

논문

광주지역 블랙카본 에어로졸 입자의 오염원 기여도 평가

Source Apportionment of Black Carbon in PM_{2.5} Observed Using a Real-time Seven-wavelength Aethalometer at an Urban Site of Gwangju

박승식*, 한새별

전남대학교 환경에너지공학과

Seungshik Park*, Saebyul Han

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

접수일 2022년 8월 5일
수정일 2022년 9월 1일
채택일 2022년 9월 2일

Received 5 August 2022
Revised 1 September 2022
Accepted 2 September 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)62-530-1863

E-mail : park8162@chonnamackr

Abstract In this study, light absorption coefficients of equivalent black carbon (eBC) in PM_{2.5} were observed for one year in 2019 using a real-time seven-wavelength aethalometer at an urban site of Gwangju to evaluate the contribution of fossil fuel (FF) combustion (BC_{FF}) and biomass burning (BB) (BC_{BB}) emissions to eBC concentration. The source apportionment of eBC was estimated using light absorption techniques, called the aethalometer model, which was proposed by Sandradewi *et al.* (2008). Daily average contribution of BC_{BB} to eBC concentration ranged from 4 to 66%. The concentration of eBC was generally dominated by FF emission sources during the study period, but there were also cases in which the influence of BB was dominant in winter. A seasonal clear diurnal pattern in BC_{FF}, which showed a sharp increase in the morning rush hour, then decreased, and showed a gradual increase in the evening rush hour, indicated that the diurnal variability of BC_{FF} was associated with the typical hourly traffic volume change trend in urban areas. On the other hand, there was no clear variability except for autumn and winter, which showed a slight increase in the morning and afternoon, in the hourly variation of eBC due to seasonal BB emission. Results of filter-based measurements performed as a case study (May 1~June 12, 2019) indicated the hourly contribution of BC_{BB} to BC during BB episode occurred at the site, in which 24-hr average OC, WSOC, K⁺, and Cl⁻ concentrations were highly enhanced, was in the range of 25~99% (a mean of 64%). Also the contribution of light absorption by brown carbon (BrC) particles to the total aerosol absorption at 370 nm wavelength ranged from 25 to 67% (a mean of 47%). However, the hourly contribution of BC_{BB} to eBC for the periods when only the concentrations of OC and EC increased without increasing K⁺ and Cl⁻ was in the range of 4~46% (a mean of 20%), suggesting that the measured eBC concentration at that period was strongly related to FF emissions. The contribution of BrC light absorption to the total aerosol absorption at 370 nm wavelength ranged from 10 to 30% (a mean of 20%). Results of the study suggest that it will be helpful in establishing a strategy to reduce BC particles emitted from urban areas. However, further modeling studies are needed to evaluate the effect of the reduction in the emission of BC particles in urban areas on the change in the concentration of PM_{2.5}.

Key words: Equivalent black carbon (eBC), Aethalometer model, BC source apportionment, Fossil fuel and biomass burning emissions

1. 서론

대기 입자상 물질 (particulate matter, PM)은 미세한 고체 또는 액체 입자로 이루어져 있으며, 1주 이상

의 긴 대기 체류시간으로 장거리 이동한다. 이들은 주요 대기 오염 물질로 알려져 있으며, 전 세계 기후 변화, 공중 보건 그리고 가시거리 악화에 영향을 미친다 (Kim *et al.*, 2015; Jacob and Winner, 2009). 대기 입자

중 중요한 요소인 탄소 입자는 크게 유기 탄소(organic carbon, OC)와 원소 탄소(elemental carbon, EC) 또는 블랙카본(black carbon, BC)으로 이루어져 있으며, 빛을 흡수 또는 산란시킴으로써 지구 기후에 중요한 역할을 한다(Geng *et al.*, 2020; Bahadur *et al.*, 2012). 이들 탄소 입자는 1차 배출 오염원(자동차 배기가스, 산업 활동 및 바이오매스 연소(biomass burning, BB))과 대기 중 2차 생성을 통해 발생한다(Conte *et al.*, 2020; Vicente and Alves, 2018; Yan *et al.*, 2018). 연소 배출원뿐만 아니라, 유기 에어로졸의 중요한 부분은 생물학적 배출원에서 기원한 휘발성유기화합물이다(Sarkar *et al.*, 2017; Kanakidou *et al.*, 2005). 그러나 탄소 입자의 시·공간적 분포의 큰 변동성은 기후 복사강제력 평가에서 가장 큰 불확도를 초래하는 요인으로 알려져 있으며, 인위적 배출 탄소 입자의 광학적 성질들의 불확도가 복사강제력 평가의 주요 요인으로 작용하고 있다. BC 입자는 대기 중 빛을 흡수하는 중요한 에어로졸로 알려져 있으며(Bond *et al.*, 2013), BB 외에도, 디젤 엔진, 산업용 석탄연소, 주거용 고체연료(목재, 농작물 잔류물 및 석탄)에서도 배출된다(Deng *et al.*, 2020). 일반적으로, BC는 인간의 건강에 대한 부정적인 영향뿐만 아니라, 지구 온난화, 빙하의 용융 그리고 대기 순환의 교란에 대한 기여 때문에 기후에 심각한 영향을 미치고 있다(Wang *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2016; Lüthi *et al.*, 2015). 하지만, OC 입자는 보통 빛을 산란시키는 에어로졸 유형으로 간주하지만, 자외선 또는 근·자외선 파장에서 빛을 강하게 흡수하는데 이 OC의 광흡수 분율을 갈색 탄소(brown carbon, BrC)로 특징짓는다(Pandey *et al.*, 2020; Laskin *et al.*, 2015; Andreae and Gelencsér, 2006). 기후 복사강제력 평가 시 대부분의 대기화학 수송모델들이 BC 입자에 의한 흡수만을 고려하는 사실에도 불구하고, 여러 연구에 의하면 복사강제력에 대한 BrC의 기여도 역시 중요함을 지적하였다(Zhang *et al.*, 2017; Saleh *et al.*, 2015; Shamjad *et al.*, 2015). 모델 시뮬레이션을 통해 평가한 BrC 흡수에 의한 복사강제력은 $+0.22 \sim +0.57 \text{ W/m}^2$ 로 BC 흡수에 의한 복사강제력의 27~

70%에 해당한다고 하였다(Lin *et al.*, 2014). 그러나 다양한 배출원 기원의 BrC 입자의 복잡한 화학적 조성에 의한 BrC 입자의 흡수를 정확하게 정량화하는 문제가 여전히 필요하다(Laskin *et al.*, 2015).

빛을 흡수하는 탄소 입자의 유형은 배출 오염원, 연소효율, 혼합 상태, 대기 숙성(atmospheric aging) 등에 의존하는 질량 흡수효율과 흡수옹스트룡지수(absorption Ångström exponents, AAE)에 의해 구분할 수 있다(Romano *et al.*, 2019; Pokhrel *et al.*, 2016; Stockwell *et al.*, 2016). 광흡수 성질에 대한 배출 오염원 특성 파악은 일반적으로 연소 관련 범주, 즉, 화석연료(fossil fuel, FF) 연소와 BB로 구분하여 수행하는데(Dumka *et al.*, 2018; Favez *et al.*, 2010; Sandradewi *et al.*, 2008), 여기서 FF 연소와 BB의 AAE 값은 일반적으로 1과 2를 적용한다. 각 연소 배출원에 적용된 다른 AAE 값은 이들의 광흡수 스펙트럼에 대한 다른 파장 의존성에 기인한다. 경유 자동차 배출이 지배적인 BC 입자는 스펙트럼 의존성이 약하지만(AAE ≈ 1), BB 배출 에어로졸 입자의 경우는 근·자외선 파장 범위($< 400 \text{ nm}$)에서 강한 스펙트럼 의존성(AAE > 2.0)을 가진다(Kirchstetter *et al.*, 2004). 현재까지 BC 입자의 배출 오염원에 대한 기여도 평가는 다파장 aethalometer로부터 측정된 에어로졸 입자의 전체 흡수계수로부터 BrC 입자를 분리하는 방법을 이용하여 광범위하게 진행되어 왔다(Rajesh *et al.*, 2021; Dumka *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2019; Healy *et al.*, 2017; Briggs and Long, 2016; Sciare *et al.*, 2011; Sandradewi *et al.*, 2008; Kirchstetter *et al.*, 2004). 예를 들어, 스위스 로베르토 지역에서 수행된 연구에서는 측정된 eBC(equivalent BC) 농도에 대한 BB의 평균 기여도는 약 12%라고 보고하였으며(Sandradewi *et al.*, 2008), 스위스 도심 및 시골 지역에서 BB의 평균 기여도는 24~30%로 추정하였다(Herich *et al.*, 2011). 또한, Xiao *et al.* (2020)이 중국 난징 장베이현 지역에서 수행한 결과에서는 eBC 입자에 대한 BB의 기여도는 약 19%라고 하였다. 그러나 국내에서는 여러 환경에서 aethalometer와 용매 추출법을 이용해 BrC 입자의

광흡수 특성에 관한 연구를 다양하게 수행해 왔지만 (Park *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2020, 2018a; Yu *et al.*, 2019, 2018a, 2018b), BC의 오염원 기여도를 연료의 연소 배출원 관점에서 평가한 연구는 전혀 없었다. BC의 오염원 기여도 평가와 별개로 국내에서 수행된 eBC와 관련된 연구 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다. 서울 송파구 올림픽공원에서 2016년 5월~6월에 43일 동안 Multi Angle Absorption Photometer (MAAP, eBC)와 OCEC 탄소 분석기로 측정된 PM_{2.5} 내 eBC와 EC의 평균 질량농도는 각각 2.46 ± 1.52 와 1.01 ± 0.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. eBC 농도는 평균적으로 PM_{2.5}의 8.3%를 차지하였다 (Jeong *et al.*, 2017). 또한 본 연구와 동일한 장소에서 2016년 11월~2017년 12월 사이에 7파장 aethalometer로 측정된 eBC의 평균 농도는 1.9 ± 1.2 ($0.3 \sim 7.4$) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 PM_{2.5}의 7.3%를 차지하였다 (Park *et al.*, 2018b). Single particle soot photometer (SP2)와 aethalometer를 이용해 제주도에서 2013년 5월에 측정된 내화성 BC (refractory BC, rBC (PM_{1.0}))와 eBC의 평균 질량농도는 각각 0.69 ± 0.48 과 0.76 ± 0.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 PM_{2.5}의 2.4와 2.7%를 차지하였다 (Oh *et al.*, 2015). 또한, 서울시의 불광동 (2018년 9월)과 성북구 고려대학교 (2019년 여름)에서 측정된 rBC와 EC의 평균 질량농도는 각각 0.32 ± 0.18 과 0.34 ± 0.18 (Park *et al.*, 2019), 0.58 ± 0.32 와 0.82 ± 0.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Lim *et al.*, 2019)이었다. 두 서울 지역에서 측정된 rBC의 평균 질량농도는 각각 PM_{2.5}의 2.7%와 3.2%를 차지하였다. 따라서 본 연구에서는 광주 도심지점에서 다파장 aethalometer로부터 1년 동안 측정된 PM_{2.5}의 전체 광흡수계수를 이용해 eBC 입자의 스펙트럼 흡수계수에 대한 FF 연소와 BB 오염원 기여도를 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 PM_{2.5}의 실시간 광흡수계수 측정

PM_{2.5}의 스펙트럼 흡수계수 측정은 광주광역시 전남대학교 내 공과대학의 한 건물 3층 옥상에서 dual-

spot 7파장 (370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm, 950 nm) aethalometer (AE33, Aerosol d.o.o., Slovenia)를 이용하여 1분 간격으로 2019년 1월 1일~12월 31일까지 1년간 수행하였다. 본 연구에서 사용한 dual-spot 7파장의 aethalometer에 대한 측정 원리와 파장별 광흡수계수 계산 방법은 기존의 많은 연구 논문들에 상세히 설명되어 있다 (Park *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019, 2018a, 2018b; Drinovec *et al.*, 2015). 본 논문에서 aethalometer를 이용해 측정된 광흡수계수로부터 계산한 BC 농도를 등가 농도 (equivalent BC, eBC)로 표현한다. AE33 기기의 측정자료로 계산한 에어로졸 입자의 광흡수계수와 eBC 농도의 불확도는 기기 변동성 (10%)과 산란입자에 대한 기기의 교차 감도 (cross-sensitivity to the scattering, 10%) (Healy *et al.*, 2017; Drinovec *et al.*, 2015)의 오차 전파에 의해 약 15%로 조사되었다. 측정지점은 편도 2차선 도로로부터 약 130 m 거리에 있으며, 출·퇴근 시간에 교통량이 급격히 증가하는 전형적인 도심의 오염 특성을 보이는 장소이다. 그리고 측정지점 주변에는 다수의 소규모 식당가와 주거지역이 존재하며, 북쪽으로 약 650 m에 6차선의 호남고속도로가 있다. 또한, 약 20 km 반경에 농촌 지역이 있으며, 북쪽으로 약 8 km 지점에 농경지가 있다.

2.2 24시간 평균 PM_{2.5} 측정과 화학적 성분 분석

연구에서는 PM_{2.5} 입자의 파장별 흡수계수의 실시간 관측과 별개로 BB 이벤트가 발생한 특정 기간 (2019년 5월 1일~6월 12일)에 동일한 장소에서 24시간 기준의 PM_{2.5} 시료를 채취하였다. PM_{2.5} 시료는 1대의 고용량 채취기 (TE-6070, TISCH Environmental, USA, 1.13 m³/min)와 1대의 저용량 채취기 (PMS-204, APM Engineering, Korea, 16.7 L/min)로 오전 9시에서 다음날 오전 8시 50분까지 약 24시간 동안 채취하였다. 고용량과 저용량 채취기에서 사용한 여지는 각각 20.3 cm × 25.4 cm 크기의 석영 필터 (Quartz microfiber filters, Whatman, USA)와 테플론 필터 (Teflo™, 2 μm pore size, Pall, USA)이다.

PM_{2.5} 시료 채취 후 OC와 EC 성분은 전체 석영 필터 중 한 장의 47 mm 직경의 필터를 절단한 후 이 중에서 1.5 cm²의 면적을 정량적 분석에 사용하였다. 분석은 NIOSH5040 온도 프로토콜 기반의 열-광학 투과법을 적용하는 OC/EC 분석기(OC/EC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset Laboratory, USA)를 이용하여 정량화하였다. 그리고 OC와 EC를 분석하고 남은 잔여 필터는 20 mL의 초순수를 이용해 상온에서 약 60 분 동안 초음파 추출을 진행하였다. 추출액은 0.25 µm 기공 크기의 실린지 필터로 여과한 후 총 유기 탄소(total organic carbon) 분석기(TOC-LCPH, Shimadzu, Japan)로 수용성 유기 탄소(water-soluble OC, WSOC) 성분을 분석하였다. 저용량 채취기의 테플론 필터에 채취된 시료는 이온 성분들을 분석하는 데 사용하였으며, 필터를 20 mL의 초순수로 초음파 추출하여 0.25 µm의 실린지 필터로 여과시킨 후 이온크로마토그래피(930 Compact IC Flex, Metrohm AG, Switzerland)를 사용하여 8종의 이온 성분(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻)을 분석하였다.

2.3 BC 입자의 배출 오염원 기여도 평가

현재까지 대기 중 BC 입자에 대한 FF 연소와 BB 배출원을 정량적으로 구분하는 aethalometer 모형이 폭넓게 사용되어 왔다(Kant *et al.*, 2020; Healy *et al.*, 2019; Mousavi *et al.*, 2019; Helin *et al.*, 2018; Vaishya *et al.*, 2017; Sandradewi *et al.*, 2008; Kirchstetter *et al.*, 2004). 이 모형은 AAE로 정의되는 광흡수계수의 파장 의존성을 기초로 한다. 본 연구에서 BC 입자에 대한 각 연소 배출원의 기여도 평가는 Sandradewi *et al.* (2008)이 제안한 aethalometer 모형을 기초로 하였다. 이전 연구에 의하면, 도심의 FF 연소 배출 에어로졸에 대한 AAE 값은 ~1.0인 반면에, BB 에어로졸에 대해서는 > 1.35를 초과하며 BB 배출원에 따라 달라지는 것으로 보고되고 있다(Healy *et al.*, 2019; Jain *et al.*, 2018; Cheng and Yang, 2016; Russell *et al.*, 2010). 즉, AAE 값이 BB 배출의 존재 여부를 결정하기 위한 지시자로 사용된다. 본 연구에서 AAE 값은 식 (1)과 같이 aethalo-

meter의 측정자료로부터 결정할 수 있다.

$$AAE_{370-880} = \frac{\ln(b_{abs,370}/b_{abs,880})}{\ln(880/370)} \quad (1)$$

여기서, $b_{abs,370}$ 과 $b_{abs,880}$ 은 각각 370 nm와 880 nm의 파장에서 에어로졸의 흡수계수이다. FF 연소로부터 배출되는 BC 입자의 광흡수는 약한 파장 의존성을 가지고(880 nm), BB로부터 배출되는 BC 입자의 광흡수는 짧은 파장에서 강한 파장 의존성을 가지기 때문에(370 nm) 두 가지 파장을 설정하였다. 추가로 FF 연소와(BC_{FF})와 BB 배출(BC_{BB})에 대한 BC 입자의 기여 농도는 다음의 BC 오염원 기여도 모형(식 (2)~(9))을 사용해 평가하였다(Deng *et al.*, 2020; Healy *et al.*, 2019; Mousavi *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2018; Zotter *et al.*, 2017; Favez *et al.*, 2010; Sandradewi *et al.*, 2008).

$$b_{abs,370} = b_{abs,370,FF} + b_{abs,370,BB} \quad (2)$$

$$b_{abs,880} = b_{abs,880,FF} + b_{abs,880,BB} \quad (3)$$

$$\frac{b_{abs,370,FF}}{b_{abs,880,FF}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-AAE_{FF}} \quad (4)$$

$$\frac{b_{abs,370,BB}}{b_{abs,880,BB}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-AAE_{BB}} \quad (5)$$

$$f_{FF}(\%) = \frac{b_{abs,880,FF}}{b_{abs,880}} \quad (6)$$

$$f_{BB}(\%) = 1 - f_{FF} \quad (7)$$

$$BC_{FF} = eBC \times f_{FF} \quad (8)$$

$$BC_{BB} = eBC \times f_{BB} \quad (9)$$

식 (4)와 (5)에서, AAE_{FF}와 AAE_{BB}는 FF 연소와 BB 배출 오염원에 대한 AAE 값을 나타낸다. 이전 연구에서는, BC 오염원 기여도 모형을 이용한 AAE_{FF}와 AAE_{BB} 값들로 각각 0.9~1.1과 1.7~2.2이 가장 일반적으로 사용되었다(Anand and Phuleria, 2021; Deng *et al.*, 2020; Healy *et al.*, 2019; Mousavi *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2018; Zotter *et al.*, 2017; Sciare *et al.*, 2011; Favez *et al.*, 2010; Sandradewi *et al.*, 2008). 그러나, 본 연구에서는 AAE_{FF}와 AAE_{BB}로 1.0과 2.0의 경험적인 값을 채택하였다.

그리고 식 (2)와 (3)에서 $b_{abs,370,FF}$ 와 $b_{abs,880,FF}$ 는 370 nm와 880 nm의 파장에서 FF 연소 에어로졸의 흡수계수를 나타낸다. 변수 $b_{abs,370,BB}$ 와 $b_{abs,880,BB}$ 는 370 nm와 880 nm의 파장에서 BB 에어로졸의 흡수계수이다. 그러면, 식 (6)을 푸는 데 필요한 $b_{abs,880,FF}$ 는 aethalometer를 이용한 $b_{abs,370}$ 과 $b_{abs,880}$ 의 측정값들과 식 (2)~(5)를 이용해 계산할 수 있다. 식 (6)과 (7)의 f_{FF} (%)와 f_{BB} (%)는 각각 FF 연소와 BB 배출원에 의한 BC 입자의 기여율을 나타낸다. 만약 AAE 값이 1.0보다 작으면, BC 입자의 배출은 100% FF 연소와 관련되어 있으므로 f_{BB} (%)는 0.0으로 처리하였다. 반면에, AAE 값이 >2.0이면, BC의 기여율은 전부 BB 배출에 의한 것으로 간주하여 BC 오염원 기여도 평가 모형에서 f_{BB} (%)는 1.0으로 처리하였다. 식 (8)과 (9)에서 BC_{FF} 와 BC_{BB} 는 880 nm의 파장에서 FF 연소와 BB 오염원에 의해 배출된 BC 입자의 농도를 가리킨다. FF와 BB 배출원에 대한 AAE 값 변화에 따른 두 배출원 BC 기여도의 민감도를 평가하였다. 2019년 1월 측정자료에 대해서 민감도를 분석한 결과에 의하면 다음과 같다; ① $AAE_{FF}=1.0$ 을 $AAE_{FF}=1.1$ ($AAE_{BB}=2.0$)으로 변경 시 $\%BC_{FF}$ 는 평균적으로 67 ± 7 (53~82)%에서 63 ± 6 (50~77)%로 감소하였지만, $\%BC_{BB}$ 는 33 ± 7 (18~47)%에서 37 ± 6 (23~50)%로 약간 증가하였다. ② $AAE_{BB}=2.0$ 을 $AAE_{BB}=1.8$ ($AAE_{FF}=1.0$)으로 변경 시 $\%BC_{FF}$ 는 평균적으로 67 ± 7 (53~82)%에서 47 ± 8 (31~64)%

로 감소하였지만, $\%BC_{BB}$ 는 33 ± 7 (18~47)%에서 53 ± 8 (36~69)%로 증가하였다. ③ $AAE_{BB}=2.0$ 을 $AAE_{BB}=2.2$ ($AAE_{FF}=1.0$)으로 변경 시 $\%BC_{FF}$ 는 평균적으로 67 ± 7 (53~82)%에서 84 ± 6 (72~96)%로 증가하였지만 $\%BC_{BB}$ 는 33 ± 7 (18~47)%에서 16 ± 6 (4~28)%로 eBC 농도에 대한 BB 배출원의 기여율이 약 50% 감소하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 광흡수계수와 eBC 농도의 일별 및 계절별 변동성

그림 1은 2019년 1월 1일에서 12월 31일까지 370 nm ($b_{abs,370}$)와 880 nm ($b_{abs,880}$)의 파장에서 측정된 일 평균 에어로졸 입자의 전체 광흡수계수를 나타낸다. 그리고 880 nm에서 측정된 eBC 입자의 일 평균 농도를 나타내었다. 표 1에 계절별 및 월별 평균의 $b_{abs,370}$ 와 $b_{abs,880}$, eBC 농도, eBC에 대한 배출원 기여율을 정리하였다. 일 평균 $b_{abs,370}$ 과 $b_{abs,880}$ 은 각각 $4 \sim 118 \text{ Mm}^{-1}$ 와 $1 \sim 38 \text{ Mm}^{-1}$ 으로 분포하였으며, 두 파장에서 측정된 에어로졸 입자의 최대 광흡수계수는 다른 날에 나타났다. $b_{abs,370}$ 과 $b_{abs,880}$ 의 최대 값은 각각 바이오매스 연기가 관측된 6월 5일 (118 Mm^{-1} , 3.3절에서 사례 연구로 논의)과 겨울철에 해당하는 12월 10일

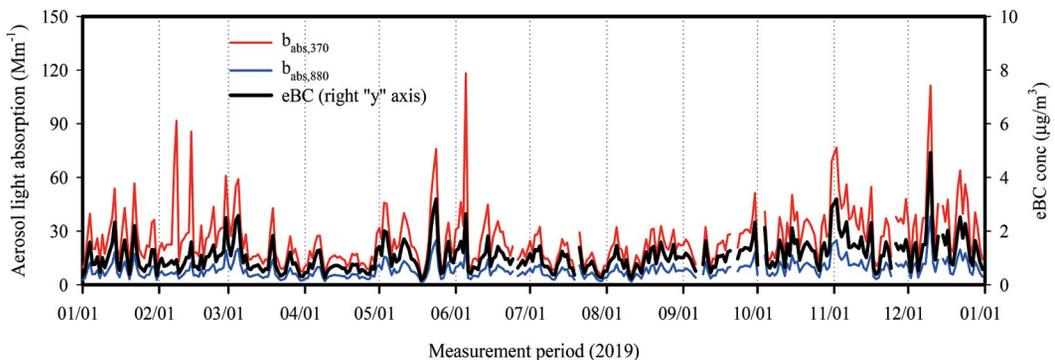


Fig. 1. Temporal variations of daily average $b_{abs,370}$, $b_{abs,880}$, and eBC during the study period.

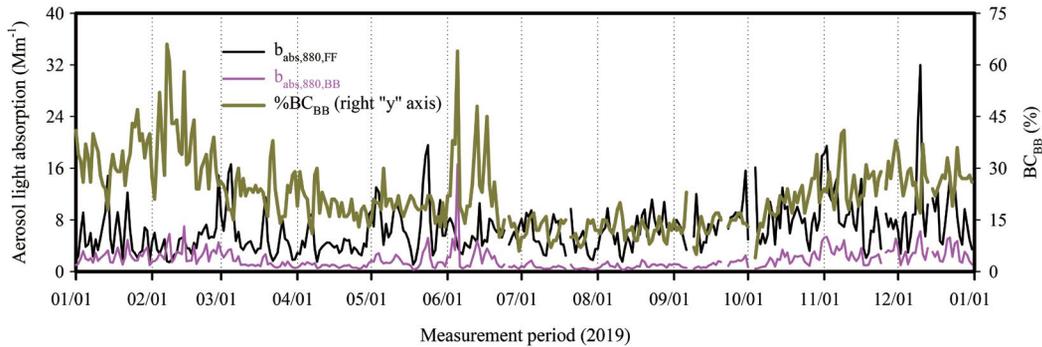


Fig. 2. Temporal variations of daily average $b_{\text{abs},880,\text{FF}}$, $b_{\text{abs},880,\text{BB}}$, and $\%BC_{\text{BB}}$ during the study period.

Table 1. Monthly summary of daily average $b_{\text{abs},370}$, $b_{\text{abs},880}$, eBC concentration, and contributions of emission sources to eBC.

Month	$b_{\text{abs},370}$ (Mm^{-1})	$b_{\text{abs},880}$ (Mm^{-1})	eBC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\%BC_{\text{FF}}$ (%)	$\%BC_{\text{BB}}$ (%)
Jan.	27 ± 12 (10~57)	8 ± 4 (3~18)	1.0 ± 0.5 (0.3~2.3)	67 ± 7 (53~82)	33 ± 7 (18~47)
Feb.	32 ± 20 (13~92)	8 ± 3 (3~19)	1.0 ± 0.4 (0.4~2.5)	63 ± 12 (34~79)	37 ± 12 (21~66)
Mar.	20 ± 13 (7~59)	7 ± 4 (2~20)	0.9 ± 0.6 (0.3~2.6)	77 ± 6 (62~86)	23 ± 6 (14~58)
Apr.	15 ± 5 (6~29)	5 ± 2 (2~10)	0.7 ± 0.3 (0.3~1.3)	81 ± 4 (70~89)	19 ± 4 (11~30)
May	27 ± 16 (4~76)	9 ± 5 (1~25)	1.2 ± 0.7 (0.2~3.2)	81 ± 3 (70~87)	19 ± 3 (13~30)
June	27 ± 21 (9~118)	8 ± 4 (3~21)	1.0 ± 0.5 (0.4~2.6)	76 ± 13 (36~93)	24 ± 13 (7~64)
July	16 ± 7 (6~32)	6 ± 3 (2~11)	0.7 ± 0.3 (0.3~1.4)	88 ± 3 (83~93)	12 ± 3 (7~17)
Aug.	21 ± 7 (5~33)	7 ± 3 (2~12)	1.0 ± 0.3 (0.2~1.6)	87 ± 3 (80~92)	13 ± 3 (8~20)
Sept.	24 ± 9 (10~51)	9 ± 3 (3~18)	1.1 ± 0.4 (0.5~2.3)	86 ± 4 (77~95)	14 ± 4 (5~23)
Oct.	30 ± 12 (13~69)	10 ± 4 (4~23)	1.3 ± 0.5 (0.5~2.9)	80 ± 6 (66~96)	20 ± 6 (4~34)
Nov.	35 ± 12 (10~56)	11 ± 4 (3~18)	1.4 ± 0.5 (0.4~2.3)	73 ± 6 (59~82)	27 ± 6 (18~41)
Dec.	39 ± 22 (13~111)	12 ± 7 (4~38)	1.6 ± 0.9 (0.5~4.9)	73 ± 4 (63~83)	27 ± 4 (17~37)

(38 Mm^{-1})이었다. 6월 5일에 조사된 일 평균 $b_{\text{abs},880}$ 은 21 Mm^{-1} 이었으며, 12월 10일에 조사된 $b_{\text{abs},370}$ 은 111 Mm^{-1} 이었다. 일 평균 eBC 농도는 $0.2 \sim 4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 $5.6 \pm 2.8\%$ (1.9~14.9%)를 차지하였다. 그리고 12월 10일에 최대 값이 측정되었으며, BB 연소가 심했던 6월 5일에는 $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 봄, 여름, 가을 및 겨울의 평균 eBC 농도는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 4.3 ± 1.9 , 5.5 ± 2.2 , 8.4 ± 2.5 , $4.7 \pm 2.5\%$ 를 차지하였다. 여기서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 측정지점으로부터 약 2 km 떨어진 두암동 보건지소 도시대기측정망에서 측정된 자료이다. 계절적으로 $b_{\text{abs},370}$ 와 $b_{\text{abs},880}$ 는 겨울(1월, 2월, 12월)에 가장 높았으나, 가을(9월~11월)과 거의 유사하였다. $b_{\text{abs},370}$, $b_{\text{abs},880}$ 그리고 eBC의 일 평균값은 각각 15 (4

월)~ 39 Mm^{-1} (12월), 5 (4월)~ 12 Mm^{-1} (12월), 0.7 (4월)~ $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (12월)으로, 여름보다는 겨울에 높았으며 12월에 가장 높았다.

3.2 eBC 입자의 배출 오염원 기여도 평가

그림 2는 aethalometer 모형(식 (2)~(9))을 이용해 평가한 880 nm의 파장에서 FF 연소($b_{\text{abs},880,\text{FF}}$)와 BB 배출원($b_{\text{abs},880,\text{BB}}$)에 대한 에어로졸 입자의 전체 광흡수계수와 eBC 농도에 대한 BB 배출원의 기여율($\%BC_{\text{BB}}$)의 일 평균 추이를 나타낸다. $b_{\text{abs},880,\text{FF}}$ 와 $b_{\text{abs},880,\text{BB}}$ 의 일 평균은 각각 $1.1 \sim 32$ 와 $0.3 \sim 17 \text{ Mm}^{-1}$ 으로 일반적으로 겨울에 높고 여름에 낮은 값을 나타내었다. $b_{\text{abs},880,\text{FF}}$ 와 $b_{\text{abs},880,\text{BB}}$ 의 최대 값은 각각 12월 10

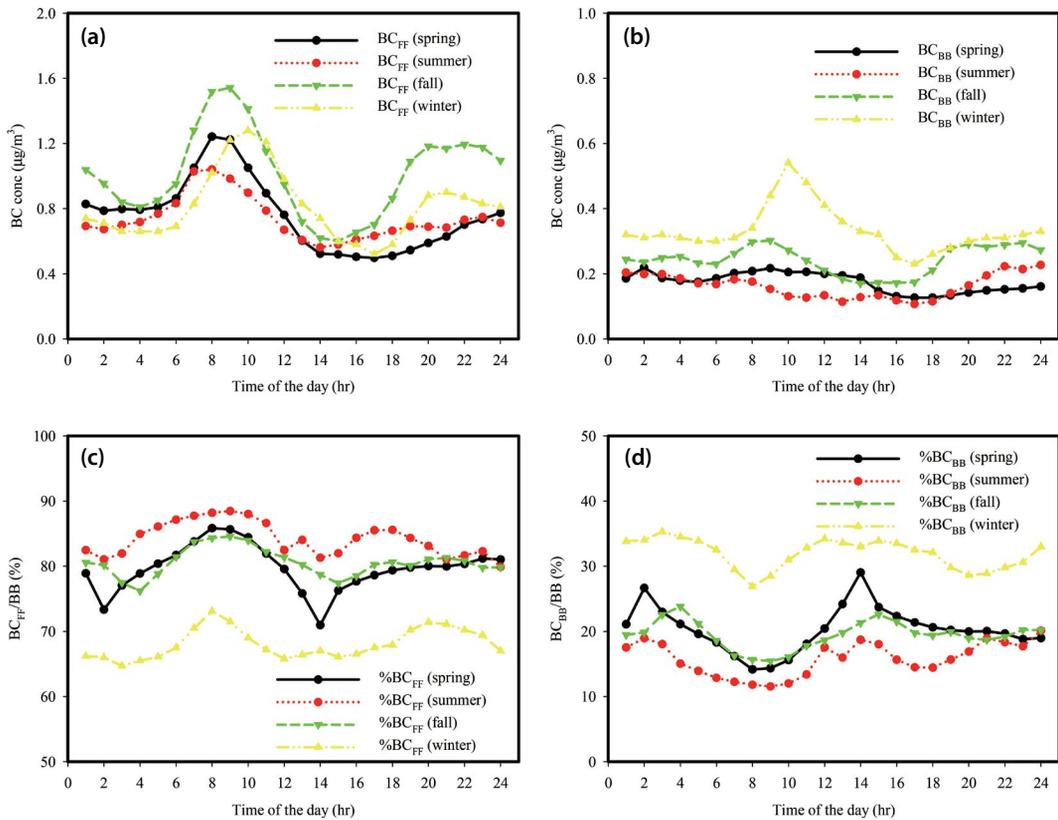


Fig. 3. Diurnal patterns of seasonal average BC_{FF} , BC_{BB} , $\%BC_{FF}$, and $\%BC_{BB}$.

일과 6월 5일에 관측되었다. 연구 기간 중 측정지점의 eBC 농도는 FF 연소 배출원에 의한 영향이 지배적이었으나, 겨울철에는 BB에 의한 영향이 우세한 때도 간혹 발생하였다. eBC 농도에 대한 BB 배출원의 일 평균 기여율은 4~66%로 평가되었으며 최대 값은 2월 7일에 조사되었다. 뚜렷한 BB의 영향이 관측된 6월 5일에는 64%의 eBC 농도가 BB 배출원에 의한 영향으로 평가되었다(표 1). eBC 농도에 대한 BC_{BB} 의 겨울, 봄, 여름 및 가을의 평균 기여율은 각각 32, 20, 16, 20%로 겨울철에 BB의 영향이 가장 크게 나타났다. 월별로는 2월에 37%로 가장 높았고 7월에 12%로 가장 낮았다(표 1). 즉, 여름철에는 측정된 eBC 농도의 대부분이 FF 연소 배출원과 관련이 있었음을 의미한다.

그림 3은 eBC_{FF} , eBC_{BB} , $\%BC_{FF}$ 그리고 $\%BC_{BB}$ 의 계

절별 평균에 시간별 변동성을 보여준다. 계절별로 분석한 FF 연소에 의한 eBC 농도(BC_{FF})의 시간별 변동성(그림 3(a))은 절대 농도의 차이는 있으나 추이는 매우 유사하였다. 즉, 아침 출근 시간에 급격한 증가를 한 후 감소하다가 저녁 퇴근 시간에 완만한 증가 추이를 보였다. 이는 도시지역의 전형적인 시간별 교통량의 변화 추이와 유사하다. 반면에 계절별 BB 배출에 의한 eBC 농도(BC_{BB})의 시간별 변동 추이(그림 3(b))는 오전과 저녁 시간에 약간 증가하는 경향을 보이는 가을과 겨울 외에는 뚜렷한 변동성을 확인할 수 없었다. 즉, eBC 농도에 대한 BB 배출원의 영향은 기온이 낮은 계절에 더 크다고 볼 수 있다. 계절별 eBC 농도에 대한 FF 연소와 BB 배출 농도의 시간별 비율(그림 3(c)와 3(d))은 각 배출원에 의한 eBC의 시간별 추이

와 매우 유사하였으나, FF 연소에 의한 eBC 농도의 기여율은 다른 계절과 비교해 겨울철에 가장 낮았고 BB 배출에 의한 eBC 농도의 기여율은 겨울에 가장 높았다. 봄, 여름, 가을 및 겨울의 %BC_{FF}의 평균 기여율은 각각 80, 84, 80, 68%였으며, %BC_{BB}의 평균 기여율은 각각 20, 16, 20, 32%였다.

3.3 사례 연구

그림 4는 2019년 5월 1일~6월 12일까지 24시간 기준의 필터법으로 측정된 탄소 성분(OC, WSOC 및 EC)(그림 4(a))과 2종의 이온 성분(K⁺, Cl⁻)(그림 4(b))의 농도 추이를 나타낸다. K⁺와 Cl⁻ 성분은 BB 배출원의 추적자 물질로 알려져 사례 연구 기간 중 측정된 대기 에어로졸 입자에 농업 잔재물의 소각(K⁺와 Cl⁻)을 포함한 BB의 영향 여부를 판단하기 위하여 나타내었다. 또한, 그림 4(c)에 FF 연소와 BB 배출원에 의한 광흡수계수($b_{abs,880,FF}$, $b_{abs,880,BB}$)와 BB에 의한 eBC 농도의 기여율(%BC_{BB})을 시간 평균으로 나타내었다. 대기 중 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수는 세 가지 구성 요소(BC, BrC 및 무기 물질(mineral dust))에 의한 광흡수의 합으로 평가한다. 그러나 황사 먼지와 같은 대량의 무기 물질의 양(>100×BC 농도)이 에어로졸 입자에 포함되어 있지 않으면 무기 물질에 의한 광흡수는 무시할 수 있으므로 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수는 BC와 BrC의 광흡수의 합(식 (10))으로 표현할 수 있다.

$$b_{abs,\lambda} = BCb_{abs,\lambda} + BrCb_{abs,\lambda} \quad (10)$$

만약 880 nm 이상의 파장에서 에어로졸 입자에 의한 광흡수가 BC에 의해서만 일어난다고 가정하면, 880 nm 이하 파장에서 BC 입자에 의한 광흡수계수는 식 (11)을 이용해 산정할 수 있다(Park *et al.*, 2022). 여기서 BC 입자의 AAE_{BC}는 1.0으로 가정하였다(Laskin *et al.*, 2015).

$$BCb_{abs,\lambda} = \left(\frac{b_{abs,880} + b_{abs,950}}{2} \right) \times \left(\frac{\lambda}{880 + 950} \right)^{-AAE_{BC}} \quad (11)$$

그림 4(d)에 aethalometer로 측정된 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자의 전체 광흡수계수($b_{abs,370}$)와 상기의 알고리즘(식 (10)과 (11))으로 370 nm의 파장에서 산정한 BC와 BrC 입자의 시간별 광흡수계수를 나타내었다. 여기서 370 nm의 파장을 나타낸 이유는 BrC 입자의 광흡수 성질이 BC와 달리 강한 파장 의존성을 가지며 근-자외선 파장에서 가장 많은 빛을 흡수하는 물질이기 때문이다. 그림 4(e)는 두 파장 범위(370~880 nm와 370~520 nm)에서 계산한 두 AAE 값(AAE₃₇₀₋₈₈₀, AAE₃₇₀₋₅₂₀)을 나타낸다. 별도로 AAE₃₇₀₋₅₂₀을 표현한 이유는 근-자외선 및 가시광선 파장에서 에어로졸 입자 내 BrC의 존재 여부를 판단하기 위함이다.

그림 4(a)의 24시간 평균(09:00~08:50) 탄소 성분의 농도 추이를 보면, 5월 9~12일, 5월 23~24일, 6월 5일에 세 번의 농도 증가 현상이 관측되었다. 그림 5는 세 기간의 동북아시아 지역의 MODIS 산불 발생 영상(<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map>)과 세 고도(500, 1,000 및 1,500 m)에서 평가한 기단의 역궤적 계산 결과를 보여준다. 외부에서 측정지점으로 기단의 유입 경로를 파악하기 위하여 NOAA에서 제공하는 Hysplit 모델(https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)을 이용하여 측정 일을 기준으로 3일 간격의 공기 역궤적 계산을 수행하였다(Rolph *et al.*, 2017). 첫 번째 기간(5월 9일~12일)의 OC, WSOC 및 EC의 24시간 평균 농도는 각각 10.4~15.0, 5.9~7.3, 1.2~1.7 μgC/m³이었으며, 산불이나 농업 잔재물 소각의 추적자로 알려진 K⁺와 Cl⁻의 농도는 각각 0.10~0.16, 0.04~0.12 μg/m³으로 매우 낮았다. 차량과 BB 배출원 추적자 성분들 사이의 농도 비, 즉, WSOC/K⁺, EC/K⁺ 및 K⁺/Cl⁻는 각각 37~57, 7.5~11.7, 1.3~4.3이었다. 이 기간에 측정된 탄소 성분과 K⁺와 Cl⁻의 농도 수준과 해양에서 유입되는 기단의 유입 경로(그림 5(a))를 고려하면 탄소 입자들은 BB 배출원에 의한 영향보다는 국지적인 자동차 배기가스의 영향이 지배적인 경우에 해당된다고 볼 수 있을 것이다. 이때 eBC 농도에 대한 BB 배출원의 영향(BC_{BB}, %)은 18~22%로 FF 연소에

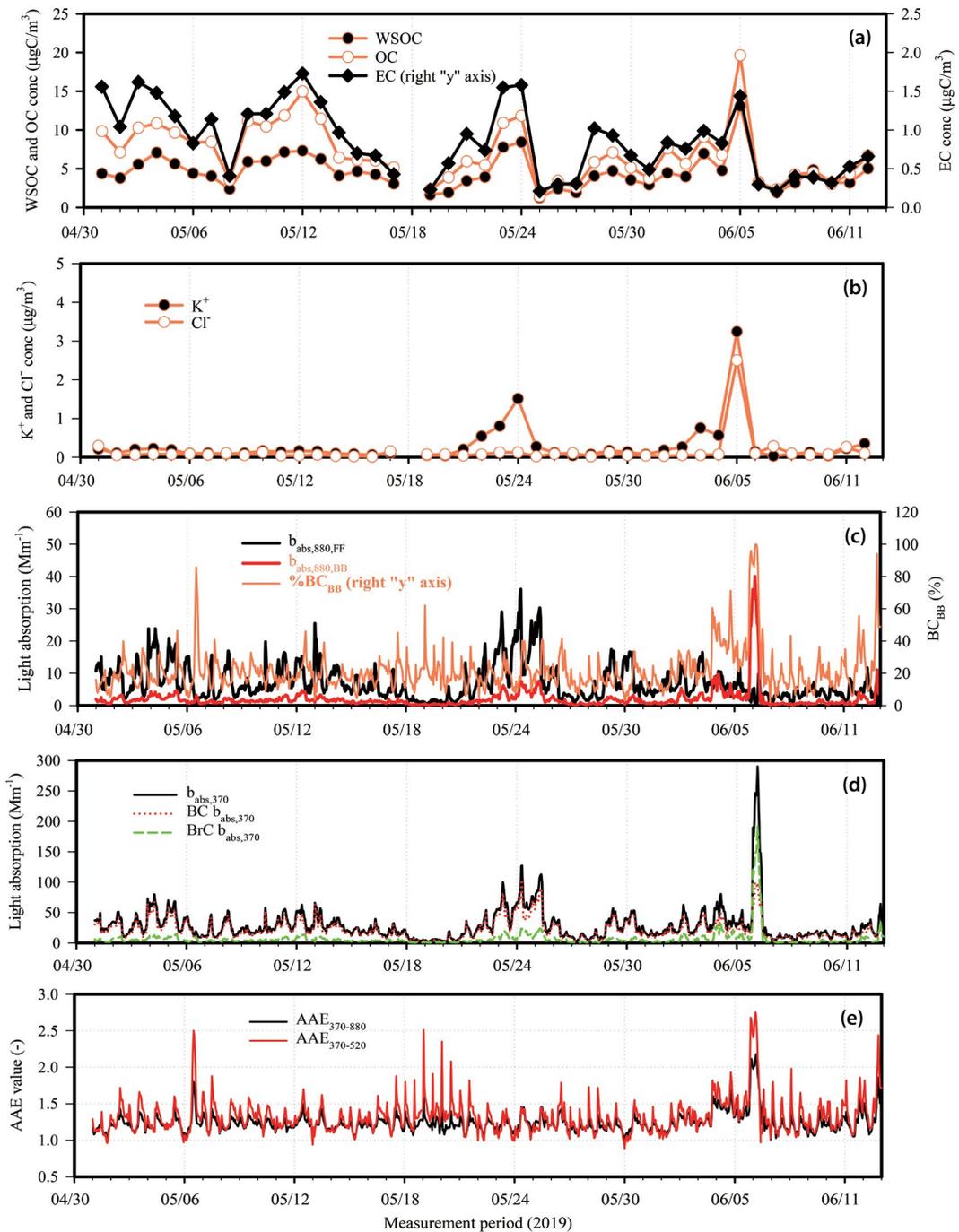


Fig. 4. Temporal variations of (a) WSOC, OC, and EC, (b) K^+ and Cl^- , (c) absorption coefficients at 880 nm ($b_{\text{abs},880,\text{FF}}$ and $b_{\text{abs},880,\text{BB}}$) and $\% \text{BC}_{\text{BB}}$, (d) absorption coefficients ($b_{\text{abs},370}$, $\text{BC } b_{\text{abs},370}$, and $\text{BrC } b_{\text{abs},370}$), and (e) two AAE values measured during spring intensive measurement period.

의한 BC의 배출이 지배적이었음을 알 수 있다. 370 nm에서 에어로졸, eBC 및 BrC 입자에 의한 24시간 평균 광흡수계수는 각각 22~40, 18~32, 4.3~8.2 Mm^{-1} 이었다. 또한, 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 입자에 의한 광흡수가 차지하는 비중은 18.5~21.3%였다. $\text{AAE}_{370-880}$ 과 $\text{AAE}_{370-520}$ 은 각각 1.21~1.24 (1.0~1.50), 1.28~1.35 (0.94~1.70)로 에어로졸 입자에 의한 광흡수가 BB에 의해 배출된 BrC 입자보다는 FF 연소과정을 통해 배출된 BC 입자에 의해 대부분 일어난 것으로 보인다. 두 번째 기간(5월 23일~24일)에 측정된 OC, WSOC 및 EC의 24시간 평균 농도는 각각 10.9~11.8, 7.8~8.4, 1.55~1.58 $\mu\text{gC}/\text{m}^3$ 이었으며, K^+ 의 농도(0.8~1.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 첫 번째 기간보다 상당히 증가하였으나 Cl^- 의 농도(0.12~0.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 증가는 없었다. 이때 WSOC/K^+ , EC/K^+ 및 K^+/Cl^- 의 농도비는 각각 5.6~9.7, 1.1~1.9, 6.6~12.9였다. 그림 5(b)의 MODIS 산불 영상과 기단의 이동 경로를 고려하면 중국 남동쪽에서 발생한 산불이 측정지점의 대기 에어로졸 입자의 화학적 성상에 영향을 주었을 것으로 판단되지만, 그림 4(c)의 BB에 의한 eBC 농도에 미치는 영향을 보면 외부 산불 연기의 영향이 제한적이었을 것이다. 이 기간에 eBC 농도에 대한 BB 배출원의 영향(BC_{BB} , %)은 19~22%로 제한적이었다. 또한, 370 nm에서 에어로졸, eBC 및 BrC 입자에 의한 24시간 평균 광흡수계수는 각각 64~76, 52~60, 11.5~16.3 Mm^{-1} 으로 에어로졸의 전체 광흡수에서 BrC 입자가 차지하는 비중은 11.5~16.3%였다. 24시간 평균 $\text{AAE}_{370-880}$ 과 $\text{AAE}_{370-520}$ 의 값은 각각 1.21~1.26(시간 평균: 1.08~1.46), 1.18~1.21 (0.99~1.45)로 에어로졸 입자에 의한 광흡수가 산불 연기에 포함된 빛을 흡수하는 BrC 입자보다는 FF 연소과정을 통해 배출된 BC 입자에 의해 주로 영향을 받았을 것으로 판단된다. 이는 그림 6(a)에 나타난 5월 23일~25일 사이의 370과 880 nm의 파장에서 eBC의 광흡수계수의 시간별 변화로 설명할 수 있다. 그림 6(a)의 5월 23일~25일 사이의 출·퇴근 시간에 880 nm의 광흡수계수($b_{\text{abs},880}$)가 증가하는 경향을 고려하면 측정지점 주변에서 자동차

배기가스에 의한 영향이 eBC와 에어로졸 입자의 농도 증가에 기여했을 것으로 추정된다. 세 번째 기간인 6월 5일(09:00~08:50)에는 OC, K^+ 그리고 Cl^- 의 농도 증가가 두드러졌다. OC, WSOC 및 EC의 24시간 평균 농도는 각각 19.6, 13.1, 1.44 $\mu\text{gC}/\text{m}^3$ 이었으며, K^+ 와 Cl^- 의 농도는 3.24와 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이때 WSOC/K^+ , EC/K^+ 및 K^+/Cl^- 의 농도비는 각각 4.0, 0.4, 1.3이었으며, eBC에 대한 국지적 FF의 영향이 지배적인 첫 번째와 두 번째 기간에 조사된 추적자 성분들의 농도비와 크게 달랐다. 그림 5(c)의 산불 영상과 기단의 이동 경로를 보면 이때 대기 에어로졸 입자는 확실하게 국지적 및 외부 유입에 의한 BB의 영향을 받았을 것이다. 이 기간에 eBC 농도에 대한 BB 배출원의 영향(BC_{BB} , %)은 24시간 평균 64% (25~99%)로 BB의 영향이 eBC와 갈색 탄소의 농도 증가에 상당히 기여했을 것이다. 그러나, 그림 6(b)에서 6월 5일과 6일 사이의 출·퇴근 시간에 외부 유입에 의한 BB의 영향으로 $b_{\text{abs},880}$ 의 값이 $b_{\text{abs},370}$ 값보다 상대적으로 낮게 조사되었으나, 국지적인 자동차 배기가스에 의한 영향이 출·퇴근 시간의 eBC 농도에 영향을 주었을 것이다. 그림 4(d)의 370 nm에서 관측한 에어로졸, BC 및 BrC의 광흡수계수의 시간별 추이를 보면 이들은 6월 5일 21:00에 급격한 증가를 하고 6월 6일 03:00에 최고치에 이른 후 09:00에 급격한 감소를 나타내었다. 이 시각에 $b_{\text{abs},370}$ 과 BrC $b_{\text{abs},370}$ 은 각각 190과 124, 290과 191, 58과 22 Mm^{-1} 으로 BrC 입자에 의한 광흡수가 에어로졸 입자의 65, 66, 37%를 차지하였다. 이때 BB가 eBC 농도에 기여한 비율(BC_{BB} , %)은 93, 97.4, 43%였다. 370 nm에서 에어로졸, BC 및 BrC 입자에 의한 24시간 평균 광흡수계수는 각각 118, 49, 69 Mm^{-1} 으로 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 입자의 비중은 47% (25~67%)였다. 24시간 평균 $\text{AAE}_{370-880}$ 과 $\text{AAE}_{370-520}$ 의 값은 각각 1.7 (1.3~2.2)과 2.0 (1.3~2.8)으로 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수는 BB에 의해 배출된 BrC 입자로부터 상당한 영향을 받았을 것이다.

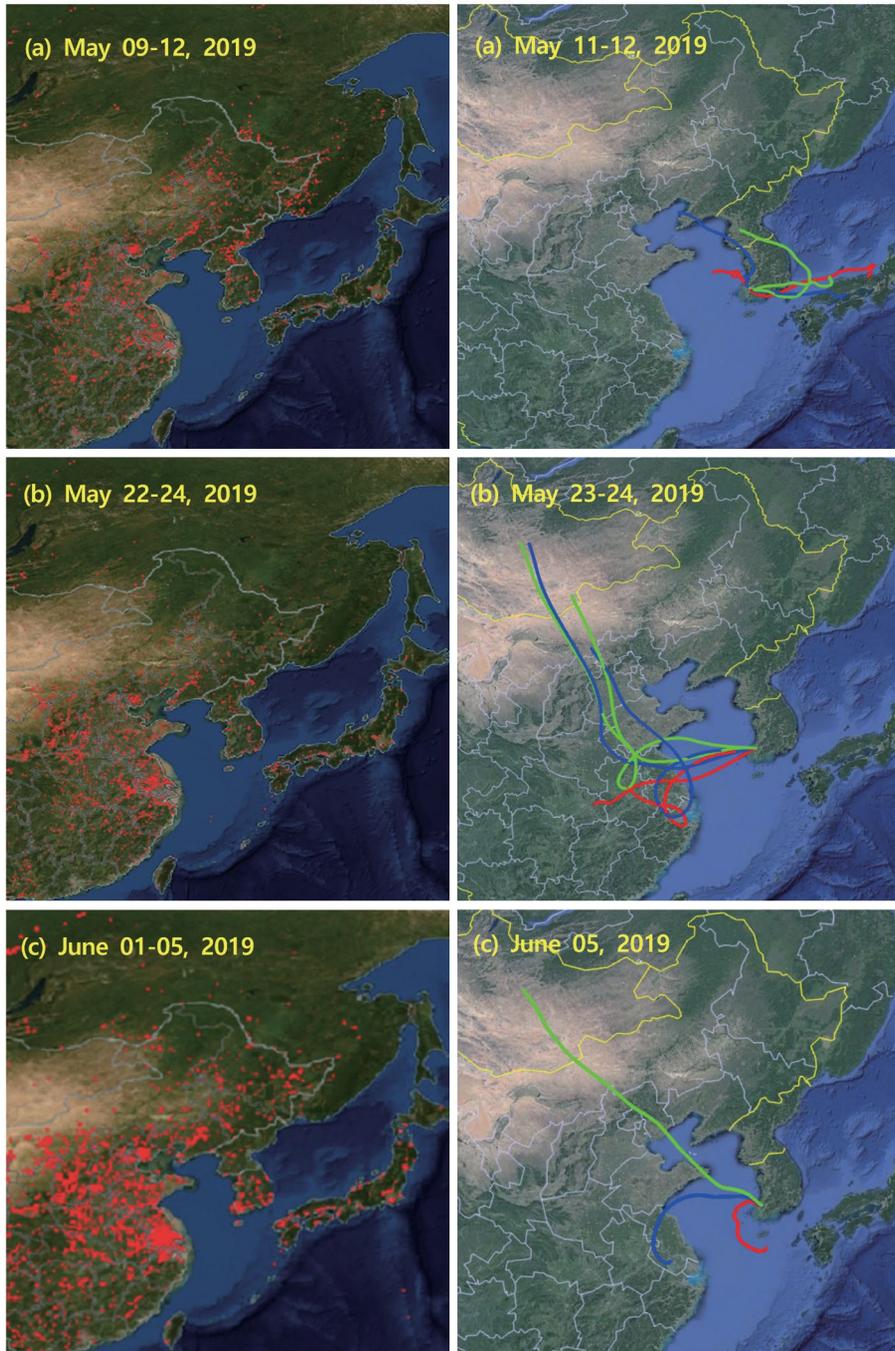


Fig. 5. MODIS fire map (left graphs) and air mass backward trajectories (right graphs). Transport pathways of air masses on the right represent (a) May 11~12, (b) May 23~24, and (c) June 05, 2019. Red, blue, and green lines indicate transport pathways of the air masses at heights of 500 m, 1,000 m, and 1,500 m above ground level, respectively.

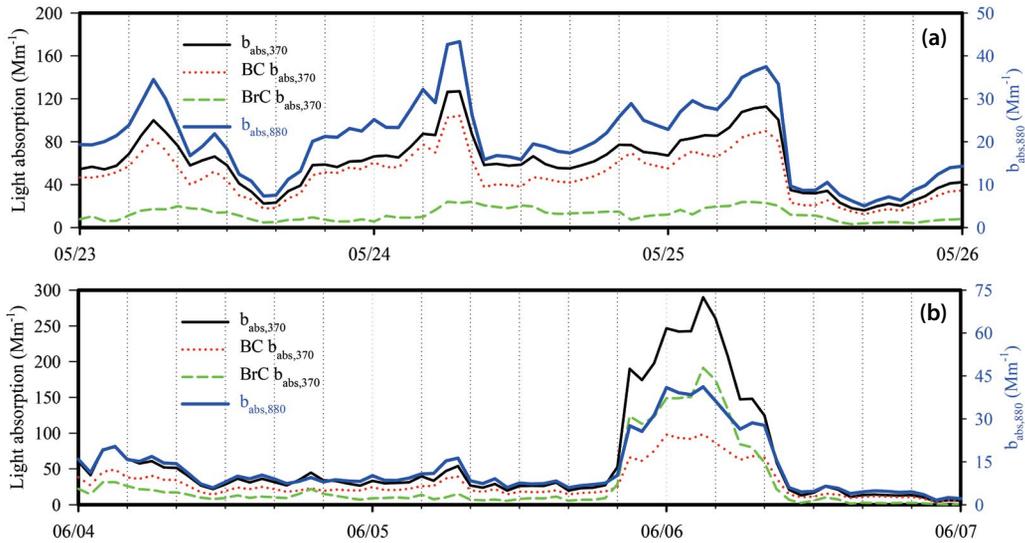


Fig. 6. Temporal variations of absorption coefficients ($b_{\text{abs},370}$, $\text{eBC } b_{\text{abs},370}$, $\text{BrC } b_{\text{abs},370}$, and $b_{\text{abs},880}$) on May 23~24 (a) and June 05 (b).

4. 결 론

본 연구에서는 광주광역시 한 도심지역에서 2019년 1년 동안 7파장 aethalometer를 이용해 측정된 eBC 입자의 농도에 대한 FF와 BB 배출원의 정량적 기여도를 평가하였다. BC 입자의 배출 오염원 기여도 평가는 370 nm와 880 nm의 파장에서 측정된 광흡수계수와 FF와 BB의 다른 파장 의존성에 대한 AAE 값을 이용하는 aethalometer 모형으로 수행하였다. 또한 사례 연구로서 2019년 5월 1일에서 6월 12일까지 24시간 기준으로 $\text{PM}_{2.5}$ 를 채취한 후 탄소 성분과 이온 성분을 분석하여 각 성분의 농도 증가 시 eBC 농도에 대한 BC 배출원 기여도 차이, 에어로졸에 의한 전체 광흡수에 대한 BrC 입자에 의한 광흡수 기여도 차이 등을 분석하였다. BC의 오염원 기여도 평가에 의하면, 연구 기간 중 eBC 농도에 대한 BC_{FF} 와 BC_{BB} 의 일 평균 기여도는 각각 34~96% (평균 78%)와 4~66% (평균 22%)였으며, 계절별로 평가한 BC_{BB} 의 평균 기여도는 겨울에 가장 높고(32%), 여름에 가장 낮았다(16%).

2019년 5월 1일~6월 12일 사이에 필터를 이용해

$\text{PM}_{2.5}$ 의 화학적 성질을 조사한 사례 연구에서 BB의 추적자 성분으로 알려진 K^+ 와 Cl^- 의 농도 증가는 없으나 OC와 EC의 농도가 상당히 증가한 경우에 eBC 농도는 FF 연소에 의해 주로 영향을 받았다($\% \text{BC}_{\text{BB}} = 18 \sim 22\%$). 이때 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 입자에 의한 광흡수가 차지하는 비중은 18.5~21.3%였다. 그리고 $\text{AAE}_{370-520}$ 은 1.28~1.35 (0.94~1.70)로 에어로졸 입자에 의한 광흡수는 BrC 입자보다는 FF 연소를 통해 배출된 BC 입자에 의해 영향을 받았음을 의미한다. 그러나 OC, WSOC, K^+ 및 Cl^- 의 급격한 농도 증가가 나타난 날은 MODIS의 산불 영상과 기단의 이동 경로를 고려할 때 이때 측정된 대기 에어로졸 입자는 확실하게 국지적 및 외부 유입에 의한 BB의 영향을 받았을 것이다. 이 기간에 eBC 농도에 대한 BC_{BB} 의 24시간 평균 기여율은 64% (25~99%)로 상당히 높았으며 BB의 영향이 eBC의 농도 증가에 상당히 기여하였다. 그리고 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 입자의 평균 기여도는 47% (25~67%)였다. 또한 $\text{AAE}_{370-520}$ 의 24시간 평균값은 2.0 (1.3~2.8)으로 근-자외선 및 가시광선 파장

에서 측정된 에어로졸 입자의 전체 광흡수는 BB에 의해 배출된 BrC 입자로부터 상당한 영향을 받았음을 의미한다. 본 연구에서 aethalometer 모델을 이용한 광주 도심지역 측정 eBC 농도의 배출 오염원 기여도 평가 결과는 도시지역에서 화석연료의 연소로 배출된 BC 입자의 저감 대책을 수립하는 데 필요한 기본적인 자료의 제공이 가능하다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2020R1I1A3A04036617).

References

- Anand, A., Phuleria, H.C. (2021) Spatial and seasonal variation of outdoor BC and PM_{2.5} in densely populated urban slums, *Environmental Science Pollution Research*, 28, 1397-1408.
- Andreae, M.O., Gelencsér, A. (2006) Black carbon or brown carbon? The nature of light absorbing carbonaceous aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3131-3148.
- Bahadur, R., Praveen, P.S., Xu, Y., Ramanathan, V. (2012) Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(43), 17366-17371.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment, *Journal of Geophysical Research*, 118, 5380-5552.
- Briggs, N.L., Long, C.M. (2016) Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States, *Atmospheric Environment*, 144, 409-427.
- Cheng, Y.H., Yang, L.S. (2016) Characteristics of ambient black carbon mass and size-resolved particle number concentrations during corn straw open-field burning episode observations at a rural site in southern Taiwan, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13, 688.
- Conte, M., Merico, E., Cesari, D., Cesari, D., Dinoi, A., Grasso, F.M., Donateo, A., Guascito, M.R., Contini, D. (2020) Long-term characterisation of African dust advection in south-eastern Italy: influence on fine and coarse particle concentrations, size distributions, and carbon content, *Atmospheric Research*, 233, 104690. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104690>
- Deng, J., Guo, H., Zhang, H., Zhu, J., Wang, X., Fu, P. (2020) Source apportionment of black carbon aerosols from light absorption observation and source-oriented modeling: an implication in a coastal city in China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 14419-14435.
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A.S.H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Hansen, A.D.A. (2015) The "dual-spot" Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(5), 1965-1979. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Dumka, U.C., Kaskaoutis, D.G., Devara, P.C.S., Kumar, R., Kumar, S., Tiwari, S., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N. (2019) Year-long variability of the fossil fuel and wood burning black carbon components at a rural site in southern Delhi outskirts, *Atmospheric Research*, 216, 11-25.
- Dumka, U.C., Kaskaoutis, D.G., Tiwari, S., Safai, P.D., Attri, S.D., Soni, V.K., Singh, N., Mihalopoulos, N. (2018) Assessment of biomass burning and fossil fuel contribution to black carbon concentrations in Delhi during winter, *Atmospheric Environment*, 194, 93-109.
- Favez, O., El Haddad, I., Piot, C., Boréave, A., Abidi, E., Marchand, N., Jaffrezo, J.L., Besombes, J.L., Sciare, J., Wortham, H., George, C., d'Anna, B. (2010) Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 5295-5314.
- Geng, X., Mo, Y., Li, J., Zhong, G., Tang, J., Jiang, H., Zhang, G. (2020) Source apportionment of water-soluble brown carbon in aerosols over the northern South China Sea: Influence from land outflow, SOA formation and marine emission, *Atmospheric Environment*, 229, 117484.
- Healy, R.M., Sofowote, U., Su, Y., Debosz, J., Noble, M., Jeong,

- C.H., Wang, J.M., Hilker, N., Evans, G.J., Doerksen, G., Jones, K., Munoz, A. (2017) Ambient measurements and source apportionment of fossil fuel and biomass burning black carbon in Ontario, *Atmospheric Environment*, 161, 34-47.
- Healy, R.M., Wang, J.M., Sofowote, U., Su, Y., Deboz, J., Noble, M., Munoz, A., Jeong, C.H., Hilker, N., Evans, G.J., Doerksen, G. (2019) Black carbon in the Lower Fraser Valley, British Columbia: impact of 2017 wildfires on local air quality and aerosol optical properties, *Atmospheric Environment*, 217, 116976.
- Helin, A., Niemi, J.V., Virkkula, A., Pirjola, L., Teinila, K., Backman, J., Aurela, M., Saarikoski, S., Ronkko, T., Asmi, E., Timonen, H. (2018) Characteristics and source apportionment of black carbon in the Helsinki metropolitan area, Finland, *Atmospheric Environment*, 190, 87-98.
- Herich, H., Hueglin, C., Buchmann, B. (2011) A 2.5 year's source apportionment study of black carbon from wood burning and fossil fuel combustion at urban and rural sites in Switzerland, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(7), 1409-1420.
- Jain, C.D., Gadhavi, H.S., Wankhede, T., Kallelapu, K., Sudhesh, S., Das, L.N., Pai, R.U., Jayaraman, A. (2018) Spectral properties of black carbon produced during biomass burning, *Aerosol Air Quality Research*, 18, 671-679.
- Jeong, B., Bae, M.-S., Ahn, J., Lee, J. (2017) A Study of carbonaceous aerosols measurement in metropolitan area performed during KORUS-AQ 2016 campaign, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 205-216, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.205>
- Kanakidou, M., Seinfeld, J., Pandis, S., Barnes, I., Dentener, F., Facchini, M., Dingenen, R.V., Ervens, B., Nenes, A., Nielsen, C. (2005) Organic aerosol and global climate modelling: a review, *Atmospheric Chemistry Physics*, 5, 1053-1123.
- Kant, Y., Shaik, D.S., Mitra, D., Chandola, H.C., Babu, S.S., Chauhan, P. (2020) Black carbon aerosol quantification over north-west Himalayas: seasonal heterogeneity, source apportionment and radiative forcing, *Environmental Pollution*, 257, 113446.
- Kim, K.H., Kabir, E., Kabir, S. (2015) A review on the human health impact of airborne particulate matter, *Environmental International*, 74, 136-143.
- Kirchstetter, T.W., Novakov, T., Hobbs, P.V. (2004) Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D21), D21208.
- Laskin, A., Laskin, J., Nizkorodov, S.A. (2015) Chemistry of atmospheric brown carbon, *Chemical Reviews*, 115, 4335-4382. <https://doi.org/10.1021/cr5006167>
- Lim, S., Kang, Y., Lee, M., Yoo, H.-J., Lee, S.-S., Lee, G.-H. (2019) Mass concentration and size distribution of refractory black carbon in Seoul during summer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(6), 713-725, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.713>
- Lin, G., Penner, J.E., Flanner, M.G., Sillman, S., Xu, L., Zhu, C. (2014) Radiative forcing of organic aerosol in the atmosphere and on snow: Effects of SOA and brown carbon, *Journal of Geophysical Research*, 119, 7453-7476.
- Liu, Y., Yan, C., Zheng, M. (2018) Source apportionment of black carbon during winter in Beijing, *Science of The Total Environment*, 618, 531-541.
- Lüthi, Z.L., Škerlak, B., Kim, S.W., Lauer, A., Mues, A., Rupakheti, M., Kang, S. (2015) Atmospheric brown clouds reach the Tibetan Plateau by crossing the Himalayas, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 6007-6021.
- Mousavi, A., Sowlat, M.H., Lovett, C., Rauber, M., Szidat, S., Boffi, R., Borgini, A., De Marco, C., Ruprecht, A.A., Sioutas, C. (2019) Source apportionment of black carbon (BC) from fossil fuel and biomass burning in metropolitan Milan, Italy, *Atmospheric Environment*, 203, 252-261.
- Oh, J., Park, J., Lee, S., Ahn, J., Choi, J., Lee, S., Lee, Y., Kim, H., Hong, Y., Hong, J., Kim, J., Kim, S., Lee, G. (2015) Characteristics of black carbon particles in ambient air using a single particle soot photometer (SP2) in May 2013, Jeju, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 255-268, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.255>
- Pandey, A., Hsu, A., Tiwari, S., Pervez, S., Chakrabarty, R.K. (2020) Light absorption by organic aerosol emissions rivals that of black carbon from residential biomass fuels in South Asia, *Environmental Science and Technology Letter*, 7, 266-272.
- Park, J., Song, I., Kim, H., Lim, H., Park, S., Shin, S., Shin, H., Lee, S., Kim, J. (2019) The characteristics of black carbon of Seoul, *Journal of Environment Impact Assessment*, 28(2), 113-128, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.2.113>
- Park, S.S., Lee, G.Y., Lee, M.D. (2020) Light absorption of PM_{2.5} observed during fall at a Seosan site in Chungchoeng province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 404-413, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.404>

- Park, S.-S., Son, S.-C., Lee, S. (2018a) Characterization, sources, and light absorption of fine organic aerosols during summer and winter at an urban site, *Atmospheric Research*, 213, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.017>
- Park, S.S., Yu, G.-H., Lee, S.-I., Bae, M.-S. (2018b) Aethalometer-based estimate of mass absorption cross section of black carbon particles at an urban site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 727-734, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.727>
- Park, T.E., Son, S.C., Lee, K.-H., Park, S. (2022) Differences in chemical, light absorption, and spectroscopic characterizations of PM_{2.5} during spring at an urban site in Gwangju and a port site in Gangneung, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 375-393, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.375>
- 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 Ångström exponent (AAE) with EC/OC for aerosol emissions from biomass burning, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9549-9561.
- Qiu, Y., Wu, X., Zhang, Y., Xu, L., Hong, Y., Chen, J., Deng, J. (2019) Aerosol light absorption in a coastal city in South-east China: Temporal variations and implications for brown carbon, *Journal of Environmental Sciences*, 80, 257-266.
- Rajesh, T.A., Ramachandran, S., Dhaker, V.K. (2021) Black carbon aerosols: relative source strengths of vehicular emissions and residential/open wood burning over an urban and a semi-urban environment, *Atmospheric Pollution Research*, 12, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101060>
- Rolph, G., Stein, A., Stunder, B. (2017) Real-time Environmental Applications and Display sYstem:READY, *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Romano, S., Perrone, M.R., Pavese, G., Esposito, F., Calvello, M. (2019) Optical properties of PM_{2.5} particles: results from a monitoring campaign in southeastern Italy, *Atmospheric Environment*, 203, 35-47.
- Russell, P.B., Bergstrom, R.W., Shinozuka, Y., Clarke, A.D., DeCarlo, P.F., Jimenez, J.L., Livingston, J.M., Redemann, J., Dubovik, O., Strawa, A. (2010) Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1155-1169.
- Saleh, R., Marks, M., Heo, J., Adams, P.J., Donahue, N.M., Robinson, A.L. (2015) Contribution of brown carbon and lensing to the direct radiative effect of carbonaceous aerosols from biomass and biofuel burning emissions, *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 120, 10285-10296.
- Sandradewi, J., Prévôt, A.S.H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M.R., Lanz, V.A., Baltensperger, U. (2008) Using Aerosol Light Absorption Measurements for the Quantitative Determination of Wood Burning and Traffic Emission Contributions to Particulate Matter, *Environmental Science and Technology*, 42(9), 3316-3323.
- Sarkar, C., Sinha, V., Sinha, B., Panday, A.K., Rupakheti, M., Lawrence, M.G. (2017) Source apportionment of NMVOCs in the Kathmandu Valley during the SusKat-ABC international field campaign using positive matrix factorization, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 8129-8156.
- Sciare, J., D'Argoues, O., Sarda-Esteve, R., Gaimoz, C., Dolgouky, C., Bonnaire, N., Favez, O., Bonsang, B., Gros, V. (2011) Large contribution of water-insoluble secondary organic aerosols in the region of Paris (France) during wintertime, *Journal of Geophysical Research*, 116, D22203. <https://doi.org/10.1029/2011JD015756>
- Shamjad, P.M., Tripathi, S.N., Pathak, R., Hallquist, M., Arola, A., Bergin, M.H. (2015) Contribution of brown carbon to direct radiative forcing over the indo-gangetic plain, *Environmental Science and Technology*, 49(17), 10474-10481.
- Stockwell, C.E., Christian, T.J., Goetz, J.D., Jayarathne, T., Bhawe, P.V., Praveen, P.S., Adhikari, S., Maharjan, R., DeCarlo, P.F., Stone, E.A., Saikawa, E., Blake, D.R., Simpson, I.J., Yokelson, R.J., Panday, A.K. (2016) Nepal ambient monitoring and source testing experiment (NAMA-STE): emissions of trace gases and light-absorbing carbon from wood and dung cooking fires, garbage and crop residue burning, brick kilns, and other sources, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 11043-11081.
- Vaishya, A., Singh, P., Rastogi, S., Babu, S.S. (2017) Aerosol black carbon quantification in the central Indo-Gangetic Plain: seasonal heterogeneity and source apportionment, *Atmospheric Research*, 185, 13-21.
- Vicente, E.D., Alves, C.A. (2018) An overview of particulate emissions from residential biomass combustion, *Atmospheric Research*, 199, 159-185.
- Wang, Q., Li, L., Zhou, J., Ye, J., Dai, W., Liu, H., Zhang, Y., Zhang, R., Tian, J., Chen, Y., Wu, Y., Ran, W., Cao, J. (2020) Mea-

- surement report: source and mixing state of black carbon aerosol in the North China Plain: implications for radiative effect, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 15427-15442. <https://doi.org/10.5194/acp-20-15427-2020>
- Wang, Q., Ye, J., Wang, Y., Zhang, T., Ran, W., Wu, Y., Tian, J., Li, L., Zhou, Y., Ho, S.S.H., Dang, B., Zhang, Q., Zhang, R., Chen, Y., Zhu, C., Cao, J. (2019) Wintertime optical properties of primary and secondary Brown carbon at a regional site in the North China Plain, *Environmental Science and Technology*, 53, 12389-12397.
- Wang, R., Balkanski, Y., Boucher, O., Ciais, P., Schuster, G.L., Chevallier, F., Samset, B.H., Liu, J., Piao, S., Valari, M., Tao, S. (2016) Estimation of global black carbon direct radiative forcing and its uncertainty constrained by observations, *Journal of Geophysical Research*, 121, 5948-5971. <https://doi.org/10.1002/2015JD024326>
- Xiao, S., Yu, X., Zhu, B., Kumar, K.R., Li, M., Li, L. (2020) Characterization and source apportionment of black carbon aerosol in the Nanjing Jiangbei New Area based on two years of measurements from Aethalometer, *Journal of Aerosol Science*, 139, 105461.
- 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.
- Yu, G.-H., Yu, J.-M., Park, S.-S. (2018a) 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>
- Yu, G.H., Park, S.S., Shin, S.K., Lee, K.H., Nam, H.G. (2018b) Enhanced light absorption due to aerosol particles in ship plumes observed at a seashore site, *Atmospheric Pollution Research*, 9(6), 1177-1183. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.05.005>
- Yu, G.H., Park, S.S., Lee, K.H. (2019) Light absorption characteristics of fine particles using a real-time optical absorption measurement instrument at a seashore wharf, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 564-567, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.564>
- Zang, L., Zhang, Y., Zhu, B., Mao, F., Zhang, Y., Wang, Z. (2021) Characteristics of water-soluble inorganic aerosol pollution and its meteorological response in Wuhan, Central China, *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 362-369.
- Zhang, Y., Forrister, H., Liu, J., Dibb, J., Anderson, B., Schwarz, J.P., Perring, A.E., Jimenez, J.L., Campuzano-Jost, P., Wang, Y., Nenes, A., Weber, R.J. (2017) Top-of-atmosphere radiative forcing affected by brown carbon in the upper troposphere, *Nature Geoscience*, 10, 486-489. <https://doi.org/10.1038/NGEO2960>
- Zhao, Z., Cao, J., Chow, J.C., Watson, J.G., Chen, A.L.-W., Wang, X., Wang, Q., Tian, J., Shen, Z., Zhu, C., Liu, S., Tao, J., Ye, Z., Zhang, T., Zhou, J., Tian, R. (2019) Multi-wavelength light absorption of black and brown carbon at a high-altitude site on the Southeastern margin of the Tibetan Plateau, China, *Atmospheric Environment*, 212, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.035>
- Zotter, P., Herich, H., Gysel, M., El-Haddad, I., Zhang, Y., Močnik, G., Hülin, C., Baltensperger, U., Szidat, S., Prévôt, A.S.H. (2017) Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 4229-4249.

Authors Information

박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)
(park8162@chonnam.ac.kr)

한새별 (전남대학교 환경에너지공학과 석사졸업)
(saeyulhan@gmail.com)