

## 지상 원격 관측 자료를 기반으로 한 아시아 에어로졸 광학 깊이의 장기 추세 분석

채유진<sup>1)</sup> · 조예슬<sup>2)</sup> · 구자호<sup>1)</sup> · 김준<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

(접수일: 2026년 4월 1일, 수정일: 2026년 5월 5일, 게재확정일: 2026년 5월 5일)

### Long-term Trend Analysis of Asian Aerosol Optical Depth Based on Ground-based Remote Sensing Data

Yujin Chai<sup>1)</sup>, Yeseul Cho<sup>2)</sup>, Ja-Ho Koo<sup>1)</sup>, and Jhoon Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Department of Civil Urban Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute  
of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Korea

(Manuscript received 1 April 2026; revised 5 May 2026; accepted 5 May 2026)

**Abstract** Aerosols significantly impact air quality, public health, and climate. Long-term analysis of aerosol loading trends is essential for understanding changes in air quality and climate, and informing regulatory policies. This study analyzes long-term Aerosol Optical Depth (AOD) trends across Asia using data from the Aerosol Robotic Network (AERONET), a global ground-based remote sensing network for aerosol optical properties. Observations from 56 stations across 21 countries in East, Southeast, South, and Central Asia (1998~2024) were deseasonalized and analyzed via linear regression. Unlike previous studies focused on total AOD, this study separately examines Fine-mode and Coarse-mode AOD (FAOD and CAOD) to distinguish anthropogenic aerosol contributions from dust and integrates analyses of absorption properties, including Single Scattering Albedo (SSA), and aerosol type. Overall, both FAOD and CAOD exhibit decreasing trends across Asia. The FAOD decrease is most pronounced in East Asia, reaching up to  $-7\% \text{ yr}^{-1}$ , likely attributable to air pollution control policies. Several stations also show a shift from Black Carbon to Non-Absorbing aerosol dominance, accompanied by increasing SSA. The CAOD decrease is dominant in South Asia, reaching up to  $-6\% \text{ yr}^{-1}$ , driven primarily by a reduction in Asian dust frequency. In contrast, FAOD in South Asia shows an increasing trend, potentially linked to meteorological factors. These findings demonstrate that regional aerosol trends are governed by the combined influence of local environmental conditions, air quality policies, and meteorological variability, all of which must be considered in future analyses.

**Key words:** Aerosol Optical Depth, Trend analysis, Air quality, AERONET

\*Corresponding Author: Jhoon Kim, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea.  
Phone: +82-2-2123-5682, Fax: +82-2-365-5163  
E-mail: jkim2@yonsei.ac.kr

## 1. 서 론

에어로졸은 대기질 및 공중 보건, 그리고 기후 변화에까지 깊은 관련성을 갖고 있다(Charlson et al., 1992; Brauer et al., 2016). 특히 fine particulate matter (PM)이라고 불리는 작은 크기의 에어로졸은 건강에 직접적인 영향을 준다(van Donkelaar et al., 2015). 따라서 에어로졸양 추세 분석은 대기질의 동향 확인뿐 아니라, 규제 정책 수립과 기후 변화 연구에도 중요한 기반이 된다. 본 연구에서는 에어로졸 배출량이 많은 아시아의 장기간 에어로졸 광학 깊이(aerosol optical depth, AOD)의 추세를 분석하였다.

AOD는 단위면적 위의 공기기둥 내의 에어로졸에 의한 복사에너지의 감쇄 총량을 나타내는 물리량으로, 대기 오염의 지표로도 활용된다(Gui et al., 2022). AOD를 원격 측정하는 방법에는 크게 지상 원격과 위성 원격 관측이 있다. 지상 기반 태양 광도계는 직달 태양 복사 측정을 통해 AOD를 도출하는 반면, 위성 측정은 지구 지표면을 내려다보며 대기권 최상단에서 측정된 복사량을 역산정하여 도출한다. 위성 원격 관측은 측정 공간 범위가 넓다는 장점이 있지만, 지표와 에어로졸 특성에 대한 많은 가정에 의존한다는 한계가 있다. 지상 원격 관측은 지리적 분포에 한계가 있으나, 더 정확한 에어로졸 광학 특성을 제공할 수 있기에 지상 원격 관측 자료인 미국 NASA의 Aerosol Robotic Network (AERONET)을 활용하였다. AERONET은 에어로졸 광학 특성 정보를 제공하는 자동화된 지상 관측 자료의 전 지구 네트워크이다(Holben et al., 1998). 전 세계적으로 많은 관측소의 장기간 및 연속적인 데이터를 보유하고 있으며, 높고 안정적인 정확도를 보인다. 본 연구에서는 AERONET 자료를 이용해 아시아 지역의 미세입자(fine-mode)와 조대입자(coarse-mode) AOD 추세를 분리하여 분석하였으며, 추가로 단일산란알베도(single scattering albedo, SSA)의 추세와 에어로졸 유형 변화를 통해 흡수 특성 변화를 확인하였다.

지상 및 위성 원격 관측 AOD 장기간 추세는 많은 분석이 진행되어 왔다. Yoon et al. (2016), Ningombam et al. (2019), Shin et al. (2022), Zhang et al. (2025)은 AERONET을 이용해 장기간 AOD의 추세를 분석하였다. 또한, Gupta et al. (2022)과 Gupta et al. (2023)은 위성과 원격 관측 자료를 함께 활용하였다. AOD와 더불어 옹스트롬 지수(angstrom exponent, AE; Shin et al., 2022; Zhang et al., 2025)와 SSA (Zhang et al., 2025) 같은 광학 특성도 추세에 활용되지만, 입자 크기에 따른 광학 깊이의 변화를 분석한 선행 연구는 제한적이다(Yan et al., 2021; Shin et al., 2022; Gupta et al., 2023; Luo et al., 2024). 위성 관측 자료를 인공 지능으로 학습하여 계산한 미세입자 및 조대

입자 AOD의 추세 분석도 수행되고 있으나 에어로졸 유형의 변화까지 관찰하지는 못한다(Yan et al., 2021; Zang et al., 2023; Luo et al., 2024). 입자 크기별 AOD 추세, SSA 추세, 에어로졸 유형 변화를 통합적으로 분석한 연구는 아직 수행된 바 없다. 본 연구에서는 AERONET 자료를 이용하여 이 세 가지를 통합적으로 분석함으로써 에어로졸 광학 특성의 다차원적 변화를 더욱 포괄적으로 제시하였다.

에어로졸은 크기에 따라 미세입자와 조대입자로 나뉘는데, 조대입자는 모래 먼지(dust), 꽃가루, 해염 입자 등 주로 자연 발생적인 물질들로 구성되어 있으며, 상대적으로 더 작은 미세입자는 산업 활동, 바이오매스 연소, 도시 대기 오염, 기체 전구체와 산화체에 의해 생성되는 2차 에어로졸과 관련이 있다(Shin et al., 2022). 에어로졸의 입자 크기 분포가 쌍봉(bimodal) 구조라는 점을 통해 AOD로부터 fine-mode AOD (FAOD)와 coarse-mode AOD (CAOD)로 분리할 수 있다(O'Neill et al., 2003). 분리된 값은 AOD를 이용한 일반적인 분석보다 더 본질적인 에어로졸 광학 통계를 제공할 수 있다. AOD에서 FAOD의 비율을 나타내는 Fine-Mode Fraction (FMF)는 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸을 구별하는 데 유용한 지표이다(Bellouin et al., 2005). Bellouin et al. (2005)에 따르면 인위적 에어로졸은 미세입자 비중이 높으며, 자연적 에어로졸은 조대입자 비중이 높다. Quaas et al. (2022)에서는 FAOD의 추세가 황산염 변화와 공간적으로 더 잘 일치하는 모습을 보이며 미세입자는 인위적 에어로졸의 정보를 담고 있음을 나타냈다. 공중 보건과 기후 변화에 에어로졸이 끼치는 영향을 평가하기 위해서는 전체 에어로졸 부하에서 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸의 분리가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 선행 연구(Bellouin et al., 2005; Quaas et al., 2022)에 기반하여 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸 부하를 각각 FAOD와 CAOD로 가정하여 분석하였다.

미세 입자(조대 입자)를 인위적(자연적) 에어로졸의 지표로 사용하는 방법은 선행 연구에서 광범위하게 적용되어 왔다(Chung et al., 2005; Kaufman et al., 2005; Lee and Chung, 2013; Li et al., 2020). Chung et al. (2005)는 인위적 에어로졸 직접 복사 강제력 추정의 불확실성을 분석하는 과정에서, MODIS의 CAOD를 자연적 에어로졸로 간주하는 방법을 보조적으로 활용하였다. Li et al. (2020)에서도 Bellouin et al. (2005)에 근거하여 FMF를 인위적 에어로졸의 지표로 사용하였다. Kaufman et al. (2005) 또한, 인위적 에어로졸과 자연적 에어로졸이 미세 모드와 조대 모드의 비율에서 큰 차이가 보임을 명시했다. 하지만 이러한 가정은 불확실성이 존재한다. Chung et al. (2005)는 황사 입자와 해염 입자 역시 미세 입자를 포함하고

있기 때문에 조대 입자만을 자연적 에어로졸로 간주하는 가정이 자연적 에어로졸 부하의 과소 추정을 유발한다는 점을 명시했다. 조대입자 비율은 자연적 에어로졸 비율 하한의 의미함을 알 수 있다. Lee and Chung (2013)에서도 인위적 에어로졸의 지표로 FAOD를 사용하였으나, 일부 황사 입자의 크기는 작으며, 일부 탄소성 에어로졸과 황산염은 산불 등에서 자연적으로 발생할 수 있지만, 일반적으로 입자 크기에 따라 인위적 또는 자연적 에어로졸로 분류됨을 언급하였다. Kaufman et al. (2005)는 이러한 가정의 불확실성을 제시하였다. Kaufman et al. (2005)는 해양 상에서 MODIS의 FAOD와 CAOD 분리 능력을 이용해 인위적 에어로졸 비율을 추정하였으며, 이 방법의 불확실성은 약 ±30%임을 제시하였다.

에어로졸 유형 분류는 임계값 기반의 분류법을 사용했다. AERONET 자료를 활용한 임계값 기반의 에어로졸 유형 분류 방법은 꾸준히 발전해 왔다. Eck et al. (1999)과 Gobbi et al. (2007)은 AOD, AE 및 그 분광 곡률을 이용하여 바이오매스 연소, 도시 및 산업 에어로졸, 황사와 같은 주요 에어로졸 유형의 광학적 특성을 분석하였다. Lee et al. (2010)은 SSA, FMF를 활용하여 검댕(black carbon, BC), 비흡수성 에어로졸(non-absorbing, NA), 황사(dust)로 구분하는 임계값을 제안하였다. Cazorla et al. (2013)과 Cappa et al. (2016)은 흡수 및 산란 AE를 활용한 구분 방법을 추가로 발전시켰으며, Shin et al. (2019)은 입자 선형 탈분극률과 SSA를 활용한 구분 방법을 제시하였다. 본 연구에서는, 단순성과 강건성을 지닌 Lee et al. (2010) 방법론을 사용하여 유형을 분류하였다.

아시아는 전반적으로 FAOD와 CAOD 모두 감소 추세를 보이는데, FAOD는 동아시아에서 큰 감소를 나타냈다(예, Zhang et al., 2025). 이는 대기 오염 물질 배출 규제 정책 시행 이후 에어로졸이 감소했다는 선행 연구에 따라 환경 정책의 긍정적인 효과로 해석할 수 있다(Uno et al., 2020; Xie and Liao, 2022; Gao et al., 2023; Kim et al., 2023; Chen et al., 2024; Fan et al., 2025). 또한 황사 영향권인 남아시아에서는 CAOD 감소가 뚜렷하게 나타났다. 한편, 아시아 관측소에서는 BC 유형이 주요 구성 에어로졸로 나타났다. 특히, 일본의 관측소는 2015년을 전후로 BC에서 NA로의 변화, FAOD의 감소 및 SSA의 증가를 보였다. 대표 유형이 Dust에서 BC으로 전환된 인도 관측소는 FAOD의 증가, CAOD의 감소, SSA의 감소가 나타나 유형 변화와 일치하는 추세 양상을 보였다. CAOD와 FAOD를 비교했을 때, 같은 나라 및 지역은 비슷한 추이를 보였다. 이를 통해 에어로졸은 공간 변동성이 크지만 각 국가의 지역적인 환경 및 기상장과 환경 정책의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 AERONET

AERONET (Holben et al., 1998)은 전 세계적으로 분포된 지상 태양 광도계 관측 네트워크로, 에어로졸 광학 특성에 대한 정보를 제공한다. 일간 여러 차례의 관측을 통해 장기간에 걸친 연속적인 데이터를 제공해 오고 있어, AOD의 장기간 추세 분석에 사용하였다. AERONET은 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1,020, 1,640 nm를 약 3에서 15분 간격으로 측정한다(Giles et al., 2019). 역산정(inversion, INV) 자료 산출을 위한 등고도권 하늘 복사 측정은 1시간 간격으로 측정한다(Sinyuk et al., 2020). 산출 불확실도는 AOD와 SSA에 대해 각각 0.010~0.021, 0.03으로 높은 정확도를 보여준다. 이때, 데이터 품질에 따라 세 가지 레벨에 대한 자료가 제공된다. Level 1.0, Level 1.5, Level 2.0은 각각 사전 선별 자료, 실시간 자동 구름 제거 및 기기 이상 관리 자료, 품질 관리 및 검보정이 적용된 자료를 나타낸다. Level 2.0 자료가 가장 품질이 보장되어 있으나 자료 수가 적어 역산정 자료는 Level 1.5를 사용하였다.

본 연구에서는 Version 3 Level 2.0 분광 분리(spectral deconvolution algorithm, SDA) 자료와 Level 1.5 역산정 자료를 사용했다. 분광 분리 자료에서 500 nm에서의 FAOD와 CAOD를 사용하여 AOD의 추세를 분석하였다. 역산정 자료에서는 440 nm에서의 SSA, 440 nm 및 675 nm에서의 AOD, 입자 부피 크기 분포를 활용해 SSA의 추세, 에어로졸 유형 및 입자 크기 분포의 변화를 분석하였다. 분광 분리 알고리즘에서 AOD는 FAOD와 CAOD로 분리된다(O'Neill et al., 2003). 이는 특정 반경에서의 경계값을 사용하는 것이 아니라, 에어로졸 입자 크기 분포가 쌍봉 구조(bimodal)라는 점에 기반해 광학적으로 정의된다. 조대 모드의 스펙트럼 변화가 파장에 대해 근사적으로 중립적이며, 전체 스펙트럼 변화가 주로 미세 모드에 의해 결정된다는 점을 활용하여 분리된다. 입자 부피 크기 분포는 0.05~15 μm 범위에서 로그 간격으로 22개의 bin에서 제공된다.

전 세계의 AERONET 관측소 중, 10°S 이상 50°N 이하 및 65°E 이상 155°E 이하에 위치하며, 2011년 이후로 6년 이상 데이터를 보유한 56개의 아시아 관측소를 분석하였다. 사용한 관측소는 중앙아시아 2곳, 동아시아 27곳, 동남아시아 18곳, 남아시아 9곳으로 Fig. S1에서 확인할 수 있다.

### 2.2 ERA5

ERA5 (Hersbach et al., 2023a, 2023b)는 ECMWF에서 제공하는 재분석 자료로, 자료 동화 기법을 통해

전 세계의 모델 자료와 관측 자료를 결합하여 일관된 자료를 제공한다. ERA5 재분석 자료의 수평 공간 해상도는  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 로 전 지구를 커버하며 시간 해상도는 1시간이다. 수직으로는 1,000 hPa부터 1 hPa까지 37개의 기압면에서의 자료를 제공한다. 추가로, 동일한 공간 해상도로 시간별 자료를 평균한 월평균 자료도 제공된다. 제공되는 자료 중, 기압면 월평균 및 시간별 재분석 상대 습도 자료를 이용했다.

자료 기간은 2000년부터 2024년으로, 월평균 자료는 격자마다 800 hPa부터 1,000 hPa까지 25 hPa 간격의 9개 기압면 자료(800, 825, 850, 875, 900, 925, 950, 975, 1,000 hPa)를 산술 평균해 1,000-800 hPa 기압 층 평균값으로 계산하여 분석에 활용하였다. 시간별 자료의 경우, 800 hPa부터 1,000 hPa까지 50 hPa 간격의 5개 기압면 자료(800, 850, 900, 950, 1,000 hPa)를 산술 평균하여 분석하였다. 800에서 1,000 hPa까지 25 hPa 간격으로 기압면 자료가 있으나, 시간별 자료의 크기가 커 50 hPa 간격으로 사용하였다.

1,000-800 hPa 기압 층 평균 상대 습도의 월평균 시계열에 대해 각 격자점에서 1차 선형 회귀를 적용하여 장기 추세를 추정하였다. 월 단위로 계산된 회귀 기울기에 12를 곱하여 연간 변화율(% yr<sup>-1</sup>)로 환산하였다. 또한 1,000-800 hPa 기압 층 평균 상대 습도가 시간 별로 80%를 초과하는 시간 수를 연별로 계산하였다. 각 격자점의 연별 시계열에 대해 1차 선형 회귀를 적용하여 고습도 발생 빈도의 장기 추세를 추정하였다. 시간별 자료를 사용하였으므로 연간 자료 총수는 8,760개(365일 × 24시간)이며, 전체 시간 수에 대한 비율로 나타낼 수도 있으나, 본 연구에서는 절대 빈도(count)를 사용하였다.

### 2.3 Linear Regression

추세를 추정하기 위해 1차 선형 회귀분석을 사용했다. AOD의 계절적 변동성을 최소화하고 더 정확한 추세를 계산하기 위해 Li et al. (2014)의 방법을 사용했다. 5회 이상의 관측이 이루어진 달에 대한 월별 중앙값이 8개 이상 있는 해에 대해, 월별 중앙값의 산술 평균으로 연평균 값을 계산한다. 2011년 이후 최소 6년의 연평균 값을 보유하고 있는 관측소의 연평균 값을 사용해 1차 선형 회귀 추세를 계산한다. 결측값은 별도로 보정하지 않았으며, 위의 최소 관측 횟수 기준을 충족하지 못한 경우 해당 기간의 자료를 분석에서 제외하였다. 추가로 Mann-Kendall 검정(Mann, 1945; Kendall, 1948)을 활용해 추세의 통계적 유의성을 평가한다.

### 2.4 Mann-Kendall test

Mann-Kendall test는 자료의 단조 증가 또는 단조

감소 여부를 판단하는 비모수적 통계적 추론 방법이다. 자료가 특정 분포를 만족하지 않거나 이상치가 존재해도 적용이 가능하다는 장점이 있다. Mann-Kendall test 계산 과정은 다음과 같다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

$X$ 는 자료,  $n$ 은 자료의 개수를 나타낸다. 여기서  $\text{sgn}$ 은  $X_j - X_i$ 가 양수일 때 +1, 0일 때 0, 음수일 때 -1을 반환한다.

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{if } X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$V(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

식(3)에서  $V(S)$ 는 자료의 분산(variance)을 의미한다. 이때,  $q$ 는 자료의 고유값 개수이고,  $t_p$ 는 고유값을 지닌  $p$ 번째 집단의 자료 개수이다. 식(4)로 계산된  $|Z|$ 가 1.96 이상일 때는 95% 신뢰구간에서 추세가 있음을, 1.65 이상일 때는 90% 신뢰구간에서 추세가 있음을 나타낸다.  $Z$ 를 이용해 계산한 p-value가 0.1 이하일 때, 90% 신뢰구간에서 추세를 신뢰할 수 있다. 본 연구에서는 90% 신뢰구간에서 p-value가 0.1 이하일 때, 유의한 추세가 있다고 보았다. 본 연구의 목적은 개별 관측소의 정밀한 추세 크기 추정이 아닌 지역 규모에서의 추세 방향성 일관성 파악이다. 이를 위해 관측소 선정 기준을 엄격한 장기 관측 요건으로 설정하지 않아 통계적 불확실성이 존재할 수 있다. 이러한 통계적 불확실성을 수용하며, p-value ≤ 0.05 적용 시, 유의한 관측소가 적어져 지역별 추세 방향성의 일관성을 평가하기 어렵기 때문에 통상적인 기준인 0.05보다 완화된 0.1을 유의성 기준으로 채택하였다.

### 2.5 에어로졸 유형 분류 방법

구체적인 에어로졸 유형 분류를 위해 SSA와 FMF를 활용해 에어로졸을 BC, NA, Dust로 구분하였다

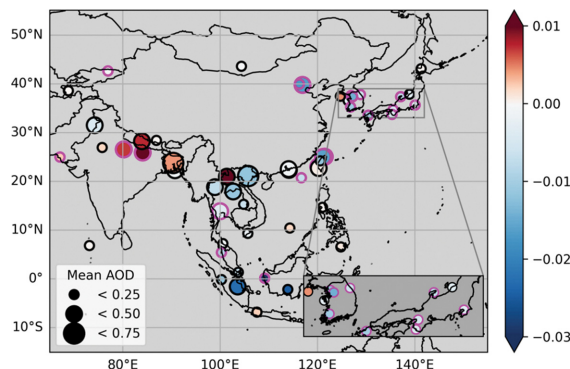
(Lee et al., 2010). Lee et al. (2010) 에어로졸 유형 구분 방법은 440 nm의 SSA와 550 nm의 FMF를 사용한다. AERONET INV 자료는 550 nm FMF를 제공하지 않기 때문에 AE를 이용해 550 nm의 AOD를 계산하여 550 nm FMF를 도출하였다. 에어로졸 유형 구분법은 다음과 같다. FMF가 0.4 미만이고 SSA가 0.95 이하인 경우는 Dust, SSA가 0.95 초과인 경우는 미상(uncertain)이다. 미상은 전체 분석 자료의 0.3%로 거의 나타나지 않았다고 한다. 다음으로 FMF가 0.4 이상 0.6 이하인 경우는 혼합형(Mixture)이다. FMF가 0.6 초과이며 SSA가 0.95 초과인 타입은 NA, SSA가 0.95 이하인 타입은 BC이다. BC는 세분화하여 SSA가 0.85 이하일 때는 highly absorbing (HA), 0.85 초과 0.90 이하일 때는 moderately absorbing (MA), 0.90 초과 0.95 이하일 때는 slightly absorbing (SA)로 분류할 수 있다. 광학 흡수성이 강한 조대입자는 Dust, 광학 흡수성이 강한 미세입자는 BC, 광학 흡수성이 약한 미세입자는 NA로 구분되며, 그 외는 Mixture로 분류된다.

### 3. 결과 및 토의

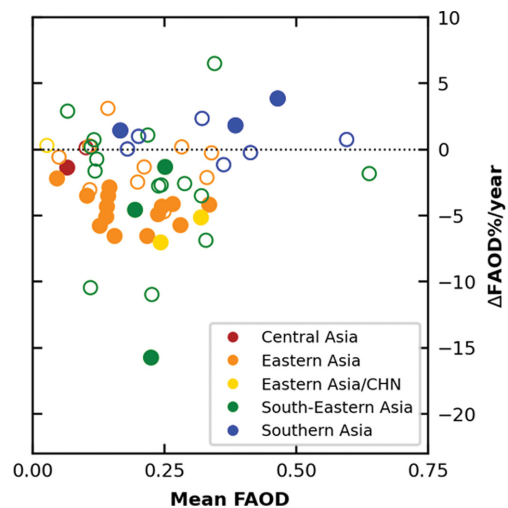
**3.1 미세 모드 에어로졸 광학 깊이의 장기 변화 추세**  
 전반적으로 아시아 지역은 FAOD가 감소하는 경향을 보인다(Fig. 1). 분석에 사용한 56개 관측소 중 39개소에서 FAOD 감소 추세가 관찰되었으며, 특히 동아시아 지역에서 이 추세가 두드러진다. 90% 신뢰 구간에서 유의한 감소를 보인 20개소 중 16개소가 동아시아에 속해 있다. 한국, 중국, 대만은 FAOD 평균값이 상대적으로 높음에도 불구하고 장기간에 걸쳐 감소 추세를 보이고 있으며, 일본은 다른 국가들보다 낮은 FAOD 평균값을 보이면서도, 장기적으로 약한 감

소 추세를 유지하고 있어 효과적인 대기질 관리가 이루어지고 있음을 시사한다. 동아시아의 FAOD 감소는 대기 오염 물질 배출 저감 정책의 긍정적인 결과로 생각된다. 중국은 Air Pollution Prevention and Control Action Plan (2013~2017)과 Three-year Blue-sky Action Plan (2018~2020) 정책으로 2013년부터 2020년까지 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량이 각각 70%, 28% 감소하였다(Chen et al., 2024). 중국의 배출량 감소는 중국 내 에어로졸의 감소로 이어졌으며(Uno et al., 2020; Xie and Liao, 2022; Gao et al., 2023; Chen et al., 2024; Fan et al., 2025), 풍하측 지역인 한국과 일본에서의 에어로졸 감소도 이끌었다(Uno et al., 2020; Xie and Liao, 2022). 한국은 2005년부터 대기 환경과 오염 물질 관련 정책을 시행했으며, 2000년부터 2018년까지 한국의 Clean Air Policy Support System 배출량 인벤토리를 활용하여 분석하였을 때, 정책 시행 시점과 연동되어 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 배출량의 감소가 확인되었다(Kim et al., 2023). Kim et al. (2023)은 전 지구 배출량 인벤토리인 HTAPv3을 활용하여 한국, 중국, 일본의 배출량 추세를 분석하였는데, 대기 오염 물질 감소가 시작된 시기는 일본이 가장 먼저였으며, 이후 한국, 중국 순으로 나타났다. 반면 남아시아, 특히 인도에서는 FAOD의 증가 추세가 주를 이루며, 90% 신뢰 구간에서 유의미한 증가를 보이는 Gandhi\_College와 Kanpur 관측소 모두 인도 내에 있다. 인도는 FAOD 평균값이 다른 국가들에 비해 상대적으로 높으며, 이는 높은 인구 밀도, 바이오매스 연소, 대기 오염 규제 이행 부족, 기상장 등과 관련이 있을 것으로 생각된다.

아시아의 지역별로 관측소를 분류하여 FAOD의 추



**Fig. 1.** The trend of fine-mode Aerosol Optical Depth ( $\Delta\text{FAOD yr}^{-1}$ ). The magenta line on the circle indicates that the p-value of that trend is below 0.1.



**Fig. 2.** The scatter plot of the mean value and the trend of FAOD.

세와 평균값을 비교한 결과, 지역별로 뚜렷한 차이를 보였다(Fig. 2). 중앙아시아는 FAOD 평균값이 약 0.10으로 비교적 낮았으며, 이 중 키르기스스탄의 Issyk-Kul 관측소는 연간  $-1.3\% \text{ yr}^{-1}$ 의 유의미한 감소 추세를 나타냈다.

동아시아는 FAOD 평균값이 0.10에서 0.40 사이로 나타났으며, 대부분의 관측소에서 감소 추세를 보였다. 특히 중국의 Beijing-CAMS, 한국의 Hankuk\_UFS, 일본의 Fukuoka 관측소에서는 약  $-7\% \text{ yr}^{-1}$ 의 유의미한 감소 추세를 보인다. 황해에 있는 한국의 해양 기지인 Socheongcho 관측소를 포함한 4개소에서는 증가 추세가 나타났지만, 90% 신뢰 구간에서는 유의미한 추세를 나타내지 않았다. 이는 전반적으로 동아시아 지역에서 FAOD가 감소하고 있음을 보여준다. 특히, 한국은 Socheongcho를 제외한 6개소에서  $-1\% \text{ yr}^{-1}$ 에서  $-7\% \text{ yr}^{-1}$ 로 감소하며, 중국은 세 관측소 중 2개소에서  $-5\% \text{ yr}^{-1}$ 에서  $-7\% \text{ yr}^{-1}$ 로 큰 폭으로 감소하였다. FAOD 평균값이 낮은 일본에서도 1개소를 제외한 6개소에서  $-3\% \text{ yr}^{-1}$ 에서  $-7\% \text{ yr}^{-1}$ 로 감소함이 확인되었다.

동남아시아는 FAOD의 평균값과 추세가 다른 지역에 비해 넓은 범위로 분포한다. FAOD 평균값은 최소 0.07에서 최대 0.64로, 최댓값을 보인 곳은 베트남의 NGHIA\_DO 관측소이다. 가장 큰 증가 추세와 감소 추세는 모두 동남아시아 관측소에서 나타났다. 18개소 중 13개소에서 감소 추세를, 5개소에서 증가 추세가 나타났지만, Pontianak, Silpakom\_ Univ, USM\_Penang 3개의 관측소에서만 유의미한 감소 추세가 나타났다.

남아시아는 0.17에서 0.60 사이의 높은 FAOD 평균값을 보였으며, 9개 관측소 중 7개에서 증가 추세가 나타났다. 이중 인도의 Gandhi\_College와 Kanpur 관측소에서 각각  $4\% \text{ yr}^{-1}$ ,  $2\% \text{ yr}^{-1}$ 의 유의미한 가파른 증가 추세가 관찰되었다. 아시아의 다른 지역과 달리 FAOD가 증가하는 남아시아와 증감 추세가 뚜렷하지 않은 동남아시아는 기상장 영향 여부에 대한 추가 분석이 필요한 것으로 보인다.

### 3.2 조대 모드 에어로졸 광학 깊이의 장기 변화 추세

아시아 지역의 CAOD는 전반적으로 감소하는 경향을 보인다(Fig. 3). 분석에 사용한 56개의 관측소 중 43개소에서 감소 추세가 나타났다. 특히, 동남아시아를 제외한 대부분 지역에서 감소 추세가 뚜렷하게 나타난다. 선행 연구에 따르면, 아시아의 사막에서 발생한 황사 에어로졸 부하(dust aerosol loading)가 감소하고 있다(Lee et al., 2015; Wang et al., 2018; Yao et al., 2021). 몽골과 중국 북부의 사막 지역에서 발생한 황사 에어로졸의 30%가 재침강하고, 나머지 70%는 장거리 수송으로 동아시아와 북태평양으로 이동하는데

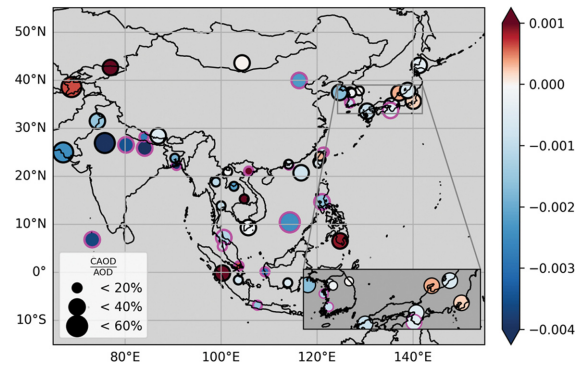


Fig. 3. The trend of coarse-mode Aerosol Optical Depth ( $\Delta\text{CAOD} \text{ yr}^{-1}$ ). The magenta line on the circle indicates that the p-value of that trend is below 0.1.

(An et al., 2018), 극지 증폭 효과(Arctic amplification effect)로 인한 북반구의 남북 기온 경도 감소와 동서 풍속 감소, 기온과 강수의 증가로 인해 늘어난 식생이 황사 발생 빈도를 줄이는 데 기여했다(Liu et al., 2020; Yao et al., 2021). 이러한 요인들이 복합적으로 작용하여 장거리 수송되는 황사 에어로졸 부하가 줄어들고 고비 사막, 타클라마칸 사막, 타르 사막의 영향을 받는 동아시아와 인도의 CAOD에 영향을 준 것으로 보인다. 인도의 경우, 전체 AOD 대비 CAOD의 비중이 높고 황사 영향권에 있어 황사 빈도 감소의 영향을 크게 받는 것으로 보인다. 반면, 사막에 있는 몽골의 Dalanzadgad 관측소는 거의 추세 변화를 보이지 않는다. 1998년부터 2023년의 장기간 자료를 보유하고 있음에도 불구하고 CAOD의 변화가 없는 것은 사막에 자리 잡고 있기 때문이다. 아시아의 황사 에어로졸 부하가 감소하는 주원인은 기상장 변화로 사막으로부터의 장거리 수송이 감소했기 때문이나, 사막 자체의 환경이 크게 변화하지 않았기 때문에 해당 관측소의 CAOD에는 큰 변화가 없는 것이다.

이때, 56개 관측소 중 90% 신뢰 구간에서 유의미한 추세를 보이는 관측소는 22개소이다. 이 중 20개소는 감소, 2개소는 증가를 보였다. Figure 4에 따르면, 중앙아시아의 2개 관측소는 유의미한 추세를 보이지 않았지만, 키르기스스탄의 Issyk-Kul에서  $5.0\% \text{ yr}^{-1}$ 의 높은 증가 추세가 관찰되었다.

동아시아 지역의 대부분 관측소에서 모두 감소 추세를 보였으며, 증가 추세를 보인 6개의 관측소는 높은 p-value를 보여 유의미하지 않은 추세를 보인다. 이는 대체로 동아시아의 CAOD가 감소하는 추세임을 보여준다. CAOD 평균값은 0.1 이하로 크지 않지만, 고비사막의 영향을 받아 전체 AOD 대비 CAOD 비중이 상대적으로 큰 편이다. 유의미한 감소 추세를 보

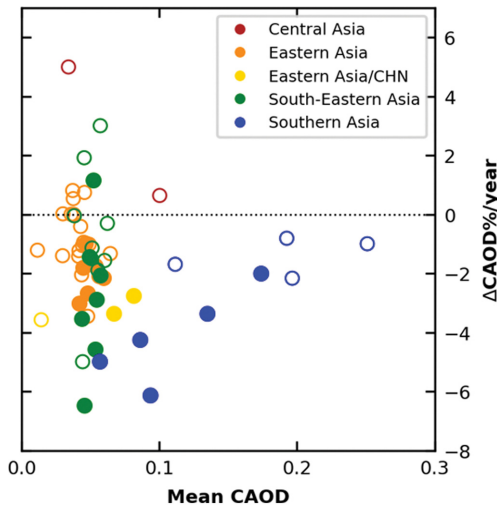


Fig. 4. The scatter plot of the mean value and the trend of CAOD.

이곳은 9곳으로,  $-1\% \text{ yr}^{-1}$ 에서  $-3\% \text{ yr}^{-1}$ 의 추세를 보이며 한국 3곳, 중국 2곳, 대만 2곳, 홍콩 1곳, 일본 1곳이 포함되어 있다.

동남아시아는 CAOD 평균값이 0.03에서 0.07로 작은 편이며 전체 AOD 대비 CAOD 비중도 작은 편이다. 동남아시아 추세 분포는 FAOD와 마찬가지로 넓게 나타나며, 이 중 2개의 관측소에서 유의미한 증가 추세와 6개의 관측소에서 유의미한 감소 추세가 관찰되었다. 다른 지역과 달리 동남아시아 관측소들은 서로 비슷한 추세 분포를 보이지 않는데, 이는 해당 지역이 황사 에어로졸 발원지와 거리가 있으며, 해

염 입자 등 조대입자의 원천이 지역별로 다양하고, 기상장의 영향이 있기 때문으로 생각된다.

남아시아는 최대 CAOD 평균값이 0.25로 다른 지역에 비해 높게 나타났으며, 모든 관측소에서 감소 추세를 보였다. 이 중 5개의 관측소에서 유의미한 감소 추세가 관찰되었고, 방글라데시의 Bhola에서  $-6\% \text{ yr}^{-1}$ , 네팔의 Pokhara에서  $-5\% \text{ yr}^{-1}$ 의 가파른 감소를 보였다. 남아시아는 전체 AOD 대비 CAOD 비중이 크다. 사막의 영향권이기 때문에 황사 에어로졸 장거리 수송 약화의 영향을 받아 CAOD 감소 추세가 다른 지역 대비 우세한 것으로 보인다.

### 3.3 에어로졸 유형 변화와 단일산란알베도 추세를 통한 흡수 특성 변화

Figure 5는 2015년 이전과 이후의 관측소 대표 에어로졸 타입을 나타낸다. 분석 도메인 내에서 BC가 주요 에어로졸 유형으로 나타났다. 2015년 이전에는 56개소 중 27개소, 2015년 이후에는 30개소의 대표 유형이 BC로 나타났다. 한국, 중국, 인도차이나반도는 BC 유형, 일본, 대만, 인도네시아는 NA 유형이 대표 유형으로 나타났다. 2015년을 기점으로 10개의 관측소에서 대표 유형의 변화가 관찰되었다. 중앙아시아의 관측소는 NA에서 BC로 변화했다. 동아시아의 4개소 중 한국의 Gwangju\_GIST와 일본의 Osaka, Shirahama는 BC에서 NA로, 홍콩의 Hong\_Kong\_Sheung은 NA에서 BC로 대표유형의 변화가 있었다. 동남아시아에서는 베트남의 2개소와 태국의 1개소는 NA에서 BC로, 말레이시아의 1개소는 BC에서 NA로 변화했다. 남아시아에서는 인도의 Jaipur에서 Dust에서 BC로 바뀌었다. 이 결과는 3.1절과 3.2절의 결과

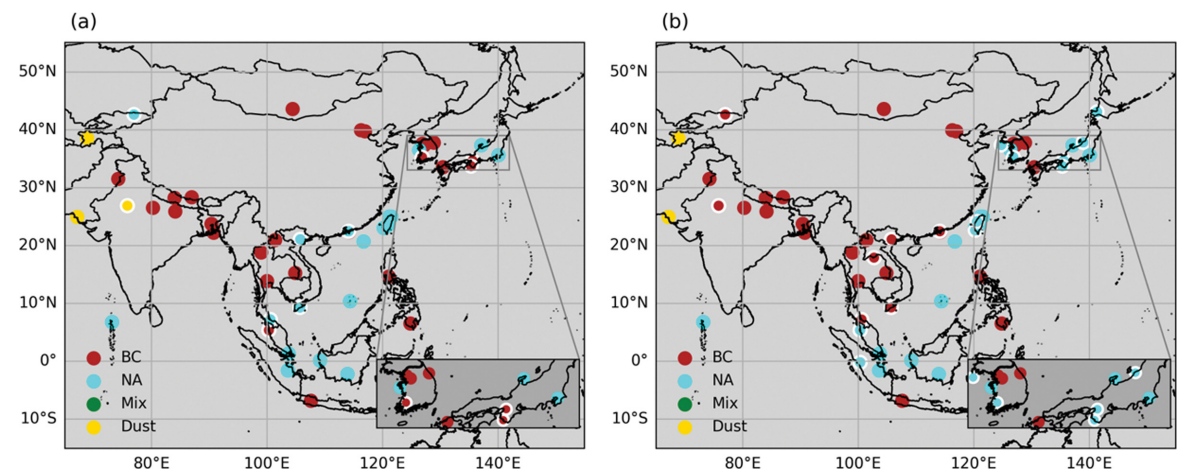
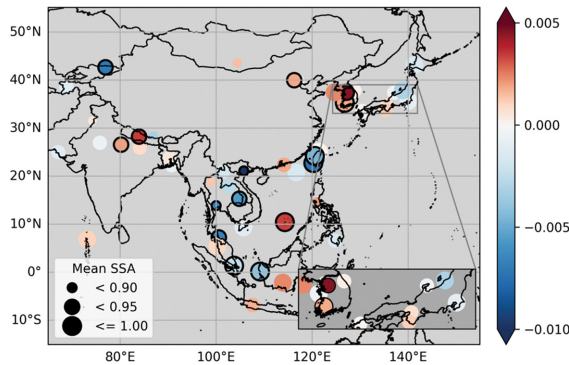


Fig. 5. Main aerosol types (a) before 2015 and (b) after 2015. Red, cyan, green, and yellow represent BC, NA, Mixture, and Dust, respectively. White lines indicate sites where the main aerosol type changed after 2015.



**Fig. 6.** The trend of Single Scattering Albedo ( $\Delta SSA \text{ yr}^{-1}$ ). The black line on the circle indicates that the p-value of that trend is below 0.1.

와도 일치한다. 동아시아의 FAOD 감소와 상응하여 에어로졸 타입이 BC에서 NA로, 인도의 CAOD 감소 및 FAOD 증가와 상응하여 Dust에서 BC로 변화했다.

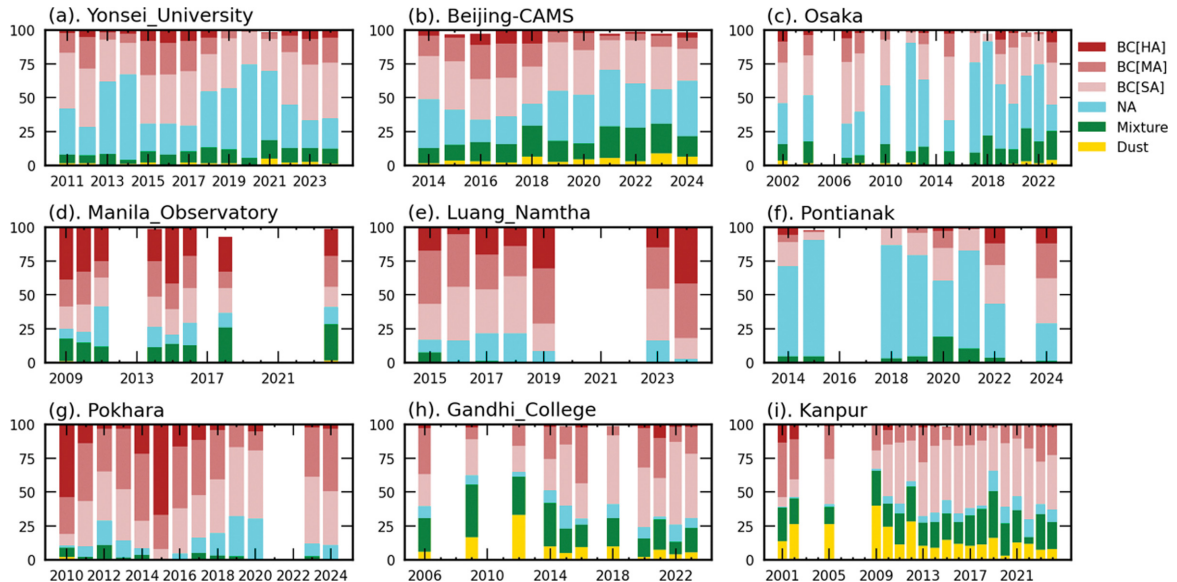
이는 SSA 추세와도 일관성을 보인다. Figure 6은 SSA의 평균값과 추세를 보여준다. BC 비중이 높은 인도차이나반도와 BC와 Dust 비중이 높은 남아시아는 낮은 SSA 평균값을 보인다. SSA는 에어로졸의 산란성을 나타내는 지표로, 인도차이나반도와 남아시아에는 흡수성 에어로졸이 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다. NA 비중이 높은 일본, 대만, 인도네시아는

높은 SSA 평균값을 보이며 산란성 에어로졸이 분포하고 있는 것이 확인된다.

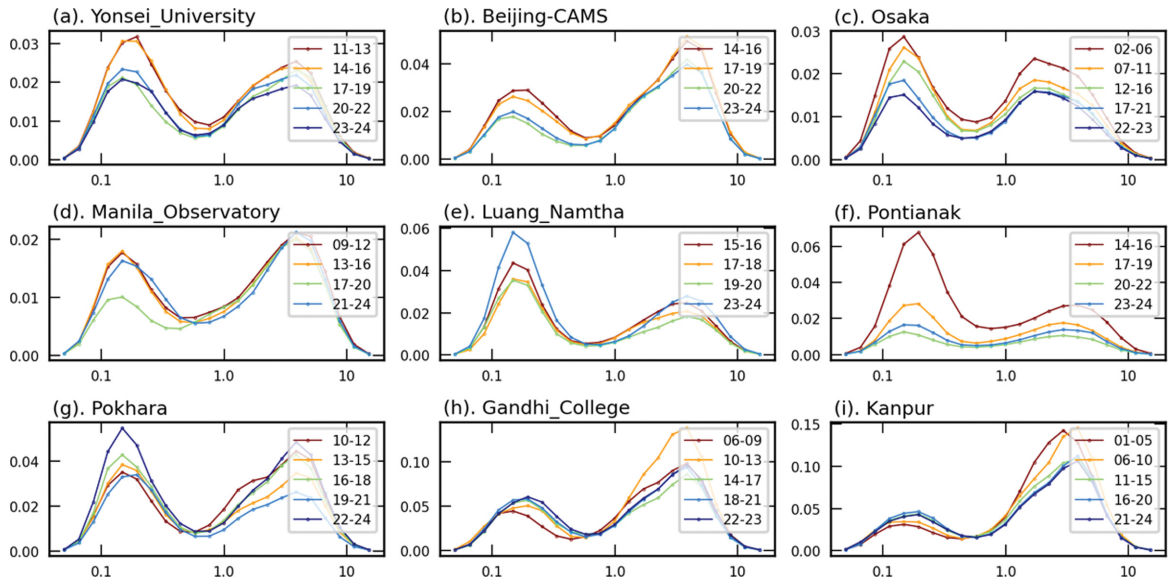
2.3절에 명시된 데이터 기준에 부합하지 않는 관측소 3곳을 제외한 53개소 중, 27개소에서 SSA 감소, 26개소에서 SSA 증가 추세가 나타났다. 이 중 중앙아시아 1개소, 동아시아 2개소, 동남아시아 6개소에서 유의미한 감소 추세를 보였으며, 동아시아 5개소, 동남아시아 1개소, 남아시아 2개소에서 유의미한 증가 추세를 보였다. 동아시아와 남아시아는 SSA가 증가하는 것으로 산란성 에어로졸의 증가가 확인된다. FAOD 및 CAOD가 줄어든 동아시아는 대기 규제 정책으로 인한 BC의 감소 및 황사 빈도 감소로 인한 Dust 감소로 SSA 또한 증가하는 것과 상응한다. 하지만 CAOD 감소와 FAOD 증가가 함께 발생한 남아시아의 경우, SSA가 증가한 것에 대한 추가 분석이 필요하다. 또한 동남아시아는 동아시아 및 남아시아와 달리 SSA가 감소하며 흡수성 에어로졸이 증가하는 것이 관찰된다. 동남아시아는 CAOD의 비중이 작고, FAOD의 증감이 혼재된 지역으로 원인 추정이 어렵다. 동남아시아의 바이오매스 연소가 증가한 것으로 예상되나, 이는 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

### 3.4 주요 도시 관측소의 에어로졸 유형 및 입자 크기 분포 변화

Figure 7과 Fig. 8은 대도시 관측소에서의 에어로졸 유형 비율과 입자 크기 분포이며, FAOD와 CAOD 추



**Fig. 7.** Percentage of aerosol types at (a) Yonsei\_University, (b) Beijing-CAMS, (c) Osaka, (d) Manila\_Observatory, (e) Luang\_Namtha, (f) Pontianak, (g) Pokhara, (h) Gandhi\_College, (i) Kanpur. The year is shown on the x-axis and the percentage of aerosol types on the y-axis.



**Fig. 8.** Volume particle size distribution at (a) Yonsei\_University, (b) Beijing-CAMS, (c) Osaka, (d) Manila\_Observatory, (e) Luang\_Namtha, (f) Pontianak, (g) Pokhara, (h) Gandhi\_College, (i) Kanpur. Radius [ $\mu\text{m}$ ] is shown on the x-axis and volume particle size distribution ( $dV(r)/d\ln(r)$  [ $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ]) on the y-axis. Line colors denote different years.

세는 Fig. S2와 Fig. S3에서 확인할 수 있다. 한국, 중국, 일본의 대도시인 서울, 베이징, 오사카는 FAOD와 CAOD 모두 감소 추세를 나타낸다. 입자 크기 분포 그림은 에어로졸의 쌍봉(bimodal) 분포를 보여주며,  $1\ \mu\text{m}$  이하(이상)는 미세입자(조대입자) 에어로졸을 나타낸다. 서울, 베이징, 오사카의 미세입자와 조대입자의 크기 분포가 모두 감소하는 것이 확인된다. 베이징은 흡수성이 강한 인위적 에어로졸인 BC 비중이 꾸준히 감소했다. 서울은 COVID-19 기간인 2020-2021년에 BC 비중이 크게 줄었지만 2022년부터 다시 BC 비중이 늘고 NA 비중이 감소했다. 이는 에어로졸 배출은 감소하였지만, 아직 인위적인 인간 활동이 에어로졸 배출의 많은 양을 차지하고 있는 것으로 생각된다. 오사카는 BC 비중이 변동성을 보이지만, 2017년 이후로 NA와 Mixture 유형의 비중이 대부분을 차지하며 대기질이 잘 관리되고 있는 모습을 보인다.

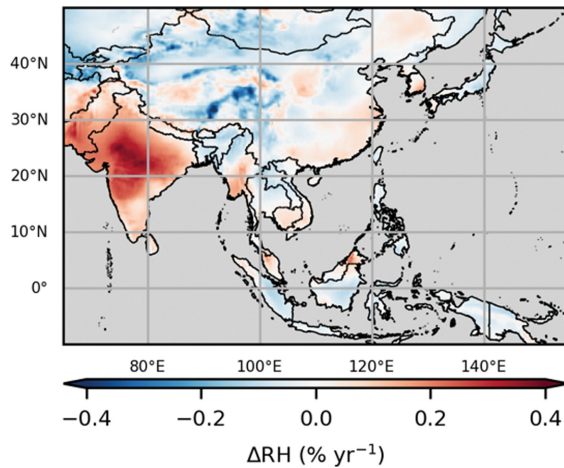
필리핀의 마닐라는 FAOD는 큰 추세를 보이지 않으며, CAOD는 감소를 보인다. 라오스의 루앙남타는 FAOD의 증가 추세를 보이고, BC 유형의 비중이 증가하는 양상이 나타나며, 이는 산불 빈도와 연관이 있을 것으로 생각된다. 인도네시아의 폰티아나크는 FAOD와 CAOD가 감소했지만, BC 비중은 증가하였다.

네팔의 포카라는 FAOD는 증가를, CAOD는 감소를 보인다. 인도는 FAOD 증가, CAOD 감소 양상을 나타내는데, 이는 입자 크기 분포 그림에서도 확인된다. 두 관측소 모두 BC 비중은 증가하거나 큰 변동이 없

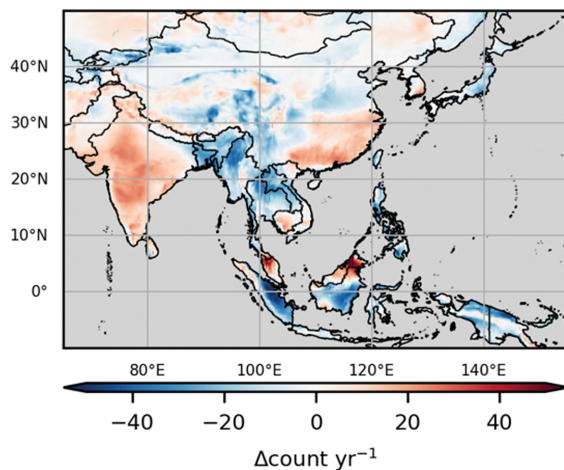
으며, Dust 비중은 감소한다. Dust 유형의 비중 감소는 3.2절의 설명과 같이 Dust의 장거리 수송이 줄었기 때문이다.

본 연구의 인도의 FAOD 증가와 상반되게 선행 연구에서  $\text{PM}_{2.5}$ 의 감소 추세가 확인된다. Singh et al. (2021)과 Wang et al. (2024)에 따르면, 인도의 5개 대도시인 첸나이, 콜카타, 하이데라바드, 뭄바이, 델리에서 모두  $\text{PM}_{2.5}$ 가 감소하는 추세를 보인다. 2014년에서 2020년 자료를 분석한 Singh et al. (2021)에 따르면, 분석 기간의 풍속, 기온, PBLH와 강수량은 큰 변화가 없어 인위적 배출의 감소가  $\text{PM}_{2.5}$  감소에 대부분을 기여한다. 2014년에서 2021년 자료를 기상 자료와 분석한 Wang et al. (2024)에서는 여름/몬순 기간의 델리와 겨울철의 첸나이, 뭄바이, 델리에서는 기상 영향으로 인한  $\text{PM}_{2.5}$  감소 기여율이 65%에서 최대 105%에 달한다. 기상장과  $\text{PM}_{2.5}$  간의 상관성에 대해 차이가 있지만, 인도의 대기 오염 도시의  $\text{PM}_{2.5}$  감소 추세는 동일하다.

Figure 8을 보면, FAOD 증가 추세와 더불어 미세입자의 변곡점 크기도 증가하고 있다. 따라서 인도의 FAOD 증가는 습도와 연관이 있을 것으로 생각되어, ERA5의 상대 습도 추세를 확인하였다. Figure 9는 2000년부터 2024년의 1,000-800 hPa 기압 층 평균 상대 습도의 추세로, 인도는 타 아시아 국가보다 큰 증가 추세를 보인다. 에어로졸의 흡습 성장은 상대 습도의 절댓값보다 흡습 성장에 필요한 상대 습도 역치



**Fig. 9.** The trend ( $\Delta RH$ ,  $\% \text{ yr}^{-1}$ ) in 1,000-800 hPa mean relative humidity over the period 2000~2024.



**Fig. 10.** The trend ( $\Delta \text{count yr}^{-1}$ ) in the annual frequency of 1,000-800 hPa mean relative humidity exceeding 80% over the period 2000~2024.

를 넘는 것이 중요하다. Figure 10은 2000년부터 2024년까지의 1,000-800 hPa 기압 층 평균 시간별 상대 습도가 80%를 넘는 횟수 추세이다. 흡습 성장에 필요한 상대 습도 최솟값은 에어로졸의 성분과 비율에 따라 달라진다. 실험실에서 생성한 9종의 유기 및 유기-무기 혼합 에어로졸의 흡습 성장 계수가 대부분 80% 이상에서 증가하는 것을 참고하여 이 역치를 80%로 설정하였다(Hodas et al., 2015). 인도는 1,000-800 hPa 기압 층 평균 상대 습도가 80%를 초과하는 시간 수가 증가하는 양상을 보이며, 약 20  $\text{count yr}^{-1}$  내외의 추세를 나타낸다. 이는 8,760시간(365일  $\times$  24시간)

한국기상학회 대기 제36권 2호 (2026)

을 기준으로 고습도 발생 빈도가 연간 약 0.23%p씩 증가한 것을 의미한다. 추세가 크지 않다고 보일 수 있으나, 25년 간의 장기간 추세이며 1,000-800 hPa 기압 층 평균 상대 습도 또한 다른 지역보다 큰 증가 추세를 보인다는 점을 고려하면, 상대 습도가 미세입자 크기 분포의 변곡점 입자 크기 증가와 연관이 있을 가능성이 있다. 이를 통해 인도의 인위적 에어로졸 배출이 감소하여  $\text{PM}_{2.5}$ 는 줄었지만, 에어로졸의 흡습 성장이 FAOD 증가에 기여했을 가능성이 있다. 이러한 결과는 Nair et al. (2020)의 겨울철 인도 갠지스 평원 전역에서 에어로졸과 수분의 상호작용이 고에어로졸 조건을 강화한다는 결과와 부합한다.

한편, 중국 동남부와 남한에서도 고습도 발생 빈도의 증가가 나타나지만, 오히려 FAOD는 감소 추세를 보인다. 배출 인자와 기상 인자는 모두 복합적으로 AOD에 영향을 주지만, 이 영향은 지역마다 다르게 나타난다. Che et al. (2019)에 따르면 배출 인자와 기상 인자가 AOD 변동성에 주는 영향은 각각 0~56%, 20.4~72.8%로 기상 인자의 영향이 크지만, 지역마다 기상 인자의 효과가 다르게 나타난다. 특히 중국은 기상 인자 중 풍속의 영향력이 가장 크게 나타났으며, 동북아시아는 대기경계층 고도, 온도, 상대습도의 복합적인 영향력이 가장 크게 나타났다. 또한, 동남아시아와 같은 바이오매스 연소 지배 지역은 강수, 상대 습도와 같은 습도 관련 기상 인자와 AOD의 음의 상관 관계를 보였으나, 남아시아에서는 습도 관련 기상 인자와 AOD가 양의 상관 관계를 보였다. 이와 비슷하게 Ma and Guan (2018)에서도 동중국의 AOD는 지표 풍속과 관계가 큰 것으로 나타났다.

이러한 기상장의 효과는 AOD에 영향을 미치기 때문에 배출 저감의 AOD 감소 효과를 기상 효과가 줄이거나 강화할 수 있다(de Leeuw et al., 2023; Fan et al., 2025). de Leeuw et al. (2023)과 Fan et al. (2025)에 따르면, 중국의 장기간 AOD를 분석했을 때의 전체적인 AOD 감소는 대부분 인위적인 기여에 의해 지배되었다. 결국, AOD는 배출과 기상의 영향을 복합적으로 받지만, 지역마다 그 영향 차이가 있으며, 동아시아의 경우, 남아시아와 달리 배출량 저감 효과가 컸던 것으로 생각된다. 따라서 기상의 영향을 받는 AOD만으로는 인위적인 배출량의 증감 추세를 설명할 수 없음을 시사한다.

#### 4. 결 론

AOD는 시공간 변동성이 크다. 하지만 AOD 추세 패턴은 같은 지역 간에 비슷하게 나타났다. 이는 비슷한 에어로졸 배출원, 기상장의 영향과 대기질 규제 정책의 복합적 결과로 보인다. FAOD는 아시아에서

감소 양상을 보이는데, 동아시아에서 감소가 우세하며 특히 한국과 중국의 감소 추세가 뚜렷하다. 최대  $-7\% \text{ yr}^{-1}$ 의 감소를 보이며, 이는 동아시아의 대기질 규제 정책의 영향으로 보인다. 이에 반해 남아시아는 FAOD가 증가를 보이는데, 이는 인위적 배출뿐만 아니라 기상장과 관련이 있는 것으로 생각된다. 선행 연구 결과에서도 동일한 결과로, 동아시아의 AOD는 감소를 보이고, 인도는 뚜렷한 증가를 보인다(Gui et al., 2022; Papachristopoulou et al., 2022). CAOD는 아시아에서 감소 양상을 보인다. 황사 에어로졸의 장거리 수송이 감소 중이라는 선행 연구 결과와 동일하게 사막 영향권에 해당하는 아시아 나라들의 CAOD가 감소했다. 타르 사막과 타클라마칸 사막의 영향권인 인도와 네팔의 감소가 최대  $-6\% \text{ yr}^{-1}$ 로 우세하게 나타났다. 고비 사막의 영향권인 중국, 한국, 일본의 감소 또한 확인된다. 동남아시아는 증감 추세가 섞여 있는데, 이는 사막 영향권이 아니기 때문에 해염 입자 등의 에어로졸 원천의 영향을 받은 것으로 생각된다. 동남아시아의 CAOD 증감은 추가적인 연구가 필요하다. 아시아의 대표 에어로졸 타입은 BC로, 대표 타입이 BC인 관측소가 반수 이상이다. 이때, 2015년을 기점으로 대표 에어로졸 타입이 달라진 관측소는 10개이다. 이 중 한국과 일본의 관측소 3곳은 BC에서 NA로 변했고, SSA는 증가해 흡수성 에어로졸이 감소함을 나타냈다. 또, FAOD와 CAOD의 감소 추세로 대기질이 장기적으로 좋아지고 있음을 보여주었다. 종합적으로 아시아는 대체로 에어로졸양이 줄어들고 있다. 하지만 기상장과의 복합적인 관련성으로 인해 AOD만으로는 인간 활동에 의한 에어로졸이 저감되고 있다고 확인할 수 없다. AOD, 기상장, 배출량의 장기 분석을 통해 에어로졸 추세 동향을 파악하여 대기질 변화를 이해하면, 대기 오염과 기후 변화에 대응하는 정책 수립에 도움이 될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2026-04-02-019), 연세 이윤재 펠로우 교원 지원, 삼성종합기술원의 지원(2021-11-2232)으로 수행되었습니다.

### REFERENCES

An, L., and Coauthors, 2018: Temporal and spatial variations in sand and dust storm events in East Asia from 2007 to 2016: Relationships with surface conditions and climate change. *Sci. Total Environ.*, **633**, 452-462, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.068.

Bellouin, N., O. Boucher, J. Haywood, and M. S. Reddy, 2005: Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements. *Nature*, **438**, 1138-1141, doi:10.1038/nature04348.

Brauer, M., and Coauthors, 2016: Ambient air pollution exposure estimation for the global burden of disease 2013. *Environ. Sci. Technol.*, **50**, 79-88, doi:10.1021/acs.est.5b03709.

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.

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., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, Jr., J. E. Hansen, and D. J. Hofmann, 1992: Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, **255**, 423-430, doi:10.1126/science.255.5043.423.

Che, H., and Coauthors, 2019: Large contribution of meteorological factors to inter-decadal changes in regional aerosol optical depth. *Atmos. Chem. Phys.*, **19**, 10497-10523, doi:10.5194/acp-19-10497-2019.

Chen, Q., and Coauthors, 2024: Widespread 2013-2020 decreases and reduction challenges of organic aerosol in China. *Nat. Commun.*, **15**, 4465, doi:10.1038/s41467-024-48902-0.

Chung, C. E., V. Ramanathan, D. Kim, and I. A. Podgorny, 2005: Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **110**, D24207, doi:10.1029/2005JD006356.

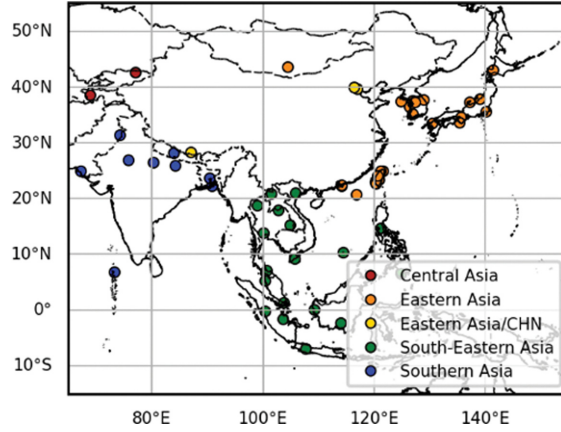
de Leeuw, G., H. Kang, C. Fan, Z. Li, C. Fang, and Y. Zhang, 2023: Meteorological and anthropogenic contributions to changes in the Aerosol Optical Depth (AOD) over China during the last decade. *Atmos. Environ.*, **301**, 119676, doi:10.1016/j.atmosenv.2023.119676.

Eck, T. F., B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne, 1999: Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **104**, 31333-31349, doi:10.1029/

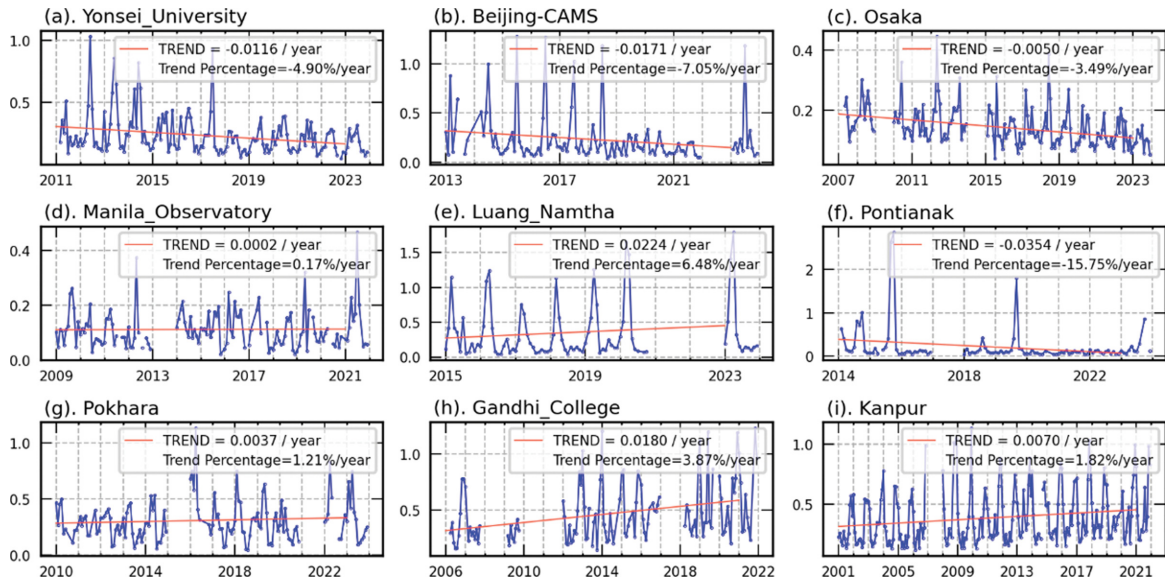
- 1999JD900923.
- Fan, C., G. de Leeuw, X. Yan, J. Dong, H. Kang, C. Fang, Z. Li, and Y. Zhang, 2025: Evolution of aerosol optical depth over China in 2010-2024: increasing importance of meteorological influences. *Atmos. Chem. Phys.*, **25**, 11951-11973, doi:10.5194/acp-25-11951-2025.
- Gao, J., Y. Yang, H. Wang, P. Wang, B. Li, J. Li, J. Wei, M. Gao, and H. Liao, 2023: Climate responses in China to domestic and foreign aerosol changes due to clean air actions during 2013-2019. *npj Clim. Atmos. Sci.*, **6**, 160, doi:10.1038/s41612-023-00488-y.
- 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.
- Gobbi, G. P., Y. J. Kaufman, I. Koren, and T. F. Eck, 2007: Classification of aerosol properties derived from AERONET direct sun data. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 453-458, doi:10.5194/acp-7-453-2007.
- Gui, K., and Coauthors, 2022: The significant contribution of small-sized and spherical aerosol particles to the decreasing trend in total aerosol optical depth over land from 2003 to 2018. *Engineering*, **16**, 82-92, doi:10.1016/j.eng.2021.05.017.
- Gupta, G., M. Venkat Ratnam, B. L. Madhavan, and A. Jayaraman, 2023: Global trends in the aerosol optical, physical, and morphological properties obtained using multi-sensor measurements. *Atmos. Environ.*, **295**, 119569, doi:10.1016/j.atmosenv.2022.119569.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and C. S. Narayanamurthy, 2022: Long-term trends in aerosol optical depth obtained across the globe using multi-satellite measurements. *Atmos. Environ.*, **273**, 118953, doi:10.1016/j.atmosenv.2022.118953.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2023a: ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, doi:10.24381/cds.bd0915c6.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2023b: ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, doi:10.24381/cds.6860a573.
- Hodas, N., A. Zuend, W. Mui, R. C. Flagan, and J. H. Seinfeld, 2015: Influence of particle-phase state on the hygroscopic behavior of mixed organic-inorganic aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 5027-5045, doi:10.5194/acp-15-5027-2015.
- Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16, doi:10.1016/S0034-4257(98)00031-5.
- Kaufman, Y. J., O. Boucher, D. Tanré, M. Chin, L. A. Remer, and T. Takemura, 2005: Aerosol anthropogenic component estimated from satellite data. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17804, doi:10.1029/2005GL023125.
- Kendall, M. G., 1948: *Rank correlation methods*. Charles Griffin & Company, 160 pp.
- Kim, J., and Coauthors, 2023: Long-term historical trends in air pollutant emissions in South Korea (2000-2018). *Asian J. Atmos. Environ.*, **17**, 12, doi:10.1007/s44273-023-00013-w.
- 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., and C. E. Chung, 2013: Observationally-constrained estimates of global fine-mode AOD. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 2907-2921, doi:10.5194/acp-13-2907-2013.
- Lee, Y. G., C.-H. Ho, J.-H. Kim, and J. Kim, 2015: Quiescence of Asian dust events in South Korea and Japan during 2012 spring: dust outbreaks and transports. *Atmos. Environ.*, **114**, 92-101, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.05.035.
- Li, J., B. E. Carlson, O. Dubovik, and A. A. Lacis, 2014: Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 12271-12289, doi:10.5194/acp-14-12271-2014.
- Li, L., and Coauthors, 2020: Climatology of Fine and Coarse Mode Aerosol Optical Thickness Over East and South Asia Derived From POLDER/PARASOL Satellite. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2020JD032665, doi:10.1029/2020JD032665.
- Liu, J., and Coauthors, 2020: Impact of Arctic amplification on declining spring dust events in East Asia. *Clim. Dyn.*, **54**, 1913-1935, doi:10.1007/s00382-019-05094-4.
- Luo, N., Y. Zhang, Y. Jiang, C. Zuo, J. Chen, W. Zhao, W. Shi, and X. Yan, 2024: Unveiling global land fine- and coarse-mode aerosol dynamics from 2005 to 2020 using enhanced satellite-based monthly inversion data. *Environ. Pollut.*, **348**, 123838, doi:10.1016/j.envpol.2024.123838.

- Ma, F., and Z. Guan, 2018: Seasonal variations of aerosol optical depth over East China and India in relationship to the Asian monsoon circulation. *J. Meteorol. Res.*, **32**, 648-660, doi:10.1007/s13351-018-7171-1.
- Mann, H. B., 1945: Nonparametric tests against Trend. *Econometrica*, **13**, 245-259, doi:10.2307/1907187.
- Nair, V. S., F. Giorgi, and U. Keshav Hasyagar, 2020: Amplification of South Asian haze by water vapour-aerosol interactions. *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 14457-14471, doi:10.5194/acp-20-14457-2020.
- Ningombam, S. S., E. J. L. Larson, U. C. Dumka, V. Estellés, M. Campanelli, and C. Steve, 2019: Long-term (1995-2018) aerosol optical depth derived using ground based AERONET and SKYNET measurements from aerosol aged-background sites. *Atmos. Pollut. Res.*, **10**, 608-620, doi:10.1016/j.apr.2018.10.008.
- O'Neill, N. T., T. F. Eck, A. Smirnov, B. N. Holben, and S. Thulasiraman, 2003: Spectral discrimination of coarse and fine mode optical depth. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **108**, 4559, doi:10.1029/2002JD002975.
- Papachristopoulou, K., I.-P. Raptis, A. Gkikas, I. Fountoulakis, A. Masoom, and S. Kazadzis, 2022: Aerosol optical depth regime over megacities of the world. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 15703-15727, doi:10.5194/acp-22-15703-2022.
- Quaas, J., and Coauthors, 2022: Robust evidence for reversal of the trend in aerosol effective climate forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, **22**, 12221-12239, doi:10.5194/acp-22-12221-2022.
- Shin, J., and Coauthors, 2022: Long-Term variation study of fine-mode particle size and regional characteristics using AERONET data. *Remote Sens.*, **14**, 4429, doi:10.3390/rs14184429.
- 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.
- Singh, V., S. Singh, and A. Biswal, 2021: Exceedances and trends of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in five Indian megacities. *Sci. Total Environ.*, **750**, 141461, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141461.
- Sinyuk, A., and Coauthors, 2020: The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 3375-3411, doi:10.5194/amt-13-3375-2020.
- Uno, I., Z. Wang, S. Itahashi, K. Yumimoto, Y. Yamamura, A. Yoshino, A. Takami, M. Hayasaki, and B.-G. Kim, 2020: Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China. *Sci. Rep.*, **10**, 6450, doi:10.1038/s41598-020-63592-6.
- van Donkelaar, A., R. V. Martin, M. Brauer, and B. L. Boys, 2015: Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter. *Environ. Health Perspect.*, **123**, 135-143, doi:10.1289/ehp.1408646.
- Wang, X., J. Liu, H. Che, F. Ji, and J. Liu, 2018: Spatial and temporal evolution of natural and anthropogenic dust events over northern China. *Sci. Rep.*, **8**, 2141, doi:10.1038/s41598-018-20382-5.
- Wang, X. Q., J. Zhu, K. Li, L. Chen, Y. Yang, Y. Q. Zhao, X. Yue, Y. X. Gu, and H. Liao, 2024: Meteorology-driven trends in PM<sub>2.5</sub> concentrations and related health burden over India. *Atmos. Res.*, **308**, 107548, doi:10.1016/j.atmosres.2024.107548.
- Xie, P., and H. Liao, 2022: The impacts of changes in anthropogenic emissions over China on PM<sub>2.5</sub> concentrations in South Korea and Japan during 2013-2017. *Front. Environ. Sci.*, **10**, 841285, doi:10.3389/fenvs.2022.841285.
- Yan, X., Z. Zang, C. Zhao, and L. Husi, 2021: Understanding global changes in fine-mode aerosols during 2008-2017 using statistical methods and deep learning approach. *Environ. Int.*, **149**, 106392, doi:10.1016/j.envint.2021.106392.
- Yao, W. R., K. Gui, Y. Q. Wang, H. Z. Che, and X. Y. Zhang, 2021: Identifying the dominant local factors of 2000-2019 changes in dust loading over East Asia. *Sci. Total Environ.*, **777**, 146064, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146064.
- Yoon, J., and Coauthors, 2016: Trend estimates of AERONET-observed and model-simulated AOTs between 1993 and 2013. *Atmos. Environ.*, **125**, 33-47, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.10.058.
- Zang, Z., and Coauthors, 2023: Exploring global land coarse-mode aerosol changes from 2001-2021 using a new spatiotemporal coaction deep-learning model. *Environ. Sci. Technol.*, **57**, 19881-19890, doi:10.1021/acs.est.3c07982.
- Zhang, Z., and Coauthors, 2025: Long-term trends in aerosol properties derived from AERONET measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, **25**, 4617-4637, doi:10.5194/acp-25-4617-2025.

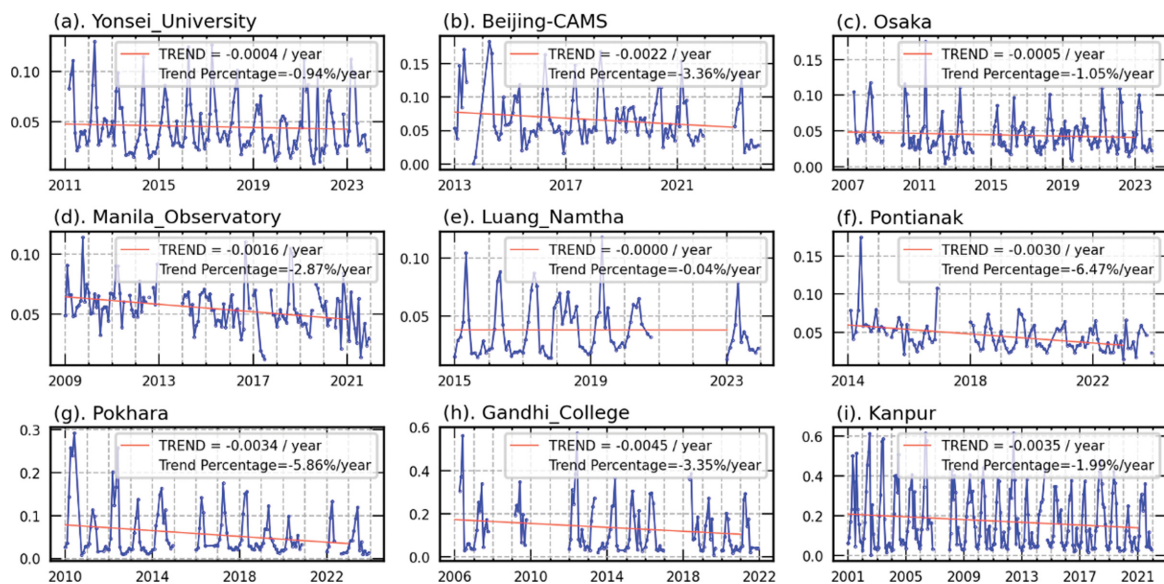
## SUPPORTING MATERIAL



**Fig. S1.** AERONET stations used in this study.



**Fig. S2.** Time-series of FAOD at (a) Yonsei\_University, (b) Beijing-CAMS, (c) Osaka, (d) Manila\_Observatory, (e) Luang\_Namtha, (f) Pontianak, (g) Pokhara, (h) Gandhi\_College, (i) Kanpur. Year is shown on the x-axis and FAOD on the y-axis.



**Fig. S3.** Time-series of CAOD at (a) Yonsei\_University, (b) Beijing-CAMS, (c) Osaka, (d) Manila\_Observatory, (e) Luang\_Namtha, (f) Pontianak, (g) Pokhara, (h) Gandhi\_College, (i) Kanpur. Year is shown on the x-axis and CAOD on the y-axis.