

논문

충남 서산에서 가을에 측정한 초미세먼지의 오염 특성 조사

Pollution Characteristics of PM_{2.5} Measured during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province

주서령, 유근혜, 박승식*, 이지이¹⁾, 이상일²⁾, 지준범³⁾, 이광열⁴⁾, 이민도⁴⁾

전남대학교 환경에너지공학과, ¹⁾이화여자대학교 환경공학과,

²⁾한국표준과학연구원 가스분석표준센터, ³⁾한국외국어대학교 대기환경연구센터

⁴⁾국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과

Seoryeong Ju, Geun-Hye Yu, Seungshik Park*, JiYi Lee¹⁾, Sangil Lee²⁾,
Joonbum Jee³⁾, Kwangyul Lee⁴⁾, Mindo Lee⁴⁾

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

¹⁾Department of Environmental Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Republic of Korea

²⁾Center for Gas Analysis, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon, Republic of Korea

³⁾Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi-do, Republic of Korea

⁴⁾Air Quality Environment Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2020년 4월 5일

수정일 2020년 4월 26일

채택일 2020년 5월 6일

Received 5 April 2020

Revised 26 April 2020

Accepted 6 May 2020

*Corresponding author

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

E-mail : park8162@chonnam.ac.kr

Abstract In this study, chemical characteristics of PM_{2.5} collected between October 1 and November 4, 2019 at Chungcheong region air quality research center in Seosan, were studied to understand reasons leading to PM_{2.5} increases. 24-hr integrated PM_{2.5} samples were analysed for organic and elemental carbon (OC and EC), water-soluble OC (WSOC), and eight water-soluble inorganic ions. Over the study period, increase in PM_{2.5} concentration was attributed to enhancement of organic mass (OM=1.8×OC) and NO₃⁻ concentrations. Relationships of OC and WSOC with EC, K⁺, Cl⁻, and secondary NO₃⁻ showed good-to-strong correlations, suggesting primary emissions (e.g., traffic and biomass burning sources) and secondary organic aerosol (OA) formation contributed to WSOC and OC concentrations. Moreover, high WSOC/OC (mean: 0.54) and OC/EC (mean: 9.0) ratios support the existence of various OA sources at the site. Four PM_{2.5} pollution episodes (October, 10 (event I), 17 (event II), 20~22 (event III), and November 02 (event IV)), which exceeded 24-hr PM_{2.5} Korean standard of 35 µg/m³, occurred and were related to concentration increases in OM and secondary ionic species. Based on synoptic weather patterns, PM_{2.5} forecast results, and air mass transport pathways, it was concluded that events I, II, and IV were significantly influenced by locally produced pollutions, while event III was impacted by both long-range transport of air pollutants and local emissions, with the highest concentration of SO₄²⁻ (7.3 µg/m³). Among the four events, highest OM and NO₃⁻ concentrations were found in the events IV and III, respectively. Results from this study suggest that strategies to reduce nitrogen oxides and organic aerosols in the study region are formulated to control PM_{2.5} levels.

Key words: Chungcheong region, PM_{2.5} pollution events, Organic aerosols and NO₃⁻, Biomass burning, Synoptic weather patterns, Local emissions

1. 서론

지난 수십 년 동안 빠른 경제 성장과 자동차 수의

급격한 증가로 인해 발생한 다양한 대기오염물질들은 국내 대기질을 지속적으로 악화시켜왔다. 이들 중 미세먼지 (PM_{2.5}, 공기 역학적 직경 ≤ 2.5 µm)는 가시

성을 감소시킬 뿐만 아니라, 인간 호흡기 및 순환 계통에 악영향을 미칠 수 있는 것으로 알려져 있다. 세계보건기구(WHO)는 미세먼지를 1급 발암물질로 지정하였으며 중국에서는 매년 약 30만 명의 조기 사망과 관련이 있다고 추정하였다(Wu *et al.*, 2020). $PM_{2.5}$ 는 유기탄소(OC, Organic Carbon), 원소탄소(EC, Elemental Carbon), 질산염(NO_3^-), 황산염(SO_4^{2-}), 암모늄염(NH_4^+) 등으로 이루어진 복잡한 혼합물이며, 탄소성분은 미세먼지의 20~50%를 차지한다고 보고하였다(Hegde *et al.*, 2020). EC는 주로 탄소 함유 물질의 불완전 연소로부터 유도되는 일차 탄소 입자를 구성한다. OC는 다양한 연소 공정에서 직접 배출되는 1차 유기탄소(POC, Primary Organic Carbon)와 대기 중 인위적 및 자연적으로 배출된 휘발성 유기화합물의 광화학 반응을 통해 생성된 2차 유기탄소(SOC, Secondary Organic Carbon)로 이루어져 있다(Hegde *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2015). 또한 $PM_{2.5}$ 의 주요 구성 성분인 NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 은 연무 발생 시 급격히 증가하는 경향이 있다(Xu *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2019a, 2018a, 2018b, 2018c, 2015). 2차 무기 이온 성분들은 흡습성이 강해 구름 응결핵의 형성을 촉진하고, 미세먼지의 크기, 조성 및 수명에 영향을 미친다(Cao *et al.*, 2012). 또한 중국과 몽골 등에서 발생한 대기오염물질 또는 황사 입자가 국내로 유입되어 국내 대기질에 영향을 미친다(Park, 2019; Yu *et al.*, 2019a, 2018a, 2018b, 2018c; Park and Yu, 2018; Park *et al.*, 2013a). 예를 들어, 중국에서 10~2월 사이에 석탄 사용의 증가로 인해 야기되는 엄청난 양의 황산화물, 질소산화물, 미세먼지 등의 대기오염물질들은 배출과 복잡한 2차 생성 과정을 거친 후 종관기상패턴에 따라 한반도에 유입되어 국지적으로 배출된 대기오염물질들과 혼합 및 축적되어 국내 미세먼지의 고농도 현상을 초래한다(Yu *et al.*, 2019a, 2018b).

일반적으로 대기 오염은 인구 밀도가 높고 차량 통행량이 많은 도시 지역과 대기오염물질의 배출이 많은 대규모 사업장들이 밀집해 있는 산업단지를 중심으로 심각한 수준을 보여 왔다. 이와 같은 상황에서,

정부에서는 2017년 이후 고농도 미세먼지 현상이 발생 시 노후 석탄화력발전소의 가동률을 일정 수준 이하로 축소, 사업장의 조업시간 단축, 차량 5부제 실시, 노후 경유차 운행 제한 등의 다양한 조치 등을 추진하고 있지만 가시적인 성과는 거두지 못하고 있다.

특히 충청남도의 서쪽 지역은 대규모 석탄 화력발전소를 포함한 제철소, 석유화학산업단지 등의 대형 점오염원이 밀집하고 있어 전국에서 가장 많은 대기오염물질을 배출하는 것으로 알려져 있다(Lee and Park, 2019). 또한 충남지역은 국내 석탄 화력발전량의 약 50%를 담당하고 있으며, 보령화력, 태안화력 및 당진화력발전소가 가동 중에 있다. 이와 같은 충남지역의 지리적 여건으로 인하여 2차 미세먼지의 전구물질인 질소산화물과 황산화물의 배출이 전국 대기오염물질 배출량(2016년 기준)의 27%를 차지한다(국가대기오염물질 배출량, <http://airemiss.nier.go.kr>). 게다가, 제조업 연소, 생산 공정 등에서 배출되는 미세먼지와 대기오염물질이 풍하 방향에 위치한 수도권에 $PM_{2.5}$ 의 농도 수준에 영향을 미친다고 보고하였다(Kim *et al.*, 2017).

이에 본 연구에서는 충남 내륙지역으로 도시, 농촌 및 산업단지의 특성이 혼재된 서산시 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소에서 2019년 10월에 약 1개월 동안 $PM_{2.5}$ 를 측정하여 측정기간 중 종관기상 유형에 따라 $PM_{2.5}$ 의 화학적 특성을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 $PM_{2.5}$ 시료 채취

$PM_{2.5}$ 시료는 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소(충남 아산시 수석 1길 124-1 (126.494E, 36.777N, 해발고도: 25.19m, 서산 기상대)에서 2019년 10월 1일~11월 4일까지 고용량 샘플러(1000 L/min, HV-RW, SIBATA Sci Tech., Japan)를 이용하여 채취하였다. 시료 채취 지점은 주변에 3곳의 목공소가 있으며 오래된 농가 주택 및 식당 등이 위치해 있다(그림

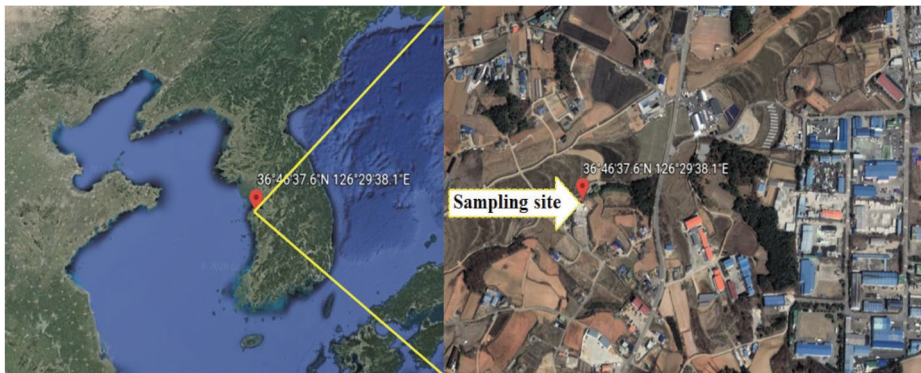


Fig. 1. A $PM_{2.5}$ sampling site in Seosan.

1). 그리고 북쪽으로 약 1 km 위치에 2차선 도로와 서쪽으로 약 3~5 km에 서산시 도심지역이 위치하고 있으며 농업과 소규모 사업장이 혼합된 농공산업단지로 지정된 장소이다. 에어로졸 입자의 시료 채취에 사용된 여지는 석영 여과지(Pall Tissuquartz Filters Filter 7204, 2500 QAT-UP, 8×10 in)로 사용 전 실험실에서 약 550°C 의 화로에서 휘발성 및 반 휘발성 유기 성분의 흡착으로 인한 불순물을 처리한 후 사용하였다. 시료는 당일 오전 10시부터 다음날 오전 9시까지 약 23시간 동안 채취하였다. 채취된 시료의 화학적 성분을 분석하기 전까지 햇빛을 차단하기 위해 알루미늄 호일로 포장한 뒤 냉동(4°C) 보관하였다.

2.2 탄소성분 및 수용성 이온성분 분석

2.2.1 탄소성분 분석

수집된 $PM_{2.5}$ 샘플을 1.5 cm^2 크기로 펀치 후, OCEC 분석기(Sunset Laboratory, Portland, USA)를 사용하여 OC와 EC 성분을 분석하였다. 분석은 열광학 투과율(TOT, Thermal Optical Transmittance)을 기반으로 하는 NIOSH-5040(National Occupational Safety and Health) 온도 프로토콜에 의해 정량화하였다. NIOSH 프로토콜의 각 단계별 온도 프로그램은 온도를 크게 두 단계로 상승 및 하강시키는데, 먼저 OC는 310°C (80초), 475°C (60초), 615°C (60초) 및 870°C (60초)인 4 단계를 거쳐 정량화한다. 다음 헬

륨-산소단계에서 550°C (45초), 625°C (45초), 700°C (45초), 775°C (45초), 850°C (45초) 및 870°C (120초)으로 6 단계를 거치면서 EC를 정량화한다(Yu *et al.*, 2019b; Kim *et al.*, 2015). 본 연구에서 사용된 고용량 채취기에는 탄소 함침 디누더가 설치되어 있지 않아서 분석된 OC의 농도는 실제보다 다소 과평가되었을 것이다. OC와 EC 분석 후 잔여 필터를 초순수 40 mL와 혼합하여 추출한 후 수용성 유기 탄소(water-soluble OC, WSOC)를 정량화하였다. 약 60분 동안 초음파 처리한 후 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 기공 크기의 시린지 필터를 통과시켜 여과액을 TOC 분석기(Sievers 5310C, USA)를 이용해 정량화하였다.

2.2.2 수용성 이온성분 분석

WSOC 성분을 정량하고 남은 추출액을 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 기공 크기의 시린지 필터를 통과시킨 후, 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, Metrohm 930)를 이용해 수용성 이온성분을 정량화하였다. 양이온(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 5종은 Metrosep C4-칼럼을 사용하여 $1.7\text{ mM HNO}_3/0.7\text{ mM dipicolinic acid}$ 용리액의 조건 하에 분석하였고, 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 3종은 Metrosep A Supp 5-칼럼을 사용하여 $3.2\text{ mM Na}_2\text{CO}_3/1.0\text{ mM NaHCO}_3$ 용리액 조건 하에 분석을 진행하였다. 분석에 대한 상세한 내용은 여러 연구논문들에 잘 기술되어 있다(Yu *et al.*, 2017, 2015).

3. 결과 및 고찰

3.1 PM_{2.5} 오염 사례 분류

그림 2(a)는 충청권 대기환경연구소로부터 약 5 km 떨어진 충남 서산시 동문동에 위치한 도시대기측정망에서 생산한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 시간별 농도를 나타낸다. 그리고 측정 지점에서 채취한 PM_{2.5}의 화학적 성분들의 농도를 토대로 재산정한 PM_{2.5} 농도를 그림 2(a)에 포함하였다. 또한 PM_{2.5}의 탄소성분(OC, WSOC, EC), 이온성분(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, K⁺)들의 농도들을 그림 2(b)~(d)에 도식화하였다. 그림 3은 측정 기간 중 서산 기상대에서 측정된 시간별 풍속, 기온 및 상대습도의 변화를 보여준다. 연구에서는 PM_{2.5}의 질량농도 측정이 이루어지지 않아 24시간 PM_{2.5}의 질량농도를 화학적 구성성분들을 이용해 다음과 같이 산정하였다(Malm *et al.*, 1996); PM_{2.5} (μg/m³) = EC + OM + NO₃⁻ + SO₄²⁻ + NH₄⁺ + 기타 이온성분들. 연구에서는 원소성분들을 분석하지 않아서 재산정된 PM_{2.5} 농도는 실제보다 낮게 평가되었을 것이다. 유기물질(organic matter, OM)의 농도는 OC에 1.8을 적용하였다(Turpin and Lim, 2001). 여기서 OC 농도로부터 OM의 농도를 평가하는 데 1.8을 적용한 이유는 측정 지점 주변에 빈번하게 톱밥을 소각하여 실내를 난방하는 목공소가 위치하고 있기 때문이다. 그림 2(a)에서 24시간 PM_{2.5}의 질량농도(원소성분들의 기여 분은 제외된 농도)는 네 번의 피크(10월 10일, 10월 17일, 10월 20~22일, 11월 2일)가 관측되었다. 10월 10일(사례 1), 10월 17일(사례 2), 10월 20~22일(사례 3), 11월 2일(사례 4)에 측정된 24시간 평균 PM_{2.5}의 농도는 각각 33, 40, 36, 46, 34, 50 μg/m³이었다. 그림 2(a)~(c)에 의하면, 네 번의 PM_{2.5} 농도 증가 사례는 OM과 NO₃⁻의 농도 증가가 직접적인 원인으로 작용하였다. 네 종류의 사례에 대해 24시간 평균 풍속(m/s)과 상대습도(%)는 각각 0.7과 80, 1.4와 70, 1.1(10월 20일)~1.4(10월 22일)와 66(10월 22일)~80(10월 20일), 0.7과 82이었다. 이와 같은 기상조건들은 대기 에어로졸 입자의

축적과 2차 에어로졸 입자 생성 촉진으로 PM_{2.5}의 농도 증가를 가져왔을 것이다. 네 종류의 PM_{2.5} 사례에는 포함되지 않았지만, 10월 27일의 PM_{2.5}, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 농도는 각각 29, 3.1, 2.8 μg/m³로 높지 않았음에도 OM의 농도는 18.3 μg/m³로 11월 2일(OM = 21.0 μg/m³) 다음으로 높았다.

충청권 대기환경연구소에서 측정한 PM_{2.5}의 농도 증가 원인이 국지적인지 외부로부터 장거리 수송에 의해서 유입된 결과인지 판단하기 위하여 연구기간 중 PM_{2.5}의 고농도 사례에 대해서 위성 영상, 국립환경과학원의 PM_{2.5}의 대기질 예보 결과(<http://www.airkorea.or.kr/web/dustForecast>), 지상 일기도(<https://www.weather.go.kr/weather/images/analysischart.jsp>), 그리고 공기 역궤적 분석을 수행하여 그 결과들을 각각 그림 4~7에 나타내었다. 선정된 네 가지 PM_{2.5}의 고농도 사례에 대해 충청권 대기환경연구소로 유입되는 기단의 역궤적 해석은 미국 NOAA의 HYSPLIT 모델을 이용하여 3일 간격으로 300 m 및 500 m의 고도에서 계산하였다.

고농도 사례 1은 2019년 10월 10일에 발생한 사례로서 국외 유입형 종관 패턴에 해당한다(그림 6 지상 일기도). 10월 8일경 대륙 고기압이 발해만 서쪽부근까지 남하하여 변질되기 시작하였고, 이 과정에서 서~북서 계열의 유입기류가 형성되었다. 이 시기 한반도는 한반도 북동쪽에 위치한 저기압 세력의 후면부 영역의 영향이 약하게 존재하였으나 다가오는 대륙 고기압의 영향권에 들어 있었다. 상층 500 hPa의 흐름은 8일까지는 강한 북서기류의 형태였고 9일에는 같은 북서 계열 기류이나 동서 방향의 성분이 더 강해지면서 풍속이 약해지는 경향을 보였다. 10월 9일 경에는 변질된 대륙성 고기압의 중심이 서해 중부 해상까지 동진하여 이동하였다. 이 과정에서 한반도 북서쪽으로부터의 유입 기류가 형성되었다. 이 시기는 한반도 전역이 화남 지방에 중심을 두고 변질된 후 분리된 이동성 고기압의 영향권에 속해 있었다. 또한 상층 흐름이 상대적으로 느려지고 동서 방향의 상층 기류 성분이 강화되면서 이 흐름에 따라 기압계의 이

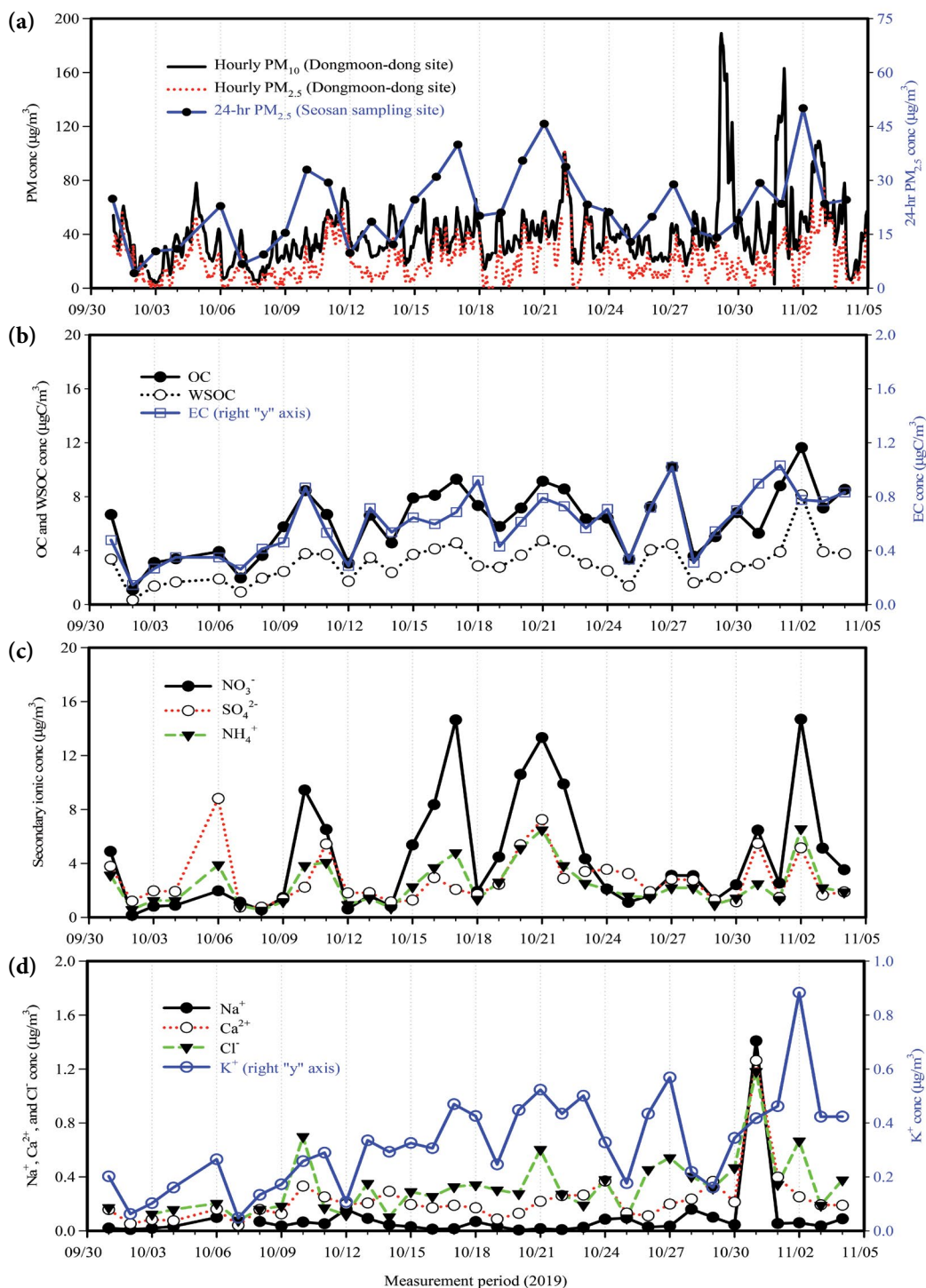


Fig. 2. Temporal variations of hourly PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, 24-h $\text{PM}_{2.5}$, OC, WSOC, EC, secondary ionic species (NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+), Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , and K^+ concentrations over the study period.

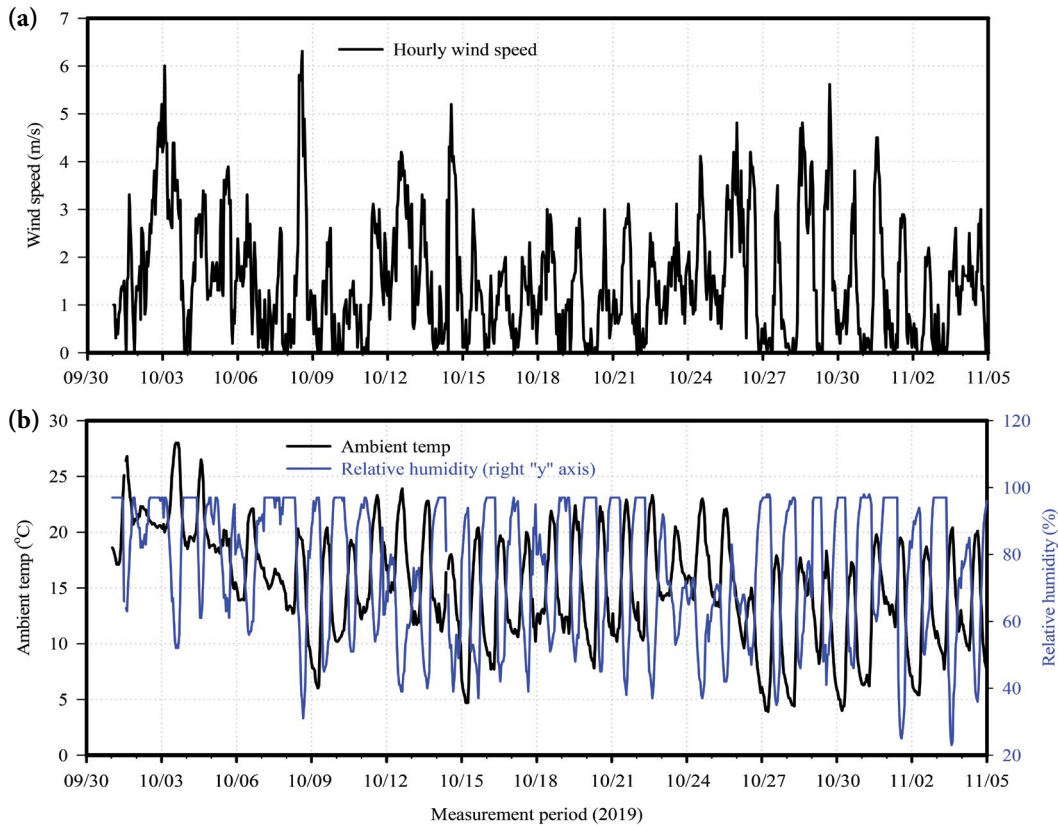


Fig. 3. Temporal variation of (a) wind speed and (b) ambient temperature and relative humidity at meteorological agency in Seosan.

동에 변화가 발생하였다. 이에 따라 한반도 서~북서 방향으로부터의 유입 기류가 형성되는 종관 상황이 나타났다. 그러나 유입 기류 주변의 오염원의 농도가 낮아서 실제적인 외부 유입에 의한 고농도 현상이 발생하지는 않았다. 10월 11일의 위성영상(그림 4)을 보면 한반도 주변으로 유입되는 먼지의 모습이 관찰되지 않고 있어 이때 $PM_{2.5}$ 의 농도 증가는 낮은 풍속으로 인한 국지적으로 발생한 미세먼지의 축적과 2차 생성에 의해 나타난 결과로 보인다. 따라서 사례 1은 국외 유입형 종관 패턴으로 분류되지만 국지적인 영향이 $PM_{2.5}$ 의 농도 증가를 야기한 사례로 구분할 수 있다.

고농도 사례 2는 2019년 10월 16~17일에 나타난 사례로서 국외 유입형 종관 패턴에 해당되나 국지적

영향이 우세한 경우이다. 고기압의 위치 변화에 의한 국외 유입형의 종관 패턴을 보인 사례에 해당한다(그림 6). 10월 14일 발해만 북서쪽에 중심을 둔 대륙성 고기압이 상층 500 hPa의 북서기류를 타고 남동진하였다. 10월 15일에는 이 고기압의 일부 세력이 분리되어 한반도 북쪽에서 동진하였다. 10월 16일에서 17일 사이에 한반도를 중심으로 동서 방향으로 고기압 세력이 자리를 잡고 상층 기압능과 연결되어 발달하였다. 또한 상층 500 hPa 기류 변화의 영향을 받아 고기압의 중심 세력이 한반도 동쪽으로 이동하였다. 10월 18일경에 한반도 남동쪽을 중심으로 태풍 너구리와 관련된 기압골이 영향을 주고 있었으나, 한반도는 여전히 한반도 북동쪽에 정체되어 있는 고기압의 영향권에 들어 있었다. 정리하면 이 시기의 초기에는

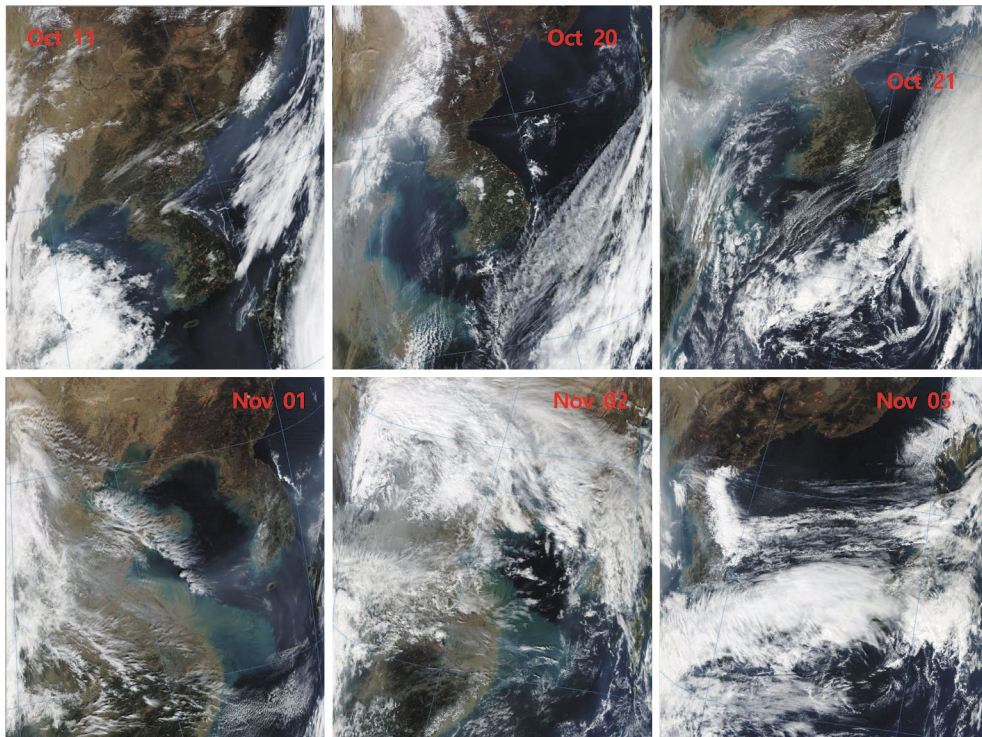


Fig. 4. MODIS satellite imagery for three $PM_{2.5}$ episodes (episodes 1, 3 and 4).

한반도 북서쪽으로부터의 유입기류가 우세하였다. 그러나 고기압의 세력 중심이 이동하면서 동쪽으로부터의 유입기류가 형성되었던 시기로서 유입 시점 부근 지역의 먼지 농도가 낮았고 특히 후반부에는 주로 동쪽으로부터의 유입 기류가 형성되어 한반도 내부에 고농도 현상이 나타나지 않았다. 고농도 사례 2 (10월 17일)의 경우는 그림 4에 한반도 주변이 구름에 의해 덮여있어서 외부 유입의 영향을 확인할 수 없어서 위성 영상을 포함하지 않았다. 그러나 이때 낮은 풍속으로 인한 대기 정체 현상은 충남지역 $PM_{2.5}$ 의 고농도 현상을 초래한 하나의 원인이었을 것이다.

고농도 사례 3은 2019년 10월 20~22일에 나타난 경우로서 국내 정체와 국외 유입형 종관 패턴이 혼합된 경우이다. 이 시기는 한반도 북쪽에 중심을 둔 고기압 세력에 의해 영향을 받던 시기이다. 10월 21일

경에 한반도 북쪽에 머무르던 지상 고기압의 중심이 22일경에는 동쪽으로 이동하여 한반도 북동쪽 먼 지역에 자리를 잡았다. 10월 23일경에는 발해만 북서쪽에 위치해 있던 약한 기압골과 한반도 남쪽 먼 지역에서 북동진하며 다가오는 저기압이 존재하였다. 그러나 한반도 전역은 여전히 고기압권에 속해 있었다. 또한, 상층 500 hPa의 등고선 간격도 넓은 편이어서 종관 기압계의 이동속도도 상대적으로 작았다. 이 시기 초기에는 북풍 계열의 유입기류가 일부 존재하였으나 풍속이 비교적 약했다. 그리고 시간이 지나면서 고기압의 중심이 북동쪽으로 이동하면서 동쪽으로부터의 약한 유입기류가 발생하였다. 결국, 이 시기의 초반에는 국외 유입 기류와 후반에는 국외 유입의 가능성이 적은 국내 정체형 종관 패턴에 속한다고 판단된다. 21일 북풍계열의 유입기류 하에서 $PM_{2.5}$ 의 농도는 전날의 $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하다가

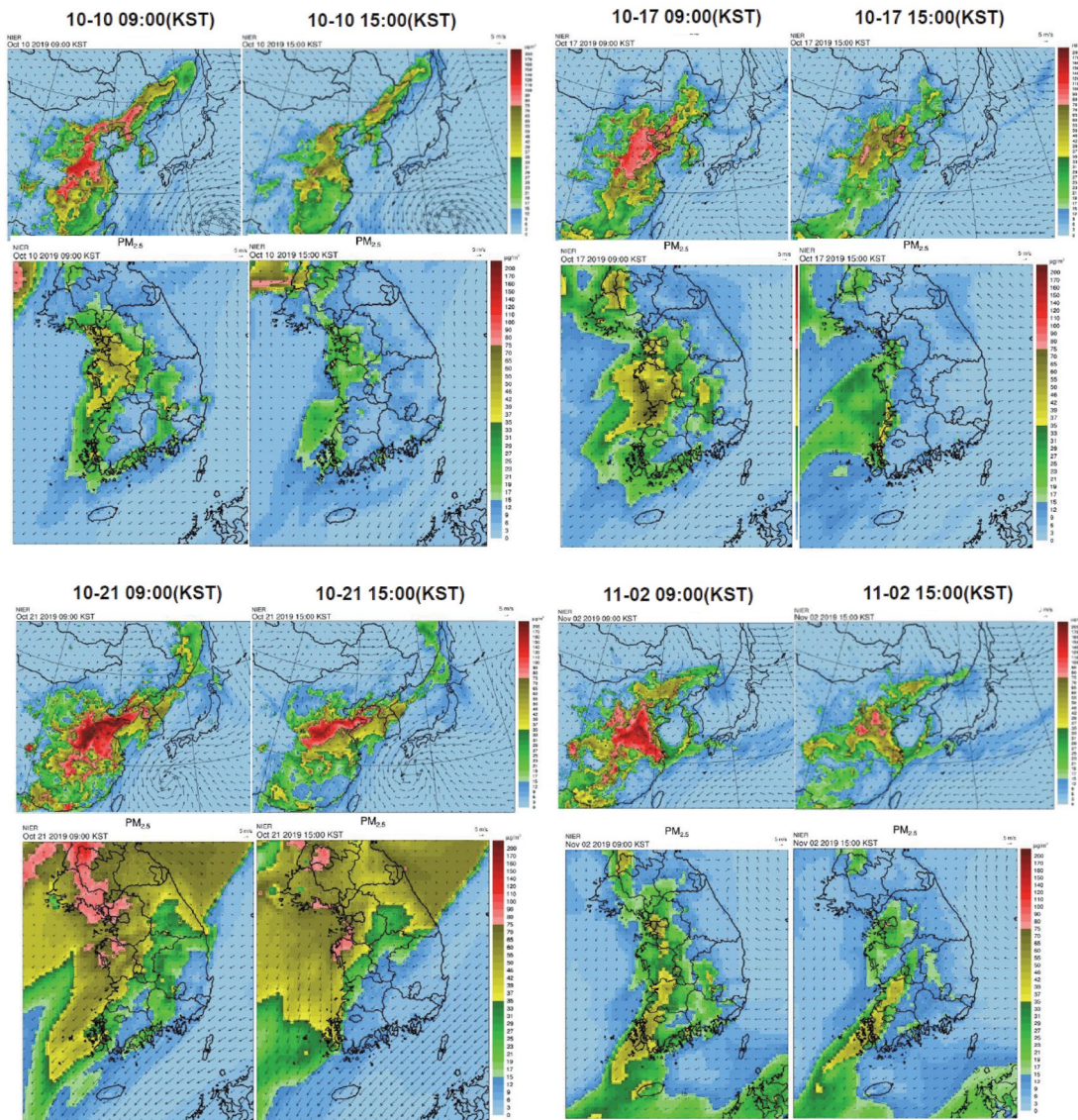


Fig. 5. $PM_{2.5}$ forecast results for four $PM_{2.5}$ episodes (<http://www.airkorea.or.kr/web/dustForecast>).

22일 동쪽으로부터 약한 유입기류가 발생하여 국외 영향이 감소한 사례($PM_{2.5}$ 농도 $34 \mu g/m^3$)이다(유입 기류 방향 변화). 고농도 사례 3은 그림 4~7에서 보는 바와 같이 측정소 주변의 대기 정체와 중국의 북동쪽 지역으로부터 유입된 연무로 인하여 $PM_{2.5}$ 의 고농도 현상이 발생했던 것으로 판단된다.

고농도 사례 4는 2019년 11월 1~3일에 발생하였으

나, 특히 11월 2일에 $PM_{2.5}$ 의 농도가 상승한 경우이다. 이 사례는 국외 유입형 종관 패턴에 해당되나 국내 정체가 결합된 사례이다. 10월 28일에 한반도 북쪽에 위치한 전선을 동반한 저기압의 한랭전선 후면부를 타고 황사를 동반한 미세먼지 영역이 한반도로 유입되었다. 이후 북쪽 저기압은 동진하며 한반도를 벗어났고 이 저기압 후면부에서 중국 화남지방 부근

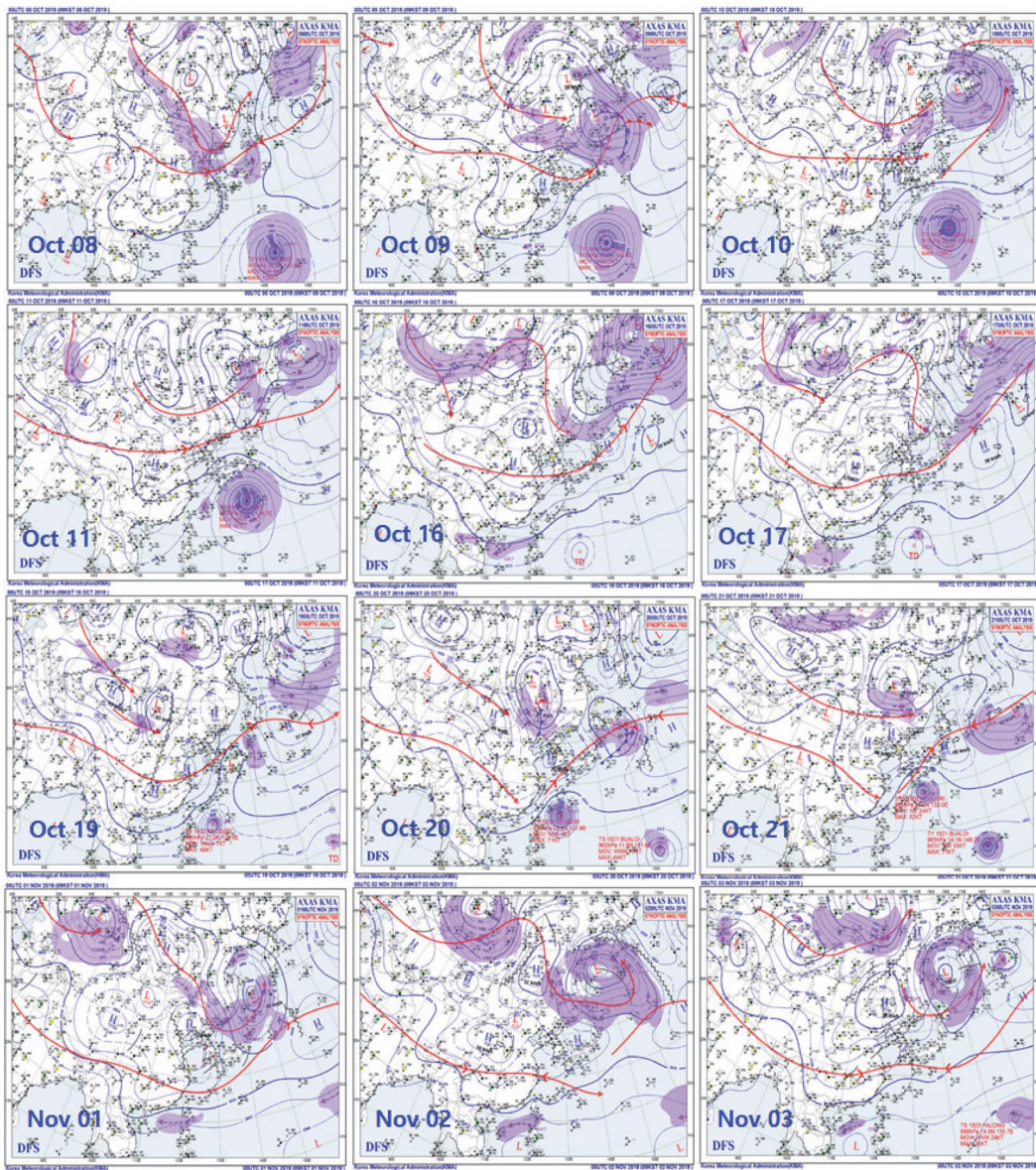


Fig. 6. Surface synoptic weather charts for four $PM_{2.5}$ pollution episodes.

까지 대륙 고기압이 남진하였다. 이 고기압은 서서히 변질되었고 일부 고기압 세력이 분리되어 10월 30일 경에 한반도 남서쪽에 위치하게 되었다. 이 고기압이 1~2일간 정체하면서 한반도 남서쪽에서부터의 유입 기류가 형성되기 시작하였다. 이 시기는 초기에 저기압 후면부로부터의 유입이 있는 후, 한반도 남서쪽

고기압에 의한 남서 유입이 이루어진 시기이다. 따라서 국외 유입형 종관 패턴에 속한다고 판단하였다. 그리고 11월 3일은 한반도 북쪽에 위치한 고기압의 영향으로 북풍계열의 유입 기류가 발생되었다. 한반도 남동쪽 지역을 중심으로 대기 불안정 영역이 존재하였다. 사례 4의 경우는 11월 2일과 3일에 한반도 주

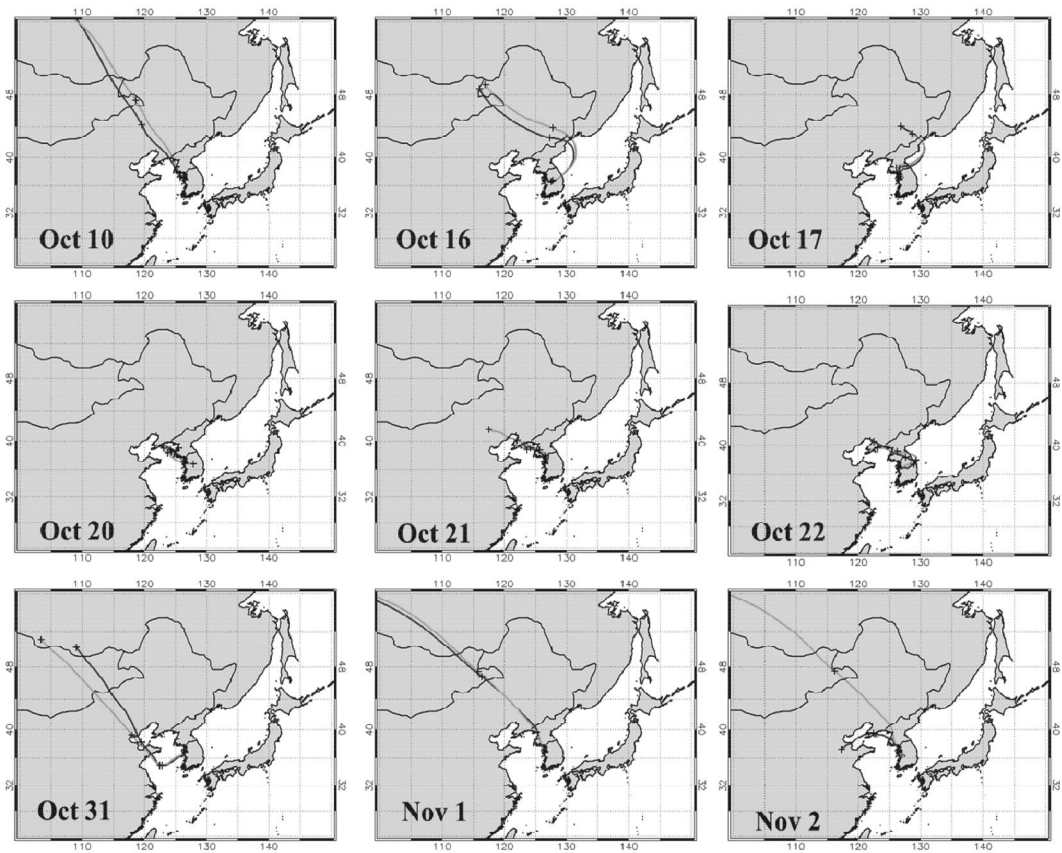


Fig. 7. Transport pathways of air masses arriving at the site for four $PM_{2.5}$ episodes. Blue and green lines indicate heights of 300 and 500 m AGL.

변과 상공이 구름에 의해 덮여있어서 중국으로부터 연무 유입 여부가 명확하지 않지만 11월 3의 한반도 서해상을 유심히 보면 연무 피가 걸쳐 있는 것으로 보인다(그림 4). 그러나, 그림 7의 공기 역학적 계산 결과를 보면 기단의 대부분이 중국 북동쪽 오염지역 보다는 북한과 동해를 통해 측정 지점으로 유입되고 있었다. 이와 같은 결과와 낮은 풍속 조건은 네 번째 고농도 사례는 국지적인 미세먼지의 축적과 2차 생성, 그리고 북한으로부터 유입된 오염물질들이 결합하여 발생한 경우이다.

3.2 탄소성분의 화학적 특성

대기 중에 존재하는 OC와 EC 입자는 태양 복사열

을 반사 또는 흡수할 수 있는 성질로 인해 기후 변화에 영향을 주는 물질로 주목받고 있다. 그림 8은 측정 기간 중 OC, EC, WSOC, K^+ , Cl^- 성분들 사이의 상관 분석 결과를 보여준다. 연구에서 측정한 OC와 EC의 평균 농도는 각각 $6.3 (1.1 \sim 11.6)$, $0.6 (0.1 \sim 1.0) \mu gC/m^3$ 이었고, OC와 EC 사이에 높은 상관성 ($R^2=0.71$)을 확인하였다(그림 8(a)). EC는 연료의 연소 과정에서 배출되어 대기 중 변화가 거의 일어나지 않아 1차 연소배출원을 확인하는 지표로서 활용되고, OC는 인위적 배출 또는 자연적 배출원에서 배출된 1차 유기탄소와 대기 중에서 산화반응을 통해 생성된 2차 유기탄소로 구분되어 활용되고 있다(Shubhankar and Ambade, 2016; Weber *et al.*, 2007). OC와 EC 농도 사

이의 높은 상관성은 연구 기간 동안 측정된 OC의 농도가 1차 배출원의 영향을 많이 받았음을 알 수 있다. 또한 바이오매스 연소의 추적자 (Yu *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016; Park *et al.*, 2013b) 또는 2차 유기에어로졸의 생성을 판단하는 물질 (Weber *et al.*, 2007)로 알려진 WSOC는 OC와 높은 상관성 ($R^2=0.87$)을 보여 OC와 유사한 배출원의 영향을 받은 것으로 추정된다 (그림 8(b)). 논문에는 나타내지 않았지만 WSOC와 EC 사이의 좋은 상관성 ($R^2=0.50$)은 측정된 WSOC 역시 EC의 배출원과도 관련이 있었을 것으로 판단된다. 일반적으로 도심 지역에서 자동차 배출가스에 의한 WSOC/OC 비율 (<0.3) (Saarikoski *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2006)은 산업 및 바이오매스 연소 배출에 비해 낮은 것으로 알려져 있다 (Yu *et al.*, 2017; Fan *et al.*, 2016; Park and Yu, 2016; Shubhankar and Ambade, 2016). 예를 들어, 인도의 주요 산업 시설과 바이오매스 연소 활동이 활발한 지역에서 가을철에 측정된 미세먼지 내 WSOC/OC는 각각 0.47와 0.45였다 (Shubhankar and Ambade, 2016). 자동차 배기가스에서 미세먼지 내 낮은 WSOC/OC 비율은 디젤이나 가솔린과 같은 액체 연료의 연소로부터 발생한 유기성분의 낮은 용해도 때문이다 (Shubhankar and Ambade, 2016). 따라서 본 연구에서 확인된 WSOC/OC의 평균 비율 (0.54, 범위: 0.3~0.7)은 측정된 OC 농도가 자동차 배기가스 외에 다른 배출원 (e.g., 산업이나 바이오매스 연소 활동)이나 2차 생성의 영향이 포함되어 나타난 결과로 판단된다.

OC/EC 비율은 배출원마다 다르며 계절적 차이를 보이기 때문에 본 연구에서도 탄소성분의 배출원 특성을 해석하기 위해 OC/EC를 사용하였다. 주로 자동차 배출의 영향을 많이 받는 도심지역인 서울과 대전 시에서 가을철에 측정된 미세먼지 내 OC/EC는 각각 2.2와 3.8이었으나 (Kim *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2007), 본 연구에서 측정된 OC/EC의 평균값은 9.0이었다. 앞에서 간단하게 OC의 배출원에 대해 언급한 것처럼 연구에서 얻은 높은 OC/EC는 자동차 배기가스뿐

만 아니라 측정소 주변의 바이오매스 (목재 연료, 톱밥, 나무껍질, 농업 폐기물)의 불완전 연소가 OC 농도 증가에 상당히 기여했을 것으로 판단된다. 나무나 농업 잔재물 등의 바이오매스 연소 시 발생하는 미세먼지에는 K^+ 나 Cl^- 성분이 다량 포함되어 있기 때문에 이들 성분들은 바이오매스 연소의 효과적인 추적자로 활용할 수 있다 (Wang *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2017; Park and Yu, 2016; Park *et al.*, 2013b; Huang *et al.*, 2006). 따라서 OC와 WSOC의 바이오매스 연소에 의한 영향을 판단하기 위하여 그림 8(c)와 (d)에 OC, WSOC, K^+ 및 Cl^- 사이의 상관 해석 결과를 나타내었다. 그림 8(c)에서 K^+ 는 OC 및 WSOC와 각각 0.74와 0.80의 상관결정계수 (R^2)를 보였으며, 그림 8(d)에서 Cl^- 도 OC 및 WSOC와 비교적 좋은 상관성 ($R^2=0.52$ 와 0.44)을 보였다. 이러한 상관분석 결과는 바이오매스 연소로부터 배출된 연기가 OC와 WSOC 생성에 주요 역할을 했다고 볼 수 있을 것이다. 또한 측정 기간 중 시료 채취 지점 주변에서 이루어진 불법 소각, 난방 활동 등으로 인한 연기가 OC 농도의 증가에 기여했을 것이다.

EC 입자의 화학적 성질은 안정된 탄소성 물질의 불완전 연소 방출에서 비롯되기 때문에 1차 연소에 의해 생성된 EC와 POC (primary OC) 사이에는 일정한 상관관계가 확인된다 (Castro *et al.*, 1999). 보통 OC/EC 값이 작다고 가정하면 전체 OC 농도에 미치는 SOC (secondary OC)의 영향을 배제할 수 있다 (Shubhankar and Ambade, 2016). 이와 같은 가정을 전제로 OC와 EC의 최소 비율을 사용하여 SOC의 크기를 다음 식에 의해 정량적으로 추정할 수 있다; $POC = EC \times (OC/EC)_{min}$, $SOC = OC - POC$. 여기서 $(OC/EC)_{min}$ 은 샘플링 기간 동안 OC/EC의 최소값이며, POC는 추정된 1차 OC 농도이고, SOC는 2차 OC 농도의 정량적 추정치이다. 본 연구에서 $(OC/EC)_{min} = 5.9$ 를 사용해 추정된 SOC 농도는 $2.8 (0.2 \sim 7.1) \mu gC/m^3$ 이었고, 총 OC 농도의 53 ($21 \sim 61$)%를 차지하였다. 2차 OC의 생성 지시자로 알려진 WSOC의 농도는 SOC 농도와 매우 높은 상관성 ($R^2=0.86$)을 보

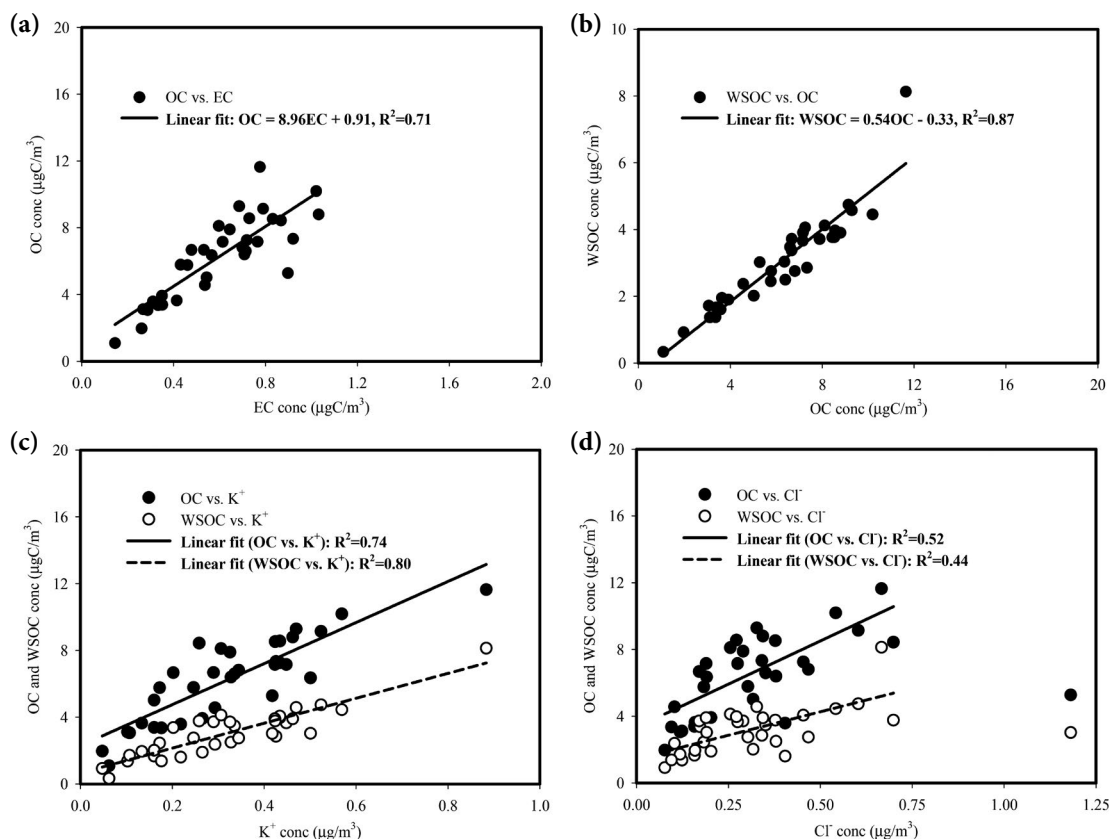


Fig. 8. Regression relationships among OC, EC, WSOC, K^+ , and Cl^- over the study period.

였으며 POC와는 0.52의 R^2 값을 가졌다. 뿐만 아니라, WSOC는 국지적인 NO_2 의 산화과정을 통해 생성되었을 것으로 추정되는 NO_3^- (24시간 평균 NO_2 vs. NO_3^- , $R^2=0.45$)와 좋은 상관성($R^2=0.59$)을 보여주었다. 이와 같은 결과들은 측정 지점에서 얻은 WSOC의 일부는 SOA의 생성과 밀접한 관계가 있었음을 암시한다(Weber *et al.*, 2007). 결론적으로 서산시 도심 지역에서 인접하고 농공산업단지 내에 위치한 측정 지점의 미세먼지 내 OC (와 WSOC)의 오염원은 1차 배출원(차량 배기가스, 바이오매스 연소 등)과 SOA 생성의 영향에 기인되었다고 할 수 있다.

$PM_{2.5}$ 고농도 사례 시 (사례 1~4) OC, EC 및 WSOC의 평균 농도는 각각 9.0, 0.7, 4.8 $\mu gC/m^3$ 이었고, 비-고농도 (typical) 시 이들의 농도 (5.7, 0.7, 2.7

$\mu gC/m^3$)와 비교해 약 1.6, 1.3, 1.8배 높았다. 표 1은 고농도 사례와 비-고농도 (typical) 시 주요 화학적 성분인 탄소성분들과 2차 이온성분들의 농도를 정리한 표이다. $PM_{2.5}$ 사례 1, 2, 3 및 4에서 OM의 농도는 각각 15.2, 16.7, 14.9, 21.0 $\mu g/m^3$ 으로 네 번째 사례에서 가장 높았다.

사례 1 (10월 10일)은 국외에서 기류의 유입이 있었으나, 장거리 이동에 의한 영향보다는 국지적인 배출과 생성에 의한 영향이 큰 경우에 해당되며, 이때 EC 추적자 방법을 이용해 예측한 POC와 SOC의 농도는 각각 5.1, 3.3 $\mu gC/m^3$ 으로 1차 배출원의 영향이 우세하였다. 사례 2 (10월 17일) 역시 국지적인 영향이 우세한 경우로서 기단의 이동 경로(그림 7)를 보면 풍상 지역인 당진제철소 주변에서 발생한 오염물

Table 1. Comparison of carbonaceous and secondary inorganic species concentrations among four episodic and typical conditions.

PM _{2.5} classification	OC ($\mu\text{gC}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{gC}/\text{m}^3$)	WSOC ($\mu\text{gC}/\text{m}^3$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$\Sigma\text{SIC}^{1)}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Episode 1	8.4	0.9	3.8	3.8	9.4	2.2	15.5
Episode 2	9.3	0.7	4.6	4.8	14.6	2.1	21.5
Episode 3	8.3	0.7	4.1	5.1	11.3	5.2	21.6
Episode 4	11.6	0.8	4.7	6.6	14.7	5.2	26.4
Typical	5.7	0.8	2.7	1.9	2.8	2.5	7.1

¹⁾SIC indicates secondary inorganic components.

질들이 측정 지점으로 유입되고 있으며 높은 상대습도와 낮은 풍속 조건(그림 3)으로 2차 미세먼지의 생성이 활발한 조건에 해당하였다. 이때 OC/EC는 13.6으로 매우 높았으며, SOC의 농도($5.3 \mu\text{gC}/\text{m}^3$)가 POC의 농도($4.0 \mu\text{gC}/\text{m}^3$)보다 높았다. 사례 3(10월 20~22일)은 국외 영향, 대기 정체 및 국지적인 영향이 결합된 경우로서, 그림 5와 7을 보면 중국 북동쪽에서 발생한 연무가 편서풍을 타고 국내로 유입되었다. 또한 한반도에 자리 잡은 고기압의 영향(그림 6)으로 대기 정체 현상(그림 3)이 발생해 오염물질들의 축적과 2차 미세먼지의 생성을 촉진시킨 경우이다. 사례 4(11월 2일)는 OC 농도가 가장 높았으며, 황사를 동반한 미세먼지가 유입됐던 10월 31일(그림 2(d))부터 점차적으로 증가하였다. 11월 2일에 측정된 OC/EC는 15.0으로 매우 높았으며, 바이오매스 연소의 지시자인 K⁺ 농도($0.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 역시 측정 기간 중 가장 높았다(그림 2(d)). 대기오염물질의 국외 유입과 K⁺의 농도 증가를 고려하면 바이오매스 연소와 장거리 수송에 의한 외부 영향이 사례 4의 OC 농도 증가에 대한 주요 원인이었을 것이다. 이때 SOC 농도($7.1 \mu\text{gC}/\text{m}^3$)는 측정 기간 중 가장 높았으며 총 OC의 61%를 차지해 SOA 생성이 활발했음을 짐작할 수 있다.

10월 27일에 측정된 PM_{2.5}는 PM_{2.5}의 농도 증가 사례에 해당되진 않았지만, OC와 EC 농도는 10.2와 $1.0 \mu\text{gC}/\text{m}^3$ 으로 매우 높았다. 이것은 10월 26일부터 27일까지 시료 채취 지점 주변에서 연기와 타는 냄새가

심하게 발생하여 나타난 결과이다. 10월 27일의 K⁺ 농도 역시 $0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가하였으며 11월 2일 다음으로 높았다(그림 2(d)).

3.3 무기 이온성분의 화학적 특성

석탄 화력발전소, 석유화학 산업시설 및 제철소 등에서 배출된 다량의 질소산화물과 아황산가스는 대기 중에서 균일 및 비균질 산화반응을 거친 후 암모니아와 만나서 미세먼지의 주요 성분인 황산암모늄과 질산암모늄염으로 변환된다(Kim *et al.*, 2017; Chow *et al.*, 1996). Kim *et al.* (2019)이 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality Model) 모델을 통해 충남지역 배출원에 대한 PM_{2.5} 기여도를 추정한 연구 결과에 의하면, 제조업 연소(44%), 에너지산업 연소(17.5%), 생산 공정(17.2%) 순서로 기여하였고, 이동오염원은 7.7%를 차지하였다. 이와 같은 결과는 충남 지역에 대규모로 분포하고 있는 연료의 연소 시설들과 생산 공정 등에서 발생된 질소산화물과 황산화물이 대기 중 변환 과정을 통해 미세먼지 생성에 상당한 기여를 하고 있음을 암시한다.

이온성분들의 평균 농도는 $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 PM_{2.5} 농도에 기여하였다. 2차 이온성분인 NO_3^- , NH_4^+ , 그리고 SO_4^{2-} 의 평균 농도는 각각 9.4, 3.8, $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며 OM 농도 다음으로 PM_{2.5}에 기여하였다. 일반적으로 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 농도비가 클수록 이동오염원(자동차 배기가스)의 영향이 크고, 1보다 작으면 점오염원(석

탄 연소 등)의 영향이 크다고 알려져 있다(Wu *et al.*, 2020). 연구에서 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 농도비의 평균값은 1.3 (0.1~5.5)으로 큰 변화폭을 보였으나, 1보다 작은 값이 약 56%를 차지하였다. 이는 가을철 연구 기간 중 측정 지점에서 NO_3^- 생성의 전구물질인 질소산화물의 배출은 이동오염원과 점오염원이 혼합되어 나타난 결과로 추정할 수 있다.

고농도 사례(사례 1~4) 발생시 NO_3^- , NH_4^+ 및 SO_4^{2-} 의 평균 농도는 각각 12.1 (9.4~14.7), 5.1 (3.8~6.6), 4.2 (2.1~5.2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 비-고농도 기간의 이들의 평균 농도보다 4.3, 2.8, 1.7배 증가하였다. 2차 이온성분들의 전체 농도는 15.5 (사례 1)~26.4 (사례 4) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 사례 4에서 가장 높았다. 사례 1의 기단의 이동 경로(그림 7)를 보면 현대 당진제철소와 당진 석탄 화력발전소 주변을 지나 측정 지점으로 유입되고 있었으며, 사례 3에서는 기단이 현대 당진제철소 주변을 지난 후 측정 지점으로 유입되고 있었다. 사례 4는 중국 북동쪽에서 발생한 연무의 장거리 이동과 기단의 흐름선상에 위치한 풍상의 산업 단지를 경유한 후 측정 지점에 유입된 경우에 해당한다. 앞 3.1 절에서 언급한 바와 같이 네 종류의 사례에서 확인된 매우 낮은 평균 풍속(0.7~1.4 m/s)과 매우 높은 상대습도(66~82%) 조건, 그리고 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도비를 고려하면 모든 사례에서 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 증가에 상당한 역할을 한 질산암모늄의 생성은 국외 유입에 의한 영향보다는 충남지역 점오염원과 이동오염원으로부터 배출된 질소산화물이 대기 정체 조건하에서 비균질 산화반응을 통해 생성되었을 것으로 추정한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2019년 가을(10월 1일~11월 4일)에 충남 서산시에 위치한 국립환경과학원 충청권 대기환경연구소에서 24시간 $\text{PM}_{2.5}$ 를 측정하여 이들의 오염 특성을 조사하였다. 연구 기간 중 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 증가는 유기물질과 NO_3^- 의 농도 증가에 기인하였다. 유기에어로졸 입자의 농도 증가는 자동차 배기가스

와 바이오매스 연소와 같은 1차 배출원과 SOA의 생성을 통해 이루어진 것으로 조사되었다. 연구 기간 중 환경부의 24시간 기준치를 초과한 $\text{PM}_{2.5}$ 사례는 총 4회 발생하였다. 종관기상패턴, $\text{PM}_{2.5}$ 예보 결과, MODIS 위성 영상 및 기단의 이동 경로를 분석한 결과에 의하면, 사례 1 (10월 10일), 사례 2 (10월 17일) 및 사례 4 (11월 2일)에 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 는 국외 유입보다는 국지적인 영향이 지배적인 반면에 사례 3 (10월 20~22일)의 경우는 국외의 장거리 유입과 국지적인 영향이 혼합된 사례에 해당하였다. SO_4^{2-} 의 농도는 NO_3^- 의 농도에 비해 매우 낮았으나, 국외 유입의 영향이 큰 사례 3에서 가장 높은 값이 측정되었다(10월 21일 7.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). 뿐만 아니라 모든 사례에서 측정된 낮은 풍속과 높은 상대습도는 대기오염물질의 축적과 2차 에어로졸 입자의 생성을 촉진하여 미세먼지의 농도 증가를 가져온 조건들로 작용하였다. 또한 시료 채취 지점과 가까운 곳에 목공소와 농가 주택 등이 위치하고 있어 측정 기간 중 빈번하게 바이오매스 연소로 인한 연기와 악취가 발생하여 유기 에어로졸과 K^+ 의 농도가 증가하는 사례들이 관측되었다.

결론적으로 충남 서산시에 위치한 측정 지점에서 가을철 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 수준을 환경기준치 이하로 유지하기 위해서는 바이오매스 소각 행위 근절과 사업장들로부터 배출되는 질소산화물의 양을 절대적으로 관리하여 질산염 입자의 생성을 제어할 필요가 있다. 그러나 이러한 결론은 측정기간(가을철 중 10월)과 측정 지점(1개소)을 고려할 때 연구기간 동안의 종관기상 특징, 당시의 사업장 및 바이오매스 배출원의 활동도 및 지점 측정의 공간 평가에 대한 대표성의 한계를 배제할 수 없으므로 4계절의 변화를 다수의 지점에서 장기적으로 분석하는 추가 연구를 통해 충남 서산시의 $\text{PM}_{2.5}$ 관리방안의 보완이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지

국가전략프로젝트사업의 지원을 받아 수행함 (2017 M3D8A1092015).

References

- Cao, J.-J., Shen, Z.-X., Chow, J.-C., Watson, J.-G., Lee, S.-C., Tie, X.-X., Ho, K.-F., Wang, G.-H., Han, Y.-M. (2012) Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 62(10), 1214-1226. <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.701193>
- Castro, L.-M., Pio, C.-A., Harrison, R.-M., Smith, D.-T. (1999) Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: Estimation of secondary organic carbon concentrations, *Atmospheric Environment*, 33(17), 2771-2781. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00331-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00331-8)
- Chow, J.-C., Watson, J.-G., Lu, Z., Lowenthal, D.-H., Frazier, C.-A., Solomon, P.-A., Thuillier, R.-H., Magliano, K. (1996) Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during sjvaqs/auspex, *Atmospheric Environment*, 30(12), 2079-2112. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00402-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00402-5)
- 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 Physics*, 16, 13321-13340. <https://doi.org/10.5194/acp-16-13321-2016>
- Hegde, P., Vyas, B.-M., Aswinia, A.-R., Aryasree, S., Nair, P.-R. (2020) Carbonaceous and water-soluble inorganic aerosols over a semi-arid location in north west India: Seasonal variations and source characteristics, *Journal of Arid Environments*, 172, 104018. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104018>
- Huang, X.-F., Yu, J.-Z., He, L.-Y., Yuan, Z. (2006) Water soluble organic carbon and oxalate in aerosols at a coastal urban site in China: Size distribution characteristics, sources, and formation mechanisms, *Journal of Geophysical Research*, 111(D22). <https://doi.org/10.1029/2006JD007408>
- Kim, E.-H., Kim, H.-C., Kim, B.-U., Kim, S.-T. (2019) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 226-248, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.226>
- Kim, H.-S., Heo, J.-B., Hopke, P.-K., Holsen, T.-M., Yi, S.M. (2007) Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and some events in Seoul, Korea in 2003 and 2004, *Atmospheric Environment*, 41(32), 6762-6770. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.060>
- Kim, H.-S., Jung, J.-S., Lee, J.-H., Lee, S.-I. (2015) Seasonal Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Daejeon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 28-40, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.1.028>
- Kim, S.-T., Kim, O.-I., Kim, B.-U., Kim, H.-C. (2017) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.159>
- Lee, B.-J., Park, S.-S. (2019) Temporal and Spatial Variabilities of Concentrations of Criteria Air Pollutants during Early Summer in 2018 in South Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 265-281, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.265>
- Malm, W.C., Molnar, J.V., Eldred, R.A., Sisler, J.F. (1996) Examining the relationship among atmospheric aerosols and light scattering and extinction in the Grand Canyon area, *Journal of Geophysical Research*, 101(D14), 19251-19265. <https://doi.org/10.1029/96JD00552>
- Park, J.-S., Han, J.-S., Ahn, J.-Y. (2013a) The Research Trend of Asian Dust Storm (AD) of Korea and Recent Episode Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 553-573, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.5.553>
- Park, S.S., Sim, S.Y., Bae, M.S., Schauer, J.J. (2013b) Size distribution of water-soluble components in particulate matter emitted from biomass burning, *Atmospheric Environment*, 73, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.025>
- Park, S.S., Yu, J. (2016) Chemical and light absorption properties of humic-like substances from biomass burning emissions under controlled combustion experiments, *Atmospheric Environment*, 136, 114-122.

- <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.022>
- Park, S.-S., Yu, G.-H. (2018) Effect of Air Stagnation Conditions on Mass Size Distributions of Water-soluble Aerosol Particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 418-429, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.418>
- Park, S. (2019) Change in Mass Size Distributions of Ambient Aerosol Particles during Asian Dust Storm Event in Late Fall at an Urban Site of Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 502-515, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.502>
- Saarikoski, S., Timonen, H., Saarnio, K., Aurela, M., Jarvi, L., Keronen, P., Kerminen, V.M., Hillamo, R. (2008) Sources of organic carbon in fine particulate matter in northern European urban air, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6281-6295. <https://doi.org/10.5194/acp-8-6281-2008>
- Shubhankar, B., Ambade, B. (2016) Chemical characterization of carbonaceous carbon from industrial and semi urban site of eastern India, SpringerPlus, 837. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2506-9>
- Turpin, B.J., Lim, H.J. (2001) Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass, *Aerosol Science and Technology*, 35(1), 602-610. <https://doi.org/10.1080/02786820152051454>
- Wang, X., Hu, Z., Adeosun, A.-A. (2018) Particulate matter emission and K/S/Cl transformation during biomass combustion in an entrained flow reactor, *Journal of the Energy Institute*, 91(6), 835-844. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.10.005>
- Weber, R.-J., Sullivan, A.-P., Peltier, R.-E., Russell, A., Yan, B., Zheng, M., Gouw, J.-D., Warneke, C., Brock, C., Holloway, J.-S., Atlas, E.-L., Edgerton, E. (2007) A study of secondary organic aerosol formation in the anthropogenic-influenced Southeastern United States, *Journal of Geophysical Research*, 112(D13). <https://doi.org/10.1029/2007JD008408>
- Wu, X., Chen, B., Wen, T., Habib, A., Shi, G. (2020) Concentrations and chemical compositions of PM₁₀ during hazy and non-hazy days in Beijing, *Journal of Environmental Sciences*, 87, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.021>
- Xu, Q., Wang, S., Jiang, J., Bhattarai, N., Li, X., Chang, X., Qiu, X., Zheng, M., Hua, Y., Hao, J. (2019) Nitrate dominates the chemical composition of PM_{2.5} during haze event in Beijing, China, *Science of The Total Environment*, 689, 1293-1303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.294>
- Yu, G.-H., Cho, S.-Y., Bae, M.-S., Lee, K.H., Park, S.S. (2015) Investigation of PM_{2.5} pollution episodes in Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 269-286, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.269>
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Ghim, Y.-S., Shin, H.-J., Lim, C.-S., Ban, S.-J., Yu, J.-A., Kang, H.-J., Seo, Y.-K., Kang, K.-S., Jo, M.-R., Jung, S.-A., Lee, M.-H., Hwang, T.-K., Kang, B.-C., Kim, H.-S. (2018a) Difference in Chemical Composition of PM_{2.5} and Investigation of its Causing Factors between 2013 and 2015 in Air Pollution Intensive Monitoring Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 16-37, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.016>
- 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. (2018b) Pollution Characteristics of PM_{2.5} 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). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.038>
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Lim, Y.-J., Shin, H.-J., Lee, S.-B., Kim, Y.-S. (2018c) Investigation on Characteristics of High PM_{2.5} 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., 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_{2.5} 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., Jung, S.-A., Jo, M.-R., Lim, Y.-J., Lee, S. (2019b) A Comparison of Carbonaceous Components between Semi-continuous and Filter-based Measurements Using Thermal-optical Transmittance Method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 395-403, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.395>
- Yu, J., Yu, G.-H., Park, S., Bae, M.-S. (2017) Chemical and absorption characteristics of water-soluble organic carbon and humic-like substances in size-segregated parti-

cles from biomass burning emissions, Asian Journal of Atmospheric Environment, 11(2), 96-106. <https://doi.org/10.5572/ajae.2017.11.2.096>

Authors Information

주서령 (전남대학교 환경에너지공학과 대학원생 (석사과정))
유근혜 (전남대학교 환경에너지공학과 박사후과정 연구원)

박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)
이지이 (이화여자대학교 환경공학과 교수)
지준범 (한국외국어대학교 대기환경연구센터 책임연구원)
이상일 (한국표준과학연구원 가스분석센터 책임연구원)
이광열 (국립환경과학원 대기환경연구과 충청권 대기환경
연구소 환경연구사)
이민도 (국립환경과학원 대기환경연구과 충청권 대기환경
연구소 환경연구관)