

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment Vol. 35, No. 5, October 2019, pp. 564-576 https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.564 p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문



선착장에서 실시간 광흡수 측정기를 이용한 초미세먼지의 광흡수 특성

Light Absorption Characteristics of Fine Particles Using a Real-Time Optical Absorption Measurement Instrument at a Seashore Wharf

유근혜, 박승식*, 이권호¹⁾ 전남대학교 환경에너지공학과, ¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

Geun-Hye Yu, Seung-Shik Park^{*}, Kwon-Ho Lee¹⁾

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea ¹⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,

Gangneung, Republic of Korea

접수일 2019년 8월 12일 **수정일** 2019년 9월 2일 **채택일** 2019년 9월 5일

Received 12 August 2019 Revised 2 September 2019 Accepted 5 September 2019

*Corresponding author Tel : +82-62-530-1863 E-mail : park8162@chonnam.ac.ki

Abstract In this study, measurement of aerosol light absorption with 1-minute time resolution was made using a dualspot multi-wavelength aethalometer equipped with a PM_{2.5} impactor between October 23 and November 01, 2018 at a port of Gangneung. In addition, real-time measurements of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations were carried out with a GRIMM light scattering monitor. Over the study period, PM₁₀, PM_{2.5}, black carbon (BC₃₇₀) and aerosol light absorption coefficient (b_{abs,370}) at 370 nm wavelength peaked mostly in the morning (06:00~09:00) and evening hours (18:00~21:00), which are fairly coincident with activity hours of fishing boats at harbor. Furthermore, absorption Ångström exponent (AAE) values in the wavelength range of 370~520 nm (AAE₃₇₀₋₅₂₀) and contribution of brown carbon (BrC) absorption at 370 nm (b_{BrC,370}) to aerosol b_{abs,370} were enhanced during the excursion. As the difference between BC₃₇₀ and BC₈₈₀ (BC at 880 nm) concentrations increases, the AAE₃₇₀₋₅₂₀ values increased. During the excursion, maximum AAE₃₇₀₋₅₂₀ and b_{BrC,370}/b_{abs,370} were in the range of 1.76~2.50 and 7.8~59.9%, respectively. These suggest the impact of light-absorbing organic aerosols to total aerosol light absorption at the site. Light absorption by BrC particles exhibited strong spectral dependence with increasing tendency in shorter visible wavelengths. Finally, enhanced BC₃₇₀, b_{abs,370}, b_{ABrC,370}, AAE₃₇₀₋₅₂₀, and BrC absorption contribution at 370 nm indicate the existence of light-absorbing organic aerosols in ship engine emissions at the seashore site in the absence of traffic, industrial sources, and biomass burning emissions.

Key words: Ship emissions, Aerosol light absorption, Light-absorbing organic aerosols, Absorption Ångström exponent

1. 서 론

정부는 최근 고농도 미세먼지로 인한 국민들의 피 해를 줄이기 위하여 미세먼지로 인한 피해를 사회 재 난의 정의에 명시적으로 규정하여 관리하도록 하였 다. 2019년 3월 13일에 발표한 미세먼지 대책 국회의 결 법령에 의하면, 그 관리의 일환으로서 "항만 지역 의 대기질 개선에 관한 특별법"을 제정하였다(https:// www.me.go.kr/cleanair/cleanair). 항만은 국내 미세먼 지 배출원의 약 10%를 차지하는 선박과 대형 경유 자 동차 출입 등으로 인해 국내 주요 미세먼지 배출원으 로 꼽히고 있다. 2015년을 기준으로 국내 미세먼지 배 출량 33만 6066톤 중에서 선박에서 배출하는 양이 3 만 2300톤에 이른다. 이에 정부는 부산, 인천 등 항만 지역에서 발생하는 미세먼지를 2022년까지 현재의 절반 수준으로 감축하기 위해 항만을 배출규제해역으 로 지정하였다. 항만이 배출규제해역으로 지정되면 일반해역보다 강화된 선박 연료유 황 함유량 기준 (0.1% 미만)을 적용받을 뿐만 아니라, 일반해역보다 강화된 속도 기준을 적용한 저속운항해역도 지정된다 (https://www.me.go.kr/cleanair/cleanair).

항만에서의 여객선, 어선 등의 선박활동은 광흡수 탄소입자, 황산염, 그리고 질소산화물과 황산화물과 같은 기체상 오염물질들을 대기 중으로 상당히 배출 한다(Aulinger et al., 2016; Mueller et al., 2015; Zhan et al., 2014; Lack et al., 2009). 선박 엔진에서 이런 오 염 물질들의 생성과 배출량은 사용 연료의 조성, 엔 진의 종류, 운전 조건 등에 따라 변한다 (Mueller et al., 2015; Lack and Corbett, 2012; Lack et al., 2009; Kasper et al., 2007). 또한 선박 엔진에서 배출하는 에 어로졸 입자의 흡수 성질은 엔진에서 사용하는 연료 의 조성에 의존한다(Corbin et al., 2017). 예를 들어, 실험실 환경에서 중유를 사용하는 선박 엔진에서 배 출되는 입자상 물질은 유기 탄소 7%, 황산염 38%, 황 산염이 결합된 수분, 블랙카본(black carbon, BC) 7% 를 함유하였다. 그리고 상업용 선박에서는 황산염 46%, 유기물질 39%, 그리고 BC 15%를 함유하는 입 자상 물질을 배출한다고 하였다(Lack et al., 2009). 선 박에서 배출하는 입자상 물질의 배출량은 지구 전체 BC 배출량의 1.7% (Lack et al., 2008), 화석 및 바이오 연료의 불완전 연소에 의한 유기물질 배출량의 7.5% 를 차지한다고 하였다(Wang et al., 2008; Ito and Penner, 2005). 기존 연구에서 상업용 선박 활동으로 부터 배출되는 입자상 물질의 화학적 및 광학적 성질 에 대한 연구는 광범위하게 이루어졌다(Corbin et al., 2017; Aulinger et al., 2016; Mueller et al., 2015; Zhan et al., 2014; Lack et al., 2009).

대기 중 BC 입자는 태양 복사 에너지를 강하게 흡 수하여 지구 기후에 영향을 미치는 중요한 물질로 알

려져 있다(IPCC, 2014; Ramanathan and Carmichael, 2008). 유기 에어로졸의 한 성분인 갈색탄소(brown carbon, BrC) 역시 빛을 흡수하여 지구 복사 강제력에 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다(Laskin et al., 2015). 그러나 BrC 입자는 BC 입자와 다르게 광학적 성질과 오염원 특성이 상당히 다르다. BC 입자는 자 외선~가시광선의 넓은 파장범위에서 빛을 강하게 흡수하지만, BrC 입자는 파장 의존성이 강하며 300~ 400 nm의 자외선 파장 영역에서 강한 광흡수 특성을 가진다(Kirchstetter et al., 2004). 또한 BC 입자는 화 석 연료의 불완전 연소 과정이나 바이오 매스의 연소 과정을 통해서만 배출하는 곳으로 알려져 있지만, BrC 입자는 1차 오염원을 통해 배출될 뿐만 아니라 휘발성 유기물질의 대기 중 2차 산화 과정을 통해서 도 생성된다(Park et al., 2018; Yu et al., 2017; Zheng et al., 2013; Updyke et al., 2012). 대기 중 BrC 입자의 1 차 배출원은 바이오매스 연소(Park et al., 2018; Yu et al., 2018, 2017; Fan et al., 2016; Park and Yu, 2016; Laskin et al., 2015)와 자동차 배기가스(Park et al., 2018; Park and Son, 2017; Liu et al., 2013)를 포함한 다. 이외에도 중유, 등유 등을 사용하는 선박 엔진의 배기가스 역시 빛을 흡수하는 BrC 입자를 배출하는 것으로 보고되고 있다(Aulinger et al., 2017; Corbin et al., 2017; Pei et al., 2017; Mueller et al., 2015). 그러나 해안 지역에서 선박으로부터 배출되는 BrC의 광흡수 성질에 대한 연구는 상당히 제한적이었다.

따라서 본 연구에서는, 강릉항에서 2018년 10월 하 순에 1분 단위로 에어로졸 입자의 광흡수 계수를 측정 하여 선박 배출과 대기 에어로졸 입자에 의한 광흡수 와의 관계를 조사하였다. 측정 지점인 강릉항 주변에 는 수송(자동차 운행), 산업 시설, 화력발전소 등과 같 은 인위적인 주요 연소 오염원이 없는 것으로 확인되 었으며, 대기 측정 중 바이오매스의 연소 활동은 없었 다. 이 연구 결과는 항구 지역에서 선박들의 활동으로 배출된 에어로졸 입자와 에어로졸 입자의 광흡수와 의 관계를 이해하는 데 유용한 정보를 제공할 것이다.

565

2. 실험 방법

2.1 온라인 미세먼지 농도 및 광흡수 계수 측정

연구에서 실시간 미세먼지의 질량 농도와 PM₂₅의 파장별 광흡수 계수의 측정은 강원도 강릉시의 강릉 항(128.95°E, 37.77°N)에서 2018년 10월 23일 18시부 터 11월 1일 15시까지 이루어졌다. 측정 지점에서 북 서쪽으로는 약 400 m 위치(330° 각도)에 여객선 터미 널이 위치하고 있으며 터미널에서는 저유황 경유를 사용하는 대형 여객선이 매일 오전 8시~8시 30분 사 이에 출항한 후 18시 또는 20시에 입항한다. 또한 측 정 지점으로부터 북서 방향으로 약 370 m에 소형 어 선들이 정박해 있으며 (300° 각도), 북서쪽으로 약 500~1000 m의 위치(280~300° 각도)에 관광객 리조 트와 호텔, 편의시설, 커피숍, 식당 등의 상업지역이 위치하고 있다. 연구 기간 중 강릉항의 선박 입·출 항 기록에 의하면, 어선들은 보통 이른 새벽 3시~9시 에 출항한 후 오전부터 저녁 19시 이전에 입항하였 다. 그리고 10시~15시 사이에 출항하여 입항하는 어 선들도 일부 존재하였다. 이들 어선의 종류는 자망, 통발, 정치망, 낚싯배 등이었으며 대부분의 어선 규모 는 1~7톤 이하의 용량이었다. 어선들은 연료유로 중 유와 경유(bunker A oil)를 혼합하여 사용하고 있었 다. 측정 지점 주변에는 바이오매스 연소 행위, 차량 통행 등에 의한 에어로졸 입자의 배출이 거의 없었 다. 그러나 낚시를 위해 강릉항에 들어오는 차량들이 간혹 있었지만, 이들의 통행으로부터 발생되는 대기 오염물질들의 배출은 매우 제한적이었다. 낚싯배의 출항은 보통 오전 6시 30분~7시와 11~13시 사이에 이루어졌으며 대부분은 7시 이전에 출항하였다. 따라 서 연구 기간 중 측정 지점에서 관측된 미세먼지는 선박 배출과 자연적인 해양 오염원으로부터 발생했 을 것으로 추정할 수 있을 것이다.

실시간 미세먼지 농도 측정은 에어로졸 입자의 광 산란을 기반으로 하는 독일 GRIMM사의 에어로졸 분광기 (Optical particle counter, OPC, Model: 1.109, GRIMM Aerosol Technik Co., Germany)를 이용하였 다. 광산란 미세먼지 측정기에서 수분을 조절하기 위 한 제습기는 설치하지 않았다. OPC에 대한 측정 원 리는 기존 연구 논문들에 상세히 기술되어 있다(Lee and Park, 2019; Park *et al.*, 2016). 간단히 설명하면, OPC는 0.25~32 µm 사이의 입자 크기를 16 채널로 분리하여 입경별로 먼지의 산란 정도를 측정하여 입 자의 개수를 측정한다. 여기에 입자의 밀도와 굴절률 을 적용해 PM₁, PM_{2.5} 및 PM₁₀의 질량 농도를 1분 단 위로 산출한다.

PM2.5의 광흡수 계수는 7파장 dual-spot aethalometer (AE33, Aerosol d.o.o., Slovenia)를 이용하여 1분 단위로 측정하였다. 7 파장은 근자외선에서 근적외선 의 스펙트럼 범위(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)를 포함한다. Aethlaometer에서 PM₂₅의 광흡수 계수를 측정하기 위하여 도입부에 5.0 L/min의 유량 으로 설계된 PM2.5 임팩터를 설치하였다. PM2.5 임팩 터로 유입된 5 L/min의 공기 유량은 약 3.8~3.9 L/ min과 1.1~1.2 L/min의 유량으로 두 개의 필터 spot 을 각각 지나면서 에어로졸 입자의 채취가 이루어진 다. Aethalometer의 측정 원리는 기존의 연구 논문들 에 상세히 기술되어 있다(Park et al., 2018; Yu et al., 2018; Drinovec et al., 2015). 간단히 설명하면, 파장별 BC 입자의 농도는 광흡수 계수, 질량흡수효율 및 에 어로졸 입자에 의한 빛의 감쇄치에 의해 계산된다. Aethalometer에서 BC 농도 계산에 사용되는 파장별 질량흡수효율은 기기에 내장된 값들을 적용한다. 기 기에서 파장별 BC 농도는 필터를 통과하는 공기의 유량이 큰 첫 번째 필터 spot으로부터 야기되는 빛의 감쇄치(△ATN1)를 사용하여 다음과 같이 계산한다.

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

여기서 $b_{abs}(\lambda)$ 는 채취된 에어로졸 입자에 의한 광흡

수 계수, λ 는 파장, S는 에어로졸 입자가 채취되는 필 터 spot 면적, F_1 은 필터 spot 1의 공기 유량(3.8~3.9 L/min), 그리고 C는 다중 산란계수(석영필터 2.14) (Weingartner *et al.*, 2003), ζ 는 공기 누설 계수(=0.02 ~0.07) (Drinovec *et al.*, 2015), $\sigma_{ATN}(\lambda)$ 는 BC 입자의 파장별 질량흡수효율(m^2/g), $k(\lambda)$ 는 입자의 광학적 부하계수(loading factor), Δt 는 샘플링 시간(1분)을 가리킨다.

2.2 갈색탄소의 광흡수 계수 평가

대기 에어로졸 입자에 의한 빛의 흡수는 세 종류의 물질(BC, BrC 및 무기 먼지 성분)에 의해 일어난다 (Park et al., 2018; Yu et al., 2018; Laskin et al., 2015; Bergstrom et al., 2007, 2004; Collaud Coen et al., 2004). 그러나 이들 흡수체의 빛의 흡수 정도는 파장 에 따라 상당히 다르다. BC 입자에 의한 빛의 흡수는 파장에 따라 크게 변하지 않은 반면, BrC과 무기 먼 지(흙먼지, 황사먼지 등)는 300~400 nm의 자외선 파 장 범위에서 빛을 더 강하게 흡수하는 성질을 가진다 (Laskin et al., 2015). Aethalometer에서 측정한 에어 로졸 입자의 광흡수 계수는 세 흡수체에 의한 흡수 기여도의 합으로 나타낸 값이므로 각 흡수체에 의한 광흡수 기여도를 분리하는 것이 필요하다. 일반적으 로 에어로졸 입자에 의한 빛의 흡수로부터 각 흡수체 의 기여도를 평가하기 위하여 BC 입자의 흡수 옹스 트롱 지수(Absorption Ångström Exponent, AAE)값 을 이용하였다 (Yu et al., 2018; Laskin et al., 2015; Kirchstetter and Thatcher, 2012; Sandradewi et al., 2008). 화석 연료의 불완전 연소로 배출된 BC 입자는 ~1.0과 바이오매스 연소로 배출된 유기 에어로졸 입 자는 ~2.0의 AAE 값을 갖는다고 보고하였다(Laskin et al., 2015; Kirchstetter et al., 2004). 또한 사하라 사 막 먼지는 1~2 (Collaud Coen et al., 2004), 도시 오염 과 사막 먼지가 혼합된 입자는 2.2 (Bergstrom et al., 2004)의 AAE값을 나타내었다. 이와 같이 각 흡수체 의 흡수 파장과 AAE의 값이 다른 점을 이용해 에어 로졸 입자에 의한 전체 광흡수 계수에서 BC와 BrC에

의한 빛의 흡수 기여도를 분리할 수 있다. Aethalometer의 측정 결과로부터 각 흡수체의 흡수 기여도를 분리하는 방법에 대해서는 Yu et al. (2018)에 상세히 언급되어 있다. 측정 기간 중 측정 지점의 위치(항구) 를 고려하면 먼지 입자에 의한 빛의 흡수는 무시할 수 있기 때문에 PM2.5에 의한 빛의 흡수는 BC와 BrC 의 흡수 기여도의 합으로 표현할 수 있을 것이다. 그 러면, BC와 BrC의 빛의 흡수에 대한 파장 의존성을 고려하면 가시광선 및 근 적외선의 파장 스펙트럼에 서 측정된 흡수도는 BC만에 의한 흡수를 나타내며, 자외선 근처의 파장에서 측정된 흡수는 BC와 BrC의 흡수 기여도를 포함한다. 따라서 BrC에 의한 흡수 기 여도는 자외선 근처 파장에서의 전체 흡수에서 BC에 의한 흡수를 빼줌으로써 얻을 수 있다. 결론적으로 각 파장에서 에어로졸 입자의 전체 광흡수 계수 $(b_{abs\lambda})$ 는 BC와 BrC의 광흡수 계수 $(b_{BC\lambda}$ 와 $b_{BrC\lambda})$ 의 합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$b_{abs,\lambda} = b_{BC,\lambda} + b_{BrC,\lambda} \tag{2}$$

여기에서 BC 입자에 의한 빛 흡수 $(b_{BC,\lambda})$ 는 과거 연 구자들이 제안한 방법에 준하여 880 및 950 nm의 파 장에서 발생하는 모든 광흡수는 BC에 의해서만 일어 난다고 가정하고 계산하였다 (Yu *et al.*, 2018; Sandradewi *et al.*, 2008). 880 nm 이하의 파장에서 BC의 광흡수 계수는 아래 식(3)과 같이 880 및 950 nm의 파장에서 빛 흡수의 평균값을 계산하고 BC에 대한 AAE (AAE_{BC})를 1.0으로 하고 외삽하였다. 그리고 BrC만의 AAE 값은 식(4)와 같이 광흡수 계수와 파 장 사이의 지수관계를 이용하여 계산하였다.

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

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

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 빛의 전체 흡수 계수를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PM₁₀, PM_{2.5}, BC 및 에어로졸 입자의 광흡수 계수의 변화 특성

그림 1은(a) PM₁₀, PM₂, 및 PM₂, /PM₁₀, (b) 두 BC 농도(880 nm와 370 nm), (c) 에어로졸 입자의 광흡수 계수(880 nm와 370 nm), 그리고(d) AAE (AAE₃₇₀₋₉₅₀ 와 AAE370-520)의 10분 평균들의 변화를 나타낸 그림 들이다. 아래에서 BC₈₈₀와 BC₃₇₀은 각각 880 nm와 370 nm에서 측정된 BC 농도(µg/m³)를, b_{abs.880}와 b_{abs.370}은 각각 880 nm와 370 nm에서 측정된 광흡수 계수 (Mm⁻¹)를 나타낸다. 그리고 AAE₃₇₀₋₉₅₀와 AAE₃₇₀₋₅₂₀ 은 각각 370 nm와 950 nm 사이의 파장과 370 nm와 520 nm 사이의 파장에서 계산한 흡수 옹스트롱 지수 를 나타낸다. 갈색탄소와 같은 유기물질들은 400 nm 이하의 낮은 파장에서 빛을 흡수하기 때문에 BC 입 자의 농도는 보통 880 nm의 파장에서 측정된 값 (BC880)을 이용한다(Laskin et al., 2015). 그리고 논문 에서 AAE370-520 값들은 근 자외선과 짧은 가시광선 파장에서 에어로졸 입자의 광흡수성질의 변화를 분 석하기 위하여 계산하였다. 그림 1(a)의 PM₁₀과 PM_{2.5} 의 농도 변화를 보면 대부분 아침(06:00~09:00)과 저 녁 시간(18:00~21:00)에 농도 증가현상을 보여주었 다. 그리고 PM25/PM10는 10월 27일 01:00~19:00 사 이에 비교적 낮게 관측(0.40~0.60)된 경우를 제외하 고 대부분의 측정 시간에 0.70~0.90 사이의 높은 값 들이 측정되었다. 측정 지점이 도시 지역이 아닌 해안 선착장 주변임에도 불구하고 아침과 저녁 시간에 관 측된 PM10과 PM25의 높은 농도와 비교적 높은 PM25/PM10는 선착장 주변의 인위적 활동에 의한 영 향(예를 들어 여객선, 어선 등)과/또는 외부로부터 측 정 지점으로 유입되어온 2차 오염물질들의 영향으로

판단된다. 대기오염물질들의 시간별 농도 추이에서 일반적으로 아침과 저녁 시간에 발생하는 PM10, PM25, 탄소입자, 일산화탄소 및 질소산화물의 농도 증가현상은 도시 지역에서 출·퇴근 시간의 자동차 운행에 의한 영향에 기인한다(Yu et al., 2018). 그러나 측정 지점 주변에 차량 통행에 의한 영향이 미미한 점을 고려하면 아침과 저녁 시간에 증가하는 PM10과 PM25의 농도는 항구를 떠나고 들어오는 수많은 어 선들의 엔진에서 배출된 오염물질들의 영향으로 판 단된다. 그러나 2차 에어로졸 입자의 영향을 조사하 기 위해서는 대기 에어로졸 입자의 화학적 성상 분석 이 이루어져야 할 것이다. 그림 1(b)와(c)에서 볼 수 있듯이 880 nm와 370 nm에서 측정된 BC 농도와 babs 의 값들의 증가 현상 역시 PM,5의 농도가 증가하는 시간과 매우 일치하였다. 이것은 연료의 불완전 연소 과정을 통해 직접 배출되는 BC880의 농도와 본 연구 에서는 측정하지 않았지만 유기 에어로졸의 농도 증 가가 PM_{2.5} 농도 증가의 한 원인이었음을 암시한다. 그러나 370 nm에서 측정된 BC와 babs의 값들은 880 nm에서 측정된 값들보다 높았으며, 특히 광흡수 계수 의 차이가 두드러졌다. 이 의미는 PM_{2.5}에 자외선 파 장에서 빛을 흡수하는 물질이 상당히 포함되어 있음 을 의미한다. 그림 1(d)에 의하면 AAE370-950은 0.97~ 2.01 (평균 1.35)로 AAE₃₇₀₋₅₂₀은 0.76~3.07 (평균 1.55) 로 분포하였다. AAE370-520 의 최고값 (3.07)은 10월 31 일 16:00에 관측되었으며, 이때 BC370과 babs, 370은 각각 0.60 μg/m³와 11.0 Mm⁻¹로 상당히 낮았음에도 상대적 으로 에어로졸 입자에 의한 전체 빛 흡수 중 갈색탄소 의 영향이 크게 나타났다. 그러나 AAE370-520 의 값들 이 증가하는 시점 역시 370 nm에서 광흡수 계수의 증 가 시점과 유사하였으나 두 값들 사이에는 우수한 상 관성은 발견되지 않았다.

본 연구에서 근 자외선 파장범위에서 1.0보다 훨씬 큰 AAE₃₇₀₋₅₂₀ 값들은 초미세입자에 의한 광흡수가 빛을 흡수하는 유기 에어로졸과 BC 에어로졸에 의해 나타난 결과로 보인다. 보통 PM_{2.5}의 농도가 높으면 AAE₃₇₀₋₅₂₀ 값들은 >1.0보다 훨씬 컸다. 기존 연구 결

569



Fig. 1. Temporal profiles of (a) PM concentrations, (b) BC, (c) b_{abs}, and (d) AAE values over the study period.

과들에 의하면 자동차 배출가스에 의한 BC 에어로졸 의 AAE는 대략 1.0의 값(Clarke *et al.*, 2007; Kirchstetter *et al.*, 2004)을 갖는 반면에, 생물성 연소 배출 에 의한 유기 에어로졸의 AAE 값들은 대략 2.0이었 다 (Yu *et al.*, 2017; Laskin *et al.*, 2015; Kirchstetter *et al.*, 2004). 그리고 Pei *et al.* (2017)은 선박으로부터 배



Fig. 2. Temporal profiles of BrC absorption coefficient and BrC contribution (%) at 370 nm over the study period.



Fig. 3. Diurnal patterns of aerosol light absorptions at 880 and 370 nm, and diurnal BC and BrC contributions at 370 nm.

출된 405~781 nm 사이 입자들의 AAE는 대략 1.5로 나타났으며 이것은 선박 배출연기에 빛을 흡수하는 갈색탄소 입자들이 존재하여 나타난 결과라고 하였 다. 또한 고유황 중유를 사용하는 선박 엔진으로부터 배출된 유기 에어로졸은 1.5~2.5의 AAE 값을 가지 며 이것은 짧은 자외선 파장에서 유기 에어로졸에 의 한 광흡수가 중요함을 의미한다(Corbin *et al.*, 2017).

그림 2는 370 nm에서 측정한 BrC의 광흡수 계수 (b_{BrC,370})와 전체 광흡수에서 370 nm의 BrC이 차지하 는 광흡수의 비율(%)을 10분 평균으로 나타낸 그림이 다. 그림에서 보는 바와 같이 식(2)와 (3)을 이용해 평 가한 시간별 b_{BrC,370}의 값들은 PM₁₀, PM_{2.5} 및 b_{abs,370} 의 시간별 변동 추이와 피크를 보이는 시점이 매우 비 슷하였다. 10월 26일 08:30에서부터 31일 17:30 사이 에 측정된 대부분의 b_{BrC,370} 값들은 <10 Mm⁻¹이었으 나 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC이 차지하는 비율은 많이 감소하지 않았다. 이것 은 370 nm에서 BrC에 의한 광흡수가 낮음에도 선착 장 주변에 BrC 입자의 영향이 지속적으로 존재했음 을 의미한다. 측정 기간 중 370 nm에서 전체 광흡수 중 BrC이 차지하는 기여율은 0~61.1%였으며 평균 은 29.1%를 차지하였다. 그리고 370 nm에서 b_{BrC,370} b_{BC,370}은 0.08~1.57로 분포하였으며 평균적으로는 0.43±0.20이었다. 즉 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자에 의한 광흡수는 BrC보다는 BC에 의한 흡수가 더 우세하였음을 의미한다.

선착장에서 어선들의 활동 시간 중 배출된 에어로 졸 입자가 BC와 BrC의 광흡수에 미치는 영향을 이해 하기 위하여, 에어로졸 입자, BC 및 BrC에 의한 광흡 수 계수의 시간별 변화(diurnal variation)를 조사하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 880 nm와 370 nm에서 측정한 에어로졸 입자의 광흡수 계수(babs 880과 b_{abs 370})와 370 nm에서 BC와 BrC의 광흡수계수(b_{BC 370} 와 b_{BrC,370})의 시간 변화를 보여준다. 그림 3(a)에서 보여주듯이, 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수는 880 nm보다 370 nm의 파장에서 훨씬 크게 나타났다. 그리고 두 광흡수 계수들의 피크는 02:00~03:00, 07:00~09:00, 그리고 18:00~21:00에 세 번 나타났으 나, 아침과 저녁 시간에 뚜렷한 거동특성이 확인되었 다. 이는 앞 2절의 실험 방법에서 상세히 기술한대로 선착장에서 어선들의 조업 시간(입항과 출항)과 상 당히 일치하였다. 게다가 370 nm에서 에어로졸 입자 에 의한 광흡수는 BrC보다는 BC에 의해 더 크게 일 어났으며 이들의 피크 역시 370 nm에서 에어로졸 입 자의 광흡수 계수의 시간 변화와 일치하였다. 그러나 b_{BC,370}의 시간변화는 아침보다는 저녁 시간에 더 뚜 렷한 증가현상이 확인되었다.

3.2 에어로졸 입자에 의한 광흡수 중 BrC에 의한 광흡수 기여율

그림 4는 BrC 입자의 평균과 최대 광흡수 계수에 대한 370~660 nm 사이의 파장의존성을 나타낸 그림 이다. BrC의 최대 광흡수는 10월 31일 18:10시에 나 타났다. 그림에서 보듯이 두 경우 모두 측정 지점에 서 조사한 BrC에 의한 광흡수는 강한 파장의존성을 보여주었다. 370~660 nm 사이의 파장에 대해 계산 한 BrC의 AAE₃₇₀₋₆₆₀은 4.1~4.3이었다. 파장이 660 nm에서 370 nm까지 감소함에 따라 대기 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수에서 BrC 흡수에 의한 기여 율은 평균적으로는 6.2%에서 29.1%까지, 최대값으로 는 19.8%에서 61.1%까지 증가하였다.

표 1은 그림 1에서 BC370의 농도와 babs,370의 값이



Fig. 4. Spectral dependence of average and maximum BrC absorption, and BrC contribution.

 Table 1. A summary of PM and BC concentrations, and absorption properties at the peaks of light absorption coefficients at 370 nm.

Time	ΡΜ ₁₀ (μg/m ³)	ΡΜ _{2.5} (μg/m ³)	BC ₃₇₀ (μg/m ³)	BC ₈₈₀ (μg/m ³)	AAE ₃₇₀₋₅₂₀ (–)	b _{вс,370} (Mm ⁻¹)	b _{BrC,370} (Mm ⁻¹)	BrC ₃₇₀ (%)
2018/10/24 06:30	49.9	37.2	6.5	5.9	1.08	110.7	9.4	7.8
2018/10/24 20:00	63.2	45.7	6.0	3.4	1.98	63.4	47.1	42.4
2018/10/25 07:50	67.3	57.6	8.3	3.9	2.00	72.6	79.8	52.4
2018/10/25 20:00	64.8	47.6	6.7	4.0	1.76	74.3	48.5	39.5
2018/10/31 18:10	63.3	55.7	11.2	4.5	2.50	82.8	123.6	59.9
2018/11/01 02:10	68.9	63.8	11.3	11.6	0.76	208.7	0.0	0.0

571

뚜렷한 피크를 보이는 6개의 시간에 대해서 PM10, PM_{2.5}, BC₃₇₀, BC₈₈₀, AAE₃₇₀₋₅₂₀, b_{BC,370}, b_{BrC,370}, 그리 고 BrC370 %를 정리한 표이다. 370 nm의 자외선 파장 에서 BC 농도가 880 nm의 적외선 파장에서의 BC 농 도보다 크면 클수록 빛을 흡수하는 유기 에어로졸의 영향이 크게 나타나 AAE370-520의 값이 증가하였다. 그리고 370 nm의 파장에서 에어로졸 입자에 의한 전 체 광흡수에서 BrC에 의한 광흡수의 기여율이 증가 하였다. 예를 들어, 10월 31일 18:10에는 BC370와 BC₈₈₀의 농도는 각각 11.2와 4.5 μg/m³로 두 BC 농도 의 비는 약 2.5배였다. 또한 AAE₃₇₀₋₅₂₀의 값은 2.50로 BrC 입자에 의한 광흡수가 크게 나타났으며 370 nm 에서 대기 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수 중 BrC 에 의한 광흡수 비율이 약 60%에 이르렀다. 그러나 11월 1일 02:10에 측정한 자료를 보면 PM25의 오염 도가 연구 기간 중 가장 높았음에도 불구하고 BC370 와 BC880의 농도는 11.3~11.6 µg/m³로 거의 비슷하였 다. 이때 AAE370-520 의 값은 <1.0으로 에어로졸 입자 에 의한 광흡수가 유기 에어로졸 성분이 아닌 BC 입 자에 의해 대부분 일어났다고 볼 수 있을 것이다. 이 시간에 관측된 BC370와 BC880의 농도가 거의 동일하 여 370 nm에서 에어로졸 입자에 의한 전체 광흡수가 BC에 의해서만 일어난 것으로 보인다. 항구에서 선 박들의 입·출항 기록에 의하면 11월 1일 01:00~ 03:00 사이에 선박들의 출항기록이 없는 것으로 판단 할 때 PM_{2.5}, BC₃₇₀ 및 b_{abs.370}의 증가 현상은 확실하지 는 않지만, 이른 새벽 시간에 어선들의 활동에 의한 영향보다는 빛을 흡수하는 유기물질의 배출이 거의 없는 연소 조건에서 배출된 BC 입자에 의한 영향으 로 추정된다. 에어로졸 입자의 광흡수에 미치는 선박 배출에 의한 유기 에어로졸의 영향을 좀 더 조사하기 위하여 그림 5에 AAE370-520의 값이 최대와 최소가 존 재하는 시간(10월 31일 10:00~11월 1일 04:00)에 대 한 PM10, PM2.5, BC370, BC880, AAE370-520, bBC370, b_{BrC.370}, 그리고 BrC₃₇₀ %를 도식화하였다. 그림 5의 PM10과 PM25의 농도 변화를 보면 두 번의 농도 피크 가 관측되었다. 10월 31일 17:20분 이전의 PM_{2.5} 농도

는 <7.0 µg/m³이었으나, 17:20분부터 증가를 시작하 여 18:10분에 최고 농도(55.7 µg/m³)에 도달한 후 약 30 μg/m³까지 감소한 후 큰 변화를 보이지 않다가 22:00 이후부터 서서히 감소하였다. 그리고 11월 1일 01:50분에 갑자기 40.7 μg/m³까지 증가한 후 02:00시 에 63.8 µg/m³에 이르렀다. 그림을 보면 PM_{2.5}의 농도 가 피크에 도달하는 두 시점(10월 31일 18:10과 11월 1일 02:00)에 BC370, babs370, bBrC370, BrC370 (%), 그리 고 AAE370-520의 값이 급격히 증가하였다. 이들의 값 이 증가하기 시작 전인 10월 31일 17:20분에 BC370, babs.370, bBrC.370, BrC370 (%), 그리고 AAE370-520 의 값은 각각 0.8 µg/m³, 14.5 Mm⁻¹, 4.1 Mm⁻¹, 28.4%, 1.53이 었다. 그러나 10월 31일 18:10분에는 이들의 값은 11.2 µg/m³, 206.3 Mm⁻¹, 123.6 Mm⁻¹, 59.9%, 2.4977³ 증가하였다. 항구에서 선박들의 입·출항 기록에 의 하면 10월 31일 17:25분에 5.5톤의 낚싯배가 입항하 여 정박하였다. 어선의 입항 기록, BC370과 BC880의 농도 차이, BrC370 (%) 및 AAE370-520 의 값들을 고려할 때 10월 31일 17:30~18:10에 측정된 대기 에어로졸 입자는 선착장에 들어온 어선의 배출 가스에 의해 영 향을 받았을 것이다. 그리고 그림 5를 보면 10월 31일 15:50~16:40 사이에 뚜렷한 PM, 5의 농도 증가는 관 측되지 않았으나 BrC370 (%)와 AAE370-520은 상당히 증가하였다. 항구에서 선박들의 입·출항 기록에 의 하면, 15:50~16:50분 사이에 2.88~3.11 ton의 용량을 가진 3대의 자망 어선들이 출항과 입항을 하였다. 이 와 같은 어선의 활동에 의한 에어로졸 입자의 배출이 BrC370 (%)와 AAE370-520 의 증가를 나타낸 것으로 판 단한다. 즉, 370 nm에서 BrC에 의한 광흡수는 PM25 의 농도가 높지 않더라도 상당히 높을 수 있음이 확 인되었다. 결론적으로 연구 지점 주변에 생물성 연소 와 자동차 배출 가스와 같은 BrC 입자의 주요 오염원 이 없는 점을 고려하면 측정 기간에 관측된 BC370, babs.370, bBrC.370, BrC370 (%), 그리고 AAE370-520 의 증가 는 선박 배출에 의한 유기 에어로졸의 광흡수에 의해 기인한 것으로 판단하였다.



Fig. 5. Temporal profiles of (a) PM_{10} and $PM_{2.5'}$ (b) BC, (c) $b_{abs'}$ (d) $b_{BrC,370}$ and BrC_{370} (%), and (e) AAE values for the specific measurement period (Oct 31 10:00~November 01 04:00).

J. Korean Soc. Atmos. Environ., Vol. 35, No. 5, October 2019, pp. 564-576

573

4. 요약 및 결론

연구에서는 항만의 선박 활동을 통해 배출되는 입 자상 물질이 주변 대기 에어로졸 입자의 광흡수 특성 에 미치는 영향을 조사하기 위하여 동해안에 위치한 강릉항에서 2018년 10월 하순에 약 9일 동안 1분 간 격으로 PM_{2.5}의 광흡수 계수를 측정하였다. 실시간 PM_{2.5}의 광흡수 계수는 근 자외선에서 근 적외선 (370~950 nm)까지 측정이 가능한 7-파장 aethalometer를 이용해 측정하였다. 이와 별개로 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도를 GRIMM 광산란 미세먼지 측정기를 이용해 실시간으로 측정하였다.

연구 기간 중 PM10, PM2.5의 BC370, BC880, babs,880, b_{abs.370} 및 b_{BrC.370}의 피크 값은 주로 아침(06:00~ 09:00)과 저녁 시간(18:00~21:00)에 관측되었다. 측 정 지점 주변에서 차량 통행의 미미한 영향과 항구에 서 선박들의 조업 시간을 고려하면, 아침과 저녁 시 간에 관측된 이들의 피크 현상은 선착장에서 어선들 의 엔진에서 배출된 입자상 물질들의 영향으로 판단 되었다. 자외선과 가시광선 파장에서 광흡수를 야기 하는 원인 물질을 결정하는 AAE₃₇₀₋₅₂₀의 값은 1.55 (0.8~3.1)로 자외선 파장에서 광흡수는 블랙카본뿐 만 아니라 유기 에어로졸의 한 종류인 BrC에 의해서 도 일어났다고 볼 수 있다. 그리고 BrC에 의한 광흡 수는 적외선 파장에서는 거의 일어나지 않으며 자외 선으로 접근할수록 급격히 증가하는 강한 파장 의존 성을 보여주었으며, 370 nm에서 에어로졸 입자에 의 한 전체 광흡수 중 BrC이 차지하는 광흡수 기여율은 평균적으로 29.1% (0~61.1%)이었다. 결론적으로 항 만 주변에 자외선 파장에서 빛을 강하게 흡수하는 BrC의 1차 배출 오염원인 바이오매스 연소와 자동차 통행에 의한 영향이 거의 없었던 점을 고려할 때 측 정 기간 중 BC370, babs, 370, bBrC, 370, BrC370 (%), 그리고 AAE 370-520 의 증가는 어선들의 활동으로 인한 갈색탄 소입자의 배출에 기인하였다고 할 수 있을 것이다.

항만에서 선박들의 활동은 미세먼지, 유기물질, BC, 황산염, 황산화물, 질소산화물 등의 다양한 오염 물질들을 대기 중으로 배출하는 것으로 알려져 있기 때문에 향 후 선박 활동이 주변 지역의 대기질에 미 치는 영향을 더 심층적으로 연구하기 위해서는 장기 관측과 유기물질, BC, 황산화물 등과 같은 선박 활동 의 추적자 성분들에 대한 측정이 반드시 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구 입니다(NRF-2017R1D1A3A03000511와 NRF-2019R11 1A3A01062804).

References

- Aulinger, A., Matthias, V., Zeretzke, M., Bieser, J., Quante, M., Backes, A. (2016) The impact of shipping emissions on air pollution in the greater North Sea region - Part 1: Current emissions and concentrations, Atmospheric Chemistry and Physics, 16(2), 739-758, https://doi. org/10.5194/acp-16-739-2016.
- Aulinger, A., Ramacher, M., Karl, M., Matthias, V. (2017) Primary and secondary particles from ship emissions in port cities, European Aerosol Conference 2017, Zurich, Abstract SPS6N3fb.
- 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.
- 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(23), 5937-5943, https:// doi.org/10.5194/acp-7-5937-2007.
- 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.

- Corbin, J.C., Mensah, A.A., Zanatta, M., Pieber, S., Jakobi, G., Orasche, J., Slowik, J.G., Kumar, N., Haddad, I. El, Klein, F., Stengel, B., Zimmermann, R., Prévôt, A.S.H., Baltensperger, U., Gysel, M. (2017) Brown carbon in ship-engine exhaust: imaginary refractive index and mass absorption cross-section retrieval, European Aerosol Conference 2017, Zurich, Abstract SPS6N379.
- Drinovec, L., Mŏcnik, 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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Climate Change 2014: Radiative Forcing of Climate Change, Cambridge Univ. Press, New York.
- Ito, A., Penner, J.E. (2005) Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870-2000, Global Biogeochemical Cycles, 19(2), GB2028, https://doi.org/10.1029/2004GB00 2374.
- Kasper, A., Aufdenblatten, S., Forss, A., Mohr, M., Burtscher, H. (2007) Particulate emissions from a low-speed marine diesel engine, Aerosol Science and Technology, 41(1), 24-32, https://doi.org/10.1080/027868 20601055392.
- 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.
- Lack, D.A., Lerner, B., Granier, C., Baynard, T., Lovejoy, E.R., Mas-

soli, P., Ravishankara, A.R., Williams, E. (2008) Light absorbing carbon emissions from commercial shipping, Geophysical Research Letter, 35(13), L13815, https://doi.org/10.1029/2008GL033906.

- Lack, D.A., Corbett, J.J., Onasch, T.B., Lerner, B., Massoli, P., Quinn, P.K., Bates, T.S., Covert, D., Coffman, D.J., Sierau, B., Herndon, S., Allan, J., Baynard, T., Lovejoy, E., Ravishankara, A.R., Williams, E. (2009) Particulate emissions from commercial shipping: Chemical, physical and optical properties, Journal of Geophysical Research, 114(D7), D00F04, https://doi.org/10. 1029/2008/JD011300.
- Lack, D.A., Corbett, J.J. (2012) Black carbon from ships: a review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing, Atmospheric Chemistry and Physics, 12(9), 3985-4000, https://doi.org/10.5194/acp-12-3985-2012.
- 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.
- Lee, B.J., Park, S.S. (2019) Evaluation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations from online light scattering dust monitors using gravimetric and beta-ray absorption methods, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(3), 357-369, (in Korean with English abstract), https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35. 3.357.
- 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(24), 12389-12404, https://doi.org/10.5194/acp-13-12389-2013.
- 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.
- Park, D.-J., Lee, K.-Y., Park, K., Bae, M.-S. (2016) Diurnal Size Distributions of Black Carbon by Comparison of Optical Particulate Measurements - Part I, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(1), 1-8, (in Korean with English abstract), https://doi. org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.001.
- Park, S.S., Son, S.-C. (2017) Relationship between carbona-

ceous 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.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.
- 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 SPS6N-1ba.
- Ramanathan, V., Carmichael, G. (2008) Global and regional climate changes due to black carbon, Nature Geoscience, 1, 221-227.
- 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.
- Wang, C., Corbett, J.J., Firestone, J. (2008) Improving spatial representation of global ship emissions inventories,

Environmental Science and Technology, 42(1), 193-199, https://doi.org/10.1021/es0700799.

- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B., Baltensperger, U. (2003) Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers, Journal of Aerosol Science, 34(10), 1445-1463, https://doi.org/10.1016/ S0021-8502(03)00359-8.
- 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 dualspot 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.
- Zhan, J., Gao, Y., Li, W., Chen, L., Lin, H., Lin, Q. (2014) Effects of ship emissions on summertime aerosols at Ny-Alesund in the Arctic, Atmospheric Pollution Research, 5(3), 500-510, https://doi.org/10.5094/APR.2014. 059.
- 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

유근혜 (전남대학교 환경에너지공학과 박사과정) 박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수) 이권호 (강릉원주대학교 대기환경과학과 교수)