모두 4월과 함께 3월에도 높은 발생 일수(장기 16일, 단기 5일)와 사례 수(장기 3회, 단기 3회)를 나타내고 있는데, 이는 Xuan(1999)의 발원지인 북중국에서 연간 먼지(dust) 배출량의 절반 정도가 봄철에 방출된다는 연구결과와 유관하다고 판단된다. 특히 장기 사례와 달리 단기 사례의 가장 큰 특징은 겨울철 황사현상이 총 4회(4일)의 사례로 4월의 발생사례 만큼 발생한 것을 알 수 있다. 이는 한반도를 향해 장출하고 있는 대륙성 고기압의 영향과 지구온난화로 인한 발원지 내 기온상승과 관련지을 수 있으나 보다 정확한 해석을 위하여 장기간의 자료를 통한 세부연구가 요구된다(전영신 등, 2000).

3. 2 농도변동

그림 3의 (a)는 앞서 분류된 장기(9사례)와 단기 사례(11사례)시 서울지역에서 측정된 PM₁₀ 농도의 평균값과 최고값을 사례별로 나타낸 것으로, 10번째 단기 사례의 경우는 자료결측으로 인해 농도분석이 이루어지지 않았다. 분석결과, 장기 사례는 전반적으로 각 사례별 평균값과 최고값이 큰 차이를 보이며 뚜렷이 구분되고 있는데, 이는 사례기간의 농도 변화가 큰 폭으로 증가 후 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 한편, 상대적으로 평균값과 최고값의 차이가 작은 사례는 농도변동 폭이 작은 것으로 거의 일정한 농도값 분포를 가지는 것으로 해석된다. 반면 단기 사례는 낮은 농도값에서 평균값과 최고값이 근소한 차이를 보이는 사례를 볼 수 있으며, 이 사례들은 모두 하루의 지속시간을 나타내는데, 이는 시·공간적으로 적은 양의 황사 유입에 의한 농도변동 특성으로 보여진다. 그러나 평균값과 최고값의 차이가 커 농도 증감의 폭이 큰 단기 사례시에는 장기 사례와 비교해 볼 때 보다 단시간 내 빠른 농도변동을 나타내었다.

아울러 장기 및 단기 사례의 전체 평균값과 최고값들의 평균을 비교해 보면, 전체 평균값의 경우 장기 사례시 131.1 μg m⁻³과 단기 사례시 133.3 μg m⁻³으로 유사한 값을 가지나, 최고값의 경우 장기 사례시 379.8 μg m⁻³과 단기 사례시 247.2 μg m⁻³으로 132.6 μg m⁻³의 큰 차이를 보인다. 이처럼 장기와 단기 사례시 평균값은 서로 유사하나 최고값 분포가 큰 차이를 보이는 것은 일정 시간 내 전체적인 농도값 분포는 서로 유사하나 증가폭 및 감소폭에 따른 절대값 차이가 장기 사례시 보다 큰 분포 변화를 가지는 것으로, 이는 한반도 내 발생된 양과 함께 사례별 기상조건 변화와 관련한 농도변동으로 해석될 수 있다.

그림 3의 (b)는 장기와 단기 사례시 한반도를 중심으로 33~43°N, 123~131°E 영역 내의 에어로솔 지수 분포 정도를 사례별 평균값과 최고값으로 나타낸 것이다. 장기 사례 경우, 앞선 PM₁₀ 농도분포와 유사하게 평균값과 최고값의 큰 차이를 볼 수 있으며, 이는 많은 양의 황사가 한반도 상층으로 유입됨에 따라 시간에 따른 농도분포 변화가 커져 평균값과 최고값 분포의 차이가 큰 것으로 해석된다. 그러나 장기 사례 6의 경우는 큰 차이를 보인 PM₁₀ 농도와 달

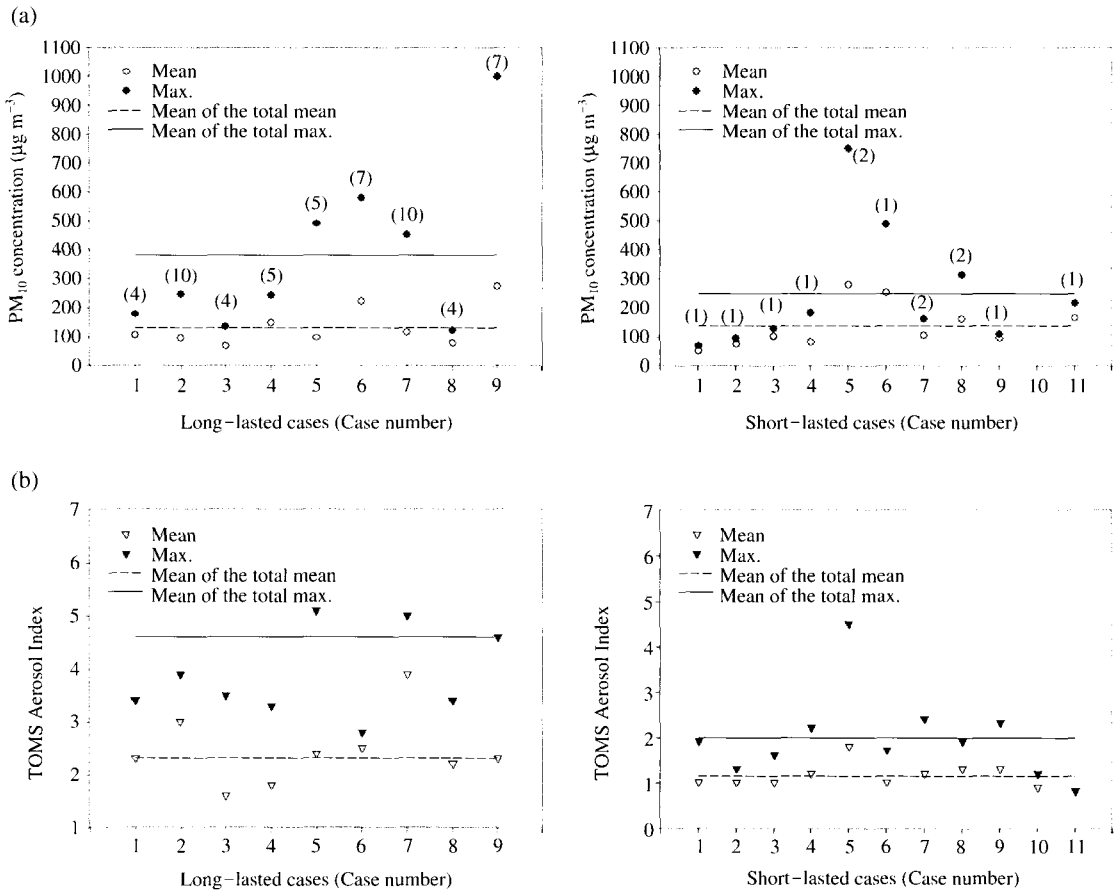


Fig. 3. Variation range of mean and maximum values in (a) PM_{10} concentration and (b) TOMS aerosol index for long- (9 cases) and short-lived cases (11 cases). The values in the parentheses indicate the number of days for each case.

리 에어로솔 지수에서는 상대적으로 작은 차이를 보이는데, 이는 상층보다 하층(약 1.5 km 이내)으로 많은 양의 황사가 수평 수송되어 침적되었기 때문에 지표 PM_{10} 의 농도변동이 보다 크게 나타난 것으로 보인다. 단기 사례의 경우, 상대적으로 평균값과 최고값이 작은 차이를 보이고 있으며, 이는 사례기간 중 상층으로 유입되는 황사의 양적 차이가 작은 것으로 볼 수 있다. 사례 1의 경우는 지상 PM_{10} 농도와 비교시 보다 큰 차이를 보이는데, 이는 하층보다 상층으로의 황사 수송량의 변화가 큰 것으로 해석될 수 있다.

에어로솔 지수의 장·단기 사례시 전체 평균값과 최고값을 비교해 보면, 장기 사례의 경우 평균값은

+2.3의 평균을 보이며 최고값은 하나의 사례를 제외하면 모두 +3 이상의 지수값(최고값 평균: +4.6)을 보여 전체적으로 평균값과 최고값의 차이가 +2.3 정도로 큰 차이를 나타낸다. 이는 지상 대기질 변화와 비교해 볼 때 상층에서 하층까지의 강한 황사 유입으로 인해 상·하층 모두 큰 농도변동을 나타낸 것이다. 반면 단기 사례의 경우는 최고값이 약 +2.0의 지수를 가지며, 평균값이 약 +1.1의 지수를 가짐에 따라 상대적으로 작은 상층의 농도변동을 확인할 수 있다. 이는 지상에서의 작은 PM_{10} 농도변동과 함께 대기 상·하층 모두 황사현상으로 인한 농도변동이 약했음을 설명해준다.

3. 3 종관기상분석

앞선, 대기 중 농도변동은 상·하층 종관기상장 분포와 관련된다. 특히, 상층 기압골 이동 특성은 황사의 장거리 수송과 밀접한 연관성이 있음을 여러 선행연구에서 밝힌 바 있다(Uno *et al.*, 2001; 전종갑 등 1999; Merrill *et al.*, 1985). 따라서 본 연구에서 역시 지속시간에 따라 분류된 황사 사례에 있어 상층 기압골의 분포 특성을 찾아보고자 하였다.

표 2는 본 연구에서 분류된 장·단기 사례시 한반도 상공을 통과하는 기압골의 이동 모습을 500 hPa 일기도를 통해 분석한 결과이며, 이와 함께 각 사례 기간 동안 한반도 상공을 통과한 기압골의 수를 제시한 것이다. 이 때의 기압골 이동 모습을 보다 특징적으로 비교하고 이해하기 위해 각각의 특성을 가진 사례를 임의로 선정하여, 500 hPa에서의 지위고도 분포를 그림 4에 나타내었다.

장기 사례의 경우, 약한 기압골(weak trough)이 여러 번 통과하는 경우(22%)가 있으며 이는 장파 내

의 약하게 발달된 기압골이 zonal flow의 빠른 이동 속도로 여러 번 한반도 북쪽 상공을 통과하게 된다(그림 4a). 깊게 발달된 기압골(deep trough)은 zonal flow보다는 남북으로의 meridional flow가 크게 작용함에 따라 편서풍대에 위치하고 있는 한반도 상공을 빠르게 통과하지 못하게 된다. 이에 따라 기압골은 알류산 저기압(Aleutian Low)과 북태평양 고기압의 발달 정도에 따라 한반도 동해상 및 일본 연안에서 정체되는 경향을 보이게 되며, 이러한 정체된 기압골은 풍상측에서 발달되는 또 다른 기압골의 발달과 이동으로 인해 정체현상이 해소되어 이동하게 된다(Moon *et al.*, 2002; Bluestein, 1993). 이와 같이, 발원지에서부터 발달된 기압골이 한반도 인근에 머물게 되면(그림 4b의 4월 8일), 상층으로 수송되어 온 황사는 정체된 기압골 후면의 하강기류를 통해 한반도 중심 상공에 지속적으로 영향을 주게 되는 것으로 볼 수 있으며, 이후 한반도는 풍상측으로부터 이동해 온 또 다른 약한 기압골의 영향을 받게 된다(그림 4b의 4월 12일). 이와 같은 기압골 모습은 전체 장기 사례에 걸쳐 56%의 높은 비율을 차지하고 있으며, 특히 3월과 4월 사례에 긴 지속시간과 함께 나타나고 있다. 또 다른 기압골 이동으로는 그림 4의 (c)에서 볼 수 있듯이 약하게 발달된 기압골이 한반도 중심 상공을 통과한 후 깊게 발달된 기압골이 다시 한반도 상공에 영향을 주는 경우를 들 수 있다(22%). 이 때의 약한 기압골 이동은 뒤이은 기압골 발달과 함께 한반도 인근에서 상대적으로 조밀한 남북 등고선 모습을 보이게 되며, 이에 따라 zonal flow가 발달하게 된다. 즉, 발원지에서 한반도로 강한 풍속의 영향을 받을 경우, 발원지에서 발생된 황사입자가 위도에 따른 강한 풍속에 의해 한반도로 직접 이동하게 됨을 예상할 수 있다.

단기 사례시, 사례 기간 내 약한 기압골의 이동 모습이 상대적으로 높은 빈도(64%)를 보였으며, 이때의 기압골 패턴은 장파 내의 약한 기압골 이동으로 zonal flow의 모습을 나타낸다(그림 4d). 이러한 zonal flow가 점차 강화될 때, 강한 풍속으로 인해 발원지에서 한반도로의 직접적인 수평수송을 예상할 수 있으며, 이후 일정시간 지속되는 zonal flow의 강풍은 황사입자의 빠른 수송과 함께 보다 큰 확산효과를 야기시킬 수 있다. 단기 사례시의 또 다른 기압골 이동 모습인 깊게 발달된 기압골 이동(36%)은

Table 2. Characteristics of trough pattern in long- and short- lasted cases.

Case	Trough pattern	Date	Number of the passed trough (over Korea)	
Long -lasted cases	*Weak trough	March 27 ~ 30, 1998	1	
		May 2 ~ 5, 2001	2	
	Weak after	April 13 ~ 22, 1998	3	
		*Deep trough	April 11 ~ 15, 2000	2
	*Deep trough	March 4 ~ 8, 2001	3	
		March 19 ~ 25, 2001	2	
		April 7 ~ 13, 2002	2	
		Deep after	April 3 ~ 6, 1999	2
	Weak trough	April 5 ~ 14, 2001	4	
	Short -lasted cases	Weak trough	April 26, 1998	1
April 28, 1998			1	
*Deep trough		February 26, 1999	1	
		March 19, 2000	1	
		January 2, 2001	1	
		April 27, 2001	1	
		January 12, 2002	1	
		Deep trough	March 23 ~ 24, 2000	1
			March 1 ~ 2, 2001	1
April 24 ~ 25, 2001		1		
December 13, 2001	1			

* deep trough : It has a well-developed wave in the polar jet with significant vorticity advection in the region of cyclogenesis

* weak trough : It has almost straight jet with weak vorticity advection (Djurić, 1994)

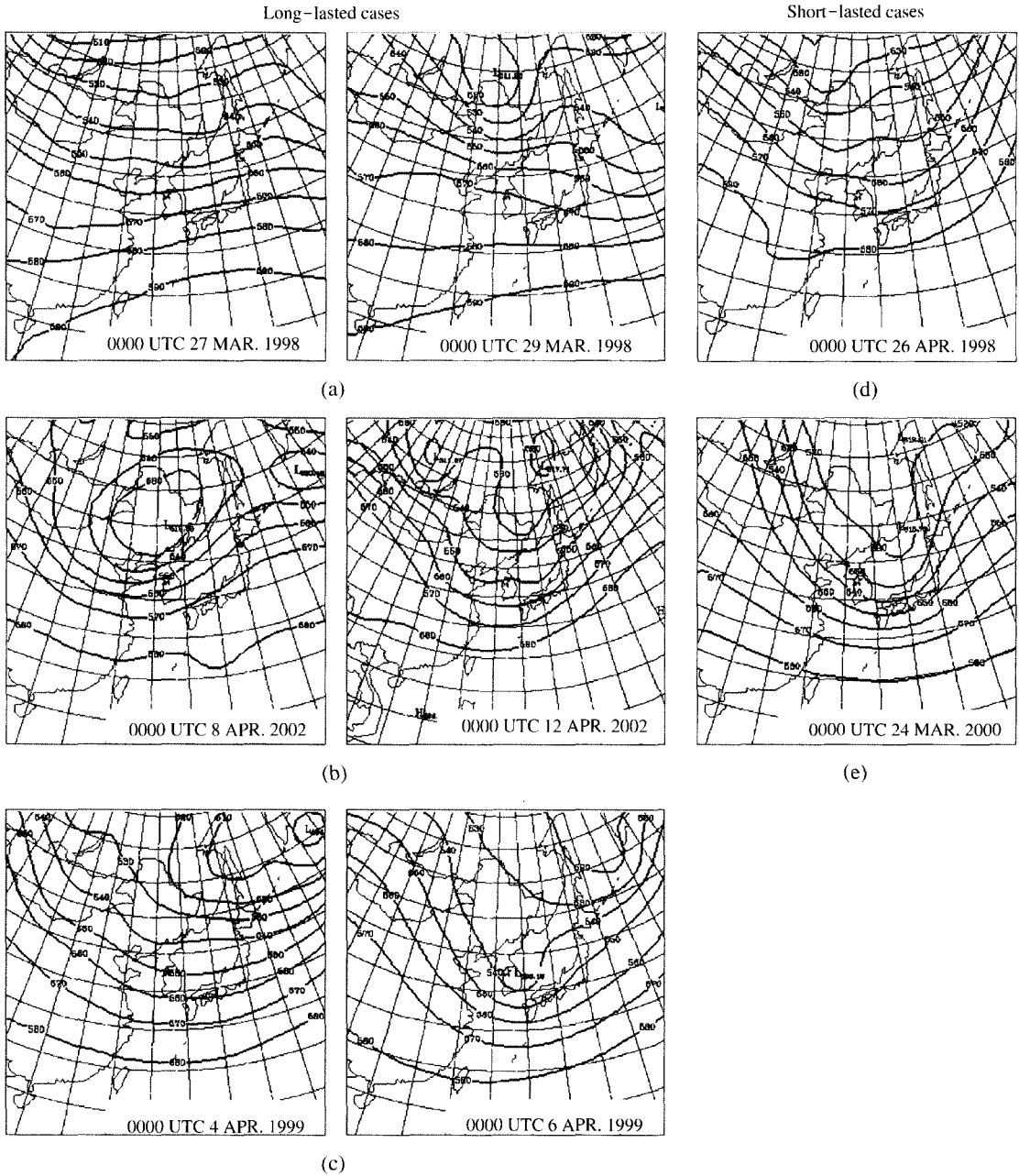


Fig. 4. Horizontal distributions of 500 hPa geopotential height for (a) weak troughs, (b) deep (8 April) and weak trough (12 April), (c) weak (4 April) and deep trough (6 April) pattern in the long-lasting cases (in left column) and (d) weak trough, (e) deep trough pattern in the short-lasting cases (in right column). (<http://www.arl.noaa.gov/ready-bin/arlplot1a.pl>).

발원지로부터 발달된 기압골이 한반도 중심 상공을 통과하게 되나, 장기 사례와 달리 기압골 풍하측의

보다 조밀해진 등고선으로 인해 빠른 이동속도를 보이게 된다(그림 4e). 즉 이러한 단기 사례시의 기압

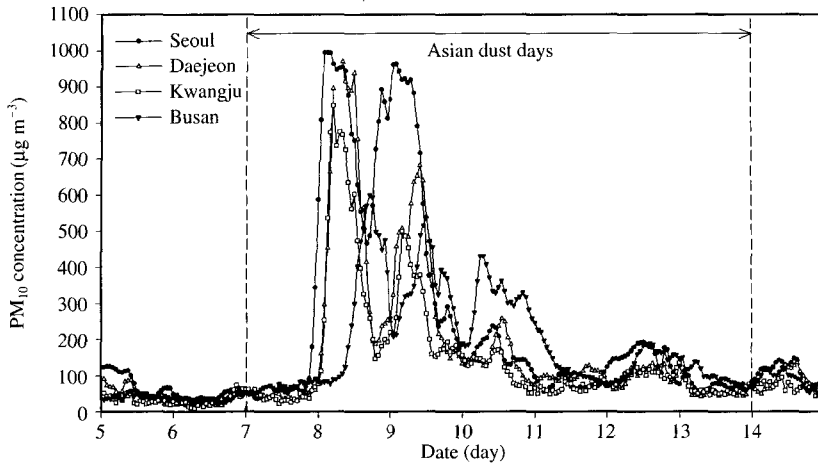


Fig. 5. Daily variations of hourly mean PM₁₀ concentration in Seoul, Daejeon, Kwangju, and Busan for 5-14 April 2002.

골 이동은 상대적으로 빠른 이동속도를 보이게 되며, 기압골 통과 후 또 다른 연속적인 기압골 이동이 없어 사례기간 내 1회의 기압골이 한반도 상공을 통과하게 된다.

4. 사례연구

4.1 장기 사례 (2002년 4월 7~13일) : 정체된 기압골 영향

장기 사례 중 높은 빈도(56%)를 차지한 정체된 기압골 영향하에 있던 사례 중 상·하층 모두 뚜렷한 대기질 농도변동과 함께(그림 3 참고) PM₁₀ 농도가 1,000 µg m⁻³ 정도로 강한 황사 영향(그림 5)이 있었던 2002년 4월 7~13일의 사례를 통해 세부적인 종관기상장 분석을 수행하였다.

그림 5는 사례기간 중 한반도 주요 네 도시의 시간에 따른 PM₁₀ 농도 변화를 나타낸 것으로, 총 4번의 고농도 정점(peak)을 볼 수 있다. 시간적 변화를 보면, 1차 정점은 도시의 지리적 위치에 따라 농도값 및 고농도 정점 발생 시간에 있어 약간의 차이는 있으나 7일 밤부터 시작하여 8일 사이에 최대 약 1000 µg m⁻³ 정도의 고농도를 보인다. 이후, 9일에 최대 약 700 µg m⁻³ 이상의 고농도로 2차 정점이 나타났으며, 10~11일에는 다시 최대 약 500 µg m⁻³ 정도의 3차 정점 분포를 보였다. 마지막으로 12~13일 사이에 상

대적으로 약한 고농도 정점을 나타내었다. 이러한 농도의 일변화 중 오후에 높은 농도를 보이는 반면, 새벽과 오전에 상대적으로 낮은 농도를 보이는 경향은 정용승 등(2001)에서 제시한 야간의 약한 육풍과 지면냉각에 의한 대기 안정으로 대기 중의 황사 입자가 지면에 침전되기 때문으로 볼 수 있다. 아울러, 공간적 변화를 보면, 7일 저녁 서울(995.5 µg m⁻³)의 최고 농도값 분포를 시작으로 대전(969.0 µg m⁻³), 광주(848.3 µg m⁻³)에서 급격한 고농도 증가 모습을 보이며, 이후 8일 정오경에 부산에서 599.4 µg m⁻³의 최고 농도값을 나타내고 있다. 이는 중국 발원지에서부터 황사가 편서풍을 따라 수송되어 올 경우 한반도 주요 네 도시 중 풍하측으로 가장 가까운 서울이 가장 빠른 농도 증가와 함께 최고 높은 농도값을 보이며, 그 다음으로 상대적인 거리의 증가와 함께 대전, 광주, 부산 순으로 농도 증가 분포 모습과 최고 농도값의 감소 경향을 보였다.

그림 6은 강한 황사 영향이 있었던 4월 8일의 에어로솔 지수분포를 나타낸 것으로, 약 4.0 이상의 값을 가진 에어로솔 지수가 한반도 북쪽 상공을 중심으로 뒤덮고 있다. 이는 6일 중국의 내몽골 지역 부근에서 발원되어 시간에 따라 한반도로 이동한 것으로, 지상 부근 PM₁₀ 농도 분포와 함께 볼 때, 8일 한반도는 내몽골 지역에서 발생된 황사입자에 의해 지상과 상층 모두 강한 황사의 영향 하에 있었음을 확인할 수 있다.

그림 7은 상층 기압골 이동과 관련한 중관기상장을 분석하기 위해 사례일의 500 hPa 일기도를 나타낸 것이다. 지상 일기도를 통해 고비사막과 내몽골 지방에서 기압경도력에 의한 강풍의 영향과 함께 황사 발생을 알리는 기상전문을 확인한 6일 1200 UTC

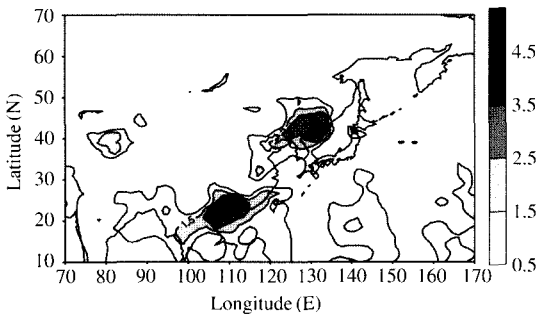


Fig. 6. Horizontal distributions of TOMS aerosol index on 8 April 2002.

의 경우, 발원지 부근 상층 역시 기압골 아래 부분의 조밀한 등고선에 의한 강한 풍속 분포를 보이고 있어 황사 발원지의 상층과 하층은 모두 강한 풍속의 영향에 있음을 알 수 있다. 한반도 내 매우 강한 황사 영향을 초래하였던 8일 0000 UTC의 경우, 발원지 상공에 위치하던 기압골이 북만주 부근에 중심을 두고 있으며, 한반도는 조밀해진 등고선 영향 아래 강한 풍속(약 45 ms^{-1} 이상)을 나타내고 있다. 이때 지상은 한랭전선을 동반한 저기압 후면의 고기압 영향에 들고 있었으며, 상층 기압골의 중심(45°N , 125°E)과 하층 저기압의 중심이 거의 일치하고 있어 저기압 발달의 최성기를 나타내는 것으로, 이후 1200 UTC부터 이러한 기압골과 지상 저기압은 서서히 정체되어 blocking 효과를 보이게 된다. 이는 황사발생시 발원지 상공에서 발달된 저기압 중심이 우리나라 북부 만주지방에서 정체현상을 보일 때 한반도에서의 황사현상이 오래 지속된다는 사례연구 결과(전중

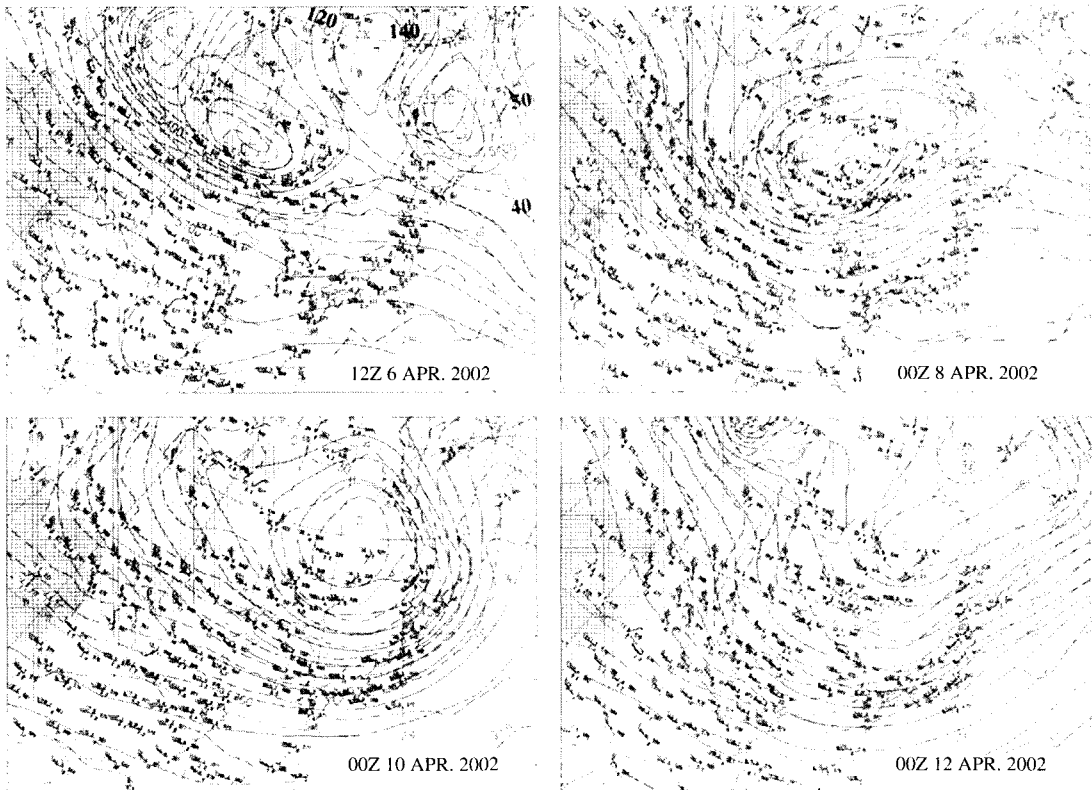


Fig. 7. 500 hPa weather maps on 6, 8, 10, and 12 April 2002.

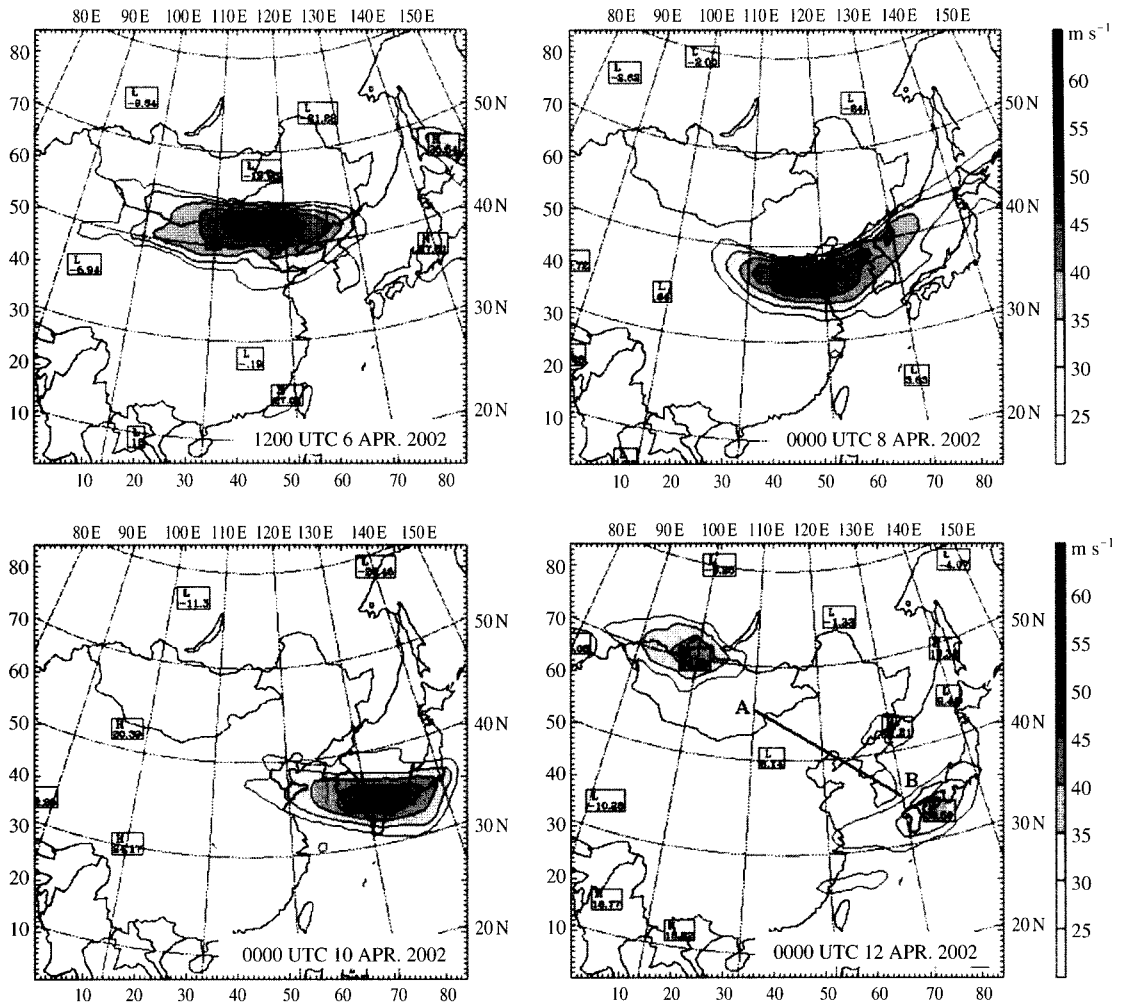


Fig. 8. Horizontal distributions of wind speed at 500 hPa level on 6, 8, 10, and 12 April 2002.

갑 등, 1999; 전종갑, 1991)와 유사하였다. 황사 현상이 약화된 10일 0000 UTC의 경우, 8일부터 한반도 인근에 정체되어있던 기압골 중심이 북동쪽(50°N, 130°E)으로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 몽골지방 북쪽에서는 한랭 공기의 이류와 함께 또 다른 기압골 발달이 시작되고 있음을 알 수 있다. 이 기압골의 점차적인 발달로 1200 UTC에는 발원지로 추정되는 40°N, 100°E 부근에서 또 다른 황사 발생의 일기현상을 일기도를 통해 확인할 수 있었다. 12일 0000 UTC의 경우, 이전 10일의 정체되어 있던 기압골은 찾아 볼 수 없으나 발원지 부근에서 발생된 또 다른 기압골이 북만주 부근으로 이동하여 영향을 주고 있

다.

그림 8과 9는 발원지로부터 한반도로의 기압골 이동에 따른 기류의 수평적 이동경로와 연직적 이동 모습을 살펴보기 위한, 동북아시아 상공 500 hPa에서의 수평 풍속과 발원지에서 한반도까지의 연직단면도의 기온 및 은위, 그리고 IPV 분포를 나타낸다. 그림 8의 4월 6일 1200 UTC 상층 풍속을 보면, 42°N, 118°E의 발원지 부근 상공에서 $55 m s^{-1}$ 이상의 강한 풍속 분포를 보이고 있는데, 이후 한반도에 영향을 준 황사는 발원지 하층에 부유된 황사 입자가 이러한 상층의 강풍대에 편승하여 장거리 수송된 것으로 추정할 수 있다(Chun *et al.*, 2001; Murayama *et al.*,

2001). 8일 0000 UTC 경우, 그림 7에서의 일기도 분석시 기압배치와 비교해서 살펴보면, 한반도는 북만주에 중심을 둔 기압골 영향으로 인해 50 ms^{-1} 이상의 강풍속대가 시간이 지남에 따라 한반도 중심을 통과하게 됨을 알 수 있다. 즉 강풍속대를 따라 이동하는 황사입자를 고려해 볼 때 한반도 상공은 황사를 포함한 상층기류의 직접적 영향하에 있게 된다. 10일 0000 UTC 경우, 한반도 상층은 기압골 후면의 강풍속 영향을 8일 이후부터 지속적으로 받고 있었으며, 이후 점차 풍속이 감소하는 분포모습을 보이고 있다. 따라서, 10일 한반도 상공에는 40 ms^{-1} 정도의 강풍속대 영향하에 있다. 12일 0000 UTC 경우, 이전

의 기압골이 한반도 상공을 통과해 지나간 후 또 다른 약한 기압골이 한반도 상공을 통과함에 따라 상대적으로 약화된 강풍속대 분포(약 35 ms^{-1})를 보이고 있다. 또한 풍속대 중심이 한반도 남해상 약 33°N 부근을 따라 통과하여 강풍속대를 따른 기류의 직접적 영향에서 벗어나 있음을 알 수 있어, 12일 한반도에 영향을 준 황사는 약한 기압골의 이동에 따른 광범위한 편서풍 기류 흐름에 의해 수송된 것으로 볼 수 있다.

그림 9는 그림 8의 굵은 실선(A-B: 45°N , $110^\circ\text{E} \sim 35^\circ\text{N}$, 130°E)으로 표시된 중국대륙 상공에서 한반도로의 연직단면도를 나타낸 것으로, 4월 6일

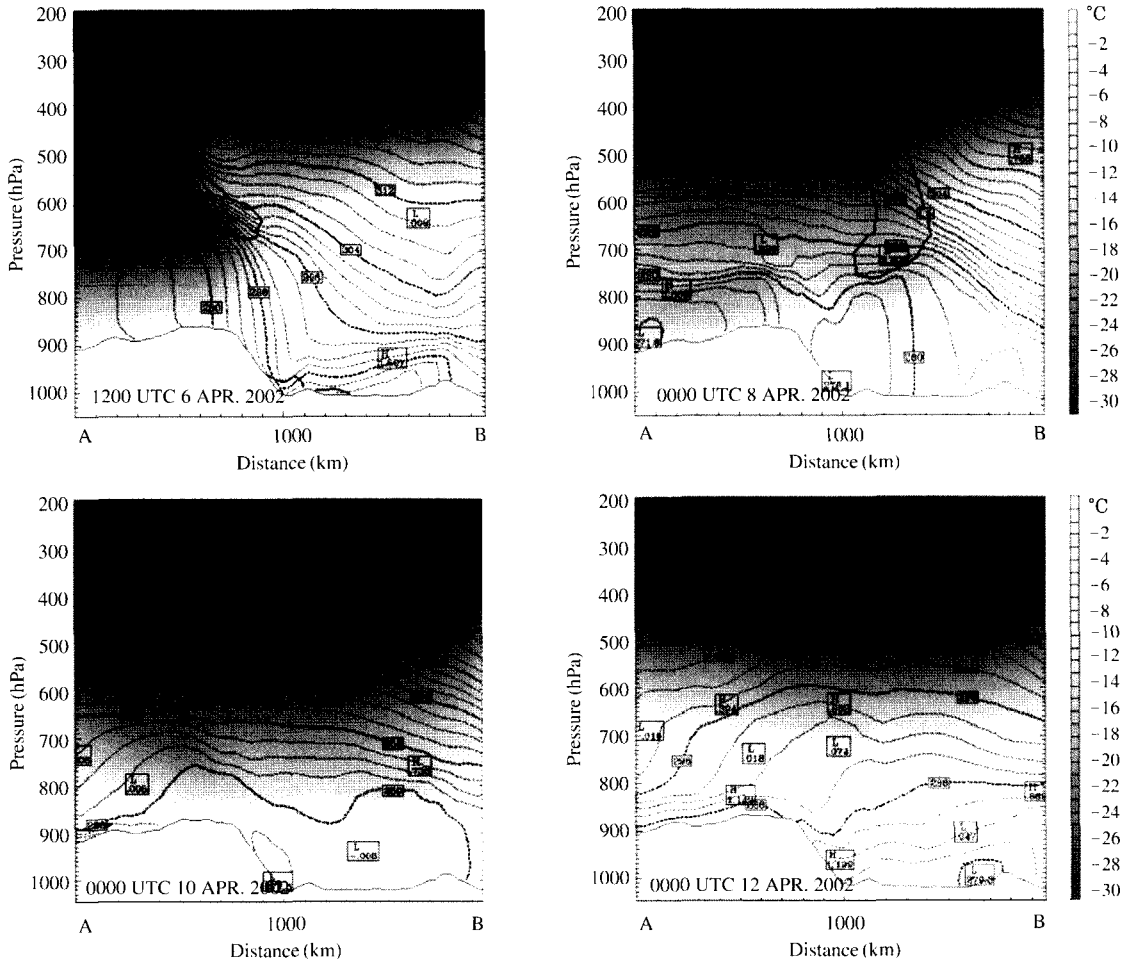


Fig. 9. Vertical distributions of temperature (contour), potential temperature (dashed lines), and 1.5 IPV (thick solid lines) on 6, 8, 10, and 12 April 2002.

1200 UTC 경우, 굵은 실선으로 표시된 상층의 1.5 PVU 분포가 고원지대인 발원지 상공에서 약 650 hPa 고도까지 하강한 것을 알 수 있으며, 이 때 IPV 하강 부근에서 큰 온위 경도를 볼 수 있는데, 이러한 강한 등온위면 경도를 따라 상층의 한랭공기가 이루어져 하강한 것을 온도 분포를 통해 확인 할 수 있다. 즉 한랭이류로 인해 발원지 상공의 불안정한 대기는 고도가 증가함에 따라 온위가 일정한 혼합 상태의 대기 분포 모습을 보이고 있으며, 이러한 불안정한 대기 상태는 발원지에서의 황사발생 조건이 될 수 있다(Uno *et al.*, 2001). 반면 한반도 상공에서는 고도에 따라 온위가 증가하는 성층화된 대기상태를 확인할 수 있다. 8일 0000 UTC 경우, 6일 발원지 상공에 영향을 준 1.5 PVU 분포가 동진하여 서해 상공으로 이동한 후 약 750 hPa 고도까지 깊게 하강한 모습을 보여주고 있다. 기압골 후면 한랭이류의 하강은 등온위면 분포를 통해서도 알 수 있듯이 발원지 상공에서부터 한반도 인근까지 하층의 불안정한 대기 상태를 유발하고 있음을 짐작할 수 있다. 따라서 6일 발원지 지상에서 부유된 황사는 상층까지 발달한 불안정한 대기 상태로 인해 상층에 유입되며, 유입된 황사 입자는 기류에 따라 한반도 상공으로 이동하게 될 것으로 보인다. 이에 한반도 인근 상공에 위치한 하강 기류의 영향으로 인해 상층의 황사 입자가 하층까지 영향을 줄 수 있으며, 또한 6일 발원지 하층의 혼합층 내에 분포한 황사 입자는 등온위면을 따

른 기류와 함께 한반도에 영향을 주게 됨을 예상할 수 있다. 즉, 8일 한반도는 상층에서 하층으로의 연직 기류 수송효과와 함께 혼합층 고도의 수평 기류 수송영향으로 인해 높은 황사 농도를 예상할 수 있다. 10일 0000 UTC 경우, IPV 분포 (1.5 PVU)가 약 400 hPa 고도의 상층에 위치하고 있으며, 이때 상층은 고도에 따라 온위가 증가하는 등온위면 분포를 통해 성층화된 대기 상태를 보여주고 있다. 대기 하층에서는 발원지 상공에서 한반도 상공까지 동일한 온위값 분포를 보이고 있으며, 발원지에서부터 점차 이러한 혼합 정도가 약화되고 있음을 알 수 있다. 따라서 발원지의 지상 부근에서 불안정한 대기 상태로 인해 부유되는 황사의 발생량은 다소 적으며, 동시에 연직 이류의 효과 또한 약화될 것으로 추정된다. 12일 0000 UTC 경우, 1.5 PVU 분포는 이전의 강한 기압골 통과시(8일 0000 UTC)와 비교하여 보다 상층에 머물러 있으며 발원지 지상부근 및 한반도 인근 상공에서 온위 및 기온의 분포가 연직으로 큰 변화없이 거의 성층화된 대기 상태를 보이고 있다.

4. 2 단기 사례 (2000년 3월 23~24) : 빠른 기압골 영향

2000년 3월 23~24일은 단기 사례시 높은 빈도를 차지한 종관패턴의 사례일은 아니지만, 한반도 상공에 강한 황사 영향이 있어 뚜렷한 PM₁₀ 농도변동(그림 3과 10 참고)을 가지며, 장기 사례와 달리 단시간

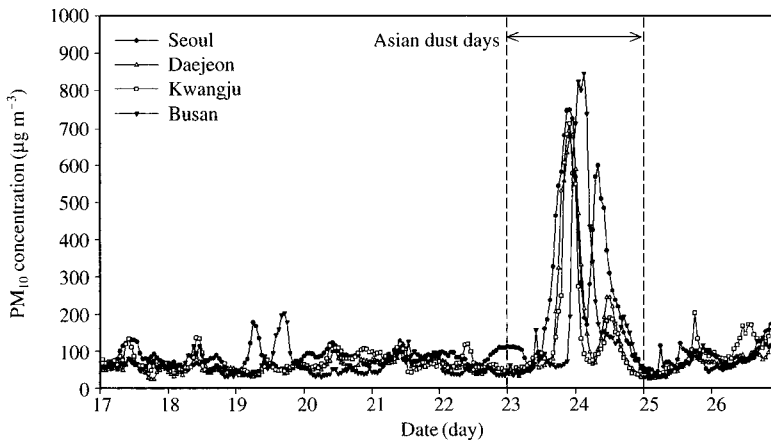


Fig. 10. Daily variations of hourly mean PM₁₀ concentration in Seoul, Daejeon, Kwangju, and Busan for 17–26 March 2000.

내 급격한 농도변동을 보였다. 이러한 급격한 농도변동을 유발시키는 요인 중 하나인 깊게 발달된 기압골 이동 특성을 장기 사례의 기압골 이동 특성과 비교하고, 그 영향 정도를 살펴보고자 본 사례를 선정하였다.

그림 10의 PM₁₀ 농도 시계열 변화를 보면, 사례일인 23~24일 동안 약 700~800 μgm⁻³ 이상의 고농도 정점을 나타낸 후 급격히 감소하는 분포를 보인다. 이 때의 농도 증가는 서울을 시작으로 대전, 광주, 부산 순으로 증가하고 있으며, 부산을 제외한 세 도시에서의 고농도 정점을 보인 시간은 23일 2200~2300 LST 사이로 거의 일치하지만 부산은 24일 0300 LST로 나타났다. 이때 최고 농도값은 서울 748.6 μgm⁻³, 대전 683.0 μgm⁻³, 광주 714.3 μgm⁻³으로 나타났으며, 부산은 845.0 μgm⁻³의 다소 증가된 최고 농도값을 보였다. 이러한 1차 정점 이후 네 도시는 모두 급격히 감소한 후 다시 증가하는 농도변동을 보인다. 이때 다시 증가한 고농도 정점은 1차 정점보다 낮은 값으로 서울(약 550 μgm⁻³)을 제외하면, 약 250 μgm⁻³의 농도분포를 가진다. 즉 단기 사례의 농도변동은 앞서 제시된 장기 사례의 농도변동 특성과 유사하나 이후의 또 다른 연속적인 고농도 발생 분포를 찾아 볼 수 없다.

그림 11은 3월 23일의 에어로솔 지수 분포를 나타낸 그림이다. 22일 중국 대륙 내 42°N, 115°E 부근의 황사 발원지에서 이동한 것으로 추정되는 에어로솔 지수 분포는 23일 한반도 북쪽을 중심으로 약 3.5 이상의 지수를 나타내고 있다. 중국 동안의 산둥반도로부터 한반도 북쪽까지 동서로 길게 분포하고 있어, 23일 한반도 상층은 중국의 발원지로부터 이동되는 황사의 영향이 강하게 나타나며, 지상 부근의 높은 PM₁₀ 농도값과 비교해 볼 때, 상층과 하층 모두 강한 황사의 영향 하에 있음을 알 수 있다(그림 3 참고). 한편, 중국 대륙 남쪽에 나타난 또 하나의 높은 에어로솔 지수는 사막 및 고원지대의 발원지에서 배출된 황사 영향이 아니며, 여러 선행연구에서 biomass burning에 의한 것으로 밝힌 바 있다(Chan *et al.*, 2003; Pochanart *et al.*, 2003).

그림 12는 선정된 대표 단기 사례시의 상층 500 hPa 일기도이다. 그림이 제시되지 않았으나 발생 전일인 22일 1200 UTC의 지상 일기도를 통해, 42°N, 115°E 부근의 내몽골 지역에서 황사 발생을 나타내

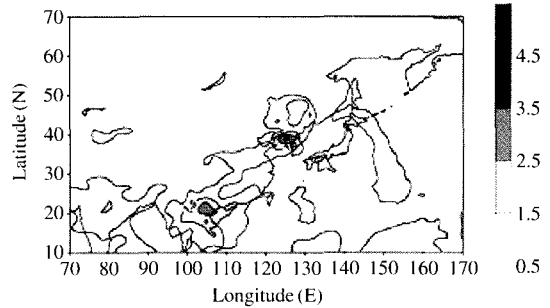


Fig. 11. Horizontal distributions of TOMS aerosol index on 23 March 2000.

는 일기현상을 확인할 수 있었다. 이 지점에서는 한랭전선을 동반한 저기압 후면으로 중국 북서쪽으로 부터의 찬 대륙성 고기압이 점차 발달하여 이동해 오며 따라 조밀해진 등고선 아래 강한 기압 경도를 보이고 있었으며, 약 10 ms⁻¹의 강풍에 의해 지면 부근 건조한 황사 입자의 부유를 예상할 수 있었다. 즉, 이 날의 상층 일기도인 그림 12에서는 발원지 북쪽 상공 부근(50°N, 120°E)에서 발달하는 기압골을 볼 수 있으며, 기압골 발달에 따라 조밀해진 등고선에 의한 강풍(약 40 ms⁻¹)을 볼 수 있다. 이는 특히 기압골의 풍하측에서 보다 강하게 나타나고 있으며, 기압골 후면에서는 한랭이류에 의한 강한 경압구조의 기압배치를 확인할 수 있다.

한반도에 강한 황사현상이 있었던 23일 1200 UTC 경우, 전 날인 22일 발원지 상공에 위치하고 있던 기압골이 북만주 부근을 중심으로 이동하였으며, 이는 한랭이류로 인해 보다 발달하였다. 특히 이러한 기압골 풍하측의 더욱 조밀한 등고선은 기압골의 빠른 동진을 야기시키게 된다(Bluestein, 1993). 반면 지상에서는 한반도 동해 상공에 한랭전선을 동반한 저기압 세력이 남북으로 길게 뻗어있어 한반도는 한랭전선 후면에 위치하고 있었으며, 저기압 후면으로는 중국 대륙에서부터 확장하는 고기압의 모습을 볼 수 있었다. 이 때 한반도 지상에서의 풍속은 약 5 ms⁻¹을 나타내었다.

24일 1200 UTC 경우, 남북으로 깊게 발달된 기압골이 조밀한 등고선에 의한 강풍(35~40 ms⁻¹)과 함께 한반도 상공을 통과함에 따라 한반도는 기압골 후면의 영향 하에 위치하고 있으며, 기압골 중심이 일본 북쪽 해상으로 이동한 것을 알 수 있다. 한편

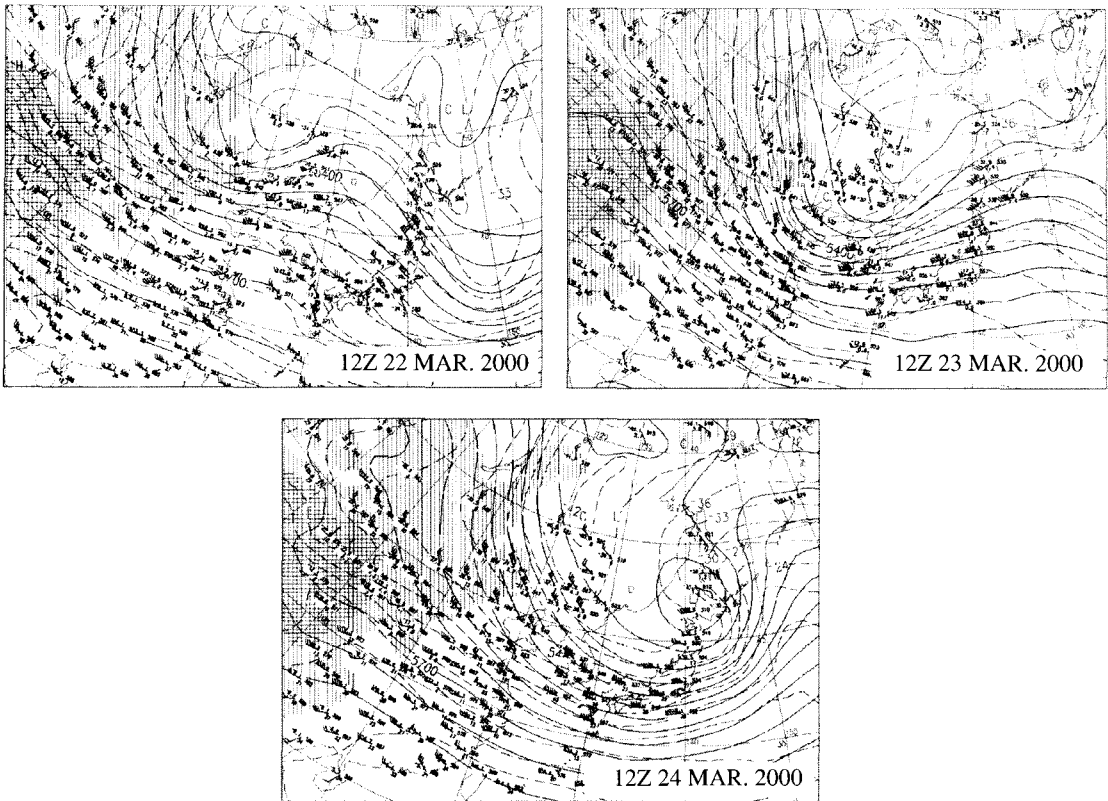


Fig. 12. 500 hPa weather maps on 22, 23, and 24 March 2000.

지상에서는 23일 한반도 상공에 영향을 준 저기압이 일본 북쪽 해상으로 이동해 감에 따라 한반도는 중국 대륙으로부터 확장된 고기압의 가장 자리에 위치하며, 약 $5 \sim 10 \text{ ms}^{-1}$ 의 대체로 빠른 풍속을 나타낸다. 즉 깊게 발달된 기압골 풍하층의 더욱 조밀한 등고선에 의해 빠른 동진을 예상할 수 있으며, 강한 풍속과 함께 한반도 상공을 만 하루에 걸쳐 빠른 속도로 통과한 것이다. 지상에서는 남북으로 깊게 발달된 한랭전선 후면의 확장되고 있는 대륙성 고기압 가장자리 영향으로 강한 풍속을 보여, 사례기간 동안 상층과 하층 모두 강한 풍속의 영향하에 있었다.

그림 13은 500 hPa 수평 풍속을 나타낸 것으로 3월 23일 1200 UTC 경우, 한반도 상공 전체에 45 ms^{-1} 이상의 강한 풍속이 큰 풍속 경도차와 함께 남서-북동 방향으로 분포하고 있으며, 이는 발원지에서부터 한반도까지 발달된 기압골의 이동에 따른 것으로 볼 수 있다. 특히 기압골의 풍하층 부근에서 보다 강한

풍속분포를 확인할 수 있으며, 중국 건조대륙으로부터 이동된 강풍속대가 한반도 중심을 통과함에 따라 기류의 직접적인 영향을 받게 된다. 24일 1200 UTC 경우, 45 ms^{-1} 이상의 강풍속 중심대가 빠른 속도로 한반도 중심을 통과하였으며, 강풍속대의 중심이 보다 남하하여 비교적 완만해진 경도차의 넓은 풍속 분포 경향을 보이고 있다.

그림 14는 그림 13에 표시된 A-B의 실선을 따른 기온, 온위, 1.5 PVU의 연직단면도를 나타낸다. 3월 23일 1200 UTC 경우, 그 전날 발원지 상공에 분포했던 IPV (1.5 PVU) 흐름이 빠르게 동진하여 23일 한반도 상공까지 이동한 것을 알 수 있으며, 이 1.5 PVU는 한반도 상공에서 약 700 hPa까지 남하하여 기압골 후면의 한랭 이류 효과와 함께 강한 하강기류의 영향을 나타낸다. 또한 발원지 상공의 등온위 분포가 한반도 상공까지 거의 동일한 값의 분포를 보임에 따라 발달된 혼합층의 이동을 볼 수 있다. 만

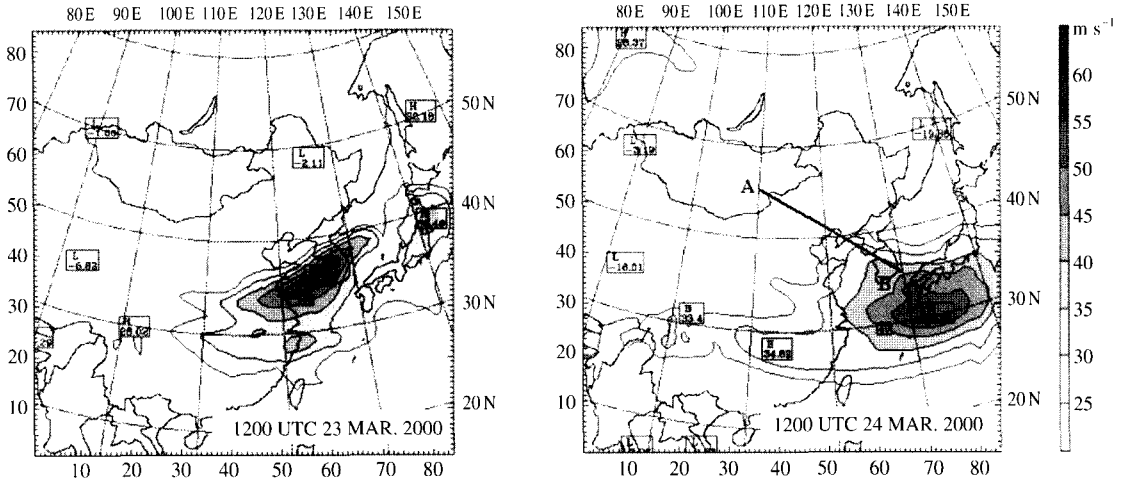


Fig. 13. Horizontal distributions of wind speed at 500 hPa level on 23 and 24 March 2000.

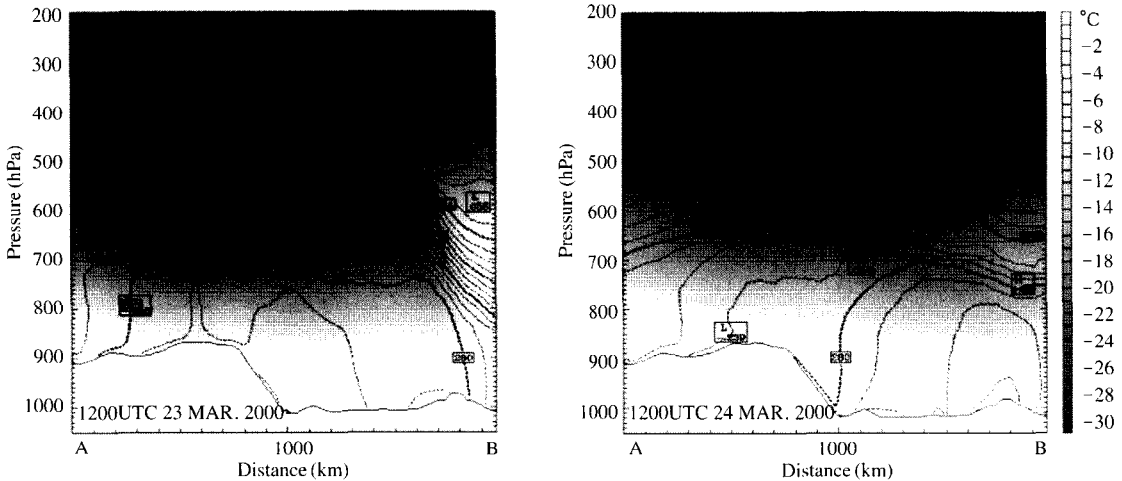


Fig. 14. Vertical distributions of temperature (contour), potential temperature (dashed lines), and 1.5 IPV (thick solid lines) on 23 and 24 March 2000.

약 발원지 상공의 발달된 대기 혼합 효과로 인해 상층까지 유입된 황사 입자를 고려해 본다면, 한반도 인근 상공으로 이동한 기압골 후면 하강 기류의 연직적 수송과 혼합층 내 황사 입자의 수평적 수송을 통해 한반도 내 강한 황사 농도를 예상할 수 있다. 24일 1200 UTC 경우, 23일 한반도 상공에 영향을 준 1.5 PVU의 하강 분포가 완전히 통과했음을 알 수 있다. 이 때 상층에서의 고도별 기온 및 온위의 분포는 하강기류를 야기시킬 만큼 큰 연직 변화가 없으므로 상층에서 하층으로의 강한 한랭 이류 효과를 볼 수

없다. 또한 발원지 상층 500 hPa 이상 고도에서의 성층화된 대기 상태를 통해 단시간 내 또 다른 기압골 발달 및 이동에 따른 기류 내 황사 발생 및 수송은 예상하기 어렵다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 1998~2002년 동안 관측된 장·단기 황사 사례를 대상으로 지속시간에 따른 대기 중

농도변동 및 종관기상장 특성을 분석하였다. 이를 위해 각각 사례별 PM₁₀ 농도 및 TOMS 에어로솔 지수 분포와 상층 기압골 이동 특성을 주요하게 분석하였다.

전반적으로 장기 사례시 대기 상·하층 모두 큰 대기질 변동을 일으키는 사례가 많음을 알 수 있었다. 즉, PM₁₀ 농도와 에어로솔 지수 각각의 최고값과 평균값 차이는 248.7 μg m⁻³과 +2.3으로 뚜렷한 변동 폭을 보였다. 이러한 대기 중 농도변동과 함께 상층 기압골 이동 모습을 분석한 결과, 발원지 상공에서 발달 및 이동되어 단과 형태의 남북으로 깊게 발달한 기압골이 한반도 인근에 영향을 준 후, 또 다른 약한 기압골이 한반도 상공을 통과하는 종관패턴이 전체의 56%를 차지하여 가장 많은 특성으로 나타났다. 한편, 단기 사례시에는 낮은 평균값과 함께 농도 변동 폭이 작은 사례가 많았으며, 이는 시·공간적으로 다소 작은 규모의 황사가 유입됨에 따른 것으로 해석된다. 전 단기 사례의 PM₁₀ 농도와 에어로솔 지수 각각에 대한 최고값과 평균값 차이는 113.9 μg m⁻³과 +0.9로 장기 사례와 비교시 상대적으로 낮은 변동 폭을 나타내었다. 그러나 높은 농도값과 함께 큰 농도변동 폭을 보인 사례 또한 찾아 볼 수 있었다. 이에 따른 상층 기압골 분포 패턴으로는 약한 기압골이 한반도 상공에 영향을 준 사례가 64%, 깊게 발달된 기압골 특성을 보인 사례도 36%로 나타났다. 즉, 지속시간에 따른 대기 중 농도변동은 기압골의 이동 경로 및 분포 특성과 관련성을 가짐을 알 수 있었다.

이와 같은 대기 중 농도변동과 기상장 분포를 보다 면밀하게 살펴보기 위해 특정 장·단기 사례를 분석한 결과, 장기 사례의 경우는 한반도 인근 상층에 깊게 발달된 기압골이 일정시간 정체됨에 따라 기압골 후면 하강기류의 영향을 지속적으로 받게되며, 이때 상층의 황사 농도가 하층까지 영향을 줄 수 있는 기류분포를 보이게 된다. 또한 기압골 발달 및 통과시 강풍속대의 직접적 영향과 함께 대기 하층의 불안정으로 인해 발원지 부근에서부터 한반도까지 발달된 혼합층 내 황사의 수평적 이류의 영향을 예상할 수 있다. 이러한 수평 및 연직적 기류의 이동과 함께 이후의 또 다른 약한 기압골 영향으로 시·공간적으로 뚜렷이 증가 및 감소하는 농도 분포와 함께 지속적으로 증가된 평균 농도 분포를 보이게 된

다. 반면 단기 사례의 경우는 깊게 발달된 기압골이 한반도 상공에 영향을 주게 되나, 기압골 풍하층의 더욱 조밀한 등고선 영향으로 기압골은 빠른 이동속도를 가지며 통과하게 된다. 따라서 기압골 후면 하강기류로 인한 황사 농도의 뚜렷한 증가를 예상할 수 있으나, 이후의 또 다른 농도 증가 분포는 찾아 볼 수 없었다.

결론적으로 한반도 황사시 지속시간과 관련된 종관기상학적 특성 분석은 기상장 모델의 수치모의와 함께 발원지에서 한반도로의 황사 입자를 포함한 기류 이동과정을 보다 상세히 이해 할 수 있게 한다. 그러나 지상부근 황사 농도에 직접적 영향을 줄 수 있는 대기 하층의 기상 특성 및 기류 분석 역시 황사의 지속시간에 영향을 주는 요인으로 볼 수 있어, 이에 관한 연구 또한 이루어져야 할 것이다. 또한 기상장 모델의 수치모의는 황사 발생시간에 대해 황사 입자를 포함한 기류의 이동 모습 추정에 적절하나 실제 황사 입자의 이동 모습을 분석하기는 어렵다. 따라서 발원지에서 발생한 황사 입자가 동아시아 상공의 기류를 따라 수평과 연직적으로 이동하는 분포 모습을 황사 입자의 발생·수송·침적이 고려된 수송모델을 통해 분석하는 과정이 반드시 요구된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 SRC 기후환경시스템연구센터의 지원으로 이루어졌다.

참고 문헌

- 윤용황 (1990) 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 111-120.
- 이재규 (1993) 1993년 4월 22-24일에 관측된 황사현상에 대한 종관분석, 한국환경과학회지, 2(3), 161-177.
- 전영신, 김지영, 부경은, 김남옥 (2000) 겨울철 황사 현상의 특징, 한국대기환경학회지, 16(5), 487-497.
- 전종갑 (1991) 대기 오염 물질 수송과 관련된 동부 아시아 상층 대기의 순환 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 27(2), 180-196.
- 전종갑, 예상욱, 권민호, 정용승 (1999) 황사의 장거리 수송과 관련된 대기 순환 유형의 분류, 한국기상학회

- 지, 35 (4), 575-586.
- 정관영, 박순웅 (1998) 황사의 크기 및 침착량에 대한 수치 모의, 한국대기보전학회지, 14 (3), 191-208.
- 정용승, 김학성, L. Natsagdorj, D. Jugder, and Chen Shou-jun (2001) 1997~2000년에 발생된 황사에 관한 연구, 한국기상학회지, 37 (4), 305-316.
- Bluestein, H.B. (1993) *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes, Vol II. Observations and theory of weather systems*, Oxford university Press, New York, 594 pp.
- Chan, C.Y., L.Y. Chan, J.M. Harris, S.J. Oltmans, D.R. Blake, Y. Qin, Y.G. Zheng, and X.D. Zheng (2003) Characteristics of biomass burning emission sources, transport and chemical speciation of enhanced springtime ozone profile over the troposphere of Hong Kong area, J. Geophys. Res., 108 (D1), 4015-4027.
- Chun, Y., K.O. Boo, J. Kim, S.U. Park, and M. Lee (2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, J. Geophys. Res., 106 (D16), 18461-18469.
- Djuric, D. (1994) *Weather analysis*, Prentice Hall, U.S.A., 175-180.
- Ginoux, P., M. Chin, I. Tegen, J.M. Prospero, B.N. 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.
- In, H.J. and S.U. Park (2002) A simulation of long-range transport of Yellow Sand observed in April 1998 in Korea, Atmos. Environ., 36, 4173-4187.
- Kim, Y.K., H.W. Lee, Y.S. Moon, and S.K. Song (2001) Long-range transport mechanisms of Asian dust associated with the synoptic weather system, J. of the Environmental Sciences, 10 (S-4), 197-206.
- Merrill, J.T., R. Bleck, and L. Avila (1985) Modeling atmospheric transport to the Marshall Islands, J. Geophys. Res., 90 (D7), 12927-12936.
- Moon, Y.S., Y.K. Kim, Kimberly Strong, Y.K. Lim, I.B. Oh, S.K. Song, and J.H. Bae (2002) Asian dust transport during blocking episode days over Korea, J. of the Environmental Sciences, 11 (2), 111-120.
- 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.
- Pochanart, P., H. Akimoto, Y. Kajii, and P. Sukasem (2003) Carbon monoxide, regional-scale transport, and biomass burning in tropical continental Southeast Asia: Observations in rural Thailand, J. Geophys. Res., 108 (D17), 4552-4566.
- Sun, J., M. Zhang, and T. Liu (2001) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate, J. Geophys. Res., 106 (D10), 10325-10333.
- 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.
- Xuan, J. (1999) Dust emission factors for environment of Northern China, Atmos. Environ., 33, 1767-1776.
- Zender, C.S., H. Bian, and D. Newman (2003) Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990's dust climatology, J. Geophys. Res., 108 (D14), 4416-4434.