



논 문

봄철 광주 도시 및 강릉 항만지점 PM_{2.5}의 화학적, 광흡수 및 분광학적 특성 차이

Differences in Chemical, Light Absorption, and Spectroscopic Characterizations of PM_{2.5} during Spring at an Urban Site in Gwangju and a Port Site in Gangneung

박태언, 손세창, 이권호¹⁾, 박승식*

전남대학교 환경에너지공학과, ¹⁾국립강릉원주대학교 대기환경과학과

접수일 2022년 4월 4일

수정일 2022년 4월 21일

채택일 2022년 5월 5일

Tae-Eon Park, Se-Chang Son, Kwon-Ho Lee¹⁾, Seungshik Park*

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University,

Gwangju, Republic of Korea

Received 4 April 2022

Revised 21 April 2022

Accepted 5 May 2022

¹⁾Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,
Gangneung, Republic of Korea

*Corresponding author

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

E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

Abstract In this study, differences in chemical and light absorption characteristics of PM_{2.5} between an urban site in Gwangju and a port site in Gangneung during spring were investigated. Results showed that concentration of NO₃⁻ was significantly high in the urban site where traffic emissions dominated, while OC was observed to be higher in the port site than in the urban site. Relationship between OC and EC concentrations at both sites suggests that carbonaceous particles measured at the urban site were strongly associated with the traffic emissions, on the contrary, they at the port site would have been affected by the traffic emissions as well as other emission sources (e.g., biomass burning). Results of ATR-FTIR (attenuated total reflection-fourier transform infrared) analysis indicated that stronger C=O and v(C=O) peaks appeared at the urban site. The peak of amine (NH₂), which is of marine origin, appeared at the port site only. In addition, presence of gypsum, calcite, and syngenite related to dust particles was observed during Asian dust event at the port site. Higher light absorption at 365 nm (Abs₃₆₅) and absorption Ångström exponent (AAE₃₃₀₋₄₀₀) values were observed at the port site, implying more amounts of light-absorbing organic aerosols. Measurements of aerosol light absorption using dual-spot aethalometer at the port site indicated that Abs₃₇₀ (aerosol total light absorption at 370 nm) and Abs_{BrC,370} (BrC light absorption at 370 nm) were found to be higher during nighttime (21:00~09:00) than during daytime (09:00~21:00), suggesting they were strongly associated with biomass burning emissions, rather than the traffic emissions, or activities of fishing boats. However, increased light absorption in the morning hours (05:00~09:00) was certainly related with shipping activities.

Key words: PM_{2.5}, An urban and a port site, ATR-FTIR, Amine (NH₂-) peak, Aerosol and BrC light absorption, AAE

1. 서 론

대기 중에 존재하는 에어로졸 입자는 탄소 성분, 이온 성분 등의 물질로 구성된 혼합물로 에어로졸 입자의 화학적 특성은 도심지역, 교외지역, 산업 단지 및 항만지역 등과 같은 다양한 공간적 특성의 영향을 받

는다(Ju *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2018). 특히, 선박 배출로 생성되는 에어로졸로 인하여 연간 약 14,500~37,500명이 조기 사망하는 것으로 조사되었다(Liu *et al.*, 2016). 선박의 디젤 엔진은 다양한 연료를 연소하며, 일반적으로 벙커C유와 같이 황, 니켈 및 바나듐을 포함하는 저 휘발성 잔류 오일을 사용한

다(Agrawal *et al.*, 2008; Kim and Hopke, 2008). 여기서 배출되는 선박 배출 오염물질에는 O₃를 생성하는 NOx와 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)과 SO₂, 블랙카본(black carbon, BC) 등이 존재하는 것으로 알려졌다(Winther *et al.*, 2014; Corbett *et al.*, 2010). 우리나라 해양수산부에 의하면 2017년 기준 국내 PM_{2.5} 총배출량의 약 8.4%가 선박 배출에 의한 것으로 조사되었다. 이에 정부는 ‘항만지역 등 대기질 개선 종합계획’을 수립하여 2025년까지 항만지역에서 발생하는 PM_{2.5}를 60% 이상 감축하는 관리방안을 마련하여 친환경 항만을 조성하는 것을 목표로 하고 있다(<https://www.mof.go.kr>).

탄소 성분은 PM_{2.5} 질량농도의 20~50%를 차지하며(Ma *et al.*, 2021), 분석법에 따라 두 종류로 분류할 수 있다. 유기탄소(organic carbon, OC)와 원소탄소(elemental carbon, EC)는 열·화학적(thermochemical) 분석법으로 분류되며, BC와 갈색탄소(brown carbon, BrC)는 광학적 분석법(optical method)으로 분류된다. BC는 근-자외선에서 근-적외선 파장까지(400~900 nm)의 태양 복사에너지를 흡수하지만, 파장 의존성이 약하며(wavelength-independent), 주로 화석연료 및 바이오매스의 불완전 연소를 통해 배출된다(Park *et al.*, 2020; Laskin *et al.*, 2015). 반면에, BrC는 주로 자외선에서 근-자외선 파장까지(300~400 nm) 태양 복사를 흡수하고 강한 파장 의존성을 가지며(Wang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020), 바이오매스 연소와 화석연료 연소(자동차와 선박)에서 배출되거나 휘발성 유기화합물의 대기 중 2차 산화 과정에 의해서도 생성된다(Soleimanian *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019). BC는 태양 복사를 직접 흡수하거나 다른 에어로졸과의 혼합을 통해 대기 가열 속도를 증가시켜 지구 기후에 영향을 준다(Highwood and Kinnersley, 2006). BrC는 근-자외선 파장에서 탄소질 에어로졸에 의한 총 광흡수의 약 10~15%, 550 nm 파장에서 약 10% (Washenfelder *et al.*, 2015; Bahadur *et al.*, 2012; Lack *et al.*, 2012), 370 nm에서 총 광흡수의 50% 이상을 기여할 수 있는 것으로 알려졌다.

며(Favez *et al.*, 2009), BC와 마찬가지로 지구 복사 강제력에 영향을 미친다(Laskin *et al.*, 2015). 여러 연구자들에 의하면, 자외선 파장범위에서 BrC 입자에 의한 복사강제력은 +0.11~+0.57 Wm⁻²로 추정되었으나 여전히 큰 불확도를 가진다(Saleh *et al.*, 2015; Lin *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2013).

국내에서 항만지역을 대상으로 수행한 이전의 연구를 살펴보면 주로 입자상 물질 및 가스상 물질의 특성을 분석했다. 예를 들면 Lee *et al.* (2020)이 부산신항에서 PM_{2.5}를 채취하여 조건확률함수(Conditional probability functions) 분석을 수행한 결과에 의하면 측정 지점의 PM_{2.5}는 항만지역 오염원의 영향을 크게 받은 것으로 조사되었다. Han *et al.* (2011)이 인천항의 항만시설에서 배출되는 HC, CO, NOx, PM₁₀ 및 SO₂의 배출량 산정 결과 각 오염물질은 인천시 배출량의 0.4%, 1.1%, 7.5%, 12.5%, 23.0%를 차지하였다. 그리고 에어로졸 입자의 광흡수 특성에 관한 연구는 주로 도심지점 또는 준도심 지역을 대상으로 연구되었으며(Park *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2018a), 항만지역의 경우는 매우 제한적이었다(Yu *et al.*, 2019, 2018b).

본 연구에서는 도시지역과 항만지역에 존재하는 PM_{2.5}의 화학적 및 광학적 특성에 대한 분석을 종합적으로 수행하였다. 이를 위하여 광주광역시의 한 도심지점과 강릉시에 있는 강릉항(항만지점) 두 지점에서 2021년 4월 1일부터 23일까지 PM_{2.5}를 채취하여 PM_{2.5}를 구성하는 탄소 성분, 이온 성분 및 감쇄전반사 FTIR (attenuated total reflection - fourier transform infrared spectroscopy, ATR-FTIR) 분석을 통하여 화학성분들의 특성을 조사했다. 그리고 두 지점의 초순수 및 메탄올 추출 BrC의 광학적 특성을 분석하였다. 항만지점의 경우는 추가로 aethalometer를 이용하여 1분 단위의 에어로졸 입자의 광흡수 계수를 측정하여 선박 배출의 영향을 조사하였다. 최종적으로 도심지점과 항만지점의 PM_{2.5}의 특성의 비교를 통하여 항만지역에서 활동하는 선박들에서 배출되는 에어로졸 입자의 특성을 분석하는 데 유용한 정보를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 $PM_{2.5}$ 채취

도심지점의 $PM_{2.5}$ 는 광주광역시의 전남대학교 한 건물 3층 옥상에서 2021년 4월 1일부터 4월 23일까지 저용량 샘플러(PMS-204, APM Engineering, Korea, 16.7 L/min) 1대와 고용량 샘플러(TE-6070, TISCH Environmental, USA, 1.13 m³/min) 1대를 이용하여 오전 9시에서 익일 오전 9시까지 24시간 간격으로 채취하였다. 저용량 샘플러와 고용량 샘플러는 각각 테플론 필터(Teflo™, 2 μm pore size, Pall, USA)와 20.3 cm × 25.4 cm 크기의 석영 필터(Quartz microfiber filters, Whatman, USA)를 사용했다. 채취 지점은 서쪽 약 150 m 지점에 왕복 4차선 도로가 위치하며, 출·퇴근 시간에 교통량이 일시적으로 증가하는 양상을 보인다. 또한, 북쪽 약 650 m 지점에 호남고속도로가 위치하며 북동쪽 약 1.9 km 지점에는 호남고속도로 나들목과 순천 및 담양 분기점이 존재하여 교통의 영향을 많이 받는 지점이다.

항만지점의 $PM_{2.5}$ 는 강릉항에서 약 250 m 떨어진 2층 건물 옥상에서 도심지점과 같은 기간 동안 석영 필터(Pallflex Tissuquartz 2500 QAO, Whatman, USA)를 사용한 저용량 샘플러(PMS-104, APM Engineering, Korea, 16.7 L/min) 1대와 20.3 cm × 25.4 cm 크기의 석영 필터(Quartz microfiber filters, Whatman, USA)를 이용한 고용량 샘플러(TE-6070, TISCH Environmental, USA, 1.13 m³/min) 1대로 각각 12시간 (09:00~21:00과 21:00~09:00)과 24시간 (09:00~09:00) 간격으로 채취하였다. 또한, dual-spot 7파장 aethalometer를 설치하여 $PM_{2.5}$ 에어로졸 입자의 광흡수 계수를 1분 간격으로 측정하였다. Aethalometer의 측정 원리는 기존 연구 논문들에 상세히 기술되어 있다(Park *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2019, 2018a, 2018b). 시료 채취 지점은 출·퇴근 시간에 자동차 통행량이 거의 없는 지점이며 채취 지점에 대한 설명은 기존의 논문에 상세히 기술되어 있다(Yu *et al.*, 2019, 2018b). 시료 채취 지점으로부터 약 10 m 떨어진 곳에

어업 활동을 하는 소형 및 중형 어선이 정박해 있다. 연구 기간에 어선들의 출항은 새벽 2~3시부터 시작하여 아침 6~7시에 가장 많았으며, 입항은 아침 6~7시에 시작하여 오후 2~3시에 최대로 이루어졌다. 그리고 북서쪽으로 약 200 m 부근에 강릉항 여객터미널과 요트장이 위치하여 선박과 여객선의 운항이 잦은 곳이다.

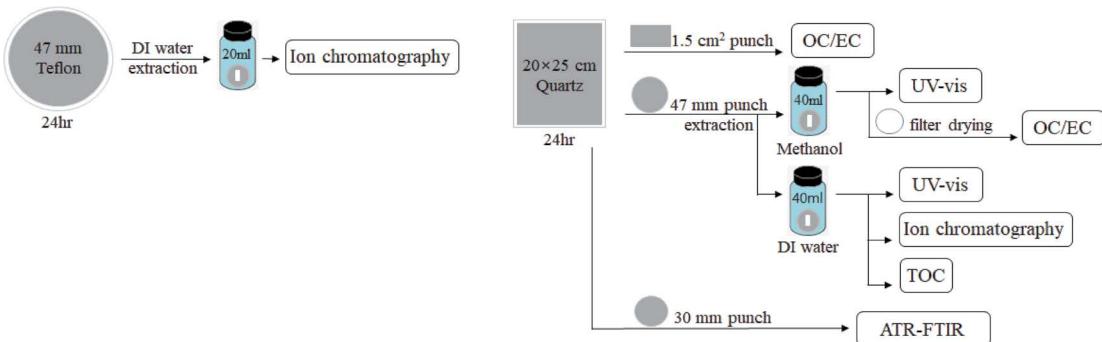
두 지점에서 사용한 저용량 샘플러의 석영 및 테플론 필터는 시료 채취 전·후에 항온·항습 데시케이터에 넣고 24시간 동안 보관한 후 마이크로밸런스(CP2P-F, Satorius, Germany)로 칭량하여 시료 채취 전·후의 무게 차를 이용하여 $PM_{2.5}$ 의 질량농도를 결정하였다.

2.2 탄소 성분 및 이온 성분 분석

그림 1은 두 지점에서 채취한 $PM_{2.5}$ 의 화학적 성분 및 광흡수 특성의 분석 방법을 보여주는 개략도이다. 두 지점의 OC 및 EC는 석영 필터를 1.5 cm² 크기로 잘라 NIOSH Method 5040 (NIOSH, National Occupational Safety and Health) 온도 프로토콜 기반의 열-광학 투과법을 이용하는 OC/EC 분석기(OC/EC Carbon Aerosol Analyzer, Sunset Laboratory, USA)로 정량화하였다. 수용성 유기탄소(water soluble organic carbon, WSOC)는 도심지점과 항만지점의 24시간 간격 시료의 경우 OC 및 EC 분석 후 남은 석영 필터를 초순수 40 mL와 함께 초음파 추출한 후 추출액을 0.20 μm 기공 크기의 실린지 필터로 여과시켜 총 유기탄소(total organic carbon, TOC) 분석기(TOC-LCPH, SHIMADZU, Japan)로 분석하였다. 항만지점의 12시간 간격 시료는 OC와 EC를 분석하고 남은 석영 필터를 20 mL 초순수를 이용하여 추출하였으며, 이후 과정은 24시간 기준 시료와 동일하다.

도심지점의 이온 성분은 테플론 필터에 초순수 20 mL를 넣고 초음파 추출하여 0.20 μm의 시린지 필터로 여과시킨 후 이온크로마토그래피(930 Compact IC Flex, Metrohm AG, Switzerland)를 사용하여 8종의 이온 성분(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- 및

(a) Urban



(b) Port

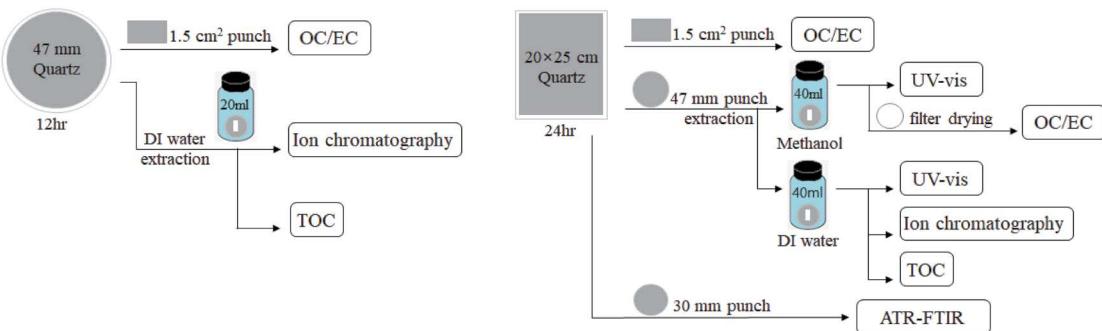


Fig. 1. Schematic diagram of chemical, light absorption, and FTIR analyses of PM_{2.5} collected at an urban site (a) and port site (b).

SO₄²⁻)을 분석하였다. 항만지점의 12시간 및 24시간 간격 시료는 각각 WSOC를 분석하고 남은 추출액을 이용하였으며, 사용한 분석기와 분석 성분은 도심지점과 동일하다.

2.3 초순수 및 메탄올 추출액의 흡흡수 평가

도심지점 및 항만지점의 24시간 기준 에어로졸 입자의 흡흡수를 평가하기 위하여 두 지점의 고용량 샘플러에서 사용한 석영 필터를 47 mm 직경으로 자른 후 초순수와 메탄올로 추출하여 분석하였다(그림 1 참조). 초순수 추출액의 흡광도 측정은 WSOC 및 이온 성분을 분석하고 남은 시료를 사용하였으며, 메탄올 추출액은 두 지점의 고용량 샘플러로 채취한 석영 필터를 직경 47 mm 크기로 자른 후 40 mL 메탄올로 추출하였다. 메탄올 용매의 경우 추출 도중 온도 상승으로 인한 휘발성 유기탄소의 손실을 최소화하기 위

하여 초음파기의 수조를 얼음물로 채웠다. 그리고 추출액은 0.20 μm 시린지 필터로 불용성 성분을 제거하였다. 초순수(수용성 BrC) 및 메탄올(수용성 + 불용성 BrC)의 흡광도는 250~700 nm 파장에서 10 nm 간격으로 UV-Vis 분광광도계(GENESYS 10S series, Thermo Scientific, USA)를 사용하여 측정하였다. 또한, 365 nm 단일파장에서 흡광도를 분석하여 365 nm 파장에서 BrC의 질량흡수효율(mass absorption efficiency, MAE₃₆₅)을 평가하였다. 측정된 흡광도는 동일한 부피의 용매별로 추출한 공 필터의 스펙트럼으로 보정하였다. 초순수 및 메탄올 추출의 유기물질의 질량흡수효율(MAE)은 식 (1)에 의하여 산정하였다(Park and Yu, 2016).

$$MAE(m^2/g) = \frac{A}{C \times L} \times \ln(10) \quad (1)$$

여기서, A는 분광광도계 365 nm 파장에서 측정한 흡광도이다. C는 용액 내 초순수 및 메탄을 추출 유기물질의 농도(μg/mL)로 초순수 추출액의 경우는 앞에서 분석한 WSOC의 농도를 이용하였다. 메탄을 추출액의 농도(methanol-extracted OC, MSOC)는 메탄을로 추출하고 남은 석영 필터를 24시간 동안 건조한 후 OC/EC 분석기로 분석한 OC 농도(a, 그림 1 참조)와 PM_{2.5}의 OC 농도(b)로부터 결정하였다(MSOC = b - c). 메탄을 추출액의 유기물질 농도를 TOC 분석기를 이용하여 직접적으로 분석하지 않은 이유는 메탄을 용매에 포함된 탄소 성분의 간섭 현상을 최대한 줄이기 위해서이다. 그리고 L은 흡수 셀의 흡수경로 길이를 의미한다. 두 추출액의 파장 의존성은 파장과 흡광도 사이의 관계를 이용하여 얻은 흡수옹스트롱지수(absorption Ångström exponent, AAE)로 평가하며, AAE는 식 (2)를 이용하여 산정한다.

$$AAE = \frac{-\ln(Abs(\lambda_1)/Abs(\lambda_2))}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (2)$$

식(2)에서 λ_1 과 λ_2 는 파장 범위인 두 개의 기준 파장을 의미하며, Abs(λ)는 파장 λ 에서의 초순수 및 메탄을 추출액의 광흡수 계수이다.

2.4 Aethalometer를 이용한 PM_{2.5}의 광흡수 계수 평가

대기 에어로졸 입자의 전체 광 흡수는 블랙카본(BC), 갈색탄소(BrC) 및 무기 먼지(mineral dust) 성분에 의해 일어나며, 각 성분이 흡수하는 파장 범위가 다르다는 것을 이용하여 광 흡수 기여도를 분리한다. 항만지점 측정 PM_{2.5}의 광흡수 계수의 측정은 dual-spot 7파장 aethalometer (AE33, Aerosol d.o.o., Slovenia)를 사용하여 1분 단위로 실시간 측정이 이루어졌다. 에어로졸 입자의 전체 광흡수 계수는 무기성분에 의한 영향을 무시하면 BC와 BrC의 광흡수 계수의 합으로 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Abs_{\lambda} = BC_{\lambda} + BrC_{\lambda} \quad (3)$$

식 (3)에서 880 및 950 nm의 파장에서 에어로졸 입자

에 의한 광흡수는 BC 성분에 의해서만 일어난다고 가정하고 이를 기반으로 880 nm 이하 파장의 BC 광흡수 계수를 식 (4)를 이용하여 산정하였다(Yu *et al.*, 2019, 2018b).

$$BC_{\lambda} = \left(\frac{Abs_{880nm} + Abs_{950nm}}{2} \right) \times \left(\frac{\lambda}{\frac{880+950}{2}} \right)^{-AAE_{BC}} \quad (4)$$

여기서 BC 입자의 흡수옹스트롱지수(AAE_{BC})는 1.0으로 가정하였다(Laskin *et al.*, 2015).

2.5 ATR-FTIR 분석

도심지점 및 항만지점의 ATR-FTIR 분석은 FTIR(FT-IR/NIR Spectrometer Frontier, PerkinElmer, USA)을 이용하였다. 분석에 사용한 필터는 고용량 샘플러를 이용하여 채취한 석영 필터로 수분을 충분히 제거한 후 Diamond/KRS-5 결정 평판에 필터를 올린 후 deuterated triglycine sulfate (DTGS) detector를 사용하여 분석하였다. FTIR 내부에 설치된 beam splitter의 재질 및 광원은 각각 KBr과 Air cooled Ceramic이며, 4,000~450 cm⁻¹ 측정 파장과 4 cm⁻¹ 해상도로 설정하여 분석을 수행하였다. 측정기와 연결된 Perkin Elmer Spectrum 프로그램에서 출력한 각 시료의 스펙트럼의 투과율은 정규화를 한 후 분석에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연구 기간 중 기상 요인과 PM_{2.5}의 화학적 성분들의 변화

그림 2는 도심지점과 항만지점에서 24시간 기준으로 측정한 PM_{2.5}의 OC, EC, 그리고 2차 이온 성분들(NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+) 농도 변화를 보여준다. 또한 연구 기간에 두 지역의 풍속, 온도 및 상대습도(RH)를 나타내었다. 표 1에 두 지점에서 측정한 OC, EC, WSOC, MSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 의 평균 농도와 범위, 그리고 광흡수 성질들의 평균과 범위를 정리하였

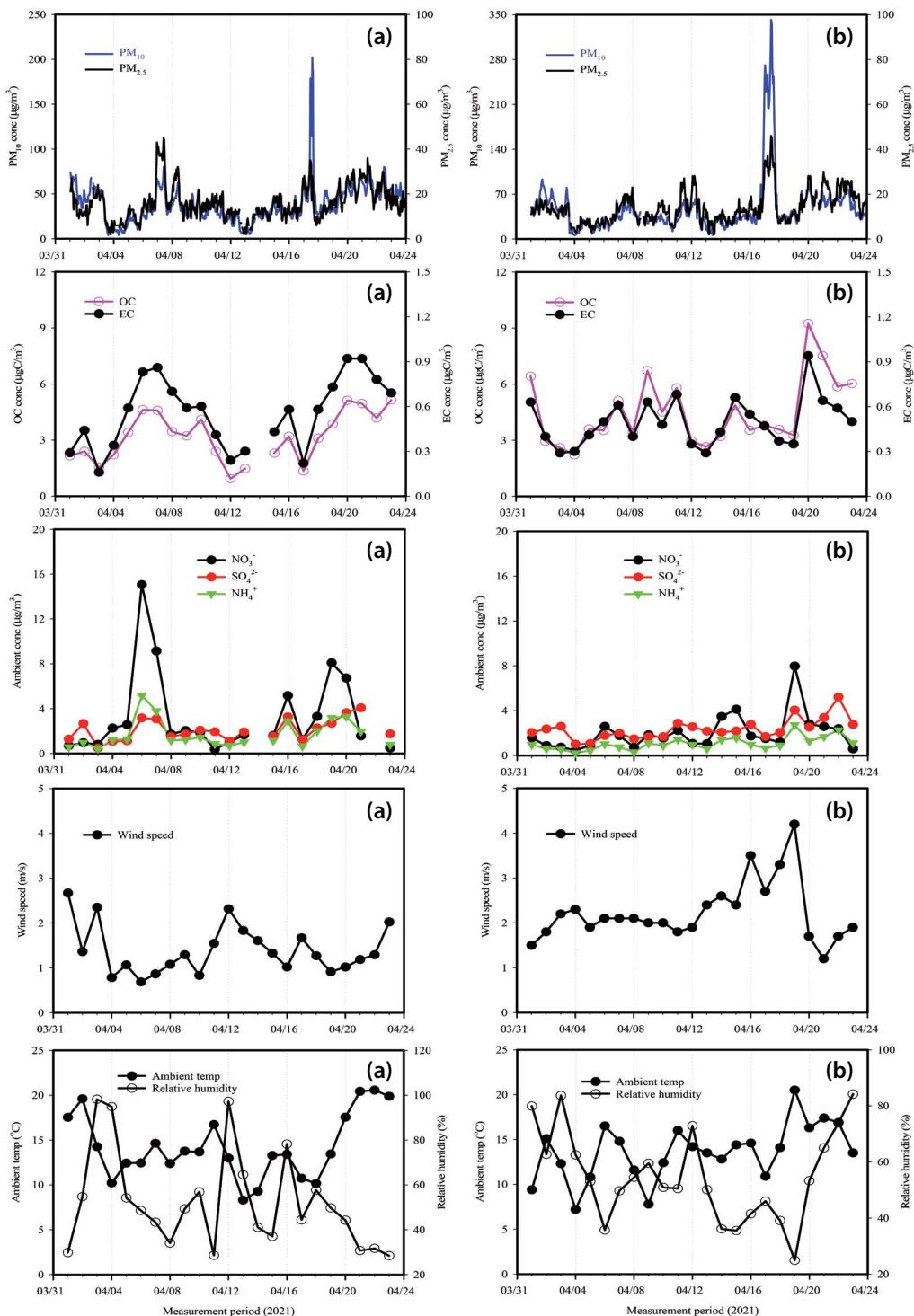


Fig. 2. Temporal variations of PM₁₀, PM_{2.5}, OC, EC, NO₃⁻, SO₄²⁻, and NH₄⁺ concentrations, and meteorological parameters at an urban site (a) (left-hand side) and a port site (b) (right-hand side) during spring 2021.

Table 1. A summary of carbonaceous species concentration and light absorption properties in PM_{2.5} measured at an urban site (Gwangju) and a port site (Gangneung).

| Item | Unit | Urban site | | Port site | |
|-------------------------------|--------------------|---------------|-----------|---------------|-----------|
| | | Average ± std | Range | Average ± std | Range |
| OC | µgC/m ³ | 3.2 ± 1.3 | 0.9~5.1 | 4.5 ± 1.8 | 2.2~9.2 |
| EC | µgC/m ³ | 0.55 ± 0.24 | 0.16~0.92 | 0.50 ± 0.16 | 0.29~0.94 |
| WSOC | µgC/m ³ | 1.9 ± 0.9 | 0.5~3.4 | 2.3 ± 1.2 | 0.7~5.0 |
| MSOC | µgC/m ³ | 3.0 ± 1.2 | 0.8~4.9 | 4.3 ± 1.8 | 2.1~8.8 |
| NO ₃ ⁻ | µg/m ³ | 3.3 ± 3.7 | 0.4~15.1 | 2.0 ± 1.6 | 0.5~8.0 |
| SO ₄ ²⁻ | µg/m ³ | 2.1 ± 1.0 | 0.5~4.1 | 2.4 ± 0.9 | 1.0~5.2 |
| NH ₄ ⁺ | µg/m ³ | 1.7 ± 1.3 | 0.4~5.2 | 1.1 ± 0.6 | 0.2~2.7 |
| Abs _{365,WSOC} | Mm ⁻¹ | 1.2 ± 0.5 | 0.3~2.0 | 1.8 ± 0.8 | 0.7~3.5 |
| Abs _{365,MSOC} | Mm ⁻¹ | 2.2 ± 1.0 | 0.7~3.9 | 2.9 ± 1.5 | 1.2~6.5 |
| AAE ₃₃₀₋₄₀₀ (WSOC) | - | 4.8 ± 0.9 | 2.7~6.3 | 5.2 ± 0.9 | 2.7~6.6 |
| AAE ₃₃₀₋₄₀₀ (MSOC) | - | 4.7 ± 0.9 | 2.5~6.1 | 5.5 ± 0.9 | 3.4~6.7 |
| MAE ₃₆₅ (WSOC) | m ² /g | 0.7 ± 0.2 | 0.5~1.0 | 0.8 ± 0.2 | 0.5~1.1 |
| MAE ₃₆₅ (MSOC) | m ² /g | 0.8 ± 0.2 | 0.5~1.2 | 0.6 ± 0.2 | 0.3~0.9 |

다. 그림 2의 농도 추이를 보면 두 지점의 탄소 성분과 2차 이온 성분들의 거동 특성이 상당히 달랐다. 차량 통행이 많은 도심의 측정 지점에서는 항만지점보다 NO₃⁻ 입자의 농도가 높았지만, 도심지점과 달리 차량 운행이 적은 항만지점에서는 특이하게 OC 농도가 높게 나타났다. 좀 더 구체적으로는 탄소 성분 중 OC 농도는 항만지점이 높았지만, EC 농도는 도심지점에서 약간 높게 나타났다(표 1). 그림 2에서 4월 11일, 20일 및 21일의 항만지점의 OC 농도는 각각 5.8, 9.2, 7.5 µgC/m³지만, 도심지점의 이들의 농도는 각각 2.4, 5.1, 5.0 µgC/m³이었다. 2차 이온 성분 중 NO₃⁻와 NH₄⁺의 농도는 도심지점에서 높았지만, SO₄²⁻의 농도는 항만지점에서 약간 높았다(표 1). 도심지점에서 NO₃⁻와 탄소 성분들의 농도 증가 현상은 약한 풍속 조건과 밀접하게 관련되어 있었다. 예를 들어, 4월 6일, 7일, 19일, 20일, 그리고 21일에 측정된 NO₃⁻와 OC와 EC의 농도 증가는 매우 낮은 풍속 (<1.0 m/s)에서 나타났다. 이는 자동차 배기ガ스를 통해 배출된 탄소 성분과 질소산화물이 원활하지 못한 대기화산 조건에서 축적되고 2차 NO₃⁻로의 생성을 증가시켜 나타난 현상이다. 도심지점에서 4월 6일, 7일, 19일, 그리고 20일에 측정된 NO₃⁻의 농도는 각각 15.1, 9.2, 8.1, 6.7 µg/m³

이었으며, 풍속은 0.7, 0.9, 0.9, 1.0 m/s이었다. 그러나 비교적 낮은 기온과 낮은 RH 조건에서 질산염의 농도 증가가 확인되었다. 그러나 항만지점에서는 이들의 농도 증가와 풍속의 감소 현상이 일치하지 않았다(그림 2 참조). 이는 아마도 2차 이온 성분들이 측정 지점 주변에서 배출된 기체상 전구물질들의 화학반응에 의해 생성된 것이 아니라 외부에서 유입되었기 때문으로 추정한다. 두 지점의 탄소 입자의 배출 특성을 조사하기 위하여 EC와 OC 농도 사이의 선형회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과에 의하면 두 지점 모두 EC와 OC 농도 사이에 매우 높은 상관성을 보여주었으나, OC/EC의 기울기는 약 2배 차이가 났다; 도심지점의 경우는 $OC = 5.24EC + 0.26$, $R^2 = 0.90$ 인 반면에 항만지점의 경우는 $OC = 10.40EC - 0.67$, $R^2 = 0.82$ 이었다. 두 지점 모두 탄소 디누더 없이 탄소 입자 채취가 이루어져 샘플링 중 준-휘발성 유기성분(semi-volatile organic species)의 흡착에 의해 발생할 수 있는 OC 입자의 과대평가가 존재하더라도 항만지점의 OC/EC의 비가 매우 높은 점을 고려하면 자동차 배기 가스 외에 다른 유기물질의 배출원이 존재했을 것으로 추정할 수 있다.

3.2 분광학적 방법을 이용한 PM_{2.5} 화학적 특성

봄철 두 지점에서 측정한 PM_{2.5}의 분광학적 방법에 의한 화학적 특성의 차이를 조사하기 위해 각 지점에서 총 12개의 시료(4월 4일, 5일, 6일, 7일, 11일, 16일, 17일, 18일, 19일, 20일, 21일, 22일)에 대해서 ATR-FTIR 분석을 수행하였다. 이 중에서 3.1절에서 언급한 두 지점의 화학적 특성의 차이가 명확한 4월 6일, 11일, 16일, 20일, 21일의 분석결과를 그림 3(a)~(e)에 나타내었다. 그림 3의 FTIR 분석 결과에 의하면 측정 일 및 지점별로 다른 화학적 특성을 보였다.

4월 6일은 광주 도심지점에서 NO₃⁻의 농도가 가장 높게 관측된 날로 강릉 항만지점(2.6 μg/m³)보다 매우 높았다. 4월 6일에 광주에서 나타난 피크 중 3,235, 3,050 및 1,425~1,420 cm⁻¹ 파장은 NH₄⁺ 성분을 나타내며(Anil *et al.*, 2014; Maria *et al.*, 2003), 강릉보다 훨씬 큰 흡수능을 보여준다(그림 3(a)). 2,910 및 2,850 cm⁻¹의 파장은 methylene group (-CH₂-)의 C-H 사슬로(Zhang *et al.*, 2020; Corrigan *et al.*, 2013; Hawkins *et al.*, 2010) 바이오매스 연소의 영향에 의한 것으로 알려져 있다(Medeiros *et al.*, 2006; Simoneit *et al.*, 2004). 1,715 cm⁻¹ 파장에서 보인 피크는 ketones, aldehydes 및 carboxylic acid와 같은 carbonyl group (C=O)으로(Shaka' and Saliba, 2004; Allen *et al.*, 1994), 이들은 도시지역의 차량 배출 등의 인위적 오염원에 의한 것으로 알려져 있다(Varrica *et al.*, 2019; Mohiuddin *et al.*, 2016). 1,632 cm⁻¹은 carbonyl group의 신축 진동(v(C=O))으로 인한 피크이다(Kowalcuk and Pitucha, 2019). 이들 파장에서 보인 스펙트럼의 흡수능 역시 강릉보다는 광주에서 높게 나타났는데, 이것은 4월 6일에 광주지역에서 측정된 높은 OC와 EC 농도에 기인하였다. 1,340~1,331 cm⁻¹ 파장은 NO₃⁻ 성분을 나타내며(Maria *et al.*, 2003; Allen *et al.*, 1994), 이날 광주에서 측정된 훨씬 높은 NO₃⁻ 농도 때문에 강릉보다 광주에서 훨씬 큰 흡수능을 보여주었다. 612 cm⁻¹ 파장에서 나타난 피크는 (NH₄)₂SO₄에 의한 SO₄²⁻이다(Maria *et al.*, 2003; Allen *et al.*, 1994). 강릉 항만지점의 경우, 특이하게 광주에서 나타난

NH₄⁺, C-H, C=O 및 NO₃⁻ 외에도 추가적인 피크들이 보였다; 3,525와 3,404 cm⁻¹의 파장은 CaSO₄·2H₂O로 구성된 석고에서 나타나는 피크를 의미하며(Morillas *et al.*, 2015; Maria *et al.*, 2003), 1,620 cm⁻¹은 H₂O을 의미한다(Varrica *et al.*, 2019). 그리고 700 cm⁻¹와 671 cm⁻¹ 파장의 피크는 각각 SO₃²⁻와 CaSO₄이다(Tsai and Kuo, 2006). 4월 6일에 관측된 파장별 스펙트럼은 두 지점 PM_{2.5}의 화학적 특성의 차이를 명확히 보여주었다.

4월 11일에 관측된 스펙트럼(그림 3(b))에서는, 광주 도심지점은 NH₄⁺, C-H, C=O, v(C=O) 및 SO₄²⁻의 피크가 보였으나, 강릉 항만지점에서는 NH₄⁺, C-H, C=O, amine (NH₂), 그리고 SO₄²⁻의 피트가 나타났다. 항만지점에서만 관측된 amine (NH₂)은 3,400 과 1,635 cm⁻¹의 파장에서 나타났는데(Dokmaisrijan *et al.*, 2010; Gilardoni *et al.*, 2009, 2007; Coury and Dillner, 2008), 이것은 항만지점이 바다 옆에 위치하였기 때문일 것이다. Hawkins *et al.* (2010)에 의하면 amine의 유기물질 기여율은 해양 기원(8%)이 연료 연소에 의한 기원(3%)보다 높은 것으로 보고하였다. Frossard *et al.* (2014)이 5개 해양 지역에서 수행한 연구를 살펴보면, 해양 대기 에어로졸 입자를 구성하는 유기화합물 작용기 중 6%가 amine이었으며, 이는 해양 다당류, 아미노당, 키토산 및 글루코사민 성분들에 의한 것으로 보고하였다. 또한, 일차 해양 에어로졸 입자에서는 탄화수소화합물 작용기 중 amine이 13%의 기여율을 차지한다. Amine의 피크는 4월 11일 외에도 본 논문에 나타내지 않았지만 4월 4일, 5일, 그리고 7일에도 존재하였다.

4월 16일은 강릉지역에서 나타난 황사의 영향을 잘 보여주는 스펙트류이다. 그림 2를 보면 강릉에서 황사가 관측된 날은 4월 16일 22시 (PM₁₀=126 μg/m³)부터 17일 18시 (PM₁₀=117 μg/m³)까지였다. 이 기간 중 PM₁₀의 최고농도는 4월 17일 11시에 관측되었으며, 342 μg/m³에 이르렀다. 반면에 광주에서는 황사가 16일에 관측되지 않았으나, 17일 11시~15시 (PM₁₀=110~200 μg/m³)에 관측된 후 소멸되었다. 따라서 두

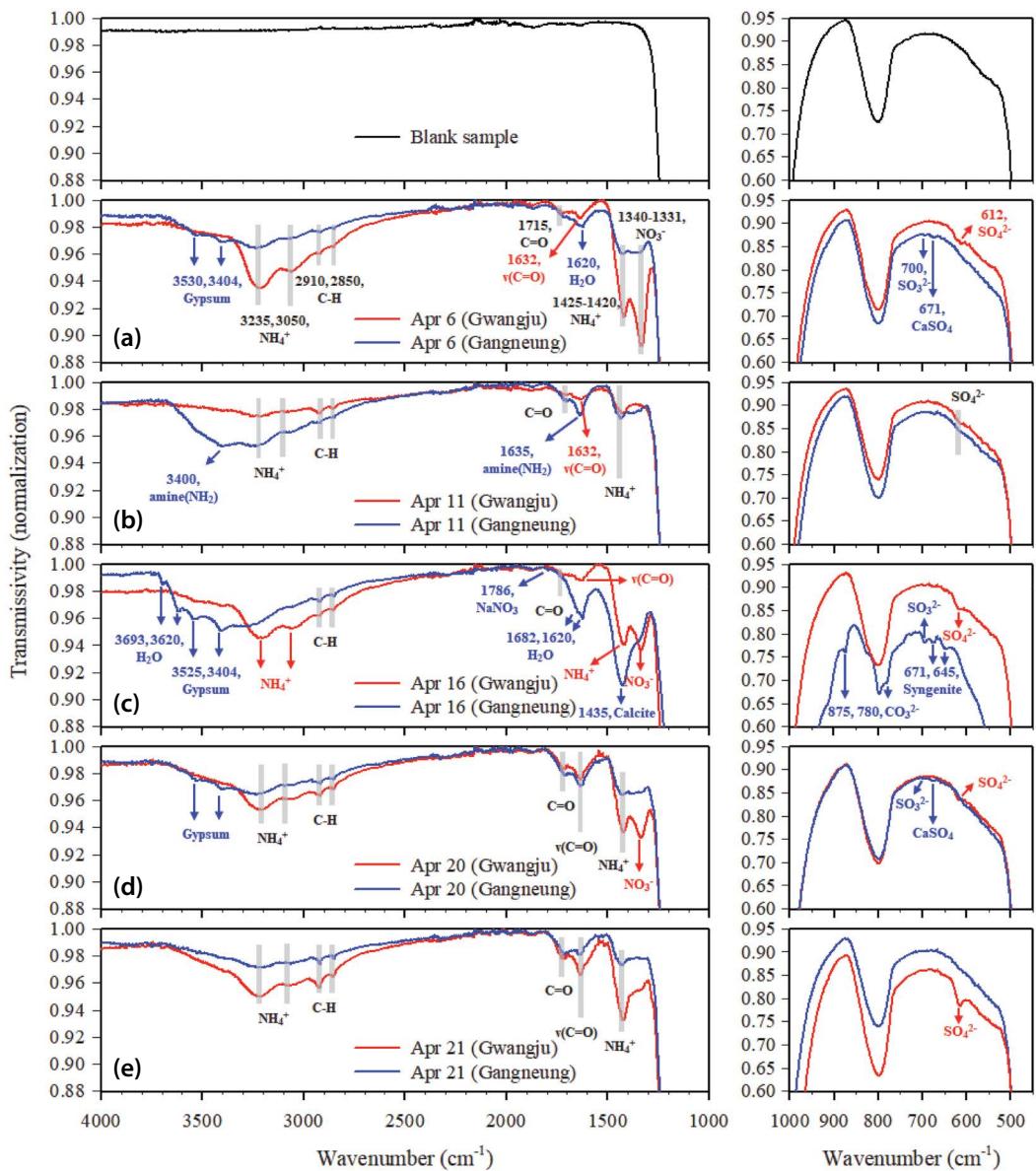


Fig. 3. ATR-FTIR spectra of PM_{2.5} samples collected on (a) April 6, (b) April 11, (c) April 16, (d) April 20, and (e) April 21. Black line indicates spectra for blank quartz filter. Red and blue lines indicate Gwangju and Gangneung, respectively.

지점의 황사에 의한 차이를 보여주기 위하여 4월 16일의 스펙트럼을 그림 3(c)에 나타내었다. 광주의 ATR-FTIR 분석 결과는 NH₄⁺, C-H, C=O, v(C=O), NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 피크가 나타났다. 반면에, 강릉은 황사의 영향으로 발생한 토양 기원 입자들로 추정되는

성분들의 존재가 뚜렷하게 나타나고 있으나, 광주에서는 보이지 않았다. 강릉에서 나타난 3,693, 3,620, 1,682, 그리고 1,620 cm⁻¹의 피크는 H₂O로 (Varrica *et al.*, 2019) 3,693과 3,620 cm⁻¹는 점토 광물에 존재하는 -OH 그룹과 연관이 있는 것으로 알려져 있다 (Varrica

et al., 2019). 또한 3,525와 3,404 cm⁻¹ 파장에서의 석고와 1,786 cm⁻¹ 파장에서의 NaNO₃ (Allen *et al.*, 1994)도 나타났다. NaNO₃의 경우는 해양 에어로졸인 NaCl과 HNO₃의 반응에 의하여 형성되는데 (Dasgupta *et al.*, 2007), 황사의 영향을 받은 4월 16일과 17에만 관측되었다. 1,435 cm⁻¹의 파장은 CaCO₃로 구성된 방해석의 존재를 나타낸다 (Zhu *et al.*, 2021; Siciliano *et al.*, 2018). 1,435 cm⁻¹의 파장은 NH₄⁺로 해석할 수 있으나, 일반적으로 NH₄⁺ 성분은 3,235와 3,050 cm⁻¹의 파장이 동시에 나타나야 존재하는 것으로 알려져 있다. 하지만, ATR-FTIR 분석 결과에 의하면 3,235와 3,050 cm⁻¹의 파장이 나타나지 않았다. 또한, 4월 16일 강릉에서 NH₄⁺의 농도는 0.96 µg/m³으로 낮아서 1,435 cm⁻¹의 파장을 방해석으로 판단하였다. 그리고 875와 780 cm⁻¹의 피크는 CO₃²⁻로 이태리에서 모래 폭풍 기간에 측정한 PM_{2.5} 분석 결과에서도 동일한 피크가 나타났다 (Varrica *et al.*, 2019). 700과 671 cm⁻¹에서 보인 각각의 피크는 SO₃²⁻와 CaSO₄ (Tsai and Kuo, 2006)로 645 cm⁻¹의 피크와 함께 광물 종류인 싱게나이트 (syngenite)에서 나타나는 것으로 알려져 있다 (Morillas *et al.*, 2015).

4월 20일에 두 지점에서 측정된 시료들의 ATR-FTIR 스펙트럼은 4월 6일에 분석된 스펙트럼과 유사하였다 (그림 3(d)). 도심지점은 NH₄⁺, C-H, C=O, v(C=O), NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 피크가 존재하였으며, 항만지점은 석고 (gypsum), NH₄⁺, C-H, C=O, v(C=O), SO₃²⁻, 그리고 CaSO₄의 피크가 나타났다. 무기 이온 성분들의 경우는 이들의 농도 수준과 비슷하게 도심지점에서 확실하게 큰 흡수능을 보였으나, 유기물질의 경우는 OC의 농도가 항만지점 (9.2 µgC/m³)이 도심지점 (5.1 µgC/m³)보다 높게 측정되었음에도 파장별 흡수능 (C=O, v(C=O))의 차이가 크지 않았다. 이러한 원인은 아마도 OC를 구성하는 화학적 작용기 성분들의 차이에 의한 것으로 추정된다. 앞서 언급한 도심지점이 항만지점보다 자동차 배기ガ스에 의한 영향이 더 크다는 점을 고려하면, 이는 광주 도심지점의 OC 농도가 강릉 항만지점보다 낮더라도 차량 배출에 의

하여 나타나는 C=O의 흡수능의 크기는 두 지점이 비슷하게 나타난 것으로 추정된다. 즉, 탄소 성분의 농도는 다르더라도 OC가 배출된 주 오염원의 종류에 따라서 나타나는 피크의 크기가 다른 것을 확인할 수 있다. 4월 21일에는 광주와 강릉에서 모두 NH₄⁺, C-H, C=O, v(C=O)의 피크가 존재하였으며, 특이하게 광주에서만 SO₄²⁻의 피크가 나타났다 (그림 3(e)). 정리하면, 두 지점에서 채취한 시료들의 ATR-FTIR의 스펙트럼 분석 결과에 의하면 두 지점에서 측정된 PM_{2.5}의 화학적 특성의 차이를 명확하게 보여주었다. 결론적으로 도심지점인 광주에서는 강릉과 비교해 카르보닐 그룹들 (C=O와 v(C=O))이 더 자주 검출되었으며, 특히, 4월 20일과 21일에 v(C=O)의 피크가 매우 강하게 나타났다. 강릉지점의 경우에는 황사의 영향이 존재하지 않았던 4월 6일과 20일에도 석고, SO₃²⁻, 그리고 CaSO₄의 피크가 확인되었다. 이러한 결과는 강릉의 시료 채취 지점 인근에 존재하는 백사장의 영향으로 추정된다.

3.3 두 지점 PM_{2.5}의 광흡수 특성 차이

그림 4는 두 지점의 초순수 (water-extracted, WSOC)와 메탄올 (MeOH-extracted, MSOC) 추출 용액의 평균 흡수 스펙트럼을 보여준다. WSOC와 MSOC의 평균 농도는 도시지점보다 항만지점에서 높게 나타났다 (표 1). 도심지점과 항만지점에서 WSOC와 MSOC의 농도는 OC 농도의 57% (42~72%) (WSOC vs. OC, R²=0.93)와 91% (76~99%) (MSOC vs. OC, R²=0.98), 49% (26~70%) (WSOC vs. OC, R²=0.89)와 95% (0.86~0.99) (MSOC vs. OC, R²=0.99)를 차지하였다. 그림 4를 보면 도심지점과 항만지점 모두 에어로졸 입자의 광흡수는 전형적인 갈색탄소 (brown carbon, BrC) 입자의 광흡수 특성을 보여주고 있다. 즉, 파장이 근-자외선 (~300 nm)까지 감소함에 따라 에어로졸 입자의 광흡수는 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 반면에, 파장이 근-적외선 이상으로 증가함에 따라 광흡수는 거의 일어나지 않았다. 초순수 및 MeOH 추출액의 광흡수 계수는 평균적으로 차량 배기ガ스의

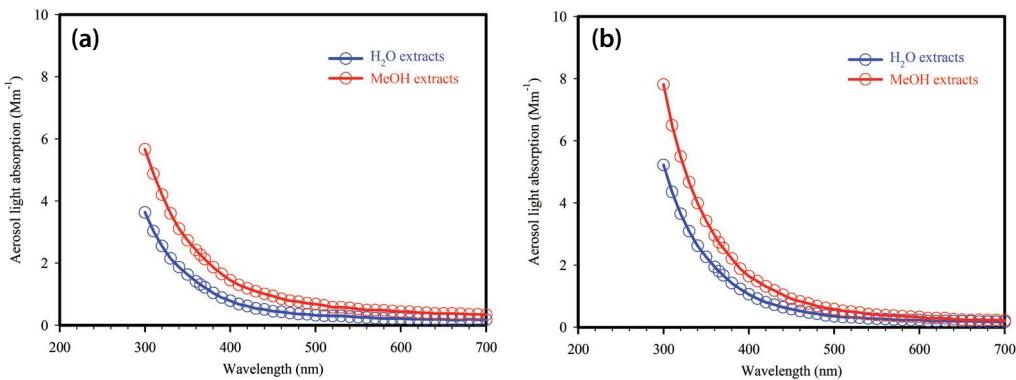


Fig. 4. Spectral dependence of water- and MeOH extracted samples at an urban site (a) and a port site (b).

영향이 미미한 항만지점에서 도심지점보다 높게 측정이 되었다. 365 nm의 파장을 기준으로 도심지점에서 초순수와 MeOH 추출액의 광흡수 계수는 각각 1.3과 2.3 Mm⁻¹로 항만지점에서 이들의 광흡수 계수의 약 73%와 83%에 해당하였다. MeOH 추출액이 초순수 추출액보다 광흡수가 높은 이유는 MeOH 용매가 수용성 유기물질뿐만 아니라 바이오매스와 화석연료의 연소 시 발생하는 퀴논과 같은 다환 방향족 탄화수소 화합물도 충분하게 용출시키기 때문이다(Kim *et al.*, 2016). 또한 도심과 항만지점에서 평가한 초순수 및 MeOH 추출액의 흡수옹스트롱지수(AAE_{300~700})는 각각 3.55와 3.25, 4.10과 4.25로 항만지점의 AAE 값이 도심지점보다 높았다. 이것은 도시지점보다 항만지점의 대기 입자에 빛을 흡수하는 유기물질의 양(자동차 배기ガス + 바이오매스 연소)이 많이 존재함을 의미한다.

PM_{2.5} 내 존재하는 BrC의 광흡수 특성을 파악하고자 용매별로 365 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 광흡수 계수를 계산하였다. 365 nm 파장에서 추출액 흡광도의 분석은 질산염 입자와 같은 비-유기화합물의 간섭을 피할 수 있기 때문이다(Hecobian *et al.*, 2010). 그림 5는 도시 및 항만지점에서 채취한 시료들에 대해서 365 nm 파장에서 측정한 WSOC ($\text{Abs}_{365,\text{WSOC}}$)와 MeOH 추출액 ($\text{Abs}_{365,\text{MSOC}}$)의 광흡수 계수(그림 5(a)), WSOC와 MSOC의 농도와 광흡수 계수와의 상

관계수 (Abs_{365} vs. WSOC (또는 MSOC)) (그림 5(b)), 그리고 WSOC와 MSOC 기준의 AAE_{300~400} (300~400 nm 파장) 값(그림 5(c))과 질량흡수효율(MAE₃₆₅) (그림 5(d))의 일변화를 보여준다. $\text{Abs}_{365,\text{WSOC}}$ 와 $\text{Abs}_{365,\text{MSOC}}$ 의 광흡수 계수는 항만지점에서 도시지점보다 높았다(표 1, 그림 5(a)). 두 지점에서 MeOH 추출액의 광흡수 계수는 WSOC 추출액보다 평균적으로 각각 1.8 (1.2~2.7)배와 1.7 (1.1~2.5)배 높았다. 용매별(초순수와 메탄올) 광흡수 계수 차이는 불용성 유기물질(water-insoluble BrC)에 의한 광흡수 때문에 메탄올 추출액의 광흡수 계수가 더 높게 조사되었다. 추가적으로 항만지점에서 aethalometer를 이용하여 370 nm의 파장에서 평가한 BrC 입자의 24시간 평균 광흡수 계수 ($\text{Abs}_{\text{BrC},370}$)는 6.2 (2.1~14.9) Mm⁻¹이었으며, 메탄올 추출액의 광흡수 계수 ($\text{Abs}_{365,\text{MSOC}}$)보다 약 2.2배 높았다. 또한 두 방법을 통해 평가한 $\text{Abs}_{\text{BrC},370}$ 과 $\text{Abs}_{365,\text{MSOC}}$ 사이의 상관계수 (R^2)는 0.81로 매우 뛰어났다. 그러나 두 방법에 의한 광흡수 계수의 큰 차이는 여러 요인에 의해 기인한다고 볼 수 있다; ① UV-vis 분광 광도계의 선택 파장에서 오는 차이와 용매 추출 시 선택한 용매에 따른 용해되는 특정 종에 의해 기인한 것으로 판단된다. ② 또한 aethalometer는 수용성 및 불용성 유기물질의 전체 광흡수가 평가되어 높았을 것이며, 장비 특성상 필터 기반 측정에서 오는 오차(다중 산란 및 입자 그림자)와 BC

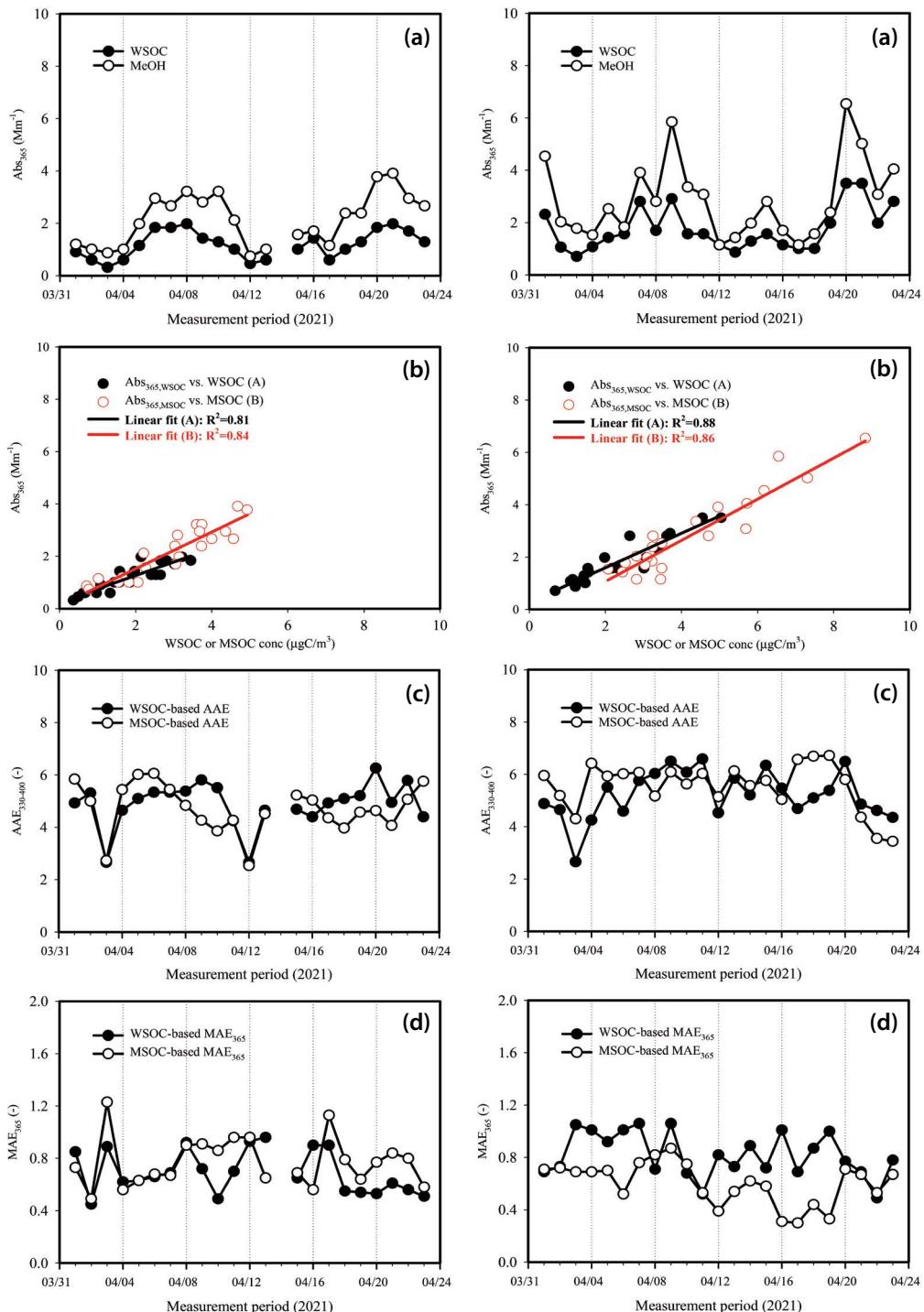


Fig. 5. Temporal variations of light absorption properties of water and MeOH extracts at an urban site (left graphs) and a port site (right graphs). (a), (b), (c), and (d) represent Abs_{365} , $\text{Abs}_{365,\text{WSOC}}$ (MSOC), $\text{AAE}_{330-400}$, and MAE_{365} , respectively.

코어에 유기물의 코팅으로 인한 광흡수 증폭이 부정 확성을 초래하였을 것이다(Kim *et al.*, 2016). 그리고 두 지점에서 WSOC와 MeOH 추출액에 의한 광흡수 계수와 이들의 절대농도 사이의 매우 높은 R^2 값(도심지점: $R^2=0.81\sim0.84$, 항만지점: $R^2=0.86\sim0.88$, 그림 5(b) 참조)은 두 추출액의 흡광도 측정의 신뢰성이 매우 높음을 의미한다.

초순수와 MeOH 추출액 기반의 AAE₃₃₀₋₄₀₀ 값은 도시지점보다 항만지점에서 약간 높게 나타났다(표 1, 그림 5(c)). 그리고 두 지점에서 초순수 및 MeOH 추출액 기반의 MAE₃₆₅는 각각 0.7과 0.8 m^2/g , 0.8과 0.6 m^2/g 로 두 지점 모두 용매에 따른 차이가 크게 나타나지 않았다(그림 5(d)). 본 연구의 두 지점에서 봄철에 조사된 초순수와 MeOH 추출액의 AAE 값은 서울(초순수: 6.4, MeOH: 5.2) (Kim *et al.*, 2016), 광주(5.3/4.8) (Park *et al.*, 2018), 중국의 난징(5.8/5.0) (Xie *et al.*, 2020), 그리고 티베트의 Lulang(6.6/8.4) (Zhu *et al.*, 2018)과 비슷하거나 낮게 조사되었다. 일반적으로 바이오연소 배출 $PM_{2.5}$ 의 초순수와 MeOH 추출액의 AAE 값들은 대략적으로 6~9에 해당된다고 하였다 (Park *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016; Hoffer *et al.*, 2006). 뿐만 아니라, 바이오매스 연소 연기의 영향을 받은 대기 시료의 초순수와 MeOH 추출액의 AAE 값 역시 5~8을 갖는 것으로 알려져 있다 (Kim *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2013; Hecobian *et al.*, 2010). 이러한 국내·외 AAE 값의 차이는 측정지점 주변의 차량 운행, 바이오매스 연소 등과 같은 1차 배출 원과 BrC의 대기 중 2차 생성의 기여가 다를 수 있기 때문이다. 또한, 초순수 및 MeOH 추출액의 AAE 값 차이는 MeOH 추출이 장파장에서 더 흡수하고 파장이 증가할수록 흡수가 천천히 감소하여 비교적 낮은 AAE가 관찰되기 때문이다. 특히 티베트의 Lulang의 경우에는 도시지점과 차이를 보였는데 이는 Lulang의 지리적 특성상 광대한 산림으로부터 유입되는 생물학적 에어로졸과 오염물질의 장거리 이송의 영향을 받은 것으로 판단하였다(Zhu *et al.*, 2018).

3. 4 Aethalometer를 이용한 강릉 항만지점 측정

갈색탄소의 배출 특성 상세분석

그림 6은 370 nm의 파장에서 전체 에어로졸(Abs₃₇₀)과 BrC 입자(Abs_{BrC,370})에 의한 시간 평균 광흡수 계수, 12시간 기준 OC 농도(그림 6(a)), 그리고 370~950 nm와 370~520 nm 파장에서 계산한 AAE 값들의 변화(그림 6(b))를 보여준다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 aethalometer로 측정한 Abs_{BrC,370}는 12시간 평균 OC와 WSOC의 농도와 매우 높은 상관성($R^2=0.71$ 과 0.61)을 보여주었다. 이는 강릉 항만지점에서 측정한 OC(또는 WSOC)의 상당한 부분이 빛을 흡수하는 물질들로 이루어졌음을 의미한다. 그리고 OC와 Abs_{BrC,370} 사이의 상관성이 WSOC와 Abs_{BrC,370} 사이의 상관성보다 높은 이유는 OC 내 빛을 흡수하는 불용성 유기물질의 존재 때문으로 판단된다(Park *et al.*, 2020). 그림 6(a)에서 12시간 평균 OC 농도는 대부분 주간(09:00~21:00)보다는 야간(21:00~09:00)에 높았으며, 특히 4월 9일, 10일, 11일, 20일, 21일의 야간 OC 농도는 주간보다 1.4(21일)~3.2(10일)배 높았다. 이때 OC 농도는 각각 8.7, 8.9, 10.8, 11.4, 9.7 $\mu gC/m^3$ 이었다. 여기서 편의상 4월 9일, 10일, 11일, 20일 및 21일의 야간시간을 A, B, C, D, E 시간으로 규정한다. A~E 시간의 12시간 평균 Abs₃₇₀과 Abs_{BrC,370}의 값은 각각 45.7과 16.4, 35.4와 10.9, 42.3과 10.6, 54.1과 20.0, 38.3과 9.9 Mm^{-1} 로 OC 농도가 가장 높았던 4월 20일 저녁시간(D)에 두 광흡수 계수 값 역시 가장 높았다. 그리고 370 nm에서 전체 에어로졸 입자의 광흡수 중 BrC에 의한 광흡수가 차지하는 분율(%)은 각각 35.8 (24.1~56.9), 30.7 (10.7~39.2), 25.0 (21.7~32.9), 37.0 (24.5~46.1), 25.9 (18.5~30.4)이었다.

그림 6(b)에서 자외선 파장 범위에서 평가한 AAE_{370-520nm}은 위에서 언급한 A~E 시간에 대해서 차량 배출 오염원의 BC 입자에 의한 ~1.0의 AAE 값(Laskin *et al.*, 2015)보다 훨씬 큰 AAE_{370-520nm} 값들을 보여주었다. A 시간(4월 9일 저녁)에 측정된 AAE_{370-520nm} 값(평균 1.8)은 4월 9일 05:00시부터 증가(1.91)

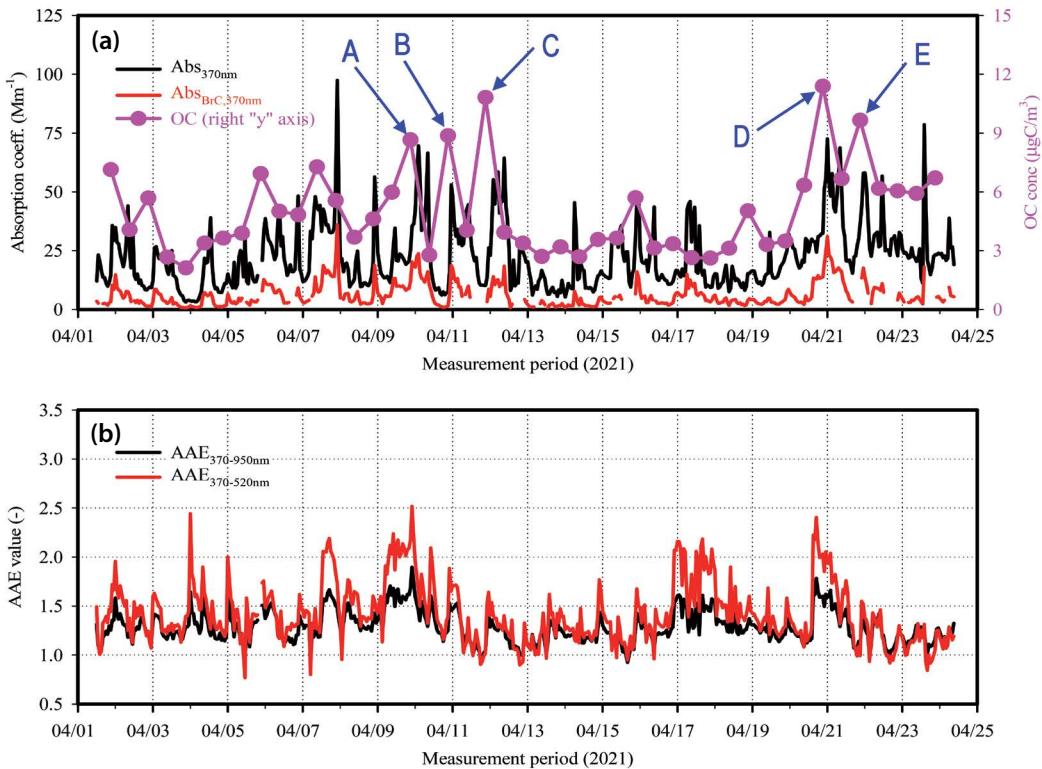


Fig. 6. Temporal profiles of (a) hourly absorption coefficients at 370 nm by aerosol and BrC particles, 12-hr average OC concentration, and (b) two AAE values ($\text{AAE}_{370-950\text{nm}}$ and $\text{AAE}_{370-520\text{nm}}$) at a port site.

를 시작한 후 21:00시까지 약 2.0을 유지하다가 22:00~23:00시에 2.5로 증가한 후 서서히 감소하였다. 그리고 B 시간(4월 10일 야간)에는 1.0~1.9(평균 1.5)를 보였으며 4월 10일 저녁에 증가한 후 감소하는 추이를 보여주었다. C 시간(4월 11일 야간)에는 OC의 농도가 A와 B 시간보다 높았으나 $\text{AAE}_{370-520\text{nm}}$ 는 1.0~1.6(평균 1.4)으로 낮았다. 이것은 아마도 이때 측정된 OC의 상당 분율이 바이오매스 연소나 선박 운행에 의한 영향보다는 차량 배기ガ스에 의한 BC의 영향이 우세하여 나타난 결과로 추정된다. 4월 20일에 $\text{AAE}_{370-520\text{nm}}$ 값은 15시(2.2)부터 급격하게 증가하기 시작하여 17시에 최고값(2.4)을 보인 후, D 시간(4월 20일 21:00~09:00)에는 1.5~2.1(평균 1.8)을 유지하였다. 새벽이나 아침시간(03:00~09:00)보다는 자정을 전·후(21:00~02:00)로 비교적 높았다. 그러나 E 시

간(4월 21일 21:00~09:00)에 $\text{AAE}_{370-520\text{nm}}$ 값은 0.9~1.5(평균 1.3)로 비교적 낮았다. 이 역시 C 시간 때와 비슷하게 자동차 배기ガ스(e.g., 야간 낚시 동호회원들의 차량 유입)에 의한 BC의 영향이 더 우세하였던 것으로 추정된다.

Abs_{370} 과 $\text{Abs}_{\text{BrC},370}$ 의 시간 변화(그림 6(a))를 보면, 이들은 대부분 아침 출근 및 어선의 출항 시간(05:00~09:00)과 저녁 시간(22:00~23:00)에 증가하는 양상을 보였다. 측정지점 주변의 어선 활동이 370 nm에서 BrC의 광흡수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 앞에서 규정한 A~E 기간에 대해서 어선의 입·출항 전체대수와 $\text{Abs}_{\text{BrC},370}$ 의 시간별 변동추이를 그림 7에 나타내었다. 그림에 나타나 있진 않지만, 연구 기간에 어선의 출항은 평균적으로 새벽 2~3시에 시작하여 아침 7시에 최대를 보인 후 감소하는 추이를 보이

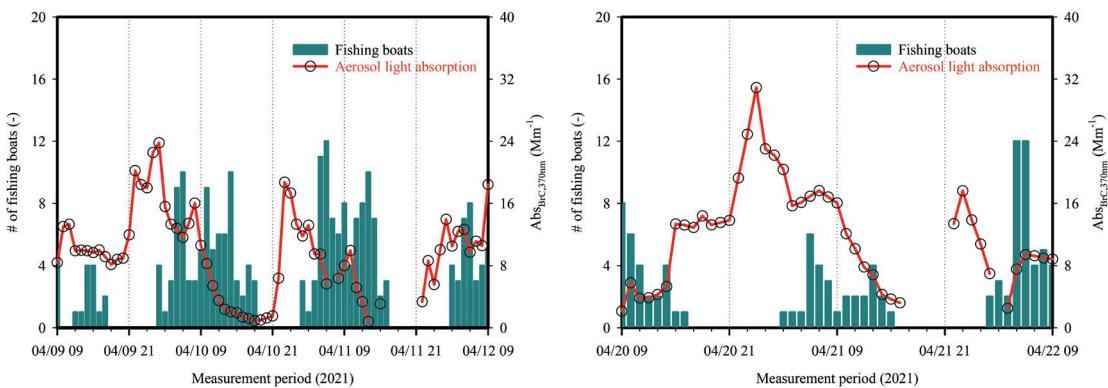


Fig. 7. Temporal profiles of both number of fishing boats and $Abs_{BrC,370}$ during sampling periods of A~E. The left graph represents the periods of A through C and the right graph the periods of D and E.

지만 입항은 보통 새벽 5~6시에 시작하여 오후 2~3시에 최대를 보인 후 감소하였다. 그리고 저녁 7시 이후에는 어선의 활동은 이루어지지 않았다. 모든 A~E 기간에 대해서, 어선의 출항이 시작되기 전(21:00~02:00)에 $Abs_{BrC,370}$ 의 값은 최고를 보인 후 오전 9시까지 서서히 감소하는 추이를 보이고 있다. 이것은 이 시간에 관측된 $Abs_{BrC,370}$ 의 증가는 어선 활동이나 차량 운행과 무관한 바이오매스 연소 활동에 기인한 것으로 추정된다. 이때 바이오매스 연소의 추적자로 알려진 K^+ 의 농도가 증가하는 경향을 보였다. 4월 9일, 10일, 11일, 20일, 그리고 21일의 12시간 평균 K^+ 의 농도는 각각 0.48, 0.23, 0.22, 0.46, 0.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 위에서 언급한 B와 C 시간에 비교적 낮은 $AAE_{370-520\text{nm}}$ 값들은 다른 시간들과 비교해 상대적으로 낮은 K^+ 의 측정 농도와 일치한다. 반면에 04:00~09:00 시간에 측정지점 주변에 차량 운행이 거의 없으며 어선의 입·출항이 가장 활발하게 이루어지는 점(그림 7)을 고려하면, 이때 빛을 흡수하는 유기물질의 존재는 어선의 입·출항 활동과 관련이 있었음을 암시한다.

그림 6(b)을 보면 위에서 언급한 A~E 시간 외에 4월 16일 오후~4월 17일 오후까지 $AAE_{370-520\text{nm}}$ 의 값들이 크게 증가하였다. 이는 강릉지역에서 황사가 관측된 기간(4월 16일 22시~4월 17일 18시)과 일치한다. 이때 Abs_{370} 와 $Abs_{BrC,370}$ 은 각각 14~46 Mm^{-1} 와

4~15 Mm^{-1} 로 A~E 시간에 관측된 광흡수 계수들보다 비교적 낮았다. 황사 발생 기간 중 $Abs_{BrC,370}$ 은 Abs_{370} 의 20~45%를 차지하였으며, $AAE_{370-520}$ 는 1.5~2.2로 매우 높았다(평균 1.9). 그리고 황사입자에 의한 $AAE_{370-660}$ 의 값은 5.9~8.8로 바이오매스 연소로 배출되는 갈색 탄소에 의한 AAE 값들과 매우 비슷하였다 (Park and Yu, 2016). 4월 16일 저녁(21:00~09:00)과 4월 17일 낮(09:00~21:00)에 측정한 12시간 평균 OC 농도는 각각 3.4와 2.6 $\mu\text{gC}/\text{m}^3$ 로 높지 않았다. 4월 16일 저녁에서 4월 17일 오후까지 측정된 낮은 OC 농도에도 불구하고, 370 nm의 파장에서 황사 먼지의 광흡수 계수 분율의 증가와 매우 높은 $AAE_{370-520}$ 는 황사 먼지에 함유된 무기 성분들(mineral dust)에 의한 광흡수의 증가 때문으로 판단된다. 이는 대기 중 황사 입자 역시 태양 복사에너지를 흡수하는 데 기여하는 물질이라는 기존의 연구 결과들과 일치한다(Yu et al., 2018a; Bergstrom et al., 2007; Collaud Coen et al., 2004).

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 도심 및 항만지점 $PM_{2.5}$ 의 화학적 특성 및 광학적 특성을 조사하였다. 연구를 위하여

2021년 4월 1일부터 23일까지 광주광역시의 도심지점과 강릉시의 강릉항 인근의 항만지점에서 PM_{2.5}를 24시간 기준으로 채취하였다. 또한, 항만지역의 경우에는 12시간 기준 간격으로 PM_{2.5}를 추가로 채취하였으며, dual-spot 7파장 aethalometer를 이용하여 에어로졸 입자의 광흡수 계수를 실시간으로 측정하였다.

도심지점 및 항만지점 PM_{2.5}의 화학적 특성은 뚜렷한 차이를 보였다. 도심지점은 NO₃⁻, NH₄⁺ 및 EC 농도가 더 높았으며, 항만지점은 OC 농도가 더 높게 나타났다. 도심지점과 항만지점의 OC/EC의 기울기는 각각 5.2와 10.4로 항만지점이 높았는데, 이는 항만지점에서 측정된 OC의 상당한 분율이 자동차 배기ガ스 외에 다른 유기물질 배출원의 영향이 있었음을 의미한다. ATR-FTIR 분석 결과에 의하면 도심지점은 자동차 배기ガ스에 의하여 존재하는 C=O와 ν(C=O) 피크가 항만지점보다 더 자주 나타났다. 반면에, 항만지점은 amine (NH₂)의 존재가 확인되었으며, 이는 해양 기원으로 인한 것으로 추정된다. 항만지점에 황사가 발생한 측정일에는 토양과 관련된 석고, 방해석 및 싱게나이트의 피크가 나타났다.

항만지점에서 aethalometer를 이용하여 측정한 Abs₃₇₀과 Abs_{BrC,370}은 시간에 따라 다른 특성을 보였다. Abs₃₇₀과 Abs_{BrC,370}은 대부분 주간보다는 야간에 더 높게 나타났다. 하지만, 21:00~02:00 시간에 보인 Abs_{BrC,370}의 높은 값은 바이오매스 연소 활동에 의한 것으로 추정되며, 동시간대에 바이오매스 연소의 추적자인 K⁺의 농도가 높았다. 또한, 차량 운행이 거의 없고 어선의 입·출항이 잦은 04:00~09:00 시간에는 어선의 활동이 빛을 흡수하는 유기물질의 배출원일 것으로 판단된다. 황사가 발생한 4월 16일과 4월 17일은 OC의 농도가 매우 낮음에도 불구하고 황사입자에 의한 AAE₃₇₀₋₆₆₀의 값은 5.9~8.8로 바이오매스 연소로 배출되는 BrC의 AAE와 매우 비슷하였다. 이는 황사 먼지에 함유된 무기 성분(e.g., Fe)들이 태양 복사에너지로 흡수하는 물질임을 암시한다.

배출 특성이 확연하게 다른 두 지점(도심과 항만지점)에서 PM_{2.5}를 측정하여 두 지점 PM_{2.5}의 화학적 및

광흡수 특성이 확연한 차이가 있음을 확인하였다. 특히, 항만지점의 경우에, 에어로졸 입자의 광흡수 특성은 시간대에 따라서 다른 오염원의 영향을 받는 것으로 나타났으나, 단기간의 측정 결과이기 때문에 항만지점의 명확한 특성을 보여주기에는 한계점이 있다. 따라서 항만지점의 선박 활동이 대기 중 미세먼지의 화학적 및 광흡수 특성에 미치는 영향을 상세히 조사하기 위해서는 장기적인 관측과 선박 배출의 추적자 성분들의 분석이 동시에 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

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

References

- Agrawal, H., Malloy, Q.G.J., Welch, W.A., Miller, W., Cocker, D.R. (2008) In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel, *Atmospheric Environment*, 42(21), 5504-5510.
- Allen, D.T., Palen, E.J., Haimov, M.I., Hering, S.V., Young, J.R. (1994) Fourier transform infrared spectroscopy of aerosols collected in a low pressure impactor (LPI/FTIR): method development and field calibration, *Aerosol Science and Technology*, 21(4), 325-342. <https://doi.org/10.1080/02786829408959719>
- Anil, I., Golcuk, K., Karaca, F. (2014) ATR-FTIR spectroscopic study of functional groups in aerosols: The contribution of a Saharan dust transport to urban atmosphere in Istanbul, Turkey, *Water, Air & Soil Pollution*, 225(3), 1-14.
- Bahadur, R., Praveen, P.S., Xu, Y., Ramanathan, V. (2012) Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(43), 17366-17371.
- Bergstrom, R.W., Pilewskie, P., Russell, P.B., Redemann, J., Bonds, T.C., Quinn, P.K., Sierau, B. (2007) Spectral absorption properties of atmospheric aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5937-5943.

- Collaud Coen, M., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., Schikowski, M., Baltensperger, U. (2004) Saharan dust events at the Jungfraujoch: Detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 2465-2480.
- Corbett, J.J., Lack, D.A., Winebrake, J.J., Harder, S., Silberman, J.A., Gold, M. (2010) Arctic shipping emissions inventories and future scenarios, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(19), 9689-9704.
- Corrigan, A.L., Russell, L.M., Takahama, S., Aijala, M., Ehn, M., Junninen, H., Rinne, J., Petaja, T., Kulmala, M., Vogel, A.L. (2013) Biogenic and biomass burning organic aerosol in a boreal forest at Hyytiala, Finland, during HUMPPA-COPEC 2010, *Atmospheric Chemistry Physics*, 13, 12233-12256.
- Coury, C., Dillner, A.M. (2008) A method to quantify organic functional groups and inorganic compounds in ambient aerosols using attenuated total reflectance FTIR spectroscopy and multivariate chemometric techniques, *Atmospheric Environment*, 42(23), 5923-5932.
- Dasgupta, P.K., Campbell, S.W., Al-Horr, R.S., Ullah, S.M.R., Li, J., Amalfitano, C., Poor, N.D. (2007) Conversion of sea salt aerosol to NaNO₃ and the production of HCl: Analysis of temporal behavior of aerosol chloride/nitrate and gaseous HCl/HNO₃ concentration with AIM, *Atmospheric Environment*, 41(20), 4242-4257.
- Dokmaisrijan, S., Ledd, V.S., Nimmanpipug, P. (2010) The gas phase conformers and vibrational spectra of valine, leucine and isoleucine: An ab initio study, *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 953(1-3), 28-38.
- 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.
- Favez, O., Alfaro, S.C., Sciare, J., Cachier, H., Abdelwahab, M.M. (2009) Ambient measurements of light-absorption by agricultural waste burning organic aerosols, *Journal of Aerosol Science*, 40(7), 613-620.
- Feng, Y., Ramanathan, V., Kotamarthi, V.R. (2013) Brown carbon: a significant atmospheric absorber of solar radiation?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 8607-8621.
- Frossard, A.A., Russell, L.M., Burrows, S.M., Eliott, S.M., Bates, T.S., Quinn, P.K. (2014) Sources and composition of submicron organic mass in marine aerosol particles, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(22), 12977-13003.
- Gilardoni, S., Liu, S., Takahama, S., Russell, L.M., Allan, J.D., Steinbrecher, R., Jimenez, J.L., Carlo, P.F.D., Dunlea, E.J., Banumgardner, D. (2009) Characterization of organic ambient aerosol during MIRAGE 2006 on three platforms, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(15), 5417-5432.
- Gilardoni, S., Russell, L.M., Soroshian, A., Flagan, R.C., Seinfeld, J.H., Bates, T.S., Quinn, P.K., Allan, J.D., Williams, B., Goldstein, A.H., Onasch, T.B., Worsnop, D.R. (2007) Regional variation of organic functional groups in aerosol particles on four U.S. east coast platforms during the International Consortium for Atmospheric Research on Transport and Transformation 2004 campaign, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D10), D10S27.
- Han, S., Youn, J.-S., Kim, W.-J., Seo, Y.-H., Jung, Y.-W. (2011) Estimation of air pollutant emissions from port-related sources in the port of Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(4), 460-471, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.4.460>
- Hawkins, L.N., Russell, L.M., Covert, D.S., Quinn, P.K., Bates, T.S. (2010) Carboxylic acids, sulfates, and organosulfates in processed continental organic aerosol over the southeast Pacific Ocean during VOCALS-REx 2008, *Journal of Geophysical Research*, 115(D13), D13201.
- Hecobian, A., Zhang, X., Zheng, M., Frank, N., Edgerton, E.S., Weber, R.J. (2010) Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the Southeastern United States, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(13), 5965-5977.
- Highwood, E., Kinnersley, R.P. (2006) When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health, *Environment International*, 32(4), 560-566.
- Hoffer, A., Gelencsér, A., Guyon, P., Kiss, G., Schmid, O., Frank, G.P., Artaxo, P., Andreae, M.O. (2006) Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3563-3570.
- Ju, S.-R., Yu, G.-H., Park, S.-S., Lee, J.-Y., Lee, S.-I., Jee, J.-B., Lee, K.-Y., Lee, M.-D. (2020) Pollution characteristics of PM_{2.5} 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>
- Kang, B.-W., Jeon, J.-M., Lee, H.-S. (2018) The characteristics of

- PM_{2.5} and trace elements in the Vicinity of steel industrial complex, Journal of Korean Society for Environmental Technology, 19(1), 18-29, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.26511/JKSET.19.1.3>
- Kim, E., Hopke, P.K. (2008) Source characterization of ambient fine particles at multiple sites in the Seattle area, Atmospheric Environment, 42(24), 6047-6056.
- Kim, H., Kim, J.-Y., Jin, H.-C., Lee, J.-Y., Lee, S.-P. (2016) Seasonal variations in the light-absorbing properties of water-soluble and insoluble organic aerosols in Seoul, Korea, Atmospheric Environment, 129, 234-242.
- Kowalcuk, D., Pitucha, M. (2019) Application of FTIR method for the assessment of immobilization of active substances in the matrix of biomedical materials, Materials, 12(18), 2972.
- Lack, D., Langridge, J., Bahreini, R., Cappa, C., Middlebrook, A., Schwarz, J. (2012) Brown carbon and internal mixing in biomass burning particles, Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(37), 14802-14807.
- Laskin, A., Laskin, J., Nizkorodov, S.A. (2015) Chemistry of Atmospheric Brown Carbon, Chemical Reviews, 115(10), 4335-4382.
- Lee, Y., Song, M., Kim, E., Oh, S.-H., Park, C., Choi, W., Lee, T., Shon, Z.-H., Bae, M.-S. (2020) Source identification of PM_{2.5} major elemental components at the harbor industrial area in Busan - Comparison of trace elemental concentrations using two XRFs, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(2), 216-227, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.216>
- Li, L., Che, H., Derimian, Y., Dubovik, O., Schuster, G.L., Chen, C., Li, Q., Wang, Y., Guo, B., Zhang, X. (2020) Retrievals of fine mode light-absorbing carbonaceous aerosols from POLDER/PARASOL observations over East and South Asia, Remote Sensing of Environment, 247, 111913.
- Liu, J., Bergin, M., Guo, H., King, L., Kotra, N., Edgerton, E., Weber, R.J. (2013) Size-resolved measurements of brown carbon in water and methanol extracts and estimates of their contribution to ambient fine-particle light absorption, Atmospheric Chemistry and Physics, 13, 12389-12404.
- 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, H., Fu, M., Jin, X., Shang, Y., Shindell, D., Faluvegi, G., Shindell, C., He, K. (2016) Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia, nature Climate Change, 6(11), 1037-1041.
- Ma, Y., Zheng, W., Guo, X., Tigabu, M., Guo, F. (2021) Effect of forest floor fuel moisture content on chemical components of PM_{2.5} emitted during combustion, Chemosphere, 279, 130547.
- Maria, S.F., Russell, L.M., Turpin, B.J., Porcja, R.J., Campos, T.L., Weber, R.J., Huebert, B.J. (2003) Source signatures of carbon monoxide and organic functional groups in Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-Asia) submicron aerosol types, Journal of Geophysical Research, 108(D23), 8637.
- Medeiros, P.M., Conte, M.H., Weber, J.C., Simoneit, B.R.T. (2006) Sugars as source indicators of biogenic organic carbon in aerosols collected above the Howland Experimental Forest, Maine, Atmospheric Environment, 40(9), 1694-1705.
- Mohiuddin, K., Strezov, V., Nelson, P.F., Evans, T. (2016) Bonding structure and mineral analysis of size resolved atmospheric particles nearby steelmaking industrial sites in Australia, Aerosol and Air Quality Research, 16, 1638-1650.
- Morillas, H., Maguregui, M., Paris, C., Bellot-Gurlet, L., Colombar, P., Madariaga, J.M. (2015) The role of marine aerosol in the formation of (double) sulfate/nitrate salts in plasters, Microchemical Journal, 123, 148-157.
- Park, S.S., Lee, G.Y., Lee, M.D. (2020) Light absorption of PM_{2.5} observed during fall at a Seosan site in Chungcheong province, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(3), 404-413, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.404>
- 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.
- Saleh, R., Marks, M., Heo, J., Adams, P.J., Donahue, N.M., Robinson, A.L. (2015) Contribution of brown carbon and lensing to the direct radiative effect of carbonaceous aerosols from biomass and biofuel burning emissions, Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 120, 10285-10296.
- Shaka, H., Saliba, N.A. (2004) Concentration measurements and chemical composition of PM_{10-2.5} and PM_{2.5} at a coastal site in Beirut, Lebanon, Atmospheric Environ-

- ment, 38(4), 523-531.
- Siciliano, T., Siciliano, M., Malatesta, C., Proto, A., Cucciniello, R., Giove, A., Lacobellis, S., Genga, A. (2018) Carbonaceous PM₁₀ and PM_{2.5} and secondary organic aerosol in a coastal rural site near Brindisi (Southern Italy), *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 23929-23945.
- Simoneit, B.R.T., Kobayashi, M., Mochida, M., Kawamura, K., Lee, M., Lim, H.J., Turpin, B.J., Komazaki, Y. (2004) Composition and major sources of organic compounds of aerosol particulate matter sampled during the ACE-Asia campaign, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D19), D19S10.
- Soleimanian, E., Mousavi, A., Taghvaei, Si., Shafer, M.M., Sioutas, C. (2020) Impact of secondary and primary particulate matter (PM) sources on the enhanced light absorption by brown carbon (BrC) particles in central Los Angeles, *Science of The total Environment*, 705, 135902.
- Tsai, T.I., Kuo, S.C. (2006) Development of diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy for the rapid characterization of aerosols, *Atmospheric Environment*, 40(10), 1781-1793.
- Varrica, D., Tamburo, E., Vultaggio, M. (2019) ATR-FTIR spectral analysis and soluble components of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter over the urban area of Palermo (Italy) during normal days and Saharan events, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(14), 2507.
- Wang, L., Jin, W., Sum, J., Zhi, G., Li, Z., Zhang, Y., Guo, S., He, J., Zhao, C. (2021) Seasonal features of brown carbon in northern China: Implications for BrC emission control, *Atmospheric Research*, 257, 105610.
- Washenfelder, R.A., Attwood, A.R., Brock, C.A., Guo, H., Xu, L., Weber, R.J., Ng, N.L., Allen, H.M., Ayres, B.R., Baumann, K., Cohen, R.C., Draper, D.C., Duffey, K.C., Edgerton, E., Fry, J.L., Hu, W.W., Jimenez, J.L., Palm, B.B., Romer, P., Stone, E.A., Wooldridge, P.J., Brown, S.S. (2015) Biomass burning dominates brown carbon absorption in the rural southeastern United States, *Geophysical Research Letters*, 42(2), 653-664.
- Winter, M., Christensen, J.H., Pleidrup, M.S., Ravn, E.S., Eriksson, Ó.F., Kristensen, H.O. (2014) Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data, *Atmospheric Environment*, 91, 1-14.
- Xie, X., Chen, Y., Nie, D., Liu, Y., Liu, Y., Lei, R., Zhao, X., Li, H., Ge, X. (2020) Light-absorbing and fluorescent properties of atmospheric brown carbon: A case study in Nanjing, China, *Chemosphere*, 251, 126350.
- Yu, G.-H., Yu, J.-M., Park, S.-S. (2018a) Estimation of light absorption by brown carbon particles using multi-wavelength dual-spot aethalometer, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 207-222, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.207>
- Yu, G.H., Park, S.S., Lee, K.H. (2018b) 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., Park, S.S., Lee, K.H. (2019) Light absorption characteristics of fine particles using a real-time optical absorption measurement instrument at a seashore wharf, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 564-576, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.564>
- Zhang, T., Shen, Z., Zhang, L., Tang, Z., Zhang, Q., Chen, Q., Lei, Y., Zeng, Y., Xu, H., Cao, J. (2020) PM_{2.5} humic-like substances over Xi'an, China: Optical properties, chemical functional group, and source identification, *Atmospheric Research*, 234, 104784.
- Zhu, C.-S., Cao, J.-J., Huang, R.-J., Shen, Z.-X., Wang, Q.-Y., Zhang, N.-N. (2018) Light absorption properties of brown carbon over the southeastern Tibetan Plateau, *Science of The Total Environment*, 625, 246-251.
- Zhu, Y., Cui, Y., Ahan, Z., Dai, R., Shi, L., Chen, H. (2021) Rabrication and characterization of a multi-functional and environmentally-friendly starch/organo-bentonite composite liquid dust suppressant, *Powder Technology*, 391, 532-543.

Authors Information

박태언(전남대학교 환경에너지공학과 석사 졸업)
(pte90@naver.com)

손세창(전남대학교 환경에너지공학과 박사과정)
(endron7@naver.com)

이권호(강릉원주대학교 대기환경과학과 교수)
(kwonho.lee@gmail.com)

박승식(전남대학교 환경에너지공학과 교수)
(park8162@chonnam.ac.kr)