

기술자료

충남 서산에서 가을철에 관측한 초미세먼지의 광흡수 특성

Light Absorption of PM_{2.5} Observed during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province

박승식*, 이광열¹⁾, 이민도¹⁾

전남대학교 환경에너지공학과, ¹⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과

Seungshik Park*, Kwangyul Lee¹⁾, Mindoo Lee¹⁾

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

¹⁾Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2020년 4월 3일
수정일 2020년 4월 21일
채택일 2020년 4월 23일

Received 3 April 2020
Revised 21 April 2020
Accepted 23 April 2020

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

Abstract In this study, a real-time monitoring of aerosol light absorption was conducted using a dual-spot seven-wavelength aethalometer with a PM_{2.5} impactor between October 18 and November 05, 2019 at Chungcheong region air quality research center in Seosan, Chungcheongnam-do. Over the study period, light absorption coefficients of atmospheric aerosol and brown carbon (BrC) at wavelength of 370 nm peaked in both the morning (07:00~09:00 LT) and evening hours (17:00~24:00 LT), but with more predominance of their absorption coefficients during nighttime hours. This could possibly be due to light-absorbing organic aerosols from biomass burning emissions at night around the sampling site. Contribution of black carbon (BC) and BrC absorption to total aerosol light absorption at 370 nm wavelength was 70.4 and 29.6% at 08:00 LT and 53.5 and 46.4% at 18:00 LT, respectively. For the time when the contribution of BC absorption (~33%) to total aerosol absorption at 370 nm was approximately two-fold lower than BrC absorption contribution (~67%), absorption Ångström exponent (AAE) values of aerosol particles in the 370~520 nm wavelength range (AAE₃₇₀₋₅₂₀) were greater than 2.0, reaching maximum of 3.1. On the other hand, when BC absorption accounted for most of the total aerosol absorption, aerosol AAE₃₇₀₋₅₂₀ values were close to 1.0. For the periods when light absorption by aerosol particles significantly increased, AAE₃₇₀₋₆₆₀ of BrC estimated between the wavelengths of 370 and 660 nm was in the range of 3.4~5.1. The difference in AAE values among the excursion periods was likely due to the considerable difference in water-soluble and insoluble BrC absorption. Furthermore, correlation analyses among water-soluble organic carbon (OC), total OC concentrations, and BrC absorption coefficients at 370 nm wavelength suggest that light absorption by BrC particles was clearly influenced by not only water-soluble OC fractions, but water-insoluble OC fractions.

Key words: Chungcheong region, Dual-spot multi-wavelength aethalometer, Aerosol light absorption, BC absorption, Water-soluble and insoluble BrC absorption

1. 서 론

대기 에어로졸 입자 내 중요한 구성물질인 탄소성분은 크게 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소(elemental carbon, EC)로 분류할 수 있다. 탄소성분을 다시 열화학적 분석법(thermochemical method)

과 광학적 분석법(optical method)에 따라 각각 EC와 OC, 블랙카본(black carbon, BC)과 광흡수(및 광-비흡수) OC 성분으로 분류할 수 있다(Pöschl, 2005). 대기 중에 존재하는 BC 입자는 화석 연료나 생물성 물질들의 불완전 연소과정을 통해 배출되므로 대부분 PM_{2.5}에 해당하는 초미세먼지의 크기범위에 분포한

다. 그리고 이들은 근자외선~근적외선 파장 범위 (400~900 nm)에서 빛을 강하게 흡수하는 물질이지만 약한 파장 의존성을 가지고 있다. 그러나 유기 에어로졸 입자의 한 종류인 갈색탄소 (brown carbon, BrC) 입자는 빛을 산란하는 일반적인 OC 입자와 다르게 빛을 흡수하는 유기물질 (광흡수 OC에 해당)로 알려져 있다 (Laskin *et al.*, 2015; Kirchstetter *et al.*, 2004). 반면에 이들은 BC 입자와 다르게 300~700 nm의 파장범위에서 파장이 감소할수록 빛의 흡수가 지수 함수적으로 증가하며 강한 파장 의존성을 가지는 것으로 알려져 있다. BrC 입자는 1차적으로는 주로 생물성 연소과정을 통해 배출되는 것으로 알려져 있으나 (Park *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018, 2017; Fan *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016; Laskin *et al.*, 2015), 최근 연구 결과들에 의하면 연료로 중유나 등유를 사용하는 어선이나 중·대형 선박들의 활동 (Yu *et al.*, 2019, 2018; Pei *et al.*, 2017; Mueller *et al.*, 2015)이나 가솔린 엔진 차량 (Xie *et al.*, 2017)을 통해서도 빛을 흡수하는 OC 입자가 배출되는 것으로 보고되고 있다. 게다가 대기 중에서 휘발성 유기화합물의 산화 과정을 통해서도 생성되는 것으로 알려져 있다 (Zheng *et al.*, 2013; Updyke *et al.*, 2012).

일반적으로 대기 에어로졸 입자 내 BC와 BrC에 의한 광흡수를 분리하기 위하여 흡수용스트롱지수 (Absorption Ångström Exponent, AAE)를 이용한다 (Yu *et al.*, 2019, 2018; Kirchstetter and Thatcher, 2012; Sandradewi *et al.*, 2008). 예를 들어, 화석연료의 연소 과정 (e.g., 자동차 배기가스)을 통해 배출되는 BC 입자는 약 1.0에 가까운 AAE 값을 갖지만, 생물성 연소나 선박 활동을 통해 배출되는 BrC 입자의 AAE 값은 2.0에 근접한 것으로 알려져 있다 (Yu *et al.*, 2019, 2018; Yu *et al.*, 2017; Laskin *et al.*, 2015; Kirchstetter *et al.*, 2004). 뿐만 아니라, 먼지 (soil dust) 성분들에 의해 광흡수가 일어나는 경우의 AAE 값은 사하라 사막 먼지는 1~2 (Collaud Coen *et al.*, 2004), 도시지역 발생 인위적 입자와 중국과 몽골의 사막 먼지가 섞인 입자는 2.2 (Bergstrom *et al.*, 2004)를 갖는다고 하였다. 과

거 많은 연구에서 BrC 입자에 의한 광흡수 계수를 평가하기 위하여 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 계수와 BC의 AAE 값을 1.0으로 가정한 후 예측한 BC에 의한 광흡수 계수를 이용하였다 (Yu *et al.*, 2019, 2018; Park *et al.*, 2018; Park and Son, 2017; Liu *et al.*, 2015; Olsen *et al.*, 2015; Kirchstetter and Thatcher, 2012).

국내에서 대기 에어로졸 입자 내 BrC의 광흡수에 대한 연구는 대부분 도시지역을 중심으로 수행되어 왔으나 (Park and Yu, 2019; Park *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018; Park and Son, 2017), 나무, 농업폐기물 등의 바이오매스의 소각 활동이 빈번하게 이루어지고 있는 준·시골지역에서 BrC 입자에 의한 광흡수 특성에 대한 연구는 매우 제한적이었다. 따라서 본 연구에서는 충청남도 서산시에 위치한 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소에서 2019년 10월 18일에서 11월 5일까지 dual-spot 7-파장 aethalometer를 이용하여 1분 간격으로 PM_{2.5}의 BC 농도를 측정하여 BrC 입자의 광흡수 특성을 조사하였다. 측정 지점인 충청권 대기환경연구소는 농공산업단지 내에 위치하고 있으며 서산시 도심지역으로부터 동쪽으로 3.8~5 km 떨어져 있다.

2. 연구 방법

2.1 PM_{2.5}의 실시간 광흡수 계수 측정

1분 간격의 PM_{2.5} 광흡수 계수의 측정은 7파장 dual-spot aethalometer (AE33, Aerosol d.o.o., Slovenia)를 이용하여 충청남도 서산시에 위치한 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소 (126.4939E, 36.7769N, 서산 기상대, 그림 1)에서 2019년 10월 18일부터 11월 5일까지 이루어졌다. 측정 지점은 서산시 도심지역으로부터 동쪽으로 약 3~5 km에 위치하고 있으며 주변으로는 농지와 소규모 사업장들이 있는 시골지역, 도시지역, 그리고 사업장의 대기오염특성이 혼합된 장소이다. 그리고 측정소에서 북쪽으로 약

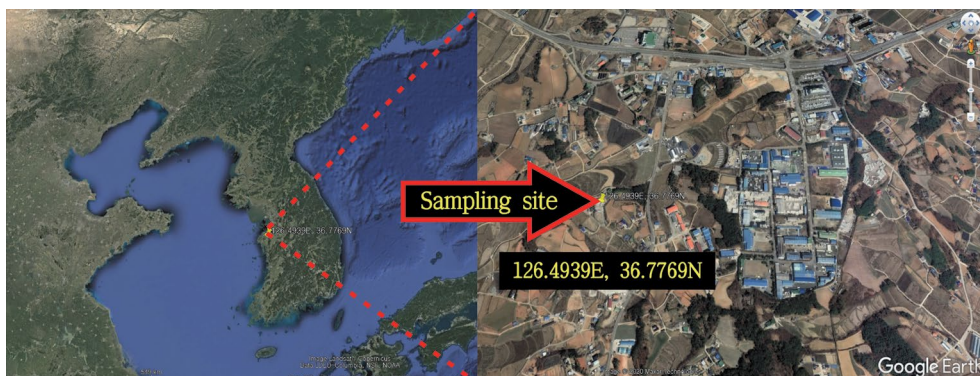


Fig. 1. An observation site in Seosan.

1 km 거리에 2차선 도로가 있으며, 또한 약 200 m 위치에 소규모 목재소가 영업 중에 있어 빈번하게 목재를 소각하는 행위가 이루어지고 있다. Aethalometer에서 사용된 7가지의 파장은 근자외선~근적외선 범위에 해당하는 370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm이다. 연구에서 사용된 aethalometer의 측정 원리는 기존의 연구 논문들에 상세하게 설명되어있다(Yu *et al.*, 2019, 2018; Park *et al.*, 2018; Drinovec *et al.*, 2015).

2.2 BC 및 갈색 탄소의 광흡수 계수 평가

Aethalometer로부터 측정되는 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수는 BC, BrC, 그리고 지각 먼지 성분들에 의한 각 흡수체의 흡수 계수의 합으로 나타난다. 그러나 이들 흡수체의 광흡수 정도는 파장에 따라 다르며 AAE 값 역시 다른 것으로 알려져 있다(Yu *et al.*, 2019, 2018; Laskin *et al.*, 2015; Kirchstetter and Thatcher, 2012; Sandradewi *et al.*, 2008). 예를 들어, BC에 의한 광흡수는 파장에 따라 크게 변하지 않는 반면에, BrC과 흙먼지나 황사먼지와 같은 지각물질로 이루어진 먼지들은 근자외선 파장 범위(300~400 nm)에서 빛을 강하게 흡수한다(Laskin *et al.*, 2015). Aethalometer를 이용한 에어로졸 입자의 광흡수 계수는 이들 세 흡수체에 의한 광흡수 계수의 합으로 결정된 값이므로 각 물질에 의한 광흡수 계수를 분리하는 것이 필요하다. Aethalometer에 의해 측정된 에

어로졸 입자의 광흡수 계수로부터 각 흡수체의 광흡수 기여도를 분리하는 방법에 대해서는 과거 논문들에 상세히 언급되어 있다(Park *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018; Sandradewi *et al.*, 2008). 측정 기간 중 먼지 입자에 의한 광흡수를 무시하면, 파장에 따른 $PM_{2.5}$ 에 의한 전체 광흡수 계수($b_{abs, \lambda}$)는 BC와 BrC 입자의 광흡수 계수($b_{BC, \lambda}$ 와 $b_{BrC, \lambda}$)의 합으로 표현할 수 있다.

$$b_{abs, \lambda} = b_{BC, \lambda} + b_{BrC, \lambda} \quad (1)$$

여기에서 BC에 의한 광흡수($b_{BC, \lambda}$)는 880 및 950 nm의 파장에서 일어나는 모든 광흡수는 BC에 의해서만 발생한다고 가정하고 계산하였다(Yu *et al.*, 2018; Sandradewi *et al.*, 2008). 이와 같은 가정을 토대로 880 nm 이하의 파장에서 BC에 의한 광흡수 계수는 아래 식 (2)로부터 계산하였다(Yu *et al.*, 2019, 2018; Martinsson *et al.*, 2015). 식 (2)에서 필요로 하는 BC 입자의 AAE 값(AAE_{BC})은 1.0을 적용하였다. 그리고 에어로졸 입자와 BrC 입자에 의한 AAE 값은 식 (3)과 같이 광흡수 계수와 파장 사이의 지수관계를 이용하여 계산하였다(Laskin *et al.*, 2015).

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

$$AAE = - \frac{\log\left(\frac{b_{abs,\lambda_1}}{b_{abs,\lambda_2}}\right)}{\log\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad (3)$$

식(3)에서 λ_1 과 λ_2 는 370과 660 nm의 파장을 의미하며, $b_{abs,\lambda}$ 는 파장 λ 에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 계수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대기 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수의 일반적 특성

그림 2는 370 nm의 파장에서 측정한 1시간 평균 초미세먼지 입자의 전체 광흡수 계수와 식(1)과 (2)를 이용해 평가한 BrC 입자의 광흡수 계수의 변화를 나타낸 그림이다. 또한 측정 지점으로부터 서쪽 방향으로 약 4 km 떨어져 있는 서산시 동문동에 위치한 도시대기측정망에서 생산한 PM_{2.5}의 시간별 농도 자료를 나타내었다. 대기 에어로졸 입자와 BrC 입자의 광흡수 계수의 변화 추이를 보면 아침 시간(07:00~09:00 LT)과 저녁 시간(17:00~24:00 LT)에 피크가 관측되었으며, 아침보다는 저녁 시간에 더 두드러진 광흡수 계수의 증가가 확인되었다. 이는 아침과 저녁

시간에 출·퇴근에 의한 차량 통행의 영향과 저녁에 측정 지점 주변에서 나무 등의 바이오매스 연소에 의한 유기 입자의 배출에 의한 영향으로 판단된다. 논문에서 사용된 시간은 한국 현지시간(local time)을 나타낸다.

그림 2를 보면, 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수의 변화는 PM_{2.5}의 농도 변화와 직접적으로 관련은 없었다. 예를 들어, 370 nm에서 측정한 에어로졸 입자의 광흡수 계수가 가장 높은 10월 27일 18:00시에 PM_{2.5}의 농도는 18 µg/m³이었다. 이때 370 nm의 파장에서 측정한 에어로졸 입자, BC 입자, 그리고 BrC 입자의 광흡수 계수는 각각 355, 116, 239 Mm⁻¹로 대기 에어로졸 입자에 의한 광흡수는 BC 입자(33%)보다는 유기에어로졸 입자(67%)에 의한 빛의 흡수가 훨씬 우세하였다. 370~950 nm와 370~520 nm에서 평가한 AAE₃₇₀₋₉₅₀와 AAE₃₇₀₋₅₂₀ 값은 각각 2.2와 3.1로 매우 높았다. 보통 AAE의 값이 >2.0일 때 에어로졸 입자에 의한 빛의 흡수는 바이오매스 연소에 의해 배출된 에어로졸 입자에 의해 일어난다고 알려져 있기 때문에(Laskin *et al.*, 2015), 이 경우 빛의 흡수는 확실히 바이오매스 연소 입자와 밀접한 관련이 있었음을 추정할 수 있다. 보통 대기 중 BC 입자의 농도로 사용되는 880 nm의 파장에서 측정된 BC의 광흡수 계수는 49 Mm⁻¹로 370 nm에서의 광흡수 계수(116 Mm⁻¹)

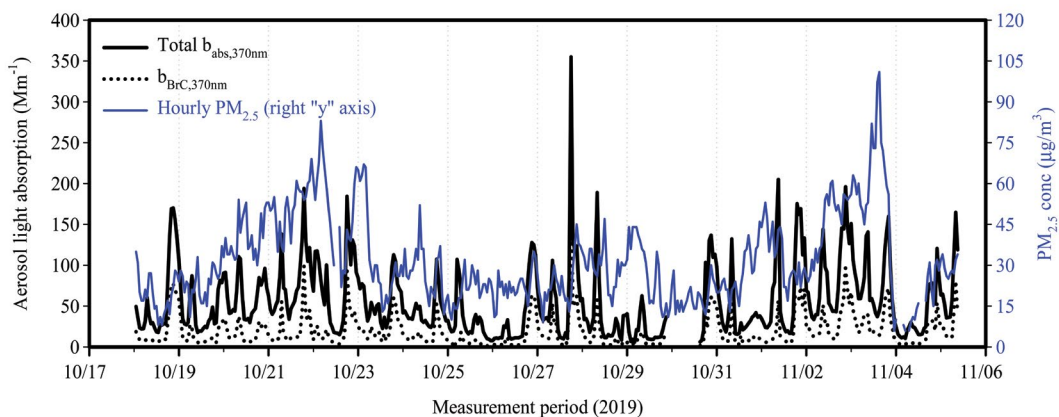


Fig. 2. Temporal variations of light absorption coefficients due to aerosol ($b_{abs, 370 \text{ nm}}$) and BrC ($b_{BrC, 370 \text{ nm}}$) particles at 370 nm, and PM_{2.5} concentration over the study period.

와 비교해 상당히 낮았다. 그러나 1시간 기준 $PM_{2.5}$ 의 농도가 매우 높았던 11월 3일 15:00시($PM_{2.5}$: $101 \mu g/m^3$)와 10월 22일 04:00시($PM_{2.5}$: $83 \mu g/m^3$)에 대기 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수는 매우 낮았다. 11월 3일 15:00시에 관측된 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자, BC 입자, 그리고 BrC 입자의 광흡수 계수는 각각 44, 30, $14 Mm^{-1}$ 로 BC 입자(68%)가 BrC 입자에 의한 광흡수보다 약 2배 높았다. 이때 평가한 $AAE_{370-950}$ 와 $AAE_{370-520}$ 값은 각각 1.4와 1.6이었다. 10월 22일 04:00시의 경우에도 유사한 결과가 얻어졌다. 이때는 대기 에어로졸 입자에 의해 발생한 광흡수($82 Mm^{-1}$)의 대부분은 BC 입자($73 Mm^{-1}$, 89%)에 의해 이루어졌다. 그리고 $AAE_{370-950}$ 와 $AAE_{370-520}$ 값은 각각 1.13과 1.11로 대기 에어로졸 입자에 의한 빛의 흡수는 차량 운행을 통해 배출된 BC 입자가 주요 원인이었음을 의미한다. 이와 같이 대기 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수와 BC와 BrC에 의한 광흡수 기여율 역시 $PM_{2.5}$ 의 질량농도와는 크게 상관성이 없었다. 이것은 에어로졸 입자와 BrC의 광흡수 계수는 측정 지점 주변과 외부로부터 바이오매스 연소 과정을 통해 배출 또는 유입되는 BrC 에어로졸 입자의 존재 유무에 따라 크게 좌우됨을 암시한다.

그림 3은 370 nm에서 측정된 에어로졸 입자, BC 및 BrC 입자에 의한 광흡수 계수의 일별 변화를 보여준다. 또한 서산시 동문동 대기오염측정소에서 관측된 24시간 평균 $PM_{2.5}$ 의 농도를 그림 3에 포함하였다. 그림 3을 보면, 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자의 24시간 평균 광흡수 계수는 10월 21일, 27일, 그리고 11월 2일에 세 번의 피크가 관측되었다. 10월 21일, 27일, 그리고 11월 2일에 관측된 대기 에어로졸 입자, BC 입자 및 BrC 입자에 의한 24시간 평균 광흡수 계수는 각각 84, 62 및 $21 Mm^{-1}$, 70, 39 및 $32 Mm^{-1}$, 96, 60 및 $36 Mm^{-1}$ 이었다. 이때 측정된 24시간 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 각각 41, 19, $51 \mu g/m^3$ 이었다. 10월 27일의 경우는 그림 2에서 설명한 바와 같이, $PM_{2.5}$ 의 농도 수준에 비해 대기 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수가 상당히 높게 관측되었다. 10월 21일, 27

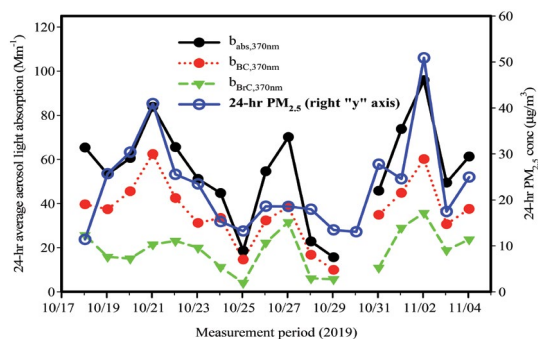


Fig. 3. Daily variations of light absorption due to aerosol, BC and BrC particles at wavelength of 370 nm, and of 24-hr $PM_{2.5}$ concentration.

일 및 11월 2일의 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 입자에 의한 광흡수 기여율은 23.6%, 37%, 35%이었다. 이는 10월 21일에 관측된 대기 에어로졸 입자의 광흡수는 BC 입자에 의한 광흡수 기여도가 상당히 우세하였으나, 10월 27일과 11월 2일에는 상대적으로 BrC 입자에 의한 광흡수 기여도가 증가하였음을 의미한다. 이와 같은 결과는 $AAE_{370-520}$ 에서도 입증된다. 10월 21일, 27일 및 11월 2일에 370~520 nm의 파장 사이에서 평가한 에어로졸 입자의 평균 $AAE_{370-520}$ 값은 각각 1.37, 1.76, 1.67이었다. 11월 2일에 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수가 피크에 이르기 전인 11월 1일의 370 nm에서 에어로졸 입자와 BrC에 의한 광흡수 계수는 11월 2일보다 낮았으나, BrC에 의한 광흡수 기여율은 38%로 높았으며 에어로졸 입자의 $AAE_{370-520}$ 값 역시 1.78로 높았다.

3.2 근자외선 파장에서 BrC 광흡수의 시간별 변동 특성

그림 4는 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자, BC 입자 및 BrC 입자에 의한 광흡수 계수의 시간 변화(diurnal cycle)를 보여준다. 이들 입자들의 시간에 따른 광흡수 계수의 변화를 보면 모두 아침(06:00~09:00 LT)과 저녁 시간(18:00~24:00 LT)에 두 번의 피크가 관측되었다. 에어로졸과 BrC 입자의 경우는 아

침보다는 저녁 시간에 광흡수 계수의 증가가 더 크게 나타났다. 반면에, BC 입자에 의한 광흡수는 아침과 저녁에 거의 비슷한 수준으로 나타났다. 에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수가 최대가 되는 아침 시간(08:00 LT)과 저녁 시간(18:00 LT)에 BC와 BrC에 의한 광흡수가 차지하는 비율은 각각 70.4와 29.6%, 53.5와 46.4%였다. 이와 같이 저녁 시간에 높게 측정된 에어로졸 입자에 의한 광흡수는 저녁 시간에 측정 지점 주변에서 바이오매스의 연소 활동에 의해 배출된 BrC 입자에 의한 광흡수의 증가로부터 기인된 것으로 판단된다. 그러나 광주광역시 도심지역에서는

에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 입자에 의한 광흡수가 차지하는 비율은 저녁 시간에 바이오매스의 연소 활동에 의한 BrC 입자의 배출이 낮기 때문에 아침과 저녁에 큰 차이를 보이지 않았다(Yu *et al.*, 2018). 뿐만 아니라 BrC의 광흡수 계수 역시 저녁보다는 아침 시간에 더 높게 조사되었다. 그리고 370 nm에서 BC 입자에 의한 광흡수 계수는 아침 시간에 차량 통행량의 급증으로 인해 저녁보다는 훨씬 높았다.

3.3 BrC의 광흡수에 대한 사례 조사

그림 2에서 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자의 광흡수가 급격하게 증가하는 10월 21일 18:00, 10월 27일 17:00, 11월 1일 08:00 및 11월 2일 20:00시에 대해 에어로졸 입자의 광흡수 특성을 구체적으로 살펴 보았다. 10월 21일 18:00, 10월 27일 17:00, 11월 1일 08:00 및 11월 2일 20:00에 370 nm의 파장에서 평가한 BrC에 의한 광흡수 계수는 각각 99, 239, 57, 96 Mm^{-1} 이었다. 그림 5는 언급한 네 종류의 사례에 대해서 370~660 nm의 파장 범위에서 파장 변화에 따른 BrC의 광흡수 계수 변화를 도식화한 것이다. 각 사례에 대한 370~660 nm의 파장 범위에서 예측한 BrC의 $\text{AAE}_{370-660}$ 값은 각각 4.4, 5.1, 3.4, 4.8이었다(그림 5(a)).

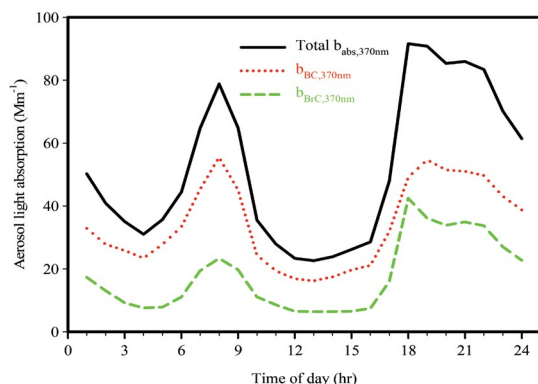


Fig. 4. Diurnal variations of light absorption due to aerosol, BC, and BrC particles at 370 nm.

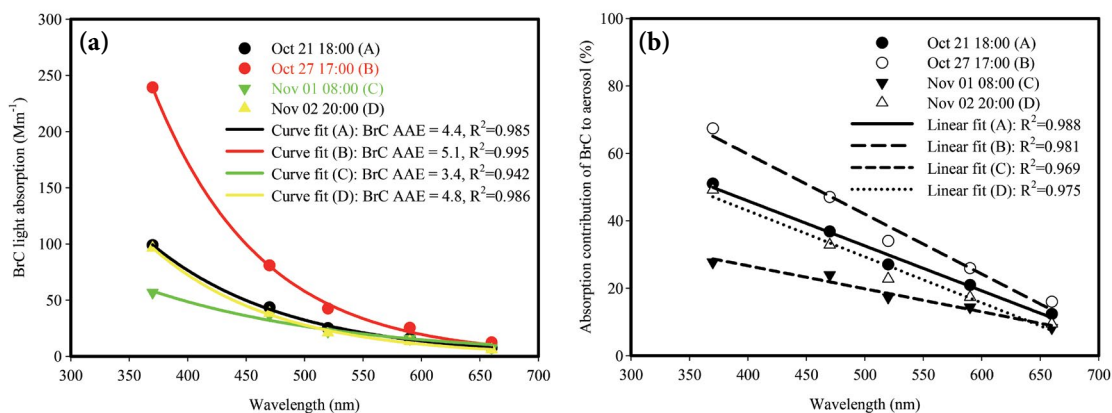


Fig. 5. (a) Dependence of wavelength on BrC light absorption and (b) faction of BrC absorption to total aerosol absorption over wavelength.

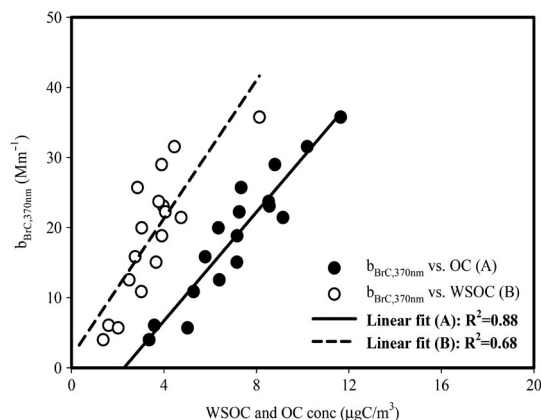


Fig. 6. Regression relationship between WSOC and OC concentrations, and BrC light absorption at 370 nm.

그림 5에서 각 사례에 따라 $AAE_{370-660}$ 의 값이 차이가 나는 이유는 에어로졸 입자에 의한 광흡수 중 BrC에 의한 광흡수가 큰 차이를 보였기 때문이며 BrC의 $AAE_{370-660}$ 값이 가장 높은 10월 27일의 대기 에어로졸 입자에 빛을 흡수하는 BrC 물질이 가장 많이 함유된 것으로 판단된다. 유기 에어로졸 입자에 의한 빛의 흡수가 바이오매스 연소로부터 배출된 수용성 유기입자에 의해 일어나면 BrC의 AAE 값은 보통 6~7을 가지는 것으로 보고되었다 (Park *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2016; Fan *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016). 그러나 BrC 입자의 AAE 값이 6~7보다 작은 값을 가지면 수용성 유기 입자뿐만 아니라 불용성 유기 입자에 의한 빛의 흡수가 포함되어 나타난 결과로 설명이 가능하다. 이와 같은 가설을 입증하기 위해 동일한 장소에서 2019년 10월 18일~11월 4일까지 측정된 $PM_{2.5}$ 내 유기탄소 (OC)와 수용성 유기탄소 (water-soluble OC, WSOC)의 농도 (Ju *et al.*, 2020)와 aethalometer에 의해 370 nm의 파장에서 평가한 BrC에 의한 광흡수 계수 ($b_{BrC, 370nm}$)와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 의하면 370 nm에서 BrC에 의한 광흡수 계수는 WSOC 농도와는 0.68의 R^2 를 나타낸 반면에 수용성과 불용성 분율을 모두 포함하는 OC 농도와는 0.88의 R^2 를 보였다. 이는 BrC 입자에 의한 광흡수는 확

실하게 수용성 유기물질 (WSOC)뿐만 아니라 불용성 유기물질에 의해서도 이루어졌음을 의미한다. 따라서 위의 네 가지 사례의 경우에는 BrC 입자에 의한 광흡수가 수용성뿐만 아니라 불용성 유기에어로졸 입자에 의한 빛의 흡수가 포함되어 나타난 결과로 판단이 되지만, 두 번째 경우인 10월 27일 17:00시에는 측정 지점 주변의 바이오매스 연소 과정을 통해 배출된 유기에어로졸 입자가 대기 에어로졸 입자의 광흡수에 가장 크게 영향을 주었을 것이다. 그리고 빛의 파장 변화에 따른 에어로졸 입자의 광흡수 중 BrC 입자의 광흡수가 차지하는 기여율은 파장이 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다 (그림 5(b)). 네 가지 사례에 대한 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자의 전체 광흡수 중 BrC의 광흡수 기여율은 각각 51.0%, 67.4%, 27.7%, 49.2%를 차지하였으며, 이와 같은 차이는 BrC 입자의 AAE 값에 영향을 주었다고 볼 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

연구에서는 충남지역 서산시에 위치한 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소에서 2019년 10월 18일~11월 5일까지 dual-spot aethalometer 기기를 활용하여 1분 간격으로 $PM_{2.5}$ 의 광흡수 계수를 측정하였다. 측정 지점은 아산시 도심지에서 약 5 km 떨어져 있고 인근에 농지와 소규모 사업장들이 혼재된 곳에 위치하고 있어 대기오염 측면에서는 도시지역보다는 도시와 시골지역의 혼합특성을 가지는 장소이다.

연구 기간 중 대기 에어로졸과 BrC 입자의 광흡수 계수는 아침과 저녁 시간에 뚜렷한 증가 현상이 관측되었으며, 아침보다는 저녁 시간의 증가가 더 두드러졌다. 연구를 통해 확인된 중요한 결과는 $PM_{2.5}$ 의 농도가 낮더라도 빛을 흡수하는 유기에어로졸 입자에 의한 광흡수 계수가 매우 높게 측정된 점이다. 이때 370~520 nm의 파장에서 평가한 에어로졸 입자의 흡수용스트롱지수인 $AAE_{370-520}$ 의 값은 3.1로 매우 높

았다. 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자의 광흡수 계수가 급증하는 네 종류의 사례에서 370~660 nm에서 예측한 BrC의 $AAE_{370-660}$ 의 값은 3.4~5.1로 사례별로 상당한 차이를 보였는데, 이것은 대기 에어로졸 입자에 빛을 흡수하는 수용성 및 불용성 유기에어로졸 입자의 농도 차이로부터 기인하였다. 불용성 유기입자에 의한 빛의 흡수 여부는 WSOC와 OC의 농도와 BrC 입자의 광흡수 계수 사이의 상관관계를 통해 입증하였다. 또한 370 nm의 파장에서 대기 에어로졸, BC 및 BrC 입자에 의해 일어나는 광흡수의 시간별 변화에 의하면, 아침 시간에 두드러진 증가를 보이는 도시지역의 특성과 다르게 측정 지점에서는 대기 에어로졸과 BrC 입자의 광흡수는 아침보다는 저녁 시간에 더 증가하는 현상이 관측되었다. 이것은 측정 지점 주변이 농업과 소규모 사업장들로 이루어진 지역적 특성상 야간에 나무 등의 바이오매스 연소 활동으로 배출된 유기 에어로졸 입자의 농도 증가에 기인한 것이다. 본 연구를 통해 확인된 결과는 주변 지역의 대기질 악화나 기후 변화(기온 상승) 관점에서 현재 무책임하게 이루어지고 있는 바이오매스의 불법 소각 행위가 근절될 수 있도록 강력한 행정 조치가 이루어져야 함을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019M1A2A2103953). 논문에서 사용된 실시간으로 관측된 $PM_{2.5}$ 의 블랙카본 자료는 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소로부터 제공받았으며 이에 감사드립니다.

References

- 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(D19), D19S15. <https://doi.org/10.1029/2003JD004467>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.035>
- 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(11/12), 2465-2480. <https://doi.org/10.5194/acp-4-2465-2004>
- Drinovec, L., Möcnik, 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(5), 1965-1979. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Fan, X., Wei, S., Zhu, M., Song, J., Peng, P. (2016) Comprehensive characterization of humic-like substances in smoke $PM_{2.5}$ emitted from the combustion of biomass materials and fossil fuels, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(20), 13321-13340. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13321-2016>
- Ju, S., Yu, G.H., Park, S., Lee, J., Lee, S., Ji, J., Lee, K., Lee, M. (2020) Pollution characteristics of $PM_{2.5}$ measured during fall at Seosan site in Chungcheong province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, submitted for publication.
- 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(D21), D21208. <https://doi.org/10.1029/2004JD004999>
- 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(14), 6067-6072. <https://doi.org/10.5194/acp-12-6067-2012>
- 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>
- 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. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7841-2015>
- 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. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03205>
- Mueller, L., Jakobi, G., Czech, H., Stengel, B., Orasche, J., Arteaga-Salas, J.M., Kara, E., Elsasser, M., Sippula, O., Streibel, T., Slowik, J.G., Prevot, A.S.H., Jokiniemi, J., Rabe, R., Harndorf, H., Michalke, B., Schnelle-Kreis, J., Zimmermann, R. (2015) Characteristics and temporal evolution of particulate emissions from a ship diesel engine, *Applied Energy*, 155, 204-217. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.115>
- 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. <https://doi.org/10.1002/2014JD022970>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.022>
- Park, S.S., Son, S.-C. (2017) Relationship between carbonaceous components and aerosol light absorption during winter at an urban site of Gwangju, Korea, *Atmospheric Research*, 185, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.005>
- Park, S.S., Son, S.C., Lee, S. (2018) 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., Yu, G. (2019) Absorption properties and size distribution of aerosol particles during the fall season at an urban site of Gwangju, Korea, *Environmental Engineering Research*, 24(1), 159-172. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.166>
- Pei, X., Pathak, R.K., Eriksson, A.C., Salo, K., Hallquist, M. (2017) Chemical, physical and optical properties of ship plumes catching by MEGA-chamber, European Aerosol Conference 2017, Zurich, Abstract SPS6N1ba.
- Pöschl, U. (2005) "Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects", *Angewandte Chemie International Edition*, 44, 7520-7540, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>
- 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(9), 3316-3323. <https://doi.org/10.1021/es702253m>
- Updyke, K.M., Nguyen, T.B., Nizkorodov, S.A. (2012) Formation of brown carbon via reactions of ammonia with secondary organic aerosols from biogenic and anthropogenic precursors, *Atmospheric Environment*, 63, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.012>
- Xie, M., Hay, M.D., Holder, A.L. (2017) Light-absorbing organic carbon from prescribed and laboratory biomass burning and gasoline vehicle emissions, *Scientific Reports*, 7, 7318. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06981-8>
- 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. <https://doi.org/10.5572/ajae.2017.11.2.096>
- Yu, G.-H., Yu, J., Park, 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>
- Yu, G.-H., Park, 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), 564-576 (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.564>
- Zheng, G.J., He, K.B., Duan, F.K., Cheng, Y., Ma, Y.L. (2013) Measurement of humic-like substances in aerosols: A review, *Environmental Pollution*, 181, 301-314. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.05.055>

Authors Information

박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)

이광열 (국립환경과학원 대기환경연구과 충청권대기환경연구소
환경연구사)

이민도 (국립환경과학원 대기환경연구과 충청권대기환경연구소
환경연구관)