

논문

YES-AQ 캠페인 기간 중 기상 1호에서 광학입자계수기로 관측한 서해상 에어로졸 물리 특성

Aerosol Physical Characteristics over the Yellow Sea Using Optical Particle Counter Measurement Data Onboard Gisang1 Vessel during the YES-AQ Campaign

신대근*, 김정은, 정주용, 유희정
국립기상과학원 미래기반연구부

Daegeun Shin*, Jeong Eun Kim, Chu-Yong Chung, Hee-Jung Yoo
Innovative Meteorological Research Department, Korea Meteorological Administration/
National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Republic of Korea

접수일 2022년 1월 11일
수정일 2022년 2월 4일
채택일 2022년 2월 21일

Received 11 January 2022
Revised 4 February 2022
Accepted 21 February 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)64-780-6654
E-mail : shingeun@korea.kr

Abstract In order to identify the source of pollutants flowing into the Korean Peninsula and predict their impact, it is necessary to understand the characteristics of aerosols over the Yellow Sea. The Korea Meteorological Administration (KMA) has been conducting aerosol observations over the Yellow Sea in spring through the annual Yellow Sea Air-Quality (YES-AQ) joint observation campaign since 2018. In this study, aerosols in the Yellow Sea in spring were classified into the Background Particle Group (BPG), Fine particle Dominant Group (FDG), and Coarse particle Dominant Group (CDG) based on the particulate matter less than 10 μm ($\text{PM}_{2.5}$) and the particulate matter less than 10 μm (PM_{10}) mass concentrations obtained from the ship-based Optical Particle Counter (OPC) measurements. Statistical tools, such as the Gaussian mixture model and Gaussian kernel analysis, were utilized to classify the groups effectively. In company with, we presented various threshold values for the ratio of fine and coarse particles that can be easily distinguishing the FDG from the CDG. The BPG accounted for approximately 50% of the total data, and showed mean mass concentrations of 24.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 15.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, respectively. In the case of the CDG, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ indicated the highest frequencies around 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, whereas they showed the highest frequencies around 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, for the case of the FDG. Our study provides criteria for easily discriminating natural and anthropogenic aerosols from OPC data in the Yellow Sea. In addition, it contributes to enhancing the reliability of aerosol analysis through mutual complementation with other instrument or analysis methods in unstable ship observation environment.

Key words: YES-AQ, OPC, Gisang1 vessel, PM, Aerosol size distribution

1. 서론

동아시아 지역은 급격한 산업화로 인해 전지구 대기질에 큰 영향을 주었고, 기후, 환경 분야에 있어 매우 중요한 지역으로 주목받고 있다(Crawford *et al.*, 2021; Calvin *et al.*, 2012; Ramanathan *et al.*, 2008). 특히, 한반도는 동아시아 최대 오염물질 배출원인 중국

의 풍하측에 위치하여 자체적인 배출원과 함께 장거리 수송된 황사나 미세먼지의 영향을 받는다. 한반도 대기질에 장거리 오염물질이 미치는 영향은 다수의 연구들을 통해 밝혀진 바 있다(Lee *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015; Cho *et al.*, 2013; Park and Lee, 2004).

편서풍의 영향을 받아 한반도로 넘어오는 황사 및

에어로졸은 장거리 수송을 통해 한반도뿐만 아니라 일본과 태평양 너머까지 영향을 미치고 있다 (Itahashi *et al.*, 2021; Matsumoto and Uematsu, 2005; Jaffe *et al.*, 2003). 특히, 서해는 중국 동안의 인구과밀 지역, 또는 대규모 산업단지들과 인접해 있기 때문에 서해상 대기질에 대한 지속적인 감시와 분석은 동아시아 오염물질 수송을 이해하는데 있어 매우 중요하다. 서해상 대기질은 해양이라는 지리적 특성으로 인해 동일한 지점에서 지속적인 관측을 수행하는 지상 관측과는 달리 주로 선박을 이용한 이벤트성 관측을 통해 분석되었다. Bates *et al.* (2004)에서는 2001년 수행된 ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization) 캠페인 기간 동안 수집된 동아시아 해역의 선박 관측자료를 바탕으로 에어로졸 화학 성분 및 입경 분포를 분석하였고, Zhao *et al.* (2015)는 “Dong Fang Hong-2”라는 연구용 선박을 이용해 서해상의 에어로졸을 분석하여 역궤적 모델을 통해 그 기원을 추정하였다. 국내에서는 주로 기상청에서 운영한 해양기상 관측선 “기상 2000호”와 국내 최초 첨단 기상 관측선 “기상 1호”에서 얻어진 자료들을 바탕으로 서해상 에어로졸에 대한 연구들이 수행되었으며 (Park *et al.*, 2021a; Yoo *et al.*, 2021; Cha *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2009), 2016년에는 KORUS-AQ (the Korea-United States Air Quality Study)라는 한·미 공동 대기질 관측 캠페인을 통해 지상, 항공 및 위성 관측자료, 그리고 모델 분석 등을 통해 다방면으로 서해상 및 한반도 대기질에 대한 분석이 수행된 바 있다 (Crawford *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2021b; Jordan *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020; Schroeder *et al.*, 2020; Simpson *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2019; Goldberg *et al.*, 2019; Halliday *et al.*, 2019; Oak *et al.*, 2019; Herman *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018; Spinei *et al.*, 2018).

한편, 기상청에서는 2017년 기상항공기 “나라호”를 도입함에 따라 2018년부터 지상, 선박 및 항공기 동시 관측을 수행하는 서해상 대기질 입체 관측 캠페인 (Yellow Sea-Air Quality, YES-AQ)을 통해 국내 다수 기관 및 대학과 협력하여 장거리 수송 오염물질

분석 및 황사 예보 업무 등을 지원하고 있다. 기상 관측선에는 광학입자계수기 (Optical Particle Counter, OPC), 공기역학입자계수기 (Aerodynamic Particle Sizer, APS), 저용량 미세먼지 채취기, 광산란계수측정기 (nephelometer), 광흡수계수측정기 (aethalometer), 준실시간 이온분석기 (Monitor for Aerosols & Gases in Ambient Air, MARGA), 스카이라디오미터 (Skyradiometer) 등의 다양한 장비들이 활용되고 있으며, 이 밖에도 고품질의 대기질 관측을 위한 장비들이 매년 추가적으로 교체 및 도입되고 있다. 이들 중 OPC는 에어로졸의 광학적 특성을 바탕으로 입경별 농도를 측정하며, 특히 관측 환경과 목적에 따라 다양한 타입으로 설계가 가능해 지상 관측뿐만 아니라 항공 및 선박 등에도 널리 활용되고 있다 (Yus-Diez *et al.*, 2021; Denjean *et al.*, 2020; Shin *et al.*, 2014; Diesch *et al.*, 2013; Sinha *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2010; Shiobara *et al.*, 2007; Matsumoto and Uematsu, 2005; Moore *et al.*, 2004; Clarke *et al.*, 2002). YES-AQ 캠페인에서도 OPC는 가장 초기에 선박에 도입되어 최근까지 상당수의 자료가 지속적으로 얻어지고 있다.

한편, 에어로졸은 입자 크기에 따라 미세먼지 (particulate matter less than 10 μm , PM_{10})와 초미세먼지 (particulate matter less than 2.5 μm , $\text{PM}_{2.5}$), 그리고 극초미세먼지 (particulate matter less than 1 μm , PM_1)로 구분된다. OPC는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$, 그리고 PM_1 등의 질량농도 값을 제공하며, 이는 인위적 오염원으로부터 배출된 에어로졸과 자연적 오염원으로부터 배출된 에어로졸을 구분할 수 있는 중요한 단서로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 황사와 연무 사례의 구분에도 활용된다 (Lee *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2015). Lee *et al.* (2008)에서는 APS 관측 자료를 바탕으로 PM_{10} 이 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도 사례에 대해서, 황사와 연무를 판별할 수 있는 기준을 입경별 분포 특성을 바탕으로 제시한 바 있다. 그러나 이 연구에 제시된 방법을 활용하기 위해서는 고해상도의 입경별 농도 정보가 요구되며, APS와 같은 고정밀 측정 기기가 아닌 경우

이에 대한 정보를 얻기가 쉽지 않다. 특히, 선박 관측과 같이 지상에 비해 불안정한 환경에서는 장비에 수시로 이상이 발생할 뿐만 아니라 높은 관측 불확실성을 갖기 때문에, 다양한 장비에서 얻을 수 있는 $PM_{2.5}$, PM_{10} 등의 질량농도 정보를 활용한 자연적 오염원과 인위적 오염원(또는 황사와 연무)의 구분이 상당히 유용하게 활용될 수 있다. 무엇보다 이러한 환경에서는 각 장비별로 독립적인 분석 결과들을 제시하고, 이들을 상호 비교 및 보완함으로써 분석결과가 높은 신뢰성을 얻게 된다. 본 연구에서는 특별관측에서 가장 널리 사용되는 OPC를 통해 서해상에서 얻어진 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 질량농도 자료에 대해 가우시안 커널 분석을 활용하여 초대입자가 우세한 사례와 미세입자가 우세한 사례를 구분해 살펴보고, 이를 바탕으로 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸을 구분할 뿐만 아니라 황사와 연무 사례 구분에도 활용할 수 있는 기준값들을 제시하였다. 이에 더하여, 각 사례별로 황사가 주로 발생하는 봄철 서해상에서 관측된 에어로졸 입자 분포특성을 살펴보았으며, 이를 통해 서해상 OPC에서 얻어진 자료를 이해하고, 효과적으로 활용하는 데 목적을 두고 있다.

2. 실험 방법

2.1 측정장비 및 기간

OPC는 높은 범용성으로 인해 지상 관측뿐만 아니라 선박, 항공 관측과 같은 다양한 플랫폼에서도 널리 사용되는 에어로졸 측정 장비이다. OPC는 펄프로 유입된 공기에 레이저를 조사하여 개별 입자에 의해 산란된 빛을 측정하며, 입자 크기에 따른 산란광의 강도 차이를 통해 간접적으로 에어로졸 직경을 추정한다(Walser *et al.*, 2017; Choi *et al.*, 2002). 이 때, 산란광의 강도는 입자 크기에 대한 비-단조(non-monotonic) 함수일 뿐만 아니라, 복소 굴절률(complex refractive index) 및 입자 모양과 같은 입자의 고유한 특성들에 따라 달라진다. 그러나 OPC의 장비

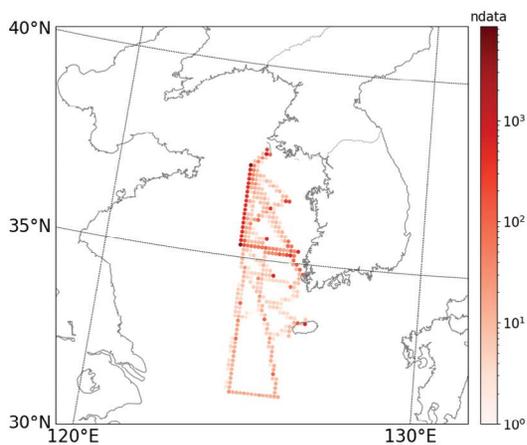
설계 단계에서 이러한 복합적인 특성을 모두 고려할 수 없기 때문에 주로 일반적인 에어로졸 특성을 대표하는 단분산 폴리스티렌 라텍스(monodisperse polystyrene latex, PSL) 에어로졸의 굴절률($m = 1.59$)을 활용해 입자 크기를 산출하게 된다. 이렇게 추정된 직경은 실제 관측 환경에 따라 차이가 있을 수 있으며, 입자 크기가 클수록 큰 오차를 가질 수 있다(Walser *et al.*, 2017; Heim *et al.*, 2008). 본 연구에서 사용된 OPC(EDM 164, GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co., Germany)는 직경이 0.25–30 μm 인 입자를 측정하여 PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_{10} 의 질량농도를 제공한다. 상대습도가 높은 환경에서는 입자의 흡습성장에 따른 오차가 커질 수 있기 때문에 흡입관을 가열하여 이로 인한 오차를 최소화할 수 있도록 설계되었다.

한편, 기상청 주관으로 수행되고 있는 서해상 대기 질 입체 관측 캠페인 YES-AQ는 매년 3–6월 사이의 봄철에 임무 기간을 갖는데, 봄철은 장거리 수송 오염물질로 인해 황사가 가장 많이 발생하는 계절로써, 다른 계절에 비해 상대적으로 높은 농도의 에어로졸이 측정된다. NIMS (2020)에 의하면, 최근 10년 통계를 기준으로 평균적으로 연 5.2일의 황사 발생일 중 총 3.6일의 황사가 3–6월 사이에 발생하고 있으며 이는 전체 황사의 약 65%에 해당하는 비율이다. 즉, 봄철 서해상에서 얻어진 에어로졸 관측 자료가 한반도로 넘어오는 오염물질의 특성을 이해하는데 효과적으로 활용될 것으로 기대할 수 있다. YES-AQ 캠페인에서 OPC는 선박의 에어로졸 관측 장비 중 가장 초기에 탑재된 장비로서 실제 관측은 캠페인이 시작된 2018년부터 수행되었지만 초기 자료품질의 안정성이 확보되지 않아 본 연구에서는 2019년부터 2021까지의 자료를 활용하였다. 분석에 사용된 자료는 모두 5분 단위로 평균 처리되었으며, 연도별 자료가 수집된 항차별 기간에 대한 정보는 다음의 표 1에 제시한 바와 같다. 한편, 자료가 얻어진 선박의 경로는 그림 1과 같다. 일부 기간에 대해 제주 남쪽 바다까지 관측 영역에 포함되며, 대부분의 관측이 서해상에서 이루어

Table 1. Period of the ship-based aerosol observation by year.

| Year | Cruise | | | |
|------|---|------------------------|---------------------------|------------------------|
| | 1 st Cruise | 2 nd Cruise | 3 rd Cruise | 4 th Cruise |
| 2019 | Apr. 15–24 | May 1–10 *May 1–2 | May 15–24 | Jun. 4–13 |
| 2020 | Mar. 20–Apr. 1 | Apr. 4–13 *Apr. 4 | May 11–22 *May 11 | May 27–Jun. 5 |
| 2021 | Mar. 22–Apr. 2 *Mar. 23 *Mar. 28–Apr. 1 | Apr. 6–15 | Apr. 20–29 *Apr. 28–29 | – |

*: Asian Dust days in Korea

**Fig. 1.** Ship tracks analysed in this study.

어진 것을 확인할 수 있다.

2.2 분석방법

본 연구에서는 OPC로 관측한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 분포를 가우시안 커널 추정 (Gaussian kernel density estimate) 방법을 활용해 분석하였다. 가우시안 커널 추정 방법은 자료의 분포를 불연속적인 히스토그램 형태가 아닌 가우시안 커널들의 조합을 통해 연속적으로 표현하는 방법이다. 이 방법은 실제 자료의 분포를 평활화(smoothing)한 효과를 보이기 때문에 커널의 밴드폭에 따라 실제 자료를 왜곡할 수 있다는 단점이 있지만, 자료의 특징적인 분포를 보다 명확하게 가시적으로 확인할 수 있다는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 통계 분석에 주로 사용되는 파이썬 모듈인 scipy에서 제공하는 가우시안 커널 추정 함수 (scipy.stats.gaussian_kde)를 활용하였으며, 해당 함수에서 제공하는 Scott 방법을 통해 밴드폭을 결정하였다 (https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.htm).

한편, 전체 표본 개수에 해당하는 가우시안들부터 자료의 분포 형태를 추정하는 가우시안 커널 추정 방법과 달리, 자료를 원하는 개수의 가우시안 조합으로 표현하고 이들로부터 자료에 최적화된 평균, 표준편차와 같은 매개변수를 얻기 위한 방법으로 기댓값 최대화 (Expectation-maximization, EM) 알고리즘 기반의 가우시안 혼합 모델 (Gaussian mixture model)이 활용된다. 가우시안 혼합 모델은 초기에 가우시안 모드의 개수 및 파라미터 값들 (평균, 표준편차, 가중치)을 요구한다는 점에서 모수화(parametric) 추정 방법에 해당하며, 사전에 자료의 특성을 구분짓는 집단의 개수를 안다면 가우시안으로 추정된 각 집단의 특성 및 경계를 얻는데 활용될 수 있다. 가우시안 혼합 모델은 초기 모드 개수의 선정과 파라미터가 분석 결과에 매우 중요하게 작용하며, 초기 파라미터의 결정은 일반적으로 K-평균 알고리즘을 활용한다. 본 연구에서는 자료의 분포로부터 구분하고자 하는 사례들의 경계 구분을 위해 가우시안 혼합 모델을 활용하였고, 이는 파이썬의 통계 모듈인 scikit-learn의 가우시안 혼합모델 함수 (sklearn.mixture.GaussianMixture)를

사용하였다 (<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.mixture.GaussianMixture.html>).

3. 결 과

3.1 OPC와 APS의 에어로졸 크기별 질량농도 비교

서해상에는 해염과 안개뿐만 아니라 선박, 도시, 산업시설 등 다양한 오염원으로부터 유입된 에어로졸이 혼재한다. 본 연구에 사용된 선박 OPC는 입자 직경에 따라 PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 의 질량농도를 제공하며, 이를 통해 이러한 에어로졸들의 오염원을 세세하게 구분해 내기에는 한계가 있다. 그러나 에어로졸의 입경 분포는 다양한 오염원들 중 자연적 발생원과 인위적 발생원을 간접적으로 추정하고, 구분할 수 있는 단서를 제공한다. 에어로졸의 입경별 분포는 핵모드(nuclei mode, $<0.1 \mu\text{m}$), 축적모드(accumulation mode, $0.1\text{--}2.0 \mu\text{m}$), 조대모드(coarse mode, $>2.0 \mu\text{m}$)로 나뉘며, OPC 관측범위 내에서는 축적모드와 조대모드로 구분된다. 상대적으로 입자 크기가 작은 핵모드 또는 축적모드의 에어로졸들은 대개 인위적 발생원에 기원하여 각종 연소과정이나 가스상 오염물질의 입자상 전환, 또는 입자상 에어로졸의 결합 등을 통해 형성되는 반면, 입자크기가 큰 조대모드 에어로졸들은 토양이나 해염, 꽃가루 등과 같은 자연적 발생원에 기원한다(Suh *et al.*, 2014; Seinfeld and Pandis, 1998). 이처럼 자연적 발생원과 인위적 발생원은 각각 조대입자와 미세입자의 구분을 통해 간접적으로 추정되며, 나아가 황사와 연무 사례의 구분에도 동일하게 적용 가능하다. 이를 위해 입자 크기별 농도의 비율($PM_{2.5}/PM_{10}$ 또는 $PM_{1.0}/PM_{10}$)이 활용되며(Lee *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2015), 서해상 OPC에서 얻어진 자료를 활용하여 이들을 가장 효과적으로 구분할 수 있는 경계값을 제시하기 위한 분석을 수행하였다.

OPC에서 관측된 입경별 질량농도 특성 분석에 앞

서, APS로 관측한 입자 크기 분포와의 상호 비교를 통해 독립적인 방법으로 측정된 에어로졸 입경별 질량 농도의 정성적 유사성을 살펴보았다. 레이저 산란으로부터 입자의 크기를 추정하는 OPC와 달리 APS는 입자 크기에 따른 비행시간(time of flight) 차이를 측정함으로써 입자 크기를 계산한다. 이 같은 관측 원리의 차이는 OPC와 APS가 각각 광학적 직경(optical diameter)과 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)을 도출한다는 점에서 결과의 차이를 발생시킬 수 있다. APS는 입경별 수농도 관측 값($dN/d\log D_p$)을 제공하며, 이를 통한 질량농도의 계산식은 다음과 같다.

$$PM_X = \sum_{D_p=0.5}^X (dN/d\log D_p \times \pi/6 \times D_p^3 \times \text{density}) \quad (1)$$

여기서, PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$ 각각에 해당하는 입자 크기를 X 로 표시하였으며, 입자의 밀도(density)는 1.5 g/cm^3 으로 가정하였다(Pitz *et al.*, 2003). 기상 1호에 함께 탑재된 OPC와 APS 자료로부터 각각 산출한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도를 비교해보면 그림 2와 같다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 각각 0.92와 0.93의 높은 상관성을 보이며, 정성적인 측면에서 입경별 수농도의 관측이 잘 이루어지고 있음을 보여준다. 또한 PM_{10} 에 대해서 6.19의 편의(bias)를, 그리고 $PM_{2.5}$ 에 대해서는 0.77의 편의를 보였고, OPC가 APS에 비해 다소 과대 측정하는 특성을 나타냈다. 한편, 평균제곱근편차(Root Mean Squared Error, RMSE) 측면에서는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 가 각각 $57.9 \mu\text{g/m}^3$ 와 $12.2 \mu\text{g/m}^3$ 의 값을 보이며 장비 특성에 따른 한계를 일부 나타냈다. OPC와 APS는 서로 다른 원리로 입자의 질량 농도를 산출하기 때문에 각기 다른 오차특성을 가지며, 특히 조대입자를 포함하는 PM_{10} 의 경우 $PM_{2.5}$ 에 비해 질량농도가 훨씬 넓은 범위에 분포하기 때문에 상대적으로 큰 오차를 보인 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 0에 가까운 y 절편 값과, 상대적으로 크지 않은 편의로부터 두 장비 간의 측정값 차이가 비교적 고르게 분포함을 알 수 있다.

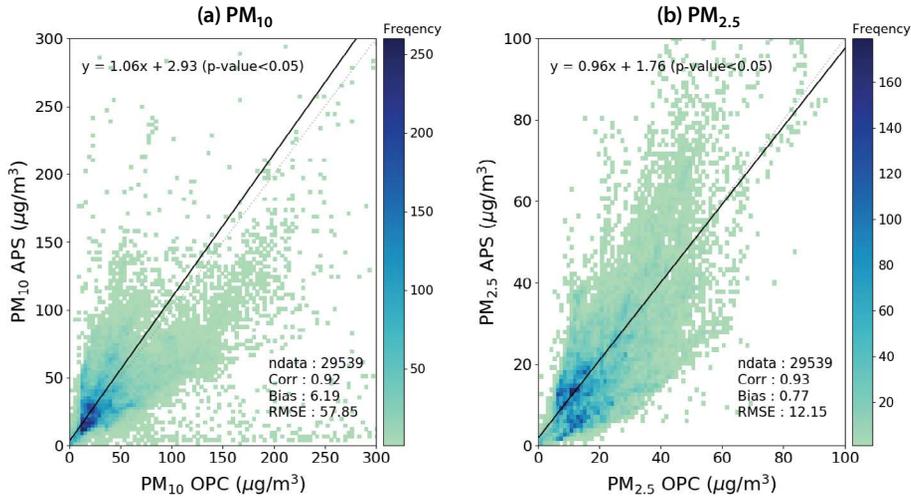


Fig. 2. Comparison between Ship-based OPC and APS for (a) PM_{10} and (b) $PM_{2.5}$.

3.2 서해상 에어로졸 입자 특성 분석

최근 3년간 YES-AQ 캠페인을 통해 기상1호에서 관측된 서해상의 입자 크기별 농도 분포를 살펴보기 위해, OPC에서 얻어진 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도를 관측 월별로 구분하여 상자 그래프(box plot)로 나타내었다(그림 3). 연도별로 살펴봤을 때, 2021년에 가장 높은 에어로졸 농도가 관측되었고, 2020년에 상대적으로 농도가 낮았다. 월별로 봤을 때는 2019년 5월과 2021년 3월에 상당히 높은 에어로졸이 나타났는데 두 기간 모두 지상에서도 황사가 관측되었다. 이 중 2021년 3월에는 유일하게 두 번의 황사 사례가 지상에서 보고되었고, 서해상에서는 PM_{10} 이 최고 $2228.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (5분 평균)에 달하는 고농도 에어로졸이 OPC에서 관측되었다. 특히, 3월 29일에는 일평균 PM_{10} 농도가 $1246.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 당일 대부분의 시간 동안 황사경보 발효기준인 $800.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2시간 이상 지속 예상)을 훨씬 웃도는 이례적으로 높은 농도가 OPC에서 나타났다. 그림 3에 제시된 전체 기간에 대한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 평균 및 표준편차를 살펴보면, 각각 $66.0 \pm 135.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $25.0 \pm 31.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고, 다소 높은 평균과 표준편차는 해당 기간에 포함된 PM_{10} 이 $2228.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 고농도 사례로 인한 것으로 보인다. 평균에서 표준편차 2배수 범위를 벗어나는 극값을 제거할

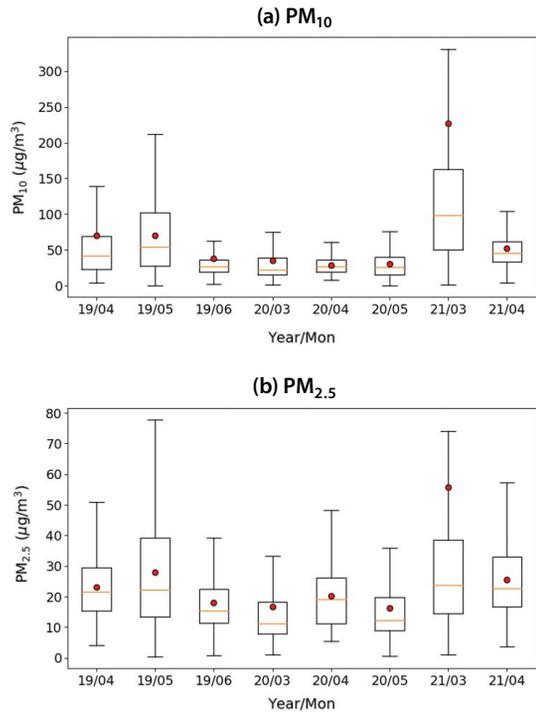


Fig. 3. Box plots of monthly (a) PM_{10} and (b) $PM_{2.5}$ obtained from ship-based OPC measurement.

경우, PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 평균농도는 $51.2 \pm 45.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $22.9 \pm 14.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮아졌다. 서해상의 PM_{10} 농

Table 2. Comparison of PM₁₀ concentration (μg/m³) in the stations around the Yellow Sea provided in previous studies.

| Stations | Mean | Standard deviation | Period | Reference |
|--------------------------|-------|--------------------|-----------------------|---------------------------|
| Yellow Sea | 66.0 | 135.0 | Mar.-Jun. / 2019-2021 | This study |
| Yellow Sea (w/o outlier) | 51.2 | 45.2 | Mar.-Jun. / 2019-2021 | This study |
| Anheung, Korea | 42.8 | 30.1 | Dec. 2017-Apr. 2018 | Lee <i>et al.</i> (2018) |
| Fujiazuang, China | 66.9 | 51.8 | Jan. 2002-Dec. 2013 | Yang <i>et al.</i> (2016) |
| Ganjingzi, China | 102.9 | 69.4 | Jan. 2002-Dec. 2013 | Yang <i>et al.</i> (2016) |
| Hongwen, China | 65.7 | 38.1 | Jan. 2002-Dec. 2013 | Yang <i>et al.</i> (2016) |
| Gosan, Korea | 43.4 | 32.1 | Jan. 2000-Dec. 2014 | Yang <i>et al.</i> (2016) |
| Ganghwa, Korea | 53.9 | 37.4 | Jan. 2000-Dec. 2014 | Yang <i>et al.</i> (2016) |
| Taeon, Korea | 54.4 | 36.9 | Jan. 2000-Dec. 2014 | Yang <i>et al.</i> (2016) |

도를 선행 연구에 제시된 한국과 중국의 배경농도 측정소, 서해안의 안흥 지점 등과 비교해 보면 표 2와 같다. 극값을 제외한 서해상의 PM₁₀ 농도는 Yang *et al.* (2016)에서 제시된 중국 배경농도 측정소인 Fujiazuang, Ganjingzi, Hongwen 보다는 낮은 편이나, 한반도의 배경농도 측정소인 고산보단 높고, 강화나 태안과는 비슷한 수준으로 볼 수 있다. 또한 Lee *et al.* (2018)에서 분석한 봄철 서해안에 위치한 태안의 안흥 지점 관측값보다 PM₁₀은 다소 높았고, PM_{2.5} (29.7 ± 25.1 μg/m³)는 낮았다.

실제 서해상의 에어로졸은 그 기원에 따라 다양한 특성을 가질 수 있으며 이들을 대개 서로 뒤섞여 존재한다. 한편, 관측된 환경에서 일반적으로 나타나는 저농도 에어로졸은 해당 지역의 배경농도로 볼 수 있으며, 전체 자료에서 가장 높은 비율을 차지하게 된다. 또한 특정 조건들에 의해 유입되는 에어로졸은 그 기원에 따라 크게 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸로 구분할 수 있으며, 이들은 각각 미세입자와 조대입자들이 우세한 구성을 갖는다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 서해상에서 OPC로 관측된 에어로졸을 각각 배경농도 그룹 (Background Particle Group, BPG), 미세입자 우세 그룹 (Fine particle Dominant Group, FDG), 조대입자 우세 그룹 (Coarse particle Dominant Group, CDG)으로 구분하고, 각 그룹이 갖는 특성을 살펴보고자 하였다. 이에 앞서 서해상에서 얻어진 전체 자료의 입자 크기 및 조대입자 대비 미세입자의 비율 분포를 히스토그램과 세 개 모드의 가

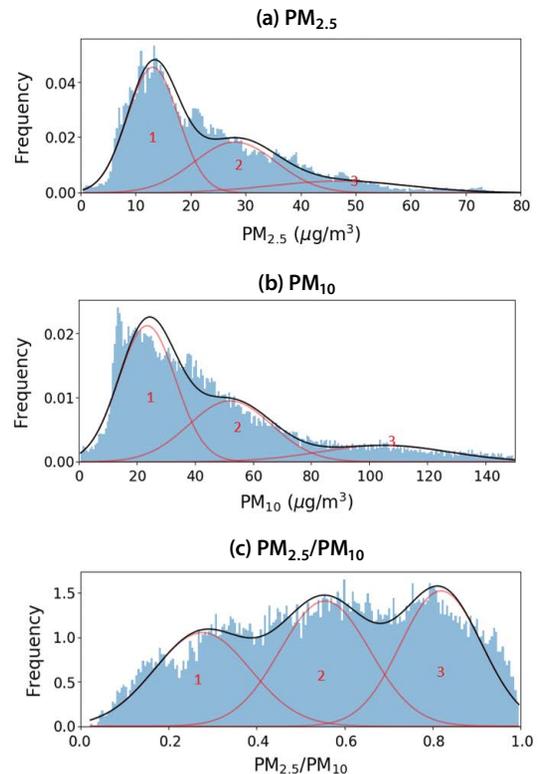


Fig. 4. Histogram and Gaussian mixture model of (a) PM_{2.5}, (b) PM₁₀, and (c) PM_{2.5}/PM₁₀ obtained from ship-based OPC measurement.

우시안 혼합모델로 분석해 살펴보면 그림 4와 같다. 편의상 가우시안 혼합 모델 분석 결과 얻어진 세 개 모드를 x축 값이 낮은 쪽부터 1번, 2번, 3번 모드로 각각 명명했을 때, PM_{2.5}와 PM₁₀ 모두 공통적으로 가장

농도가 낮은 1번 모드에 많은 자료들이 집중되는 모습을 볼 수 있으며 고농도 쪽으로 갈수록 빈도수가 점차 작아졌다. 가우시안 혼합 모델 분석은 사전 훈련 과정이 없는 비지도 학습(unsupervised learning) 분석이기 때문에 오직 자료의 분포 특성만을 바탕으로 가능성이 높은 군집을 구분 짓는다. 따라서, 자료의 분포가 확연히 구분되는 특징적인 분포를 갖지 않은 경우 실험에서 의도치 않은 결과를 제공하기도 한다. 즉, $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 분포에서 뚜렷한 가우시안 분포의 형태를 나타내지 못한 2번과 3번 모드와 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 분포상의 모드들은 어떤 특정 집단을 나타낸다고 보기에는 무리가 따른다. 반면, $PM_{2.5}$ 분포에서 1번 모드의 경우 가장 많은 자료가 집중되며 눈에 띄는 가우시안 분포를 형성하고 있다. 이는 배경농도에 대한 사전 정보로부터 BPG 모드로 추정할 수 있으며, 봄철 서해상에서 대략 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 전후의 $PM_{2.5}$ 농도가 가장 흔하게 나타나고 있음을 의미한다. 마찬가지로 PM_{10} 의 분포에서도 가장 낮은 농도대에서 높은 비율을 갖는 1번 모드가 BPG 그룹의 특성을 가장 크게 반영하고 있는 것으로 예상할 수 있다. 그러나 PM_{10} 의 경우 $PM_{2.5}$ 와는 달리 1번 모드가 뚜렷한 가우시안을 형성하지는 않고 있어, 이를 BPG 그룹으로 구분했을 때, 상대적으로 높은 불확실성을 가질 수 있을 것으로 예상된다. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 각각에 대해 BPG 모드가 차지하는 가중치를 살펴보면 0.492와 0.525이며, 뚜렷한 가우시안 모드를 형성하지 못한 PM_{10} 에서의 BPG 모드 불확실성을 감안하더라도 BPG가 전체 자료의 50%가량을 차지할 것으로 추정할 수 있다. 한편, PM_{10} 의 경우 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근의 저농도 구간에 빈도수가 일부 튀는 모습을 볼 수 있는데 이는 관측장소가 해상임을 고려했을 때, 해염 입자가 영향을 미친 것으로 사료된다. 육상 기원 에어로졸의 경우, 유입 경로와 이동 거리에 따라 다양한 크기 분포를 가질 수 있지만, 해염 입자는 봄철 서해상이라는 제한된 조건에서 생성되기 때문에 상대적으로 비슷한 크기와 농도 분포를 가질 것으로 예상된다. 따라서, PM_{10} 조대입자 분포상의 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 집중된 입

자들을 해염 입자로 추정할 수 있으며, 실제 정확한 특성을 파악하기 위해서는 화학성분에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 이는 추후 YES-AQ 캠페인에 사용된 다양한 장비에 대한 종합적인 분석 연구를 통해 자세히 다루는 것이 적절해 보인다. 마지막으로, $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 비율은 대체로 고른 빈도 분포를 보이고 있으며, 가장 많은 빈도를 가질 것으로 예상되는 BPG 그룹 또한 눈에 띄는 모드를 형성하지 못하고 있다. 이는 앞서 가정한 세 개의 그룹(BPG, CDG, FDG)이 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 분포에서 차별화된 특성을 보이지 못하거나 일부 혼재함을 의미하며, 우리가 원하는 경계값을 찾기 위해서는 다른 측면에서의 분석이 필요함을 알 수 있다.

3.3 미세입자와 조대입자 우세 특성의 구분

미세입자와 조대입자의 우세 특성을 구분하기 위해 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 분포 특성을 산포도의 형태로 나타내면 그림 5와 같다. 이 때, 분포 특성을 명확히 하기 위해 표준편차의 2배수를 벗어난 극값을 제거하였고 가우시안 커널 추정을 적용하였다. 가우시안 커널 추정을 사용할 경우, 각각의 표본은 확률분포함수 값을 가지며 이는 다수의 표본이 집중된 곳에 위치할수록 높은 값을 갖는다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 앞서 히스토그램으로 살펴본 바와 같이 BPG에 해당하는 저농도 영역에 가장 많은 자료가 집중되며, 농도가 높아질수록 빈도수가 줄어드는 분포 특성을 확인할 수 있다. 이와 함께 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 가 함께 증가하는 기울기 방향과 $PM_{2.5}$ 에 비해 PM_{10} 이 강하게 증가하는 기울기 방향으로 특징적인 분포가 일부 나타나기도 하지만 배경 농도에 집중되는 특성이 워낙 강해 식별이 쉽지 않다. 배경 농도 이외의 분포를 더 뚜렷하게 살펴보기 위해 가우시안 커널 추정에서 얻어진 확률밀도함수를 활용하여 BPG 표본들을 제거하고 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 분포를 분석하였다. 이를 위해 그림 5(a)의 전체 자료들 중에서 확률밀도함수가 높은 표본들을 BPG로 간주하여 제거하였으며, 이 때 사용된 기준값은 앞선 3.2절의 가우시안 혼합 모델 분석에서 얻어

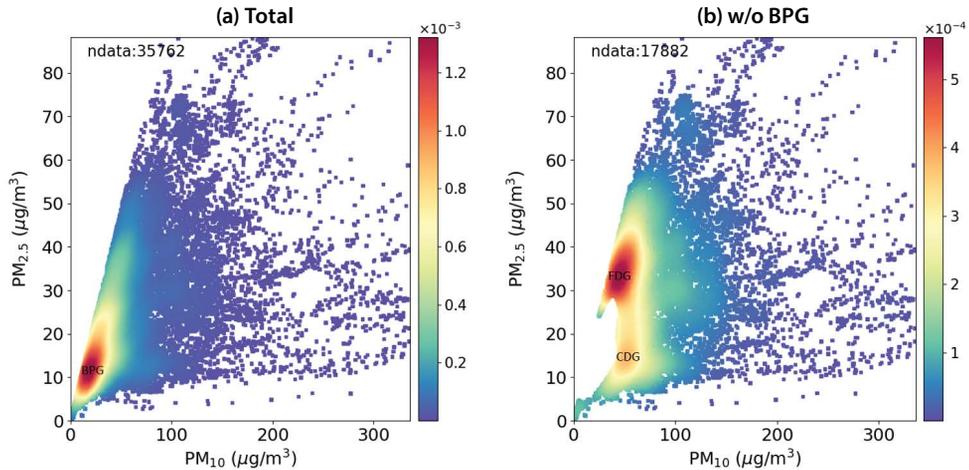


Fig. 5. Distribution of PM_{10} and $PM_{2.5}$ obtained from OPC (a) before and (b) after the BPG removal. Colors represent the probability density functions obtained from Gaussian kernel density estimate.

진 BPG 모드들의 가중치 0.5를 활용하였다(그림 5b). BPG 표본을 제거한 경우, 눈에 띄는 두개의 피크를 확인할 수 있는데 이들 중 $PM_{2.5}$ 의 비율이 높은 것을 FDG, 상대적으로 $PM_{2.5}$ 의 비율이 낮은 것을 CDG의 특성을 지닌 군집으로 구분할 수 있다.

그림 5에서 살펴본 BPG 제거 전과 후의 입경별 질량농도 분포 특성을 히스토그램으로 비교해 보면 다음의 그림 6과 같다. BPG를 제거했을 때 이전에 비해 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 모두 저농도의 분포가 확연히 줄어들었고, 특히 PM_{10} 에서 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근의 빈도수 감소가 두드러졌다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 분포에서는 비율이 낮은 쪽의 빈도수가 증가한 것을 봤을 때, 봄철 서해상의 배경농도는 미세입자 비율이 높은 쪽으로 치우친 특성을 가짐을 예상할 수 있다. BPG 표본들의 크기별 농도분포를 분석해 보면, PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에 대해서 각각 $5.0\text{--}44.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $4.5\text{--}29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이에 분포하며, $24.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $15.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균을 갖는다. BPG 제거 이후 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 분포에서 미세입자의 비율이 낮은 0.3 부근의 비율이 증가하면서 CDG와 FDG와의 구분이 이전에 비해 용이해 졌지만 여전히 명확한 경계를 찾기에는 어려움이 있다(그림 6c).

두 그룹 사이의 최적의 경계를 선정하기 위해 BPG를 제거한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 분포에서 추가로 확률밀

도함수 값이 낮은 하위 30% 자료를 제거하여 히스토그램과 가우시안 혼합모델 분석을 수행하면 그림 7과 같다. x축 값이 낮은 순서대로 모드의 번호를 매겼을 때, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 에서 미세입자 비율이 낮은 1번 모드는 CDG 모드, 2번과 3번 모드는 FDG 모드로 볼 수 있다. CDG 모드의 경우, 뚜렷한 가우시안의 형태를 나타내며, FDG 모드는 두 개의 가우시안이 결합된 형태로 표현된다. 이전(그림 6c)에 비해 CDG 모드와 FDG 모드 사이의 경계가 명확히 구분되고 있으며, 두 모드의 평균 사이에 위치하는 가우시안 혼합 모델 최솟값으로부터 0.42의 경계값을 얻을 수 있다.

$PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 은 각각 미세입자와 조대입자를 대표하는 에어로졸 크기 농도로서 널리 활용되고 있다. 그러나 이 밖에도 $PM_{2.5}$ 보다 작은 PM_1 을 미세입자 농도로 활용하거나 PM_{10} 에서 $PM_{2.5}$ 또는 PM_1 을 뺀 값을 조대입자의 농도로 사용하기도 한다. 앞서 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 분포로부터 CDG 모드와 FDG 모드의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 경계값을 선정하는 방식을 활용하여 다양하게 정의된 미세입자와 조대입자의 경계값을 산출해 보면 표 3과 같다. 미세입자와 조대입자를 구분하는 경계값은 0.36에서 0.69까지 0.5를 전후하여 다양하게 나타나며, $10 \mu\text{m}$ 이하의 모든 입자를 포함하는 PM_{10} 을 조대입자로 사용한 경우(PM_ratio1 ,

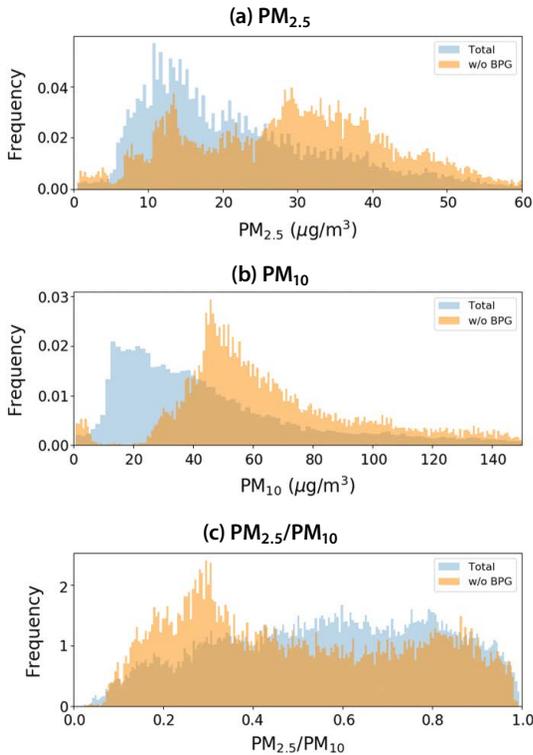


Fig. 6. Histograms of (a) $PM_{2.5}$, (b) PM_{10} , and (c) $PM_{2.5}/PM_{10}$ before (light blue) and after (orange) the BPG removal.

PM_{ratio2})가 PM_{10} 에서 미세입자농도를 뺀 $PM_{10}-PM_{2.5}$ 또는 $PM_{10}-PM_1$ 을 조대입자로 사용한 경우 ($PM_{ratio3-6}$)보다 대체로 낮은 경계값을 보였다. 또한 PM_{ratio1} , PM_{ratio2} 에서 CDG와 FDG 모드 간 경계가 가장 뚜렷하게 나타났으며, 두 그룹의 구분에 가장 효과적으로 작용할 것으로 추정된다.

3. 4 미세입자와 조대입자 우세 특성 분석

CDG와 FDG 그룹의 질량농도 분포 특성을 각각 살펴보기 위해 미세입자와 조대입자의 비율이 표 3에 제시된 모든 경계값들보다 작은 자료를 CDG로, 반대로 모든 경계값들보다 큰 비율을 갖는 자료를 FDG로 구분하여, 각 그룹별 질량농도 분포 특성을 살펴보면 그림 8과 같다. 이 때, 두 집단 사이의 특성을 명확히 구분하기 위해 3.3절에 설명한 바와 같이 BPG 표본들은 제외하고 분석을 수행하였다. 미세입

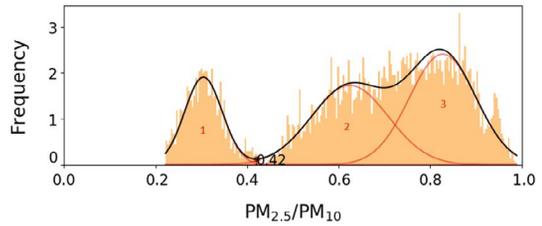


Fig. 7. Histogram and Gaussian mixture model of $PM_{2.5}/PM_{10}$ after removing BPG and lower probability density function area.

Table 3. Threshold values of the ratio of fine particles to coarse particles for the classification of CDG and FDG.

| | Fine particle | Coarse particle | Threshold value |
|---------------|---------------|--------------------|-----------------|
| PM_{ratio1} | $PM_{2.5}$ | PM_{10} | 0.42 |
| PM_{ratio2} | PM_1 | PM_{10} | 0.36 |
| PM_{ratio3} | $PM_{2.5}$ | $PM_{10}-PM_{2.5}$ | 0.69 |
| PM_{ratio4} | $PM_{2.5}$ | $PM_{10}-PM_1$ | 0.59 |
| PM_{ratio5} | PM_1 | $PM_{10}-PM_{2.5}$ | 0.55 |
| PM_{ratio6} | PM_1 | $PM_{10}-PM_1$ | 0.56 |

자에 해당하는 $PM_{2.5}$ 에 대해서 CDG는 상대적으로 미세입자 농도가 낮은 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근에 많은 자료가 분포하는 반면, FDG는 미세입자 농도가 높은 약 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 구간에 많은 비율로 분포하고 있다(그림 8a). 조대입자에 해당하는 PM_{10} 질량농도의 경우에는 CDG가 약 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최대빈도수를 보이고 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 고농도 영역까지 농도가 높아질수록 서서히 빈도수가 줄어드는 모습을 보이는 한편, FDG는 $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근에 최대빈도수를 보이고, 여기서 멀어질수록 급격히 낮아지는 분포 특성을 보인다(그림 8d). 조대입자를 나타내는 $PM_{10}-PM_{2.5}$ 나 $PM_{10}-PM_1$ 의 분포의 경우 PM_{10} 과 유사한 분포를 보이며, CDG는 각각 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 빈도수 피크에서부터 고농도로 갈수록 서서히 낮아지는 특성을 보이는 반면, FDG는 대략 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 저농도 구간에 대부분 존재한다(그림 8b, 8e). 조대입자에 대한 미세입자 비율의 경우, CDG는 0.2 전후에 최대빈도수를 보이며 가우시안에 가까운 분포를 보이는 반면, FDG는 경계값보다 높은 지역 전반에 걸쳐 고르게

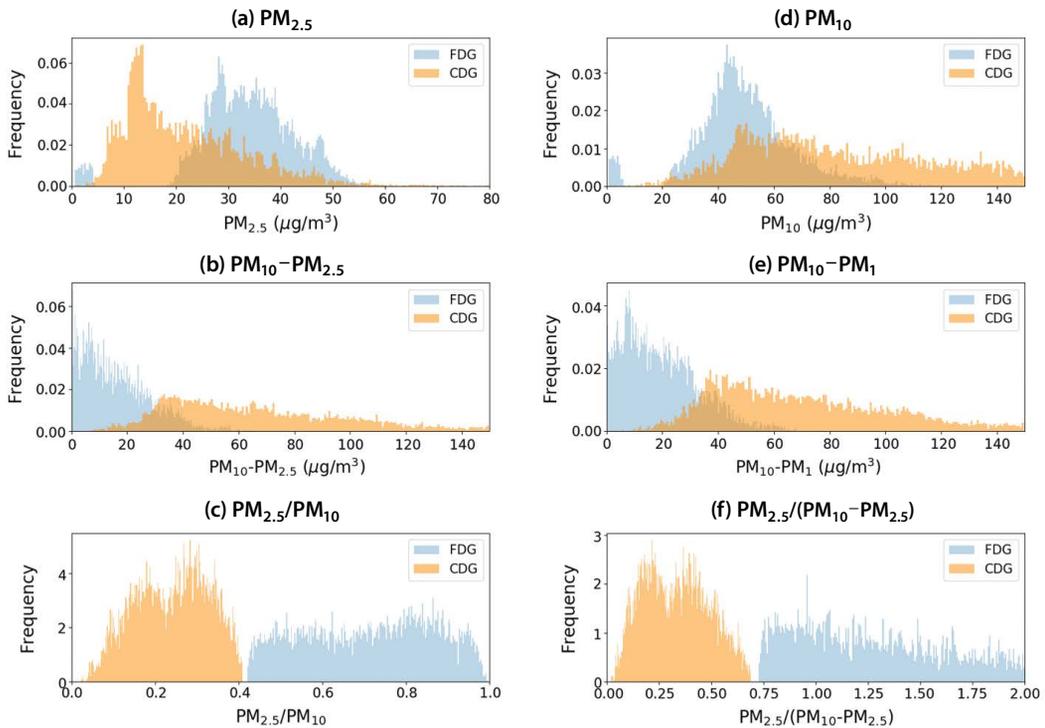


Fig. 8. Histogram of (a) $PM_{2.5}$, (b) $PM_{10}-PM_{2.5}$, (c) $PM_{2.5}/PM_{10}$, (d) PM_{10} , (e) $PM_{10}-PM_1$, and (f) $PM_{2.5}/(PM_{10}-PM_{2.5})$ for FDG and CDG.

분포하는 모습을 보이고 있다(그림 8c, 8f). 즉, 조대입자의 크기 분포에서는 FDG보다 CDG가 넓게 분포하는 모습을 보였고, 조대입자와 미세입자의 비율 측면에서는 오히려 FDG가 넓은 범위에 걸쳐 고르게 분포하는 특징을 보인다. 전체 자료에서 BPG를 제외한 CDG와 FDG의 비율을 살펴보면, 각각 42.78%와 21.07%로 CDG가 FDG에 비해 2배가량을 차지했다.

동일한 시간대의 APS 자료를 활용하여 앞서 선정된 경계값들을 통해 CDG와 FDG의 입경별 분포를 살펴보면 그림 9와 같다. 3.2절에서와 마찬가지로 BPG에 해당하는 자료들은 제거하였고, PM_{10} 농도에 따라 입경별 부피농도를 나열하였다. APS로 살펴본 CDG와 FDG의 입경별 부피농도는 두 그룹이 상당히 효과적으로 구분되고 있음을 보여준다. CDG의 경우 전체적으로 입경이 약 $1 \mu m$ 이상으로 큰 쪽에 높은 분포를 나타내며, 이는 PM_{10} 이 고농도로 갈수록 명

확해진다(그림 9a). FDG의 경우에는 반대로 $1 \mu m$ 보다 작은 미세입자 쪽의 비율이 높으며, CDG와 비교해 봤을 때 PM_{10} 농도에 따른 입경별 부피농도 차이는 크지 않았다(그림 9b). 한편, FDG는 PM_{10} 저농도 구간 ($< \sim 5 \mu g/m^3$)에서 미세입자보다 $4 \mu m$ 이상의 큰 입자의 비율이 오히려 더 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 확률분포함수 기반으로 배경농도를 제거함에 따라 발생 빈도가 낮은 극 저농도 사례가 일부 포함된 것에 기인한다. 그림 8a와 8d를 통해 배경농도 제거 이후에도 FDG에 저농도 구간이 일부 포함되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 저농도 구간에서는 배경농도 제거의 불확실성뿐만 아니라 측정 정밀도에 따라서도 미세입자와 조대입자 비율이 크게 달라질 수 있다. 그러나 실제 분석에서 중요하게 여겨지는 황사와 연무는 PM_{10} 농도가 $200 \mu g/m^3$ 고농도 사례에 해당하며, 배경농도와 저농도 구간이 모두

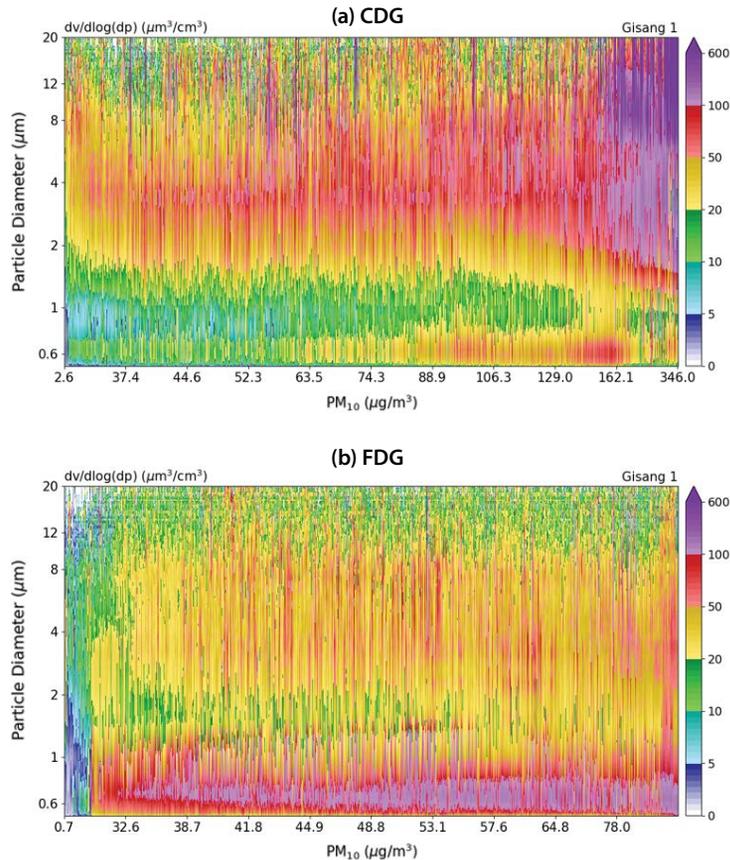


Fig. 9. Aerosol volume size distribution according to PM_{10} mass concentration of (a) CDG and (b) FDG analyzed by APS.

제거되는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도 $44.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 구간에서는 표 3의 경계값들을 통해 두 그룹을 효과적으로 구분됨을 알 수 있다.

CDG와 FDG에서 가장 높은 농도를 나타내는 입경을 명확히 살펴보기 위해 각 그룹의 평균적인 입자 크기 분포를 그림 10에 나타내었다. 그림 9에서도 확인한 바와 같이 입경별 부피농도 분포에서 CDG는 $2\sim 5 \mu\text{m}$ 의 조대입자 영역에, FDG는 $1 \mu\text{m}$ 이하의 영역에 주로 분포하고 있으며, 이들은 각각 평균경이 $3.278 \mu\text{m}$ 와 $0.626 \mu\text{m}$ 인 구간에서 가장 부피농도가 높다(그림 10a). 또한 CDG의 경우 입자 크기가 큰 쪽에서, 그리고 FDG의 경우에는 입자 크기가 작은 쪽에서 표준편차 범위가 크게 나타난다. 한편, 입경별

수농도 측면에서는 CDG와 FDG 모두 $0.542 \mu\text{m}$ 에서 수농도 최댓값을 보였으나 미세입자 영역 ($< 1 \mu\text{m}$)에서는 FDG의 수농도가 조금 더 높았고, $1\sim 3 \mu\text{m}$ 구간에서는 CDG의 수농도가 상대적으로 더 높았다(그림 10b).

4. 결 론

본 연구에서는 선박에서 얻어진 에어로졸 자료 분석의 불확실성을 줄이기 위한 하나의 수단으로써, OPC를 이용한 서해상 에어로졸 특성 분석 결과를 제시하였다. 이를 위해 YES-AQ 기간 중 기상 1호에서

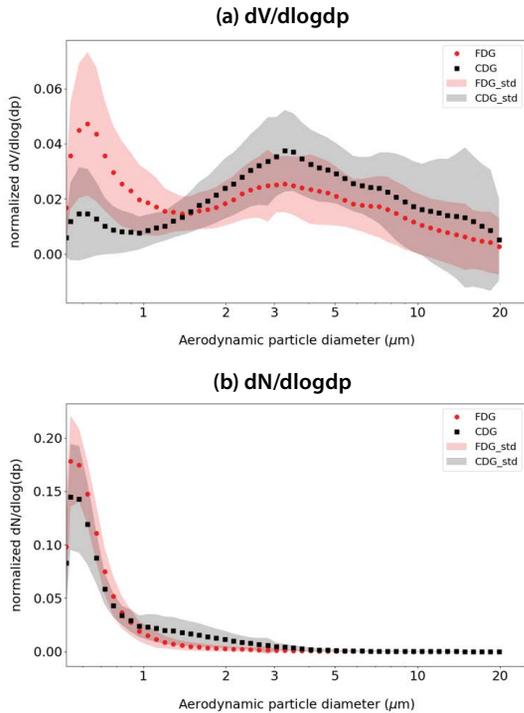


Fig. 10. Mean and standard deviations of (a) aerosol volume size distribution and (b) number size distribution for CDG and FDG.

OPC를 통해 측정된 서해상 에어로졸 입경별 ($PM_{2.5}$, PM_{10}) 질량농도 자료로부터 조대입자 우세 특성과 미세입자 우세 특성을 구분할 수 있는 경계값들을 제시하였으며, 배경농도 및 조대입자, 미세입자의 관측 특성을 분석하였다. 선박에 탑재된 OPC와 APS 자료는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 모두에 대해서 0.9 이상의 상관성을 보이며, 정성적으로는 상당히 유사했으나 PM_{10} 의 RMSE가 $57.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되는 등 관측값에는 다소 차이가 있었다. 한편, 서해상에서 황사의 영향을 많이 받는 3~6월 기간 동안 대략 50%의 빈도로 관측된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 배경농도 평균은 각각 $24.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $15.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 배경농도를 제외한 관측 자료를 조대입자의 질량농도에 대한 미세입자 질량농도의 비율을 바탕으로 CDG와 FDG로 구분하였으며, 그 경계로는 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 에 대해 0.42를 포함한 다양한 미세입자와 조대입자의 비율들을 활용하였다. 그 결

과 CDG는 $PM_{2.5}$ 에 대해서 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근에서 가장 높은 빈도수를 보였으며, PM_{10} 은 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 비교적 고르게 분포하는 특성을 보였다. 또한 FDG의 경우 $PM_{2.5}$ 에 대해서 $20\sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에, PM_{10} 에 대해서는 $30\sim 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 주로 분포하는 특성을 보였다. 본 연구에 제시된 경계값들은 배경농도의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 분포범위 상한인 $44.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도에서 두 그룹을 효과적으로 구분할 수 있을 것으로 사료되며, 특히 고농도 에어로졸 사례에 해당하는 황사와 연무 사례의 구분에 유용할 것으로 사료된다. 이와 함께 잦은 빈도수로 발생하는 약한 황사 또는 연무, 그리고 황사와 연무가 혼합된 사례에서도 에어로졸의 특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 단, 자료의 해석에 있어서는 안정적인 지상이 아닌 관측 환경에서 불가피하게 발생하는 측정의 불확실성을 고려하여, 최대한 다양한 장비들로부터 얻어진 분석 결과와의 상호 비교를 통해 신뢰성을 높일 필요가 있다. 특히, 그 범용성으로 인해 특별 관측에서 가장 널리 활용되는 OPC 측정 자료의 효과적인 분석에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 『황사·연무 감시 및 예보기술 개발』(KMA2018-00521)의 지원으로 수행되었습니다. 어려운 환경에서 소중한 자료 생산에 기여해주신 기상 1호 선원분들께 감사를 표합니다.

References

- Bates, T.S., Quinn, P.K., Coffman, D.J., Covert, D.S., Miller, T.L., Johnson, J.E., Carmichael, G.R., Uno, I., Guazzotti, S. A., Sodeman, D.A., Prather, K.A., Rivera, M., Russell, L. M., Merrill, J.T. (2004) Marine boundary layer dust

- and pollutant transport associated with the passage of a frontal system over eastern Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D19), D19S19. <https://doi.org/10.1029/2003JD004094>
- Calvin, K., Clarke, L., Krey, V., Blanford, G., Jiang, K., Kainuma, M., Kriegler, E., Luderer, G., Shukla, P.R. (2012) The role of Asia in mitigating climate change: Results from the Asia modeling exercise, *Energy Economics*, 34, S251-S260. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.09.003>
- Cha, J.W., Ko, H.-J., Shin, B., Lee, H.-J., Kim, J. E., Ahn, B., Ryoo, S.-B. (2016) Characteristics of aerosol mass concentration and chemical composition of the Yellow and South Sea around the Korean Peninsula using a Gisang 1 Research Vessel. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, 26(3), 357-372, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.3.357>
- Cho, C., Park, G., Kim, B. (2013) An effectiveness of simultaneous measurement of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{1.0} concentrations in Asian dust and haze monitoring, *Journal of Environmental Science International*, 22(6), 651-666. <https://doi.org/10.5322/JESI.2013.22.6.651>
- Choi, J., Park, R.J., Lee, H.-M., Lee, S., Jo, D.S., Jeong, J.I., Henze, D.K., Woo, J.-H., Ban, S.-J., Lee, M.-D., Lim, C.-S., Park, M.-K., Shin, H.J., Cho, S., Peterson, D., Song, C.-K. (2019) Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on PM_{2.5} exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 203, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.008>
- Choi, J.-C., Cha, J.-W., Bang, S.-Y., Youn, Y.-H. (2002) A Study on Physical and Chemical Characteristics of Yellow Sand at Anmyeon-do, Chungnam, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 38(2), 105-117, (in Korean with English abstract).
- Clarke, A.D., Howell, S., Quinn, P.K., Bates, T.S., Ogren, J.A., Andrews, E., Jefferson, A., Massling, A., Mayol-Braceiro, O., Maring, H., Savoie, D., Cass, G. (2002) INDOEX aerosol: A comparison and summary of chemical, microphysical, and optical properties observed from land, ship, and aircraft, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D19), 8033. <https://doi.org/10.1029/2001JD000572>
- 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.-Y., Hong, Y.-D., Lefer, B.L., Lee, M., Lee, T., Kim, S., Min, K.-E., Yum, S.S., Shin, H.J., Kim, Y.-W., Choi, J.-S., Park, J.-S., Szykman, J.J., Long, R.W., Jordan, C.E., Simpson, J.J., Fried, A., Dibb, J.E., Cho, S., Kim, Y.P. (2021) The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.00163>
- Denjean, C., Bourrienne, T., Burnet, F., Mallet, M., Maury, N., Colomb, A., Dominutti, P., Brito, J., Dupuy, R., Sellégri, K., Schwarzenboeck, A., Flamant, C., Knippertz, P. (2020) Overview of aerosol optical properties over southern West Africa from DACCWA aircraft measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(8), 4735-4756. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4735-2020>
- Diesch, J.-M., Drewnick, F., Klimach, T., Borrmann, S. (2013) Investigation of gaseous and particulate emissions from various marine vessel types measured on the banks of the Elbe in Northern Germany, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(7), 3603-3618. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3603-2013>
- Goldberg, D.L., Saide, P.E., Lamsal, L.N., de Foy, B., Lu, Z., Woo, J.-H., Kim, Y., Kim, J., Gao, M., Carmichael, G., Streets, D.G. (2019) A top-down assessment using OMI NO₂ suggests an underestimate in the NO_x emissions inventory in Seoul, South Korea, during KORUS-AQ, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(3), 1801-1818. <https://doi.org/10.5194/acp-19-1801-2019>
- Halliday, H.S., DiGangi, J.P., Choi, Y., Diskin, G.S., Pusede, S.E., Rana, M., Nowak, J.B., Knote, C., Ren, X., He, H., Dickerson, R.R., Li, Z. (2019) Using Short-Term CO/CO₂ Ratios to Assess Air Mass Differences Over the Korean Peninsula During KORUS-AQ, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(20), 10951-10972. <https://doi.org/10.1029/2018JD029697>
- Heim, M., Mullins, B.J., Umhauer, H., Kasper, G. (2008) Performance evaluation of three optical particle counters with an efficient "multimodal" calibration method, *Journal of Aerosol Science*, 39(12), 1019-1031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.07.006>
- Herman, J., Spinei, E., Fried, A., Kim, J., Kim, J., Kim, W., Cede, A., Abuhassan, N., Segal-Rozenhaimer, M. (2018) NO₂ and HCHO measurements in Korea from 2012 to 2016 from Pandora spectrometer instruments compared with OMI retrievals and with aircraft measurements during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4583-4603. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4583-2018>
- Itahashi, S., Sakurai, T., Shimadera, H., Araki, S., Hayami, H. (2021) Long-term trends of satellite-based fine-

- mode aerosol optical depth over the Seto Inland Sea, Japan, over two decades (2001-2020), *Environmental Research Letters*, 16(6), 064062. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac03db>
- Jaffe, D., Snow, J., Cooper, O. (2003) The 2001 Asian Dust Events: Transport and Impact on Surface Aerosol Concentrations in the U.S. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 84(46), 501-516. <https://doi.org/10.1029/2003EO460001>
- Jordan, C.E., Crawford, J.H., Beyersdorf, A.J., Eck, T.F., Halliday, H.S., Nault, B.A., Chang, L.-S., Park, J., Park, R., Lee, G. L., Kim, H., Ahn, J.-Y., Cho, S., Shin, H.J., Lee, J.H., Jung, J., Kim, D.-S., Lee, M., Lee, T., Whitehill, A., Szykman, J., Schueneman, M.K., Campuzano-Jost, P., Jimenez, J.L., Digangi, J.P., Diskin, G.S., Anderson, B.E., Moore, R.H., Ziemba, L.D., Fenn, M.A., Hair, J.W., Kuehn, R.E., Holz, R.E., Chen, G., Travis, K., Shook, M., Peterson, D.A., Lamb, K.D., Schwarz, J.P. (2020) Investigation of factors controlling PM_{2.5} variability across the South Korean Peninsula during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8. <https://doi.org/10.1525/elementa.424>
- Kim, H., Gil, J., Lee, M., Jung, J., Whitehill, A., Szykman, J., Lee, G., Kim, D.-S., Cho, S., Ahn, J.-Y., Hong, J., Park, M.-S. (2020) Factors controlling surface ozone in the Seoul Metropolitan Area during the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8. <https://doi.org/10.1525/elementa.444>
- Kim, H., Zhang, Q., Heo, J. (2018) Influence of intense secondary aerosol formation and long-range transport on aerosol chemistry and properties in the Seoul Metropolitan Area during spring time: results from KORUS-AQ, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(10), 7149-7168. <https://doi.org/10.5194/acp-18-7149-2018>
- 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>
- Lee, H.-J., Jo, H.-Y., Kim, S.-W., Park, M.-S., Kim, C.-H. (2019) Impacts of atmospheric vertical structures on transboundary aerosol transport from China to South Korea, *Scientific Reports*, 9, 13040. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49691-z>
- Lee, K.-H., Lee, K.-T., Kim, J.-H., Mun, G.-H., Ahn, J.-M. (2018) Characteristics of Aerosol Mass Concentrations and Size Distribution Measured at Anheung, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 677-686, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.677>
- Lee, T., Choi, J., Lee, G., Ahn, J., Park, J.S., Atwood, S.A., Schurman, M., Choi, Y., Chung, Y., Collett, J.L. (2015) Characterization of aerosol composition, concentrations, and sources at Baengnyeong Island, Korea using an aerosol mass spectrometer, *Atmospheric Environment*, 120, 297-306. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.038>
- Lee, Y.-G., Cho, C.-H., Kim, M.-S. (2008) Developing a Method for Detecting the Asian Dust Event among High PM₁₀ Events Using Aerodynamic Particle Sizer (APS), *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, 18(1), 25-32, (in Korean with English abstract).
- Matsumoto, K., Uematsu, M. (2005) Free amino acids in marine aerosols over the western North Pacific Ocean, *Atmospheric Environment*, 39(11), 2163-2170. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.022>
- Moore II, K.G., Clarke, A.D., Kapustin, V.N., McNaughton, C., Anderson, B.E., Winstead, E.L., Weber, R., Ma, Y., Lee, Y.N., Talbot, R., Dibb, J., Anderson, T., Doherty, S., Covert, D., Rogers, D. (2004) A comparison of similar aerosol measurements made on the NASA P3-B, DC-8, and NSF C-130 aircraft during TRACE-P and ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D15), D15S15. <https://doi.org/10.1029/2003JD003543>
- National Institute of Meteorological Sciences (NIMS) (2020) Asian dust report 2019.
- Oak, Y.J., Park, R.J., Schroeder, J.R., Crawford, J.H., Blake, D.R., Weinheimer, A.J., Woo, J.-H., Kim, S.-W., Yeo, H., Fried, A., Wisthaler, A., Brune, W.H. (2019) Evaluation of simulated O₃ production efficiency during the KORUS-AQ campaign: Implications for anthropogenic NO_x emissions in Korea, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 7. <https://doi.org/10.1525/elementa.394>
- Park, M., Yum, S.S., Kim, N., Jeong, M., Yoo, H.-J., Kim, J.E., Park, J., Lee, M., Sung, M., Ahn, J. (2021) 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, R.J., Oak, Y.J., Emmons, L.K., Kim, C.-H., Pfister, G.G., Carmichael, G.R., Saide, P.E., Cho, S.-Y., Kim, S., Woo, J.-H., Crawford, J.H., Gaubert, B., Lee, H.-J., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Gao, M., Tang, B., Stanier, C.O., Shin, S.S., Park,

- H.Y., Bae, C., Kim, E. (2021) Multi-model intercomparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00139>
- Park, S.-U., Lee, E.-H. (2004) Parameterization of Asian dust (Hwangsae) particle-size distributions for use in dust emission models, *Atmospheric Environment*, 38(14), 2155-2162. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.024>
- Pérez, N., Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Bhatia, R., Spiro, B., Hanvey, M. (2010) Physicochemical variations in atmospheric aerosols recorded at sea onboard the Atlantic-Mediterranean 2008 Scholar Ship cruise (Part I): Particle mass concentrations, size ratios, and main chemical components, *Atmospheric Environment*, 44(21-22), 2552-2562. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.023>
- Pitz, M., Cyrys, J., Karg, E., Wiedensohler, A., Wichmann, H., Heinrich, J. (2003) Variability of apparent particle density of an urban aerosol, *Environmental Science & Technology*, 37(19), 4336-4342. <https://doi.org/10.1021/es034322p>
- Ramanathan, V., Agrawal, M., Akimoto, H. (2008) Atmospheric brown clouds: Regional assessment report with focus on Asia, The United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Schroeder, J.R., Crawford, J.H., Ahn, J.-Y., Chang, L., Fried, A., Walega, J., Weinheimer, A., Montzka, D.D., Hall, S.R., Ullmann, K., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Chen, G., Blake, D.R., Blake, N.J., Hughes, S.C., Meinardi, S., Diskin, G., Digangi, J.P., Choi, Y., Pusede, S.E., Huey, G.L., Tanner, D.J., Kim, M., Wennberg, P. (2020) Observation-based modeling of ozone chemistry in the Seoul metropolitan area during the Korea-United States Air Quality Study (KORUS-AQ), *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8. <https://doi.org/10.1525/elementa.400>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998) *Atmospheric chemistry and physics*, John Wiley and Sons. 408-447.
- Shin, D.H., Müller, D., Choi, T., Noh, Y.M., Yoon, Y.J., Lee, K.H., Shin, S.K., Chae, N., Kim, K., Kim, Y.J. (2014) Influence of wind speed on optical properties of aerosols in the marine boundary layer measured by ship-borne DePolarization Lidar in the coastal area of Korea, *Atmospheric Environment*, 83, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.027>
- Shiobara, M., Hara, K., Yabuki, M., Kobayashi, H. (2007) Optical and chemical properties of marine boundary-layer aerosol around Japan determined from shipboard measurements in 2002, *Atmospheric Environment*, 41(22), 4638-4652. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.048>
- Simpson, I.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S.C., Fleming, L.T., Crawford, J.H., Diskin, G. S., Emmons, L.K., Fried, A., Guo, H., Peterson, D.A., Wisthaler, A., Woo, J.-H., Barré, J., Gaubert, B., Kim, J., Kim, M.J., Kim, Y., Knote, C., Mikoviny, T., Pusede, S.E., Schroeder, J.R., Wang, Y., Wennberg, P.O., Zeng, L. (2020) Characterization, sources and reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in Seoul and surrounding regions during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8. <https://doi.org/10.1525/elementa.434>
- Sinha, P.R., Manchanda, R.K., Subbarao, J.V., Dumka, U.C., Sreenivasan, S., Suresh Babu, S., Krishna Moorthy, K. (2011) Spatial distribution and vertical structure of the MABL aerosols over Bay of Bengal during winter: Results from W-ICARB experiment, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73(4), 430-438. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.10.011>
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.131>
- Spinei, E., Whitehill, A., Fried, A., Tiefengraber, M., Knepp, T.N., Herndon, S., Herman, J.R., Müller, M., Abuhassan, N., Cede, A., Richter, D., Walega, J., Crawford, J., Szykman, J., Valin, L., Williams, D.J., Long, R., Swap, R.J., Lee, Y., Nowak, N., Poche, B. (2018) The first evaluation of formaldehyde column observations by improved Pandora spectrometers during the KORUS-AQ field study, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(9), 4943-4961. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4943-2018>
- Suh, J.-M., Bin, W., Jang, S.-H., Park, J.-H., Choi, K.-C. (2014) Characteristics of Size-segregated Mass Concentrations of Indoor Aerosol Particles in University Buildings, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 24(4), 453-461, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2014.24.4.453>
- Walser, A., Sauer, D., Spanu, A., Gasteiger, J., Weinzierl, B. (2017) On the parametrization of optical particle counter response including instrument-induced broadening of size spectra and a self-consistent evaluation

- of calibration measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(11), 4341-4361. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4341-2017>
- Yang, G.-H., Lee, J.-J., Lyu, Y.-S., Chang, L.-S., Lim, J.H., Lee, D.-W., Kim, S.-K., Kim, C.-H. (2016) Analysis of the recent trend of national background PM₁₀ concentrations over Korea, China, and Japan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 360-371, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.360>
- Yoo, H.Y., Kim, K.A., An, H., Lee, Y., Zihui, T., Yoo, H.-J., Kim, J.E., Ko, H.-J., Sung, M.-Y., Choi, J.-S., Park, J.-S., Lee, J.Y. (2021) Characteristics of Carbonaceous and Organic Components in PM_{2.5} over the Yellow Sea, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 31(3), 267-282, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2021.31.3.267>
- Yus-Diez, J., Ealo, M., Pandolfi, M., Perez, N., Titos, G., Močnik, G.a., Querol, X., Alastuey, A. (2021) Aircraft vertical profiles during summertime regional and Saharan dust scenarios over the north-western Mediterranean basin: aerosol optical and physical properties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(1), 431-455. <https://doi.org/10.5194/acp-21-431-2021>
- Zhao, R., Han, B., Lu, B., Zhang, N., Zhu, L., Bai, Z. (2015) Element composition and source apportionment of atmospheric aerosols over the China Sea. *Atmospheric Pollution Research*, 6(2), 191-201. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.023>

Authors Information

- 신대근 (국립기상과학원 미래기반연구부 연구원)
(shingeun@korea.kr)
- 김정은 (국립기상과학원 미래기반연구부 연구사)
(narci76@korea.kr)
- 정주용 (국립기상과학원 미래기반연구부 연구관)
(cychung@kma.go.kr)
- 유희정 (국립기상과학원 미래기반연구부 연구사)
(heejuyoo@korea.kr)