Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 32, No. 3, June 2016, pp. 256-271
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.256
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

2010년 3월 극심한 황사사례의 발생 및 수송과정에 관한 연구

A Study on the Outbreak and Transport Processes of the Severe Asian Dust Event Observed in March 2010

김 석 우 · 송 상 근[1),*] · 한 승 범[1)]
제주지방기상청 기후서비스과, [1)]제주대학교 지구해양과학과

(2016년 4월 6일 접수, 2016년 5월 4일 수정, 2016년 5월 9일 채택)

Sukwoo Kim, Sang-Keun Song[1),*] and Seung-Bum Han[1)]
Climate and Meteorological Service Division, Jeju Regional Office of Meteorology
[1)]*Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University*

(Received 6 April 2016, revised 4 May 2016, accepted 9 May 2016)

Abstract

The source and transport of the severe Asian dust event (ADE) recently observed in the Korean peninsula were analyzed based on observations (surface weather charts and satellite data) and modeling study (WRF-CMAQ modeling systems). The ADE occurred on 20-21 March 2010 in South Korea with very high PM_{10} concentrations (up to approximately 3,000 $\mu g/m^3$ in Daegu and Jeju). The dominant meteorological conditions affecting the dust outbreak and transport processes were found to be associated with the two synoptic features: (1) strong airflows (i.e., westerlies) induced by a strong pressure gradient resulting from a dense isobar pattern (west-high and east-low) between Tuva Republic and Mongolia and (2) a rapid movement of the strong westerlies merged with airflows generated near Gobi Desert and Inner Mongolia. The merged strong westerlies with a low pressure played a pivotal role in the huge amount of AD and its transport height of 5-8 km. The time and location of dust emissions calculated in the source regions were similar to those observed in the weather charts and satellite image. The ADE simulation mostly showed agreement in the patterns and the concentration levels of modeled dust (including PM_{10}) with those of the observations.

Key words : Asian dust, Strong pressure gradient, Strong westerlies, Low pressure, WRF-CMAQ

1. 서 론

우리나라에 영향을 주는 황사현상의 대표적인 발원지는 우리나라에서 약 5,000 km 떨어져 있고 산맥으로 둘러싸인 타클라마칸 사막, 1,000 m 이상 고도에 위치하고 연 강수량이 200 mm 이하의 건조지역인 몽골 지역, 그리고 중국과 몽골의 경계지점인 고비사막과 황토고원 등으로 알려져 있다(Chun *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2001; Gao *et al.*, 1992; Yoon, 1990). 이러한 황사는 산성화된 토양을 중화시키는 긍정적인 측면도 있지만 (Kim, 2002), 최근 중국의 산업활동 증가와 교통량의

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)64-754-3431, E-mail : songsk@jejunu.ac.kr

증가에 따라 모래먼지의 수송과정에서 중국의 공업/산업지역 및 대도시의 상공에 부유하고 있는 유해 오염물질을 포함하여 유입되기 때문에(Yu *et al.*, 2006), 국민의 건강에 피해를 주는 것은 물론 시정악화로 인한 항공기 운항의 어려움, 먼지입자의 침착에 의한 기기 문제발생 증가 등 다양한 산업과 환경에 큰 피해를 유발한다고 알려져 있다(Korea Environment Institute (KEI), 2004; Kwon *et al.*, 2002; Monn *et al.*, 1997).

황사의 발원지에 근접하고 편서풍의 풍하측에 위치한 우리나라는 지리 · 기상학적인 요인에 의해 황사 영향을 크게 받고 있다. 특히 봄철과 겨울철에 황사 영향이 크고 가을철에도 황사발생 빈도가 조금씩 늘고 있다(Song and Kim, 2005; Kim *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2002; Chun *et al.*, 2000). 황사의 영향범위는 매우 넓어 때로는 우리나라를 넘어서 일본과 북태평양 그리고 북미까지 장거리 수송되기도 하므로, 많은 연구자들은 이 지역을 중심으로 황사 발생 및 수송과정을 규명하고 피해를 예방하기 위한 예측연구를 수행하여 왔다(Tsai *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2008; Uno *et al.*, 2006, 2001; Ginoux *et al.*, 2001; Hacker *et al.*, 2001; Husar *et al.*, 2001). 한편 황사 수치모의의 예측정확도를 향상시키기 위해 오래전부터 모델링 기반의 황사 배출량 산출과 관련한 많은 연구가 진행되어 왔다(Shao *et al.*, 2002; Gillette and Passi, 1988; Westphal *et al.*, 1988). 우리나라 또한 황사 배출량을 임계마찰속도와 발원지의 지표면 특성을 고려하여 산정한 바 있고(Zender *et al.*, 2003; In and Park, 2002; Ginoux *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2000), 이를 기반으로 하여 기상청은 먼저 ADAM (Asian Dust Aerosol Model)(In and Park, 2003) 모델을 통해 황사연구를 진행하였으며, 최근에 와서는 ADAM2 모델을 이용하여 황사의 단기예측 연구를 수행하고 있다(http://www.kma.go.kr/weather/asiandust/prediction.jsp). 이외에도, 일기도를 이용한 종관기상장 분석 연구(Song and Kim, 2007; Kim *et al.*, 2006; Kim and Song, 2004), 라이더, 썬포토메터, 인공위성 등을 이용한 황사의 광학특성 연구(Chun *et al.*, 2001) 등이 있다.

우리나라는 최근 황사의 피해가 점차 커지고 있고 이에 따른 황사 발생에 대한 관심이 고조되고 있기 때문에 황사연구는 지속적으로 필요한 실정이다. 최근 10여 년간(2005~2014년) 한반도에 관측된 황사 사례를 보면(Korean Ministry of Environment, 2015), 본 연구사례일을 제외하고는 최고농도가 1시간 평균 413 (2012년 경기)~2,941 $\mu g/m^3$ (2006년 서울)로 나타났으나, 본 연구의 3월 20일 PM_{10} 농도는 대구 노원동에서 1시간 평균 3,135 $\mu g/m^3$, 제주도 서귀포 동홍동에서 2,985 $\mu g/m^3$을 기록하였다. 이것은 황사경보 1시간 평균 농도에 비해 약 4배 높은 수치이며, 최근 10여 년 동안 가장 강한 황사사례라고 할 수 있다(http://www.ytn.co.kr/_ln/0108_201502231312401101). 본 연구는 사례연구로써, 최근 우리나라에 나타난 최악의 황사사례일(2010년 3월 20~21일)을 대상으로 황사의 발생, 발원지에서 한반도로의 수송되는 모습, 황사 수송시의 종관기상조건 및 농도분포, 그리고 황사의 영향범위 예측 등을 일기도, PM_{10} 농도, 위성영상 자료와 3차원 기상-대기질 모델링의 수치모의 결과를 이용하여 상세하게 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구기간 및 방법

본 연구에서는 최근 나타난 최악의 황사 사례일 2010년 3월 20~21일과 사례일 전후를 대상으로 황사의 발생 및 수송과정 그리고 PM_{10} 농도의 분포특성을 살펴보기 위하여, 연구기간의 동아시아 영역의 종관일기도, 정지궤도위성(MTSAT-1R)의 적외선광학두께지수(IODI: Infrared Optical Depth Index) 영상자료, 우리나라 주요 도시의 시간별 PM_{10} 농도자료 등을 이용하였다. 종관일기도와 IODI 영상자료는 각각 기상청과 국가기상위성센터(http://nmsc.kma.go.kr/)에서 제공받아 활용하였으며, PM_{10} 자료는 환경부 산하 주요 도시 내 대기질 측정지점(특히, 대구의 노원동과 서귀포의 동홍동)에서 관측한 시간별 자료이다. 이 외에도, 연구사례일의 한반도 전역에 대한 PM_{10} 농도 분포 특성을 알아보기 위하여 대기환경연보에서 제공하는 도시 내 지점별 최고농도를 이용하였다(Korean Ministry of Environment, 2011).

수치모델링을 통한 황사의 발생기작과 수송과정을 살펴보기 위하여 3차원 중규모 기상 및 대기질 모델링을 수행하였으며, 수치모의 결과를 이용해 동아시아 영역(한반도 포함)에서의 황사농도에 대한 시 · 공간분

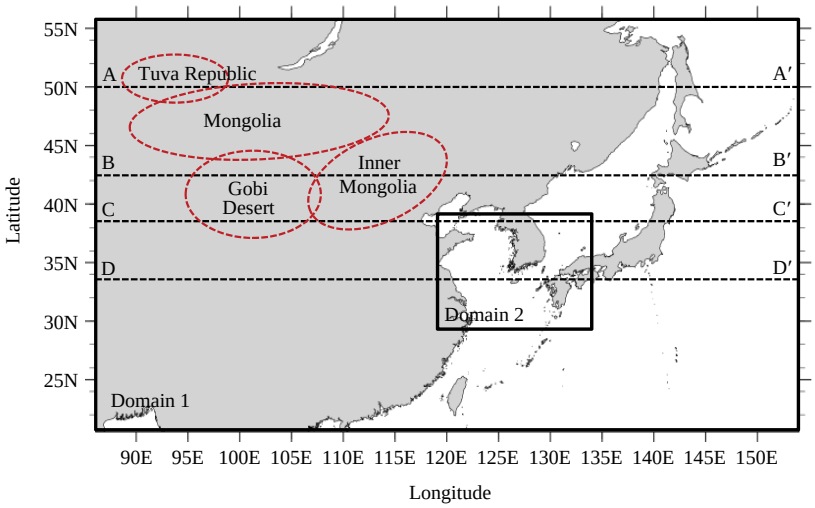


Fig. 1. Coarse (Domain 1) and nested fine domains (Domain 2) for the WRF model. A-A′ (50°N), B-B′ (42°N), C-C′ (38°N), and D-D′ (33°N) indicate the vertical cross-section lines.

포 특성을 분석하였다. 또한 고도에 따른 황사농도의 연직단면도를 분석하여 황사의 발생과 발원지로부터 수송되는 과정에 대해 살펴보았다. 여기서 연직단면도는 황사가 많이 배출되는 주요 발원지(고비사막, 몽골 등)의 위치와 발원지에서 한반도까지 수송되는 과정 등을 자세히 파악하기 위하여 총 4개의 위도(50°N, 42°N, 38°N, 33°N)를 중심으로 단면선을 작성하여 연직단면도를 분석하였다(그림 1). 이외에도, 모델결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 우리나라 주요 도시(서울, 광주, 대전, 부산, 대구, 제주)의 기상관측지점에서 관측된 시간별 기온, 풍속과 모델에서 계산된 최하층 값(Sigma level = 0.999)을 비교분석하였다. 이용된 통계변수는 IOA (Index Of Agreement), RMSE (Root Mean Square Error), MBE (Mean Bias Error)이다. 아울러 우리나라에서 가장 높은 PM_{10} 농도를 기록하였던 대구시(14 지점)와 제주도(3 지점)의 농도 자료를 이용하여 황사 수치모의 결과와의 비교 · 검증을 수행하였다. 본 연구에 이용된 기상 모델과 대기질(황사) 모델에 대한 자세한 설명은 2.2절에 나타낸다.

2.2 모델 구성 및 입력 자료

본 연구에서 기상 및 황사의 수치모의를 위해 이용된 기상과 대기질 모델은 각각 WRF (Weather Research and Forecasting, version 3.6)와 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality, version 5.0.1) 모델이다. WRF 모델은 NCEP (National Center for Environmental Prediction)과 NCAR (National Center for Atmospheric Research)가 공동 개발한 완전 압축성 비정수계 (Fully compressible non-hydrostatic) 방정식을 사용한다. 수평격자는 Arakawa-C 격자체계를 사용하고 연직 격자로는 높이와 지형에 근거하여 새로 추가된 Eulerian 질량좌표계를 사용한다 (Skamarock *et al.*, 2008). 또한 WRF 모델은 NCEP에서 현업에 활용해 온 모델로서 현재 세계적으로 널리 보급되어 많은 연구에 이용되고 있다 (Advanced Research WRF (ARW), 2014). CMAQ 모델은 기체상 및 입자상 오염물질을 모의하기 위한 지역규모 화학수송모델이며, 특히 본 연구에서는 황사 및 PM_{10}에 대하여 직접적인 영향을 가진 다중규모 (multi-scale)의 기상현상과 화학반응을 결합시켜 여러 가지 오염물질의 상호작용을 고려한다 (http://www.cmascenter.org/).

기상모델인 WRF의 수치모의 영역은 그림 1과 같이 30 km (Domain 1)와 10 km (Domain 2)의 둥지격자를 사용하였다. 즉, Domain 1은 경도 124.04°E~129.11°E, 위도 31.87°N~35.25°N이고, Domain 2는 Domain 1을 nested down 하는 데 있어서 1/3 비율로 구성하였다.

기상모델의 초기/경계 조건에 이용된 자료는 NCEP/NCAR에서 제공하는 FNL 재분석 자료(6시간 간격, 1°×1°의 해상도)를 이용하였다. 기상모델의 주요 물리과정에서 해상도에 따른 적운 모수화 방법은 Kain-Fritsch scheme (Kain, 2004), 중규모에 적합한 미세물리과정은 WRF Single-Moment 3-class scheme (ARW, 2014), 장파와 단파 대기복사 과정은 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) scheme과 Dudhia scheme을 사용하였다(Dudhia, 1989). 또한 대기경계층의 조건은 YSU (YonSei University) scheme을 사용하였다(Hong *et al.*, 2006). 모델 수행에서 토지피복도는 USGS (US Geological Service) 30초 자료를, 지형자료는 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 30초 자료를 활용하였다. 모델링 기간은 2010년 3월 16일 00 UTC (09 LST)부터 2010년 3월 21일 18 UTC (22일 03 LST)으로 선정하였으며, 모델 초기조건의 불확실성에 따른 영향을 최소화하기 위하여 첫 하루(24시간)를 spin-up 기간으로 하였다.

CMAQ 모델의 오염물질에 대한 초기/경계 조건에서 모델링 기간의 맨 첫날은 모델 내에서 제공하는 대기오염물질 프로파일 자료를 활용하였고(Stockwell *et al.*, 1990), 그 다음 날(예, 둘째와 셋째 날)의 초기/경계조건 자료는 각 해당되는 날짜의 바로 직전 날(둘째 날은 첫날을, 셋째 날은 둘째 날을 이용)의 결과를 이용하여 수행하였다. CCTM (CMAQ Chemical-Transport Model) 과정에 이용된 에어로졸 메커니즘은 AERO-05, 화학메커니즘은 SAPRC-99을 활용하였으며, 수평 및 연직확산에는 각각 multiscale과 ACM2 (Asymmetric Convective Method 2) scheme, 수직이류는 PPM (Piecewise Parabolic Method) scheme을 사용하였다(http://www.cmaqmodel.org/).

황사 배출량을 산정하기 위해서 먼저 WRF의 출력자료를 CMAQ의 입력형태로 바꿔주는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) 과정을 수행하고 이를 통해 얻어지는 기상자료를 활용하여 각 발원지의 지표특성과 토양에 따라 다르게 나타나는 임계마찰속도(u_{*t}, threshold friction velocity)를 계산하였다. 발원지 토양은 중국의 토양도와 몽골의 토양정보 등을 이용하여 고비(Gobi), 모래(Sand), 황토(Loess), 혼합(Mixed) 총 4가지로 구분하였다(In and Park, 2002). 또한 황사 발원지의 24개 식생정보(USGS, US Geological Survey)를 적용하고 이에 따른 감쇄인자를 고려하여 최종 배출량(F_a)을 산정하였다(Lee, 2009). 마찰속도(u_*)가 임계마찰속도(u_{*t}) 이상의 값을 갖는다는 조건하에 최종적으로 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$F_a = \sum_i (1 - f_i R_i) \times 5.2 \times 10^{-14} u_*^4 (u_* \geq u_{*t}) \quad (1)$$

여기서 u_{*t}: 임계마찰속도, f_i: 발원지의 i번째 식생부분값, R_i: i번째 식생부분의 감쇄인자를 의미한다. 이외에도 본 연구에서 이용된 인위적 배출량 자료에 대해, 동아시아 영역은 CGRER (Center for Global and Regional Environmental Research)에서 제공하는 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-phase B) (Zhang *et al.*, 2009), 우리나라 남한영역은 국립환경과학원에서 제공하는 국가 배출량 인벤토리 CAPSS (Clean Air Policy Support System)를 활용하여 시 · 공간 분포를 분석하였다(National Institute of Environmental Research, 2010).

3. 결과 및 고찰

3.1 관측 자료를 이용한 황사의 발생 및 수송과정 분석

그림 2는 본 연구사례일인 2010년 3월 20일~21일에 나타난 전국 주요 도시의 시간별 PM_{10} 최고 농도(그림 2(a))와, 대구의 노원동과 제주도 서귀포 동홍동 지점에서 관측된 PM_{10} 농도의 시계열(그림 2(b))을 나타낸다. 전국 주요 도시 중 최고의 PM_{10} 농도가 관측된 곳은 대구 노원동으로 약 3,100 μg/m^{3}이었고, 그 다음으로 서귀포 동홍동에서 3,000 μg/m^{3}에 이르는 수치를 나타냈다. 반면, 충남의 모종동과 서울의 대치동에서 각각 약 900 μg/m^{3}과 600 μg/m^{3}으로 가장 낮은 농도를 보였다(그림 2(a)). 가장 고농도가 관측된 대구의 노원동과 서귀포 동홍동의 PM_{10} 농도 시계열을 보면(그림 2(b)), 3월 20일 06시부터 20일 16시 이전까지는 대략 300 μg/m^3 이하의 PM_{10} 농도가 관측되었다. 이후 20일 19시~20시에 농도가 급증하여(약 1,000~2,000 μg/m^3 이상) 20시~23시 사이에 최고 수치(약 2,500~3,000 μg/m^3)를 보였으며, 다시 그 이후로 급격히 감소하였다. 또한 서귀포 동홍동의 경우 대구 노원동에 비해 황사영향으로 인한 농도 증가 시각이 조금 빠르고 상대

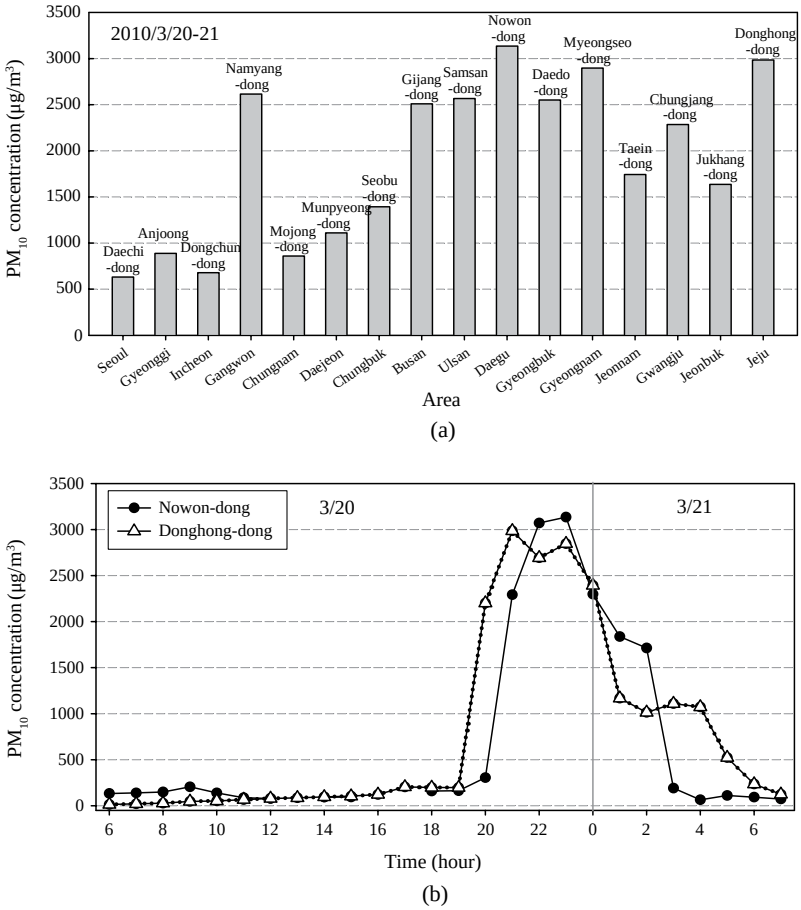


Fig. 2. (a) The highest PM_{10} concentrations (hourly mean) recorded in several cities and districts of South Korea and (b) time series of hourly mean PM_{10} concentrations observed at Nowon-dong (Daegu) and Donghong-dong sites (Jeju-do) during an Asian dust event (20～21 March 2010).

적으로 오랜 시간 지속되는 특징을 보였다. 이외에도 황사영향이 거의 없는 20일 오전시간대에는 노원동 지점이 동홍동 지점보다 조금 높은 PM_{10} 농도가 관측되었는데, 이는 일반적인 대도시 패턴으로 대구지역이 제주도와 비교하여 다소 대기질이 좋지 않음을 시사한다.

그림 3은 황사사례일을 포함한 전후 시간대에 대한 일기도 및 위성영상을 나타낸다. 위성영상은 정지기상위성 MTSAT-1R의 적외광학두께지수(IODI) 영상이며, IODI는 청천지표복사와 황사층을 통과한 복사의 비율을 이용하여 황사의 강도를 지수로 나타낸다(Jung *et al.*, 2014). 3월 18일 18시(09 UTC) 일기도를 보면 바이칼 호 서남쪽 부근의 등압선 패턴이 조밀한 지역(투바공화국과 몽골의 서쪽 경계, 45～50°N, 90～95°E 부근)에서 강한 기압경도력이 형성되고(서고동저 기압배치), 이는 황사먼지를 상층으로 부유시킬 수 있는 강한 기류(약 10 m/s)를 유발한다(그림 3(a)). 한편, 위성영상에서는 이 시간대에 황사신호가 구름에 가려져 잘 나타나지 않았다. 이때 고기압 중심부와 저기압 중심부의 기압 차이는 약 40 hPa이었다. 19일 09시(00 UTC)에는 18일 18시에 나타났던 서쪽의 고기압이 발원지 부근에 위치한 저기압을 밀어내면서 빠르게 이동하고 있고, 위성영상에서도 황사신호가 나타났다(그림 3(b)). 이후 19일 18시의 일기도와 위성영상에서는 고

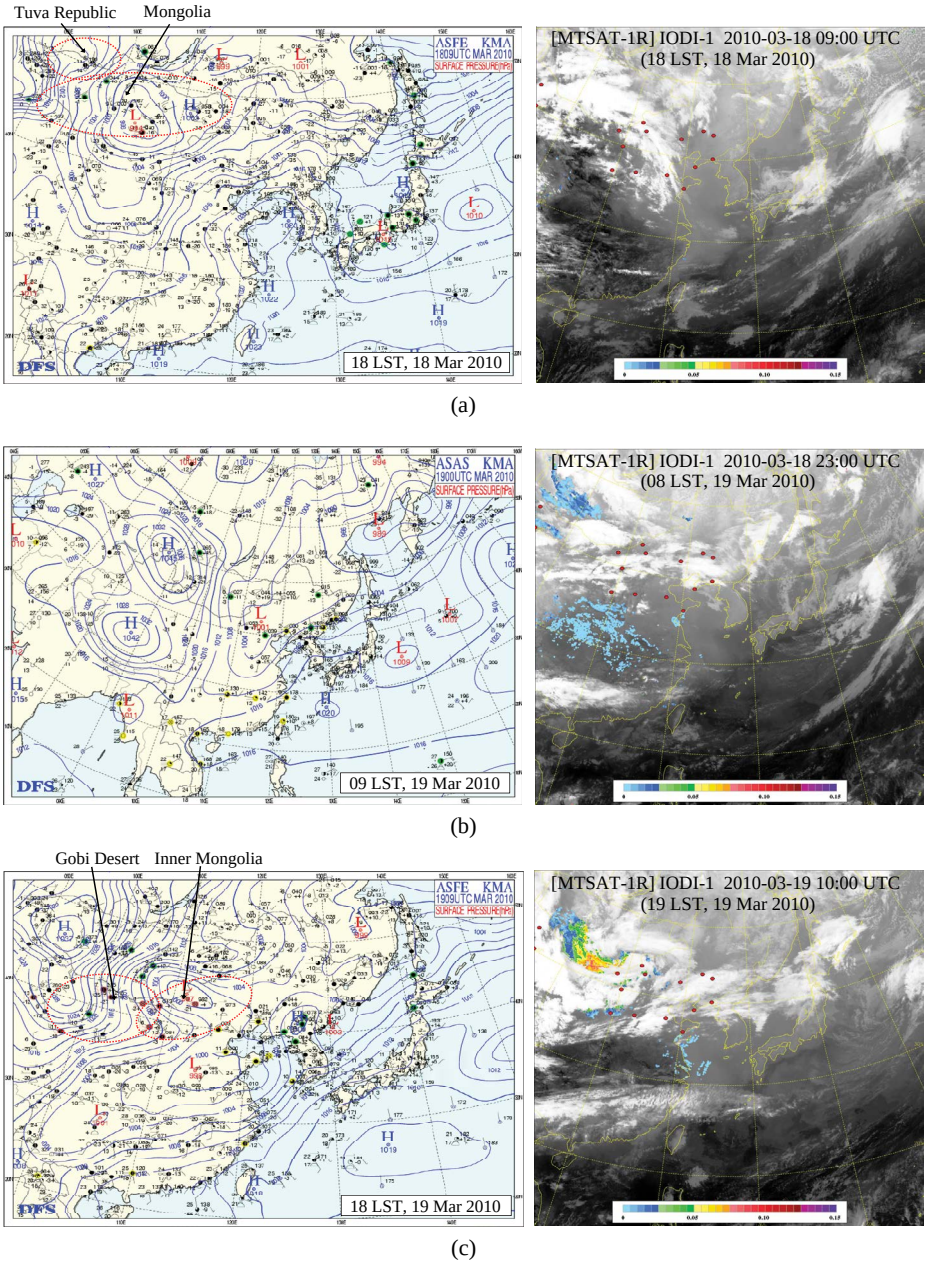
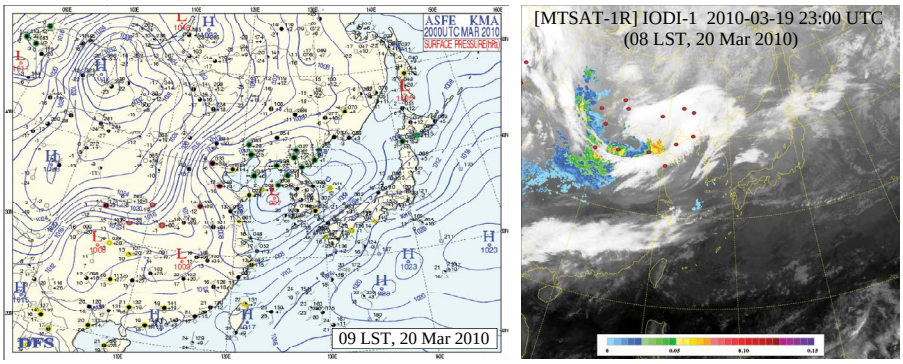
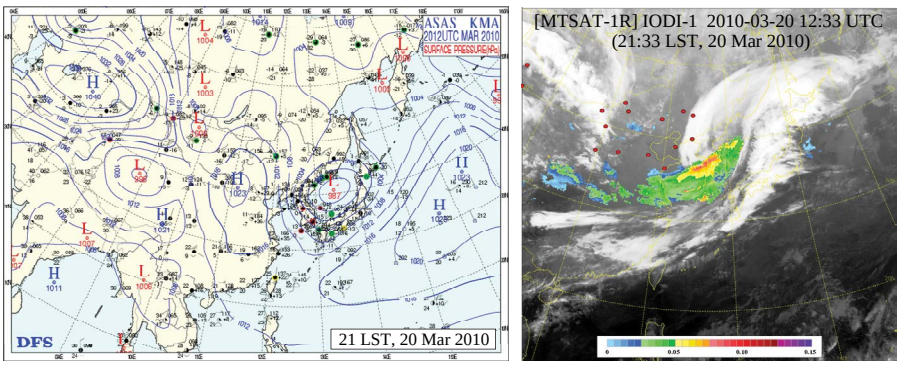


Fig. 3. Surface weather charts and MTSAT-1R IODI (Infrared Optical Depth Index) image in East Asia at (a) 18 LST on 18 March, (b) 09 LST on 19 March, (c) 18 LST on 19 March, (d) 09 LST on 20 March, (e) 21 LST on 20 March, and (f) 09 LST on 21 March 2010.

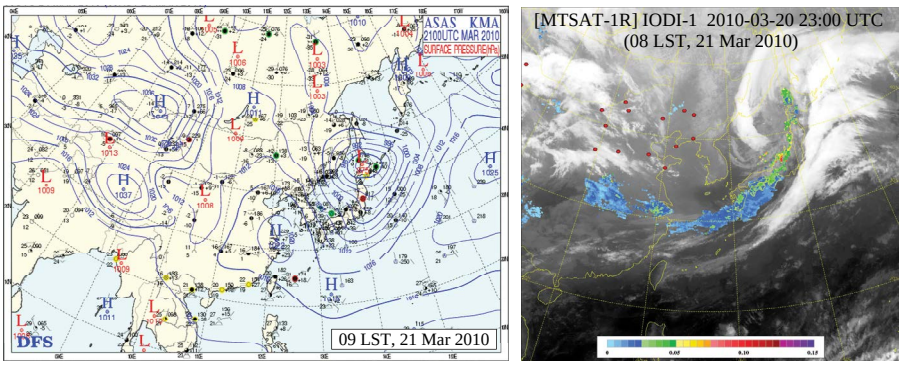
비사막과 내몽골 부근에서 조밀한 등압선과 함께 강한 기류 및 황사신호가 각각 나타났으며, 18일의 서풍 기류와 합쳐져 더 빠르게 남동진하는 모습을 확인할 수 있다(그림 3(c)). 이렇게 합쳐진 강한 기류는 다량의 황사먼지를 일으키는 원인이 될 수 있으며, 또한 발원지 주변의 강한 저기압은 황사먼지를 높은 고도까지 부양



(d)



(e)



(f)

Fig. 3. Continued.

시킬 수 있다.

20일 09시경에는 동중국에 위치하는 공업단지 주변까지 황사먼지가 이동되는 모습이 기압배치의 이동과 함께 관측되었으며, 20일 21시경에는 저기압 후면을 따라 강한 황사가 광범위하게 남한 전체를 완전히 뒤덮는 모습을 확인할 수 있다(그림 3(d)~3(e)). 이때 저기압 후면의 상층에 존재하는 강한 기압골이 남한지역을 통과하면서 상층기류의 수렴에 의한 하향운동이 발생하게 되고, 이로 인해 하층대기는 물론 지상부근까지 황사농도가 증가하는 원인이 된 것으로 해석된다

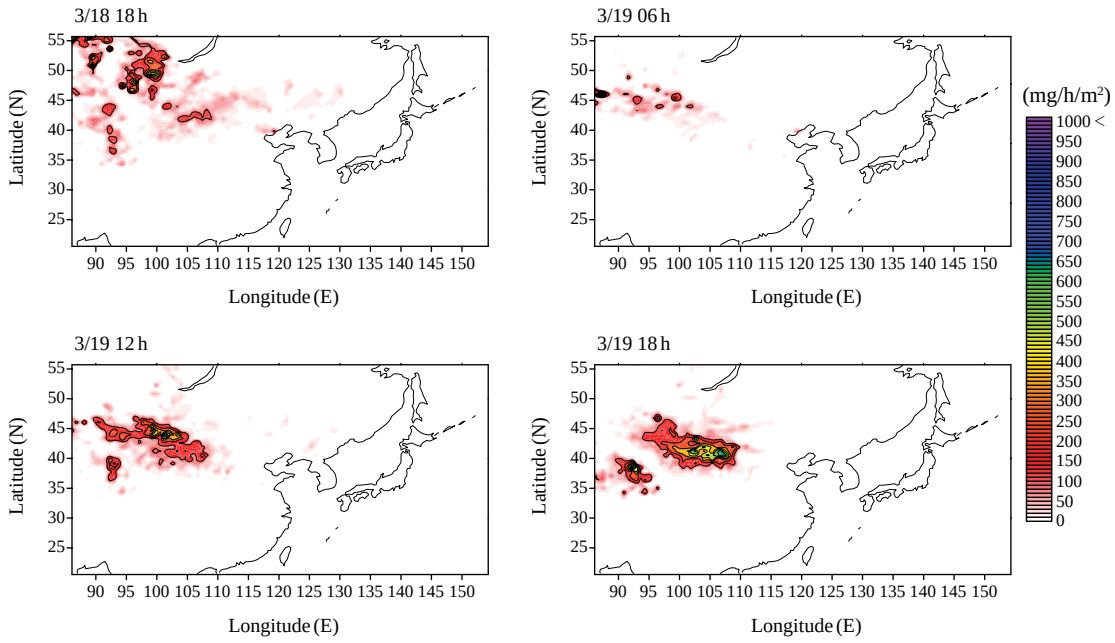
(Uno *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2002). 이러한 종관기상 특징은 2010년 3월 20일 늦은 오후 또는 야간에 우리나라의 주요 도시에서 PM_{10} 농도가 급증한 주요 원인이 되어 그 시간대에 고농도 PM_{10}이 관측되었으며, 또한 최고농도가 나타나는 시간대도 대체로 유사하였다(그림 2). 한편, 21일 09시에는 우리나라를 완전히 벗어나 일본방향으로 황사먼지가 이동하였음을 알 수 있다(그림 3(f)).

본 황사사례일(3월 20~21일)의 종관기상 특징은 주요 발원지인 고비사막(및 주변지역)에서 발생하여 우리나라로 수송해오는 전형적인 패턴(약 3일 내외, 약 1~3 km 및 3~5 km 수송고도)과는 조금 다르다(Park, 2014; Moon *et al.*, 2011; Yoon, 1990). 요약하면, 3월 18일 투바공화국과 몽골의 서쪽 경계지점에서 조밀한 등압선 패턴으로 인해 강한 기압경도력이 발생하고 이는 강한 기류(서풍)를 유발하게 된다. 이러한 강한 서풍 기류가 다음 날 고비사막 및 주변지역에서 발생한 기류와 서로 합쳐져 비교적 높은 고도에서 매우 빠른 속도(약 1~2일)로 남동진하는 패턴이다. 또한 바이칼호의 서쪽에 위치한 강한 고기압이 남동쪽에 위치한 저기압을 빠르게 밀어내면서 황사를 포함한 강한 기류가 우리나라로 유입된 것으로 사료된다(Jung *et al.*, 2014). 국내 다른 황사사례일의 발원지 주변 저기압과 고기압의 기압 차이는 대략 20~30 hPa (Yang, 2016; Kang *et al.*, 2012; Moon *et al.*, 2011)인데, 본 연구사례일의 기압 차이는 약 40 hPa (그림 3(a)~3(c))으로서 상대적으로 기압경도력이 크게 작용하고 우리나라 쪽으로 기류가 이동하면서 고비사막 및 내몽골 주변의 기류와 합쳐져 보다 많은 황사 부유/배출과 보다 빠르게 황사가 이동된 것으로 판단된다. Moon *et al.* (2011)에 의하면, 2009년 3월 17일 황사 사례는 상공 1~3 km를 통과하면서 상대적으로 약한 황사가 나타났다는 연구결과를 발표한 바 있다. 한편, 일기도와 위성영상은 구름 등의 요인으로 인해 황사 발생 위치와 수송과정을 정확하게 파악하는 데 일부 한계가 있어, 본 연구에서는 3차원 기상-대기질 수치모델링을 수행하였고 그 결과 분석을 3.2절에 나타낸다.

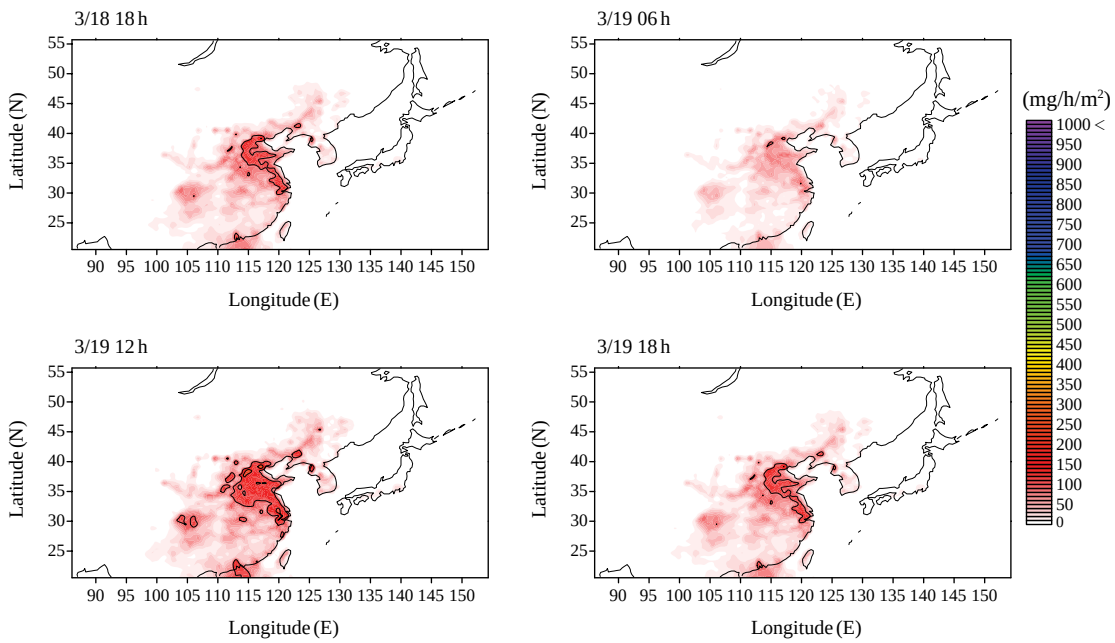
3.2 황사 발생 및 수송과정의 수치모의

수치모의 분석에 앞서 그림 4는 임계마찰속도(u_{*t})를 이용하여 산출한 황사 배출량과 INTEX-B (동아시아 영역) 및 CAPSS (남한 영역)를 활용한 인위적 PM_{10} 배출량의 시 · 공간 분포를 나타낸다. 황사 배출량 분포를 보면(그림 4(a)), 3월 18일 12시부터(그림 제외) 18시경에 바이칼호 서남쪽 부근(45~50°N, 90~95°E 부근)에 황사먼지가 배출되었다(최고 약 1,000 mg/h/m^2). 이 지역은 몽골 서쪽 부근과 투바공화국의 경계지점으로 크게 알려지지 않은 사막이 위치하고 있다. 이후 19일 06시에 배출이 조금 약해지다가 다시 19일 12시부터 18시까지 고비사막과 내몽골에서 강한 황사배출(최고 약 1,300 mg/h/m^2)이 나타났다. 특히 배출면적과 강도로 봤을 때 19일 18시경에 가장 많은 양의 황사먼지가 배출된 것으로 추정된다. 전반적으로 황사 배출량의 시 · 공간 분포는 일기도와 위성영상의 분포 패턴과 유사한 것으로 사료된다. 그림 4(b)의 인위적 PM_{10} 배출량 분포를 보면, 전체적으로 중국 동쪽의 공업단지 부근에서 엄청난 양의 배출과 한반도에는 상대적으로 적은 양이 배출되었다. 예를 들어, 3월 19일 06시에는 50 mg/h/m^2 정도의 다소 적은 배출량을 보이는 반면, 19일 12시경에 약 3배가량 늘어난 100~150 mg/h/m^2 정도의 많은 배출량이 추정되었다. 또한 중국공업단지 등에 의한 PM_{10} 배출량은 황사발원지에서의 배출량에 비해 약 10배 정도 낮은 수치를 보이므로, 우리나라의 PM_{10} 고농도 현상은 중국 발원지의 황사에 의한 영향이 매우 클 것으로 예상된다.

그림 5는 수치모의를 통해 추정된 황사 농도와 바람벡터 및 풍속의 시 · 공간분포를 나타낸다. 2010년 3월 18일 18시경에 다량의 황사가 배출되었던(그림 4) 바이칼 호의 서남쪽 부근(투바공화국과 몽골지역의 경계지점)에서 고농도의 황사(최고 8,000~9,000 μg/m^3 정도)가 추정되었으며, 19일 18시에는 고비사막, 내몽골, 황토고원 부근에서 다시 매우 높은 농도(최고 약 9,500 μg/m^3)의 황사가 모의되었다. 또한 3월 19일 18시 이후부터 20일 12시 사이에 황사의 공간분포는 계속 남동진하여 우리나라 서해 부근으로 빠르게(약 10 m/s 이상) 다가서고 있다(약 3,000~3,500 μg/m^3). 이후 20일 22시경에는 황사(약 3,000 μg/m^3)가 우리나라 전역(특히 남부지역과 제주도)을 뒤덮는 공간분포였으며(그림 5의 맨 아래), 그 이후로 서서히 우리나라를 완전히 벗어나 일본 방향으로 진행하게 된다(그림 제외). 이러한 황사의 수송과정은 그림 3의 종관패턴처럼 바이칼 호 서남쪽에서 발생한 강한 서풍 기류와 고비사



(a)



(b)

Fig. 4. Spatial distributions of (a) hourly Asian dust emissions (mg/h/m^2) calculated by threshold friction velocity (u^*_t) and vegetation information, as shown in Eq. (1) and (b) PM_{10} emissions derived from INTEX-B (for East Asia) and CAPSS (for South Korea) at the surface layer of the study area.

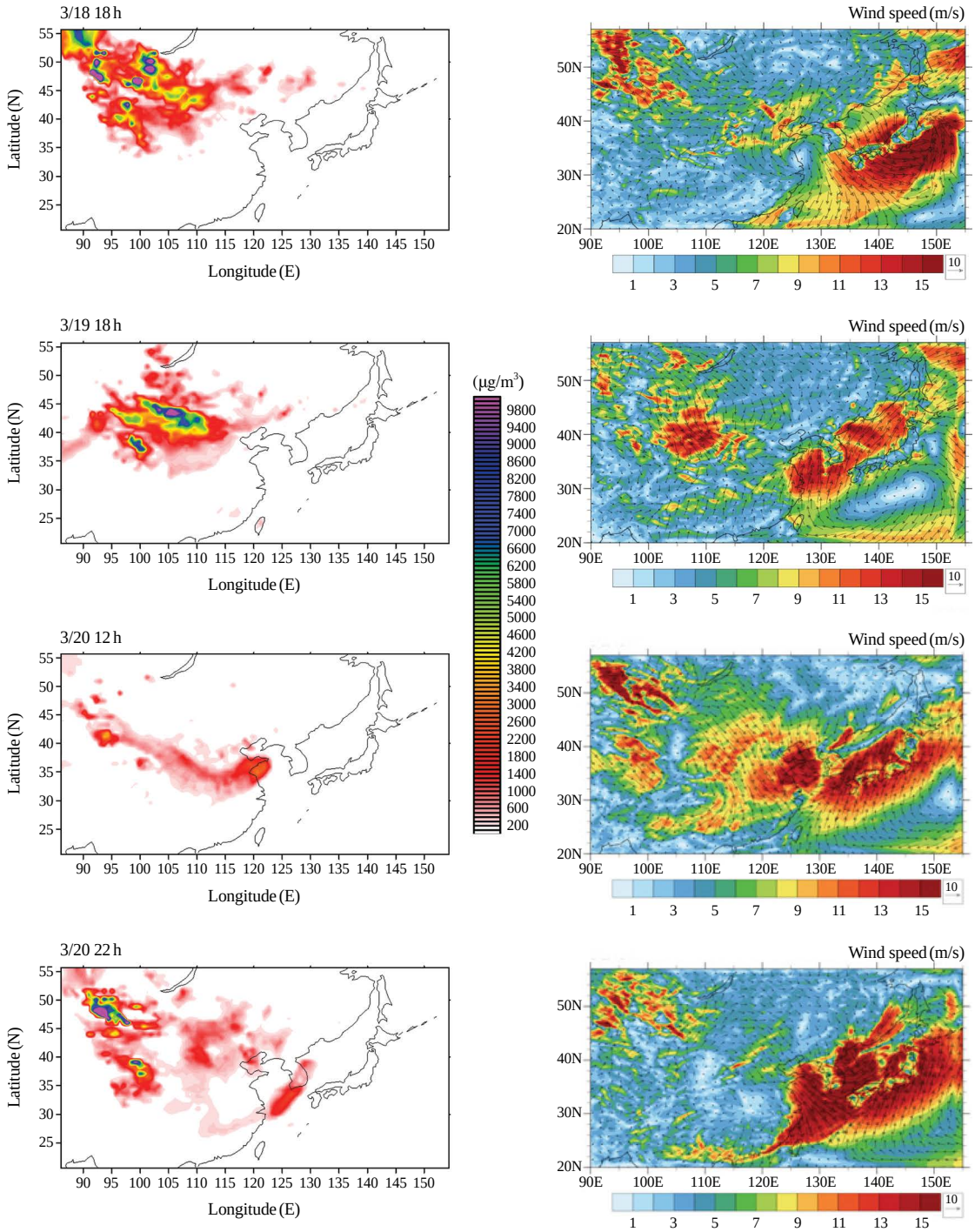


Fig. 5. Spatial distributions of hourly mean Asian dust concentrations (μg/m^3), horizontal wind vectors (m/s, arrow), and wind speed (m/s, contour) simulated by the WRF-CMAQ modeling system in the study area.

Table 1. Statistical evaluation of meteorological variables between observations and model-predicted values: results compared at several monitoring sites in major cities of Korea during the simulation period (01 LST 18 March ~ 00 LST 22 March).

City	Air temperature			Wind speed		
	IOA[a]	MBE[b] (°C)	RMSE[c] (°C)	IOA[a]	MBE[b] (m/s)	RMSE[c] (m/s)
Seoul	0.82	−3.12	3.37	0.81	1.18	1.68
Gwangju	0.90	−2.51	3.17	0.60	2.01	3.08
Daejeon	0.85	−2.59	3.65	0.46	3.66	4.44
Busan	0.84	−3.60	4.00	0.78	2.33	3.44
Gangneung	0.69	−4.89	5.27	0.40	4.97	5.93
Daegu	0.85	−3.35	4.73	0.58	3.49	4.29
Jeju	0.87	−2.12	3.07	0.74	2.29	3.69

[a] IOA: index of agreement.
[b] MBE: Mean bias error.
[c] RMSE: root mean square error.

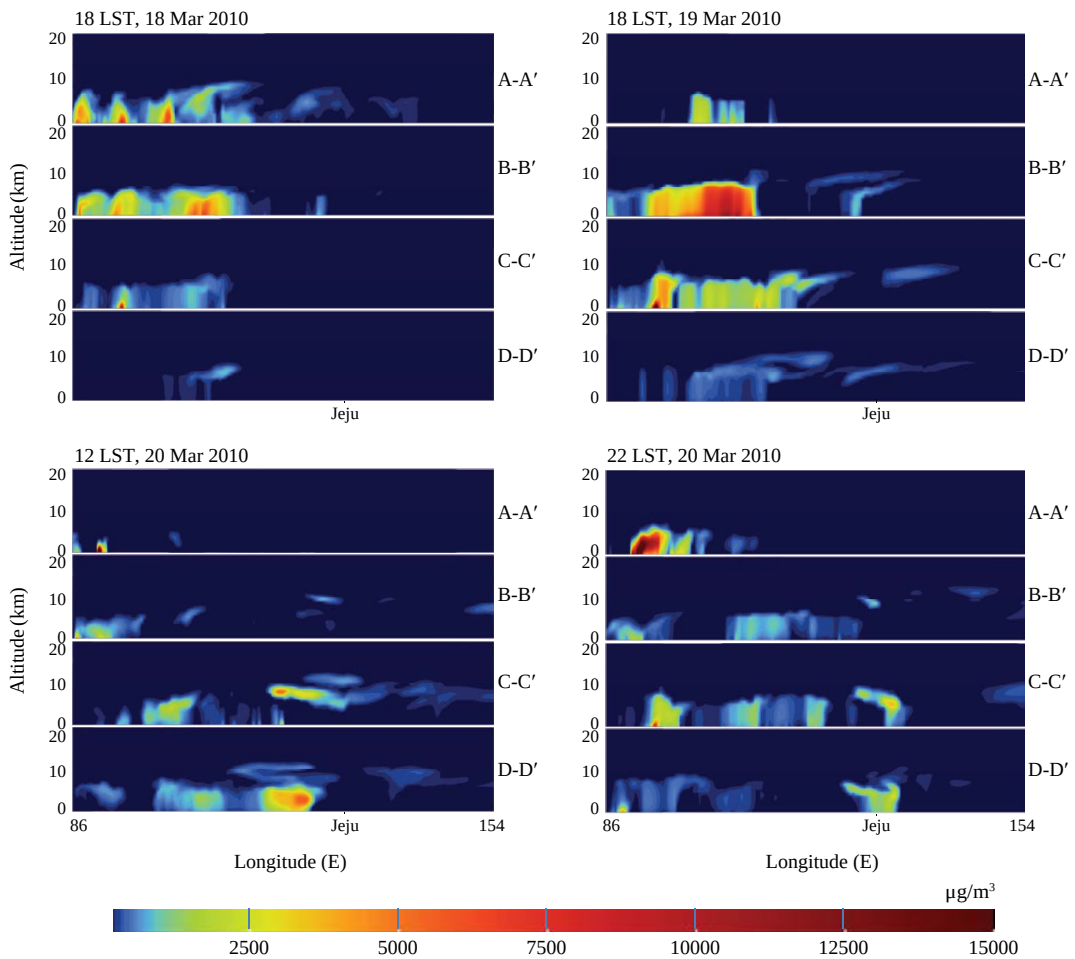
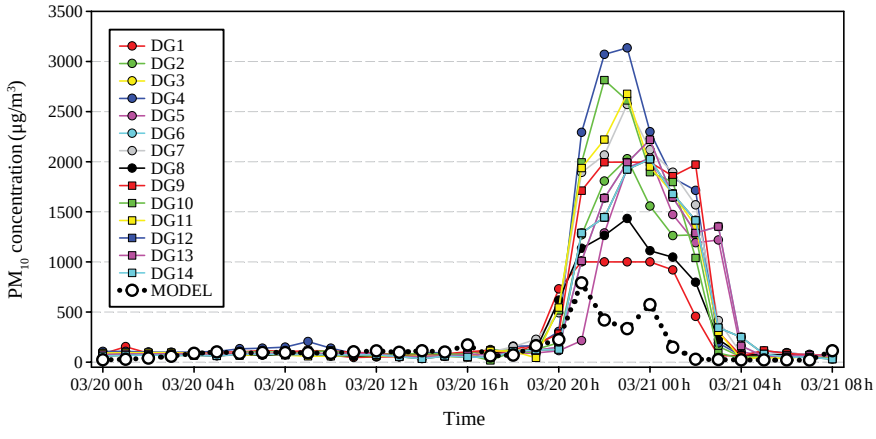
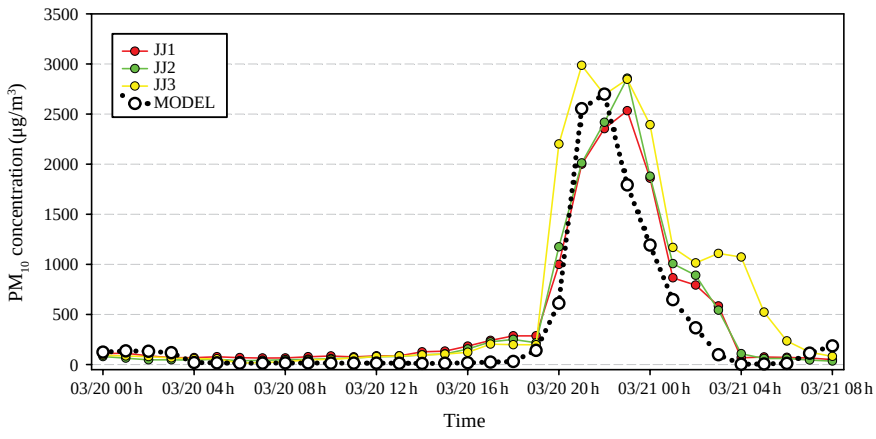


Fig. 6. Longitude-altitude cross sections for the concentrations of Asian dust (μg/m³) simulated by the CMAQ model in the study area.



(a)



(b)

Fig. 7. Comparison between the observed PM_{10} concentrations and modeled Asian dust (including PM_{10}) concentrations ($\mu g/m^3$) at (a) 14 air quality monitoring sites in Daegu and (b) 3 air quality monitoring sites on Jeju Island from 00 LST on 20 March to 08 LST on 21 March 2010.

막 부근의 기류가 합쳐져 매우 빠른 속도로 다량의 황사먼지가 이동된 것으로 사료된다.

수치모의 결과의 신뢰성 평가를 위해 우리나라 주요 도시를 대상으로 수행한 기온과 풍속의 통계 검증(IOA, RMSE, MBE 등)을 표 1에 제시하였다. 기온의 경우 강릉(0.7 IOA)을 제외하고 대부분 0.8 이상의 높은 IOA를 나타내고 있으나, 모델값이 관측값과 비교해 약 2~4°C 정도 과소평가 되고 있으며 RMSE도 약 3~4°C 정도를 나타내고 있다. 강릉지역은 상대적으로 좋지 않은 결과(가장 낮은 IOA와 높은 RMSE)를 보였다. 풍속의 경우는 강릉, 대전, 대구를 제외하고 대부분 0.6 이상의 IOA를 나타내며, 모델값이 관측값에 비해 약 1~2 m/s 정도의 과대평가, 약 2~4 m/s 정도의 RMSE를 나타낸다. 그러나 강릉, 대전, 대구는 제주를 포함한 다른 도시와 비교하여 풍속에서 다소 낮은 IOA (약 0.4~0.6), 약 3~5 m/s 과대평가, 높은 RMSE (4 m/s 이상)를 보였다. 따라서 일부 도시를 제외하고 대부분 지역에서의 통계 검증은 모델결과의 신뢰성을 뒷받침해주고 있으며, 기상에 따른 황사 수치모의 결과를 해석하는데 적절하다고 사료된다.

황사 발생과 수송과정을 보다 정확하게 살펴보기 위하여 고도-경도의 연직단면도를 분석하였다(그림 6).

그림에 나타난 각 단면선은 그림 1에서 제시한 총 4개의 위도(50°N, 42°N, 38°N, 33°N)를 중심으로 자른 단면선을 나타낸다(A-A′, B-B′, C-C′, D-D′). 3월 18일 18시부터 시간이 경과하면서 바이칼 호의 서남쪽 부근 약 5~8 km 상공에 매우 높은 농도의 황사가 모의되었으며(A-A′), 19일 18시에는 비슷한 농도 수준의 황사가 고비사막 부근에서 나타났다(B-B′). 이러한 높은 고도에서의 황사 수송은 일기도에서 나타난 강한 저기압의 형성이 주요 원인인 것으로 사료된다(그림 3). 20일 12시에는 상대적으로 낮은 농도의 황사가 우리나라 서해 부근으로 빠르게 진행하고(C-C′), 20일 22시경에는 저기압 후면의 상층 기압골이 남한지역을 통과하면서 기류의 하향운동으로 인해 우리나라 남한지역 및 제주도 지표부근에 도달하는 수송패턴이었다(D-D′).

그림 7은 황사 수치모의(WRF-CMAQ 모델링 시스템) 결과와 관측값을 비교하기 위한 시계열 그림을 나타낸다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 우리나라 주요 도시 중에서 가장 PM_{10} 농도가 높았던 대구와 제주도를 대상으로 비교하였다. 다만, 수치모델의 결과값은 약 10 km 격자 해상도에서 추출된 황사(PM_{10} 포함) 농도이므로 관측지점의 위경도와 정확하게 일치하지 않는다는 점을 감안하여 대구와 제주도의 전체 측정지점(각각 14개와 3개 지점)에 대해 분석하였다. 전반적으로 수치모의 결과와 관측값의 시간변화는 유사하게 나타났다. 즉, 모델값과 관측값 모두 3월 20일 늦은 오후부터(18~19시경) 농도가 증가하기 시작하여 21~23시 사이에 최고 농도가 나타났다. 한편 대구지역에서 수치모의 결과(약 1,000 μg/m^3)는 관측값(약 3,000 μg/m^3)에 비해 상당히 과소모의 된 반면, 제주도에서는 상대적으로 서로 유사한 농도 수준(약 2,500~3,000 μg/m^3)을 보였다. 제주와 비교하여 대구에서의 이러한 차이는 앞서 언급한 격자 해상도의 한계로부터 오는 수치모델링의 불확실도(uncertainty)와 기상모델 평가(기온과 풍속, 표 1)에서 나타난 상대적으로 낮은 IOA, 2배 정도 높은 과대평가, 높은 RMSE 등이 주요 원인으로 추정된다. 또한 대구 및 제주지역에서 모의된 농도는 대부분의 측정지점과 비교하여 1~2시간 빨리 최고 농도가 나타났으며, 지속시간도 다소 짧게 모의 되었는데, 이것은 종관기상(일기도 패턴) 및 위성영상(그림 3)에서처럼 강한 서풍 기류와 기류의 빠른 움직임이 주요 원인인 것으로 추정된다. 이외에도, 황사사례일의 우리나라 주요 도시를 대상으로 황사배출과 인위적 배출에 의한 농도 수준을 서로 비교한 결과(그림 제외), 황사배출에 의한 농도가 평균적으로 약 5배(서울)~50배(제주) 정도 높게 추정되어 본 연구사례일은 황사배출로 인한 영향이 훨씬 지배적인 것으로 볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 최근 10여 년간 한반도에서 가장 극심했던 황사발생일의 사례연구로써(2010년 3월 20~21일, 최고 약 3,000 μg/m^{3}의 PM_{10} 농도), 황사의 발생기작과 수송과정 등을 관측 자료(일기도, 위성영상 자료 등)와 수치모델링을 통해 살펴보았다. 본 연구사례일의 황사 발생과 수송과정에 영향을 주는 종관기상은 바이칼 호 서남쪽 부근(투바공화국과 몽골의 서쪽 경계)의 등압선이 조밀한 지역에서 강한 기압경도력이 형성되어 강한 기류가 발생하고(3월 18일), 이 기류는 고비사막과 내몽골 주변의 기류(3월 19일)와 합쳐져 빠른 속도로 다량의 황사먼지가 수송되는 특징이었다. 즉, 바이칼 호 서남쪽 부근에서 다량의 황사가 배출되고 그 이후로 고비사막과 내몽골 부근에서 재차 많은 양의 황사먼지가 발생한 강한 황사사례로서, 이렇게 배출된 황사먼지가 강한 서풍 기류를 타고 우리나라로 유입된 것으로 사료된다. 또한 발원지 주변의 강한 저기압의 형성으로 인해 일반적으로 잘 알려진 주요 황사 수송고도(약 3~5 km)보다 조금 높은 5~8 km 고도에서 수송되어 우리나라로 유입되는 패턴이었다. 이러한 종관기상의 특징은 본 연구사례일의 황사 배출량에 대한 시 · 공간 분포와 황사 발생과 수송과정에 대한 수치모의 결과(황사농도의 공간 분포와 연직단면도)에서 잘 뒷받침되고 있다.

본 연구에서의 황사 수치모의 분석을 통해 종관기상학적(일기도 등) 해석의 한계점을 보완하며, 황사 발생 및 수송과정을 보다 상세히 이해하게 되었다. 또한 많은 연구에서 황사의 주요 발원지는 고비사막 및 내몽골, 황토고원으로 알려져 있는데, 다양한 발생 및 수송패턴(배출량, 수송고도, 기상조건 등)의 황사사례에 대한 정확한 해석을 위해서는 주요 발원지에서의 황사연구뿐만 아니라 그 외 여러 건조지역에서의 황사 발생, 수송과정, 영향에 대한 연구와 병행하여 종합적인 분

석이 필요하다고 사료된다. 따라서 향후 우리나라에서 관측되는 여러 고농도 황사사례일의 다양한 수치모의 분석을 통하여 보다 정확한 황사 발생(발원지 규명) 및 수송과정과 영향지역의 고농도현상에 대해 면밀한 원인규명이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화감시예측 및 국가정책지원강화 사업(KMIPA 2015-2050)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Advanced Research WRF (ARW) (2014) Weather Research & Forecasting Version 3 Modeling System user's Guide, Mesoscale & Micro-scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.

Choi, J.C., J.W. Cha, S.Y. Bang, and Y.H. Youn (2002) Study on physical and chemical characteristics of yellow sand at Anmyeon-do, Chungnam, Journal of the Korean Meteorological Society, 38(2), 105-117. (in Korean with English abstract)

Chun, Y., K.O. Boo, J. Kim, S.U. Park, and M. Lee (2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, Journal of Geophysical Research, 06(D16), 18461-18469.

Chun, Y.S., J.Y. Kim, K.O. Boo, and N.O. Kim (2000) The features associated with the yellow sand phenomenon observed in Korea in wintertime, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 16(5), 487-497. (in Korean with English abstract)

Dudhia, J. (1989) Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale Two-Dimensional model, Journal of the Atmospheric Sciences, 46, 3077-3107.

Gao, Y., R. Arimoto, M.Y. Zhou, J.T. Merrill, and R.A. Duce (1992) Relationships between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific, Journal of Geophysical Research, 97(D9), 9867-9872.

Gillette, D.A. and R. Passi (1988) Modeling dust emission caused by wind erosion, Journal of Geophysical Research, 93(D11), 14233-14242.

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, Journal of Geophysical Research, 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, Bulletin of the American Meteorological Society, 40, 1617-1628.

Hong, S.Y., Y. Noh, and J. Dudhia (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, Monthly Weather Review, 134, 2318-2341.

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.R. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, N. Sugimoto, and W.C. Malm (2001) The Asian dust events of April 1998, Journal of Geophysical Research, 106, 18317-18330.

In, H.J. and S.U. Park (2002) A simulation of long-range transport of yellow sand observed in april 1998 in Korea, Atmospheric Environment, 36, 4173-4187.

In, H.J. and S.U. Park (2003) Estimation of dust emission amount for a dust storm event occurred in april 1998 in China, Water, Air, & Soil Pollution, 148, 201-221.

Jung, W.S., S.H. Park, D.I. Lee, D.D. Kang, and D.C. Kim (2014) Characterization of aerosol concentration during severe asian dust period at Busan, Korea in 20 March 2010, Journal of Environmental Sciences, 23(2), 275-289.

Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: an update, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 43, 170-181.

Kang, D.H., J.Y. Kim, K.E. Kim, and B.S. Lim (2012) Aerosol size distributions and optical properties during severe Asian dust episodes measured over South Korea in spring of 2009-2010, Journal of the Korean Meteorological Society, 22(3), 369-381.

Kim, B.K. (2002) Simulation of Asian dust transport associated with weather pattern, MSc Dissertation, Pusan National University, Busan, South Korea, 61 pp.

Kim, Y.-K., H.W. Lee, J.K. Park, and Y.-S. Moon (2002) The stratosphere-troposphere exchange of ozone and

aerosols over Korea, Atmospheric Environment, 36, 449-463.

Kim, Y.-K. and S.-K. Song (2004) Synoptic analysis and transport during Asian Dust events observed over Korea, Journal of the Korean Meteorological Society, 40(3), 273-291.

Kim, Y.-K., S.-K. Song, and J.-E. Kang (2004) Characteristics of concentration variations and synoptic conditions by the lasting time of Asian Dust, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 20(4), 465-481. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.-K., S.-K. Song, H.W. Lee, C.-H. Kim, and I.-B. Oh (2006) Characteristics of Asian Dust transport based on synoptic meteorological analysis over Korea, Journal of the Air & Waste Management Association, 56, 306-316.

Korea Environment Institute (KEI) (2004) A Study on the Analysis of Damages from the Northeast Asian Dust and Sand Storm and the Regional Cooperation Strategies, 138 pp.

Korean Ministry of Environment (2011) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2010, Republic of Korea.

Korean Ministry of Environment (2015) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2014, Republic of Korea.

Kwon, H.J., S.H. Cho, Y. Chun, F. Lagarde, and G. Pershgen (2002) Effects of the asian dust events on daily mortality in Seoul, Environmental Research, 90, 1-5.

Lee, J.J. (2009) Comparative study on the estimation of dust emission flux over the Asian dust source regions, MSc Dissertation, Pusan National University, Busan, South Korea, 61 pp.

Monn, C., V. Carabias, M. Junker, R. Waeber, M. Karrer, and H.U. Wanner (1997) Small-scale spatial variability of particulate matter $<10\ \mu m$ (PM_{10}) and nitrogen dioxide, Atmospheric Environment, 31(15), 2243-2247.

Moon, Y.-S., Y.-K. Lim, and L. Lee (2011) An estimation of concentration of Asian dust (PM_{10}) using WRF-SMOKE-CMAQ (MADRID) during springtime in the Korean peninsula, Journal of the Korean Earth Science Society, 32(3), 276-293.

National Institute of Environmental Research (NIER), 2010. Guidebook for Estimating National Air Pollutant Emissions (II).

Park, C.H. (2014) A study on the travel time of the sand and dust storm observed from KCJSDS (Korea-China Joint Monitoring Network of Sand and Dust Storm) to the Korean peninsula, using its PM_{10} data, Ph.D. Dissertation, Chosun National University, Gwangju, South Korea, 108 pp.

Shao, Y., E. Jung, and L.M. Leslie (2002) Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system, Journal of Geophysical Research, 107(D24), 4814.

Skamarock, W.C., J. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR. Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.

Song, S.-K. and Y.-K. Kim (2005) A case study of an Asian dust (Hwangsa) event observed in November 2002 in Korea, Journal of the Korean Meteorological Society, 41(5), 707-715. (in Korean with English abstract)

Song, S.-K. and Y.-K. Kim (2007) Characteristic of meteorological conditions relevant to Asian Dust outbreaks during spring month of 1998-2002, Journal of Environmental Sciences, 16(4), 399-407.

Song, S.-K., Y.-K. Kim, Z.-H. Shon, and H.W. Lee (2008) Influence of meteorological conditions on trans-Pacific transport of Asian dust during spring season, Journal of Aerosol Science, 39, 1003-1017.

Stockwell, W.R., P. Middleton, J.S. Chang, and X. Tang (1990) The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling, Journal of Geophysical Research, 95, 16343-16347.

Sun, J.M., M. Zhang, and T.S. Liu (2001) Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate, Journal of Geophysical Research, 106(D10), 10325-10333.

Tsai, F., J.-Y. Tu, S.-C. Hsu, and W.-N. Chen (2014) Case study of the Asian dust and pollutant event in spring 2006: Source, transport, and contribution to Taiwan, Science of the Total Environment, 478, 163-174.

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, Journal of Geophysical Research, 106(D16), 18331-18344.

Uno, I., S. Satake, G.R. Carmichael, Y. Tang, Z. Wang, T. Takemura, N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Murayama, T.A. Cahill, S. Cliff, M. Uematsu, S. Ohta, P.K. Quinn, and T.S. Bates (2004) Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model, Journal of Geophysical Research, 109, D19S24.

Uno, I., Z. Wang, M. Chiba, Y.S. Chun, S.L. Gong, Y. Hara, E. Jung, S.-S. Lee, M. Liu, M. Mikami, S. Music, S. Nickovic, S. Sateke, Y. Shao, Z. Song, N. Sugimoto, T. Tanaka, and D.L. Westphal (2006) Dust model intercomparison (DMIP) study over Asia: Overview, Journal of Geophysical Research, 111, D12213.

Wang, Z., H. Ueda, and M. Huang (2000) A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia, Journal of Geophysical Research, 105(D22), 26947-26959.

Westphal, D.L., O.B. Toon, and T.N. Calson (1988) A case study of mobilization and transport of Saharan dust, Journal of the Atmospheric Sciences, 45, 2145-2175.

Yang, H.J. (2016) Analysis of synoptic meteorological characteristic difference between high dust cases and low dust cases in South Korea, MSc Dissertation, Chungnam National University, Chungnam, South Korea, 108 pp.

Yoon, Y.H. (1990) On the yellow sand transport to the Korea Peninsula, Journal of the Korean Meteorological Society, 26(2), 111-120.

Yu, X., T. Cheng, J. Chen, and Y. Liu (2006) A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia, Atmospheric Environment, 40 (30), 5787-5797.

Zender, C.S., H. Bian, and D. Newman (2003) The mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology, Journal of Geophysical Research, 108(D14), 4416.

Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, Atmospheric Chemistry and Physics, 9, 5131-5153.