

논문

# 늦가을에 도시와 부두 지점에서 측정한 초미세먼지의 화학적 성상과 선박 운항이 에어로졸 입자의 광 흡수에 미치는 영향

## Chemical Composition in PM<sub>2.5</sub> at an Urban Site in Gwangju and a Pier Site in Youngam in Late Fall and Influence of Shipping Activities at the Pier Site on Light Absorption Properties of Aerosol Particles

박태언, 한정웅<sup>1)</sup>, 박승식\*

전남대학교 환경에너지공학과,

<sup>1)</sup>한국환경공단 광주전남제주환경본부 환경서비스처 대기관리1부

Tae-Eon Park, Jeong-Ung Han<sup>1)</sup>, Seungshik Park\*

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

<sup>1)</sup>Air Quality Management Division 1, Gwangju-Jeonnam-Jeju Environmental Headquarter, Korea Environmental Corporation

접수일 2022년 10월 3일  
수정일 2022년 11월 11일  
채택일 2022년 11월 11일

Received 3 October 2022  
Revised 11 November 2022  
Accepted 11 November 2022

\*Corresponding author

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

E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

**Abstract** In order to investigate the difference in the chemical properties of PM<sub>2.5</sub> at two sites (at an urban site in Gwangju and a pier site in Youngam-gun) where the concentrations of gaseous pollutants (CO, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub>) emitted during fossil fuel combustion and their diurnal cycles have a large difference, 8-hr integrated PM<sub>2.5</sub> samples were simultaneously collected at the two sites for one month in the late fall of 2021, and their chemical composition was analyzed. In addition, real-time observation of aerosol light absorption was conducted using a 7-wavelength aethalometer to evaluate the effect of organic aerosols emitted from the operation of large ships at the pier site on the light absorption of atmospheric aerosol particles. The concentrations of NO, NO<sub>2</sub>, CO, and SO<sub>2</sub> measured at the urban site were much higher than those at the pier site, however, the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its carbonaceous and secondary ionic species were high at the pier. Also, the concentration of secondarily-formed O<sub>3</sub> was slightly higher at the pier. Despite the concentration of NO<sub>2</sub> was fairly low at the pier, high O<sub>3</sub> concentration was likely due to the effect of VOCs emitted during the production of ship components in the nearby Daebul industrial complex, suggesting that VOCs/NO<sub>x</sub> ratio may have played an important role in production of O<sub>3</sub> at the pier. Considering the good correlations between the NO<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> at the two sites, some of the measured NO<sub>3</sub><sup>-</sup> could be formed through the oxidation process of locally emitted nitrogen oxides. However, the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> was higher at the pier site under conditions of low NO<sub>2</sub> concentration, strong wind speed, and low relative humidity, than at the urban site. This might be due to impact of aerosol particles transported from polluted regions of China. Diurnal cycles of both the light absorption coefficients by aerosol and brown carbon (BrC) particles at wavelength of 370 nm and the equivalent BC (eBC) concentration at the pier site were very similar to those of NO and NO<sub>2</sub>, indicating that they were affected by similar emission sources at the pier. In case studies to investigate the effect of particulate matter emitted by shipping activities on the light absorption properties of aerosol particles, it was found that the temporal variations of the aerosol and BrC absorption coefficients, and eBC concentration were greatly affected by the operating time of the cargo ships and the vehicles in the pier. In summary, it was confirmed that the operation of large cargo ships in the pier emits light-absorbing BrC particles to the atmosphere, affecting the increase in light absorption of atmospheric aerosol particles.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, An urban and a pier site, Cargo ships, Diurnal cycles of NO and NO<sub>2</sub>, Long-range transport, Temporal variations of aerosol and BrC absorption coefficients at 370 nm

## 1. 서 론

대기 중 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)는 탄소 성분, 이온 성분, 원소 성분, 수분 등으로 이루어진 복잡한 화학물질이다. 수용지점에서 이들의 화학적 성질은 계절, 대기 오염물질의 배출원, 기상 조건, 외부 장거리 수송 여부 등에 따라 달라진다. 원소 탄소(elemental carbon, EC)와 유기 탄소(organic carbon, OC)와 같은 탄소 성분의 농도는 주변의 화석연료 연소나 생물성 연소 배출원에 의해 크게 영향을 받는다. 반면에, SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>의 대기 산화 과정을 통해 생성되는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 같은 2차 이온 성분은 기체상 전구물질들의 국지적 배출원(자동차 배기가스, 석유화학 및 철강 산업단지, 석탄화력발전소 등) 또는 장거리 수송 여부에 의해 영향을 받는다(Park *et al.*, 2022a, 2022b; Son *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2006). 과거 연구 결과에 의하면 PM<sub>2.5</sub>의 농도 증가를 견인하는 주요 화학적 성상의 종류는 계절적 또는 지역적 특성을 잘 반영하는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2022a, 2022b; Son *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2019a, 2018a, 2018b; Park *et al.*, 2006). 예를 들어, 기온이 높고 태양복사가 강한 여름철에 PM<sub>2.5</sub>의 농도 증가는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 생성에 기인한다(Yu *et al.*, 2018a; Park *et al.*, 2006). 반면에 기온이 낮고 대기가 안정한 조건의 늦가을이나 겨울철에는 OC 입자와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 같은 2차 이온 성분의 농도 증가가 PM<sub>2.5</sub>의 고농도 현상을 초래하는 물질로 알려져 있다(Son *et al.*, 2021; Ju *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019a, 2018a, 2018b; Park *et al.*, 2006).

2016년(측정일 기준) 이전의 연구에 따르면 광주 지역에서 가을과 겨울에 발생한 연무 시 PM<sub>2.5</sub>에 대한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 기여도는 18~43%로 상당히 높았다(Yu and Park, 2021; Yu *et al.*, 2019a, 2018b, 2017; Park *et al.*, 2018). 이는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 생성에 산업시설이 미미한 광주 지역의 국지적인 영향보다는 중국 동북의 오염된 지역으로부터 장거리 수송에 의한 유입이 기인하였다. 그러나 최근 가을과 겨울에 한반도로 유입되는 기단이 중국의 오염된 지역에서 발원하더라도 PM<sub>2.5</sub>에

대한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 기여도가 낮게 나타나고 있다. 이것은 2016년 이후 중국의 인위적인 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub> 등에 대한 강력한 배출원 규제 때문이다(China State Council, 2016). 그 결과 2013년부터 2017년까지 SO<sub>2</sub>와 PM<sub>2.5</sub> 농도가 각각 57~75%와 30~50% 감소하였다(Bai *et al.*, 2019; Zhai *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019). 이처럼 중국의 인위적인 배출원 규제 효과는 국내에서 가을과 겨울에 발생하는 PM<sub>2.5</sub>의 고농도가 OC와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 국지적인 생성 증가로 나타나고 있다(Park *et al.*, 2022b; Son *et al.*, 2021). 이와 같은 상황은 OC, EC, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, VOCs (volatile organic compounds) 등을 다량 배출하는 도로이동오염원이 중요한 도시지역의 전형적인 PM<sub>2.5</sub>의 오염 특성이다. 또한 도시지역에서 이런 오염물질들의 농도는 뚜렷한 일주기(diurnal cycle) 특성을 보이며 국지적 영향이 지배적이다(Yu *et al.*, 2019a, 2018a, 2018b; Park *et al.*, 2006, 2005). 그러나 건설 현장이나 항만 지역에서 특정 시간에만 활동 중인 컨테이너 운반 트럭이나 중장비(지게차) 등의 비도로이동오염원이 중요한 지역에서 배출되는 대기오염물질들의 농도는 뚜렷한 일주기 특성을 보이지 않고 작업시간을 통해서만 이들의 배출량이 증가하게 된다. 따라서 대기오염물질의 주요 배출원과 배출량의 차이가 확연한 두 지역(예: 도심과 항만 부두 지점)에서 PM<sub>2.5</sub>의 고농도 발생 시 NO<sub>x</sub>와 탄소 성분(e.g., EC) 등의 일주기 특성과 발생 원인(국지적 vs. 외부 영향)의 차이를 조사하는 것은 해당 지역의 대기질 관리 차원에서 중요한 정보 제공이 가능하다.

블랙카본(black carbon, BC)과 빛을 흡수하는 OC로 알려진 갈색 탄소(brown carbon, BrC)는 대기 중 두 종류의 중요한 광 흡수 입자이며 기후 복사강제력에 상당한 영향을 미친다(Ding *et al.*, 2016; Bond *et al.*, 2013). BC 입자는 화석연료(fossil fuel, FF)의 불완전 연소와 바이오매스 연소(biomass burning, BB)의 부산물이며(Vaishya *et al.*, 2017), 태양복사를 흡수하여 전 세계와 지역의 기후, 구름 응결핵 생성 또는 눈의 용융(snow melt)을 촉진한다고 알려져 있다(Cappa *et*

al., 2019; Ditas *et al.*, 2018). 그러나 BC의 광 흡수는 다양한 화학적 환경에서 크게 달라지는 입자의 혼합 상태에 크게 의존한다(Cappa *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2017).

BrC 입자 역시 자외선 파장에서 복사강제력에 중요한 역할을 한다(Laskin *et al.*, 2015). 모델 시뮬레이션에 의한 BrC의 광 흡수 추정치는  $+0.22 \sim +0.57 \text{ W/m}^2$ 으로 BC 흡수의 27~70%에 해당한다(Lin *et al.*, 2014). 그러나 다양한 오염원으로부터 발생하는 BrC 입자의 복잡한 화학적 조성 때문에 BrC 입자에 의한 광 흡수를 정확히 정량화하는 것은 여전히 어려운 과제이다(Laskin *et al.*, 2015). 따라서 오염원과 생성과정이 다른 여러 환경에서 BrC 입자의 광 흡수 성질을 특성화하는 것이 중요하다. 일반적으로, BrC 입자는 주로 BB와 FF 연소원으로부터 나오는 1차 BrC(Park *et al.*, 2020; Olson *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2013; Lack and Corbett, 2012; Bond, 2001)와 대기 중 다상 반응(multi-phase reactions)을 통해 생성되는 2차 BrC(Wang *et al.*, 2019; Kroll *et al.*, 2012)로 구분한다. 1차 BrC 입자의 FF 배출원으로는 자동차 배기가스(Park *et al.*, 2018; Park and Son, 2017; Xie *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2013), 석탄 연소(Xie *et al.*, 2019a; Yan *et al.*, 2017), 선박 엔진의 배기가스(Park *et al.*, 2022a; Yu *et al.*, 2019b, 2018c; Mueller *et al.*, 2015; Lack and Corbett, 2012)를 포함한다. 그러나 선박으로부터 배출되는 유기 에어로졸 입자의 광 흡수 성질에 관한 연구는 여전히 상당히 제한적이다. 일반적으로 BC와 BrC 입자에 의한 광 흡수를 구분하는 데 흡수옹스트룽지수(Absorption Ångström Exponent, AAE) 값이 사용되어왔다. 예를 들어, AAE 값이  $\sim 1.0$ 인 경우는 FF 연소에 의해 배출되는 BC 에어로졸 입자의 흡수가 지배적이며(Kirchstetter *et al.*, 2004),  $\sim 2$ 이면 바이오매스 물질이나 바이오연료의 불완전 연소에 의해 배출된 유기 에어로졸(e.g., BrC)에 의한 흡수가 우세함을 의미한다(Park *et al.*, 2020; Laskin *et al.*, 2015; Kirchstetter *et al.*, 2004). 이러한 연구들은 BB 기원과 대기환경 BrC 입자의 화학적 및 광 흡수 성질에 대한 정보를 제

공해왔다. 그뿐만 아니라, 국내 강릉항에서 10톤 이하의 소형 어선들(중유와 경유의 혼합연료(A 중유) 사용)의 운항 시 배출되는 플룸 내 에어로졸 입자의 광 흡수 특성을 평가하였다(Park *et al.*, 2022a; Yu *et al.*, 2019b, 2018c). 이들의 측정 결과에 의하면 어선의 입·출항 시 370~520 nm의 파장에서 평가한 에어로졸 입자의 AAE 값이 1.8~2.5까지 증가하였으며, 370 nm의 파장에서 전체 광 흡수 중 BrC 입자에 의한 광 흡수 기여도는 약 60%에 이르렀다. 이는 항구에서 어선 활동이 대기 중에 빛을 흡수하는 BrC 입자를 배출하여 에어로졸 입자의 전체 광 흡수에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 암시한다. 그러나 선박 엔진에서 배출되는 에어로졸 입자의 생성과 배출량은 사용 연료의 조성, 엔진 종류와 규모 그리고 조업 조건(엔진 부하) 등에 의존하므로(Mueller *et al.*, 2015; Lack and Corbett, 2012; Lack *et al.*, 2009; Kasper *et al.*, 2007), 규모가 다른 화물선, 벌크선 등의 대형 선박(>1000톤) 등의 운항 시 배출되는 에어로졸 입자의 광 흡수 특성에 대한 조사가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 위에서 언급한 궁금증을 해소하고자 대기오염물질의 배출 특성이 다른 두 지점(광주광역시 도심과 영암군 부두 지점)에서 2021년 늦가을에 약 1개월 동안 8시간 간격으로  $\text{PM}_{2.5}$ 를 채취하여 탄소 성분과 이온 성분을 분석하였다. 또한 부두 지점에서 배출하는 유기 에어로졸 입자(BrC)가 대기 에어로졸 입자의 광 흡수에 미치는 영향을 조사하기 위해 7파장의 aethalometer를 이용해 1분 단위로 파장별 광 흡수계수를 측정하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 측정

도심과 부두 지점에서  $\text{PM}_{2.5}$ 의 측정은 2021년 11월 3일 16:00부터 12월 3일 08:00까지 동시에 진행하였다. 도심 지점은 광주광역시에 있는 전남대학교 공과대학의 한 건물 3층 옥상(35.1768N, 126.9048E)이며,



Fig. 1. A sampling site (★) of Yongdang wharf.

부두 지점은 영암군 용당 부두(전라남도 영암군 삼호읍 용당리 2169-1, 34.7717N, 126.3922E)이다(그림 1). 두 지점에서 사용된  $PM_{2.5}$  채취기는 각각 국내 APM 엔지니어링사의 연속 채취기(PMS-104, 16.7 L/min)와 미국 MetOne의 연속 채취기(E-SEQ-FRM, MetOne, USA, 16.7 L/min)를 이용하여 8시간 간격으로 매일 3회(00:00~08:00, 08:00~16:00, 16:00~24:00) 채취하였다. 8시간 간격으로 시료 채취가 이루어진 이유는 새벽~아침, 낮, 저녁 시간의 두 지점  $PM_{2.5}$ 의 화학적 특성의 차이를 파악하기 위함이다. 두  $PM_{2.5}$  저용량 채취기에서 사용된 여지는 약 550°C의 화로 내에서 10시간 동안 전처리가 완료된(pre-baked) 47 mm 직경의 석영 필터(Pallflex Tissuquartz 2500 QAO, Whatman, USA)이다. 그리고 두 지점에서 사용된 채취기에  $PM_{2.5}$  도입부와 필터 카세트 사이에 시료 채취 중 석영 필터상의 준-휘발성 유기물질의 흡착을 최소화할 수 있는 카본 디뉴터를 설치할 수 없어서 입자상 OC의 농도가 실제보다 과대평가되었을 것이다. 또한, 용당 부두 지점에서는  $PM_{2.5}$ 의 채취와 별개로 dual-spot 7파장(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950

nm) aethalometer(AE33, Aerosol d.o.o., Slovenia)를 이용하여 1분 단위로  $PM_{2.5}$  입자의 광 흡수계수를 측정하였다. Aethalometer에서 보고된 BC 농도는 광 흡수계수를 질량 흡수효율( $\sigma$ )로 나누어 계산한다. 880 nm의 파장에서 보고된 BC 농도는 880 nm에서 측정된 광 흡수계수( $Mm^{-1}$ )와 제작사로부터 제공된  $\sigma$ (7.77  $m^2/g$ )에 의해 계산된다. Aethalometer로부터 측정된 파장별 BC 농도는 참값이 아니므로 상당 농도(equivalent concentration)로 규정하고, 논문에서는 880nm에서 측정된 BC 농도를 eBC로 표기하였다. Dual-spot 7파장 aethalometer에 대한 측정 원리는 다른 연구 논문들에 상세히 기술되어 있다(Park *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019b, 2018c; Drinovec *et al.*, 2015).

광주 도심 지점에 대한 설명은 기존 논문에 상세히 기술되어 있다(Park *et al.*, 2022a; Park and Han, 2022). 이 지점은 인근 주변에 출·퇴근 시간에 이용하는 왕복 4차선 도로와 8차선의 호남고속도로가 있어서 차량 통행의 영향을 많이 받는 지점이다. 따라서 차량 통행으로 배출되는 BC, OC,  $NO_x$  및 CO의 일주기 특성이 뚜렷한 전형적인 도심 지점이다. 2019년 기준 광주광역시 대기오염물질 총배출량은 40849톤으로 이 중에서  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ , CO 및 VOCs의 배출량은 각각 135, 12588, 964, 7560, 16791톤으로 총배출량의 0.33, 31.0, 2.4, 19.0, 41.0%를 차지하였다(<https://www.air.go.kr/jbmd/sub43.do?tabPage=3>). 측정 지점이 위치한 광주광역시 북구 기준으로는 대기오염물질 총배출량은 9541톤으로 이 중에서  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ , CO 및 VOCs의 배출량은 각각 30, 2991, 257, 1854, 3761톤으로 총배출량의 0.31, 31.4, 2.7, 19.4, 39.4%를 차지하였다. 그리고  $NO_x$ ,  $NH_3$ , CO 성분의 도로이동오염원의 배출량은 총배출량에서 60.0, 6.4, 53.0%를 차지하였다. 영암군의 용당 부두는 광주 도심 지점으로부터 남서쪽(~225°)으로 약 66 km 떨어져 있다. 용당 부두로부터 남동쪽(82~129°)으로 약 1.6~6.6 km 위치에 대불산업단지가 있으며, 남서쪽(185~220°)으로 약 3.7 km 위치에 삼호산업단지가 있다(그림 1). 부두의 시료 채취 지점은 한국환경공단에서 운영 중인 항만 대

기 측정망으로 주변으로 출·퇴근 시간에 자동차 통행량이 거의 없는 지점이다. 그러나 부두 내에서 컨테이너 운반 트럭이나 지게차 등이 빈번하게 운행되었고, 측정망 인근에 자동차 야적장이 있어서 수시로 차량이 운행되었다. 2019년 기준 영암군 대기오염배출량은 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, CO 및 VOCs가 각각 535, 2908, 3194, 2174, 11921톤으로 이 중 VOCs의 배출량은 총배출량(21905톤)의 54.4%를 차지하였다. 그리고 VOCs 총배출량의 93%가 산업단지 내의 유기용제 사용에 의한 것으로 조사되었다. 영암군의 배출업종별 대기오염물질 발생량은 대불산업단지의 수산화알루미늄(세라믹, 내화물 등)과 선박 구성품 생산제품에서 각각 72%와 13%를, 삼호산업단지의 선박 생산제품에서 약 8%를 차지하는 것으로 알려져 있다(전라남도 2020년 환경오염물질 배출사업현황, <https://www.jeonnam.go.kr/J030101>).

그림 2는 측정 기간 용당 부두에서 입·출항하는 선박들의 시간별 총 대수를 나타낸다(목포지방해양수산청, <http://mokpo.mof.go.kr>). 선박의 용도는 산물선(벌크선), 일반화물선, 모래운반선, 석유제품운반선 등으로 구성되어 있으며, 측정 기간 중 총 267대가 입·출항한 것으로 기록되어 있다. 이 중 일반화물선과 벌크선이 전체 선박 수 중 61%(163대)와 21%(55대)를 차지하였다. 입·출항한 일반화물선과 산물선

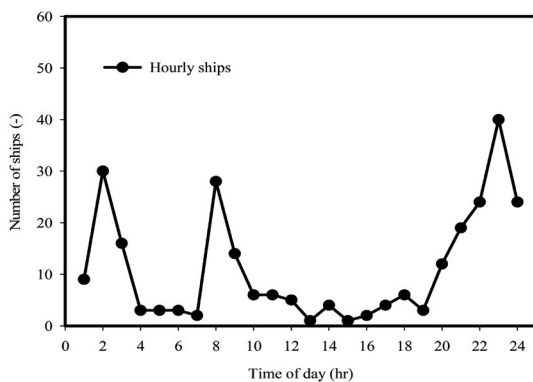


Fig. 2. Diurnal pattern of total number of ships entering and leaving the pier during the study period.

(벌크선)의 총 톤수는 각각 628~3692톤과 6562톤이었다. 시간별 선박의 입·출항은 주로 00~03시, 07~09시, 20~24시에 이루어졌다. 그리고 선박의 입·출항 전·후로 컨테이너 운반 트럭이나 지게차 등의 운행이 수시로 이루어졌다.

### 2.2 탄소 및 이온 성분 분석

두 지점에서 OC와 EC 성분의 분석은 PM<sub>2.5</sub>를 채취한 석영 필터를 1.5 cm<sup>2</sup> 크기로 잘라 NIOSH 5040 온도 프로토콜 기반의 열-광학 투과법을 이용하는 OC/EC 분석기(OC/EC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset Laboratory, USA)로 정량화하였다. 분석 후 남은 여지는 수용성 유기 탄소(water soluble organic carbon, WSOC)와 8종의 이온 성분(Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 및 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 분석을 위해 초순수 20 mL를 사용하여 초음파 추출한 후 0.20 μm의 실린지 필터로 여과시켰다. 그 추출액은 총 유기 탄소(total organic carbon, TOC) 분석기(TOC-LCPH, SHIMADZU, Japan)와 이온크로마토그래피(930 Compact IC Flex, Metrohm AG, Switzerland)를 사용하여 WSOC와 이온 성분을 분석하였다.

### 2.3 블랙카본과 갈색 탄소의 광 흡수계수 평가

대기 에어로졸 입자에 의한 광 흡수는 크게 세 가지 성분(BC, 갈색 탄소(BrC) 그리고 무기 먼지)에 의해 일어난다. 그러나 무기 먼지 성분에 의한 광 흡수는 황사 입자와 같은 대규모 먼지 폭풍이 발생하지 않는 대기 조건에서는 보통 무시할 수 있으므로 에어로졸 입자의 광 흡수계수(Abs<sub>λ</sub>)는 BC(BC Abs<sub>λ</sub>)와 BrC(BrC Abs<sub>λ</sub>) 입자에 의한 광 흡수계수의 합으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Abs_{\lambda} = BC Abs_{\lambda} + BrC Abs_{\lambda} \quad (1)$$

식 (1)에서 880 nm 이하의 파장에서 BC 입자의 광 흡수계수는 880과 950 nm의 파장에서 에어로졸 입자에 의한 광 흡수의 대부분이 BC 성분에 의해서만 일어난다는 가정을 전제로 식 (2)를 이용해 계산하였다(Park

*et al.*, 2022a; Yu *et al.*, 2019b, 2018c).

$$BCAbs_{\lambda} = \left( \frac{Abs_{880nm} + Abs_{950nm}}{2} \right) \times \left( \frac{\lambda}{880 + 950} \right)^{-AAE_{BC}} \quad (2)$$

여기서 차량 배출에 의한 순수한 BC 입자의 스펙트럼 흡수에 대한  $AAE_{BC}$  값은 일반적으로 문헌에서 1.0으로 확립되어 있다 (Zhang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Drinovec *et al.*, 2015; Laskin *et al.*, 2015). 그러나 현장 연구를 통해 보고된 BC 입자의 AAE 값들은 다른 비-흡수성 물질들과의 혼합 상태로 인해 가시광선 스펙트럼에서 1로부터 약간 벗어나는 것 ( $1.1 \pm 0.3$ )으로 확인되어 (Zhang *et al.*, 2021; Xulu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2019; Lack and Cappa, 2010; Kirchstetter *et al.*, 2004), 본 연구에서도 식 (2)에 의해 880 nm 이하의 파장에서 BC 입자의 광 흡수계수를 계산하는 데 필요한 AAE 값으로 1.1을 적용하였다. 비-흡수성 물질과 BC에 코팅된 BrC는  $E_{abs}$ 로 정의된 BC의 흡수 향상을 유도하는 “렌즈 효과 (lensing effect)”를 유발할 수 있다고 보고되었다 (Cappa *et al.*, 2019; Lack and Cappa, 2010; Cheng *et al.*, 2006).  $E_{abs}$ 는 지구복사에 상당한 영향을 미치기 때문에 광범위

한 현장 측정과 실험실 연구를 통해 다양한  $E_{abs}$  값들이 조사되었다. 예를 들어,  $E_{abs}$ 는 California와 Fontana 지역 (Cappa *et al.*, 2019), Mexico 시 (Doran *et al.*, 2007) 그리고 Toronto (Healy *et al.*, 2015)에서는 1.06~1.1의 작은 값이 측정되었지만, 영국의 겨울이나 (Liu *et al.*, 2015) 베이징 (Xie *et al.*, 2019b)에서는 1.3~1.6의 높은  $E_{abs}$  값이 관측되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 두 측정 지점의 $PM_{2.5}$ , 기체상 대기오염물질, 기상변수의 일반적 성질

그림 3은 두 측정 지점의 8시간 평균  $PM_{2.5}$ , 이들의 탄소와 이온 성분 (OC, EC,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$ ) 그리고 바이오매스와 폐기물 소각의 추적자로 알려진  $K^+$ 와  $Cl^-$ 의 농도 추이를 나타낸다. 또한 표 1에 이들의 농도자료를 8시간 측정 기준과 전체 평균으로 정리하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 이들의 시간별 변동 추이는 매우 유사하였으나, 앞에서 언급한 대로, 두 측정 지점의 뚜렷한 대기오염물질 배출 특성의 차이가 존재하였음에도 불구하고,  $PM_{2.5}$ 와 이들의 EC와 이온 성분들의 전체 평균 농도는 부두 지점에서 약간 높게 조사되었다 (표 1 참조). 도심 지점에서  $PM_{2.5}$ , OC,

**Table 1.** Comparison of  $PM_{2.5}$  and its major chemical component concentrations, and meteorological parameters between two sites.

Item	Unit	Urban site (Gwangju)				Wharf site (Yeongam-gun)			
		00:00~08:00	08:00~16:00	16:00~24:00	Avg ± std	00:00~08:00	08:00~16:00	16:00~24:00	Avg ± std
$PM_{2.5}$	$\mu g/m^3$	18 ± 11	18 ± 11	20 ± 13	18 ± 11	24 ± 16	25 ± 18	24 ± 20	25 ± 18
OC	$\mu gC/m^3$	5.9 ± 2.9	5.1 ± 2.8	6.2 ± 3.6	5.8 ± 3.1	5.5 ± 3.0	5.7 ± 3.2	5.2 ± 3.2	5.5 ± 3.1
EC	$\mu gC/m^3$	0.7 ± 0.4	0.7 ± 0.4	0.9 ± 0.5	0.8 ± 0.4	1.0 ± 0.5	1.2 ± 0.6	0.9 ± 0.6	1.0 ± 0.6
WSOC	$\mu gC/m^3$	3.2 ± 1.9	2.7 ± 1.6	3.3 ± 1.9	3.1 ± 1.8	3.1 ± 1.8	3.1 ± 1.9	3.3 ± 2.0	3.2 ± 1.9
$NH_4^+$	$\mu g/m^3$	1.8 ± 1.9	1.8 ± 2.0	1.7 ± 2.1	1.8 ± 2.0	2.0 ± 1.9	2.0 ± 2.4	2.0 ± 2.8	2.0 ± 2.4
$NO_3^-$	$\mu g/m^3$	3.0 ± 3.2	3.6 ± 3.5	3.0 ± 3.5	3.2 ± 3.4	3.5 ± 3.2	3.7 ± 4.0	3.3 ± 4.5	3.5 ± 3.9
$SO_4^{2-}$	$\mu g/m^3$	1.6 ± 1.1	1.7 ± 1.2	1.8 ± 1.3	1.7 ± 1.2	1.9 ± 1.0	2.0 ± 1.3	2.2 ± 1.7	2.0 ± 1.4
$K^+$	$\mu g/m^3$	0.21 ± 0.13	0.23 ± 0.14	0.23 ± 0.12	0.23 ± 0.13	0.28 ± 0.12	0.29 ± 0.15	0.31 ± 0.15	0.29 ± 0.14
$Cl^-$	$\mu g/m^3$	0.18 ± 0.09	0.14 ± 0.20	0.20 ± 0.08	0.17 ± 0.09	0.26 ± 0.13	0.22 ± 0.15	0.26 ± 0.15	0.25 ± 0.15
Temp	°C	6.9 ± 3.2	11.6 ± 4.0	9.9 ± 3.6	9.5 ± 4.1	8.9 ± 3.0	12.2 ± 3.6	10.7 ± 3.2	10.6 ± 3.5
WS	m/s	0.9 ± 0.8	1.3 ± 0.6	1.0 ± 0.6	1.0 ± 0.7	3.2 ± 2.3	4.1 ± 2.4	3.3 ± 2.2	3.5 ± 2.3
RH	%	90 ± 9	70 ± 17	74 ± 15	78 ± 16	76 ± 11	62 ± 12	70 ± 10	70 ± 12

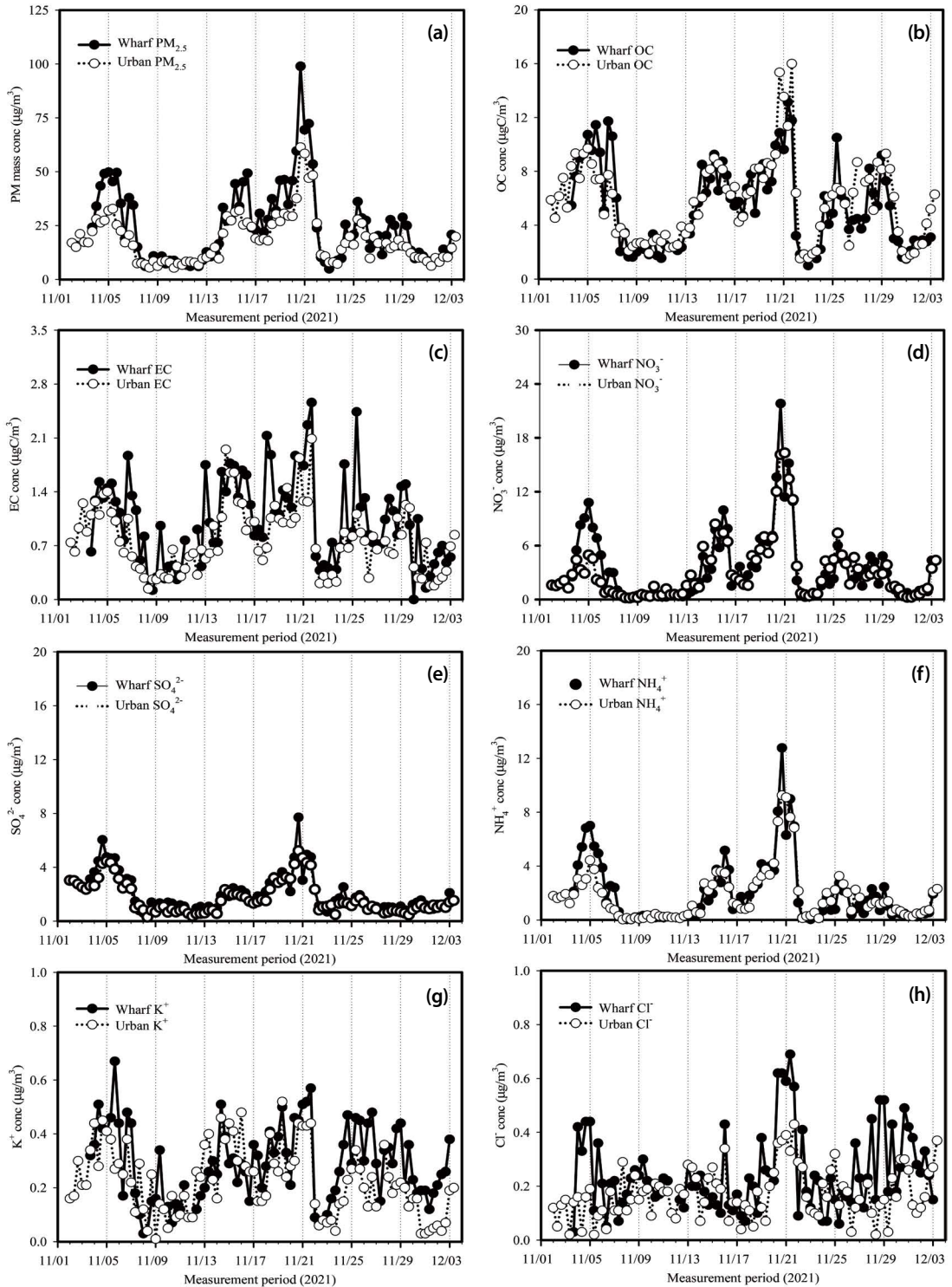


Fig. 3. Temporal variations of 8-hr average  $\text{PM}_{2.5}$ , OC, EC,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Cl}^-$  concentrations measured at two sites.

EC,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  그리고  $\text{NH}_4^+$ 의 8시간 평균 농도는 각각 18 (5~61), 5.8 (1.5~16.0), 0.8 (0.1~2.1), 3.2 (0.2~16.3), 1.7 (0.3~5.2), 1.8 (0.1~9.3)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 반면에, 부두 지점에서 이들의 8시간 평균 농도는 각각 25 (5~99), 5.5 (1.0~13.1), 1.0 (0.1~2.6), 3.5 (0.1~21.8), 2.0 (0.6~7.7), 2.0 (0.1~12.8)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 도로이동오염원이 거의 없는 부두 지점에서 OC와 EC의 높은 농도는 아마도 부두 내 컨테이너 운반 트럭이나 지게차의 빈번한 운행, 선박 운항 등에 의한 탄소 입자의 배출에 기인한 것으로 추정된다. 그뿐만 아니라, 두 지점에서 이들의 8시간 평균 자료 (00:00~08:00, 08:00~16:00, 16:00~24:00) 역시 통계적으로는 큰 차이가 없었다 ( $p < 0.05$ ). 이는 측정 기간 중 두 지점  $\text{PM}_{2.5}$ 의 화학적 성상이 시간에 따른 국지적 배출 특성의 차이보다는 외부 유입의 영향을 크게 받아 나타난 결과로 판단된다. 탄소 성분의 배출 특성(1차 vs. 2차)을 조사하기 위해 수행한 OC와 EC 사이의 회귀분석 결과에 의하면 두 지점 모두 두 성분 사이에 매우 높은 상관성 ( $R^2$ )이 확인되었다(도심: 0.77, 부두: 0.71). 이와 같은 두 탄소 성분 사이의 높은 상관성은 두 지점에서 측정된 OC와 EC 입자의 배출이 1차 배출원과 밀접하게 관련되었음을 의미한다. 2차 이온 성분 중  $\text{NO}_3^-$ 의 국지적 생성 가능성을 판단하기 위하여  $\text{NO}_3^-$ 와 연료의 연소 과정을 통해 배출되는 NO의 산화물인  $\text{NO}_2$ 와 CO 사이의 상관성을 조사하였다. 광주 도심 지점에서 측정된  $\text{NO}_3^-$ 는  $\text{NO}_2$ 와 CO 사이에 각각 0.40과 0.46의  $R^2$ 를, 부두 지점에서는 0.38과 0.61의  $R^2$ 를 나타내었다. 이는 두 지점에서 측정된  $\text{NO}_3^-$ 의 일부는 국지적으로 배출된 질소산화물의 산화 과정을 통해 생성되었음을 의미한다. 그러나 두 지점에서  $\text{SO}_2$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$  사이의 매우 낮은 상관성 ( $R^2 \sim 0.00$ )은 두 지점에서 측정된  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 대부분이 국지적으로 배출된  $\text{SO}_2$ 의 산화 과정을 통한 생성보다는 외부 유입에 의한 영향이 지배적이었음을 의미한다. 또한, 두 측정 지점에서 유사하게 OC,  $\text{NO}_3^-$  및  $\text{NH}_4^+$  농도의 증가 사례가 가끔 관측되었다(그림 3). 이는  $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 증가를 초래하였다.

그러나 그림 4의 전체 연구 기간 중 기체상 오염물질( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  및 CO)의 시간별 농도 변화를 보면 도심 지점에서 부두 지점보다 확실히 높았다. 두 지점의 NO와  $\text{NO}_2$  농도의 일주기(그림 5(a))를 살펴보면, 도심 지점에서 측정된 NO와  $\text{NO}_2$ 의 농도는 출·퇴근 시간에 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 특히 광주 도심에서 이들의 훨씬 높은 농도와 뚜렷한 시간별 변동성이 확인되었다. 반면에, 부두에서는 NO와  $\text{NO}_2$ 의 농도가 오전 시간(08:00~12:00)에 완만한 증가 현상을 보인 후 감소하다 도심과 다르게 저녁 시간(23:00~03:00)에 서서히 증가하였다. 이것은 아마 부두 내에서 화물을 운반하는 트럭, 중장비, 자동차 야적장 또는 선박 운항에 의한 것으로 추정된다. CO의 시간별 농도 추이(그림 4) 역시 질소산화물의 거동과 유사하였으며 도심 지점에서 훨씬 높은 농도가 관측되었다. 이것은 도심 지점에서 휘발유 차량의 운행에 의한 배출량 증가에 기인한다. 그러나 2차 오염물질인  $\text{O}_3$ 의 시간별 변화추이(그림 4와 5(b))를 보면 도심보다는 대불과 삼호산업단지 인근에 있는 부두 지점에서 약간 높았다.  $\text{O}_3$ 의 경우는 화석연료의 연소 과정을 통해 배출되는 1차 기체상 오염물질들과 달리 오후에 일사량의 증가로 인해 두 지점 모두 오후 시간(13:00~18:00)에 증가하였다. 부두 지점에서  $\text{O}_3$ 의 전구물질인  $\text{NO}_2$ 의 농도가 도심 지점보다 상당히 낮았음에도(그림 4와 5)  $\text{O}_3$ 의 농도가 높았던 이유는 아마도 주변의 대불산업단지 내 선박 구성품 생산 과정에서 배출하는 VOCs에 의한 영향으로 판단된다. 대기 중  $\text{O}_3$ 의 생성 속도는 VOCs와  $\text{NO}_x$ 의 농도비(VOCs/ $\text{NO}_x$ )와  $\text{NO}_2$ 의 광분해 조건 등에 강하게 의존하는데(Seinfeld and Pandis, 2006), 도심에서  $\text{NO}_2$ 의 농도가 높고 두 지점의 일사량의 강도가 비슷한 점을 고려하면 부두 지점에서 약간 높게 측정된  $\text{O}_3$  농도는 VOCs/ $\text{NO}_x$ 의 농도비가 중요한 역할을 했을 것으로 판단된다.

연구 기간 중 두 측정 지점의 8시간 평균 기온(AT), 풍속(WS), 상대습도(RH) 및 일사량(RAD)(그림 6)과 이들의 평균값(표 1)들을 보면 AT는 평균적으로 두 지점에서 거의 비슷하였지만( $9.5 \pm 4.1$  vs.  $10.6 \pm$



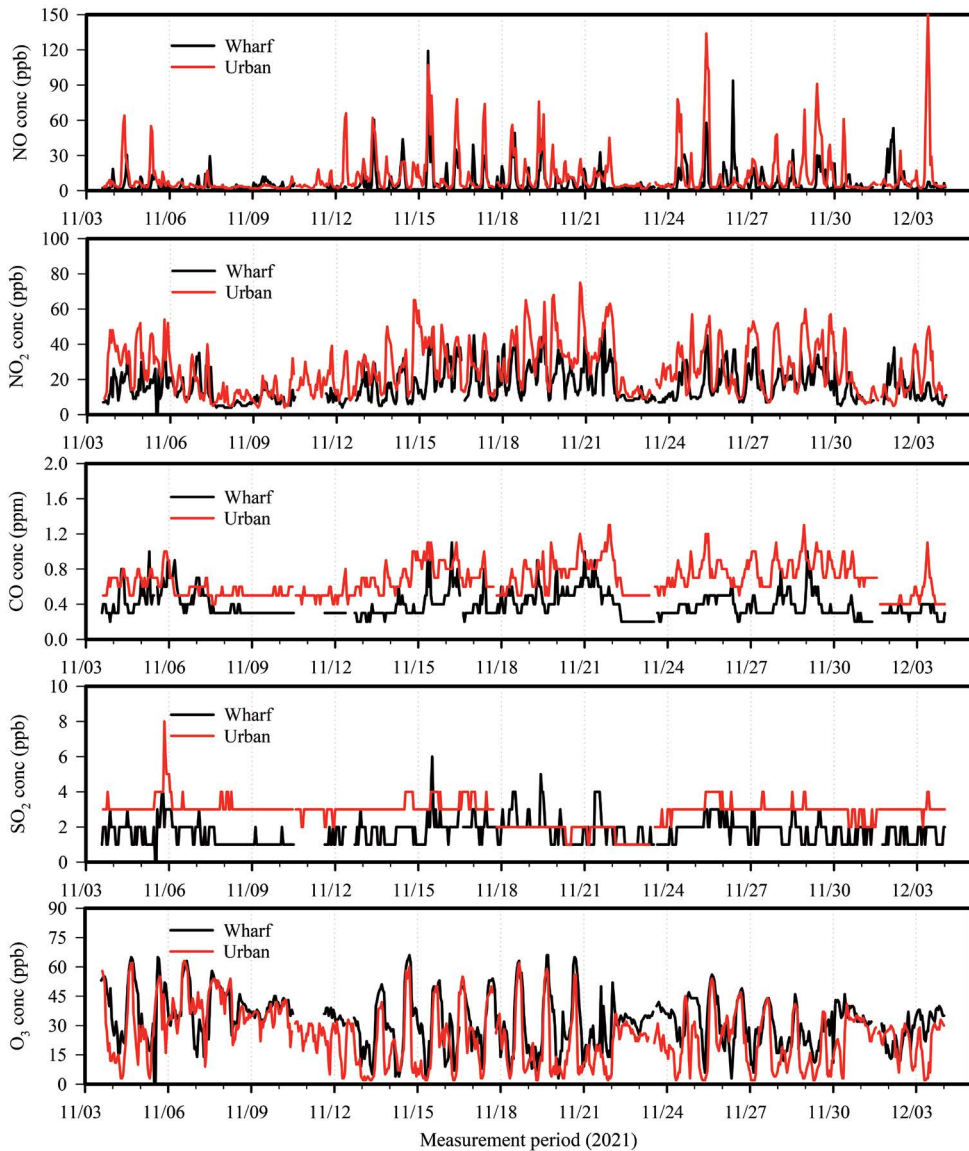
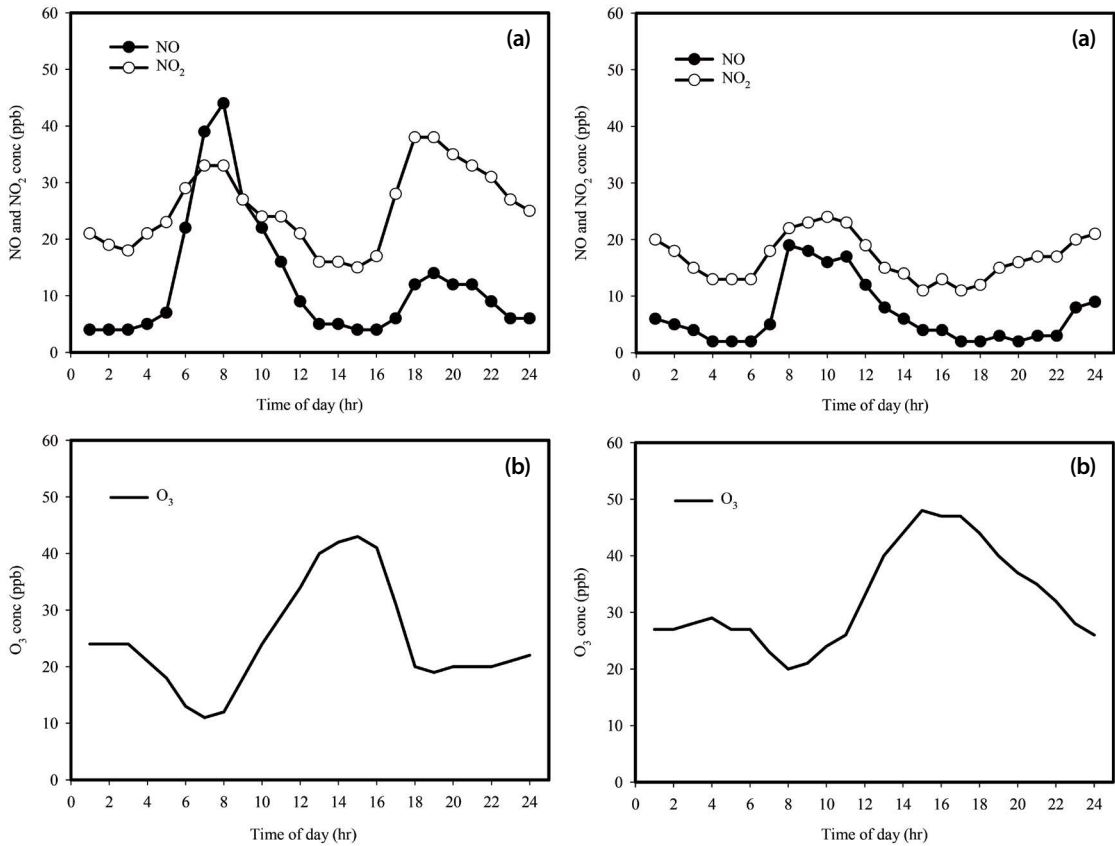


Fig. 4. Temporal variations of hourly NO, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> concentrations measured at two sites.

3.5°C), WS는 도심에서 상당히 낮고( $1.0 \pm 0.7$  vs.  $3.5 \pm 2.3$  m/s) RH는 도심에서 높았다( $78 \pm 16$  vs.  $70 \pm 12\%$ ). 이와 같은 도심 지점에서 약한 WS와 높은 RH와 같은 안정한 기상 조건들은 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>와 비균질 액상 반응을 통해 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 생성을 촉진하는 것으로 알려져 있다(Peng *et al.*, 2021; Son *et al.*, 2021; Sein-

feld and Pandis, 2006; Park *et al.*, 2005). 그러나 부두 지점에서 측정된 기상변수들과 낮은 NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>의 농도 조건들은 도심 지점보다 부두 지점에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도가 낮아야 하는데, 실제 결과는 반대로 측정이 되었다. 이에 대한 원인에 대해서는 다음 3.2 절에서 세 번의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 증가 사례를 통해 확인



**Fig. 5.** Diurnal cycles of (a) NO and NO<sub>2</sub>, and (b) O<sub>3</sub> concentrations. Left and right grapes represent urban and wharf sites, respectively.

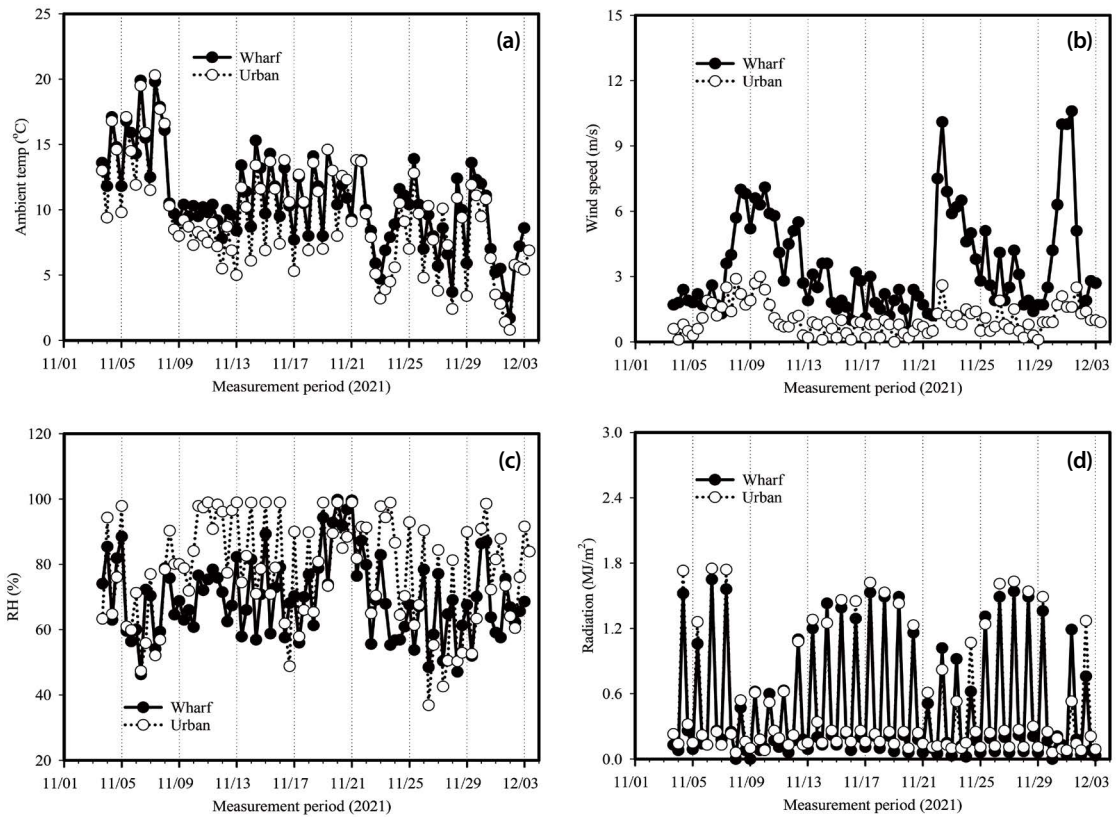
하고자 한다.

### 3.2 두 측정 지점에서 나타난 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 증가 원인 분석

그림 3을 보면 두 지점 모두 PM<sub>2.5</sub>의 농도 증가는 OC와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(및 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 농도 증가에 기인하였다. 그림 3(d)에 의하면, 연구 기간 중 두 지점에서 동시에 세 번의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도 피크가 관측되었다(사례 I: 11월 4일 08:00~11월 6일 00:00, 사례 II: 11월 15일 08:00~11월 16일 16:00, 사례 III: 11월 20일 08:00~11월 22일 00:00). 두 지점의 각 사례에 대해서 8시간 평균의 PM<sub>2.5</sub>, OC, EC, WSOC, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 기체상 오염물질(NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>) 그리고 기상변수(AT,

WS, RH)에 대한 자료들을 표 2에 정리하였다. 그림 4와 표 2에서 두 지점의 기체상 오염물질들의 농도 추이와 사례별로 이들의 8시간 평균 농도 범위를 보면 광주 도심 지점에서 측정된 NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 및 CO의 평균 농도는 영암군 용당 부두에서 측정된 농도들보다 높게 측정되었다. 이와 같은 이들의 농도 차이는 두 지점에서 화석연료(휘발유, 경유, LPG)를 사용하는 차량의 교통량에 기인한다.

그러나 NO<sub>2</sub>의 광분해로 인해 생성되는 O<sub>3</sub>의 경우는 3.1절에서 전체 측정 기간에 관해서 설명한 바와 같이 각 사례에 대해서도 8시간 평균 농도 범위는 부두 지점에서 도심보다 높게 측정이 되었다(그림 4와 표 2). 일례로 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 증가 사례에 따라 차이는



**Fig. 6.** Temporal variations of 8-hr average (a) ambient temperature (AT), (b) wind speed (WS), (c) relative humidity (RH), and (d) radiation (RAD) measured at two sites.

존재하였으나, 오후 시간(13:00~18:00)에 측정된 1시간 평균 O<sub>3</sub>의 최고 농도는 부두와 도심 지점에서 각각 50~65 ppb와 20~62 ppb에 이르렀다. 그리고 특히 주목할 점은 두 측정 지점의 뚜렷한 배출 특성의 차이로 인해 기체상 오염물질(NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 및 CO)의 농도 변화(그림 4)가 크게 존재하였음에도 입자상 오염물질인 PM<sub>2.5</sub>와 탄소 성분(OC, EC, WSOC) 그리고 2차 이온 성분(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)의 8시간 평균 농도 수준은 도심보다 부두 지점에서 높게 측정이 되었다(표 2). 3.1절에서 설명한 바와 같이 두 지점에서 OC와 EC 사이의 매우 높은 상관성은 두 성분이 유사한 오염원을 통해 배출되었을 것으로 추정되지만 도심보다 부두 지점에서의 낮은 차량 통행량에도 불구하고 높은 OC와 EC 농도는 아마도 부두 내로 진입하는 대

형 트럭이나 선박에 컨테이너를 운반하는 트럭, 지게차 그리고 자동차 야적장에서 차량 운행으로 배출되는 탄소 입자나 산업단지 내 선박 부속품을 도장하는 과정에서 배출되는 유기용제 입자에 기인한 것으로 판단된다.

위에서 언급한 바와 같이, NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>의 농도 수준이 도심 지점에서 높았지만, 기체상 전구물질(NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>)의 대기 산화반응을 통해 생성되는 2차 이온 성분들(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)의 농도 수준은 반대로 도심보다 부두 지점에서 높았다. 기온이 낮은 계절(늦가을과 겨울)에 대기 중 NO<sub>2</sub>에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 입자로의 생성(NO<sub>2</sub> → HNO<sub>3</sub> + NH<sub>3</sub> → NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>)은 약한 풍속, 낮은 기온과 높은 RH와 같은 기상 조건에서 유리하다(Peng *et al.*, 2021; Son *et al.*, 2021; Seinfeld and Pan-

**Table 2.** Comparison of PM<sub>2.5</sub>, its major chemical components, criteria gases, and meteorological parameters between the two sites over three NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pollution cases.

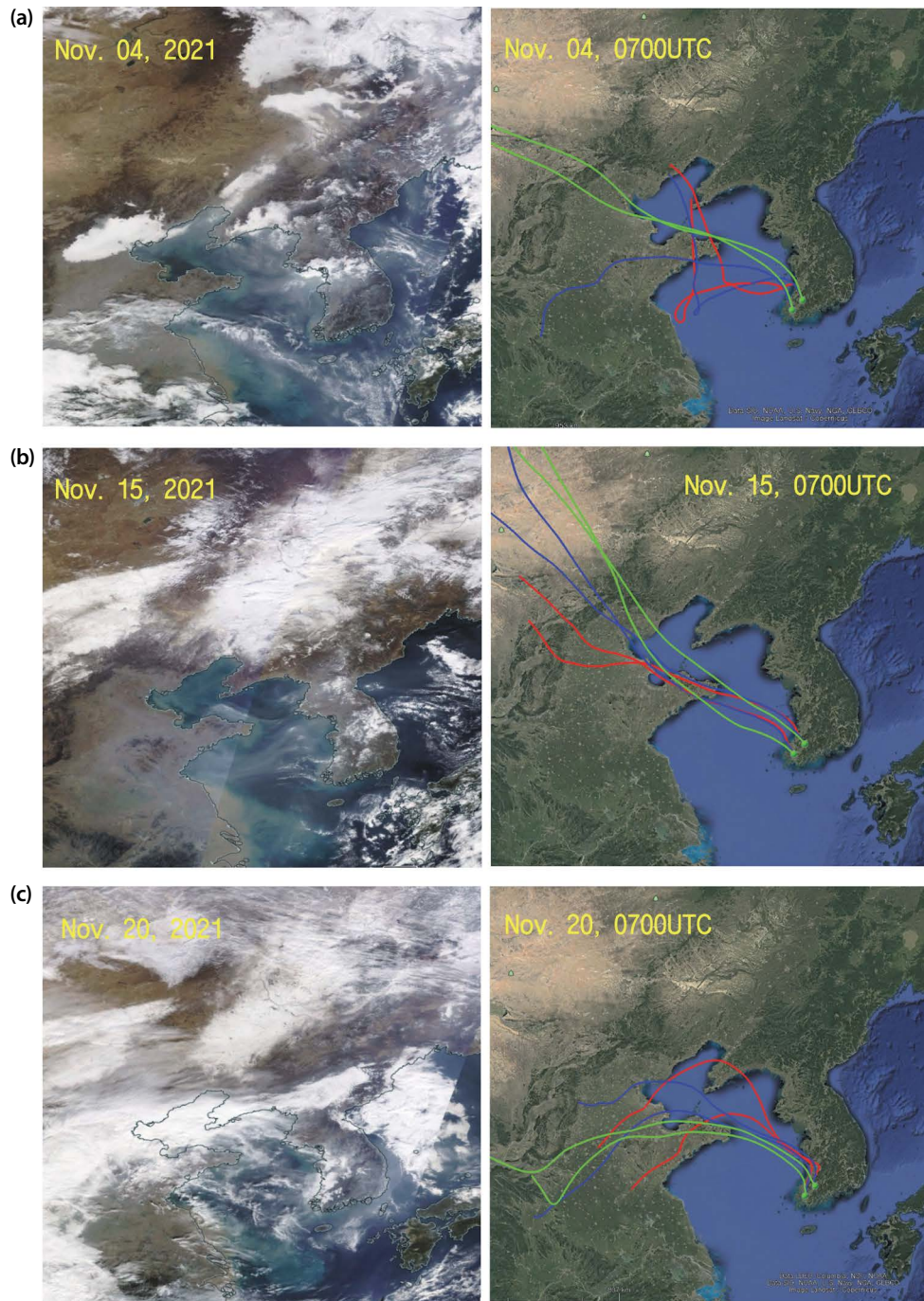
Item	Unit	Urban site (Gwangju)			Wharf site (Yeongam-Gun)		
		Case I	Case II	Case III	Case I	Case II	Case III
PM <sub>2.5</sub>	µg/m <sup>3</sup>	25~33	25~32	50~86	43~50	34~49	54~99
OC	µgC/m <sup>3</sup>	7.4~9.7	6.7~9.0	9.3~16.0	9.0~11.5	6.6~9.3	9.6~11.8
EC	µgC/m <sup>3</sup>	1.0~1.4	0.9~1.7	1.1~2.1	1.3~1.5	1.3~1.7	1.7~2.6
WSOC	µgC/m <sup>3</sup>	4.7~6.6	3.6~4.8	7.0~9.3	5.7~7.2	3.3~4.5	5.5~7.5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	µg/m <sup>3</sup>	2.4~4.4	2.4~3.6	6.9~9.3	5.0~7.0	2.8~5.2	6.3~12.8
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	µg/m <sup>3</sup>	2.2~5.0	6.4~8.4	11.1~16.3	6.8~10.8	5.8~9.9	11.4~21.8
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	µg/m <sup>3</sup>	3.2~4.5	1.8~2.0	4.2~5.2	4.5~6.0	1.9~2.5	3.0~7.7
NO	ppb	6~20	6~36	7~21	2~10	6~22	1~15
NO <sub>2</sub>	ppb	26~40	23~36	31~57	16~22	25~28	17~32
SO <sub>2</sub>	ppb	3.0~5.1	3.0~3.8	1.5~2.0	1.1~3.1	1.9~3.0	1.0~3.4
CO	ppm	0.63~0.88	0.78~0.88	0.78~1.11	0.39~0.65	0.43~0.69	0.51~0.68
O <sub>3</sub>	ppb	19~36	16~36	5~29	25~46	20~36	22~37
Temp	°C	10~17	7~14	9~14	12~17	10~14	9~14
WS	m/s	0.3~1.1	0.1~1.0	0.5~0.8	1.7~2.4	1.0~3.2	1.2~2.4
RH	%	60~98	62~99	82~99	56~89	58~79	76~100

dis, 2006; Park *et al.*, 2005). 표 2를 보면 두 지점에서 세 번의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도 증가 사례가 관측된 기상 조건들은 대기 중 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 입자의 생성이 매우 활발한 조건에 해당하였다. 사례 중 8시간 평균 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 최고 농도는 세 번째 사례를 제외하고 가장 낮은 WS, AT 및 RH의 기상 조건에서 관측되었다. 즉, 이는 두 지점에서 측정된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 상당한 양은 국지적으로 생성된 NO<sub>2</sub>의 산화 과정을 통해 생성되었을 것으로 판단되지만 부두 지점에서 낮은 NO<sub>2</sub>의 농도와 강한 풍속 조건에서 높게 측정된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 아마 다른 요인이 영향을 주었을 것이다. 이를 조사하기 위하여 각 사례에 대해서 미국 NASA의 위성영상(<https://worldview.earthdata.nasa.gov>)과 측정 지점으로 유입되는 기단의 역궤적 계산을 수행하였다. 그림 7에 각 사례(November 04, 15, 20, 2021)에 대한 위성영상과 세 고도(300, 500 및 1000 m)에서 계산한 기단의 역궤적 결과를 나타내었다. 외부에서 측정 지점으로 기단의 유입 경로를 파악하기 위하여 NOAA에서 제공하는 Hysplit 모델([https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php))을 이용하여 각 사례에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 최대 농도가 관측된 시

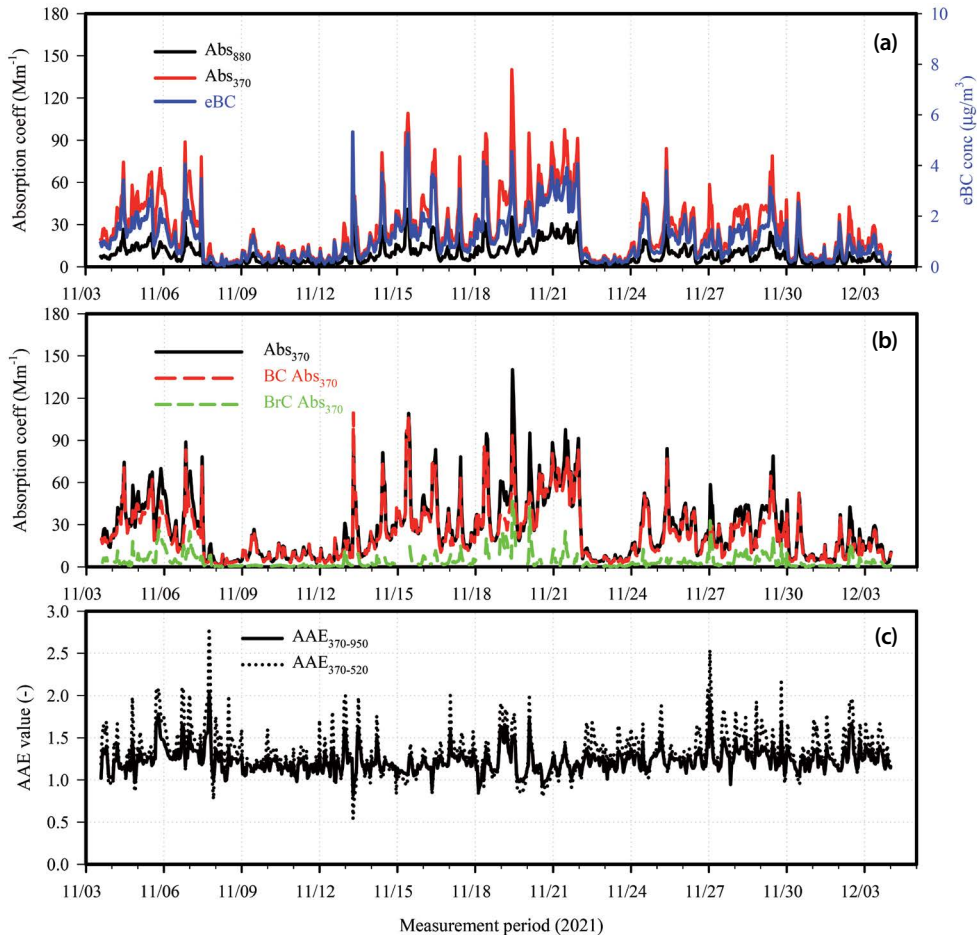
간을 기준으로 3일 간격의 공기 역궤적 계산을 수행하였다(Rolph *et al.*, 2017). 그림 7에 나타난 각 사례의 위성영상을 보면 중국의 동북쪽으로부터 연무가 서해를 거치면서 한반도로 유입되고 있으며 한반도가 연무로 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그뿐만 아니라, 세 고도에서 기단의 이동 경로를 보면, 중국에 있는 오염된 기단이 두 수용지점으로 유입되고 있는 것으로 판단할 때 뚜렷하게 외부의 장거리 수송에 의한 영향이 두 지점에서 측정된 PM<sub>2.5</sub>와 이들의 주요 화학적 성상에 영향을 주었을 것이다. 그러나 수용지점에서 받는 PM<sub>2.5</sub>의 정량적 영향 정도가 달라서 본 연구를 수행한 광주 도심과 영암 용당 부두 지점에서의 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 두 지점의 외부 유입에 의한 정량적인 평가는 3차원 대기화학수송모델의 수행을 통해 가능할 것이다.

### 3.3 부두에서 선박 운항이 에어로졸 입자의 광 흡수 성질 변화에 미치는 영향 조사

그림 8(a)는 용당 부두에서 aethalometer를 이용해 측정된 880과 370 nm에서의 1시간 평균 PM<sub>2.5</sub>의 광



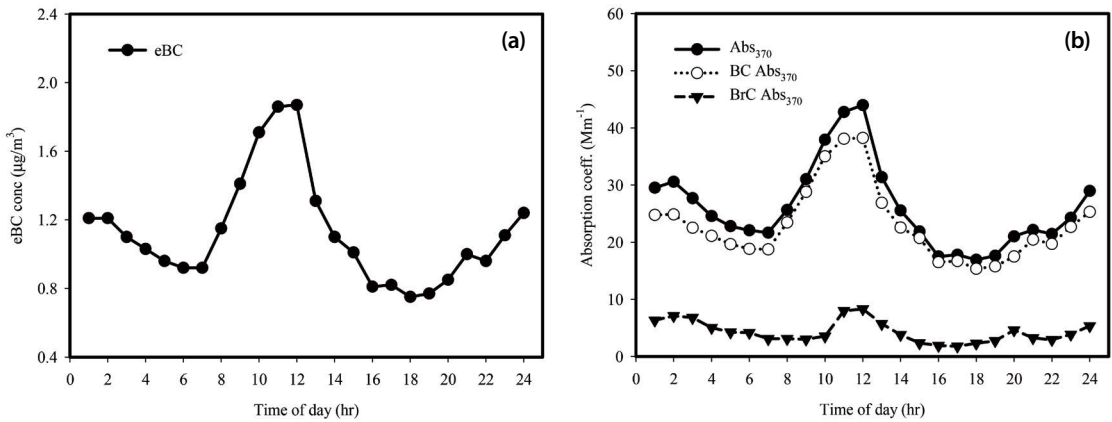
**Fig. 7.** MODIS images (left graphs) and air mass backward trajectories (right graphs). Transport pathways of air masses on the right represent (a) Nov 04, (b) Nov 15, and (c) Nov 20, 2021. Red, blue, and green lines indicate transport pathways of the air masses at heights of 300 m, 500m, and 1000 m above ground level, respectively.



**Fig. 8.** Temporal variations of (a)  $Abs_{880}$ ,  $Abs_{370}$ , and eBC, (b) BC  $Abs_{370}$  and BrC  $Abs_{370}$ , and (c)  $AAE_{370-950}$  and  $AAE_{370-520}$  at Yongdang pier site during the entire study period.

흡수계수 ( $Abs_{880}$  과  $Abs_{370}$ )와 880 nm에서 BC 농도 (eBC)를 나타낸다. 그리고 그림 8(b)와 (c)는 각각 370 nm의 파장에서  $PM_{2.5}$ , BC (BC  $Abs_{370}$ ) 및 BrC (BrC  $Abs_{370}$ ) 입자의 광 흡수계수와 370~950 nm와 370~520 nm의 파장 범위에서 계산한 흡수용스트롱지수 ( $AAE_{370-950}$ 와  $AAE_{370-520}$ )의 시간별 변화를 보여준다. 전체 연구 기간 중 BrC 입자의 1차 배출원(화석연료 vs. BB)을 규정하기 위해 BrC  $Abs_{370}$ 와 OC,  $K^+$  그리고  $Cl^-$  농도 사이의 상관 분석을 수행하였다. 370 nm에서 평가한 BrC 입자의 광 흡수계수 (BrC  $Abs_{370}$ )가 OC와 BB 또는 농업잔재물 (agricultural residues)의

추적자인  $K^+$ 와  $Cl^-$  농도 사이에 0.51, 0.36, 0.06의  $R^2$ 를 나타낸 점을 고려하면 부두에서 측정된 광 흡수 BrC 입자는 BB나 농업폐기물 소각 활동에 의한 영향보다는 화석연료의 연소 과정(선박 엔진이나 차량 운행)이나 유기용제의 분무 입자에 의해 발생한 것으로 추정된다. 그림 9(a)와 (b)는 각각 eBC 농도와 370 nm에서 각 흡수체의 광 흡수계수 ( $Abs_{370}$ , BC  $Abs_{370}$ , BrC  $Abs_{370}$ )의 일주기 특성을 보여준다. eBC 농도와 370 nm의 파장에서 광 흡수계수의 일주기(그림 9(a)와 (b))는 부두 지점에서 측정된 NO와  $NO_2$ 의 일주기 특성(그림 5)과 매우 유사하였다. 이는 이들의 일주기

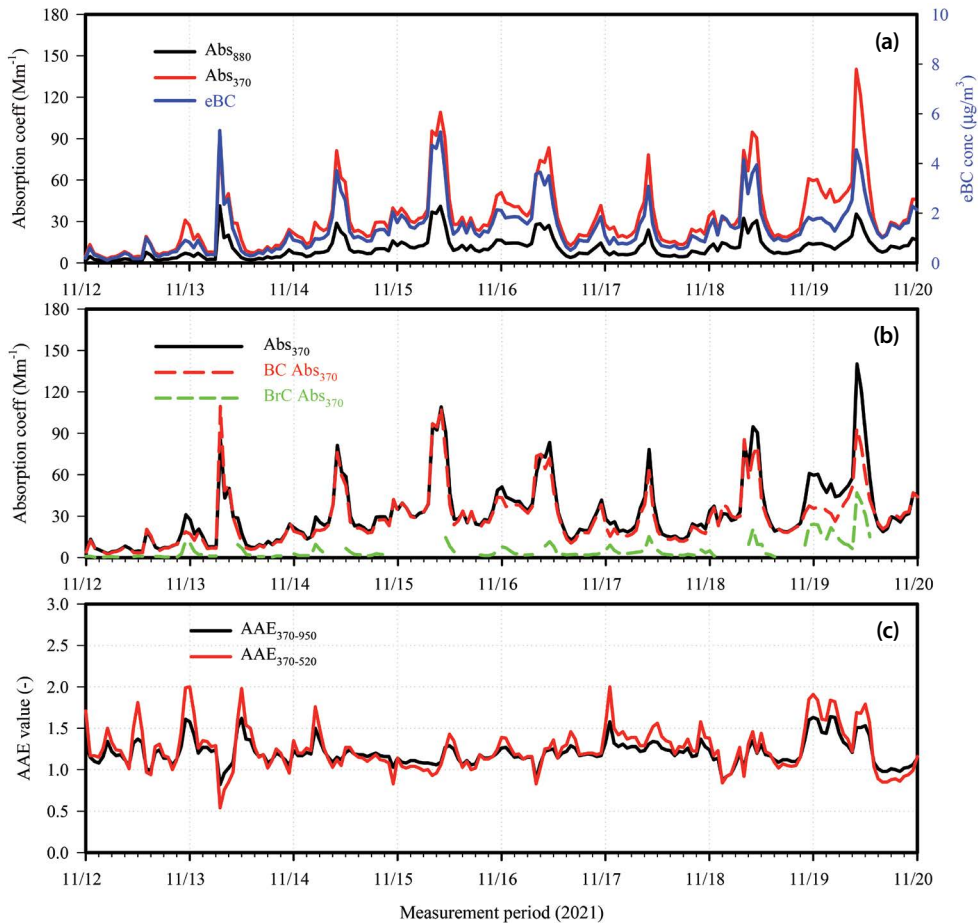


**Fig. 9.** Diurnal cycles of (a) eBC concentration and (b) absorption coefficients by PM<sub>2.5</sub> (Abs<sub>370</sub>), BC (BC Abs<sub>370</sub>), and BrC (BrC Abs<sub>370</sub>) particles at 370 nm.

가 부두에서 활동 중인 유사한 배출 오염원에 영향을 받았음을 의미한다. 그러나 2019년 광주 도심에서 관측된 eBC 농도의 일주기 (Park and Han, 2022)는 도시 지역의 시간별 교통량의 변화 추이와 차이를 보이는 부두에서 측정된 일주기 특성과 약간 달랐다. 도심에서의 eBC 농도는 아침 출근 시간 (07:00~09:00)에 급격하게 증가한 후 감소하다가 저녁 퇴근 시간 (18:00~21:00)에 완만한 증가 추이를 보인 후 감소하는 일주기 특성을 보였다. 전체 연구 기간 중 1시간 평균 Abs<sub>880</sub>과 Abs<sub>370</sub>는 각각  $8.8 \pm 7.2$  (0.3~41.4)와  $26.8 \pm 21.6$  (0.8~140.2) Mm<sup>-1</sup>으로 370 nm에서 880 nm의 파장보다 에어로졸 입자에 의한 광 흡수계수가 약 3배 높았다. 이것은 근-자외선 파장에서는 BC 입자뿐만 아니라 유기 에어로졸 입자(BrC)에 의해서도 광 흡수가 일어나기 때문이다. Abs<sub>880</sub>과 Abs<sub>370</sub>의 최대값은 각각 11월 13일 07:00~08:00와 11월 19일 10:00~11:00에 관측되었다. eBC의 1시간 평균 농도는  $1.1 \pm 0.9$  (0.04~5.32) µg/m<sup>3</sup>으로 11월 13일 07:00~08:00에 최대값이 관측되었으며 두 번째로 높은 eBC 농도는 5.28 µg/m<sup>3</sup>으로 11월 15일 10:00~11:00에 관측되었다(그림 8(a)). 370 nm에서 평가한 BC와 BrC 입자의 1시간 평균 광 흡수계수는 각각  $23.3 \pm 19.0$  (0.8~109.4)과  $4.2 \pm 5.4$  (0.04~46.8) Mm<sup>-1</sup>으로 BrC 입자에 의한 평균 광 흡수는 전체 에어로졸 입자에 의한 광 흡수 중

14.5 ± 9.3 (0.1~58.2)%를 차지하였다. BrC Abs<sub>370</sub>의 최대값(46.8 Mm<sup>-1</sup>)은 11월 19일 10:00~11:00에 관측되었으며 에어로졸 입자에 의한 광 흡수 중 33.4%를 차지하였다. 그러나 Abs<sub>370</sub> 중 BrC Abs<sub>370</sub>의 최대 기여율(58.2%)이 관측된 시각은 11월 7일 18:00~19:00였다. AAE<sub>370-950</sub>와 AAE<sub>370-520</sub>의 1시간 평균값은 각각  $1.23 \pm 0.14$  (0.8~2.0)와  $1.32 \pm 0.26$  (0.5~2.8)으로 880 nm 이하의 파장에서 BrC의 광 흡수계수를 평가하기 위하여 사용한 BC 입자의 AAE 값(1.1)보다 높았다. 이는 대기 에어로졸 입자에 근-자외선 파장에서 빛을 흡수하는 유기 에어로졸 입자가 존재했음을 암시한다. 11월 7일 18:00~19:00에 관측된 eBC 농도(0.28 µg/m<sup>3</sup>)와 Abs<sub>370</sub> (13.7 Mm<sup>-1</sup>)의 값들은 매우 낮았음에도 대기 에어로졸 입자 내 BrC 성분의 존재를 입증할 수 있는 AAE<sub>370-950</sub> (2.02)와 AAE<sub>370-520</sub> (2.80)의 값은 연구 기간 중 가장 높았다. 이때 에어로졸 입자 중 BrC 입자의 광 흡수 기여율이 가장 높았다.

2절의 실험방법에서 언급한 대로 목포지방해양수산청의 자료에 의하면 부두에서 선박의 입·출항은 주로 00:00~03:00, 07:00~09:00 및 20:00~24:00시에 이루어졌으며, 부두 내에서 화물의 운반과 선적 및 하역을 위해 09:00~12:00시에 트럭이나 중장비 등이 운행되었다(그림 5와 9: NO, NO<sub>2</sub>, eBC 및 광 흡수계수의 일주기). 선박의 입·출항으로 인해 배출되는 입자상



**Fig. 10.** Temporal variations of (a)  $Abs_{880}$ ,  $Abs_{370}$ , and eBC, (b) BC  $Abs_{370}$  and BrC  $Abs_{370}$ , and (c)  $AAE_{370-950}$  and  $AAE_{370-520}$  at Yongdang pier site for period of November 12~19.

물질이 에어로졸 입자의 광 흡수 성질에 미치는 영향을 조사하기 위해 사례 연구로서 11월 12~13일과 18~19일을 선정하여 그림 10(a)~(c)에 이 기간에 조사한  $Abs_{880}$ ,  $Abs_{370}$ , eBC, BC  $Abs_{370}$ , BrC  $Abs_{370}$ ,  $AAE_{370-950}$ 와  $AAE_{370-520}$ 의 시간 자료들을 나타내었다. 그림 10(a)에서 에어로졸 입자의 광 흡수계수와 eBC 농도의 시간 변동 추이는 선박의 입·출항 시간과 부두 내 경유 연료를 사용하는 차량의 활동 시간과 거의 일치하였으며, 해당 시간에 이들의 최대값들이 관측되었다. 먼저 11월 12일 저녁의 상황을 상세히 살펴보면, 21:00시에 관측된  $Abs_{370}$ ,  $Abs_{880}$ , eBC,  $AAE_{370-950}$

와  $AAE_{370-520}$ 의 값은 각각  $9.9 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $3.6 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1.13, 1.12로, 매우 낮은 AAE 값( $\sim 1.1$ )과 BrC 입자의 광 흡수 기여율(4.1%)을 고려하면, 이 시각에 370 nm의 파장에서 측정된 에어로졸 입자의 대부분의 광 흡수는 BC 입자에 의해 발생하였다. 그러나 22:00~00:00시에 측정된 이들의 값은  $17.4\sim 31.0 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $5.5\sim 7.1 \text{ Mm}^{-1}$ ,  $0.71\sim 0.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.27\sim 1.61$ ,  $1.44\sim 2.00$ 까지 증가하였다. 그리고  $Abs_{370}$  중 BrC  $Abs_{370}$ 이 차지하는 비율( $\% \text{BrC } Abs_{370} = \text{BrC } Abs_{370} / Abs_{370} \times 100\%$ )은 14.5~31.3%까지 증가하였다. 이 시간에 확인된  $AAE_{370-520}$ 와  $\% \text{BrC } Abs_{370}$ 의 두드러진 증가는 선박의



운항 시간과 거의 일치하였다. 그러나 선박의 운항이 없었던 (목포지방해양수산청 자료) 11월 13일 07:00~09:00의  $Abs_{370}$ ,  $Abs_{880}$ , eBC,  $AAE_{370-950}$ ,  $AAE_{370-520}$ , %BrC  $Abs_{370}$ 는 각각  $43.1\sim 85.1\text{ Mm}^{-1}$ ,  $18.3\sim 41.3\text{ Mm}^{-1}$ ,  $2.36\sim 5.32\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.82\sim 1.02$ ,  $0.54\sim 0.85$ ,  $7.5\sim 8.7\%$ 였다. 이 시간에 측정된 매우 높은 eBC 농도, <1.0의 AAE 값, 낮은 %BrC  $Abs_{370}$  등을 고려하면, 이때 대기 에어로졸 입자의 광학적 성질은 확실하게 선박 운항에 의한 영향보다는 측정 지점 주변의 경유 차량 운행에 의한 영향으로 추정된다. 비슷하게 11월 15일 10:00~11:00시(그림 10 참조)에 급증한  $Abs_{370}$  ( $109.1\text{ Mm}^{-1}$ )와 eBC 농도 ( $5.28\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), %BrC  $Abs_{370}$ 의 기여율 (85%), 1에 가까운  $AAE_{370-950}$  (1.09)와  $AAE_{370-520}$  (1.06)에 의하면 이때 역시  $Abs_{370}$ 의 급격한 증가와 낮은 AAE 값은 에어로졸 입자에 의한 광 흡수는 BrC 입자보다는 대부분 차량 배출에 의한 BC 입자에 의한 영향으로 추정된다. 마지막으로 11월 18일~19일의 상황을 보면, 18일 22:00~19일 05:00시에  $Abs_{370}$ ,  $Abs_{880}$ , eBC,  $AAE_{370-950}$ ,  $AAE_{370-520}$ , %BrC  $Abs_{370}$ 는 각각  $41.5\sim 61.0\text{ Mm}^{-1}$ ,  $10.0\sim 14.2\text{ Mm}^{-1}$ ,  $1.28\sim 1.83\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $1.35\sim 1.63$ ,  $1.47\sim 1.91$ ,  $21.7\sim 40.5\%$ 로 AAE 값들과 BrC 입자에 의한 광 흡수 기여율이 증가하였다. 이와 같은 에어로졸 입자의 광학적 성질들의 증가는 해당 시간에 확인된 총 8대의 선박의 입·출항 횟수(벌크선, 일반화물선, 모래운반선)와 직접적으로 관련이 있었을 것이다. 몇몇 사례를 통해 에어로졸 입자의 광학적 성질의 변화를 상세히 분석한 결과에 의하면 부두 내 선박 운항이 대기에 빛을 흡수하는 BrC 입자를 배출함과 동시에 BC 입자와 함께 대기 에어로졸 입자의 광 흡수에 지대한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

#### 4. 요약 및 결론

화석연료 연소 시 배출되는 기체상 오염물질(CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>)의 농도(배출량)와 일주기가 큰 차이를 보이는 두 지점(광주광역시와 한 도심과 영암군 용당

부두 지점)에서 PM<sub>2.5</sub>의 탄소와 2차 이온 성분들의 화학적 특성 차이를 조사하기 위해 두 지점에서 2021년 늦가을에 약 1개월간 8시간 주기로 PM<sub>2.5</sub>를 채취하여 이들의 화학적 성분을 분석하였다. 게다가, 부두 지점에서 대형 선박의 운항으로 배출되는 입자상 오염물질이 대기 에어로졸 입자(e.g., BrC)의 광 흡수에 미치는 영향을 평가하기 위해 7파장 aethalometer를 이용하여 1분 단위로 PM<sub>2.5</sub>의 광 흡수계수를 측정하였다.

광주 도심에서 측정된 NO, NO<sub>2</sub>, CO 그리고 SO<sub>2</sub>의 농도가 용당 부두에서 측정된 농도보다 매우 높았으나, PM<sub>2.5</sub>와 이들의 탄소와 2차 이온 성분들의 농도는 반대로 부두 지점에서 높았다. 또한, O<sub>3</sub>의 농도는 도심보다는 부두 지점에서 약간 높았다. 부두 지점에서 상당히 낮은 NO<sub>2</sub>의 농도에도 불구하고 O<sub>3</sub>의 농도가 높았던 이유는 주변의 대불산업단지 내 선박 구성품 생산 과정에서 배출하는 VOCs에 의한 영향으로 판단된다. 대기 중 O<sub>3</sub>의 생성 속도는 NO<sub>2</sub>의 광분해 조건과 VOCs/NO<sub>x</sub>의 농도비 등에 의존하는데, 부두 지점에서 도로이동오염원이 중요한 도심 지점보다 약간 높은 O<sub>3</sub>의 농도는 VOCs/NO<sub>x</sub>의 농도비가 중요한 역할을 했을 것이다.

두 지점에서 NO<sub>2</sub>와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 사이의 좋은 상관관계(R<sup>2</sup>=0.38~0.40)에 의하면 두 지점에서 측정된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 일부는 국지적으로 배출된 질소산화물의 산화 과정을 통해 생성되었을 것이다. 그리고 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 증가 사례는 기상학적으로 약한 풍속, 낮은 기온 그리고 높은 RH와 같은 조건에서 발생하였다. 그러나 부두 지점에서 도심 지점보다 낮은 NO<sub>2</sub> 농도, 강한 풍속 그리고 낮은 RH 하에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 반대로 더 높았다. 두 지점에서 측정된 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도 비교는 대기 중 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 생성 속도와 기체-입자로의 분배 특성이 NO<sub>2</sub>의 농도 이외의 다른 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 NO<sub>2</sub>의 농도에 반드시 비례하지 않음을 시사한다. 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 미국 NASA의 위성영상과 두 측정 지점으로 유입되는 기단의 역-궤적 계산 결과에 의하면 국지적인 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 생성뿐만 아니라 외부의 장거리 수송에 의한

해당 오염물질의 유입이 PM<sub>2.5</sub>와 이들의 주요 화학적 성상에 영향을 주었을 것으로 추정된다. 즉, 외부에서 부두 지점으로 유입된 2차 이온 성분의 절대적인 양이 도심 지점보다 훨씬 많아서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도가 높게 측정되었을 것이다. 이와 같은 결과는 수용지점에서 2차 이온 성분들의 기체상 전구물질의 농도가 높고 산화반응 속도가 빠르더라도 외부 유입의 영향 정도에 따라서 실측농도는 크게 영향을 받을 수 있음을 시사한다.

부두 지점에서 측정된 광 흡수 BrC 입자는 BB나 농업폐기물 소각 활동에 의한 영향보다는 화석연료의 연소 과정이나 유기용제의 분무 입자에 의해 발생한 것으로 추정된다. 또한 eBC 농도와 370 nm의 파장에서 광 흡수계수의 일주기는 NO와 NO<sub>2</sub>의 일주기와 매우 유사하였으며, 이는 이들이 부두에서 활동 중인 유사한 배출 오염원에 영향을 받았음을 의미한다. 370 nm에서 평가한 BrC 입자에 의한 평균 광 흡수는 전체 에어로졸 입자에 의한 광 흡수 중 14.5 ± 9.3 (0.1~58.2) %를 차지하였다. 선박의 입·출항으로 인해 배출되는 입자상 물질이 에어로졸 입자의 광 흡수 성질에 미치는 영향을 조사하기 위한 사례 연구에서 에어로졸 입자의 광 흡수계수와 eBC 농도의 시간 변동 추이는 선박의 운항 시간과 부두 내 차량의 활동 시간과 거의 일치하였다. 몇몇 사례를 통해 에어로졸 입자의 광학적 성질의 변화를 상세히 분석한 결과에 의하면 부두 내 선박 운항이 대기에 빛을 흡수하는 BrC 입자를 배출함과 동시에 BC 입자와 함께 대기 에어로졸 입자의 광 흡수에 영향을 주었음을 확인하였다. 정리하면, 기존 연구와 본 연구 결과를 통해서 소형 어선(Park *et al.*, 2022a; Yu *et al.*, 2019b, 2018c)과 대형 선박 화물선의 운항으로 인해 배출된 유기 에어로졸 입자가 대기 에어로졸 입자의 광 흡수 증가에 영향을 미친다는 점을 확인하였으나, 추가로 선박 활동으로 인한 갈색 탄소의 영향을 더 과학적으로 규명하기 위해서는 선박 배출원의 추적자 물질(NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, BC, OC 등), 입경분포, 파장별 광 흡수계수 등의 실시간 관측을 통한 종합적인 분석이 필요할 것이다.

## 감사의 글

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

## References

- Bai, K., Ma, M., Chang, N.-B., Gao, W. (2019) Spatiotemporal trend analysis for fine particulate matter concentrations in China using high-resolution satellite derived and ground-measured PM<sub>2.5</sub> data, *Journal of Environmental Management*, 233, 530-542.
- Bond, T.C. (2001) Spectral dependence of visible light absorption by carbonaceous particles emitted from coal combustion, *Geophysical Research Letters*, 28(21), 4075-4078.
- Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., Forster, P.M., Berntsen, T., DeAngelo, B.J., Flanner, M.G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P.K., Sarofim, M.C., Schultz, M.G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S.K., Hopke, P.K., Jacobson, M.Z., Kaiser, J.W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J.P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S.G., Zender, C.S. (2013) Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment, *Journal of Geophysical Research*, 118, 5380-5552.
- Cappa, C.D., Zhang, X., Russell, L.M., Collier, S., Lee, A.K.Y., Chen, C.-L., Betha, R., Chen, S., Liu, J., Price, D.J., Sanchez, K.J., McMeeking, G.R., Williams, L.R., Onasch, T.B., Worsnop, D.R., Abbatt, J., Zhang, Q. (2019) Light absorption by ambient black and brown carbon and its dependence on black carbon coating state for two California, USA, cities in winter and summer, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 124(3), 1550-1577.
- Cheng, Y.F., Eichler, H., Wiedensohler, A., Heintzenberg, J., Zhang, Y.H., Hu, M., Herrmann, H., Zeng, L.M., Liu, S., Gnauk, T., Brüggemann, E., He, L.Y. (2006) Mixing state of elemental carbon and non-light-absorbing aerosol components derived from in situ particle optical properties at Xinken in Pearl River Delta of China, *Journal of Geophysical Research*, 111(D20), D20204.
- China State Council (2016) The 13th Five-Year Plan on Energy Saving and Emissions Reduction, China State Council, Beijing, China.

- Ding, A.J., Huang, X., Nie, W., Sun, J.N., Kerminen, V.M., Petäjä, T., Su, H., Cheng, Y.F., Yang, X.Q., Wang, M.H., Chi, X.G., Wang, J.P., Virkkula, A., Guo, W.D., Yuan, J., Wang, S.Y., Zhang, R.J., Wu, Y.F., Song, Y., Zhu, T., Zilitinkevich, S., Kulmala, M., Fu, C.B. (2016) Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China, *Geophysical Research Letters*, 43(6), 2873-2879.
- Ditas, J., Ma, N., Zhang, Y., Assmann, D., Neumaier, M., Riede, H., Karu, E., Williams, J., Scharffe, D., Wang, Q., Saturno, J., Schwarz, J.P., Katich, J.M., McMeeking, G.R., Zahn, A., Hermann, M., Brenninkmeijer, C.A.M., Andreae, M.O., Pöschl, U., Su, H., Cheng, Y. (2018) Strong impact of wildfires on the abundance and aging of black carbon in the lowermost stratosphere, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(50), E11595-E11603.
- Doran, J.C., Barnard, J.C., Arnott, W.P., Cary, R., Coulter, R., Fast, J.D., Kassianov, E.I., Kleinman, L., Laulainen, N.S., Martin, T. (2007) The T1-T2 study: evolution of aerosol properties downwind of Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(6), 1585-1598.
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A.S.H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Hansen, A.D.A. (2015) The "dual-spot" Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(5), 1965-1979. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Feng, Y., Ramanathan, V., Kotamarthi, V.R. (2013) Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation? *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(17), 8607-8621.
- Healy, R.M., Wang, J.M., Jeong, C., Lee, A.K.Y., Willis, M.D., Jaroudi, E., Zimmerman, N., Hilker, N., Murphy, M.S., Eckhardt, S. (2015) Light-absorbing properties of ambient black carbon and brown carbon from fossil fuel and biomass burning sources, *Journal of Geophysical Research*, 120(13), 6619-6633.
- Ju, S., Yu, G.-H., Park, S., Lee, J., Lee, S., Jee, J., Lee, K., Lee, M. (2020) Pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> measured during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 329-345, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.329>
- Kasper, A., Aufdenblatten, S., Forss, A., Mohr, M., Bartscher, H. (2007) Particulate emissions from a low-speed marine diesel engine, *Aerosol Science and Technology*, 41, 24-32.
- Kirchstetter, T.W., Novakov, T., Hobbs, P.V. (2004) Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D21), D21208.
- Kroll, J.H., Smith, J.D., Worsnop, D.R., Wilson, K.R. (2012) Characterisation of lightly oxidised organic aerosol formed from the photochemical aging of diesel exhaust particles, *Environmental Chemistry*, 9(3), 211-220.
- 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, D00F04. <https://doi.org/10.1029/2008/JD011300>
- Lack, D.A., Cappa, C.D. (2010) Impact of brown and clear carbon on light absorption enhancement, single scatter albedo and absorption wavelength dependence of black carbon, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 4207-4220. <https://doi.org/10.5194/acp-10-4207-2010>
- 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, 3985-4000.
- Laskin, A., Laskin, J., Nizkorodov, S.A. (2015) Chemistry of atmospheric brown carbon, *Chemical Reviews*, 115, 4335-4382. <https://doi.org/10.1021/cr5006167>
- Li, S., Zhu, M., Yang, W., Tang, M., Huang, X., Yu, Y., Fang, H., Yu, X., Yu, Q., Fu, X., Song, W., Zhang, Y., Bi, X., Wang, X. (2018) Filter-based measurement of light absorption by brown carbon in PM<sub>2.5</sub> in a megacity in South China, *Science of The Total Environment*, 633, 1360-1369.
- Lin, G., Penner, J.E., Flanner, M.G., Sillman, S., Xu, L., Zhu, C. (2014) Radiative forcing of organic aerosol in the atmosphere and on snow: Effects of SOA and brown carbon, *Journal of Geophysical Research*, 119, 7453-7476.
- Liu, 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>
- Liu, S., Aiken, A.C., Gorkowski, K., Dubey, M.K., Cappa, C.D., Williams, L.R., Herndon, S.C., Massoli, P., Fortner, E., Chhabra, P.S. (2015) Enhanced light absorption by mixed source black and brown carbon particles in UK winter, *Nature Communications*, 6(1), 8435.

- Liu, D., Whitehead, J., Alfara, M.R., Reyes-Villegas, E., Spracklen, D.V., Reddington, C.L., Kong, S., Williams, P.I., Ting, Y.-C., Haslett, S., Taylor, J.W., Flynn, M.J., Morgan, W.T., McFiggans, G., Coe, H., Allan, J.D. (2017) Black carbon absorption enhancement in the atmosphere determined by particle mixing state, *Nature Geoscience*, 10(3), 184-188.
- Mueller, L., Jakobi, G., Czeck, 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., Harnsdorf, 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.
- Olson, M.R., Victoria Garcia, M., Robinson, M.A., Van Rooy, P., Dietenberger, M.A., Bergin, M., 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-Atmosphere*, 120(13), 6682-6697.
- Park, S.S., Ondov, J.M., Harrison, D., Nair, N.P. (2005) Seasonal and shorter-term variations in particulate atmospheric nitrate in Baltimore, *Atmospheric Environment*, 39, 2011-2020.
- Park, S.S., Kleissl, J., Harrison, D., Kumar, V., Nair, N.P., Adam, M., Ondov, J., Parlange, M. (2006) Characteristics of PM<sub>2.5</sub> episodes revealed by semi-continuous measurements at the Baltimore Supersite at Ponca St., *Aerosol Science and Technology*, 40, 845-860.
- 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., 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.
- Park, S., Yu, G.-H., Bae, M.-S. (2020) Effects of combustion condition and biomass type on the light absorption of fine organic aerosols from fresh biomass burning emissions over Korea, *Environmental Pollution*, 265, 114841.
- Park, T.E., Son, S.C., Lee, K.-H., Park, S. (2022a) Differences in chemical, light absorption, and spectroscopic characterizations of PM<sub>2.5</sub> during spring at an urban site in Gwangju and a port site in Gangneung, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 375-393, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.375>
- Park, S., Son, S., Lee, K. (2022b) Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> during spring and fall at two sites in Chungcheongnam-do, South Korea; insight into Fe solubility and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> formation, *Atmospheric Pollution Research*, 13(3), 101350.
- Park, S., Han, S. (2022) Source apportionment of black carbon in PM<sub>2.5</sub> observed using a real-time seven-wavelength aethalometer at an urban site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 653-668, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.653>
- Peng, J., Hu, M., Shang, D., Wu, Z., Du, Z., Tan, T., Wang, Y., Zhang, F., Zhang, R. (2021) Explosive secondary aerosol formation during severe haze in the North China Plain, *Environmental Science and Technology*, 55, 2189-2207.
- Rolph, G., Stein, A., Stunder, B. (2017) Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY, *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Son, S.-C., Yu, G.-H., Park, S., Lee, S. (2021) Comprehensive characterization of PM<sub>2.5</sub> using chemical, optical, and spectroscopic methods during pollution episodes at an urban site in Gwangju, Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 12, 101199.
- Vaishya, A., Singh, P., Rastogi, S., Babu, S.S. (2017) Aerosol black carbon quantification in the central indo-Gangetic plain: seasonal heterogeneity and source apportionment, *Atmospheric Research*, 185, 13-21.
- Wang, Q., Ye, J., Wang, Y., Zhang, T., Ran, W., Wu, Y., Tian, J., Li, L., Zhou, Y., Ho, S.S.H., Dang, B., Zhang, Q., Zhang, R., Chen, Y., Zhu, C., Cao, J. (2019) Wintertime optical properties of primary and secondary Brown carbon at a regional site in the North China Plain, *Environmental Science and Technology*, 53, 12389-12397.
- 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.
- Xie, C., Xu, W., Wang, J., Wang, Q., Sun, Y. (2019a) Vertical characterization of aerosol optical properties and brown carbon in winter in urban Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(1), 165-179.
- Xie, C., Xu, W., Wang, J., Liu, D., Ge, X., Zhang, Q., Wang, Q., Du, W.,

- Zhao, J., Zhou, W., Li, J., Fu, P., Wang, Z., Worsnop, D., Sun, Y. (2019b) Light absorption enhancement of black carbon in urban Beijing in summer, *Atmospheric Environment*, 213, 499-504.
- Xulu, N.A., Piketh, S.J., Feig, G.T., Lack, D.A., Garland, R.M. (2020) Characterizing light absorbing aerosols in a low-income settlement in South Africa, *Aerosol and Air Quality Research*, 20(8), 1812-1832. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0443>
- Yan, C., Zheng, M., Bosch, C., Andersson, A., Desyaterik, Y., Sullivan, A.P., Collett, J.L., Zhao, B., Wang, S., He, K., Gustafsson, O. (2017) Important fossil source contribution to brown carbon in Beijing during winter, *Scientific Reports*, 7, 43182.
- Yu, G.H., Zhang, Y., Cho, S.Y., Park, S. (2017) Influence of haze pollution on water soluble chemical species in PM<sub>2.5</sub> and size-resolved particles at an urban site during fall, *Journal of Environmental Sciences*, 57, 370-382.
- Yu, G.-H., Park, S.S., Park, J.S., Park, S.M., Song, I.H., Oh, J., Shin, H.J., Lee, M.D., Lim, H.B., Kim, H.W., Choi, J.Y. (2018a) Pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> observed during winter and summer in Baengryeongdo and Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 38-55, (in Korean with English abstract).
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Lim, Y.-J., Shin, H.-J., Lee, S.-B., Kim, Y.-S. (2018b) Investigation on characteristics of high PM<sub>2.5</sub> pollution occurred during October 2015 in Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 567-587, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.567>
- Yu, G.H., Park, S.S., Lee, K.H. (2018c) Enhanced light absorption due to aerosol particles in ship plumes observed at a seashore site, *Atmospheric Pollution Research*, 9(6), 1177-1183. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.05.005>
- Yu, G.-H., Lee, B.-J., Park, S.-S., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Lim, Y.-J., Kim, S.-T. (2019a) A Case study of severe PM<sub>2.5</sub> event in the Gwangju urban area during February 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 195-213, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.195>
- Yu, G.H., Park, S.S., Lee, K.H. (2019b) Light absorption characteristics of fine particles using a real-time optical absorption measurement instrument at a seashore wharf, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 564-567, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.564>
- Yu, G.-H., Park, S. (2021) Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at an urban site in Gwangju, Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 12, 101092.
- Zhai, S., Jacob, D.J., Wang, X., Shen, L., Li, K., Zhang, Y., Gui, K., Zhao, T., Liao, H. (2019) Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) trends in China, 2013-2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 11031-11041.
- Zhao, Z., Cao, J., Chow, J.C., Watson, J.G., Chen, A.L.-W., Wang, X., Wang, Q., Tian, J., Shen, Z., Zhu, C., Liu, S., Tao, J., Ye, Z., Zhang, T., Zhou, J., Tian, R. (2019) Multi-wavelength light absorption of black and brown carbon at a high-altitude site on the Southeastern margin of the Tibetan Plateau, China, *Atmospheric Environment*, 212, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.035>
- Zhang, X., Xu, X., Ding, Y., Liu, Y., Zhang, H., Wang, Y., Zhong, J. (2019) The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM<sub>2.5</sub> mass reduction in key regions in China, *Science China Earth Sciences*, 62, 1885-1902.
- Zhang, Y., Albinet, A., Petit, J.-E., Jacob, V., Chevrier, F., Gille, G., Pontet, S., Chrétien, E., Dominik-Sègue, M., Levigoureux, G., Mocnik, G., Gros, V., Jaffrezou, J.-L., Favez, O. (2020) Substantial brown carbon emissions from wintertime residential wood burning over France, *Science of The Total Environment*, 743, 140752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140752>
- Zhang, W., Wang, W., Li, J., Ma, S., Lian, C., Li, K., Shi, B., Liu, M., Li, Y., Wang, Q., Sun, Y., Tong, S., Ge, M. (2021) Light absorption properties and potential sources of brown carbon in Fenwei Plain during winter 2018-2019, *Journal of Environmental Sciences*, 102, 53-63.

## Authors Information

- 박태언 (전남대학교 환경에너지공학과 석사졸업, 영산강유역환경청 환경관리국 측정분석과 전문연구원) (pte90@korea.kr)
- 한정웅 (한국환경공단 광주전남제주환경본부 환경서비스처 대기관리1부 과장) (jwhan@keco.or.kr)
- 박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수) (park8162@chonnam.ac.kr)