



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

最近 濟州地域에서 觀測된 極甚한
黃砂 事例 特性分析 및 數值模擬

濟州大學校 大學院

地球海洋科學科

金 錫 祐

2016年 2月

석사학위논문

최근 제주지역에서 관측된 극심한
황사 사례 특성분석 및 수치모의

제주대학교 대학원

지구해양과학과

김 석 우

2016년 2월

최근 제주지역에서 관측된 극심한 황사 사례 특성분석 및 수치모의


지도교수 송 상 근

김 석 우

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2015年 12月

김석우의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장	김 태 훈	
위 원	송 상 근	
위 원	유 석 훈	

제주대학교 대학원

2015年 12月

Characteristic analysis and numerical
simulation of the severe Asian dust event
observed in Jeju in recent years

Sukwoo Kim
(Supervised by professor Sang-Keun Song)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree
of Master of Science

2015. 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Earth and Marine Sciences

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
제 1 장 서론	1
1.1. 연구배경	1
1.2. 연구목적	3
제 2 장 재료 및 방법	4
2.1. 자료 및 연구방법	4
2.2. 모델 구성	5
2.2.1. 기상모델	5
2.2.2. 대기질모델	9
제 3 장 결과 및 고찰	16
3.1. 황사사례일 특성 분석	16
3.2. 기상모델 평가	25
3.3. 황사 및 PM ₁₀ 배출량의 시·공간 분포 특성	28
3.4. 황사농도 시·공간 분포 특성	32
3.4.1. 수평분포 분석	32
3.4.2. 연직단면도 분석	39
3.4.3. 황사모델 결과와 관측값 비교	48

제 4 장 요약 및 결론	53
참 고 문 헌	56
Abstract	62
부 록	66

List of Tables

Table 1.	The configuration of the WRF model used for this study.	8
Table 2.	The configuration of the CMAQ model used for this study. ..	12
Table 3.	Composition of the soil texture and threshold conditions for Asian dust over the source regions (Source : In and Park, 2003).	14
Table 4.	U.S. Geological Survey's 24 vegetation categories with the surface roughness length (Z_o) and the Asian dust emission reduction factor (R) (Source : In and Park, 2003).	15
Table 5.	Statistical evaluation of meteorological variables between observations and model-predicted values: results compared at several monitoring sites during the study period (01 LST 18 March ~ 00 LST 22 March).	28
Table 6.	Statistical evaluation of PM_{10} concentration between model-predicted and observations value the nearest from model latitude, longitude (Busan : MyeongJang-dong, Gwangju : Nongseong-dong, Daegu : Suchang-dong, Daejeon : Munpyeong-dong, Total : 53 sites of all region) during the study period (00 LST 20 March ~ 08 LST 21 March).	52

List of Figures

Fig. 1.	The flow chart of WRF modeling system.	7
Fig. 2.	Coarse and nested fine domains for the WRF model.	8
Fig. 3.	Emissions and Meteorological modeling systems and the CMAQ Chemical Transport Model and Interface Processor.	11
Fig. 4.	Time series of hourly mean PM ₁₀ concentration observed at Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong sites on Jeju island during an Asian dust event (06 LST 20 March ~ 07 LST 21 March 2010).	17
Fig. 5.	Surface weather charts of East Asia at (a) 09 LST 18 March, (b) 12 LST 18 March, (c) 15 LST 18 March, (d) 18 LST 18, March, and (e) 21 LST 18 March 2010.	18
Fig. 6.	Same as Fig. 5 except for (a) 09 LST 19 March, (b) 12 LST 19 March, (c) 15 LST 19 March, (d) 18 LST 19 March, and (e) 21 LST 19 March 2010.	19
Fig. 7.	Same as Fig. 5 except for (a) 09 LST 20 March, (b) 12 LST 20 March, (c) 15 LST 20 March, (d) 18 LST 20 March, (e) 21 LST 20 March, and (f) 09 LST 21 March 2010.	20
Fig. 8.	MISAT-1R IODI(Infrared Optical Depth Index) imagery for (a) 06 LST 18 March, (b) 12 LST 18 March, and (c) 18 LST 18 March 2010.	22
Fig. 9.	Same as Fig. 8 except for (a) 00 LST 19 March, (b) 06 LST 19 March, (c) 12 LST 19 March, and (d) 18 LST 19 March 2010.	23
Fig. 10.	Same as Fig. 8 except for (a) 00 LST 20 March, (b) 06 LST 20 March, (c) 12 LST 20 March, (d) 18 LST 20 March, and (e) 21	

	LST 20 March 2010.	24
Fig. 11.	Same as Fig. 8 except for (a) 00 LST 21 March, and (b) 06 LST 21 March 2010.	25
Fig. 12.	Time series of the observed and WRF model-predicted meteorological variables such as (a) air temperature, (b) wind speed.	27
Fig. 13.	Spatial distributions of (a) hourly Asian dust emissions calculated by threshold friction velocity (u_{*t}) and (b) PM_{10} emissions derived from INTEX-B (East Asia) and CPASS (South Korea) at the surface layer of the study area.	30
Fig. 14.	Spatial distributions of (a) hourly mean Asian dust concentrations simulated by the CMAQ modeling system and (b) wind vectors simulated by the WRF model in the East Aisa.	33
Fig. 15.	Spatial distributions of hourly mean Asian dust concentrations simulated by the CMAQ modeling system around Jeju island.	37
Fig. 16.	A-A' (50°N), B-B' (42°N), C-C' (38°N), and D-D' (33°N) indicate the vertical cross-section lines.	41
Fig. 17.	Altitude-longitude cross sections for Aisan dust concentrations ($\mu g/m^3$) simulated by the CMAQ modeling system at each time.	41
Fig. 18.	Time series of CMAQ model-predicted PM_{10} ($\mu g/m^3$) and the observed such as (a) 19 air quality monitoring sites in Busan, (b) 9 sites in Gwangju, (c) 14 air quality monitoring sites in Daegu, (d) 8 sites in Daejeon, and (e) 3 air quality monitoring sites in Jeju.	50

제 1 장 서론

1.1. 연구배경

황사(黃砂, Asian dust)는 주로 중국 북부의 황토(黃土)지대에서 바람에 의하여 하늘 높이 불어 올라간 무수의 미세한 모래먼지가 대기 중에 퍼져서 하늘을 덮었다가 서서히 강하하는 현상 또는 강하하는 모래먼지를 말하며 편서풍을 타고 우리나라, 일본 등지로 유입되어 많은 영향을 준다(김광식 등, 1992). 이러한 황사 발원지는 우리나라에서 약 5,000 km 떨어져 있고 산맥으로 둘러싸인 타클라마칸 사막과 1,000 m 이상 고도에 위치하고 연 강수량이 200 mm 이하의 건조지역인 몽골 지역, 중국과 몽골의 경계지점인 고비사막과 황토고원 등이 대표적이다(윤용황, 1990; Gao et al., 1992; Chun et al., 2001; Sun et al., 2001).

최근 중국의 산업활동 증가와 교통량의 증가에 따라 모래먼지의 수송과정에서 중국의 공업/산업지역 및 대도시의 상공에 부유하고 있는 유해 오염물질을 포함하여 유입된다(Yu et al., 2006). 황사는 산성화된 토양을 중화시키는 긍정적인 측면도 존재하나(김보경, 2002), 국민에 호흡기질환, 심혈관질환 등을 유발하여 건강의 악화는 물론 시정악화로 인한 항공기 운항의 어려움, 먼지입자의 침착에 의한 기기 문제발생 증가 등 황사는 산업, 환경 등 다양한 측면에 피해를 유발한다고 알려져 있다(한국환경 정책·평가 연구원, 2003; Monn et al., 1997; Kwon et al., 2002).

지리·기상학적인 요인에 의하여 황사 발원지에 근접하고 편서풍의 풍하측에 위치한 우리나라의 경우 황사의 영향을 크게 받으며 매년 봄철과 겨울철에 미세 먼지에 의한 피해를 입고 드물게는 가을에도 그 영향을 받는다(이민희 등, 1986; 윤용황, 1990; 전영신 등, 2000, 2002; 최재천 등, 2002; 김유근, 2004; 송상근과 김유근, 2005; Kim and Park, 2001). 황사의 영향범위는 매우 넓어 때로는 일본과 북태평양 그리고 북미까지 장거리 수송이 되기도 하기 때문에, 황사의 발생과 수송과정을 규명하고 피해를 예방하기 위한 영향예측 연구는 매우 중요하며 오늘

날 국내·외에서는 많은 선행연구가 수행되어오고 있다(Duce et al., 1980; Merrill et al., 1985, 1989; Gao et al., 1992; Ginoux et al., 2001; Hacker et al., 2001; Husar et al., 2001; Uno et al., 2001; Kim et al., 2006; Song and Kim, 2007).

외국에서는 모델링을 기반으로 한 수치모의 연구가 과거부터 오랜 기간 이루어졌으며(Westphal et al., 1988; Gillete, 1988; Shao et al., 2002) 근래에는 많은 모델연구를 토대로 서로 비교·검증하는 연구 또한 이루어지고 있다(Uno et al., 2006). 한편, 우리나라의 경우는 대기 중 부유하고 있는 분진을 포집하여 황사의 입경 비교 및 화학 특성 분석을 시작으로 1980년대 후반부터 시작되었다(이민희 등, 1986; 이민희 등, 1988, 이민희 등, 1989). 황사 발생시 지상에서 500 hPa까지는 편서풍이 현저하다고 밝혀졌고(전종갑, 1991), 차가운 대륙성 고기압 전면에서 발생하여 한반도까지 수송된다고 밝혀진 바 있다(정관영 등, 1995). 또한 황사사례일의 일기유형이 4월의 평균 일기 유형과 관련이 깊으며(이동규 등, 1997), 황사 발생시 대기 순환 패턴 분류를 통한 황사의 수송과 지속시간이 상층 기압골의 위치, 이동속도, 연직 기압구조, 하층의 기류패턴 등의 영향을 받는다고 밝혀졌다(전종갑, 1999). 이와 같이 입자의 분석뿐만 아니라 황사 발생시 기상학적 조건 및 특성분석에 대한 연구도 병행되어 왔다.

최근 동아시아의 먼지 발생(Dust emission)과 수송에 대한 이해에 있어서 모델링을 통한 분석은 매우 중요한 역할을 하기 때문에 우리나라 또한 황사배출량을 임계마찰속도와 발원지의 지표성질을 고려하여 산정한 바 있고(Wang et al., 2000; Ginoux et al., 2001; In and Park, 2002; Zender et al., 2003), 이를 기반으로 하여 ADAM (Asian Dust Aerosol Model, In and Park, 2003)의 개발이 이루어져 모델링을 통한 황사 단기예측 등을 수행하였다(기상연구소, 2004, 2005; 기상청, 2006; 전영신, 2006). 우리나라는 최근 황사의 피해가 점차 커지고 있고 이에 따른 황사 발생에 대한 관심이 고조되고 있기 때문에 황사연구는 지속적으로 필요한 실정이다. 우리나라에 도달한 황사의 화학적 특성과는 다른 보다 근본적인 원인으로 작용할 수 있는 황사의 발생, 이동 그리고 영향 범위의 예측 등이 요구되는 것으로 사료된다.

1.2. 연구목적

현재 기상청 기준으로 미세먼지(PM₁₀)의 1시간 평균농도가 각각 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높고 지속시간이 2시간 이상 예상될 때 황사주의보와 황사경보를 발령한다. 최근 5년간 PM₁₀ 최고농도가 가장 높았던 날은 2010년 3월 20일로 대구 노원동 지점에서 최고 3,135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하였으며, 다음으로 제주도 서귀포시 동홍동 지점에서 2,985 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 관측되었다. 이와 같은 농도는 최근 5년뿐만 아니라 지금까지 우리나라에 왔던 황사 중 가장 높은 PM₁₀ 농도를 보였다고 추정된다. 미세먼지 농도가 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘으면 눈을 뜨기가 힘들고 숨쉬기 곤란한 상태가 되기도 하는데, 2010년 3월 20일 황사사례의 농도 수치는 황사경보 1시간 평균 농도에 비해 약 4배 높으며 역대 최악의 황사라 불릴 정도로 극심한 PM₁₀ 농도를 나타낸다(http://www.ytn.co.kr/_ln/0108_201502231312401101). 제주도는 대기오염물질의 배출원(특히 고정 배출원)에 의한 영향이 매우 적기 때문에 PM₁₀의 농도 또한 다른 도시에 비해 낮게 나타나는 청정지역에 속한다. 그러므로 이러한 고농도 사례는 제주도의 특징상 흔하지 않는 현상이라 사료된다. 종관 기상장만을 이용한 황사사례 분석의 한계성 때문에, 최근 모델링을 기반으로 한 황사연구가 중요해지고 있음에도 불구하고 현 시점에서 제주지역을 대상으로 상세한 황사수치모의 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 극심한 PM₁₀ 농도가 관측되었던 2010년 3월 20일의 황사사례일에 대하여 황사 발원지 특성과 황사의 수송과정 및 영향 등을 3차원 기상-대기질 모델링을 통하여 보다 상세하게 분석하고자 한다.

제 2 장 재 료 및 방 법

2.1. 자 료 및 연 구 방 법

본 연구에서는 연구사례일인 2010년 3월 20일 전후에 대해 기상청에서 제공되는 종관일기도, 국가위성센터에서 제공되는 정지궤도위성(MTSAT-1R)의 적외선 광학두께지수(IODI, Infrared Optical Depth Index) 영상자료, 기상청과 환경부에서 제공하는 시간별 기상요소 및 PM₁₀ 농도자료 등을 이용하여 사례일의 특성을 살펴보았다. 종관기상 및 황사의 수치모의를 위해 이용된 기상 및 대기질 모델은 각각 WRF (Weather Research and Forecasting Model)와 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality)이다. 기상수치모의 모델 평가를 위하여 제주지역 24군데 기상관측지점의 시간별 기상요소 자료(관측지점 고도가 50 m보다 낮은 지점을 선정하여 총 13지점의 자료 활용)를 사용하였다. 또한 WRF 모델평가의 정량적인 분석을 위하여 통계적 변수인 MB (Mean Bias), IOA (Index of Agreement) 그리고 RMSE (Root Mean Square Error)를 이용하였고 관련된 식을 아래에 나타낸다.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_1^n (|M - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \right] \quad (3)$$

M = 모델결과 값

O = 관측 값

\bar{O} = 평균 관측값

이외에도, 산정된 황사배출량과 중국 공업단지 등에서 생성되는 PM₁₀ 배출량의 차이를 비교하기 위해서 각 시간에 따른 공간분포도를 통해 비교·분석하였다. 또한 황사 수송과정의 시·공간적 분포 특성 분석은 CMAQ 모델링 결과의 황사 신호를 공간분포도(동아시아, 제주지역), 수평 바람장 그림 그리고 위도에 따른 연직단면도를 통해서 수행하였다. 연직단면도의 경우, 황사가 많이 배출된 주요 발원지(고비사막, 몽골 등)의 위도를 중심으로 작성하였으며, 우리나라와 제주지역으로 수송되는 과정을 보기 위해서 약 50°N, 42°N, 38°N, 33°N의 단면도를 작성하여 활용하였다. 또한 황사 수치모의 모델결과와 관측값의 비교분석을 위해 대상지역의 대기질 측정 지점인 이도동, 연동, 동홍동 총 3지점의 PM₁₀ 자료(고산의 대기질 시간별 자료 부재)뿐 아니라 우리나라의 여러 주요 도시 중에서 황사의 영향이 커서 고농도 PM₁₀이 관측된 4개 도시를 선정하여 시계열 분석에 활용하였다(부산은 19지점, 광주는 9지점, 대구는 14지점, 대전은 8지점). 이때 CMAQ 모델 결과값과 대기질 관측값의 통계적 비교를 위해 사용된 방법은 WRF 모델평가 방법과 동일하고, 관측자료는 Total의 경우 각 도시의 모든 대기질 관측지점(총 53지점)을 활용하였다. 각 도시에 대한 자료는 시계열 결과 중 관측값과 모델값의 위경도가 가장 일치할 것으로 추정되는 지점을 산정하여 이용하였다 (부산: 명장동, 광주: 농성동, 대구: 수찬동, 대전: 문평동, 제주-1, 2, 3: 이도동, 연동, 동홍동).

2.2. 모델 구성

2.2.1. 기상모델

WRF 모델은 기존에 활용되던 기상모델인 MM5 (short for Fifth-generation penn state/NCAR Mesoscale Model) 를 대체하기 위해서 NCEP (National Center for Environmental Prediction)과 NCAR (National Center for

Atmospheric Research)가 공동 개발한 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 모델이다. 수평격자는 Arakawa-C 격자체계를 사용하고 연직격자는 Eulerian 질량좌표계를 사용한다. 이는 NCEP에서 현업에 활용되며, 세계적으로 널리 보급되어 많은 연구에 활용되고 있다(Skamarock et al., 2008; ARW(Advanced Research WRF), 2014).

WRF모델에 이용된 Input data로서 모델의 대상영역 내 지형고도 및 토지피복도(land-use) 등의 자료와, GFS (Global Forecast System), NCEP FNL (Final) 등의 전구기상자료를 활용한다. 그리고 각 Input data를 WRF 모델을 수행하기 적절하게 만들기 위한 전처리 과정(Pre-processing)을 거치게 되고 처리된 자료를 이용해 본격적으로 WRF모델을 수행하기 시작한다. 모델을 수행하는 과정에서 기온, 기압, 습도, 바람(U-wind, V-wind) 등 다양한 기상자료를 여러 scheme에 따라서 분석한다. 또한 크게 WRF-3DVAR (시간, X축, Y축), WRF-4DVAR (시간, X축, Y축, Z축)로 분류하여 기상변수에 따라 각각 출력하는 모델로 주요 구성과 실행과정은 Fig. 1에 나타낸다.

본 연구에서는 WRF모델 3.6버전을 사용하였고 모델의 초기/경계 자료에 사용된 입력자료는 NCEP/NCAR에서 제공하는 FNL 재분석 자료(6시간 간격, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 해상도)를 이용하였다. 또한 coarse domain(경도 : $124.04^{\circ}E \sim 129.11^{\circ}E$, 위도 : $31.87^{\circ}N \sim 35.25^{\circ}N$, 해상도 : $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$)을 nested down하는데 있어서 1/3 비율로 fine domain (Domain2 : $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, Domain3 : $3.3 \text{ km} \times 3.3 \text{ km}$)을 구성하였다(Fig. 2). 수치모의를 수행하는 과정에서 사용된 자료와 scheme은 해상도에 따른 구름모수화에는 Kain-Fritsch scheme을 사용하였고 메조스케일에 적합한 Microphysics인 WRF Single-Moment 3-class scheme을 사용하였으며 장파복사와 단파복사는 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) scheme과 Dudhia scheme을 사용하였다. 대기경계층 조건은 YSU (YonSei University) scheme을 이용하였다(Dudhia, 1989; Kain, 2004; Hong et al., 2006, ARW, 2014). Spin-up은 약 1~2일 정도로 판단하여 모델링 수행기간은 2010년 3월 16일 00 UTC 부터 2010년 3월 21일 18 UTC 까지 이루어졌다. 전반적으로 사용된 모델 구성 및 configuration은 Table 1에 간략히 나타낸다. 한편 본 연구에서는 관측자료를 이용한 자료동화 기법은 적용하지 않았다.

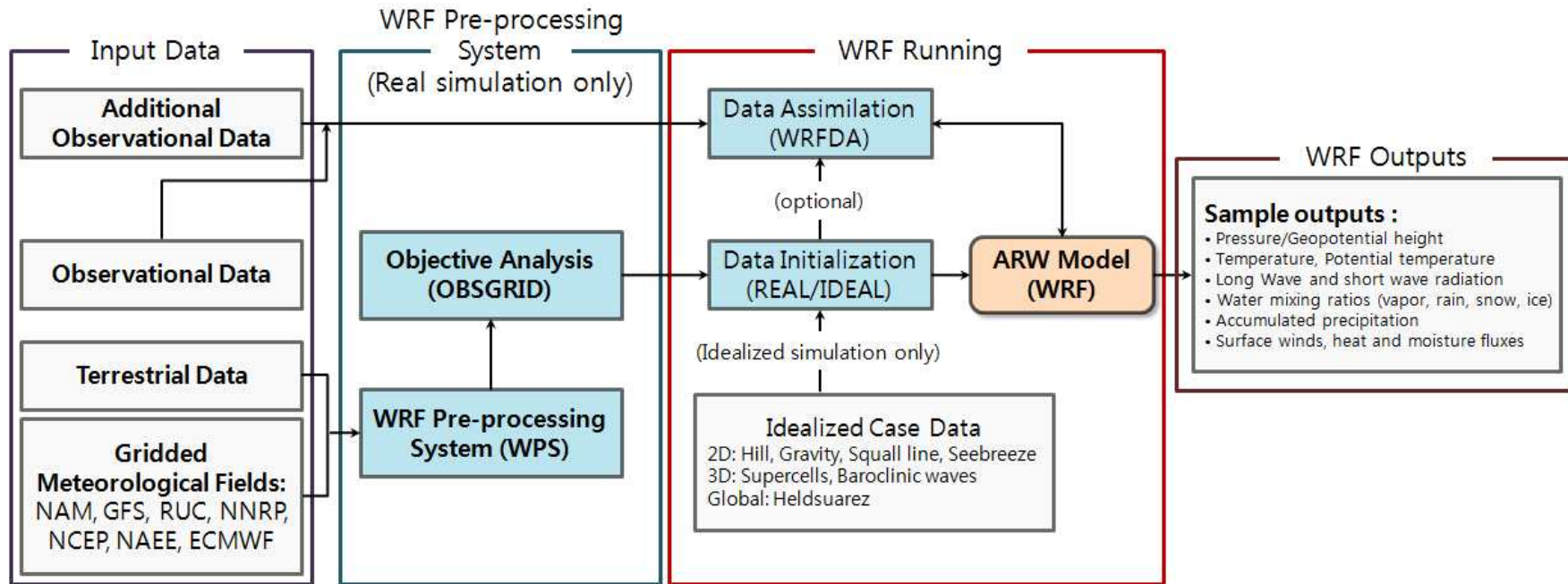


Fig. 1. The flow chart of WRF modeling system.

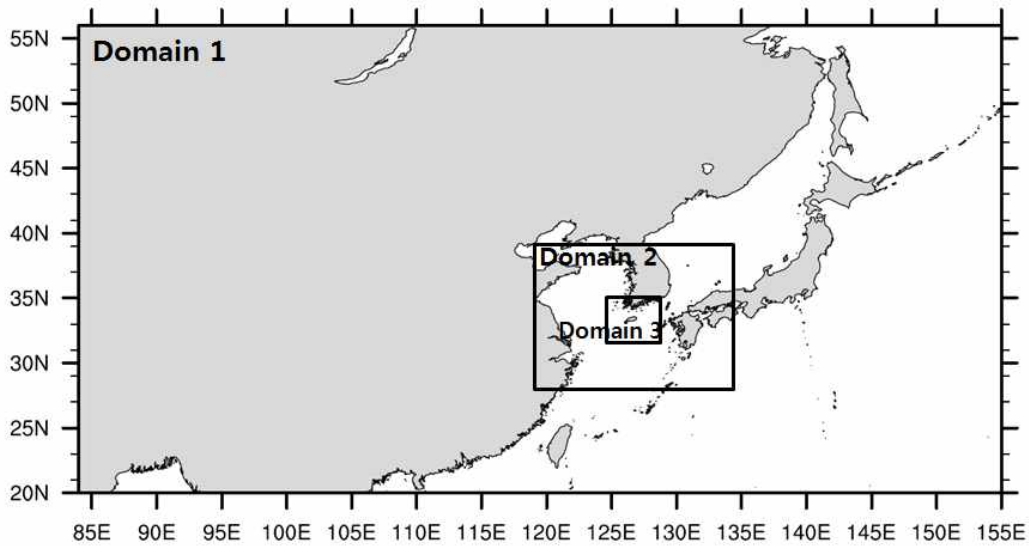


Fig. 2. Coarse and nested fine domains for the WRF model.

Table 1. The configuration of the WRF model used for this study.

	1 Domain	2 Domain	3 Domain
Resolution (km)	30km	10km	3.3km
Topo	5m	2m	30s
Nesting mode		One-way	
Landuse	USGS 5m	USGS 2m	USGS 30s
Microphysics	WRF Single-Moment 3-class scheme		
Longwave Radiation	RRTM scheme		
Shortwave Radiation	Dudhia scheme		
PBL	(YSU) Yonsei University scheme		
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch scheme		None

2.2.2. 대기질모델

황사수치모의를 위한 모델은 미국 환경청(U.S. Environmental Agency)에서 개발된 Model-3/CMAQ (Third Generation Community Multiscale Air Quality Modeling system)의 5.0.1버전을 사용하였다. 황사와 PM₁₀에 대하여 직접적인 영향을 가진 다중규모(multi-scale)의 기상현상과 화학반응을 결합시켜 여러 가지 오염물질(multi-pollutants)의 상호작용을 고려한다. 도시규모의 대기현상은 수평과 연직 규모가 유사하기 때문에 수치모의에 적합하도록 모델의 비정역학 관계식을 적용하였다. 또한 아래의 식과 같이 물리·화학적 과정의 기여도를 제시하는 Process Analysis 방법을 탑재하고 있다. Process Analysis는 수평과 연직 이류(advection) 및 확산(diffusion), 침적(deposition) 그리고 화학반응(in-situ chemical production)으로 인해 생산(product)되고 소실(loss)되는 등 상대적 기여율을 계산하고 평가하는 IPR (Integrated Process Rate)과 IRR (Integrated Reaction Rate)로 구성되어있다(Gipson, 1999; <http://www.epa.gov/asmdnerl/CMAQ/CMAQscienceDoc.html>).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \left[\frac{\partial}{\partial x}(u C_i) + \frac{\partial}{\partial y}(v C_i) \right] \quad (4)$$

$$+ \left[- \frac{\partial}{\partial x}(w C_i) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) \right] \quad (5)$$

$$+ (P_{chem} - L_{chem}) + E \quad (6)$$

$$+ \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{cloud} + \left(\frac{\partial C_i}{\partial t} \right)_{dry} \quad (7)$$

C_i : 화학변수 농도,

K_e : 확산난류

P_{chem} : 화학적 생산량,

L_{chem} : 화학반응으로 인한 손실률

E : 배출비율

CMAQ 모델의 구성과 실행과정은 Fig. 3에 나타난다. 주요 Input data는 기상 모델 자료와 배출량 자료가 있으며, 최종 화학·수송 모델(CCTM, CMAQ

Chemical Transport Model)을 수행하는데 있어서 필요한 전처리 과정은 4가지가 있다. 전처리 과정은 기상장 모델을 CMAQ 모델에 맞는 입력자료 형식으로 바꿔주는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor), 초기농도조건 구성해주는 ICON (Initial CONditions processor), 매 시간에 따른 경계농도조건을 구성하는 BCON (Boundary CONdition processor), 모델을 수행하는 기간에 따른 광해리율을 산정하는 JPROC (Photolysis Rate Processor)이 있다(U.S. EPA, 1999). 각 전처리 과정을 통한 자료를 종합적으로 사용하여 CCTM을 수행하는데 Gas-Phase Chemistry, Aerosol Chemistry 등의 조건을 설정한 scheme에 따라서 분석한다. 이와 같이 분석된 CCTM 결과는 다양한 후처리 프로그램을 활용하여 매 시간에 대하여 연속적으로 대기오염물질별 농도값 출력이 가능하다.

CMAQ 모델의 초기/경계 조건은 첫 번째 모델링수행 날짜에 대해서는 EPA (United States Environmental Protection Agency)에서 제공하는 프로파일 자료를 활용하였고 이후 모델링수행 날짜(두 번째, 세 번째 등)에 대한 초기/경계조건 자료는 이전 날짜(각각 첫 번째, 두 번째 등)의 모델결과를 이용하였다. 예를 들면, 두 번째 날짜인 3월 20일에 대하여 모델링 수행과정에서 사용되는 초기/경계 조건은 첫 번째 날짜인 3월 19일의 CMAQ 결과를 사용하는 방식이다. CCTM 과정에 사용된 에어로솔 메커니즘은 AERO-05, 화학메커니즘은 Saprc-99이며, 수평 및 연직확산에는 각각 CMAQ에서 기본적으로 설정하고 있는 multiscale과 ACM2 scheme을 수직이류 scheme은 PPM을 사용하였다. 전반적으로 사용된 조건은 Table 2에 정리하였다.

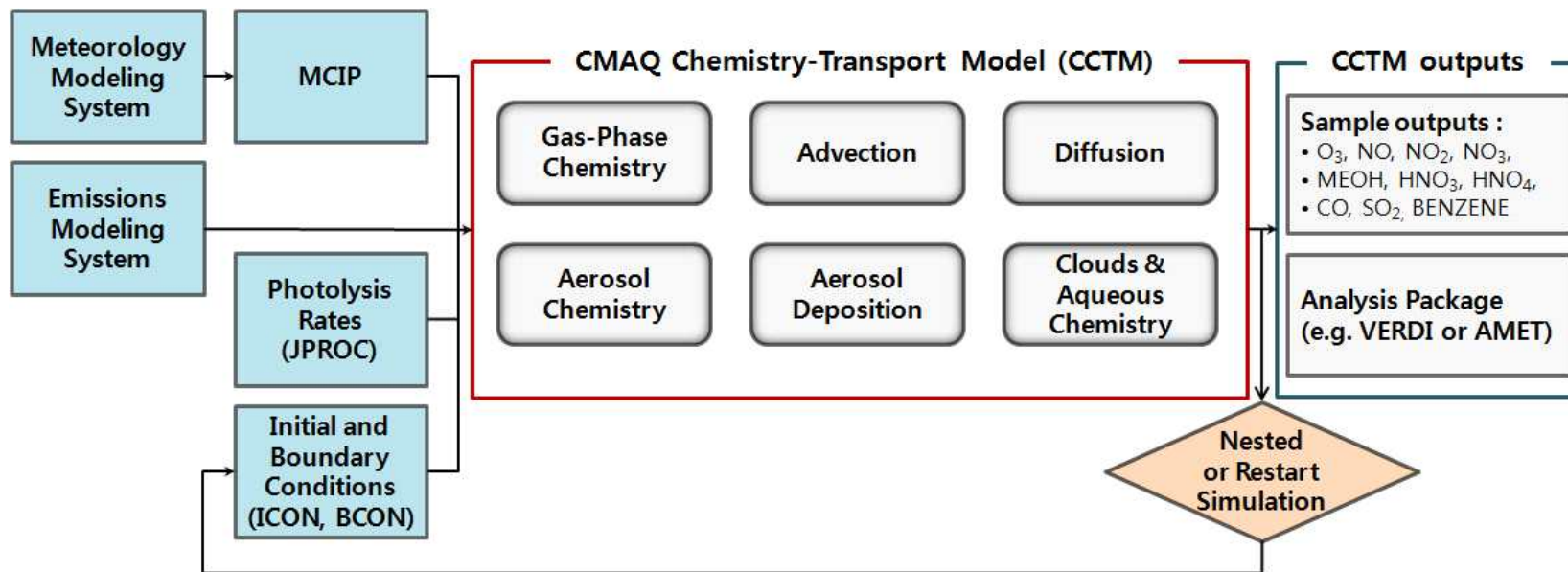


Fig. 3. The flow chart of CMAQ modeling system.

Table 2. The configuration of the CMAQ model used for this study.

	Options
Resolution (km)	30km
Chemical Mechanism	Saprc-99
Aerosol	AERO-05
Emission	CAPSS, INTEX-B, Dust emission
Vertical Diffusion	Asymmetric Convective Method scheme
Horizontal Diffusion	Multi-scale
Vertical Advection	Piecewise Parabolic Method scheme
Horizontal Advection	hyamo globalmass-conserving scheme

황사 수치모의(CMAQ 모델링)를 위해 본 연구에서는 MCIP 과정에 황사사례 일에 대한 WRF 모델의 output 자료를 이용하였고, 황사 배출량은 MCIP의 기상 자료를 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). 반면 최소 및 최대 분산 분포 함수는 토양을 Clay, Loam, Sand 총 3가지로 구별되어 있고, 이는 황사발원지 토양을 4가지로 구분한 방법과는 다르다. 따라서 이러한 분산 분포 함수를 토양을 4가지로 구분한 방법에 적용하기 위해서, 중국 북부 지방에서 채취한 37개의 토양성분을 분석하여, 4가지(고비, 모래, 황토, 혼합)로 분류된 황사발원지에 따라 이들 성분비를 구하였다(Table 3). 또한 황사발원지의 24개의 식생정보(USGS, US Geological Survey)를 적용하고 이에 따른 감쇄인자를 고려하여 최종 배출량(F_e)을 산정하였다(Table 4)(이종재, 2009). 마찰속도(u_*)는 임계마찰속도(u_{*t}) 이상의 값을 갖는다는 조건하에 최종 배출량을 산정하는 경험식은 다음과 같다.

$$F_a = \sum_i (1 - f_i R_i) * 5.2 * 10^{-14} u_*^4 \quad (u_* \geq u_{*t}) \quad (8)$$

u_{*t} : 임계마찰속도

f_i : 발원지의 i번째 식생부분 값

R_i : i번째 식생부분의 감쇄인자

이외에도, 인위적 배출량 자료로 동아시아 영역은 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-phase B)를, 우리나라 영역은 국가 배출량 인벤토리인 CAPSS (Clean Air Policy Support System)를 활용하였다.

Table 3. Composition of the soil texture and threshold conditions for Asian dust over the source regions (Source : In and Park, 2003).

Source region	Soil texture			WS (m/s)	RH (%)	Precipitation
	Clay (%)	Loam (%)	Sand (%)			
Gobi region	15	35	50	9.5	60	
Sand region	10	10	80	7.5	35	None
Loess region	20	55	25	6	30	
Mixed soil region	30	30	40	9.2	45	

Table 4. U.S. Geological Survey's 24 vegetation categories with the surface roughness length (Z_0) and the Asian dust emission reduction factor (R)
(Source : In and Park, 2003).

Type	USGS Description	Z_0 (m)	Reduction Factor (R)
A	Urban and built-up land	1	1
B	Dry cropland and pasture	0.02	0.4
C	Irrigated cropland and pasture	0.02	0.6
D	Mixed dry/irrigated cropland and pasture	0.02	0.5
E	Cropland/grassland	0.02	0.5
F	Cropland/woodland	0.02	0.7
G	Grassland	0.02	0.6
H	Shrubland	0.03	0.7
I	Mixed shrub/grassland	0.03	0.75
J	Savanna	0.02	0.8
K	Deciduous broadleaf forest	0.05	0.9
L	Deciduous needleleaf forest	0.05	0.9
M	Evergreen broadleaf forest	0.05	0.9
N	Evergreen needleleaf forest	0.05	0.9
O	Mixed forest	0.05	0.9
P	Water	0.001	1
Q	Herbaceous wet land	0.002	1
R	Wooded wet land	0.003	1
S	Barren or sparsely vegetated land	0.01	0.1
T	Herbaceous tundra	0.003	1
U	Wooded tundra	0.003	1
V	Mixed tundra	0.002	1
W	Bare ground tundra	0.001	1
X	Snow or ice	0.001	1

제 3 장 결과 및 고찰

3.1. 황사사례일 특성 분석

연구사례일에 대하여 제주지역을 대상으로 1시간 평균 관측 PM₁₀ 농도를 살펴 보면 18일 00시부터 20일 12시 이전까지는 전반적으로 약 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 농도를 보인다. 이후 20일 19시에 급격하게 증가하여(약 1,000~2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 20~21시 사이에 최고 수치를 보이고 23시 이후부터 빠르게 PM₁₀ 농도가 하강하는 추세를 보인다. 특히 동홍동 지점에서 최고농도 약 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 가장 높은 수치를 보였고, 다음으로 이도동과 연동 지점에서 최고농도가 각각 약 2,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 2,800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 관측되었다(Fig. 4).

Fig. 5는 황사사례일 전후 시간에 대한 일기도를 나타낸다. 18일 09~18시에 바이칼호 남서쪽 부근(투바공화국과 몽골의 경계지점)에 저기압과 모래먼지를 나타내고 고비사막 부근까지 이동하였으며, 18일 21시 일기도에서는 18일 09~18시에 나타났던 모래먼지가 사라진다(Fig. 5). 이후 19일 12시에 바이칼호 남쪽에 있는 고비사막 부근에서 저기압과 함께 많은 모래먼지가 나타났고 점차 남동진하는 모습이 나타났다(Fig. 6). Fig. 7을 보면, 20일 15시경 우리나라 서해부근으로 진입하였고 이후 18시, 21시에는 우리나라를 완전히 덮고 있는 형태를 보이고 있는데 이는 제주지역의 PM₁₀ 농도가 높아지기 시작하고 최고농도를 보이는 시각과 일치한다. 21일 09시에는 우리나라를 완전히 벗어나 일본방향으로 모래먼지가 이동하는 모습을 보인다. 19일 12시부터 21일 09시까지의 황사특성은 고비사막 및 내몽골 지역에서 생성되어 우리나라까지 오는 전형적인 황사현상의 패턴이라 할 수 있으나, 대체적으로 우리나라에서 약 2,000 km 떨어져있는 고비사막으로부터 발생하는 황사의 경우 국내까지 도달하는 시간이 약 2~3일정도 시간이 소요되는 특징(윤용황, 1990; 정관영 등, 1995; 박철홍, 2014)에 비해 매우 빠른 속도(약 1~2일)로 우리나라로 진입한 것을 알 수 있다. 이때, 바이칼호의 서쪽으로부터 강한 고기압이 나타났고 이보다 남동쪽에 있는 저기압을 밀어내면서 우리나라에

강한 황사가 발생한 것으로 보인다(정운선 외, 2014).

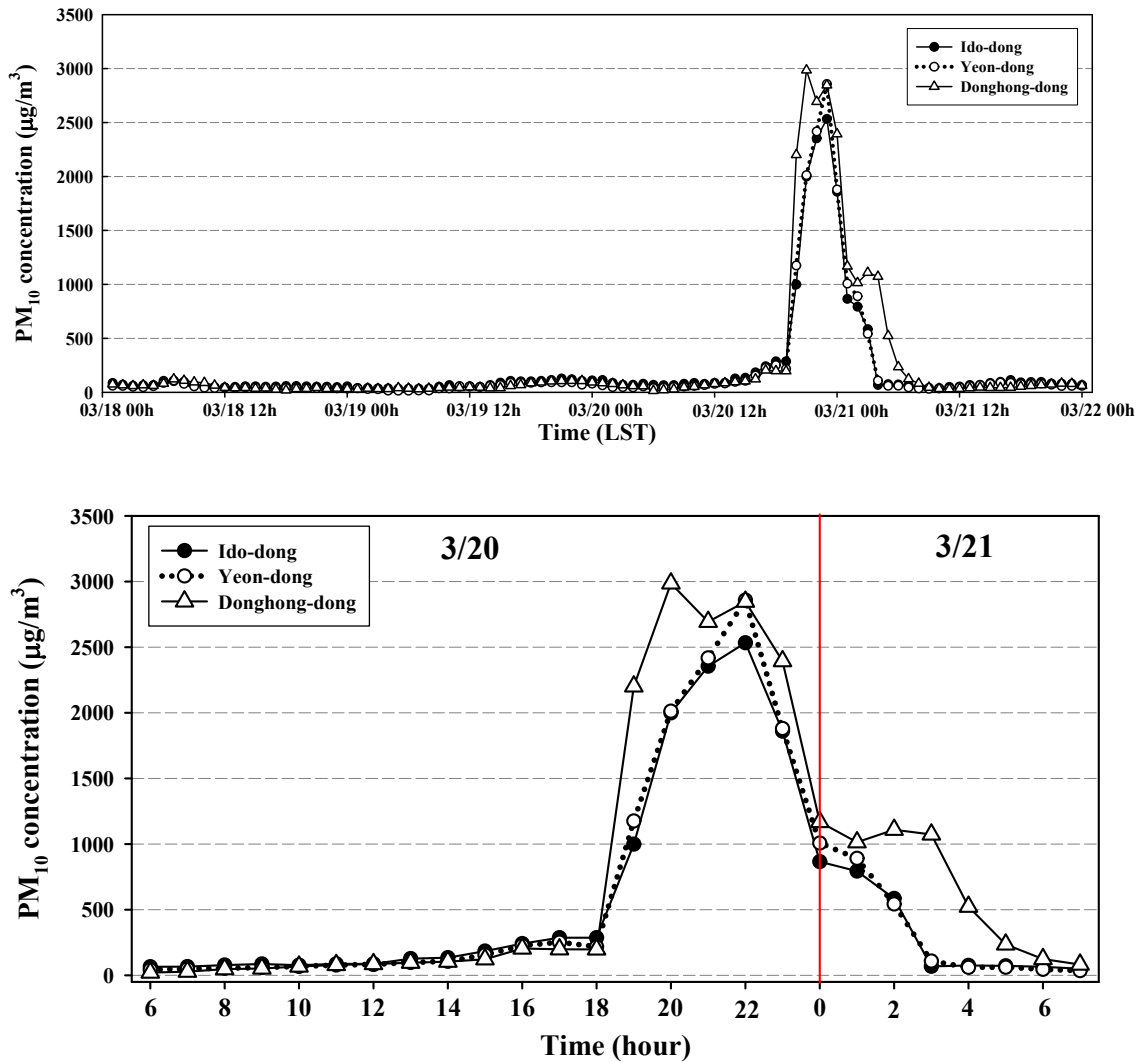


Fig. 4. Time series of hourly mean PM₁₀ concentration observed at Ido-dong, Yeon-dong, and Donghong-dong sites on Jeju island during an Asian dust event (06 LST 20 March ~ 07 LST 21 March 2010).

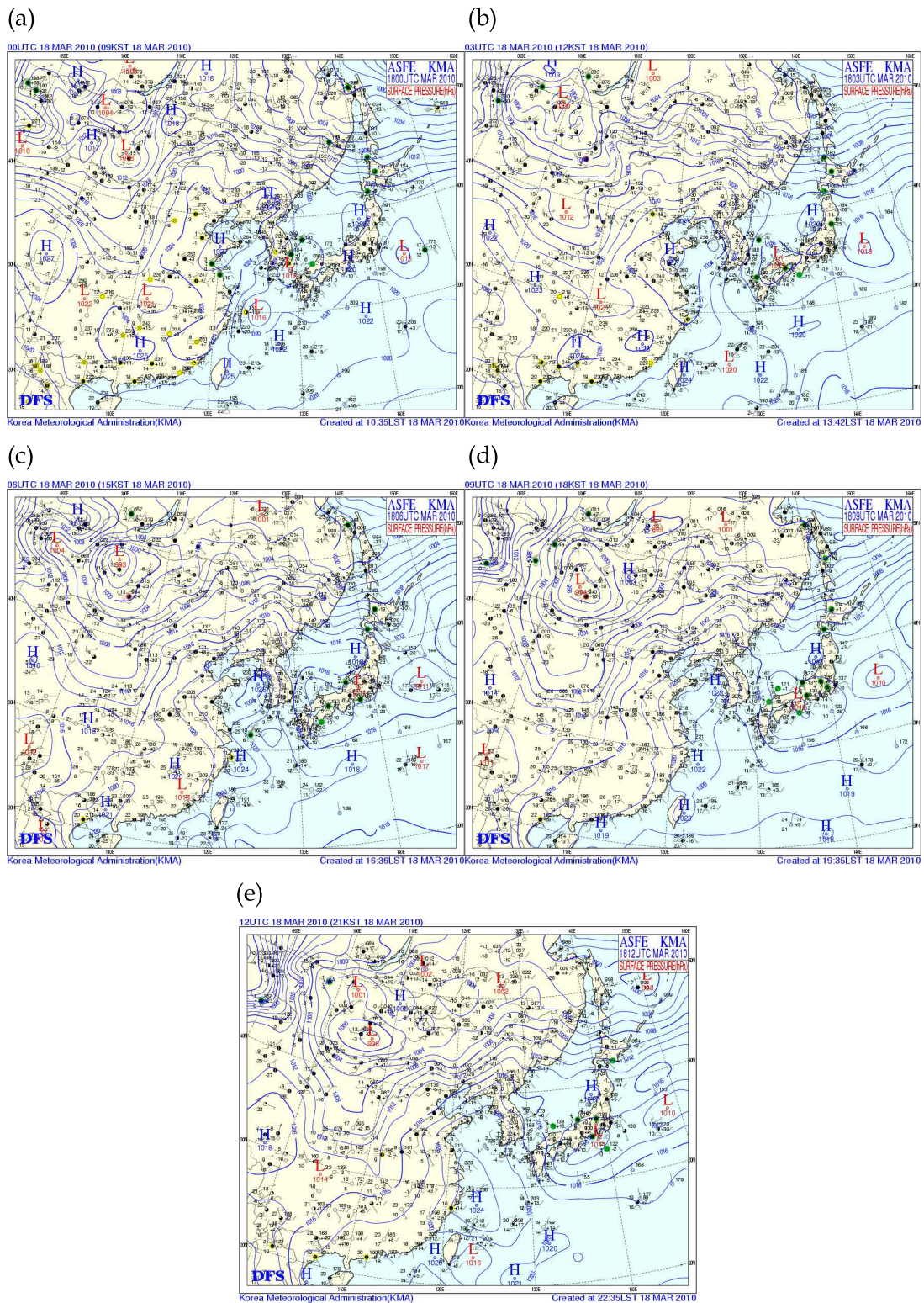


Fig. 5. Surface weather charts of East Asia at (a) 09 LST 18 March, (b) 12 LST 18 March, (c) 15 LST 18 March, (d) 18 LST 18, March, and (e) 21 LST 18 March 2010.

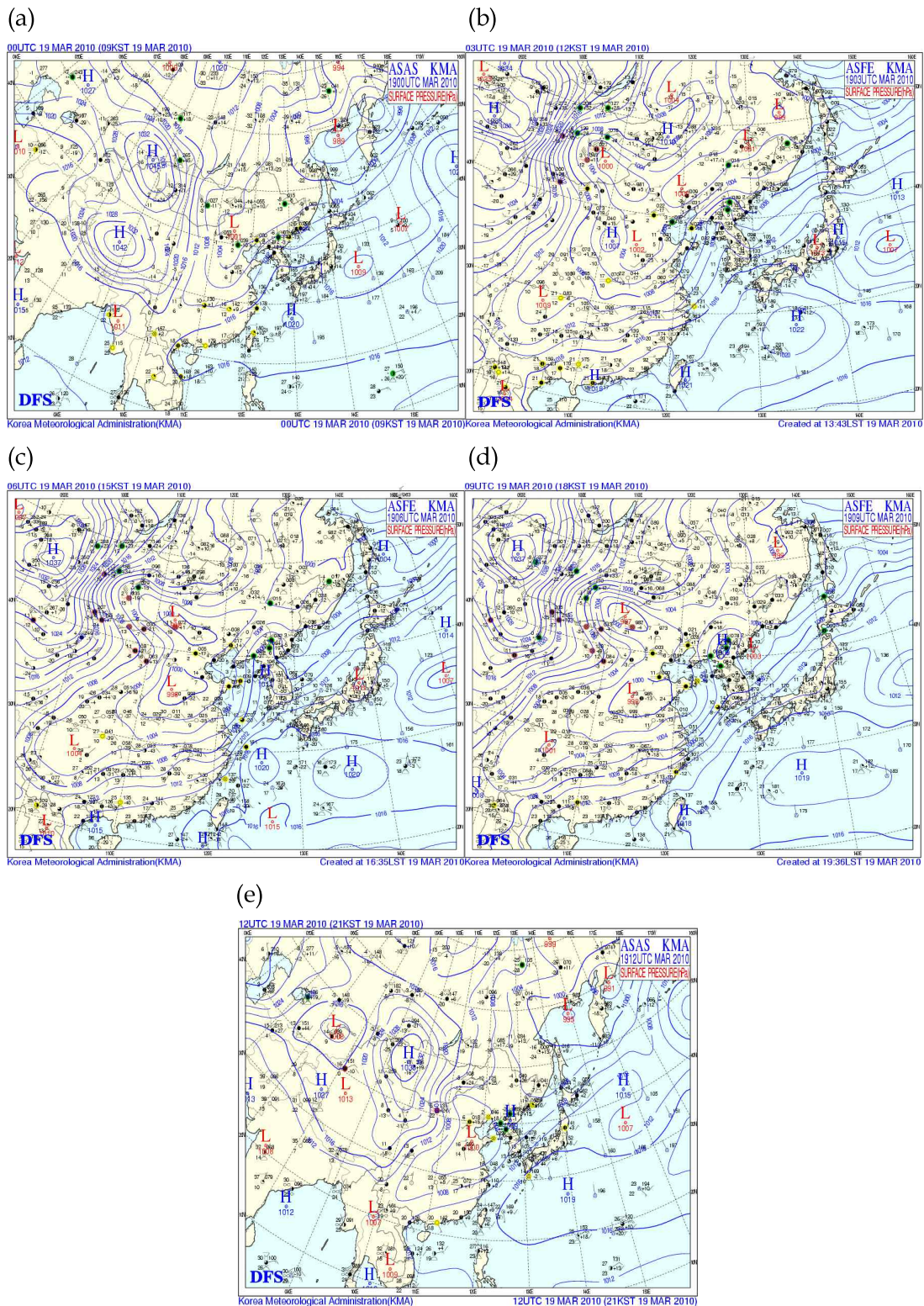


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for (a) 09 LST 19 March, (b) 12 LST 19 March, (c) 15 LST 19 March, (d) 18 LST 19 March, and (e) 21 LST 19 March 2010.

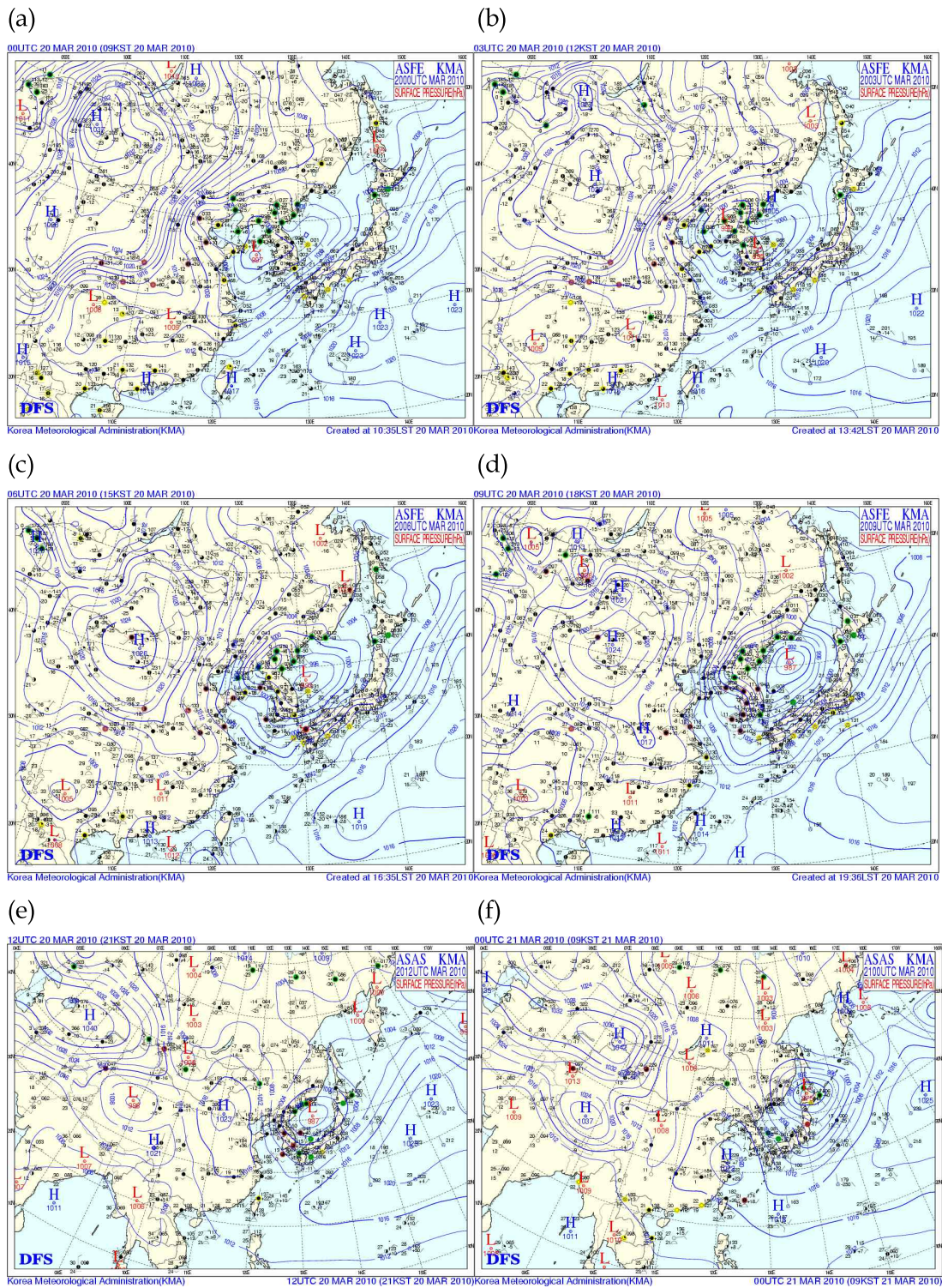


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for (a) 09 LST 20 March, (b) 12 LST 20 March, (c) 15 LST 20 March, (d) 18 LST 20 March, (e) 21 LST 20 March, and (f) 09 LST 21 March 2010.

Fig. 8은 시간별 정지기상위성(MTSAT-1R)의 적외광학두께지수(IODI) 영상을 나타내며, 적외광학두께지수는 청천지표복사와 황사층을 통과한 복사의 비율을 이용하여 황사의 강도를 지수로 나타낸 것이다(정운선, 2014). Fig. 8에서 18일 06시에 황사가 보이나 12시에는 황사를 찾아보기 힘들고, 이후 18시에 미세한 황사 농도가 보이는 것을 알 수 있다. 이후 19일 00시에 구름에 가려져 있지만 황사가 중국과 바이칼호의 남서쪽부근에서 뚜렷하게 보인다. 이는 Fig. 5의 일기도에서 보이는 황사 특징과는 다소 다르게 나타났다. 이후 19일 06시까지 황사농도가 유지되다가 12시경 고비사막과 내몽골 지역에서 황사농도가 많이 증가하는 모습을 보인다(Fig. 9). 발생한 황사는 점차 우리나라의 서해부근까지 남동진 하여 18시, 20시에 우리나라로 진입하는 모습을 보이고(Figs. 9-10) Fig. 11은 황사가 우리나라에서 점점 빠져 나가는 영상을 나타낸다. 전반적으로 위성영상에서 많은 모래먼지가 나타나는 시각, 위치 그리고 수송되는 시각은 일기도와 유사하다. 요약하면, 위성영상의 공간분포(Figs. 8-11)는 전반적으로 사례일 PM₁₀ 농도 시계열(Fig. 4)과 일기도(Figs. 5-7)와 유사한 수송패턴을 가지며, 시간별로 잘 일치하는 모습을 보인다. 한편, 일기도에서 18일 12시에 나타났던 모래먼지가 19일 12시에는 사라졌으나 위성영상에서는 이와 달리 지속적으로 모래먼지(황사신호)의 모습을 나타내고 있다.

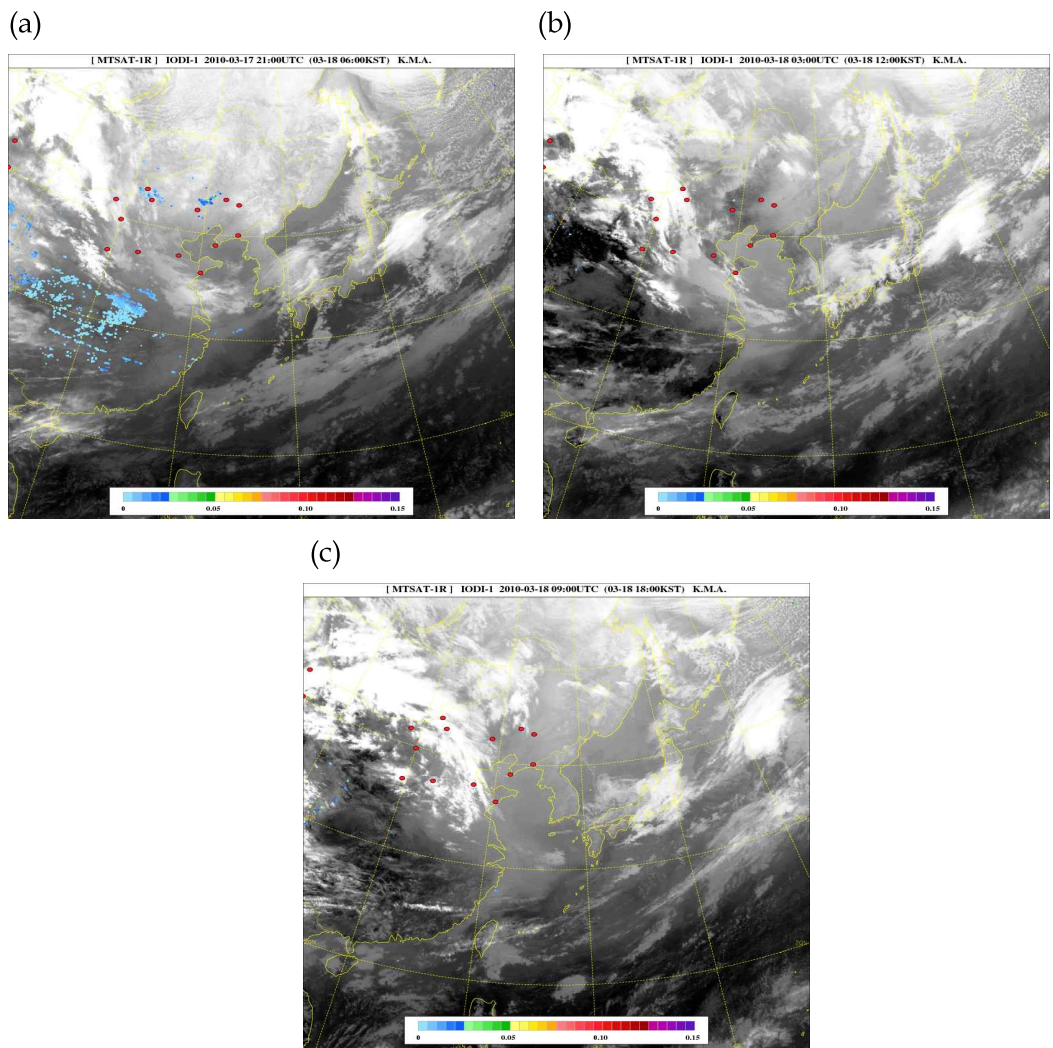


Fig. 8. MISAT-1R IODI(Infrared Optical Depth Index) imagery for (a) 06 LST 18 March, (b) 12 LST 18 March, and (c) 18 LST 18 March 2010.

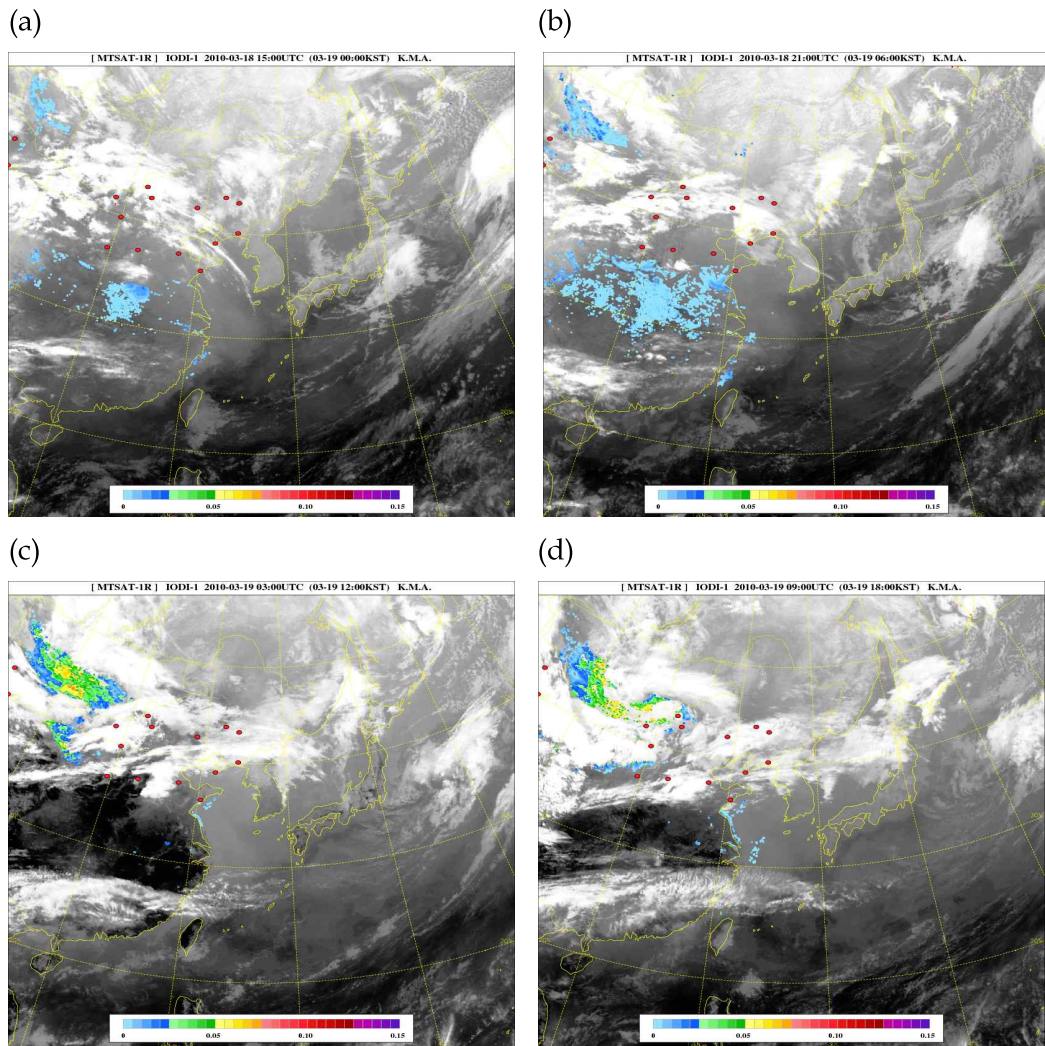


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for (a) 00 LST 19 March, (b) 06 LST 19 March, (c) 12 LST 19 March, and (d) 18 LST 19 March 2010.

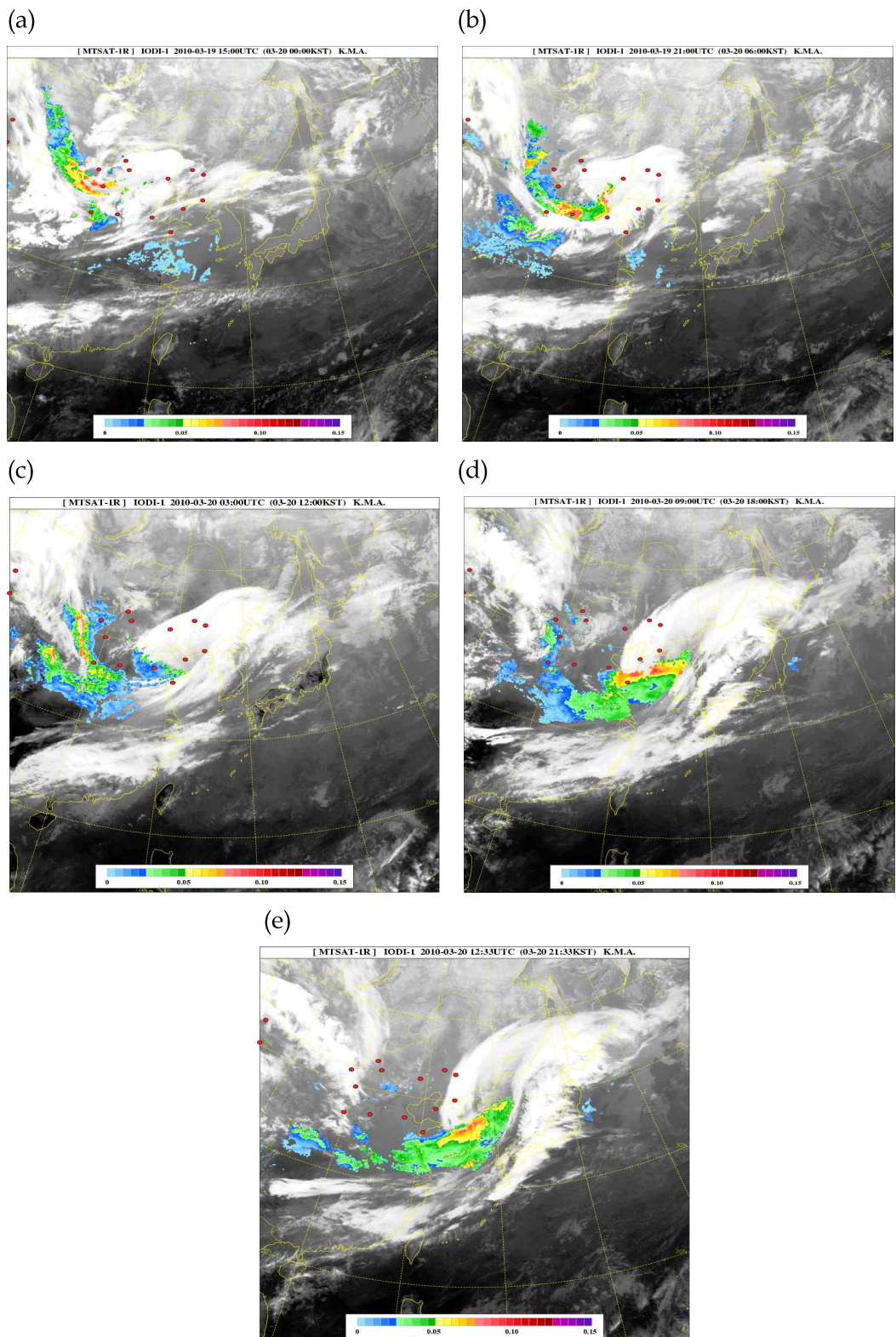


Fig. 10. Same as Fig. 8 except for (a) 00 LST 20 March, (b) 06 LST 20 March, (c) 12 LST 20 March, (d) 18 LST 20 March, and (e) 21 LST 20 March 2010.

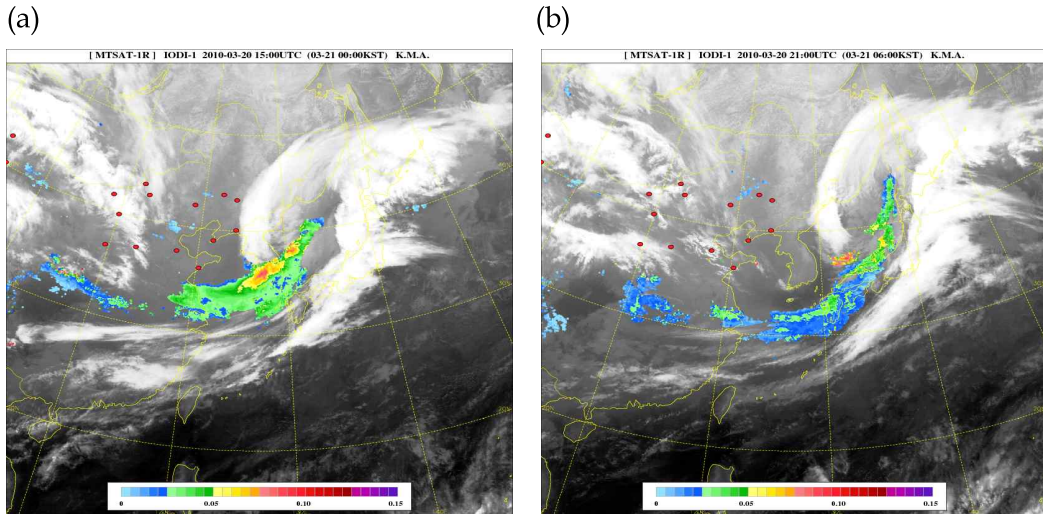


Fig. 11. Same as Fig. 8 except for (a) 00 LST 21 March, and (b) 06 LST 21 March 2010.

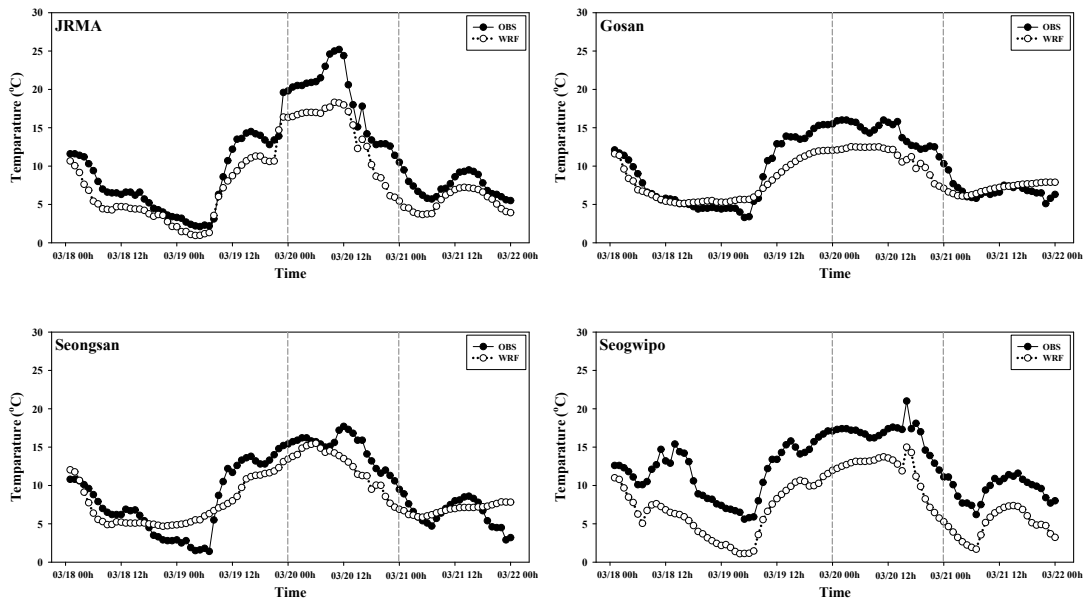
3.2. 기상모델 평가

WRF 모델 평가를 위해서 기상요소(기온, 풍속)의 관측값과 모델값을 비교를 하였다(Fig. 12). 일반적으로 기온은 낮 시간에 높아지고 밤 시간에 낮아지는 패턴을 보이는데, 본 연구의 황사 사례일과 그 전·후일의 경우 이와는 다른 패턴을 보이고 모델값 또한 이러한 패턴을 잘 묘사하는 것으로 보인다(Fig. 12(a)). 전반적으로 모델값이 관측값에 비해 약간 낮게 나타났고 특히 제주지방기상청(JRMA, Jeju Regional Meteorology Administration)에서 그 특징이 뚜렷하였다. Fig. 12(b)에서 나타내는 풍속은 대부분의 관측지점이 바닷가에 위치하여 전반적으로 높은 수치를 보이며, 모델값은 대부분의 지점에서 과대모의 하는 경향을 보였다. 이와 같은 특징은 주로 JRMA나 성산지점(Seongsan)에서 크게 나타났다.

정량적인 WRF 모델 결과 평가를 위해 통계분석을 실시하였고, 본 연구에서는 RMSE, MB 그리고 IOA를 활용하였다(Table 5). RMSE는 관측값과 모델값의 편차 분석을 (+) 값으로 표현하고 그 수치가 작을수록 모델 분석이 잘 이루어진 것을 뜻한다. MB는 RMSE와 비슷한 개념을 가지지만 모델평가에 있어서 (+), (-)로

구분하여 보여주기 때문에 모델값이 과대모의하는지 과소모의하는지 평가하는 척도가 되기도 한다. IOA의 경우 관측값과 모델값 수치의 일치도가 어느 정도인지 나타내며 0~1까지의 값에서 1에 가까울수록 두 요소의 값이 유사하다는 것을 말한다(Kim, 2013). 기온부터 살펴보면 RMSE는 대부분 2~3℃ 수준으로 나타났으나 서귀포(Seogwipo) 지점의 경우 약 5℃ 정도로 비교적 높게 나타났다. MB는 RMSE와 마찬가지로 서귀포 지점에서 가장 큰 편차(약 -5℃)를 보였고 모든 수치가 음의 값을 보이므로 시계열과 함께 비교한 결과 모델값이 모두 과소모의하는 것으로 나타났다. IOA는 서귀포 지점의 약 0.7을 제외하고는 모두 0.8, 0.9 정도의 높은 값을 나타내 관측값과 모델값 사이의 일치도가 높은 것을 알 수 있다. 풍속을 살펴보면, RMSE는 전반적으로 2~4 m/s 정도의 값을 보이는데 특히 성산과 아라 지점에서 각각 약 6 m/s와 8 m/s의 높은 수치를 보였다. MB는 RMSE의 특징과 유사하게 성산과 아라(Ara) 지점에서 높은 편차를 보이고 고산(Gosan)을 제외한 모든 값이 양의 값을 보여 전반적으로 과대모의 했다고 할 수 있다. IOA는 고산의 경우 0.9로 높은 일치율을 보이고 아라의 경우 0.3의 낮은 일치율을 보여 전체적으로 약 0.3~0.9까지의 다양한 값을 나타냈다. 모든 지점(Total)을 비교했을 때 기온, 풍속 모두 RMSE, MB 등 편차는 비교적 크나 IOA의 경우 높은 수치(기온 약 0.9, 풍속 약 0.7)를 보이기 때문에 기상모델링의 결과는 황사수송과정 및 특성 수치모의(CMAQ 모델링)를 수행하기에 대체적으로 합리적이라고 사료된다.

(a)



(b)

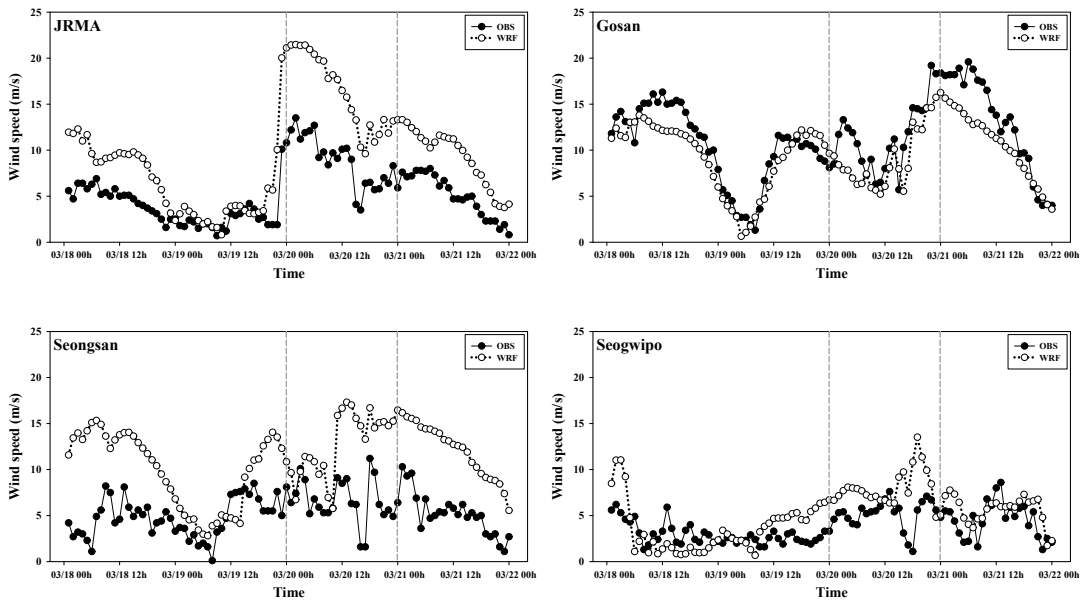


Fig. 12. Time series of the observed and WRF model-predicted meteorological variables such as (a) air temperature, (b) wind speed.

Table 5. Statistical evaluation of meteorological variables between observations and model-predicted values: results compared at several monitoring sites during the study period (01 LST 18 March ~ 00 LST 22 March).

Site	Air temperature (°C)			Wind speed (w/s)		
	RMSE	MB	IOA	RMSE	MB	IOA
JRMA	3.045	-2.592	0.928	4.967	4.093	0.731
Gosan	2.240	-1.051	0.888	2.609	-1.756	0.903
Seongsan	2.465	-0.567	0.899	6.325	5.281	0.425
Seogwipo	5.109	-4.942	0.701	2.606	1.119	0.659
Ara	2.681	-0.457	0.949	7.997	6.598	0.325
Chujado	2.310	-1.205	0.890	6.143	5.467	0.532
Udo	2.038	-0.752	0.922	3.965	2.551	0.757
Marado	1.850	-1.192	0.914	2.387	0.676	0.890
Hallim	3.274	-2.739	0.874	3.660	3.273	0.759
Namwon	4.040	-3.632	0.816	3.610	1.394	0.556
Gujwa	4.022	-3.212	0.848	4.860	4.205	0.616
Moseulpo	3.043	-2.213	0.842	2.477	0.816	0.858
Gapado	2.592	-2.093	0.888	3.474	0.176	0.730
Total	3.110	-2.049	0.896	4.396	2.481	0.746

3.3. 황사 및 PM₁₀ 배출량의 시·공간 분포 특성

CMAQ모델에 입력자료로 들어가는 황사 및 PM₁₀ 배출량의 각 시간별 공간분포도를 Fig. 13에 나타낸다. (a)는 임계마찰속도(Threshold friction velocity)를 통해 구해진 황사(Aisan dust) 농도를 나타내고, (b)는 INTEX-B, CAPSS 배출량에서 제공되는 PM₁₀ 배출량을 나타낸다. Fig. 13(a)를 보면, 3월 18일 06시와 12시에 바이칼호 남서쪽 부근(약 95°E, 50°N 부근)부터 황사의 배출을 보이고 그 중심부의 배출량이 약 1000 mg/h/m²이다. 이 지점은 몽골 서쪽 부근과 투바공화국의 경계지점으로 사막이 위치하고 있다. 이후 18일 18시와 19일 00시에 배출이 점차 약해지는 모습을 보이고 19일 06시에 다시 배출이 시작되다가 12시부터 18시까지 내몽골 및 고비사막에서 큰 황사배출(중심부에서 약 1,300 mg/h/m²)을

보인다. 특히 중심부의 최고농도의 수치가 높고 그 면적을 보았을 때 19일 18시에 황사배출이 가장 많았을 것으로 판단된다. 그리고 3월 18일 12시부터 19일 06시까지 일정 수준의 배출량이 나타나는 것으로 보아 계산된 황사배출량 모델에 사용된 황사 배출량은 일기도 그림(Figs. 5-7) 보다 정지궤도위성(MTSAT-1R)의 IODI 영상(Figs. 8-11)에 더 일치하는 것으로 사료된다.

Fig. 13(b)를 보면, 전체적으로 한반도와 중국지역의 동쪽지역(특히 중국내 공업단지 부근)에서 PM_{10} 배출량 분포를 볼 수 있는데, 시간 변화에 따라 배출정도가 서로 다른 것을 확인할 수 있었다. 06시에는 전반적으로 약 50 mg/h/m^2 정도의 약한 배출량을 보이는 반면, 12시경에 2~3배가량 늘어난 약 $100\sim150 \text{ mg/h/m}^2$ 의 배출량을 보인다. 18시에는 12시에 비해 다소 적어지는 경향을 보였고 00시에는 06시와 거의 유사한 수치를 보였다. 이와 같은 PM_{10} 배출량의 변화 패턴은 인간의 활동 시각과 밀접한 관련을 갖는다고 사료된다. 즉, 인간이 왕성하게 활동하는 시각인 낮시간(12~18시)의 배출량이 밤시간(00~06시)에 비해 더 많은 배출량을 보인다. 이외에도, 통계적 배출량 자료를 활용하였기 때문에 사례일과 같은 단기간에는 날짜에 따른 배출량 차이는 나타나지 않았다. 그리고 중국 공업단지 등에 의한 PM_{10} 배출량은 사막지에서 발생하는 황사배출에 비해 약 10배정도 낮은 수치를 보였기 때문에 우리나라에 발생한 고농도 PM_{10} 은 황사에 의한 영향이 약 90%이상이라고 추정된다.

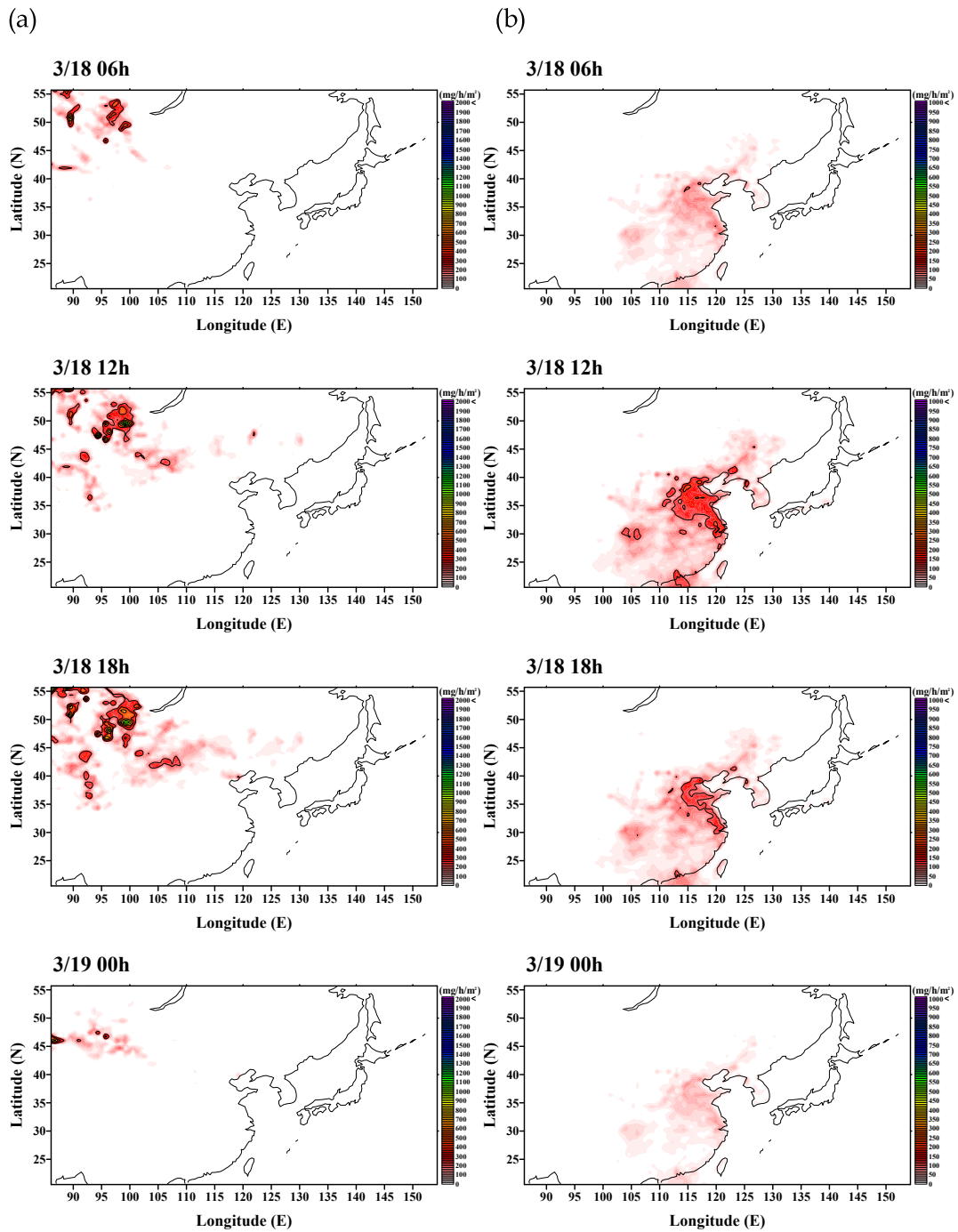


Fig. 13. Spatial distributions of (a) hourly Asian dust emissions calculated by threshold friction velocity (u^*_t) and (b) PM_{10} emissions derived from INTEX-B (East Asia) and CPASS (South Korea) at the surface layer of the study area.

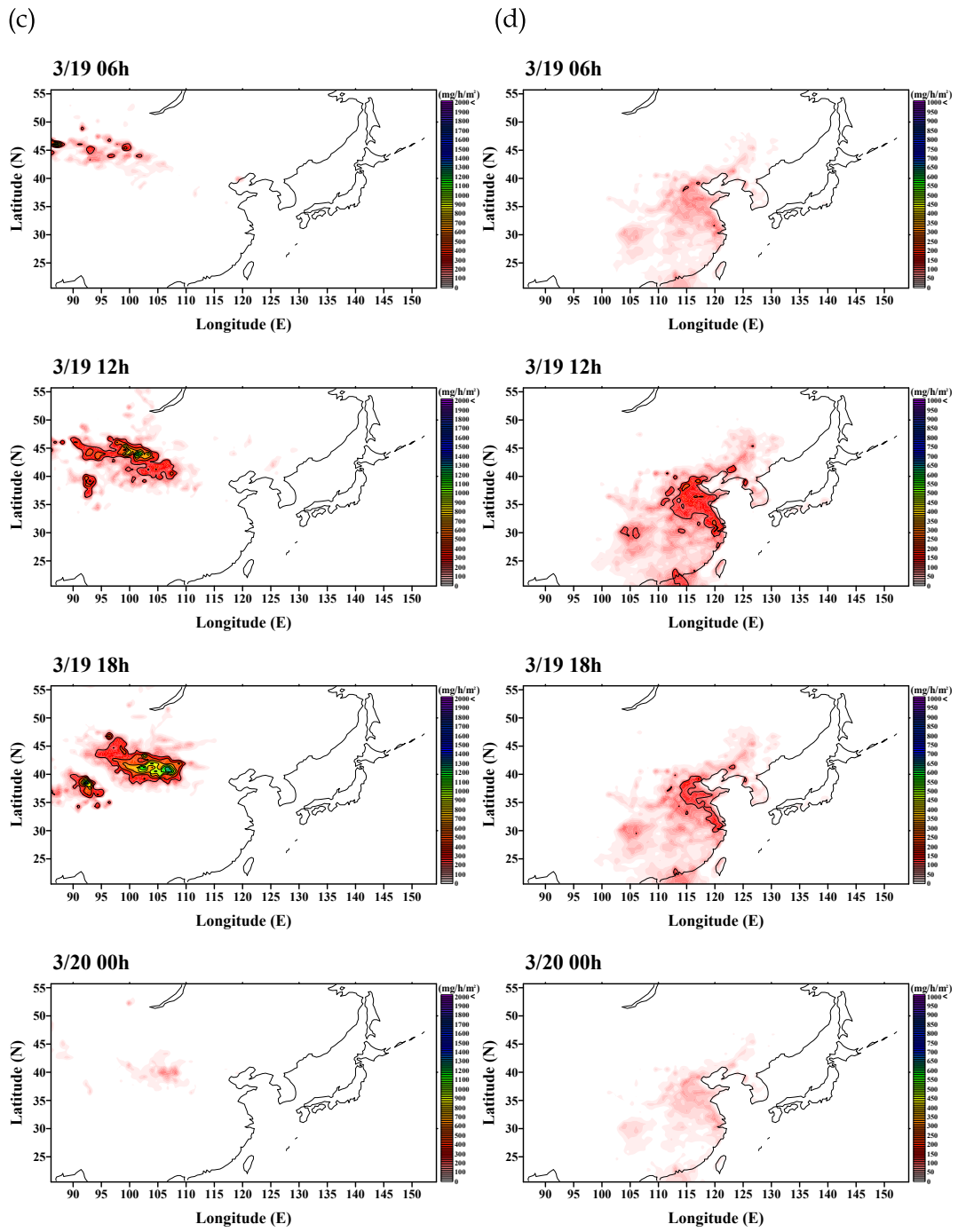


Fig. 13. (Continued.)

3.4. 황사농도 시·공간 분포 특성

3.4.1. 수평분포 분석

Fig. 14는 CMAQ 모델링을 수행하여 추정된 황사 수송과정의 공간분포와 WRF 모델의 바람벡터를 나타낸다. 먼저 3월 18일 18시를 보면, 18일 12시부터 발생한 황사배출의 영향(Fig. 13)을 받아 바이칼호의 투바공화국과 몽골지역의 경계지점에서 매우 높은 황사농도(중심부에서 약 $9,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)가 나타났다. 같은 시간대의 바람벡터를 보면 황사신호가 강하게 나타나는 지역에서 강한 풍속의 바람이 부는 것으로 보아 임계마찰속도에 크게 영향을 받는 황사의 배출(Fig. 13)과 같은 시각의 황사농도는 강한 풍속에 의하여 생긴 것으로 사료되고 이는 일기도 및 위성영상과 유사한 패턴이다. 이후 19일 00시~06시까지 북서풍 바람의 영향을 받아 점차 남동진하는 모습을 보인다. 19일 12시에는 고비사막 부근까지 황사가 수송되었고 이 부근에서 강한 바람이 넓은 범위에 걸쳐 불었다는 것을 알 수 있다. 이후 19일 18시 그림에서는 고비사막 부근에서 수송되던 황사의 농도가 더욱 짙어지는 패턴을 보이고 중심부 최고농도가 약 $9,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 수치를 보인다.

20일 00시의 경우 남동진하는 과정에서 최고농도 부분의 면적이 더 넓어지는 모습을 보였고, 19일 18시와 20일 00시의 이러한 패턴은 고비사막을 지나는 과정에서 강한 풍속이 지속적으로 이루어져 황사의 농도가 매우 높아진 것으로 추정된다. 20일 06시, 12시의 그림은 바람장 그림에서 볼 수 있듯 지속적인 북서풍의 영향으로 황사가 우리나라로 남동진하는 모습을 나타낸다. 20일 18시경 우리나라의 서해쪽에 그 영향을 미치기 시작하며 황사가 보이고, 중심부의 농도가 약 $3,400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보인다. 이때 바이칼호의 남서쪽에서 짙은 황사가 보이는데 이는 같은 시간 일기도의 그림에서 나타난 저기압이 그 원인이 되었을 것으로 추정된다. 20일 20시에 황사는 우리나라로 진입한 모습을 보이고 21일 00시까지 지속적으로 남동진하면서 우리나라를 덮고 있고 그 농도는 약 $600 \sim 3,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지의 짙은 농도를 보인다. 이후 3월 21일 06시 황사는 바람장을 따라서 일본쪽으로 빠져나간다. 황사 수치모의의 수평분포는 전반적으로 일기도 및 위성영상에서 나타나는 수송모습과 유사한 결과를 나타낸다.

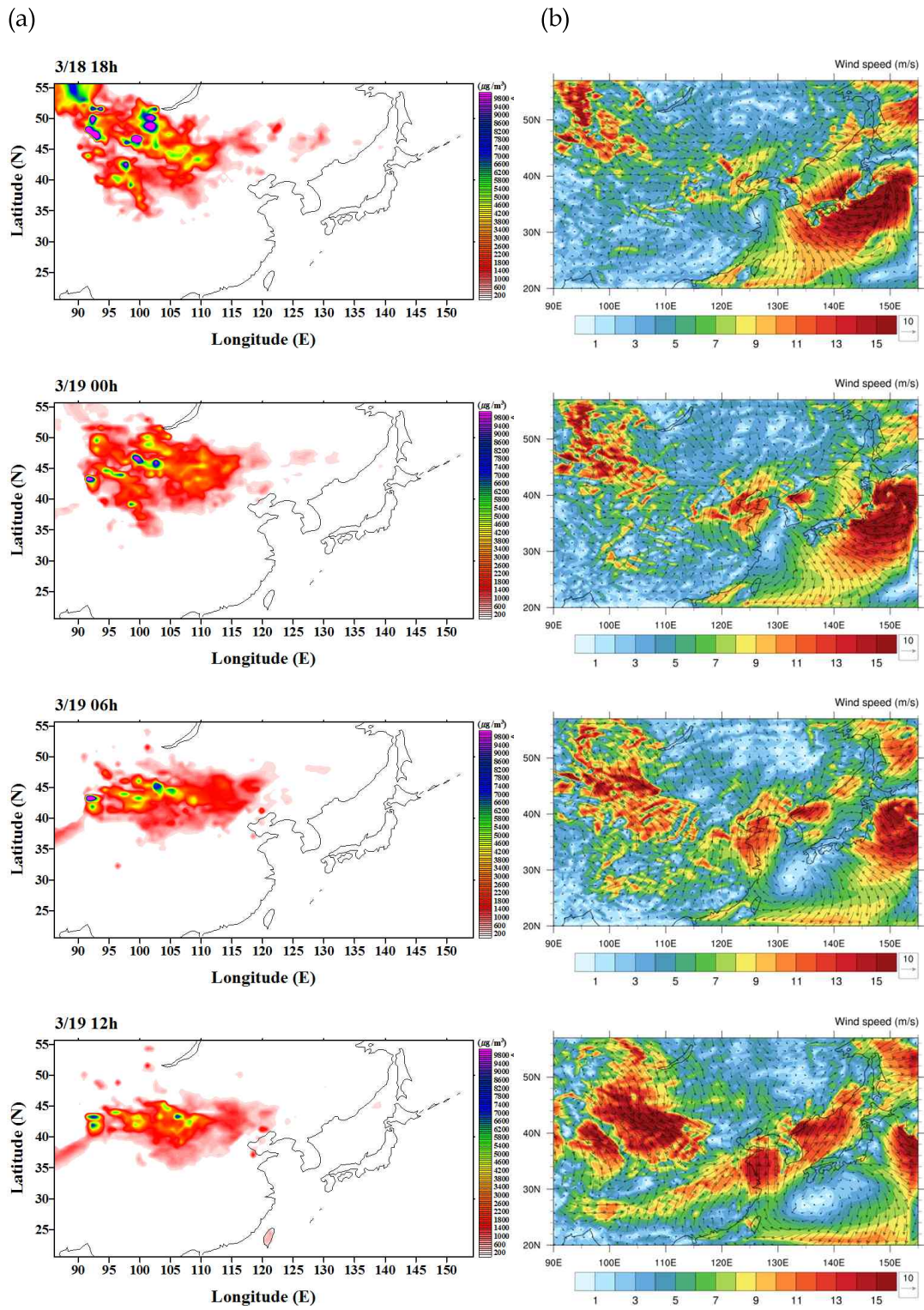


Fig. 14. Spatial distributions of (a) hourly mean Asian dust concentrations simulated by the CMAQ modeling system and (b) wind vectors simulated by the WRF model at each time in the East Asia.

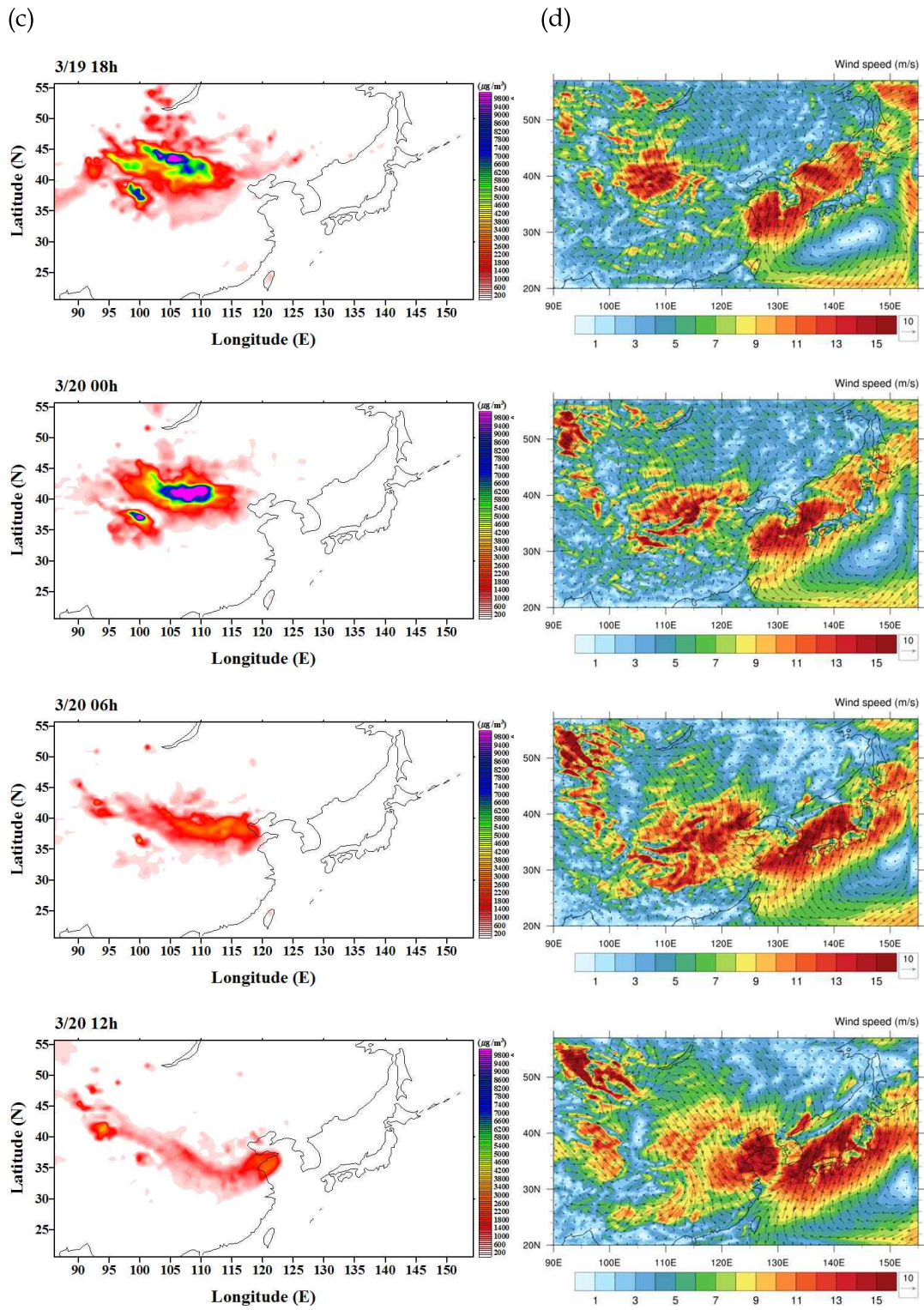
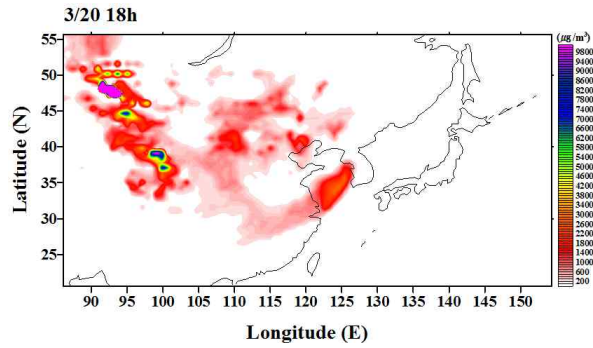
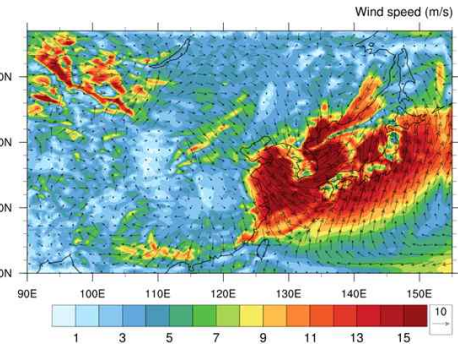


Fig. 14. (Continued.)

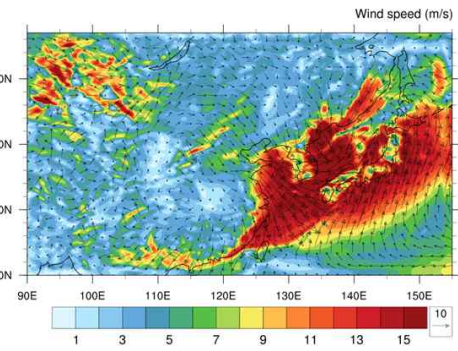
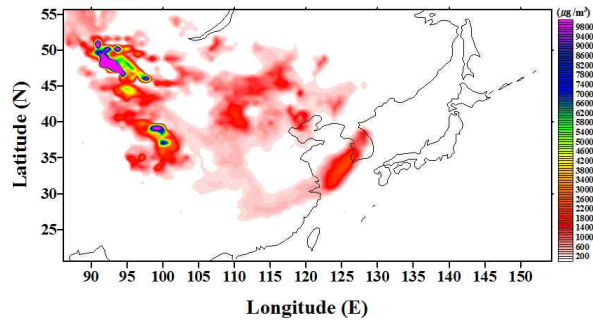
(e)



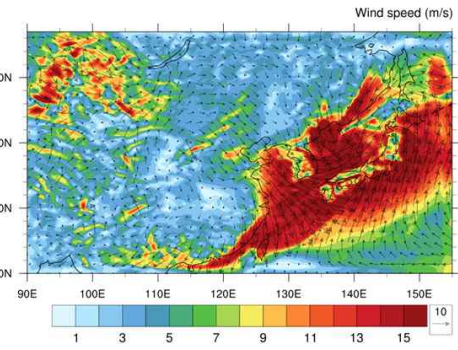
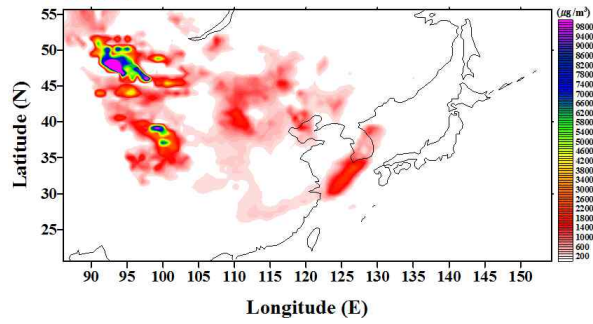
(f)



3/20 20h



3/20 22h



3/21 00h

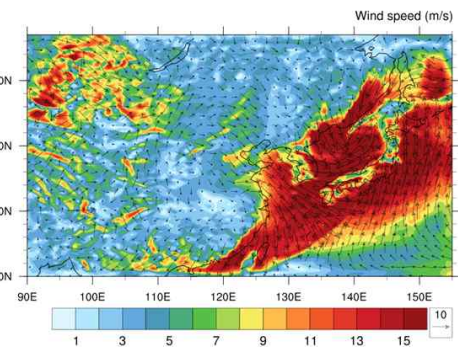
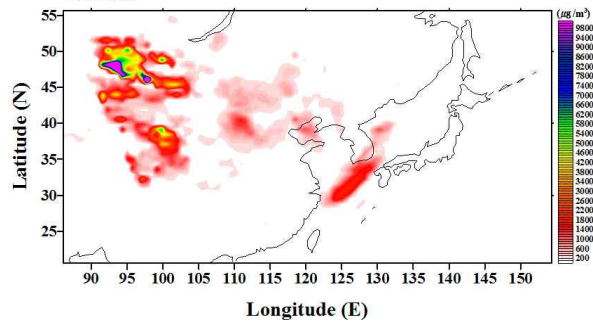


Fig. 14. (Continued.)

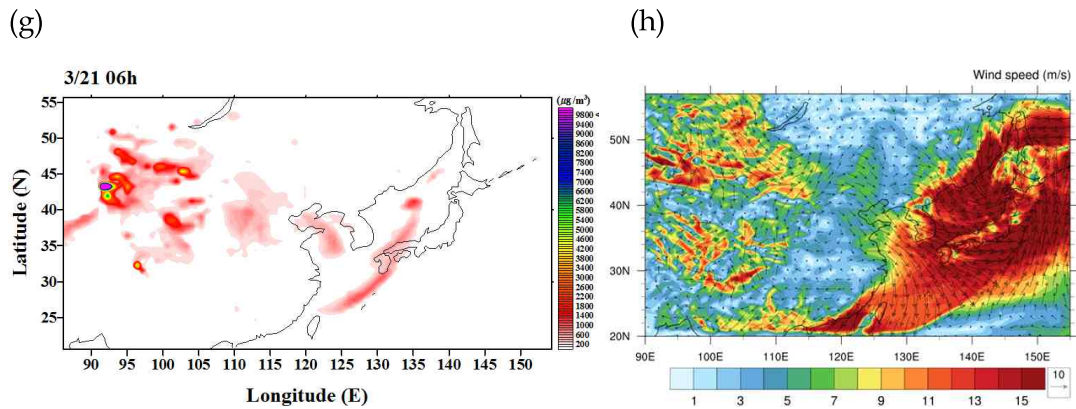


Fig. 14. (Continued.)

Fig. 15는 연구대상지역인 제주도의 황사농도 수평분포를 나타낸다. 20일 12시 경 아직 황사가 보이지 않으며 14시에 우리나라의 서해부근에서 약 $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 황사농도가 나타났다. 이후 16시에는 점차 남동진하였고 18시에 고농도(최고 농도 약 $3,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)의 황사를 나타낸다. 이때 우리나라 서해, 남해, 제주도 등 낮은 수치의 황사가 보이기 시작한다(그림에서 묘사하지 않음). 이후 20시 제주도 서쪽지역부터 황사의 영향을 받기 시작하며 이는 Fig. 4에 나타난 황사농도가 본격적으로 높아지기 시작하는 시각과 농도가 거의 유사하다. 20일 22시 제주도를 완전히 덮은 모습을 보이고 제주도의 북동쪽에서 매우 높은 황사농도(약 $2,700 \sim 2,900 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보인다. 이때 광범위했던 황사가 공간적으로 나뉘는 모습을 보이는데 이는 제주도 중심에 있는 한라산이 수송되는 황사를 막았기 때문으로 사료된다. 이때 황사의 공간분포 모습이 갈라지는 위치가 거의 한라산이 위치한 제주도의 중심부인 것으로 보아 제주지역에 대한 모델결과의 신뢰성은 높다고 판단된다. 이후 21일 00시 황사가 제주도를 점점 빠져나가는 모습을 보이기 시작하고 이때 약 $180 \sim 1,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도의 황사가 지속적으로 제주지역에서 나타났다. 21일 02시 제주도에 나타났던 고농도의 황사농도가 점차 낮아졌고, 이후 21일 04~06시에 제주지역을 완전히 벗어나 일본쪽으로 빠져나가는 모습을 보인다.

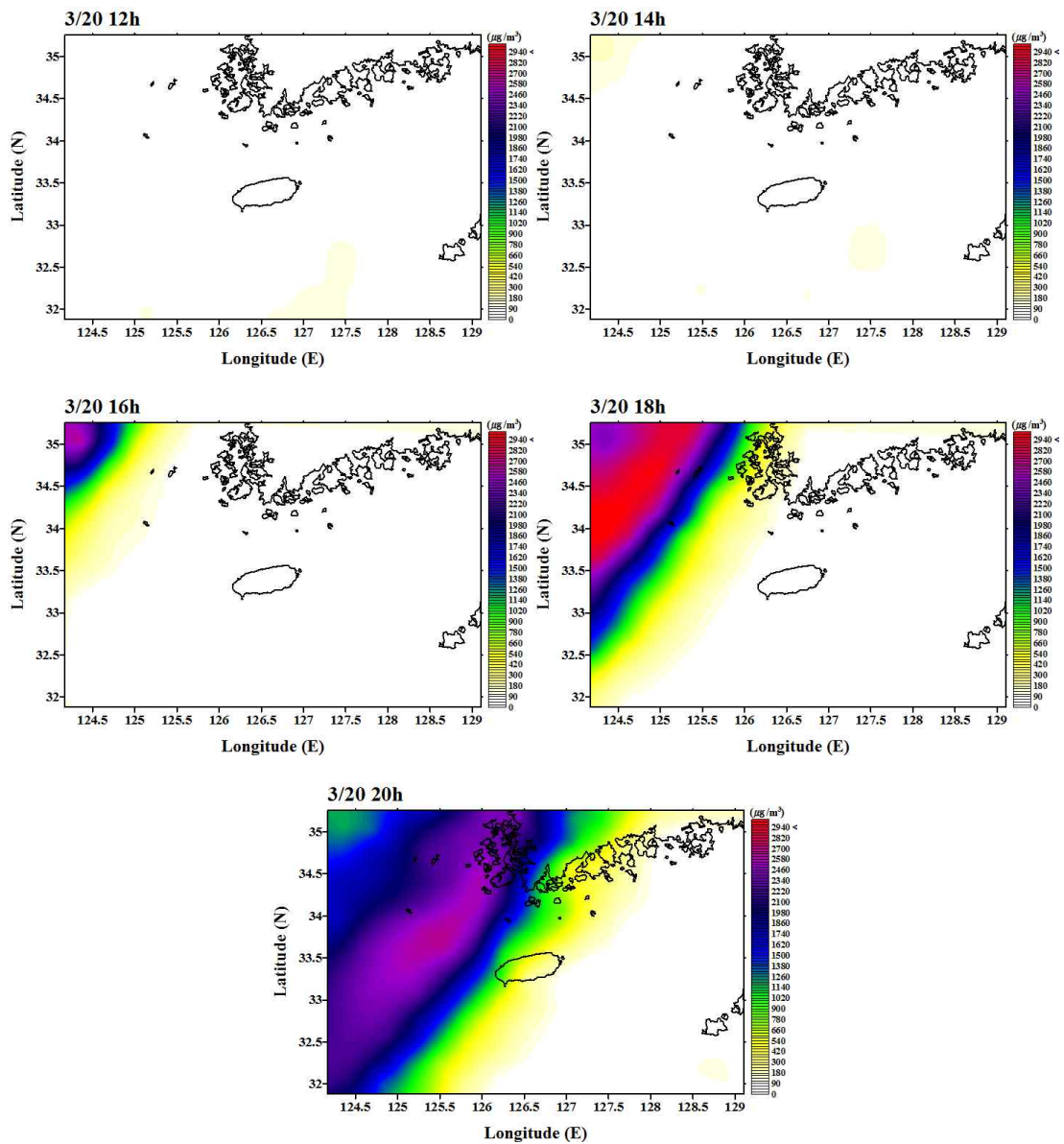


Fig. 15. Spatial distributions of hourly mean Asian dust concentrations simulated by the CMAQ modeling system around Jeju island.

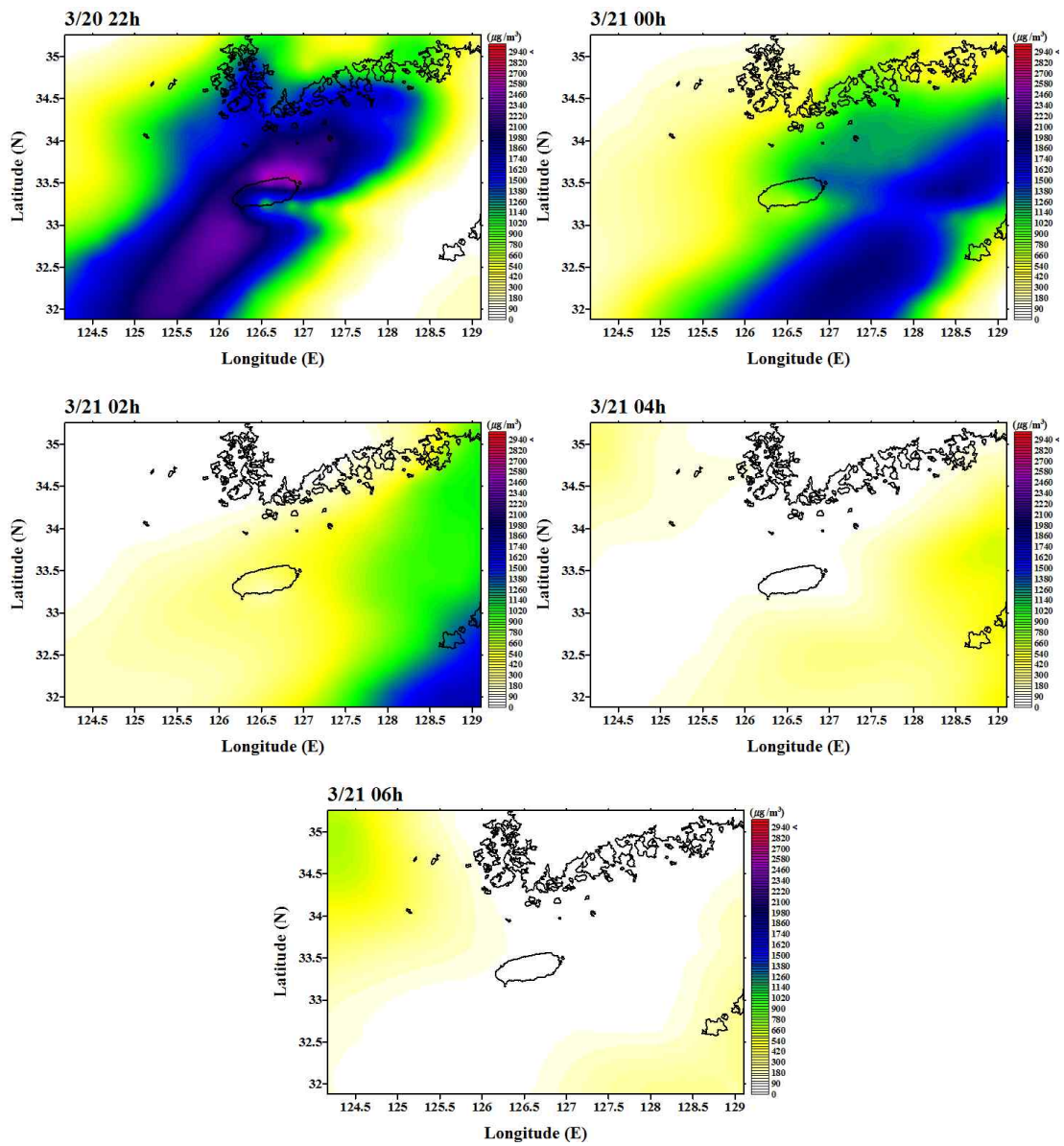


Fig. 15. (Continued.)

3.4.2. 연직단면도 분석

Fig. 16은 황사수송과정을 보기위한 고도-위도의 연직단면도를 나타내며 (a)는 각 단면도에 나타낸 위도에 따른 Cross lines 을 나타내며 각각 A-A' (50°N)는 몽골과 투바공화국의 경계지점을 보고자 하였고, B-B' (42°N)는 고비사막에서 황사의 발생과 수송, C-C' (38°N)는 우리나라로 수송되는 황사의 모습, 그리고 D-D' (33°N)는 제주지역에 대한 황사의 모습을 보기위해 설정하였다. Fig. 17은 각 cross line에 따른 연직단면도를 나타낸다. 3월 18일 18시 일기도(Figs. 5-7), 위성영상(Figs. 8-11) 그리고 황사농도 수치모의 수평분포(Fig. 14)에서도 알 수 있듯이 바이칼호의 남서쪽부근에서 지속적인 배출로 인하여 낮은 고도에서 고농도 황사(약 $12,500 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 보이고(A-A'), B-B'에서는 A-A'에서의 황사농도에 비해 조금 낮게 나타났으며, C-C'은 B-B'과 유사한 연직분포였으나 농도가 발원지와 거리가 길기 때문에 비교적 낮게 나타났다. D-D'에선 강한 황사가 보이지 않는 특징을 나타냈다. 3월 19일 00시 A-A'에 비해 B-B'에서 그 농도가 더 짙어지는 것을 통해 황사는 남쪽으로 향하는 것을 알 수 있고 황사의 위치가 이전 시각에 비해 오른쪽으로 바뀌는 것으로 보아 종합적으로 황사는 남동진하고 있다는 것을 알 수 있다. 19일 06시에는 19일 00시 B-B'에서 보이던 황사가 부유하여 수송되는 모습을 보이고 90°E~95°E 사이에 조금씩 황사가 보이기 시작한다. 이후 12시에 좀 더 남쪽까지 수송되어 C-C'와 D-D'까지 황사가 보이고 고비사막 부근에서도 황사가 배출되어 수송되던 황사에 모래먼지를 더 공급하는 모습을 보인다. 19일 18시경 앞서 살펴보았던 일기도, 위성영상과 유사하게 고비사막에서 매우 강한 황사를 보이고 그 범위 또한 넓다. 그리고 점차 약 5~8 km 고도를 따라서 국내로 수송되는 모습을 보인다. 이는 일반적으로 황사가 수송되는 고도(약 3~5 km)에 비해 높은 고도를 따라 수송되고 있음을 보여준다. 20일 00시 발생된 황사는 점점 더 남동진 하는 모습을 보여 D-D'에서도 많은 황사를 보이고 약 7~9 km 고도 부근에서 열은 띠 형상의 황사 모습이 나타났다. 이중 가벼운 황사입자의 경우 저기압의 영향을 지속적으로 받아서 공중에 부유하게 되며 상층의 바람에 따라 상공을 통해 빠른 속도로 제주도과 일본까지도 넘어갔을 것으로 추정된다. 20일 06시 이전 시각에는 C-C'에서 많은 농도를 보인 것에 비해 D-D'에서 많은 황사가 보이고 조금씩 고농도의 황사가 부유 및 수송되는 모습을

보인다. 이후 20일 12시에 C-C'와 D-D'에서 중국의 공업단지부근의 상공에서 짙은 농도의 황사를 보이며 이는 공업단지의 PM₁₀ 배출(Fig. 13(b), Fig. 13(d))을 고려하지 않았음에도 불구하고 일기도 및 위성그림 결과와 유사한 패턴이기 때문에 앞서 언급하였듯이 사례일의 고농도 PM₁₀은 황사에 의한 영향이 대부분인 것으로 판단된다. 20일 18시 D-D'에서는 황사가 제주지역으로 진입하고 하층까지 영향을 주는 모습을 보인다. 이후 20~22시에는 그 농도가 작아지기 시작하며 다시 부유하여 동진하는 형태를 보인다. Fig. 14의 같은 시간 그림에서 바람이 지속적으로 북서풍이 부는 것으로 보아 그림에 나타내지는 않았지만 수평장과 유사하게 남동진한 것으로 추정된다. 21일 06시에는 황사가 일본 부근까지 빠져나가는 모습을 보이고 농도가 매우 감소하였다.

황사수치모의(CMAQ 모델링) 결과를 요약하면, 황사사례일 동안 우리나라로 유입되었던 황사는 3월 18일 18시에 바이칼호의 남서쪽 몽골와 투바공화국의 경계지점에 있는 사막에서 발생하여 지속적인 강한 북서풍 바람에 의해서 남동진하였고 이동하는 과정에서 19일 12~18시경 고비사막에서 발생한 모래먼지가 합쳐져 매우 심각한 농도수준을 기록하게 되었다. 이후 20일 18시까지 바람장에 의해 지속적으로 남동진하여 우리나라로 진입하여 영향을 준 뒤 일본쪽으로 빠져나가는 모습을 보인다. 황사 발원지에서 농도는 약 12,500~15,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 수치를 보였고 우리나라에 도달하여 영향을 미치는 시간의 상층 농도는 약 5,000~7,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소하였다. 지표부근에서의 농도는 약 1,000~3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 사막 등 발생지에서의 농도보다 약 5배~10배 가량 감소하였다. 또한 수송되는 과정에서 약한 황사 신호가 대류권의 상층부인 약 10 km 고도까지 넘어가기도 하는데 이는 매우 강한 저기압이 가벼운 황사입자를 부유시키는 등 황사의 수송에 기여하였기 때문이라고 사료된다.

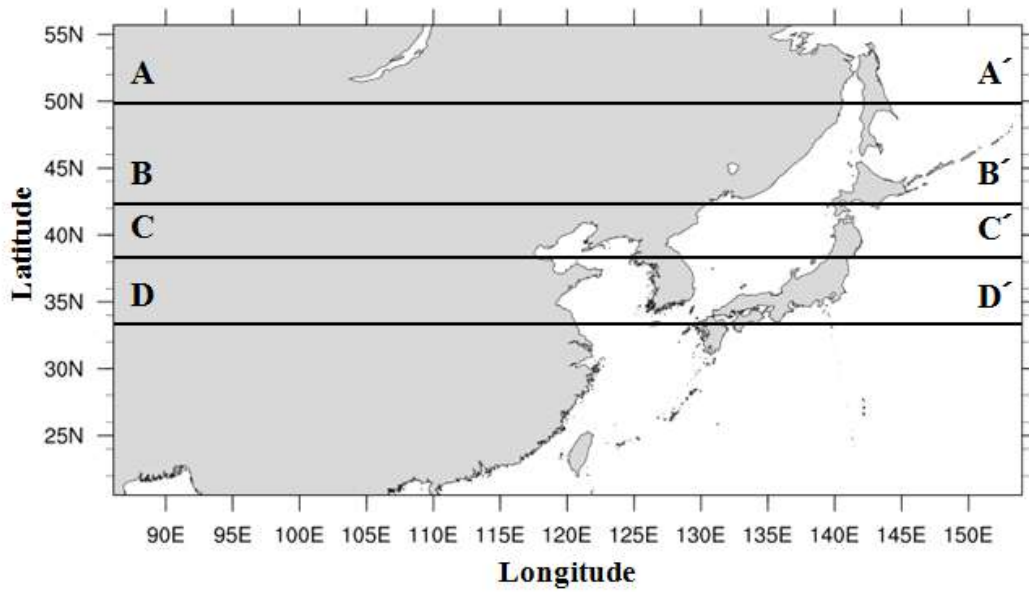


Fig. 16. A-A' (50°N), B-B' (42°N), C-C' (38°N), and D-D' (33°N) indicate the vertical cross-section lines.

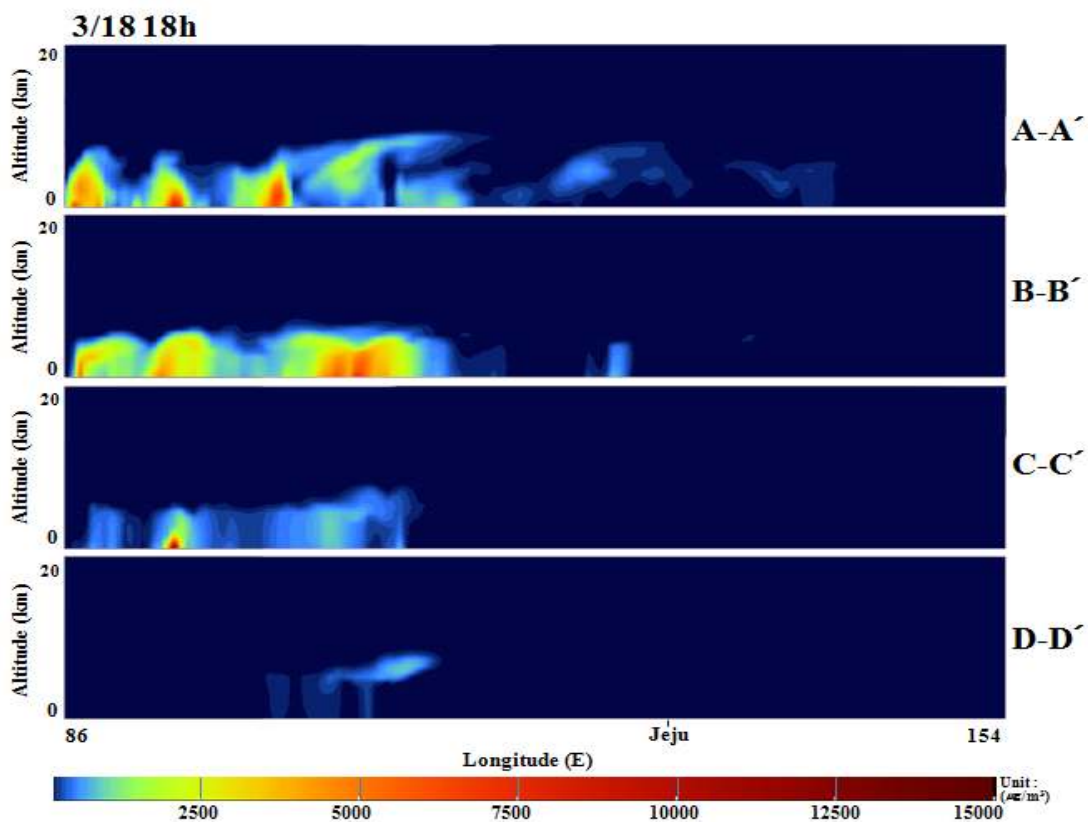


Fig. 17. Altitude-longitude cross sections for Aisan dust concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) simulated by the CMAQ modeling system at each time.

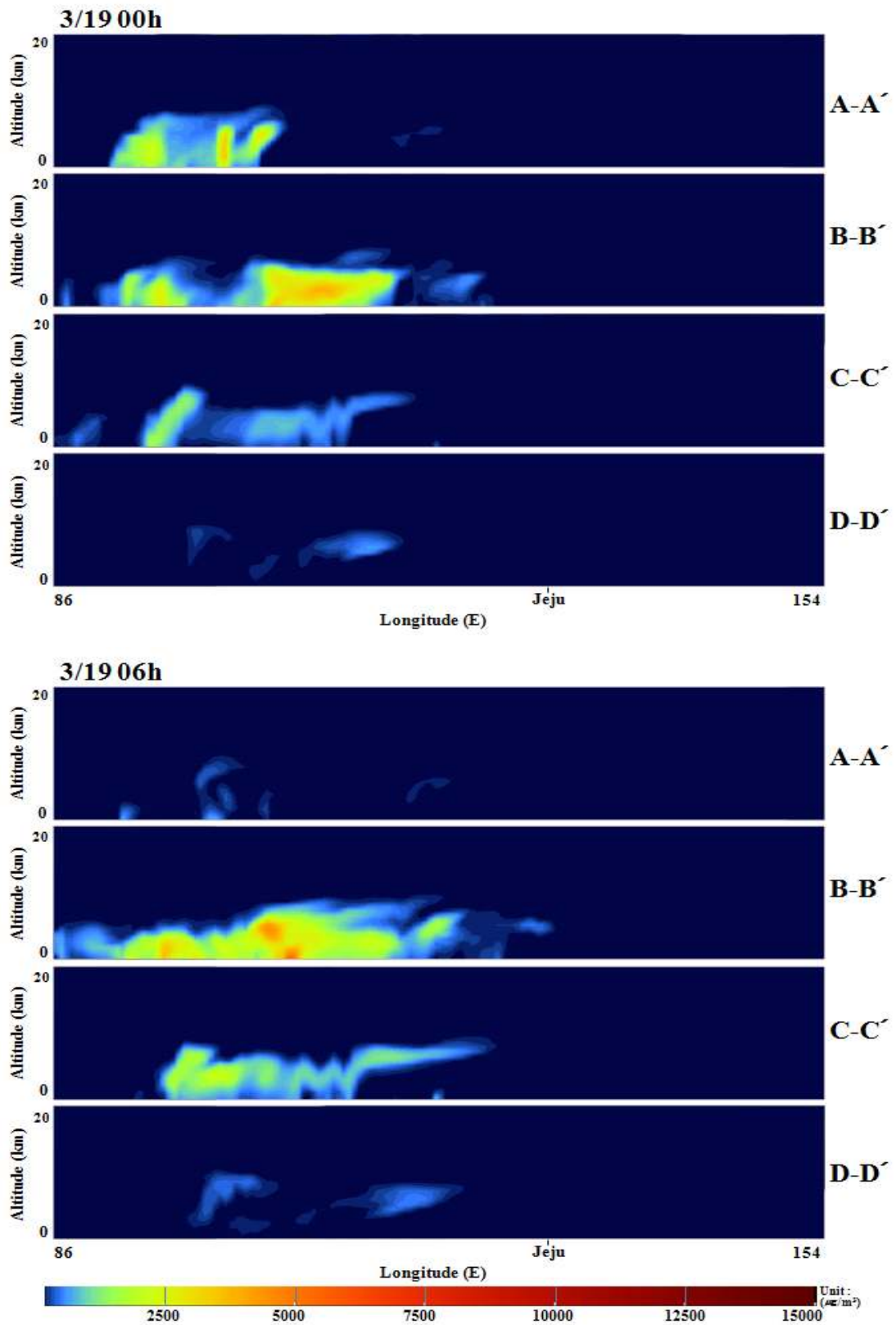


Fig. 17. (continued.)

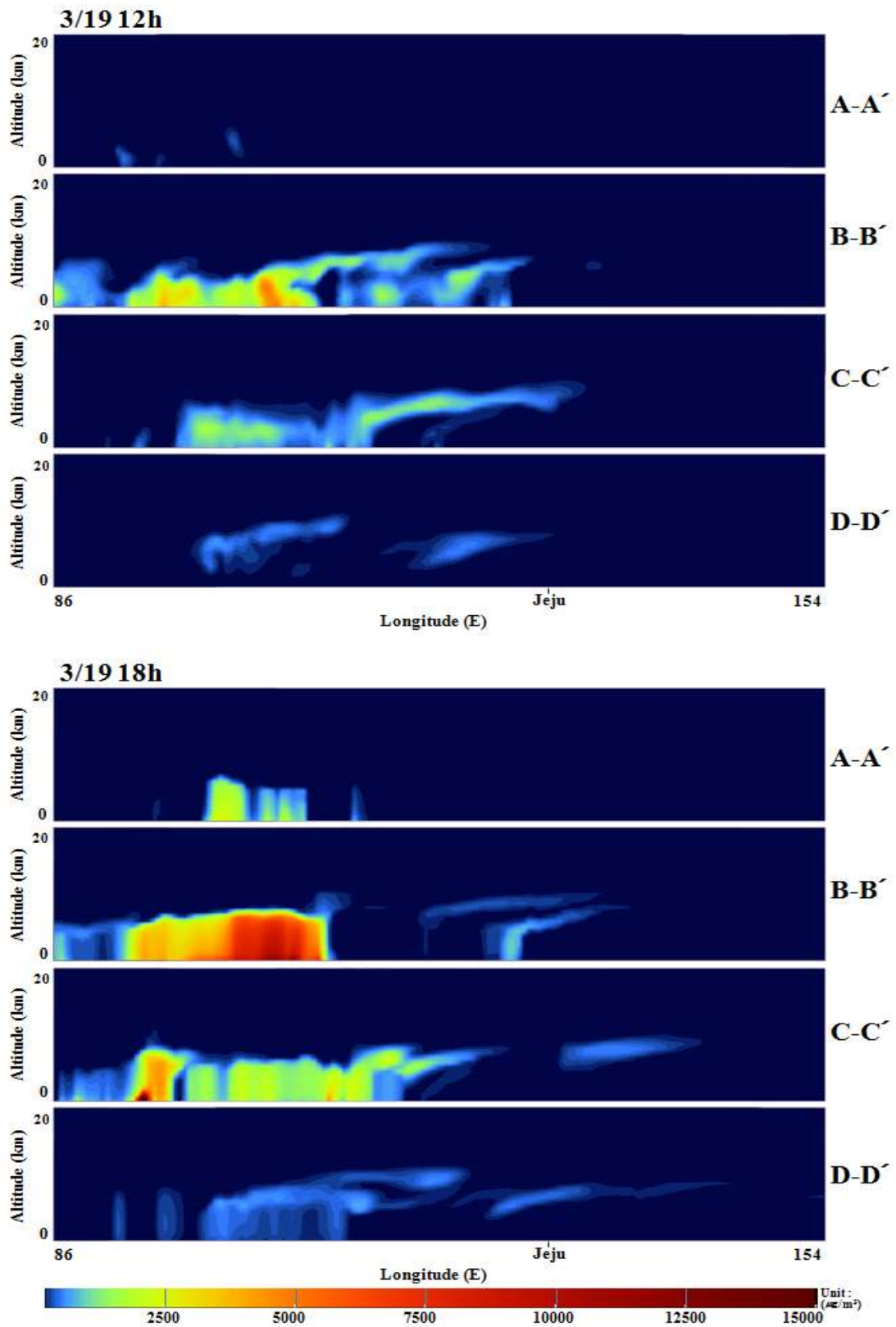


Fig. 17. (continued.)

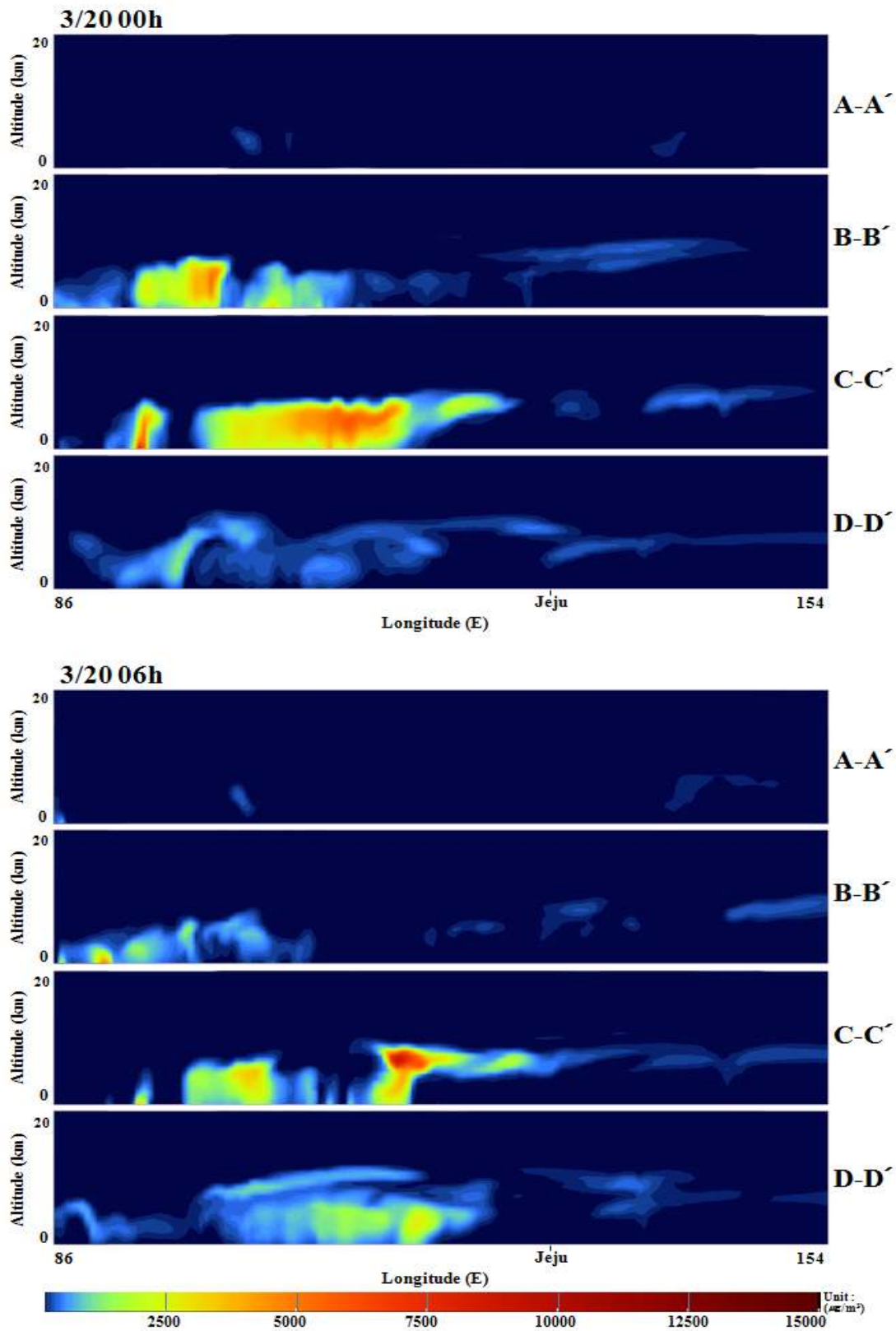


Fig. 17. (continued.)

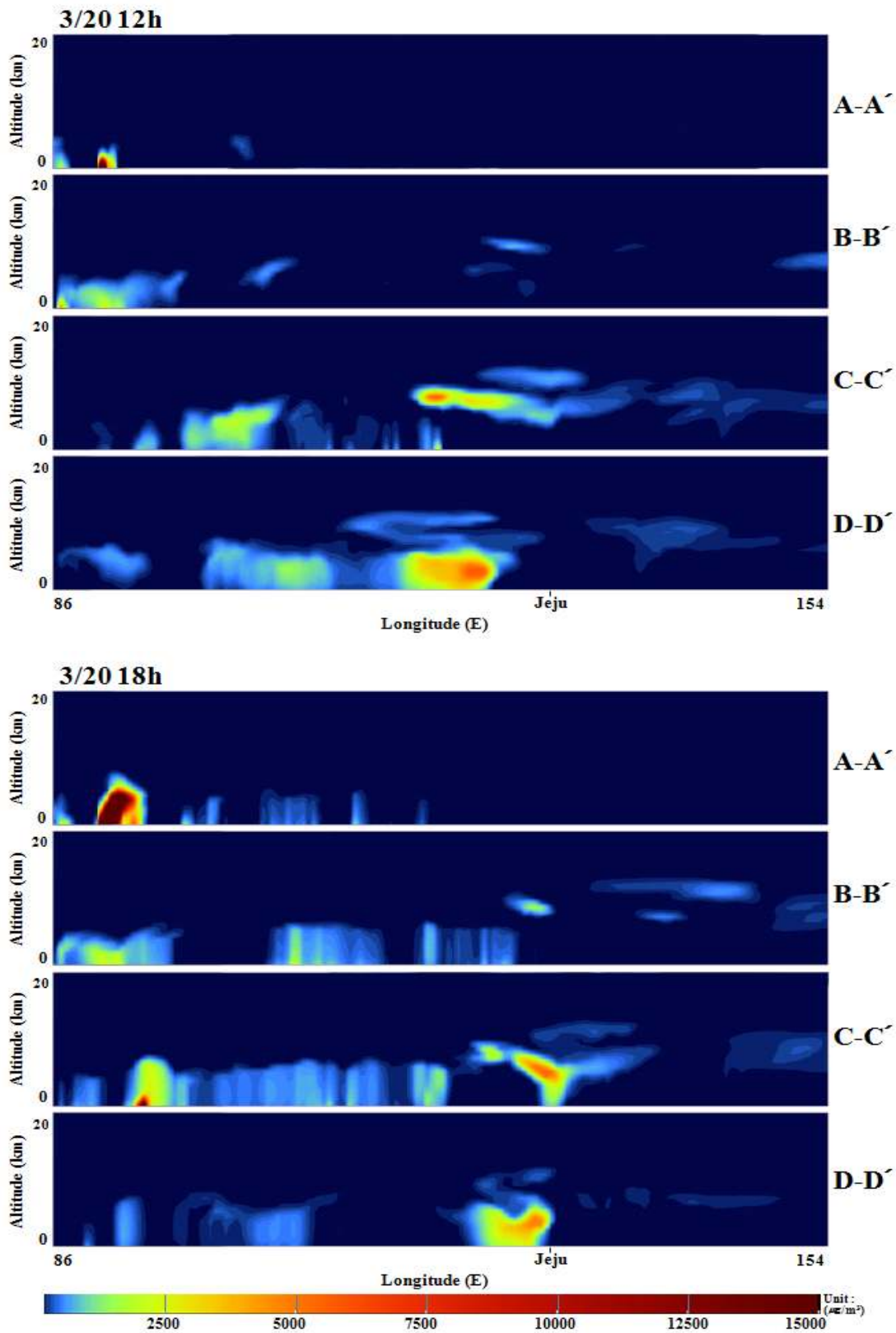


Fig. 17. (continued.)

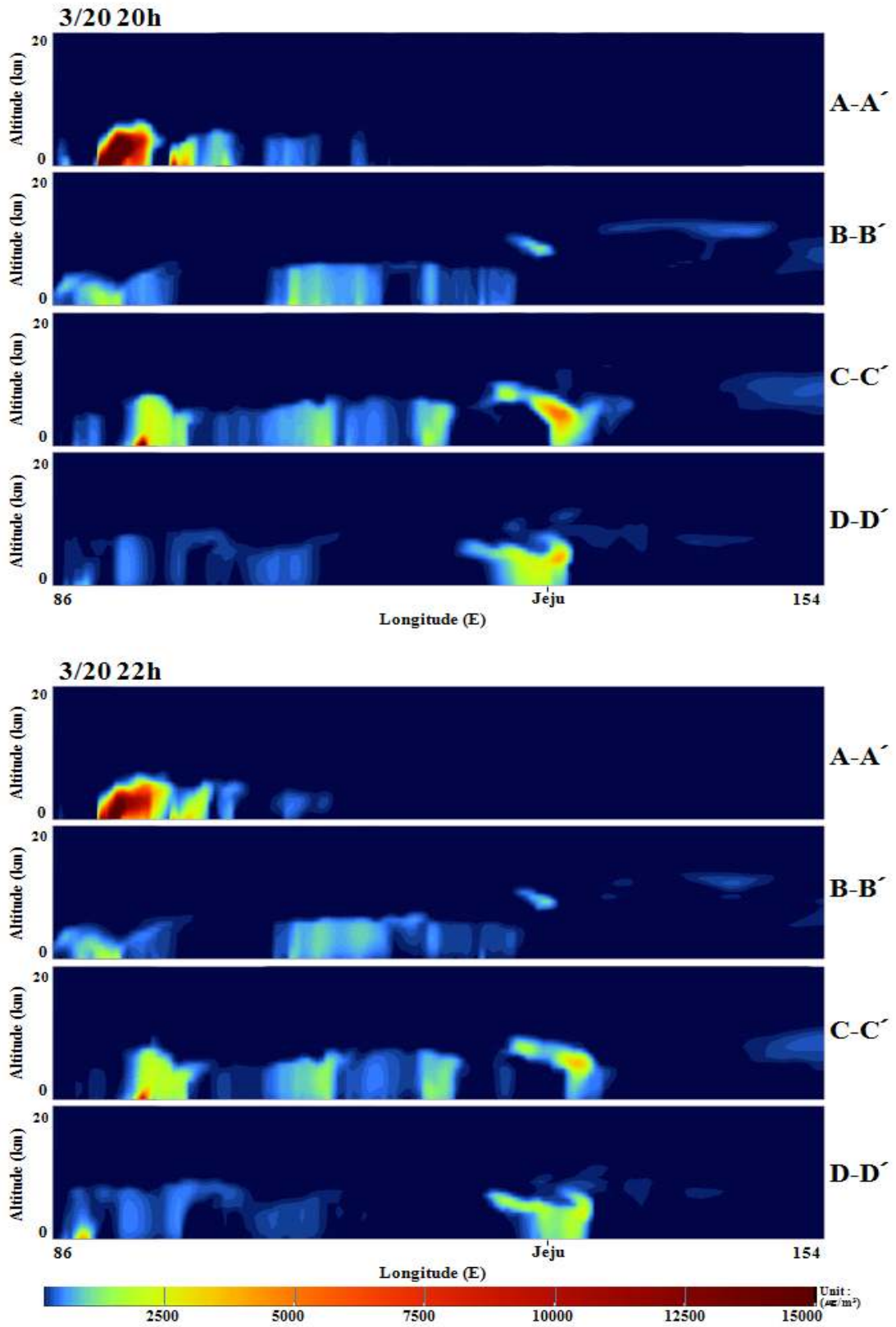


Fig. 17. (continued.)

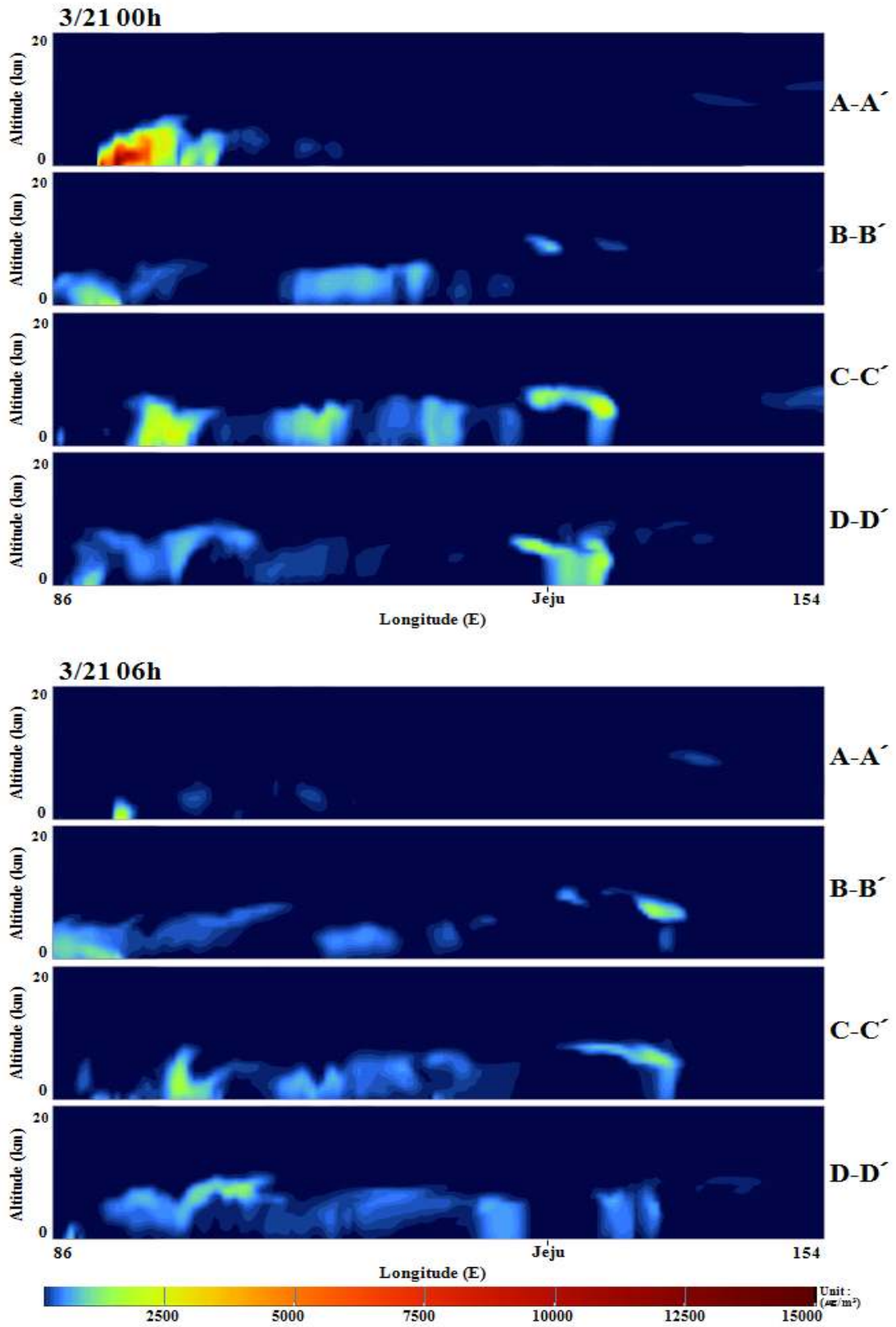


Fig. 17. (continued.)

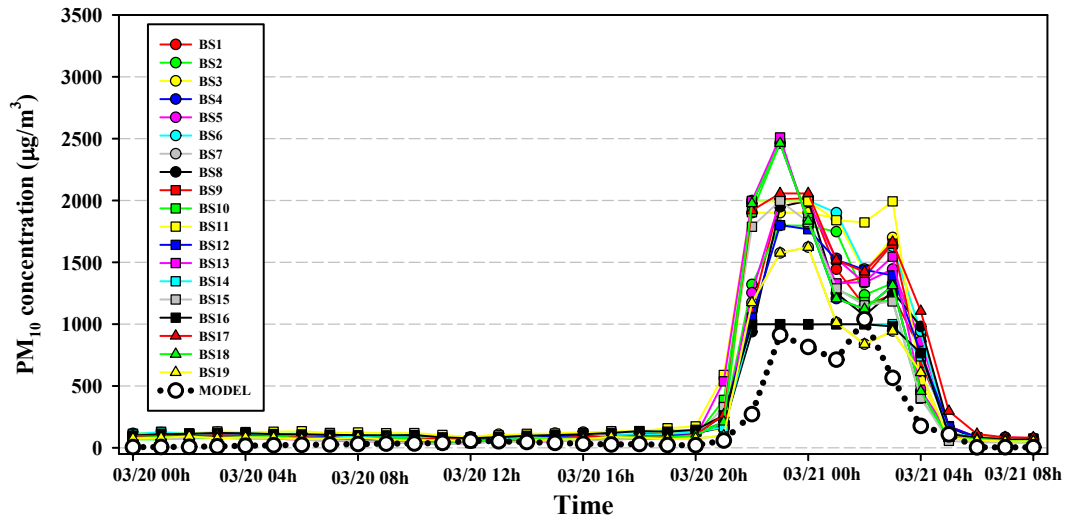
3.4.3. 황사모델 결과와 관측값 비교

수치모델의 결과와 관측값과의 비교를 위해, CMAQ 모델결과의 PM₁₀은 임계마찰속도로부터 생성된 황사의 농도와 인위적 배출량(CAPSS, INTEX-B)으로부터 생성된 PM₁₀을 합하여 최종 PM₁₀ 농도를 산정하였고 이를 황사의 영향을 많이 받은 한반도 남쪽의 5개 도시와 비교·분석하였다(Fig. 18). Fig. 18의 모든 그림에서 3월 20일 저녁시각(19~20시)부터 PM₁₀의 농도가 높아졌고 21~23시경 최고 농도를 보인다. 부산지역의 대기질 관측지점(19지점)과 비교해보면(Fig. 18(a)) 모델값은 22시에 높아지기 시작하여 약 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 값을 보였다가 잠시 낮아지는데 이는 부산지역 대부분의 관측값 경향과 유사하다. 이후 21일 01시에 다시 높아져 최고 농도를 보인다. PM₁₀의 패턴경향은 대부분의 관측 경향과 유사하였고 가장 농도가 비슷했던 관측지점은 명장동(BS16) 지점이었다. 따라서 모델값에서 나타내는 부산지역의 위·경도는 명장동 지점과 가장 가까울 것이라 추정된다. Fig. 18(b) 그림은 광주의 대기질 관측지점(9지점)과 모델값의 비교 그림으로 전체적인 관측지점에 비해 모델값이 과소모의 한 것으로 보이고 PM₁₀ 농도가 높아지는 시간이나 최고농도를 봤을 때 모델값이 약 2시간 정도 빠르다. 농성동(GJ9)에서 모델값과 가장 유사한 PM₁₀ 농도를 보이므로 농성동 지점이 광주지역에서 모델값의 위·경도와 가장 근접하다고 추정된다. Fig. 18(c) 그림은 1장에서 언급하였듯이 황사사태일에 우리나라에서 가장 높은 1시간 평균 PM₁₀ 농도(3,135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보이는 노원동(DG4)이 속한 대구지역으로 총 14개의 관측지점 중 약 50%정도가 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 나타났다. 모델값의 패턴은 울하동(DG9)과 가장 유사하게 나타났으나, PM₁₀ 농도는 수창동(DG1)과 가장 근접한 수치(최고농도 약 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 본 연구에서는 농도값이 유사한 지점을 더욱 근접한 위치라고 추정하였기 때문에 모델값의 위·경도와 가장 가까운 지점은 수창동으로 사료된다. 대전지역을 나타내는 Fig. 18(d)는 대부분의 관측값은 서로 유사한 농도를 보였고 PM₁₀ 농도가 증가하는 시각이나 최고 수치를 보이는 시각은 서로 달랐으며, 모델값의 경우 관측값보다 약 2시간 정도 빠르게 나타나는 특징을 보인다. 또한 부산, 광주, 대구 지역과는 다르게 모델값의 최고 농도가 관측값(DJ4 지점, 문평동)보다 조금 높은 특징을 보였고 문평동 지점이 모델값 위·경도와 가장 가까울 것으로 추정된다. 제주지역의 관측 PM₁₀ 농도와 모델 PM₁₀ 농

도를 비교해보면(Fig. 18(e)), 동홍동(JJ3) 지점에서 가장 높은 PM₁₀ 수치를 보이고 그 지속시간 또한 가장 길다. 비교적 다른 지역에 비해 관측값과 모델값의 PM₁₀ 농도가 증가하는 시각과 최고농도가 가장 잘 일치하는 것으로 보인다. 모델값의 위·경도는 각 관측값의 위경도와 크게 차이가 없을 것으로 추정된다. 한편, 광주 지역과 대전지역에서는 모델값이 관측값에 비해 약 2시간 정도 빨리 PM₁₀ 농도가 증가하는 모습을 볼 수 있는데, 이는 WRF 모델 평가에서 풍속이 과대모의되었기 때문에 이러한 현상을 보이는 것으로 사료된다.

Table 6은 CMAQ 모델평가의 정량적인 분석을 위하여 통계분석을 실시한 표를 나타내며, Fig. 18 그림에서 모델의 위·경도와 각 지역마다 가장 가까운 위경도로 추정되는 지점을 선정하여 분석하였고 제주는 모든 관측지점에서 큰 차이가 없었기 때문에 제주-1, 2, 3으로 분류하였다(각각 이도동, 연동, 동홍동). Total의 경우 모든 지역의 관측지점(총 53지점)을 이용하여 계산하였다. 계산결과, RMSE는 전반적으로 190~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지의 값들을 보이며 특히, 대전지역에서 약 187 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 작은 수치를 나타내고 제주-3(동홍동)에서 가장 큰 오차값(약 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 보인다. MB는 모두 음의 값을 나타냈고 시계열 분석 그림과 같이 비교해보면 모델결과 PM₁₀ 농도는 과소모의된 것으로 보인다. IOA는 부산, 제주-1(이도동), 제주-2(연동)에서 0.9 이상의 값으로 매우 좋은 일치율을 보였고 광주의 경우 약 0.4의 낮은 수치를 보였다. Total의 MB는 각 지역의 MB에서 나타났듯이 모델이 과소모의하는 경향을 보였고 IOA의 경우 약 0.7로 중간정도의 수치를 보였는데, 이는 가장 가깝다고 예상되는 지점이 아닌 모든 지점에서 계산을 하였기 때문에 일치율이 다소 떨어지는 모습을 보인다. 위도상 비교적 남쪽에 있는 부산과 제주에서 가장 높은 IOA 수치를 보였고, 제주지역에서 제주-3(동홍동) 지점과 비교를 했을 때 그 일치도가 더 떨어지는 모습을 보이는데 이는 모델값의 위·경도가 제주-3에 비해 제주-1(이도동), 제주-2(연동)에 더 가까운 것으로 사료된다.

(a)



(b)

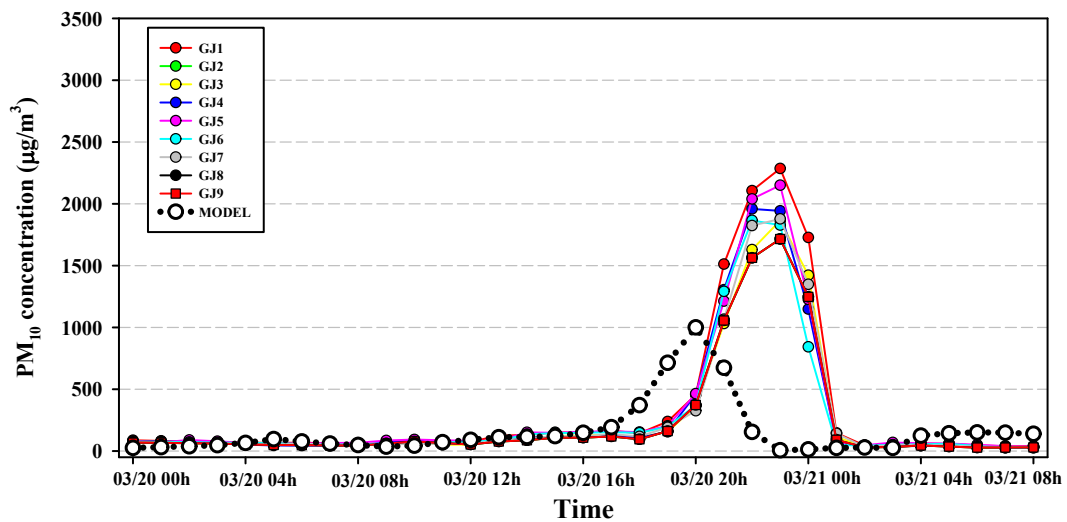
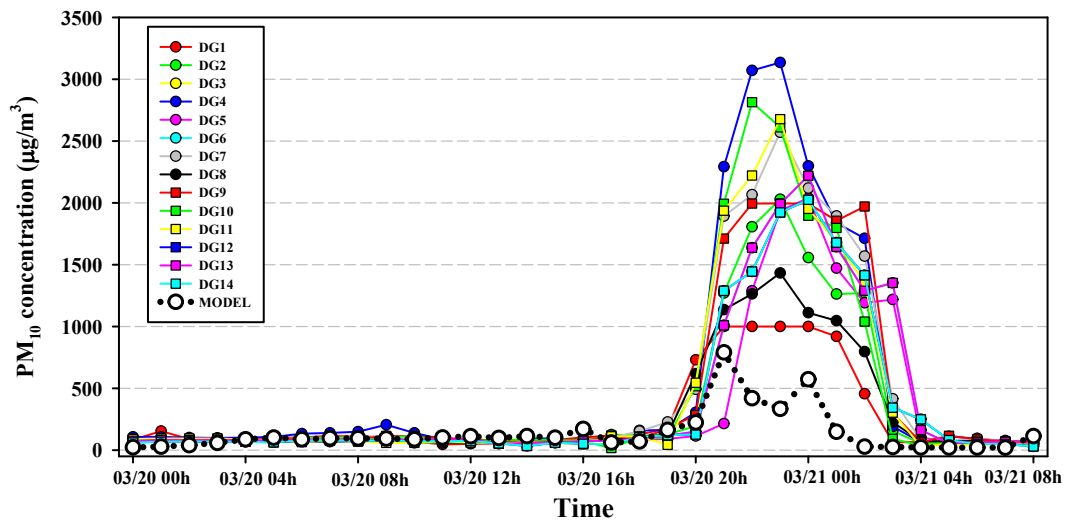


Fig. 18. Time series of CMAQ model-predicted PM_{10} ($\mu g/m^3$) and the observed such as (a) 19 air quality monitoring sites in Busan, (b) 9 sites in Gwangju, (c) 14 air quality monitoring sites in Daegu, (d) 8 sites in Daejeon, and (e) 3 air quality monitoring sites in Jeju.

(c)



(d)

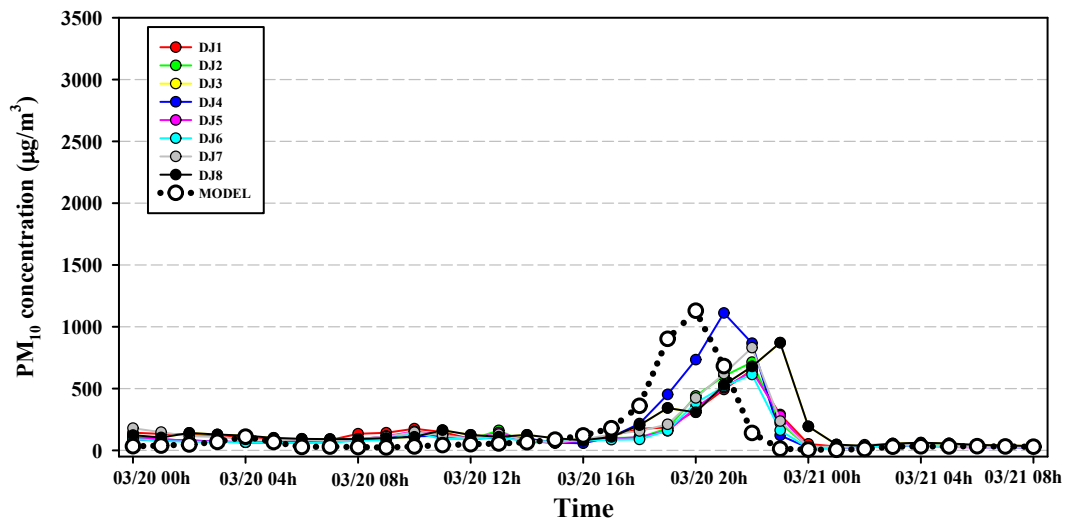


Fig. 18. (continued.)

(e)

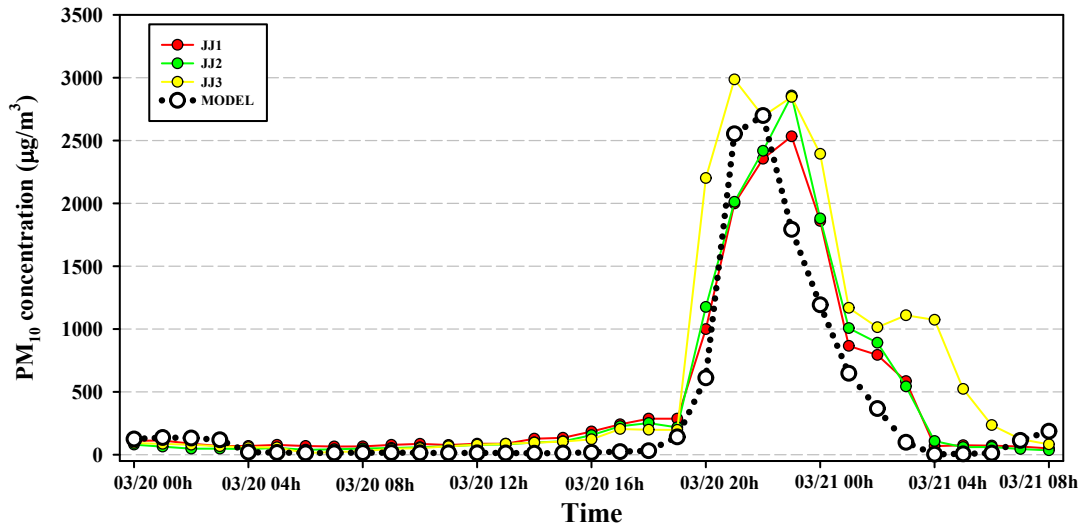


Fig. 18. (continued.)

Table 6. Statistical evaluation of PM₁₀ concentration between model-predicted and observations value the nearest from model latitude, longitude (Busan : MyeongJang-dong, Gwangju : Nongseong-dong, Daegu : Suchang-dong, Daejeon : Munpyeong-dong, Total : 53 sites of all region) during the study period (00 LST 20 March ~ 08 LST 21 March)

Site	PM ₁₀ Concentration (µg/m ³)		
	RMSE	MB	IOA
Busan	205.00	-132.72	0.90
Gwangju	474.64	-80.80	0.38
Daegu	252.38	-116.24	0.75
Deajeon	187.21	-24.30	0.85
Jeju-1 (Ido-dong)	264.18	-107.58	0.96
Jeju-2 (Yeon-dong)	307.04	-114.68	0.95
Jeju-3 (Donghong-dong)	509.79	-273.86	0.70
Total	470.69	-169.03	0.68

제 4 장 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 한반도에서 가장 극심했던 황사 사례일(2010년 3월 20일)에 대하여 황사 발생 현황, 황사의 수송과정 그리고 청정지역인 제주도에서 고농도 PM₁₀의 원인을 알아보고자 일기도, 위성영상, PM₁₀ 관측자료와 3차원 수치모델링(WRF, CMAQ)을 통하여 그 특성을 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 연구사례일의 특성은 PM₁₀의 농도가 3월 20일 19시부터 급격하게 증가하기 시작(약 700~2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가)하여 20~21시 동홍동 지점에서 최고 농도(약 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보이고 이후 점점 하강하는 추세를 보인다. 일기도 분석에 따르면 18일 12시에 모래먼지가 투바공화국과 몽골의 경계 지점에서 보였다 사라지는 경향을 보이고, 이후 19일 12시부터 고비사막에서 발생한 모래먼지가 편서풍과 고기압의 영향을 받아 매우 빠른 속도로 남동진하여 20일 18~21시에 우리나라에 영향을 주어 극심했던 황사사례의 원인이 되었을 것으로 사료된다. 우리나라까지 오는 시간은 약 1.5일 정도 소요되었고 일반적으로 고비사막에서 발생한 황사가 우리나라로 도달하기까지 걸리는 시간(2~3일)에 비해 매우 빠른 속도로 이동하였다. 위성영상에서는 전반적으로 황사의 발생시각과 수송되어 우리나라로 도달하는 시각 등이 일기도 모래먼지의 발생·이동 패턴과 유사하였으나 18일 12시에 보이는 황사 신호가 지속적으로 묘사된다는 차이를 보인다. 이는 사례일의 황사원인이 19일 12시경 고비사막의 모래먼지 때문만이 아니라 18일 12시에 보이는 모래먼지 또한 직·간접적으로 우리나라까지 영향을 줄 수 있다는 가능성을 의미한다.

2) 황사수치모의는 CMAQ 모델링을 통하여 이루어졌고 황사의 수송과 발생에 주요한 역할을 하는 WRF모델(기상장 모델)의 결과는 CMAQ 모델링을 수행하기에 합리적으로 나타났으며, 사용된 황사배출량은 임계마찰속도, 식생지수, 감쇄인

자 등을 고려하여 산정하였다. 황사배출량은 일기도와 위성영상 자료와 유사한 위치에서 배출을 보였고 그 시간도 비슷하였다. 중국 공업단지에서 나타나는 PM₁₀ 배출량은 황사에 비해 약 10배정도 낮은 수치를 보여 관측된 PM₁₀의 고농도 수치는 황사에 의한 영향이 대부분이라 사료된다. 황사공간분포도와 바람장을 같이 분석한 결과 18일 18시경 투바공화국과 몽골 경계부의 사막에서 중심부가 약 9,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 농도의 황사를 나타내고 이후 바람장을 따라서 남동진하는 모습을 보인다. 그 뒤로 19일 12시경 고비사막 부근까지 황사의 수송이 이루어졌고 18시에는 고비사막까지 수송된 황사의 농도가 다시 짙어 지는 현상을 보인다. 이는 위성영상 분석과 유사하게 18일 생성된 황사가 수송되는 과정에서 강한 바람에 의해서 고비사막의 모래먼지가 부유하여 황사의 농도가 재차 증가하였다는 가능성을 나타낸다. 이후 바람을 따라 20일 20시에 우리나라로 진입하였고 그 농도가 약 600~3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 짙은 농도를 보여 제주지역 최고 PM₁₀ 관측농도와 거의 유사하였다. 이후 점차 일본쪽으로 빠져나가는 모습을 보인다. 제주도를 집중적 살펴보면 수평장의 경우 제주지역의 관측값의 PM₁₀ 농도가 높아지는 시각과 그 농도가 거의 유사하였으며 황사가 제주도를 지나치는 과정에서 중심부가 나뉘지는 모습을 보이는데 이는 제주도 중심부의 한라산이 황사를 막았기 때문이라고 사료된다.

3) 연직단면도 분석에서는 각 시간별 수평장과 마찬가지로 황사가 제주지역으로 넘어오는 과정에서 부유 및 침강 등의 모습을 상세하게 볼 수 있다. 특히 18일 18시 약 95°E, 50°N 부근(투바공화국과 몽골의 경계지점)에서 배출되어 수송되는 황사신호와 19일 12~18시에 고비사막으로부터 부유되는 황사의 모습이 눈에 띄게 나타난다. 전반적으로 황사의 수송은 대류권의 상층부인 약 5~8km 고도를 통해 수송되는데 일부 그 이상의 고도에서 나타나기도 한다. 이는 일반적으로 황사가 수송되는 고도(3~5 km)보다 높기 때문에 매우 강한 저기압이 황사의 수송에 기여하였을 것으로 사료된다. CMAQ 모델 결과값과 관측값의 비교 결과, 전반적으로 PM₁₀ 농도가 증가하는 시각은 거의 유사하였고 약 2시간정도 빠르게 묘사되는 부분은 WRF모델의 풍속이 과대모의 되는 경향이 있기 때문으로 추정된다. 또한 관측값에 비해 모델값이 비교적 작게 나타나는 경향을 보였고, 각 지

역의 PM₁₀ 농도값이 가장 비슷한 지점을 가장 매칭이 잘되는 위·경도로 추정하여 이를 통계분석 하였다. 통계분석 결과 RMSE의 경우 전반적으로 190~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 값을 나타내고, MB는 모든 지점에서 음의 값을 나타내므로 모델이 PM₁₀을 과소모의 한 것으로 보인다. 가장 가깝다고 추정되는 지점의 IOA는 광주를 제외한 지점에서 약 0.7~0.9 이상의 높은 수치를 보인다. Total의 RMSE는 비교적 높고 IOA는 중간정도의 수치를 보이는데 이는 모든 관측지점의 값을 이용하여 계산하였기 때문이라고 사료되며, 따라서 CMAQ모델 결과는 황사의 재현을 하는데 있어 합리적인 수준이라고 판단된다.

이러한 수치모의를 통한 황사분석은 종관기상학적(일기도 등)의 한계점을 보완하며 황사를 발원지로부터 어떻게 발생하고, 수송되는 되는지, 또한 어떤 고도를 통해서 오는지, 그리고 농도가 증가하는 경우의 원인 분석 등 더욱 상세하게 이해 할 수 있게 한다. 일기도에서 보이는 황사의 경우 위성영상과 모델결과가 나타내는 황사와는 다소 다른 모습을 보이는데 이는 발원지 부근에 다양한 관측망이 부족하기 때문에 한계가 있을 것으로 사료된다. 또한 대체적으로 우리나라로 오는 황사의 발원지는 대부분이 고비사막 및 내몽골, 황토고원으로 알려져 있는데, 이와 같은 특정 지역의 영향뿐만 아니라 편서풍의 풍상측에 위치해 있는 알려지지 않은 사막(예, 투바공화국과 몽골의 경계지점의 사막) 등에서의 수송되는 영향을 같이 고려해볼 필요성을 보인다. 향후 우리나라의 다른 고농도 황사사례의 다양한 수치모의 분석을 통하여 보다 정확한 황사발생 과정 및 고농도 PM₁₀의 원인분석이 요구된다.

참 고 문 헌

- 강재은, 2012: 연안인근 계곡도시 오존오염의 모델링 최적화 방안 및 발생원인
정량평가, 부산대학교 대기과학과 박사학위논문, 178 pp.
- 기상연구소, 2004: 지역대기환경예측기술개발. 기상청 지진기술개발 사업,
MR033A11, 242 pp.
- 기상연구소, 2005: 황사감시 및 예측기술개발(I). 기상청 기상지진기술개발사업,
MR043A11. 208 pp.
- 기상청, 2006: 황사예보기술편람. 1-63.
- 김광식, 외 15명, 1992: 기상학사전, 향문사, 601 pp.
- 김보경, 2002: 한반도에서 황사 발생시 중관 기상장 특성과 사례분석, 부산대학교
대기과학과 석사학위논문, 61 pp.
- 김유근, 송상근, 강재은, 2004: 황사의 지속시간에 따른 대기 중 농도변동 및 중
관기상장 특성, 한국대기환경학회지, 20(4), 465-481.
- 박철홍, 2014: 한·중 황사공동관측망을 활용한 황사의 한반도 도달시간 연구,
조선대학교, 박사학위 논문.
- 송상근, 김유근, 2005: 2002년 11월에 관측된 가을황사의 사례 분석, 한국기상
학회지, 41(5), 707-715.
- 윤용황, 1990: 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지,
26(2), 111-120.
- 이동규, 김영아, 1997: 1980-1989년 북동아시아의 봄철 일기 유형 및 황사 현상과
의 관계, 한국기상학회지, 33(1), 17-40.
- 이민희, 한의정, 원양수, 1989: 황사현상이 우리나라에 미치는 영향, 한국대기환경
학회지, 2(3), 34-44.
- 이종재, 2009: 발원지의 황사 발생량 추정방법 비교연구, 부산대학교 지구환경
시스템학부 대기과학전공 석사학위논문, 61 pp.
- 전영신, 김지영, 부경은, 김남욱, 2000: 겨울철 황사 현상의 특징, 한국대기환경

- 학회지, 16(5), 487-497.
- 전영신, 김정숙, 임주연, 조경미, 2002: 최근 100년간 황사 관측일수, 한국기상학회, 한국기상학회 가을 학술 발표지, 12(3), 236-237.
- 전영신, 2006: ADAM 모델의 황사배출 특성. 황사 감시 및 예측기술워크숍 발표집, 기상청, 7-13.
- 정종갑, 예상욱, 권민호, 정용승, 1999: 황사의 장거리 수송과 관련된 대기 순환 유형의 분류, 한국기상학회지, 35(4), 575-586.
- 정관영, 박순웅, 1995: 한반도에 황사 출현 시의 종관 기상 특징. 한국기상학회지, 31(1), 45-63.
- 정옥진, 2015: WRF-Chem 모델을 이용한 황사 예측에 관한 연구, 한국교원대학교 환경교육전공 석사학위논문, 118 pp.
- 정운선, 박성화, 이동인, 강덕두, 김동철, 2014: 2010년 3월 20일 부산지역에 발생한 극심한 황사의 에어로솔 농도 분포 특성, 23(2), 275-289.
- 조창범, 전영신, 구본양, 박순웅, 이상삼, 정연양, 2007: 황사농도 단기예측모델의 PM10 농도와 실측 PM10 농도의 비교 -2006년 4월 7~9일 황사 현상에 대해-, 대기, 17(1), 89-99.
- 최재천, 차주완, 방소영, 윤용훈, 2002: 2001년 봄철 안면도에서 관측된 황사의 물리·화학적 특성에 관한 연구, 한국기상학회지, 38(2), 105-117.
- 한국환경정책·평가연구원, 2003: 동북아시아의 황사피해 분석 및 피해저감을 위한 지역 협력방안. 138 pp.
- ARW (2014) Weather Research & Forecasting Version 3 Modeling System user's Guide, Mesoscale & Micro-scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.
- Chun, Y., Boo, K. O., Kim, J., Park, S. U., Lee, M., 2001: Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, Journal of Geophysical Research, 06(D16), 18461-18469.
- Duce, R. A., Unni, C. K., Ray, B., J., Prospero, J. M., Merrill, J. T., 1980: Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the

- Tropical North Pacific: Temporal variability. *Science*, 209(26), 1522-1524.
- 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., Arimoto, R., Zhou, M. Y., Merrill, J. T., Duce, R. A., 1992: Relationships between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 97(D9), 9867-9872.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J. M., Holben, B. N., Dubovik, O., Lin, S.-J., 2001: Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model, *Journal of Geophysical Research*, 106(D17), 20255-20273.
- Gillette, D. A., Passi, R., 1988: Modeling Dust Emission Caused by Wind Erosion, *Journal of Geophysical Research*, 93, 74233-14242.
- Hacker, J. P., McKendry, I. G., Stull, R. B., 2001: Modeled downward transport of a passive tracer over Western North America during an Asian dust event in April 1998, *American Meteorological Society*, 40, 1617-1628.
- Hong, S. Y., Noh Y., Dudhia J., 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, 134, 2318 - 2341. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Husar, R. B., Tratt, D. M., Schichtel, B. A., Falke, S. R., Li, F., Jaffe, D., Gasso, S., Gill, T., Laulainen, N. S., Lu, F., Reheis, M. C., Chun, Y., Westphal, D., Holben, B. N., Gueymard, C., McKendry, I., Kuring, N., Feldman, G. C., McClain, C., Frouin, R. R., Merrill, J., DuBois, D., Sugimoto, N., Malm, W. C., 2001: The Asian dust events of April 1998, *Journal of Geophysical Research*, 106, 18317-18330.
- In H.-J., Park S.-U., 2002: A simulation of long-range transport of Yellow

Sand observed in April 1998 in Korea, *Atmospheric Environment*, 36, 4173-4187.

- In H.-J., Park S.-U., 2003: Estimation of dust emission amount for a dust storm event occurred in April 1998 in China. *Water, Air, & Soil pollution*, 148, 201-221.
- Kim, E. B., 2013: Evaluation of human-body effect and potential risk forecasting models by high temperature environment, Inje University doctorate thesis.
- John S. Kain, 2004: The Kain - Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43, 170 - 181.
- Kim, Y.-K., 2006: Characteristics of Asian Dust Transport Based on Synoptic Meteorological Analysis over Korea., *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 306-316
- 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 Section A*, 90, 1-5. doi: 10.1006/enrs.2002.4377
- Merrill, J. T., Bleck, R., Avila, L., 1989: Modeling atmospheric transport to the Marshall Islands, *Journal of Geophysical Research*, 90(D7), 12927-12936.
- Merrill, J. T., Uematsu, M., Bleck, R., 1989: Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific, *Journal of Geophysical Research*, 94(D6), 8584-8598.
- Monn, C., et al., 1997: Small-scale spatial variability of particulate matter < 10 (PM10) and nitrogen dioxide. *Atmospheric Environment*, 31(15), 2243-2247. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00030-7
- Shao, Y., Jung, E., Leslie, L. M., 2002: Numerical prediction of northeast Asian dust storms using an integrated wind erosion modeling system. *Journal of Geophysical Research*, 107(D24), 4814.

doi: 10.1029/2001JD001493

- Skamarock W. C., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., Powers, J. G., 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 Kim Y.-K., 2007: Characteristic of Meteorological Conditions Relevant to Asian Dust Outbreaks During Spring Month of 1998-2002, *Journal of Environmental Science*, 16(4), 399-407.
- Sun, J. M., Zhang, M., Liu, T. S., 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.
- Uno, I., Amano, H., Emori, S., Kinoshita, K., Matsui, I., Sugimoto, N., 2001: Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18331-18344.
- Uno, I., Wang, Z., Chiba, M., Chun, Y. S., Gong, S. L., Hara, Y., Jung, E., Lee, S.-S., Liu, M., Mikami, M., Music, S., Nickovic, S., Sateke, S., Shao, Y., Song, Z., Sugimoto, N., Tanaka, T., Westphal, D. L., 2006: Dust model intercomparison(DMIP) study over Asia: Overview, *Journal of Geophysical Research*, 111, D12213.
doi: 10.1029/2005JD006575
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 1999, Science algorithms of the EPA Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system,
http://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=63400.
- Wang, Z., Ueda, H., Huang, M., 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., Toon, O.B., Calson, T.N., 1988: A case study of mobilization and transport of Saharan dust. *Journal of Atmospheric Sciences*, 45, 2145-2175.
- 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., Bian, H., Newman, D., 2002: The mineral Dust Entrainment And Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology, *Journal of Geophysical Research*, 108(D14), 4416. doi:10.1029/2002JD002775

Characteristic analysis and numerical simulation of the severe Asian dust event observed in Jeju in recent years

Sukwoo Kim

Department of Earth and Marine Sciences,
Graduate School, Jeju National University

Abstract

The purpose of this study is to analyze the generation and transport process of Asian dust and the cause of high concentration PM₁₀ appeared in Jeju Island with the use of the three-dimensional numerical modeling (WRF and CMAQ) in relation to the episode day (March 20, 2010) of the most severe Asian dust in the Korean peninsula in recent years. In regard to the characteristics of research episode day, PM₁₀ concentration started increasing rapidly from 7 PM on March 20 (increased by approximately 700 to 2,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). The maximum concentration (approximately 2,500 to 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) was reached around 8 and 9 PM. The concentration then started falling gradually.

According to the weather chart and satellite image, the sand dust appeared in the desert located at the boundary between Tuva Republic and Mongolia and Gobi Desert around noon on March 18 and noon on March 19, respectively. However, the weather chart showed that the sand dust, which had appeared around noon on March 18, soon disappeared, whereas the satellite image continuously showed the signal of Asian dust. This difference implies that the sand dust generated from Gobi Desert around noon on March 19 was not the only cause of Asian dust on the episode day. That is to say, the sand dust, which appeared at noon on March 18, might influence Korea directly or indirectly. In addition, it generally takes approximately 2 or 3 days for Asian dust to arrive to Korea from Gobi Desert. However, it took only about 1 to 2 days in the case of research episode day. This indicates that Asian dust enters Korea at a very fast pace.

The numerical simulation on Asian dust was conducted through CMAQ modeling. The emission quantity of Asian dust was calculated in consideration of the critical friction velocity, vegetation indices and attenuation factors. In regard to the emission quantity of Asian dust, the emission appeared at the time and location that were similar to that of the weather chart and satellite image. The emission quantity of PM_{10} , which appeared in the Chinese industrial complex, was approximately 10 times lower than Asian dust. Therefore, it is assumed that only Asian dust made a significant impact on the high concentration of observed PM_{10} . As a result of the analysis on the spatial distribution and wind field of Asian dust, high concentration Asian dust appeared in the desert located at the boundary between Tuva Republic and Mongolia around 6 PM on March 18. It then moved southeast along the wind field. Since then, Asian dust was transported up to the vicinity of Gobi Desert around noon on March 19. In the picture taken at 6 PM, the concentration of Asian dust transported to Gobi Desert became high again. Similarly to the result of the satellite image analysis, the result of the picture

taken at 6 PM implies the possibility that the concentration of Asian dust was again increased because the sand dust of Gobi Desert floated due to the strong wind while Asian dust generated on March 18 was being transported. It then entered Korea around 8 PM on March 20 along the wind. Its concentration was approximately 600 to 3,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. That is, its concentration was almost identical to the highest observed concentration of PM_{10} in Jeju island. It then exited gradually toward Japan. In regard to the horizontal field in Jeju Island, the time when the PM_{10} concentration increased and the increased concentration of PM_{10} , which were derived from the observed values of Jeju island, were almost identical. Also, the central area of Asian dust was divided when it passed by Jeju island. This is probably because Halla Mountain, which is located at the center of Jeju island, blocked Asian dust.

Similarly to the horizontal field for each time slot, the vertical cross-section analysis shows in detail how Asian dust floats and sinks while entering Jeju island. Overall, Asian dust is transported at an altitude of approximately 5 to 8 km, which is the upper part of the troposphere. Some portion of Asian dust is transported at an altitude of higher than 8 km. This fact implies that a very strong cyclone might contribute to the transport of Asian dust. As a result of the comparative analysis on the results of CMAQ model and the observed values, there was almost no difference in the time when PM_{10} concentration increased. Overall, the observed values tended to be smaller than the results of CMAQ model. For the quantitative analysis, the statistical analysis was conducted in this study. In the case of RMSE, it reached even 190 to 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In contrast, the model showed a low value of PM_{10} because MB represents a negative value at all the places. IOA shows a high value of approximately 0.7 to 0.9 in all the places with the exception of Gwangju. Therefore, it is concluded that the results of CMAQ model are at reasonable levels for reproducing Asian dust.

The Asian dust analysis based on the above-mentioned numerical simulation

complements the limitations of synoptic meteorology, such as weather chart. In particular, this analysis enables us to better understand Asian dust in terms of how it is generated and transported from its origin, what altitude it travels at and why its concentration increases. In general, a majority of Asian dust, which come to Korea, are originated Gobi Desert, Inner Mongolia and yellow earth plateau. Hence, it is necessary to consider not only the effects of the aforementioned regions but also the effects resulting from many unknown deserts located in the region where the windward of westerlies. It is required to analyze the generation process of Asian dust and the causes of high concentration PM_{10} more accurately through various numerical simulation analyses on those episode days of high concentration Asian dust, which is different from Korea.

<부 록> 최근 5년 동안 황사 발생 현황 분석

Time (Year)	Time (Month /Day)	황사 발생 지점	최고농도 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	기상특보
2010	1/25	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 충북(충주, 청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 흑산도, 순천), 제주, 제주(고산, 서귀포)	348 (백령도)	
	3/12-13	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(원주, 속초, 동해, 영월, 울릉도), 충북(충주, 청주, 추풍령), 충남(천안), 전북(전주), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 경남(울산, 진주, 거창)	386 (흑산도)	
	3/13	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(원주, 속초, 동해, 영월, 울릉도), 충북(충주, 청주, 추풍령), 충남(천안), 전북(전주), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 경남(울산, 진주, 거창)	386 (흑산도)	
	3/15-16	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(춘천, 원주, 대관령, 속초, 동해, 철원, 영월), 울릉도, 충북(충주, 청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 경남(울산, 마산, 통영, 진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)	572 (춘천)	황사주의보
	3/20-24	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(춘천, 원주, 대관령,	2712 (흑산도)	황사경보

	속초, 동해, 철원, 영월), 울릉도, 충북(충주, 청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 경남(울산, 마산, 통영, 진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)		
4/1-3	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 수원), 강원(속초, 철원, 영월), 충북(충주, 추풍령), 대전, 경북(울진, 안동, 상주)	247 (백령도)	
4/27	남(여수, 완도, 진도, 흑산도), 대구, 경북(포항), 부산, 경남(울산, 마산, 통영, 진주), 제주(제주, 고산, 서귀포)	164 (울산)	
5/8-11	서울, 강원(철원), 충북(청주, 추풍령), 대전, 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(안동, 상주, 구미), 경남(진주), 제주(제주, 고산, 서귀포)	361 (관악산)	
11/11-13	서울, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(북강릉, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 동해, 철원, 영월), 울릉도, 충북(충주, 청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 울산, 경남(마산, 통영, 진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)	1664 (백령도)	황사경보
11/27	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(춘천, 원주), 울릉도, 충북(충주, 청주), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주), 대구	374 (백령도)	
12/2-3	서울, 백령도, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(북강릉, 춘천, 원주,	398 (춘천)	황사주의보

		대관령, 속초, 동해, 철원, 영월), 울릉도, 충북(충주, 청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 울산, 경남(마산, 통영, 진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)		
	12/10-11	서울, 인천, 경기(문산, 동두천, 수원, 이천), 강원(북강릉, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 동해, 철원, 영월), 울릉도, 충북(충주, 청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍, 남원), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 순천), 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항, 구미), 부산, 울산, 경남(마산, 통영, 진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)	375 (천안)	
2011	3/14	백령도	190 (백령도)	
	3/19-22	서울, 백령도, 인천, 경기(동두천, 수원), 강원(북강릉, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 동해, 철원), 충북(청주, 추풍령), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 정읍), 광주, 대구, 경북(울진, 안동, 상주, 포항), 부산, 울산, 경남(마산, 통영, 진주, 거창)	876 (천안)	황사경보
	4/1	백령도	281 (백령도)	
	4/15-16	강원(대관령), 대구, 경북(울진, 안동, 포항), 울산	214 (영월)	
	5/1-4	서울, 백령도, 인천, 경기(수원), 강원(북강릉, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 철원, 울릉도), 충북(청주), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주, 장수), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도), 대구, 경북(울진,	1025 (천안)	황사경보

		안동, 포항), 부산, 울산, 경남(마산, 통영, 진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)		
	5/12-14	서울, 백령도, 인천, 경기(수원), 강원(북강릉, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 철원), 울릉도, 충북(청주), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 진주), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도), 대구, 경북(울진, 안동, 포항), 부산, 경남(진주, 거창), 제주(제주, 고산, 서귀포)	838 (백령도)	황사주의보
2012	3/24	제주(제주, 고산)	193 (춘천)	
	3/31	인천, 경기(수원), 강원(춘천, 원주, 대관령), 충북(청주), 충남(천안), 제주(제주, 고산, 서귀포)	242 (대관령)	
	4/28	강원(속초)		
	11/28-29	서울, 백령도, 인천, 경기(수원), 북강릉, 강원(춘천, 원주, 대관령, 속초, 철원)울릉도, 충북(충주), 충남(대전, 서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도)경북(대구, 울진, 안동), 경남(거창), 제주(제주, 고산)	318 (백령도)	
	12/3	제주(고산)	261 (고산)	
2013	1/1-2	전남(목포, 여수, 진도 흑산도), 경남(진주), 제주(고산), 부산, 울산	226 (고산)	
	3/1	서울, 인천(백령도), 경기(문산, 수원), 강원(원주), 전북(군산, 전주), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도)제주(고산)	156 (백령도)	
	3/9-10	서울, 인천(백령도), 경기(수원), 충북(청주), 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주), 광주, 전남(목포, 완도, 진도, 흑산도), 대구,	299 (백령도)	

		경북(안동)제주(고산, 서귀포)		
	3/19	광주, 전남(목포, 진도, 흑산도), 제주(고산, 서귀포)	275 (진도)	
	4/9	제주(고산, 서귀포)	146 (고산)	
2014	1/1-2	서울, 백령도, 인천, 수원, 강원(춘천, 원주, 철원), 충북(청주), 대전, 충남(서산, 천안, 보령), 전북(군산, 전주), 광주, 전남(목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도), 부산, 울산, 경남(통영, 진주, 거창), 제주(고산, 서귀포)	190 (천안)	
	1/20	충북(청주), 충남(서산, 천안, 보령)전북(군산, 전주), 광주, 전남(목포, 진도, 흑산도)부산, 울산 경남(마산, 통영, 진주), 제주(고산, 서귀포)	281 (격렬비 도)	
	1/30-31	제주(고산, 서귀포)	155 (고산)	
	2/3	서울	154 (관악산)	
	3/18-19	서울, 인천, 수원, 북강릉, 춘천, 원주, 속초, 철원, 청주, 대전, 서산, 천안, 보령, 군산, 전주, 광주, 목포, 여수, 완도, 진도, 흑산도, 울진, 안동, 포항, 울릉도, 부산, 울산, 마산, 통영, 진주, 거창, 제주, 고산, 서귀포	410 (청원)	
	5/26-29	서울, 백령도, 인천, 수원, 춘천, 원주, 속초, 철원, 청주, 대전, 서산, 천안, 보령, 군산, 전주, 광주, 목포, 여수 완도, 진도, 흑산도, 울진, 안동, 포항, 울릉도, 부산, 울산, 마산, 통영, 진주, 거창, 제주, 고산, 서귀포	321 (흑산도)	
	10/16	백령도	133 (백령도)	

	10/27	백령도	144 (백령도)	
	11/13	서울, 인천, 수원, 북강릉, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 철원, 청주, 천안, 안동	253 (안면도)	
	12/1	백령도, 흑산도	175 (진도)	
	12/2	서울, 백령도, 인천, 수원, 춘천, 원주, 대관령, 속초, 철원, 천안	248 (강화도)	

Source : 정옥진, 2015.