

논문

# 안면도 기후변화감시소에서 관측된 산불 기원 바이오매스 연소 에어로졸의 광흡수 특성: 2023년 4월 사례 연구

## Light-absorption Properties of Fresh Biomass Burning Aerosols Observed at the Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Regional Station: A Case Study in April 2023

박은호<sup>1)</sup>, 김만해<sup>1)</sup>, 한종현<sup>3)</sup>, 유희정<sup>3)</sup>, 양세환<sup>3)</sup>, 김수민<sup>3)</sup>, 김영아<sup>3)</sup>,  
원덕진<sup>3)</sup>, 김상우<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>2)</sup>서울대학교 기후대기환경연구소,

<sup>3)</sup>국립기상과학원 지구대기감시연구과

Eunho Park<sup>1)</sup>, Man-Hae Kim<sup>1)</sup>, Jongheon Han<sup>3)</sup>, Hee-Jung Yoo<sup>3)</sup>,  
Se-Hwan Yang<sup>3)</sup>, Sumin Kim<sup>3)</sup>, Young-Ah Kim<sup>3)</sup>, Dukjin Won<sup>3)</sup>,  
Sang-Woo Kim<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Climate and Atmospheric Environment Research Institute, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

<sup>3)</sup>Global Atmospheric Watch and Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Republic of Korea

접수일 2024년 10월 10일

수정일 2024년 10월 16일

채택일 2024년 10월 17일

Received 10 October 2024

Revised 16 October 2024

Accepted 17 October 2024

\*Corresponding author

Tel: +82-(0)2-880-6716

E-mail: sangwookim@snu.ac.kr

**Abstract** This study examined the optical and physical properties of fresh biomass burning aerosols observed at the Anmyeondo Global Atmospheric Watch (GAW) station in April 2023. The fresh biomass burning aerosols exhibited a significantly higher scattering coefficient ( $567.54 \pm 287.14 \text{ Mm}^{-1}$  at 550 nm), approximately five times greater than the station's April 2023 average ( $101.67 \pm 145.6 \text{ Mm}^{-1}$ ). Additionally, these aerosols demonstrated markedly increased light absorption ( $48.23 \pm 24.25 \text{ Mm}^{-1}$  at 520 nm), far exceeding the April 2023 average ( $7.25 \pm 8.58 \text{ Mm}^{-1}$ ). The biomass burning aerosols showed stronger solar absorption, particularly at shorter wavelengths ( $\text{AAE}_{370-950} = 2.14$ ), indicating substantial light absorption by brown carbon (BrC) aerosol. Within these aerosols, BrC accounted for  $64.5 \pm 5.7\%$  of total light absorption at 370 nm, considerably higher than the April 2023 average contribution ( $20.7 \pm 20.9\%$ ). The elevated BrC contribution, which was relatively higher compared to those reported from field observations of biomass burning plumes, likely resulted from the short travel distance (17 km) between the fire spot and the observation station. This limited distance probably restricted the aging process (e.g., photobleaching) of the biomass burning aerosols.

**Key words:** Anmyeondo GAW station, Biomass burning, Aerosols, Light absorption, Brown carbon

### 1. 서론

최근 지구 온난화로 인한 기후변화는 전 세계적으로 기온 상승과 강수 패턴의 변동을 초래하고 있으며, 이는 산불의 발생과 확산에 유리한 기상 조건을 조성하고 있다 (Jain *et al.*, 2022). 그 결과, 세계 곳곳에서

이례적인 규모의 큰 산불이 동시다발적으로 빈번하게 발생하고 있다 (Cunningham *et al.*, 2024; Cho *et al.*, 2022). 특히, 2019년과 2020년 시베리아지역에서 발생한 산불은 4.7 Mha의 면적을 소실시켜, 지난 40년간 발생한 산불 피해 면적의 44%를 차지하였다 (Descals *et al.*, 2022). 2023년 캐나다 산불은 15 Mha의 면적을

태워, 1972년 산불 감시를 시작한 이래 최대 규모의 피해를 남겼다(Jain *et al.*, 2024).

한반도 역시 지구 온난화로 인한 기온 상승으로 건조한 기간의 산불 발생 및 그 규모가 증가하고 있다(Chang *et al.*, 2024; NIFOS, 2023; Jain *et al.*, 2022). 2020년 안동에서는 1,944 ha의 면적이 산불로 소실되었으며, 2022년 3월 경상북도 울진에서 발생한 산불은 16,301 ha의 면적을 태워 국내 단일 산불 중 역대 최대 규모를 기록하였다(NIFOS, 2023). 이처럼 대형 산불이 과거에 비해 더욱 빈번하게 발생하고 있으며, 그로 인한 사회경제적 피해 또한 많이 증가하고 있다(Kang *et al.*, 2024; NIFOS, 2023; Sun *et al.*, 2023).

산불 발생 시 산림의 연소 과정에서 다량의 에어로졸과 미량 기체가 대기 중으로 배출된다(Schill *et al.*, 2020; Sokolik *et al.*, 2019). 2020년 4월 안동 산불의 경우, 산불 기원 미량 기체(일산화탄소, 질소산화물, 휘발성 유기화합물)와 더불어 오존(O<sub>3</sub>) 증가가 보고되었다(Kim *et al.*, 2022). 또한, 2022년 3월 강릉 산불로 인해 주변 지역의 일산화탄소(CO) 농도가 평상시 대비 4~12배, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도가 약 20배 증가한 것으로 보고되었다(Chang *et al.*, 2024; Kang *et al.*, 2024).

한편, 산불에서 배출되는 블랙 카본(Black Carbon, BC)과 유기 에어로졸(organic aerosol)은 대기질 악화를 초래할 뿐만 아니라 태양 복사를 흡수하거나 산란시켜 지구 복사 수지에 큰 영향을 미친다(Cho *et al.*, 2022, 2019; Jo *et al.*, 2016; Chung *et al.*, 2012). 산불 발생 시 배출되는 에어로졸 총질량의 70~80%는 유기 에어로졸이 차지하는 것으로 알려져 있다(He *et al.*, 2024; Andreae and Merlet, 2001). 이 중 브라운 카본(Brown Carbon, BrC)은 자외선 파장대의 태양 복사를 강하게 흡수하는 특성을 가진 에어로졸이다. 그러나 블랙 카본에 비해 브라운 카본의 화학적 조성과 광흡수 특성 그리고 지구 복사 수지에 미치는 영향에 대한 불확실성은 여전히 크다(Fang *et al.*, 2023; IPCC, 2022). 이는 산불에 따른 바이오매스(biomass burning)의 연소 과정에서 배출되는 브라운 카본의 양에 대한 추정과 대

기 중에서의 광학·복사적 특성 변화에 대한 관측 부족에서 기인한다. 특히 최근 연구들에 따르면, 대기 중에서의 다른 유기 및 무기 에어로졸과의 활발한 혼합으로 인한 브라운 카본의 노화 과정(aging process), 즉 광표백 효과(photobleaching effect)는 실험실 기반 연구보다 실제 대기에서 진행한 관측에서 더 뚜렷하게 보고되고 있다(Liu *et al.*, 2021; Cappa *et al.*, 2020; Hodshire *et al.*, 2019; Bruns *et al.*, 2016; Forrister *et al.*, 2015; Laskin *et al.*, 2015). 브라운 카본의 기후 효과를 보다 정확하게 산정하기 위해서는, 산불 발생 시 바이오매스 연소 과정에서 다량 배출되는 브라운 카본의 대기 중 체류 시간에 따른 노화 정도와 그에 따른 광흡수 특성 변화에 대한 지속적인 상세 관측이 필요하다.

국내 에어로졸 직접(in-situ) 관측 연구의 경우 국내 발생 및 장거리 국외 유입에 따른 에어로졸 광학적·물리적·복사적 특성 관측을 목적으로 한반도 서쪽 해안의 배경 대기지역(백령도, 안면도, 제주 고산 등)에서 주로 이루어져 왔다(Park *et al.*, 2023; Park *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2005). 그러나 산불 기원 바이오매스 연소 에어로졸 특성에 대한 직접 관측 및 앞서 언급한 브라운 카본의 복사 특성에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 안면도 기후변화감시소에서 관측된 에어로졸 광학적·물리적 특성 자료에 기반하여 2023년 4월 충청남도 홍성지역에서 발생한 산불에 기인한 바이오매스 연소 에어로졸의 광흡수 특성을 규명하고, 이를 황사 및 오염 에어로졸의 특성과 비교·분석하였다. 또한 관측소와 근접 거리(직선거리 약 17 km)에서 배출되고, 안면도 기후변화감시소로 빠르게 유입(약 30 분)되어 대기 중 노화 과정이 비교적 덜 진행된 브라운 카본의 광흡수 특성을 심도 있게 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 에어로졸 광학·물리 특성 측정

산불 기원 바이오매스 연소 에어로졸의 광흡수 특

성 분석을 위해 2023년 4월 안면도 기후변화감시소 (36°32'N, 126°19'E, 해발 45.7 m)에서 관측된 에어로졸 광학적·물리적 특성을 분석하였다.

에어로졸 광산란계수 (scattering coefficient)는 3 파장 (450 nm, 550 nm 및 700 nm) 네펠로미터 (Nephelometer, TSI Inc., TSI 3563)를 이용하여 관측하였다. 네펠로미터는 고농도 가스로 이산화탄소를, 저농도 가스로는 여과된 공기를 사용하여 교정하였으며, Anderson and Ogren (1998)이 제안한 보정 방법을 적용하여 광산란계수를 구하였다. 에어로졸 광흡수계수 (absorption coefficient)는 에셀로미터 (Aethalometer, Magee Sci., AE31)를 사용하여 7개 파장 (370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm 및 950 nm)에서 측정하였다. 광흡수계수는 Weingartner *et al.* (2003)의 방법에 따라 필터 적재 효과 (filter loading effect)와 다중 산란 효과 (multiple scattering effect)를 보정하였다 (Kim *et al.*, 2019). 이때 다중 산란 보정 계수 (multiple scattering correction factor)는 세계기상기구의 지구 대기 감시 (Global Atmospheric Watch, WMO, 2016) 프로그램의 보정 지침에 따라 모든 파장대에 대하여 3.5를 적용하였다. 에어로졸 크기별 수농도 분포는 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, GRIMM, GRIMM 5.416)와 Aerodynamic Particle Sizer (APS, TSI Inc., TSI 3321)를 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 입경이 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 입자는 SMPS를 통해서, 0.5  $\mu\text{m}$  이상의 에어로졸은 APS의 관측값을 적용하여 에어로졸의 크기별 수농도 분포 특성 자료를 분석에 활용하였다.

한편, 베타선 입자 분석기 (ThermoFisher Sci., FH62C14)를 사용하여 측정된 직경 10  $\mu\text{m}$  이하인 에어로졸의 질량 농도 (PM<sub>10</sub>)와 비분산 적외선 (NDIR) 분석기 (ThermoFisher Sci., 48i-TLE)를 사용하여 측정된 일산화탄소 농도를 추가적으로 분석하였다.

## 2.2 브라운 카본(BrC)의 광흡수 기여도 산정

블랙 카본과 브라운 카본 및 황사 입자는 태양 복사를 흡수하는 광흡수성 에어로졸이다 (Fang *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2012). 황사의 영향이 없는

시기에는 광흡수는 블랙 카본과 브라운 카본의 광흡수 기여도의 합으로 가정할 수 있다. 본 연구에서는 블랙 카본과 브라운 카본의 광흡수 기여도를 분리하여 산정하기 위해 이들의 파장에 따른 광흡수 특성, 즉 흡수 옴스트롱 지수 (Absorption Ångström Exponent, AÅE) 기법을 적용하였다 (Cho *et al.*, 2022, 2019; Kim *et al.*, 2021). 블랙 카본은 근자외선에서 근적외선 파장대까지의 태양복사를 고르게 흡수하는 반면, 브라운 카본은 근적외선 파장대 (880 nm)에서 거의 빛을 흡수하지 않고 자외선 혹은 근자외선 파장대에서 태양 복사를 강하게 흡수한다 (Cho *et al.*, 2022, 2019; Kim *et al.*, 2021). 본 연구에서는 흡수 옴스트롱 지수 기법을 활용하여, 880 nm 파장에서 관측된 에어로졸 광흡수계수를 블랙 카본에 의한 것으로 간주하고 블랙 카본의 흡수 옴스트롱 지수를 1.0으로 가정하여, 블랙 카본의 파장별 광흡수 기여도를 산출하였다. 브라운 카본에 의한 광흡수 기여도는 에셀로미터를 통해 관측된 광흡수계수에서 흡수 옴스트롱 지수 기법을 통해 산출된 블랙 카본에 의한 광흡수 기여도를 제외하여 산출하였다. 한편, 황사 입자의 경우 브라운 카본과 유사하게 근자외선 파장 영역에서 태양 복사를 우세하게 흡수하는 특성이 있다. 따라서 황사 기간에는 흡수 옴스트롱 지수 기법을 적용하면, 브라운 카본의 광흡수 기여도가 과대평가될 수 있다 (Kim *et al.*, 2021; Cho *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2018). 이에 본 연구에서는 2023년 4월 중 기상청이 황사 발생을 보고한 기간을 제외하고 흡수 옴스트롱 지수 기법을 적용하였다 (Lee *et al.*, 2012).

## 2.3 산불 정보

국립산림과학원이 발간한 산림청의 '2023년 산불 통계연보'를 바탕으로 2023년 홍성지역에서 발생한 산불 및 지난 10년간 우리나라 산불의 발생 횟수와 피해 면적을 분석하였다. 국내 산불 정보는 주민 신고, 산불 감시탑, 무인카메라, 항공기 등 다양한 수단을 통해 탐지 및 보고된 결과이며 산불 기록의 기준은 피해 면적 0.01 ha 이상이다 (NIFOS, 2023).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 국내 봄철 산불 발생 추이

2014년부터 2023년까지 최근 10년간 국내의 연평균 산불 발생 건수는 567건이며, 피해 면적은 평균 약 4,004 ha이다(NIFOS, 2023). 그러나 2022년에는 약 24,797 ha의 면적이 산불로 소실되었으며, 최근 5년간(2019~2023년) 산불 피해 면적은 평균 7,346 ha로 과거에 비해 크게 확대되고 있다(그림 1(a)). 반면, 산불 피해 면적이 높았던 최근 5년의 연평균 산불 발생 건수(595건)는 지난 10년 연평균(567건)과 유의미한 차이가 없었다(그림 1(b)). 즉 국내 산불의 경우 대부분 논·밭두렁 소각, 쓰레기 소각, 담뱃불 실화 등 인간 활동으로 인해 발생하기에(NIFOS, 2023; Won *et al.*, 2011) 지난 10년간 국내 산불 발생 건수는 뚜렷한 증감 추세가 없었다. 그러나 산불 피해 면적은 기온, 상대습도, 강수량, 풍속 등 기상 조건의 영향을 받으며(Jeon and Chae, 2017), 기후변화에 따른 봄철 대기·지표 건조도 증가와 강풍 발생의 빈도 증가 등으로 인해 최근 산불 피해 면적은 증가 추세를 보인다(Chang *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2023; Choi, 2020).

최근 10년간 국내 산불은 건조한 봄철(2~5월)에 집중적으로 발생하였으며, 봄철 산불로 인한 피해 면적

은 연평균 산불 피해 면적의 98%에 해당된다(그림 1(a)). 국내 산불이 빈번히 발생하는 봄철은 종관 규모에서는 건조한 대륙성 계절풍의 영향이, 국지적으로는 해풍 및 편 현상의 영향이 우세하다(Jeong *et al.*, 2018; Won *et al.*, 2011). 특히 상대습도와 연료 습도가 낮아 산림 내 지피물이 매우 건조해지며, 산림 식생이 아직 잎이 돋아나지 않은 상태여서 산불 발생과 확산의 위험도가 높다(Lee and Lee, 2006). 지난 20년간(2004~2023년) 국내 봄철 평균 기온은 이전 20년(1984~2003년) 대비 0.66°C 상승하였고, 평균 강수량은 6.58 mm 감소하였다. 결과적으로 상대습도는 약 3.6% 감소하고, 수증기압차(Vapor Pressure Deficit, VPD)는 0.16 kPa 증가하는 등 과거와 비교하면 고온 건조해지면서 산불 발생 및 확산의 호조건이 형성되었다(Chang *et al.*, 2024; 그림 2). 특히, 홍성산불이 발생한 2023년 봄철은 지난 40년(1984~2023년) 중 가장 높은 기온(9.49°C)과 가장 적은 강수량(37.08 mm)을 기록하여 산불이 확산되기 유리한 환경이 조성되었다. 그 결과, 2023년은 지난 10년(2014~2023년) 중 두 번째로 넓은 면적(4992 ha)이 산불로 소실되었다.

기후변화로 인해 봄철 대기와 지표가 지속적으로 고온 건조한 상태를 유지하면서, 봄철 산불 발생 시 그 피해 면적이 확대될 뿐만 아니라, 다량의 에어로졸

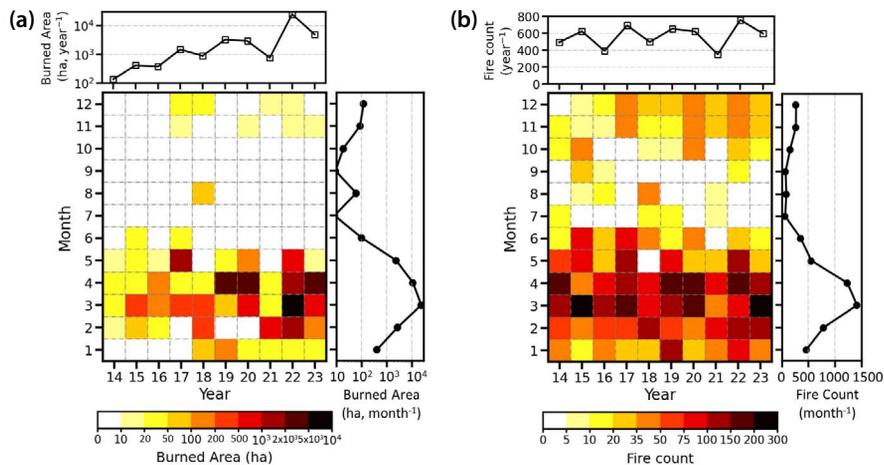
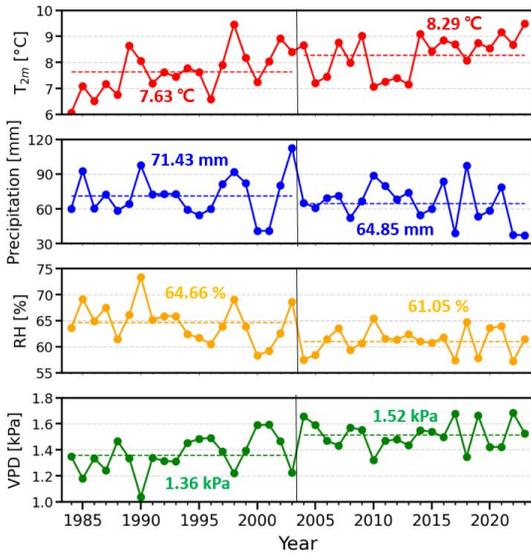


Fig. 1. Monthly and annual (a) burned area and (b) fire count of wildfires occurred in South Korea from 2014 to 2023.



**Fig. 2.** Time series of 2 m-temperature, accumulated precipitation, relative humidity, and vapor pressure deficit during fire season (February, March, April, and May) from 1984 to 2023.

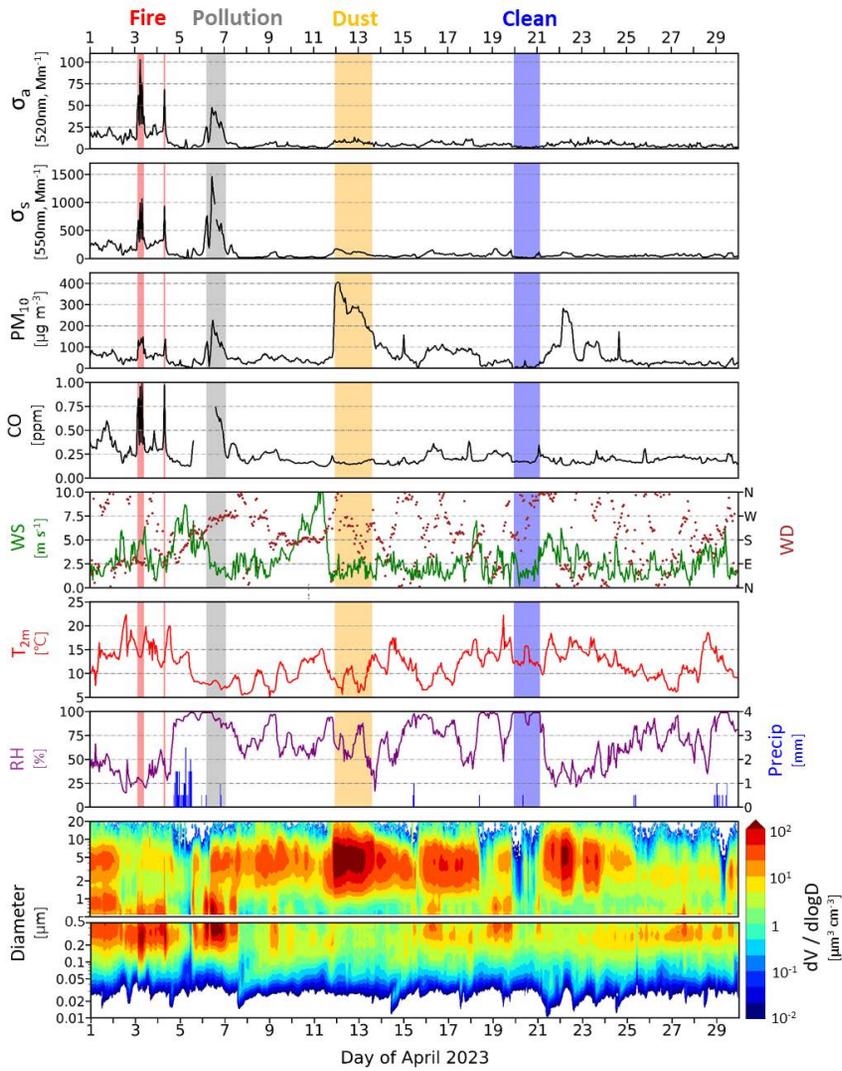
배출 증가에 따른 대기질 악화로 이어질 수 있다. 산불 기원 바이오매스 연소 에어로졸은 그 광학적 및 물리적 특성에 따라 지구 복사 수지에 큰 영향을 미치고 있어 결과적으로 기후변화를 유발하는 되먹임(feed-back) 과정을 촉진할 수 있다(Cho *et al.*, 2024; Cho *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2004).

### 3.2 산불 기원 에어로졸의 광학적·물리적 특성

그림 3은 2023년 4월 한 달간 안면도 기후변화감시소에서 관측된 에어로졸 광학적·물리적 특성과 질량 농도 및 기상 변수를 나타낸 것이다. 4월 3일 03시부터 10시 그리고, 4월 4일 07시부터 09시까지 비교적 짧은 시간 동안 에어로졸 광산란·광흡수계수뿐만 아니라  $PM_{10}$  질량 농도와 직경  $0.1\sim 1\ \mu m$  구간의 입자 수농도의 급격한 증가가 관측되었다(상세한 설명은 표 1 및 그림 5 참조). 또한, 산불에 의한 바이오매스의 불완전 연소를 나타내는 지표(May *et al.*, 2023; Forrister *et al.*, 2015) 중 하나인 일산화탄소 농도가 월평균( $0.22\pm 0.10\ ppm$ )을 크게 상회하는  $0.62\pm 0.26\ ppm$

으로 나타났다. 이는 안면도 기후변화감시소로부터 동쪽으로 약 17 km 떨어진 충청남도 홍성군 서부면에 발생한 산불의 연기가 강한 동풍에 의해 안면도 기후변화감시소로 확산된 결과이다(그림 4(a)). 산불이 발생한 2023년 4월 2일의 경우 일 최고기온이  $22.8^\circ C$ , 일 최저 상대습도는 13.5%로 관측되었는데, 이는 2008년부터 2024년까지 안면도 기후변화감시소에서 관측된 4월 2일 평균 최고기온( $13.8^\circ C$ )과 최저습도(49.8%)와 비교할 때 매우 고온건조한 상태였다. 이러한 기상 상황은 동해상의 고기압에서 유도된 동풍이 태백산맥을 넘으면서 발생한 윈현상과 일조량 증가로 인해 형성된 것이다. 중국 동해안에 자리한 저기압과 동해에 위치한 고기압 사이에서 발달한 강풍(평균 풍속:  $7.1\ m\ s^{-1}$ )이 풍하측으로 빠르게 산불 연기 확산시켰다(그림 4(b)). 본 연구에서는 이 기간을 ‘산불(Fire)’ 기간으로 지정하였다.

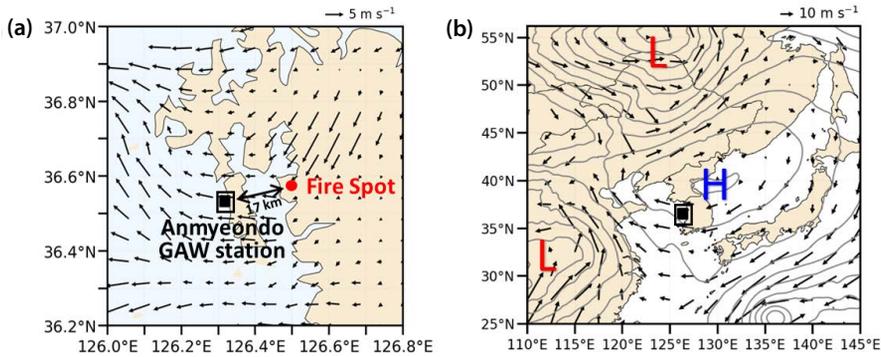
한편, 봄철, 특히 4월에는 한반도 전역에서 다양한 대기 현상이 관측된다. 중국과 아시아 대륙에서 수송된 대기오염물질 및 고비사막과 내몽고 등에서 발원한 황사가 빈번히 관측되며, 동풍이나 남풍이 불 때는 비교적 청정한 공기가 유입되기도 한다(Kwon *et al.*, 2024; Jeong *et al.*, 2023; Shim *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2008). 이에 본 연구에서는 산불 발생 시의 에어로졸 특성, 특히 바이오매스 연소로 인해 배출되는 브라운 카본의 광흡수 기여도를 규명하고자 2023년 4월에 관측된 오염(Pollution), 황사(Asian Dust) 및 청정(Clean) 사례를 선정하여 비교 분석하였다. ‘오염’ 기간은 중국 동해안 지역에 위치한 고기압의 가장자리를 통해 발달한 북서풍 하에서 대기오염물질들이 유입된 2023년 4월 6일 11시부터 4월 7일 02시(그림 S1(a))에 해당된다. 중국 북동부를 지나는 저기압의 후면을 따라 서풍이 불면서 한반도로 황사 입자가 유입된 4월 11일 23시부터 4월 13일 12시까지를 본 연구에서 ‘황사’ 기간(그림 S1(b))으로 선정하였다. 마지막으로, ‘청정’ 기간은 한반도 남쪽을 통과한 저기압이 유도하는 습윤한 남풍의 영향으로 한반도 곳곳에 강수가 발생한 후 매우 낮은 에어로졸 농도가 관측된 4



**Fig. 3.** Hourly variations of aerosol absorption coefficient  $\sigma_a$  at 520 nm, aerosol scattering coefficient ( $\sigma_s$ ) at 550 nm,  $PM_{10}$  concentration, CO concentration, wind speed (WS), wind direction (WD), 2 m-temperature ( $T_{2m}$ ), relative humidity (RH), precipitation (Precip), aerosol volume size distribution ( $dV/d\log D$ ) observed in April 2023 at Anmyeondo GAW Station. The red, gray, orange and blue shading denote fire period, pollution period, dust period, and clean period, respectively.

**Table 1.** Comparison of means and standard deviations of aerosol absorption coefficient ( $\sigma_a$ ), aerosol scattering coefficient ( $\sigma_s$ ) during the four designated periods (fire, pollution, dust, and clean).

Period	Fire	Pollution	Dust	Clean	April 2023
$\sigma_a$ [520 nm, $Mm^{-1}$ ]	$48.2 \pm 24.3$	$27.2 \pm 11.6$	$8.0 \pm 1.5$	$2.0 \pm 0.7$	$7.3 \pm 8.6$
$\sigma_s$ [550 nm, $Mm^{-1}$ ]	$567.5 \pm 287.1$	$620.4 \pm 343.3$	$110.1 \pm 32.3$	$30.5 \pm 24.4$	$101.7 \pm 145.7$
$PM_{10}$ [ $\mu g m^{-3}$ ]	$106.9 \pm 32.4$	$118.9 \pm 49.8$	$281.8 \pm 67.1$	$8.6 \pm 8.4$	$66.3 \pm 70.3$
CO [ppm]	$0.62 \pm 0.26$	$0.53 \pm 0.15$	$0.16 \pm 0.02$	$0.18 \pm 0.04$	$0.22 \pm 0.10$

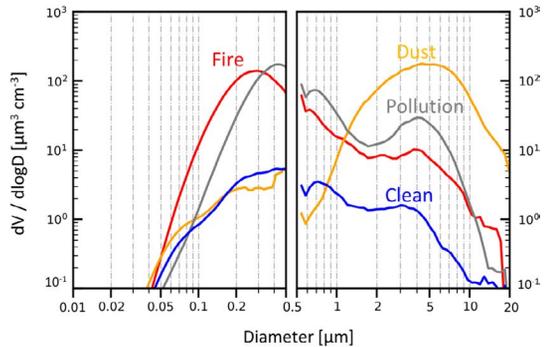


**Fig. 4.** (a) Averaged 10 m wind vectors during fire period (06 LST on 3 April). (b) ECMWF 850 hPa geopotential height and 850 hPa wind vectors on 12 LST on 2 April (15 hours before fire period).

월 19일 23시부터 4월 21일 3시까지이다(그림 S1(c)).

표 1은 산불 기간에 관측된 에어로졸의 광흡수계수 (520 nm,  $\sigma_a$ ), 광산란계수 (550 nm,  $\sigma_s$ ), PM<sub>10</sub> 질량 농도 및 일산화탄소 농도를 오염·황사·청정 사례와 2023년 4월 평균과 비교하여 정리한 것이다. 산불 기간의 광흡수계수 ( $48.2 \pm 24.3 \text{ Mm}^{-1}$ )는 4월 평균값 ( $7.3 \pm 8.6 \text{ Mm}^{-1}$ )과 황사 기간 ( $8.0 \pm 1.5 \text{ Mm}^{-1}$ )보다는 6~7배가량, 청정 기간 ( $2.0 \pm 0.7 \text{ Mm}^{-1}$ )에 비해서는 24 배가량 높은 값을 보였으며, 오염 기간 ( $27.2 \pm 11.6 \text{ Mm}^{-1}$ )에 비해서도 약 77% 높은 값을 보였다. 산불 기간의 광산란계수 ( $567.5 \pm 287.1 \text{ Mm}^{-1}$ )는 2023년 4월 평균값 ( $101.7 \pm 145.7 \text{ Mm}^{-1}$ )과 황사 기간 ( $110.1 \pm 32.3 \text{ Mm}^{-1}$ )보다 약 5배 이상 높은 수치이며, 청정 기간 ( $30.5 \pm 24.4 \text{ Mm}^{-1}$ )에 비해 약 19배 높은 값이 나타났다. 위에서 언급한 광흡수계수와 달리, 오염 기간의 광산란계수 ( $620.4 \pm 343.3 \text{ Mm}^{-1}$ )보다는 약  $50 \text{ Mm}^{-1}$  낮았다.

부피 입경분포 (volume size distribution)를 보면, 산불 기간은 직경 약  $0.3 \mu\text{m}$  부근인 미세 모드 (fine mode) 최댓값을 보이며, 직경  $0.3 \mu\text{m}$  이하의 부피 수농도가 다른 사례 기간에 비해 높게 나타났다(그림 5). 조대 모드 (coarse mode)에서의 산불 기간 부피 수농도는 오염 및 황사 기간에 비해 낮게 나타났다. 오염 기간의 경우 미세 모드 입자가 우세하였지만 조대 모드에서도 입자 직경 약  $3\sim 5 \mu\text{m}$  부근에서 최댓값을



**Fig. 5.** Comparison of volume size distribution during the four (fire, pollution, dust, and clean) designated periods.

보이며 부피 수농도가 높게 나타났다. 황사 기간과 청정 기간은 선행 연구들에서 보고된 바와 같이, 각각 조대 모드에서 높은 부피 수농도와 모든 입경 영역에서 낮은 부피 수농도를 보였다(Jeong *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2005).

한편, 앞서 언급한 산불 기간과 오염 기간의 높은 광흡수계수는 바이오매스의 연소 과정에서 다량 배출된 블랙 카본 및 브라운 카본에 기인한 것이다(Cho *et al.*, 2022; Yan *et al.*, 2018). 또한, 두 기간 모두 높게 나타난 광산란계수는 상대적으로 산란 효율이 높은 미세 모드 입자들의 수농도가 급증한 것이 원인이다(May *et al.*, 2023; Cho *et al.*, 2022). 특히, 오염 기간의 경우 인위적 배출원에서 2차 생성된 황산염, 질산염,

및 유기 탄소와 같은 산란 효율이 높은 에어로졸들이 주요 성분이다(Jeong *et al.*, 2024; Lim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2007). 이로 인해 산불 기간은 오염 기간에 비해 광흡수계수는 높지만, 광산란계수는 낮게 나타난 것으로 사료된다.

### 3.3 산불 기원 브라운 카본(BrC)의 광흡수 기여도

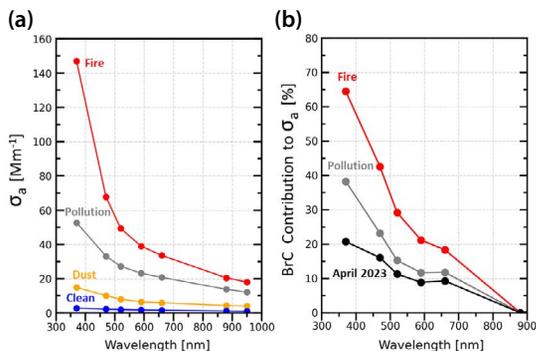
그림 6(a)는 7파장 에셀로미터로부터 측정된 광흡수계수의 파장에 따른 변동 특성(wavelength-dependency)을 앞서 3.2장에서 언급한 4 사례 기간(산불, 오염, 황사 및 청정 기간)에 대해 비교하여 그린 것이다. 산불 기간에는 모든 파장대에서 광흡수계수가 다른 사례보다 높게 나타났으며, 특히 자외선 혹은 근자외선 파장대에서 뚜렷한 광흡수 증가가 관찰되었다. 370 nm 파장에서 산불 기간의 광흡수계수는  $141.6 \pm 78.5 \text{ Mm}^{-1}$ 로, 2023년 4월 평균( $13.3 \pm 22.5 \text{ Mm}^{-1}$ )보다 약 11배가량 높게 관측되었다.

370~950 nm 파장 범위에서 산출한 흡수 옴스트롱 지수는 산불 기간( $2.17 \pm 0.18$ )이 가장 높으며, 이는 오염 기간( $1.58 \pm 0.21$ ), 황사 기간( $1.40 \pm 0.29$ ) 및 청정 기간( $1.15 \pm 0.56$ )보다 월등히 높은 수치이다. 이러한 짧은 파장대에서의 뚜렷한 광흡수 증가는 산불 시 바이오매스의 연소 과정에서 배출되는 광흡수성 유기 탄소인 브라운 카본의 특성에 기인한다(Fang *et al.*,

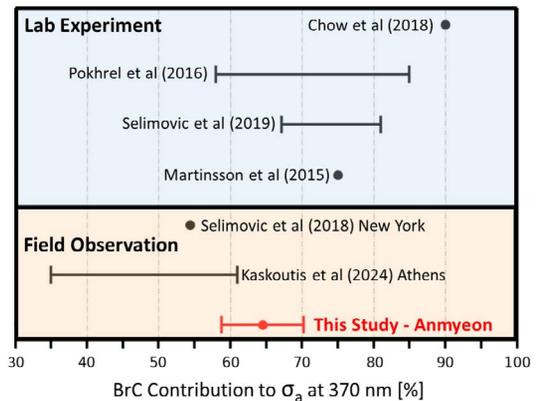
2023; Cho *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021). 브라운 카본은 자외선 혹은 근자외선 파장대에서 태양 복사를 우세하게 흡수하기에 흡수 옴스트롱 지수가 일반적으로 1.5에서 3의 범위에서 나타난다. 반면, 블랙 카본은 에셀로미터의 모든 관측 파장에서 유사한 정도로 태양 복사를 흡수하기에 1.0에 가까운 흡수 옴스트롱 지수를 보인다(Park and Han, 2022; Yan *et al.*, 2018). 본 연구에서는 이러한 선행 연구들에 기초하여 블랙 카본의 흡수 옴스트롱 지수를 1.0으로 가정하고, 브라운 카본의 광흡수 기여도를 산출하였다.

그림 6(b)는 4 사례 기간의 파장별 브라운 카본의 광흡수 기여도 산출 결과를 나타낸 것이다. 370 nm 파장에서 브라운 카본의 광흡수 기여도는 산불 기간에  $64.5 \pm 5.7\%$ 로, 오염 기간( $38.4 \pm 13.4\%$ )과 2023년 4월 평균( $20.7 \pm 20.9\%$ )에 비해 2~3배 높게 나타났다. 특히, 370 nm 파장에서의 광흡수계수가  $304.3 \text{ Mm}^{-1}$ 로 가장 높았던 2023년 4월 3일 6시경의 브라운 카본의 광흡수계수 기여도는 70.3%에 달했다. 이는 바이오매스의 연소에 기인한 브라운 카본의 비중이 매우 높음을 의미한다.

산불 기간의 이와 같은 높은 브라운 카본 광흡수 기여도는 실험실에서의 직접 연소 기반 선행 연구 결과보다는 다소 낮지만, 실제 대기에서 관측된 기여도보다는 다소 높은 결과이다(그림 7). Kaskaoutis *et al.*



**Fig. 6.** (a) Aerosol absorption coefficient ( $\sigma_a$ ) and (b) BrC contribution to  $\sigma_a$  as a function of wavelength during the four designated period (fire, pollution, dust, and clean period).



**Fig. 7.** Comparison of BrC contribution to aerosol absorption coefficient ( $\sigma_a$ ) at 370 nm under ambient (red) and laboratory (blue) conditions.

(2024)은 산불 발생지로부터 18~100 km 떨어진 지점에서 370 nm 파장에서의 브라운 카본 기여도를 35~61%로 산정하였으며, Selimovic *et al.* (2019)은 산불의 약 52 km 풍하 지점에서 관측, 브라운 카본 광흡수 기여도가 약 54.4%임을 보고하였다. 반면, 실험실에서의 직접 연소 실험을 통한 관측 연구나 항공기를 이용한 산불 발원지 상공에서의 관측 연구는 370 nm 파장대에서의 브라운 카본 광흡수 기여도를 60% 이상, 최대 90% 정도로 보고하고 있다(Chow *et al.*, 2018; Selimovic *et al.*, 2018; Pokhrel *et al.*, 2016; Martinsson *et al.*, 2015). 일반적으로 산불 기원 바이오매스의 연소 과정에서 생성되는 브라운 카본은 장거리 수송 과정에서 광표백 과정(photobleaching process)과 같은 광화학적 노화 과정(photochemical aging process)을 거치면서 광흡수 효율이 감소하는 것으로 보고되고 있다(Dasari *et al.*, 2019; Selimovic *et al.*, 2018; Forrister *et al.*, 2015; Lack *et al.*, 2013). 즉, 본 연구에서 산출된 브라운 카본의 광흡수 기여도가 실제 대기 관측 결과보다는 높고 실험실 기반 결과보다는 낮은 이유는, 관측지점인 안면도 기후변화감시소와 산불 발생지 간의 짧은 거리(약 17 km), 강풍 그리고 매우 건조한 대기 조건이 브라운 카본의 노화 과정을 더디게 하면서 상대적으로 갓 배출된 바이오매스 에어로졸이 관측되었기 때문으로 사료된다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 2023년 4월 안면도 기후변화감시소에서 관측된 산불 기원 바이오매스 연소 에어로졸의 광학적 및 물리적 특성을 분석하고, 브라운 카본의 광흡수 기여도를 산출하였다.

광산란계수는 산불 기간  $567.5 \pm 287.1 \text{ Mm}^{-1}$ 로, 4월 평균( $101.67 \pm 145.67 \text{ Mm}^{-1}$ )보다 5배 이상 높게 나타났으며, 이는 산란 효율이 높은 미세 입자( $0.3 \mu\text{m}$ )에서 나타난 급격한 수농도 증가 때문이다. 광흡수계수의 경우, 산불 기간  $48.2 \pm 24.3 \text{ Mm}^{-1}$ 로 나타났으며,

이는 바이오매스 연소 과정에서 다량 배출된 블랙 카본과 브라운 카본과 같은 광흡수성 에어로졸 때문으로, 2023년 4월 안면도 평균( $7.3 \pm 8.6 \text{ Mm}^{-1}$ )을 포함한 오염 및 황사 사례 기간보다 높은 값을 보였다.

산불 발생 시 다량으로 배출된 브라운 카본은 자외선 혹은 자외선 인근 파장대에서 강한 광흡수 특성으로 인해, 높은 흡수 옴스트롱 지수(2.14)를 보였다. 이에 따라, 370 nm에서의 브라운 카본 광흡수계수 기여도는  $64.5 \pm 5.7\%$ 로 산정되었으며, 본 연구의 오염 기간( $38.4 \pm 13.4\%$ )과 4월 평균( $20.7 \pm 20.9\%$ )보다 2~3배 높게 나타났다. 본 연구에서 산불 기간의 브라운 카본 광흡수 기여도는 실험실에서의 직접 연소 과정에서 측정된 기여도보다는 낮지만, 산불 발생지에서 다소 떨어진 지점에서 측정된 기여도보다는 높은 수치이다. 이는 산불 발생지와 측정 지점(안면도 기후변화감시소) 간의 짧은 수송 거리(약 17 km)와 매우 건조한 대기 상태로 인해 대기 중에서 광화학적 노화 과정의 거의 진행되지 않아, 광흡수 정도가 감소하지 않은 결과로 사료된다.

본 연구는 국내에서 산불 기원 바이오매스 에어로졸의 광학적 특성에 대한 최초의 직접 관측 결과로서 큰 의의를 지닌다. 그러나 바이오매스 연소에서 배출되는 브라운 카본의 대기 중 노화 과정에 따른 광흡수 특성의 변화를 설명하기에는 연소 효율, 연소 온도, 식생 종류 등 산불과 관련된 구체적인 정보가 부족하다는 한계점이 있다. 향후 산불 기원 바이오매스 연소 에어로졸이 대기질과 기후변화에 미치는 영향 진단 및 예측 정확도 향상을 위해서는 지상 직접-원격-항공-위성의 입체관측이 요구된다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 “기후변화감시 서비스체계 구축 및 운영”과 기상업무지원기술개발 연구 “황사·연무 감시 및 예보기술 개발(KMA2018-00521)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Anderson, T.L., Ogren, J.A. (1998) Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 29(1), 57-69. <https://doi.org/10.1080/02786829808965551>
- Andreae, M.O., Merlet, P. (2001) Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955-966. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>
- Bruns, E.A., El Haddad, I., Slowik, J.G., Kilic, D., Klein, F., Baltensperger, U., Prévôt, A.S.H. (2016) Identification of significant precursor gases of secondary organic aerosols from residential wood combustion, *Scientific Reports*, 6, 27881. <https://doi.org/10.1038/srep27881>
- Cappa, C.D., Lim, C.Y., Hagan, D.H., Coggon, M., Koss, A., Sekimoto, K., de Gouw, J., Onasch, T.B., Warneke, C., Kroll, J.H. (2020) Biomass-burning-derived particles from a wide variety of fuels - Part 2: Effects of photochemical aging on particle optical and chemical properties, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 8511-8532. <https://doi.org/10.5194/acp-20-8511-2020>
- Chang, D.Y., Jeong, S., Park, C.E., Park, H., Shin, J., Bae, Y., Park, H., Park, C.R. (2024) Unprecedented wildfires in Korea: Historical evidence of increasing wildfire activity due to climate change, *Agricultural and Forest Meteorology*, 348, 109920. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109920>
- Cho, C., Kim, S.W., Choi, W., Kim, M.H. (2022) Significant light absorption of brown carbon during the 2020 California wildfires, *Science of The Total Environment*, 813, 152453. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152453>
- Cho, C., Kim, S.W., Lee, M., Lim, S., Fang, W., Gustafsson, Ö., Andersson, A., Park, R.J., Sheridan, P.J. (2019) Observation-based estimates of the mass absorption cross-section of black and brown carbon and their contribution to aerosol light absorption in East Asia, *Atmospheric Environment*, 212, 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.024>
- Cho, Y., Yoon, J.H., Jeong, J.H., Kug, J.S., Kim, B.M., Kim, H., Park, R.J., Kim, S.W. (2024) Precipitation-induced abrupt decrease of Siberian wildfire in summer 2022 under continued warming, *Environmental Research Letters*, 19(7), 074037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad5573>
- Choi, G. (2020) Climatic characteristics of a local wind called Yangganjipung blowing in the northeast coastal region of South Korea, *Journal of Climate Research*, 15, 49-66. <https://doi.org/10.14383/crj.2020.15.2.49>
- Chow, J.C., Watson, J.G., Green, M.C., Wang, X., Chen, L.W.A., Trimble, D.L., Cropper, P.M., Kohl S.D., Gronstal, S.B. (2018) Separation of brown carbon from black carbon for IMPROVE and Chemical Speciation Network PM<sub>2.5</sub> samples, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(5), 494-510. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1426653>
- Chung, C.E., Kim, S.-W., Lee, M., Yoon, S.-C., Lee, S. (2012) Carbonaceous aerosol AAE inferred from in-situ aerosol measurements at the Gosan ABC super site, and the implications for brown carbon aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 6173-6184. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6173-2012>
- Cunningham, C.X., Williamson, G.J., Bowman, D.M.J.S. (2024) Increasing frequency and intensity of the most extreme wildfires on Earth, *Nature Ecology & Evolution*, 8, 1420-1425. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02452-2>
- Dasari, S., Andersson, A., Bikkina, S., Holmstrand, H., Budhavant, K., Satheesh, S., Asmi, E., Kesti, J., Backman, J., Salam, A., Bisht, D.S., Tiwari, S., Hameed, Z., Gustafsson, Ö. (2019) Photochemical degradation affects the light absorption of water-soluble brown carbon in the South Asian outflow, *Science Advances*, 5(1), eaau8066. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau8066>
- Descals, A., Gaveau, D.L., Verger, A., Sheil, D., Naito, D., Peñuelas, J. (2022) Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures, *Science*, 378(6619), 532-537. <https://doi.org/10.1126/science.abn9768>
- Fang, W., Andersson, A., Lee, M., Zheng, M., Du, K., Kim, S.-W., Holmstrand, H., Gustafsson, Ö. (2023) Combined influences of sources and atmospheric bleaching on light absorption of water-soluble brown carbon aerosols, *npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 104. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00438-8>
- Forrister, H., Liu, J., Scheuer, E., Dibb, J., Ziemba, L., Thornhill, K.L., Anderson, B., Diskin, G., Perring, A.E., Schwarz, J.P., Campuzano-Jost, P., Day, D.A., Palm, B.B., Jimenez, J.L., Nenes, A., Weber, R.J. (2015) Evolution of brown carbon in wildfire plumes, *Geophysical Research Letters*, 42(11), 4623-4630. <https://doi.org/10.1002/2015GL063897>
- He, Y., Zhao, B., Wang, S., Valorso, R., Chang, X., Yin, D., Feng, B., Camredon, M., Aumont, B., Dearden, A., Jathar, S.H., Shrivastava, M., Jiang, Z., Cappa, C.D., Yee, L.D., Seinfeld, J.H., Hao, J., Donahue, N.M. (2024) Formation of secondary organic aerosol from wildfire emissions enhanced by long-time ageing, *Nature Geoscience*, 17, 124-129. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01355-4>

- Hodshire, A.L., Akherati, A., Alvarado, M.J., Brown-Steiner, B., Jathar, S.H., Jimenez, J.L., Kreidenweis, S.M., Lonsdale, C.R., Onasch, T.B., Ortega, A.M., Pierce, J.R. (2019) Aging effects on biomass burning aerosol mass and composition: A critical review of field and laboratory studies, *Environmental Science & Technology*, 53(17), 10007-10022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02588>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) Climate Change 2021, the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- Jain, P., Barber, Q.E., Taylor, S.W., Whitman, E., Acuna, D.C., Boulanger, Y., Chavardès, R.D., Chen, J., Englefield, P., Flannigan, M., Girardin, M.P., Hanes, C.C., Little, J., Morrison, K., Skakun, R.S., Thompson, D.K., Wang, X., Parisien M.-A. (2024) Drivers and Impacts of the Record-Breaking 2023 Wildfire Season in Canada, *Nature Communications*, 15, 6764. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51154-7>
- Jain, P., Castellanos-Acuna, D., Coogan, S.C.P., Abatzoglou, J.T., Flannigan, M. (2022) Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature, *Nature Climate Change*, 12, 63-70. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01224-1>
- Jeon, B., Chae, H. (2017) A study on the analysis of the relationship between forest fire occurrence and meteorological factors in Korea, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(5), 197-206, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.5.197>
- Jeong, J., Ko, H.-J., Seo, W., Kim, J.E., Boo, K.-O. (2023) Size-segregated aerosol chemical characteristics in accordance with pathways of the Asian dust observed in 2014 and 2015 in Jeju, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(2), 202-216, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.2.202>
- Jeong, J.-Y., Woo, S.-H., Son, R.-H., Yoon, J.-H., Jeong, J.-H., Lee, S.-J., Lee, B.-D. (2018) Spring forest-fire variability over Korea associated with large-scale climate factors, *Atmosphere*, 28(4), 457-467. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.4.457>
- Jeong, M.J., Yoo, H.-J., Ko, H.-J., Oh, S.M., Hwang, S.-O. (2024) Comparison of physical, optical, and chemical properties of aerosols from Asian dust and haze episodes observed at Anmyeon-do in 2018-2021, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 171-179, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.2.171>
- Jo, D.S., Park, R.J., Lee, S., Kim, S.-W., Zhang, X. (2016) A global simulation of brown carbon: Implications for photochemistry and direct radiative effect, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 3413-3432. <https://doi.org/10.5194/acp-16-3413-2016>
- Kang, Y., Choi, H., Kim, Y., Im, J. (2024) Understanding the impact of forest fire on ambient air quality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(1), 103-117, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.103>
- Kaskaoutis, D.G., Petrinioli, K., Grivas, G., Kalkavouras, P., Tzagarakaki, M., Tavernarakis, K., Papoutsidaki, K., Stavroulas, I., Paraskevopoulou, D., Bougiatioti, A., Liakakou, E., Rashki, A., Sotiropoulou, R.E.P., Tagaris, E., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N. (2024) Impact of peri-urban forest fires on air quality and aerosol optical and chemical properties: The case of the August 2021 wildfires in Athens, Greece, *Science of The Total Environment*, 907, 168028. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168028>
- Kim, D., Jeon, W., Park, J., Mun, J., Choi, H., Kim, C.-H., Lee, H.-J., Jo, H.-Y. (2022) A Numerical Analysis of the Changes in O<sub>3</sub> Concentration in a Wildfire Plume, *Remote Sensing*, 14(18), 4549. <https://doi.org/10.3390/rs14184549>
- Kim, J.H., Kim, S.W., Ogren, J.A., Sheridan, P.J., Yoon, S.C., Sharma, S., Lin, N.H. (2019) Multiple scattering correction factor estimation for aethalometer aerosol absorption coefficient measurement, *Aerosol Science and Technology*, 53(2), 160-171. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1555368>
- Kim, S.W., Yoon, S.C., Jefferson, A., Ogren, J.A., Dutton, E.G., Won, J.G., Ghim, Y.S., Lee, B.-I., Han, J.S. (2005) Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001, *Atmospheric Environment*, 39(1), 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.056>
- Kim, S.W., Yoon, S.C., Kim, J. (2008) Columnar Asian dust particle properties observed by sun/sky radiometers from 2000 to 2006 in Korea, *Atmospheric Environment*, 42(3), 492-504. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.055>
- Kim, S.W., Yoon, S.C., Kim, J., Kim, S.Y. (2007) Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements, *Atmospheric Environment*, 41(8), 1634-1651. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.044>
- Kim, S.W., Cho, C., Rupakheti, M. (2021) Estimating contributions of black and brown carbon to solar absorption from aethalometer and AERONET measurements in the

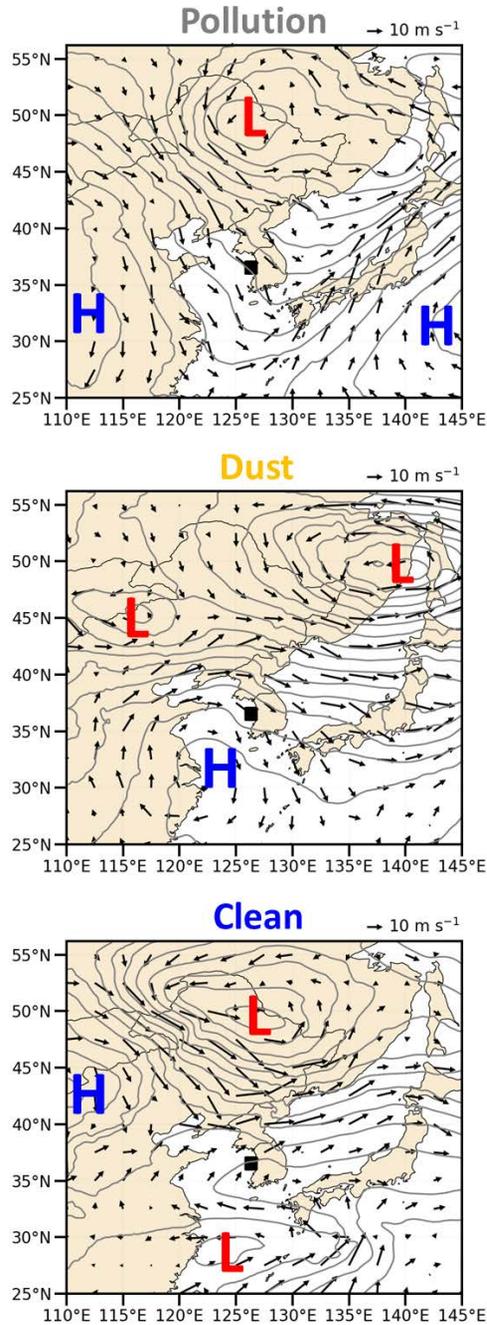
- highly polluted Kathmandu Valley, Nepal, *Atmospheric Research*, 247, 105164. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105164>
- Kim, Y., Kim, S.W., Yoon, S.C., Kim, M.H., Park, K.H. (2014) Aerosol properties and associated regional meteorology during winter pollution event at Gosan climate observatory, Korea, *Atmospheric Environment*, 85, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.11.041>
- Kwon, D.J., Park, J.S., Kim, H.J., Choi, J., Kim, S.W. (2024) Estimating the transboundary budget of sulfate aerosols in Northeast Asia with NASA MERRA aerosol reanalysis data, *Atmospheric Pollution Research*, 15(2), 101981. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101981>
- Lack, D.A., Bahreini, R., Langridge, J.M., Gilman, J.B., Middlebrook, A.M. (2013) Brown carbon absorption linked to organic mass tracers in biomass burning particles, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 2415-2422. <https://doi.org/10.5194/acp-13-2415-2013>
- Laskin, A., Laskin, J., Nizkorodov, S.A. (2015) Chemistry of atmospheric brown carbon, *Chemical Reviews*, 115 (10), 4335-4382. <https://doi.org/10.1021/cr5006167>
- Lee, H.Y., Ok, S., Kim, N., Lee, K., Jung, M., Shin, H.-J., Yang, J.-H., Jung, J. (2023). Intercomparison of light absorbing characteristics of brown carbon (BrC) according to analytical methods at a suburban site in Seosan, Chungnam during winter 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39 (6), 931-946, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.931>
- Lee, K.H., Kim, J.E., Kim, Y.J., Kim, J. (2004) Impact of the smoke aerosol from Russian forest fires on the atmospheric environment over Korea during May 2003, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(5), 603-613, (in Korean with English abstract).
- Lee, S., Yoon, S.C., Kim, S.W., Kim, Y.P., Ghim, Y.S., Kim, J.H., Kang, C.-H., Kim, Y.J., Chang, L.-S., Lee, S.J. (2012) Spectral dependency of light scattering/absorption and hygroscopicity of pollution and dust aerosols in Northeast Asia, *Atmospheric Environment*, 50, 246-254. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.026>
- Lee, S.-Y., Lee, H.-P. (2006) Analysis of Forest Fire Occurrence in Korea, *Fire Science and Engineering*, 20(2), 54-63.
- Lim, S., Lee, M., Kim, S.W., Laj, P. (2018) Sulfate alters aerosol absorption properties in East Asian outflow, *Scientific Reports*, 8, 5172 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23021-1>
- Liu, D., Li, S., Hu, D, Kong, S., Cheng, Y., Wu, Y., Ding, S., Hu, K., Zheng, S., Yan, Q., Zheng, H., Zhao, D., Tian, P., Ye, J., Huang, M., Ding, D. (2021) Evolution of aerosol optical properties from wood smoke in real atmosphere influenced by burning phase and solar radiation, *Environmental Science & Technology*, 47, 6349-6357. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07569>
- Martinsson, J., Eriksson, A.C., Nielsen, I.E., Malmberg, V.B., Ahlberg, E., Andersen, C., Lindgren, R., Nyström, R., ENordin, Z., Brune, W.H., Svenningsson, B., Swietlicki, E., Boman, C., Pagels, J.H. (2015) Impacts of combustion conditions and photochemical processing on the light absorption of biomass combustion aerosol, *Environmental Science & Technology*, 49(24), 14663-14671. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03205>
- May, N.W., Bernays, N., Farley, R., Zhang, Q., Jaffe, D.A. (2023) Intensive aerosol properties of boreal and regional biomass burning aerosol at Mt. Bachelor Observatory: larger and black carbon (BC)-dominant particles transported from Siberian wildfires, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(4), 2747-2764. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2747-2023>
- National Institute of Forest Science (NIFOS) (2023) 2023 Statistical Yearbook of Forest Fire. <https://forest.go.kr/>
- Park, D.H., Kim, J.E., Park, J.S., Choi, J.S., Kim, S.W. (2023) Impacts of the COVID-19 lockdown in China on new particle formation and particle number size distribution in three regional background sites in Asian continental outflow, *Science of The Total Environment*, 858, 159904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159904>
- Park, J.U., Kim, H.J., Choi, J., Park, J.S., Heo, J., Kim, S. W. (2021) Observation of aerosol size distribution and new particle formation under different air masses arriving at the northwesternmost South Korean island in the Yellow Sea, *Atmospheric Research*, 255, 105537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105537>
- Park, S., Han, S. (2022) Source apportionment of black carbon in PM<sub>2.5</sub> observed using a real-time seven-wavelength aethalometer at an urban site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 653-668, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.653>
- Pokhrel, R.P., Wagner, N.L., Langridge, J.M., Lack, D.A., Jayarathne, T., Stone, E.A., Stockwell, C.E., Yokelson, R.J., Murphy, S.M. (2016) Parameterization of single-scattering albedo (SSA) and absorption Angstrom exponent (A<sub>ÅE</sub>) with EC/OC for aerosol emissions from biomass burning, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(15), 9549-9561. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9549-2016>
- Schill, G.P., Froyd, K.D., Bian, H., Kupc, A., Williamson, C., Brock, C.A., Ray, E., Hornbrook, R.S., Hills, A.J., Apel, E.C., Chin, M., Colarco, P.R., Murphy, D.M. (2020) Widespread biomass burning smoke throughout the remote troposphere, *Nature Geoscience*, 13, 422-427. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0611-1>

- org/10.1038/s41561-020-0586-1
- Selimovic, V., Yokelson, R.J., McMeeking, G.R., Coefield, S. (2019) In situ measurements of trace gases, PM, and aerosol optical properties during the 2017 NW US wildfire smoke event, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(6), 3905-3926. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3905-2019>
- Selimovic, V., Yokelson, R.J., Warneke, C., Roberts, J.M., De Gouw, J., Reardon, J., Griffith, D.W. (2018) Aerosol optical properties and trace gas emissions by PAX and OP-FTIR for laboratory-simulated western US wildfires during FIREX, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2929-2948. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2929-2018>
- Shim, K., Kim, M.H., Lee, H.J., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kobayashi, H., Kim, C.-H., Kim, S.W. (2022) Exacerbation of PM<sub>2.5</sub> concentration due to unpredictable weak Asian dust storm: A case study of an extraordinarily long-lasting spring haze episode in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 287, 119261. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119261>
- Sokolik, I.N., Soja, A.J., DeMott, P.J., Winker, D. (2019) Progress and challenges in quantifying wildfire smoke emissions, their properties, transport, and atmospheric impacts, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(23), 13005-13025. <https://doi.org/10.1029/2018JD029878>
- Sun, D.-H., Song, S.-K., Cho, S.-B., Moon, S.-H. (2023) Long-term trend analysis in biomass burning emissions and their impacts on aerosols and CO concentrations in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(3), 351-371, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.3.351>
- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., Baltensperger, U. (2003) Absorption of light by soot particles: Determination of the absorption coefficient by means of aethalometers, *Journal of Aerosol Science*, 34(10), 1445-1463, (in Korean with English abstract). [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(03\)00359-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00359-8)
- Won, M.-S., Yoon, S., Koo, K.S., Kim, K.-H. (2011) Spatio-temporal analysis of forest fire occurrences during the dry season between the 1990s and 2000s in South Korea, *Journal of Korean Association of Geographic Information Studies*, 14, 150-162, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11108/kagis.2011.14.3.150>
- World Meteorological Organization (WMO) (2016) GAW Report No. 227, WMO/GAW Aerosol Measurement Procedures, Guidelines and Recommendations, World Meteorological Organization and Global Atmosphere Watch, Geneva, Switzerland, 93pp.
- Yan, J., Wang, X., Gong, P., Wang, C., Cong, Z. (2018) Review of brown carbon aerosols: Recent progress and perspectives, *Science of The Total Environment*, 634, 1475-1485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.083>
- Yu, G., Yu, J., Park, S.S. (2018) Estimation of Light Absorption by Brown Carbon Particles using Multi-wavelength Dual-spot Aethalometer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 207-222, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.207>

## Authors Information

- 박은호 (서울대학교 지구환경과학부 석사과정)  
(peh0508@snu.ac.kr)
- 김만해 (서울대학교 지구환경과학부 선임연구원)  
(manhae@snu.ac.kr)
- 한종현 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구원)  
(jh365@korea.kr)
- 유희정 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구사)  
(heejuyo@korea.kr)
- 양세환 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구사)  
(ysh82@korea.kr)
- 김수민 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구관)  
(sulla@korea.kr)
- 김영아 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 연구관)  
(kyababy2@korea.kr)
- 원덕진 (국립기상과학원 지구대기감시연구과 과장)  
(graupel@korea.kr)
- 김상우 (서울대학교 지구환경과학부 교수)  
(sangwookim@snu.ac.kr)

## Supplementary Materials



**Fig. S1.** ECMWF 850 hPa geopotential height and 850 hPa wind vectors during (a) pollution period (03 LST on 7 April), (b) dust period (00 LST on 13 April), (c) clean period (00 LST on 20 April).