



논문

2022년 12월 황사 사례 분석을 통한 황사·연무통합예측모델 (ADAM3)의 예측성 평가

Assessment of Asian Dust Aerosol Model 3 Based on an Asian Dust Case of December 2022

강미선*, 이우정

국립기상과학원 예보연구부

Misun Kang*, Woojeong Lee

Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Seogwipo, Republic of Korea

접수일 2023년 3월 20일
수정일 2023년 5월 19일
채택일 2023년 6월 8일

Received 20 March 2023

Revised 19 May 2023

Accepted 8 June 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)64-780-6579

E-mail : misun0106@korea.kr

Abstract The Korea Meteorological Administration (KMA) is operating Asian Dust Aerosol Model 3 (ADAM3) to monitor and forecast Asian dust events. An unusual Asian dust event of high concentrations in winter was observed from December 12 to 14, 2022 in South Korea. In this study, the characteristics of the Asian dust event were analyzed using various observational data, and the performance analysis of ADAM3 coupled with the Unified Model, the operational weather forecasting model at KMA, was conducted with satellite and surface PM concentrations observed during the Asian dust event period. The lower 500 hPa geopotential height and higher 2 m air temperature compared to normal years (1991~2020) in the source region were a proper condition for dust particles to be well intruded from the surface into the air above on December 11, 2022. Hourly mean PM₁₀ concentration was observed at 2,714 $\mu\text{g m}^{-3}$ with a strong surface wind speed of 9 m s⁻¹ or more at Nomgon of the source region. Asian dust was transported to the Bohai bay in China by the northwesterly, and then flowed into the Korean peninsula by the westerly on December 12, 2022, at 0730 KST. The hourly mean PM₁₀ concentration observed in Seoul at 11 KST on the 13th was 480 $\mu\text{g m}^{-3}$, and the volume concentration of coarse particles from 2 to 6 μm was predominant. ADAM3 for each initial time simulated the spatial distribution of Asian dust generated from the Gobi Desert and the Inner Mongolia Plateau and Asian dust moving to the Korean Peninsula similarly to GK2A RGB dust image. In the comparison of observed and simulated PM₁₀ concentrations, the start and end times of the dust events were similar. In the source of Asian dust and in Korea, RMSE was 137.76 $\mu\text{g m}^{-3}$, 35.95 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively, and MBE was -16.50 $\mu\text{g m}^{-3}$ and -25.89 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectively. These results are expected to be used as basic data for accurate Asian dust forecasting when similar cases of Asian dust will occur in the source region and South Korea.

Key words: Asian dust, ADAM3, Asian dust numerical modeling

1. 서론

토양이 건조한 지역에서 강한 바람에 의해 높은 고도로 부유한 먼지 또는 모래 입자가 서서히 하강하는 현상을 황사라고 부른다(WMO, 1992). 한반도는 동아시아의 주요 황사 발원지인 고비사막, 내몽골 고원,

만주지역의 풍하측에 위치하여 종종 황사 영향을 크게 받는다(Park *et al.*, 2016; Yu *et al.*, 2006). 주로 저기압 내의 강한 상승기류에 의해 상층으로 부유한 황사는 동아시아뿐만 아니라 북미대륙까지 수송되기도 한다(Husar *et al.*, 2001; Jaffe *et al.*, 1999). 중국 동부의 대규모 산업지역을 통과하여 한반도에 영향을 미치는

황사는 모래먼지뿐만 아니라 인위적인 대기오염물질을 동반한다(Park *et al.*, 2013). 이러한 이유로 황사는 정밀기계 손상 등의 경제적 피해와 식물의 광합성 작용을 방해하여 생태계에 악영향을 초래할 뿐만 아니라 폐기능 저하 및 호흡기 질환 악화 등 인체에도 유해한 것으로 알려져 있다(Yoo *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007; Hong, 2004).

황사 피해를 최소화하기 위해 여러 나라에서는 수치모델을 활용하여 황사예측모델을 개발하여 운영하고 있다. ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)와 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서는 각각 MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate; Simmons, 2010)와 NGAC (NEMS GFS Aerosol Component; Lu *et al.*, 2016)을, 중국기상청과 일본기상청에서는 각각 CUACE/Dust (China Meteorological Administration Unified Atmospheric Chemistry Environment-Dust; Gong and Zhang, 2008) 모델과 MASINGAR (Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere; Tanaka and Chiba, 2005) 모델을 이용하여 황사예측 정보를 생산하고 있다. 또한, 우리나라 기상청에서도 황사예측모델인 ADAM (Asian Dust and Aerosol Model)을 개발하였고(Park *et al.*, 2010) 황사예보 지원을 위해서 황사·연무통합예측모델 (ADAM3, Asian Dust Aerosol Model version 3)을 운영하고 있다. 황사 감시 능력 강화 및 예측 성능 향상을 위해 각 국가에서 생산된 황사예측 정보는 WMO (World Meteorological Organization) SDS-WAS (Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System) 아시아 노드를 통해 공유되고 있으며, 에어로졸 광학 깊이 자료를 활용한 황사발원지 지표면 특성 개선, 관측 PM₁₀ 농도 자료를 활용한 자료동화 연구 등을 통해 황사예측 성능 개선을 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다(SDS-WAS ASIAN-RC, 2023; WMO, 2022b). 2021년 봄철(3~5월)에 대하여 각 모델의 예측 성능을 상호 비교한 결과에서 ADAM3의 정확도는 0.94, CUACE/Dust와 MASINGAR의 정확도는 각각 0.93, 0.92로 평가되었고, 황

사 사례(2021년 3월 13~18일)의 예측 및 관측 PM₁₀ 농도에 대한 상관계수는 각각 0.69 (ADAM3), 0.61 (CUACE/Dust), 0.57 (MASINGAR)로 나타나 기상청의 ADAM3이 동아시아지역 국가 중 우수한 예측 성능을 보이고 있다(WMO, 2022a).

기상청은 지상 및 위성관측자료를 이용하여 황사발원지와 우리나라에서의 황사를 실시간으로 감시하고 황사·연무통합예측모델의 예측 결과를 바탕으로 황사의 발원과 한반도에서의 영향 가능성을 예보하고 있다(Park *et al.*, 2016). 이에 따라 정확한 황사예보를 위해서는 우리나라에 영향을 미치는 황사 사례 분석을 통한 ADAM3의 지속적인 평가가 필요하다.

최근 20년(2003~2022년) 동안 한반도는 평균 126.8일 동안 황사의 영향을 받았다. 이 중 평균 황사일수는 봄철과 겨울철에 각각 91.2일과 21.3일로 관측되어 우리나라는 봄철 다음으로 겨울철에 황사의 영향을 많이 받고 있는 실정이다(그림 1a). 보통 겨울철에는 황사발원지의 지면이 얼어 있거나 눈으로 덮여 있어 많은 양의 황사가 발원하기 어려운 환경이다(Sun *et al.*, 2003). 또한, 황사가 발원한다고 하더라도 봄철의 황사보다 이동속도가 빨라 황사발원지에서 발원 후 약 하루만에 우리나라에 영향을 미치고(Chun *et al.*, 2000), 뒤따르는 시베리아 고기압에 의해 한반도는 1일 이내에 황사의 영향권에서 벗어난다(Park *et al.*, 2016). 이러한 겨울철 종관기상학적 특성으로 인해 우리나라에 영향을 미치는 겨울철 황사는 PM₁₀ 질량농도가 봄철보다 상대적으로 낮은 옅은 황사(PM₁₀ < 300 μg m⁻³)의 특성을 보인다(그림 1b; NIMS, 2021). 그러나, 2022년 12월 12일부터 14일까지 3일 동안 관측된 황사는 겨울철임에도 불구하고 한반도에 30시간 동안 지속되었고, 서울을 기준으로 PM₁₀ 질량농도가 한 시간 평균 480 μg m⁻³까지 관측되었다. 이는 최근 20년 동안 우리나라에서 관측된 12월 황사 중 2009년 12월 25일부터 26일까지 발생한 황사(서울 PM₁₀ 농도 최대값 963 μg m⁻³) 다음으로 높았던 이례적인 겨울철 고농도 황사 현상이었다.

본 연구에서는 2022년 12월 12일부터 14일까지 한

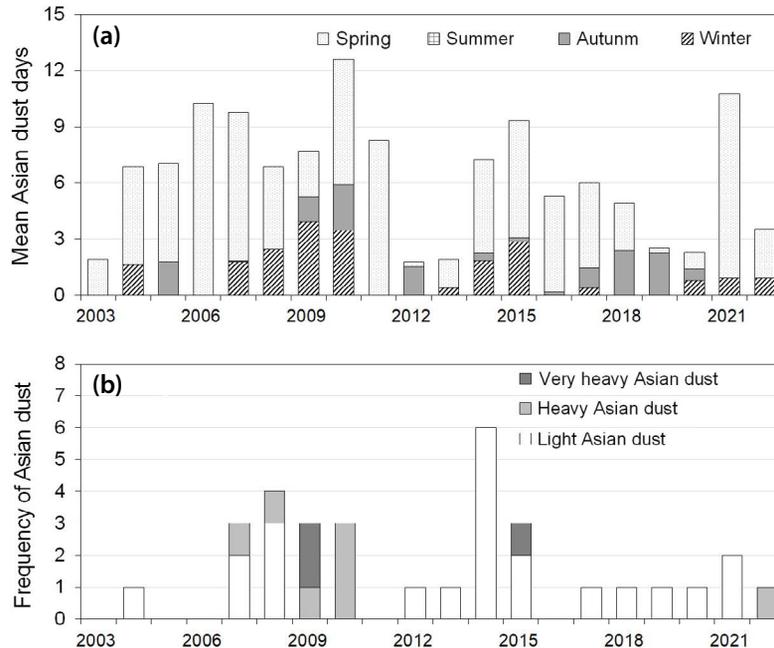


Fig. 1. (a) The number of mean Asian dust days observed 13 observation stations in South Korea from 2003 to 2021 and (b) the frequency of Asian dust in Winter by the dust intensity. The dust intensity is classified as very heavy Asian dust ($PM_{10} \geq 800 \mu g m^{-3}$), heavy Asian dust ($300 \mu g m^{-3} < PM_{10} \leq 800 \mu g m^{-3}$), and light Asian dust ($PM_{10} < 300 \mu g m^{-3}$).

반도에서 관측된 황사 사례의 특성을 분석하고 기상청에서 운영하는 황사·연무통합예측모델인 ADAM3의 황사예측성을 살펴보고자 한다. 이를 위해 지상 및 위성자료 등 다양한 관측자료를 활용하여 황사 발원지의 기상환경과 황사의 종관 및 지점별 특성을 분석하고, 2022년 12월 황사 사례의 초기 시간별 예측 결과를 분석함으로써 모델 결과를 시·공간적으로 진단하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1 황사·연무통합예측모델

기상청은 황사 감시 및 예보를 위하여 황사·연무통합예측모델(ADAM3)을 매일 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 현업 운영하고 있다. ADAM3은 미국환경보호국에서 개발된 대기화학 수송모델인 CMAQ (Community

Multiscale Air Quality Modeling System)에 황사발원 알고리즘을 통합하여 개발되었으며 황사 발원 모듈, 수송 및 확산모듈, 건·습성 침착모듈 등으로 구성되어 있다(Park *et al.*, 2010; Park and In, 2003). 모델 영역은 한반도, 일본과 황사 발원지를 포함하는 동아시아지역 ($20 \sim 60^{\circ}N$, $70 \sim 150^{\circ}E$)으로 수평해상도는 25 km이고 연직층은 100 hPa까지 49개 층으로 구성되어 있으며 초기 시간에 따라 168시간(00, 12UTC)과 72시간(06, 18UTC)의 예측 시간을 갖는다(NMC, 2021, 2020). 기상입력자료는 영국기상청의 통합모델인 UM (Unified Model)을 기반으로 기상청에서 생산되는 GDAPS (Global Data Assimilation and Prediction System) 자료를 이용하고, 지상 에어로졸(PM_{10}) 농도의 실시간 예측오차를 반영하기 위해 앙상블 기반 3DAVR (Three dimensional VARIational data assimilation) 체계를 적용하고 있다(NMC, 2020). ADAM3의 황사 발원지는 세계기상기구에 보고되는 종관기상실황 관측자료를

활용하여 황사가 보고된 영역으로 정의되었고, 황사 발원지의 토양 유형은 중국 토양도와 몽골 수문기상국의 토양정보를 이용하여 고비(Gobi), 모래(Sand), 황토(Loess), 혼합(Mixed)의 네 가지로 구분하고 있다(Lee *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2010; In and Park, 2002; Park, 2002). ADAM3에서 황사농도(D)는 각 토양 유형별로 산정된 풍속(WS_{10})과 상대습도($RH_{1.5}$)의 각 임계 조건(WS_{10t} , $RH_{1.5t}$)을 충족하면, 식 (1)의 황사 발원알고리즘을 통해 산정된다(Part *et al.*, 2010; Park and In, 2003).

$$D = (1 - Rf) \times \alpha \times PRf \times u_*^4, \quad (1)$$

$$WS_{10} \geq WS_{10t} \text{ and } RH_{1.5} \leq RH_{1.5t}$$

여기에서, Rf 와 PRf 는 각각 식생 비율과 과거 강수에 의한 황사 발원 억제지수를 의미하고 u_*^4 는 마찰속도를 의미한다. 황사 발원량은 마찰속도의 4제곱(u_*^4)에 비례하여 산정되고 위성에서 관측된 NDVI (normalized difference vegetation index) 자료를 이용하여 시공간적으로 변화하는 식생 특성을 반영하며(Cho *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2010), 예측시점 이전(3~6시간)에 황사 발원지에서 발생한 강수량을 고려하여 황사 발원량을 조절한다(Lim *et al.*, 2021). 즉, 식생이 증가할수록 강수량이 많을수록 황사 발원량이 감소하도록 설계되어 있다. ADAM3의 자세한 환경 설정은 표 1에

Table 1. The configuration of the ADAM3.

UM-ADAM3	
Initial meteorological conditions	UM-GDAPS ¹⁾
Horizontal resolution	25 km
Num. of horizontal grids	340 (East~West) × 220 (North~South)
Vertical resolution	49 levels (up to 100 hPa)
Vertical coordinate	Sigma vertical coordinate
Map projection	Lambert conformal conic
Data assimilation	3DVAR ²⁾
Number of operation/day	4 (00, 06, 12, 18 UTC)
Forecast time	168 hours (00, 12 UTC), 72 hours (06, 18 UTC)

UM-GDAPS¹⁾: Unified Model-Global Data Assimilation and Prediction System
3DVAR²⁾: Three dimensional VARIational data assimilation

서 확인 가능하다.

2.2 관측자료

기상청의 황사 일기도와 위성자료를 활용하여 황사의 발원과 한반도로의 유입과정을 분석하였다. 황사 일기도는 GTS (Global Telecommunication System)를 통해 보고되는 육상 종관기상실황 전문자료 중 먼지 현상을 일기도에 나타낸 것으로 1일 8회 3시간 간격으로 자료 활용이 가능하다. 위성자료는 GK2A (Geosta-

Table 2. Information of the stations used for this study.

No.	Name	Latitude (°)	Longitude (°)	Elevation (m)
A	Nomgon	42.841	105.131	1494.000
a	Tongliao	122.370	43.600	178.500
b	Erenhot	112.000	43.390	0.000
c	Siping	124.200	43.110	0.000
d	Chifeng	118.930	42.270	0.000
e	Wulatezhongqi	108.520	41.570	1288.000
f	Huimin	117.530	37.480	11.700
g	Yushe	112.980	37.070	1041.400
1	Sokcho	128.565	38.251	18.060
2	Gwangdeoksan	127.433	38.117	1066.000
3	Baengnyeongdo	124.630	37.966	144.860
4	Chuncheon	127.736	37.903	76.470
5	Ganghwa	126.446	37.707	47.010
6	Daegwallyeong	128.718	37.677	772.570
7	Seoul	126.966	37.571	85.800
8	Ulleungdo	130.899	37.481	222.800
9	Kwanaksan	126.964	37.445	622.380
10	Suwon	126.985	37.272	34.060
11	Yeongwol	128.457	37.181	240.600
12	Ulsan	129.413	36.992	50.000
13	Cheonan	127.119	36.780	21.300
14	Gyegryelbi-do	125.560	36.625	103.560
15	Andong	128.707	36.573	140.100
16	Anmyeon-do	126.330	36.538	45.700
17	Chupungnyeong	127.995	36.220	244.730
18	Gunsan	126.761	36.005	23.200
19	Daegu	128.619	35.885	64.080
20	Jeonju	127.155	35.822	53.400
21	Ulsan	129.320	35.560	34.570
22	Gwangju	126.892	35.173	72.380
23	Jinju	128.040	35.164	30.210
24	Gudeoksan	129.000	35.119	518.460
25	Heuksando	125.451	34.687	76.490
26	Jindo	126.324	34.472	476.470
27	Gosan	126.163	33.294	74.290

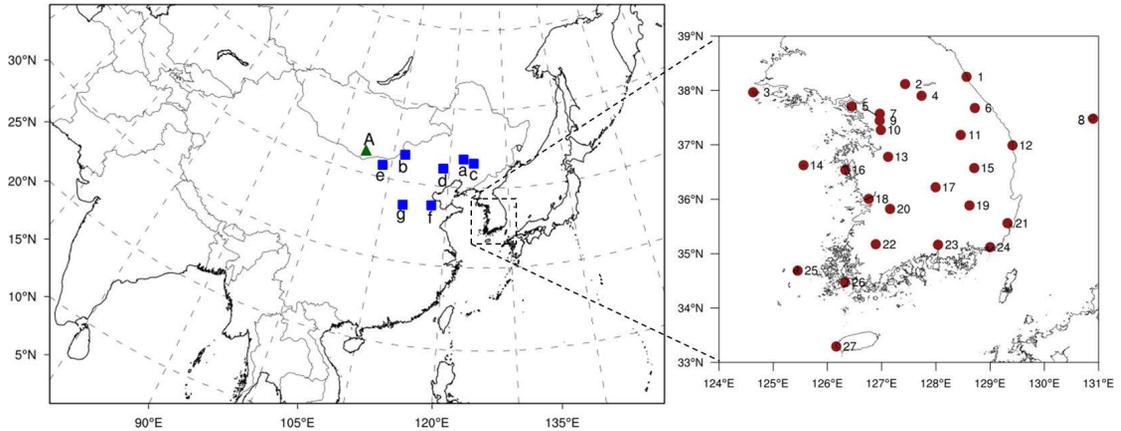


Fig. 2. ADAM3 domain (left) and geographical location of the employed stations. Detailed information of the dust monitoring tower in Nomgon of Mongolia (green triangle; A) and KMA-CMA joint monitoring stations (blue squares; a~g) and KMA (dark red circles; 1~27) are presented in Table 2.

tionary Korea Multi-Purpose SATellite 2A) RGB 황사 영상을 이용하였다. 이는 GK2A에 탑재된 AMI (Advanced Meteorological Imager)에서 제공되는 11.2~10.5 μm 파장을 사용하여 황사를 탐지하는 위성영상으로 황사를 열린 진분홍, 연분홍, 자홍, 보라색으로 표출하고 있으며 황사의 이동 분석 및 모델 평가 등에 활용할 수 있다 (Jang *et al.*, 2022).

황사의 발원과 국내에 유입된 황사의 농도 및 영향 범위를 파악하기 위하여 황사감시기상탑이 설치되어 있는 몽골 놘곤(Nomgon) 지점과 중국에 위치한 황사 감시망(운영장비: Tapered element oscillating microbalance 1400a 측정기)에서 관측한 PM_{10} 농도 자료를 이용하였고, 국내 기상청 지상 감시망(운영장비: β -ray 부유분진측정기) 27개 지점에서 관측한 지상 PM_{10} 농도 자료를 활용하였다. 또한, 백령도 및 서울에서 관측된 광학입자계수기(Optical Particle Counter) 자료를 이용하여 한반도에 유입된 황사의 입자 크기별 부피농도를 분석하였다. 광학입자계수기는 직경 0.3~25 μm 입자의 산란광의 강도를 측정하여 입자의 크기별 개수를 측정하는 기기로 청정지역의 대기 중 부유하는 입자의 측정에 용이하다고 알려져 있다 (Chun *et al.*, 1999). 마지막으로 황사 사례의 시·종 시각은 목측관측지점에서 황사 발생 시 황사 현상의 부

호, 방향, 관측 시각 등을 기록한 황사 기사자료를 활용하였다. 본 연구에서 이용한 놘곤 지점과 중국 및 기상청의 황사 감시지점의 위치는 그림 2와 표 2를 참고하면 된다.

2.3 기타 활용자료

황사 발원지에서의 기상 특성은 NCEP/NCAR R1 (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research Reanalysis 1; Kalnay *et al.*, 1996) 재분석자료의 500 hPa 지위고도, 850 hPa 바람, 2 m 기온, 누적 강수량 자료를 이용하여 파악하였다. NCEP R1 자료는 약 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 의 수평격자해상도와 6시간의 시간해상도를 가진다. 본 분석에는 기후기간과 아노말리 분석을 위해 1991년부터 2020년까지 자료와 2022년 12월의 일 및 월 평균 자료를 이용하였다.

2.4 황사·연무통합예측모델 평가

기상청의 ADAM3은 황사 및 연무예측을 위해 매일 4회(00, 06, 12, 18 UTC) 운영되고 황사 PM_{10} 및 비황사 PM_{10} 농도를 산출하고 있다. 2022년 12월 12일부터 14일까지 우리나라에서 관측된 고농도 황사 사례에 대하여 초기 시간별로 생산된 예측 황사 PM_{10} 자료

와 위성자료(RGB 황사영상)를 비교하여 ADAM3에서의 황사 발생 및 이동 등의 공간분포를 정성적으로 평가하였다. 또한, ADAM3에서 산출된 황사 PM_{10} 과 비황사 PM_{10} 의 합인 총 PM_{10} 의 평가를 위해서 지점별 관측 PM_{10} 농도와 입자 크기별 부피농도를 이용하여 비교하였다. 더불어, 초기 시간별로 갱신되는 총 PM_{10} 의 예측성을 정량적으로 평가하기 위하여 평균 편향오차 (Mean Bias Error, MBE), 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하였다. MBE (식 (2))와 RMSE (식 (3))는 예측값과 관측값의 차이를 나타내는 척도로 0에 가까울수록 예측값과 관측값의 수치가 서로 유사하다고 평가된다.

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_i - o_i)^2} \quad (3)$$

여기에서 N 은 황사 발원지와 우리나라에서의 PM_{10} 지상관측소 수이고, i 는 예측 시간이며, f_i 와 o_i 는 각각 예측 시간(i)에서의 예측값과 관측값을 의미한다.

3. 결 과

3.1 2022년 12월 고농도 황사 사례 특성

기상청 목적관측지점을 기준으로 2022년 12월 12일 (최초 관측시점/지점: 1930 KST/백령도)부터 14일 (최종 관측시점/지점: 0115 KST/울산)에 관측된 황사의 발원과 이동을 분석하기 위해 그림 3에 황사 일기도와 GK2A RGB 황사영상을 나타내었다. 12월 11일 09 KST (Korea Standard Time) 500 hPa 일기도의 몽골 지역에 위치한 상승 기압골이 발달함에 따라(그림 생략) 몽골 동부지역에 하층 저기압이 생성되었고 저기압 후면과 행한 고기압 전면에 기압경도력이 강화되었으며 몽골 중부와 중국 북부지역인 고비사막 및 내몽골 고원 일대에서 황사가 발원하였다. 황사 일기도에서 볼 수 있듯이 11일 12 KST와 12일 00 KST에는 등고도면이 조밀하여 강풍으로 인해 황사가 발

원하기 좋은 조건이었다(그림 3a, c). 또한, 황사 발원 시 850 hPa 고도에서 저기압 서쪽과 중심에 각각 온도골과 온도능이 위치하였다(그림 생략). Kim *et al.* (2022)의 연구에 따르면 강화된 온도경도를 가진 동서방향의 온도골이 남북으로 형성된 등고도선과 교차함에 따라 강한 경압불안정을 야기한다고 하였다. GK2A RGB 황사영상에서도 몽골 남부를 시작으로 황사(분홍색)가 탐지되어 고비사막 및 내몽골 고원 전역에서 황사(자홍색)가 발원한 것으로 확인되었다(그림 3b, d).

NCEP/NCAR R1 재분석자료를 이용하여 황사 발원지에서의 500 hPa 지위고도, 850 hPa 바람, 2 m 기온, 누적강수량의 평년 편차를 살펴보면(그림 4), 황사 발원일(12월 11일)에는 황사 발원 전 일주일(12월 5일부터 11일)에 비해 몽골 남부 및 중국 북부지역의 황사 발원지에서 강한 저기압 편차가 형성되었고, 황사 발원지에서부터 한반도까지 평년보다 강한 북서기류가 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 황사 발원지에서 상승기류에 의해 대기상층으로 황사가 확산되고 북서풍을 타고 우리나라에 영향을 줄 수 있음을 의미한다(그림 4a, d). 황사 발원지에서 기온은 황사 발원 전 일주일(12월 5일부터 11일)에 비해 황사 발원일(12월 11일)에 2~7°C의 강한 양의 편차를 형성하였으며, 황사가 발원하기에 충분히 온난한 상태였던 것으로 보인다. 강수량은 평년과 비슷한 수준으로 나타났다(그림 4b, e).

그림 5는 황사 발원지인 몽골 남부에 위치한 놘곤 지점에서 관측된 PM_{10} 농도와 풍속을 나타낸 것이다. 놘곤에서는 11일 15 KST부터 12일 03 KST까지 9 m s^{-1} 이상의 강풍이 발생하였는데 이는 Park *et al.* (2010)이 제시한 12월의 황사 발원 풍속 임계값(7.5 m s^{-1}) 이상의 풍속을 나타낸다. 강풍이 발생하기 시작한 후부터 지상 PM_{10} 농도가 증가하기 시작하였고 11일 20 KST부터 1시간 평균 지상 PM_{10} 농도가 $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상으로 관측되었으며, 최고 $2,714 \mu\text{g m}^{-3}$ (11일 23 KST)까지도 나타났다. 비슷한 시각에 중국 북부지역인 고비사막 및 내몽골 고원에 위치한 엘렌하오터와

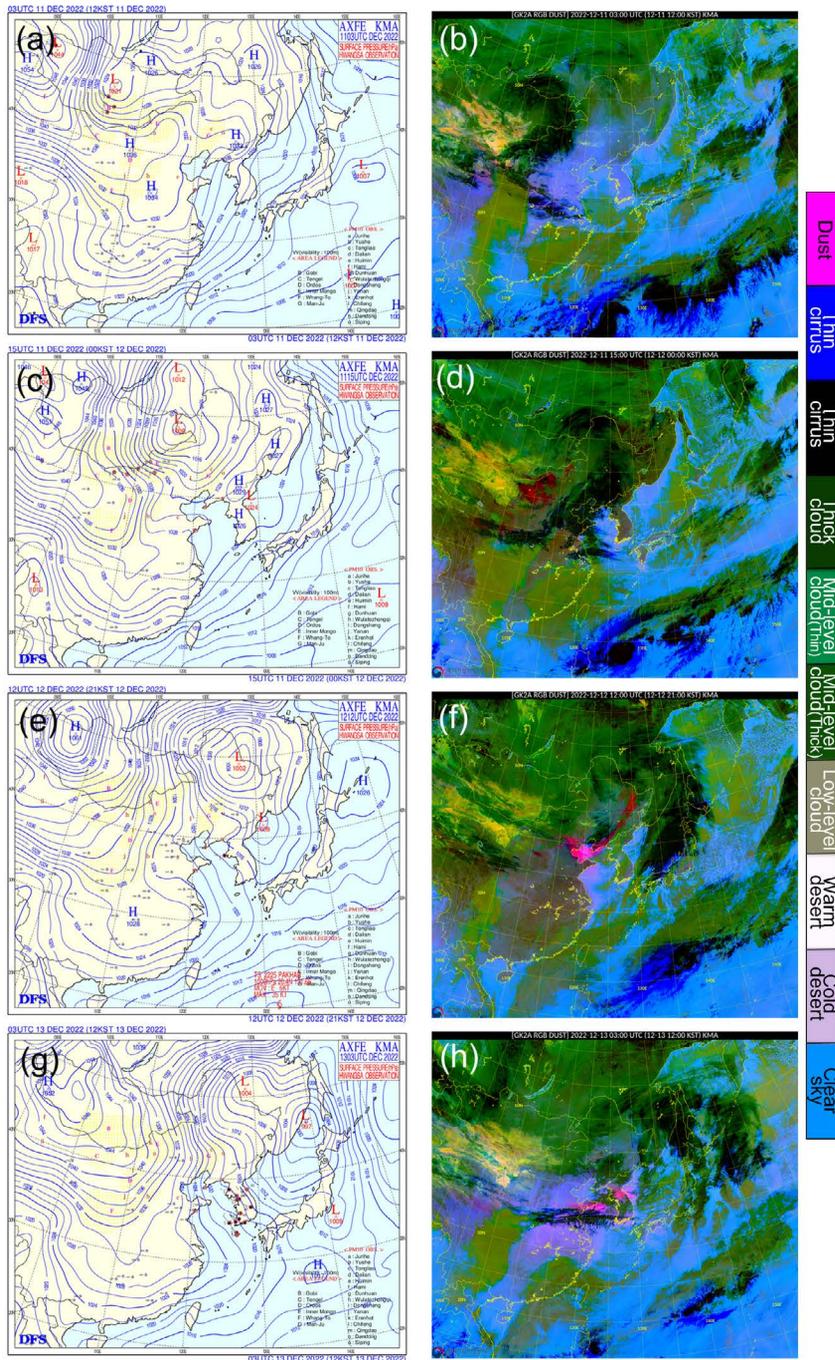


Fig. 3. Surface weather charts for Asian dust (left), where the red weather symbols represent the Asian dust observed at surface synoptic observation stations, and GK2A dust RGB images (right), where pink color represents the Asian dust, at 1200 KST on 11 (a, b), at 0000 and 2100 KST on 12 (c~f), and at 1200 KST on 13 December 2022.

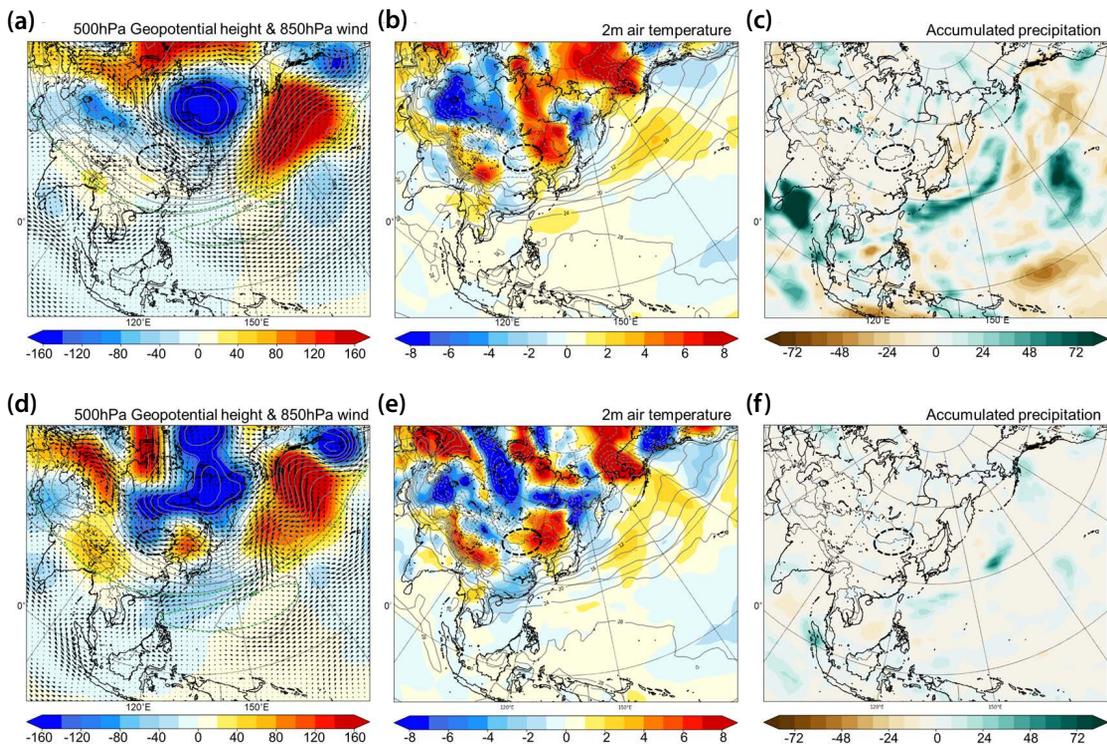


Fig. 4. NCEP/NCAR R1 500 hPa Geopotential height with 850 hPa wind (a, d), 2 m air temperature (b, e), and accumulate precipitation (c, f) anomalies for 5 to 11 December 2022 (a~c) and 11 December 2022 (d~f). The climate period is from 1991 to 2020. Circles indicate the source region of the Asian dust.

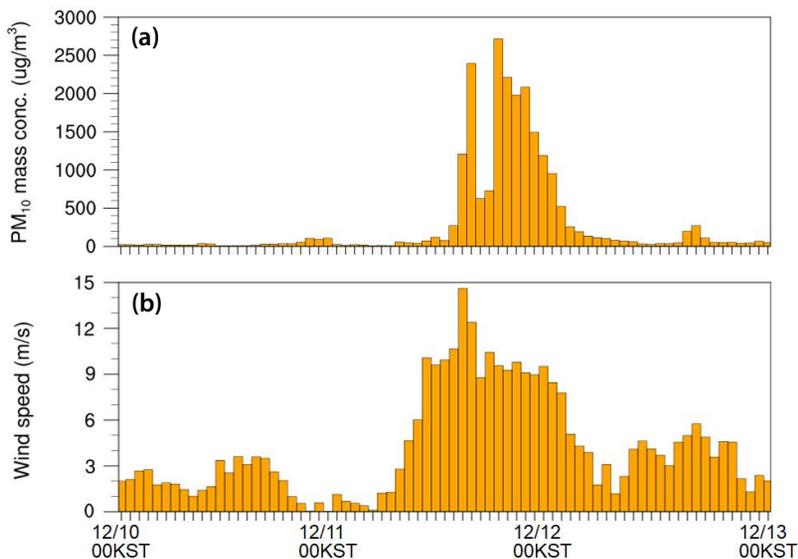


Fig. 5. (a) PM₁₀ mass concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$) and (b) 2 m wind speed (m s^{-1}) at the dust monitoring tower in Nomgon of Mongolia from 10 to 13 December 2022.

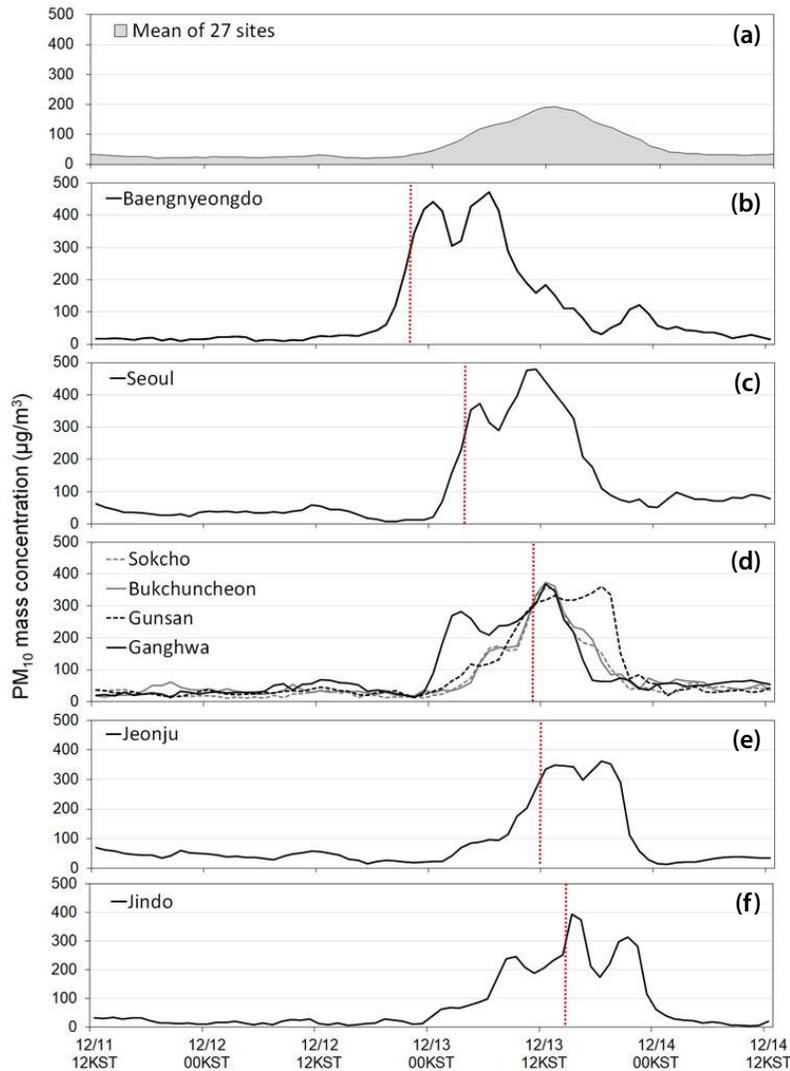


Fig. 6. Time series for PM_{10} mass concentration at surface observation sites in South Korea from 11 to 14 December 2022.

우라터중치 지점에서도 $12\sim 15\text{ m s}^{-1}$ 의 강풍과 함께 1시간 평균 지상 PM_{10} 농도가 $800\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 매우 짙은 황사가 관측되었다(그림 생략). 열렌하오터와 우라터중치에서 1시간 평균 지상 PM_{10} 농도는 각각 $1,136\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (11일 22 KST)와 $4,143\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (11일 23 KST)까지 발생하였다. 그 후 만주지역에 위치한 지점인 츠핑, 퉁랴오, 쓰핑 순으로 각각 $1,083\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (12일 08 KST), $1,084\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (12일 13 KST), $890\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (12

일 17 KST)의 PM_{10} 최고농도가 나타났다. 11일부터 12일까지 내몽골 고원에서 발원한 황사는 대륙고기압의 확장고 함께 저기압 후면을 따라 발해만 방향으로 형성된 북서풍을 따라 남동진하였고 12일 15 KST에 화베이 지역에서 황사가 관측되었으며, 12일 21 KST 경에 백령도를 시작으로 한반도 전역에 영향을 미쳤다(그림 3e~h). 12일 21 KST와 13일 12 KST의 황사 일기도에서 만주지방과 동해에 위치해 있던 저기압과

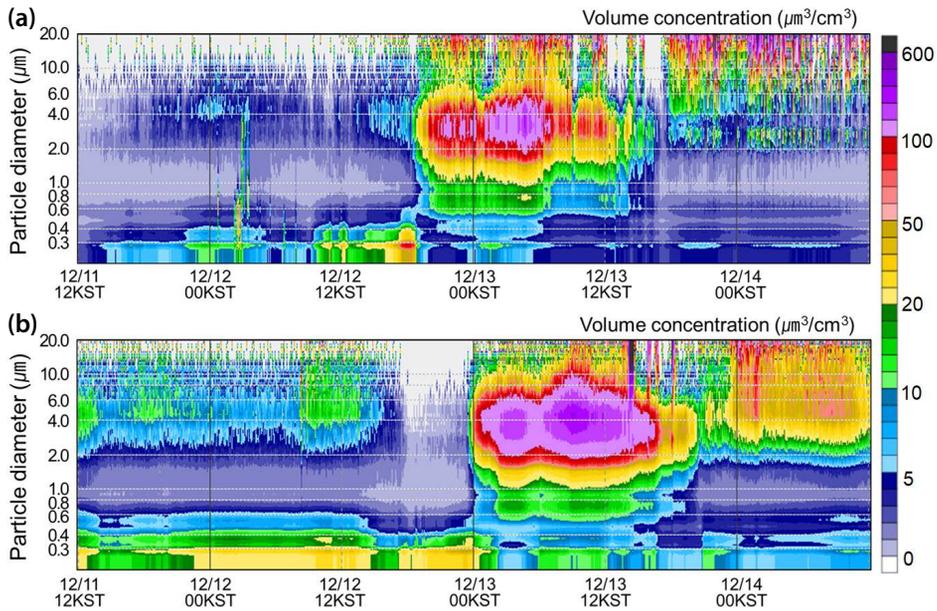


Fig. 7. Time series for particle size distributions observed by the optical particle counter at (a) Baengnyeongdo and (b) Seoul in 11~14 December 2022.

고기압 사이의 기압경도력이 더 커지고 등고선이 더 조밀해진 것으로 보아 저기압 주위의 풍속이 증가하였고 이로 인해 저기압이 빠르게 북동진한 것으로 보인다. 12일 1930 KST 남한의 최북단 섬인 백령도에서부터 시작된 황사(목측 기준)는 13일 00 KST경부터 서울과 서해안 일부 지역에 영향을 주었다. 그림 6에는 한반도 평균(27개 지점 평균) PM_{10} 농도와 $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 농도가 나타난 지점의 1시간 평균 PM_{10} 농도를 나타내었다. 황사 영향을 받는 기간 동안 한반도는 평균적으로 최고 $192 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 PM_{10} 농도가 관측되었다(그림 6a). $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 PM_{10} 농도는 12일 22 KST에 백령도에서 가장 먼저 관측되었고 이후에는 서울(13일 04 KST), 속초·북춘천·군산·강화(13일 11 KST), 전주(13일 12 KST), 진도(13일 15 KST) 순으로 관측되었다(그림 6b~f). 백령도와 서울에서는 각각 $472 \mu\text{g m}^{-3}$ (13일 05 KST), $480 \mu\text{g m}^{-3}$ (13일 11 KST)의 최고 PM_{10} 농도를 보였다(그림 6b~f).

그림 7은 황사 사례 중 최고 PM_{10} 농도가 관측되었던 백령도와 서울에서 관측된 입자 크기별 부피농도

자료를 나타낸 것이다. 백령도의 경우, 지상 PM_{10} 농도가 증가하기 시작한 12일 15 KST부터 21 KST까지는 입경이 $0.6 \mu\text{m}$ 이하의 초미세먼지가 증가하였으며(그림 7a), 이후 1시간 평균 PM_{10} 농도가 $472 \mu\text{g m}^{-3}$ (13일 06 KST)으로 증가했고 13일 09 KST까지 $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 고농도 지상 PM_{10} 이 관측되었다(그림 6). 이때 증가한 PM_{10} 농도는 입경이 약 $4 \mu\text{m}$ (조대입자)에서 최대로 나타났다. 서울의 입자 크기별 부피농도 자료에서는 13일 00 KST에서 16 KST 사이에 조대입자(직경 $2.5 \mu\text{m}$ 이상) 영역의 부피농도가 높게 나타났으며(그림 7b), 13일 11 KST에 1시간 평균 PM_{10} 농도가 $480 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 관측되었다. 한반도 전역에 영향을 미친 황사는 마지막으로 14일 0115 KST에 울산에서 목측으로 관측되었다.

3.2 ADAM3의 예측성 평가

우리나라에 영향을 미친 황사를 정확하게 예측하기 위해서는 우선 모델이 발원지에서의 황사(총 PM_{10} 농도)를 얼마나 정확하게 모의했는지 평가해야 한다.

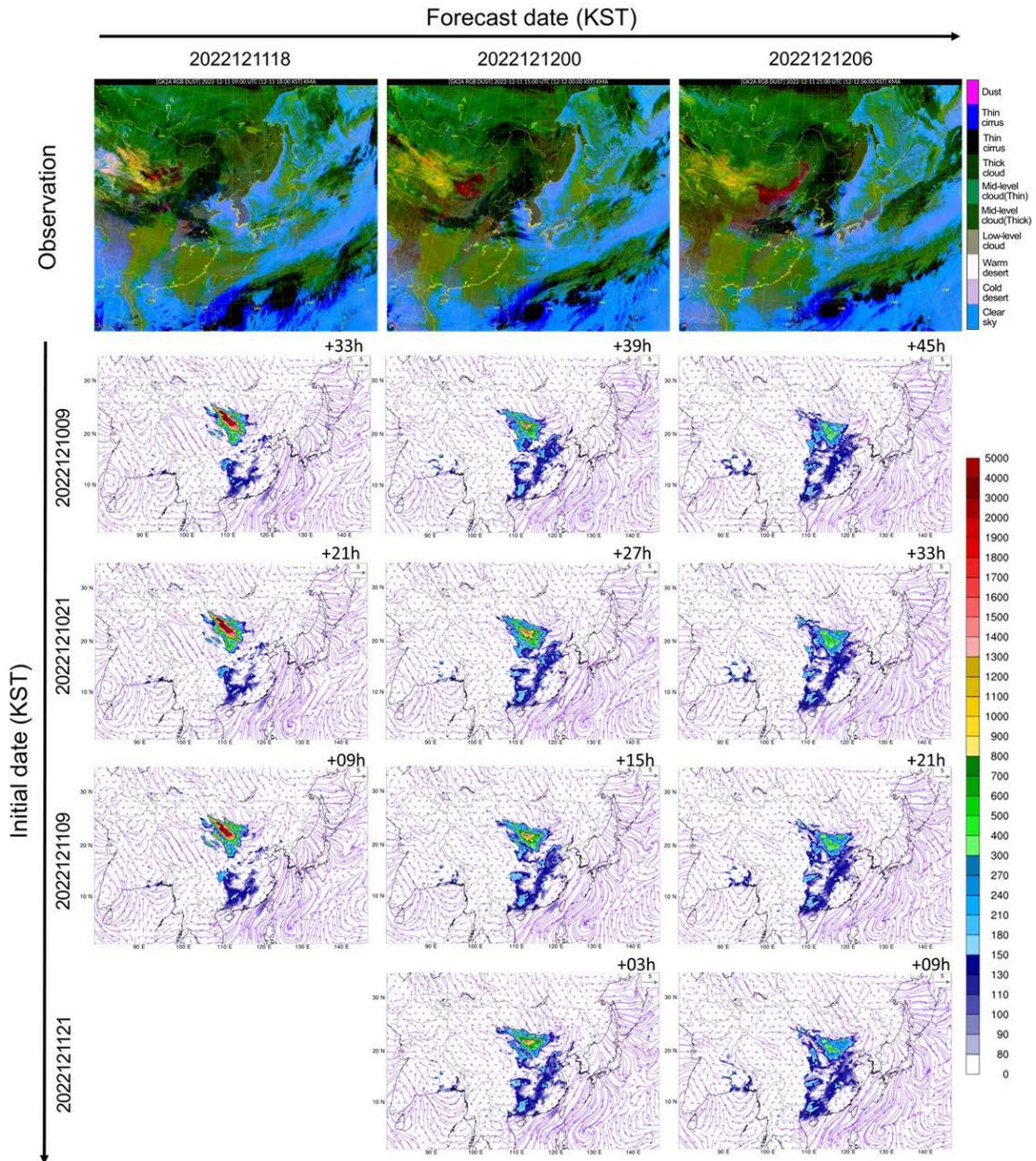


Fig. 8. Spatial distributions of total PM₁₀ concentration in East Asia with four runs by initial date: 09 KST and 21 KST 10 December, and 09 KST and 21 KST 11 December 2022. The GK2A RGB dust images for the forecast date are shown on the top.

또한, 동일한 목표 시각에 대한 모델 황사농도 예측의 변화를 파악할 수 있도록(Lee *et al.*, 2012) 매 초기 시간별 갱신되는 예측정보의 정확도가 어떻게 변화하는

지 예측경향성에 대한 평가가 필요하다. 그림 8은 발원지에서의 황사예측과 이동을 공간적으로 검증하기 위해 초기 시간별로 ADAM3에서 예측된 PM₁₀ 농도

와 GK2A RGB 황사영상을 나타낸 것이다. 모델 초기 시간은 10일 09 KST부터 12시간 간격으로 나타내었고(그림 8 세로방향) 위성자료와 비교된 예측 시각은 황사가 발원하기 시작하였던 12월 11일 18 KST부터 6시간 간격으로 나타내었다(그림 8 가로방향).

ADAM3은 10일 09 KST 모의에서 12일 18 KST (+21 h)부터 12일 06 KST (+33 h)까지 몽골 남부, 고비사막 및 내몽골 고원 부근 발원지에서 발원한 황사를 모의하였고 북서기류를 따라 동남진하는 황사를 모의하고 있다. 모델에서 모의된 황사 공간분포는 GK2A RGB 황사영상에서 탐지된 황사(주황, 자색, 분홍 등)의 공간분포와 비슷하게 나타났다. 서로 다른 초기 시간으로부터 모의된 모든 예측장이 발원지에서 황사 발원과 이동 패턴을 비슷하게 모의하고 있어 모델이 본 황사 사례를 안정적으로 예측한 것을 볼 수 있다.

황사의 이동속도, 최고강도, 발원지의 먼지 발생 등의 정보들이 최신 자료로 갱신됨에 따라(Lee *et al.*, 2012) 다른 초기 시간으로부터 모의된 황사 강도와 패턴도 서로 다르게 예측된다. 이러한 차이는 각 지점별

로 예측된 PM₁₀ 농도 시계열 분석을 통해 살펴볼 수 있다. 그림 9에는 고농도 황사가 관측된 지점(얼렌하오터, 통랴오, 위서)과 발원지 풍하측에 위치한 지점(후이민)의 초기 시간별로 모의된 PM₁₀ 농도의 시계열을 제시하였다. 그림에서 회색 음영은 관측에서 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 PM₁₀ 농도가 관측된 시점을 나타낸 것이다. ADAM3의 10일 21 KST의 모의에서 11일과 12일에 각각 우라터중치와 통랴오에서 관측된 1,000 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 매우 높은 PM₁₀ 농도를 상당히 과소모의하였지만 모델의 초기 시간이 갱신됨에 따라 PM₁₀ 농도를 높게 모의하는 것을 볼 수 있다(그림 9a, b). 또한, 황사의 시작 및 종료시각을 유사하게 모의하였다(그림 생략). 그림 9c의 위서 지점의 경우, 10일 21 KST의 모의에서 최고농도 황사를 관측보다 약 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 과대모의(12일 11 KST)하였으나, 시간이 지남에 따라 PM₁₀ 농도를 낮게 모의하여 11일 21 KST 모의에서는 관측값과 거의 유사한 강도(약 144 $\mu\text{g m}^{-3}$)로 모의하였다. 선행 시간이 짧아질수록 관측에 가까운 PM₁₀ 농도를 모의하였지만 13일에 발생한 최고농도 시점을 관측보다 약 5시간 늦게 모의하였다. 마지막으로,

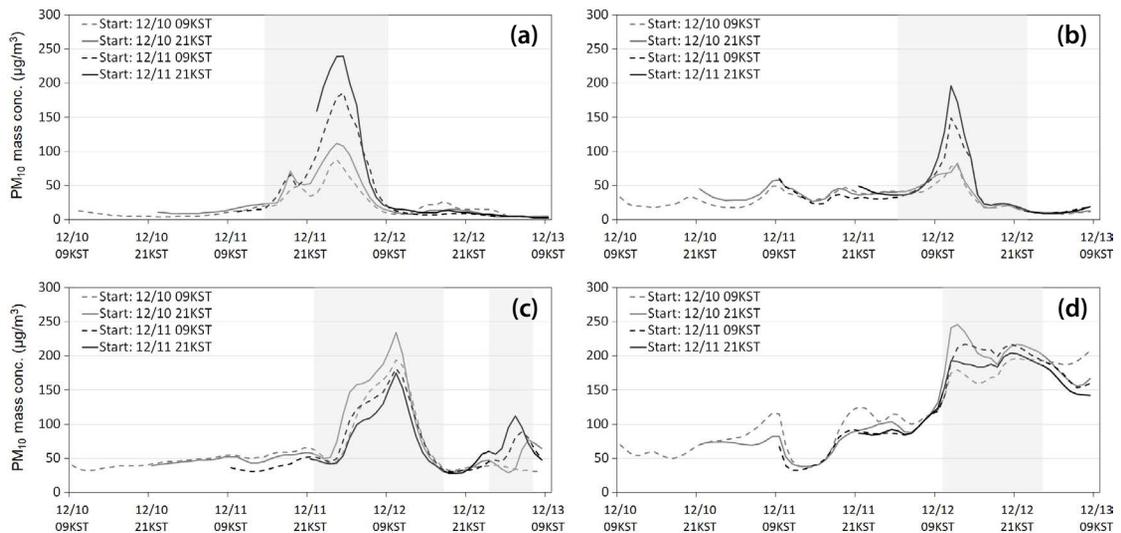


Fig. 9. Time series of observed PM₁₀ concentration at (a) Erenhot, (b) Tongliao, (c) Yushe, and (d) Huimin in Asian dust source regions initialized from different simulation starting time. Gray shading indicates the range of the time when PM₁₀ concentrations above 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ were observed.

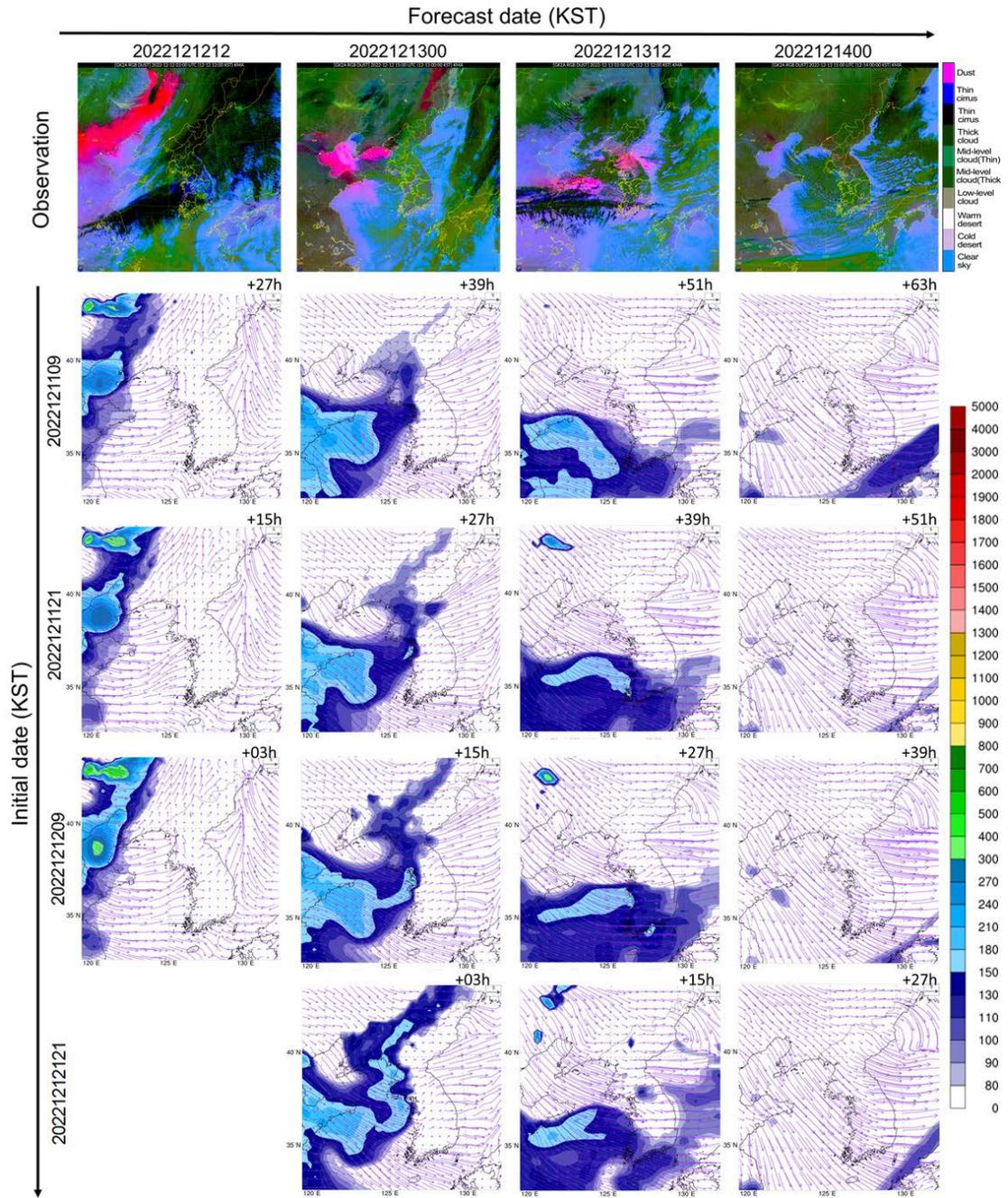


Fig. 10. Spatial distributions of total PM₁₀ concentration in South Korea with four runs by initial date: 09 KST and 21 KST 11 December, and 09 KST and 21 KST 12 December 2022. The GK2A RGB dust images for the forecast date are shown on the top.

후이민 지점에서는 초기 시간별 모의된 PM₁₀ 농도의 차이를 볼 수 없었지만, 11일 21 KST 모의에서 예측된

최고농도가 204 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 관측된 최고농도 (249 $\mu\text{g m}^{-3}$)와 비슷하게 모의하였다(그림 9d).

한반도에서 예측을 검증하기 위해 한반도에 황사가 유입되기 전부터 황사 영향이 벗어난 시각까지 12시간 간격으로 예측된 황사 PM_{10} 농도를 초기 시간별로 나타내었고, 관측과 비교를 위해 동일한 예측 시간의 GK2A RGB 황사영상을 함께 나타내었다(그림 10). 4개의 서로 다른 초기 시간으로부터 모의된 황사 PM_{10} 은 예측 시간이 서로 다름에도 불구하고 북서풍을 따라 요동반도와(12일 12 KST) 서해로(13일 00 KST) 유입된 황사가 우리나라의 서해와 남해 등에 영향을 미치고(13일 12 KST) 14일 00 KST에 한반도의 영향에서 벗어난 것을 비슷하게 모의하고 있어 모델이 본 황사 사례를 안정적으로 예측한 것을 알 수 있다. 네 초기 시간 모두 12시간 후인 14일 00 KST 모의에서는 한반도의 예측농도가 약화되어 $80 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하로 나타났고 남해상의 황사는 동진하여 일본에 도달한 것으로 모의하였다. 위성에서 탐지된 황사는 중국 허베이성을 거쳐(12일 12 KST) 12일 13 KST에 발해만을 통과하여 서해로 유입되었고, 모델에서는 황사가 허베이성을 거쳐(12일 12 KST) 13일 00 KST에 발해만보다 남쪽으로 치우친 산둥반도 쪽으로 황사가 유입된 후 서해와 영향을 미쳐 약간의 차이를 보였지만 초기 시간별로 ADAM3에서 모의된 황사는 위성영상에서 탐지된 황사와 전반적으로 비슷한 분포를 나타내었다

(그림 10). 그러나, 초기 시간별 동일한 예측 시각에도 그 강도와 패턴은 다소 달라지는 것을 볼 수 있다. 한반도에 황사가 도달한 13일 00 KST에 대한 모의를 비교해 보면 초기 시간 11일 09 KST와 21 KST에는 백령도 부근에서 PM_{10} 농도가 약 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 모의되었지만 초기 시간 12일 21 KST에는 농도가 점점 증가하여 약 $250 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 모의되었다. 또한, 12일 14 KST에 예측된 황사의 경우, 예측 시간이 짧아질수록(초기 시간 12일 21 KST) 한반도에서 빠져나간 황사 영역대가 더욱 넓어진 것으로 모의되었다.

ADAM3에서 예측된 황사농도에 대하여 지점별로 살펴보고자 관측에서 $300 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상의 고농도를 보였던 백령도, 서울 지점과 서해 및 남해안에 위치한 흑산도와 안면도의 관측 및 예측 PM_{10} 농도 시계열을 그림 11에 제시하였다. 최고농도가 나타났던 백령도와 서울 지점의 경우 11일 09 KST 모의에서 황사의 시종 시각은 관측과 유사하게 모의하였지만 최고농도를 과소모의하였다. 예측 초기 시간이 갱신됨에 따라 모의농도가 약간 증가하였지만 가장 최근의 초기 시간인 12일 21 KST의 모의에서도 백령도와 서울의 예측된 최고농도는 각각 $211 \mu\text{g m}^{-3}$, $132 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 나타나 관측에 비해 PM_{10} 농도를 각각 $450 \mu\text{g m}^{-3}$, $350 \mu\text{g m}^{-3}$ 가량 낮게 모의하여 여전히 과소모의하였다.

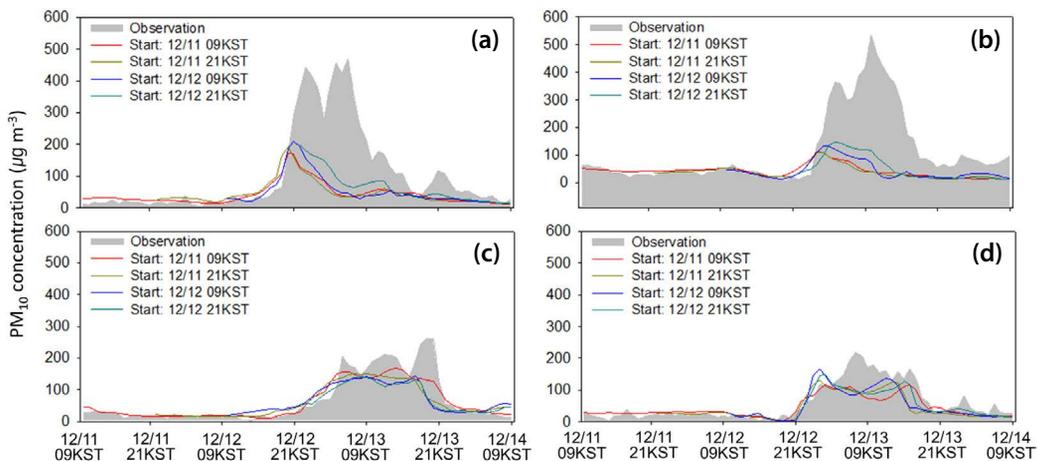


Fig. 11. Time series of simulated and observed PM_{10} concentration at (a) Baengnyeongdo, (b) Seoul, (c) Heuksando, and (d) Anmyeondo in South Korea, initialized from different simulation starting time.

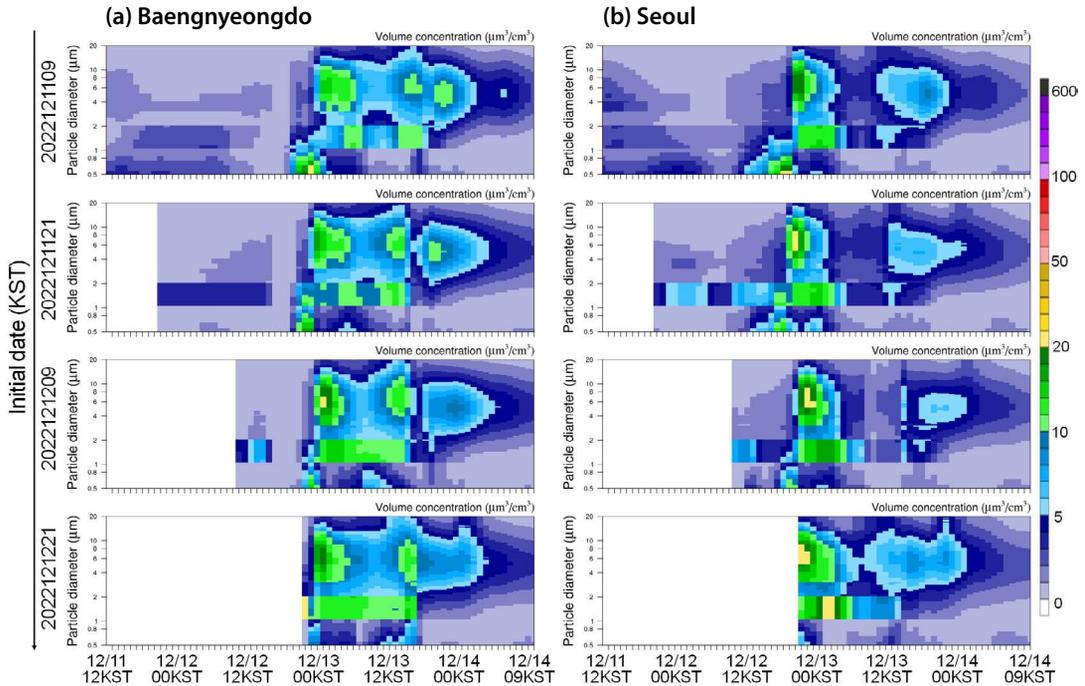


Fig. 12. Time series for particle size distributions simulated at (a) Baengnyeongdo and (b) Seoul of South Korea, initialized from different simulation starting time.

이러한 황사 과소모의는 고농도 황사가 발생했던 발원지역(우라터중치, 엘렌하오터 등)에서의 과소모의가 원인일 수 있다. 상대적으로 낮은 PM_{10} 농도가 관측되었던 흑산도와 안면도의 경우 초기 시간에 따라 예측된 PM_{10} 농도의 차이가 크지 않았고, 12일 21 KST 모의에서 PM_{10} 농도가 각각 $168 \mu\text{g m}^{-3}$, $166 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 예측되어 관측(흑산도: $261 \mu\text{g m}^{-3}$, 안면도: $219 \mu\text{g m}^{-3}$)과 약 $100 \mu\text{g m}^{-3}$ 이하의 차이를 보였다. 한반도에서의 예측된 황사는 발원지에서의 황사발생 뿐만 아니라 발원지에서 한반도까지의 기류 예측 등이 복합적으로 작용되기 때문에 발원지에 비하여 불확실성이 커지는 것으로 보인다.

초기 시간에 따라 변화하는 백령도와 서울에서 산출된 입자 크기별 부피농도를 그림 12에 나타내었다. 입자별 에어로졸 부피농도는 ADAM3에서 직접적으로 예측되지 않으므로 Whitby and McMurry (1997)의 방법에 따라 예측된 에어로졸 질량농도 및 수농도를

이용하여 산정하였다. 11일 09 KST에 모의된 백령도에서의 입자 크기별 부피농도는 12일 20 KST부터 13일 00 KST까지 입자 직경 $0.8 \mu\text{m}$ 이하의 미세먼지가 증가하기 시작하였고 이후에는 $3\sim 10 \mu\text{m}$ 의 입자 직경에서 최대 부피농도를 보여(그림 12a), 초미세입자와 조대입자의 부피농도를 과소모의했지만 입자별 부피농도 분포는 관측과 유사하게 모의되었다(그림 7a 참고). 서울에서도 11일 09 KST에 모의 결과에서 입자 직경별 부피농도를 관측보다 과소모의하였지만 조대입자($5\sim 10 \mu\text{m}$) 부피농도가 증가하는 시각(13일 00 KST)은 관측과 유사하게 모의하였다. 백령도와 서울 모두 초기 시간에 따른 입자별 부피농도 분포 결과는 비슷하게 나타났다.

황사가 발원하고 이동하여 한반도에 영향을 준 기간에 대하여 황사 발원지와 한반도에서의 MBE와 RMSE를 초기 시간에 따라 6시간 간격으로 표 3에 제시하였다. 초기 시간에 따라 72시간(1~72 예측 시간)

Table 3. The mean bias error (MBE) and root mean square error (RMSE) in Asian dust source region and South Korea, initialized from different simulation starting time.

Asian dust source region			South Korea		
Initial date	MBE	RMSE	Initial date	MBE	RMSE
12/10 09 KST	-1.84	134.69	12/11 09 KST	-20.1	53.3
12/10 15 KST	-12.94	141.94	12/11 15 KST	-25.1	57.5
12/10 21 KST	-12.70	142.43	12/11 21 KST	-26.2	55.7
12/11 03 KST	-16.65	140.73	12/12 00 KST	-26.5	54.9
12/11 09 KST	-20.12	137.38	12/12 09 KST	-27.2	52.2
12/11 15 KST	-25.09	138.37	12/12 15 KST	-29.5	53.3
12/11 21 KST	-26.20	128.78	12/12 21 KST	-26.6	50.7
Average	-16.50	137.76	Average	-25.89	35.95

의 예측자료를 이용하였고 황사 발원지와 한반도 모든 지점에 대한 평균값을 나타내었다. 모든 초기 시간에 대한 평균 MBE는 황사 발원지와 한반도에서 각각 $-16.50 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $-25.89 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 나타났다. 선행 연구에 따르면 황사 발원지에서 ADAM3는 봄철에 PM_{10} 농도를 관측에 비해 과대모의하는 것으로 알려져 있으나 (Ryoo *et al.*, 2020), 본 황사 사례가 포함된 기간 동안에는 PM_{10} 농도를 전반적으로 과소모의하였다. 모든 초기 시간에 대한 평균 RMSE는 황사 발원지와 우리나라에서 각각 $137.76 \mu\text{g m}^{-3}$, $35.95 \mu\text{g m}^{-3}$ 수준으로 평가되어 지상 PM_{10} 농도가 높게 발생했던 황사 발원지에서의 오차가 더 크게 나타났다. 두 지역 모두 초기 시간에 따라 MBE의 차이가 거의 나타나지 않았고, RMSE는 최근의 초기 시간자료를 이용했을 때 작은 오차를 보이긴 했지만 그 차이는 작게 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 황사 일기도, 위성관측자료 (GK2A RGB 황사), 지상 PM_{10} 관측망, 광학입자계수기 자료를 2022년 12월 12일부터 14일까지 한반도에서 관측된 짙은 황사 사례의 원인 및 특성을 분석하였다. 또한, 황사가 발원하기 시작하여 한반도를 벗어난 시점 (2022년 12월 11일 09 KST~2022년 12월 14일 03

KST)에 대하여 6시간 간격으로 예측된 황사농도를 위성관측자료와 지상 PM_{10} 농도와의 비교를 통해 통합기상모델 UM을 입력장으로 하는 ADAM3의 예측 정확도를 파악하였다.

황사가 발원했던 12월 11일은 저기압 편차 및 북서 기류가 평년 대비 강하게 형성되었고 기온은 평년 대비 $2\sim 7^\circ\text{C}$ 온난하여, 발원지 환경은 황사가 지표면으로부터 대기 상층까지 확산되어 우리나라까지 영향을 주기에 좋은 조건이었다. 중국 북부에 위치한 저기압 내 강한 상승기류에 의해 고비사막, 내몽골 고원 및 황토 고원 일대에서 11일 오전부터 황사가 발원하였다. 이때, 황사 발원지에 위치한 높곤에서는 9 m s^{-1} 의 이상의 지상 강풍과 함께 11일 23 KST에는 최고 $2,714 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 1시간 평균 PM_{10} 농도가 최고 관측되었고 우라터중치에서도 $12\sim 15 \text{ m s}^{-1}$ 의 지상 강풍과 함께 $4,143 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 PM_{10} 농도가 관측되었다. 황사가 발원한 후, 확장하는 대륙고기압과 저기압 사이에 평년보다 강하게 형성된 북서기류에 의해 황사가 빠른 속도로 발해만을 통과하여 한반도 (12일)로 유입되었다. 선행 연구에서도 겨울철 황사는 황사가 발원한 후 적게는 10시간부터 24시간 이내로 비교적 빠르게 우리나라까지 이동한다고 하였고 (Jeon, 2012; Chun *et al.*, 2000), 유사한 종관 특성은 2015년 2월 우리나라에서 관측된 겨울철 고농도 황사 사례에서도 살펴볼 수 있다 (Park *et al.*, 2016). 우리나라로 유입된 황사는 목적을 기준으로 12월 12일 1930 KST부터 14일 0115

KST까지 약 30시간 동안 지속되었고 서울에서 $480 \mu\text{g m}^{-3}$ 의 한 시간 평균 지상 PM_{10} 농도를 발생시켰다. 서울에서 관측된 PM_{10} 농도는 입경이 약 $2\sim 6 \mu\text{m}$ 인 조대입자의 부피농도가 우세하게 나타났다.

초기 시간별 갱신되는 ADAM3의 예측정보를 지상 PM_{10} 농도와 GK2A RGB 황사 영상과 비교하여 시·공간적으로 검증한 결과, ADAM3은 고비사막 및 내몽골 고원 일대에서 발원하여 한반도로 유입된 황사의 공간분포를 위성관측자료와 유사하게 모의하는 것을 확인하였다. 모델의 초기 시간별 예측 시간이 서로 다름에도 황사의 분포와 농도, 이동 경향을 비슷하게 모의한 것으로 보아 모델이 황사 사례를 안정적으로 예측한 것을 확인하였다. ADAM3는 황사 시작 및 종료 시각과 최고농도가 나타난 시각을 관측과 유사하게 모의하였고 사례일에 가까운 초기 시간을 이용할 수록 상대적으로 관측과 비슷한 PM_{10} 농도 시계열을 보였다. 한반도에서 모의된 PM_{10} 농도도 과소모의되는 지역이 존재하였지만 황사 변동성은 유사하게 나타났다. 초기 시간별로 한반도에서 모의된 PM_{10} 농도 차이가 비슷한 것을 고려해 볼 때 발원지에서의 황사 발생뿐만 아니라 한반도까지의 기류 등의 정확성과 PM_{10} 농도 자료를 이용한 자료동화 연구가 더욱 확보되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 우리나라에 영향을 주었던 겨울철 고농도 사례에 대하여 평가했기 때문에 보다 정확한 모델 평가를 위하여 과거에 발생했던 황사 사례나 이후 발생될 황사 사례를 대상으로 추가적인 사례 분석과 모델 검증이 필요하다. 또한, 이러한 지상 및 위성 관측자료를 이용한 황사 사례 분석과 ADAM3의 황사 검증 결과를 바탕으로 지속적인 모델 개선이 수행되어야 하며, 모델의 정확도 개선을 위해서는 추가적으로 황사 발원을 결정하는 풍속, 지면기온, 상대습도, 강수량과 같은 기상변수 검증을 통한 원인 분석이 필요하다. 본 연구 결과가 발원지와 우리나라에서 유사한 황사 사례가 발생하였을 때 보다 정확도 높은 황사 예보 및 대응을 위해 활용되기를 기대한다.

감사의 글

이 연구는 ‘황사·연무기술 지원 및 활용연구(KMA 2018-00521)’의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Cho, J.H., Ryoo, S.B., Kim, J. (2021) Improvements of ADAM3 by Incorporating New Dust Emission Reduction Formulations Based on Real-Time MODIS NDVI, Remote Sensing, 13(16), 3139.
- Chun, Y., Kim, J., Choi, J.-C., Shin, D.-S. (1999) The Characteristics of the Aerosol Number Concentration Observed in Seoul and Anmyondo During an Yellow Sand Phenomenon, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 15(5), 575-586, (in Korean with English abstract).
- Chun, Y., Kim, J., Boo, K.-O., Kim, N.-O. (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.
- Gong, S.L., Zhang, X.Y. (2008) CUACE/Dust - An integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia, Atmospheric Chemistry and Physics, 8, 2333-2340.
- Hong, J.H. (2004) Economic damage costs of Asian dust in Korea, The Hanyang Journal of Economic Studies, 25, 101-115, (in Korean with English abstract).
- Husar, R.B., Tratt, D.M., Schichtel, B.A., Falke, S.R., Li, F., Jaffe, D., Gassó, 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.J., Merrill, J., DuBois, D., Vignola, F., Murayama, T., Nickovic, S., Wilson, W.E., Sassen, K., Sugimoto, N., Malm, W.C. (2001) Asian dust events of April 1998, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 106, 18317-18330. <https://doi.org/10.1029/2000JD900788>
- 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.
- Jaffe, D., Anderson, T., Covert, D., Kotchenruther, R., Trost, B., Danielson, J., Simpson, W., Berntsen, T., Karlsdottir, S., Blake, D., Harris, J., Carmichael, G., Uno, I. (1999) Transport of Asian air pollution to North America, Geophysical Research Letters, 26, 711-714. <https://doi.org/10.1029/1998GL012801>

- org/10.1029/1999GL900100
- Jang, J.C., Lee, S., Sohn, E.H., Noh, Y.J., Miller, S.D. (2022) Combined dust detection algorithm for Asian Dust events over East Asia using GK2A/AMI: A case study in October 2019, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 58(1), 45-64. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00234-5>
- Jeon, B.-I. (2012) Characteristics of wintertime Asian Dust occurrence at Busan, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 21(4), 581-591, (in Korean with English abstract).
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-472. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kim, J., Baek, K., Lee, K., Lee, Y., Hong, D. (2007) Effect of the Asian dust events on respiratory disease during the spring, *Journal of The Korean Society of Emergency Medicine*, 18, 326-332, (in Korean with English abstract).
- Kim, J.E., Jung, W.S., Seo, W., Li, S., Oh, S.M., Shin, D., Ko, H.-J., Yoo, H.-J., Chung, C.-Y., Kim, Y.-H. (2022) Characteristics of Asian Dust Observed over the Yellow Sea during YES-AQ Campaign in March, 2021 based on Vessel and Aircraft Measurement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38, 557-576, (in Korean with English abstract).
- Lee, E.-H., Kim, S., Ha, J.-C., Chun, Y. (2012) Performance Analysis of Simulation of Asian Dust Observed in 2010 by the all-Season Dust Forecasting Model, UM-ADAM2, *Atmosphere*, 22(2), 245-257, (in Korean with English abstract).
- Lim, Y., Kang, M., Kim, J. (2021) Sensitivity Analysis of the Dust-Generation Algorithm in ADAM3 by Incorporating Surface-Wetness Effects, *Atmosphere*, 12(7), 872.
- Lu, C.-H., da Silva, A., Wang, J., Moorthi, S., Chin, M., Colarco, P., Tang, Y., Bhattacharjee, P.S., Chen, S.-P., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M.H., McQueen, J., Iredell, M. (2016) The implementation of NEMS GFS Aerosol Component (NGAC) Version 1.0 for global dust forecasting at NOAA/NCEP, *Geoscientific Model Development*, 9, 1905-1919. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1905-2016>
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2021) Report of Asian dust cases in 2021, 172pp.
- Numerical Modeling Center (NMC) (2020) Report of verification of numerical forecasting system, 184pp.
- Numerical Modeling Center (NMC) (2021) Report of verification of numerical forecasting system, 253pp.
- Park, J.S., Han, J.S., Ahn, J.Y. (2013) The research trend of Asian Dust storm (AD) of Korea and recent episode analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29, 553-573, (in Korean with English abstract).
- Park, M.E., Cho, J.H., Kim, S., Lee, S.-S., Kim, J.E., Lee, H.C., Cha, J.W., Ryoo, S.B. (2016) Case Study of the Heavy Asian Dust Observed in Late February 2015, *Atmosphere*, 26, 257-275. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.2.257>
- Park, S.-U. (2002) Field survey of Yellow Sand source regions. Proceedings of workshop of Asian dust, 22 March, 2002, Korea Meteorological Administration, Korea.
- Park, S.-U., Choe, A., Lee, E.H., Park, M.S., Song, X. (2010) The Asian dust aerosol model 2 (ADAM2) with the use of normalized difference vegetation index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data, *Theoretical and Applied Climatology*, 101, 191-208. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0244-4>
- Park, S.-U., In, H.-J. (2003) Parameterization of dust emission for the simulation of the Yellow Sand (Asian dust) observed in March 2002 in Korea, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108, 1-21. <https://doi.org/10.1029/2003JD00348>
- Ryoo, S.B., Kim, J., Cho, J.H. (2020) Performance of KMA-ADAM3 in identifying Asian dust days over Northern China, *Atmosphere*, 11(6), 593.
- SDS-WAS ASIAN-RC (2023) Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System ASIAN Regional Center. World Meteorological Organization [Available online at <http://www.asdf-bj.net>].
- Simmons, A. (2010) Monitoring atmospheric composition and climate, *ECMWF Newsletter*, 123, 10-13.
- Sun, D., Chen, F., Bloemendal, J., Su, R. (2003) Seasonal variability of modern dust over the Loess Plateau of China, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 108. <https://doi.org/10.1029/2003JD003382>
- Tanaka, T.Y., Chiba, M. (2005) Global simulation of dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR, *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 83A, 255-278.
- Whitby, E.R., McMurry, P.H. (1997) Modal aerosol dynamics modeling, *Aerosol Science and Technology*, 27, 673-688.
- World Meteorological Organization (WMO) (1992) International Meteorological Vocabulary, In WMO Technical Publication No. 182 (2nd ed.).

World Meteorological Organization (WMO) (2022a) The 8th MEETING OF THE WMO SDS-WAS REGIONAL STEERING GROUP (RSG) FOR ASIA. WMO, 17-18 Oct. 2022, Jeju, South Korea.

World Meteorological Organization (WMO) (2022b) WMO Airborne Dust Bulletin, WMO, Geneva, Switzerland, 8pp.

Yoo, Y., Choung, J.T., Yu, J., Kim, D.K., Koh, Y.Y. (2008) Acute effects of Asian dust events on respiratory symptoms and peak expiratory flow in children with mild asthma, *Journal of Korean Medical Science*, 23, 66-71.

Yu, X., Cheng, T., Chen, J., Liu, Y. (2006) A comparison of dust properties between China continent and Korea,

Japan in East Asia, *Atmospheric Environment*, 40, 5787-5797.

Authors Information

강미선 (국립기상과학원 예보연구부 연구원)
(misun0106@korea.kr)

이우정 (국립기상과학원 예보연구부 연구사)
(lwj@korea.kr)