

다파장 Dual-spot Aethalometer를 이용한 갈색탄소의 광흡수계수 평가

Estimation of Light Absorption by Brown Carbon Particles using Multi-wavelength Dual-spot Aethalometer

유근혜¹⁾ · 유재명^{1),2)} · 박승식^{1),*}

¹⁾전남대학교 환경에너지공학과, ²⁾(주)랩코

(2017년 12월 13일 접수, 2018년 2월 1일 수정, 2018년 2월 20일 채택)

Geun-Hye Yu¹⁾, Jae-Myeong Yu^{1),2)} and Seung-Shik Park^{1),*}

¹⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

²⁾LABCO Ltd.

(Received 13 December 2017, revised 1 February 2018, accepted 20 February 2018)

Abstract

In this study, light absorption of carbonaceous species in PM_{2.5} was investigated using a dual-spot 7-wavelength Aethalometer (model AE33) with 1-min time interval between January 01 and September 30, 2017 at an urban site of Gwangju. During the study period, two Asian dust (AD) events occurred in April (AD I) and May (AD II), respectively, during which light absorption in total suspended particles was observed. Black carbon (BC) was the dominant light absorbing aerosol component at all wavelengths over the study period. Light absorption coefficients by aerosol particles were found to have 2.7~3.3 times higher at 370 nm than at 880 nm. This would be attributed to light absorbing organic aerosols, which is called brown carbon (BrC), as well as BC as absorbing agents of aerosol particles. Monthly average absorption Ångström exponent (AAE_{370-950nm}) calculated over wavelength range of 370~950 nm ranged from 1.10 to 1.35, which was lower than the AAE_{370-520nm} values ranging from 1.19~1.68 that was enhanced due to the presence of BrC. The estimated AAE_{370-660nm} of BrC ranged from 2.2 to 7.5 with an average of 4.22, which was fairly consistent to the values reported by previous studies. The BrC absorption at 370 nm contributed 10.4~28.4% to the total aerosol absorption, with higher contribution in winter and spring and lower in summer. Average PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were 108 ± 36 and 24 ± 14 µg/m³ during AD I, respectively, and 164 ± 66 and 43 ± 26 µg/m³ during AD II, respectively, implying the greater contribution of local pollution and/or regional pollution to PM_{2.5} during the AD II. BC concentration and aerosol light absorption at 370 nm were relatively high in AD II, compared to those in AD I. Strong spectral dependence of aerosol light absorption was clearly found during the two AD events. AAE_{370-660nm} of both light absorbing organic aerosols and dust

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-530-1863, E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

particles during the AD I and II was 4.8 ± 0.5 and 6.2 ± 0.7 , respectively. Higher AAE value during the AD II could be attributed to mixed enhanced urban pollution and dust aerosols. Absorption contribution by the light absorbing organic and dust aerosols estimated at 370 nm to the total light absorption was approximately 19% before and after the AD events, but it increased to 32.9~35.0% during the AD events. In conclusion, results from this study support enhancement of the aerosol light absorption due to Asian dust particles observed at the site.

Key words : Black carbon, Brown carbon, Light absorption, Asian dust particles, Absorption Ångström exponent

1. 서 론

대기 중에 존재하는 에어로졸 입자는 직·간접적으로 빛을 흡수 또는 산란시킴으로서 기후변화에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2014; Ramanathan and Carmichael, 2008; Charlson *et al.*, 1992). 에어로졸 입자의 구성 성분들 중 블랙카본(black carbon, BC), 갈색탄소(Brown Carbon, BrC) 및 무기 먼지(mineral dust)는 빛을 흡수하여 지구 복사강제력에 상당한 영향을 미친다(Laskin *et al.*, 2015). 그러나 이 세 성분의 광흡수 성질은 파장에 따라 상당한 차이가 있다. 각 에어로졸 종류의 광흡수 특성을 이해하기 위해서는 대기 에어로졸 입자에 의한 전체 광 흡수량에서 각각의 에어로졸 흡수체가 차지하는 영향을 평가하는 것이 중요하다. 대기 에어로졸 입자 중 중요한 구성 요소인 유기 에어로졸(organic aerosols, OA)은 태양 복사에너지를 산란하거나 흡수함으로써 지구의 복사수지에 영향을 미치며 300~400 nm의 자외선 파장범위에서 상당한 양의 빛을 흡수하는 것으로 알려져 있다(Kirchstetter *et al.*, 2004). 이와 같이 자외선 영역에서 빛을 흡수하는 OA를 BrC라 한다(Laskin *et al.*, 2015; Andreae and Gelencsér, 2006).

지구 기후변화 모델링에 의하면 BrC는 대기 에어로졸에 의한 전체 광흡수 중의 19~40%를 차지하는 것으로 보고되고 있다(Saleh *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2013). 최근 BrC가 지구의 복사강제력에 미치는 영향 때문에 이 물질에 대한 관심이 증가하고 있지만, BrC의 화학적 조성과 빛 흡수 성질에 대한 이해의 한계로 인해서 OA의 빛 흡수에 의한 직접적 복사강제력 평가의 불확도가 높은 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2014). 대기 중에 존재하는 BrC 입자는 바이오매스 및 바이오 연료(장작, 팥감 등) 연소 과정, 산불 연기 및 석탄 연소와 같은 1차 오염원과 대기 중 유기화합물의 화학적

변화과정을 통해 2차적으로 생성되는 것으로 알려져 있다(Laskin *et al.*, 2015). 일반적으로 BC 입자는 자외선과 가시광선 스펙트럼의 넓은 파장범위에서 빛을 강하게 흡수하지만, BrC과 무기 먼지(e.g., 황사입자)는 <400 nm의 자외선 파장범위에서 빛을 더 강하게 흡수한다(Bergstrom *et al.*, 2007). BrC과 무기 먼지의 파장에 따른 광흡수 의존성은 흡수 옹스트롬 지수(Absorption Ångström Exponent, AAE)로 결정한다. 기존의 연구에 의하면, 빛을 흡수하는 에어로졸의 AAE 값들은 화석 연료의 연소 배출로 인한 BC 입자는 ~1.0, 바이오매스 연소 과정을 통해 배출되는 OA는 ~2.0로 보고되고 있다(Laskin *et al.*, 2015; Kirchstetter *et al.*, 2004). 또한 먼지 입자의 흡수에 의한 AAE 값은 사하라 사막 먼지는 1~2 (Collaud Coen *et al.*, 2004), 도시 오염과 황사 먼지가 혼합된 에어로졸 입자는 2.2(Bergstrom *et al.*, 2004)로서 보고되었다.

위에서 언급한 바와 같이 현재 BrC의 광흡수 성질에 대한 이해도 부족은 지구 전체 에어로졸의 직접적인 복사 강제력의 불확도를 증가시킨다. 현재 관측 자료로부터 기후변화 모델링 계산 결과의 정확도를 높이기 위한 방법으로 간단한 AAE 방법을 이용하여 BC와 BrC의 흡수 기여율을 평가하고 있다(Martinsson *et al.*, 2015; Kirchstetter and Thatcher, 2012; Sandradewi *et al.*, 2008). 간단히 설명하면, BC와 BrC의 흡수율을 분리하기 위하여 BrC의 흡수를 포함하는 자외선 근처의 파장과 BrC의 흡수가 없는 가시광선 및 근 적외선 스펙트럼에서 흡수도를 측정한다. 만약 대기 중 무기 먼지(흙먼지, 황사먼지 등)가 존재하지 않는다면 긴 파장에서 측정된 흡수도는 BC에 의한 흡수를 나타낸다. 자외선 파장에서 측정된 빛의 흡수는 BC와 BrC의 흡수 기여도를 포함하므로 BC의 AAE를 알고 있으면 짧은 파장에서 BC의 흡수도는 긴 파장에서 측정 결과를 이용해 계산할 수 있다. 그 결과 BrC의 흡수는 짧은 파장

에서 BC의 흡수 기여도를 제거함으로써 결정할 수 있다. 그러나 대기 중에 황사 먼지가 존재하면 자외선 파장범위에서의 빛의 흡수는 BrC과 황사 먼지의 혼합에 의한 결과로 설명이 가능할 것이다. 기존의 연구에서 에어로졸 입자에 의한 광흡수로부터 BrC에 의한 광흡수 기여율을 평가하기 위하여 BC의 AAE 값을 1.0으로 가정하였다(Liu *et al.*, 2015; Olsen *et al.*, 2015).

보통 BrC에 의한 광흡수는 여과지법을 이용해 측정된 에어로졸 입자의 용매(물, 메탄올 등) 추출액의 흡광도를 측정하거나(Yu *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2013), aethalometer를 이용하여 직접 측정된 에어로졸 입자의 광흡수계수와 BC 입자의 광흡수계수 사이의 차이를 계산함으로써 평가하였다(Titos *et al.*, 2017; Martinsson *et al.*, 2015). 국내에서는 BrC의 광흡수 특성을 조사하기 위하여 여러 연구자들에 의해 전자의 방법이 이용되어 왔으나(Kim *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016), 후자 방법인 BC의 AAE 값을 1.0으로 가정하여 BrC의 광흡수 성질을 조사한 연구는 전혀 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 광주광역시 한 도심지역에서 2017년 1~9월까지 7-파장 aethalometer를 이용하여 1분 간격의 PM_{2.5}의 광흡수계수를 측정하여 BrC의 광흡수 특성을 조사하였다. 게다가 측정 기간 중 4월과 5월에 2회의 황사가 발생하였는데 황사 입자의 광흡수 특성 역시 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 PM_{2.5} BC 입자의 광흡수계수 측정

연구에서는 BrC 입자의 광흡수 기여율을 평가하기 위하여 광주광역시 한 도심지역 도로변에서 약 150 m 떨어진 지점에서 7-파장 dual-spots aethalometer(AE 33, aerosol d.o.o., Slovenia)를 이용하여 2017년 1~9월까지 1분 간격으로 파장별 PM_{2.5} BC 입자를 측정하였다. PM_{2.5} 내 BC 농도를 측정할 수 있도록 5.0 L/min의 유량으로 설계된 PM_{2.5} 임팩터를 aethalometer의 도입부에 설치하였다. 측정 기간 중 4월과 5월 초에 2회의 황사가 중국으로부터 유입되었는데 황사 입자가 광흡수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 황사 기간 중에는 PM_{2.5} 대신에 총 먼지를 측정하였다. 그리고 5월 10일에서 7월 20일까지는 장비 고장으로 BC 입자의

측정이 이루어지지 않았다.

AE33은 석영 여과지에 포집된 에어로졸 입자의 loading 효과에 의한 측정오차를 보정하여 측정의 정확도를 향상시킬 수 있도록 개선된 장비이다(Drinovec *et al.*, 2015). 측정 방법에 대한 상세한 내용은 Drinovec *et al.* (2015)의 논문에 잘 기술되어 있다. AE33 모델에서 BC 농도 계산은 샘플링 유량이 높은 첫 번째 필터 spot의 빛의 감쇄치(ΔATN_1)가 사용되며 다음 관계식에 의해 결정된다.

$$BC = \frac{b_{abs}(\lambda)}{\sigma_{ATN}(\lambda) \times (1-k(\lambda)) \times ATN_1(\lambda)}$$

$$= \frac{S \times (\Delta ATN_1(\lambda)/100)}{F_1(1-\zeta) \times \sigma_{ATN}(\lambda) \times C \times (1-k(\lambda)) \times ATN_1(\lambda) \times \Delta t} \quad (1)$$

$$b_{abs}(\lambda) = \frac{S \times (\Delta ATN_1(\lambda)/100)}{F_1(1-\zeta) \times C \times (1-k(\lambda)) \times ATN_1(\lambda) \times \Delta t}$$

여기서 $b_{abs}(\lambda)$ 는 에어로졸 입자의 광흡수계수, S 는 에어로졸 입자가 포집되는 필터 표면적, F_1 은 필터 spot 1의 공기유량, C 는 다중 산란계수(석영필터 2.14)(Weingartner *et al.*, 2003), ζ 는 공기누출계수(=0.02~0.07)(Drinovec *et al.*, 2015), $\sigma_{ATN}(\lambda)$ 는 BC의 질량흡수단면적(m²/g), $k(\lambda)$ 는 입자의 광학적 부하계수(loading factor), Δt 는 샘플링 시간을 나타낸다. BC 측정 장비에서 공기 유량은 공기가 필터를 통과한 후 측정이 이루어지므로, 필터에서 측면의 공기흐름(ζ)을 고려한다. 측정 장비에서 에어로졸 입자의 광학적 흡수계수는 7개의 파장(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)에서 동시에 측정된다. BC(λ) 질량농도 계산에서 사용되는 질량흡수단면적(λ)은 각각의 파장에서 18.47, 14.54, 13.14, 11.58, 10.35, 7.77, 7.19 m²/g의 값들이 사용되지만, 에어로졸 특성에 따라 달라진다. 그래서 aethalometer를 이용해 측정된 파장별 BC의 질량농도는 정확한 값이 아니므로 논문에서는 상당농도(equivalent concentration)로 규정하며 880 nm에서의 BC 농도를 BC_c로 표기한다. 또한 aethalometer를 이용해 측정된 에어로졸 입자의 광흡수계수는 자동차, 바이오매스 연소, 또는 무기 먼지 배출에 의한 광흡수 기여도의 합으로 표현된다.

2.2 파장에 따른 BC 및 갈색탄소의 광흡수 기여율 평가

기후모델링 연구는 BrC는 전체 탄소 에어로졸에 의한 흡수의 19~40%를 차지하며 흡수에 의한 직접 복사강제력은 +0.1에서 +0.6 W/m²의 값을 갖는다(Jo et al., 2016; Saleh et al., 2015; Feng et al., 2013). 그러나 이들의 연구결과는 BrC의 오염원, 광학적 성질 및 화학적 변환과정에 대한 지식이 부족한 상태에서는 불확도가 높을 수밖에 없다. BC 입자에 의한 빛 흡수는 파장에 따라 크게 변하지 않으며 약 1.0의 AAE 값을 보인다. 그러나 BrC는 자외선 파장범위에서 상당한 빛을 흡수하므로 BrC를 포함하는 배출원은 >1.0의 AAE 값을 보인다(Sandradewi et al., 2008). 따라서 BrC에 의한 광흡수를 평가하기 위하여 간단한 AAE 방법을 적용할 수 있다. 즉, BrC는 주로 자외선 파장 근처에서 빛을 강하게 흡수하므로 BrC의 AAE는 BC의 AAE와 다르다는 점을 이용할 수 있다. 각각의 파장에서 에어로졸 입자의 전체 광흡수계수($b_{abs,\lambda}$)를 BC와 BrC의 광흡수계수(BC_λ , BrC_λ)로 구분하기 위해 $b_{abs,\lambda}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$b_{abs,\lambda} = BC_\lambda + BrC_\lambda \quad (2)$$

BC와 BrC의 흡수도를 분리하기 위하여 BrC의 흡수를 포함하는 자외선 근처의 파장과 BrC의 흡수가 없는 가시광선 및 근 적외선 스펙트럼에서 흡수를 측정한다. 만약 대기 중 무기먼지에 의한 영향을 무시할 수 있으면 긴 파장에서 측정된 흡수도는 BC만에 의한 흡수를 나타내며, 자외선 근처의 파장에서 측정된 흡수는 BC와 BrC의 흡수 기여도를 포함한다. 그 결과, BC의 AAE를 알고 있으면 짧은 파장에서 BC의 흡수도는 긴 파장에서 측정 결과를 이용해 계산할 수 있다. 따라서 BrC의 흡수는 짧은 파장에서의 흡수에서 BC 흡수 기여도를 제거함으로써 유도된다. 기존의 연구에서 BrC의 광흡수를 평가하기 위하여 BC에 대한 AAE 값으로 1.0을 가정한 후 이 방법을 적용하였다(Titos et al., 2017; Liu et al., 2015; Martinsson et al., 2015; Sandradewi et al., 2008). 880 및 950 nm의 파장에서 나타나는 모든 광흡수는 BC 입자에 의해서만 일어난다고 가정하고 BC 입자에 의한 광흡수를 계산하였다. 370~660 nm의 파장에서 BC_λ 를 계산하기 위해 식(3)과 같이 880 및 950 nm의 파장에서 광흡수의 평균값을

계산하고 BC에 대한 AAE(AAE_{BC})를 1.0으로 하고 의삽하였다. 그리고 파장에 따른 BrC의 광흡수계수(BrC_λ)는 식(3)의 결과와 식(2)를 이용해 구하였다. 또한 BrC의 AAE 값은 광흡수계수와 파장 사이의 지수관계를 이용하여 식(4)에 의해 결정하였다.

$$BC_\lambda = \left(\frac{b_{abs,800nm} + b_{abs,950nm}}{2} \right) \times \left(\frac{\lambda}{\frac{880 + 950}{2}} \right)^{-AAE_{BC}} \quad (3)$$

여기서 λ_1 과 λ_2 는 두 개의 기준 파장을 의미하며(e.g., 370과 660 nm), $b_{abs,\lambda}$ 는 파장 λ 에서 에어로졸 입자에 의한 총 광흡수계수를 나타낸다.

$$AAE = \frac{\log\left(\frac{b_{abs,\lambda_1}}{\lambda_2}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 BC 및 BrC의 농도와 광흡수계수

그림 1은 측정 기간 중 24시간 평균 BC_c, PM_{2.5} 및 BC_c/PM_{2.5}의 분율을 나타낸다. 논문에서 사용한 PM_{2.5} 농도는 측정 지점에서 약 2.0 km 떨어진 환경부의 대기오염측정망에서 생산한 자료이다. 880 nm 파장에서의 질량흡수단면적(7.77 m²/g)을 이용하여 계산한 BC_c의 농도는 1.72 ± 1.29 μg/m³ (0.28~5.29)로 PM_{2.5}의 6.9% (2.5~14.6%)를 차지하였다. BC_c의 월 평균 농도는 1.05 (8월)~2.23 μg/m³ (4월)로 분포하였으며, PM_{2.5}의 5.5 (9월)~9.2% (4월)를 차지하였다.

그림 2는 월별로 평가한 BC_c/PM_{2.5}의 시간별 추이를 나타내며, 그림 3은 370 nm와 880 nm에서 측정된 BC 농도의 시간별 추이를 보여준다. BC_c/PM_{2.5}는 월별로 절대 값의 차이는 존재하였으나 아침 출근시간에 최고치를 보였다(그림 2). 그리고 시간이 진행됨에 따라 점차적으로 감소하다가 저녁 시간에 약간 증가하는 추세를 보였다. 이는 아침 출근 시간에 측정지점 주변에 위치한 도로에서 운행하는 경우 차량의 증가에 기인한다. 이에 대한 자세한 내용은 3.1절의 후반부에서 측정지점 주변의 시간별 교통량의 변화를 통해 논의한다. 또한 370 nm와 880 nm에서 측정된 BC 농도의 시간별

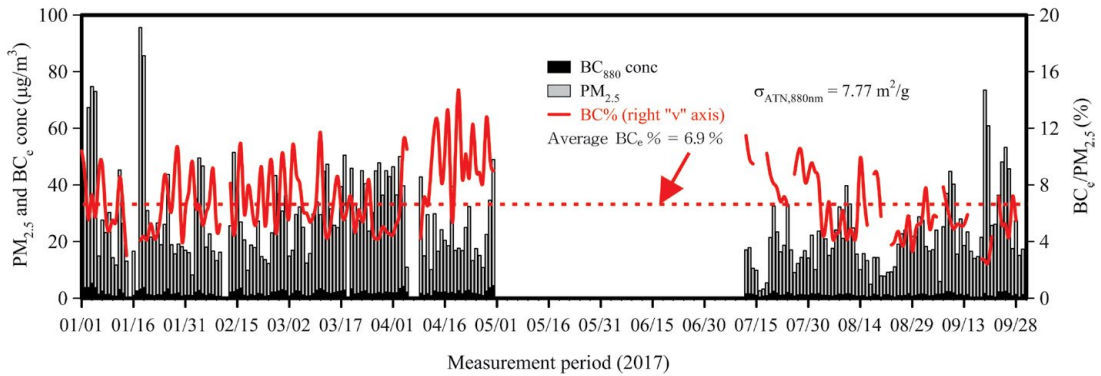


Fig. 1. Temporal profiles of BC_e, PM_{2.5}, and BC_e/PM_{2.5} over the study period.

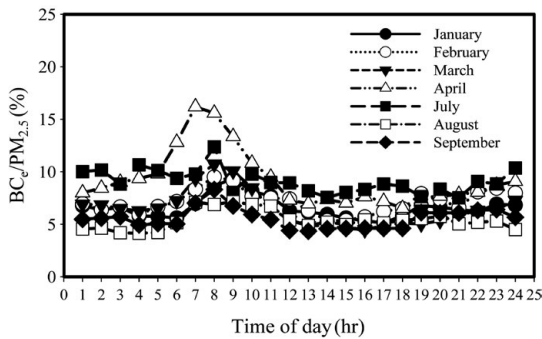


Fig. 2. Diurnal cycle of monthly BC_e/PM_{2.5}.

추이는 동시에 아침 8~9시 사이에 최고치를 보여주었으며, 오전에 감소하다가 저녁 시간에 약간 증가하는 거동 특성을 보여주었다. 그러나 BC 농도의 절대 값은 880 nm보다 370 nm의 파장에서 높게 나타났다. 이것은 370 nm의 자외선 파장에서 경유 차량 배출원 외에 빛을 흡수하는 탄소 성분의 존재에 의해 기인한 것으로 판단된다.

그림 4는 330 nm와 880 nm에서 측정한 에어로졸 입자에 의한 빛 흡수계수(그림 4a)와 식(2)와 (3)을 이용하여 평가한 370 nm에서 BrC의 빛 흡수계수(그림 4b)를 나타낸다. 에어로졸 입자의 880 nm와 370 nm에서의 빛 흡수계수는 각각 8.1~17.3 Mm⁻¹, 22.2~53.5 Mm⁻¹로 370 nm의 파장에서의 흡수계수가 2.7~3.3배 높았다. 이는 자외선 파장범위에서 빛을 흡수하는 물질로서 BC 입자 외에도 빛을 흡수하는 다른 탄소입자가 존재함을 의미한다. 그리고 370 nm 파장에서 평가한 BrC

의 광흡수계수는 2.6(8월)~14.0(3월) Mm⁻¹로 전체 에어로졸 입자에 의한 광흡수 중 10.4%(7월)~28.4%(2월)를 차지하였다.

370 nm와 880 nm에서 측정한 에어로졸 입자에 의한 총 광흡수계수를 식(2)와 (3)에 의해 BC 입자와 BrC 입자에 의한 광흡수계수로 분리하여 그림 5와 6에 시간별 광흡수계수의 변화를 도식화하였다. 370 nm와 880 nm에서의 BC 입자에 의한 시간별 변화 추이는 그림 3에서 언급한 BC 농도의 시간별 추이와 거의 유사하였다. 즉, 370 nm와 880 nm에서의 BC 입자에 의한 광흡수계수는 아침 출근 시간에 최대치를 보이고 점차적으로 감소하다가 저녁 퇴근시간에 약간 증가하는 거동 특성을 보여주었다(그림 5). 그리고 370 nm에서 BrC에 의한 시간별 광흡수계수는 BC 입자와 거의 유사하게 아침 시간에 최고치를 보여주었다. 그리고 1~4월 사이의 BrC에 의한 광흡수계수와 여름철 7~9월 사이의 광흡수계수는 큰 차이를 보여주었다(그림 6). 여름철 BrC 입자의 배출량 감소(e.g., 바이오매스 연소), 입자상 물질의 원활한 대기확산조건, 높은 대기혼합고 등이 여름철 BrC 입자에 의한 광흡수계수의 감소를 유발하였을 것이라 판단된다. 또한 그림 6의 오른쪽에서 보는 바와 같이 370 nm에서의 총 광흡수계수에서 BrC가 차지하는 비율은 BrC의 농도와 광흡수계수와 달리 아침 출근 시간에 최저치를 보이면서 점진적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 이것은 출근 시간에 자동차 배기가스에 의한 BC 입자의 영향이 증가하였기 때문이다. 그리고 여름철에 측정된 BrC의 광흡수계수가 차지하는 비율이 1~4월의 비율보다 상당히 낮았다. 1~4

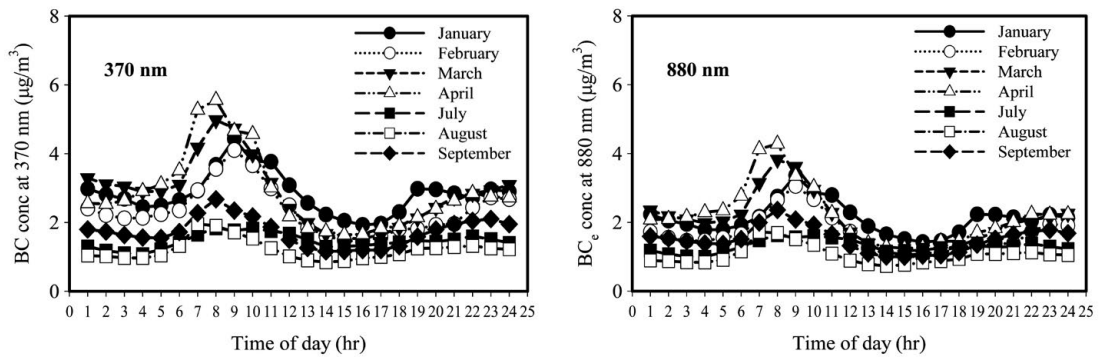


Fig. 3. Diurnal cycle of monthly BC concentrations at wavelengths of 370 and 880 nm.

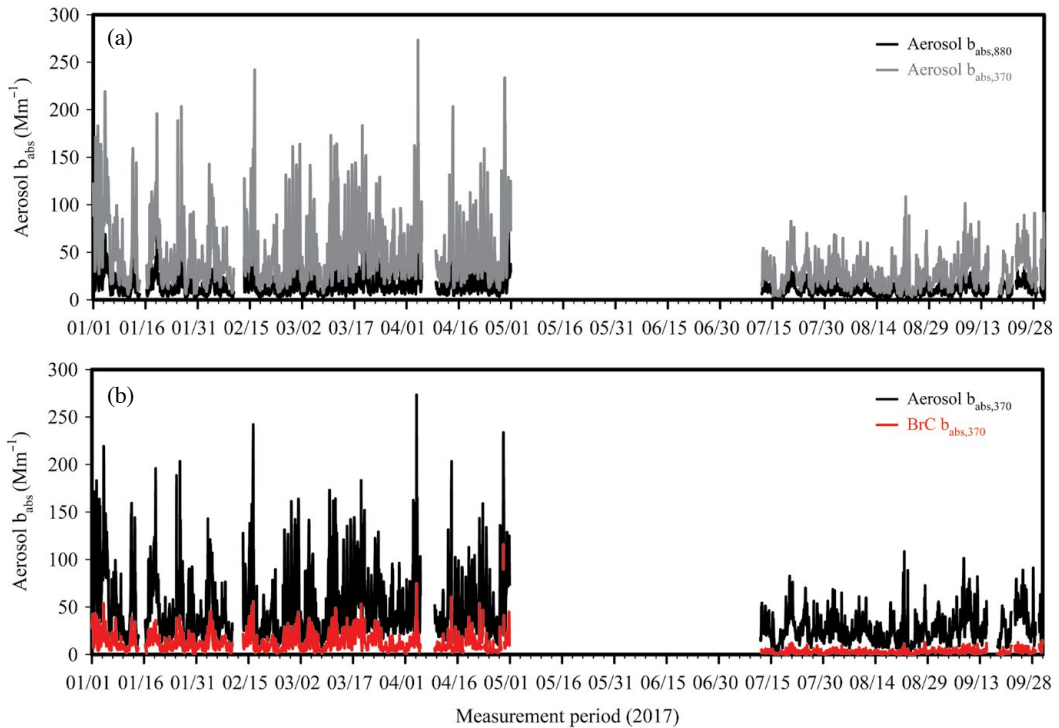


Fig. 4. Temporal profiles of absorption coefficients of aerosol particles at 880 and 370 nm (a), and of brown carbon estimated at 370 nm (b).

월 사이의 BrC에 의한 광흡수계수가 차지하는 비율은 최대 23.7 (4월)~31.3% (2월)이었으나, 여름철에는 13.1% (7월)~15.6% (9월)까지 감소하였다.

앞에서 BC_c/PM_{2.5}, 370 nm와 880 nm에서 BC 농도와 광흡수계수 및 370 nm에서 BrC의 광흡수계수의 시간

별 거동특성에 의하면 오전 아침 시간에 최고치를 보이면서 점차적으로 감소하다가 저녁에 약간 증가하는 거동 특성을 보여주었다. 이와 같은 이들의 거동 특성이 측정지점에서 인접한 도로를 통해 운행되는 경유 차량의 배출가스에 의한 영향인지를 살펴보기 위하여 전남

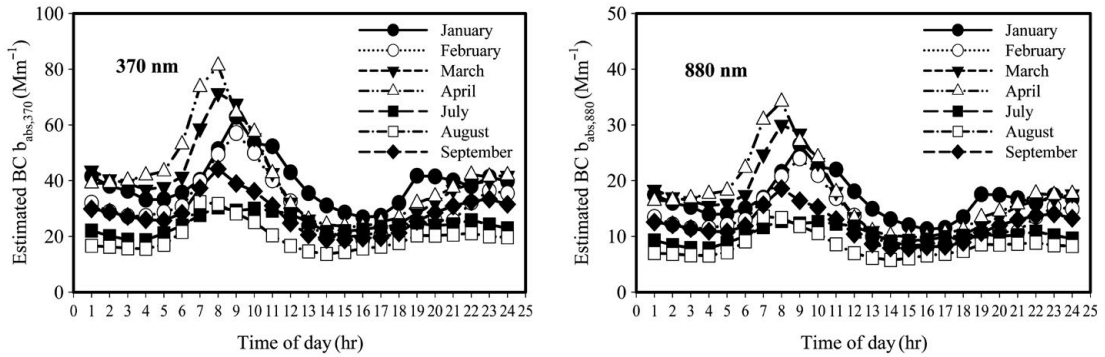


Fig. 5. Diurnal cycles of estimated light absorption by BC particles at 370 nm and 880 nm by month.

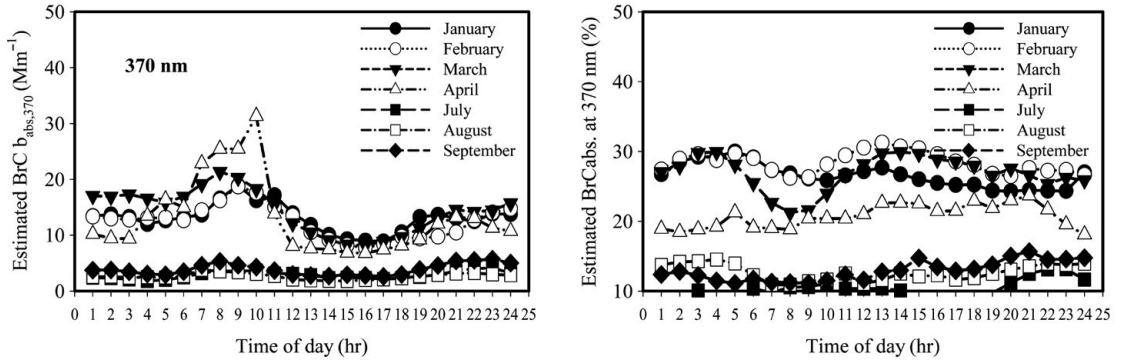


Fig. 6. Diurnal cycles of estimated light absorption by BrC particles at 370 nm and its contribution to total light absorption by month.

대 후문 방향으로 이동하는 교통량을 조사하였다 (Gwangju, 2017). 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 전남대 후문을 지나는 총 교통량은 오전 8~9시와 18~19시에 최대치를 보이며 거의 비슷한 교통량을 보여주고 있으나, 그림 6에서 언급한 바와 같이 저녁 시간에 낮은 $BC_e/PM_{2.5}$, BC 농도와 광흡수계수 및 370 nm에서 BrC의 광흡수계수 값들은 아침 시간과 비교해 퇴근 시간 무렵에 오염물질들의 대기확산이 원활하고 대기혼합도가 높아서 나타난 현상이다. 그림 7의 오른쪽 하단 그림에서 BC 입자를 배출하는 경우 차량의 시간별 분포를 보면 경우 승용차의 시간별 운행 추이가 $BC_e/PM_{2.5}$, BC 농도와 광흡수계수 및 370 nm에서 BrC의 광흡수계수의 시간별 추이와 유사한 것을 고려하면 경우 자동차와 트럭의 교통량이 이들의 시간별 추이를 그대로 반영하고 있음을 입증한다.

3.2 BrC의 광흡수 기여도 및 흡수 응스트롱 지수 평가

차량 운행을 통해 배출된 BC 입자에 의한 광흡수는 파장에 따라 크게 변하지 않으며 보통 1.0의 AAE 값을 보인다(Kirchstetter *et al.*, 2004). 그러나 BC, 유기탄소, BrC 및 비-흡수 성분들을 포함하는 대기 에어로졸 입자의 광흡수에 의한 AAE는 BrC 또는 비-흡수 및 흡수 물질과 내부적으로 혼합된 BC에 의한 흡수의 증폭 때문에 1보다 큰 값을 가진다(Liu *et al.*, 2015; Russel *et al.*, 2010; Schnaiter *et al.*, 2005). 또한 BrC는 자외선 파장 범위에서 강하게 빛을 흡수하므로 BrC를 포함하는 배출원은 약 2.0의 AAE를 나타낸다고 보고되고 있다(Laskin *et al.*, 2015). 그림 8은 측정 기간 중 370~950 nm ($AAE_{370-950}$)와 370~520 nm ($AAE_{370-520}$)의 파장 범위에서 평가한 에어로졸 입자의 AAE의 시간별 추이를 보여준다. 에어로졸 입자의 $AAE_{370-950}$ 와 $AAE_{370-520}$ 의

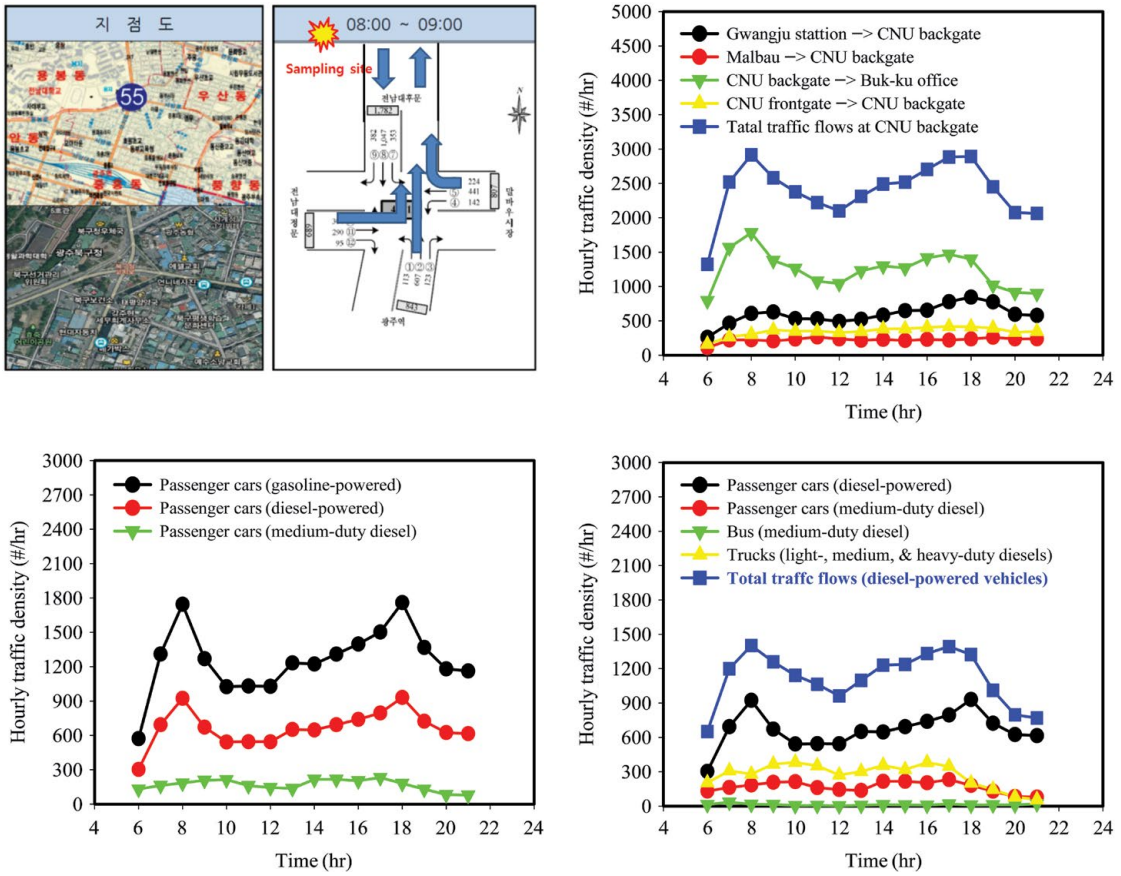


Fig. 7. A survey location of traffic volumes and hourly traffic density of vehicles nearby the sampling site.

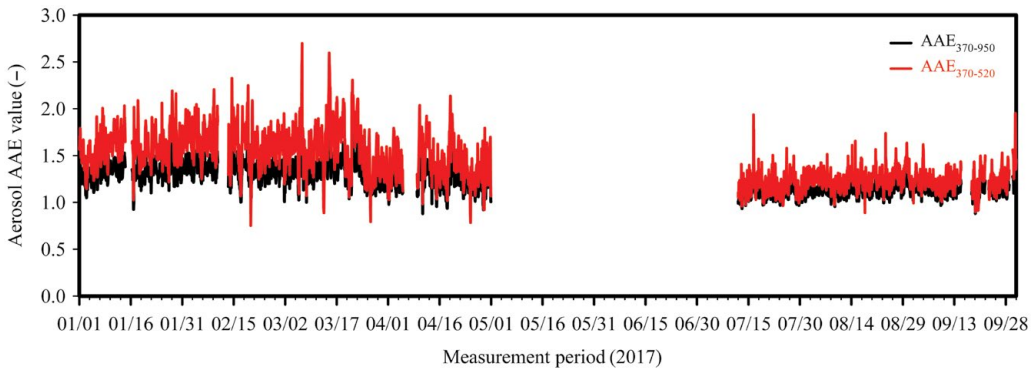


Fig. 8. Temporal profiles of AAE values calculated over 370 ~ 950 nm and 370 ~ 520 nm.

월 평균 값은 각각 1.10 (7월)~1.35 (2월), 1.19 (7월)~1.68 (2월)이었으며 기온이 높은 계절보다는 기온이 낮은 겨울철에 더 높은 AAE 값들이 측정되었다. 이와 같

은 결과는 겨울철에 관측된 에어로졸 입자의 빛 흡수가 차량 운행에 따른 영향뿐만 아니라 나무 연소 등과 같은 바이오매스 연소 배출원에 의한 영향이 포함되어

나타난 것으로 보인다. 그리고 그림 8을 보면 여름철의 $AAE_{370-950}$ 와 $AAE_{370-520}$ 의 값들의 차이가 크지 않은데, 이유는 자외선 파장범위에서 빛을 흡수하는 BrC의 1차 배출원인 바이오매스 연소의 영향이 미미했기 때문이다.

그림 9는 880~950 nm의 파장에서 BC 입자에 대한 AAE의 값을 1.0으로 가정하고 예측한 BrC의 370~660 nm의 파장범위에서 $AAE_{370-660}$ 의 추이와 평균값을 나타내었다. BrC의 평균 $AAE_{370-660}$ 는 4.22 ± 0.58 (범위 2.2~7.5)이었다. 그리고 BrC의 $AAE_{370-660}$ 값은 시간에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

본 연구에서 얻은 BrC의 AAE 결과는 기존의 여러 연구결과들과 비슷하였다(Zhang *et al.*, 2013; Kirchstetter and Thatcher, 2012). Kirchstetter and Thatcher (2012)의 연구에서는 나무연기 (wood smoke) 배출 $PM_{2.5}$ 에 대한 AAE 값은 1.89 (0.86~3.48)이었으며, BC의 AAE 값을 0.86으로 가정한 후 평가한 유기 에어로졸의 빛 흡수에 의한 AAE 값은 평균적으로 5.0 (3.0~7.4)이었다. 미국 Los Angeles basin에서 $PM_{2.5}$ 의 메탄올 추출액에 대한 AAE의 평균값은 4.8이었다(Zhang *et al.*, 2013). 대기 분진을 메탄올로 추출하게 되면 수용성뿐만 아니라 불용성 유기물질의 추출도 가능하므로, 메탄올 추출액에 대한 광흡수계수의 평가는 에어로졸 입자 내에 존재하는 총 BrC (불용성 + 수용성 BrC)의 광흡수 성질에 대한 조사가 가능하다. 이런 이유 때문에 일반적으로 메탄올 추출 BrC의 AAE 값이 초순수 추출 BrC의 값보다 낮게 조사된다. 따라서 Zhang *et al.* (2013)의 연구에서 얻어진 메탄올 추출 BrC의 AAE의 값이 본 연구와 Kirchstetter and Thatcher (2012)의 연

구에서 얻어진 결과와 유사하였다. 수용성 BrC의 흡수 특성에 대한 연구에서는, 도시 및 시골지역에서 채취한 $PM_{2.5}$ 를 초순수로 추출하여 광 흡수도를 측정된 후 결정된 AAE의 값(수용성 BrC)은 약 6.0~9.0으로 보고되고 있다(Kim *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Hecobian *et al.*, 2010). 그러나 중국 베이징에서 겨울에 수행한 연구에서는 메탄올(7.1)과 초순수 추출액(7.3) 사이의 BrC의 AAE 값이 차이가 거의 없었다(Cheng *et al.*, 2016). 또한 바이오매스 연소 연기에서 채취한 $PM_{2.5}$ 의 초순수 추출액의 AAE 값들은 대략적으로 6.7~8.3에 해당된다고 하였다(Fan *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016; Hoffer *et al.*, 2006). 정리하면, 기존의 초순수 추출액으로부터 얻어진 BrC의 AAE와 비교해 본 연구에서 BrC 입자의 낮은 AAE 값은 수용성 BrC 입자뿐만 아니라 불용성 BrC 입자에 의해서도 빛의 흡수가 일어나기 때문이다. 즉, 불용성 유기 입자 역시 대기 중 BrC 입자에 의한 광흡수에 어느 정도 영향을 미친다고 볼 수 있다. 게다가, 몇몇의 연구자들에 의해서 바이오매스와 화석연료의 연소로부터 배출되는 고 분자량의 다환방향족탄화수소화합물이 빛을 흡수하는 불용성 유기화합물에 해당된다고 하였다(Zhang *et al.*, 2013; Chen and Bond, 2010; Sun *et al.*, 2007).

그림 10은 파장이 370 nm에서 660 nm까지 변할 때 BrC의 빛 흡수계수의 변화와 전체 빛 흡수 중 BrC에 의한 흡수가 차지하는 비율을 나타낸다. 370 nm에서 BrC의 빛 흡수계수는 $2.6(8월)$ 에서 $14.0 Mm^{-1}(3월)$ 로 여름보다는 기온이 낮은 계절에 높았다. 이것은 기온이 낮아질수록 바이오매스 및 바이오 연료의 연소과정을 통해 배출되는 1차 BrC의 양이 증가하기 때문이다.

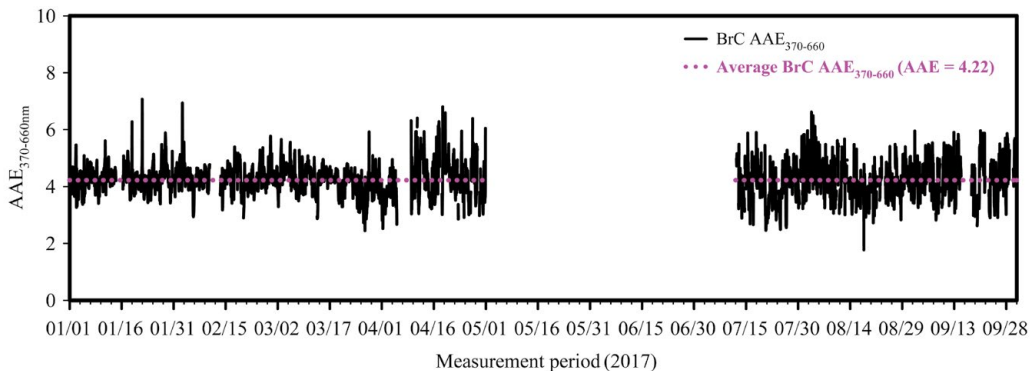


Fig. 9. Temporal profile of estimated BrC AAE values calculated over 370 ~ 660 nm.

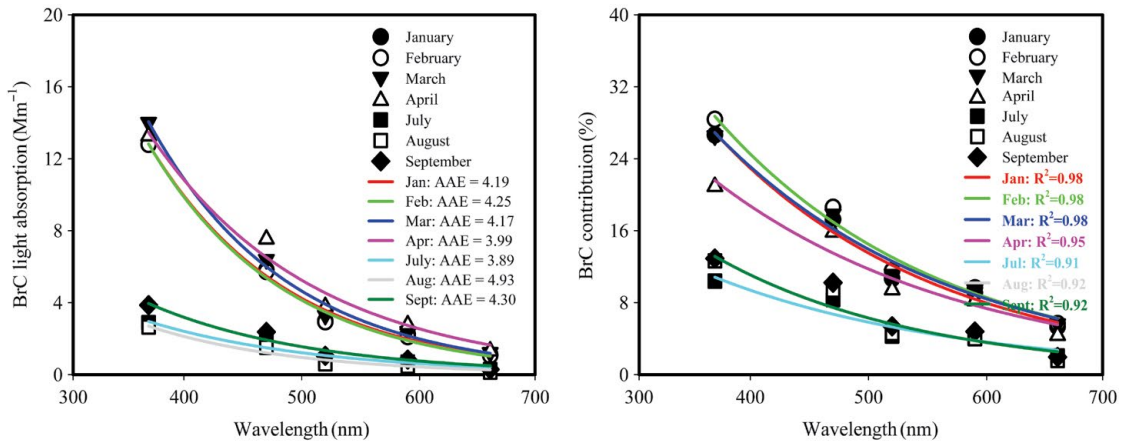


Fig. 10. Relationships between light absorption by BrC and wavelength by month and monthly BrC contribution.

그리고 파장과 광흡수계수 ($b_{abs}(\lambda)$) 사이의 지수 관계 ($b_{abs}(\lambda) = A \times \lambda^{-AAE}$)를 이용하여 계산한 BrC의 월별 AAE는 큰 차이가 없었다. BrC의 월별 AAE 값은 3.89 (7월)에서 4.93 (8월)으로 분포하였으며 연구 기간 동안 측정된 $PM_{2.5}$ 는 BrC의 광 흡수특성을 뚜렷하게 보여주었다. 즉, 자외선 파장에서 강한 광흡수 의존성을 나타내었다. 370 nm에서 측정된 에어로졸 입자의 광 흡수계수 중 BrC가 차지하는 비율은 10.4 (7월)에서 28.4% (2월)까지 분포하였으며 겨울과 봄보다는 여름에 BrC의 기여율이 낮았다.

3.3 황사 입자가 광흡수에 미치는 영향

측정 기간 중 두 번의 황사 현상이 발생하였다. 첫 번째는 4월 18일 13:00~20일 05:00 (Asian Dust (AD) event I)에 두 번째는 5월 6일 02:00에서 9일 05:00 (AD event II) 사이에 발생하였다.

그림 11은 AD I 기간 중 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도, 370 nm에서 에어로졸 입자와 BrC에 의한 광흡수계수, 370 nm와 880 nm에서의 BC 농도 및 370~950 nm와 370~520 nm의 파장범위에 대해 계산한 AAE 값들의 변화를 보여준다. 이 절에서 황사 기간 중 BrC의 광흡수계수는 황사 입자와 갈색탄소의 혼합물에 의한 광흡수를 나타낸다. 편의상 BrC에 의한 광흡수를 에어로졸 입자의 총 광흡수에서 BC 입자에 의한 광흡수를 제외한 것으로 간주한다 (BrC $b_{abs} = (\text{유기입자} + \text{황사입자})$ 에 의한 b_{abs}). 또한 측정 결과에 대한 이해를 향상시키기 위

하여 표 1에 이들의 결과를 정리하였다. 그림 12에는 BrC 입자에 의한 AAE의 시간 분포 및 황사 발생 전과 발생 중의 BrC의 광흡수계수와 파장과의 관계 및 BrC의 광흡수 기여율을 보여준다. AD I 기간 중 $PM_{2.5}$ 의 농도는 황사 발생 전·후와 비교해 큰 차이가 없었으며, 낮은 농도 (24 ± 14) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 유지되었다. 황사 발생 전, 발생 중 및 발생 후에 관측한 BC_{880} 의 농도는 큰 차이가 없었으나, BC_{370} 의 농도는 황사 발생 중에 약간 높았다. 즉 자외선 파장에서 BC 외에 빛을 흡수하는 다른 물질이 존재했음을 의미한다. 광흡수계수 역시 880 nm의 파장에서는 황사 발생 전, 발생 중 및 발생 후에 큰 차이가 없었으나, 370 nm의 파장에서는 황사 발생 중 (52.5 ± 22.6 Mm^{-1}) 광흡수계수가 높았다. 그러나 황사 발생 후 높게 관측된 광흡수계수 (50.8 ± 24.3 Mm^{-1})는 황사입자보다는 인위적 오염원에 의한 것으로 판단된다. 그리고 370~520 nm의 파장범위에서 계산한 에어로졸 입자의 $AAE_{370-520}$ 는 황사 발생 전·후에는 1.32 ± 0.13 (1.02~1.68)과 1.41 ± 0.12 (1.10~1.71)에서 황사 발생 중 1.74 ± 0.21 (1.28~2.14)로 증가하였다. 그리고 황사 발생 시 BrC 입자에 의한 $AAE_{370-660}$ (4.8 ± 0.5 , 범위 3.7~6.8)는 황사 발생 전 (4.3 ± 0.8 , 범위 3.0~6.3)과 발생 후 (4.4 ± 0.5 , 범위 3.5~5.5)보다 약간 높은 광 흡수 특성을 보여주었다(표 1 참조).

그림 12의 두 번째 그림을 보면 파장별 BrC 입자(황사+갈색탄소)에 의한 광흡수계수는 파장에 따라 지수 함수적으로 감소하는 뚜렷한 경향을 보였으며, 370 nm

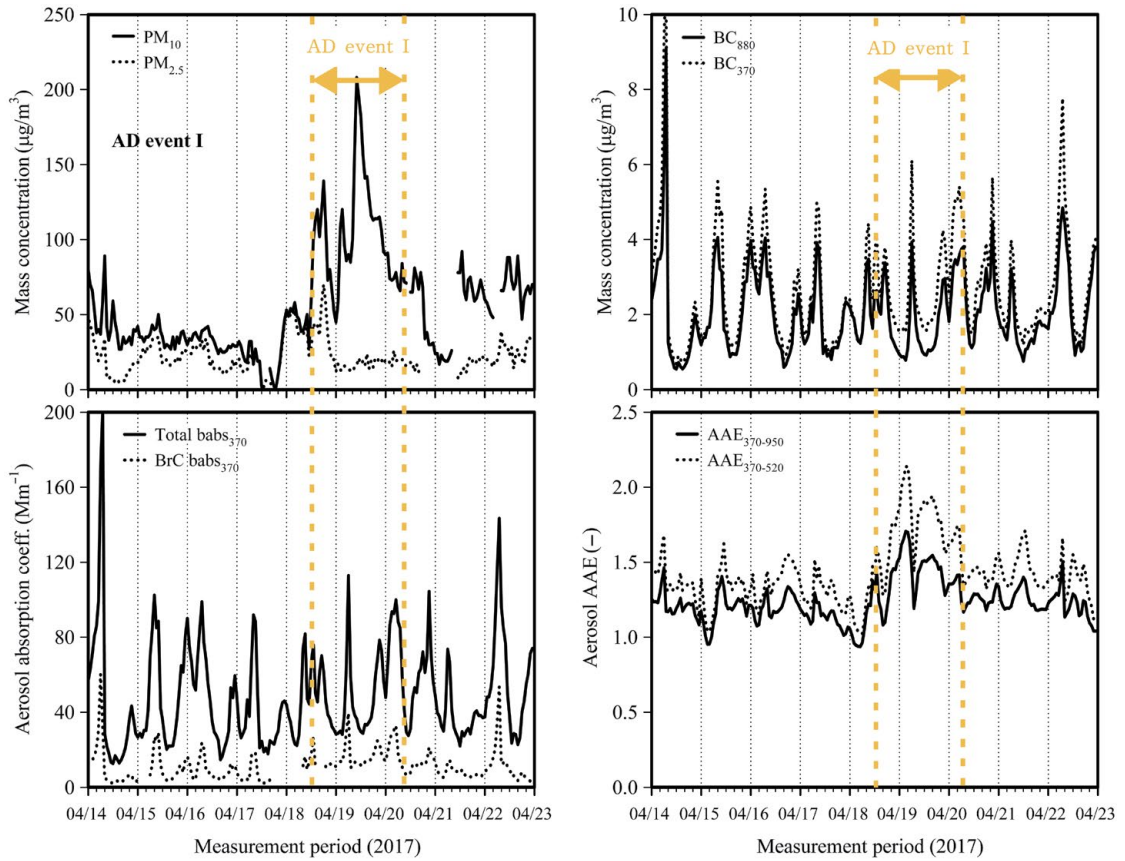


Fig. 11. Profiles of PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC_{370} , BC_{880} , $b_{abs,370}$, $BrC b_{abs,370}$, $AAE_{370-950}$, and $AAE_{370-520}$ during AD event I.

Table 1. Comparison of PM, BC, and light absorption properties of aerosol and BrC between AD I and AD II periods.

Item	Unit	Asian dust I (AD I)			Asian dust II (AD II)	
		Before AD I	During AD I	After AD I	During AD II	After AD II
Period		04/14 00:00~ 04/18 12:00	04/18 13:00~ 04/20 05:00	04/20 06:00~ 04/22 23:00	05/06 02:00~ 05/09 05:00	05/09 06:00~ 05/10 23:00
PM_{10}	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 ± 14	108 ± 36	59 ± 21	164 ± 66	26 ± 15
$PM_{2.5}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	23 ± 12	24 ± 14	21 ± 7	43 ± 26	23 ± 9
BC_{880}	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.0 ± 1.3	1.9 ± 0.9	2.2 ± 1.0	2.5 ± 1.5	1.4 ± 0.6
BC_{370}	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.5 ± 1.7	2.8 ± 1.2	2.7 ± 1.3	3.7 ± 2.2	1.7 ± 0.8
$b_{abs,880}$	Mm^{-1}	15.8 ± 9.8	15.0 ± 7.2	16.7 ± 7.9	19.7 ± 11.4	10.7 ± 4.3
$b_{abs,370}$	Mm^{-1}	46.2 ± 30.7	52.5 ± 22.6	50.8 ± 24.3	69.1 ± 40.0	31.4 ± 14.6
Aerosol $AAE_{370-950}$	-	1.18 ± 0.10	1.42 ± 0.15	1.24 ± 0.08	1.35 ± 0.17	1.19 ± 0.19
Aerosol $AAE_{370-520}$	-	1.32 ± 0.13	1.74 ± 0.21	1.41 ± 0.12	1.71 ± 0.26	1.34 ± 0.28
BrC $AAE_{370-660}$	-	4.3	4.8	4.4	6.2	4.5

의 자외선 파장에서 가장 높은 광흡수 특성을 나타내었다. 황사 발생 시 $PM_{2.5}$ 와 BC_{880} 의 농도가 발생 전·후와 비교해 큰 차이가 없었음에도 불구하고, 370 nm

파장에서 BrC의 광흡수계수는 황사 발생 전·후 9.6~10.4 Mm^{-1} 에서 황사 발생 시에는 17.4 Mm^{-1} 로 약 1.7~1.8배 증가하였으며 파장이 증가함에 세 기간의 차이

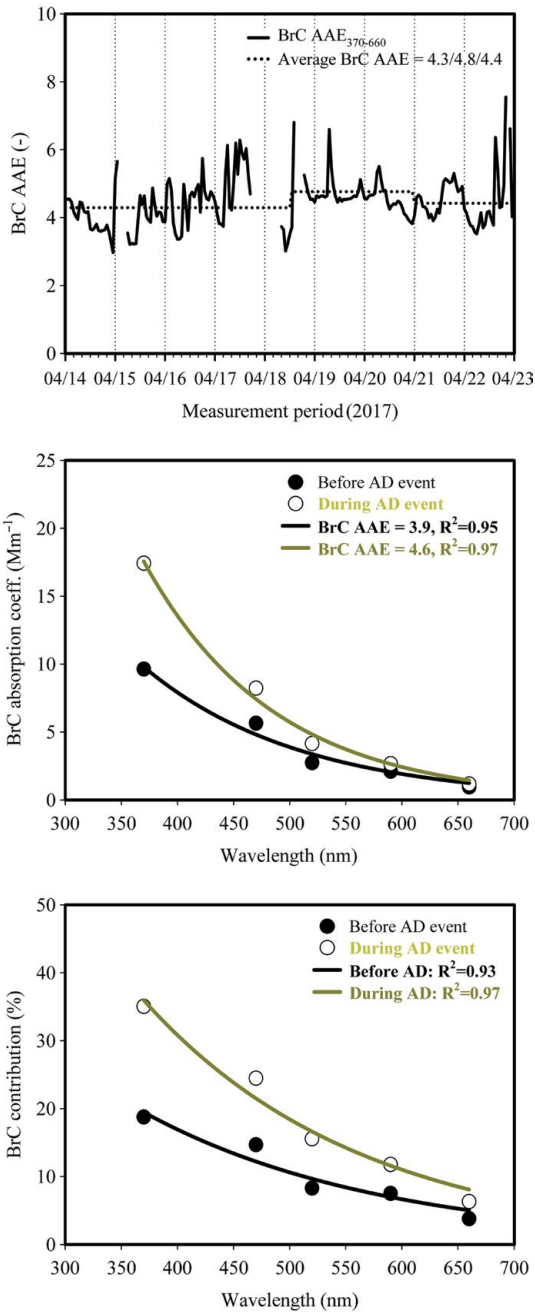


Fig. 12. Profiles of BrC AAE, and wavelength-dependent BrC light absorption and BrC contribution during AD event I.

는 감소하는 경향을 보여주었다. 즉, 황사 입자에 의한 광흡수가 대부분 자외선 파장에서 일어났음을 의미한

다. 그리고 370 nm에서 에어로졸 입자의 총 광흡수 중 BrC에 의한 광흡수가 차지하는 비율은 황사 발생 전·후에는 평균적으로 18.8~20.7%에서 황사 발생 시에는 35.0%까지 상당히 증가하였다. 즉 황사 발생 시 자외선 파장에서 광흡수는 바이오매스 연소 배출원과 자동차 배기가스 외에도 황사 입자에 의해서도 영향을 받았음을 암시하고 있다.

그림 13은 AD II 기간 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도, 370 nm에서 전체 에어로졸과 BrC에 의한 광흡수계수, 370 nm와 880 nm에서의 BC 농도 및 370~950 nm와 370~520 nm의 파장범위에 대해 계산한 AAE 값들의 변화를 보여준다. 그리고 표 1에 AD II 기간 중 이들의 결과를 정리하였다. AD II 기간에는 황사 발생 전에 에어로졸 입자의 광흡수계수 측정이 정상적으로 이루어지지 않아 황사 발생 시와 발생 후에 대해서 비교 분석을 실시하였다. 그림 14는 BrC 입자에 의한 AAE의 시간 분포 및 황사 발생 중과 발생 후의 BrC의 광흡수계수와 파장과의 관계 및 BrC에 의한 광흡수 기여율을 보여준다. AD II에서는 황사 발생 중 PM_{2.5}의 농도가 43±26 µg/m³로 AD I과 비교해 꽤 높은 수준을 유지하였다. AD II 기간 중 PM₁₀의 농도는 164±66 µg/m³로 AD I 기간 중의 PM₁₀의 농도와 비교해 약 50% 높았으며, 황사 발생 시 BC₈₈₀의 농도는 발생 후보다 꽤 높았다. 또한 370 nm에서 BC 농도는 황사 발생 시 3.7±2.2 µg/m³로 황사 발생 후의 농도에 비해 2배 이상 높았다 (표 1). 황사 발생 중과 발생 후의 PM 농도와 370 nm와 880 nm에서의 BC 농도를 비교하면 황사 기간 중 에어로졸 입자에 의한 광흡수는 황사 입자뿐만 아니라 국지적으로 배출된 유기입자에 의해서도 영향을 받았음을 짐작할 수 있다. 880 nm의 파장에서 광흡수계수 ($b_{abs,880}$)는 황사 발생 중에 발생 후보다 약 2배 높았으며 이는 아마도 황사 기간 중 국지적인 화석연료 연소 오염원의 증가에 기인되었다고 판단할 수 있을 것이다. 그리고 황사 발생 시 370 nm의 파장에서 측정된 광흡수계수 ($b_{abs,370}$)는 69.1±40.0 Mm⁻¹로 황사 종료 후의 광흡수계수보다 2배 이상 높았다. 또한 370~520 nm의 파장범위에서 계산한 에어로졸 입자의 AAE₃₇₀₋₅₂₀는 발생 시에는 1.71±0.26 (1.25~2.34), 황사 발생 후에는 1.34±0.28 (0.92~1.83)의 값을 나타내었다. 황사 발생 시 BrC 입자에 대해 계산한 AAE₃₇₀₋₆₆₀ (6.2±0.7, 범위 4.6~8.1)는 발생 후의 값(4.5±0.8, 범위 3.1~6.3)보다

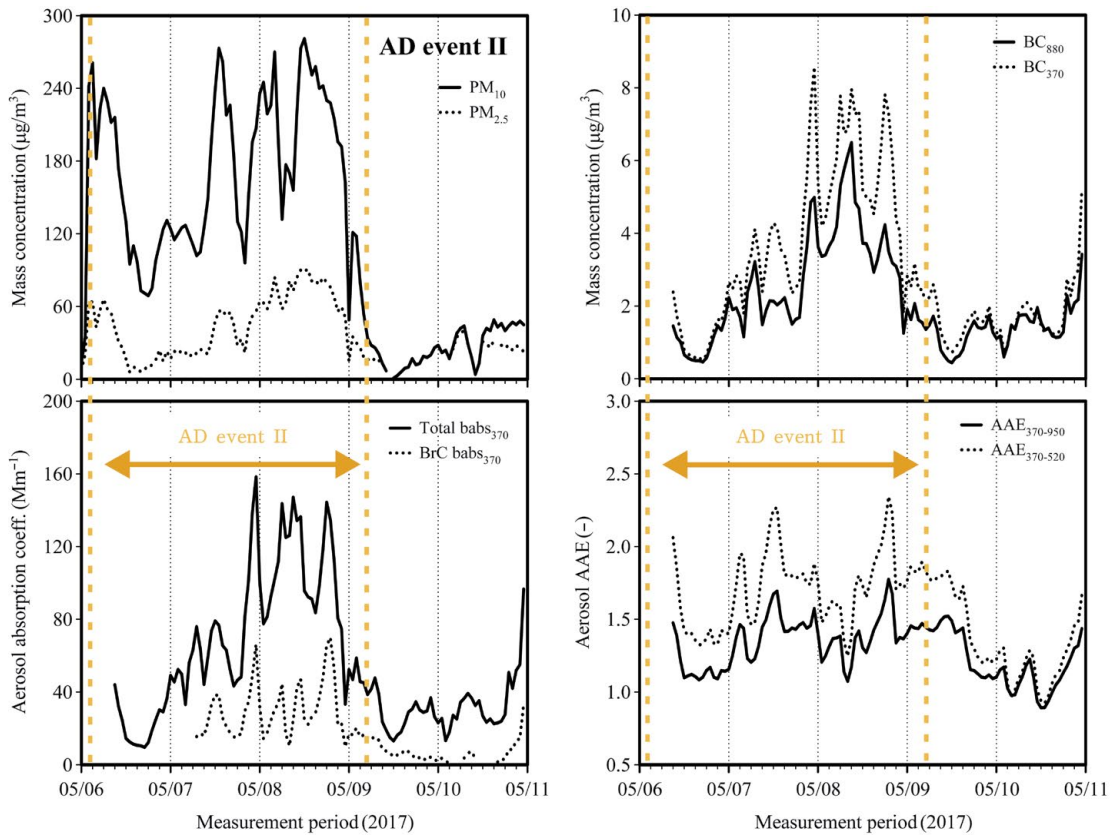


Fig. 13. Profiles of PM_{10} , $PM_{2.5}$, BC_{370} , BC_{880} , $b_{abs,370}$, $BrC b_{abs,370}$, $AAE_{370-950}$ and $AAE_{370-520}$ during AD event II.

높았다(표 1 참조). 이것은 황사 기간 중 자외선 파장에서 다양한 물질들(수용성 및 불용성 갈색탄소, 황사 입자 등)에 의해서 광흡수가 이루어져 높은 AAE 값이 얻어진 것으로 판단된다. 그림 14를 살펴보면 파장별 BrC 입자에 의한 광흡수계수는 파장에 따라 지수 함수적으로 감소하는 뚜렷한 경향을 보이고 있으며, 370 nm의 자외선 파장에서 가장 높은 광흡수 특성을 나타낸다(그림 14의 두 번째 그림). 370 nm 파장에서 BrC의 광흡수계수는 황사 발생 시에는 $28.5 Mm^{-1}$ 에서 황사 발생 후 $7.0 Mm^{-1}$ 로 감소하였으며, 파장이 증가함에 따라 광흡수계수의 차이는 감소하는 경향을 보여주었다. 그리고 370 nm에서 에어로졸 입자의 총 광흡수 중 BrC에 의한 광흡수가 차지하는 비율은 황사 발생 시에는 평균적으로 32.9%에서 황사 발생 후에는 21.0%까지 감소하는 결과를 가져왔다. 즉, 황사 현상이 발생 시 자외선 파장범위에서 바이오매스 연소 배출원, 자

동차 배기가스 외에도 황사 입자가 에어로졸 입자의 광흡수에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

광주광역시 한 도심지역의 4차선 도로로부터 약 150 m 떨어진 지점에서 2017년 1월부터 9월까지 7-파장 aethalometer를 이용하여 에어로졸 입자와 BrC의 광흡수 특성을 조사하였다. 또한 황사 발생 시 황사 입자의 광흡수 특성에 대해서도 조사하였다.

연구기간 중 에어로졸 입자에 의한 광흡수계수는 370 nm에서 880 nm보다 2.7~3.3배 높았다. 이것은 자외선 파장에서 빛을 흡수하는 물질로 BC 입자뿐만 아니라 다른 빛의 흡수원(e.g., BrC, 황사입자 등)이 존재하고 있음을 암시한다. 880~950 nm의 파장에서 BC

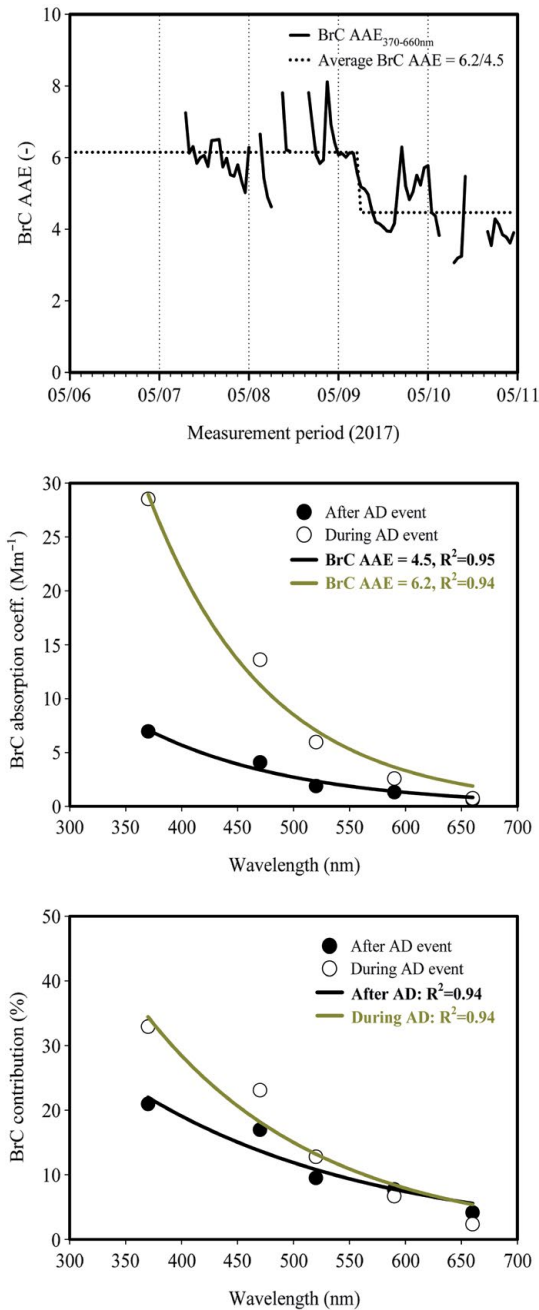


Fig. 14. Profiles of BrC AAE, and wavelength-dependent BrC light absorption and BrC contribution during AD event II.

입자에 대한 AAE의 값을 1.0으로 가정하고 370~660 nm의 파장범위에서 예측한 BrC의 AAE₃₇₀₋₆₆₀는 평균적

으로 4.22(범위 2.2~7.5)이었으며, AAE의 월 평균 값은 3.89~4.93이었다. 370 nm에서 측정된 에어로졸 입자의 광흡수계수 중 BrC가 차지하는 기여율은 10.4~28.4%이었으며 여름보다는 겨울과 봄에 BrC의 광흡수 기여율이 높았다.

연구 기간 중 두 번의 황사 현상이 발생하였다. AD I 기간(04/18 13:00~04/20 05:00) 중 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 평균 농도는 각각 108±36, 24±14 µg/m³이었으며, PM_{2.5}의 농도는 황사 발생 전·후와 비교해 큰 차이가 없었다. AD II 기간(05/06 02:00~05/09 05:00) 중 이들의 평균 농도는 각각 164±66, 43±26 µg/m³로 AD I과 비교해서 꽤 높았다. AD I 기간에서는 황사 발생 시와 발생 전·후의 PM_{2.5} 농도 및 880 nm에서 BC 농도와 광흡수계수가 큰 차이가 없었으나, AD II에서는 황사 발생 시와 발생 후의 PM_{2.5} 농도 및 880 nm에서 BC 농도와 광흡수계수가 크게 차이가 발생하였다. 두 황사 기간 중에 발생한 이와 같은 차이는 아마도 국지적으로 발생한 화석연료의 연소 오염원에 의한 영향이 AD I에 비해 AD II에서 더 크게 작용했기 때문으로 사료된다. 그리고 370 nm의 파장에서 측정된 BC의 농도와 광흡수계수 역시 AD II 기간에 훨씬 높았다. 두 황사 기간 중 에어로졸 입자에 의한 광흡수계수는 파장에 따라 지수 함수적으로 감소하는 뚜렷한 경향을 보였으며, 370 nm의 자외선 파장에서 가장 큰 광흡수 특성을 나타내었다. 그리고 370~660 nm의 파장범위에서 평가한 BrC 입자에 의한 AAE₃₇₀₋₆₆₀ 값은 AD I과 AD II에서 각각 4.8±0.5, 6.2±0.7로 평가되었으며, 이것은 AD II 기간 중 갈색탄소와 황사입자에 의한 광흡수가 더 많이 이루어졌음을 의미한다. 그리고 370 nm에서 에어로졸 입자의 총 광흡수 중 갈색탄소와 황사입자에 의한 광흡수가 차지하는 비율은 황사 발생 전에는 평균적으로 약 19%에서 황사 발생 시에는 32.9(AD II)~35.0(AD I)%까지 증가하였다. 이는 연구 기간 중 발생한 두 번의 황사 현상이 광주지역 대기 에어로졸 입자의 광흡수 향상에 기여를 했음을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임

니다(NRF-2017R1D1A3A03000511). 또한 중소기업 기술정보진흥원의 혁신형기술개발사업 (과제번호: S2501639)의 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

- 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.
- Bergstrom, R.W., Pilewskie, P., Pommier, J., Rabbette, M., Russell, P.B., Schmid, B., Redemann, J., Higurashi, A., Nakajima, T., Quinn, P.K. (2004) Spectral absorption of solar radiation by aerosols during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research*, 109, D19S15, doi:10.1029/2003JD004467.
- Bergstrom, R.W., Pilewskie, P., Russell, P.B., Redemann, J., Bonds, T.C., Quinn, P.K., Sierau, B. (2007) Spectral absorption properties of atmospheric aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5937-5943.
- Charlson, R.J., Schwartz, S.E., Hales, J.M., Cess, R.D., Coakley, J.A., Hansen, J.E., Hoffman, D.J. (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, 255, 423-430.
- Chen, T., Bond, T.C. (2010) Light absorption by organic carbon from wood combustion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1773-1787.
- Cheng, Y., He, K., Du, Z., Engling, G., Liu, J., Ma, Y., Zheng, M., Weber, R.J. (2016) The characteristics of brown carbon aerosol during winter in Beijing, *Atmospheric Environment*, 127, 355-364.
- Collaud Coen, M., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., Schikowski, M., Baltensperger, U. (2004) Saharan dust events at the Jungfraujoch: Detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 2465-2480.
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A.S.H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., 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, 1965-1979.
- Feng, Y., Ramanathan, V., Kotamarthi, V.R. (2013) Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 8607-8621.
- Gelencsér, A., Hoffer, A., Krivácsy, Z., Kiss, G., Molnar, A., Meszaros, E. (2000) On the possible origin of humic matter in fine continental aerosol, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 107(D12), 4137, doi:10.1029/2001JD001299.
- Gwangju (2017) A report of basic survey on the volume traffic in Gwangju in 2016.
- Hoffer, A., Gelencsér, A., Guyon, P., Kiss, G., Schmid, O., Frank, G.P., Artaxo, P., Andreae, M.O. (2006) Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 3563-3570.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) *Climate Change 2014: Radiative Forcing of Climate Change*, Cambridge Univ. Press, New York.
- 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 Physics*, 16, 3413-3432, doi: 10.5194/acp-16-3413-2016.
- Kim, H., Kim, J.Y., Jin, H.C., Lee, J.Y., Lee, S.P. (2016) Seasonal variations in the light-absorbing properties of water-soluble and insoluble organic aerosols in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 129, 234-242.
- Kirchstetter, T.W., Novakov, T., Hobbs, P.V. (2004) Evidence that spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon, *Journal of Geophysical Research*, 109, D21208.
- Kirchstetter, T.W., Thatcher, T.L. (2012) Contribution of organic carbon to wood smoke particulate matter absorption of solar radiation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 6067-6072.
- Laskin, A., Laskin, J., Nizkorodov, S.A. (2015) Chemistry of atmospheric brown carbon, *Chemical Reviews*, 115, 4335-4382.
- Liu, J., Bergin, M., Guo, H., King, L., Kotra, N., Edgerton, E., Weber, R.J. (2013) Size-resolved measurements of brown carbon in water and methanol extracts and estimates of their contribution to ambient fine-particle light absorption, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 12389-12404.
- Liu, J., Scheuer, E., Dibb, J., Diskin, G.S., Ziemba, L.D., Thornhill, K.L., Anderson, B.E., Wisthaler, A., Mikoviny, T., Devi, J.J., Bergin, M., Perring, A.E.,

- Markovic, M.Z., Schwarz, J.P., Campuzano-Jost, P., Day, D.A., Jimenez, J.L., Weber, R.J. (2015) Brown carbon aerosol in the North American continental troposphere: sources, abundance, and radiative forcing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 7841-7858.
- Martinsson, J., Eriksson, A.C., Elbæk Nielsen, I., Berg Malmberg, V., Ahlberg, E., Andersen, C., Lindgren, R., Nyström, R., Nordin, E.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 and Technology*, 49, 14663-14671.
- Olson, M.R., Garcia, M.V., Robinson, M.A., Van Rooy, P., Dietenberger, M.A., Bergin, M.H., Schauer, J.J. (2015) Investigation of black and brown carbon multiple wavelength dependent light absorption from biomass and fossil fuel combustion source emissions, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 120, 6682-6697.
- Park, S.S., Yu, J. (2016) Chemical and light absorption properties of humic-like substances from biomass burning emissions under controlled combustion experiments, *Atmospheric Environment*, 136, 114-122.
- Ramanathan, V., Carmichael, G. (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience* 1, 221-227.
- Russell, P.B., Bergstrom, R.W., Shinozuka, Y., Clarke, A.D., De-Carlo, P.F., Jimenez, J.L., Livingston, J.M., Redemann, J., Dubovik, O., Strawa, A. (2010) Absorption Ångström 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., Prevot, A.S.H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M.R., Lanz, V.A., Weingartner, E., Baltensperger, U. (2008) Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emissions contributions to particulate matter, *Environmental Science and Technology*, 42, 3316-3323.
- Schnaiter, M., Linke, M., Möhler, O., Naumann, K.-H., Saathoff, H., Wagner, R., Schurath, U., Wehner, B. (2005) Absorption amplification of black carbon internally mixed with secondary organic aerosol, *Journal of Geophysical Research*, 110, D19204, doi:10.1029/2005JD006046.
- Sun, H., Biedermann, L., Bond, T.C. (2007) Color of brown carbon: A model for ultraviolet and visible light absorption by organic carbon aerosol, *Geophysical Research Letter* 34, L17813.
- Titos, G., del Águila, A., Cazorla, A., Lyamani, H., Casquero-Vera, J.A., Colombi, C., Cuccia, E., Gianelle, V., Močnik, G., Alastuey, A., Olmo, F.J., Alados-Arboledas, L. (2017) Spatial and temporal variability of carbonaceous aerosols: Assessing the impact of biomass burning in the urban environment, *Science of the Total Environment*, 578, 613-625.
- 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, 1445-1463.
- Yu, J., Yu, G.-H., Park, S., Bae, M.-S. (2017) Chemical and absorption characteristics of water-soluble organic carbon and humic-like substances in size-segregated particles from biomass burning emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(2), 1-11.