

논문

2021년 3월 YES-AQ 기간 중 선박과 항공기로 관측한 서해상 황사 특성

Characteristics of Asian Dust Observed over the Yellow Sea during YES-AQ Campaign in March, 2021 based on Vessel and Aircraft Measurement

김정은*, 정원석, 서원익, 이선란, 오상민, 신대근, 고희정, 유희정,
정주용¹⁾, 김연희²⁾

국립기상과학원 기후연구부, ¹⁾국립기상과학원 기후변화예측연구팀,

²⁾기상청 수치자료응용과

Jeong Eun Kim*, Won Seok Jung, Wonick Seo, Shanlan Li, Sang Min Oh,
Daegeun Shin, Hee-Jung Ko, Hee-Jung Yoo, Chu-Yong Chung¹⁾, Yeon-Hee Kim²⁾

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

¹⁾Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Republic of Korea

²⁾Numerical Data Application Division, Korea Meteorological Administration, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2022년 4월 6일

수정일 2022년 5월 23일

채택일 2022년 6월 10일

Received 6 April 2022

Revised 23 May 2022

Accepted 10 June 2022

*Corresponding author

Tel: +82-(0)64-780-6624

E-mail: narci76@korea.kr

Abstract The meteorological and aerosol characteristics of heavy dust during the 2021 YES-AQ campaign were analyzed. The source region of Asian Dust were sufficiently warm and dry, which is a proper condition for dust particles to be well intruded from the surface into the air above. Asian dust transported to the Shandong peninsula in China by the northwesterly, and then flowed into the Korean peninsula by the westerly. When the fine-mode aerosol is dominated in the period before arrival of Asian dust, scattering mass efficiency of PM₁₀ was 5.3 m²/g and secondary pollutants such as sulfate, nitrate, and ammonium accounted for 50% of the total PM₁₀ mass concentration. During the heavy dust period, PM₁₀ mass concentration was maintained at 676~1,384 μg/m³ for about 24 hours from 21 KST on March 29, 2021 which is 25 times higher than the PM₁₀ mass concentration before the Asian dust arrived. The light absorption coefficient in the heavy dust period was 38.5 ± 9.4 Mm⁻¹, which was higher than in the period before the arrival of Asian dust (22.5 ± 10.2 Mm⁻¹) confirming the Asian dust was highly absorbing. The scattering Ångström exponent and absorption Ångström exponent were 0.29 and 2.64, respectively, which are similar to the values reported around the Asian Dust source region. Although the concentration of fine particles did not increase during HD, it is presumed that the Asian Dust and fine particles were combined as the concentration of ions of anthropogenic pollutants increased to 15 μg/m³. Aerosol physical and optical properties were observed at 0.5~5.0 km over the Yellow Sea using an aircraft during HD. The coarse particle concentration and light scattering coefficient (545.7 Mm⁻¹) and the light absorption coefficient (23.1 Mm⁻¹) were the highest at the altitude of 0.9 km (36.5°N, 124.4°E). The scattering Ångström exponent (-0.067 ± 0.13) and the absorption Ångström exponent (1.3~1.9) showed distinct characteristics of dust. The vertical lapse rate of the temperature from the aircraft and the backward trajectory analysis declared that the air origins were different below and over the altitude of 1.8 km.

Key words: Asian dust, Yellow Sea, YES-AQ, Aerosol, Aircraft measurement

1. 서론

황사와 연무는 동아시아에서 가장 자주 관측되는

먼지관련 기상 현상이다. 황사는 강하고 격렬한 바람에 의해 높은 고도로 불려 올라간 먼지 또는 모래 입자들을 말하며(WMO, 1992), 주로 중국과 몽골의 건

조 또는 반건조 지역에서 발생한다. 연무는 육안으로 볼 수 없지만 하늘을 뿌옇게 보이게 할 만큼 매우 작고 건조한 입자가 대기 중에 부유하는 현상으로 정의된다(WMO, 1992). 최근, 동아시아에서는 인위적인 대기오염물질 배출의 증가로 인해 심한 연무가 자주 관측된다(Lee *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2016). 황사나 연무의 원인이 되는 대기 에어로졸은 태양광을 산란, 흡수하고, 구름의 특성을 변형시켜 날씨나 기후에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한 피부, 호흡기, 안구 질환을 유발하며(Kim *et al.*, 2020; Sugiyama *et al.*, 2020), 특히 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 흡입성 에어로졸은 호흡기 또는 심혈관 질환을 일으킬 수 있어(Pun *et al.*, 2017) 이에 대한 관심이 점차 증가하고 있다.

에어로졸은 대류권 하부에서 수천 km까지 장거리 이동하여 심지어 대륙 간 이동도 관측된다(Uno *et al.*, 2009; Prospero, 1999; Duce *et al.*, 1980). 동아시아에서는 장거리 이동 황사나 인위적 에어로졸로 인한 심각한 연무가 국경을 넘어 영향을 주는 것으로 인식되고 있어(Wang and Chen, 2016; Jeong *et al.*, 2014; Kim, 2004) 황사나 연무 발생 정보, 예측 결과 등을 공유하여 공동으로 대응하려는 노력을 하고 있다(Nickovic *et al.*, 2015; Kim, 2004). 그러나 중국과 한반도 사이에 위치한 서해상에는 장거리 이동 에어로졸에 대한 관측 정보가 거의 없어 이에 대한 정량적 예측이 어려운 실정이다. 이는, 인공위성의 에어로졸 산출물을 통해 일부 극복될 수 있다. 그러나, 구름, 해무, 안개 등으로 인해 불확실성이 크거나 탐지되지 않는 사례가 잦으며, 구름과 안개 등의 장애물이 없더라도 에어로졸 농도나 수직 분포와 같은 정량적 정보를 얻기에는 여전히 한계가 있다. 이러한 이유로 서해상에서 관측 자료를 축적하기 위해 국내에서 여러 관측 캠페인이 진행되어 왔다(Crawford *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2009).

서해상 대기질 입체관측(The Yellow Sea Air Quality; YES-AQ) 캠페인은 서해상을 통해 이동해 오는 장거리 이동 에어로졸에 대한 이해를 높이기 위해 2018년부터 국내 다양한 기관이 협력 중인 집중 관측 실험

이다. 장거리 이동 황사나 고농도 에어로졸 사례가 빈번한 봄철을 중심으로 선박에 크기별 입자 수농도, 질량농도, 화학조성 및 광학 특성 측정 장비 등을 탑재해 다양한 에어로졸 특성을 감시하고 있다(Shin *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2021b; Yoo *et al.*, 2021). 또한, 에어로졸이 기후에 미치는 영향을 연구하는 데 수직 분포를 이해하는 것이 중요하므로 선박 항로 상공의 다양한 고도에서 항공관측도 수행한다(Kang *et al.*, 2021).

2012년 이후 국내 황사 관측일수는 감소하는 추세이고(NIMS, 2021), 황사 입자의 특성에 관해 국내 학회지에 게재된 연구 사례는 지난 10년간 11편에 불과하다. 한편, 과거 국내에 보고된 황사 관련 연구는 지상에서 관측한 입자의 화학 특성, 입자크기 분포, 위성 관측 결과 분석 등이 주를 이루고 있다(Park, 2019; Kim *et al.*, 2017; Ko *et al.*, 2016; Song *et al.*, 2015). 황사 입자를 비롯한 에어로졸은 존재 고도나 혼합 상태 등에 따라 기후 영향이 서로 다른 것으로 알려져 있으나, 이에 대한 이해를 높이기 위해 필요한 고도별 실지(in-situ) 관측이나 다양한 광학 특성 요소에 대한 분석 연구는 상대적으로 보고되는 사례가 드물다. 따라서, 황사의 크기 분포, 화학성분과 더불어 다파장 광산란계수, 광흡수계수와 이로부터 산출되는 정성적 광학 특성들을 종합적으로 분석하고 고도별 에어로졸 실지 관측 자료도 충분히 축적해야 할 필요가 있다.

2021년 YES-AQ 캠페인 기간에는 3월 28일부터 30일 사이에 PM_{10} 질량농도 $1,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 질은 황사가 서해상과 우리나라에서 관측되었는데, 이로 인해 5년 만에 황사 특보가 발표되었다. 본 연구에서는 이 황사의 발원, 이동 과정을 비롯해 서해상 선박과 항공기에서 관측한 황사의 크기 분포, 질량농도, 다파장 광산란/광흡수 특성, 화학성분의 실시간 변화 그리고 황사의 연직 분포 특성을 종합적으로 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

에어로졸의 물리, 광학, 화학 특성을 측정하기 위해 기상1호에 다양한 장비를 탑재하였다. PM_{10} 질량농

도와 입자크기 분포는 각각 베타선흡수법의 미세먼지 (PM₁₀) 측정기 (FH62C14, Thermo Fisher Scientific, USA)와 공기역학입자계수기 (TSI3321, TSI, USA, 이하 APS)를 이용하여 측정하였다. 3파장 (450, 550, and 700 nm) 에어로졸 광산란계수와 7파장 (370, 470, 520, 590, 660, 880, and 950 nm) 에어로졸 광흡수계수 측정은 각각 네펠로미터 (nephelometer, TSI 3563, TSI, USA)와 에살로미터 (aethalometer, AE33, Aerosol d.o.o.)를 이용하였다. 광산란계수 자료는 Anderson and Ogren (1998)에 따라 표준대기상태, 각도 오차를 보정하였다. 이온 성분의 변동은 시료의 포집과 준실시간 이온 분석이 가능한 MARGA (Monitor for Aerosols and Gases in ambient Air, 2060 MARGA, Metrohm)를 통해 관측되었다. 각 장비는 별도의 PM₁₀ 임팩터와 스테인레스 스틸 재질의 흡입관을 이용하였고, 유입 공기의 상대습도를 낮추기 위해 실내 흡입관은 38~40°C로 가열하였다. 서해상 에어로졸의 위도별 분포를 관측하기 위해 기상관측선 기상1호는 그림 1과 같이 남북 방향으로 운항하였다. 짙은 황사가 관측되기 시작한 3월 28일 야간에는 37.33°N 지점에서 정박 중이었고 3월 29일 주간에는 37.33°N (19 KST)까지 남쪽으로 향해 후 3월 30일 05 KST까지 다시 북진하며 관측하였다.

국립기상과학원의 기상항공기 나라호는 위험기상, 대기조성물질 감시, 구름 물리 특성 관측 등을 위해 25종의 장비가 탑재된 항공기이다 (Lee *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020). 짙은 황사가 유입된 3월 29일에는 기상1호가 운항하는 위도대 (35~37°N)에서 0.5~5.0 km 상공을 운항하며 관측하였다. 나라호의 에어로졸 인렛 (model 1200, Brechtel)은 5 μm 크기의 입자까지 흡입이 가능하게 설계되어 있다. 입자크기 분포, 에어로졸 광산란계수와 광흡수계수는 각각 항공용 광학입자계

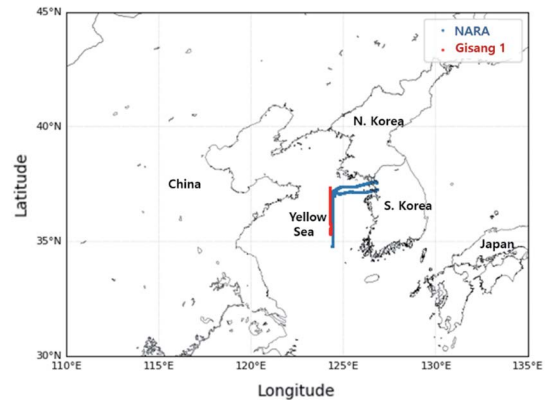
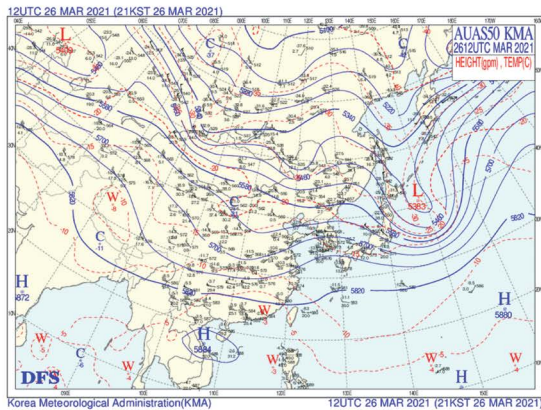


Fig. 1. The routes of the Gisang No.1 (vessel, red) and the NARA (aircraft, blue) during 2021 YES-AQ campaign over the Yellow Sea.

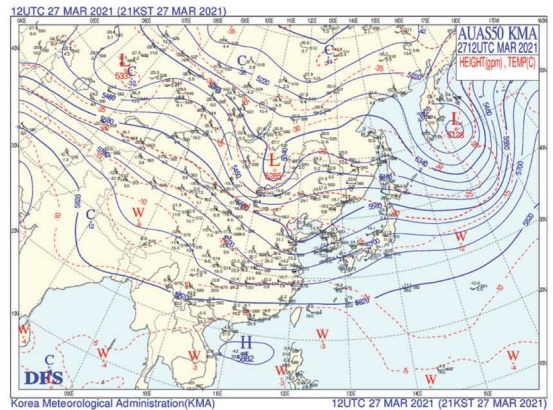
Table 1. Instruments onboard the Gisang No.1 and the NARA.

Platform	Parameters/species	Instrument/manufacturer
Gisang No.1	PM ₁₀ mass concentration	FH62C14/Thermo Fisher Scientific
	Aerosol size distribution (0.523~20 μm)	Aerodynamic particle sizer (APS), TSI3321/TSI
	Aerosol scattering coefficients (450, 550, 700 nm)	Integrating nephelometer, TSI3563/TSI
	Aerosol absorption coefficients (370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)	Aethalometer, AE33/Aerosol d.o.o.
	Water soluble ion components (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , NH ₄ ⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻)	2060 MARGA R/Metrohm Applikon Ion chromatography
NARA	Aerosol size distribution (0.25~32 μm)	Sky-OPC, GRIMM 1.129/GRIMM
	Aerosol scattering coefficients (450, 550, 700 nm)	Integrating nephelometer, TSI3563/TSI
	Aerosol absorption coefficients (467, 528, 652 nm)	Tricolor absorption photometer (TAP)/Brechtel
	Refractory black carbon mass concentration	Single particle soot photometer (SP2-D)/DMT

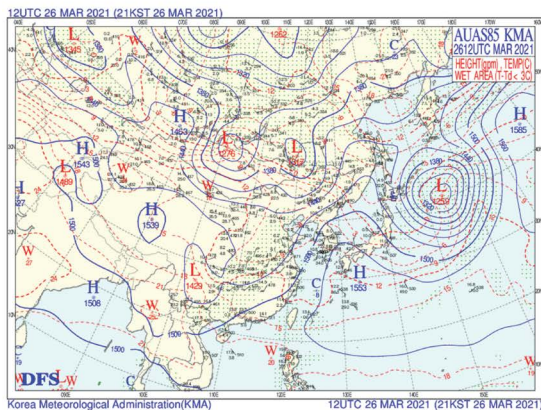
(a) 500 hPa on 21 KST, 26 March



(b) 500 hPa on 21 KST, 27 March



(c) 850 hPa on 21 KST, 26 March



(d) 850 hPa on 21 KST, 27 March

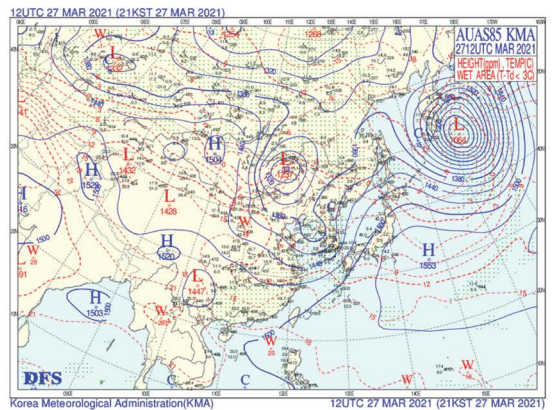


Fig. 2. 500 hPa and 850 hPa geopotential height and temperature on 26 and 27 March, 2021.

수기 (sky-OPC, optical particle counter, model 1.129, GRIMM Aerosol Technik), 네펠로미터 (TSI3563) 그리고 TAP (Tricolor absorption photometer, Brechtel Inc.)을 이용하여 측정하였으며, 기상자료와 마찬가지로 Anderson and Ogren (1998), Ogren *et al.* (2017)에 따라 표준대기상태, 각도오차 보정값을 적용하였다. 내화성 블랙카본 (refractive black carbon, rBC) 농도는 Single particle soot photometer (SP2, Droplet Measurement Technologies, USA)로 측정하였다 (Schwarz *et al.*, 2006). 기상1호와 나라호에서 운영한 에어로졸 관측 장비에 관한 정보를 표 1에 제시하였다.

관측지점에 도착한 기류의 72시간 역궤적은 미

국해양대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델과 기상청에서 생산한 UM GDAPS (Unified Model Global Data Assimilation Prediction System) 자료를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 황사의 발원과 이동

3월 26일 21 KST 500 hPa 일기도로부터 상층 기압

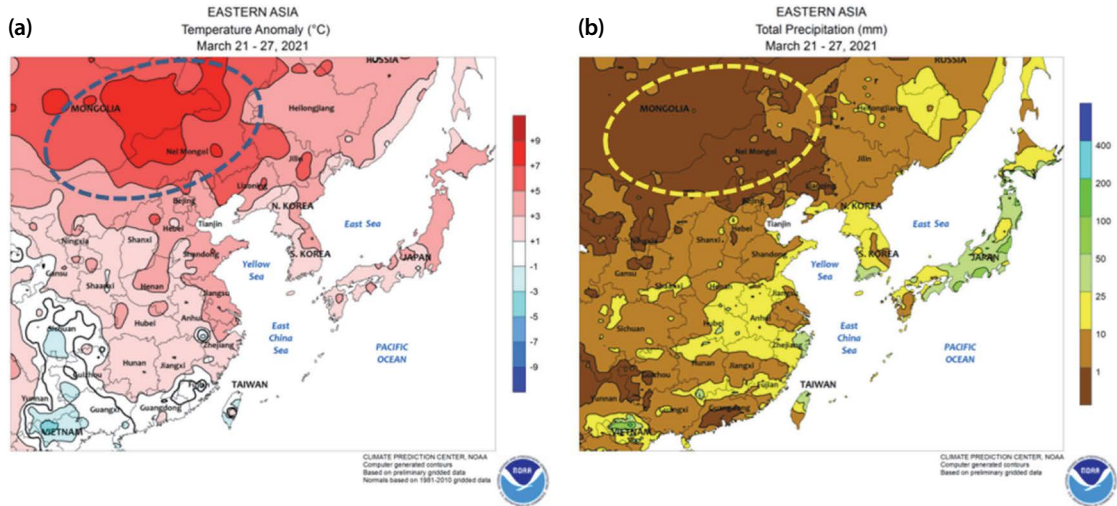


Fig. 3. (a) Surface temperature anomaly and (b) total precipitation of Eastern Asia during March 21~27, 2021 (https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/regional_monitoring, accessed 30 March, 2021).

골이 발달하기 시작하여 27일까지 이 기압골이 점점 깊어짐에 따라 몽골 지역 하층 저기압이 유도된 것으로 보인다(그림 2a, b). 이와 같이 상층 저기압과 지상 저기압 발달이 연관되어 상층 제트가 정체될 경우 상층 제트의 골 뒤쪽 수렴부를 따라 상층의 공기가 하층으로 전이되며, 이 경로를 통해 황사가 지상으로 유입될 수 있다(Moon *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2001). 그림 2c의 850 hPa 일기도에서 보는 바와 같이 3월 26일 21 KST에는 등고도면이 조밀하여 강풍으로 인해 황사가 발원하기 좋은 조건이었다. 기상청에서 수집한 관측 전문 보고에서 3월 26~27일 황사가 발원한 몽골과 중국 내몽골고원의 풍속은 8~20 m/s였다. 또한 저기압의 서쪽에 온도골(thermal trough)이, 저기압의 중심에는 온도능(thermal ridge)이 위치하고 있다(그림 2c). 강한 온도경도를 가진 온도골이 동서방향으로 발달하면서 남북으로 형성된 등고도선과 수직으로 교차하는 형태를 보이며, 이러한 강한 경압 불안정(baroclinic instability)에 의해 황사가 상승할 수 있는 조건이 형성된 것으로 판단된다.

또한, 미국 NOAA의 기후예측센터(Climatic prediction center)가 분석한 동아시아 기온의 평년 편차와

강수량을 보면 2021년 3월 21~27일 사이 황사의 주요 발원지인 몽골, 고비사막, 내몽골고원 등의 지표 기온은 평년에 비해 기온이 1~9°C 높은 0~8°C였고, 대부분 지역에서 강수량은 1 mm 미만으로 황사가 발원하기에 충분히 고온, 건조했던 것으로 보인다(그림 3).

3월 26일과 27일에 걸쳐 황사를 발원시킨 저기압은 몽골 동부와 내몽골고원을 거쳐 만주 북쪽으로 이동하여 보하이만 방향으로 황사가 이동할 수 있는 북서풍을 형성하였으며, 기압골 후면의 하강운동에 의해 28일 밤에 산둥반도와 요동반도에서 황사가 관측되었다(그림 4a~c). 3월 29일 00 KST에는 남한의 최북단 섬인 백령도에서 황사가 관측되었고 03 KST경부터는 서해안 일부 지역에도 영향을 주기 시작하였다(그림 4d). 서해상에서 백령도 남서쪽 약 70 km 해상(37.33°N, 124.28°E)에서 묘박 중이던 기상1호에서는 28일 밤 22 KST부터 PM₁₀ 질량농도가 상승하기 시작하여 본격적으로 황사 특성이 관측되었다. 황사 입자의 물리, 광학, 화학 특성은 3.2절에 기술하였다.

3월 29일 00 KST에 기상1호 위치의 역궤적 분석 결과를 보면, 해당 지점에 도달한 공기는 대부분 고비사막과 내몽골자치구 등 황사 발원지에서 기원하였고,

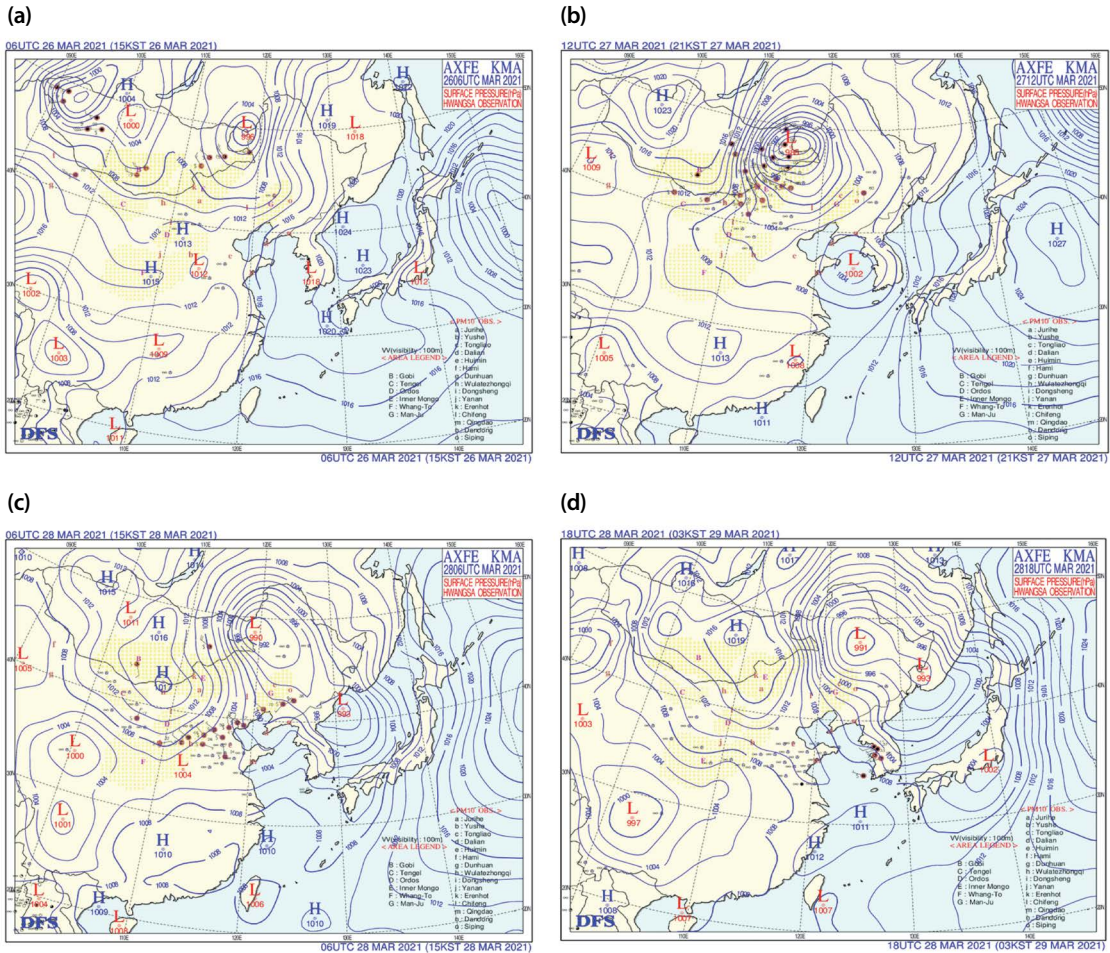


Fig. 4. Surface weather charts of East Asia during March 26~29, 2021. Red dots denote Asian dust observed at surface synoptic observation stations.

지표 부근의 공기는 산둥반도 부근에서 서풍을 타고 유입된 것으로 분석되었다(그림 5a). 3월 29일 15 KST에도 1.8 km 이하 고도의 공기는 황사 발원지에서 기원한 것으로 분석되었다(그림 5b). 황사 유입 초기의 지상 풍향을 고려하여 비슷한 위도대에 있는 중국 칭다오, 기상1호, 서울의 PM₁₀ 질량농도를 상호 비교하였다(그림 6). 지표 부근에서는 약 10 m/s 내외의 서풍이 불었고(그림 6a), 서해상에서 운항 중이던 기상1호에서 3월 28일 22 KST의 최대 풍속은 약 13 m/s로 다소 강한 서풍이 관측되었다. 황사가 유입된 이후에 풍속은 점차 낮아져 3월 30일 00 KST에는 0.8 m/s

까지 감소하였다. 황사가 유입되기 시작한 3월 28일에 PM₁₀ 질량농도가 미세먼지 경보 기준인 300 µg/m³을 초과하는 시간은 칭다오 18 KST, 기상1호 22 KST, 서울은 익일 02 KST로 지점별로 약 4시간의 차이를 보였다(그림 6b).

한편, 그림 6b를 보면 3월 29일 자정 무렵에 서울의 PM₁₀ 질량농도가 두 번째 정점을 보였는데, 이는 관측 고도가 다른 두 서울 지점인 송월동(86 m)과 관악산(622 m) 관측소의 PM₁₀ 질량농도 그리고 대기혼합고의 일변화로 설명할 수 있다(Park *et al.*, 2021a). 대기혼합고는 관악산 부근의 서울대학교에서 관측한 예

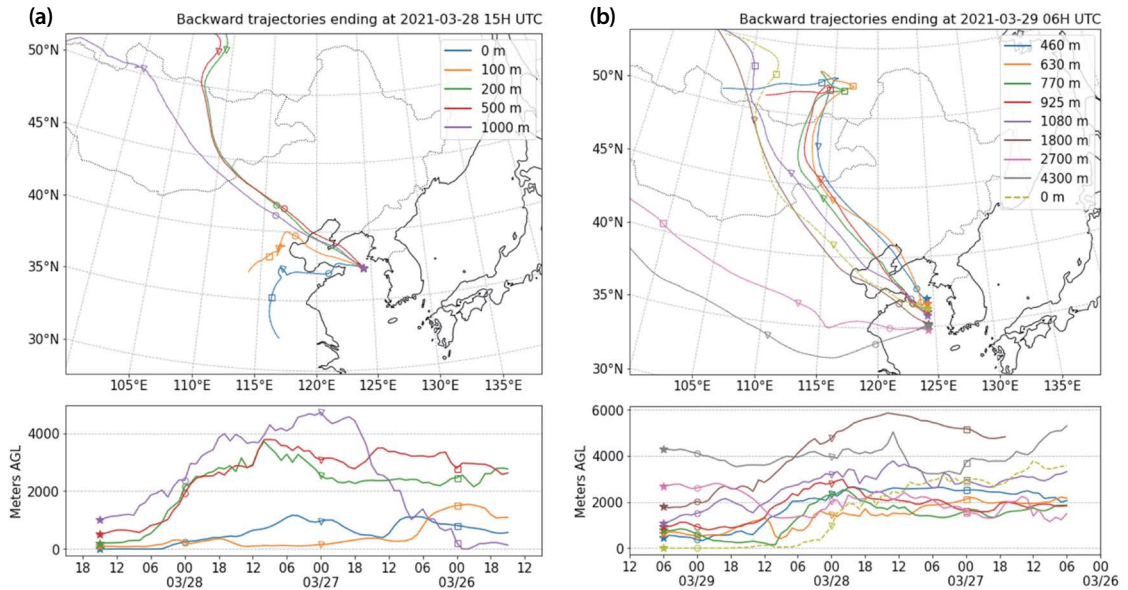


Fig. 5. 72-hr backward trajectories (Horizontal and vertical) started from (a) 00 KST on March 29 at the Gisang No.1 and (b) 15 KST on March 29 over the route of Gisang No.1 and NARA.

어로졸 라이다 관측 자료로부터 산출되었으며 (<http://kalion.kr>) 송월동과 관악산은 기상청에서 운영하는 황사관측망의 일부이다. 서울에서는 3월 29일 04 KST 부터 황사가 관측되기 시작하였고 PM_{10} 질량농도는 $608 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 반면 관악산에서 관측된 PM_{10} 질량농도는 $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 불과한 것으로 보아, 황사가 대기경계층 아래인 지표 부근으로 유입됐을 것으로 추정할 수 있다. 3월 29일 07 KST 이후로 관악산의 PM_{10} 질량농도가 증가하는데, 이는 일사의 영향으로 대기혼합고가 점차 높아진 영향으로 해석할 수 있다. 3월 29일 09 KST경부터 라이다 관측 자료로부터 대기혼합고가 산출되었으며, 이후 대기혼합고는 고도 1,500 m 이상 (14 KST)까지 발달하는 것을 볼 수 있는데, 혼합고가 높아짐에 따라 송월동과 관악산의 PM_{10} 질량농도가 비슷한 변동을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 대기혼합고가 관악산 지점보다 높은 고도까지 발달하면서 송월동과 관악산 지점이 모두 대기경계층 내에 존재했던 것으로 보인다. 이후 태양 고도가 점차 낮아지면서 21 KST에는 대기혼합고가 최저 360m까지 감소하

였는데, 이때 대기경계층 높이가 낮아지면서 대기경계층 내의 PM_{10} 질량농도가 다시 높아지는 효과를 가져왔을 것으로 보인다. 따라서 대기경계층 내에 존재하는 송월동의 PM_{10} 질량농도는 $573 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다시 증가하면서 두 번째 정점을 나타냈다. 이때 대기경계층보다 높은 고도에 위치한 관악산 지점의 농도는 $131 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 송월동의 약 1/4 수준으로 관측되었다 (그림 6c).

3.2 에어로졸 특성

3.2.1 물리 특성

서해상에서 관측 중인 기상1호에서는 3월 28일 21 시경부터 조대입자 ($PM_{10-2.5}$) 부피농도와 PM_{10} 질량농도가 급상승하기 시작하여 황사가 유입된 것으로 판단할 수 있다(그림 7a, b). 광학입자계수기(optical particle counter)에서 관측한 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도비(Shin *et al.*, 2022), PM_{10} 질량농도, APS 입자크기 분포 자료를 참조하여 황사 유입 전(BD, Before dust, 3월 28일 16~21 KST), 황사 농도가 상대적으로 높은

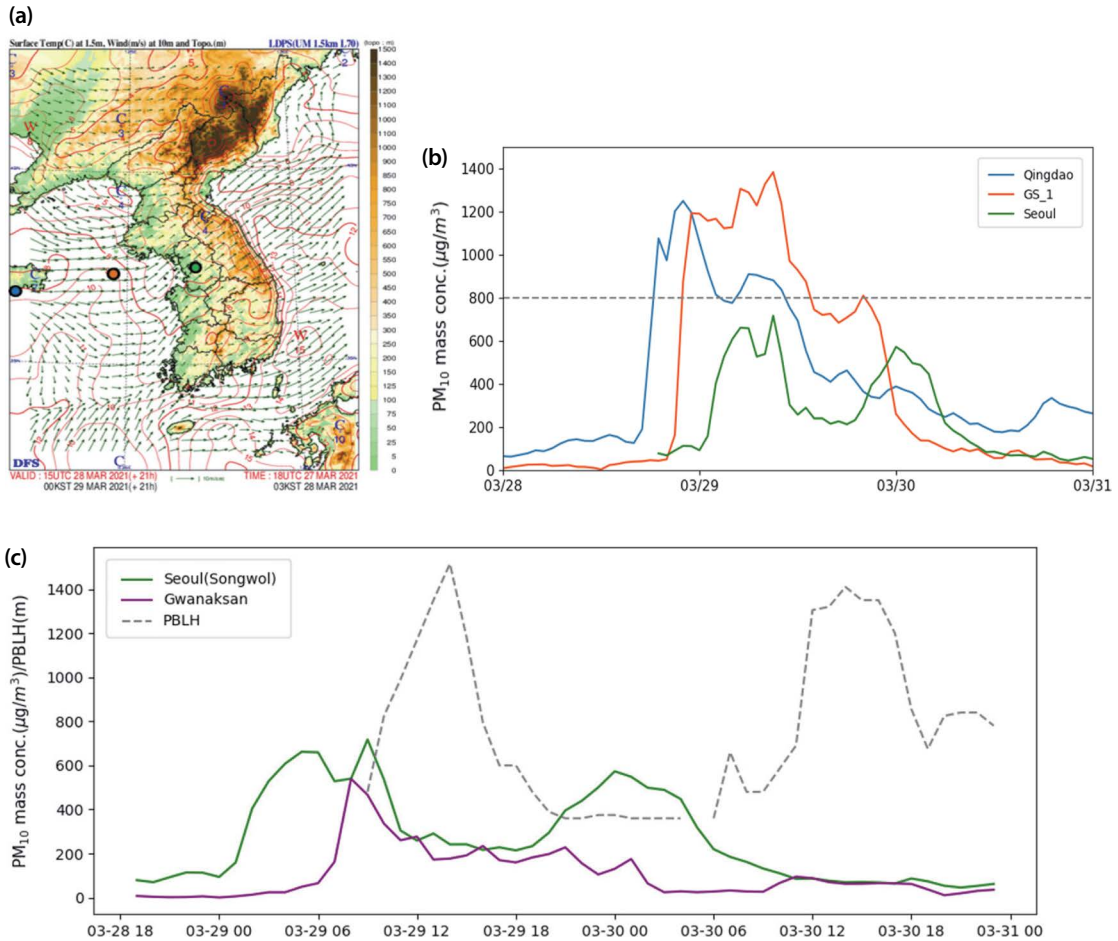


Fig. 6. (a) Surface temperature and wind vectors over the Yellow Sea and Korean Peninsula on 00 KST 29 March, 2021 (Colored circles indicate the locations of Qingdao (blue), Gisang No.1 (orange), and Seoul (green)), (b) PM₁₀ mass concentrations at Qingdao, Gisang No.1 and Seoul from 28 to 30 March, 2021 and (c) comparison of PM₁₀ mass concentration and planetary boundary layer height at Seoul from 28 to 30 March, 2021.

(PM₁₀ > 500 μg/m³) 기간을 짙은 황사(HD, heavy dust, 3월 28일 22 KST~3월 29일 22 KST)로, 낮은 기간 (PM₁₀ > 500 μg/m³)을 옅은 황사(WD, weak dust, 3월 29일 23 KST~3월 30일 23 KST)로 구분하였다(표 2). PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도비는 HD와 WD 기간에는 각각 0.24와 0.22로 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나, 황사 유입 전 0.61에 비하면 크게 감소한 수준이다. 그림 8a의 입자크기별 수농도 분포에서 BD 기간 중인 3월 28일 16~20 KST에 고농도의 미세입자가 존재하는 것을

Table 2. Categorization of the event period.

Event	Period	PM ₁₀ mass concentration (μg/m ³) and PM _{2.5} /PM ₁₀
BD (before dust)	28 March, 16~21 KST	66 ± 48 0.61 ± 0.21
HD (heavy dust)	28 March, 22 KST ~29 March, 22 KST	998 ± 242 0.24 ± 0.043
WD (weak dust)	29 March, 23 KST ~30 March, 23 KST	109 ± 95 0.22 ± 0.080

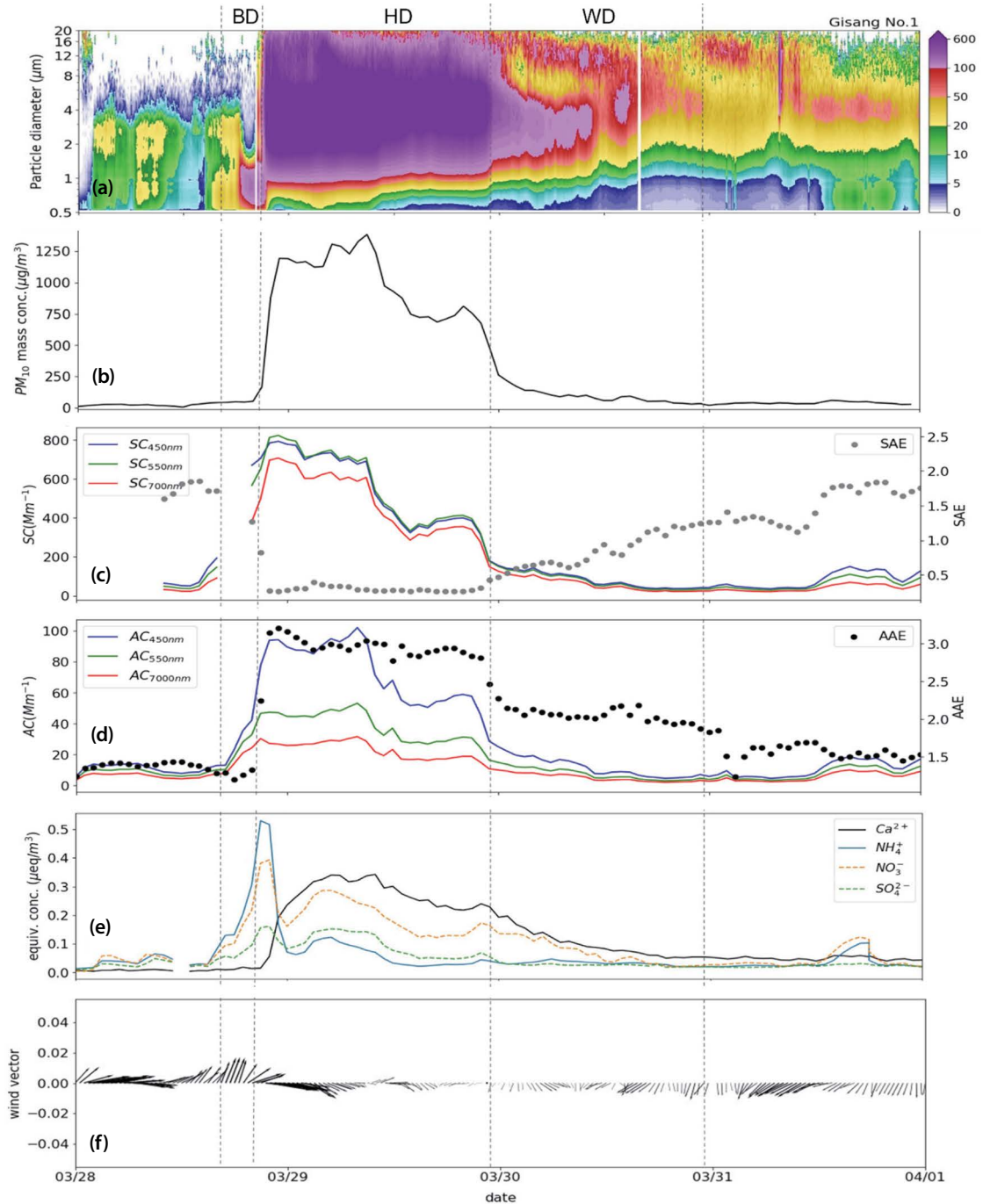


Fig. 7. (a) Aerosol volume size distribution, (b) PM₁₀ mass concentration, (c) aerosol light scattering coefficients (SC) and scattering Ångström exponent (SAE), (d) aerosol absorption coefficients (AC) and absorption Ångström exponent (AAE), (e) equivalent concentration of major ion species, and (f) wind vectors obtained from the Gisang No.1 during 28~31 March, 2021 over the Yellow Sea.

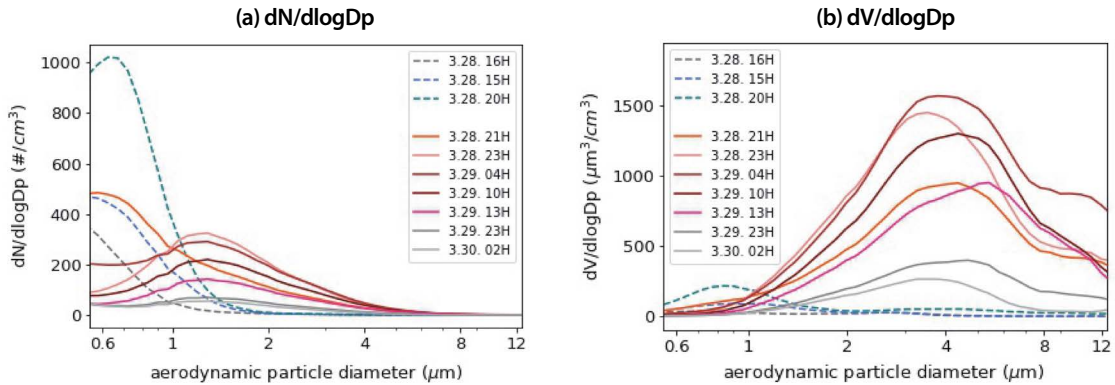


Fig. 8. (a) Aerosol number size distribution and (b) volume size distribution before dust arrived (16~21 KST, 28 March) and during dust (22 KST, 28 March~23 KST 29 March) measured onboard the Gisang No.1.

볼 수 있으며, 이때 개수중양경은 $0.745 \pm 0.022 \mu\text{m}$ 였다. HD 기간인 28일 22 KST부터는 개수중양경은 $1.63 \pm 0.078 \mu\text{m}$ 로 이동하였고 조대입자 영역의 부피농도가 증가하여, 황사의 영향을 받기 시작했음을 알 수 있다. 입자크기별 부피농도 분포에서는 HD와 WD 기간에 황사 이후 조대입자 부피농도가 뚜렷하게 증가하였다(그림 8b). 2016년 KORUS-AQ 기간 서해상 기상1호에서 관측한 입자크기별 부피농도 자료 중 내몽골에서 중국 중북부를 거쳐 이동해 온 경우 $0.7 \mu\text{m}$ 와 $2 \mu\text{m}$ 이상에서 두 개의 피크를 보이는 이산형분포로 관측되었으나(Lim *et al.*, 2019), 본 연구의 황사 사례에서는 한 개의 정점만 관측되었다.

황사 유입 직전인 3월 28일 20 KST의 평균 PM_{10} 질량농도는 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 약 2시간 만에 $876 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 약 16배 증가하였다. 그로부터 한 시간 후인 23 KST에는 $1,193 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 첫 번째 피크를 보였고, 이는 황사 유입 전에 비해 20배가 넘는 수준이다. PM_{10} 질량농도는 3월 29일 22 KST까지 $676 \sim 1,384 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (29일 09 KST에 최대)의 고농도로 유지되었다. 조대입자가 증가하는 시기는 PM_{10} 질량농도가 급격히 증가하는 시기와 일치하며(그림 7a, b) 이 시점에 풍향은 남풍계열에서 점차 서풍으로 바뀌고 있었다(그림 7f). 3월 29일 23 KST부터는 여전히 조대입자가 우세하긴 하지만 전일에 비해 부피농도가 50% 이하로 감

소하여 황사의 영향이 상대적으로 약하게 남아 있었다. 황사가 유입된 이후의 각 입경별 분포의 부피중양경은 $5.09 \pm 0.25 \mu\text{m}$ 로 입경별 분포 형태는 유사하나 부피농도는 시간에 따라 변동하는 것을 볼 수 있다(그림 8b).

3.2.2 광학 특성

황사의 영향을 받는 기간 동안 에어로졸 광산란계수(550 nm)가 크게 증가하였는데, HD 기간에는 $568.4 \pm 183.6 \text{ Mm}^{-1}$ (최댓값 824.0 Mm^{-1})이었고, 황사 유입 하루가 지난 이후 WD 기간에는 $78.3 \pm 45.1 \text{ Mm}^{-1}$ 로 감소했다(그림 7c). BD 일부 기간(17~19 KST, 3월 28일)에 네펠로미터 밸브 오류로 유효한 값이 관측되지 않았다. BD 기간에는 미세입자가 우세하였고 이때 광산란계수 평균은 567.1 Mm^{-1} 으로 같은 황사 기간의 평균과 유사하였다.

에어로졸 직경이 커질수록 광산란효율은 감소하는데 황사가 영향을 준 기간 동안(3월 28일 22 KST 이후) PM_{10} 질량농도에 대한 광산란계수의 비율인 질량산란 효율(mass scattering efficiency, 이하 MSE)은 황사 유입 전에 비해 급격하게 낮아졌다(그림 9a). 550 nm 에서의 PM_{10} 에 대한 MSE는 황사 유입 전인 3월 28일 15~21 KST 사이에 $5.3 \pm 3.8 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었는데, HD 기간에는 0.65 ± 0.19 ($0.37 \sim 0.93$) m^2/g 으로 약 1/8로

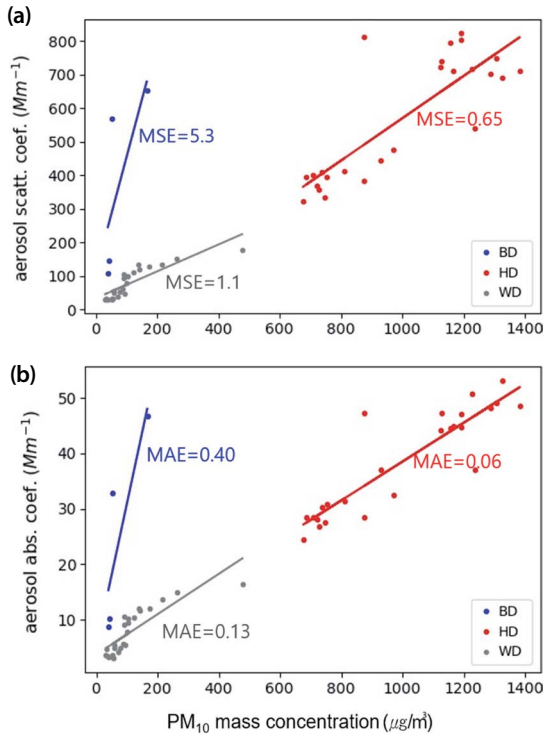


Fig. 9. (a) Mass scattering efficiencies (at 550 nm) and (b) mass absorption efficiencies (at 550 nm) according to PM_{10} mass concentration for BD (before dust), HD (heavy dust) and WD (weak dust) cases.

감소했다. 이 값은 이스라엘에서 관측된 황사 중 조대입자의 MSE ($0.52 m^2/g$) (Andreae *et al.*, 2002), 중국 고비사막 부근에서 관측된 PM_{10} 의 MSE ($0.25\sim 0.77 m^2/g$) (Bi *et al.*, 2017)와 유사한 수준이다. 또한, 황사 유입 후 하루가 지난 WD 기간에는 $1.1 \pm 0.52 m^2/g$ 으로 HD 기간에 비해 약 60% 증가하였다. Hand and Malm (2007)에서 보고한 조대입자 dust에 대한 MSE인 $0.7 \pm 0.2 m^2/g$ 과도 비슷하였다. 혼합 입자의 MSE에 대해서는 선행 연구마다 다른 결과를 제시하고 있다. 상대습도가 높은 환경에서 입자의 흡습성장으로 인해 MSE가 증가된 사례가 있으나, 본 연구의 광산란계수는 유입 공기에 가열을 하여 상대습도를 40% 이하로 유지하였기 때문에 흡습성장에 의해 산란 증가 효과는 거의 없을 것으로 생각한다. MSE는 크기 분

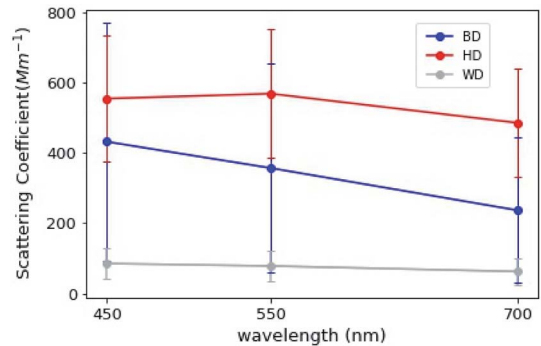


Fig. 10. Wavelength dependence of aerosol light scattering coefficients for BD (before dust, blue), HD (heavy dust, red), and WD (weak dust, gray) period.

포, 결합 상태, 오염도 등에 따라 달라질 수 있으며, 오염된 환경에서는 MSE가 큰 입자크기로 성장하기 때문에, 산출 지역과 환경에 따라 다양한 값이 보고되고 있다 (Titos *et al.*, 2012; Hand and Malm, 2007; Lowenthal and Kumar, 2004; Andreae *et al.*, 2002; Howell and Huebert, 1998). 광산란효율이나 광흡수효율은 에어로졸의 복사강제력 기여도와 직접 관계가 있으며 에어로졸의 조성, 산출 지역, 시간에 따른 변동이 크기 때문에, 관측 결과를 활용한 에어로졸의 광학 기여도에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

한편, 황사가 관측되는 동안 파장별 광산란계수의 파장의존성은 비황사 시와 구분된다. 가시광선 영역에 더욱 민감한 미세입자가 우세한 경우에는 파장이 커짐에 따라 광산란계수는 작아지는데, 보통의 대기 중 에어로졸은 미세입자 영역의 수농도가 가장 크기 때문에 이러한 파장의존성을 보인다. 그러나 상대적으로 미세입자 영역의 수가 감소하고 조대입자가 크게 증가할 경우에는 이러한 파장의존성을 따르지 않을 수 있다. 대표적으로 짙은 황사가 이에 해당하는데, 본 연구에서는 황사가 유입되어 미세입자가 감소하고, 조대입자가 우세해지면서 광산란계수의 파장의존성이 약해진 것으로 관측되었다 (그림 10). 파장의존성은 산란옹스트롬지수 (scattering Ångström exponent, 이하 SAE)로 나타낼 수 있는데, 네펠로미터 파

장별 광산란계수로부터 산출한 SAE (450~700 nm) 는 BD 기간에 1.7~1.8이었으나 HD 기간에는 평균 0.29 ± 0.035 (최솟값 0.26)로 감소하여 황사 기간 중 조대입자가 우세했음을 보여준다(그림 7c, 10). 한편, 이처럼 SAE가 0에 가깝거나 음수로 나타나는 에어로졸 광학 특성은 선행 연구에서 밝혀진 황사 발원지 부근과 비슷한 수준으로 볼 수 있다(Valenzuela *et al.*, 2015; Andreae *et al.*, 2002). 황사의 영향이 다소 약해진 WD 기간의 광산란계수(550 nm)는 HD 기간의 약 50% 수준인 177 Mm^{-1} 으로 감소하였다. 또한 파장별 광산란계수는 450 nm에서 가장 높고, 700 nm에서 가장 낮은 일반적인 에어로졸과 같은 파장의존성을 보였고, 이때의 SAE는 1.09 ± 0.23 으로 나타났다(그림 7c, 10).

에살로미터로 관측한 파장별 광흡수계수를 파장과 광흡수계수 간 멱법칙(power law)을 이용하여 네펠로미터의 파장(450, 550, 700 nm)에 해당하는 광흡수계수로 변환하였다. 미세먼지가 우세한 BD 기간 동안 550 nm에서의 광흡수계수는 $22.5 \pm 10.1 \text{ Mm}^{-1}$, HD 기간에는 38.5 ± 9.4 (최대 53.2 Mm^{-1})로 증가하였고, WD 기간에는 $7.7 \pm 4.1 \text{ Mm}^{-1}$ 으로 가장 낮았다(그림 7d).

황사가 유입된 3월 28일 22 KST 이후 PM_{10} 질량 농도에 대한 550 nm 흡수계수의 비율인 질량 흡수 효율(mass absorption efficiency, 이하 MAE)은 MSE와 마찬가지로 황사가 유입됨에 따라 급격하게 감소하였다(그림 9b). 황사 유입 후의 MAE는 0.06 (HD), 0.13 (WD)으로 BD 기간의 0.40에 비해 약 1/6~1/3 수준으로 감소하였다.

황사로 인한 광흡수계수 증가폭은 광산란계수에 비해 크지 않았으나, 짧은 파장에서의 광흡수계수가 긴 파장에 비해 훨씬 강한 것으로 관측되었다. 즉, 황사 기간 동안 광흡수계수는 광산란계수와 달리 파장의존도가 뚜렷하였다(그림 7c, d). 흡수옹스트롬 지수(450~700 nm, absorption Ångström exponent, 이하 AAE)는 황사 유입 전 1.19 ± 0.06 이었으나, 황사가 유입되면서 BD 기간에는 2.64 ± 0.10 , 이후 WD 기간에는 1.89 ± 0.12 로 황사 유입 직전에 비해 높은 값이 유

지되었다. 순수한 블랙카본(Black carbon, 이하 BC)의 AAE는 거의 1에 가까운 반면 황사와 브라운카본(Brown carbon, 이하 BrC) 등의 입자는 짧은 파장대에서 흡수가 강하게 일어나는 것으로 알려져 있다(Moosmüller *et al.*, 2011; Yang *et al.*, 2009; Sokolik and Toon, 1999). 또한 토양에 포함된 산화철(Iron oxides)은 짧은 파장(자외선 부근, 청색광)의 빛을 강하게 흡수하므로(Alfaro *et al.*, 2004) 대기 에어로졸 중 토양 입자가 우세할 경우 AAE는 2보다 크게 평가되기도 하는데, Yang *et al.* (2009)에서도 중국 내 황사의 영향을 받은 사례에서 AAE가 0.6~3.2 사이로 산출된 바 있다.

지표 실지 관측 에어로졸의 SAE와 AAE를 이용한 에어로졸 유형 구분에 따르면(Schmeisser *et al.*, 2017) 본 연구의 BD와 황사 기간(HD, WD)의 에어로졸은 각각 BC 우세와 황사/BC/BrC 혼합으로 분류된다. 선행 연구에서 안면도, 고산의 에어로졸은 평균적으로 BC가 우세한 형태로 분류되었는데(Schmeisser *et al.*,

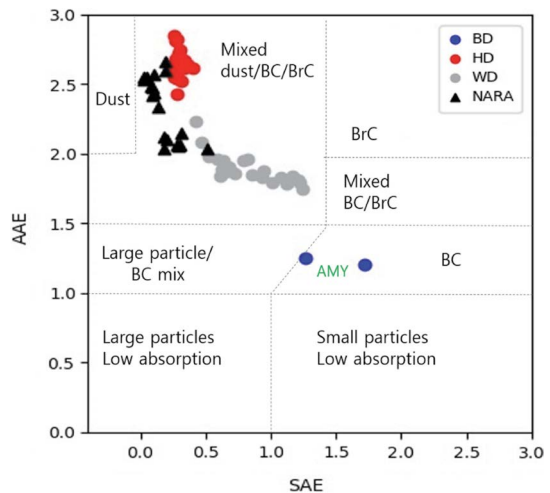


Fig. 11. Aerosol type classification for BD (blue), HD (red), and WD (grey) period with scattering Ångström exponent (SAE) and absorption Ångström exponent (AAE). Black triangles are from NARA aircraft observation at the altitude between 450~900 m. Aerosol type classification according to Schmeisser *et al.* (2017). The position of green colored 'AMY' denotes the average aerosol type for Anmyeon-do GAW station during 2011~2014.

2017), 서해상 고농도 에어로졸 역시 안면도, 고산 등에서 관측된 에어로졸과 비슷한 기원을 가질 수 있는 가능성을 보여준다(그림 11). 다만, 사례에 따라 에어로졸 유형과 기원이 다를 수 있으며, 탄소 에어로졸의 혼합으로 분류된 만큼 서해상 탄소 에어로졸에 대한 지속적인 관측도 필요할 것으로 보인다.

3.2.3 화학 특성

실시간으로 관측된 한 시간 간격의 이온성분의 변동은 상대적인 증감을 알기 쉽도록 당량농도로 표현하였다(그림 7e). BD 기간에 인위적 기원의 2차 오염 물질인 질산염, 황산염, 암모늄의 농도가 급격하게 증가하였다. 이들 농도는 황사 유입 직전인 3월 28일 21 KST에 각각 24.4, 7.4, 9.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최댓값으로 이온성분 전체 농도(60.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 68%를 차지하였으며, 황사가 유입됨에 따라 점점 감소하였다. 이와 동시에 토양에서 주로 기원하는 것으로 알려진 칼슘 이온(non sea-salt Ca^{2+})의 농도가 증가하였는데 3월 29일 03~08 KST 사이에 5.6~6.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 총 이온 성분 중에서 칼슘 이온(non sea-salt, Ca^{2+})이 차지하는 질량 비율은 황사 유입 전 0.5%였으나, 황사가 유입된 후에는 13~21%로 크게 증가하였다. 칼슘 이온 농도가 가장 높은 3월 29일 3~8 KST 동안 인위적 기원의 2차 오염물질 농도도 다시 증가하는데, 이때 입자크기별 부피농도 분포에서 1 μm 이하 입자의 농도가 증가하지 않은(그림 7a) 것으로부터 이들 성분은 1 μm 이상 크기 입자로 존재했다고 추정할 수 있다. 또한, 양이온 중 칼슘의 당량농도가 암모늄의 당량농도보다 2~10배 높은 것으로 보아 대부분의 질산염이나 황산염이 칼슘과 결합한 상태였을 것으로 판단된다. 이는 산성물질의 중화 기여도인 중화인자(neutralization factor, NF)로 설명이 가능하다. 대기 중 산성물질의 중화는 암모니아, 칼슘, 마그네슘 등이 기여하고 있고, 특히 암모니아와 칼슘에 의한 기여도가 크다고 알려져 있다(Akpoa *et al.*, 2015). 암모니아와 칼슘 중화인자는 BD 기간에는 각각 0.26와 0.02, HD 기간에는 각각 0.09와 0.34, WD 기간에 각각 0.12와 0.38

로, 황사 영향을 받는 동안 칼슘에 의한 중화영향이 더 컸다. 즉, BD 기간에는 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 와 NH_4NO_3 그리고 황사 기간(HD와 WD)에는 CaSO_4 와 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 의 상태로 결합되었을 가능성이 높다.

3.2.4 항공기를 이용한 에어로졸 연직 분포 관측

3월 29일에는 기상항공기 나라호를 이용하여 서해상의 에어로졸 연직분포를 관측하였다. 나라호는 3월 29일 12:35 KST에 김포공항을 출발하여 서해상 기상1호 이동 경로 상공을 남북으로 왕복한 후 16:10 KST 경 김포공항으로 복귀하였다. 기상1호 운항 경로(35°N~37°N, 124.4°E) 상공으로 이동하면서 최북 지점(약 37°N, 고도 5 km)에서 나선형으로 고도 450 m까지 하강하였으며(14:07 KST), 이후 북위 35°N까지 같은 고도로 약 5분간 운항하였다. 이후, 300 m씩 상승하며 남하하다가 최남 지점(14:56 KST)부터는 고도 4.5 km까지 상승한 후 김포공항으로 복귀하였다(그림 12).

항공기에서 sky-OPC로 관측한 에어로졸 크기별 부피농도 분포를 살펴보면 대부분의 구간에서 조대입자 농도가 우세하게 관측되었고, 이로부터 항공기가 운항한 대부분 구간에서 황사의 영향을 받은 것으로 볼 수 있다(그림 13a). 다만 조대입자 농도는 상대적으로

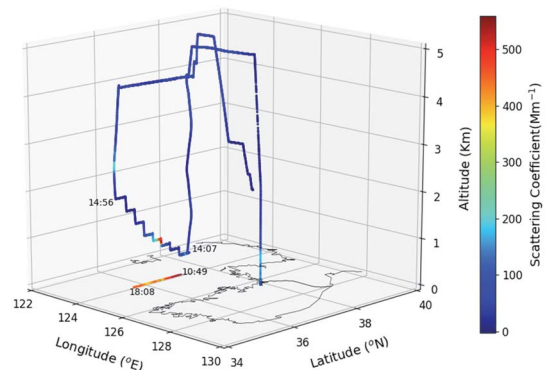


Fig. 12. The routes of the Gisang No.1 (red) and the NARA (blue) during 2021 YES-AQ campaign over the Yellow Sea. The color indicates aerosol light scattering coefficients measured onboard the Gisang No.1 and the NARA.

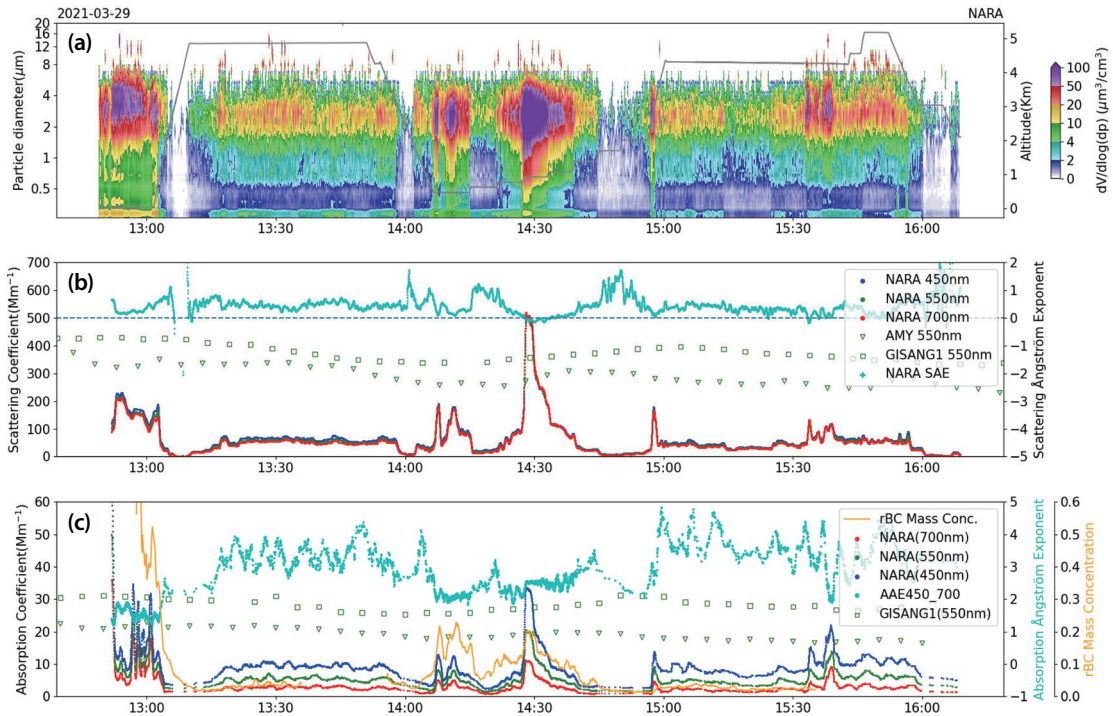


Fig. 13. (a) Aerosol volume size distribution according to the altitude (blue solid line indicates the mission area over the Yellow Sea, at the latitude between 35°N and 37°N and longitude of 124°24'E), (b) aerosol light scattering coefficients at 3 wavelengths (blue, green, red) and scattering Ångström exponent (light blue), and (c) aerosol light absorption coefficients at 3 wavelengths (blue, green, red) and absorption Ångström exponent (light blue) onboard the NARA aircraft on 29 March, 2021. Aircraft data are plotted as 30 second moving average. Aerosol light scattering coefficients and absorption coefficients at 550 nm measured at Anmyeon-do GAW station and onboard the Gisang No. 1 were marked with green colored open circle and open triangle, respectively.

낮은 고도에서 고농도로 관측되었고, 입자크기 분포와 농도는 위도에 따른 차이를 보였다. 항공기 출발지점인 김포공항 상공에서는 조대입자가 우세했을 뿐 아니라, 미세입자 농도도 관측 전 구간 중 가장 높았다. 김포공항을 출발하여 상승하는 구간에서 관측 고도가 2 km를 넘어가면서부터 입자 농도는 점차 감소하였고, 서해상 임무 시작 구간인 37°N, 124.4°E에서 나선 모양으로 하강함에 따라 고도 2 km부터 조대입자와 미세입자의 농도가 다시 증가하기 시작하였다. 조대입자 농도는 36.5°N, 124.4°E, 고도 0.9 km 구간에서 최대로 관측되었다(그림 13a).

항공기에서 관측된 광산란계수(550 nm)는 김포공항 상공에서는 100~200 Mm^{-1} 사이였으나 관측고도

가 상승하고 서해상에 도달할 때까지는 60 Mm^{-1} 이하로 관측되었다(그림 13b). 관측 구간 중 최댓값은 545.7 Mm^{-1} (30초 평균, 14:27, 36.5°N, 124.4°E, 고도 0.9 km)으로 조대입자 농도가 가장 높았던 구간과 일치한다(그림 12, 13b). 항공기에서 관측한 광산란계수로부터 산출한 SAE는 조대입자 농도가 가장 높은 구간(고도 0.9 km)에서 -0.067 ± 0.13 로 광산란계수의 파장의존도가 거의 없었으며, 3.2.2절에서 기술한 바와 같이 짙은 황사의 광산란 특성을 보였다. 특히, 기상1호에서 산출된 SAE인 0.26보다 더 낮은데, 이는 SAE가 0에 가깝거나 음수로 나타나는 황사 발원지의 값과 유사하다.

광흡수계수는 출발지인 김포공항에서 최대 49.9

Mm^{-1} 으로 가장 높았고, 서해 상공에서는 최대 $20.5 Mm^{-1}$ (3월 29일 14:28 KST)으로 관측되었다(그림 13c). AAE의 경우 김포공항에서는 1.2~1.4인 반면, 서해 상공에서 황사의 영향을 받은 구간에서는 1.9~2.7로 더 높게 산출되었는데, 이는 sky-OPC, SP2 자료 등을 통해 설명할 수 있다. 에어로졸에 의한 빛의 흡수에서는, BC의 기여도가 가장 크기 때문에 SP2 자료로 산출한 rBC 농도와 광흡수계수의 시간 변동이 유사하다(그림 13c). 출발지인 김포공항은 BC의 배출이 많아 rBC 농도가 $1.2 \mu g/m^3$ 이상으로 관측 구간 중 가장 높았고, AAE는 순수한 BC의 값인 1에 가까웠다. 항공기가 서해상으로 진입함에 따라 rBC의 농도는 급격하게 감소하여 $0.1 \mu g/m^3$ 수준으로 낮아졌다. 한편, 서해상에서 14:00~14:40 KST 사이에 rBC와 광흡수계수의 농도가 증가하는 구간이 있는데, 이때 sky-OPC 자료에서는 조대입자와 미세입자가 모두 증가했고, rBC의 농도는 $0.2 \mu g/m^3$ 으로 출발지인 김포공항에서 관측된 값의 1/6 이하로 낮은 수준이었다. 그림 13a에서 볼 수 있듯이 미세입자보다는 조대입자의 농도가 우세하였고, 이는 황사의 영향을 받았기 때문이며, AAE가 증가한 것도 같은 이유로 볼 수 있다. BC 이외에 BrC나, 황사 등도 빛을 흡수하므로, rBC의 농도 증가분은 크지 않음에도 불구하고 광흡수계수가 크게 증가한 원인은 고농도 황사가 관측된 구간(고도 0.9 km)의 황사가 기여한 바가 크다고 해석된다.

항공 관측 구간 중 황사 농도가 가장 높은 구간(14:00~14:38 KST, 고도 0.4~0.9 km)의 SAE와 AAE는 각각 0.0~0.5와 1.9~2.7이었으며, 그림 11에서 보는 바와 같이 기상1호에서 관측된 에어로졸과 같은 황사/BC/BrC 혼합형으로 분류된다. 기상1호와 나라호는 에어로졸 인렛의 절단경이 다소 차이가 있고, 광흡수계수 측정장비가 서로 다름에도 불구하고 황사의 영향을 받는 기간의 측정값이나 에어로졸 형태도 유사하게 분류되었다. 이로부터, 항공 관측 기간 동안 서해 상공에서는 최소한 고도 0.9 km 아래로는 광학적으로 같은 유형의 입자가 존재한 것으로 해석된다. 고도가 높아지면서 에어로졸의 농도는 감소하였고, 특

히, 고도 1.8~2.0 km 구간에서는 에어로졸이 거의 관측되지 않았는데, 황사의 분포가 수평적으로 균질하지 않으므로, 이 자료만 가지고는 다른 위도 구간에서도 황사 영향이 없었다고 단정할 수는 없다(그림 13). 항공기를 이용하여 단시간 동안 황사의 분포를 수평, 수직으로 모두 관측하기에는 한계가 있으므로, 황사와 같은 고농도 사례에서 가장 효율적인 비행 경로 설계에 대해 적극적으로 고민할 필요가 있다.

항공기에서 관측된 온위의 수직 감률과 습도의 연직분포가 크게 변하는 고도가 약 1.7과 1.9 km에서 관측되었다(그림 14). 이 고도를 경계로 서로 다른 기원의 공기 덩어리가 서해상에 영향을 준 것으로 판단되며, 이는 그림 5b의 고도별 후방궤적(3월 29일 15 KST)에서 서해 상공 1.8 km 이하와 2.7 km 이상의 고도의 기류가 서로 달랐던 것으로 설명 가능하다. 즉, 해당 지점의 고도 0.45~1.8 km에서는 북서쪽에서 유

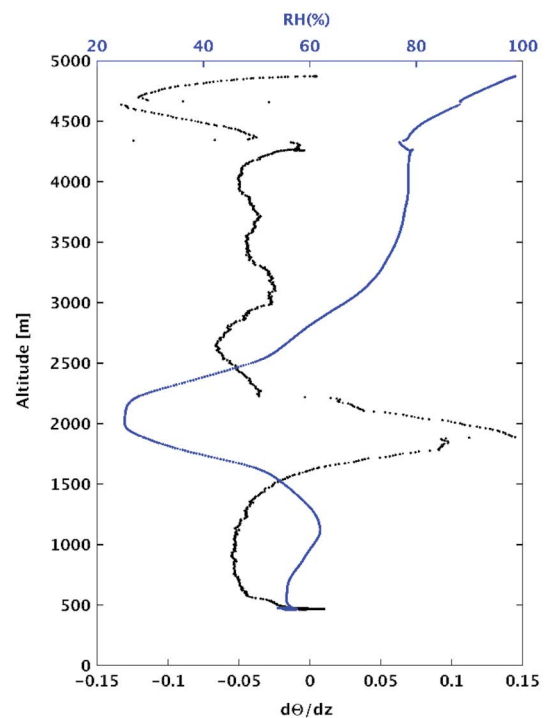


Fig. 14. Vertical distribution of potential temperature gradient (black) and relative humidity (blue) during spiral descent flight mode on 29 March, 2021.

입되는 기류의 영향을 받았고, 황사뿐 아니라 대류권 하층 공기의 영향으로 미세입자도 동시에 관측된 것으로 보이며, 그 이상의 고도에서는 조대입자가 주로 관측되었으나, 그 농도는 1.8 km 이하에 비해서 낮았다.

4. 결 론

2021년 YES-AQ 캠페인 기간 중 기상1호에서 측정된 서해상 짙은 황사의 특성을 분석하였다. 황사가 유입되기 직전인 3월 28일 16~21 KST 사이에는 미세입자가 고농도로 관측되었는데, 이 기간에는 매우 강한 산란을 보이는 에어로졸이 우세하였다. 3월 28일 22 KST부터 짙은 황사의 특징이 나타나기 시작하였는데, 황사의 영향이 가장 뚜렷했던 기간(3월 28일 22 KST~3월 29일 22 KST) 동안 SAE는 최저 0.26으로 황사 발원지 주변과 유사한 값으로 산출되었다. 황사 입자로 인해 짧은 파장의 광흡수가 두드러지게 증가함에 따라 황사 농도가 가장 높은 HD 기간의 AAE는 2.64 ± 0.10 이었다. 이는 SAE와 마찬가지로 황사 발원지 주변에서 보고된 값과 비슷한 수준이다. HD 기간에 미세영역의 입자 농도가 증가하지는 않았으나 이온성분 분석 결과 인위적 기원의 황산염, 질산염 등이 황사와 결합된 형태로 추정되었다.

HD 기간 중 서해상의 기상1호가 운항하는 지점의 상공을 기상항공기를 이용하여 고도별 에어로졸 특성을 관측하였다. 대부분의 구간(고도 0.45~5.0 km)에서 황사의 영향을 받아 조대입자가 관측되었으나, 1.8 km 이하의 고도에서는 조대입자 농도가 더 높을 뿐 아니라 미세입자도 함께 관측되었다.

에어로졸 SAE와 AAE를 이용해 에어로졸 유형을 살펴본 결과 기상1호의 황사 영향 기간과 항공기에서 관측된 에어로졸은 황사/BC/BrC 혼합이며, 기상1호에서 황사 유입 전 미세입자 농도가 높은 기간은 BC가 우세한 형태로 구분되었다.

과거에 보고된 다수의 황사 사례 분석에서처럼 황

사는 인위적 오염물질과 혼재되기도 하고 본 연구에서 제시한 바와 같이 황사 발원지 수준의 광학 특성을 보이기도 한다. 최근 우리나라의 황사 일수가 감소하고 있었지만, 2021년과 같이 이례적으로 황사가 빈번하게 관측되고 고농도로 영향을 줄 수 있으므로 황사에 대한 꾸준한 관심이 필요하다. 또한 황사를 비롯한 에어로졸의 광학 특성 그리고 분포 고도 등은 기후강제력 산출에 있어 여전히 큰 불확실성으로 작용하므로 황사로 인한 기후학적 기여도를 산정하기 위한 연구도 필요할 것으로 보인다.

관측공백 지역인 서해상에서 이루어지는 대기질 입체관측은 우리나라의 배출 영향이 배제되어 국외 유입 오염물질의 특성을 보다 자세히 이해할 수 있고, 해상에서 이루어지는 에어로졸 형성 및 노화(aging) 등 다양한 에어로졸 과정에 대한 과학적 이해를 높일 수 있는 기회를 제공할 수 있는 실험이라고 할 수 있다. 2018년부터 실시된 서해상 대기질 입체관측을 통해 움직이는 해상 관측환경에서 에어로졸 관측을 안정적으로 수행할 수 있는 경험과 노하우를 확보하였고, 에어로졸 물리 특성에만 국한하던 초기 관측에서 벗어나 점차 다양한 에어로졸 관측 요소를 추가하였으며, 2021년부터는 국내외에 연구 결과를 발표하기 시작하였다. 특히, 본 연구는 서해상에서 관측된 고농도 황사에 대한 국내 첫 분석 사례로, 다양한 에어로졸 요소들에 대한 연직 분포 결과뿐 아니라, 입자크기 분포, 정량적/정성적 광학 특성 그리고 실시간 화학성분을 종합적으로 분석한 것에 의의를 둘 수 있다. 또한, 에어로졸 다양한 광학 특성들로부터 서해상의 에어로졸이 안면도와 비슷한 BC, BrC 혼합 유형으로 분류되고, 인위적인 오염물질과 혼합된 황사로 분류되는 등 서해상은 다양한 에어로졸의 영향을 받는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 황사 사례에 대해서만 기술하였지만, 다년간 서해상의 고도별, 위경도별 실제 관측 자료가 축적됨에 따라 서해상에서 이루어지는 에어로졸 과정에 대한 이해를 넓힐 수 있는 기반 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 에어로졸 예측모델이나 인공위성 에어로졸 산출물에 대한 검증 자료,

기후예측모델의 입력 자료 중 에어로졸 기후값 등으로 활용될 수 있다. 또한, 안정적이고 신뢰도 높은 서해상 에어로졸 자료 확보와 더불어 장거리 이동해 오는 반응가스와 온실가스 등에 대한 서해상 입체 관측을 지속적으로 수행함으로써 입자상, 가스상 오염물질 간의 상호 작용을 이해할 수 있는 계기를 마련하고 기후변화 원인물질 입체 감시에 있어 국제적으로도 중요한 역할을 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

이 연구는 ‘황사·연무감시 및 예보기술 개발(KMA 2018-00521)’의 지원으로 수행되었습니다. 국립기상과학원 기상1호, 나라호 운영팀의 지원과 HYSPLIT 모델을 제공해주신 NOAA ARL에 감사드립니다.

References

- Akpoa, A.B., Galy-Lacaux, C., Laouali, D., Delon, C., Liousse, C., Adon, M., Gardrat, E., Mariscal, A., Darakpa, C. (2015) Precipitation chemistry and wet deposition in a remote wet savanna site in West Africa: Djougou (Benin), *Atmospheric Environment*, 115, 110-123.
- Alfaro, S.C., Lafon, S., Rajot, J.L., Formenti, P., Gaudichet, A., Mailié, M. (2004) Iron oxides and light absorption by pure desert dust: An experimental study, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(D8), D08208. <https://doi.org/10.1029/2003JD004374>
- Anderson, T.L., Ogren, J.A. (1998) Determining Aerosol Radiative Properties Using the TSI 3563 Integrating Nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 29(1), 57-69. <https://doi.org/10.1080/02786829808965551>
- Andreae, T.W., Andreae, M.O., Ichoku, C., Maenhaut, W., Cafmeyer, J., Karnieli, A., Orlovsky, L. (2002) Light scattering by dust and anthropogenic aerosol at a remote site in the Negev desert, Israel, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 107(D2), 4008. <https://doi.org/10.1029/2001jd900252>
- Bi, J., Huang, J., Shi, J., Hu, Z., Zhou, T., Zhang, G., Huang, Z., Wang, X., Jin, H. (2017) Measurement of scattering and absorption properties of dust aerosol in a Gobi farmland region of northwestern China - A potential anthropogenic influence, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(12), 7775-7792. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7775-2017>
- Crawford, J.H., Ahn, J.-Y., Al-Saadi, J., Chang, L., Emmons, L.K., Kim, J., Lee, G., Park, J.-H., Park, R.J., Woo, J.H., Song, C.-K., Hong, J.-H., Hong, Y.-D., Lefer, B.L., Lee, M., Lee, T., Kim, S., Min, K.-E., Yum, S.S., Kim, Y.P. (2021) The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1), 00163. <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00163>
- 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(4464), 1522-1524. <https://doi.org/10.1126/science.209.4464.1522>
- Hand, J.L., Malm, W.C. (2007) Review of aerosol mass scattering efficiencies from ground-based measurements since 1990, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(D16), D16203. <https://doi.org/10.1029/2007JD008484>
- Howell, S.G., Huebert, B.J. (1998) Determining marine aerosol scattering characteristics at ambient humidity from size-resolved chemical composition, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 103(D1), 1391-1404. <https://doi.org/10.1029/97JD02404>
- Jeong, G.Y., Kim, J.Y., Seo, J., Kim, G.M., Jin, H.C., Chun, Y. (2014) Long-range transport of giant particles in Asian dust identified by physical, mineralogical, and meteorological analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(1), 505-521. <https://doi.org/10.5194/acp-14-505-2014>
- Kang, Y., Lim, S., Lee, M., Yoo, H.-J. (2021) Vertical distributions of refractory black carbon over the Yellow Sea during the Spring 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 710-728. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.710>
- Kim, D.-R., Cho, W.-J., Choi, M., Kim, J., Cho, A., Kim, S.-K., Kim, J., Moon, K.-J. (2017) Analysis of Aerosol Optical Properties for High Particulate Matters and Light Asian Dust in Seoul Using GOCI, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 233-240. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.233>
- Kim, J.H., Yum, S.S., Lee, Y.G., Choi, B.C. (2009) Ship measurements of submicron aerosol size distributions over the Yellow Sea and the East China Sea, *Atmospheric Research*, 93(4), 700-714. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.02.011>
- Kim, M. (2004) Environmental cooperation in Northeast Asia,

- Impact Assessment and Project Appraisal, 22(3), 191-203. <https://doi.org/10.3152/147154604781765897>
- Kim, Y., Choi, Y.H., Kim, M.K., Paik, H.J., Kim, D.H. (2020) Different adverse effects of air pollutants on dry eye disease: Ozone, PM_{2.5}, and PM₁₀. *Environmental Pollution*, 265(2), 115039. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115039>
- Kim, Y.P., Lee, G., Emmons, L., Park, R., Lin, N.H. (2018) Preface to a special issue "megacity air pollution studies (Maps)," *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 1-4. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.09.maps>
- Ko, H.-J., Song, J.-M., Cha, J.-W., Kim, J., Ryoo, S.-B., Kang, C.-H. (2016) Chemical Composition Characteristics of Atmospheric Aerosols in Relation to Haze, Asian Dust and Mixed Haze-Asian Dust Episodes at Gosan Site in 2013, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(3), 289-304. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.289>
- Lee, C., Jung, S., Kim, J., Yang, H., Ko, H., Yun, J. (2021) Airborne measurements over Korea using the KMA/NIMS atmospheric research aircraft (NARA), *Proceeding of the EGU General Assembly Conference*, 18367.
- Lee, S., Kim, J., Choi, M., Hong, J., Lim, H., Eck, T.F., Holben, B.N., Ahn, J.Y., Kim, J., Koo, J.H. (2019) Analysis of long-range transboundary transport (LRTT) effect on Korean aerosol pollution during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 204, 53-67, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.020>
- Li, S., Kim, Y., Kim, J., Takeki, S., Goo, T.Y., Labzovskii, L.D., Byun, Y.H. (2020) In situ aircraft measurements of CO₂ and CH₄: Mapping spatio-temporal variations over western Korea in high-resolutions, *Remote Sensing*, 12(18), 3093. <https://doi.org/10.3390/RS12183093>
- Lim, Y.-K., Kim, J., Lee, H.C., Lee, S.-S., Cha, J.-W., Ryoo, S.B. (2019) Aerosol physical charact Aerosol Physical Characteristics over the Yellow Sea During the KORUS-AQ Field Campaign: Observations and Air Quality Model Simulations, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55, 629-640. <https://doi.org/10.1007/s13143-018-00100x>
- Lowenthal, D.H., Kumar, N. (2004) Variation of mass scattering efficiencies in IMPROVE, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 54(8), 926-934. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470969>
- Moon, Y.-S., Lim, Y.-K., Lee, K. (2011) An estimation of concentration of Asian Dust (PM₁₀) using WRF-SMOKE-CMAQ (MADRID) during springtime in the Korean Peninsula, *Journal of Korean Earth Science Society*, 32(3), 276-293, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKES.2011.32.3.276>
- Moosmüller, H., Chakrabarty, R.K., Ehlers, K.M., Arnott, W.P. (2011) Absorption Ångström coefficient, brown carbon, and aerosols: Basic concepts, bulk matter, and spherical particles, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 1217-1225. <https://doi.org/10.5194/acp-11-1217-2011>
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2021) Rport of Asian Dust cases in 2020, 172pp.
- Nickovic, S., Cuevas, E., Baldasano, J., Terradellas, E., Nakazawa, T., Baklanov, A. (2015) Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (SDS-WAS) Science and Implementation Plan 2015-2020, World Meteorological Organization World Weather Research Programme, WWRP 2015-5. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3383
- Ogren, J.A., Wendell, J., Andrews, E., Sheridan, P.J. (2017) Continuous light absorption photometer for long-Term studies, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(12), 4805-4818. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4805-2017>
- Park, D.-H., Kim, S.-W., Kim, M.-H., Yeo, H., Park, S.S., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kim, C.-H. (2021a) Impacts of local versus long-range transported aerosols on PM₁₀ concentrations in Seoul, Korea: An estimate based on 11-year PM₁₀ and lidar observations, *Science of The Total Environment*, 750, 141739, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141739>
- Park, M., Yun, S., Kim, N., Jeong, M., Yoo, H.-J., Kim, J.E., Park, J., Lee, M., Sung, M., Ahn, J. (2021b) Characterization of submicron aerosols over the Yellow Sea measured onboard the Gisang 1 research vessel in the spring of 2018 and 2019, *Environmental Pollution*, 284, 117180. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117180>
- Park, S. (2019) Change in mass size distributions of ambient aerosol particles during Asian Dust storm event in late fall at an urban site of Gwangju, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 35(4) 502-515, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.502>
- Prospero, J.M. (1999) Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the southeastern United States, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(7), 3396-3403. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3396>
- Pun, V.C., Kazemparkouhi, F., Manjourides, J., Suh, H.H. (2017) Long-Term PM_{2.5} Exposure and Respiratory, Cancer, and Cardiovascular Mortality in Older US Adults,

- American Journal of Epidemiology, 186(8), 961-969. <https://doi.org/10.1093/aje/kwx166>
- Schmeisser, L., Andrews, E., Ogren, J.A., Sheridan, P., Jefferson, A., Sharma, S., Kim, J.E., Sherman, J.P., Sorribas, M., Kalapov, I., Arsov, T., Angelov, C., Mayol-Bracero, O.L., Labuschagne, C., Kim, S.W., Hoffer, A., Lin, N.H., Chia, H.P., Bergin, M., Sun, J., Liu, P., Wu, H. (2017) Classifying aerosol type using in situ surface spectral aerosol optical properties, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(19), 12097-12120. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12097-2017>
- Schwarz, J.P., Gao, R.S., Fahey, D.W., Thomson, D.S., Watts, L.A., Wilson, J.C., Reeves, J.M., Darbeheshti, M., Baumgardner, D.G., Kok, G.L., Chung, S.H., Schulz, M., Hendricks, J., Lauer, A., Kärcher, B., Slowik, J.G., Rosenlof, K.H., Thompson, T.L., Langford, A.O., Loewenstein, M., Aikin, K.C. (2006) Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(D16), D16207. <https://doi.org/10.1029/2006JD007076>
- Shin, D., Kim, J.E., Chung, C.-Y., Yoo, H.-J. (2022) Aerosol physical characteristics over the Yellow Sea using optical particle counter measurement data onboard Gisang 1 vessel during YES-AQ campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 203-219, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.203>
- Sokolik, I.N., Toon, O.B. (1999) Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D8), 9423-9444. <https://doi.org/10.1029/1998JD200048>
- Song, S., Kim, J.E., Lim, E., Cha, J.-W., Kim, J. (2015) Physical, Chemical and Optical Properties of an Asian Dust and Haze Episodes Observed at Seoul in 2010, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 131-142. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.131>
- Sugiyama, T., Ueda, K., Seposo, X.T., Nakashima, A., Kinoshita, M., Matsumoto, H., Ikemori, F., Honda, A., Takano, H., Michikawa, T., Nitta, H. (2020) Health effects of PM_{2.5} sources on children's allergic and respiratory symptoms in Fukuoka, Japan, *Science of The Total Environment*, 709, 136023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136023>
- Sun, J., Zhang, M., Liu, T. (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*, 105, 10325-10333.
- Titos, G., Foyo-Moreno, I., Lyamani, H., Querol, X., Alastuey, A., Alados-Arboledas, L. (2012) Optical properties and chemical composition of aerosol particles at an urban location: An estimation of the aerosol mass scattering and absorption efficiencies, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(D4), D04206. <https://doi.org/10.1029/2011JD016671>
- Uno, I., Eguchi, K., Yumimoto, K., Takemura, T., Shimizu, A., Uematsu, M., Liu, Z., Wang, Z., Hara, Y., Sugimoto, N. (2009) Asian dust transported one full circuit around the globe, *Nature Geoscience*, 2(8), 557-560. <https://doi.org/10.1038/ngeo583>
- Valenzuela, A., Olmo, F.J., Lyamani, H., Antón, M., Titos, G., Cazorla, A., Alados-Arboledas, L. (2015) Aerosol scattering and absorption Ångström exponents as indicators of dust and dust-free days over Granada (Spain), *Atmospheric Research*, 154, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.015>
- Wang, H.J., Chen, H.P. (2016) Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: Roles of climate change, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(6), 4205-4211. <https://doi.org/10.5194/acp-16-4205-2016>
- World Meteorological Organization (WMO) (1992) International Meteorological Vocabulary, In WMO Technical Publication No. 182 (2nd ed.).
- Yang, M., Howell, S.G., Zhuang, J., Huebert, B.J. (2009) Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China - Interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), 2035-2050. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2035-2009>
- Yang, Y., Liao, H., Lou, S. (2016) Increase in winter haze over eastern China in recent decades: Roles of variations in meteorological parameters and anthropogenic emissions, *Journal of Geophysical Research*, 121(21), 13050-13065. <https://doi.org/10.1002/2016JD025136>
- Yoo, H., Kim, K.A., Lee, Y., Zihui, T., Yoo, H.-J., Kim, J., Ko, H.-J., Sung, M.-Y., Choi, J.-S., Park, J.-S. (2021) Characteristics of Carbonaceous and Organic Components in PM_{2.5} over the Yellow Sea, *Atmosphere*, 31(3), 267-282, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.3.267>

Authors Information

김정은 (국립기상과학원 기후연구부 연구관)
(narci76@korea.kr)

정원석 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)
(wsjung@korea.kr)

서원익 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)
(wiseo@korea.kr)

이선란 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)
(sunranlee@korea.kr)

오상민 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)
(sangmin80@korea.kr)

신대근 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)
(shingeun@korea.kr)

고희정 (국립기상과학원 기후연구부 연구사)
(khj0614@korea.kr)

유희정 (국립기상과학원 기후연구부 연구사)
(heejuwoo@korea.kr)

정주용 (국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구관)
(cychung@kma.go.kr)

김연희 (기상청 수치자료응용과 연구관)
(kyh@kma.go.kr)