



기술자료

# 광주 지역에서 aethalometer 측정 블랙 카본 입자의 질량흡수단면 평가

## Aethalometer-based Estimate of Mass Absorption Cross Section of Black Carbon Particles at an Urban Site of Gwangju

박승식\*, 유근혜, 이상일<sup>1)</sup>, 배민석<sup>2)</sup>

전남대학교 환경에너지공학과, <sup>1)</sup>한국표준과학연구원 가스분석표준센터

<sup>2)</sup>국립목포대학교 환경공학과

접수일 2018년 10월 1일  
 수정일 2018년 10월 12일  
 채택일 2018년 10월 12일

Received 1 October 2018  
 Revised 12 October 2018  
 Accepted 12 October 2018

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

Seung-Shik Park\*, Geun-Hye Yu, Sang-Il Lee<sup>1)</sup>, Min-Suk Bae<sup>2)</sup>

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

<sup>1)</sup>Center for Gas Analysis, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS)

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

**Abstract** In this study, real-time absorption coefficients of carbonaceous species in  $PM_{2.5}$  was observed using a dual-spot 7-wavelength Aethalometer between November 1, 2016 and December 31, 2017 at an urban site of Gwangju. In addition, 24-hr integrated  $PM_{2.5}$  samples were simultaneously collected at the same site and analyzed for organic carbon and elemental carbon (OC and EC) using the thermal-optical transmittance protocol. A main objective of this study was to estimate mass absorption cross section (MAC) values of black carbon (BC) particles at the study site using the linear regression between aethalometer-based absorption coefficient and filter-based EC concentration. BC particles observed at 880 nm is mainly emitted from combustion of fossil fuels, and their concentration is typically reported as equivalent BC concentration (eBC). eBC concentration calculated using MAC value of  $7.77 \text{ m}^2/\text{g}$  at wavelength of 880 nm, which was proposed by a manufacturer, ranged from  $0.3$  to  $7.4 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$  with an average value of  $1.9 \pm 1.2 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ , accounting for 7.3% (1.5~20.9%) of  $PM_{2.5}$ . The relationship between aerosol absorption coefficients at 880 nm and EC concentrations provided BC MAC value of  $15.2 \text{ m}^2/\text{g}$ , ranging from  $11.4$  to  $16.2 \text{ m}^2/\text{g}$ . The eBC concentrations calculated using the estimated MAC of  $15.2 \text{ m}^2/\text{g}$  were significantly lower than those reported originally from aethalometer, and ranged from  $0.2$  to  $3.8 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ , with an average of  $1.0 \pm 0.6 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ , accounting for 3.7% of  $PM_{2.5}$  (0.8~10.7%). Result from this study suggests that if the MAC value recommended by the manufacturer is applied to calculate the equivalent BC concentration and radiative forcing due to BC absorption, they would result in significant errors, implying investigation of an unique MAC value of BC particles at a study site.

**Key words:** Aethalometer, Equivalent black carbon, Mass absorption cross section

### 1. 서 론

대기 에어로졸 입자는 지구 복사량과 기후 변화에 중요한 역할을 한다(Carlsaw *et al.*, 2010). 블랙 카본(black carbon, BC)은 대기 에어로졸 입자의 중요한

구성 성분으로서 화석 연료, 바이오 연료, 그리고 바이오매스의 불완전 연소 과정을 통해 배출되며 태양 복사에너지를 흡수하여 지구의 기온을 상승시키는 물질로 알려져 있다(Wang *et al.*, 2017; IPCC, 2014; Bond *et al.*, 2013). 연소 오염원에서 바로 배출된 BC

는 빠르게 미세입자(fine particles)의 집합체(aggregates)로 변한 후 대기환경에서 보통 20~60 nm의 크기로 존재한다(Alexander *et al.*, 2008). BC 입자들은 주로 원소탄소(elemental carbon, EC)로 이루어져 있지만 소량의 유기물질을 포함하는 것으로 알려져 있다(Watson and Valberg, 2001). BC에 포함된 유기물질을 BC 고유의 유기탄소(organic carbon, OC)로 일컫는다(Adler *et al.*, 2010). 따라서 BC는 대부분 EC로 이루어진 입자를 나타내지만, 유기 에어로졸에는 EC가 존재하지 않는다. BC는 OC를 일부 포함할 수 있기 때문에 BC 입자의 광흡수에 의한 복사 강제력을 정확하게 평가하기 위해서는 해당 지역에 적합한 BC 입자의 질량흡수단면을 명확하게 규정해야 한다.

BC 입자들은 대기에 머무를 때 숙성 과정(aging process)을 수반한다. 숙성 과정은 응집(coagulation), 고유 OC의 산화 과정 및 다른 화학적 성분들의 코팅에 의해 크기 변화를 수반한다. BC 입자가 숙성이 진행되면서 어떤 물질들(유기물질, 황산염 성분 등)에 의해 코팅이 되면 입자 전체는 코팅 셸(coating shell)에 의해 둘러싸인다(Moffet and Prather, 2009). 기후 모델에서 BC 입자에 의한 복사 강제력은 BC 입자의 질량흡수단면(mass absorption cross section, MAC) 값에 따라 영향을 받는다. BC는 빛을 강하게 흡수하는 에어로졸 성분으로 알려져 있으며, MAC 값은 BC 입자에 의한 광흡수 효율을 평가하는 적합한 기준이다. 대기 중 BC에 의한 MAC는 520~550 nm의 가시광선 파장범위에서 8~14 m<sup>2</sup>/g의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Wu *et al.*, 2018; Cross *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2009; Kirchstetter *et al.*, 2004). 이와 같은 BC 입자의 MAC 값이 넓은 범위를 갖는 이유는 BC 입자에 의한 광흡수가 산란 성질을 가지는 셸에 의해 증가하기 때문이다. 또한 BC와 다른 에어로졸 성분들과의 혼합 상태에 따라 BC 입자에 의한 광흡수 정도가 달라진다(Ramanathan and Carmichael, 2008). 많은 연구자들은 BC 입자를 에워싸고 있는 산란 코팅 셸(scattering coating shell)에 의해서 BC 입자에 의한 광흡수가 증가함을 입증하였다(Chung *et al.*, 2012a;

Moffet and Prather, 2009; Schnaiter *et al.*, 2005). 또한 대기 중 BC 입자는 일부는 새로운 입자(fresh BC)로, 다른 일부는 얇은 셸로, 나머지는 두꺼운 셸로 코팅된 상태로 존재한다고 하였다(Moffet and Prather, 2009; Adachi and Buseck, 2008). 이와 같은 차이가 대기 중 BC 입자에 의한 MAC의 큰 변화를 야기하는 것으로 알려져 있다. Bond and Bergstrom (2006)은 동북아시아에서 코팅되지 않은 순수한 BC의 MAC는 7.5 m<sup>2</sup>/g로 보고하였으며 대부분의 기후 모델링 연구에서 이 특정 값을 BC의 MAC 값으로 사용하고 있다. 또한 제주 고산지역에서 평가한 BC 입자의 MAC는 520 nm의 파장에서 5.1 m<sup>2</sup>/g (Chung *et al.*, 2012b)와 565 nm의 파장에서 약 6.4 m<sup>2</sup>/g로 발표하였다(Cho *et al.*, 2017). 중국 북서 지방의 한 시골 지역에서 조사한 BC의 MAC는 550 nm에서 9.8 m<sup>2</sup>/g이었다(Wu *et al.*, 2018). BC 입자의 MAC의 차이는 측정된 대기 에어로졸 입자 오염원의 차이와 BC 입자의 다양한 혼합 상태에 기인한 것으로 추정하였다. 작은 입경과 BC 입자에 산란 물질의 두꺼운 코팅이 BC의 MAC를 향상시킨다고 하였다(Adler *et al.*, 2010). 또한 다른 파장에서 조사한 BC의 MAC 값은 중국 북서 시골지역에서 637 nm의 파장에서 8.5 (Wu *et al.*, 2018), 그리고 스위스에서 630 nm에서 10.2 m<sup>2</sup>/g (Liu *et al.*, 2010)이었다.

위에서 설명한 바와 같이 대기 중 BC 입자의 MAC 값은 BC의 혼합 상태, 오염원 종류, 산란 코팅 셸의 존재 여부, 광흡수 파장 등에 따라 달라지므로 해당 지역에 적합한 BC 입자의 MAC 값에 대한 조사가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 광주 도시 지역에서 배출된 BC 입자의 고유한 MAC 값을 조사하기 위하여 4차선 도로에서 약 200 m 떨어진 지점에서 2016년 11월에서 2017년 12월까지 에어로졸 입자의 광흡수 계수를 측정하였다. 게다가 24시간 기준으로 PM<sub>2.5</sub>를 석영 여과지에 채취하여 OC와 EC 성분을 정량화한 후 880 nm에서의 BC의 MAC 값을 결정하는데 사용하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 PM<sub>2.5</sub> BC 입자의 실시간 광흡수계수 및 24시간 PM<sub>2.5</sub> 측정

광주 지역 대기 중 BC 입자의 MAC를 평가하기 위하여 도로변에서 약 200 m 떨어진 곳(35°11'N, 126°54'E)에서 BC 입자의 광흡수계수와 24시간 기준의 PM<sub>2.5</sub>를 측정하였다. PM<sub>2.5</sub> BC 입자의 광흡수계수는 2016년 11월 1일~2017년 12월 31일 사이에 “Dual Spot” 7-파장 aethalometer (AE33, aerosol d.o.o., Slovenia)를 이용하여 1분 간격으로 측정을 하였다. Aethalometer에서 PM<sub>2.5</sub>는 5.0 L/min의 유량으로 설계된 PM<sub>2.5</sub> sharp cut cyclone을 이용하여 측정하였다. 연구 기간 중 2017년 5월 10일~7월 20일까지는 장비의 고장으로 BC 입자의 측정이 수행되지 않았다. AE33 모델에서 BC 입자의 파장별 광흡수계수와 질량농도의 측정과 계산 방법에 대해서는 기존의 연구에서 잘 설명되어 있다 (Park *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018; Drinovec *et al.*, 2015). AE33 모델 aethalometer의 큰 장점은 롤-형태(roll-type)의 석영 여과지에 채취된 에어로졸 입자의 “필터 로딩 효과(filter loading effect)”로 인하여 발생하는 측정 오차를 보정하여 측정의 정확도를 향상시킨 점이다 (Drinovec *et al.*, 2015). BC 농도 계산은 샘플링 유량이 높은 첫 번째 필터 spot의 빛의 감쇄치( $\Delta ATN_1$ )를 사용하여 다음과 같이 결정한다.

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

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

여기서  $b_{abs}(\lambda)$ 는 에어로졸 입자에 의한 파장별 광흡수계수, S는 필터 면적,  $F_1$ 는 필터 spot 1의 공기 유량, C는 다중 산란계수(석영필터 2.14) (Weingartner *et al.*, 2003),  $\zeta$ 는 공기누출계수 (Drinovec *et al.*, 2015),

$\sigma_{ATN}(\lambda)$ 는 BC의 파장별 질량흡수단면 ( $m^2/g$ ),  $k(\lambda)$ 는 입자의 광학적 부하계수 (loading factor),  $\Delta t$ 는 샘플링 시간을 나타낸다. 에어로졸 입자의 광흡수계수는 7개의 파장 (370, 470, 520, 590, 660, 880 및 950 nm)에서 동시에 측정된다. BC ( $\lambda$ )의 질량 농도 계산에서 사용되는 질량흡수단면( $\lambda$ )은 각각의 파장에서 18.47, 14.54, 13.14, 11.58, 10.35, 7.77, 7.19  $m^2/g$ 의 기본 값들이 사용되고 있지만 (Drinovec *et al.*, 2015), 에어로졸의 오염원 종류와 화학적 특성, 혼합 상태 등에 따라 달라지므로 측정 지역의 대기 오염 상태에 적합한 값들의 도출이 필요하다. 그래서 aethalometer를 이용해 측정된 파장별 BC의 질량농도는 정확한 값이 아니므로 상당농도 (equivalent concentration)로 규정한다. 갈색탄소와 같은 유기물질 또는 무기물질 (mineral dust)은 880 nm 이하의 파장에서 빛을 흡수하는 성질을 가지고 있기 때문에 화석 연료의 연소 과정을 통해 배출되는 BC 입자의 농도를 보통 880 nm에서 측정된 값으로 사용하며 (Yu *et al.*, 2018; Andreae and Gelencsér, 2006; Kirchstetter *et al.*, 2004), 본 연구에서는 이 값을 eBC로 표기한다.

24시간 기준의 PM<sub>2.5</sub>는 동일한 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 사이클론 샘플러 (URG-2000-30EH)를 사용하여 오전 09:00부터 약 24시간 동안 이루어졌다. 시료 채취를 위하여 550°C의 화로에서 약 10시간 동안 사전에 가열 처리한 47 mm 직경의 석영 여지 (Pallflex Tissu-quartz 2500 QAO, Whatman)를 사용하였다. 대기 에어로졸 입자 측정 시 발생할 수 있는 반-휘발성 유기 화합물의 흡수에 의한 OC 성분의 positive artifact를 최소화할 수 있도록 사이클론 샘플러와 필터 팩 (filter-pack) 사이에 약 25 cm 길이의 카본 디뉴더 (activated charcoal impregnated absorbent surface strip)를 설치하였다.

### 2.2 탄소 성분 분석

석영 여과지에 채취된 시료들은 OC와 EC 성분을 정량화하는 데 사용하였다. OC와 EC 입자의 농도는 미국 EPA의 NIOSH 프로토콜인 thermal-optical

transmittance (TOT) 5040 방법(NIOSH, 1996)에 준하여 이루어졌다. OC와 EC의 분석 방법에 대한 내용은 기존의 연구 논문에서 확인이 가능하다(Park *et al.*, 2018; Son *et al.*, 2015). 본 연구에서는 880 nm의 BC 값에 해당하는 eBC의 질량흡수단면을 평가하기 위하여 TOT 방법을 통해 조사한 EC 자료만을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 EC, eBC 및 eBC/PM<sub>2.5</sub>의 변화

그림 1은 연구 기간 중 조사한 24시간 평균 EC 농도, eBC 농도, 그리고 eBC/PM<sub>2.5</sub>의 기여율을 나타낸 그림이다. 그림 1에서 사용한 PM<sub>2.5</sub> 농도는 측정 지점으로부터 약 2.0km 떨어진 두암동 두암보건지소(도시대기측정망)에서 측정된 1시간 자료를 24시간 산술 평균한 값이다. 석영 여지를 이용해 분석한 EC의 평균 농도는  $1.1 \pm 0.5 \mu\text{gC}/\text{m}^3$  (0.2~3.7)였다. EC의 계절 평균 농도는  $0.8 \pm 0.3 \mu\text{gC}/\text{m}^3$  (여름)에서  $1.2 \pm 0.7 \mu\text{gC}/\text{m}^3$  (겨울)로 분포하였으며 계절에 따른 변화는 크게 나타나지 않았다. Aethalometer 제작사(aerosol d.o.o.)에서 제시한 880 nm의 파장에서 MAC 값( $7.77 \text{ m}^2/\text{g}$ )을 이용해 계산한 eBC의 평균 농도는  $1.9 \pm 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.3~7.4)로 PM<sub>2.5</sub>의 7.3% (1.5~20.9%)를 차지하였다. Aethalometer에서 측정된 eBC의 농도는 필

터와 TOT 방법을 이용해 분석한 EC의 농도보다 약 2배 높게 조사되었다. eBC와 EC의 절대 농도의 차이는 eBC 계산에 사용된 BC의 MAC 값이 광주 지역의 에어로졸의 특성에 적합하지 않아서 나타난 결과로 판단된다.

#### 3.2 BC 입자의 질량흡수단면 평가

BC 입자의 MAC는 대기 에어로졸 입자의 광학적 성질을 특정 짓는 매개 변수로서 시간 및 공간적으로 변동성이 큰 것으로 알려져 있다. 대부분의 기후 모델링 연구에서는 BC의 MAC 값으로 550 nm 파장에서 보통  $7.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 의 특정 값을 사용한다(Bond *et al.*, 2013; Chung *et al.*, 2012a; Ramanathan and Carmichael, 2008; Bond and Bergstrom, 2006). 그러나 지역적으로 BC 입자의 배출량과 오염원이 크게 달라지므로 MAC 값을 일반화하여 BC의 광흡수에 의한 복사 강제력을 평가하면 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 연구 지역의 BC 입자에 대한 정확한 MAC 값의 평가가 중요하다. 대기 에어로졸 입자의 BC 성분을 가장 중요한 광 흡수체로 고려하면 대기 에어로졸 입자의 흡수 계수는 BC 입자의 질량농도와 두드러진 상관성을 보인다.

AE33 모델의 aethalometer에서 에어로졸 입자의 광흡수계수는 7개의 파장(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)에서 동시에 측정되며 파장별 BC의 질량농도는 에어로졸 입자의 광흡수계수를 BC의 MAC

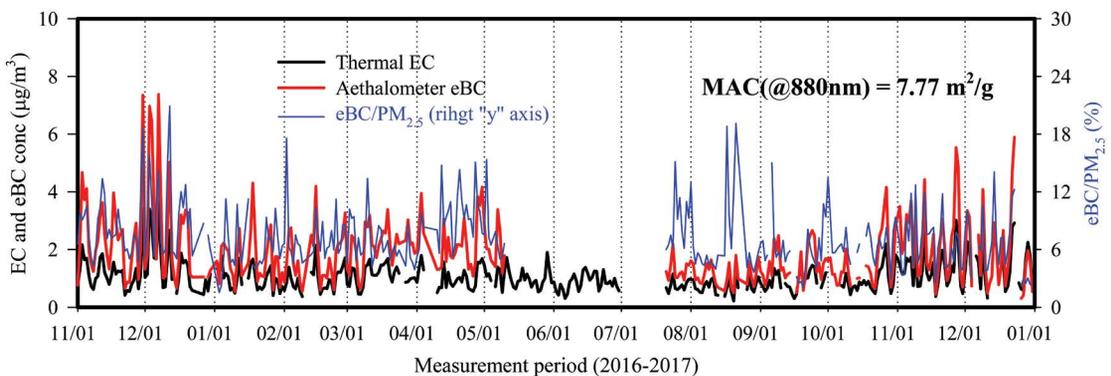


Fig. 1. Temporal variation of 24-hr averaged EC, eBC, and eBC/PM<sub>2.5</sub> over the study period.

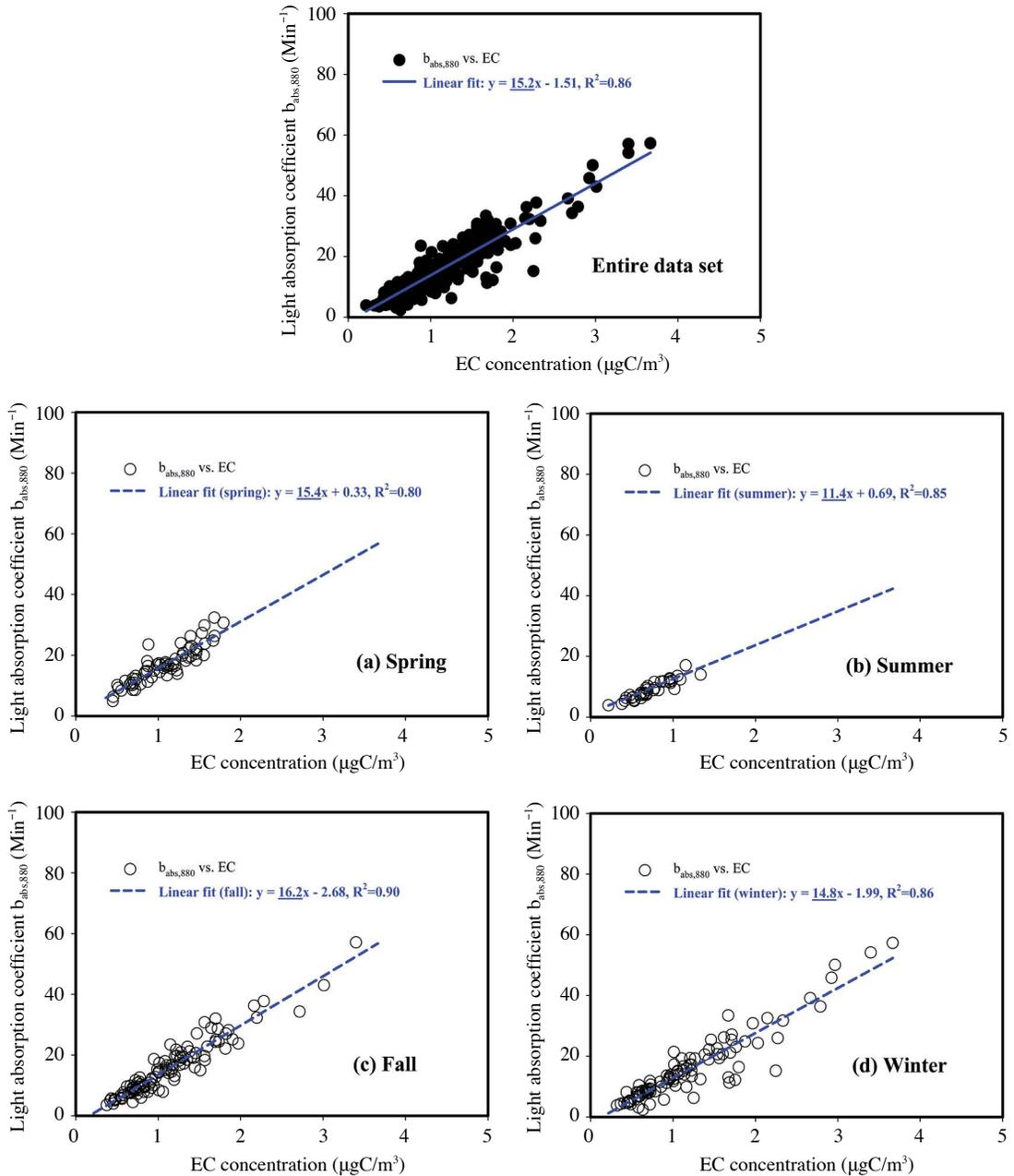


Fig. 2. Relationships between aerosol absorption coefficients and thermal EC concentrations.

로 나누어 결정한다. 그러나 현재 화석연료의 연소 배출 가스에 의한 BC 농도로 이용되고 있는 880 nm에서의 값(eBC)은 측정기 내부의 계산 알고리즘에서

BC의 MAC 값이 낮게 사용되고 있어 eBC 농도가 높게 측정되고 있다. 따라서 연구에서는 광주 지역에서 화석 연료의 연소로부터 배출되는 eBC의 측정 농도

의 정확성을 향상시키기 위하여 EC 농도와 eBC 광흡수계수를 동시에 측정하여 지역의 대기 특성에 적합한 eBC 입자의 MAC를 평가하였다. 본 논문에서는 나타내지 않았지만, 두 가지의 측정 방법을 통해 얻어진 EC와 eBC 농도 사이의 상관성( $R^2=0.86$ )은 매우 높았다. 이 의미는 분석 방법의 차이는 있지만 분석 결과의 신뢰성은 매우 높다고 할 수 있다. 그림 2는 필터 방식에 의한 EC 농도와 aethalometer 측정 880 nm에서의 광흡수계수 사이의 관계를 분석한 결과로서 EC 농도와 광흡수계수 사이의 기울기가 eBC 입자의 MAC 값을 가리킨다. 그림 2에서 전체 연구 기간을 통해 확보한 EC 농도와 eBC의 광흡수계수 사이의 상관성( $R^2=0.86$ )은 매우 높았으며 eBC 입자의 MAC 값(기울기)은  $15.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 조사되었다. 계절적으로 조사한 eBC의 MAC는  $11.4\sim 16.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 이었으며 여름에 가장 낮고 가을에 가장 높았다. 이와 같은 결과는 광주 지역에서 eBC 입자의 실시간 농도 측정을 위해 사용되는 aethalometer의 MAC 값은 제작사에서 제공되는  $7.77 \text{ m}^2/\text{g}$ 보다 높은  $15.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 보정해서 사용해야 더 신뢰할 수 있는 eBC 농도의 측정이 가능함을 의미한다. 본 연구에서 도출한 eBC의 MAC 값을 이용해 재 산정한 eBC의 평균 농도는  $1.0 \pm 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $0.2\sim 3.8$ )로  $\text{PM}_{2.5}$ 의 3.7% ( $0.8\sim 10.7\%$ )를 차지하였다.

#### 4. 요약 및 결론

현재 aethalometer 측정기에서는 차량 배출에 의한 eBC 입자의 농도 계산을 위하여 제작사에서 제공하는  $7.77 \text{ m}^2/\text{g}$ 의 MAC 값을 이용하고 있다. 그러나 BC의 MAC 값은 BC와 다른 에어로졸 성분들과의 혼합 상태, BC 입자 주변의 산란 성질을 갖는 물질들의 코팅 셀 등에 의해서 BC 입자에 의한 광흡수 정도가 달라지므로 넓은 범위를 가진다. 따라서 eBC의 정확한 농도를 얻기 위해서는 측정 지점의 고유한 MAC 값의 조사가 필요하다. 이와 같은 이유로 인하여 연구에서

는 광주 지역의 대기 입자 특성에 적합한 eBC 입자의 MAC 값을 조사하기 위하여 7-파장 aethalometer를 이용하여 차량 통행이 빈번한 도로변에서 약 200 m 떨어진 지점에서 2016년 11월 1일부터 2017년 12월 31일까지  $\text{PM}_{2.5}$ 의 광흡수계수를 측정하였다. 또한 24 시간 기준의  $\text{PM}_{2.5}$ 를 채취하여 열-광학 투과법을 이용해 EC의 농도를 분석하였다.

광주 지역에서 약 1년 동안 측정한 EC 농도와 eBC의 광흡수계수 사이의 상관관계로부터 조사한 eBC의 MAC는  $15.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 aethalometer 제작사에서 제시한 MAC 값보다 약 2배 높았다. 계절별 eBC의 MAC는 11.4에서  $16.2 \text{ m}^2/\text{g}$ 까지 분포하였으며 여름에 가장 낮았고 가을에 가장 높았다. 본 연구 결과는 aethalometer 제작사에서 제공한 eBC의 MAC 값을 사용하면 화석 연료의 연소 과정을 통해 배출되는 eBC의 측정 농도와 BC의 광흡수에 의한 복사 강제력의 큰 불확도를 야기할 수 있음을 암시한다. 따라서 이와 같은 측정 및 기후 모델링 예측의 불확도를 줄일 수 있도록 에어로졸의 배출 오염원 규모, 외부로부터 장거리 수송의 영향 등의 차이가 분명한 다양한 측정 지역(도시지역, 공단지역, 배경지역 등)에서 계절적 변화를 고려한 장기적인 BC 입자의 관측과 자료 해석이 필요할 것으로 판단한다. 결과적으로 광주 지역에서 측정한 차량 배출에 의한 eBC 입자의 평균 농도는  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $0.2\sim 3.8$ )로  $\text{PM}_{2.5}$  농도의 3.7%를 차지하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2017R1D1A3A03000511).

#### References

Adachi, K., Buseck, P.R. (2008) Internally mixed soot, sulfates, and organic matter in aerosol particles from Mexico

- city, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6469-6481.
- Adler, G., Riziq, A.A., Erlick, C., Rudich, Y. (2010) Effect of intrinsic organic carbon on the optical properties of fresh diesel soot, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 6699-6704.
- Alexander, D.T.L., Crozier, P.A., Anderson, J.R. (2008) Brown carbon spheres in East Asian outflow and their optical properties, *Science*, 321, 833-836.
- 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.
- Bond, T.C., Bergstrom, R.W. (2006) Light absorption by carbonaceous particles: an investigative review, *Aerosol Science and Technology*, 40, 27-67.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Kärcher, 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-Atmosphere*, 118, 5380-5552.
- Carslaw, K.S., Boucher, O., Spracklen, D.V., Mann, G.W., Rae, J.G.L., Woodward, S., Kulmala, M. (2010) A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1701-1737.
- Cho, C., Kim, S.W., Lee, M., Gustafsson, O., Fang, W. (2017) Estimation of the mass absorption cross-section of the black and brown carbon aerosols during GoPoEx 201, *Proceeding of the AGU Fall Meeting 2017*, San Francisco, CA, abstract #A13F-2137.
- Chung, C.E., Lee, K., Müller, D. (2012a) Effect of internal mixture on black carbon radiative forcing, *Tellus B*, 64, 1-13.
- Chung, C.E., Kim, S.W., Lee, M., Yoon, S.C., Lee, S. (2012b) Carbonaceous aerosol AAE inferred from in-situ aerosol measurements at the Gosan ABC super site, and the implications for brown carbon aerosol, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 6173-6184.
- Cross, E.S., Onasch, T.B., Ahern, A., Wrobel, W., Slowik, J.G., Olfert, J., Lack, D.A., Massoli, P., Cappa, C.D., Schwarz, J.P., Spackman, J.R., Fahey, D.W., Sedlacek, A., Trimborn, A., Jayne, J.T., Freedman, A., Williams, L.R., Ng, N.L., Mazzoleni, C., Dubey, M., Brem, B., Kok, G., Subramanian, R., Freitag, S., Clarke, A., Thornhill, D., Marr, L.C., Kolb, C.E., Worsnop, D.R., Davidovits, P. (2010) Soot particle studies - Instrument inter-comparison - Project overview, *Aerosol Science and Technology*, 44, 592-611.
- 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) *Climate Change 2014: Radiative Forcing of Climate Change*, Cambridge Univ. Press, New York.
- 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, D21208.
- Liu, D., Flynn, M., Gysel, M., Targino, A., Crawford, I., Bower, K., Choulaton, T., Jurányi, Z., Steinbacher, M., Hüglin, C., Curtius, J., Kampus, M., Petzold, A., Weingartner, E., Baltensperger, U., Coe, H. (2010) Single particle characterization of black carbon aerosols at a tropospheric alpine site in Switzerland, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 7389-7407.
- Moffet, R.C., Prather, K.A. (2009) In-situ measurements of the mixing state and optical properties of soot with implications for radiative forcing estimates, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 11872.
- Park, 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.
- Ramanathan, V., Carmichael, G. (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, *Nature Geoscience*, 1, 221-227.
- Schnaiter, M., Linke, C., 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-Atmospheres*, 110, D19204.
- Son, S.-C., Bae, M.-S., Park, S.-S. (2015) Chemical characteristics and formation pathways of Humic Like Substances (HULIS) in PM<sub>2.5</sub> in an urban area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 239-254. (in Korean with English abstract)

- Wang, J., Zhang, Q., Chen, M., Collier, S., Zhou, S., Ge, X., Xu, J., Shi, J., Xie, C., Hu, J., Ge, S., Sun, Y., Coe, H. (2017) First chemical characterization of refractory black carbon aerosols and associated coatings over the Tibetan plateau (4730 m a.s.l.), *Environmental Science and Technology*, 51, 14072-14082.
- Watson, A.Y., Valberg, P.A. (2001) Carbon black and soot: Two different substances, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 62, 218-228.
- 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.
- Wu, X., Liu, J., Wu, Y., Wang, X., Yu, X., Shi, J., Bi, J., Huang, Z., Zhou, T., Zhang, R. (2018) Aerosol optical absorption coefficients at a rural site in Northwest China: The great contribution of dust particles, *Atmospheric Environment*, 189, 145-152.
- Yang, M., Howell, S.G., Zhuang, J., Huebert, B.J. (2009) Attribution of aerosol light absorption to black carbon, brown carbon, and dust in China - interpretations of atmospheric measurements during EAST-AIRE, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2035-2050.
- 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)

### Authors Information

박승식(전남대학교 환경에너지공학과 교수)  
 유근혜(전남대학교 환경에너지공학과 박사과정 학생)  
 이상일(한국표준과학연구원 가스분석표준센터 책임연구원)  
 배민석(국립목포대학교 환경공학과 교수)