



논문

2019년 YES-AQ 캠페인 중 서해상 입체관측을 통한 에어로졸 특성 분석

Analysis of Aerosol Characteristics through Stereoscopic Observation of the West Sea during the 2019 YES-AQ Campaign

정민재, 유희정, 서원익, 신대근, 고희정, 오상민, 정주용¹⁾, 김정은*
국립기상과학원 기후연구부, ¹⁾국립기상과학원 기후변화예측연구팀

Min Jae Jeong, Hee-Jung Yoo, Wonick Seo, Daegeun Shin, Hee-Jung Ko, Sangmin Oh, Chu-Yong Chung¹⁾, Jeong Eun Kim*

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

접수일 2022년 8월 25일
수정일 2022년 10월 4일
채택일 2022년 10월 20일

Received 25 August 2022
Revised 4 October 2022
Accepted 20 October 2022

*Corresponding author
Tel: +82-(0)64-780-6624
E-mail: narci76@korea.kr

Abstract We analyzed the characteristics of aerosol inflow event observed during May 21~22, 2019 through the Yellow Sea-Air Quality (YES-AQ) observation campaign. Aerosol plumes were observed between Shandong Peninsula and Gyeonggi Bay on May 21, 2019 through the Geostationary Korean Operational Multi-Purpose SATellite-2A (GK-2A) imagery. Based on the NARA aircraft observations, the fine particle increased when passing the aerosol plume at an altitude of 1.5 km. Also, aerosol light scattering and absorption coefficients increased to 110.3 Mm^{-1} and 6.3 Mm^{-1} , respectively. For the case of May 22, two different aerosol plumes were observed on the GK-2A satellite imagery. When NARA aircraft passing the north plume at an altitude of 1.5 km, the light scattering coefficient increased to 89.9 Mm^{-1} and the light absorption coefficient increased to 4.0 Mm^{-1} . The light scattering coefficient at an altitude of 500 m when passing the south plume 98.2 Mm^{-1} , similar to that of the north plume, while the light absorption coefficient was 8.0 Mm^{-1} . As a result of backward trajectory analysis, it was analyzed that the origin and movement path of the north plume and the south plume flowed into Korea through the Yellow Sea were different. In particular, it is presumed that the south plume contained a lot of anthropogenic absorbing aerosols, as it passed over the areas at lower altitudes for a longer time compared to that of the north plume.

Key words: YES-AQ, Aerosol, Aircraft measurement, Yellow Sea, Optical coefficients

1. 서론

에어로졸이란 공기 중에 부유하는 작은 고체 및 액체 입자들을 총칭한다(Willeke and Baron, 1993). 대기 중에 고체상, 액체상의 형태로 부유하는 에어로졸은 빛의 산란과 흡수를 일으키면서 시정감소, 강우 패턴 변화, 태양복사 수지 등 기상 및 기후변화에 영향을 미친다. 에어로졸의 이러한 직·간접적 영향은 과학의 발전으로 인해 정량적인 평가는 이루어지고 있

으나 여전히 불확실성이 큰 실정이다(IPCC, 2021). 에어로졸의 평균 체류시간은 1일에서 1주일 정도로 알려져 있으며, 보통 수백~수천 km까지 이동한다(Song *et al.*, 2009). 특히, 동북아시아 지역의 급격한 산업화는 지역의 대기오염을 심화시키고 있고(Lee *et al.*, 2019a; Yang *et al.*, 2016), 기류의 이동에 의한 에어로졸의 장거리 이동은 인접 국가의 문제로 광역화되고 있다(Han *et al.*, 2006).

편서풍대에 위치한 한반도는 서풍의 영향을 주로

받으며 기압배치에 따른 기류의 영향을 받는다. 특히 서해는 기류의 흐름에 따라 중국뿐만 아니라 한반도에서 발생한 대기 오염물질이 공존하므로 동북아시아 지역의 에어로졸이 장거리 이동과정에서 변질되는 것을 직접적으로 관측할 수 있는 최적의 위치이다. 그러나, 서해는 인공위성의 에어로졸 산출물을 제외하고는 장거리 이동 에어로졸에 대한 관측 정보가 부족한 실정이다(Kim *et al.*, 2022).

우리나라는 1997년 황사를 포집한 후 실험실에서 분석하는 방법으로 서해상 에어로졸 항공관측을 시작하였으며(Kim *et al.*, 1997), 관측장비가 발전함에 따라 SO₂, NO_x, O₃ 등 가스상 물질 및 입자의 수농도까지 관측하기 시작하였다(Jang *et al.*, 2010). 기상청에서는 환경기상감시, 위험기상 선행관측 등의 목적으로 2017년 기상관측항공기(KMA/NIMS Atmospheric Research Aircraft, NARA, beechcraft Inc. King-air 350HW, 이하 나라호)를 도입하고 활발하게 항공관측을 수행하고 있다(Lee *et al.*, 2019b). 서해상에서의 항공관측은 장거리 이동 에어로졸의 3차원 농도분포를 이해하고 대기질 예측의 정확도를 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 관측 공백 지역에서의 장기 에어로졸 관측을 통해 기후변화와 관련된 과학 정보를 제공함으로써 관련 정책 수립 시 과학적 근거로 활용될 수 있다. 하지만, 항공관측은 비용이 많이 소요되고, 항공기의 재원이나 기상 상황에 따라 비행시간, 관측범위, 탑재할 수 있는 관측장비의 중량과 크기 제한 등의 어려움이 있다.

관측 공백 지역인 서해상에서의 관측을 위해 국내에서 여러 관측 캠페인들이 진행되었고(Crawford *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2009), 국립기상과학원에서는 2018년부터 항공, 선박, 지상을 아우르는 서해상 대기질 입체관측 YES-AQ (Yellow Sea-Air Quality) 캠페인을 매년 봄철(3~5월)에 수행하고 있으며, 이에 따라 서해상 에어로졸의 물리 특성, 탄소성분의 화학 특성 및 연직 특성, 고농도 황사 사례분석 등의 결과가 꾸준히 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2022; Shin *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2021; Park *et al.*,

2021; Yoo *et al.*, 2021).

본 연구에서는 2019년 진행한 YES-AQ 캠페인 기간 중 5월 21일과 22일 양일간의 서해상 항공기, 선박, 지상, 위성의 입체관측 사례를 분석하여, 에어로졸 플룸의 물리, 광학 특성을 확인하고자 하였다. 서해상의 실지(in-situ) 관측을 통해 누적된 입체관측 자료의 다양한 사례 분석은 관측 공백 지역인 서해상의 에어로졸 배경농도 및 장거리 이동 에어로졸의 특성 규명에 크게 이바지할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 관측 방법

2019년 YES-AQ 캠페인은 4월 15일부터 6월 13일까지 진행되었으며, 기상항공기 나라호, 기상관측선 기상1호, 지상의 안면도 기후변화감시소에서 관측을 수행하였다(그림 1). 이 기간 중 5월 21일(13:30~16:30 KST)과 22일(10:15~12:45 KST)에 나라호는 그림 2의 운항경로를 따라 항공관측을 수행하였다. 나라호의 임무 구간은 서해 상공의 위도 34°48'~36°44'N, 경도 124°12'~124°37'E이며, 고도는 그림 2의 P1 고도(약 900 m)에서부터 남하를 시작하여 5분 간격으로 약 90 m 하강하여 P2 고도(약 450 m)에 도착한 후, P3 지점까지 고도를 유지하고, P3 지점부터 P4 지점까지는 상승하며 관측을 수행하였다.

선박관측을 수행한 기상1호는 캠페인 기간 중 인천과 목포의 위도에 해당하는 구간(37°20'~35°20'N)의, 124°17'E에서 매일 일출 시부터 일몰 시까지 하루는 남하(37°20'N → 35°20'N)하고 다음날은 북상(35°20'N → 37°20'N)하는 방식으로 운항하였다. 본 연구에서는 5월 21일 13:30~5월 22일 13:00까지의 관측 자료를 활용하였다. 지상관측 지점인 안면도 기후변화감시소(충남 태안군 안면읍, 36°32'N, 126°19'E)는 서울에서 남서쪽으로 약 130 km 떨어져 있으며, 반경 100 km 이내에 반도체 산업단지와 북동쪽과 남동쪽 약 35 km 지점에 화력발전소가 존재하며, 서쪽과 남쪽은 갯벌



Fig. 1. KMA observation resources for 2019 YES-AQ campaign. Aircraft (NARA) (a), Anmyeon-do GAW station (b), and Vessel (Gisang No.1) (c).

로 이루어진 해안이 존재한다(Lee *et al.*, 2019c). 또한, 1999년에 안면도 기후변화감시소는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 지구 대기감시(Global Atmosphere Watch, GAW) 프로그램의 지역급 관측소로 등록되었고, 2000년 8월에 지구대기감시관측소로 명칭이 변경되었다(KMA, 2021).

2.2 관측장비 및 관측항목

나라호와 기상1호, 안면도 기후변화감시소에서는 에어로졸의 물리, 광학 특성 관측을 위한 다양한 장비

가 탑재 또는 설치되었다. 에어로졸의 물리 특성인 입자 크기별 수 농도 및 질량농도 관측을 위해, 나라호에서는 항공기용 광학입자계수기(Sky-OPC; Sky-Optical Particle Counter, Grimm Inc.)를 기상1호와 안면도에서는 공기역학입자계수기(APS; Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc., TSI 3321)를 사용하였다. 항공관측 특성상 관측 자료의 순간 변동성이 커 본 연구에서는 30초 이동평균 자료를 사용하였다. Sky-OPC로 산출된 PM 질량농도는 중량법 기준장비와의 등가성이 확보되지 않은 자료로, 본 연구에서는 농도 변화 추

세를 보기 위한 목적으로만 활용하였다.

에어로졸 광학 특성 분석을 위해 파장별 광산란계수와 광흡수계수를 관측하였다. 나라호, 기상1호, 안면도 모두 동일한 광산란계수측정기(Nephelometer, TSI Inc., TSI 3563)를 사용하였다. 광산란계수측정기는 에어로졸에 의해 산란되는 빛을 기하학적으로 적분하여

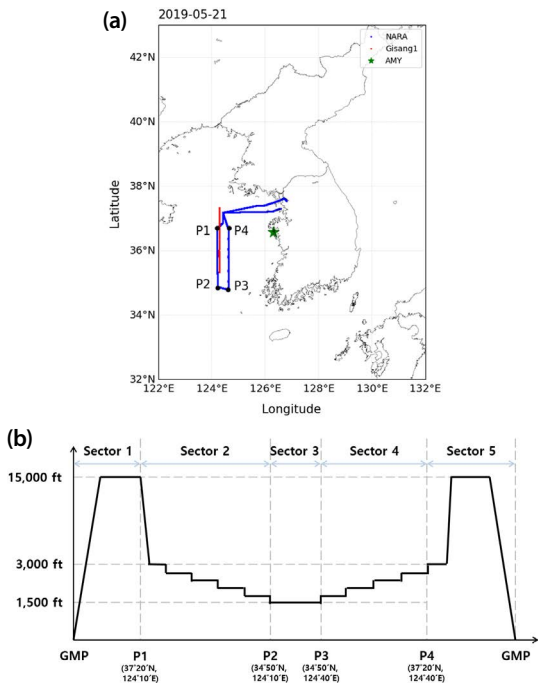


Fig. 2. The routes of NARA research aircraft (blue) and Gisang No.1 research vessel (red) and the location of Anmyeon-do GAW station (green) (a) and altitude along the flight route (b) during 21~22 May, 2019.

산란계수를 관측하며 (Ruby and Waggoner, 1981), 산란각 오차 보정, 표준상태 변환 등의 후처리는 Anderson and Ogren (1998)의 연구에서 제시한 방법에 따랐다. 광흡수계수 관측을 위해 안면도에서는 광흡수계수측정기(Aethalometer, Magee Sci., AE-31)를 사용하였고, 나라호에서는 크기와 무게 등의 이유로 삼색흡수광도계(TAP; Tricolor Absorption Photometer, BMI Inc., BMI2901)를 사용하였다. Aethalometer는 롤 필터에 채워진 시료를 통해 투과된 빛의 감쇄 정도를 측정하는 방법으로 대기 중 실시간 Black Carbon (BC)의 질량농도를 측정하기 위해 가장 많이 사용되는 장비이다(Hansen *et al.*, 1984). TAP은 에어로졸을 포집한 필터(sample)와 포집되지 않은 필터(reference)에 광원을 투과시켜 빛이 흡수되는 양의 차이로 3 파장(467 nm, 528 nm, 652 nm)의 광흡수계수를 관측하는 장비이다(Ogren *et al.*, 2017). 분석 전 관측된 광흡수계수는 Ogren *et al.* (2017)을 참고하여 광산란계수와 동일한 파장(450 nm, 550 nm, 750 nm)으로 변환하였으며, 모든 광학 특성 관측 자료는 표준온도, 압력(273.15 K, 1,013 hPa) 상태로 보정하였다. 또한, 기상1호의 경우 관측장비를 탑재한 컨테이너를 선수 가까이 설치하여(그림 1c) 선박 자체에서 배출되는 오염원의 영향을 최소화하였으며, 선박이 운항하지 않는 묘박, 정박 시와 운항 방향으로 6 m/s 이상의 바람이 불 때의 모든 관측 자료는 본 연구에서 제외하였다.

에어로졸 특성별 각 관측에 사용된 장비를 표 1에 요약하였다.

Table 1. Instruments onboard the aircraft (NARA), research vessel (Gisang No.1) and surface (Anmyeon-do).

	Physical	Optical	
	Particle size distribution	Scattering coefficient	Absorption coefficient
Surface	APS (0.5~20 μm) (TSI Inc., TSI3321)	Nephelometer (450, 550, 700 nm) (TSI Inc., TSI3563)	Aethalometer (Magee Sci., AE-31)
Vessel			
Aircraft	OPC (0.3~32 μm) (Grimm Inc., Sky-OPC)		TAP (467, 528, 652 nm) (BMI Inc., BMI2901)

3. 결과 및 고찰

3.1 위성 관측

그림 3은 항공관측이 이루어진 시간대인 2019년 5월 21일 15시와 22일 11시에 탐지된 천리안-2A (GK-2A) 위성의 에어로졸 광학 깊이 (AOD; Aerosol Optical Depth) 산출 결과이며, 해당일 항공관측 경로에 따른 Nephelometer의 550 nm 광산란계수를 도식화하여 보인 것이다. 21일에는 산둥반도로부터 경기만에 걸쳐 에어로졸 플룸이 탐지되었으며 (N_{21} , 그림 3a), 22일에는 전날 탐지된 플룸 (N_{21})이 복잡한 것으로 보이는 플룸 (N_{22} , 그림 3b)과 서해 남부 해상부터 우리나라 남부지방 및 제주도에 걸쳐있는 또 다른 플룸 (S_{22} , 그림 3b)이 탐지되었다.

3.2 에어로졸 물리 특성

5월 21일 나라호와 기상1호, 안면도에서 모두 $2\mu\text{m}$ 이상의 조대입자가 우세한 것으로 관측되었는데 (그림 4c, 4d), 5월 19일 발원한 황사의 일부가 서해상으로 유입된 영향으로 판단된다 (그림 5). 나라호의 관측 결과에 따르면 서해상에서 관측한 모든 고도에서 조대입자 농도가 유사하였다 (그림 4a, 4b). 한편, 나라호

가 1.0~1.5 km 고도 ($36^{\circ}76'\sim 37^{\circ}01'N$, $124^{\circ}41'E$)에서 N_{21} 플룸을 지날 때 (그림 4a 검은색 점선 상자) $1\mu\text{m}$ 이하의 미세입자의 농도도 증가하는 특징을 보였지만, 같은 시간대인 14~16시 사이에 기상1호와 안면도 (그림 4c, 4d 검은색 점선 상자)에서는 미세입자가 관측되지 않았다. 하지만 21일 16시 이후부터 기상1호에서도 미세입자의 농도가 증가하기 시작하였으며, 그로부터 약 6시간 후인 21일 자정부터는 안면도에서의 미세입자 영역의 에어로졸 농도 역시 증가하기 시작하였다 (그림 4c, 4d). 안면도 감시소의 라이더 (Lidar) 관측 결과에서도 21일 23시경 에어로졸이 3.5 km 이하 구간에서 농도가 증가하는 것으로 확인되었다. 이는 위성에서 확인된 N_{21} 플룸이 서해상을 지나 점차 동진하여 각 관측지점에 따라 시간 차이를 두고 영향을 받은 것으로 풀이된다.

5월 22일에 관측된 두 플룸의 입자 크기별 부피농도를 살펴보면, N_{22} 플룸 (1.0~1.5 km, $36^{\circ}76'\sim 37^{\circ}01'N$, $124^{\circ}41'E$)에서는 미세입자가 우세하였고 전일의 N_{21} 플룸에 비해 조대입자 농도는 뚜렷하게 감소했을 수 있다. 반면 S_{22} 플룸 (그림 4b 빨간색 점선 상자)을 지나는 고도 0.5 km ($34^{\circ}91'\sim 35^{\circ}07'N$, $124^{\circ}21'E$)에서는 미세입자와 조대입자가 모두 증가하는 특징을

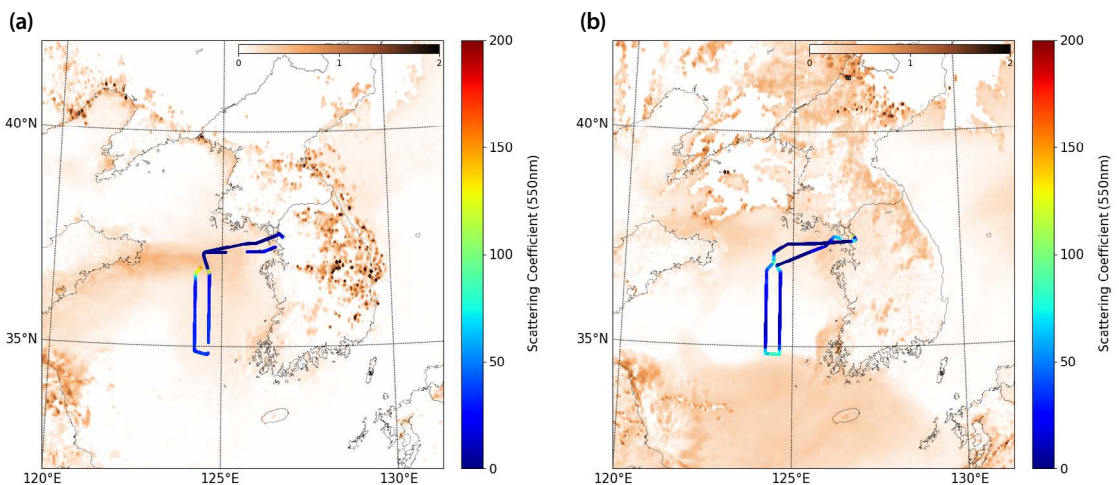


Fig. 3. Aerosol optical depths (AODs) retrieved from GK-2A (brown) at 15 KST and 550 nm scattering coefficients observed from NARA aircraft Nephelometer along the flight route (colored line) during 13:30~16:30 KST on 21 May (a) and AODs at 11 KST and scattering coefficients during 10:15~12:45 on 22 May 2019 (b).

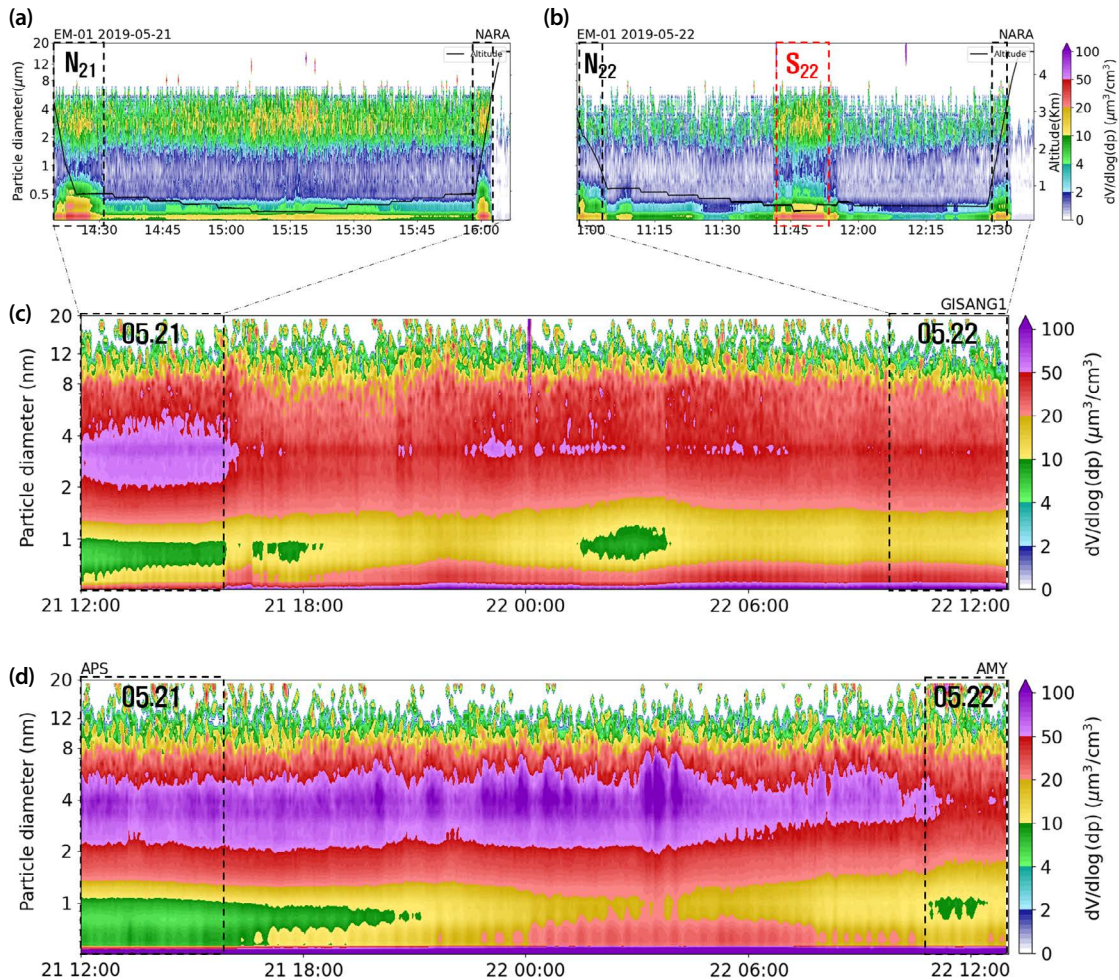


Fig. 4. Aerosol volume size distribution onboard the NARA (21 May (a) and 22 May (b)), Gisang No.1 (c), and Anmyeon-do (AMY) (d) during 21 and 22 May, 2019.

보였다(그림 4b). 같은 시간대에 기상1호와 안면도는 N_{22} 플룸의 영향을 받았으며, 기상1호에서는 조대입자와 미세입자가 동시에 관측되었고(그림 4c), 안면도에서는 농도는 감소하였으나 조대입자가 우세하게 나타났다(그림 4d).

3.3 에어로졸 광학 특성 분석

3.3.1 광산란계수(σ_{sp})

5월 21일과 22일 양일간 기상1호와 안면도에서 관측한 550 nm 광산란계수는 평균 $112.6 \pm 20.0 \text{ Mm}^{-1}$,

$68.4 \pm 18.1 \text{ Mm}^{-1}$ 이었으며, 나라호에서는 관측기간 평균 각각 $38.0 \pm 28.3 \text{ Mm}^{-1}$, $27.7 \pm 23.1 \text{ Mm}^{-1}$ 이었다(표 2). 특히, 나라호가 N_{21} 플룸을 지날 때의 광산란계수는 110.3 Mm^{-1} 으로 21일 나라호 관측 평균(38.0 Mm^{-1})보다 약 2.9배 높게 관측되었고, 같은 기간 동안 N_{21} 플룸을 지나는 기상1호 관측 평균값인 112.6 Mm^{-1} 과 유사하였다. 22일 나라호에서 관측된 두 플룸의 광산란계수는 각각 89.9 Mm^{-1} (N_{22}), 98.2 Mm^{-1} (S_{22})이었으며, 유의미한 값의 차이는 나타내지 않는 것으로 분석되었다(p -value 0.16). 5월 21일의 나라호

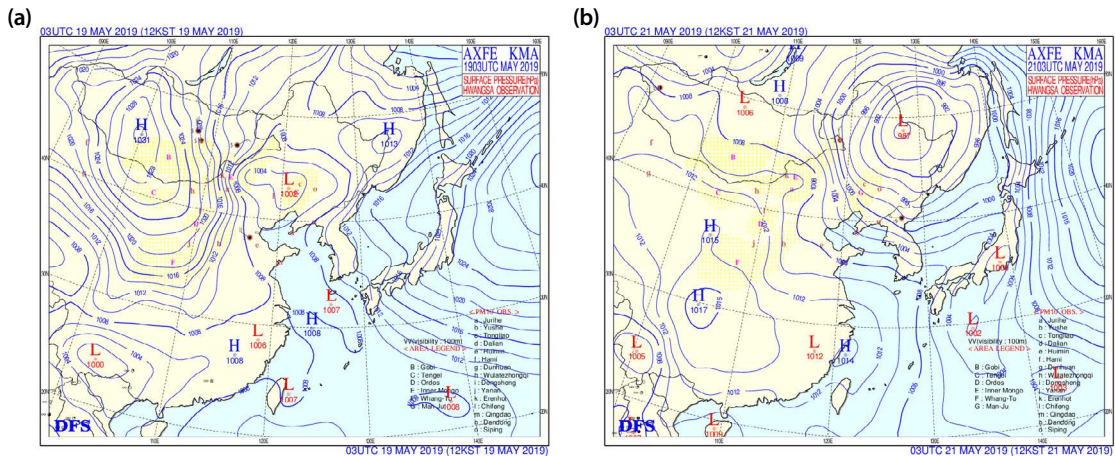


Fig. 5. Surface Asian Dust weather charts of East Asia during 19 (a) and 21 (b) May, 2019 (Red dots denote dust observation).

Table 2. Aerosol optical characteristics observed onboard the NARA, Gisang No.1, and at Anmyeon-do station.

Parameter	Date	NARA		Gisang No.1	Anmyeon-do
		21 May (13:30~16:30 KST)	22 May (10:15~12:45 KST)	21~22 May	21~22 May
σ_{sp} (550 nm, Mm^{-1})		38.0 ± 28.28 $N_{21}: 110.3 \pm 42.52$	27.7 ± 23.10 $N_{22}: 89.9 \pm 15.02$ $S_{22}: 98.2 \pm 16.08$	112.6 ± 20.0	68.4 ± 18.1
SAE (450_700)		1.6 ± 0.58 $N_{21}: 1.7 \pm 0.08$	1.6 ± 0.57 $N_{22}: 1.9 \pm 0.10$ $S_{22}: 1.8 \pm 0.07$	1.74 ± 0.21	1.3 ± 0.21
σ_{ap} (550 nm, Mm^{-1})		3.4 ± 1.32 $N_{21}: 6.3 \pm 1.91$	3.9 ± 2.92 $N_{22}: 4.0 \pm 0.97$ $S_{22}: 8.0 \pm 2.06$		10.3 ± 3.78
A AE (450_700)		1.4 ± 0.17 $N_{21}: 1.1 \pm 0.09$	1.51 ± 0.41 $N_{22}: 1.25 \pm 0.20$ $S_{22}: 1.14 \pm 0.07$		1.0 ± 1.26
SSA (ω)		0.92 ± 0.02 $N_{21}: 0.95 \pm 0.01$	0.91 ± 0.02 $N_{22}: 0.93 \pm 0.01$ $S_{22}: 0.90 \pm 0.01$		0.88 ± 0.02

관측 결과를 보면 N_{21} 플룸을 지나가는 $36^{\circ}76' \sim 37^{\circ}01'N$, $124^{\circ}41'E$, 고도 1.0~1.5 km 구간에서 광산란계수가 증가하였다(그림 6a). 5월 22일의 N_{22} 플룸은 N_{21} 플룸보다 북쪽으로 이동하여 21일과 동일한 위·경도, 고도를 운항한 나라호는 플룸의 중심에서 관측하지는 못하였지만 플룸이 탐지되지 않은 지점에 비해 상대

적으로 높은 농도로 관측되었다(그림 6b). S_{22} 플룸을 지나가는 $34^{\circ}91' \sim 35^{\circ}07'N$, $124^{\circ}21'E$, 고도 500 m 부근에서도 광산란계수가 증가하였다(그림 6b).

파장별 광산란계수로부터 산출한 산란용스트림 지수 (scattering Ångström exponent, SAE, 450~700 nm)는 나라호의 경우 21일 1.6 ± 0.58 , 22일 1.6 ± 0.57

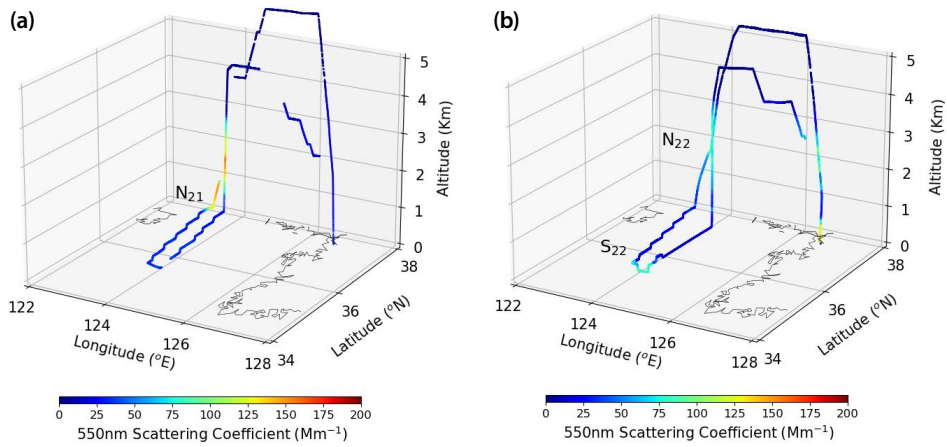


Fig. 6. The routes of the NARA research aircraft on 21 (13:30~16:30 KST) (a) and on 22 (10:15~12:45 KST) (b), May, 2019. The color indicates aerosol light scattering coefficients measured onboard the NARA.

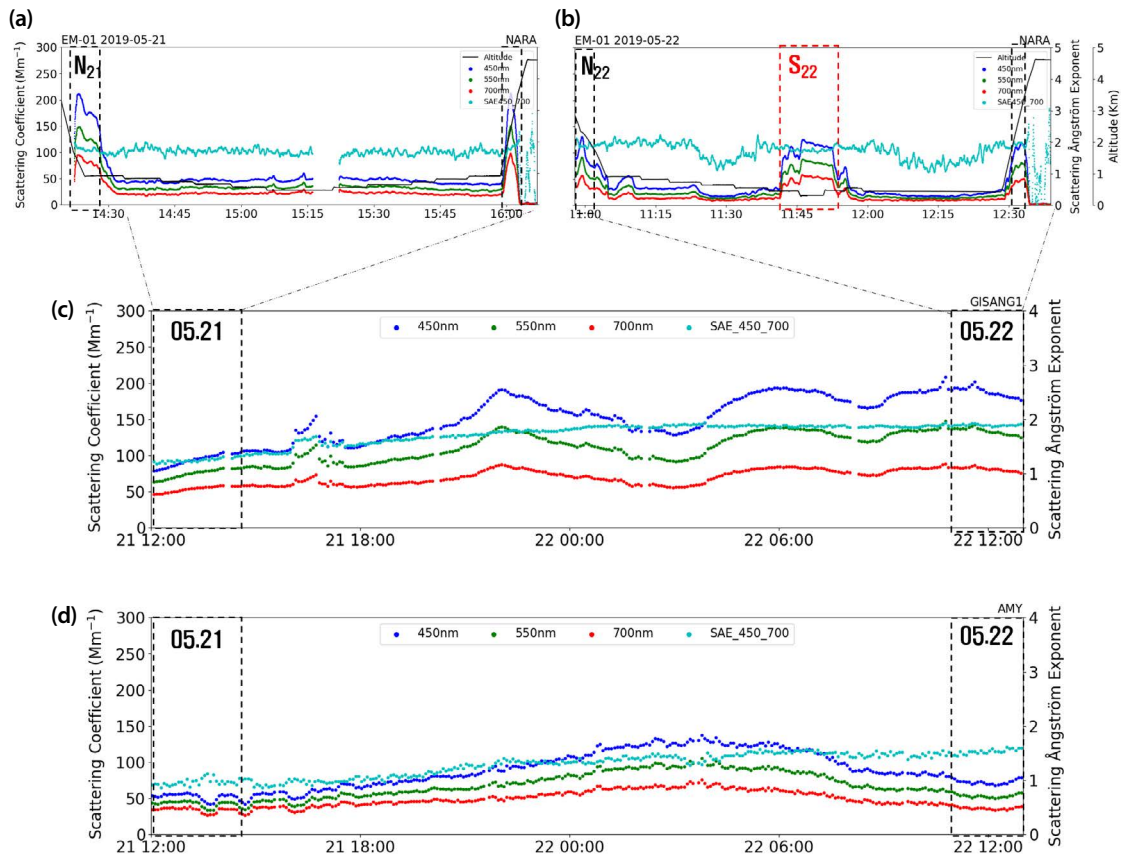


Fig. 7. Aerosol light scattering coefficients at 3 wavelengths (blue, green, red) and scattering Angstrom exponent (light blue) observations of NARA (a) and (b), Gisang No.1 (c), and Anmyeon-do station (d) during 21 and 22 May, 2019.

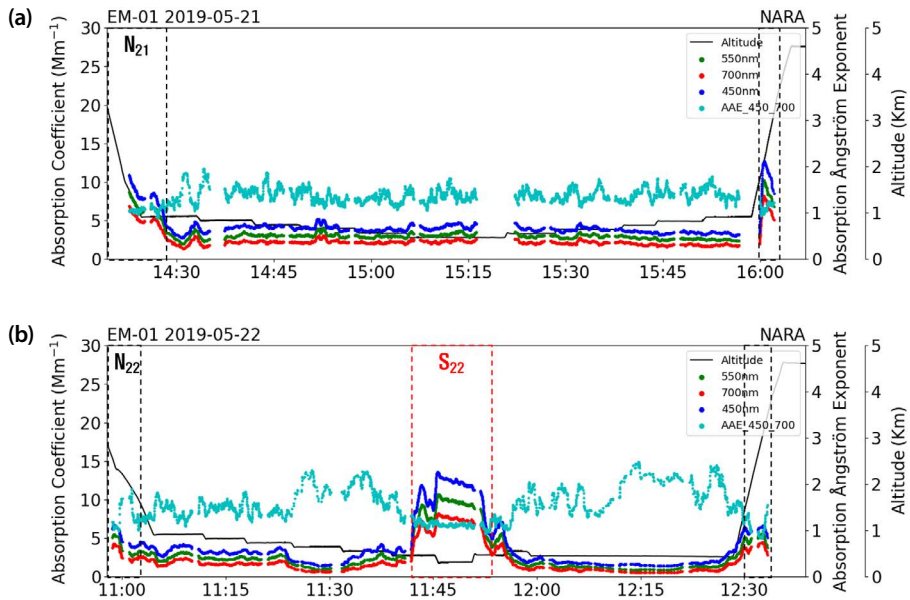


Fig. 8. Aerosol light absorption coefficients at 3 wavelengths (blue, green, red) and absorption Ångström exponent (light blue) observations of NARA May 21 (a) and 22 May (b), 2019.

로 관측기간 동안 큰 차이는 없었고, 플룸을 지날 때 N_{21} 1.7 ± 0.08 , N_{22} 1.9 ± 0.10 , S_{22} 1.8 ± 0.07 로 기상1호에서 산출된 값 (1.7 ± 0.21)과 유사했다. 하지만 안면도에서 산출된 SAE는 1.3 ± 0.21 로 나라호, 기상1호에서보다 낮았다(그림 7). 이는 안면도에서 조대입자가 상대적으로 더 우세한 것으로 해석할 수 있고, 입자 크기분포에서 안면도의 조대입자 농도가 나라호에서보다 높았던 것과 일치하는 결과이다(그림 4).

3.3.2 광흡수계수(σ_{ap})

나라호에서 관측된 광흡수계수(550 nm)는 5월 21일 평균 $4.0 \pm 1.32 \text{ Mm}^{-1}$, 5월 22일 $3.9 \pm 2.92 \text{ Mm}^{-1}$ 으로 분석되었고 안면도에서는 양일 평균 $10.3 \pm 3.8 \text{ Mm}^{-1}$ 이다(표 2, 그림 8). N_{21} 플룸에서의 광흡수계수는 6.3 Mm^{-1} 으로 21일 항공관측 평균의 약 1.9배였다. 5월 22일의 경우 S_{22} 플룸에서의 광흡수계수는 8.0 Mm^{-1} 으로 N_{22} 플룸 광흡수계수 4.0 Mm^{-1} 의 2배였다. 이는 광산란계수와는 다른 결과이며, N_{22} 플룸보다 S_{22} 플룸에 광흡수가 우세한 에어로졸이 더 많았음을 의미

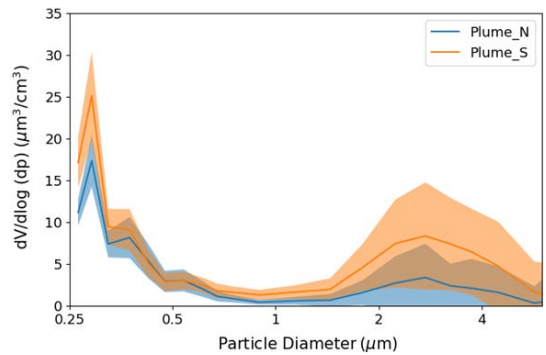


Fig. 9. Aerosol number size distributions when passing the N_{22} (blue) and S_{22} (orange) plumes.

하며, 화학조성이나 에어로졸 결합 상태, 노화 상태 등이 다를 것으로 추정할 수 있다(Romshoo *et al.*, 2021; Fleming *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2019).

그림 9에서 보이는 바와 같이 22일 서로 다른 두 플룸(N_{22} , S_{22})을 지날 때의 입경별 수농도는 $0.3 \mu\text{m}$ 이하에서 약 1.5배 차이를 보였다. 이것으로 미루어보아 미세입자 영역의 에어로졸 중 빛을 흡수하는 특성을

지닌 BC, BrC 등이 S_{22} 플룸에 더 많이 포함되었거나 광흡수효율이 높았을 것으로 추정되며, 추후 탄소 에어로졸에 대한 관측이나 광흡수특성에 대한 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

에어로졸 광소멸계수(광산란계수 + 광흡수계수)에 대한 광산란계수의 비로 계산되는 단일산란알베도(Single Scattering Albedo, SSA)는 에어로졸 타입을 분류하는 주요 요소이다. SSA는 1에 가까울수록 완전한 산란을 의미하고 0에 가까울수록 완전한 흡수를 의미한다. 탄소성분의 비율이 높아지면 0.7까지 낮아지거나, 해염입자가 증가하면 1에 근접하게 나타나기도 하지만, SSA의 변동폭은 주로 0.80부터 0.95로 알려져 있다(Russell *et al.*, 2014). 나라호에서 관측한 5월 21일, 22일의 SSA는 평균 약 0.92 ± 0.02 , 0.91 ± 0.02 로 비슷한 값을 나타냈으며, 나라호가 에어로졸 플룸 N_{21} , N_{22} 를 지날 때(1.0~1.5 km, $36^{\circ}76' \sim 37^{\circ}01'N$, $124^{\circ}41'E$), 각각 0.95 ± 0.01 , 0.93 ± 0.01 로 계산되었고, S_{22} 플룸(0.5 km, $34^{\circ}91' \sim 35^{\circ}07'N$, $124^{\circ}21'E$)에서는 광흡수계수가 상대적으로 높아 0.90 ± 0.01 로 더 낮게 산출되었다(표 2, 그림 10). 지상관측소인 안면도의 2019년 월별

SSA는 0.84~0.96의 분포를 보이며 연평균은 0.91이다. 2019년 3~4월에 진행된 3차례 항공관측에서는 0.92~0.93으로 안면도의 연평균과 유사하였다(KMA, 2019). 다만, 항공관측의 경우 절단경이 $5 \mu m$ 이하이므로, 대체로 미세입자의 영향이 주요할 것으로 예상되어, 지상의 PM_{10} 광학특성 관측 결과와의 직접 비교에는 주의가 필요하다.

5월 22일 서해상에서 위성으로 탐지된 플룸의 기원을 추정하기 위해 미국해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) 모델을 이용하여 플룸이 관측된 위·경도(N_{22} : $37^{\circ}01'N$, $124^{\circ}41'E$, S_{22} : $35^{\circ}07'N$, $124^{\circ}21'E$)에서의 500 m 고도에 대한 72시간 역궤적 분석을 수행하였다. 이때 기상장은 기상청의 UM GDAPS(Unified Model Global Data Assimilation Prediction System) 자료를 활용하였다. 그 결과, N_{22} 플룸과 S_{22} 플룸 모두 고비사막 또는 내몽골고원 등 황사발원지 상공(고도 3,000~4,000 m)을 경유하나 S_{22} 플룸의 경우 고도 1,000 m 이하, 지표 부근을 지나는 시간이 약 48시간으로 길었던

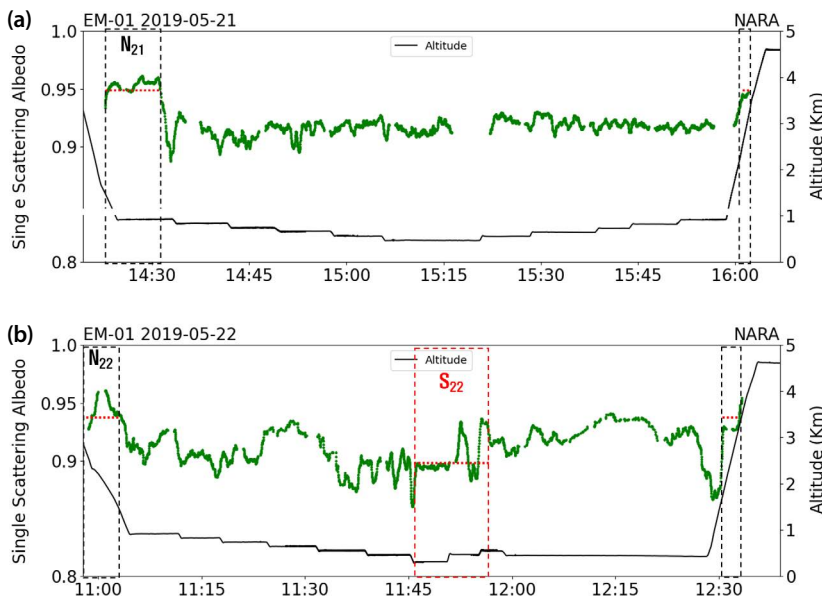


Fig. 10. Single scattering albedo from NARA aircraft measurement on 21 May (a) and 22 May (b), 2019 (black and red dotted lines are the mean of the SSA of N_{22} and S_{22} plumes).

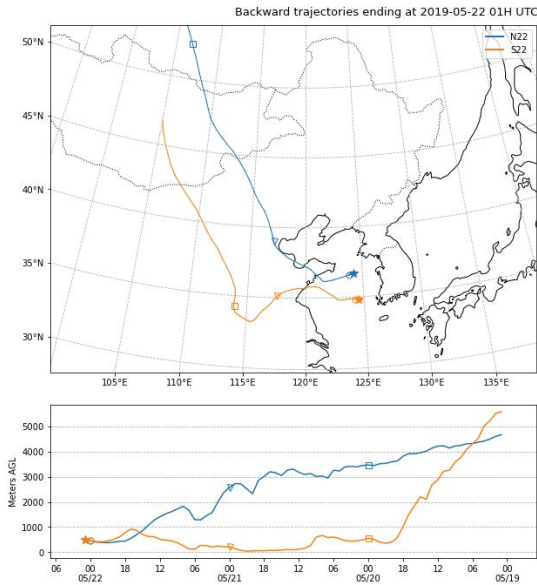


Fig. 11. 72 hr Backward trajectories from the aircraft passing time through plume N (blue) and S (orange) on 22 May, 2019.

반면 N_{22} 플룸은 6시간으로 매우 짧았다. 또한, S_{22} 플룸은 5월 20일에 24시간 동안 이동거리가 100 km (평균 속도 약 1.2 m/s)에 불과할 정도로 공기의 흐름이 느렸다(그림 11).

4. 결 론

본 연구에서는 관측 공백 지역인 서해상에서 나라호, 기상1호, 안면도 기후변화감시소, 위성 등을 활용한 입체관측을 통해 2019년 5월 21일과 22일 서해상에서 탐지된 에어로졸 플룸의 특성을 분석하였다.

5월 21일 관측 결과 고도와 상관없이 임무 구간 전체에서 조대입자가 관측되었고, 위성으로 탐지된 플룸(N_{21})을 지날 때에는 기상 1호와 나라호(고도 1.5 km)에서 미세입자도 함께 관측되었다. 나라호(항공), 기상1호(선박)와 안면도에서는 약 2~6시간의 간격을 두고 순차적으로 미세입자 농도가 증가하기 시작하였는데, 이는 나라호에서 먼저 관측된 미세입자를 포함

한 공기가 지표 부근까지 유입된 결과라고 추정한다. 또한, 기상1호에서 관측한 이온 성분의 농도증가는 미세입자가 관측되는 시점과 일치하였다.

5월 22일은 위성 영상에서 서로 다른 2개의 에어로졸 플룸(N_{22} , S_{22})이 탐지되었다. N_{22} 플룸은 N_{21} 플룸이 북상한 것으로 보이며, S_{22} 플룸은 중국 중동부지역 상공을 거쳐 우리나라 서해 남부해상 및 제주도로 유입되는 것으로 확인되었다. S_{22} 플룸과 N_{22} 플룸의 광산란계수값은 유의미한 차이는 보이지 않았지만 광흡수계수값은 S_{22} 플룸(고도 0.5 km)에서 8.0 Mm^{-1} 으로 N_{22} (4.0 Mm^{-1})보다 약 2배 높게 관측되었다. 특히, 대표적인 광흡수 에어로졸인 BC, BrC의 입자 크기에 해당하는 $0.3 \mu\text{m}$ 이하의 영역에서 큰 차이를 보였다. 역궤적 분석 결과 S_{22} 플룸은 인간활동의 영향이 많은 지역을 낮은 고도로 긴 시간 지나면서 인위적 기원의 에어로졸이 많이 포함했을 것으로 추정되며, 추후 탄소 에어로졸의 관측과 더불어 에어로졸의 화학 조성, 결합 상태, 노화 등에 의한 광학 특성의 변화에 관한 추가 연구의 필요성이 제기된다.

본 연구의 항공관측에서는 같은 위도, 경도에 대해 모든 고도를 운항한 것이 아니므로, 에어로졸의 연직 분포에 대한 정보가 충분하지 않았다는 한계가 있다. 향후, 고농도 사례 시 연직 특성을 관측할 수 있는 운항 방법에 대한 고민이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 장기간의 에어로졸 화학성분과 광산란계수, 광흡수계수와의 상관성 분석 등, YES-AQ 캠페인을 통해 입체 관측 자료를 축적하고 다양한 연구가 지속적으로 이루어진다면 서해상 에어로졸에 대한 이해도를 높이고, 이들에 의한 기후변화영향을 파악하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

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

영센터의 지원과 HYSPLIT 모델을 제공해주신 NOAA ARL에 감사드립니다.

References

- Anderson, T.L., Ogren, J.A. (1998) Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating Nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 29, 57-69. <https://doi.org/10.1080/02786829808965551>
- 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>
- Fleming, L.T., Lin, P., Roberts, J.M., Selimovic, V., Yokelson, R., Laskin, J., Laskin, A., Nizkorodov, S.A. (2020) Molecular composition and photochemical lifetimes of brown carbon chromophores in biomass burning organic aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 1105-1129. <https://doi.org/10.5194/acp-20-1105-2020>
- Han, J.S., Kim, Y.M., Ahn, J.Y., Kong, B.J., Choi, J.S., Lee, S.U., Lee, S.J. (2006) Spatial Distribution and Variation of Long-range Transboundary Air Pollutants Flux during 1997-2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 99-106, (in Korean with English abstract).
- Hansen, A., Rosen, H., Novakov, T. (1984) The Aethalometer - an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles, *Science of The Total Environment*, 36, 191-196. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(84\)90265-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(84)90265-1)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021) Climate Change 2021, the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Jang, I.S., Sung, K.H., Choi, J.S., Ban, S.J., Ahn, J.Y., Seo, S.J., Kim, S.Y. (2010) Estimation of the impact of Long-range Transboundary air pollutants from aircraft measurement and air quality modeling, *Journal of the Korean Society for Environmental Management*, 16(2), 81-88, (in Korean with English abstract).
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.710>
- Kim, B.G., Cha, J.S., Han, J.S., Park, I.S., Kim, J.S. (1997) Aircraft Measurement of SO₂, NO_x over Yellow Sea Area, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 13, 361-369, (in Korean with English abstract).
- Kim, J.E., Jung, W.S., Li, S., Oh, S.M., Shin, D.G., Ko, H.J., Yoo, H.J., Chung, C.Y., Kim, Y.H. (2022) Characteristics of Asian Dust Observed over the Yellow Sea during YES-AQ Campaign in March, 2021 based on Vessel and Aircraft Measurement, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 557-576, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.557>
- 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, 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>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019) Report of global atmosphere watch 2019, *Aerosol optical characteristics*, 5.3, 129.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2021) Report of global atmosphere watch 2021, *Status of global atmospheric monitoring station on the Korean peninsula*, 2.2, 11.
- Lee, S., Kim, J., Choi, M., Hong, J., Lim, H., Eck, T.F., Holben, B.N., Ahn, J.Y., Kim, J., Koo, J.H. (2019a) 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>
- Lee, S., Goo, T.Y., Moon, H.J., Labzovskii, L., Kenea, S.T., Oh, Y.S., Lee, H.Y., Byun, Y.H. (2019b) Airborne In-situ Measurement of CO₂ and CH₄ in Korea: Case Study of Vertical Distribution Measured at Anmyeon-do in Winter, *Korean Meteorological Society*, 29(5), 511-523. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.5.511>
- Lee, H.Y., Han, S.O., Ryoo, S.B., Lee, J.S., Lee, G.W. (2019c) The measurement of atmospheric CO₂ at KMA GAW regional stations, its characteristics, and comparisons with other East Asian sites, *Atmospheric Chemistry and*

- Physics, 19(4), 2149-2163. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2149-2019>
- 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, M.S., Yum, S.S., Kim, N.J., Jeong, M.J., Yoo, H.J., Kim, J.E., Park, J.Y., Lee, M.H., Sung, M.Y., Ahn, J.Y. (2021) Characterization of submicron aerosols over the Yellow Sea measured onboard the Gisang 1 research vessel in the spring of 2018 and 2019, 284, 117180. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117180>
- Romshoo, B., Müller, T., Pfeifer, S., Saturno, J., Nowak, A., Ciupek, K., Quincey, P., Wiedensohler, A. (2021) Optical properties of coated black carbon aggregates: numerical simulations, radiative forcing estimates, and size-resolved parameterization scheme, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 12989-13010. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12989-2021>
- Ruby, M.G., Waggoner, A.P. (1981) Intercomparison of integrating nephelometer measurements, *Environmental Science & Technology*, 15, 109-113. <https://doi.org/10.1021/es00083a014>
- Russell, P.B., Kacenelenbogen, M., Livingston, J.M., Hasekamp, O.P., Burton, S.P., Schuster, G.L., Johnson, M.S., Knobel-spiess, K.D., Redemann, J., Ramachandran, S., Holben, B. (2014) A multiparameter aerosol classification method and its application to retrievals from spaceborne polarimetry, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(16), 9838-9863. <https://doi.org/10.1002/2013JD021411>
- 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>
- Song, H.D., Choi, J.S., Jang, I.S., Kim, J.S., Lee, S.J. (2009) Studies on the Behavior of SO₂ and NO_x over Yellow Sea Area during Long Term Aircraft Measurements (1997-2007), *The Korean Environmental Sciences Society*, 18(5), 569-578, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/jes.2009.18.5.569>
- 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, Atmospheres*, 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>
- Willeke, K., Baron, P.A. (1993) *Aerosol measurement, principles, techniques, and applications*. Van Nostrand Reinhold, 876.
- Xie, M., Chen, X., Hays, M.D., Holder, A.L. (2019) Composition and light absorption of N-containing aromatic compounds in organic aerosols from laboratory biomass burning, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 2899-2945. <https://doi.org/10.5194/acp-19-2899-2019>

Authors Information

정민재 (국립기상과학원 기후연구부 연구원)
(minjaeaa@korea.kr)

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

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

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

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

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

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

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