Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 32, No. 2 (2022) pp. 149-162
https://doi.org/10.14191/Atmos.2022.32.2.149
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연 구 논 문
(Article)

황사장기예측자료를 이용한 봄철 황사 발생 예측 특성 분석

강미선[1)*] · 이우정[1)] · 장필훈[1)] · 김미경[1)] · 부경온[2)]
[1)]국립기상과학원 예보연구부, [2)]국립기상과학원 기후연구부

(접수일: 2022년 5월 3일, 게재확정일: 2022년 6월 2일)

Assessment of Performance on the Asian Dust Generation in Spring Using Hindcast Data in Asian Dust Seasonal Forecasting Model

Misun Kang[1)*], Woojeong Lee[1)], Pil-Hun Chang[1)], Mi-Gyeong Kim[1)], and Kyung-On Boo[2)]
[1)]*Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea*
[2)]*Climate Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo, Korea*

(Manuscript received 3 May 2022; accepted 2 June 2022)

Abstract This study investigated the prediction skill of the Asian dust seasonal forecasting model (GloSea5-ADAM) on the Asian dust and meteorological variables related to the dust generation for the period of 1991~2016. Additionally, we evaluated the prediction skill of those variables depending on the combination of the initial dates in the sub-seasonal scale for the dust source region affecting South Korea. The Asian dust and meteorological variables (10 m wind speed, 1.5 m relative humidity, and 1.5 m air temperature) from GloSea5-ADAM were compared to that from Synoptic observation and European Centre for medium range weather forecasts reanalysis v5, respectively, based on Mean Bias Error (MBE), Root Mean Square Error (RMSE), and Anomaly Correlation Coefficient (ACC) as evaluation criteria. In general, the Asian dust and meteorological variables in the source region showed high ACC in the prediction scale within one month. For all variables, the use of the initial dates closest to the prediction month led to the best performances based on MBE, RMSE, and ACC, and the performances could be improved by adjusting the number of ensembles considering the combination of the initial date. ACC was as high as 0.4 in Spring when using the closest two initial dates. In particular, the GloSea5-ADAM shows the best performance of Asian dust generation with an ACC of 0.60 in the occurrence frequency of Asian dust in March when using the closest initial dates for initial conditions.

Keywords: Asian dust, Subseasonal prediction, GloSea5-ADAM, Hindcast

1. 서 론

토양이 건조하고 식생이 거의 존재하지 않는 지역인 황사 발원지에서 강한 바람에 의해 발생하는 먼지 부유 현상을 황사라고 부른다. 동북아시아의 주요 황사 발원지는 중국 북동부와 몽골 지역으로, 봄부터 초여름까지 강풍에 의해 많은 양의 황사가 발원하여 동북아시아 뿐만 아니라 북미대륙까지 수송되기도 한다(Jaffe et al., 1999; Husar et al., 2001). 특히, 한반도는 황사 발원지의 풍하측에 위치하여 종종 황사 영향을 크게 받는다(Yu et al., 2006; Park et al., 2016). 대기중에 부유하는 황사는 대기질 악화의 중요한 원인 중 하나로(Oh et al., 2015), 지구 열 수지에 영향을 미쳐 기후 변화를 야기할 수 있고(Charlson et al., 1992; Solmon et al., 2008) 식물의 기공을 막거나 광합성 작

*Corresponding Author: Misun Kang, Forecast Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6570, Fax: +82-64-738-6514
E-mail: misun0106@korea.kr

용을 방해하여 식물의 생태계에도 심각한 영향을 초래한다. 또한 정밀기계의 손상 등의 경제적 피해 뿐만 아니라 인체에도 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hong, 2004; Kim et al., 2007). 특히, 인체에 유입된 황사는 호흡기 질환 악화, 폐기능 저하를 초래하고 심한 경우 사망까지 이르게 한다(Min et al., 2001; Kwon et al., 2002; Yoo et al., 2008).

황사를 정확하게 예측하고 피해를 최소화하기 위하여 여러 나라에서는 단·장기적인 관점에서 많은 노력을 하고 있다. 황사 예측에서 단기적 관점의 대표적인 방법은 수치예측모델을 활용하는 것으로 황사의 발원과 이동경로에 대한 약 10일 이내의 예측정보를 생산하는 것이다. 중국기상청에서는 CUACE/Dust (China Meteorological Administration Unified Atmospheric Chemistry Environment-Dust; Gong and Zhang, 2008) 모델을, 일본기상청에서는 MASINGAR (Model of Aerosol Species IN the Global AtmospheRe; Tanaka and Chiba, 2005) 모델을, 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 이용하여 황사 예측정보를 생산하고 있고, 우리나라 기상청에서도 황사예측모델인 ADAM (Asian Dust and Aerosol Model)을 운영하고있다. 여러 나라에서 생산된 황사 예측 정보는 WMO (World Meteorological Organization) SDA-WAS (Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System) 아시아 노드를 통해 인근 국가들과 공유되고 있으며 모델 예측 성능을 향상시키기 위한 공동연구도 진행 중에 있다(SDS-WAS ASIAN-RC, 2022).

장기적 관점의 황사 예측은 계절내 황사 활동(황사 농도 또는 빈도) 예측을 중심으로 이루어져 왔고, 주로 회귀 모델을 이용하여 계절내 황사 예측 가능성을 제시하였다(Lang, 2008; Sohn, 2013; Pu et al., 2019). 수치예측모델을 활용한 연구도 진행되어 왔지만 대부분 대기 모델에서 황사와 기상장간의 상호작용 연구에 초점이 맞춰져 왔다(Benedetti and Vitart, 2018; Rémy et al., 2019). Benedetti and Vitart (2018) 연구에서는 ECMWF EPS (Ensemble Prediction System)를 이용하여 모델예측에 대한 에어로졸의 영향에 대하여 조사하였고 1개월 규모에서 황사 예측의 가능성을 보여주었다. 최근 Kramer and Kirtman (2021)의 연구에서는 CCSM4 (Community Climate System Model version4)의 과거 모의 자료(45일 예보)를 이용하여 계절내 예측과 황사수송효율(dust transport efficiency)을 평가하였고, 바람 변동성이 높을 때 황사수송효율에 의한 먼지 예측 가능성이 높아지는 것을 제시하였다. Maki et al. (2020)은 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 모델 중 하나인 MRI-ESM2.0 (Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0)을 이용하여 황사의 장기예측에 관한 연구를 수행하였다. 또한, Ryoo et al. (2020)은 동아시아 지역의 황사 장기 예측을 목적으로 기상청 기후예측시스템(Global Seasonal Forecast System version 5, 이하 GloSea5)에 ADAM의 황사발원 알고리즘을 적용하여 황사장기예측모델(이하 GloSea5-ADAM)을 개발하였고, 2017년부터 2019년까지의 황사예측결과를 중국과 한국에서 관측된 PM_{10} 농도와 비교하여 동북아시아지역에서의 봄철 황사 예측 가능성을 보여주었다.

GloSea5-ADAM에서 황사 발원은 발원지에서의 황사 발원과 밀접하게 관련된 주요 기상변수(지상 풍속, 상대습도, 기온 등)에 의해 결정되기 때문에 모델의 황사 예측성능을 높이기 위해서는 이에 대한 예측 특성 분석이 필요하다. 본 연구에서는 GloSea5-ADAM의 과거기후 모의자료(1991~2016년)를 이용하여 황사 발원지에서의 지상 풍속, 상대습도, 기온과 황사에 대한 예측 특성을 살펴보고자 하였다. 더불어, 과거기후 모의자료의 앙상블 초기장 조합에 의한 모델의 예측 성능을 함께 살펴보았다. 제 2장에서는 GloSea5-ADAM과 연구에 사용된 자료를 설명하였고, 제 3장에서는 GloSea5-ADAM에서의 황사 발원 조건 및 황사 발생 빈도를 평가하여 그 결과를 제시하였다. 제 4장에서는 황사장기예측에 GloSea5-ADAM의 활용 가능성과 본 연구의 한계에 대해 논의 하였고, 마지막으로 결론을 제 5장에 제시하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 황사계절예측모델 및 과거기후 모의자료

본 연구에서 사용하는 GloSea5-ADAM은 GloSea5에 ADAM의 동북아시아 황사 발원지의 토양 유형 정보와 황사 발원 알고리즘을 적용한 장기예측 시스템이다(Ryoo et al., 2020). GloSea5는 대기, 해양, 해빙, 지면 모형이 커플러(Ocean Atmosphere Sea Ice Soil 3)를 통해 구성된 결합모델로, 이 중 대기 모델(Met Office Unified Model version 8.6)은 약 56 km의 수평해상도를 가지며 85개 층으로 구성되어 있다. GloSea5-ADAM에 적용된 동북아시아의 주요 황사 발원지는 중국 북부와 몽골지역으로 이 지역의 토양은 5가지 유형(고비, 모래, 황토, 혼합, 티벳)으로 구분된다(Park et al., 2010). GloSea5-ADAM에서 황사 발생은 발원지에서의 풍속, 상대습도, 지표면온도, 강수량에 의해 결정되고 2 구간의 입자 직경(중심지름 2, 8 μm)을 고려하여 계산되며, 황사 농도(D)는 식(1)을 통해 산정된다.

Table 1. Experimental designs.

	Initial date for		
	March	April	May
EXP1	02/01, 02/09, 02/17	03/01, 03/09, 03/17	04/01, 04/09, 04/17
EXP2	02/09, 02/17, 02/25	03/09, 03/17, 03/25	04/09, 04/17, 04/25
EXP3	02/17, 02/25, 03/01	03/17, 03/25, 04/01	04/17, 04/25, 05/01
EXP4	02/25, 03/01	03/25, 04/01	04/25, 05/01
EXP5	03/01	04/01	05/01

$$D = \Sigma_{i=1}^{n}(1 - fR) \times \alpha \times u_*^4,$$
$$\text{if } WS_{10} \geq WS_{10t} \text{ and } RH_{1.5} \leq RH_{1.5t} \quad (1)$$

여기에서 f와 R은 각각 식생 비율과 식생에 의한 황사 발생 억제 지수를 의미하고 α는 민감도 실험을 통해 경험적으로 얻어진 값으로 상수이며 u_*는 지표면 마찰 속도를 의미한다. WS_{10}과 $RH_{1.5}$는 각각 10 m 풍속과 1.5 m 상대습도를 의미하고 발원지에서의 10 m 풍속과 1.5 m 상대습도 임계(WS_{10t}, $RH_{1.5t}$) 조건으로 황사의 발생 조건을 진단하여 황사 농도를 산정한다 (Park and In, 2003). GloSea5-ADAM에서 WS_{10}과 $RH_{1.5}$ 자료는 GloSea5에서 산출된 자료를 이용한다.

GloSea5-ADAM의 과거기후 모의자료는 1991년부터 2016년까지 26년의 기간으로 월별 1일, 9일, 17일, 25일에 초기화되어 각 3개의 앙상블 멤버에 대하여 약 8개월(245일)의 예측 기간을 가진다. 본 연구에서는 GloSea5-ADAM의 봄철(3~5월) 황사와 기상 예측 특성을 살펴보기 위해 과거기후 모의자료를 바탕으로 황사예측농도와 황사 발원에 사용되는 기상 변수인 10 m 풍속, 1.5 m 상대습도, 1.5 m 기온에 대한 예측 성능을 평가하였다. 평가에 사용된 앙상블 초기시간은 3, 4, 5월에 대해 1개월의 예측 선행시간을 갖도록 설정되었다. EXP1은 예측 월에 상대적으로 먼 초기장이 포함된 이른 초기장 실험이고 EXP3은 예측 월에 상대적으로 가까운 초기장이 포함된 늦은 초기장 실험이며 EXP2는 EXP1과 EXP3의 중간 날짜의 초기장이 포함된 실험이다. 본 연구에서는 EXP1~EXP3을 비교함으로써 앙상블 초기 시간에 따른 기상 변수의 예측 성능을 조사하고자 하였다. 더불어, 앙상블 초기시간 개수(각 1~3개)에 따른 예측 특성을 비교하고자 (EXP3~EXP5 비교) 예측 월과 가장 가까운 초기장이 각각 2개 및 1개 포함된 경우(EXP4, EXP5)를 EXP3 (초기장 3개 이용)의 결과와 비교하였다. Table 1에는 본 연구의 각 실험(EXP1~EXP5)에서 사용한 앙상블 초기시간을 자세하게 나타내었다.

2.2 관측 자료 및 평가방법

본 연구의 분석 영역은 우리나라에 영향을 주는 주요 황사 발원지인 고비사막 및 내몽골을 포함한 지역 (35~44°N, 90~115°E)으로 정하였다(Fig. 1). GloSea5-ADAM에서 예측된 각 기상 변수의 공간 분포와 발생빈도를 평가하기 위해서 ERA5 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts Reanalysis v5)의 10 m 풍속, 1.5 m 기온, 1000 hPa 상대습도 자료를 이용하였다. ERA5 자료는 약 0.25° × 0.25°의 수평 격자 해상도와 3시간의 시간 해상도를 가진다. 본 연구에서는 모델과의 비교를 위해 6시간 간격의 자료를 사용하였고 GloSea5의 수평 해상도로 선형 내삽 후 분석하였다.

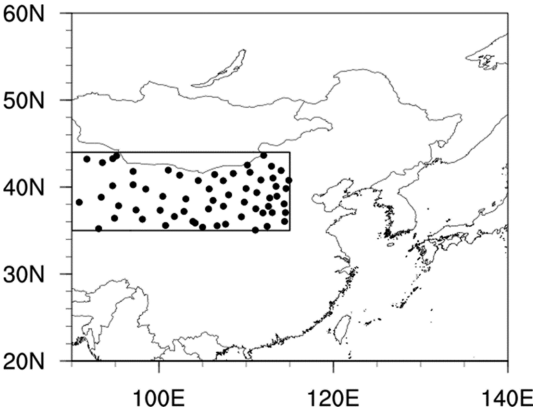

Fig. 1. Analysis area of Asian dust seasonal forecasting model. Open square indicates source regions of Asian dust in East Asia, and 62 black filled circles indicate locations of synoptic observation sites.

GloSea5-ADAM에서 예측된 황사 농도의 경우, 검증에 활용할 수 있는 장기간의 황사 농도 관측자료가 존재하지 않기 때문에 황사발생빈도로 변환 후 GTS (Global Telecommunication System)를 통해 보고되는 육상 종관기상실황 전문자료(Synoptic observation, 이하 SYNOP)와 비교하였다. 모델에서 황사 발원지의 황사 발생빈도 기준을 정의하기 위해 모델 황사 농도를 100 μg m^{-3}에서 800 μg m^{-3}까지 100 μg m^{-3} 간격으로 변화시켜 황사 발생빈도를 산정하였고, 그 발생

빈도와 관측 빈도의 상관관계가 가장 높은 농도인 500 μg m^{-3}를 황사 발생 임계값으로 정의하였다. 관측 지점별 황사발생빈도는 황사와 관련된 현재 일기현상 코드(#7-9, 30-35, 98; WMO code TABLE 4677)가 기록된 빈도로 정의하였고, 각 관측소의 황사발생빈도를 계산한 후 황사 발원지의 황사발생빈도를 산정하였다. 또한, 관측 황사발생빈도와 기상변수간의 상관관계를 분석하기 위해 황사 발생이 관측된 지점의 풍속, 상대습도를 이용하였다. SYNOP 기간은 1996년부터 2016년까지로 분석 기간 동안 결측률이 10% 이하인 62개 지점에서의 낮 시간(0000, 0600 UTC) 자료 이용하였다(Fig. 1 참고).

예측성 평가에는 평균편향오차(Mean Bias Error, 이하 MBE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, 이하 RMSE)와 편차상관계수(Anomaly Correlation Coefficient, 이하 ACC)의 검증 지수를 이용하였다. MBE와 RMSE는 예측 값과 관측 값의 차이를 나타내는 척도로 0에 가까울수록 예측 값과 관측 값의 수치가 서로 유사하다고 평가된다. ACC는 모델과 관측의 평년 편차 사이의 상관계수를 나타낸 것으로 –1에서 1 사이의 값을 가지고 1에 가까울수록 모델이 관측의 변동성을 잘 모의한다는 것을 의미한다. MBE, RMSE, ACC는 각각 식(2), 식(3), 식(4)을 통해 계산하였다.

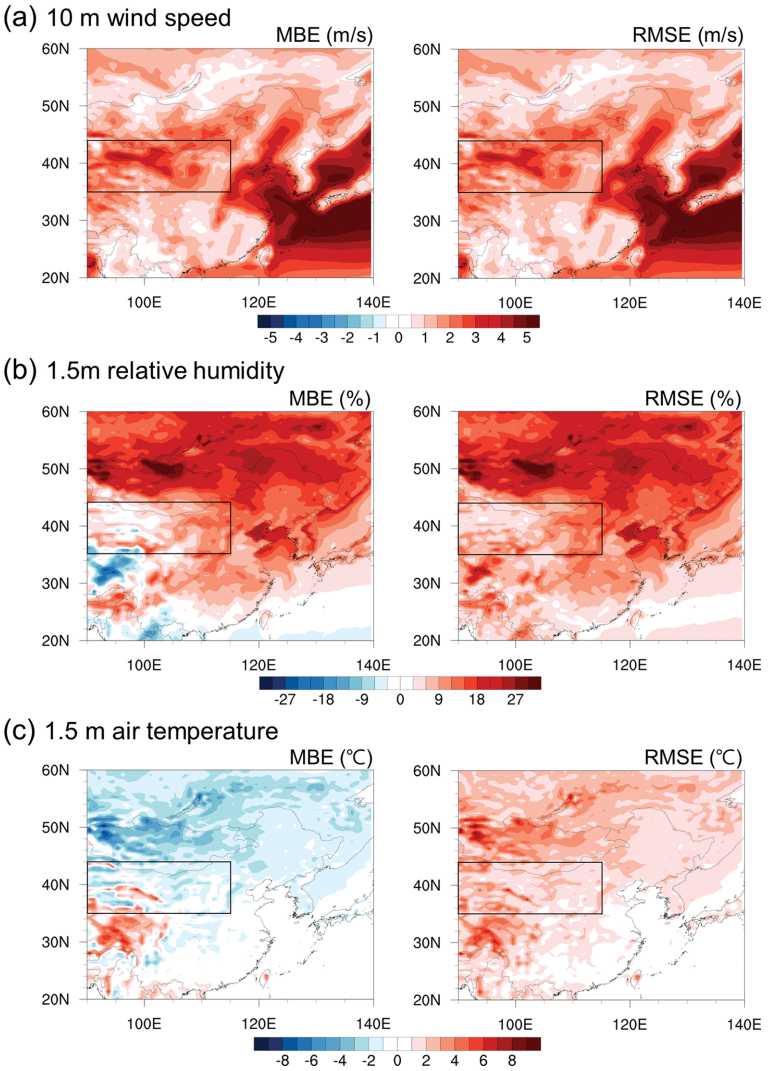

Fig. 2. Horizontal distributions of mean bias error (MBE; left) and root mean square error (RMSE; right) of (a) 10 m wind speed, (b) 1.5 m relative humidity, and (c) 1.5 m air temperature in Spring (MAM) during 1991~2016 of EXP3.

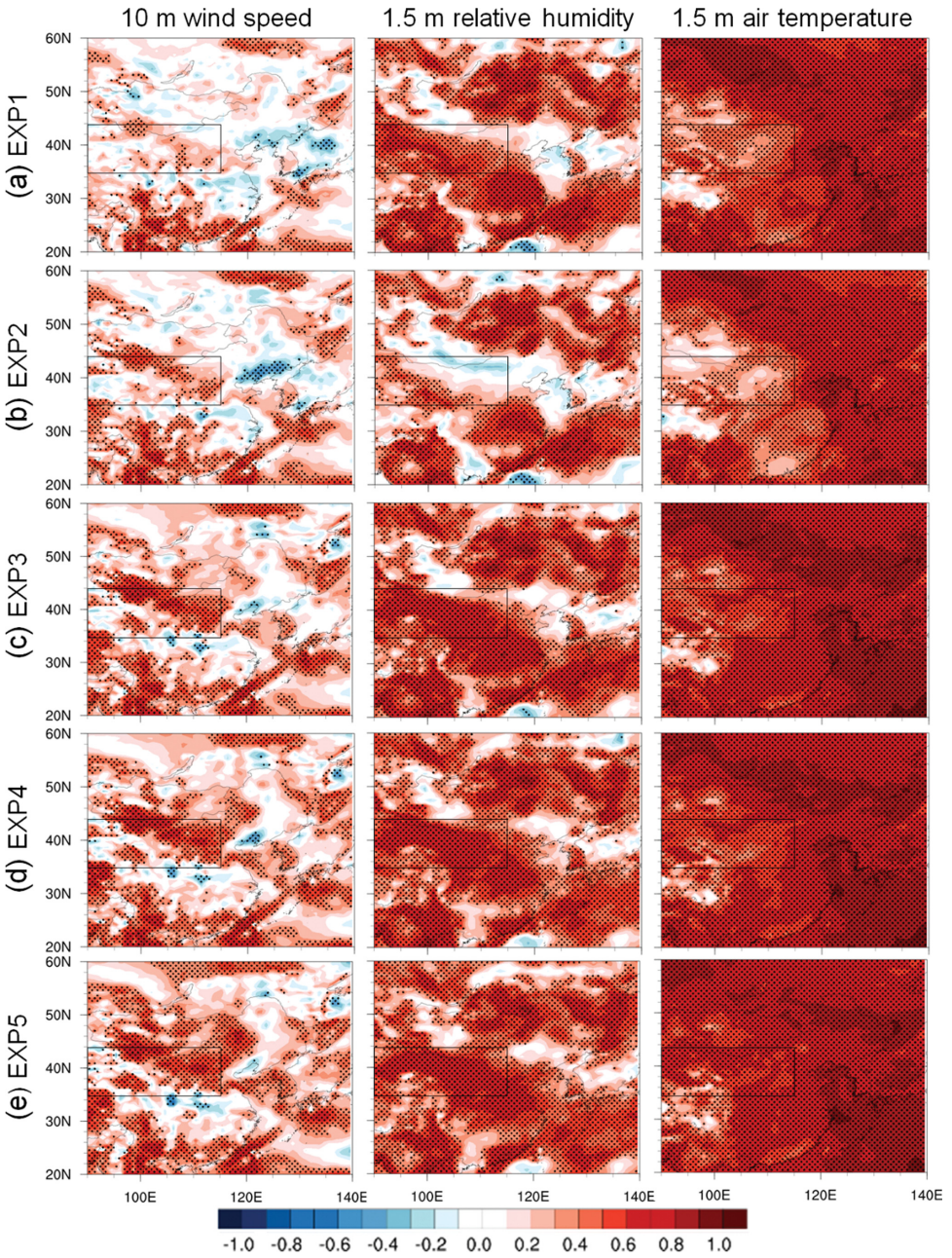

Fig. 3. Horizontal distributions of anomaly correlation coefficient (ACC) of 10 m wind speed (left), 1.5 m relative humidity (middle), and 1.5 m air temperature (right) in Spring (MAM) during 1991~2016 for different initial times: (a) EXP1, (b) EXP2, (c) EXP3, (d) EXP4, and (e) EXP5. Dotted area indicates statistically significant values at the 95% confidence level.

$$\mathrm{MBE} = \frac{1}{n}\Sigma_{i=1}^{N}(f_i - o_i) \tag{2}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^{N}(f_i - o_i)^2} \tag{3}$$

$$\mathrm{ACC} = \frac{\Sigma_{i=1}^{N}(f_i - \bar{f})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\Sigma_{i=1}^{N}(f_i - \bar{f})^2}\sqrt{\Sigma_{i=1}^{N}(o_i - \bar{o})^2}} \tag{4}$$

여기에서 N은 분석 기간(1991~2016년)인 26이고, i는

1991년부터 2016까지의 각 연도를 의미한다(i = 1~26). f_i와 o_i는 각각 i번째 연도의 예측값과 관측값을 의미하고 $\bar{f}$와 $\bar{o}$는 전체 분석 기간에 대한 각 예측 요소(f_i)의 평균과 관측 요소(o_i)의 평균을 의미한다.

3. 결 과

3.1 봄철 황사 발생 관련 기상변수 예측성능 평가

황사발생빈도의 예측성을 평가하기 앞서 봄철(3~5월) 황사 발생과 관련한 기상변수의 모의 특성을 살펴보고자 10 m 풍속, 1.5 m 상대습도, 1.5 m 기온에 대한 MBE와 RMSE의 공간 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 별(EXP1~5) MBE와 RMSE의 공간 분포 차이는 작으므로 여기에서는 대표적으로 EXP3의 봄철 평균 결과만 제시하였다. 봄철 풍속은 전반적으로 양의 편차를 보이는데, 황사 발원지(35~44°N, 90~115°E; Fig. 2 Box 영역)의 경우 MBE는 약 2~3 m s^{-1}로 분석장에 비해 풍속을 다소 높게 모의하는 것을 볼 수 있다(Fig. 2a). 상대습도는 위도 30°N 이상에서 전반적으로 과대모의 경향을 보였지만, 황사 발원지 영역에 대해서는 상대적으로 작은 MBE(약 7.5%)와 RMSE(약 10%)를 보였다(Fig. 2b). 기온의 경우 일부 지역을 제외하고 대체로 음의 편차를 보였으며, 황사 발원지 영역에서는 MBE와 RMSE 모두 상대적으로 작은 오차를 보였다(Fig. 2c).

Figure 3에는 각 기상 변수에 대한 ACC 공간 분포를 실험별로 나타내었고, 그림에서 검정 점(dot)은 예측성 변수가 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 지역을 나타낸다. 우선, 봄철 풍속의 ACC는 황사 발원지와 30°N 이하 지역에서 0.4 이상의 통계적으로 유의한 예측 성능을 보였다. 특히, 앙상블 초기 예측 시간이 예측 월에 가까워 질수록(EXP1 → EXP3) 황사 발원지의 내몽골 고원에서 양의 상관이 강해(0.4 → 0.7)지고 그 영역이 넓어졌다. 상대습도의 경우, 몽골

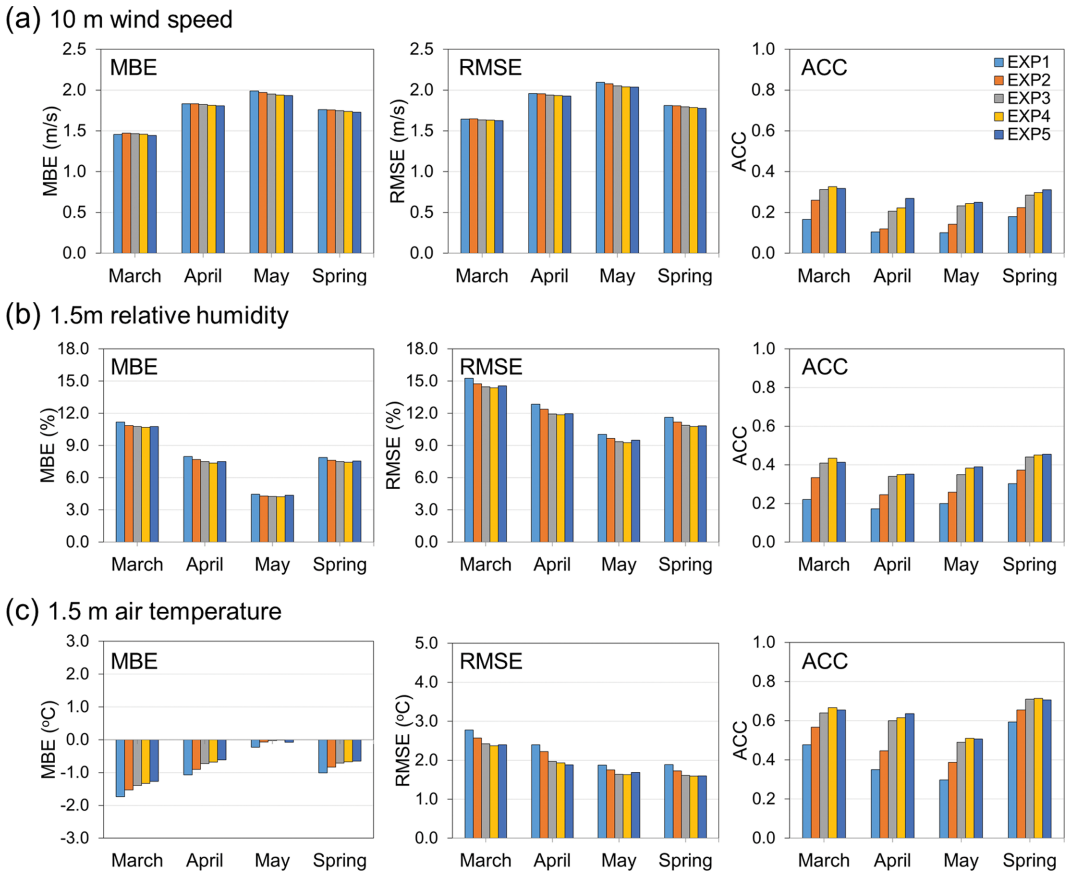

Fig. 4. MBE (left), RMSE (middle), and ACC (right) of (a) 10 m wind speed, (b) 1.5 m relative humidity, and (c) 1.5 m air temperature in Asian dust source region (see open square in Fig. 1) during 1991~2016 for different initial times. The bars of blue, orange, gray, yellow, and dark blue indicate for EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, and EXP5, respectively.

및 중국 북동부 일부 지역을 제외하고 황사 발원지를 포함한 대부분 영역에서 높은 양의 상관을 보였다. 특히, 늦은 초기장을 사용하는 EXP3에서는 황사 발원지 중 내몽골 지역 ACC가 0.7 이상으로 나타났고 모든 실험 중 ACC가 0.7 이상인 영역이 가장 넓게 나타났다. 봄철 기온은 대부분 지역에서 0.4 이상의 통계적으로 유의한 ACC를 보였고, 다른 변수와 유사하게 EXP3에서 높은 값을 나타내었다. 반면에 모든 변수에서 앙상블 초기시간 자료 수 실험(EXP3~EXP5)에 따른 결과 차이는 크게 나타나지 않았다.

계속해서 월별(3월, 4월, 5월, 봄철) 예측성을 살펴보고자 실험 별 황사발원지(35~44°N, 90~115°E)에서의 10 m 풍속, 1.5 m 상대습도, 1.5 m 기온의 MBE, RMSE, ACC를 살펴보았다(Fig. 4). 여기서 각 변수 별 MBE, RMSE, ACC 값은 실험 별 황사 발원지에 대하여 평균한 값이다. 모든 실험에서 풍속의 MBE와 RMSE는 3월에, 상대습도와 기온은 5월에 가장 작은 오차를 보였다. ACC는 세 변수 모두 3월에 가장 높은 정확도를 보였다.

풍속의 MBE와 RMSE는 EXP1~EXP3에서 거의 유사하게 나타났다. 반면, ACC의 경우 늦은 초기장을 사용한 실험(EXP3)에서 상대적으로 정확도가 향상되었다. 상대습도와 기온은 EXP3에서 모든 검증 지수의 예측 성능이 가장 높게 나타났고, 이러한 결과는 ACC의 결과에서 두드러지게 나타났다. 전반적으로 예측 시간에 가까운 초기장을 사용했을 때 황사 발원과 관련된 기상 변수의 예측 성능은 상대적으로 높게 나타났고 관측의 변동성을 잘 모의하였다. 앙상블 초기

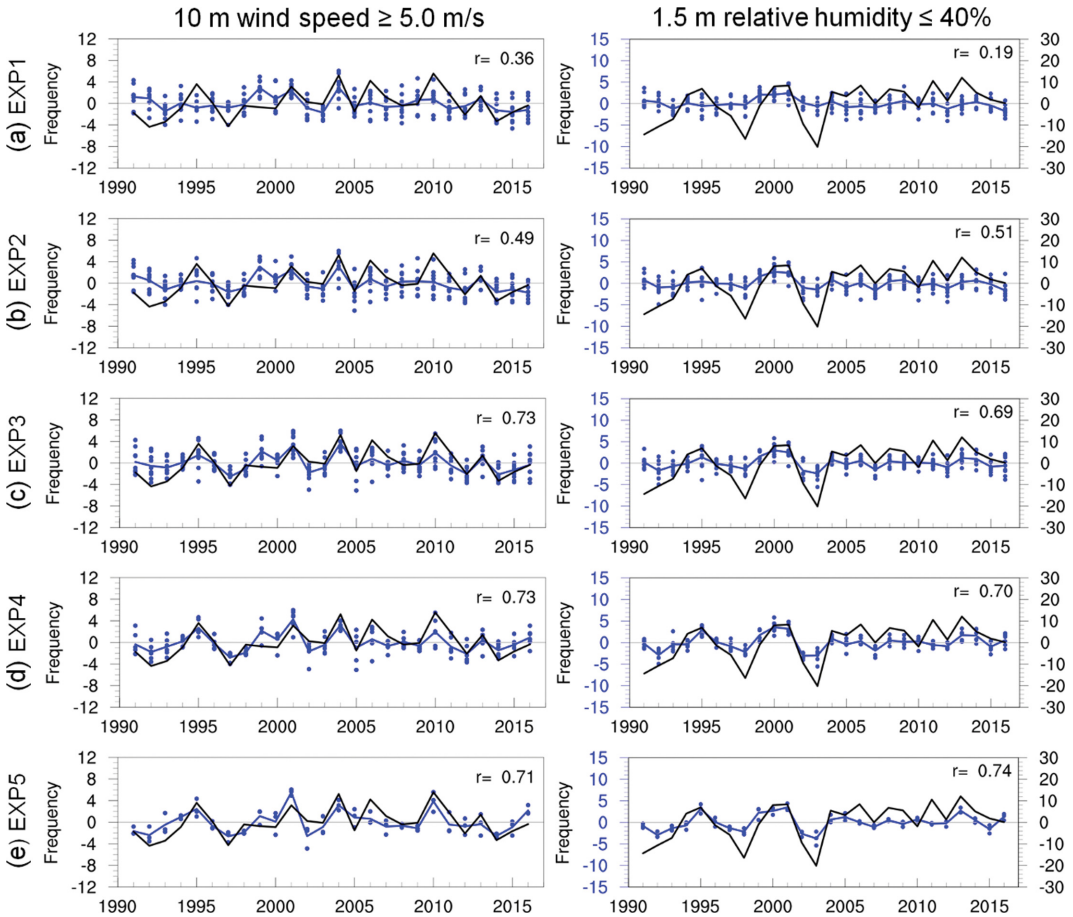

Fig. 5. Time series of frequency anomalies of 10 m wind speed (left) and 1.5 m relative humidity (right) averaged over the source region of Asian dust (see open square in Fig. 1) during Spring (1991~2016) depending on different initial times: (a) EXP1, (b) EXP2, (c) EXP3, (d) EXP4, and (e) EXP5. The blue filled circles indicate GloSea5 ensemble members, and the blue and black line indicate mean of GloSea5 ensemble and ERA5, respectively. Threshold of 10 m wind speed and 1.5 m relative humidity in Spring set to 5.0 m s^{-1} and 40%, respectively.

시간 수 조합에 따른 실험(EXP3~5)에서는 세 변수 모두 MBE, RMSE의 값이 유사하게 나타났다. ACC의 결과는 세 변수 모두 월별로 상이한 결과를 보였으나 대체로 예측 시간과 가장 가까운 1~2개 날짜(EXP4, EXP5)를 이용했을 때 좋은 결과를 보였다. 특히, 상대습도와 기온의 ACC는 3월에 EXP4에서 각각 0.4와 0.6 이상으로 비교적 높은 상관성을 보였다.

3.2 황사 발생 조건 및 황사 발생빈도 평가

황사장기예측모델에서 황사 농도는 황사 발원지에서 10 m 풍속과 1.5 m 상대습도 임계값으로 황사 발생 조건을 진단한 후 산정하고있다[식(1) 참고]. GloSea5-ADAM가 황사발원지에서 황사 발생 조건을 어떻게 모의하는지 알아보기 위해 각 임계값을 충족하는 풍속과 상대습도 발생 빈도를 평가하였고 봄철에 대한 연 변동성을 Fig. 5에 나타내었다. Figure 5에서 파란 점은 GloSea5 앙상블 멤버를, 파란 선은 앙상블 평균을 나타내고, 검정 선은 ERA5 평균을 나타낸다. 또한, 모든 실험의 월별 및 봄철 평균 상관관계를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 각 요소의 임계값 기준은 GloSea5-ADAM에서 사용하고 있는 월별 최소 임계값으로, 월별 풍속 임계값 기준은 6.0 m s^{-1} (3월), 5.5 m s^{-1} (4월), 5.0 m s^{-1} (5월, 봄철)이고, 월별 상대습도 임계값 기준은 60% (3월), 40% (4~5월, 봄철)이다.

봄철 임계값을 넘는 풍속의 발생빈도 시계열에서 ERA5 평균은 GloSea5-ADAM 앙상블 멤버 내에 위치하며 EXP1에서 0.36이었던 상관관계가 EXP3에서 0.73까지 높아지는 결과를 보였다(Left of Figs. 5a-c). 상대습도 발생빈도의 경우, ERA5 평균이 GloSea5-ADAM 앙상블 멤버 내에 존재하지 않고 값에 다소 차이는 있지만 모델은 관측의 변동성을 잘 모의하고 있다. 특히, 늦은 초기장 실험인 EXP3에서 높은 예측성(ACC = 0.69)을 보였다(Right of Fig. 5c). 그러나 앙상블 초기 시간 자료 수에 따른 실험(EXP3~5) 결과에서는 두 변수 모두 실험 별 큰 차이를 보이지 않았다(Figs. 5c-e).

Figure 6의 월별 비교 결과에서 풍속은 3월에, 상대습도는 5월에 좋은 성능을 보였고, Fig. 5의 봄철 결과와 마찬가지로 두 변수 모두 늦은 초기장 실험인 EXP3에서 높은 상관을 보였다. 특히, EXP1과 EXP3 간의 상관관계 차이가 크게 나타나는 경우가 보였다. 예를 들어, 5월 풍속의 경우에는 EXP1에서 음의 상관을 보였지만 EXP3에서는 0.56의 높은 상관관계를 보였고, 3월 상대습도도 음의 상관에서 EXP3에서는 0.48로 높아지는 결과를 보였다. 앙상블 초기 시간 자료 수에 대한 영향(EXP3~5)은 각 월별로 상이하게 나타났으나 풍속은 봄철에 앙상블 초기 시간 자료 수가 2~3개인 EXP4와 EXP3에서 상관관계가 0.73으로 높게 나타났고, 상대습도는 전반적으로 앙상블 초기시간 자료가 가장 적은 EXP5에서 높은 상관관계를 보였다.

황사 발원지에서의 황사 발원을 평가하기 위해 GloSea5-ADAM과 SYNOP에서 산정된 황사발생빈도를 비교하였다(Figs. 7, 8). Figure 7에는 3월에 발생한 황사발생빈도의 연 변동성을 나타내었고, 모든 실험의 각 예측 월에 대한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 모델에서 황사 발원지의 황사발생빈도의 임계값은 500 μg m^{-3}이다. 3월 관측 황사 발생빈도의 평균은 GloSea5-ADAM 앙상블 멤버 내에 위치하고 앙상블 평균의 변동성을 잘 모의하는 것을 볼 수 있다(Fig. 7). EXP1에서 상관관계는 0.44로 나타났고 EXP3에서 0.65까지 향상된 것을 볼 수 있다. 월별 결과를 살펴보면, 3월에 상관관계가 가장 높게 나타났고 4월과 5월로 갈수록 상관관계가 상대적으로 낮아지는 경향을 보였다. 실험 별로 살펴보면, 3월에는 예측시간과 가까운 3개의 초기시간 자료를 사용했을 때 상관관계가 0.65로 가장 높았고, 4월과 5월에는 각각 1개와 2개를 사용

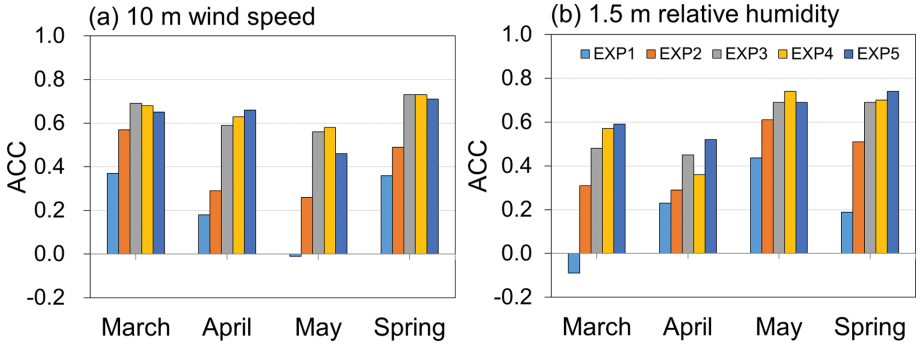

Fig. 6. ACC of frequency of (a) 10 m wind speed, (b) 1.5 m relative humidity averaged over the source region of Asian dust according to different initial times. The bars of blue, orange, gray, yellow, and dark blue indicate for EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, and EXP5, respectively.

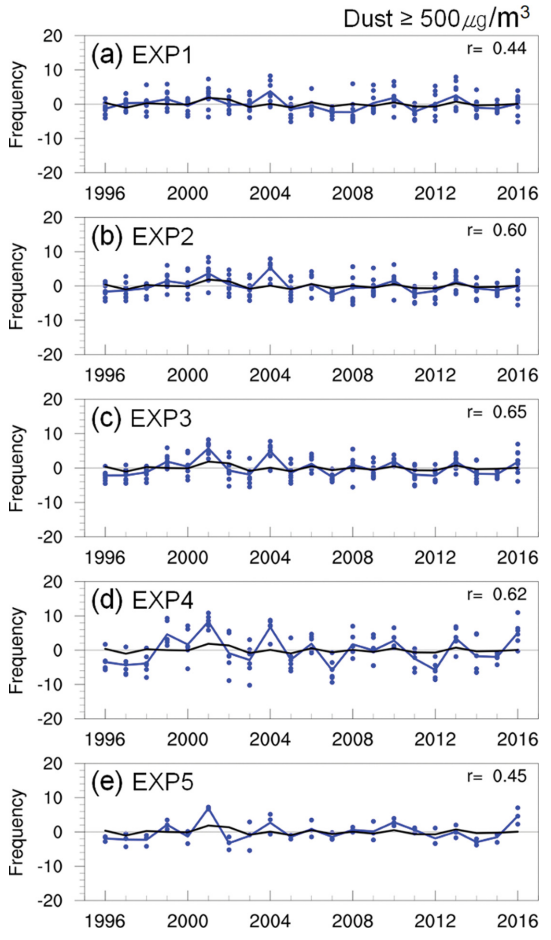

Fig. 7. Time series of frequency anomalies of Asian dust averaged over the source region of Asian dust in March (1996~2016) depending on different initial times: (a) EXP1, (b) EXP2, (c) EXP3, (d) EXP4, and (e) EXP5. The blue filled circles indicate GloSea5 ensemble members, and the blue and black line indicate mean of GloSea5 ensemble and SYNOP, respectively. Threshold was set to 500 μg m^{-3}.

했을 때 상관관계가 각각 0.45 및 0.39으로 가장 높게 나타났다(Fig. 8).

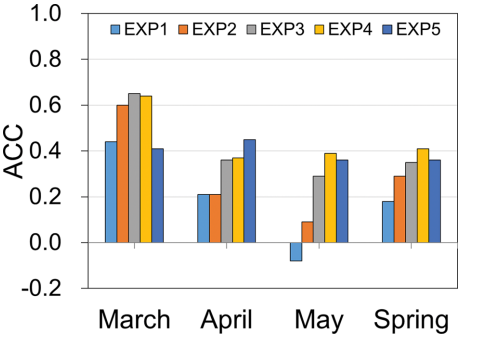

Fig. 8. ACC of frequency of Asian dust over source region of Asian dust according to different initial times. The bars of blue, orange, gray, yellow, and dark blue indicate for EXP1, EXP2, EXP3, EXP4, and EXP5, respectively.

3.3 황사 발생 조건 및 황사 발생과의 상관성

GloSea5-ADAM에서 황사 발원에 영향을 미치는 기상 요소와 황사 발생과의 관계를 분석하고 이를 관측 특성과 비교하기 위해, 풍속 발생빈도와 상대습도 발생빈도를 산정하여 황사발생빈도와의 상관관계를 분석하였다(Fig. 9, Table 2). 풍속과 상대습도 임계값은 각각 강풍 기준인 7.5 m s^{-1} (Lee and Kim, 2008)와 모델 내 상대습도 최저 임계값인 40%로 정하였다. 모델 결과는 황사 발생 조건 및 황사 발생빈도 평가에서 상대적으로 상관이 높게 나타난 EXP3의 결과를 사용하였고 관측 기간(1996~2016년)에 맞춰 분석하였다.

Figure 9는 각 월별 관측과 모델에서의 상관관계를 공간 분포로 나타낸 것이다. 먼저, 관측에서의 풍속과 황사 발생빈도간의 상관관계는 3~5월 모두 대부분의 지역에서 비교적 높게 나타났고 특히 황사 발원지 우측의 내몽골 고원에서는 0.6 이상의 높은 값을 보였다. 이는 지표 풍속과 황사 발생 간에 양의 상관관계가 있다고 제시한 여러 선행연구의 결과와 잘 일치한다(Park and In, 2003; Wang et al., 2003; Lee and Kim, 2008). 모델의 결과에서도 황사 발원지에서 강한 양의 상관계수가 나타났고, 월별로 비교했을 때에는 3월에 가장 높은 양의 상관을 보였다.

Table 2. ACC for annual variability in frequency between Asian dust and 10 m wind speed, and 1.5 m relative humidity averaged over the source region of Asian dust during 1996~2016 in EXP3.

	Wind speed		Relative humidity	
	Observation	GloSea5	Observation	GloSea5
March	0.84	0.96	0.33	0.74
April	0.62	0.92	–0.19	0.79
May	0.68	0.87	0.52	0.60

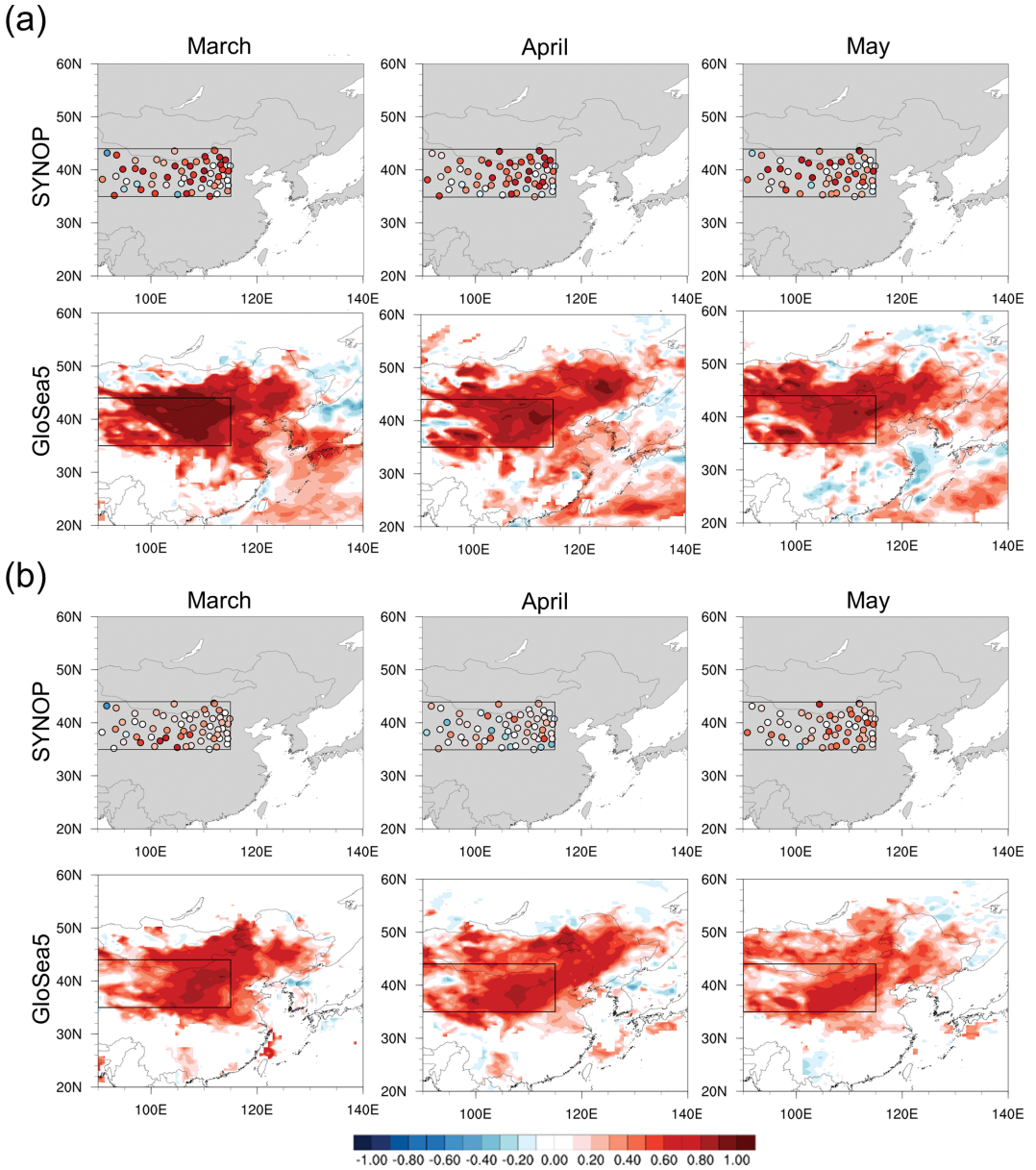

Fig. 9. Horizontal distributions of ACC of frequency between Asian dust and (a) 10 m wind speed, and (b) 1.5 m relative humidity from March to May during 1996~2016 in EXP3. Open square indicates source regions of Asian dust in East Asia, and circles in SYNOP indicate locations of synoptic observation sites.

그러나 관측에서는 토지 피복이 도시와 농경지인 일부지점에서 음의 상관관계를 보였는데 모델은 토지 피복 등에 의한 국지적인 반응을 완전히 고려하지는 못하는 것으로 보인다(Fig. 9a). 상대습도와 황사 발생빈도간의 상관관계에서 관측은 대체로 양의 상관이 우세하고 3월과 5월에 비해 4월은 상관이 다소 낮은 것으로 나타났다. 모델의 결과도 양의 상관을 보였지만 관측에 비해 상관성이 더 높게 나타났고, 관측과 달리 3월에서 5월로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 9b). 관측과 모델 모두 상대습도보다 풍속에서 황사발생과의 상관성이 더 높게 나타났고 3월에 강한 수치를 나타냈는데, 이는 황사 발생이 상대

습도보다는 풍속에 대한 의존성이 상대적으로 높다는 것을 의미한다.

각 월별 관측과 모델에서의 풍속과 황사 발생빈도의 연변동성에 대한 상관관계와 상대습도와 황사 발생빈도의 연변동성에 대한 상관관계를 Table 2에 나타내었다. 전반적으로 관측과 모델 결과 모두 풍속과의 상관성이 상대습도와의 상관보다 뚜렷한 것으로 나타났다. 먼저, 풍속과 황사 발생빈도에 대한 결과에서 관측과 모델 모두 상관관계가 3월에 가장 높았고 5월에 상대적으로 낮은 상관을 보이는 경향이 나타났다. 상대습도와의 상관관계에서, 관측은 3월과 5월에 대체로 약한 양의 상관관계를 보이고 4월에는 음의 상관관계를 보였다. 반면 모델에서는 3~5월 모두 양의 상관관계를 보이고 관측보다 전반적으로 강한 상관관계를 보였다.

4. 토 의

GloSea5-ADAM의 황사 발생에 영향을 주는 기상요소에 대한 ACC 결과를 볼 때 황사 발원지에서의 풍속, 상대습도, 기온의 예측값은 황사 장기예측과 관련하여 유용하게 활용 될 수 있을 것으로 판단된다(Fig. 3c). 또한, 풍속과 상대습도 발생빈도의 연 변동성에 대한 평가에서도 각각 0.73와 0.69의 높은 상관관계를 보여 모델이 관측의 황사 발생조건 변동성을 잘 모의하는 것으로 나타났다(Fig. 5c). 황사 발생빈도의 상관관계에서 초기장의 구성에 따라 크기에 차이가 있으나 EXP4에서 봄철 평균 약 0.41의 상관관계를 보여 1개월 예측 규모에서의 활용 가능성을 살펴볼 수 있었다(Fig. 8). 특히, 3월 황사발생빈도의 상관관계는 0.65로 1개월 예측성이 가장 높게 났다. 각 기상 요소는 관측과 절대값에서는 차이를 보이지만 공간 분포 및 시계열에서 모델이 관측의 변동성을 잘 모의하고 있으므로, 편의 보정된 기상자료를 황사 발원알고리즘에 이용하거나 황사발원알고리즘의 풍속과 상대습도의 임계 값을 개선한다면 황사발생빈도 예측성 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

풍속 및 상대습도 뿐만 아니라 황사발생빈도의 정확도는 앙상블 초기 예측 시간이 예측 월과 상대적으로 가까울수록(EXP1 → EXP3) 황사 발원지에서 상관이 강해지는 패턴을 보였다(Figs. 3-6). 변수에 차이는 있지만, 선행연구에서도 예측 시간에 가까운 초기장을 사용했을 때 여름/겨울철 기온의 계절 확률 예측 신뢰도, RMSE, ACC의 정확도가 높다고 보고한 바 있다(Hyun et al., 2020; Park et al., 2021). 더불어 앙상블 초기장 자료 수 조합에 따른 예측성능은 변수별로 상이한 결과를 보였으나 ACC를 기반으로 대부분 예측 시간과 가장 가까운 1~2개 날짜를 이용한 EXP4, EXP5에서 상대적으로 나은 결과를 보였다. 즉, 봄철 황사 관련 변수의 예측성평가에서 예측 시간에 가까운 앙상블 초기장을 사용했을 때 가장 좋은 성능을 보였고 초기장 자료 수를 조절함으로써 더 좋은 성능을 낼 수 있음을 확인하였다. 또한, 예측성 결과는 초기장 자료 수의 영향보다는 초기장 선행시간에 따른 영향에 더 높은 의존도를 보였으며, 추후 모델의 정확도 향상에 있어서 초기장 개선이 중요함을 시사한다.

여러 선행 연구에 따르면 황사 발원지에서 지표 풍속이 황사 발원에 중요한 요소로 작용한다고 하였고(Gao et al., 2003; Wang et al., 2003; Kim et al., 2018), 특히 강풍은 황사 발원지에서의 황사 발생빈도와 밀접한 관련이 있다고 하였다(Wang et al., 2003). 본 연구에서도 관측에서 풍속과 황사의 발생빈도 사이에 강한 양의 상관관계를 보였고 월별로는 3월이 4월과 5월보다 높은 상관성을 보였다. 모델도 관측과 유사하게 풍속과 황사발생 빈도간에 높은 상관성을 보였다. 상대습도의 경우, 4월에 음의 상관성을 보이는 등 관측에서는 월별 차이가 있었고, 풍속에 비해서 황사 발생빈도와의 상관성은 약한 것으로 나타났다. 모델의 황사 발생빈도도 풍속에 비해 상대습도와의 상관성은 약하게 나타났다. 다만, 3월과 4월에는 관측과 다소 차이가 있는 것으로 나타났다(Fig. 9). 풍속과 상대습도 뿐만 아니라 기온, 강수량, 토양수분, 적설 면적 등의 요소도 황사 발원에 영향을 미친다고 알려져 있기 때문에(Liu et al., 2004; Lee et al., 2013), GloSea5-ADAM 황사 발생의 정확도를 높이기 위해서는 황사 발생빈도와 다양한 기상요소와의 관계를 분석하여 보다 현실적인 결과를 황사발원알고리즘에 적용할 필요가 있다.

Figure 6에서 풍속의 ACC는 3월에 가장 높았고 4, 5월에 상대적으로 낮았으며 상대습도는 3월에서 5월로 갈수록 높은 ACC를 보였다. 황사 발생빈도에 대한 ACC는 풍속과 마찬가지로 3월에 가장 높고 4, 5월에 다소 감소하였다. GloSea5-ADAM에서 풍속과 상대습도는 모두 황사 발생 조건을 진단하는 변수로 사용되지만[식(1) 참고], 이 중 풍속은 황사 발생 조건을 진단할 뿐만 아니라 식(1)의 지표면 마찰 속도(u_*)에 의해 황사 농도(또는 황사 발생빈도) 산정에도 지속적으로 영향을 미친다. 따라서, 풍속의 ACC 감소(3월 → 5월)에 따라 황사 발생빈도의 ACC도 3월에서 5월로 갈수록 감소한 것으로 보인다. 또한 식생에 의한 저감 효과 등의 복합적인 영향도 황사 발생빈도의 ACC에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 추후 기압 변동성 분석 등을 통해 기상 변수 별, 월별 정확도 차이를 분석할 필요가 있다.

2주~2개월에 걸친 계절내-계절 시간 규모에 대한 예

측은 대기 초기조건의 영향을 받기에는 긴 시간규모이고, 해양이나 계절 변화와 같은 경계조건의 영향을 받기에는 비교적 짧은 규모의 시간이므로 정확도 높은 예측을 수행하기에는 한계가 많다. 특히, 황사 예측은 황사의 발원 뿐만 아니라 수송 및 화학 과정까지 고려해야하므로 장기적 관점에서 황사 예측에 대한 불확실성이 커질 수 밖에 없다. 그럼에도 불구하고 GloSea5-ADAM을 이용하여 장기 황사발생빈도 예측 자료를 생산하고 관련 연구를 수행하는 것은 수치모델을 이용한 황사예측연구 분야에서 선도적인 기술이라 할 수 있다.

한편, GloSea5-ADAM에서 황사 입자 크기는 2구간(경계 지름 0.2~4 μm, 4~20 μm)으로 구분되어있기 때문에 모델에서 황사 입자는 황사 기준인 PM_{10} 대신에 PM_{20}을 사용하고 있다. 또한, 모델에서 ADAM의 토양 유형 정보(황토 및 혼합 토양 등)는 동북아시아에 한정하여 적용되어 있어 전 지구적인 황사 발생에 불연속성을 야기할 수 있다. 따라서 모델 내 입자크기 구분을 세분화하고 연속적인 토양 정보를 이용한 지속적인 모델 개선 연구가 필요하다. 또한, 황사 발생에서 나대지 비율뿐만 아니라 활엽수림, 침엽수림, 초원, 관목지 등의 식생 변화에 따른 황사 발생을 고려한다면 지금보다 더욱 신뢰할 수 있는 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 GloSea5-ADAM의 과거기후 모의자료를 이용하여 황사 발원지를 중심으로 황사 발생에 영향을 주는 기상요소 인 10 m 풍속, 1.5 m 상대습도, 1.5 m 기온과 황사 발생 빈도의 예측성을 평가하였다. 또한, 과거기후 모의자료의 초기시간과 초기시간 자료의 수가 모델의 예측 성능에 어떠한 영향을 미치는지도 분석하였다. 그 결과, 봄철 황사발생 예측결과는 1개월 예측규모를 고려할 때 활용성이 높을 것으로 판단된다. 또한, 봄철 황사 발원과 관련된 기상변수와 황사는 선행 시간이 짧은 초기장을 사용할수록 정확도가 향상되었고 초기장 자료 수를 조절함에 따라 성능을 더욱 향상시킬 수 있었다. 황사 발원지에서의 황사 발생 및 기상 변수의 정확도를 평가함으로써 황사의 정량적 예보를 위한 해석에 활용 할 수 있고 모델 예측 정확도 향상 연구의 유용한 정보로도 활용될 수 있을 것이다. 향후에는 황사 발원 시 황사 발원에 영향을 미치는 풍속과 상대습도 뿐만 아니라 기온, 강수량, 토양수분, 적설 면적 등의 요소를 고려할 필요가 있고, 현실적인 토양 정보(연속적인 토양 정보, 식생 계절 변화 등)를 이용한 모델 개선 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원「황사·연무 감시 및 예보기술 개발」(KMA2018-00521)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Benedetti, A., and F. Vitart, 2018: Can the direct effect of aerosols improve subseasonal predictability? *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 3481-3498, doi:10.1175/MWR-D-17-0282.1.

Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, J. E. Hansen, and D. J. Hofmann, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosol. *Science*, **255**, 423-430.

Gao, T., L. Su, Q. Ma, H. Li, X. Li, and X. Yu, 2003: Climatic analyses on increasing dust storm frequency in the springs of 2000 and 2001 in Inner Mongolia. *Int. J. Climatol.*, **23**, 1743-1755.

Gong, S. L., and X. Y. Zhang, 2008: CUACE/Dust - An integrated system of observation and modeling systems for operational dust forecasting in Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 2333-2340.

Hong, J. H., 2004: Economic damage costs of Asian dust in Korea. *The Hanyang J. Economic Studies*, **25**, 101-115 (in Korean).

Husar, R. B., and Coauthors., 2001: Asian dust events of April 1998. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **106**, 18317-18330, doi:10.1029/2000JD900788.

Hyun, Y.-K., J. Park, J. Lee, S. Lim, S.-I. Heo, H. Ham, S.-M. Lee, H.-S. Ji, and Y. Kim, 2020: Reliability assessment of temperature and precipitation seasonal probability in current climate prediction systems. *Atmosphere*, **30**, 141-154, doi:10.14191/Atmos.2020.30.2.141 (in Korean with English abstract).

Jaffe, D., and Coauthors, 1999: Transport of Asian air pollution to North America. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 711-714, doi:10.1029/1999GL900100.

Kim, J., K. Baek, K. Lee, Y. Lee, and D. Hong, 2007: Effect of the Asian dust events on respiratory disease during the spring. *J. Korean Soc. Emerg. Med.*, **18**, 326-332 (in Korean with English abstract).

Kim, S., H. C. Lee, S. Lee, J. Cho, and S.-B. Ryoo, 2018: A study on factors that affect the Asian dust frequency in springtime over the source regions. *J. Climate Res.*, **13**, 1-16, doi:10.14383/cri.2018.13.1.1 (in Korean with English abstract).

Kramer, S. J., and B. P. Kirtman, 2021: Saharan dust trans-

port predictability utilizing a subseasonal experiment (SubX) model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **126**, e2020-JD033802, doi:10.1029/2020JD033802.

Kwon, H.-J., S.-H. Cho, Y. Chun, F. Lagarde, and G. Pershagen, 2002: Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environ. Res.*, **90**, 1-5, doi:10.1006/enrs.2002.4377.

Lang, X., 2008: Prediction model for spring dust weather frequency in North China. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, **51**, 709-720, doi:10.1007/s11430-008-0048-x.

Lee, J.-J., and C.-H. Kim, 2008: Characteristics of recent occurrence frequency of Asian dust over the source regions - Analysis of the dust occurrences since 2002. *Atmosphere*, **18**, 493-506 (in Korean with English abstract).

Lee, Y. G., C.-H. Ho, J. Kim, and J. Kim, 2013: Potential impacts of northeastern Eurasian snow cover on generation of dust storms in northwestern China during spring. *Climate Dyn.*, **41**, 721-733, doi:10.1007/s00382-012-1522-x.

Liu, X., Z.-Y. Yin, X. Zhang, and X. Yang, 2004: Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions. *J. Geophys. Res.*, **109**, D16210, doi:10.1029/2004JD004615.

Lu, C.-H., and Coauthors, 2016: The implementation of NEMS GFS Aerosol Component (NGAC) Version 1.0 for global dust forecasting at NOAA/NCEP. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1905-1919, doi:10.5194/gmd-9-1905-2016.

Maki, T., and Coauthors, 2020: Recent DSS related activities at the Japan Meteorological Agency and Meteorological Research Institute. *The 13th Meeting of Working Group I for Joint Research on Dust and Sand Storms*, Online Meeting [Available online at http://temm-dss.com/research/].

Min, P.-K., C.-W. Kim, Y.-J. Yoon, J.-H. Chang, J.-K. Chu, K.-E. Lee, J.-Y. Han, J.-W. Park, and C.-S. Hong, 2001: Effect of yellow sand on respiratory symptoms and diurnal variation of peak expiratory flow in patients with bronchial asthma. *J. Asthma, Allergy Clin. Immun.*, **21**, 1179-1986.

Oh, H.-R., C.-H. Ho, J. Kim, D. Chen, S. Lee, Y.-S. Choi, L.-S. Chang, and C.-K. Song, 2015: Long-range transport of air pollutants originating in China: a possible major cause of multi-day high-PM_{10} episodes during cold season in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **109**, 23-30, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.005.

Park, M. E., J. H. Cho, S Kim, S.-S. Lee, J. E. Kim, H. C. Lee, J. W. Cha, and S. B. Ryoo, 2016: Case study of the heavy Asian dust observed in late February 2015. *Atmosphere*, **26**, 257-275, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.257 (in Korean with English abstract).

Park, S.-U., and H.-J. In, 2003: Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) event observed in March 2002 in Korea. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 4618, doi:10.1029/2003JD00348.

_____, A. Choe, E.-H. Lee, M.-S. Park, and X. Song, 2010: The Asian dust aerosol model 2 (ADAM2) with the use of normalized difference vegetation index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data. *Theor. Appl. Climatol.*, **101**, 191-208, doi:10.1007/s00704-009-0244-4.

Park, Y.-H., Y.-K. Hyun, S.-I. Heo, and H.-S. Ji, 2021: Assessment of the prediction performance of ensemble size-related in GloSea5 hindcast Data. *Atmosphere*, **31**, 511-523, doi:10.14191/Atmos.2021.31.5.511 (in Korean with English abstract).

Pu, B., P. Ginoux, S. B. Kapnick, and X. Yang, 2019: Seasonal prediction potential for springtime dustiness in the United States. *Geophys. Res. Lett.*, **46**, 9163-9713, doi:10.1029/2019GL083703.

Rémy, S., and Coauthors, 2019: Description and evaluation of the tropospheric aerosol scheme in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Integrated Forecasting System (IFS-AER, cycle 45R1). *Geosci. Model Dev.*, **12**, 4627-4659, doi:10.5194/gmd-12-4627-2019.

Ryoo, S.-B., Y.-K. Lim, and Y.-S. Park, 2020: Seasonal Asian Dust Forecasting Using GloSea5-ADAM. *Atmosphere*, **11**, 526, doi:10.3390/atmos11050526.

SDS-WAS ASIAN-RC, 2022: 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.

Sohn, K. T., 2013: Statistical guidance on seasonal forecast of Korean dust days over South Korea in the springtime. *Adv. Atmos. Sci.*, **30**, 1343-1352, doi:10.1007/s00376-012-2112-x.

Solmon, F., M. Mallet, N. Elguindi, F. Giorgi, A. Zakey, and A. Konaré, 2008: Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L24705, doi:10.1029/2008GL035900.

Tanaka, T. Y., and M. Chiba, 2005: Global simulation of

dust aerosol with a chemical transport model, MASINGAR. *J. Meteorol. Soc. Japan Ser. II*, **83A**, 255-278.

Wang, X., Y. Ma, H. Chen, G. Wen, S. Chen, Z. Tao, and Y.-S. Chung, 2003: The relation between sandstorms and strong winds in Xinjiang, China. *Water Air Soil Poll. Focus*, **3**, 67-79.

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

Yu, X., T. Cheng, J. Chen, and Y. Liu, 2006: A comparison of dust properties between China continent and Korea, Japan in East Asia. *Atmos. Environ.*, **40**, 5787-5797.