

국내 AERONET 관측 현황과 장기간 에어로졸 광학 깊이의 변화 및 에어로졸 분포 분석

장성현¹⁾ · 엄준식^{1),2),3)*}

¹⁾부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공,
²⁾부산대학교 대기환경과학과, ³⁾부산대학교 환경연구원

(접수일: 2024년 5월 14일, 수정일: 2024년 6월 28일, 게재확정일: 2024년 6월 29일)

Current Status of AERONET Observations in South Korea and Analysis of Long-Term Changes in Aerosol Optical Depth and Aerosol Distribution

Seonghyeon Jang¹⁾ and Junshik Um^{1),2),3)*}

¹⁾BK21 School of Earth and Environment Systems, Division of Earth Environmental System,
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

²⁾Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan, Korea

³⁾Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan, Korea

(Manuscript received 14 May 2024; revised 28 June 2024; accepted 29 June 2024)

Abstract This study analyzed the distribution of Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 Level 2.0 data, spanning over two decades, across South Korea and its six administrative regions (Seoul metropolitan area, Chungcheong, Jeolla, Gangwon, Gyeongsang, and Jeju). The research assessed long-term trends in aerosol optical depth (AOD) and mass concentration of particulate matter (i.e., PM_{10} and $PM_{2.5}$), using data from the AERONET direct sun product and AirKorea, respectively. Additionally, eight aerosol types were identified using the scattering Ångström exponent and absorption Ångström exponent from the AERONET inversion product. The study further explored their domestic and regional distributions. Findings indicated that AERONET data were predominantly concentrated in the western regions of South Korea, including the Seoul metropolitan area, Chungcheong, and Jeolla, with a higher frequency of data in spring, thus demonstrating spatial and temporal heterogeneity. The annual average AOD exhibited a declining trend of -0.006 yr^{-1} . Similarly, PM_{10} and $PM_{2.5}$ mass concentrations decreased by $-1.324 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ and $-1.335 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$, respectively. These trends in AOD and PM_{10} ($PM_{2.5}$) demonstrated positive correlations, with correlation coefficients of 0.674 (0.753) and statistically significant low p-values of 0.00058 (0.03), respectively. The analysis also revealed that aerosols in South Korea predominantly consisted of black carbon (BC) or BC-mixed types (84.09%), with a notable presence of smaller, less absorbent aerosol types (13.11%).

Key words: AERONET, AOD, Long-term trend, Aerosol types, Regional distribution

*Corresponding Author: Junshik Um, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, 2, Busandehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-2171, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: jjunum@pusan.ac.kr

1. 서 론

대기 중 에어로졸은 국민적 관심사로 부상하였으며, 대기질을 결정하는 주요 요소일 뿐만 아니라 호흡기 질환과 같은 공중보건 문제를 초래하는 주된 원인으로 알려져 있다(IPCC, 2013). 에어로졸은 자연적 및 인위적 원인에 의해 발생하며, 고체 및 액체 형태의 입자로 대기 중에 존재한다. 에어로졸은 광물성 먼지, 바이오매스 연소 생성물, 화산재, 산업 오염물질, 해염 입자, 그리고 유기체 등에서 발생하는 화합물을 포함한다(Huang et al., 2016). 에어로졸 입자의 크기는 직경이 수 나노미터에서 수십 마이크로미터에 이르는 넓은 범위에 걸쳐 있으며, 대기 중 다양한 물리적 및 화학적 반응을 통해 입자 크기와 구성 성분이 복잡하게 변화하며, 이는 복사 강제력에 큰 영향을 미친다(Haywood and Boucher, 2000). 이러한 에어로졸의 복잡성으로 인해 지구 기후에 대한 불확실성이 매우 크다(IPCC, 2023). 따라서, 에어로졸의 특성을 정확하게 이해하기 위해서는 다양한 관측 및 분석이 지속적으로 필요하다.

에어로졸의 분포와 특성을 파악하기 위해 위성과 라이다 같은 다양한 원격탐사 기술이 활용되고 있다. 이 중 지상 기반의 원격 탐사 방법으로 가장 널리 사용되는 것은 Aerosol Robotic Network (AERONET; Holben et al., 1998), Sky Radiometer Network (SKYNET; Nakajima et al., 2007), Sun-Sky Radiometer Observation Network (SONET; Li et al., 2018) 등이 대표적인 선포토크미터(sunphotometer)를 활용한 방법이다. AERONET은 이들 중 가장 빈번하고 널리 자료가 사용되는 네트워크로, 직접 산출 자료(direct sun product)와 역산출 자료(inversion product) 두 종류의 자료를 제공한다. 직접 산출 자료는 선포토크미터에 도달하는 태양 복사 관측 및 소산된 태양 복사를 계산하여 대기 중 연직 에어로졸 광학 깊이(Aerosol Optical Depth, AOD)를 산출한다. AOD는 서로 다른 파장에 대해서 독립적으로 산출되며, 에어로졸의 크기를 추정할 수 있는 옹스트롬 지수(Ångström exponent) 산출에 사용된다. 역산출 자료는 측정된 복사 휘도를 기반으로 에어로졸의 크기 분포(size distribution), 단일 산란 알베도(Single-Scattering Albedo, SSA), 위상 함수(phase function), 복소 굴절률(complex index of refraction) 등 에어로졸의 복합적인 특성을 산출한다(Dubovik and King, 2000; Dubovik et al., 2000, 2002a, 2002b, 2006; Sinyuk et al., 2007). AERONET은 설립 이후 현재까지 전 세계적으로 관측이 중단된 관측 지점을 포함하여 총 1,408개의 관측 지점에서 관측을 수행하고 있다. 현재 제공되고 있는 AERONET 자료는 Version 3 알고리즘에 따라 구름의 영향을 자

동으로 제거 및 보정한 품질 관리된 자료이다(Smirnov et al., 2000; Giles et al., 2019).

국내에는 총 43개의 AERONET 관측 지점이 존재한다. 이 중 일부는 현재까지도 자료를 지속적으로 산출하고 있으나, 과거에는 자료를 산출하였지만 현재는 중단된 관측 지점도 다수 존재한다. 일부 관측 지점은 단기간 동안만 자료를 산출하였으나, 국내 AERONET 자료는 20년 이상 축적되어 있어 장기간의 에어로졸 추세 분석이 가능하다. 특히, AOD의 연간 또는 월간 평균값과 장기간 변화 추세를 지상 미세먼지 질량농도에 대한 중요한 간접 지표로 활용되며, 국민적 관심사가 높다. 국내 43개 관측 지점은 서울특별시, 인천광역시, 광주광역시, 울산광역시, 부산광역시, 경기도, 강원도, 충청도, 전라도, 경상도, 제주도 등의 행정구역에 분포하며, 이들은 수도권 지역(서울특별시, 인천광역시, 경기도), 경상도 지역(부산광역시, 울산광역시, 경상도), 전라도 지역(광주광역시, 전라도), 강원도, 충청도, 제주도 등 6개의 주요 지역으로 구분된다. 비록 현재는 국지적인 범위에서 에어로졸 유형 분류 및 특징 연구가 주로 수행되고 있지만, 전국적인 분석을 통한 지역별 에어로졸 유형 분류 및 분포에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 한국 전역에 대한 종합적인 에어로졸 유형 분류 및 분석이 필요하다.

대기 중 에어로졸은 입자 크기와 태양 복사의 흡수성과 같은 물리적 특성에 따라 분류된다. 이러한 분류에는 탄소질(carbonaceous) 에어로졸로서 태양 복사의 흡수성이 강하고 입자 크기가 작으며, 크기가 크고 흡수성이 강한 분진(dust), 흡수성이 매우 낮고 입자 크기가 작은 황산염(sulfate), 그리고 흡수성이 낮고 입자 크기가 큰 해염(sea-salt)이 포함된다(Higurashi and Nakajima, 2002; Kim et al., 2007; Lee et al., 2010). 에어로졸 유형을 분류하는 다양한 방법이 존재한다. 예를 들어 Lee et al. (2010)은 AERONET 자료를 토대로 에어로졸의 미세입자비율(fine mode fraction)과 SSA 간의 관계를 사용하여 에어로졸 유형을 분류하였으며, Shin et al. (2019)는 입자 편광소멸도(particle depolarization ratio)와 SSA 간의 관계를 통해 에어로졸 유형을 분류하였다. 이외에도 산란 옹스트롬 지수(Scattering Ångström Exponent, SAE)와 흡수 옹스트롬 지수(Absorption Ångström Exponent, AAE)를 사용하여 에어로졸 유형을 분류하는 방법 또한 존재한다. 이 지수들을 통한 군집 분석으로 에어로졸 유형을 구분한 사례가 Russell et al. (2010)에 의해 보고되었으며, 다른 연구에서는 지상 원격탐사 및 현장 관측 자료를 활용하여 에어로졸 유형을 SAE와 AAE 값으로 분류하였다(Cazorla et al., 2013; Cappa et al., 2016; Schmeisser et al., 2017).

본 연구는 1999년부터 2022년까지 국내 AERONET 관측 지점에서 산출한 Version 3 Level 2.0 직접 산출 자료와 역산출 자료를 분석하였다. 연별, 월별, 계절별 AOD의 장기간 변화를 직접 산출 자료를 활용하여 분석하였고, 에어코리아(<http://www.airkorea.or.kr>)의 최종 확정 측정자료를 사용하여 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 장기 변화도 함께 분석하였다. 또한, 역산출 자료에서 제공되는 SSA 값을 활용하여 SAE와 AAE 값에 기반한 에어로졸 유형 분류 결과를 토대로 에어로졸 유형의 시간적 및 공간적 분포를 한국 전역 및 6개 지역(수도권, 경상도, 전라도, 강원도, 충청도, 제주도)에 걸쳐 분석하였다.

2. 연구 방법 및 자료

2.1 AERONET과 에어코리아 자료

국내 AERONET 직접 산출 자료와 역산출 자료는 각각 1999년 4월 20일과 4월 23일에 진행(Chinhae: 35.156°N, 128.652°E)에서 처음 산출되었으며, 2022년을 기준으로 총 43개의 AERONET 관측 지점에서 자료를 산출하였다. 이 중 17개의 관측 지점은 Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks-Asia 2012 (DRAGON-Asia 2012; https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/DRAGON-Asia_2012_Japan_South_Korea.html) 현장 관측 캠페인을 위해 일시적으로 설치되었으나 현재는 운영되지 않고 있다. 또한, Korea United States Air Quality (KORUS-AQ; Crawford et al., 2021) 현장 관측 캠페인을 위해 설치되었던 10개의 관측 지점 중 울산(KORUS_UNIST_Ulsan; 35.582°N, 129.19°E) 관측 지점을 제외하고는 현재 운영되지 않는다(Fig. 1). 관측 캠페인을 위해 설치된 관측소를 제외한 지점 중 8개의 관측 지점도 운영되고 있지 않으며, 현재까지 운영되고 있는 관측 지점은 울산 관측 지점을 포함하여 총 9개이다. 본 연구에서는 1999년부터 2022년까지 국내 AERONET 관측 지점에서 산출된 모든 Version 3 Level 2.0 직접 산출 자료와 역산출 자료를 사용하였다. 다만, 역산출 자료 중에서는 440 nm 파장에서의 AOD [AOD (440 nm)]가 0.4 이상일 때의 자료만을 사용하였다. Dubovik et al. (2002b)에 따르면 AERONET Level 2.0 역산출 자료 중 SSA는 AOD (440 nm)가 0.4 이상일 때 불확실성이 ±0.03이라고 보고되었다. 즉, AOD (440 nm)가 0.4 이상일 경우 SSA가 유효한 값을 가진다는 것을 의미하므로, 이 조건을 만족하는 에어로졸 역산출 자료만을 사용하였다.

에어코리아는 2023년 3월 기준으로 전국 162개의 시와 군에 설치된 총 645개의 측정소에서 측정 자료를 제공하고 있으며, 실시간 자료와 모든 측정소의 자료를 매년 검증하여 최종 확정 측정자료를 제공하

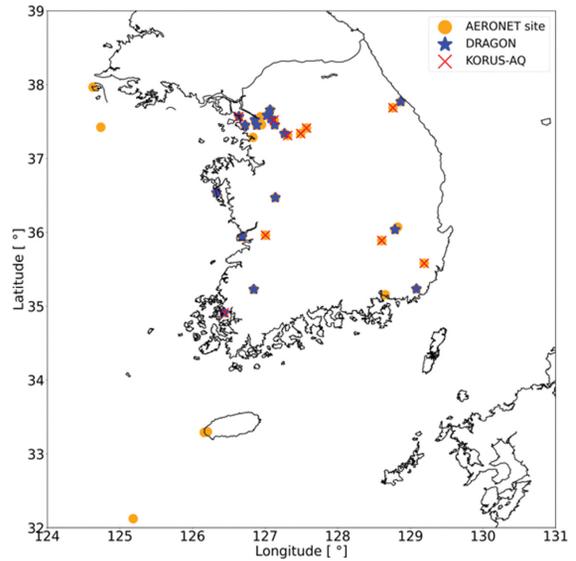


Fig. 1. The locations of the AERONET sites in South Korea.

고 있다. 최종 확정 측정자료는 2001년부터 수집된 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃), PM₁₀, 그리고 2015년부터 측정을 시작한 PM_{2.5}의 자료가 포함되어 있다. PM₁₀ 자료는 20년 이상 축적되어 있으며, PM_{2.5} 자료도 현재 약 8년 이상의 자료가 축적되어 있어, 이를 통해 질량농도의 변화를 분석할 수 있다.

본 연구는 1999년부터 2022년까지 국내 AERONET 직접 산출 자료와 AOD (440 nm)가 0.4 이상일 때의 에어로졸 역산출 자료(AOD_{0.4})의 분포를 파악하였다. 지역별 분포 및 변화를 분석하기 위해 AERONET 관측 지점과 에어코리아 측정소의 위치를 기반으로 6개의 지역으로 구분하고 각 지역의 자료 분포를 파악하였다. 또한, 직접 산출 자료와 에어코리아 최종 확정 측정자료를 사용하여, 각 자료가 산출된 이래로부터 2022년까지 AOD와 PM₁₀, 그리고 PM_{2.5} 질량농도의 연별, 월별 및 계절별 변화를 분석하였다. 또한 AOD와 PM₁₀, 그리고 PM_{2.5} 질량농도 변화 간의 관계를 통계적으로 분석하였다.

2.2 에어로졸 유형 분류

본 연구는 Schmeisser et al. (2017)의 에어로졸 유형 분류 방법을 적용하기 위해 AOD_{0.4} 자료를 기반으로 SAE와 AAE를 사용하였다. SAE는 산란의 파장의존성을 나타내는 값으로, 입자의 크기에 반비례한다. 즉, 작은 SAE 값은 상대적으로 큰 입자 크기의 에어로졸(예, 분진과 해염입자)을 나타내며, 큰 SAE 값은 작은 입자 크기의 에어로졸을 의미하여 입자의

Table 1. Aerosol types classified based on Schmeisser et al. (2017) and expressions in this study.

Aerosol type name	Expression
Black carbon	BC
Brown carbon	BrC
Dust	DU
Mixed black carbon & brown carbon	BC-BrC mix
Mixed dust & black carbon & brown carbon	DU-BC-BrC mix
Mixed large particle & black carbon	LP-BC mix
Large particle & low absorption	LP-LA
Small particle & low absorption	SP-LA

크기를 간접적으로 파악할 수 있다(Bergin et al., 2000; Schuster et al., 2006). AAE는 흡수성에 대한 파장의 의존성을 나타내는 값으로, 에어로졸을 구성하는 화학성분의 흡수성에 따라 달라진다. 이에 따라 각 에어로졸은 고유한 AAE 값의 범위를 가진다(Bergstrom et al., 2002, 2007; Russell et al., 2010). 이를 토대로 Cazorla et al. (2013)은 화석연료 연소, 바이오매스 연소, 분진의 배출원과 인접한 AERONET 관측지점의 SAE와 AAE 값을 사용하여 에어로졸 유형 분류 방법을 제시하였다. Cazorla et al. (2013)의 분류 방법은 Cappa et al. (2016)에 의해 현장 관측 자료를 사용하여 조정되었으며, 이후 Schmeisser et al. (2017)에 의해 24곳의 NOAA/ESRL Federated Aerosol Monitoring Network (NFAN; Andrews et al., 2019) 관측 지점의 자료와 군집 분석을 통해 다시 조정되었다. 그 결과로 SAE 값 1.0~1.5를 기준으로 미세 입자(fine particle)와 조대 입자(coarse particle)를 구분하였으며, 에어로졸을 구성하는 화학 물질에 따른 AAE의 범위를 기반으로 8가지의 에어로졸이 분류되었다. 분류된 8가지 에어로졸은 Dust (DU), Brown Carbon (BrC), Black Carbon (BC), mixed DU/BC/BrC (DU-BC-BrC mix), mixed BC/BrC (BC-BrC mix), mixed Large Particle/BC (LP-BC mix), Large Particle/Low Absorption (LP-LA), 그리고 Small Particle/Low Absorption (SP-LA)이다(Table 1). 본 연구에서는 이 8가지 에어로졸 유형 분류 결과를 기반으로 국내 에어로졸의 유형별 분포를 파악하였으며, 6개 지역별로 각 에어로졸 유형의 분포를 분석하여 지역별 에어로졸 분포 특성을 파악하였다.

3. 연구 결과

3.1 국내 AERONET 자료 분포

Figure 2는 국내 AERONET 관측 지점별로 1999년부터 2022년까지 매년 Version 3 Level 2.0 직접 산출 자료(Fig. 2a)와 AOD_{0.4} 자료(Fig. 2b)가 제공된 월의 분포를 보인다. 43개의 관측 지점 중 장기적인 자료

가 누적되어 있는 관측 지점은 총 8곳으로, 안면(Anmyon: 36.539°N, 126.33°E), 백령도(Baengnyeong: 37.966°N, 124.63°E), 강릉(Gangneung WNU: 37.771°N, 128.867°E), 광주(Gwangju_GIST: 35.228°N, 126.843°E), 한국외국어대학교(Hankuk_UFS: 37.339°N, 127.266°E), 서울대학교(Seoul_SNU: 37.458°N, 126.951°E), 연세대학교(Yonsei_University: 37.564°N, 126.935°E), 고산(Gosan_SNU: 33.292°N, 126.162°E)이다. 이 지점들은 10년 이상의 자료가 현재까지 제공되고 있다. 이 8곳을 제외한 현재 운영 중인 관측 지점 2곳 중 울산(KORUS_UNIST_Ulsan: 35.582°N, 129.19°E)은 2016년 3월부터 2017년 2월까지 자료가 산출된 후, 2020년 12월부터 다시 자료를 제공하기 시작하였으며, 소청초(Socheongcho: 37.423°N, 124.738°E)는 약 6년의 자료가 누적되어 제공되고 있다.

Figure 3은 본 연구에서 사용한 국내 AERONET 직접 산출 자료 개수(Fig. 3a)와 관측 지점 개수(Fig. 3b)의 연별 분포이다. 2022년까지 국내 AERONET 직접 산출 자료의 총 개수는 836,075개이다(Fig. 3a). 2010년까지 AERONET 직접 산출 자료를 산출한 관측 지점의 수는 3개 이하였으며, 매년 자료 개수는 10,000개 미만이었다. 하지만 2011년에는 4개의 관측 지점에서 12,114개의 자료를 산출하였고, 2012년에는 DRAGON-Asia 2012 기간 동안 일시적으로 설치된 관측 지점을 포함하여 27개의 관측 지점에서 86,247개의 자료를 산출하였다. 이후 2013년부터 2015년까지는 약 30,000~40,000개의 자료가 산출되었으며, 2016년에는 KORUS-AQ 기간 동안 일시적으로 설치된 관측 지점을 포함하여 22개의 관측 지점에서 146,306개의 자료가 산출되어 자료가 가장 많이 산출된 연도였다(Fig. 3). 이로 인해 1999년부터 2022년까지 4월과 5월에 자료 개수(4월: 106,435개, 5월: 127,530개)와 자료를 산출하였던 관측 지점의 개수(4월: 41개, 5월: 40개)가 가장 많았으며(Fig. 4), 2012년 3월부터 5월과 2016년 4월부터 6월은 각각 57,749개와 59,449개의 자료가 산출되어 전체 직접 산출 자료의 6.91%와 7.11%를 차지하였다(Fig. 5). 국내 AERONET 자료는 봄(3

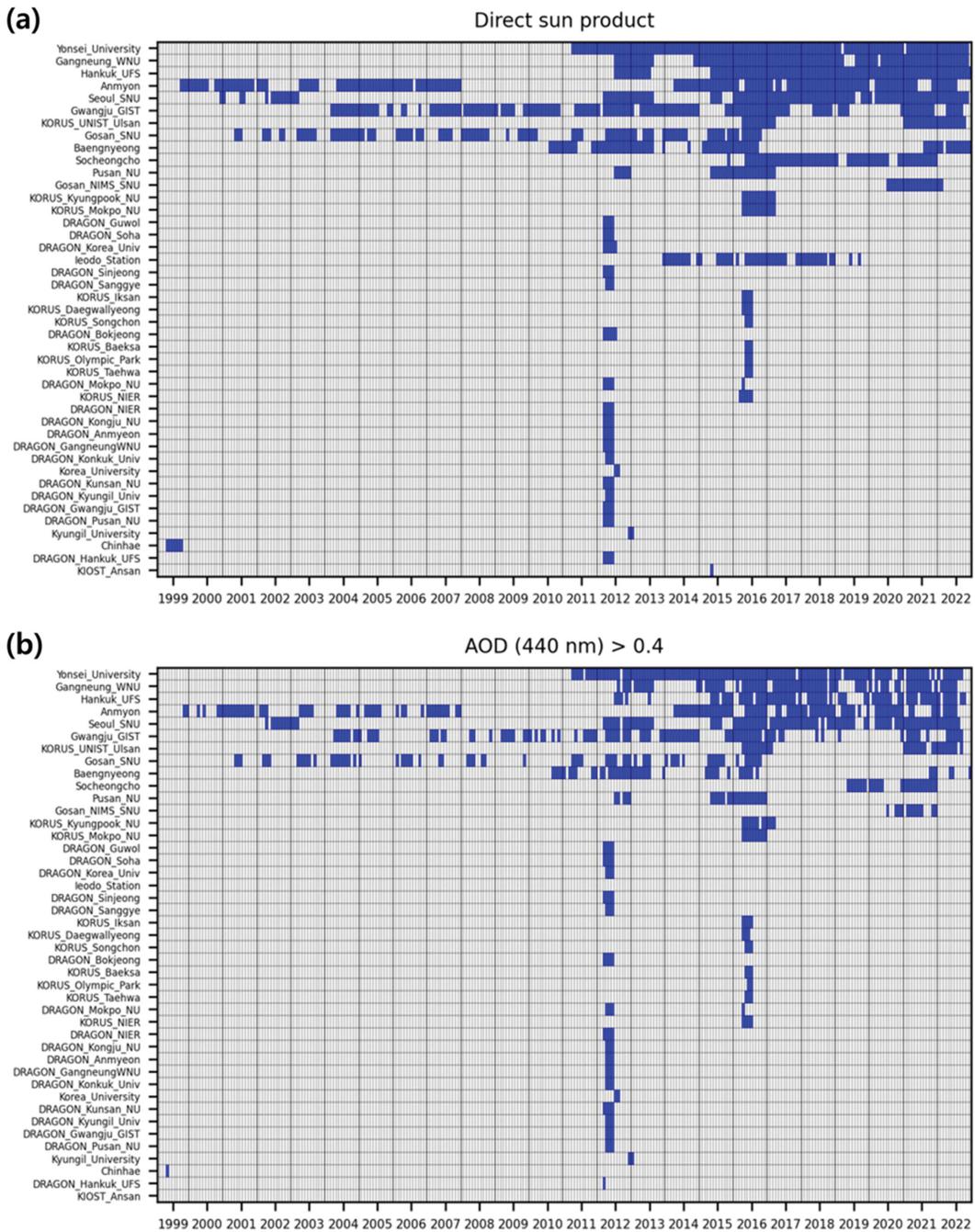


Fig. 2. Available data at AERONET sites in South Korea: Blue boxes indicate the months each year when (a) direct sun products and (b) aerosol inversion products with AOD at 440 nm greater than 0.4 are provided.

월부터 5월)에 자료가 가장 많이 분포하는 특징을 보였으며, AERONET Version 3 Level 2.0 자료는 구름의 영향으로 오염된 자료를 제거하는 과정인 Cloud-screening 알고리즘(Smimov et al., 2000; Giles et al.,

2019)이 적용된 자료로 제공되기 때문에 구름의 영향이 많은 계절인 여름에는 자료의 수가 가장 적었다(Figs. 4a, 5a). 그러나 이례적으로 2016년 8월의 직접 산출 자료 개수는 20,635개로, 그 해 5월 다음으로 가

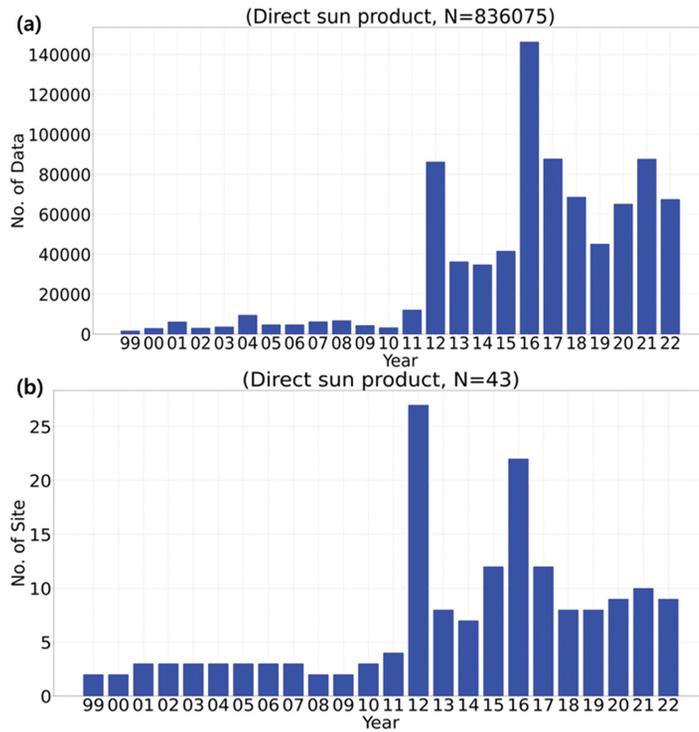


Fig. 3. The number of (a) direct sun products and (b) the AERONET sites by year in South Korea.

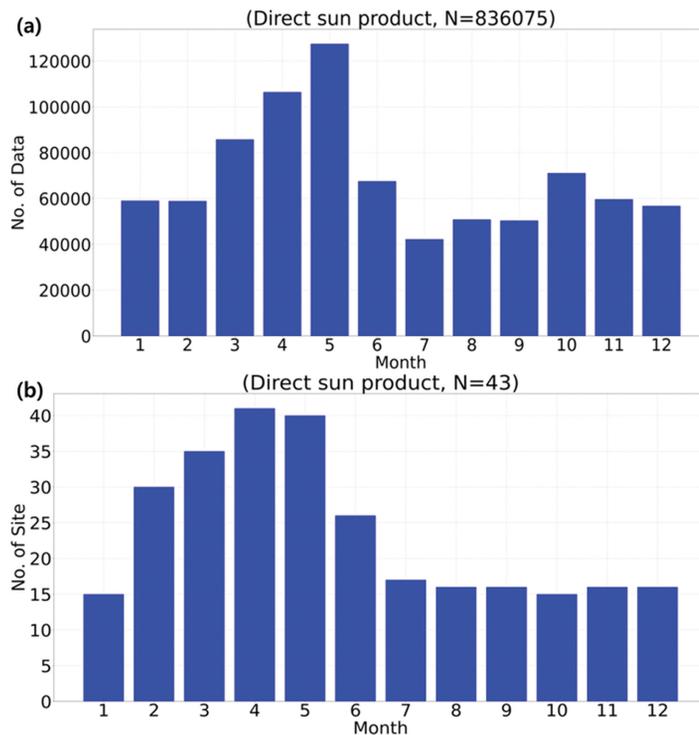


Fig. 4. The number of (a) direct sun products and (b) the AERONET sites by month in South Korea.

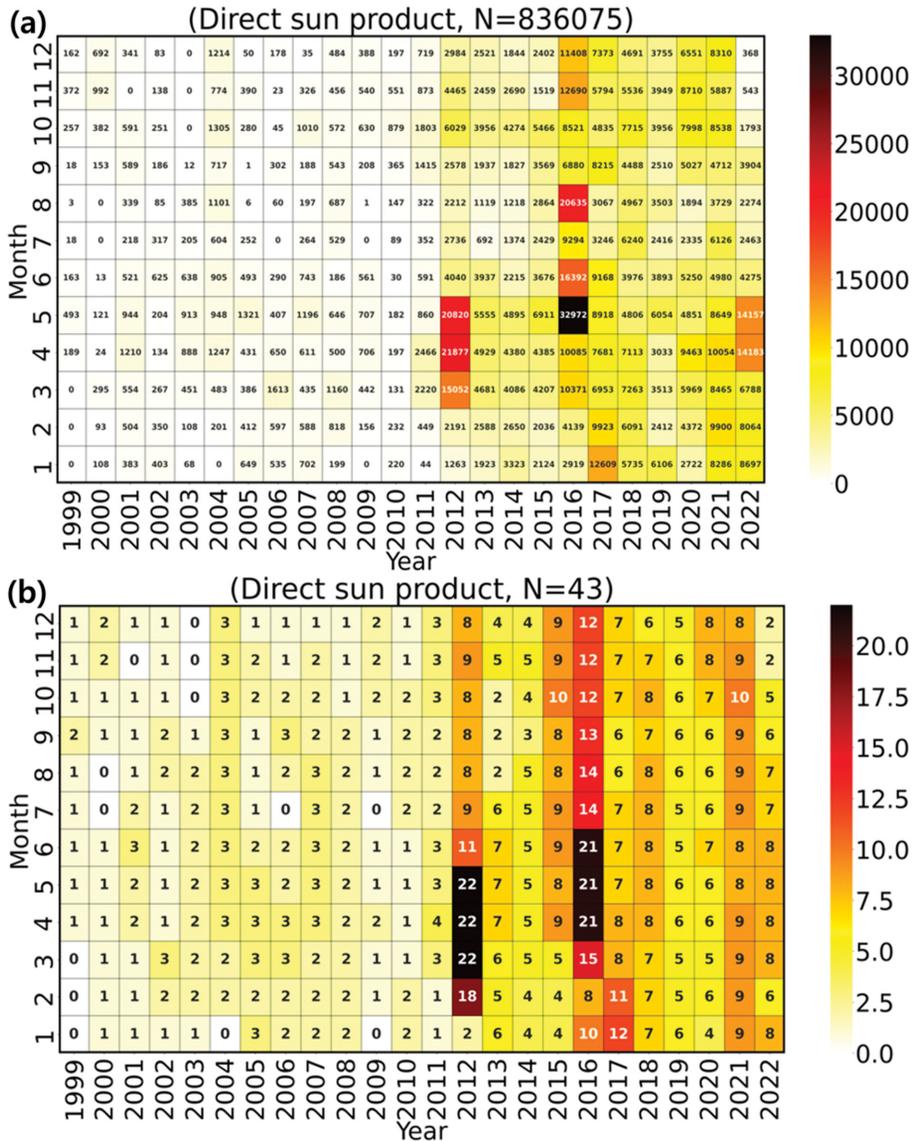


Fig. 5. The number of (a) direct sun products and (b) the AERONET sites by a month each year in South Korea.

장 많은 자료가 분포되었으며, 이는 전체 직접 산출 자료의 2.47%를 차지하였다. 2016년 8월에 자료가 존재하는 14개의 관측 지점 중 자료 개수가 1,000개 이상인 관측 지점은 11개로, 관측 지점별 산출된 자료 개수가 많았던 기간이었다(Table 2).

1999년부터 2022년까지 AERONET Version 3 Level 2.0 역산출 자료와 AOD_{0.4} 자료의 개수는 각각 32,665개와 11,519개였다(Fig. 6a). AOD_{0.4} 자료는 안산(KIOST_Ansan: 37.286°N, 126.832°E)과 이어도(Ieodo_Station: 32.123°N, 125.182°E)를 제외하고 41개의 관측지점에서 제공된다(Fig. 6b). 역산출 자료는 2012년

과 2016년에 자료 개수가 가장 많았으며, 해당 연도의 역산출 자료 개수는 각각 4,734개와 4,911개였다. AOD_{0.4} 자료의 개수는 2012년과 2016년에 각각 2,227개와 2,025개였다. 직접 산출 자료와 마찬가지로 DRAGON-Asia 2012와 KORUS-AQ 기간 동안 AERONET 에어로졸 역산출 자료를 산출한 관측 지점의 개수와 관측 자료도 많이 분포하였다. 관측 지점의 개수는 각각 22개와 19개였고(Fig. 7b), 관측 자료의 개수는 3,273개와 1,753개였다(Fig. 7a). 이러한 경향은 AOD_{0.4} 자료에서도 동일하게 나타났다(Fig. 8).

국내 AERONET Version 3 Level 2.0 자료의 전반

Table 2. AERONET site names and data counts in August 2016 in South Korea.

Site name	Data counts in August 2016
Anmyon	2,571
Baengnyeong	1,811
Gangneung_WNU	1,758
Gosan_SNU	1,490
Gwangju_GIST	2,022
Hankuk_UFS	1,114
leodo_Station	75
KORUS_Kyungpook_NU	1,903
KORUS_Mokpo_NU	1,733
KORUS_UNIST_Ulsan	1,856
Pusan_NU	2,072
Seoul_SNU	431
Socheongcho	463
Yonsei_University	1,336

적인 분포를 조사하고 AERONET 관측 지점의 위치를 기반으로 수도권(SMA), 경상도(GSD), 전라도(JLD), 강원도(GWD), 충청도(CCD), 제주도(JJD)의 6개 지역

으로 구분하여 직접 산출 자료와 역산출 자료, 그리고 AOD_{0.4} 자료의 분포를 분석하였다(Fig. 9). Table 3은 각 지역에 포함된 AERONET 관측 지점명을 나타낸다. 수도권 지역은 관측 지점 개수와 직접 산출 자료(역산출; AOD_{0.4}) 개수가 각각 21개와 425,398개(15,117개; 5,934개)로 6개 지역 중 가장 많았다. 6개 지역의 1999년부터 2022년까지 연별 관측 지점 개수 및 자료 개수는 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 2010년대에는 6개 지역 모두에서 자료가 산출되었으며, 강원도, 전라도, 그리고 제주도 지역은 자료가 처음 산출된 이후로 매년 자료가 누적되어 왔다. 수도권과 충청도 지역은 자료가 산출되지 않았던 공백기(수도권: 2004년~2009년, 충청도: 2008년~2011년, 2013년)가 있었으나 그 이후로 매년 자료가 꾸준히 산출되어 왔다. 이 5개 지역(강원도, 수도권, 전라도, 제주도, 충청도)은 자료를 꾸준히 산출해 온 관측 지점이 최소 하나 이상 있는 것이 특징이며, 이를 통해 에어로졸의 장기적인 특징 및 변화를 분석할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 AERONET 자료가 가장 꾸준히 산출되지 않았던 지역은 경상도 지역으로 1999년, 2012년, 2015

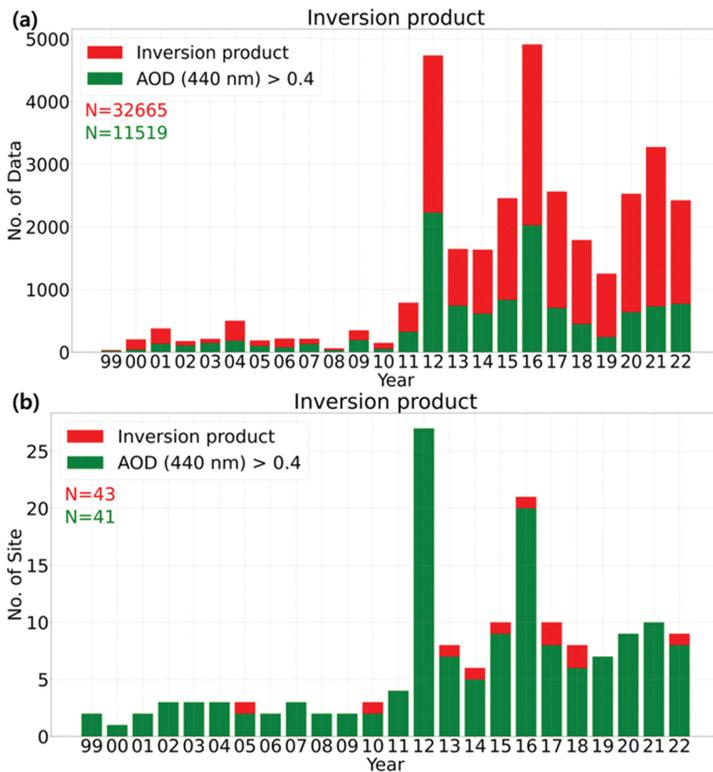


Fig. 6. The number of (a) aerosol inversion products and (b) the AERONET sites by year in South Korea. Red boxes represent all aerosol inversion products used in this study, and green boxes represent the aerosol inversion product when AOD at 440 nm was greater than 0.4.

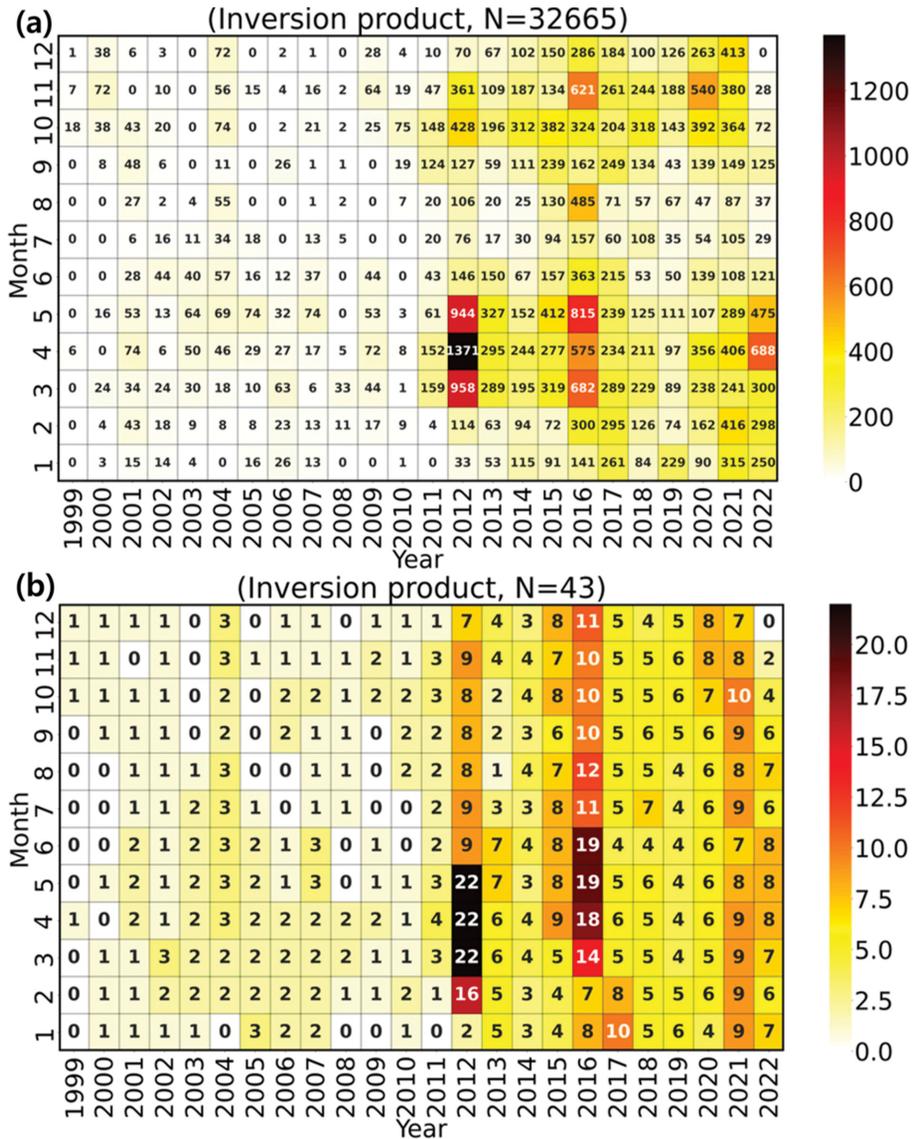


Fig. 7. The number of (a) all aerosol inversion products and (b) the AERONET sites by a month each year in South Korea.

년부터 2017년, 그리고 2020년부터 2022년에만 자료가 산출되었다. 경상도 지역에서 현재 운영 중인 관측 지점은 울산으로, 2020년 12월부터 자료가 다시 산출되고 있으나 다른 지역에 비해 경상도 지역 에어로졸의 장기적인 특징 및 변화를 분석하기에는 어려움이 있다.

3.2 AOD 변화

3.2.1 국내 AOD 및 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 연 변화

Figure 11은 국내 AERONET 직접 산출 자료와 예

어코리아 최종 확정 측정자료를 사용하여 2022년까지의 AOD 연변화와 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 질량농도의 연변화를 보인다. 연평균 AOD는 연간 -0.006 yr^{-1} 의 변화율로 감소하는 추세를 보였으며, 2003년과 2021년에 각각 평균 AOD가 0.51과 0.22로 최대값과 최소값을 기록하였다. 2003년의 평균 AOD 증가는 2003년 5월 러시아에서 발생한 대규모 산불로 인해 발생한 스모크 에어로졸 플룸이 국내로 유입되어 AOD에 영향을 미쳤다(Lee and Kim, 2004; Lee et al., 2004). 이로 인해 2003년 자료가 존재하는 관측 지점 중 5월의 자료를 보유한 안면과 고산 관측 지점의 AOD (550 nm)

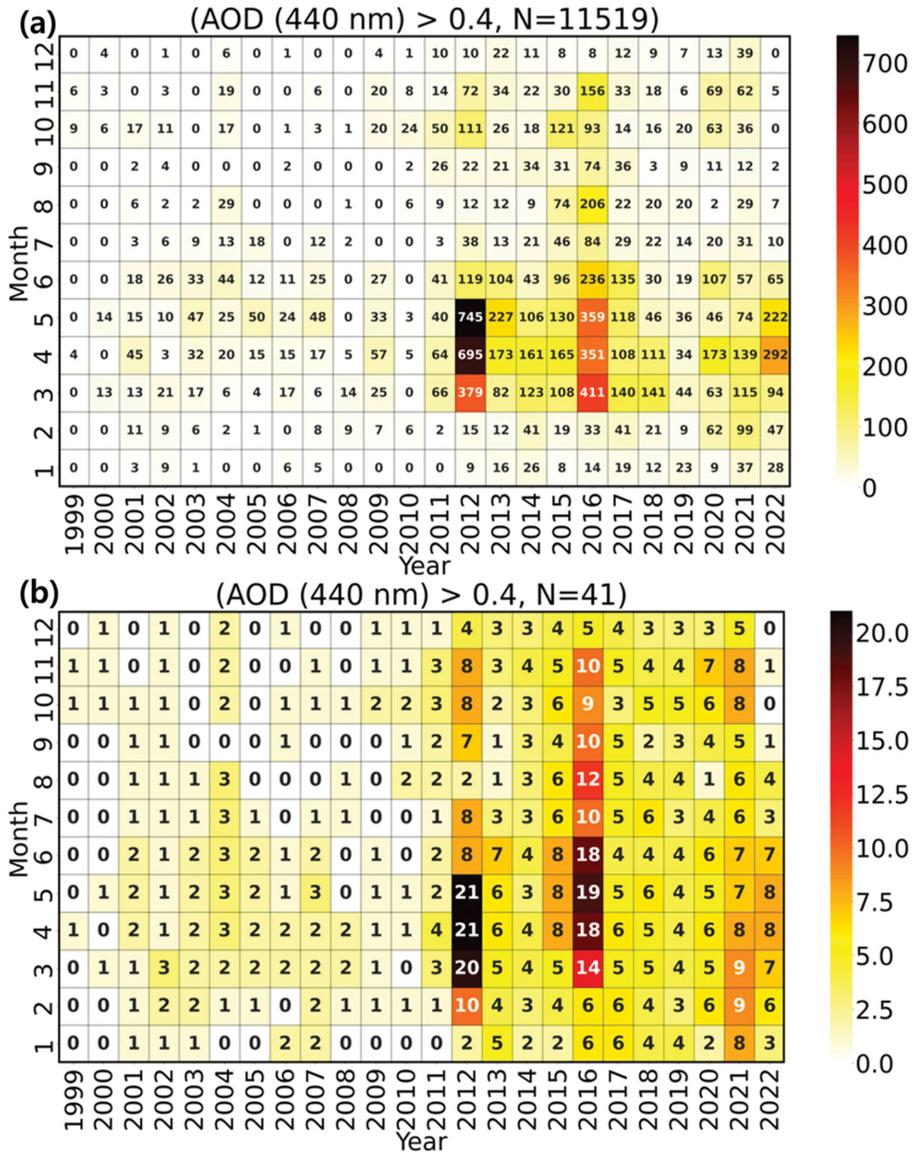


Fig. 8. The number of (a) aerosol inversion products and (b) the AERONET sites when AOD at 440 nm was greater than 0.4 by a month each year in South Korea.

는 각각 0.75와 0.64로, 안면은 2002년과 2004년 연평균 AOD보다 각각 0.36과 0.44 더 높았으며, 고산은 0.25와 0.34 더 높게 나타났다.

AOD 감소와 더불어 PM₁₀과 PM_{2.5} 또한 감소하는 추세를 보였다. PM₁₀의 연평균 질량농도는 2001년부터 2022년까지 -1.324 μg m⁻³ yr⁻¹의 변화율로 감소하는 추세를 보였으며, PM_{2.5}는 질량농도 측정을 시작한 2015년부터 8년간 -1.335 μg m⁻³ yr⁻¹의 변화율로 감소하는 추세를 보였다. PM₁₀ 연평균 질량농도는 2001년부터 2012년까지 -1.358 μg m⁻³ yr⁻¹의 변화율로 감

소하였으며, 사회의 관심과 미세먼지 질량농도 저감을 위해 정부 차원에서 미세먼지 종합대책(KLRI, 2015)을 시행한 2013년부터 2022년까지 연평균 PM₁₀ 질량농도는 -2.03 μg m⁻³ yr⁻¹의 변화율로 감소하였다. 2019년 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(MOE, 2019)이 시행된 이후 연평균 PM₁₀ 질량농도는 -2.581 μg m⁻³ yr⁻¹의 감소율을 보였으며, 연평균 PM_{2.5}의 질량농도는 -1.729 μg m⁻³ yr⁻¹의 감소율을 보여 저감 정책 이후 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 연간 감소율이 증가했음을 알 수 있다.

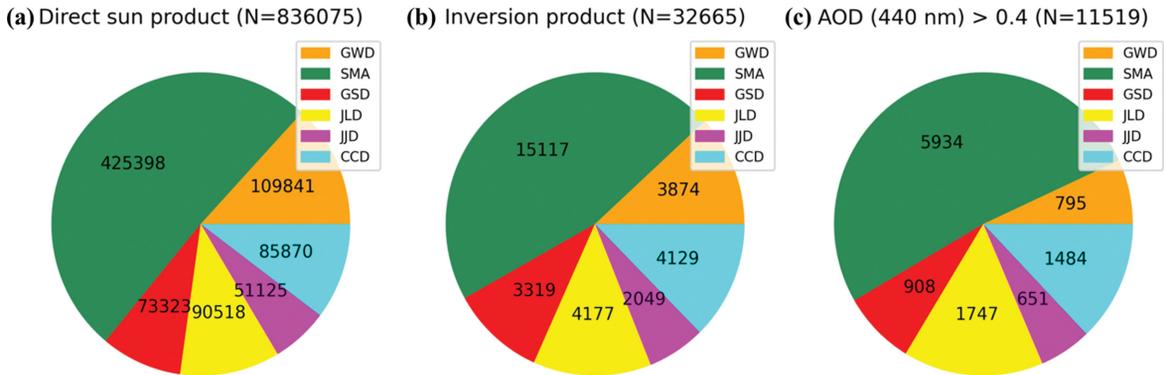


Fig. 9. Distribution of (a) AERONET's direct sun product, (b) aerosol inversion product, and (c) the aerosol inversion product when AOD at 440 nm was greater than 0.4 by six regions in South Korea.

Table 3. AERONET site names located for each region in South Korea.

Region name	AERONET site name list
GWD	DRAGON_GangneungWNU, Gangneung_WNU, KORUS_Daegwallyeong
SMA	Baengnyeong, DRAGON_Bokjeong, DRAGON_Guwol, DRAGON_Hankuk_UFS, DRAGON_Konkuk_Univ, DRAGON_Korea_Univ, DRAGON_NIER, DRAGON_Sanggye, DRAGON_Sinjeong, DRAGON_Soha, Hankuk_UFS, KIOST_Ansan, Korea_University, KORUS_Baeksa, KORUS_NIER, KORUS_Olympic_Park, KORUS_Songchon, KORUS-Taehwa, Seoul_SNU, Socheongcho, Yonsei_University
GSD	Chinhae, DRAGON_Kyungil_Univ, DRAGON_Pusan_NU, KORUS_Kyungpook_NU, KORUS_UNIST_Ulsan, Kyungil_University, Pusan_NU
JLD	DRAGON_Gwangju_GIST, DRAGON_Kunsan_NU, DRAGON_Mokpo_NU, Gwangju_GIST, KORUS_Iksan, KORUS_Mokpo_NU
JJD	Gosan_NIMS_SNU, Gosan_SNU, Ieodo_Station
CCD	Anmyon, DRAGON_Anmyeon, DRAGON_Kongju_NU

연평균 AOD, PM₁₀ 그리고 PM_{2.5}의 질량농도가 모두 감소하는 추세를 보였기에(Fig. 12), PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 질량농도와 연평균 AOD 간의 상관성 분석을 수행하였다. 2001년부터 2022년까지 PM₁₀의 연평균 질량농도와 연평균 AOD는 0.674의 양의 상관관계를 보였다. 또한, 유의 확률(probability value, p-value)이 0.00058로 PM₁₀의 연평균 질량농도와 연평균 AOD간의 상관관계는 통계적으로도 매우 유의미한 결과임을 보였다. PM_{2.5}의 연평균 질량농도와 연평균 AOD 간의 상관관계는 0.753이고 p-value는 0.03이며, 이는 PM₁₀보다 더 높은 양의 상관관계를 나타내며, 이 또한 0.05보다 낮은 p-value로 의미 있는 관계임을 알 수 있다. 즉, PM₁₀과 PM_{2.5}의 연평균 질량농도 감소와 연평균 AOD 감소 간에 통계적으로 유의미한 선형적인 관계가 존재한다고 할 수 있다. Seo et al. (2015)는 DRAGON-Asia 2012 기간 동안 서울 지역의 에어코리아 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도와 AERONET

과 Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer에서 산출한 AOD 간에 0.50의 양의 상관관계를 보고했다. 또한, 중국의 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도와 AOD 간 0.5 이상의 결정계수(coefficient of determination) 값을 보여 AOD와 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 질량농도가 서로 연관되어 있음을 보였으며, PM₁₀ 질량농도보다는 PM_{2.5} 질량농도가 AOD와의 상관관계가 더 높게 나타남을 보였다(Kong et al., 2016).

3.2.2 지역별 AOD 및 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 연 변화

국내 전역의 AOD의 연변화와 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 연변화 및 추세를 확인하였으며, 연평균 AOD 감소가 PM₁₀과 PM_{2.5} 연평균 질량농도의 감소와 관련이 있음을 확인하였다. 국내 에어로졸의 연변화를 공간적으로 세분화하여 분석하기 위해 6개 지역의 AOD와 PM₁₀, PM_{2.5} 질량농도의 연변화를 분석하였다(Fig.

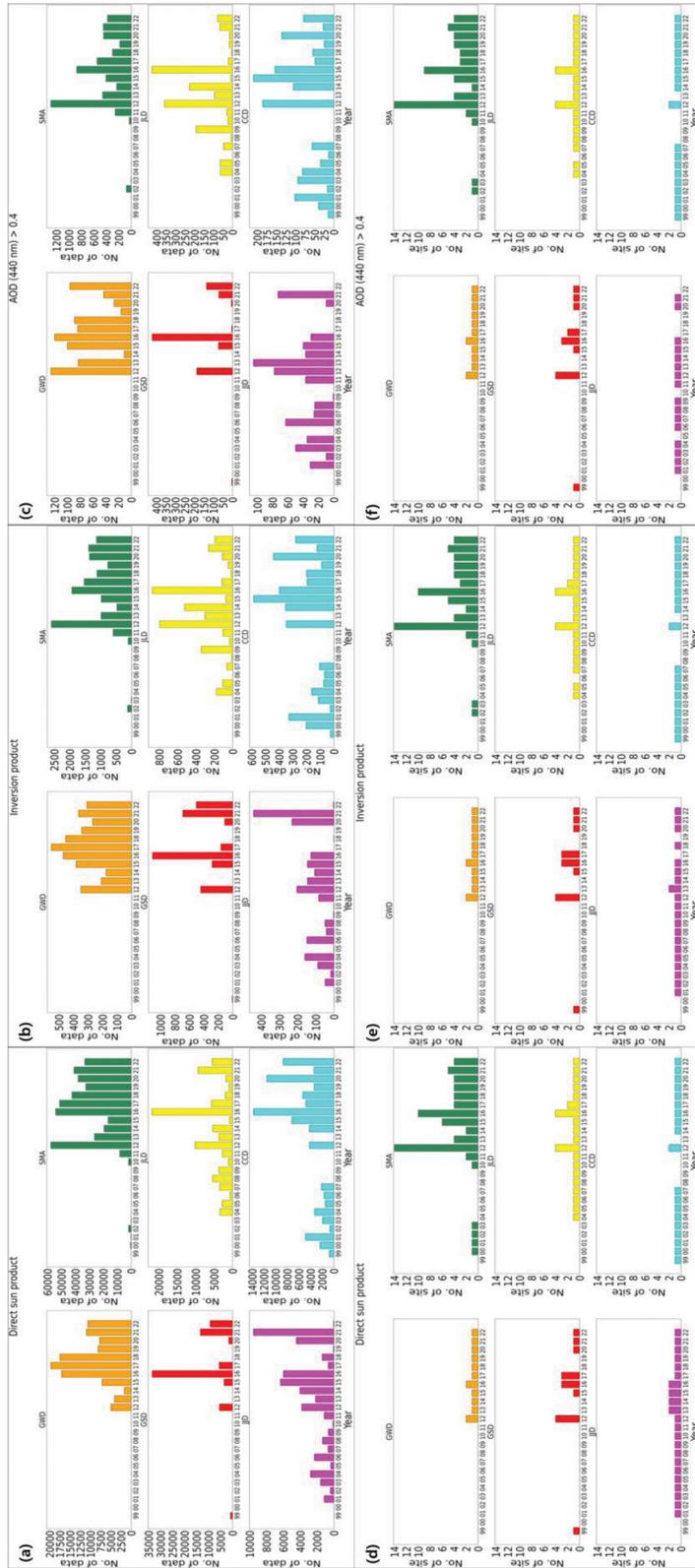


Fig. 10. The number of data (upper panels; a to c) and AERONET sites (lower panels; d to f) per year in 6 regions.

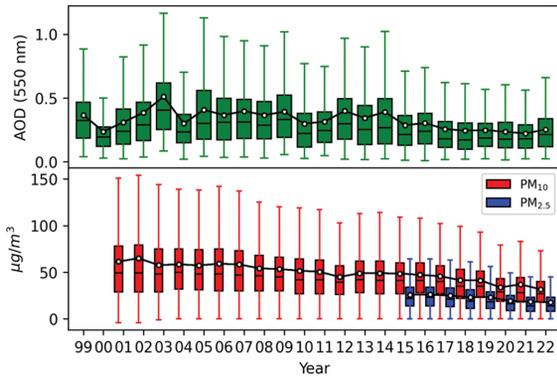


Fig. 11. Annual AOD at 550 nm variation (green) in South Korea from 1999 to 2022. The red and blue boxplots indicate the annual variation in PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations, respectively. The circle symbol and black solid line in each boxplot indicate the annual average change.

13). 지역별로 AERONET 연평균 AOD는 일반적으로 감소하는 추세를 보였으며, PM₁₀과 PM_{2.5} 연평균 질량농도도 감소하는 추세를 보였다. AERONET 직접 산출 자료의 공백이 가장 많은 경상도 지역을 제외하고, 전라도와 제주도 지역은 -0.01 yr^{-1} 의 변화율로 연평균 AOD의 감소 추세가 가장 높았으며, 충청도 지역은 -0.004 yr^{-1} 의 변화율로 가장 낮은 감소 추세를 보였다. 반면에 연평균 PM₁₀ 질량농도는 제주도과 수도권 지역이 각각 가장 낮은 감소율($-0.57 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)과 높은 감소율($-1.55 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)을 보였으며, 연평

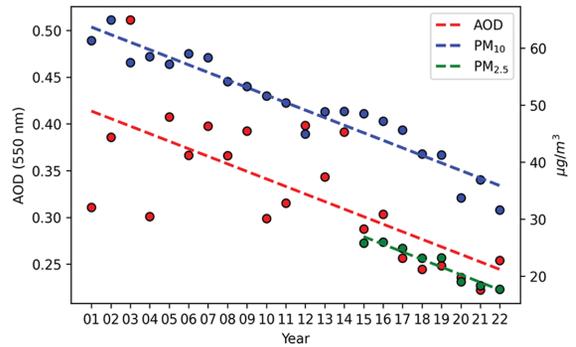


Fig. 12. Annual variations of average AOD (red), PM₁₀ (blue), and PM_{2.5} (green) in South Korea. The dashed lines represent trend lines.

균 PM_{2.5} 질량농도는 수도권 지역과 강원도 지역이 각각 가장 낮은 감소율($-1.00 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)과 높은 감소율($-2.02 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)을 보였다.

3.2.3 국내 AOD 및 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 월 변화 및 계절변화

Figure 14는 AERONET 직접 산출 자료와 에어코리아 최종 확정 측정자료를 사용하여 국내 AOD 월변화와 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 월변화를 보인다. 월평균 AOD는 1월부터 6월까지 증가하는 추세로 6월에 0.45로 가장 높은 월평균 AOD를 보였으며, 7월부터 12월까지 감소하는 추세로 12월에 0.15로 가장 낮은 월평균 AOD를 보였다. 월별 AOD의 변화를 토대로

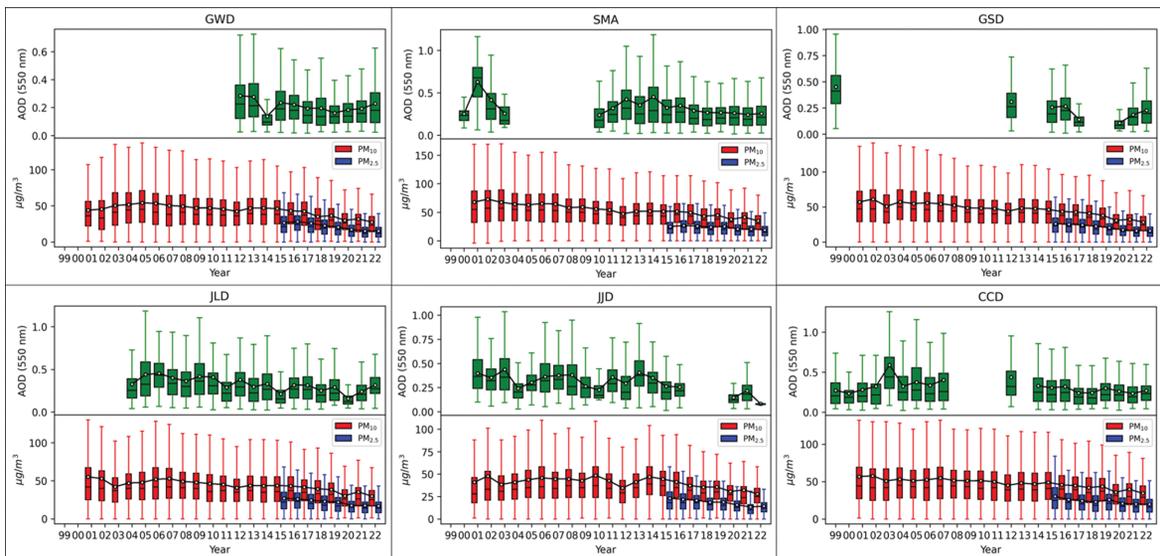


Fig. 13. Annual variations of average AOD (red), PM₁₀ (blue), and PM_{2.5} (green) for six regions in South Korea.

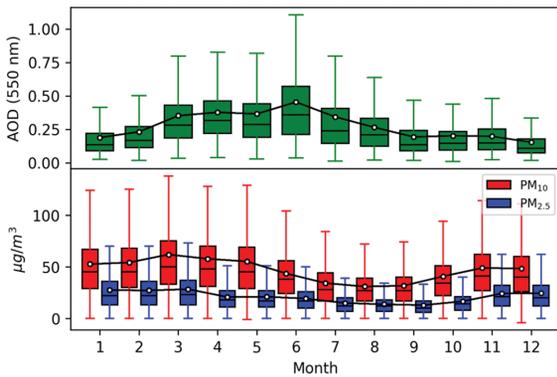


Fig. 14. Monthly AOD at 550 nm variation (green) in South Korea. The red and blue boxplots indicate the monthly variation in PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations, respectively. The circle symbol and black solid line in each boxplot indicate the monthly average change.

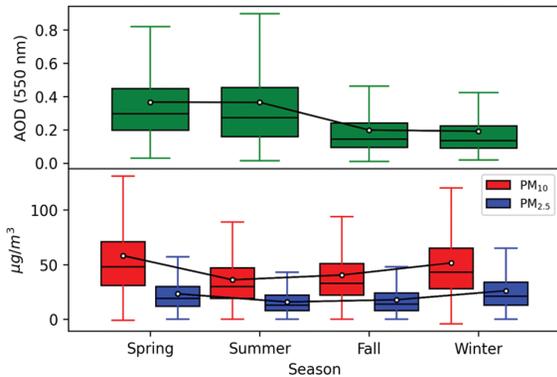


Fig. 15. Seasonal AOD at 550 nm variation (green) in South Korea. The red and blue boxplots indicate the seasonal variation in PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations, respectively. The circle symbol and black solid line in each boxplot indicate the seasonal average change.

계절별 AOD는 봄(3월부터 5월)과 여름(6월부터 8월)에 높은 AOD를 보였으며, 가을(9월부터 11월)과 겨울(12월부터 2월)에 낮은 AOD를 보였다(Fig. 15). 이는 동북아시아 AOD의 계절적인 특징으로, 봄과 여름에 AOD 값이 높고, 가을과 겨울에는 AOD 값이 낮다고 알려져 있다(Xia et al., 2006; Yu et al., 2009; Kim et al., 2010; Wang et al., 2011; Wu et al., 2015). 봄철에는 동아시아에서 발생하는 모래 먼지가 편서풍의 영향으로 중국 동부와 한국으로 수송되어 AOD가 증가한다(Ghim, 2011). 여름철에는 고온 다습한 환경이 2차 에어로졸 생성 및 에어로졸의 흡습 성장에 유리한 조건을 제공하여 입자의 단면적이 증가하고, 이는 건

조한 날씨의 에어로졸 입자보다 태양광을 더 많이 산란시켜 AOD가 증가하게 된다(Pilat and Charlson 1966; Charlson et al., 1999; Carrico et al., 2000; Koloutsou-Vakakis et al., 2001; Fierz-Schmidhauser et al., 2010; Titos et al., 2014a, b). 또한, 여름철 강한 대류는 지표 근처에 존재하는 에어로졸의 연직 이동을 향상시켜 여름철 높은 AOD가 발생한다(Cheng et al., 2015). 이외에도 여름철 습도 증가에 따른 2차 에어로졸 생성 증가의 관측 결과(Sun et al., 2013)와 흡습 성장으로 인한 태양 복사의 산란 및 소산계수(extinction coefficient) 증가의 관측 결과(Qu et al., 2015), 그리고 여름철 에어로졸의 연직 이동에 의해 대기경계층보다 높은 고도에서 소산계수의 최대값이 관측된 결과(Qu et al., 2016)가 보고되었다. 이를 종합하여 대기 중 크기가 작은 에어로졸의 농도와 태양 복사의 산란 증가가 높은 여름철 전체 공기 기둥에 대한 AOD (total column AOD)를 야기시켰다고 판단된다.

이에 반해 지표면 부근에서 관측한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 3월에 각각 $61.88 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $28.33 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 가장 높은 월평균 질량농도를 보였으며, 7월과 8월에는 각각 $30.88 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $12.85 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 가장 낮은 월평균 질량농도를 보였다(Fig. 14). AOD와는 달리, 월평균 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 질량농도는 건조한 계절에 높고 여름에 낮은 대조적인 특징을 보였다(Fig. 15). 다른 계절에 비해 강수 빈도 및 강수량이 많은 여름철에는 강수로 인해 대기 중 에어로졸(즉, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$)이 다량으로 제거되어 지표면에서의 질량농도가 낮아지며, 여름철 높은 지표 온도로 인한 강한 연직 수송 및 순환 그리고 대기경계층의 발달로 인해 지표면 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 질량농도가 감소한다. 이와 관련하여 Kong and Yi (2015)는 라이다를 사용하여 대기경계층의 월평균 고도와 대기 중 미세 입자와 조대 입자의 월평균 질량농도를 비교하여 여름철에는 대기경계층 고도가 최대였지만 입자의 질량농도는 최소임을 보였으며, 봄과 겨울에는 이와 반대의 계절적 특징을 보고했다. 또한, Qu et al. (2016)은 6월과 12월의 대기 중 입자에 의한 소산계수의 연직분포를 측정하였을 때, 12월은 지표면 근처에 소산계수가 높게 나타났지만 6월에는 약 1 km와 2.5 km 고도에서 소산계수가 높게 측정되어 여름의 높은 AOD와 지표면 근처의 낮은 미세먼지 질량농도, 그리고 이와는 반대되는 겨울철 특징을 관측을 통해 보고했다.

3.2.4 지역별 AOD 및 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 질량농도의 월변화 및 계절변화

Figure 16은 국내 6개 지역의 AOD와 PM_{10} 질량농도 및 $PM_{2.5}$ 질량농도의 월변화를 보인다. 국내 전역에 대한 월변화(Fig. 14)와 마찬가지로, 6개 지역 모

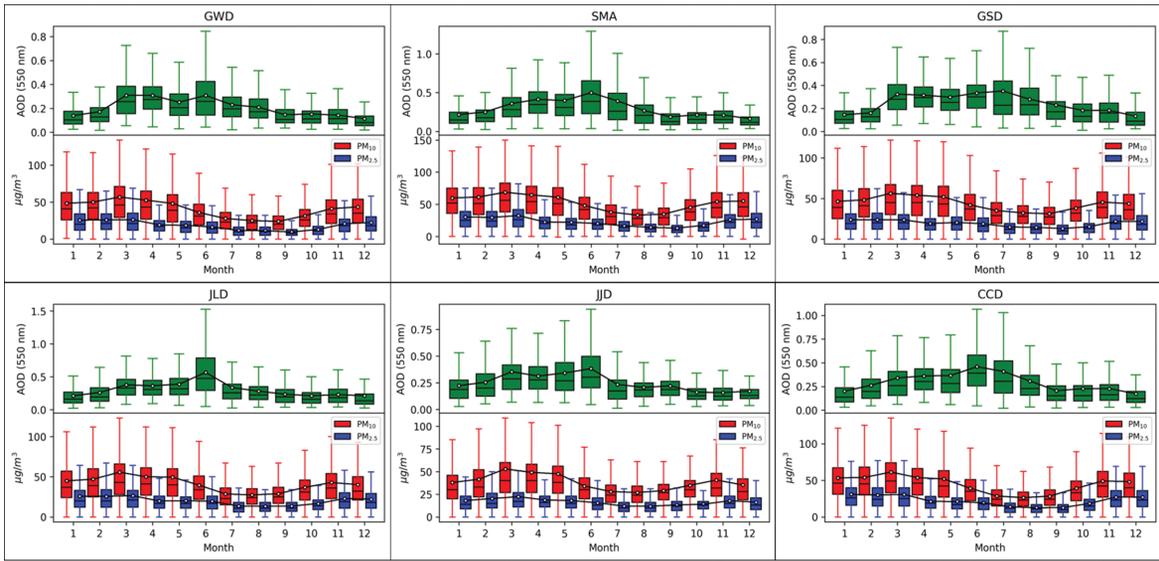


Fig. 16. Monthly variations of average AOD (red), PM₁₀ (blue), and PM_{2.5} (green) for six regions in South Korea.

두 봄과 여름에 AOD가 높고, 가을과 겨울에 AOD가 낮으며, PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도도 모두 여름에 낮은 특징을 보였다. 6개 지역 중 강원도 지역이 2월과 8월을 제외하고 월평균 AOD가 가장 낮았으며, 계절별 평균 AOD 또한 사계절 동안 강원도 지역이 0.3 미만으로 가장 낮았다(봄: 0.285, 여름: 0.255, 가을: 0.148, 겨울: 0.139). 계절별로 평균 AOD가 가장 높았던 지역은 봄과 여름에는 수도권(봄: 0.392, 여름: 0.412)이며, 가을과 겨울에는 전라도 지역이 가장 높았다(가을: 0.224, 겨울: 0.232). 특히, 수도권 지역은 봄과 여름에 AOD 뿐만 아니라 PM₁₀(봄: 64.773 µg m⁻³, 여름: 39.678 µg m⁻³)과 PM_{2.5}(봄: 25.674 µg m⁻³, 여름: 16.838 µg m⁻³)의 평균 질량농도도 가장 높았으며, PM₁₀은 사계절 모두 평균 질량농도가 가장 높게 나타났다(PM₁₀ 가을: 44.779 µg m⁻³, PM₁₀ 겨울: 58.687 µg m⁻³). 인천을 포함한 수도권 지역은 국외에서 발생한 대기오염물질의 장거리 수송의 영향을 가장 많이 받으며, 밀집된 인공로 인해 이동 오염원도 많아 AOD 및 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도가 가장 높은 것으로 판단된다(Jeong et al., 2017; Bae et al., 2020).

3.3 에어로졸 유형별 분포

3.3.1 국내 에어로졸의 유형별 분포

국내 에어로졸의 유형별 분포를 분석하기 위해 AERONET Version 3 Level 2.0 역산출 자료 중 AOD_{0.4} 자료를 사용하여 Schmeisser et al. (2017)의 에어로졸 유형 분류 방법을 적용하였다(Fig. 17). 국내 에어로졸의 AAE는 0.0부터 3.0까지 넓은 범위에

걸쳐 변화가 크며, SAE는 주로 1.0~1.5의 범위에 분포하였다. 이는 국내 에어로졸을 구성하는 화학물질의 종류 및 화학 조성의 다양성은 넓은 반면에 입자의 크기 범위는 상대적으로 넓지 않음을 시사한다. KORUS-AQ 예비종합보고서(NIER and NASA, 2017)의 서울 미세먼지 성분 분석과 Choi et al. (2016)의 연구에서 백령도 미세먼지 성분 분석에 의하면 미세먼지는 질산염(nitrate), 황산염, 암모니아, 염화물(chloride), 유기물 그리고 블랙 카본(BC)을 포함하고 있어 대기 중 에어로졸이 다양한 물질로 구성되어 있음을 알 수 있다. 분류된 8가지 에어로졸 중 분진 에어로졸(DU)과 BC 그리고 갈색 탄소(BrC)의 혼합 유형(DU-BC-BrC mix)의 자료 개수가 5,341개(46.61%)로 가장 많이 분포하였으며, BC가 2,551개(22.26%)로 두 번째로 많은 에어로졸 유형이었다(Fig. 18). DU-BC-BrC mix와 BC와 더불어 질산염 및 황산염으로 대표되는 입자 크기가 작고 흡수성이 낮은 에어로졸 [SP-LA, 1,502개(13.11%)]과 DU와 해염 입자와 같은 입자의 크기가 큰 에어로졸과 BC의 혼합 유형[LP-BC mix, 1,199개(10.46%)]이 국내 에어로졸 분포의 대부분을 차지하였다(Fig. 18). 나머지 에어로졸 유형은 866개로 약 7.5% 분포하였으며, 이 중 DU와 BrC는 각각 39개(0.34%)와 72개(0.63%)로 분포 비율이 가장 낮았다(Fig. 18). 국내 분포하는 에어로졸 유형은 BC와 관련된 에어로졸(예, BC, DU-BC-BrC mix와 LP-BC mix, BC-BrC mix)이 주를 이루었으며[총 9,637개(84.09%)], 입자의 크기가 작고 흡수성이 낮은 에어로졸(SP-LA) 또한 다수 분포한다는 특징을 보였다. 이

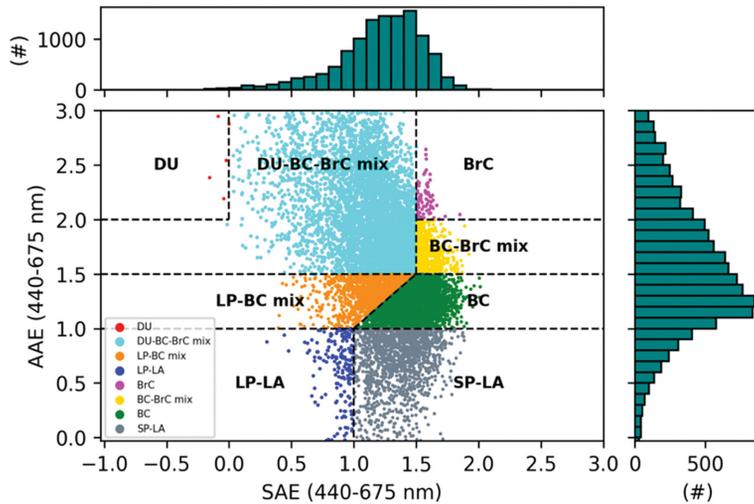


Fig. 17. The result of aerosol type classification based on Schmeisser et al. (2017). The top and right panels show the number of data points at 0.1 intervals for SAE and AAE, respectively.

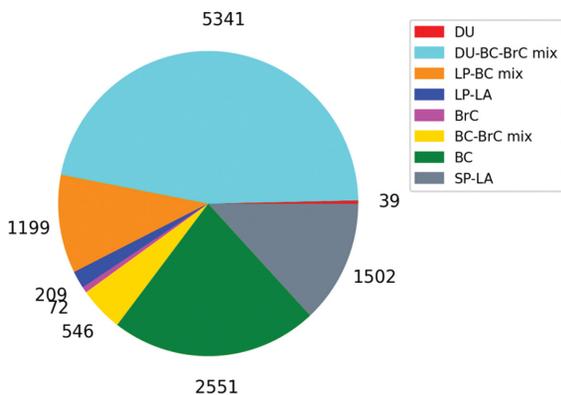


Fig. 18. Pie chart showing the data counts of eight aerosol types.

러한 특징은 국내 5개의 AERONET 관측 지점(강릉, 연세대학교, 한국외국어대학교, 안면, 고산)을 대상으로 5가지 에어로졸 유형 분류 방법을 사용하였을 때, 흡수성이 낮은 에어로졸과 BC가 가장 많이 분포하였으며 관측 지점마다 차이는 있지만 미세 입자와 조대 입자가 혼합된 특징의 에어로졸들이 다수 분포했던 결과와 유사하였다(Lee et al., 2018). 또한, Cappa et al. (2016)의 에어로졸 유형 분류 방법을 조정하여 서울대학교와 연세대학교의 AERONET 관측 자료를 적용하였던 결과와도 유사하였다(Eom et al., 2022).

Figure 19는 8가지 에어로졸 유형의 연별(Fig. 19a), 월별(Fig. 19b) 그리고 계절별(Fig. 19c) 자료 개수를 보인다. DU와 BrC를 제외하고 나머지 6가지 에어로

졸 유형은 장기적으로 꾸준히 관측되었다(Fig. 19a). 또한, DU와 BrC 그리고 입자 크기가 크고 흡수성이 낮은 에어로졸(LP-LA)을 제외하고 나머지 5가지 에어로졸 유형은 국내 AERONET 관측 자료가 가장 많았던 2012년과 2016년에 자료 개수가 가장 많았다. 월별과 계절별 자료 개수는 앞서 다뤘듯이 AERONET 자료가 봄철에 가장 많기 때문에 8가지의 에어로졸 유형 모두 봄철에 자료 개수가 가장 많았다(Figs. 19b, c). DU는 2021년 5월에 발생한 황사의 영향이 크게 미쳐 2021년에 관측된 자료가 가장 많은 것으로 판단된다. 30개의 자료 중 26개가 5월 자료였으며, 이 중 5월 7일에 발령되었던 황사 경보와 관련된 자료가 18개 그리고 5월 24일에 발생한 황사와 관련된 자료가 8개였다. 이와 관련하여 황사 경보 발령 후 제주도 지역에서는 DU와 탄소질 에어로졸이 혼합된 유형으로 분류된 자료가 다수 존재하였다. BrC의 경우 2012년과 2017년에 33개와 12개로 자료 개수가 가장 많았으며, 총 45개의 자료 중 44개가 수도권 지역 자료였다. 2012년에는 3월에 자료가 가장 많았으며, 2017년에는 4월과 5월의 자료가 가장 많았다. BrC는 흡수성을 가진 유기탄소(Organic Carbon, OC)이며, 바이오 연료의 연소, 차량에 의한 배출, 그리고 2차 생성 유기 에어로졸(secondary organic aerosol) 등에 의해 발생한다. Ham et al. (2017)은 도로오염원의 영향과 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds)의 광화학 반응으로 인한 2차 생성 또는 외부로부터의 장거리 수송이 봄철 서울 OC 농도에 기여한다고 보고했다. 또한, BrC로 분류된 자료와 동일한 날짜에 DU-BC-BrC mix와 BC-BrC mix가 주로 함께 분류된 것

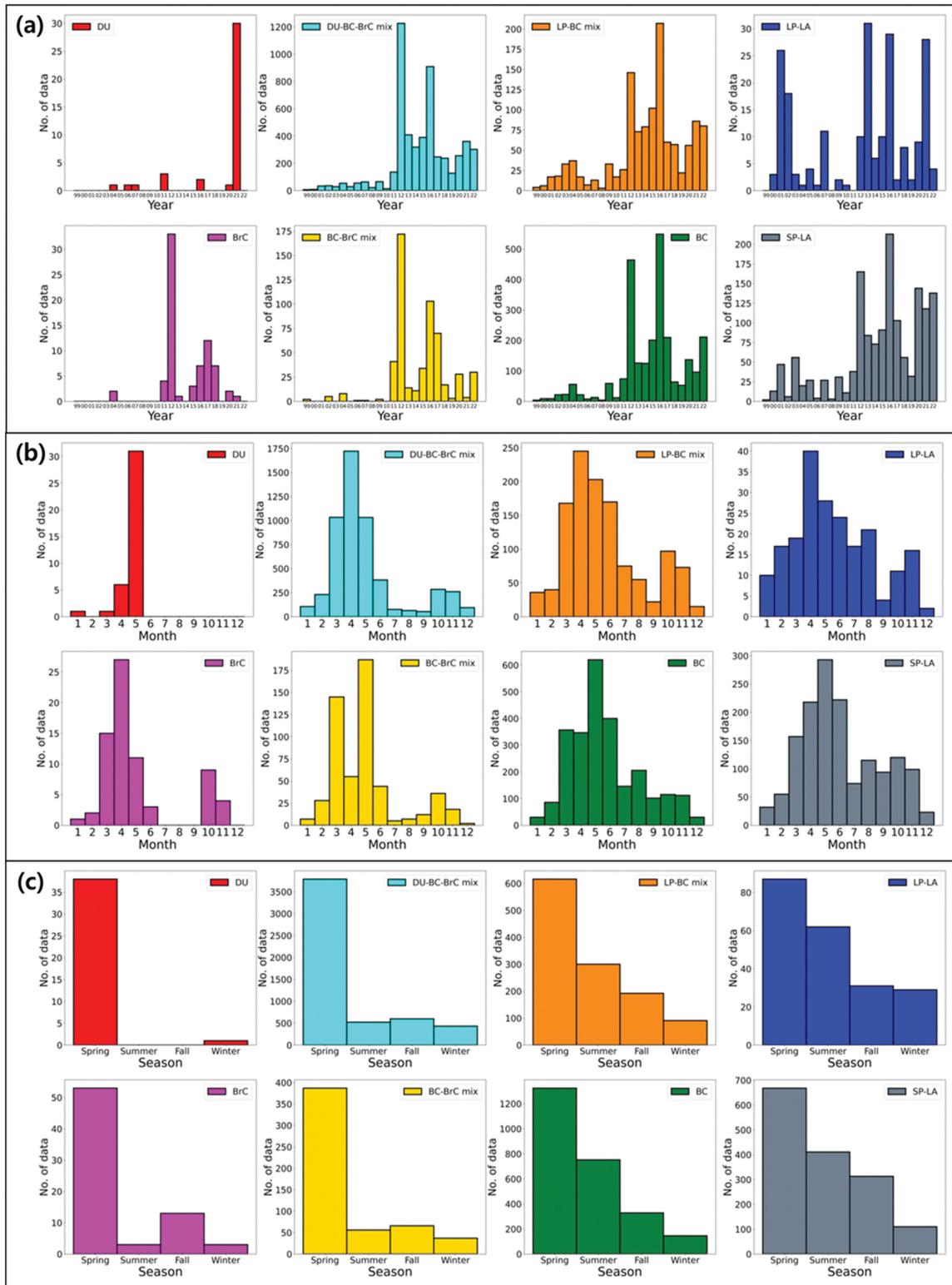


Fig. 19. (a) Annual, (b) monthly, and (c) seasonal data counts for eight aerosol types.

을 토대로, 수도권 지역에 대한 장거리 수송의 영향과 도심 내부의 지역적인 영향으로 인해 2012년과 2017년에 BrC 자료가 많이 분류된 것으로 판단된다. LP-LA의 경우 분류된 자료 개수가 많았던 해는 2001년, 2013년, 2016년, 그리고 2021년였으며, 각 자료 개수는 26개, 31개, 29개, 그리고 28개였다. 이 중 봄철과 여름철의 자료가 51개(44.74%), 34개(29.82%)였으며, 봄철 자료의 대부분은 충청도 지역 자료와 제주도 지역 자료였고[36개(70.59%)] 여름철 자료는 수도권 지역 자료가 대부분을 차지하였다[23개(67.65%)]. 제주도 지역 자료의 87%는 고산 관측 지점이며, 충청도 지역의 자료 또한 87%가 안면도 관측 지점의

자료로 두 지점 모두 해안가와 근접한 위치에 있어 해양입자의 영향으로 인해 LP-LA로 분류된 자료 개수가 많이 나타난 것으로 판단된다. 또한, 여름철의 경우 높은 습도로 인한 흡습 성장이 LP-LA로 분류된 자료 개수가 많이 나타난 것에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3.3.2 에어로졸 유형별 지역 분포

Figure 20은 6개 지역별로 8가지 에어로졸의 분포를 보인다. 6개 지역의 공통적 특징은 DU-BC-BrC mix, BC, SP-LA 그리고 LP-BC mix의 비율이 가장 높았으며, 이 4가지 에어로졸의 분포 비율은 6개 지

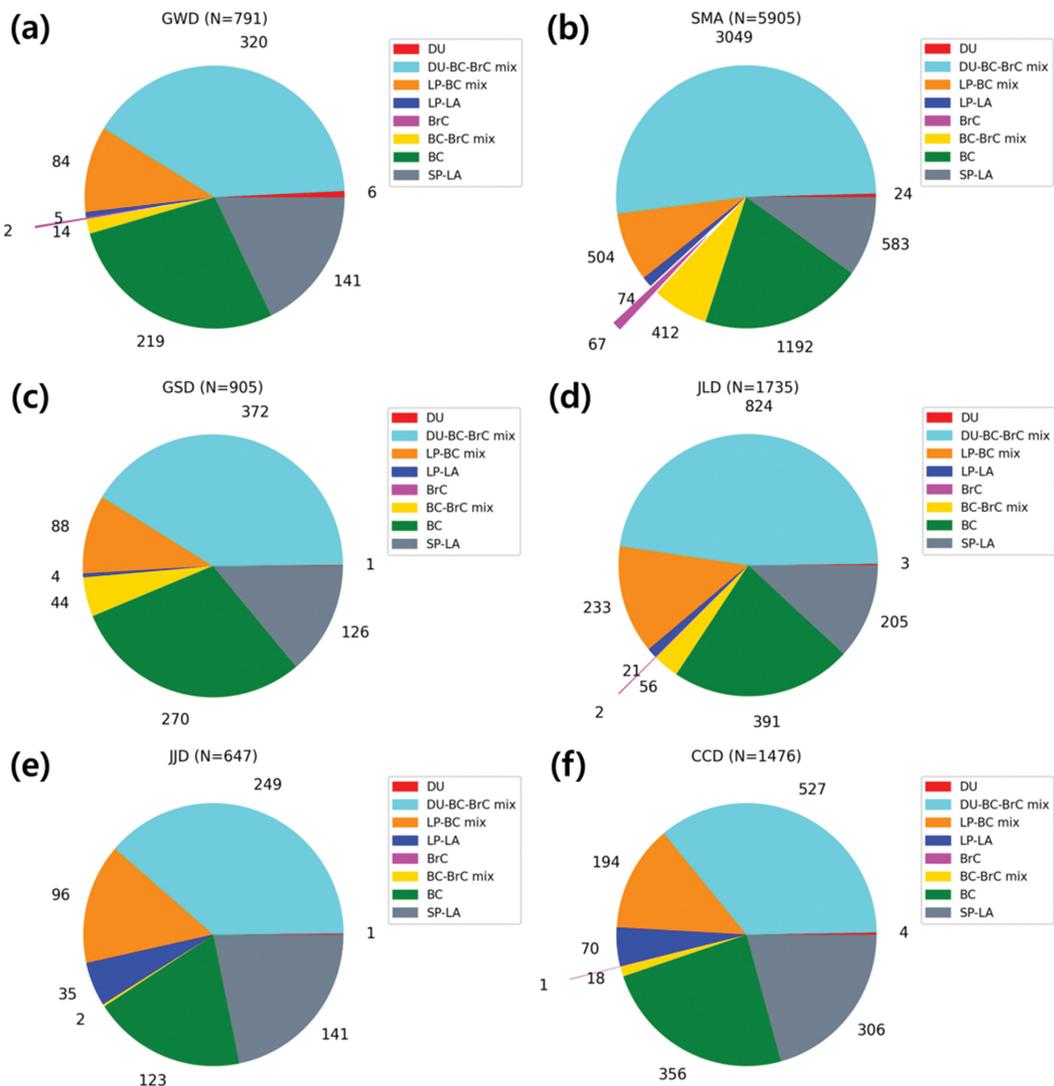


Fig. 20. Pie charts showing the data counts for eight aerosol types in each of the six regions: (a) GWD, (b) SMA, (c) GSD, (d) JLD, (e) JJD, and (f) CCD. The N represents the total data counts for each region.

역 모두 90% 이상이었다. Schmeisser et al. (2017)은 근접 분석을 통해 BC와 SP-LA가 장거리 수송된 에어로졸 또는 지역적인 영향을 받는 관측 지점에 공통적으로 나타난다는 특징을 보였다. 이를 토대로 높은 비율의 BC와 SP-LA는 장거리 수송 또는 국내 배출에 의한 영향으로 판단된다. Kang et al. (2021)과 Kim et al. (2022)는 서해상에서 BC가 다른 에어로졸과 혼합된 상태로 관측된 결과를 보고했으며, 6개 지역에서 DU-BC-BrC mix와 LP-BC의 비율이 높게 나타난 특징을 토대로 볼 때, DU를 비롯한 입자 크기가 큰 에어로졸이 장거리 수송 및 국내에서 배출되는 탄소질 에어로졸(예, BC와 BrC)과의 혼합이 매우 활발하게 발생하여 국내에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 지역별 에어로졸 유형의 분포 중 또 하나의 특이한 점은 제주도와 충청도 지역의 LP-LA의 분포가 각각 35개(5.4%)와 70개(4.7%)로 다른 4개 지역에 비해 비율이 높다는 것이다(강원도: 0.6%, 수도권: 1.3%, 경상도: 0.4%, 전라도: 1.2%). 앞서 언급하였듯이, 제주도 지역 AOD_{0.4} 자료 중 상당수가 해안가와 근접한 고산 관측 지점의 자료이다. 고산 관측 지점에서 관측한 에어로졸은 바다의 영향으로 인해 수용성 이온 성분이 높게 나타났으며, 특히 해염 성분들의 조성이 높은 특징을 보여(Hong et al., 2011), 해염입자와 같은 입자의 크기가 크고 흡수성이 낮은 LP-LA가 다수 분포하는 것으로 판단된다. 충청도 지역 AOD_{0.4} 자료 또한 상당수가 해안가와 근접한 안면도 관측 지점의 자료이며, 안면도에서 지역적으로 발생한 에어로졸의 광학 및 미세물리 특성 관측 시 입자의 크기가 상대적으로 크고 흡수성이 낮다는 특징을 보여 LP-LA의 비율이 높게 나타난 것으로 판단된다(예, Noh et al., 2010).

4. 결론 및 토의

본 연구는 1999년부터 2022년까지 국내 AERONET 관측 지점에서 산출한 Version 3 Level 2.0 직접 산출 자료와 에어로졸 역산출 자료 중 AOD_{0.4} 자료를 활용하여, 연별, 월별, 및 지역별 분포를 분석하였다. 또한, 직접 산출 자료를 사용하여 AOD (550 nm)의 연 변화, 월 변화, 및 계절변화를 조사하였다. 이와 함께 에어코리아의 최종 확정 측정자료를 사용하여 2022년까지의 PM₁₀과 PM_{2.5} 질량농도의 연간, 월간, 및 계절 변화를 연구하였다. 국내 에어로졸 유형의 분포를 파악하기 위해 Schmeisser et al. (2017)에 의해 제안된 분류 방법을 적용하고, 국내 전역 및 6개의 지역에서 의 에어로졸 유형별 분포를 분석하였다.

AERONET Version 3 Level 2.0의 국내 직접 산출 자료와 역산출 자료 분석 결과, 2011년 이후 자료량

이 급격하게 증가하기 시작하였다. DRAGON-Asia 2012 캠페인과 KORUS-AQ 캠페인이 수행된 2012년과 2016년에는 일시적으로 설치된 관측 지점들의 증가로 자료 수도 대폭 증가하였다. 월별 자료 분포는 균일하지 않으며, 특히 봄철(3월부터 5월)에 자료가 집중되어 있어 불균형한 분포를 나타낸다. 또한, 국내 AERONET 자료의 공간적 분포를 6개 지역으로 구분하여 분석한 결과, 서부권(수도권, 충청도, 전라도)에 70% 이상의 자료가 집중되어 있는 것으로 나타났다. 서부권의 관측 지점은 2000년대 초반부터 자료를 지속적으로 산출하였으며, 각 지역마다 최소 한 곳의 관측 지점이 존재한다. 동부권의 강원도 지역은 2012년부터 자료를 지속적으로 산출하였지만, 경상도 지역은 연별 자료 분포가 매우 불균형하며, 2016년부터 2017년 초까지 자료 생산 이후 2020년까지 관측 지점이 운영되지 않아 자료가 적었다. 이러한 자료 분포의 차이로 인해 서부권과 동부권 간의 차이가 두드러진다. 따라서 국내 에어로졸의 평균적인 특성 연구 시 AERONET 자료의 시공간적 불균형을 고려해야 한다.

연평균 AOD는 연간 -0.006 yr^{-1} 의 감소율을 보였으며, PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도도 각각 $-1.324 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 및 $-1.335 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 의 감소율을 나타냈다. 2019년 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 시행 이후, PM₁₀과 PM_{2.5}는 각각 $-2.581 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 및 $-1.729 \mu\text{g m}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 의 더욱 높은 감소율을 보였다. 이는 저감 정책의 효과를 시사한다. 또한, PM₁₀ 연평균 질량농도와 연평균 AOD는 0.674의 양의 상관관계와 0.00058의 낮은 p-value를 나타내어 두 변수 간의 유의미한 상관관계를 확인하였다. PM_{2.5}의 연평균 질량농도와 연평균 AOD 간의 상관관계도 0.753의 높은 양의 상관관계와 0.03의 p-value로, 두 변수 간에 더 높은 상관관계가 있음을 나타낸다.

월평균 및 계절평균 AOD는 봄과 여름에 상대적으로 높게 나타났으며, 가을과 겨울에는 낮은 값을 보였다. 반면, PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도는 건조한 계절에 더 높게 나타나는 경향을 보였고, 여름에는 상대적으로 낮았다. 이는 여름철 강수로 인한 에어로졸의 제거, 높은 지표 온도로 인해 강한 연직 수송 및 대기경계층의 확장이 지표면 PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도 감소에 기여했기 때문이다. 또한, 고온 다습한 환경에서의 에어로졸 입자의 흡습 성장은 입자의 단면적 증가로 이어져 여름철 AOD의 증가를 유발하였다. 이로 인해 AOD와 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 질량농도 간에 서로 상반된 계절적 변화가 관찰되었다.

국내 에어로졸을 SAE와 AAE 값에 기반하여 8가지의 유형으로 분류하고 그 분포를 분석하였다. 이 분석에서 BC 관련 에어로졸(BC, DU-BC-BrC mix, LP-

BC mix, BC-BrC mix)이 전체의 84.09%를 차지하여 가장 높은 비율을 보였다. SP-LA 유형의 에어로졸도 상당수 분포하는 것으로 나타났다. 에어로졸 유형별 연별 분포의 경우 DU와 BrC를 제외한 나머지 6가지 에어로졸 유형은 장기간에 걸쳐 꾸준히 분포하는 경향이 있었다. 6개 지역별 분석결과, DU-BC-BrC mix, BC, SP-LA, 그리고 LP-BC mix가 주로 분포한다는 특징을 보였다. 이는 장거리 수송 및 국내에서 발생한 지역적인 배출의 영향으로 해석된다. 또한, 바다의 영향을 받은 관측 지점이 위치한 지역에서는 해염 입자의 영향으로 LP-LA 유형의 에어로졸 분포가 높게 나타나는 특징을 보였다.

본 연구는 국내 지역을 넘어서 국내 전역에서 지상 관측 에어로졸 원격 탐사 자료의 시공간적인 불균질성, AOD 및 PM₁₀, PM_{2.5}의 장기 변화 추세, 그리고 에어로졸 유형별 분포를 체계적으로 분석하였다는 점에서 의의를 갖는다. 그러나 AOD, PM₁₀, 그리고 PM_{2.5}의 장기적인 추세 및 에어로졸 유형별 분포를 종합적으로 분석하는 과정에서 장거리 수송과 지역별 또는 인접 지역에서 배출되는 대기오염물질의 기여도를 평가하는 데 있어 미흡한 점이 있다. 또한 에어로졸 유형을 분류하는 다양한 방법이 존재하며, 이 방법들은 에어로졸의 미세물리 및 광학적 특성을 다르게 활용하기 때문에, 각 방법에 따른 결과를 비교 분석하고 평가할 필요가 있다. 마지막으로, 유형별 자료 개수가 아닌 질량농도를 기반으로 한 분석 결과가 필요함이 드러났다. 이에 따라, 향후 연구는 이러한 한계점을 보완하여 국내뿐만 아니라 동북아시아 지역의 에어로졸 분포 및 특성에 대한 보다 광범위한 연구가 요구된다.

감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다. 본 연구에 사용된 국내 AERONET 관측 지점의 선포토미터 자료를 제공해주신 모든 책임 연구자분들과 관리자분들께 감사드립니다. 본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Andrews, E., and Coauthors, 2019: Overview of the NOAA/ESRL federated aerosol network. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 123-135, doi:10.1175/BAMS-D-17-0175.1.
- Bae, M., B.-U. Kim, H. C. Kim, and S. Kim, 2020: A multi-scale tiered approach to quantify contributions: A case study of PM_{2.5} in South Korea during 2010~2017. *Atmosphere*, **11**, 141, doi:10.3390/atmos11020141.
- Bergin, M. H., S. E. Schwartz, R. N. Halthore, J. A. Ogren, and D. L. Hlavka, 2000: Comparison of aerosol optical depth inferred from surface measurements with that determined by Sun photometry for cloud-free conditions at a continental U.S. site. *J. Geophys. Res.*, **105**, 6807-6816, doi:10.1029/1999JD900454.
- Bergstrom, R. W., P. B. Russell, and P. Hignett, 2002: Wavelength dependence of the absorption of black carbon particles: predictions and results from the TARFOX experiment and implications for the aerosol single scattering albedo. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 567-577, doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0567:WDOTAO>2.0.CO;2.
- _____, P. Pilewskie, P. B. Russell, J. Redemann, T. C. Bond, P. K. Quinn, and B. Sierau, 2007: Spectral absorption properties of atmospheric aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 5937-5943, doi:10.5194/acp-7-5937-2007.
- Cappa, C. D., K. R. Kolesar, X. Zhang, D. B. Atkinson, M. S. Pekour, R. A. Zaveri, A. Zelenyuk, and Q. Zhang, 2016: Understanding the optical properties of ambient sub- and supermicron particulate matter: results from the CARES 2010 field study in northern California. *Atmos. Chem. Phys.*, **16**, 6511-6535, doi:10.5194/acp-16-6511-2016.
- Carrico, C. M., M. J. Rood, J. A. Ogren, C. Neusüb, A. Wiedensohler, and J. Heintzenberg, 2000: Aerosol optical properties at Sagres, Portugal during ACE-2. *Tellus, Ser. B*, **52**, 694-715, doi:10.1034/j.1600-0889.2000.00049.x.
- Cazorla, A., R. Bahadur, K. J. Suski, J. F. Cahill, D. Chand, B. Schmid, V. Ramanathan, and K. A. Prather, 2013: Relating aerosol absorption due to soot, organic carbon, and dust to emission sources determined from in-situ chemical measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9337-9350, doi:10.5194/acp-13-9337-2013.
- Charlson, R. J., T. L. Anderson, and H. Rodhe, 1999: Direct climate forcing by anthropogenic aerosols: Quantifying the link between atmospheric sulfate and radiation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **72**, 79-94.
- Cheng, T., and Coauthors, 2015: Seasonal variation and difference of aerosol optical properties in columnar and surface atmospheres over Shanghai. *Atmos. Environ.*, **123**, 315-326, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.05.029.
- Choi, J.-S., and Coauthors, 2016: A study on chemical characteristics of aerosol composition at west inflow regions in the Korean Peninsula I. Characteristics of PM concentration and chemical components. *J.*

- Korean Soc. Atmos. Environ.*, **32**, 469-484, doi:10.5572/KOSAE.2016.32.5.469.
- Crawford, J. H., and Coauthors, 2021: The Korea-United States Air Quality (KORUS-AQ) field study. *Elementa-Sci. Anthropol.*, **9**, 2-27, doi:10.1525/elementa.2020.00163.
- Dubovik, O., and M. D. King, 2000: A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, **105**, 20673-20696, doi:10.1029/2000JD900282.
- _____, A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y. J. Kaufman, T. F. Eck, and I. Slutsker, 2000: Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieval from AERONET sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, **105**, 9791-9806, doi:10.1029/2000JD900040.
- _____, B. N. Holben, T. Lapyonok, A. Sinyuk, M. I. Mishchenko, P. Yang, and I. Slutsker, 2002a: Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1415, doi:10.1029/2001GL014506.
- _____, _____, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, and I. Slutsker, 2002b: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in Worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 590-608, doi:10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAAOP>2.0.CO;2.
- _____, and Coauthors, 2006: Application of light scattering by spheroids for accounting for particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *J. Geophys. Res.*, **111**, D11208, doi:10.1029/2005JD006619.
- Eom, S., J. Kim, S. Lee, B. N. Holben, T. F. Eck, S.-B. Park, and S. S. Park, 2022: Long-term variation of aerosol optical properties associated with aerosol types over East Asia using AERONET and satellite (VIIRS, OMI) data (2012~2019). *Atmos. Res.*, **280**, 106457, doi:10.1016/j.atmosres.2022.106457.
- Fierz-Schmidhauser, R., P. Zieger, G. Wehrle, A. Jefferson, J. A. Ogren, U. Baltensperger, and E. Weingartner, 2010: Measurement of relative humidity dependent light scattering of aerosols. *Atmos. Meas. Tech.*, **3**, 39-50, doi:10.5194/amt-3-39-2010.
- Ghim, Y.-S., 2011: Impacts of Asian dust on atmospheric environment. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **27**, 255-271, doi:10.5572/KOSAE.2011.27.3.255.
- Giles, D. M., and Coauthors, 2019: Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 169-209, doi:10.5194/amt-12-169-2019.
- Ham, J., H. J. Lee, J. W. Cha, and S.-B. Ryoo, 2017: Potential source of PM₁₀, PM_{2.5}, and OC and EC in Seoul during spring 2016. *Atmos.*, **27**, 41-54, doi:10.14191/Atmos.2017.27.1.041.
- Haywood, J., and O. Boucher, 2000: Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geophys.*, **38**, 513-543, doi:10.1029/1999RG000078.
- Higurashi, A., and T. Nakajima, 2002: Detection of aerosol types over the East China Sea near Japan from four-channel satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1836, doi:10.1029/2002GL015357.
- Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET-A federated instrument Network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. of Environ.*, **66**, 1-16, doi:10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
- Hong, S.-B., D.-S. Jung, S.-B. Lee, D.-E. Lee, S.-H. Shin, and C.-H. Kang, 2011: Ionic composition comparison of atmospheric aerosols at coastal and mountainous sites of jeju island. *Anal. Sci. Technol.*, **24**, 24-37, doi:10.5806/AST.2011.24.1.024.
- Huang, J., and Coauthors, 2016: Validation and expected error estimation of Suomi-NPP VIIRS aerosol optical thickness and Ångström exponent with AERONET. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 7139-7160, doi:10.1002/2016JD024834.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, 1535 pp.
- _____, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), IPCC, 184 pp.
- Jeong, U., J. Kim, H. Lee, and Y. G. Lee, 2017: Assessing the effect of long-range pollutant transportation on air quality in Seoul using the conditional potential source contribution function method. *Atmos. Environ.*, **150**, 33-44, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.11.017.
- Kang, Y., S. Lim, M. Lee, and H.-J. Yoo, 2021: Vertical distributions of refractory black carbon over the yellow Sea during the Spring 2020. *J. Korean Soc.*

- Atmos. Environ.*, **37**, 710-728, doi:10.5572/KOSAE.2021.37.5.710.
- Kim, J., J. Lee, H.-C. Lee, A. Higurashi, T. Takemura, and C.-H. Song, 2007: Consistency of the aerosol type classification from satellite remote sensing during the atmospheric brown cloud-East Asia regional experiment campaign. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **112**, D22S33, doi:10.1029/2006JD008201.
- Kim, J. E., and Coauthors, 2022: Characteristics of Asian dust observed over the Yellow Sea during YES-AQ campaign in March, 2021 based on vessel and aircraft measurement. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **38**, 557-576, doi:10.5572/KOSAE.2022.38.4.557.
- Kim, S.-W., I.-J. Choi, and S.-C. Yoon, 2010: A multi-year analysis of clear-sky aerosol optical properties and direct radiative forcing at Gosan, Korea (2001~2008). *Atmos. Res.*, **95**, 279-287, doi:10.1016/j.atmosres.2009.10.008.
- KLRI, 2015: A study on the improvement of air quality management legislation system to reduce the levels of fine particle, lows to reduce precirculate matters, Korea Legislation Research Institute, 135 pp.
- Koloutsou-Vakakis, S., C. M. Carrico, P. Kus, M. J. Rood, Z. Li, R. Shrestha, J. A. Ogren, J. C. Chow, and J. G. Watson, 2001: Aerosol properties at a midlatitude Northern Hemisphere continental site. *J. Geophys. Res.*, **106**, 3019-3032, doi:10.1029/2000JD900126.
- Kong, L., J. Xin, W. Zhang, and Y. Wang, 2016: The empirical correlations between PM_{2.5}, PM₁₀ and AOD in the Beijing metropolitan region and the PM_{2.5}, PM₁₀ distributions retrieved by MODIS. *Environ. Pollut.*, **216**, 350-360, doi:10.1016/j.envpol.2016.05.085.
- Kong, W., and F. Yi, 2015: Convective boundary layer evolution from lidar backscatter and its relationship with surface aerosol concentration at a location of a central China megacity. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 7928-7940, doi:10.1002/2015JD023248.
- Lee, J., J. Kim, C.-H. Song, S.-B. Kim, Y. Chun, B.-J. Sohn, and B. N. Holben, 2010: Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements. *Atmos. Environ.*, **44**, 3110-3117, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.05.035.
- Lee, K.-H., and Y.-J. Kim, 2004: Russian forest fire smoke aerosol monitoring using satellite and AERONET data. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**, 437-450.
- _____, J.-E. Kim, Y.-J. Kim, and J. Kim, 2004: Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**, 603-613, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.09.032.
- Lee, S., and Coauthors, 2018: Characteristics of classified aerosol types in South Korea during the MAPS-Seoul campaign. *Aerosol Air Qual. Res.*, **18**, 2195-2206, doi:10.4209/aaqr.2017.11.0474.
- Li, Z. Q., and Coauthors, 2018: Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: An overview of Sun-Sky radiometer observation Network (SONET) measurements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 739-755, doi:10.1175/BAMS-D-17-0133.1.
- MOE, 2019: Enforcement Rule of the Special Act on the Reduction and Management of Fine Dust. Ministry of Environment [Available online at <https://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=207849&efYd=20190215#0000>].
- Nakajima, T., and Coauthors, 2007: Overview of the atmospheric brown cloud East Asian regional experiment 2005 and a study of the aerosol direct radiative forcing in east Asia. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24S91, doi:10.1029/2007JD009009.
- NIER, and NASA. 2017. Rapid Science Synthesis Report. 35 pp, [Available at <https://espo.nasa.gov/sites/default/files/documents/KORUS-AQ-RSSR.pdf>] (in Korean).
- Noh, Y. M., H.-L. Lee, and D. Müller, 2010: Investigation of source dependent optical and microphysical characteristics of aerosol using multi-wavelength raman lidar in Anmyun, Korea. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **26**, 554-566, doi:10.5572/KOSAE.2010.26.5.554.
- Pilat, M. J., and R. J. Charlson, 1966: Theoretical and optical studies of humidity effects on the size distribution of hygroscopic aerosol. *J. Rech. Atmos.*, **1**, 165-170.
- Qu, W. J., J. Wang, X. Y. Zhang, D. Wang, and L. F. Sheng, 2015: Influence of relative humidity on aerosol composition: impacts on light extinction and visibility impairment at two sites in coastal area of China. *Atmos. Res.*, **153**, 500-511, doi:10.1016/j.atmosres.2014.10.009.
- _____, _____, X. Zhang, L. Sheng, and W. Wang, 2016: Opposite seasonality of the aerosol optical depth and the surface particulate matter concentration over the north China Plain. *Atmos. Environ.*, **127**, 90-99, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.061.
- Russell, P. B., and Coauthors, 2010: Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 1155-1169, doi:10.5194/acp-10-1155-2010.
- Schmeisser, L., and Coauthors, 2017: Classifying aerosol

- type using in situ surface spectral aerosol optical properties. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 12097-12120, doi:10.5194/acp-17-12097-2017.
- Schuster, G. L., O. Dubovik, and B. N. Holben, 2006: Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions. *J. Geophys. Res.*, **111**, D07207, doi:10.1029/2005JD006328.
- Seo, S., J. Kim, H. Lee, U. Jeong, W. Kim, B. N. Holben, S.-W. Kim, C. H. Song, and J. H. Lim, 2015: Estimation of PM₁₀ concentrations over Seoul using multiple empirical models with AERONET and MODIS data collected during the DRAGON-Asia campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 319-334, doi:10.5194/acp-15-319-2015.
- Shin, S.-K., M. Tesche, Y. Noh, and D. Müller, 2019: Aerosol-type classification based on AERONET version 3 inversion products. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 3789-3803, doi:10.5194/amt-12-3789-2019.
- Sinyuk, A., and Coauthors, 2007: Simultaneous retrieval of aerosol and surface properties from a combination of AERONET and satellite. *Remote Sens. Env.*, **107**, 90-108, doi:10.1016/j.rse.2006.07.022.
- Smirnov, A., B. N. Holben, T. F. Eck, O. Dubovik, and I. Slutsker, 2000: Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sens. Env.*, **73**, 337-349, doi:10.1016/S0034-4257(00)00109-7.
- Sun, Y. L., Z. F. Wang, P. Q. Fu, Q. Jiang, T. Yang, J. Li, and X. L. Ge, 2013: The impact of relative humidity on aerosol composition and evolution processes during wintertime in Beijing, China. *Atmos. Environ.*, **77**, 927-934, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.06.019.
- Titos, G., H. Lyamani, A. Cazorla, M. Sorribas, I. Foyo-Moreno, A. Wiedensohler, and L. Alados-Arboledas, 2014a: Study of the relative humidity dependence of aerosol light-scattering in southern Spain. *Tellus, Ser. B*, **66**, 24536, doi:10.3402/tellusb.v66.24536.
- _____, A. Jefferson, P. J. Sheridan, E. Andrews, H. Lyamani, L. Alados-Arboledas, and J. A. Ogren, 2014b: Aerosol light-scattering enhancement due to water uptake during the TCAP campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 7031-7043, doi:10.5194/acp-14-7031-2014.
- Wang, Y., and Coauthors, 2011: Seasonal variations in aerosol optical properties over China. *J. Geophys. Res.*, **116**, D18209, doi:10.1029/2010JD015376.
- Wu, Y., J. Zhu, H. Che, X. Xia, and R. Zhang, 2015: Column-integrated aerosol optical properties and direct radiative forcing based on sun photometer measurements at a semi-arid rural site in Northeast China. *Atmos. Res.*, **157**, 56-65, doi:10.1016/j.atmosres.2015.01.021.
- Xia, X. A., H. B. Chen, P. C. Wang, W. X. Zhang, P. Goloub, B. Chatenet, T. F. Eck, and B. N. Holben, 2006: Variation of column-integrated aerosol properties in a Chinese urban region. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **111**, D05204, doi:10.1029/2005JD006203.
- Yu, X. N., B. Zhu, and M. G. Zhang, 2009: Seasonal variability of aerosol optical properties over Beijing. *Atmos. Environ.*, **43**, 4095-4101, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.03.061.