

논문

# 에르덴 황사감시기상탑 자료를 이용한 황사 발원 추세 및 기상인자의 상관성 분석

## Analysis of Asian Dust Outbreaks and Correlation with Meteorological Factors Using Erdene Dust Monitoring Tower

정민재, 유희정, 오상민, 주승진<sup>1)\*</sup>, 부경온

국립기상과학원 기후연구부, <sup>1)</sup>(사)대기환경모델링센터

Min Jae Jeong, Hee-Jung Yoo, Sang Min Oh, Seung Jin Joo<sup>1)\*</sup>, Kyung-On Boo

Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences,  
Jeju, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Center for Atmospheric and Environmental Modeling, Seoul, Republic of Korea

접수일 2023년 3월 14일  
수정일 2023년 3월 30일  
채택일 2023년 3월 30일

Received 14 March 2023  
Revised 30 March 2023  
Accepted 30 March 2023

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-885-6712

E-mail : joo.seungjin@gmail.com

**Abstract** This study analyzed the characteristics of the Asian dust source region and examined the correlation between Asian dust outbreak and meteorological factors using data collected from a 20 m dust monitoring tower located in Dornogovi Erdene, Mongolia from 2019 to 2021. During this period, the hourly average PM<sub>10</sub> concentrations were about 3,522 µg/m<sup>3</sup> on May 4 in 2019, 2,958 µg/m<sup>3</sup> on October 20 in 2020, and 3,812 µg/m<sup>3</sup> on April 15 in 2021, recording the highest concentration in the spring and fall seasons. However, according to the Asian dust monitoring tower observations, it was analyzed that the Asian dust outbreak events of which the maximum hourly average PM<sub>10</sub> concentration exceeding 200 µg/m<sup>3</sup> occurred every month of the year. Through the correlation analysis between observed meteorological factors and PM<sub>10</sub> concentration, it was found that high-concentration dust events occurred when the critical friction velocity exceeds 0.6 m/s. It was found that the dust concentration at this site was directly related to the wind speed exceeding the critical friction velocity during the winter to early spring. However, it was not only related to the wind speed but also related to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) during the late spring to the late autumn due to the growth of vegetation. The Erdene dust monitoring tower data can be used to validate the model parameters in the Asian Dust Aerosol Model (ADAM) and to improve the operational ADAM forecasting performance in the Korea Meteorological Administration (KMA).

**Key words:** Asian dust, PM<sub>10</sub>, Friction velocity, NDVI, ADAM

### 1. 서론

황사(Asian dust)는 중국의 북서부(만주)와 몽골 지역의 건조, 반건조 사막과 불모지에서 발생하는 먼지와 모래 폭풍(Dust and Sand Storm: DSS)으로 발원 지뿐만 아니라 풍하측에 위치한 한반도와 일본 그리고 미국의 서부지역까지 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Hsu *et al.*, 2006; VanCurren, 2004; Grouset *et al.*, 2003; Clarke *et al.*, 2001; Husar *et al.*, 2001).

특히 내몽골 및 고비사막 지역은 황사의 주요 발원지이자 이 지역에서 발원한 황사가 우리나라에 영향을 미치는 황사의 약 81%를 차지한다(NIMS, 2017). 한반도는 편서풍으로 인해 주로 봄철에 강한 황사의 영향을 받고 있지만 황사 발원지에서는 언제나 기상 조건만 만족하면 황사가 발생할 수 있으며(Park *et al.*, 2011, 2010), 최근에 급격한 기후변화의 영향으로 황사 발원지의 변화가 주 연구주제가 되고 있다. 황사의 특성을 이해하기 위해 국내에서 이루어진 대부분의

연구는 황사 발생 시 국내의 대기 성분의 변화를 관측하는 것으로 황사 및 고농도의 미세먼지 발생, 미발생 시기에 대기 중의 미세먼지 화학성분을 상호비교 분석하는 연구들이 중심을 이루었다 (Park *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2003; Ma *et al.*, 2001; Park *et al.*, 2001).

한반도에서의 황사 관측은 최근 10년간 유지 또는 줄어드는 추세이나 2021년에는 5년 만에 황사경보가 두 차례 발표되는 등 크게 증가하였다 (NIMS, 2021). 황사의 정확한 예보를 위해서는 황사 발원지 지표면의 특성을 파악하고 황사를 발생 또는 억제시키는 기상 조건의 정확한 규명 그리고 황사가 발생할 수 있는 기상 조건을 만족할 때 그 발생량을 명확히 매개변수화하는 것이 필요하다. 이를 위해 기상청에서는 몽골의 도르노고비 (Dornogobi aimag) 에르덴 (Erdene soum)에 20 m 황사감시기상탑을 설치하여 현재까지 운영 중에 있으며, PM<sub>10</sub> 농도 및 각종 기상 자료를 관측하고 있다. 또한 황사감시기상탑에서 얻어진 관측 자료를 연구에 적용하여 각 황사 발원지의 특성에 맞는 황사 발생량 추정에 관한 연구가 진행되고 있다 (Park *et al.*, 2019, 2016, 2011, 2010).

황사 발원지에서는 연중 황사가 지속적으로 발생하고 있으며, 발생된 황사가 우리나라에 영향을 줄 수 있느냐 하는 것은 발원지의 황사 발생 여부(지면상태, 발생 기압계 조건)와 함께, 대기 조건(기류)이 함께

고려되어야 한다.

황사 발생은 지역적인 범주를 넘어서 전 지구적인 환경문제로, 급격한 기후변화 및 사막화 진행에 따른 황사 발원지의 지표면 상태에 영향을 줄 수 있으므로 이를 지속적으로 감시·분석하고 연구하여, 그 결과를 국제적으로 진행되고 있는 미세먼지 피해 저감 및 사막화 방지 사업의 기초 자료로 활용될 수 있도록 해야 한다.

본 연구에서는 기상청에서 2007년 몽골 도르노고비도의 에르덴에 설치하여 운영 중에 있는 종합 황사감시기상탑의 최근 3년(2019~2021년) 자료를 활용하여 발원지에서의 황사 발생 경향을 파악하고 상관성 분석을 통해 황사 발원 시 기상변수들의 특성을 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 에르덴 황사감시기상탑

에르덴 황사감시기상탑 (111°05'E, 44°7'N, 988 m a.s.l.)은 지리적으로 몽골의 도르노고비 (Dornogobi aimag)의 중심지인 샤인샨드 (Sainshand)에서 남동쪽으로 약 90 km, 울란바타르에서 약 600 km 떨어진 에르덴숨 (Erdene soum)의 서남쪽 가장자리에 위치하

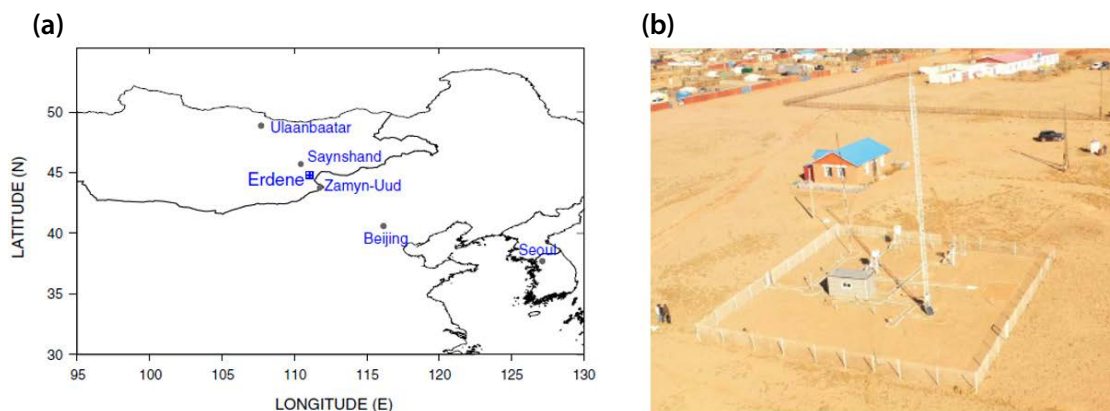


Fig. 1. Geographical locations of (a) the dust monitoring towers and the landscapes of (b) Erdene.

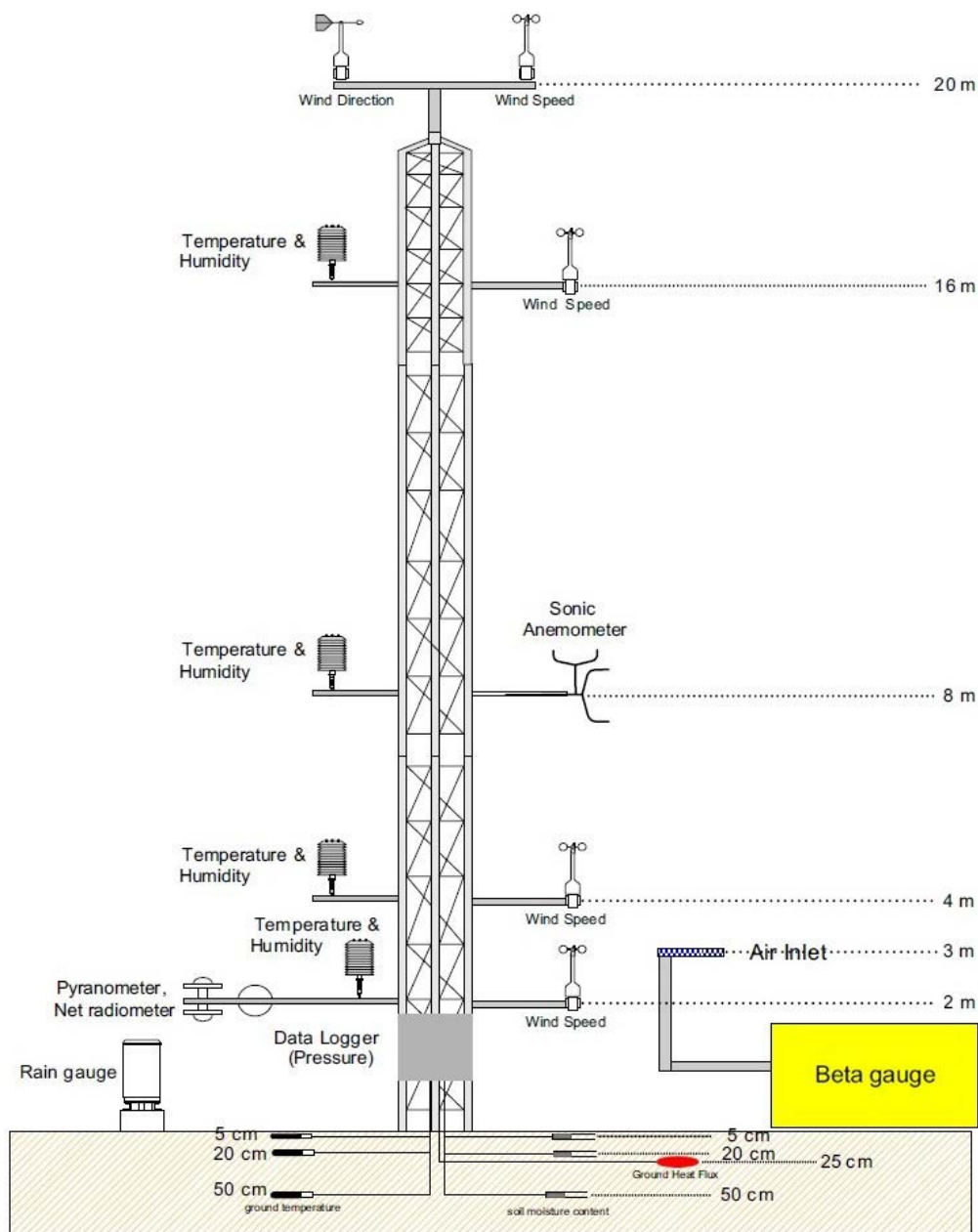


Fig. 2. The schematic representation of a dust monitoring tower at Erdene in Mongolia.

고 있다. 에르텐숨은 몽골과 중국의 국경인 자민우드 (Zamyn-Uud)에서 북동쪽으로 약 100 km 떨어져 있다(그림 1). 에르텐 황사감시기상탑의 주풍 방향인 북서방향의 넓은 지대는 전형적인 고비(Gobi brown)

토양으로 황사 발원지의 지표면 분류상 혼합고비 (mixed Gobi) 지역을 대표하는 곳이라 할 수 있다 (ALAGC, 2013). 에르텐의 서남쪽 50 km 거리에는 넓은 엘스(Els, 모래사막)가 존재하여, 서남풍의 영향을

받을 때에는 모래 폭풍의 영향을 받기도 한다. 몽골 고비사막 지대인 황사 발원지에서 기원하는 황사 성분의 직접적인 공급원인 지표면 토양 성분의 물리·화학적 특성 가운데 토양 입도분포(Soil texture)로 모래(Sand) 함량이 약 81.2~97.3%, 미사(Silt) 함량이 약 2.5~17.9% 그리고 점토(Clay) 함량이 약 0.1~1.4%의 범위에 속하며 전체적으로 모래>미사>점토 순서로 모래 성분의 비중이 가장 높고, 토양 pH는 약 7.5~9.9의 약알칼리 및 강한 알칼리성 토양이며 유기물함량은 약 0.7~4.2%로 상대적으로 초지나 산림 지역보다 낮은 수준이었다(Kim *et al.*, 2010). 한편, 고비 토양의 주요 중금속 성분들은 각  $Fe > Al > Ca > Mg > K > Mn > Na > others$ 의 순서로 농도가 상대적으로 높은 것으로 나타났으며 이온 성분은  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ 의 농도가 다른 이온 성분들에 비하여 상대적으로 높게 검출되어 매우 풍화가 심한 사막화 건조 지역의 특성을 나타내고 있다(Kim *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2004).

그림 2는 몽골의 에르덴 황사감시기상탑에 설치된 각 기상관측 장비의 종류와 센서들의 위치 및 타워의 구조물을 나타낸 것이다. 20 m 황사감시기상관측탑의 4층(2, 4, 10, 16 m)의 높이에 풍속계, 온·습도계, 10 m 높이에 풍향계, 8 m 높이에 3차원 초음파풍속계(CSA T3)가 설치되어 있다. 복사계(Up and Down 두 방향)와 순복사계를 2 m 높이에 설치하여 일사량을 관측하

였으며, 1.5 m 높이에 데이터로거(CR3000) 보관함 내부에 기압계가 설치했다. 0.6 m 높이에 지표면 온도를 측정할 수 있는 적외선 방사 온도계(Infrared radiometer)가 설치되어 있고 지중 3층(5, 20, 50 cm)의 깊이별, 각각의 토양온도, 토양수분 센서가 설치되어 있으며, 25 cm 깊이에 토양열속 센서(Ground heat flux)가 설치되어 있다. 컨테이너 창고 안쪽에 부유분진측정장치(FH62C14)를 두고 3 m 높이의 공기흡입구로부터 황사농도( $PM_{10}$ )를 안정적으로 측정하였다. 자세한 관측 장비 및 범위는 표 1에 나타났다.

## 2.2 자료수집 및 처리

관측자료의 각 분석 항목들에 대해서 최댓값과 최솟값의 유효 범위 설정, 튀는 값의 검토 등을 진행하였으며, 정전이나 전압의 불안정으로 인한 자료들은 결측 처리하였다. 관측자료의 변수들이 유효 범위 내에 있는지를 조사하기 위하여 최댓값 및 최솟값을 벗어나는 값들은 유효하지 않은 데이터로 판정하고, 분석에서 제외하였다. 이때 조사하는 변수로는  $PM_{10}$  농도, 기온, 습도, 풍속, 기압, 마찰속도( $u^*$ ), 지표 온도이다. 특히  $PM_{10}$  농도의 관측값은 최솟값을 만족하지 않는 해당 측정시간의 전, 후 각각 10분 관측자료는 제외하여 정전 등으로 측정이 이루어지지 않는 시간 동안 부유분진측정기 필터와 튜브에 남아있는 에어로졸 입

**Table 1.** Instrument deployment at the Erdene tower.

Sensor	Model & Manufacture	Measurement range	Measurement height or depth
Data logger	CR3000 (Campbell)		1.5 m
Temperature and humidity	HMP45A or C (Vaisala)	-40~60°C, 0.8~100%	2, 4, 8, 16 m
Wind speed	03101 (Campbell)	0~60 m/s	2, 4, 8, 16 m
Wind direction	03001 (Campbell)	0~360 deg	20 m
Soil temperature	107 (Campbell)	-35~50°C	5, 20, 50 cm (depth)
Soil moisture	CS615 (Campbell)	0~1 v/v	5, 20, 50 cm (depth)
Solar radiation	LI200X (Li-Cor)	0~3,000 W/m <sup>2</sup>	2 m (up, down)
Net radiation	NR-Lite (Kipp and Zonen)	-2,000~2,000 W/m <sup>2</sup>	2 m
Ground heat flux	HFP015C (Campbell)	-2,000~2,000 W/m <sup>2</sup>	25 cm (depth)
Pressure	PTB101 or PTB110 (Vaisala)	500~1,100 hPa	2 m
Precipitation	TE525 mm (Texas Electronics)	0.1 mm~inf	Surface
Surface temperature	IRTS (Apogee)	-40~70°C	2 m
Turbulent flux	CSAT (Campbell)	-30~30 m/s	8 m
Aerosol concentration ( $PM_{10}$ )	FH62C14 (Thermo)	0~5,000 µg/m <sup>3</sup>	3 m

**Table 2.** Maximum and minimum values for data quality control.

Variable	Max.	Min.
PM <sub>10</sub> Conc. (μg/m <sup>3</sup> )		≤ 10
Wind speed (m/s)	> 30	< 0
Pressure (hPa)	> 1,000	< 800
u* (m/s)	> 2	≤ 0
Temperature (°C)	> 70	< -50
Relative humidity (%)	> 100	< 0
Soil temperature (°C)	> 70	< -50

자들로부터의 영향을 최소화하였다. 변수들의 최댓값과 최솟값은 관측 지역의 과거 관측값을 기반으로 산정하였으며, 변수 처리를 위해 사용된 최댓값과 최솟값은 표 2와 같다.

몽골의 고비사막 황사 발원지에서의 황사 발생 이벤트는 시간 평균 PM<sub>10</sub> 농도 자료를 이용하였으며, 전체기간 평균( $\bar{C}$ )과 표준편차를( $\sigma$ )를 구하여 시간 평균 농도( $C$ )의 값이 전체기간 평균에 표준편차를 더한 값보다 클 때( $C > \bar{C} + \sigma$ )를 황사 발생 이벤트로 정의하고, 이벤트의 지속시간은  $\bar{C} + 0.5\sigma$ 에서 시작하여 최대 농도( $C > \bar{C} + \sigma$ )에 달한 후 감소하여  $\bar{C} + 0.5\sigma$  될 때까지의 시간으로 정하였다. 이를 참조하여 본 연구에서는 황사 발생 이벤트 시의 PM<sub>10</sub> 농도 기준은 시간 평균 140.5 μg/m<sup>3</sup>, 시간 최대 PM<sub>10</sub> 농도 217.4 μg/m<sup>3</sup> 이상으로 분석되었다. 또한 발원지의 각 황사 발생에서 지속시간이 3시간 미만인 경우는 황사 발생 이벤트의 해당 범주에서 제외하였다.

또한, 연구에서 사용된 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index (NDVI))는 미항공우주국(NASA)의 Aqua 위성의 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 관측으로부터 얻어지는 NDVI 값을 사용하였다. MODIS NDVI는 United States Geological Survey (USGS)의 Land Process Distributed Active Archive Center (LP DAAC)를 통해 자료를 얻을 수 있으며, MODIS 자료 중 16일 간격으로 합성되어 500 m × 500 m 격자의 크기로 생성되는 MYD13A1 (<https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLA/MYD13A1.006/>) 자료를 활용하였다. 해당 전구 자료 가운데 몽

**Table 3.** MYD13A1 pixel reliability.

Rank key	Summary QA	Description
-1	Fill/No Data	Not processed
0	Good data	Use with confidence
1	Marginal data	Useful, but look at other QA information
2	Snow/Ice	Target covered with snow/ice
3	Cloudy	Target not visible, covered with cloud

골의 에르덴이 위치한 지역을 포함하는 타일은 h25v04이며, 해당 격자자료 중에 Pixel Reliability 필드의 Rank Key가 0 (Good Data) 또는 1 (Marginal Data)인 타일을 유효한 자료로 사용하였다(표 3).

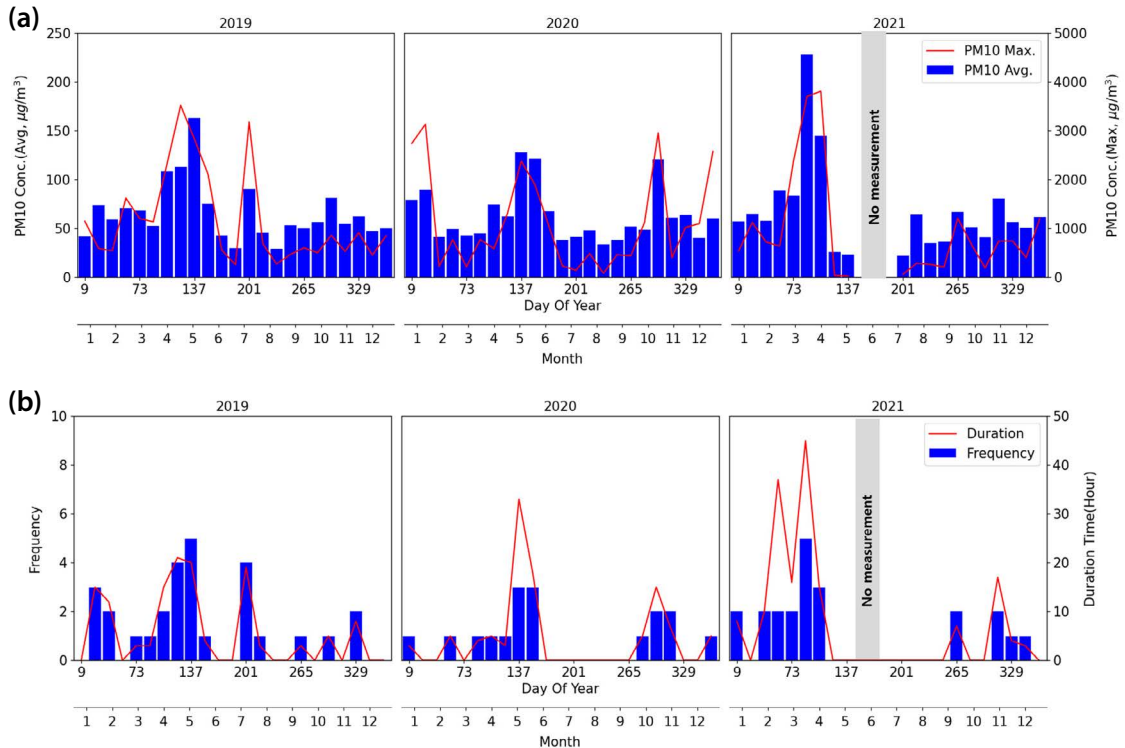
2019년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지의 에르덴 황사감시기상탑에서 수집된 모든 관측자료는 품질 관리를 거친 후 시간 평균값을 이용하여 16일 간격으로 평균해 계절변화 양상을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 에르덴 PM<sub>10</sub> 농도변화

그림 3(a)는 2019년 1월부터 2021년 12월까지 몽골 고비사막의 에르덴 황사감시기상탑으로부터 관측된 PM<sub>10</sub> 농도의 시간 평균값을 이용하여 16일 간격으로 평균한 계절변화 양상을 나타낸 것이다. 2019년도는 약 60.5 μg/m<sup>3</sup>, 2021년은 약 59.5 μg/m<sup>3</sup> 그리고 2020년은 약 59.3 μg/m<sup>3</sup> 순으로 분석되었으며, 우리나라의 봄철에 해당하는 3~5월의 시기에 평균 농도가 높은 유사한 계절 변동성을 보였다. 황사 발생 이벤트 빈도와 지속시간을 분석한 그림 3(b)를 살펴보면 2019년과 2020년은 5월의 DOY 137 (05.02~05.17)에서 각각 5회, 20 hr와 3회, 35 hr로 가장 많은 황사 이벤트가 발생하였으며 지속시간 또한 가장 길었다. 그러나 2021년도에는 3월의 DOY 89 (03.15~03.30)에서 5회, 45 hr로 다른 연도보다 이른 시기에 많은 황사 이벤트가 발생하였다. 2021년에는 장비 이상으로 인하여 DOY 153~169에 해당하는 데이터는 결측되었다.





**Fig. 3.** Time series of the (a) 16-day averaged daily maximum concentration (red line) and hourly mean dust concentration (blue bar) and (b) yellow dust duration time (red line) and frequency (blue bar) for a 16-day period.

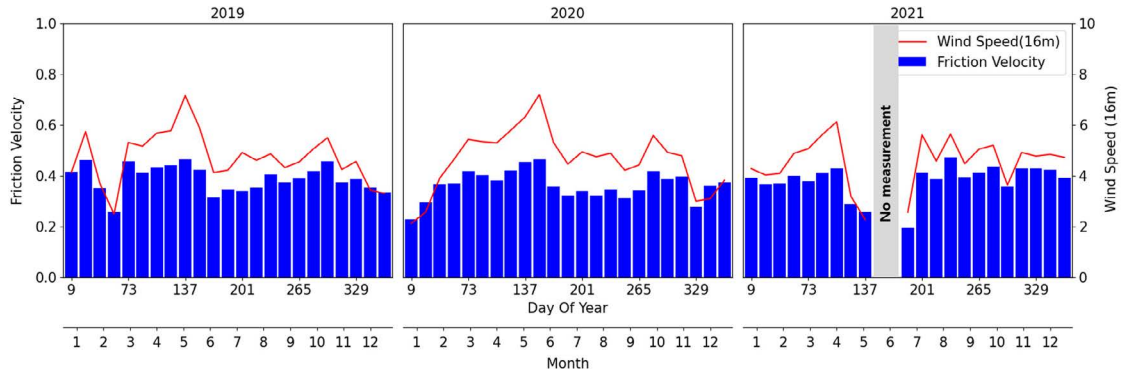
### 3.2 미기상학적 요소의 계절변화

몽골 고비사막의 에르덴 황사감시기상탑으로부터 관측된 16m 고도의 풍속은 본 연구 기간 중 연평균은 4.6~4.7 m/s를 나타냈으며, 2019년과 2020년도 모두 5월의 DOY 137 (05.02~05.17)에서 연중 가장 높은 약 7.2 m/s로 동일하게 나타났고, 2021년은 4월의 DOY 105 (03.31~04.15)에서 약 6.1 m/s로 연중 가장 높은 풍속을 나타냈다. 이는 그림 3(b)에 나타난 황사 발생 이벤트 빈도수와 지속시간과 매우 밀접한 경향을 보여 풍속과 황사 이벤트 발생의 상관성이 높음을 알 수 있었다( $R^2 = 0.56$ ). 또한 풍속과 마찰속도의 일변화는 유사한 특징을 보이고 있으며, 이는 기존에 연구되었던 연구 결과와 매우 잘 일치한다(Park *et al.*, 2010). 황사감시기상탑에서 관측된 고도별 풍속 자료를 활용하여 계산한 임계마찰속도는 황사의 발원을 예측하는 모델 수행에 있어서 중요한 매개변수로 적용되고 있

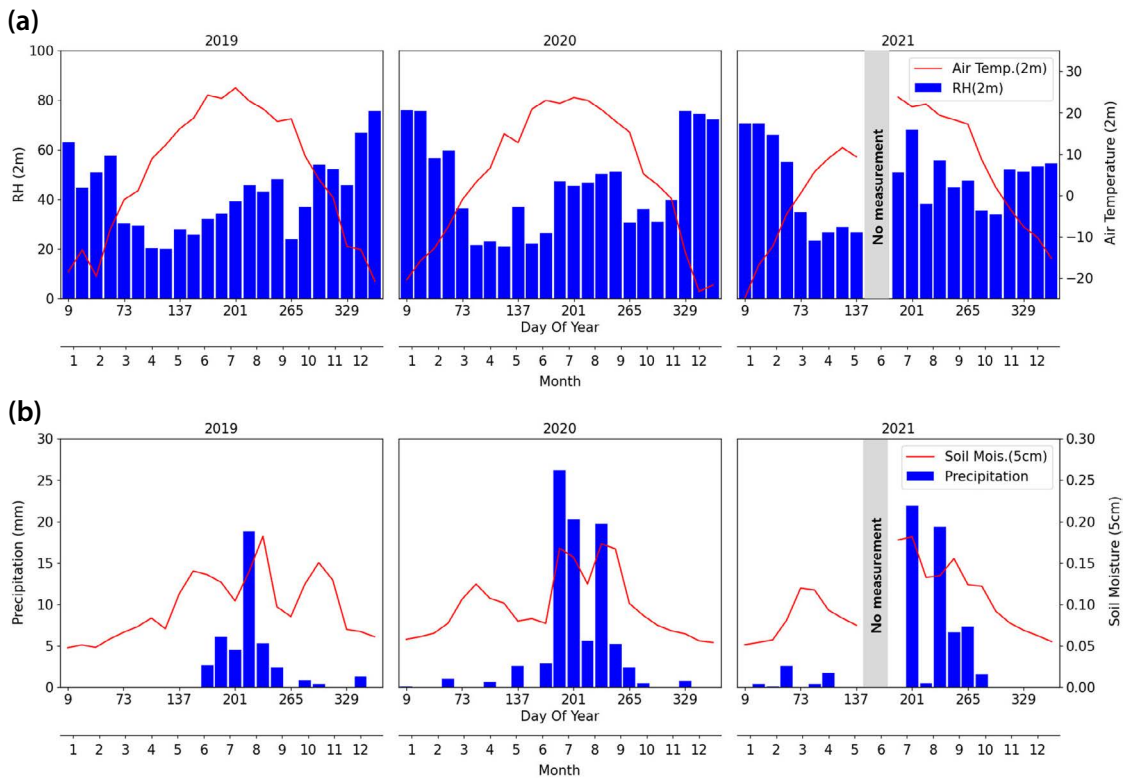
으며, 고농도의 황사 이벤트 발생과 풍속과의 자세한 설명은 3.3절에 상호관계 분석을 통해 서술하였다.

그림 5는 몽골 황사감시기상탑으로부터 관측된 2 m 고도의 온·습도와 지상의 강수량 및 토양수분을 나타내고 있다. 기온은 매년 6월 중순부터 7월초(2019년: 24.2°C, 2020년: 23.6°C, 2021년: 23.7°C) 사이에 연중 가장 높은 기온의 분포를 나타내고 있었으며, 상대 습도는 1월초에 약 70%에서 계절이 변화함에 따라 점점 작아져 3월말에서 4월의 기간 중 약 20%의 연중 최저값에 달한 후, 여름철에 약 50%의 수준으로 증가하였다. 이후, 가을철에 짧은 감소 추세를 보인 다음 점차적으로 12월까지 상승하는 경향을 보였다.

지중 5 cm 깊이에서 관측한 토양수분의 계절변화를 살펴보면 기온이 영상으로 상승하기 시작하는 3월초부터 4월말까지 증가하는 추세를 보인 후 감소하다가 여름철인 7월부터 다시 증가하여 8월초에 연중 가장



**Fig. 4.** Time series of the 16-day hourly mean wind speed (red line) at 16 m high and hourly mean friction velocity calculated with 2 m and 16 m wind speed (blue bar).



**Fig. 5.** Time series of (a) the 16-day hourly mean air temperature (red line) and hourly mean relative humidity (blue bar) at 2 m high, (b) hourly mean soil moisture (red line) and total precipitation amount (blue bar) for a 16-day period.

높은 최댓값(2019년: 0.18, 2020년: 0.17, 2021년: 0.18)을 나타냈고 이후 12월까지 감소하는 경향을 보였다. 이는 몽골 고비사막의 황사 발원지에서 관측된 강수

량이 여름철인 7월과 8월(약 42.4~87.9 mm) 사이에 집중되어 나타나는 영향으로 생각된다.

그림 6은 2019년 1월부터 2021년까지 주요 몽골 황

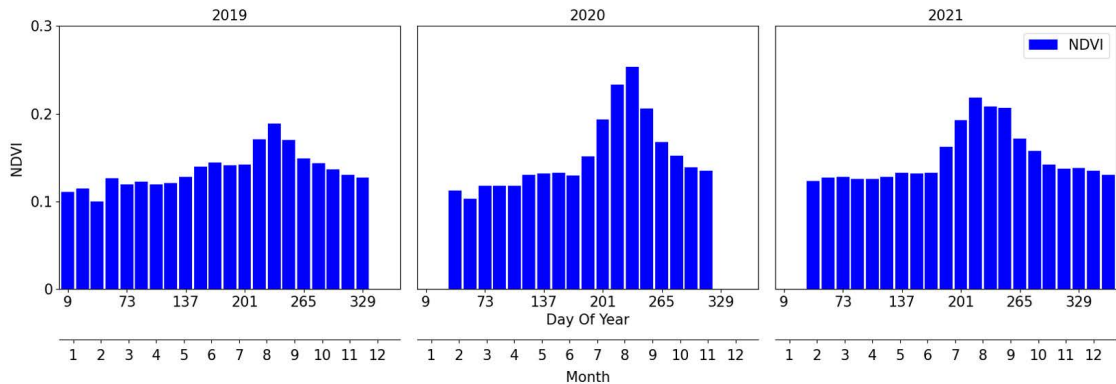


Fig. 6. Temporal variation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) during 2019~2021.

사 발원지인 에르덴 고비사막 지역에서 Aqua 위성의 MODIS로부터 16일 주기로 관측된 식생지수(NDVI)의 계절변화 양상을 나타내고 있다. 황사 발원지의 NDVI 값들은 3년의 관측기간 동안 유사한 경향을 나타냈으며 1월부터 7월초까지(DOY 9~185) 약 0.11~0.14의 범위 내에 낮은 분포를 보였다. 이후 7월 중순부터 9월초까지(DOY 201~249) 약 0.19~0.22의 높은 NDVI 값들을 나타내었다. 이는 건조한 고비사막 지역임에도 불구하고 황사 발원지에서 상승된 NDVI 값은 지표면 식생의 성장에 따른 결과로 특히, 8월의 여름철(DOY 217~233) 기간 동안에 현저하게 증가하여 연중 최대치를 나타내었다(그림 6). 반면에 고비사막 식생의 비성장시기인 9월 중순 이후부터는 NDVI가 점진적으로 낮아지는 경향을 보였다. 일반적으로 NDVI 분석 자료는 지표 식생의 계절학적 변화와 공간 분포의 상태를 이해·규명함에 있어 유용한 도구이며(Ryu *et al.*, 2013), 주요 황사 발원지에서 발생하는 황사 예측을 위한 모델의 중요한 매개변수로 활용되고 있다(Lee and Kim 2012; Lee *et al.*, 2012). 이전 연구에 의하면 몽골 고비사막 황사 발원지에서 증가하는 NDVI의 효과는 황사 발생량을 감소시키고 연중 NDVI의 수치가 0.14보다 높게 나타날 경우 황사 발생 빈도를 억제시키는 결과를 나타내었다(Lee *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2010). 그러나 몽골 황사 발원지에서 봄철(DOY 73~153) 시기의 강한 풍속(그림 4), 낮은

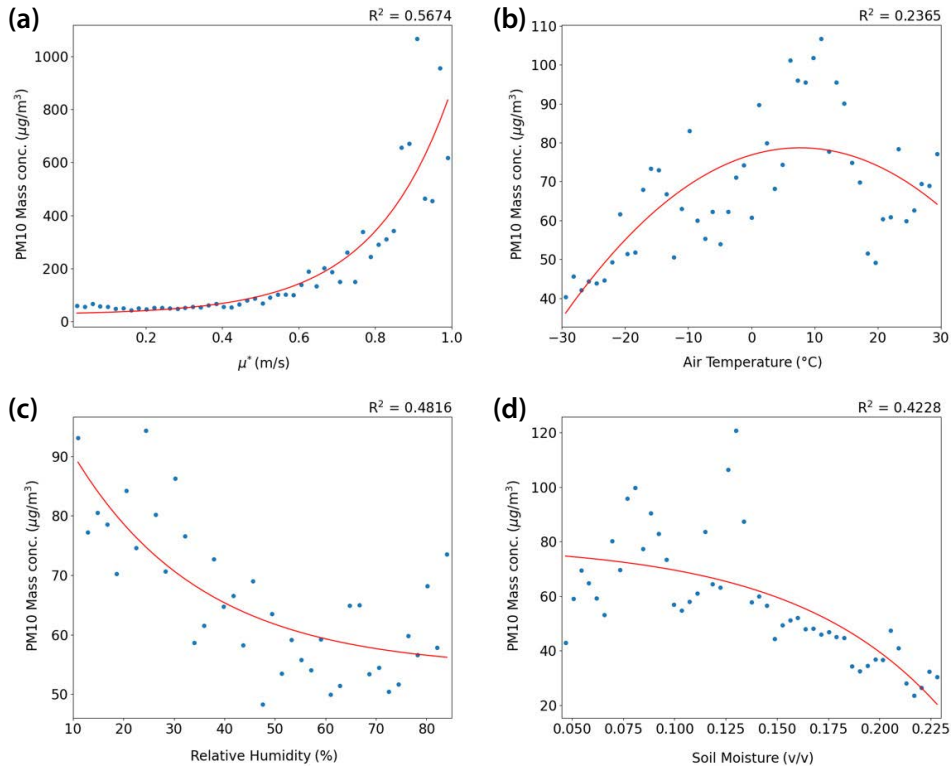
상대습도 및 강수량(그림 5(a), (b))의 분포와 일정한 NDVI 값(그림 6)은 이 시기에 연중 고농도의 황사 발생과 높은 출현 빈도수를 일으키는 주요 원인으로 제시되었다. 몽골 고비사막 지역의 식생 분포의 형태는 주로 키가 낮은 관목과 초지로 구성된 스텝사막(Stepped-Desert) 식생으로 분류된다(Jeong, 2022). 또한 이 건조 지역의 환경적 제한인자인 강수와 온도는 고유의 식생 생장과 분포에 큰 영향을 끼치고 있다(Ryu *et al.*, 2013). 따라서 고비사막 황사 발원지에서 NDVI 값의 연간 변동은 강수량과 온도의 변화와 밀접한 관계를 나타내었다(Lee and Son, 2011). 본 연구에서는 2020~2021년의 여름철(DOY 185~233) 시기에 이전의 2019년도와 비교해서 상대적으로 강수량이 높아 지표 식생의 성장량 및 분포 면적이 향상되어짐에 따라 NDVI의 수치가 높아진 결과로 사료된다.

### 3.3 발원지에서 PM<sub>10</sub> 농도와 기상변수들의 상호관계 분석

그림 7에 황사감시기상탑에서 관측된 자료의 1시간 구간 평균값을 사용하여 PM<sub>10</sub> 농도와 마찰속도, 풍속, 기온, 습도, 토양수분의 상호관계를 2차 회귀방정식으로 나타내었다(Starr and Goldfarb, 2020; Cattaneo *et al.*, 2019).

PM<sub>10</sub> 농도와 기상변수들의 관계 분석 결과 결정계수( $R^2$ ) 값은 마찰속도가 0.57로 가장 높았으며, 그 뒤





**Fig. 7.** Scatter plots of the dust concentration of (a) friction velocity, (b) air temperature, (c) relative humidity, and (d) soil moisture.

로 상대습도 ( $R^2 = 0.48$ ) > 토양수분 ( $R^2 = 0.42$ ) > 온도 ( $R^2 = 0.24$ ) 순으로 분석되었다. 2차 회귀관계식을 사용함으로써 발원지에서  $PM_{10}$  농도의 증가에 영향을 끼치는 주요 기상변수는 마찰속도임을 확인하였고 약 0.33 m/s에서 상호 변화량의 변곡점을 보이고 있으며, 약 0.6 m/s를 초과하면서 고농도의 황사 이벤트가 발생하기 시작하였다. 이 분석 결과는 Park *et al.* (2016)에 의해 기존에 연구된 결과와 잘 일치하였다.

$PM_{10}$  농도 증가의 주요 기상변수인 마찰속도와 다른 기상변수들과의 상호관계를 분석한 결과는 그림 8과 같다. 마찰속도가 증가함에 따라 풍속 ( $R^2 = 0.97$ )은 가장 밀접한 유연관계를 나타냈으며, 온도 ( $R^2 = 0.36$ ) > 토양수분 ( $R^2 = 0.28$ ) > 상대습도 ( $R^2 = 0.12$ ) 순으로 분석되었다. 마찰속도 0.6 m/s 부근까지는 양 (+) 또는 음 (-)의 상관성을 보이고 있었으나 마찰속

도가 0.6 m/s를 초과하는 순간부터 유의미한 상관성을 나타내지 않는 것으로 나타났다.

또한, 황사 발원지에서 상대습도가 감소하는 경향은 역으로 마찰속도를 증가시키는 관계를 보였고, 예상한 상호관계의 임계점을 넘어서 높게 상승하는 마찰속도는  $PM_{10}$  농도의 증가를 나타냈다.

#### 4. 결 론

본 연구는 3년(2019~2021년)의 기간 동안 고비사막 황사 발원지인 몽골 도르노고비 에르덴 지역에 설치되어 있는 20 m 황사감시기상탑으로부터 관측된 데이터를 활용하여 황사 발원지의 지표면 특성 및 미기상학적 요소와의 상관성에 대하여 분석하였다. 중

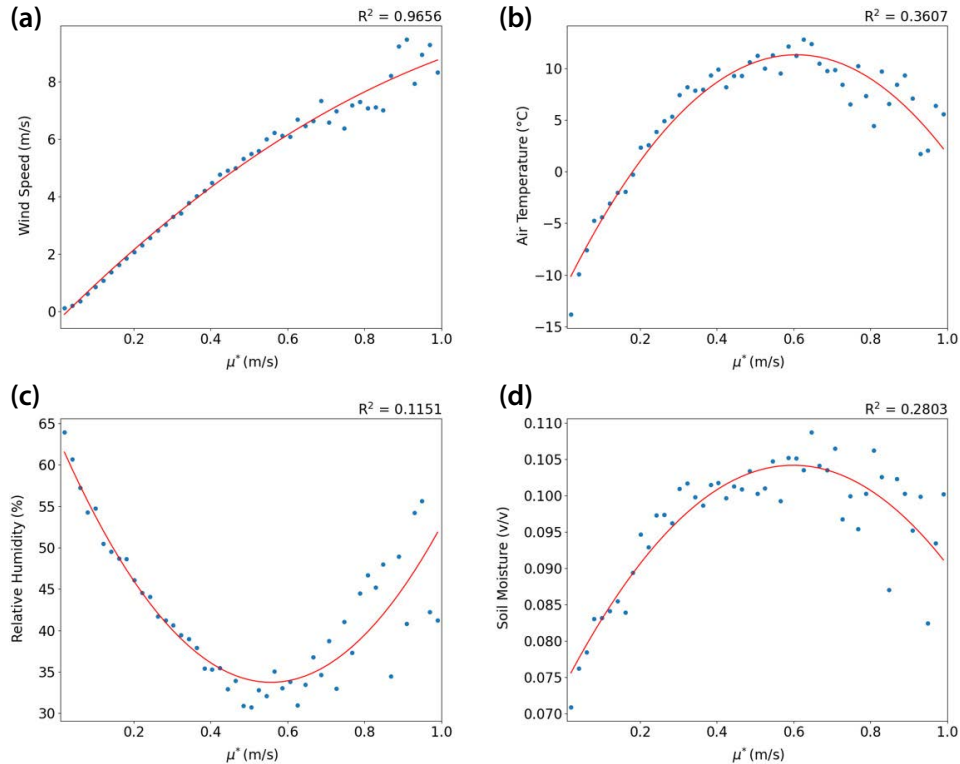


Fig. 8. Scatter plots of the friction velocity of (a) wind speed, (b) air temperature, (c) relative humidity, and (d) soil moisture.

합 황사감시기상탑에는 다양한 기상 측정 센서(온도, 습도, 풍속, 강수량, 태양복사, 토양수분, 토양온도, 초음파풍속계, PM<sub>10</sub> 농도)가 탑재되어 있으며, 모든 데이터는 10분 평균값으로 1년 내내 저장된다. 관측 수집된 자료 분석 결과에 의하면 시간 평균의 황사 PM<sub>10</sub> 농도는 2019년 5월 4일에 약 3,522  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2020년 10월 20일에 약 2,958  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2021년 4월 15일에 약 3,812  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 우리나라의 봄과 가을에 해당하는 계절에 최고 농도 값을 기록하였다. 황사감시기상탑에서 최대 시간 평균 PM<sub>10</sub> 농도가 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 황사 발생 이벤트는 매일 발생하는 것으로 분석되었다.

또한, 황사 발원지의 PM<sub>10</sub> 농도는 지표 식생의 NDVI 값이 0.14 미만인 겨울철부터 초봄까지의 기간 동안 임계마찰속도(0.6 m/s)를 초과하는 풍속의 발생 빈도와 직접적인 관련이 있음을 알 수 있었다. 여름철

의 강우 시기에도 지표 토양수분이 포화 토양수분에 도달하지 못하는 것으로 나타난 이유는 높은 증발률이 원인이 되는 것으로 분석되었다(Park *et al.*, 2010). 이로 인해 고비사막 황사 발원지의 토양수분 함량은 지표면 토양층에 상대적으로 짧은 체류시간으로 인해 PM<sub>10</sub> 농도에 큰 영향을 미칠 수 없는 것으로 나타났다.

임계마찰속도와 사막 식생으로 인한 배출 감소계수를 포함하여 황사 발원지의 PM<sub>10</sub> 농도 추정을 위한 몇 가지 중요한 매개변수는 황사 예측에도 사용되고 있다. 따라서 다년도의 몽골 황사 발원지에서 실시간 측정되고 있는 황사감시기상탑의 관측자료는 황사 예측에서 사용되는 매개변수의 검증에 사용될 수 있다. 황사 발생량을 추정하기 위한 지속적인 관련 변수 분석으로 PM<sub>10</sub> 배출 프로세스의 추가 연구가 진행된다면 정확한 황사 발생량 추정에도 기여할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 ‘황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA 2018-00521)’의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Administration of Land Affairs, Geodesy and Cartography (ALAGC) (2013) Geographic atlas of Mongolia, 62.
- Cattaneo, M.D., Crump, R.K., Farrell, M.H., Feng, Y. (2019) On bin-scatter, arXiv preprint arXiv:1902.09608.
- Choi, G.H., Kim, K.H., Kang, C.H., Lee, J.H. (2003) The influence of the Asian Dust on the Metallic Composition of Fine and Coarse Particle Fractions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(1), 45-56, (in Korean with English abstract).
- Clarke, A.D., Collins, W.G., Rasch, P.J., Kapustin, V.N., Moore, K., Howell, S., Fuelberg, H.E. (2001) Dust and pollution transport on global scale: aerosol measurements and model predictions, *Journal of Geophysical Research*, 106, 32555-3269.
- Grousset, F.E., Ginoux, P., Bory, A., Biscaye, P.E. (2003) Case study of a Chinese dust plume reaching the French Alps, *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1277.
- Han, J.S., Shin, S.A., Kong, B.J., Park, M.S., Park, S.U., Kim, S.J. (2004) Soil chemical properties in Asian dust source region in northern China, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 13(6), 277-284, (in Korean with English abstract).
- Hsu, N.C., Tsay, S.C., King, M.D., Herman, J.G. (2006) Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia, *IEEE Transactions of Geosciences Remote Sensing*, 44, 3180-3195.
- 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., Guymard, C., Mckendry, I., Nickovic, S., Wilson, W.E., Sassen, K., Sugimoto, N., Malm, W.C. (2001) Asian dust events of April 1998, *Journal of Geophysical Research*, 106(16), 18317-18330.
- Jeong, G.Y. (2022) Mineralogical Comparison between Asian Dust and Bedrock in southern Mongolia, *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(4), 397-407.
- Kim, D.-R., Kim, J.-S., Ban, S.-J. (2010) A study on the characteristics of soil in the Asian dust source regions of Mongolia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(6), 606-615, (in Korean with English abstract).
- Lee, E.-H., Son, B.-J. (2011) Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner Mongolia regions and its association with climate and surface condition change, *Atmospheric Environment*, 45, 4611-4616.
- 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 (Korean Meteorological Society)*, 22(2), 245-257, (in Korean with English abstract).
- Lee, J.-J., Kim, C.-H. (2012) Roles of surface wind, NDVI and snow cover in the recent changes in Asian dust storm occurrence frequency, *Atmospheric Environment*, 59, 366-375.
- Lee, S.-S., Lim, Y.-K., Cho, J.H., Lee, H.C., Ryoo, S.-B. (2019) Improved dust emission reduction Factor in the ADAM2 model using real-time MODIS NDVI, *Atmosphere*, 10, 702. <https://doi.org/10.3390/atmos10110702>
- Ma, C.J., Kasahara, R.H., Kamiya, T. (2001) Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period, *Atmospheric Environment*, 35(15), 2707-2717.
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2017) Report of Asian Dust cases in 2016, 20-21.
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2021) Report of Asian Dust cases in 2020, 36-37.
- Park, C.K., Eo, S.M., Ki, W.J., Kim, K.H., Mo, S.Y. (2001) The Influence of Yellow Sand Phenomena on the Concentration Variation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Ambient Air of Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(2), 179-192, (in Korean with English abstract).
- Park, M.-S., Park, S.-U., Chun, Y. (2011) Improved parameterization of dust emission ( $PM_{10}$ ) fluxes by the gradient method using the Naiman tower data at the Horqin desert in China, *Science of The Total Environment*, 412, 265-277.
- Park, S.M., Moon, K.J., Sung, J.S., Kim, H.J., Ahn, J.Y., Kim, J.S. (2012) Chemical Characteristics of Ambient Aerosol during Asian Dust and High PM Episodes at Seoul Intensive Monitoring Site in 2009, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 282-293, (in Korean with English abstract).
- 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.
- Park, S.-U., Joo, S.-J., Lee, I.-H., Ju, J.-W. (2019) The reduction of the global Irradiance due to the Asian dust aerosols ( $PM_{10}$ ) estimated by the observed data in the dust source region of Erdene in Mongolia, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 55, 459-476.
- Park, S.-U., Ju, J.-W., Lee, I.-H., Joo, S.-J. (2016) A parameterization of dust emission ( $PM_{10}$ ) fluxes of dust events observed at Naiman in Inner Mongolia using the monitored tower data, Atmospheric Environment, 140, 420-431.
- Ryu, J.-H., Han, K.-S., Pi, K.-J., Lee, M.-J. (2013) Analysis of land cover change around desert area of East Asia, Korean Journal of Remote Sensing, 29(1), 105-114, (in Korean with English abstract).
- Starr, E., Goldfarb, B. (2020) Binned scatterplots: A simple tool to make research easier and better, Strategic Management Journal, 41(12), 2261-2274.
- VanCurren, R.A. (2004) Asian aerosols in North America: extracting the chemical composition and mass concentration of the Asian continental aerosol plume from long-term aerosol records in the western United States, Journal of Geophysical Research, 108(D20), 4623.

### Authors Information

- 정민재 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)  
(minjaeaa@korea.kr)
- 유희정 (국립기상과학원 기후연구부 연구사)  
(heejuwoo@korea.kr)
- 오상민 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)  
(sangmin80@korea.kr)
- 주승진 ((사) 대기환경모델링센터 센터장)  
(joo.seungjin@gmail.com)
- 부경은 (국립기상과학원 기후연구부 연구관)  
(kyungon@korea.kr)