



논문

# 2017~2018년 전주시 대기 중 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 화학적 특성 PM<sub>2.5</sub> Concentrations and Chemical Compositions in Jeonju from 2017 to 2018

조광곤<sup>1)</sup>, 김동우<sup>1)</sup>, 송미정<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>전북대학교 지구환경과학과, <sup>2)</sup>전북대학교 지구환경시스템연구소

Gwanggon Jo<sup>1)</sup>, Dongwoo Kim<sup>1)</sup>, Mijung Song<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University

<sup>2)</sup>The Earth and Environmental Science System Research Center, Chonbuk National University

접수일 2018년 11월 8일  
 수정일 2018년 11월 30일  
 채택일 2018년 12월 12일

Received 8 November 2018  
 Revised 30 November 2018  
 Accepted 12 December 2018

\*Corresponding author  
 Tel: +82-(0)63-270-3394  
 E-mail: Mijung.song@jnu.ac.kr

**Abstract** Recently, the high concentrations of PM<sub>2.5</sub> have frequently been observed in Jeonju, Jeollabuk-do, but the characteristics of PM<sub>2.5</sub> are still not well known. In this study, we analyzed the mass concentrations and chemical compositions of the PM<sub>2.5</sub> from May 2017 to May 2018. The average concentration of the PM<sub>2.5</sub> was 25.8 μg/m<sup>3</sup>, and the mean concentrations of OC, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were 5.6 μg/m<sup>3</sup>, 4.4 μg/m<sup>3</sup>, and 3.9 μg/m<sup>3</sup>, respectively. The PM<sub>2.5</sub> was highly correlated with the OC, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, and K<sup>+</sup>, suggesting that biomass burning would be a main source of the PM<sub>2.5</sub>. During the high concentrations of the PM<sub>2.5</sub>, the fraction of the NO<sub>3</sub><sup>-</sup> was increased remarkably while the fraction of the OC, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, and metals was decreased. From the CPF model, it showed that the source of the PM<sub>2.5</sub> would be originated from the west side of Jeonju. In addition, using the HYSPLIT backward trajectories, it showed that the air masses during the entire periods were originated mainly from Mongolia and China.

**Key words:** Jeonju, PM<sub>2.5</sub>, Ions, Metals, OC, EC

## 1. 서론

초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>)는 인간의 건강에 악영향을 끼치고 기후변화에 영향을 미치는 핵심적인 물질로 알려져 있다 (Dockery, 2009; Pöschl, 2005). 세계보건기구 (WHO)는 PM<sub>2.5</sub>가 인체에 악영향을 미친다는 결과들을 바탕으로 PM<sub>2.5</sub>를 포함한 입자상 물질을 1급 발암물질로 규정하였다 (IARC, 2016; Dockery, 2009; Pöschl, 2005). 또한 PM<sub>2.5</sub>는 대기 중에서 부유하며 태양 빛을 직접 산란/흡수하고, 간접적으로 구름의 형성 및 강수량에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다 (IPCC, 2013; Solomon, 2007; Pöschl, 2005).

초미세먼지는 주로 이온, 중금속, 탄소성분 등으로 구성이 되며, 자연 배출원과 인위적 기원에 의해 생

성된다. Jeon *et al.* (2015)에서는 2011년~2013년 서울에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>과 같은 수용성 이온성분이 전체의 50% 이상을 차지하며 PM<sub>2.5</sub>의 주요 성분으로 나타났고, 탄소성분은 18~23%, 중금속 성분은 5~8%의 비중을 보였다. 2017년 부산지역 4개 측정소 PM<sub>2.5</sub> 분석결과 역시 이온성분이 가장 많은 구성비 (43.1~51.2%)를 차지하였고 다음으로 탄소성분 (19.2~24.1%)이었으며 중금속 성분은 가장 적은 구성비 (3.4~6.7%)로 분석되었다 (BMIH, 2018). 2015년 백령도에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 결과에서는 봄철에 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 빈번하며 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분이 주요한 것으로 측정되었다 (NIER, 2016).

에어코리아 자료에 따르면 16개 시도 중 전라북도 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도는 2016년, 2017년 각각 30.7 μg/

m<sup>3</sup>, 28.5 µg/m<sup>3</sup>로 전국에서 가장 높은 순위를 보였다. 최근 수년간 전라북도는 고농도 PM<sub>2.5</sub>를 나타내고 있음에도 불구하고 현재까지 PM<sub>2.5</sub>의 주요 화학조성, 기원 추적에 관한 연구가 매우 부족한 실정이다. 전라북도는 전라남도 다음으로 전국에서 경지 규모 5 ha 이상 농가가 많은 지역이며 전주는 2016년 기준 전라북도 행정구역 중 인구가 656,956명으로 가장 많고 (KOSTAT, 2016), 노령산맥과 근접한 분지 형태의 지형적 특성이 있다. 전주는 김제시(26 km 이격), 익산시(27 km 이격), 완주군(10 km 이격)과 같은 농축산업이 발달한 도시와 맞닿아 있다 (KOSIS, 2016). 2017년 전주시 중앙동에서 측정된 PM<sub>2.5</sub> 환경기준 초과일수(일 평균 35 µg/m<sup>3</sup> (2018.3 개정된 기준 적용))는 총 96일로 1년 중 1/4에 해당하는 날이 기준을

초과하는 것으로 나타났다 (KECO, 2018). 국가 대기 오염물질 배출량 서비스 자료에 따르면 2015년 전주시 PM<sub>2.5</sub> 배출원으로 비산먼지(33%)가 가장 높은 기여도를 보이고 이어 도로이동오염원(21%), 비도로이동오염원(19%), 생물성연소(19%) 순으로 분석되었다 (NIER, 2015). 본 연구에서는 2017년~2018년 동안 전주시 PM<sub>2.5</sub>의 주요 화학성분을 밝혀내고 그 기원을 분석하였다.

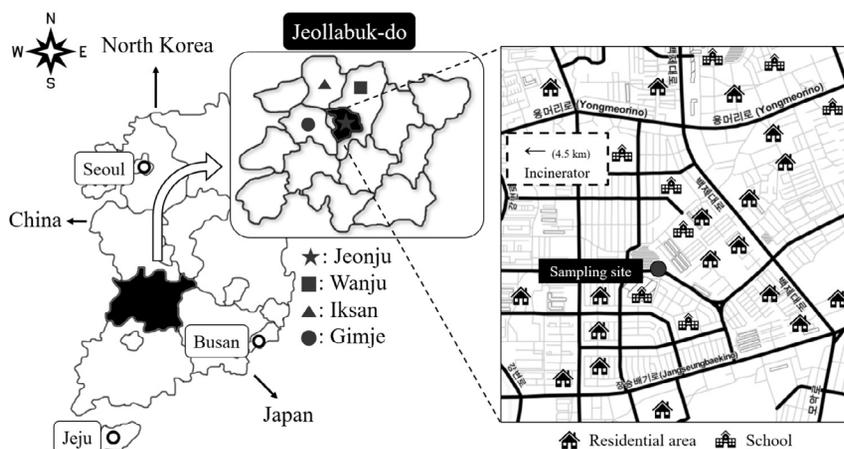
## 2. 연구 방법

### 2.1 시료 채취 방법

시료 채취는 2017년 5월~2018년 5월 전주시 삼천

**Table 1.** Mass concentration and number of samples per month. The values in bracket indicate standard deviations (1σ).

		2017							
Month		5	6	8	9	10	11	12	Sum
Mass (µg/m <sup>3</sup> )		21.1 (9.7)	20.9 (3.4)	17.4 (8.1)	16.1 (5.3)	29.1 (20.1)	40.7 (25.8)	24.0 (12.9)	-
Number of samples		5	3	12	6	9	3	3	41
		2018							
Month		1	2	3	4	5			Sum
Mass (µg/m <sup>3</sup> )		35.2 (21.9)	31.1 (15.3)	36.2 (19.2)	21.8 (7.8)	21.1 (9.3)			-
Number of samples		6	8	9	7	7			37
Total									78



**Fig. 1.** Geographical location of the sampling site in Jeonju (Samcheon-dong).

동 도시대기 측정소 (35.799°N, 127.122°E)에서 진행되었고 24시간 (09:00~다음 날 09:00) 동안 포집하여 총 78개 PM<sub>2.5</sub> 샘플을 분석하였다(표 1). 샘플링 장소인 삼천동 도시대기 측정소는 전주시 남쪽에 있으며, 서쪽으로 4.5 km 이격된 거리에 소각장이 있고 주변에 주거지역 및 교육 시설이 다수 위치(그림 1)하고 있다. 샘플은 월에 따라 3일~10일 간격으로 포집되었으며 7월은 여름철 장마의 영향으로 분석에서 제외하였다.

시료 채취는 유량 16.7 L/min으로 설정된 초미세먼지 샘플러 2대(APM engineering, PMS-204, Korea)에 각각 PTFE filter, quartz filter (PALL Zefluor™, 47 mm, USA)를 장착하여 24시간 포집하였다. PTFE filter는 질량농도, 이온, 중금속 성분의 분석을 위해 사용하였고 quartz filter는 탄소성분을 분석하기 위하여 사용하였다.

## 2.2 PM<sub>2.5</sub> 질량농도 측정

PM<sub>2.5</sub> 포집 전과 포집 후의 무게는 10 µg까지 칭량이 가능한 전자저울(Vibra, LF225DR, Japan)을 이용해 칭량 후 질량농도를 분석하였다. 포집 전 PTFE filter는 전자식 테시케이터에 48시간 이상 향량한 뒤 EPA의 시료 채취 방법에 의거하여 전자저울을 이용하여 3번 정량한 평균값(기기 검출한계의 오차범위 ±10 µg 이내)을 사용하였고(Kang *et al.*, 2006), 포집 후 filter 무게 역시 같은 방법으로 분석하였다(US EPA, 1999).

## 2.3 PM<sub>2.5</sub> 이온, 중금속, 탄소성분 분석

포집된 PTFE filter를 반으로 잘라 각각 이온 분석과 중금속 분석을 진행하였다. 이온성분은 PTFE filter에 초순수(Merck, Direct-Q 3 UV, USA) 15 mL을

첨가해 초음파추출기에서 60분, 진탕기에서 30분 진탕하여 용출한 후 주사기 필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 µm, UK)를 사용해 여액을 Ion chromatography(Dionex, ICS-90, USA)로 분석하였다. 음이온(Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)과 양이온(Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)은 각각 전용 컬럼(Dionex, 음이온: AS14, 양이온: CS12A)으로 분석되었다. 이온분석 방법검출한계(Method detection limit: MDL) 값을 얻기 위하여 매 분석 시 최저 농도를 7번 분석하여 98% 신뢰수준에서 이용하였다(표 2). 또한, 표준시료의 Calibration curve 결정계수 r<sup>2</sup> 값이 0.995 이상으로 나타났다. 이온성분의 신뢰도 분석을 위해 음이온과 양이온을 당량으로 변환하여 당량비를 계산한 결과 연평균 0.96의 값으로 양호한 선형관계가 나타났으며 국내외에서 수행된 선행연구 결과와 비교하였을 때 비슷한 값으로 나타났다(Saxena *et al.*, 2016; Lee and Hu, 2016; NIER, 2012; Lee *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2010).

중금속 분석은 전라북도 보건환경연구원에서 진행 하였으며 'EPA method IO-3'의 마이크로파 산분해법으로 용출한 후 이용하였다(US EPA, 1999). Ti, V, Mn, Ni, As, Se, Pb 성분은 ICP-MS(Agilent technologies, 7900, USA)로 Al, Fe, Zn 성분은 ICP-OES(Agilent technologies, 5100, USA)로 총 10종을 분석하였다.

탄소 분석의 경우 포집 전 quartz filter를 알루미늄 호일로 감싸 550°C에서 약 6시간 구운 뒤 포집에 이용하였다. 포집 후 OC(Organic carbon)와 EC(Elemental carbon) 성분의 분석을 위해 TOT(Thermal-optical transmittance)와 NIOSH 5040 protocol 방법으로 국립기상과학원의 OC/EC 분석기(Sunset laboratory inc., Lab OC-EC Aerosol Analyzer, USA)를 사

**Table 2.** Method detection limit (MDL) for PM<sub>2.5</sub> chemical analysis.

Components	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	OC	EC
MDL	µg/m <sup>3</sup>	0.017	0.029	0.035	0.016	0.018	0.008	0.003	0.051	0.100
Components	Al	Fe	Zn	Ti	V	Mn	Ni	As	Se	Pb
MDL	ng/m <sup>3</sup>	4.1	0.6	0.7	0.5	0.1	0.1	0.3	0.4	0.1

용하여 탄소성분을 분석하였다 (Brich and Cary, 1996). 이온 분석과 중금속 분석의 경우 재현성을 측정하기 위해 시료 중간에 표준시료를 첨가하였고, 이때 상대 오차가 10% 이내로 나타났다 (Cho *et al.*, 2016). 탄소성분의 경우 표준시료로 sucrose (2.728 µgC/µL)를 선택하였으며 표준시료와 분석값의 상대 오차가 1% 이내의 값을 나타내었다. 표 2는 각 성분별 방법검출한계를 보여준다. 성분의 분석값이 MDL보다 낮은 경우 MDL 값으로 반환하여 최종값으로 산정하였다.

#### 2.4 CPF(Conditional Probability Functions)

전주시 PM<sub>2.5</sub>의 기원 파악을 위해 PM<sub>2.5</sub> 질량농도, 풍향 및 풍속 자료를 이용, CPF (Conditional Probability Functions) 분석을 수행하였다. CPF는 풍향, 풍속을 고려해 고농도 오염원의 위치를 추정할 수 있는 통계적 확률 모델이다 (Ashbaugh *et al.*, 1967). 2017년 5월 1일부터 2018년 5월 31일까지의 한국환경공단 에어코리아의 1시간 데이터를 사용하였으며 풍향을 16방위( $\theta=22.5^\circ$ )로 나눈 뒤 샘플링 일자의 PM<sub>2.5</sub>의 값을 설정하여 분석하였다. CPF 값이 1에 근접할 수

록 오염원이 해당 방향 및 풍속에 의존할 수 있다는 것을 의미한다. 본 연구에 사용한 CPF 모델은 아래와 같은 식에 의해 계산된다.

$$CPF = \frac{m_{\theta_j}}{n_{\theta_j}}$$

$m_{\theta_j}$ 은 풍향  $\theta$ , 풍속  $j$ 에서의 고농도로 지정된 샘플 개수이며  $n_{\theta_j}$ 은 풍향  $\theta$ , 풍속  $j$ 에서의 전체 샘플 개수이다. 풍속이 0.5 m/s 미만인 자료의 경우 풍향에 대한 불확도가 높아 제외하였다 (Ham *et al.*, 2016).

#### 2.5 역궤적 분석

2017년 5월 1일부터 2018년 5월 31일까지 분석일과 동일한 날을 선정하여 대기확산모델인 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 HYSPLIT4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory) 모델을 이용하였다. 모델에 필요한 기상데이터로써 수평 해상도가 1°인 GDAS1 (Global Data Assimilation System)을 선택하였다. 분석 장소와 동일한 전주 삼전동 도서관을 수용점으로 지정하고 일반 내륙의 대기혼합고 상부 경계인 1,000 m 상공의

**Table 3.** PM<sub>2.5</sub> seasonal and annual average chemical compositions. The values in parentheses indicate standard deviations (1σ).

		Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
Mass	µg/m <sup>3</sup>	25.9 (14.8)	18.1 (7.5)	26.7 (19.9)	31.3 (18.0)	25.8 (16.4)
Cl <sup>-</sup>	µg/m <sup>3</sup>	0.2 (0.3)	0.6 (0.3)	0.3 (0.2)	0.5 (0.5)	0.4 (0.4)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	µg/m <sup>3</sup>	4.0 (6.0)	0.6 (0.7)	3.7 (4.8)	6.6 (5.9)	3.9 (5.4)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	µg/m <sup>3</sup>	5.4 (3.3)	5.0 (3.3)	3.1 (1.9)	3.4 (2.5)	4.4 (3.1)
Na <sup>+</sup>	µg/m <sup>3</sup>	1.1 (0.8)	0.6 (0.6)	1.4 (1.0)	0.2 (0.3)	0.9 (0.9)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	µg/m <sup>3</sup>	1.9 (2.2)	1.4 (1.4)	2.2 (2.6)	2.9 (2.5)	2.1 (2.3)
K <sup>+</sup>	µg/m <sup>3</sup>	0.4 (0.4)	0.3 (0.3)	0.5 (0.5)	0.5 (0.4)	0.4 (0.4)
Mg <sup>2+</sup>	µg/m <sup>3</sup>	0.009 (0.010)	0.004 (0.003)	0.005 (0.005)	0.077 (0.072)	0.022 (0.045)
Ca <sup>2+</sup>	µg/m <sup>3</sup>	0.07 (0.04)	0.05 (0.00)	0.05 (0.00)	0.20 (0.16)	0.09 (0.10)
Al	ng/m <sup>3</sup>	52.9 (55.4)	110.9 (94.9)	20.3 (31.5)	135.0 (148.0)	74.4 (98.7)
Fe	ng/m <sup>3</sup>	177.4 (105.8)	291.1 (196.7)	45.9 (74.8)	183.3 (209.4)	170.2 (169.5)
Zn	ng/m <sup>3</sup>	59.9 (62.3)	141.8 (302.9)	17.8 (27.8)	89.8 (68.7)	72.5 (148.3)
Ti	ng/m <sup>3</sup>	3.4 (5.3)	4.7 (5.1)	2.1 (2.4)	1.2 (1.0)	2.9 (4.2)
V	ng/m <sup>3</sup>	2.1 (1.3)	2.2 (0.5)	2.8 (1.9)	1.4 (1.2)	2.1 (1.4)
Mn	ng/m <sup>3</sup>	45.80 (45.95)	11.49 (42.53)	0.11 (0.02)	41.47 (39.41)	27.71 (42.77)
Ni	ng/m <sup>3</sup>	1.0 (0.9)	0.3 (0.5)	0.6 (1.0)	0.8 (1.0)	0.7 (0.9)
As	ng/m <sup>3</sup>	30.8 (30.7)	8.0 (28.6)	0.4 (0.1)	27.5 (25.7)	18.7 (28.4)
Se	ng/m <sup>3</sup>	0.7 (0.5)	0.8 (0.6)	0.8 (0.4)	0.6 (0.5)	0.7 (0.5)
Pb	ng/m <sup>3</sup>	9.7 (8.9)	1.5 (4.9)	1.7 (3.7)	11.0 (9.7)	6.6 (8.7)
OC	µg/m <sup>3</sup>	4.9 (2.0)	3.8 (1.2)	7.2 (4.8)	6.5 (2.9)	5.6 (3.2)
EC	µg/m <sup>3</sup>	0.5 (0.1)	0.3 (0.1)	0.7 (0.4)	0.9 (0.3)	0.6 (0.3)

공기를 6시간 간격으로 총 72시간 동안 분석하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 2017년~2018년 전주 PM<sub>2.5</sub> 질량농도 분포

2017년 5월~2018년 5월 전주 PM<sub>2.5</sub>의 월평균 질량농도를 표 1, 그림 2에 나타내었다. 전체기간 동안 전주 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도는 25.8 µg/m<sup>3</sup>이며 이는 국내 PM<sub>2.5</sub> 연평균 기준농도 15 µg/m<sup>3</sup>를 월등히 초과하는 수치이다. 월별 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 전체기간 중 11월에 가장 높고, 9월에 가장 낮은 PM<sub>2.5</sub> 농도를 보였다. 계절별 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 봄철 25.9 µg/m<sup>3</sup>, 여름철 18.1 µg/m<sup>3</sup>, 가을철 26.7 µg/m<sup>3</sup>, 겨울철 31.3 µg/m<sup>3</sup>로 분석되었고 겨울에 가장 높고 여름에 가장 낮은 농도로 분석되었다(표 3). 같은 기간 PM<sub>10</sub> 농도를 그림 2에 도시하였다. 전체기간 PM<sub>10</sub>의 평균 농도는 47.2 µg/m<sup>3</sup>이었고, 3월에 63.3 µg/m<sup>3</sup>의 농도로 가장 높고, 9월에 29.0 µg/m<sup>3</sup>의 농도로 가장 낮았다.

측정된 PM<sub>2.5</sub>와 에어코리아의 PM<sub>10</sub> 자료를 이용하여 2017년 5월~2018년 5월 동안 PM<sub>2.5/10</sub>의 비율을 분석하였다(그림 2). PM<sub>2.5/10</sub>은 대기 중 2차적으로 생성되는 미세먼지의 비율을 간접적으로 제시하는

지표로 사용할 수 있다(Won *et al.*, 2010). 전체 측정 기간 전주에서 PM<sub>2.5/10</sub>의 평균은 0.54였다. 월별로는 2017년 10월에 PM<sub>2.5/10</sub>의 값이 0.70으로 가장 높았고 4월의 경우 비율이 가장 낮은 0.37로 나타났는데 4월은 황사 등의 외부 먼지 유입이 많은 시기이므로 1차 미세먼지인 PM<sub>10</sub>의 농도가 다른 월에 비해 상대적으로 높기 때문으로 추정된다(Ahn and Chun, 2011; Kim and Chung, 2010).

#### 3.2 2017년~2018년 전주 PM<sub>2.5</sub> 화학조성

2017년~2018년 전주 PM<sub>2.5</sub>의 화학조성을 분석한 결과 OC (5.6 µg/m<sup>3</sup>), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (4.4 µg/m<sup>3</sup>), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (3.9 µg/m<sup>3</sup>), NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (2.1 µg/m<sup>3</sup>)가 주요한 성분으로 분석되었다. EC와 중금속은 각각 0.6 µg/m<sup>3</sup>, 0.4 µg/m<sup>3</sup>로 나타났다.

이온성분은 월, 계절에 따라 서로 다른 양상을 보였다. PM<sub>2.5</sub> 주요 이온인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>는 6월(7.9 µg/m<sup>3</sup>)에 가장 높았고 12월(1.8 µg/m<sup>3</sup>)에 가장 낮은 값을 나타내었다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 3월에 9.7 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높았으며 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 경우 11월에 5.1 µg/m<sup>3</sup>의 최솟값을 보였다(그림 3).

탄소성분인 OC와 EC는 각각 가을철(7.2 µg/m<sup>3</sup>), 겨울철(0.9 µg/m<sup>3</sup>)에 가장 높은 농도를 보였다. OC, EC 두 성분 모두 11월에 각각 12.7 µg/m<sup>3</sup>, 1.3 µg/m<sup>3</sup>

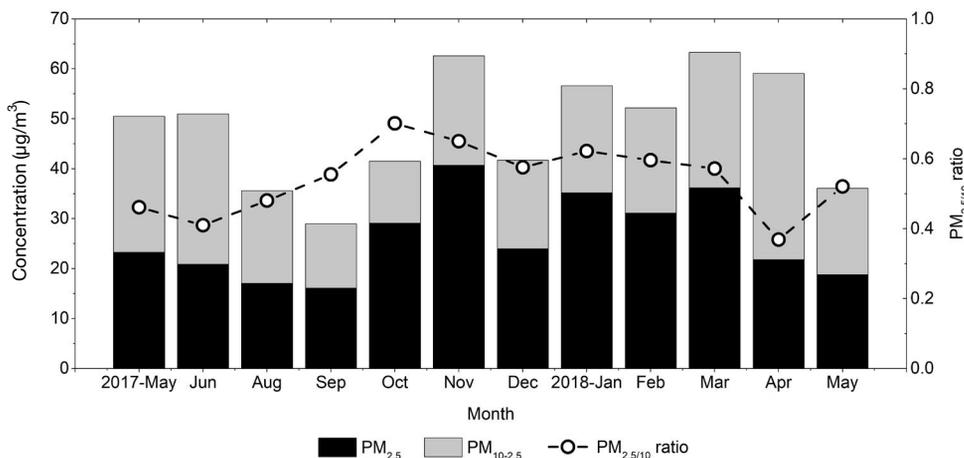


Fig. 2. Monthly mass concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>2.5/10</sub> in Jeonju.

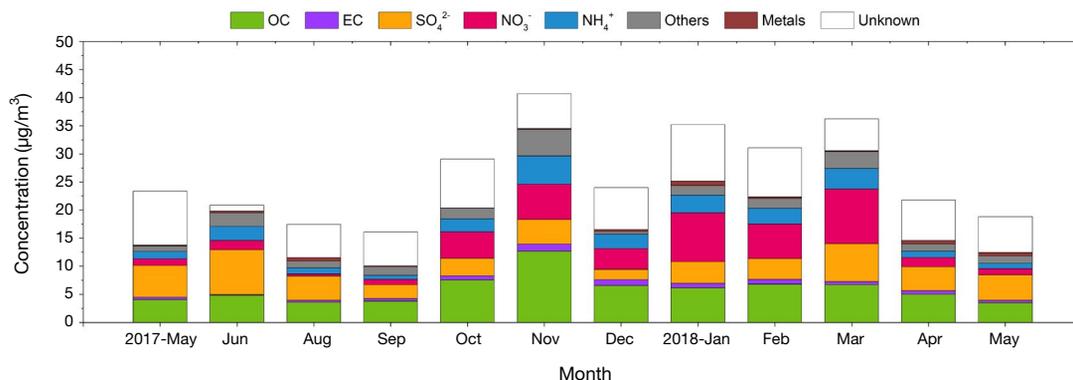


Fig. 3. Monthly variations for the PM<sub>2.5</sub> chemical compositions from May 2017 to May 2018.

로 최곳값이 분석되었다(그림 3). 2015년 수행된 6개 지역과 2017년 부산의 OC 연평균 값을 살펴보면 서울(3.7 µg/m<sup>3</sup>), 대전(5.2 µg/m<sup>3</sup>), 광주(4.4 µg/m<sup>3</sup>), 울산(3.3 µg/m<sup>3</sup>), 제주(3.2 µg/m<sup>3</sup>), 백령도(3.4 µg/m<sup>3</sup>), 부산(3.2 µg/m<sup>3</sup>)로 나타났다(Yu *et al.*, 2018; BMIH, 2015). 본 연구지역의 연평균 OC(5.6 µg/m<sup>3</sup>)와 비교해볼 때 전주시 OC 농도는 높은 수치임을 알 수 있다. EC는 백령도(0.6 µg/m<sup>3</sup>)가 가장 낮고 대전(1.7 µg/m<sup>3</sup>)이 가장 높았으며 전주는 연평균 0.6 µg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 이로부터 전체기간 평균 OC/EC 비율은 9.3으로 분석되었다. 타지역에 비해 전주의 OC/EC 비율이 상당히 높은 것으로 나타났으며, 대기 중 OC의 농도가 높은 반면 EC의 농도는 현저히 낮았다. OC/EC 비율은 대기 중 2차적으로 생성되는 미세먼지를 간접적으로 나타내는 지표로 특히 2.0을 넘을 경우 대기 중 화학반응에 의해 생성되는 OC가 많음을 시사한다(Cho *et al.*, 2016; Lee and Kang, 2001; Turpin and Huntzicker, 1995). 계절별 OC/EC 비율은 봄철 9.4, 여름철 12.5, 가을철 9.8, 겨울철 7.3으로 여름철에 가장 높은 수준을 보였다. OC, EC가 여름철에 가장 낮은 농도(3.8 µg/m<sup>3</sup>, 0.3 µg/m<sup>3</sup>)를 보임에도 불구하고 높은 온도로 인한 광화학 반응으로 인해 생성된 OC가 많거나 혹은 EC로부터 전환된 OC가 다른 계절에 비해 상대적으로 많은 것으로 추정된다(Park *et al.*, 2015; Chow *et al.*, 1996; Gray *et al.*, 1986).

OC/EC의 비율을 이용하여 오염원의 추정이 가능하다. 예를 들어 OC/EC 비율이 1.0~4.2일 경우 디젤 및 가솔린 자동차 연소과정에서 기인하는 것으로 알려져 있고(Cho *et al.*, 2016; Schauer *et al.*, 2002; Schauer *et al.*, 1999), 2.4~24.0일 경우 생물성 연소에서 기인하는 것으로 보고되었다(Bouarar *et al.*, 2017; Ram *et al.*, 2010). 본 연구에서 전주 OC/EC 평균 비율은 9.3으로 분석되었고, 전주시 PM<sub>2.5</sub> 내 탄소성분이 생물성연소에서 기원했을 가능성을 보여준다.

중금속 성분의 경우 다른 성분에 비해 매우 낮은 농도 양상을 보였다. Fe의 경우 170.2 ng/m<sup>3</sup>의 값으로 가장 큰 농도를 보였으며 Al(74.4 ng/m<sup>3</sup>), Zn(72.5 ng/m<sup>3</sup>), Mn(27.7 ng/m<sup>3</sup>), As(18.7 ng/m<sup>3</sup>), Pb(6.6 ng/m<sup>3</sup>), Ti(2.9 ng/m<sup>3</sup>), V(2.1 ng/m<sup>3</sup>) 순서로 낮은 값이 분석되었고 Se와 Ni는 각각 0.7 ng/m<sup>3</sup>, 0.7 ng/m<sup>3</sup>로 1 ng/m<sup>3</sup> 미만의 값이 분석되었다. 10종의 중금속 성분 중 Al, Mn, Fe은 지각 및 토양의 구성 성분으로 알려져 있으며(Lee and Hu, 2016; Wang *et al.*, 2007), 각각 겨울철, 봄철, 여름철에 가장 높은 평균 농도를 나타내었다. 인위적 기원인 Ni, Zn, Pb는 각각 봄철, 여름철, 겨울철에 높은 평균 농도값을 보였으며 특히 Zn, Pb는 주로 이동 오염원에서 배출되는 중금속으로 알려져 있다(Lee and Hu, 2016; Xu *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2009). 해당 인위적 기원 중금속(Ni, Zn, Pb)은 본 연구에서 연평균 농도가 0.08 µg/m<sup>3</sup>로 분석되었으며

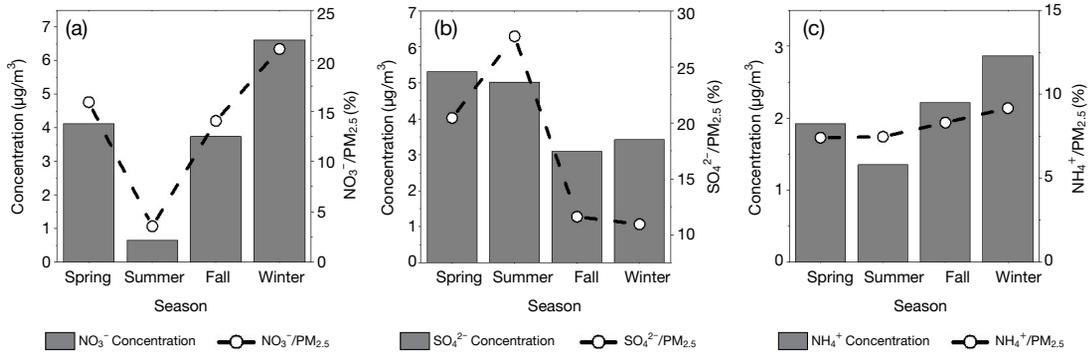


Fig. 4. Seasonal variations of (a)  $\text{NO}_3^-$ , (b)  $\text{SO}_4^{2-}$ , and (c)  $\text{NH}_4^+$ .

Table 4. Correlation analysis (Spearman's rank) for  $\text{PM}_{2.5}$  chemical compositions.

	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	Al	Fe	Zn	Pb	OC	EC
$\text{PM}_{2.5}$	1.00														
$\text{Cl}^-$	0.08	1.00													
$\text{NO}_3^-$	0.69***	0.05	1.00												
$\text{SO}_4^{2-}$	0.58***	0.11	0.35**	1.00											
$\text{Na}^+$	0.27*	0.08	0.25*	0.35***	1.00										
$\text{NH}_4^+$	0.80***	0.17	0.72***	0.72***	0.42***	1.00									
$\text{K}^+$	0.77***	0.13	0.71***	0.72	0.48***	0.97***	1.00								
$\text{Mg}^{2+}$	0.10	0.17	0.04	-0.02	-0.31	0.12	0.10	1.00							
$\text{Ca}^{2+}$	0.09	-0.06	0.16	0.01	-0.23	0.06	0.08	0.64***	1.00						
Al	-0.01	0.25*	-0.004	-0.04	-0.30	-0.11	-0.08	0.29*	0.26*	1.00					
Fe	-0.04	0.03	-0.19	0.09	-0.16	-0.11	-0.13	-0.09	-0.10	0.56***	1.00				
Zn	0.02	0.07	0.09	0.01	-0.13	-0.03	-0.02	0.31**	0.50***	0.54***	0.11	1.00			
Pb	0.35**	0.02	0.57***	0.16	0.19	0.36**	0.37***	-0.04	0.30**	0.21	0.21	0.15	1.00		
OC	0.75***	0.08	0.70***	0.35***	0.28***	0.65***	0.64***	0.09	0.09	-0.03	-0.15	0.08	0.40***	1.00	
EC	0.44***	-0.12	0.66***	-0.02	-0.01	0.38***	0.37***	0.16	0.16	-0.04	-0.12	-0.06	0.50***	0.67***	1.00

\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$

이는 서울  $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Sung *et al.*, 2017), 충주  $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kang *et al.*, 2015), 부산  $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (BMIH, 2018), 백령도  $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (NIER, 2016) 지역과 비교해 볼 때 유사한 수준으로 나타났다.

표 3에  $\text{PM}_{2.5}$  질량농도 이온성분, 중금속 성분, 탄소성분의 계절별 농도를 나타내었다. 전주  $\text{PM}_{2.5}$  질량농도의 약 47%에 해당하는 이온성분 중 주요 성분인  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 계절별 평균 농도와 기여율을 분석하였다.  $\text{NO}_3^-$ 의 경우 여름철에 가장 낮은 농도  $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 겨울철에 가장 높은 농도  $6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다(그림 4 (a)). 기여율 또한 계절과 동일한 양상이며 이는 대기 중  $\text{NO}_3^-$ 의 결합 형태인 질산암

모늄( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 해리 상수  $K_p$ 가 대기 온도에 의존하기 때문에 휘발 또는 해리하여 여름철 저농도 결과를 나타낸 것으로 보인다(Cho *et al.*, 2016; Seinfeld and Pandis, 2012; Ianniello *et al.*, 2011).  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도는 봄( $5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 가장 높고 가을( $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 가장 낮았다. 이는 2006년~2012년까지 수행된 Lim *et al.* (2015)의 계절별  $\text{SO}_4^{2-}$  평균값 특성, Cho *et al.* (2016)의 2014년 자료와 동일한 계절별 특성을 보였다. 기여율의 경우 가을과 겨울에 낮고 여름철 가장 높은 기여율을 보였는데(그림 4 (b)) 이는 높은 온도로 인한  $\text{SO}_2$ 의 광화학 산화반응에 의해 2차적으로 생성되었을 가능성을 시사한다(Yu *et al.*, 2015).  $\text{NH}_4^+$ 의 경

우 온도가 낮아질수록 높은 농도를 보였으며 겨울철 가장 높은 기여율을 나타내는 것으로 분석되었다(그림 4(c)).

표 4에 PM<sub>2.5</sub> 질량농도 및 화학성분의 상관관계를 분석하였다. 중금속 성분 중 Al, Fe, Zn, Pb를 제외한 나머지 성분은 검출한계 이하인 값이 상당하여 상관관계 분석에서 제외하였다. 분석결과 전주 지역은 PM<sub>2.5</sub>와 이온성분 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (r=0.58), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (r=0.69), NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (r=0.80) 및 유기탄소(r=0.75)의 상관도가 매우 높게 나타났다. 특히 토양 또는 해양입자의 성분 이면서 생물성 연소(Biomass burning)의 추적자 K<sup>+</sup> (Byun *et al.*, 2018; Lee and Hu, 2016; Kim *et al.*, 2015; Cao *et al.*, 2012)와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 상관도가 0.97로 매우 높게 나타났다. 상관분석을 통해 2017~2018년 동안 전주 PM<sub>2.5</sub>는 생물성 연소의 영향이 큰 것으로 판단된다.

### 3.3 2017~2018년 전주 PM<sub>2.5</sub> 고농도 특성

PM<sub>2.5</sub> 농도 구간별 PM<sub>10</sub> 대비 PM<sub>2.5</sub> 비율을 알아보기 위해 전체기간 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도를 PM<sub>2.5</sub> ≤ 15 μg/m<sup>3</sup>, 15 μg/m<sup>3</sup> < PM<sub>2.5</sub> ≤ 35 μg/m<sup>3</sup>, 35 μg/m<sup>3</sup> < PM<sub>2.5</sub> ≤ 50 μg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub> > 50 μg/m<sup>3</sup>의 4구간으로 분류하여 PM<sub>2.5/10</sub> 비율을 계산하였다(그림 5). 각 구간별 시료의 개수는 PM<sub>2.5</sub> 저농도에서 고농도로 갈수록 각각 23, 41, 5, 9개로 약 53%의 시료가 15 μg/m<sup>3</sup> < PM<sub>2.5</sub> ≤ 35 μg/m<sup>3</sup> 범위에 있다. PM<sub>2.5</sub> ≤ 15 μg/m<sup>3</sup> 구간에서는 PM<sub>2.5/10</sub> 비율이 0.34로 나타났고 고농도로 갈수록 비율이 증가하여 PM<sub>2.5</sub> > 50 μg/m<sup>3</sup> 초과인 구간에서는 0.71의 비율로 고농도 구간으로 갈수록 PM<sub>2.5</sub>의 비율이 급격하게 증가하였다. 3.1절에서 설명하였듯이 PM<sub>2.5/10</sub>는 대기 중 2차적으로 생성되는 미세먼지의 비율을 간접적으로 제시하는 지표로 사용할 수 있다. 즉 전주 PM<sub>2.5</sub> 고농도 발생 시 대기 중에서 생성되는 2차 미세먼지의 기여율이 높은 것으로 판단된다.

PM<sub>2.5</sub> 질량농도 구간별 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC, 중금속의 비율을 분석하였다(그림 6). 저농도인 PM<sub>2.5</sub> ≤ 15 μg/m<sup>3</sup>에서는 OC > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > 중

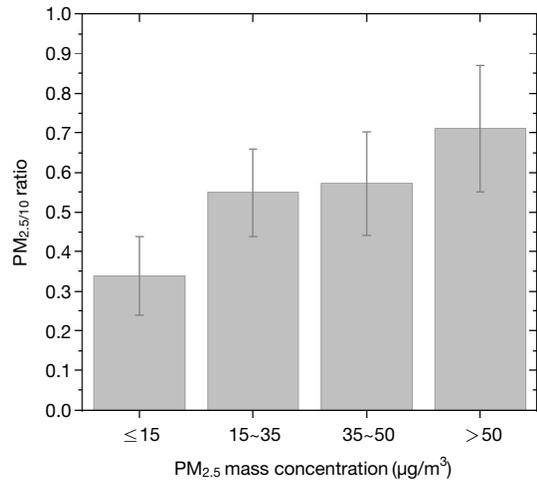


Fig. 5. PM<sub>2.5/10</sub> ratio by PM<sub>2.5</sub> mass concentrations.

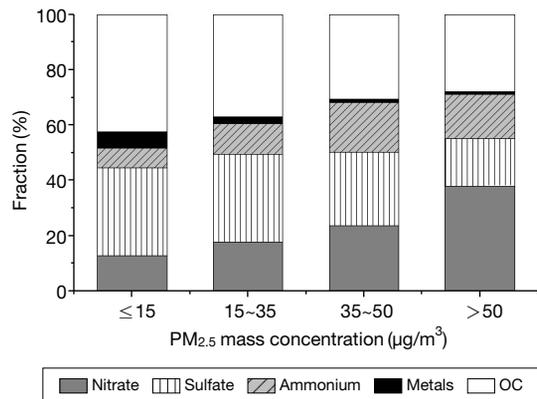
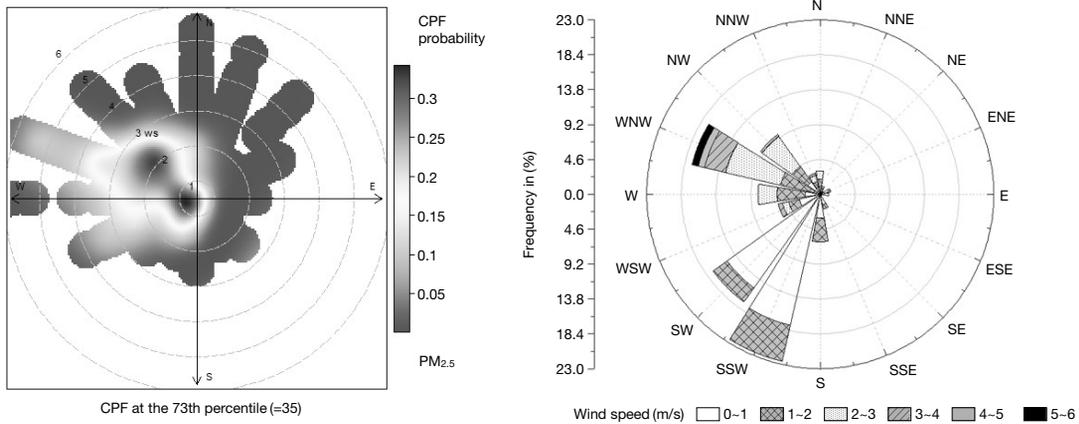


Fig. 6. Fractions of nitrate, sulfate, ammonium, metals, and organic carbon in PM<sub>2.5</sub> mass concentrations.

금속 순으로 나타난 반면 고농도인 PM<sub>2.5</sub> > 50 μg/m<sup>3</sup>에서는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > OC > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > 중금속 순으로 나타났다. 특징적으로 PM<sub>2.5</sub> 저농도에서 고농도 구간으로 갈수록 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 증가가 뚜렷하며, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 12.7%에서 38.0%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 7.2%에서 16.1%로 증가하였다. 전라북도 전주에서 고농도 구간에서는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, OC가 풍부하게 나타났다. 고농도로 갈수록 질산염의 증가가 뚜렷하지만 PM<sub>2.5</sub> 안에 유기물질(organic matter)을 고려하게 되면 (Lim and Turpin, 2002) 고농도 구간에서도 상당히 많은 유기성분이 존



**Fig. 7.** Results of (a) conditional probability function (CPF) and (b) windrose in Jeonju during high episodes of PM<sub>2.5</sub> (PM<sub>2.5</sub> > 35 μg/m<sup>3</sup>).

재할 것으로 추정된다. 2017년~2018년 전주에서 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 발생하였을 때 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 주요한 오염성분인 것으로 분석되었다. 이는 그림 2의 월별, 계절별 PM<sub>2.5</sub> 질량농도 경향(여름철 저농도, 겨울철 고농도)과 그림 4의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 계절별 특성(여름철 저농도, 겨울철 고농도)에 부합하는 결과로 해석된다. 즉, 2차 미세먼지의 생성이 활발한 겨울철 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 생성 비율이 높아지며 고농도의 PM<sub>2.5</sub> 현상에 기여할 수 있음을 시사한다. OC의 경우 15 μg/m<sup>3</sup> < PM<sub>2.5</sub> ≤ 35 μg/m<sup>3</sup> 구간까지 가장 높은 비율을 보여주었고, PM<sub>2.5</sub> > 50 μg/m<sup>3</sup>에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 다음으로 높은 약 28%의 비율로 분석되어 전주 PM<sub>2.5</sub> 생성에 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다.

### 3.4 PM<sub>2.5</sub> 기원 추적

2017년 5월~2018년 5월 전주 PM<sub>2.5</sub> 1시간 평균 기준 미세먼지 발생 시 풍향, 풍속에 따른 오염물질의 기원 추적을 위해 CPF 모델링을 수행하고 같은 기간 바람 장미도를 작성하였다(그림 7). 모델 결과, PM<sub>2.5</sub> > 35 μg/m<sup>3</sup>일 때 오염물질이 유입될 가능성이 가장 높은 지역은 전주시 북서쪽으로 분석되었으며, 해당 영역을 제외한 대부분의 풍향, 풍속에서 오염물질 유입의 확률은 0에 가까웠다. 풍속 0.5~3 m/s 범위

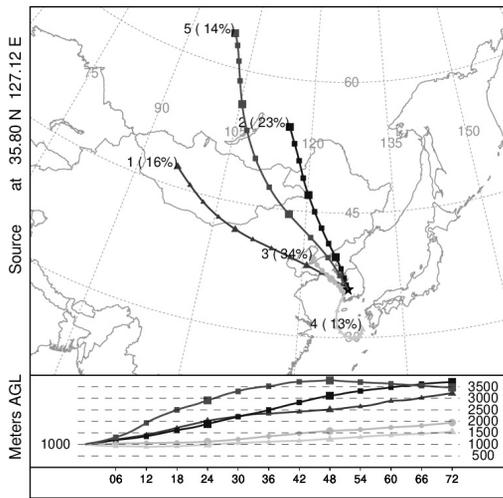
내 남서풍(SW) 또는 북서풍(NW)의 영향이 매우 크게 작용하였으나 풍속 2 m/s 이상에서 북, 동, 남풍의 영향은 거의 존재하지 않았다. 풍속이 낮은 남서풍일 수록 고농도일 확률이 증가하였고 서북서풍(WNW)의 경우 최대 풍속 5 m/s의 빠른 속도에서도 고농도 현상의 가능성이 분석되었다. 이러한 고농도 현상의 원인으로 측정소에서 약 4.5 km 거리의 측정소 서쪽에 위치한 소각장, 더 멀게는 15~20 km 이격된 김제, 익산의 농축사 밀집 지역과 약 50 km 떨어진 군산 국가산업단지가 위치하고 있어 이러한 시설에 의해 국지적인 영향을 받은 것으로 판단된다.

### 3.5 2017~2018년 전주시역 역궤적 분석 결과

장거리 이동에 의한 오염물질 유입을 파악하기 위해 역궤적 군집 분석을 수행하였다(표 5, 그림 8). 전체 궤적을 총 5개의 cluster로 구분하였으며 cluster 1은 16%로 몽골 북서부에서 발원하여 3 km 고도에서 고비사막을 통과해 중국 내 대표적인 공업단지 구역인 징진지(베이징-톈진-허베이)를 거쳐 서해에서 전주시로 이동하는 공기궤로 분석되었다. PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 37.8 μg/m<sup>3</sup>로 5개의 군집 중 가장 높게 나타났다. Cluster 2는 23%로 러시아에서 발원하여 중국, 북한을 거쳐 수용점에 도착하는 공기궤로 분석되었으

**Table 5.** PM<sub>2.5</sub> average mass concentration and meteorological characteristics in five cluster. The values in parentheses indicate standard deviations (1σ).

	Fraction (%)	PM <sub>2.5</sub> mass concentration (μg/m <sup>3</sup> )	Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (m/s)	
Cluster	1	16	37.8 (28.5)	6.8 (7.6)	64.9 (18.5)	1.4 (0.9)
	2	23	27.7 (23.4)	8.8 (9.5)	59.7 (21.1)	1.8 (1.3)
	3	34	37.2 (25.4)	13.1 (7.4)	65.7 (18.9)	1.3 (0.7)
	4	13	25.2 (17.0)	18.5 (4.6)	58.2 (18.5)	1.5 (0.8)
	5	14	20.5 (12.9)	2.9 (9.8)	56.3 (18.5)	2.8 (1.2)

**Fig. 8.** Backward trajectories and cluster analysis in Jeonju (Samcheon-dong).

며 평균 농도는 27.7 μg/m<sup>3</sup>로 나타났다. Cluster 3 (37.2 μg/m<sup>3</sup>)은 34%로 가장 많은 궤적을 가지고 중국 다롄시 근처에서 발원하여 천천히 낮은 고도에서 전주로 유입되는 경우이며, cluster 4는 13%로 기온이 가장 높고 남해에서 발원하여 천천히 머무르다가 전주로 유입되는 경우이다. Cluster 5는 14%이며 러시아에서 발원하여 빠르게 전주로 유입되는 장거리 이동의 궤적을 보였다. 이때에는 PM<sub>2.5</sub> 저농도 (20.5 μg/m<sup>3</sup>)로 나타났다. 평균 농도가 가장 높은 군집 1과 군집 3은 주로 몽골과 중국 공업단지 근처 해안에서 생성된 공기궤로 높은 고도에서 발원하여 중국 동부 공업단지를 거쳐 장거리 이동에 의해 내륙에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2017년 5월~2018년 5월의 전주시 대기 중 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 화학적 특성을 분석하였다. 2017~2018년 전주 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 농도는 25.8 μg/m<sup>3</sup>로 국내 연평균 기준을 크게 초과하는 것으로 나타났다. 월별 PM<sub>2.5</sub> 화학조성 분석결과 전주시 PM<sub>2.5</sub>의 주요한 성분은 OC, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>인 것으로 나타났으며, 평균 농도는 OC 5.6 μg/m<sup>3</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 4.4 μg/m<sup>3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 3.9 μg/m<sup>3</sup>였다. 전체 측정기간 전주에서 OC/EC 비율은 9.3으로 다량의 탄소성분이 생물성 연소에서 기인했을 것으로 추정되었다. 또한, 상관분석 결과에서도 PM<sub>2.5</sub>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, OC의 상관도가 매우 높은 것으로 나타났으며, 특히 생물성연소의 추적자인 K<sup>+</sup>의 경우 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>과 가장 높은 상관성 (0.97)을 보여줌에 따라 이 지역이 생물성연소의 영향이 큰 것을 시사하였다.

전주시 고농도 PM<sub>2.5</sub> 특성을 분석하기 위해 PM<sub>2.5/10</sub> 비율 분석결과 고농도로 갈수록 PM<sub>2.5</sub>의 비율이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이로부터 전주시 대기 중 2차적으로 생성되는 미세먼지가 상당한 것으로 판단된다. 또한, PM<sub>2.5</sub> 고농도 화학조성에서 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>>OC>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>>중금속 순으로 나타났으며 특히 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높아질수록 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 비율이 급격하게 증가하였다.

CPF 모델 결과 전체 측정기간 동안 풍속 0.5~3 m/s (최대 5 m/s), 풍향 남서풍(SW) 또는 북서풍(NW)에서 고농도 미세먼지의 가능성이 높은 것으로 나타났다. 또한, 역궤적 군집 분석 결과 중국 공업지대에

서 발원된 공기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092015) 및 2018년도 전북녹색환경지원센터의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다(18-14-02-01-15).

## References

- Ahn, B.Y., Chun, Y.S. (2011) The Characteristics Asian Dust Observed in Japan Deflecting the Korean Peninsula (2010. 5. 22.-5. 25.), *Journal of the Korean Earth Science Society*, 32(4), 388-401. (in Korean with English abstract)
- Ashbaugh, L.L., Malm, W.C., Sadeh, W.Z. (1985) A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park, *Atmospheric Environment* (1967), 19(8), 1263-1270.
- Bouarar, I., Wang, X., Brasseur, G.P. (2017) *Air Pollution in Eastern Asia: An Integrated Perspectives*, Springer.
- Brich, M.E., Cary, R.A. (1996) Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust, *Aerosol Science and Technology*, 25(3), 221-241.
- Busan metropolitan city institute of health & environment (BMIH) (2018) Annual Research Report, 27.
- Byun, J.Y., Cho, S.H., Kim, H.W., Han, Y.J. (2018) Long-term Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and Its Metallic Components in Chuncheon, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 406-417. (in Korean with English abstract)
- Cao, J., Shen, Z., Chow, J.C., Qi, G., Watson, J.G. (2009) Seasonal variations and sources of mass and chemical composition for PM<sub>10</sub> aerosol in Hangzhou, China, *Particulateology*, 7(3), 161-168.
- 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<sub>2.5</sub> Chemical Compositions in Fourteen Chinese Cities, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(10), 1214-1226.
- Cho, S.H., Kim, P.R., Han, Y.J., Kim, H.W., Yi, S.M. (2016) Characteristics of Ionic and Carbonaceous Compounds in PM<sub>2.5</sub> and High Concentration Events in Chuncheon, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 435-447.
- 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<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJAQs/AUSPEX, *Atmospheric Environment*, 30(12), 2079-2112.
- Dockery, D.W. (2009) Health effects of particulate air pollution, *Annals of Epidemiology*, 19, 257-263
- Gray, H.A., Cass, G.R., Huntzicker, J.J., Heyerdahl, E.K., Rau, J.A. (1986) Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon particle concentration in Los Angeles, *Environmental Science & Technology*, 20, 580-582.
- Ham, J.Y., Lee, H.J., Cha, J.W., Ryoo, S.B. (2017) Potential Source of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and OC and EC in Seoul During Spring 2016, *Atmosphere*, 27(1), 41-54. (in Korean with English abstract)
- Ianniello, A., Spataro, F., Esposito, G., Allegrini, I., Hu, M., Zhu, T. (2011) Chemical characteristics of inorganic ammonium salts in PM<sub>2.5</sub> in the atmosphere of Beijing (China), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(21), 10803-10822.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) *Fifth Assessment Report: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, pp. 571-658.
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2016) *Outdoor air pollution*, vol 109.
- Jeon, H.U., Park, J.S., Kim, H.J., Sung, M.Y., Choi, J.S. (2015) The Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Concentration and Chemical Composition of Seoul Metropolitan and Inflow Background area in Korea Peninsula, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 15(3), 261-271. (in Korean with English abstract)
- Kang, B.Y., Lee, H.S. (2015) Source Apportionment of Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) in the Chungju City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 437-448. (in Korean with English abstract)
- Kang, G.U., Yang, G.S., Hwang, G.S. (2006) Comparison of Chemical Components in Ambient Fine and Coarse Particles in the Iksan during Fall, 2004, *Korean Soci-*

- ety of Environmental Engineer, Fall Conference, pp. 816-822.
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.S., Jung, J.S., Lee, J.H., Lee, S.I. (2015) Seasonal Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM<sub>2.5</sub> in Daejeon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 28-40. (in Korean with English abstract)
- Korea Environment Corporation (KECO) (2018) Airkorea, Confirmation data by measuring station, <https://www.airkorea.or.kr> (accessed 12.07.2018).
- Lee, H.S., Kang, B.W. (2001) Chemical characteristics of principal PM<sub>2.5</sub> species in Chongju, South Korea, *Atmospheric Environment*, 35(4), 739-746.
- Lee, D.E., Kim, W.H., Jo, E.K., Han, J.H. (2011) Acidification and Neutralization Characteristics of Atmospheric Fine Particles at Gosan Site of Jeju Island in 2008, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 603-613. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.B., Kim, S.D., Kim, D.S. (2015) Ion Compositional Existence Forms of PM<sub>10</sub> in Seoul Area, *Korean Society of Environmental Engineer*, 37(4), 197-203. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.H., Hu, C.G. (2016) Ionic and Elemental Compositions of PM<sub>2.5</sub> at the 1,100 m-Highland of Mt. Hallasan in Jeju Island, *Journal of Environmental Science International*, 25(6), 865-875. (in Korean with English abstract)
- Lim, H.J. Turpin, B.J. (2002) Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: Results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment, *Environmental Science & Technology*, 36, 4489-4496.
- Lim, H.J., Lee, T.J., Kim, D.S. (2015) Study on Chemical Characterization of PM<sub>2.5</sub> based on Long-term Database (1990~2012) and Development of Chemical Species Profiles During Haze Days and Asian Dust Days in Yongin-Suwon Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 223-238. (in Korean with English abstract)
- Ministry of Environment (MOE) (2017) Manual for high-concentration fine dusts for protecting infants, students, seniors, and other vulnerable groups (in Korean), 16 pp.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) The study on the source contribution of pollutants and the characteristics of regional air parcel movement in the Korean Peninsula (in Korean), Ministry of Environment.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) National Air Pollutants Emission Service, <http://airemiss.nier.go.kr> (accessed 12.07.2018).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Identification and Generation Process of PM<sub>2.5</sub> Concentration by Region (II) (in Korean), Ministry of Environment.
- Park, J.S., Song, I.H., Park, S.M., Shin, H.J., Hong, Y.D. (2015) The Characteristics and Seasonal Variations of OC and EC for PM<sub>2.5</sub> in Seoul Metropolitan Area in 2014, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 24(6), 578-592. (in Korean with English abstract)
- Park, S.A., Shin, H.J. (2017) Analysis of the Factors Influencing PM<sub>2.5</sub> in Korea : Focusing on Seasonal Factors, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 25(1), 227. (in Korean with English abstract)
- Park, S.S., Cho, S.Y., Kim, S.J. (2010) Chemical Characteristics of Water Soluble Components in Fine Particulate Matter at a Gwangju area, *Korean Chemical Engineering Research*, 48(1), 20-26. (in Korean with English abstract)
- Pöschl, U. (2005) Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects, *Angewandte Chemie International Edition*, 44, 7520-7540.
- Ram, K., Sarin, M.M. (2010) Spatio-temporal variability in atmospheric abundances of EC, OC and WSOC over Northern India, *Journal of Aerosol Science*, 41(1), 88-98.
- Saxena, M., Sharma, A., Sen, A., Saxena, P. (2016) Water soluble inorganic species of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at an urban site of Delhi, India: Seasonal variability and sources, *Atmospheric Research*, 184, 112-125.
- Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R., Simoneit, B.R. (1999) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources: 2. C<sub>1</sub> through C<sub>30</sub> Organic Compounds from Medium Duty Diesel Trucks, *Environmental Science & Technology*, 33, 1578-1587.
- Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R., Simoneit, B.R.T. (2002) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 5. C<sub>1</sub>-C<sub>32</sub> Organic Compounds from Gasoline-powered Motor Vehicles, *Environmental Science & Technology*, 36(6), 1169-1180.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2012) Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, New York.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M.M.B., Miller, H.L. (2007) IPCC Fourth

- Assessment Report: Climate Change 2007: The Physical Science Basis (Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change), Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Statistics Korea (KOSTAT) (2015) Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr> (accessed 12.07.2018).
- Sung, M.Y., Moon, K.J., Park, J.S., Kim, H.J., Jeon, H.E., Choi, J.S., Ahn, J.Y., Hong, Y.D. (2017) Chemical Composition and Source Apportionment using the PMF Model of the Ambient PM<sub>2.5</sub> in 2013 over Korea. *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 17(2), 145-156. (in Korean with English abstract)
- Turpin, B.J., Huntzicker, J.J. (1995) Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmospheric Environment*, 29(23), 3527-3544.
- United States environmental protection Agency (US EPA) (1999) Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air.
- Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Zhang, W., Sun, Y., Wang, Z., An, Z. (2007) The evolution of chemical components of aerosols at five monitoring sites of China during dust storms, *Atmospheric Environment*, 41(5), 1091-1106.
- Won, S.R., Choi, Y.J., Kim, A.R., Choi, S.H., Ghim, Y.S. (2010) Ion Concentrations of Particulate Matter in Yongin in Spring and Fall, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(3), 265-275. (in Korean with English abstract)
- Xu, L., Chen, X., Chen, J., Zhang, F., He, C., Zhao, J., Yin, L. (2012) Seasonal variations and chemical compositions of PM<sub>2.5</sub> aerosol in the urban area of Fuzhou, China, *Atmospheric Research*, 104-105, 264-272.
- Yu, G.H., Cho, S.Y., Bae, M.S., Lee, K.H., Park, S.S. (2015) Investigation of PM<sub>2.5</sub> Pollution Episodes in Gwangju, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 269-286. (in Korean with English abstract)
- 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. (2018) Difference in Chemical Composition of PM<sub>2.5</sub> 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)

## Authors Information

조광곤 (전북대학교 지구환경과학과 석사)

김동우 (전북대학교 지구환경과학과 학부생)

송미정 (전북대학교 지구환경과학과 교수,

전북대학교 지구환경시스템연구소 겸임연구원)