

논문

2018년 11월 광주 지역에서 발생한 미세먼지 고농도 사례 시 수용성 성분의 크기 분포 조사

Mass Size Distributions of Water-soluble Aerosol Particles during High Fine Particulate Matter Episode over Gwangju in November 2018

손세창, 박승식*

전남대학교 환경에너지공학과

Se-Chang Son, Seungshik Park*

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

접수일 2019년 6월 12일
 수정일 2019년 7월 12일
 채택일 2019년 7월 15일

Received 12 June 2019
 Revised 12 July 2019
 Accepted 15 July 2019

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

Abstract In this study, mass size distributions of ambient aerosol particles and their water-soluble organic and inorganic species were investigated under high pollution episode. To achieve the aim of this study, 24-hr integrated size-segregated aerosol samples were collected at an urban site of Gwangju between November 02 and 16, 2018, and analyzed for mass, water-soluble organic carbon (WSOC), and ionic species. During study period, a high pollution episode of fine particulate matter (PM) occurred between November 02 and 07, possibly due to high pressure developed around Korean peninsula, extremely stable air conditions, and long-range transportation of aerosol particles from North Korea and northeastern China region. On November 02~03 when influence of local pollution dominated, ambient aerosol particles, WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+ exhibited bi-modal size distributions with a condensation mode at a particle size of $0.32 \mu\text{m}$ and a droplet mode at a particle size of $1.0 \mu\text{m}$ in $\text{PM}_{1.8}$. While, between November 05 and 07 when long-range transportation of PM was mixed with locally-produced pollution, they showed very pronounced droplet mode size distributions at $1.0 \mu\text{m}$, without a condensation mode. NO_3^- concentration in $\text{PM}_{1.8}$ during pollution episode increased significantly from $5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on November 02 to $21.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on November 06, while SO_4^{2-} in $\text{PM}_{1.8}$ increased from 1.6 to $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicating the dominance of local pollution during pollution episode. Furthermore, for WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+ , fraction of droplet mode size ($\text{PM}_{0.55-1.8}$) to $\text{PM}_{1.8}$ increased gradually as PM pollution got increased, while the condensation mode ($\text{PM}_{0.17-0.32}$) contribution decreased. In addition, it was demonstrated that relative humidity could be an important factor promoting formation of droplet mode WSOC, NO_3^- , and SO_4^{2-} .

Key words: High pollution episode, Mass size distribution, Water-soluble organic carbon, Secondary ionic species, Condensation mode, Droplet mode

1. 서론

대기 에어로졸 입자는 복사 효과에 의해 지구 기후에 직·간접적으로 영향을 미치며 가시거리의 악화와 인간의 건강을 위협한다(Bellouin *et al.*, 2005). 또한,

구름 내 존재하는 액적의 수명과 알베도를 변화시키고, 강수 및 대기 중 광화학 반응에 영향을 미치며 궁극적으로는 지구의 에너지 수지에 큰 영향을 미친다(Lin *et al.*, 2014). 인간의 생활환경과 기후에 많은 영향을 미치는 대기 에어로졸 입자의 고농도 현상은 도

시지역 대기오염 문제의 주요한 원인이다. 미세먼지의 고농도 발생 원인은 대기오염물질의 국지적 발생과 장거리 이동, 안정한 기상조건에서 오염물질의 축적과 2차 생성에 기인한다(Yu *et al.*, 2019, 2018a; Park and Yu, 2018; Ma *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2015). 미세먼지의 고농도 현상 발생 시 관찰된 일반적인 기상 조건은 낮은 풍속, 높은 상대습도, 지상 고기압, 낮은 대기 경계층 높이 등이었다(Yu *et al.*, 2019, 2018a; Park *et al.*, 2013a; Zhao *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2006). 기온과 상대습도와 같은 기상 요인들은 대기 에어로졸 입자의 크기 분포 특성, 농도 및 화학적 성상에 큰 영향을 주며(Kaskaoutis *et al.*, 2013; Verma *et al.*, 2013; Väkevä *et al.*, 2000), 풍속과 대기 경계층의 높이는 대기의 안정도에 영향을 주어 대기오염물질의 확산과 정체 현상에 주요한 작용을 한다. 특히, 상대습도는 에어로졸 입자의 성장, 크기 및 광학적 특성에 많은 영향을 주며(Castro *et al.*, 2010), 높은 상대습도 하에서 NO₂와 SO₂의 불균일 화학반응을 통한 2차 이온성분의 생성에 영향을 미친다(Wang *et al.*, 2017, 2015; Tan *et al.*, 2016).

Yu *et al.* (2016)은 광주광역시에서 2012년 9월부터 2013년 8월까지 6일 간격으로 채취한 대기 에어로졸 입자의 입경별 수용성 유기탄소(water-soluble organic carbon, WSOC)와 2차 이온성분들의 생성 과정을 조사하였으며, PMF(positive matrix factorization) 수용모델을 이용해 입경별 WSOC의 오염원을 평가하였다. 그리고 비-연무 기간과 연무 기간 중 측정된 SO₄²⁻, NO₃⁻, WSOC 및 HULIS(humic-like substances)의 질량크기분포는 기상 상태에 따라 상당히 달라진다고 하였다. Park and Yu (2018)은 광주 지역에서 2018년 3월 하순에 발생한 고기압과 대기 정체로 인한 대기 에어로졸 입자의 오염 현상을 규명하기 위하여 입경별 WSOC, HULIS 및 이온성분들을 분석하였으며, 기상조건의 변화가 이들의 생성 과정과 입경분포 변화에 큰 영향을 주었음을 확인하였다. 대기 에어로졸 입자의 고농도 현상 발생 시 입자의 생성 과정을 명확히 이해하고 이들의 저감 방안을 도출하기 위

해서는 주요 화학적 성분들의 입경분포에 대한 정보가 필요하다(Park and Yu, 2019, 2018; Yu *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2016; Park and Son, 2016; Xu *et al.*, 2015; Park and Kim, 2014; Park and Shin, 2013; Castro *et al.*, 2010). 그러나 미세먼지의 고농도 현상 발생 시 화학적 특성과 생성 과정을 규명한 연구들은 주로 PM_{2.5}에 집중되어 왔으나(Yu *et al.*, 2019, 2018a; Wang *et al.*, 2017; Tan *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2015), 여전히 풍속, 상대습도 등과 같은 기상 조건의 변화에 따른 대기 에어로졸 입자의 입경분포 조사와 화학적 성분들의 입경별 생성 과정에 대한 이해가 필요하다.

본 논문에서는 광주광역시에서 연무와 함께 미세먼지의 고농도 현상이 발생했던 2018년 11월 초에 다단 입פק터를 이용하여 약 15세트의 대기 에어로졸 입자를 입경별로 채취하였다. 논문에서 미세먼지의 고농도 기준은 환경부의 24시간 평균 PM_{2.5} 기준치(35 µg/m³)를 초과하는 경우로 규정하였다. 채취된 시료들은 입경별 질량농도, 수용성 이온 및 유기성분을 분석하는 사용하였다. 연구에서는 대기 에어로졸 입자와 주요 수용성 성분들의 질량 크기 분포가 미세먼지 고농도 사례가 발생하기 전, 진행 중, 그리고 후에 어떤 변화 과정을 보이는지 조사하였다. 또한 상대습도와 축적모드에 존재하는 주요 수용성 성분들의 2차 생성과의 관계를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 대기 에어로졸 입자의 입경별 시료 채취

광주광역시에 위치한 전남대학교의 한 건물 3층 옥상에서 2018년 11월 2일부터 11월 16일까지 24시간 기준의 입경별 대기 에어로졸 입자를 채취하였다. 대기 에어로졸 입자의 시료 채취는 편도 2차선 도로에서 약 150 m 떨어진 지점에서 이루어졌다. 측정 지점에 대한 부연 설명은 과거 논문들에 상세히 기술되어 있다(Park and Yu, 2018; Park and Son, 2016; Park *et al.*, 2015; Son *et al.*, 2015). 입경별 시료 채취는 30

L/min의 유량으로 설계된 10단의 MOUDI (Micro-Orifice Uniform Deposition Impactor, MSP110, USA)를 이용하여 이루어졌으며 매일 오전 09:00경에 시작하여 약 24시간 동안 진행하였다. MOUDI는 0.055, 0.095, 0.17, 0.32, 0.55, 1.0, 1.8, 3.1, 6.2, 9.9 및 18 μm 의 분리입경을 가지며, 47 mm 직경의 테플론 여과지(2.0 μm pore size, Teflo filter)를 사용한 마지막 단(back-up stage, <0.055 μm)을 제외한 단에는 47 mm 직경의 알루미늄 호일 여과지가 시료 채취에 사용되었다. 게다가 dual-spot 다과장 aethalometer (AE33, Aerosol d.o.o, Slovenia)를 이용하여 $\text{PM}_{2.5}$ 내 BC (black carbon) 농도를 1분 단위로 측정하였다. Aethalometer의 측정 원리에 대한 자세한 내용은 Yu *et al.* (2018b)의 논문에서 확인이 가능하다.

2.2 입경별 질량농도와 수용성 성분 농도 결정

대기 에어로졸 입자의 입경별 질량농도는 각 단에서 사용한 알루미늄 호일과 테플론 여과지의 시료 채취 전·후의 무게를 마이크로밸런스(Satorius CP2P-F)로 칭량하여 결정하였다.

무게 측정이 끝난 여과지들은 수용성 성분들(WSOC와 이온성분)의 정량화를 위해 40 mL의 바이알에 넣은 후 36 mL의 초순수를 주입하여 상온에서 60분 동안 초음파 추출을 진행하였다. 추출액은 0.25 μm 의 시린지 필터를 이용해 여과 후 TOC (Total Organic Carbon, Sievers 5310C, USA) 분석기로 정량하였다. WSOC를 분석하고 남은 추출액은 이온크로마토그래피(Metrohm 930 Compact IC Flex, Switzerland)를 이용하여 8종의 이온성분(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})을 분석하였다. 마지막으로 입경별 WSOC와 이온성분들의 최종농도는 두 종류 여과지의 공시료 배경농도를 보정하여 결정하였다. WSOC와 이온성분 분석에 대한 상세 정보는 기존 연구논문들에 잘 서술되어있다(Park and Yu, 2019, 2018; Park *et al.*, 2015; Son *et al.*, 2015).

3. 결과 및 고찰

3.1 시간 평균 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 및 기상 변수들의 변화

그림 1(a)은 2018년 11월 2일에서 11월 16일까지 측정 지점에서 약 1.5 km 떨어진 위치에 있는 광주광역시 두암동 도시대기측정망에서 측정한 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 시간 변화를 보여준다. 그림 1(b)는 880 nm 파장에서 측정한 1시간 평균 BC의 농도 변화, 그림 1(c)는 두암동 도시대기측정망에서 얻어진 NO_2 와 O_3 의 농도 추이를 보여준다. 그리고 그림 1(d)와 (e)에 측정 지점에서 약 1.5 km 떨어진 광주지방기상청에서 측정한 기온, 상대습도, 풍속 및 해면 기압의 시간적 변화를 나타내었다. 연구 기간 중 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 24시간 평균 농도는 51.6 (19.2~89.0)과 34.6 (10.2~65.2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, PM_{10} 농도의 65.6 (54.4~74.7)%가 $\text{PM}_{2.5}$ 에 해당하였다. 또한, 기온, 상대습도, 풍속 및 기압의 평균값은 각각 11.7 (9.1~14.4)°C, 78 (65~96)%, 0.9 (0.5~2.7) m/s, 1,022 (1,014~1,027) hPa이었다. 그림 1(e)와 지상 일기도에 의하면 11월 7일에 한반도로 저기압이 통과(<http://www.weather.go.kr/weather/images>)하며 오후부터 비가 내리고 서풍이 동풍으로 바뀌며 미세먼지 농도가 감소하기 시작했다. 이로 인해 11월 8일에 약 27 mm의 강우가 발생하였으며 이 때 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 24시간 평균 농도는 세정효과로 인해 19.2와 10.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 낮았다. 11월 9일 오전에 비가 그치면서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 다시 증가하였으며 11일까지 상당히 안정적인 농도를 유지하였다. 11월 11일에도 약 5 mm의 강우가 존재하였으나 강우량이 적어 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 감소에 큰 영향을 주지 못했으며, 이들의 농도는 61.8과 44.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 수준이었다.

그림 1(a)을 살펴보면 11월 2일부터 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 점진적인 증가 추세를 보이며 11월 7일 00:00~12:00 사이에 최고치를 보인 후, 11월 8일 이후 강우 현상과 빠른 풍속 조건(그림 1(e))에 의해 급격히 감소하였다. 11월 7일 00:00~12:00 사이의 풍속은

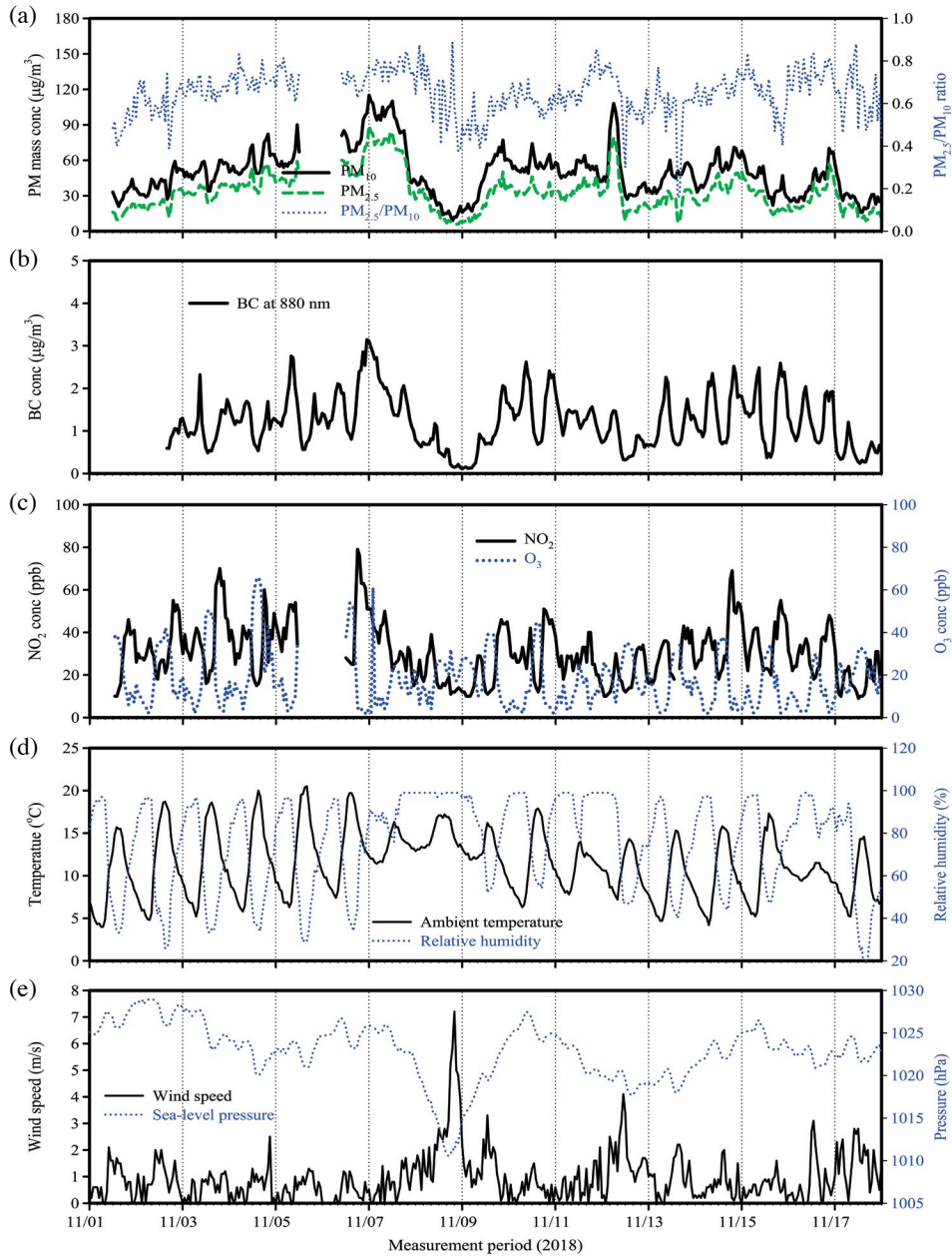


Fig. 1. Temporal profiles of PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}/PM_{10}$, BC, NO_2 , O_3 , and some meteorological parameters.

0.1~1.4 m/s, 기온은 11.4~15.6°C, 상대습도는 80~91%, 기압은 1,025~1,026 hPa, 그리고 BC 농도는 2.7~3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다. 11월 6일 저녁 시간(18:00~23:00)에 측정된 NO_2 의 높은 농도(51~79

ppb), 높은 상대습도, 그리고 매우 안정한 바람(0.1~0.8 m/s)은 NO_2 의 불균질 반응을 통한 2차 질산염 입자의 생성을 촉진시킬 수 있는 조건들이었다(Yu *et al.*, 2019, 2018a, 2017). 이와 같은 기상조건들은 국지

적으로 2차 에어로졸 입자의 생성을 활성화하여 11월 7일 00:00~12:00 사이의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도를 97~115와 73~89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가시킨 한 원인이었을 것이다. 그러나 11월 7일 오후부터 8일 사이에 발생한 강우와 강한 풍속은 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도를 크게 감소시켰다. 그 이후 11월 9일부터 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도는 다시 증가하기 시작하여 11월 12일 03:00까지 상당히 안정한 농도 수준을 유지하였다. 그림 1(b)의 BC의 농도 윤곽 역시 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 시간별 농도 변화와 매우 비슷하였다. 이 의미는 자동차 운행과 관련된 화석 연료의 불완전 연소과정이 $PM_{2.5}$ 의 배출 특성과 밀접하게 관련되었음을 암시한다. 그러나 11월 12일 04:00~08:00 사이에 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도가 급증하는 현상이 발생하였으며 이들의 최고 농도는 06:00에 관측되었다. 이 때 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 및 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 은 각각 86~108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 68~79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.72~0.79로 분포하였다. 풍속, 온도, 상대습도, 그리고 해면 기압은 1.2~2.5 m/s, 7.2~8.6°C, 91~98%, 1,019~1,020 hPa이었으며 NO_2 의 농도는 12~30 ppb로 낮은 수준이었다. 그러나 자동차 배기가스의 지시자(indicator)로 알려진 880 nm에서 BC 입자는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 급격한 농도 증가와 달리 농도 증가가 두드러지지 않았다. 1시간 평균 BC 농도는 1.0~1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 비교적 낮은 BC 농도를 고려할 때, $PM_{2.5}$ 의 급격한 농도 증가는 연소 배출원뿐만 아니라 국지적인 2차 생성(낮은 기온과 높은 상대습도) 또는 외부로부터 장거리 수송에 의한 미세먼지의 유입에 의한 것으로 추정한다.

3.2 미세먼지 고농도 발생 시 한반도 주변 기압배치와 기단의 이동 경로

그림 2는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도가 지속적으로 증가하는 기간 중 11월 2일, 6일, 7일 및 11일의 지상일기도(<http://www.weather.go.kr/weather/images>)를 보여준다. 또한 해당 일에 측정 지점으로 유입되는 기단의 이동경로를 계산하여 그림 2에 나타내었다. 기단의 이동 경로 계산은 미국 해양대기청에서 제공하는

Hysplit 역궤적 모델(Rolph *et al.*, 2017)을 사용하여 세 고도(200, 500 및 1,000 m AGL)에서 3일 간격으로 수행하였다. 11월 2일, 6일 및 7일의 일기도에 의하면 한반도와 서해상(2일), 중국 북동지방(6일), 그리고 중국 동쪽지역(7일)에 자리 잡은 고기압의 영향으로 한반도 주변의 대기 정체 상태가 지속되면서 대기오염물질의 축적과 2차 생성이 해당 기간의 미세먼지 농도 증가의 한 원인이었을 것이다. 그림 1(e)을 보면 국지적으로는 11월 2일~7일 사이의 풍속이 2 m/s 이하의 대기 정체와 야간 복사냉각에 의한 역전층 형성, 안개 및 높은 습도(그림 1(d))로 인해 지속적인 오염물질의 축적 및 2차 미세먼지 생성이 유리하게 형성되는 기상 조건들이었다.

또한 측정 지점으로 유입되는 기단의 이동 경로를 통해 미세먼지의 농도 증가 원인을 살펴보았다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 증가가 시작되는 11월 2일에는 중국 북동쪽에서 시작된 기단은 북한지역, 수도권 및 서해안 오염 지역을 지나면서 측정 지점으로 유입되었다. 11월 6일에는 기단이 대기오염물질의 배출원이 밀집되어 있는 중국 산둥반도에서 시작하여 북한지역 및 서해 충청남도 지역을 남하하면서 유입되고 있었다. 11월 7일에는 기단이 서해안 및 국내 내륙지역을 통해 유입이 되었다. 정리하면 11월 2일~7일 사이의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 증가는 서해상, 한반도 및 중국 북동지방의 고기압 영향 하에 대기 정체 상태가 지속되면서 국내 오염물질이 축적되고(11월 2일~5일) 외부로부터 오염물질의 유입(5일 야간~7일)이 더해지면서 미세먼지의 고농도가 가중되었다. 11월 11일의 일기도(11월 11일 12:00 UTC)와 공기 역궤적 해석 결과(11월 11일 21:00 UTC)에 의하면 기단이 중국 북동쪽과 산둥반도에서 시작한 후 서해를 경유하여 충남지역을 통해 측정 지점에 유입이 되었다. 이는 앞서 설명한 기상 조건들과 기단의 유입 이동 경로를 고려하면 11월 12일 새벽 시간에 발생한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 고농도 사례는 국지적인 요인뿐만 아니라 국외에서 오염물질의 유입이 더해지면서 나타난 현상으로 보인다.

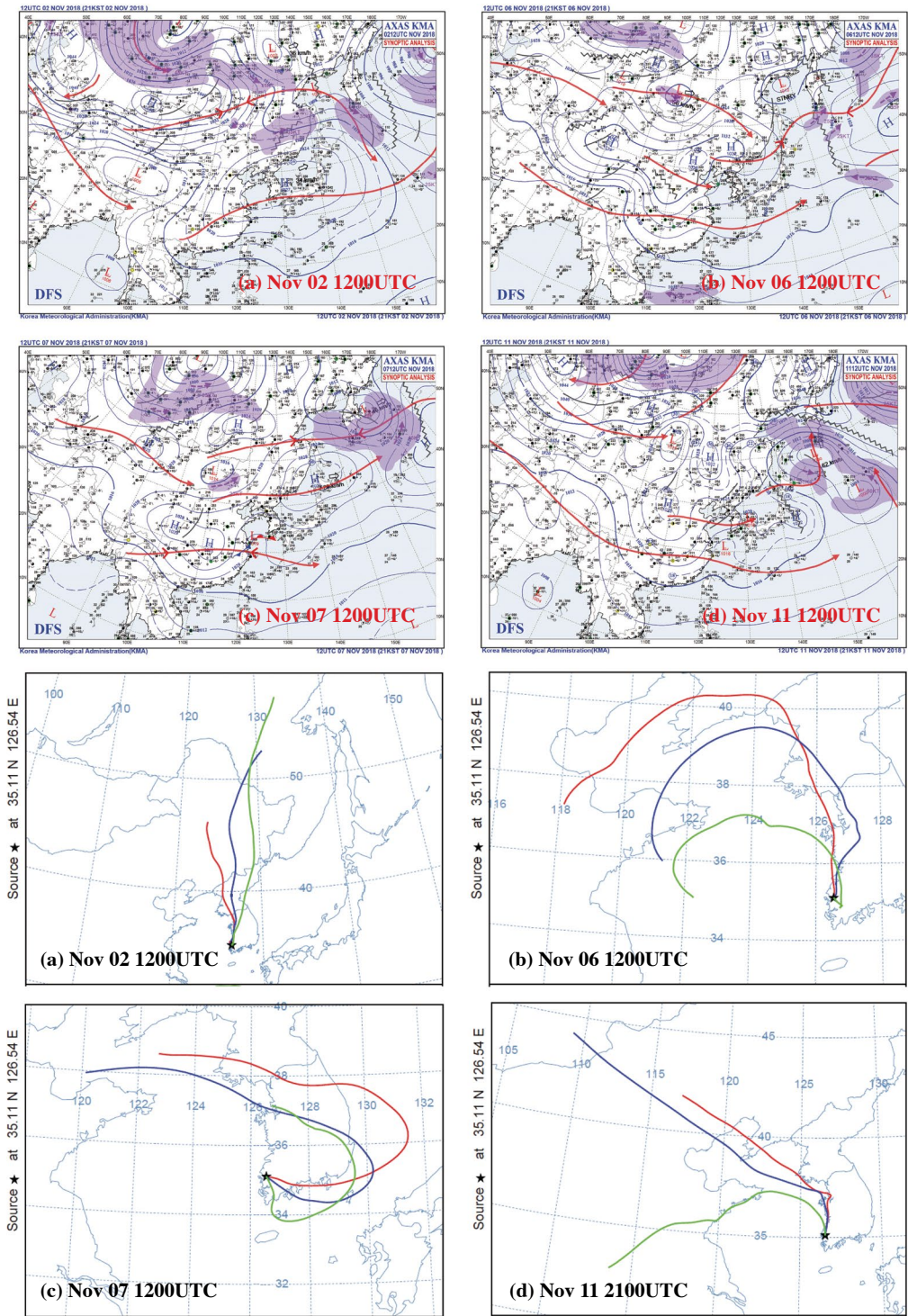


Fig. 2. Weather charts and transport pathways of air masses arriving at the site. Red, blue, and green lines indicate backward trajectories at 200 m, 500 m, and 1,000 m AGL.

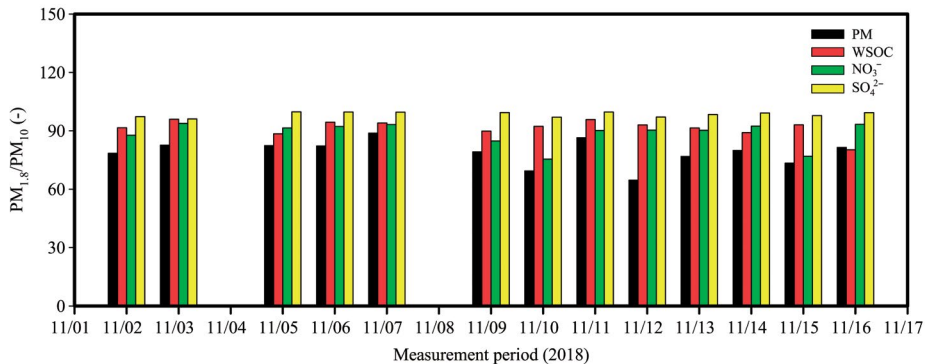


Fig. 3. PM_{1.8}/PM₁₀ ratio for PM, WSOC, NO₃⁻, and SO₄²⁻.

3.3 대기 에어로졸 입자의 크기분포

그림 3은 측정 기간 중 입경별 PM, WSOC, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 농도가 PM₁₀ 중 PM_{1.8}이 차지하는 비율을 나타낸 그림이다. PM_{1.8}에 함유되어 있는 PM, WSOC, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 농도는 PM₁₀ 중의 64.6~88.8%, 80.3~95.8%, 75.5~93.8%, 96.1~99.7%를 차지하였다. 이들의 최대 비율은 11월 7일 또는 11일 11일에 확인되었다. 특히 SO₄²⁻의 경우는 PM₁₀의 대부분이 PM_{1.8}에 해당하였다.

그림 4는 11월 2일부터 16일 사이의 대기 에어로졸 입자와 WSOC의 질량크기분포를, 그림 5는 NO₃⁻, SO₄²⁻, 그리고 NH₄⁺의 질량크기분포를 나타내었다. 미세먼지의 농도 증가가 시작되는 11월 2일과 3일에 대기 에어로졸 입자, WSOC, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺는 삼산형 모드(tri-modal) 크기분포(0.32 μm, 1.0 μm 및 3.1~6.2 μm)를 보여주었다. 그러나 그 이후(11월 5일~)에는 이들의 크기분포는 대부분은 1.0 μm와 3.1 또는 6.2 μm에서 두드러진 이산형 모드(bi-modal)를 보였다. 그러나 Yu *et al.* (2016)이 동일 지점에서 약 1년간 6일 간격으로 측정된 대기 에어로졸과 수용성 유기 및 2차 이온 성분들의 질량크기분포는 액적모드가 1.0 μm 아닌 0.55 μm에서 대부분 관측되었다. 이와 같이 두 연구에서 액적모드가 나타나는 입경이 다른 이유는 기상 조건(고기압 형성, 대기 정체 등), 에어로졸의 대기 숙성 정도, 외부로부터 장거리 이동을 통한 입자의 유입 여부 등의 차이에 의해 기인한 것으로 판

단된다. 0.1~1.0 μm의 입자크기에 해당하는 축적모드(accumulation mode)는 입자의 생성 기작에 따라 다시 응결모드(condensation mode)와 액적모드(droplet mode)로 구분한다. 응결모드는 VOC, SO₂, NO₂ 등의 전구물질들이 산화제(예를 들어, OH·)와의 기상 반응과 생성 기체의 응결과정을 통해 생성되며, 보통 0.2~0.3 μm의 크기에서 모드가 나타난다(Seinfeld and Pandis, 2006). 반면에, 액적모드에 존재하는 입자들은 주로 불균일 과정 또는 액상 반응을 통해 생성되며, 보통 ~0.7 μm의 크기에서 모드가 나타나는 것으로 알려져 있다(Yu *et al.*, 2017; Seinfeld and Pandis, 2006). 그리고 응결모드에 존재하는 입자는 대기 정체와 높은 상대습도 조건 또는 장거리 이동에 의한 오염물질의 유입 하에서 1.0 μm까지 입자의 성장이 일어나기도 한다(Park and Yu, 2019, 2018; Yu *et al.*, 2017; Park and Son, 2016; Seinfeld and Pandis, 2006). 과거 연구 결과들을 종합하면 본 연구에서 조사한 WSOC, NO₃⁻, SO₄²⁻ 및 NH₄⁺의 1.0 μm의 입자크기에서 나타난 액적모드는 수용액 상의 불균일 반응 또는 구름 내 변환과정을 통해 생성되었을 것으로 추정된다. 또한 대기 정체와 높은 상대습도와 같은 기상 조건이 액적모드의 입자크기(0.5~0.7 μm)를 1.0 μm까지 성장시켰을 것으로 추정한다.

11월 2일과 3일의 대기 입자는 응결모드(0.32 μm), 숙성된 액적모드(1.0 μm), 그리고 조대모드(3.1~6.2 μm)의 삼산형 크기분포를 보여주고 있으나, 액적모

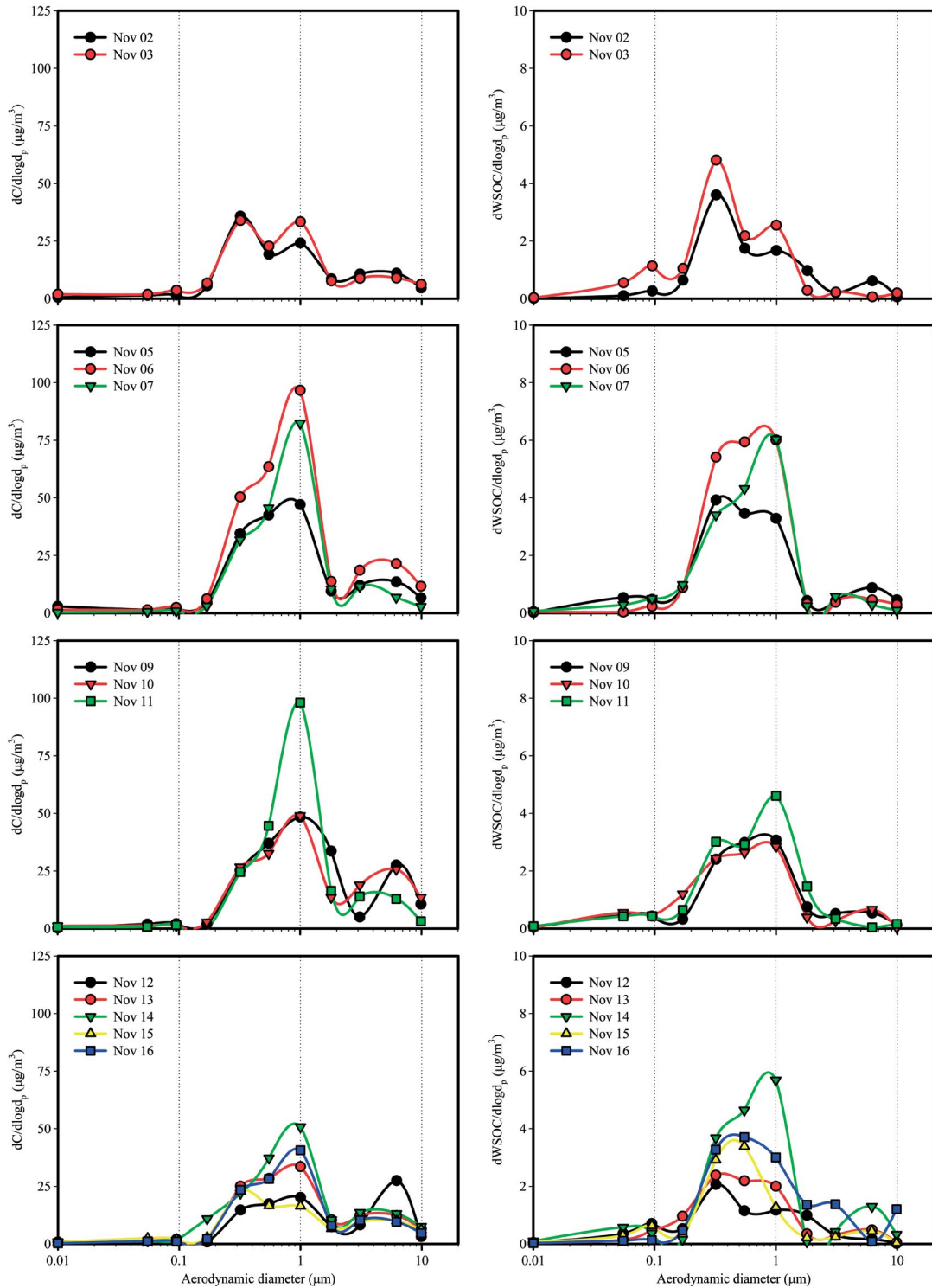


Fig. 4. Mass size distributions of PM (left) and WSOC (right) during the study period.

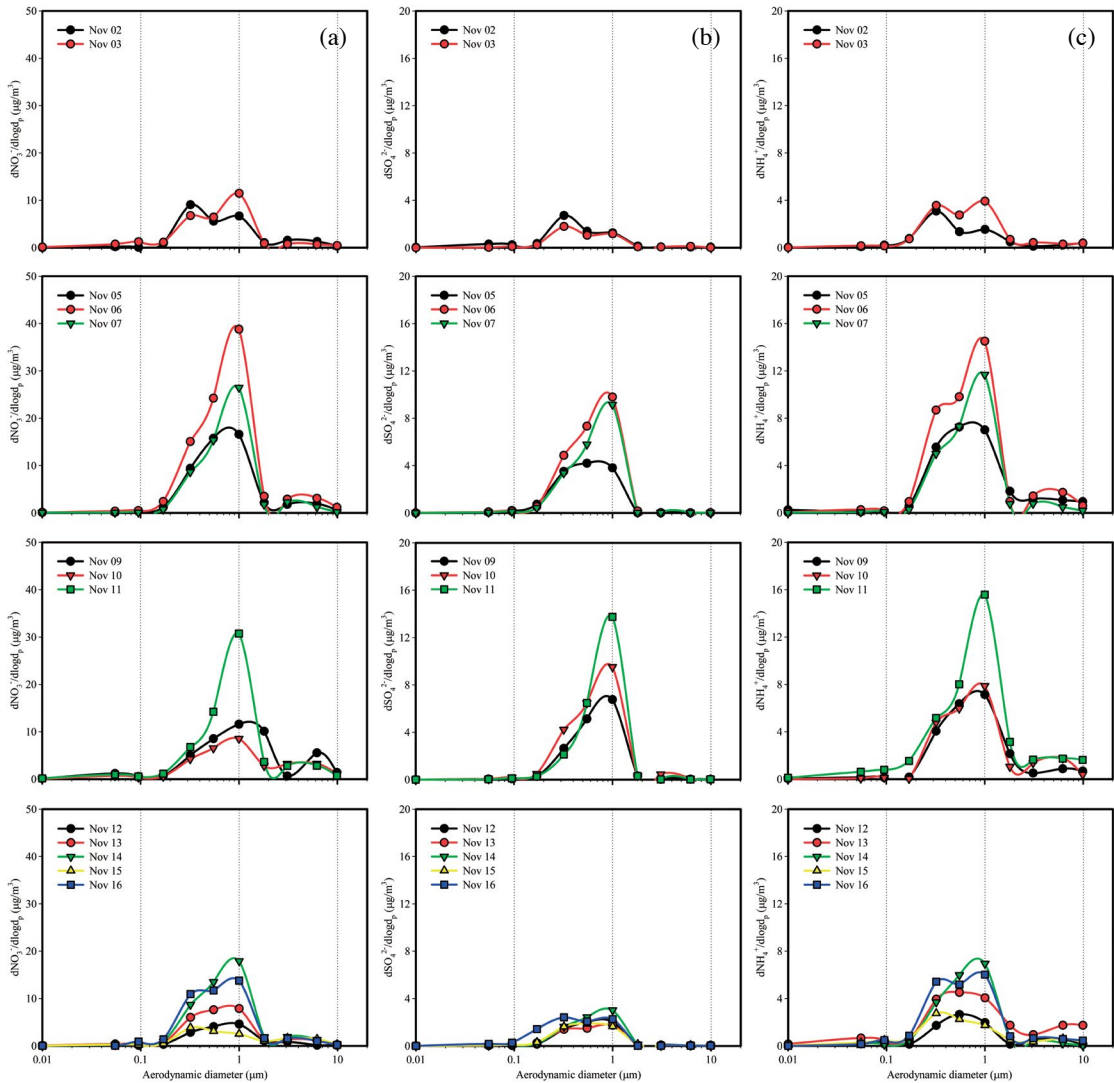


Fig. 5. Mass size distributions of (a) NO_3^- , (b) SO_4^{2-} , and (c) NH_4^+ during the study period.

드의 크기분포가 2일보다는 3일에 더 두드러졌다. 이것은 그림 5에서 볼 수 있듯이 질산암모늄의 액적모드의 질량크기분포의 증가에 기인하였다. 그림 5에서 NO_3^- 와 NH_4^+ 의 질량크기분포는 응결모드에서는 2일과 3일에 큰 차이는 없으나 액적모드에서는 2일보다는 3일에 약 2배 증가한 크기분포를 보여주었다. 이는 고기압과 대기 정체가 지속되면서 국지적으로 광화학 산화반응을 통해 응결모드에 생성된 질산암모늄

이 액적모드로의 성장과 액상반응을 통해 액적모드에 생성된 질산암모늄의 숙성(성장)에 의해 나타난 결과로 보인다. 그러나 SO_4^{2-} 의 경우는 NO_3^- 및 NH_4^+ 와 다르게 액적모드보다는 응결모드에서 더 큰 크기분포를 보여주고 있으나, NO_3^- 의 응결모드보다는 2배 이상 낮은 질량크기분포를 보여주었다. 이에 대한 설득력 있는 설명은 그림 2에서 언급한 대로 국외 유입이 적은 기상 조건하에서는 국지적인 NO_3^- 의 생성

이 증가하여 상대적으로 SO_4^{2-} 의 응결모드의 생성이 낮았기 때문이다. WSOC의 경우도, SO_4^{2-} 와 유사하게 액적모드보다는 응결모드에서 더 두드러진 질량크기 분포를 보여주고 있으며 11월 2일보다는 11월 3일에 더 큰 크기분포가 조사되었다. 11월 3일에 WSOC의 응결모드 크기분포가 NO_3^- 의 응결모드의 크기분포와 다르게 증가한 이유는 아마도 WSOC와 NO_3^- 의 생성을 야기하는 전구물질들의 오염배출특성과 생성 과정이 다르기 때문으로 사료된다. 즉, WSOC는 연소 오염원(생물성 연소, 자동차 배기가스 등)을 통해 직접 배출(1차 오염원)되거나 휘발성 유기화합물의 대기산화과정(2차 생성)을 통해 생성되지만, NO_3^- 는 질소산화물(주로 자동차 배기가스에서 배출)의 균일 또는 불균일 산화과정을 통해서 생성되기 때문이다. Park *et al.* (2013b)의 연구에 의하면 약 10종의 바이오매스 연소과정 중 배출된 연기 입자의 크기분포에서 WSOC와 K^+ 성분은 동일하게 $0.32 \mu\text{m}$ 또는 $0.56 \mu\text{m}$ 에서 모드가 나타났다. 본 논문에는 포함시키지 않았지만 11월 2일과 3일의 K^+ 의 크기분포 역시 11월 3일에 더 큰 크기분포를 나타내었으며 이와 같은 결과는 11월 3일에 관측된 WSOC 응결모드의 증가 현상에 잘 반영되었을 것으로 판단한다(Park *et al.*, 2013b).

11월 5일~11월 16일까지 대기 에어로졸 입자, WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 의 질량크기분포는 11월 2일과 3일의 이들의 크기분포와 달리 응결모드보다는 $1.0 \mu\text{m}$ 의 입자 크기에서 두드러진 액적모드가 관측되었다. 특히 11월 6일과 11일에 관측된 액적모드는 11월 2일과 3일보다 훨씬 큰 모드의 크기분포를 나타내었다. 11월 6일, 7일, 그리고 11일의 NO_3^- 와 NH_4^+ 농도의 액적모드의 두드러진 증가는 대기 에어로졸 입자의 액적모드의 급격한 증가를 가져왔다. 동일 기간에 SO_4^{2-} 의 액적모드 크기분포는 증가하였으나, NO_3^- 와 NH_4^+ 의 크기분포보다는 증가속도가 상당히 낮았다. 이것은 대기 에어로졸 입자의 고농도 현상이 외부로부터 장거리 이동에 의해 유입된 영향보다는 국지적인 배출과 생성에 의한 영향이 더 지배적임을 의미한다. 국립환경과학원의 11월 3일~6일 사

이의 고농도 미세먼지 발생 사례에 대한 분석에서도 비슷한 결론을 도출하였다(<http://www.nier.go.kr/NIER>). 이들의 분석에서 대기질 모델 기법을 이용해 고농도 미세먼지에 대한 국내·외 영향을 분석한 결과는 전국 기준으로 국내 영향과 중국 등 국외 영향이 55~82%와 18~45%이었다. 그리고 고농도 미세먼지 발생 전과 비교했을 때, 국내 요인의 비중이 높은 NO_3^- 의 농도는 3.0~3.4배 증가한 반면, 국외 유입 비중이 높은 SO_4^{2-} 의 농도는 1.3~2.3배 증가에 그쳐 국내 요인이 상대적으로 더 크게 기여하였다.

3.4 수용성 유기 및 2차 이온성분의 입경별 생성과정 조사

표 1은 측정 기간 동안의 기상변수(기온, 풍속, 상대습도 및 기압)의 일평균 값, MOUDI 측정 결과 중 PM, WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} , 그리고 NH_4^+ 의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{1.8}$ 의 질량농도, $\text{PM}_{0.17-0.32}/\text{PM}_{1.8}$ 및 $\text{PM}_{0.55-1.8}/\text{PM}_{1.8}$ 의 질량비를 정리한 것이다. 측정 기간 동안 PM_{10} 및 $\text{PM}_{1.8}$ 의 평균 농도는 각각 $42.0 (24\sim73)$, $33.6 (16.3\sim60.0) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 평균적으로 $\text{PM}_{1.8}$ 의 79 (65~89)%가 PM_{10} 에 해당하였다. $\text{PM}_{1.8}$ 에서 응결모드($0.17\sim0.32 \mu\text{m}$)와 액적모드($0.55\sim1.8 \mu\text{m}$)에 해당하는 입자의 질량농도($\text{PM}_{0.17-0.32}$ 와 $\text{PM}_{0.55-1.8}$)는 24.9 (14.8~40.8)%와 69.9 (54.2~83.0)%를 차지하였다. 국지적인 영향이 지배적인 11월 2일~3일에는 액적모드가 응결모드보다 질량농도 비율이 좀 높은 수준이었으나, 대기 정체가 지속되면서 외부로부터 오염물질의 유입이 더해지는 기간(국지적+국외 영향)인 11월 5일~7일에는 액적모드의 질량농도 비율이 더 증가하였다. 응결모드와 액적모드의 질량농도 비율은 11월 2일에는 40.8%와 54.2%이었으며, 11월 7일에는 18.7%와 79.9%이었다. $\text{PM}_{1.8}$ 에서 액적모드의 질량농도 비율이 가장 높았던 날은 11월 11일로 83.0%까지 증가하였으며, 이는 앞 3.2절에서 언급한 바와 같이 국지적인 오염물질의 배출과 2차 생성, 그리고 중국으로부터 오염물질의 유입이 증가하여 나타난 결과로 추정한다. 이와 같은 현상은 WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+

Table 1. A summary of meteorological parameters and size-resolved major chemical compositions during the study period.

	Unit	11/02	11/03	11/05	11/06	11/07	11/09	11/10	11/11	11/12	11/13	11/14	11/15	11/16
Temperature	°C	11.6	11.7	13.0	14.4	14.1	10.9	12.1	10.9	9.2	9.4	10.1	12.3	9.1
Wind speed	m/s	0.78	0.61	0.50	0.54	1.08	1.00	0.55	1.08	1.30	0.88	0.65	0.55	1.18
Relative humidity	%	66.3	65.9	65.5	69.8	94.8	82.5	82.7	94.4	70.4	72.2	74.9	73.5	87.6
Pressure	hPa	1,027	1,024	1,024	1,025	1,021	1,023	1,025	1,021	1,019	1,021	1,024	1,023	1,022
PM														
- PM ₁₀	µg/m ³	31.1	35.0	45.8	73.0	49.8	47.4	47.0	56.4	25.1	34.1	43.4	24.3	33.6
- PM _{1.8}	µg/m ³	24.4	28.9	37.7	60.0	44.2	37.5	32.6	48.8	16.3	26.2	34.6	17.8	27.4
- PM _{0.17-0.32} /PM _{1.8}	%	40.8	34.0	24.9	22.6	18.7	17.2	21.6	14.8	22.7	24.3	23.5	34.6	25.8
- PM _{0.55-1.8} /PM _{1.8}	%	54.2	56.2	67.1	74.0	79.9	79.7	74.0	83.0	70.2	70.2	72.4	56.5	71.5
WSOC														
- PM ₁₀	µg/m ³	2.44	3.28	3.70	5.06	4.29	2.95	2.89	3.59	1.89	2.37	4.36	2.48	3.77
- PM _{1.8}	µg/m ³	2.24	3.15	3.27	4.77	4.04	2.65	2.67	3.44	1.76	2.17	3.88	2.31	3.03
- PM _{0.17-0.32} /PM _{1.8}	%	45.8	45.1	35.7	31.8	26.5	24.6	33.8	25.8	35.8	38.0	23.4	33.7	29.7
- PM _{0.55-1.8} /PM _{1.8}	%	49.7	40.8	56.2	66.1	67.4	65.5	56.2	66.4	47.2	53.6	68.9	54.3	67.7
NO₃⁻														
- PM ₁₀	µg/m ³	6.70	7.80	12.68	23.32	14.47	11.13	7.90	16.39	3.70	6.69	11.80	3.74	10.86
- PM _{1.8}	µg/m ³	5.88	7.32	11.59	21.51	13.49	9.44	5.96	14.78	3.35	6.04	10.90	2.88	10.14
- PM _{0.17-0.32} /PM _{1.8}	%	40.9	26.1	21.9	19.6	16.6	14.5	19.2	12.9	22.8	26.1	21.0	36.0	29.2
- PM _{0.55-1.8} /PM _{1.8}	%	58.0	65.8	76.3	79.2	82.7	80.1	76.1	83.9	74.6	70.3	78.1	59.0	68.5
SO₄²⁻														
- PM ₁₀	µg/m ³	1.66	1.16	3.19	5.82	4.83	3.88	5.54	5.89	1.49	1.29	1.91	1.47	2.21
- PM _{1.8}	µg/m ³	1.62	1.12	3.18	5.80	4.81	3.86	5.37	5.87	1.45	1.27	1.89	1.44	2.19
- PM _{0.17-0.32} /PM _{1.8}	%	45.7	44.0	32.3	22.3	19.0	18.0	21.0	9.7	26.2	31.3	23.1	32.4	43.8
- PM _{0.55-1.8} /PM _{1.8}	%	44.3	53.0	65.1	76.6	80.0	81.2	77.9	89.7	72.7	66.3	75.5	65.4	51.1
NH₄⁺														
- PM ₁₀	µg/m ³	2.09	3.30	6.66	9.88	6.75	5.58	5.85	10.13	2.08	5.16	4.70	2.50	5.18
- PM _{1.8}	µg/m ³	1.90	3.02	5.83	8.94	6.37	5.07	4.99	8.86	1.80	4.07	4.53	2.20	4.75
- PM _{0.17-0.32} /PM _{1.8}	%	49.5	34.6	25.2	25.8	19.7	19.7	22.7	18.5	24.8	26.2	21.9	37.4	31.8
- PM _{0.55-1.8} /PM _{1.8}	%	45.4	62.5	70.5	72.5	79.4	78.5	76.2	76.7	68.4	64.3	76.3	52.2	64.8

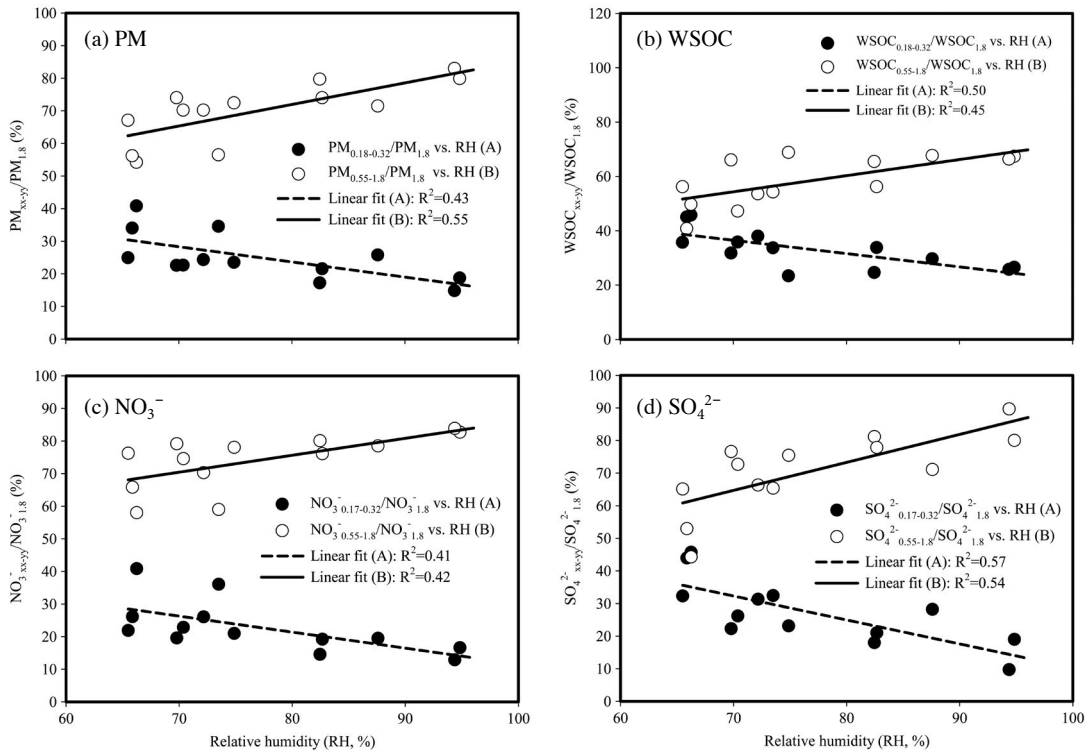


Fig. 6. Relationships between relative humidity and both condensation and droplet size fractions to $PM_{1.8}$ for $WSOC$, NO_3^- , and SO_4^{2-} .

에서도 비슷하게 확인되었다. 11월 2일~7일까지 $PM_{1.8}$ 중 액적모드에 존재하는 $WSOC$, NO_3^- , SO_4^{2-} , 그리고 NH_4^+ 의 농도 비율($PM_{0.55-1.8}/PM_{1.8}$)은 11월 7일 가장 높게 나타났으며, 특히 NO_3^- 가 82.7%까지 증가하였다. 11월 2일에서 11월 6일까지의 $PM_{1.8}$, $PM_{1.8}$ 내 $WSOC$, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 의 농도변화는 각각 24.4에서 60.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.5배 증가), 2.2에서 4.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.1배 증가), 5.9에서 21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.7배 증가), 1.6에서 5.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.6배 증가), 1.9에서 8.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.7배 증가)로 증가하였다. 11월 6일의 $PM_{1.8}$ 내 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 농도는 11월 2일과 비교해 증가 비율은 거의 동일하였으나, 두 성분의 절대농도는 차이가 매우 컸다. 이는 도시지역의 NO_3^- 는 국지적 영향에 의해서, 그리고 SO_4^{2-} 는 국외 영향에 의해서 나타난 결과인 점을 고려하면 (Yu *et al.*, 2019, 2018a), 광주지역에서 11월 2일~7일 사이에 발생한 미세먼지 고농도 현상은 국

지적인 영향이 우세하였음을 의미한다. 반면에 11월 11일에 조사한 $PM_{1.8}$, $WSOC$, NO_3^- 및 NH_4^+ 의 농도는 48.8, 3.4, 14.8, 8.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 11월 6일의 이들의 농도보다는 감소하였으나, 11월 10일보다는 1.5, 1.3, 2.5, 1.8배 높았다. 그러나 SO_4^{2-} 의 경우는 11월 6일 및 10일과 비교해 큰 변화가 없었다.

측정 기간 중 상대습도가 $PM_{1.8}$ 내 응결모드(0.18~0.32 μm)와 액적모드(0.55~1.8 μm)에 존재하는 $WSOC$, NO_3^- 및 SO_4^{2-} 의 생성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 $PM_{0.18-0.32}/PM_{1.8}$ 및 $PM_{0.55-1.8}/PM_{1.8}$ 와 상대습도 사이의 상관관계를 분석하였다. 여기서 PM은 $WSOC$, NO_3^- , 또는 SO_4^{2-} 를 가리킨다. 그 결과를 그림 6에 나타내었다. $PM_{1.8}$ 중 응결모드에 존재하는 $WSOC$, NO_3^- 및 SO_4^{2-} 의 농도 비율과 상대습도 사이에는 음의 상관성을 보여주었다. 반면에, $PM_{1.8}$ 중 액적모드에 존재하는 $WSOC$, NO_3^- 및 SO_4^{2-} 의 농도 비

울과 상대습도 사이에는 양의 상관성을 보였다. 이것은 대기 중 수분의 양이 증가함에 따라 응결모드의 수용성 유기 및 2차 이온성분들의 생성은 줄어드는 반면에, 액적모드에 존재하는 이들 성분들은 생성과 성장에는 중요한 역할을 했음을 암시한다.

4. 요약 및 결론

광주광역시에서 2018년 11월 초에 발생한 고농도 미세먼지 사례의 대기 에어로졸 입자와 이들의 수용성 유기 및 무기성분들의 질량크기분포의 변화와 이에 대한원인을 조사하였다. 대기 에어로졸 입자의 크기분포 측정은 광주광역시에 위치한 전남대학교의 한 건물 3층 옥상에서 2018년 11월 2일부터 16일까지 24시간 간격으로 수행하였다. 채취된 시료들은 입경별 질량농도, 수용성 유기 및 이온성분들을 분석하는데 사용하였다. 11월 2일에서 11월 7일 사이에 발생한 미세먼지의 고농도 사례는 11월 2일~3일에는 서해상과 한반도에 형성된 고기압과 대기 정체 조건에서 국내 오염물질의 축적으로 미세먼지 농도의 증가가 시작되었다(국지적 영향 지배적). 그 이후(11월 5일~7일)에는 고기압 영향 하에 대기 정체 상태가 지속되면서 국지적 오염물질의 축적과 생성, 그리고 국외로부터 오염물질의 유입이 더해지면서 미세먼지의 고농도 현상이 가중되었다(국지적 영향+국외 영향). 11월 2일~7일 사이에 $PM_{1.8}$ 에 함유되어 있는 NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 의 농도는 각각 3.7배, 3.6배, 4.7배의 비율로 증가하였으나, 국지적 요인이 강한 대기오염물질인 NO_3^- 의 농도는 국외 유입물질로 알려진 SO_4^{2-} 보다 상대적으로 더 크게 증가하였다. 즉, $PM_{1.8}$, $PM_{1.8} NO_3^-$, $PM_{1.8} SO_4^{2-}$, 그리고 $PM_{1.8} NH_4^+$ 의 농도는 24.4, 5.9, 1.6, 1.9 $\mu g/m^3$ 에서 60.0, 21.5, 5.8, 8.9 $\mu g/m^3$ 로 상승하였다. 국지적인 영향이 지배적인 11월 2일과 3일의 대기 에어로졸 입자와 WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 은 0.32 μm 와 1.0 μm 에서 각각 응결모드와 액적모드를 보이는 뚜렷한 이산형 크기분포를 나타

내었다. 이들의 응결모드와 액적모드의 질량크기분포 수준은 거의 비슷하였다. 반면, 국지적 영향과 외부 영향이 혼합된 11월 5일~7일에는 대기 에어로졸 입자, WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 의 질량크기분포는 0.32 μm 의 입경에서 응결모드는 관측되지 않았고, 1.0 μm 에서 매우 두드러진 액적모드를 보여주었다. 이와 같은 결과는 11월 4일 이전에 생성된 응결모드에 존재하는 입자들의 성장, 휘발성 유기화합물, 질소산화물 및 황산화물의 액상반응에 의한 2차 에어로졸 입자의 생성, 국외에서 유입된 2차 입자 성분들의 유입 등으로 인해 나타난 것으로 판단된다. 11월 2일~7일 사이의 미세먼지 고농도 사례 기간 중 시간이 경과됨에 따라 $PM_{1.8}$ 중 응결모드(0.17~0.32 μm)에 분포하는 WSOC, NO_3^- , SO_4^{2-} 및 NH_4^+ 의 농도 비율은 감소한 반면, 액적모드(0.55~1.8 μm)에 존재하는 이들의 농도 기여율은 증가하는 추세를 보였다. 그리고 $PM_{1.8}$ 중 액적모드(0.55~1.8 μm)에 존재하는 WSOC, NO_3^- 및 SO_4^{2-} 의 농도 비율과 상대습도 사이의 상관관계로부터 대기 중 수분이 액적모드에 존재하는 이들 성분들은 생성과 성장의 중요한 인자로 작용했음을 알 수 있었다.

감사의 글

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

References

- Bellouin, N., Boucher, O., Haywood, J., Reddy, M.S. (2005) Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements, *Nature*, 438, 1138-1141, DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04348>.
- Castro, A., Alonso-Blanco, E., González-Colino, M., Calvo, A.I., Fernández-Raga, M., Fraile, R. (2010) Aerosol size distribution in precipitation events in León, Spain,

- Atmospheric Research, 96, 421-435, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.01.014>.
- Kaskaoutis, D.G., Sinha, P.R., Vinoj, V., Kosmopoulos, P.G., Tripathi, S.N., Misra, A., Sharma, M., Sing, R.P. (2013) Aerosol properties and radiative forcing over Kanpur during severe aerosol loading conditions, *Atmospheric Environment*, 79, 7-19, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.020>.
- Lin, J.T., Pan, D., Davis, S.J., Zhang, Q., He, K.B., Wang, C., Streets, D.G., Wuebbles, D.J., Guan, D.B. (2014) China's international trade and air pollution in the United States, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 1736-1741, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1312860111>.
- Liu, Z., Hu, B., Zhang, J., Yu, Y., Wang, Y. (2016) Characteristics of aerosol size distributions and chemical compositions during wintertime pollution episodes in Beijing, *Atmospheric Research*, 168, 1-12, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.08.013>.
- Ma, Q., Wu, Y., Zhang, D., Wang, X., Xia, Y., Lu, X., Tian, P., Han, Z., Xia, X., Wang, Y., Zhang, R. (2017) Roles of regional transport and heterogeneous reactions in the PM_{2.5} increase during winter haze episodes in Beijing, *Science of the Total Environment*, 599-600, 246-253, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.193>.
- Park, S.S., Jung, S.A., Gong, B.J., Cho, S.Y., Lee, S.J. (2013a) Characteristics of PM_{2.5} haze episodes revealed by highly time-resolved measurements at an air pollution monitoring Supersite in Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 957-976, DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.07.0184>.
- 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, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.025>.
- Park, S.S., Shin, D.M. (2013) Characteristic of size-resolved water-soluble organic carbon in atmospheric aerosol particles observed during daytime and nighttime in an urban Area, *Particle and Aerosol Research*, 9(1), 7-21, DOI: <https://doi.org/10.11629/jpaar.2013.9.1.007>.
- Park, S.-S., Kim, J.H. (2014) Size distribution and sources of two water-soluble organic carbon fractions at a nearby roadway site during fall season, *Atmospheric Environment*, 94, 134-143, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.054>.
- Park, S., Cho, S.Y., Bae, M.S. (2015) Source identification of water-soluble organic aerosols at a roadway site using a positive matrix factorization analysis, *Science of the Total Environment*, 533, 410-421, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.004>.
- Park, S.S., Son, S.-C. (2016) Size distribution and sources of humic-like substances in particulate matter at an urban site during winter, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(1), 32-41, DOI: <https://doi.org/10.1039/c5em00423c>.
- Park, S., Yu, G. (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), DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.418>.
- Park, S., Yu, G.-H. (2019) Absorption properties and size distribution of aerosol particles during the fall season at an urban site of Gwangju, Korea, *Environmental Engineering Research*, 24(1), 159-172, DOI: <https://doi.org/10.4491/EER.2018.166>.
- Rolph, G., Stein, A., Stunder, B. (2017) Real-time Environmental Applications and Display System: READY, *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228, DOI: <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., Bae, M.-S., Park, S.-S. (2015) Chemical characteristics and formation pathways of Humic Like Substances (HULIS) in PM_{2.5} in an urban area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 239-254. (in Korean with English abstract), DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.3.239>.
- Sun, Y., Zhuang, G., Tang, A., Wang, Y., An, Z. (2006) Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing, *Environmental Science and Technology*, 40, 3148-3155, DOI: <https://doi.org/10.1021/es051533g>.
- Tan, F., Tong, S.R., Jing, B., Hou, S.Q., Liu, Q.F., Li, K., Zhang, Y., Ge, M.F. (2016) Heterogeneous reactions of NO₂ with CaCO₃-(NH₄)₂SO₄ mixtures at different relative humidities, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 8081-8093, DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-8081-2016>.
- Väkevä, M., Hämeri, K., Puhakka, T., Nilsson, E.D., Hohti, H., Mäkelä, J.M. (2000) Effects of meteorological processes on aerosol particle size distribution in an urban background area, *Journal of Geophysical Research*, 105, 9807-9821, DOI: <https://doi.org/10.1029/1999JD901143>.
- Verma, S., Payra, S., Gautam, R., Prakash, D., Soni, M., Holben, B.,

- Bell, S. (2013) Dust events and their influence on aerosol optical properties over jaipur in northwestern India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 7327-7342, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3103-9>.
- Wang, H.C., Lu, K.D., Chen, X.R., Zhu, Q.D., Chen, Q., Guo, S., Jiang, M., Li, X., Shang, D., Tan, Z., Wu, Y., Wu, Z., Zou, Q., Zheng, Y., Zeng, L., Zhu, T., Hu, M., Zhang, Y. (2017) High N₂O₃ concentrations observed in urban Beijing: implications of a large nitrate formation pathway, *Environmental Science and Technology Letters*, 4, 416-420, DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00341>.
- Wang, Q.Q., Sun, Y.L., Jiang, Q., Du, W., Sun, C.Z., Fu, P.Q., Wang, Z.F. (2015) Chemical composition of aerosol particles and light extinction apportionment before and during the heating season in Beijing, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 3205-3215, DOI: <https://doi.org/10.1002/2015JD023871>.
- Xu, J.Z., Zhang, Q., Wang, Z.B., Yu, G.M., Ge, X.L., Qin, X. (2015) Chemical composition and size distribution of summertime PM_{2.5} at a high altitude remote location in the northeast of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau: insights into aerosol sources and processing in free troposphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 5069-5081, DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-15-5069-2015>.
- Yu, G.-H., Park, S., Lee, K.H. (2016) Source contributions and potential source regions of size-resolved water-soluble organic carbon measured at an urban site over one year, *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(10), 1343-1358, DOI: <https://doi.org/10.1039/c6em00416d>.
- Yu, G.-H., Zhang, Y., Cho, S.-Y., Park, S. (2017) Influence of haze pollution on water-soluble chemical species in PM_{2.5} and size-resolved particles at an urban site during fall, *Journal of Environmental Sciences*, 57, 370-382, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.10.018>.
- Yu, G.-H., Park, S.-S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Shin, H.J., Lee, S.B., Ghim, Y.S. (2018a) 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), DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.567>.
- Yu, G.-H., Yu, J.-M., Park, S.-S. (2018b) 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), DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.207>.
- Yu, G.-H., Lee, B.-J., Park, S.S., Jung, S.A., Jo, M.R., Lim, Y.J., Kim, S. (2019) 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), DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.195>.
- Zhao, X.J., Zhao, P.S., Xu, J., Meng, W., Pu, W.W., Dong, F., He, D., Shi, Q.F. (2013) Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 5685-5696, DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-13-5685-2013>.
- Zheng, G.J., Duan, F.K., Su, H., Ma, Y.L., Cheng, Y., Zheng, B., Zhang, Q., Huang, T., Kimoto, T., Chang, D., Pöschl, U., Cheng, Y.F., He, K.B. (2015) Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 2969-2983, DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-15-2969-2015>.

Authors Information

손세창 (전남대학교 환경에너지공학과 박사과정)
박승식 (전남대학교 환경에너지공학과 교수)