



2010~2015년 전라북도 도시대기 PM₁₀의 특성 Distributions and Origins of PM₁₀ in Jeollabuk-do from 2010 to 2015

조 병 수¹⁾ · 송 미 정^{1),2),*}

¹⁾전북대학교 지구환경과학과, ²⁾전북대학교 지구환경시스템연구소
(2017년 4월 7일 접수, 2017년 5월 31일 수정, 2017년 6월 6일 채택)

Byeongsu Cho¹⁾ and Mijung Song^{1),2),*}

¹⁾*Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University*

²⁾*The Earth and Environmental Science System Research Center, Chonbuk National University*

(Received 7 April 2017, revised 31 May 2017, accepted 6 June 2017)

Abstract

Recently, Jeollabuk-do has been reported as a province where the PM₁₀ concentration is one of the highest levels in South Korea. To explore the characteristics and origins of the PM₁₀ in Jeollabuk-do, we present one of the first long-term datasets including a statistical analysis of PM₁₀ concentrations obtained from six cities in the province from 2010 to 2015. During the entire periods, the mean hourly PM₁₀ concentration was 49.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which correspond to the annual ambient air quality standards for PM₁₀ in South Korea, and the annual PM₁₀ concentration of each city showed a similarity in year-to-year variations. In the monthly variation of PM₁₀, the PM₁₀ concentrations showed a maximum value in May that was one of the top levels among the provinces of Korea while the concentrations were dramatically decreased in August showing one of the lowest levels among the provinces in Korea. For the diurnal variation of PM₁₀, the PM₁₀ concentration was enhanced during the rush hours together with gaseous species of NO₂, and CO. When the high concentrations of PM₁₀ were observed (the highest 10% of the PM₁₀ mass contribution), temperature and relative humidity were low. Using HYSPLIT backward trajectories and cluster analysis for the high PM₁₀ concentrations, we found that the pollution plumes were transported mainly from China.

Key words : PM₁₀, Meteorological parameters, Precursor gases, Local pollutants, Long-range transport pollutants

1. 서 론

에어로졸은 대기 중을 부유하는 고체상, 액체상의 입자상 물질로 크기에 따라 구분이 된다. 에어로졸 중

직경이 10 μm 이하인 것을 PM₁₀ (Particulate matter)이라고 하며, 먼지바람, 파도, 생물성 연소 등에 의해 직접적으로 대기 중으로 배출되기도 하고, 식생, 대도시로부터 방출되는 휘발성 유기화합물과 산화제의 광화학 반응에 의해 이차적으로 생성되기도 한다(Aldabe *et al.*, 2011; Pandolfi *et al.*, 2011; Myles *et al.*, 2010, 2009). 이러한 에어로졸은 직접적으로 태양빛을 산란/

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)63-270-3394, E-mail : mijung.song@jbnu.ac.kr

흡수하며, 간접적으로 구름의 성질을 변화시킨다(Solomon, 2007). 또한, 호흡기 질환 등을 일으키며 인체에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Harrison *et al.*, 2012; Baltensperger *et al.*, 2008; Jang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2003).

대기 중 PM_{10} 의 농도는 기상조건, 장거리 수송에 의한 국외 유입, 대기화학과정, 지역적 배출량, 지형 등과 밀접하게 연관되며 시·공간적으로 영향을 받게 된다. 예를 들어, 우리나라는 봄, 가을, 겨울에 북서풍이 우세하고 장거리 유입이 활발하여, 이와 연관된 기상조건과 미세먼지의 농도는 밀접한 연관성을 갖는 것으로 보고되었다(Seoul Development Institute, 2011; Chen *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2006). 또한 연무(시정: 1~10 km, 상대습도: 75% 이하), 박무(시정: 1~10 km, 상대습도: 75% 이상) 등의 기상 현상에 의해 공기가 정체되고, 정체된 공기 안에서 효율적인 화학 반응이 일어나면서 고농도의 미세먼지가 나타나는 것으로 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2013; Jo and Kim, 2011; Choi *et al.*, 2003; Chun *et al.*, 2003).

우리나라는 1993년부터 PM_{10} 을 대기환경 기준 물질로 채택하여 규제하고 있다. PM_{10} 의 대기환경 기준 농도는 1993년 연평균 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 연평균 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2007년 연평균 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기준이 강화되었다. 2016년 7월말 기준으로 전국에서 263개의 도시대기 측정소, 37개의 도로변대기 측정소, 3개의 국가배경농도 측정소, 19개의 교외대기 측정소가 운영되고 있으며, 실시간으로 PM_{10} 농도를 공개하고 있다(<http://www.airkorea.or.kr>). 2010~2015년 우리나라 전국 PM_{10} 연평균 농도는 약 $48.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미국 LA $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 일본 도쿄 $20.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해서 상당히 높은 수치이다(NIER, 2016).

우리나라 전체 면적의 약 8%를 차지하는 전라북도는 인구수 약 186만 지역으로(2017년, 국가통계포털, <http://kosis.kr>), 지형적으로는 서쪽으로 한반도 서해안과 접하여 있고, 동쪽으로는 소백산맥과 남쪽으로는 노령산맥이 접하여 있다. 2013년 비산먼지 및 생물성 연소를 제외한 전라북도 연간 PM_{10} 배출량은 1,624톤으로 보고되었다(NIER, 2015). 전라북도 PM_{10} 배출량 중 약 43%가 도로이동오염원으로 가장 높은 배출량을 보였고, 다음으로 비도로이동오염원 36%, 비산업 연소

6%, 제조업 연소 5%로 조사되었다(NIER, 2015). 전라북도 지역에서의 PM_{10} 배출량은 전국 PM_{10} 배출량의 오직 1.3%로 매우 적은 양을 차지하는 것에 비해, 대기 중 PM_{10} 의 농도는 높은 수준을 나타내고 있다. Kim and Ma (2009)의 연구에서 2004~2006년 군산과 전주에서의 PM_{10} 연평균 농도는 각각 약 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 약 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 두 지역 모두 우리나라 연평균 PM_{10} 환경 기준에 근접하거나 초과하는 수준으로 나타났다. 좀 더 최근인 2010~2015년 동안 전라북도지역 연평균 PM_{10} 농도는 평균 $50.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 여전히 우리나라 환경 기준치를 초과하는 수준이다(충북 $54.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경기 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 인천 $51.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NIER, 2015). 또한 2010~2015년간 우리나라 17개 시도별 연평균 PM_{10} 농도 순위에서 전라북도지역은 항상 4위 이내에 랭크되고 있다(NIER, 2015). 지난 수년간 전라북도지역 대기 중 PM_{10} 농도는 우리나라에서 항상 높은 순위를 나타내고 있음에도 불구하고 그 원인과 주요 오염원을 규명하기 위한 연구는 수행된 적이 없다.

본 연구에서는 최근 우리나라에서 가장 높은 수준의 미세먼지 농도를 보이고 있는 전라북도 도시대기 지역의 미세먼지 현황을 파악하고자 한다. 이를 위해 2010년부터 2015년까지 6년간의 장기간 PM_{10} 의 농도를 시공간적으로 분석하였다. 또한 전라북도에서 나타나는 PM_{10} 고농도 사례와 이에 수반되는 기상요소, 가스상 물질과의 연관성, 기원을 추적함으로써 전라북도 도시대기의 특성을 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 자료 수집

본 연구에서는 에어코리아에서 제공하고 있는 2010~2015년 전라북도 보건환경연구원의 도시대기 측정소 확정 자료를 이용하여 PM_{10} 및 가스상물질(SO_2 , CO , O_3 , NO_2)의 1시간 평균 자료를 수집하였다. 전라북도에는 2017년 현재 총 14개의 측정소에서 도시대기 PM_{10} 농도를 측정하고 있다(전주: 3개, 군산: 3개, 익산: 3개, 김제: 1개, 부안: 1개, 정읍: 1개, 고창: 1개, 남원: 1개). 미세먼지와 기상현상과의 연관성을 분석하기 위해 14개 측정소 중에서 각 지역에서 기상대와 가까운 측정소 총 6곳을 선정하였다(전주 중앙동, 군산 소

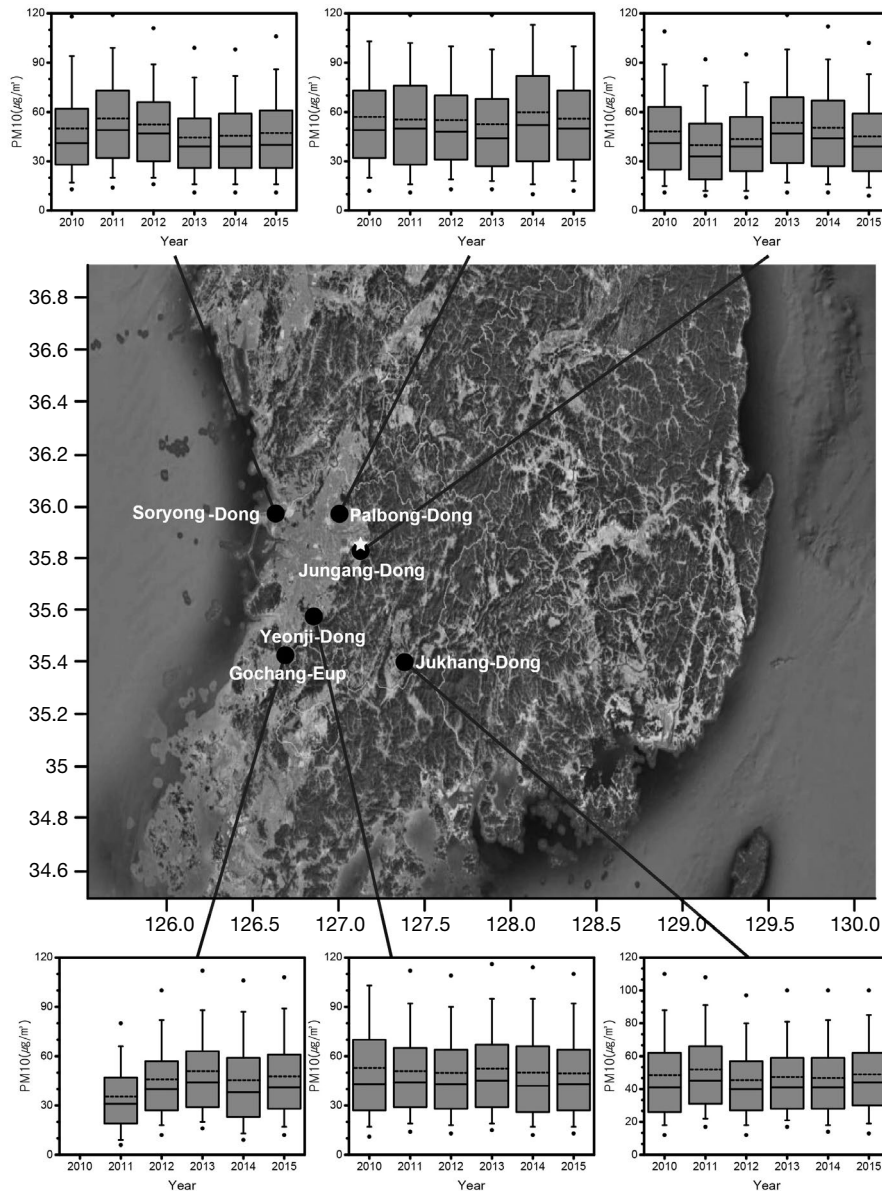


Fig. 1. The location of six air quality monitoring stations (Soryong-dong, Palbong-dong, Jungang-dong, Yeonji-dong, Gochang-eup, Jukhang-dong) in Jeollabuk-do (marked by red dots). The annual variations of PM₁₀ concentrations at each station in Jeollabuk-do between 2010 and 2015 are also shown. In the plot, the box indicates 25% and 75% of PM₁₀ concentrations and dot represents 5% and 95% of PM₁₀ concentration. Solid and dashed lines indicate median value and mean value of the PM₁₀ concentration, respectively. The location of the weather station at Jeonju is also included (marked by star).

룡동, 익산 팔봉동, 남원 죽향동, 정읍 연지동, 고창 고창읍). 그림 1과 표 1은 6개 측정소의 위치와 정보를 보여준다.

2.2 자료 분석방법

기상자료는 기상청에서 제공하는 ASOS(Automated Synoptic Observing System)와 AWS(Automatic Wea-

Table 1. Information of six stations studied in this work. Annual mean PM₁₀ concentrations of the stations from 2010 to 2015 are listed. For the data in the year of 2010 of Gochang station, the available measurement data rate is less than 75% and thus the data is excluded in this work.

City	Name	Surrounding environment	Mean PM ₁₀ (μg/m ³)						
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2010~2015
Iksan	Palbong-dong	Industrial zone, Hill, Residential zone	57.0	55.5	55.1	52.5	59.9	55.9	56.0
Jeongeup	Yeonji-dong	Residential zone, Commercial zone	52.9	50.9	49.8	52.4	50.1	49.5	50.9
Gunsan	Soryong-dong	Industrial zone, Farmland, Sea	50.1	55.9	52.4	44.5	45.5	47.2	49.2
Namwon	Jukhang-dong	Residential zone	48.5	51.9	45.4	47.4	46.7	48.9	48.2
Jeonju	Jungang-dong	Residential zone, Commercial zone, City hall	48.1	39.9	43.4	53.3	50.4	45.1	46.7
Gochang	Gochang-eup	Residential zone, Commercial zone, mountain, Empty lot	—	35.4	45.9	50.9	45.4	47.7	45.0
Six cities	Six stations		51.3	48.1	48.8	50.1	49.5	48.8	49.3

ther Station) 관측자료 중 기온, 강수량, 풍향, 풍속, 상대습도, 현상번호의 1시간 평균 자료를 이용하였다. 이 중 전라북도의 일반적인 도시대기 미세먼지 특성을 파악하기 위해 세정작용이 뚜렷하게 나타나는 초기강우 5 mm 이상(Choi *et al.*, 1998)의 발생 시간은 분석에서 제외하였다. 또한 기상청에서 발령한 황사 발생 시간의 측정 자료는 분석에서 제외하였다. 황사 발생 시간은 전라북도의 황사 제외 기준이 되는 기상관측소인 전주를 선택하였다. 초기강우 5 mm, 황사 발생 시간을 제외하고 연도별 PM₁₀의 자료가 75% 이상일 때 분석하였다. 고창 2010년의 경우 PM₁₀의 자료가 전체 일년 중 25%만이 활용 가능하여 분석에서 제외하였다.

기상요소의 변화에 의해 PM₁₀의 농도가 어떻게 변화하는지 분석하기 위해 일원배치분산분석(One way ANOVA)을 실시하였다. 본 연구에서는 PM₁₀ 농도 수준에 따라 나타난 기상학적 특성을 파악하기 위해 PM₁₀ 농도구간은 6개의 백분위수로 나누어 PM₁₀ 10% 이하, 10~25%, 25~50%, 50~75%, 75~90%, 90% 이상으로 구분하였다. 일원배치분산분석이란 X개의 표본들의 분포가 같은지를 판단하는 것으로 독립변수를 몇 개의 수준 또는 구간으로 나누고, 나누어진 집단이 통계적으로 유사한 지를 검정하는 것이다(Won and Jung, 2005). 유의수준은 5%로 설정하였으며, 유의수준보다 유의확률(p-value)이 작다면 구간간의 유의한 차이가 있는 것으로 판단할 수 있다. 그 결과 유의확률(p-value)이 모두 0.000으로 나타나 각 기상요소는 각 농도구간에 대해 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다.

2.3 역궤적 분석

고농도 PM₁₀ 발생 시간의 종관 규모 기류 패턴을 파악하기 위해 미국해양대기국(NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory (HYSPPLIT-4) 모델을 이용하여 역궤적 분석을 실시하였다. 공기의 역궤적 분석을 위해 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)에서 제공하는 GDAS (Global Data Assimilation System)를 사용하였다. GDAS는 1°의 수평해상도와 3시간의 시간해상도를 제공하고 있다. 2010~2015년 동안 PM₁₀ 농도의 데이터 수가 가장 많은 전주의 중앙동 관측소의 1500 m 상공의 공기를 6시간 간격으로 72시간 동안 역궤적 분석을 수행하였다.

2.4 CPF (Conditional Probability Function) model

전라북도 지역 중 대표도시인 전주의 국지적인 오염원의 위치를 추적하기 위해 CPF 모델을 활용하였다. 전주 기상대의 위치는 그림 1에 표시하였다. 전주 기상대는 전주 중앙동 대기관측소와 약 2.8 km 떨어져 있다. 기상자료는 2010~2015년 전체 측정기간 동안의 전주 중앙동 미세먼지 데이터와 대응하게 하여 1시간 평균자료를 이용하였다.

CPF 모델은 풍향을 이용하여 오염원의 국지적인 위치를 추정할 수 있는 조건부 확률이다(Watson *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2003). CPF 값이 1에 가까울수록 그 방향에 오염원이 존재할 가능성이 높은 것을 의미하며 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$CPF_{\Delta\theta} = m_{\Delta\theta} / n_{\Delta\theta} \quad (1)$$

$m_{\Delta\theta}$ 는 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람의 빈도수 중 농도가 일정 기준치 이상일 때의 바람 빈도수이고, $n_{\Delta\theta}$ 는 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람의 총 빈도수이다. 본 연구에서 $\Delta\theta$ 는 22.5°로 설정하여 16방위로 결정하였다. 기준치는 PM₁₀ 6개의 농도구간 중 10% 이하(저농도 PM₁₀)와 90% 이상(고농도 PM₁₀)으로 설정하였다. 또한 풍속이 매우 낮은 0.5 m/s 미만일 때는 불어오는 방향에 대한 불확실도가 높아 분석에서 제외하였다.

3. 결 과

3.1 전라북도 PM₁₀과 가스상물질 농도 분포

그림 1과 표 1은 2010~2015년 전라북도 6개 대기오염측정소의 연평균 PM₁₀의 농도를 보여준다. 그림 1의 박스플롯에서 박스는 PM₁₀ 농도의 25%, 75% 수준을 의미하며, 실선은 중앙값, 점선은 평균값, 점은 각각 5%, 95% 수준을 나타낸다. 2010~2015년 기간 동안 전라북도 6개 측정소의 PM₁₀ 평균 농도는 $49.4 \pm 31.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 이러한 전라북도의 PM₁₀ 평균 농도는 연평균 PM₁₀ 대기환경 기준치인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 상응하는 수치이다. 특히 전라북도 6개 측정소 중에서 익산 팔봉동의 PM₁₀ 평균 농도가 $56.0 \pm 36.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났다. 정읍의 연지동은 $50.9 \pm 32.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 6개 측정소 중 두 번째로 높은 농도를 보였다. 다음으로 군산의 소룡동 $49.2 \pm 31.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 남원의 죽향동 $48.2 \pm 28.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 전주의 중앙동 $46.7 \pm 30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 고창의 고창읍 $45.0 \pm 30.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다(표 1). 그림 1에서 볼 수 있듯이 2010년부터 2015년까지 전라북도 대부분의 지역에서 연평균 PM₁₀ 농도는 증가하거나 감소하지 않고 거의 일정한 농도를 보였다. 익산과 정읍의 경우 6개 측정소의 평균 PM₁₀ 농도보다 항상 높게 나타났으며 전라북도 6개 측정소 중 높은 연평균 농도를 보였다.

그림 2는 2010~2015년 전라북도 6개 대기오염측정소의 PM₁₀ 계절 평균 농도를 나타낸다(실선: 중앙값, 점선: 평균값, 박스: 25%, 75%, 점: 5%, 95% 백분위수). 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 12~2월로 정의하였다. 계절별 PM₁₀ 농도는 6개 측정소에서 서로 유사한 패턴을 보이며, 봄에 가장 높고, 여

름에 가장 낮았다. 특히 5월 6개 측정소 평균 PM₁₀ 농도 $60.3 \pm 33.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였다. 2011년 5월의 전라북도 PM₁₀ 평균 농도는 약 $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체 측정 기간 중 가장 높았으며, 같은 기간 인천($84 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 경기($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 제주($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 다음으로 높은 농도였다(<http://www.airkorea.or.kr>). 봄에는 고창을 제외한 5개 측정소에서 PM₁₀ 농도 백분위수 50% 이상이 연평균 PM₁₀ 대기환경 기준치보다 높은 농도 수준을 나타내었다. 이는 봄철 기후 특성상 서풍계열의 바람이 유입되면서 황사현상 전후로 높은 PM₁₀ 농도 수준을 보인 것으로 판단된다. 반면 6개 측정소 모두 여름철에 가장 낮은 PM₁₀ 농도를 보였다. 특히 8월이 $33.6 \pm 24.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 본 연구에서 일반적인 대기의 특성을 살펴보기 위해 강수 5 mm 이상의 자료는 제외되었으나 강수현상에 의한 활발한 세정작용 때문에 여름철은 낮은 농도를 보였으며, 북서평양의 청정한 공기의 유입에 따른 영향으로 판단된다(Lee *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2007b). 에어코리아의 2015년도 확정자료에서 8월의 전라북도 전체 측정소 PM₁₀ 평균 농도는 약 $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 우리나라 16개 지자체 중 13위에 해당하는 수치이다. 즉, 여름철 전라북도 미세먼지 농도는 우리나라에서 상당히 낮은 것으로 확인되었다.

시간대별 PM₁₀ 농도는 군산의 소룡동을 제외하고 다섯 지역에서 유사한 경향성을 나타냈다(그림 3). 오전 9시부터 12시까지 높은 PM₁₀ 농도를 보였으며, 특히 오전 10시부터 11시 사이에 최대농도를 나타내는데, 이는 출근시간대의 갑작스런 교통량의 증가가 원인으로 보여진다. 이후 오후로 가면서 PM₁₀의 농도가 낮아지는데 이것은 Kim *et al.* (2007a) 연구 결과에서처럼 대기혼합도의 증가에 따라 단위체적당 농도가 점차 감소하면서 PM₁₀ 농도가 천천히 낮아지게 된 것으로 분석된다. 저녁시간대인 20시부터 21시에 다시 PM₁₀의 농도가 높아지며, 이는 오전의 출근 시간대와 마찬가지로 퇴근 시간대에 교통량이 증가하면서 배출량 증가가 원인인 것으로 판단된다. 반면 익산 팔봉동과 군산 소룡동은 새벽 시간에도 높은 농도를 보였다(그림 3a, 3d). 익산 팔봉동 측정소는 주변환경이 공장단지와 주거지역으로, 군산 소룡동 측정소는 주변환경이 논, 바다, 공장단지로 이루어져 있다(표 1). 따라서 나머지 측정소들과 주변환경을 비교할 때, 이 지역의 시간대별

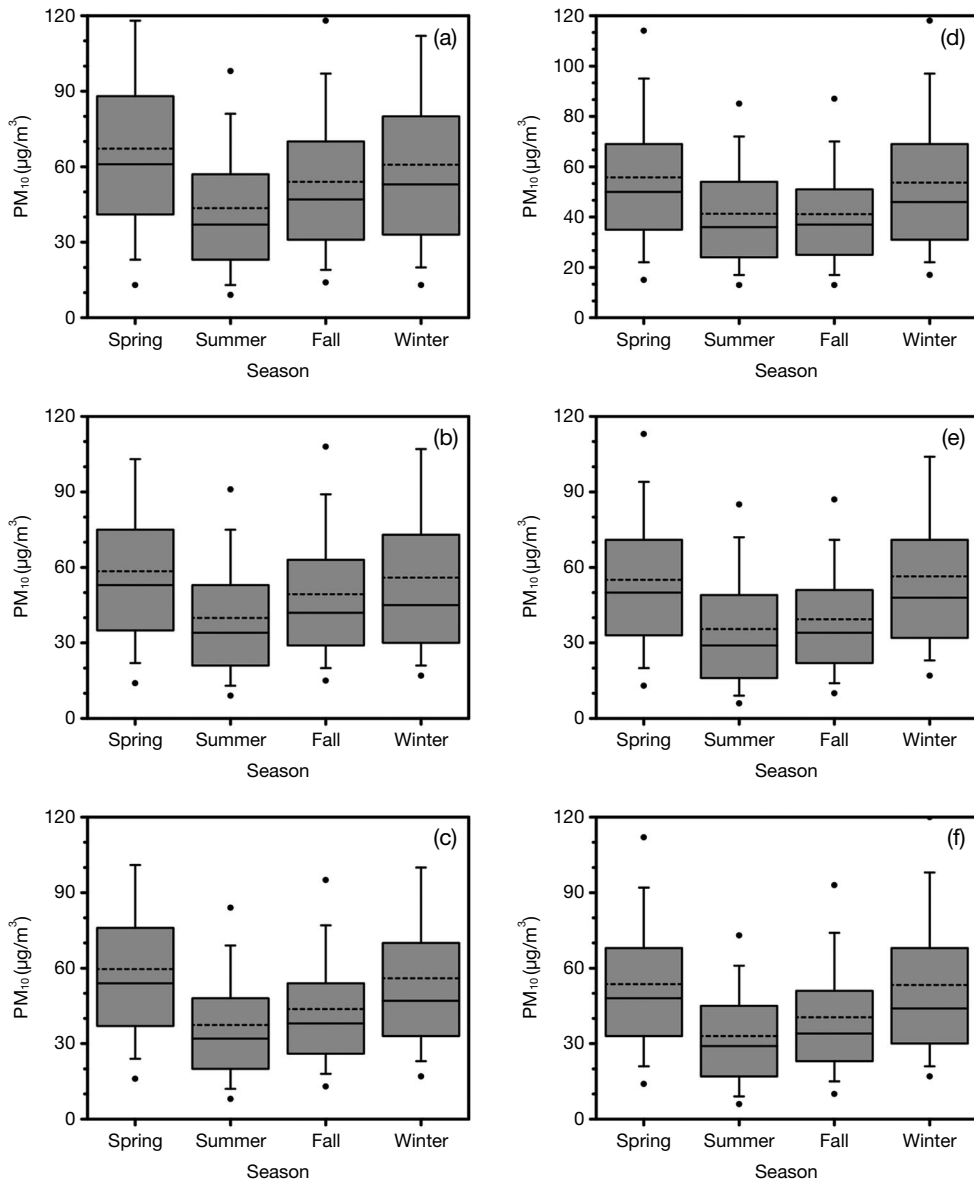


Fig. 2. Seasonal variations of PM_{10} concentration in six cities: (a) Iksan Palbong-dong, (b) Jeongeup Yeonji-dong, (c) Gunsan Soryong-dong, (d) Namwon Jukhang-dong, (e) Jeonju Jungang-dong, and (f) Gochang Gochang-eup. PM_{10} concentrations were classified into four seasons: Spring: March ~ May, summer: June ~ August, fall: September ~ November, winter: December ~ February. In the box plot, solid and dashed lines indicate median value and mean value of PM_{10} concentration, respectively. Box represents 25% and 75% of PM_{10} concentrations and dot represents 5% and 95% of PM_{10} concentrations. Solid and dashed lines indicate median value and mean values of PM_{10} concentrations, respectively.

PM_{10} 농도 분포의 차이는 교통량의 영향과 함께 공장 단지의 활동에 의한 영향도 있는 것으로 사료된다.

3.2 PM_{10} 과 가스상물질과의 연관성

PM_{10} 과 가스상물질과의 연관성을 파악하기 위해 가스상물질 SO_2 , CO , O_3 , NO_2 의 연도별, 시간별 농도변화

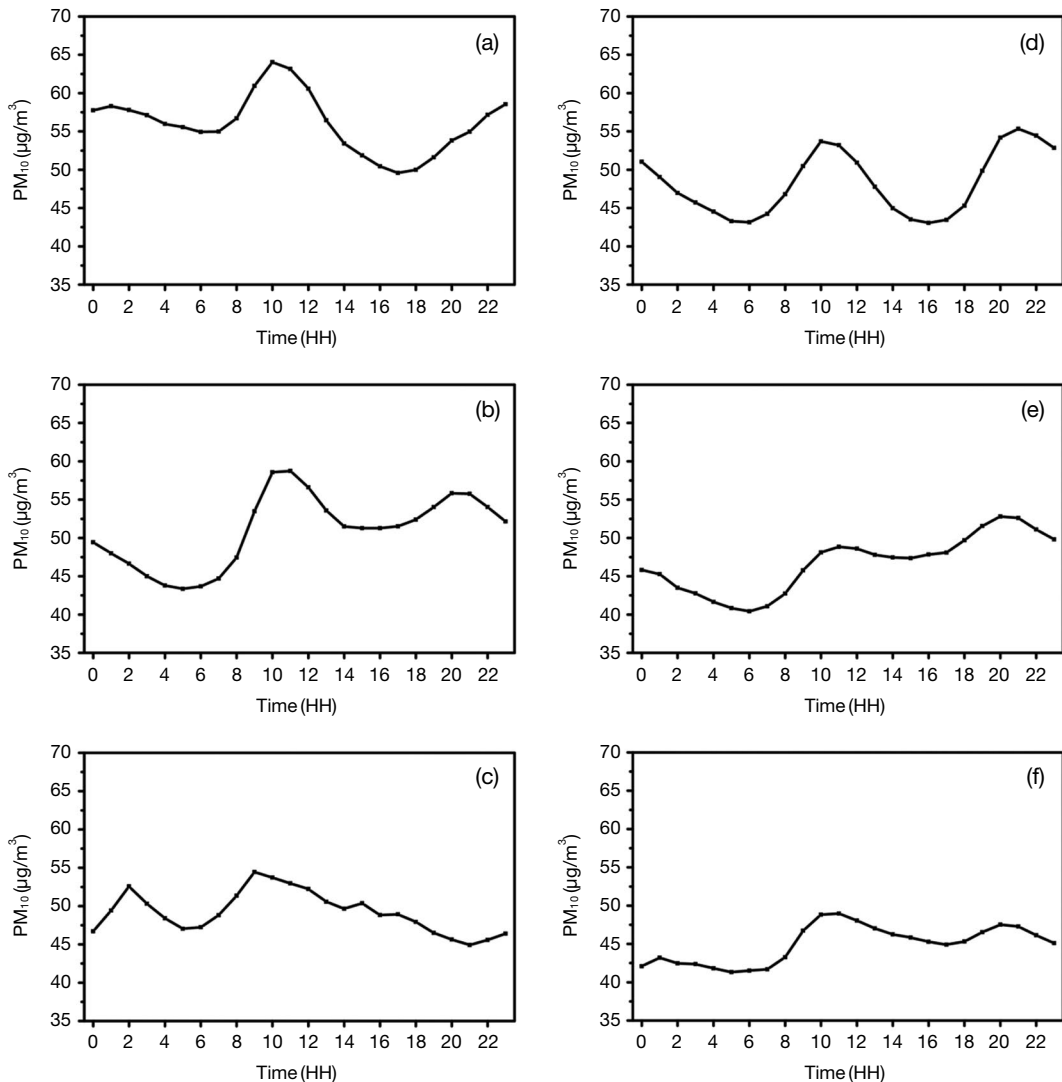


Fig. 3. Diurnal variations of PM₁₀ concentrations. (a) Iksan Palbong-dong, (b) Jeongeup Yeonji-dong, (c) Gunsan Soryong-dong, (d) Namwon Jukhang-dong, (e) Jeonju Jungang-dong, and (f) Gochang Gochang-eup.

를 분석하였다. 이를 위해 환경부에서 지정한 전라북도 추이측정소인 군산의 소룡동과 전주의 중앙동을 대표 측정소로 선택하여 PM₁₀과 가스상물질의 연관성을 분석하였다. 표 2는 2010~2015년 연도별 SO₂, CO, O₃, NO₂ 평균 농도를 보여준다. 2010년 O₃의 평균 농도는 군산 소룡동 25.7 ppb, 전주 중앙동 19.2 ppb였고, 차츰 증가하여 2015년에는 군산 31.1 ppb, 전주 30.0 ppb였다. 군산 소룡동의 경우 2010년에서 2015년으로 갈수록

O₃뿐만 아니라 CO의 농도도 435.7 ppb에서 510.7 ppb로, NO₂의 농도도 14.0 ppb에서 17.4 ppb로 증가하였다. 전주 중앙동의 경우에는 지난 6년 동안 NO₂의 농도가 15.6 ppb에서 17.6 ppb로 10% 정도 증가하였다.

NO₂와 CO는 주로 자동차로부터 배출되는 가스상물질이다(QUARG, 1996). 대기 중에서 CO는 OH와 같은 산화제와의 반응에 의해 O₃을 생성하는 주요한 역할을 한다. 또한 NO₂는 대기 중에서 광분해되어 O₃을

Table 2. Summary of concentrations of the gaseous species including SO₂, CO, O₃, and NO₂ at Gunsan and Jeonju sites from 2010 to 2015.

City	Name		Mean concentrations (ppb)						
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2010~2015
Gunsan	Soryong-dong	SO ₂	6.0	6.2	6.5	6.8	6.3	5.6	6.2
		CO	435.7	497.6	494.1	519.4	549.9	510.7	501.3
		O ₃	25.7	22.6	23.5	25.1	26.0	31.1	25.7
		NO ₂	14.0	14.2	16.2	15.1	16.6	17.4	15.6
Jeonju	Jungang-dong	SO ₂	4.1	6.0	3.6	3.7	3.4	3.4	4.0
		CO	517.5	548.6	427.9	421.5	417.9	425.0	460.9
		O ₃	19.2	26.5	24.7	30.4	29.7	30.0	26.7
		NO ₂	15.6	14.8	16.3	17.9	17.1	17.6	16.5

생성한다. O₃은 대기 중에서 산화제로 작용하며 휘발성 유기화합물과의 광화학 반응에 의해 이차 유기 에어로졸(secondary organic aerosol)을 생성하는 것으로 알려져 있다(Hallquist *et al.*, 2009). Ghim *et al.* (2015)에서는 서울에서 출퇴근 시간의 CO와 NO₂의 농도 증가가 뚜렷하며, 이때 PM₁₀ 농도도 함께 증가하는 것으로 보고하였다.

PM₁₀의 시간대별 변화와 비교하였을 때(그림 3), 가스상물질 중 NO₂의 농도 변화가 가장 유사한 경향을 보였다(그림 4). 군산의 경우 오전 8시에 NO₂가 최고 농도를 보였고(그림 4a), 1시간 뒤인 오전 9시에 PM₁₀의 농도가 최고치를 나타냈다(그림 3d). 전주의 경우, NO₂가 두 번의 피크를 보이며 오전 9시와 오후 8시에 높아졌고(그림 4b), 약간의 시간 차이를 보이며 오전 11시와 오후 9시에 PM₁₀의 피크가 나타났다(그림 3e). 특히 늦은 오후 20~21시경에 PM₁₀의 농도가 최고 수준을 나타내었는데 이 시간 전후로 NO₂의 농도도 최고 수준을 나타내었다. CO의 경우에도 NO₂와 유사한 경향을 보였고, 새벽에도 다소 높은 농도를 나타내었다. 따라서 최근 수년 동안 전라북도 지역에서 O₃, NO₂, CO의 지속적인 농도 증가는 미세먼지의 전구체로 작용하여 대기 중에서 미세먼지의 농도를 증가시키는 데 영향을 주었을 것으로 판단된다.

2010~2015년 동안 SO₂의 경우 전주와 군산 측정소에서 모두 감소하였다(표 2). 그림 4에서 SO₂와 CO의 경우, 대부분의 시간대에서 전주보다 군산에서 높게 나타났다. 이것은 군산 소룡동에 산업단지와 공장지대가 형성되어 있어 그 농도를 높이는 데 기여한 것으로 보여진다.

3.3 PM₁₀ 고농도와 저농도에서 나타난 기상학적 특성

2010~2015년 전라북도 PM₁₀ 고농도와 저농도에서 나타난 기상학적 특성을 비교하기 위해 전라북도 추이 측정소 중에서 PM₁₀ 오류자료가 가장 적은 전주의 중앙동을 기준으로(PM₁₀ 전체자료의 96.7%를 분석에 이용) PM₁₀ 농도 분포와 기상요소(기온, 상대습도, 풍속, 풍향)를 분석하였다. 본 연구에서는 2010~2015년 PM₁₀ 시간 평균 농도 90% 백분위수 이상을 나타낸 발생 시간을 고농도 PM₁₀(총 4982시간)으로, PM₁₀ 시간 평균 농도 10% 백분위수 이하를 저농도 PM₁₀(총 5280시간)으로 정의하였다. 계절별 PM₁₀ 빈도수는 고농도 PM₁₀의 경우 겨울 41.4%, 봄 34.6%, 여름 12.2%, 가을 11.8%으로 분석되었고, 저농도 PM₁₀의 경우 여름 53.9%, 가을 23.7%, 봄 14.4%, 겨울 8.1%로 나타났다.

전주 중앙동에서 고농도 PM₁₀의 평균 농도는 약 $113.9 \pm 26.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 저농도 PM₁₀의 평균 농도는 약 $9.5 \pm 3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다(표 3). 2010~2015년 전주의 PM₁₀ 고농도 평균치는 2007~2011년 부산지역 고농도 미세먼지(상위 90% 이상) 평균치인 약 $95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비교하였을 때 매우 높은 것으로 확인되었다. 고농도와 저농도 PM₁₀ 구간에서 상대습도, 온도, 풍향, 풍속은 상당한 차이를 보였다. 저농도와 고농도 PM₁₀의 기온은 각각 20.3°C, 11.2°C로 큰 차이를 보였으며 고농도 구간에서 현저히 낮은 온도를 나타냈다. 상대습도는 저농도 구간에서 77.2%, 고농도 구간에서 63.9%였다. 풍속은 저농도와 고농도 구간에서 미미한 차이를 보이며 각각 2.0 m/s, 1.6 m/s로 나타났다. Kim *et al.* (2013)의 연구에서 2007~2011년 부산에서 고농도 PM₁₀은 기상요소

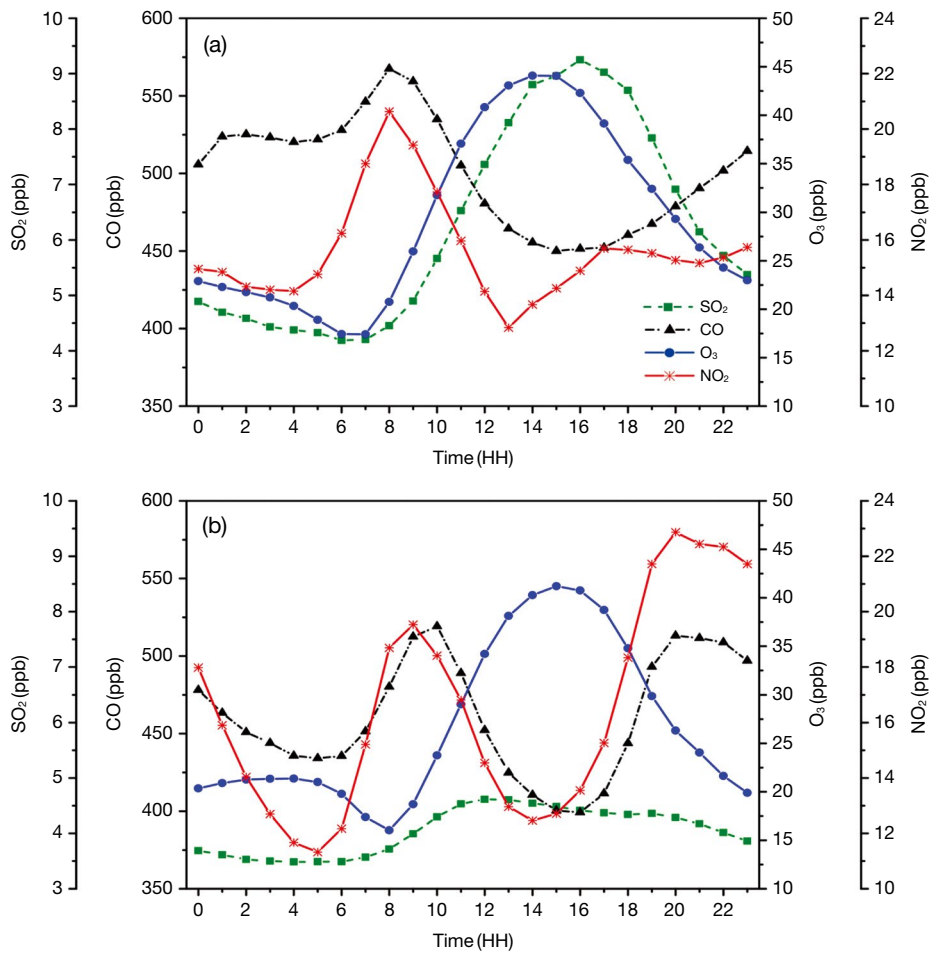


Fig. 4. Diurnal distributions of gaseous species in (a) Gunsan (Soryong-dong), and (b) Jeonju (Jungang-dong).

와 밀접하게 연관되며, 고농도 PM₁₀ 발생일에서 기온은 높게, 풍속과 습도는 낮게 나타나는 것으로 보고되었다. 기온의 경우, 전주와는 다른 분석 결과를 보이는데 이는 전주의 고농도 PM₁₀이 겨울(41.4%)에 집중된 이유로 분석된다.

그림 5는 2010~2015년 동안 전라북도 전주에서 박무(mist)와 연무(haze) 발생 시간과 PM₁₀ 농도 백분위수와와의 상관성을 보여준다. 각 백분위수 별 PM₁₀의 평균 농도는 그림 5의 y축 괄호 안에 나타내었다. 그림에서 막대 바는 각 PM₁₀ 분위수 별 박무와 연무가 발생한 확률을 나타낸다. 그림에서도 볼 수 있듯이, 고농도 PM₁₀ 분위수로 갈수록 박무와 연무의 발생 확률이 현저히 높아지는 것이 확인되었다. 2010년에서 2015년

동안 박무와 연무 발생 시의 평균 PM₁₀ 농도는 각각 $61.1 \pm 35.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $95.5 \pm 36.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 전체 기간 중 저농도 PM₁₀ 분위수에서 박무가 발생한 시간은 총 5280시간 중 480시간, 10~25% 분위수에서 6965시간 중 716시간, 25~50% 분위수에서 12387시간 중 1539시간, 50~75% 분위수에서 12669시간 중 2439시간, 75~90% 분위수에서 7807시간 중 2292시간, 고농도 PM₁₀ 분위수에서 4982시간 중 1843시간으로 조사되었다. 특히 고농도 PM₁₀ 분위수에서 박무 발생은 약 37%로 나타났으며, 이때 평균 PM₁₀ 농도는 $115.5 \pm 27.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다(그림 5). 연무의 경우 PM₁₀ 50~75% 분위수에서 12669시간 중 370시간, 75~90% 분위수에서 7807시간 중 981시간, 고농도 PM₁₀ 분위수에서 4982

Table 3. Meteorological parameters of the mean $\pm$ standard deviation of temperature, relative humidity, and wind speed for the lowest 10% of the PM_{10} mass contribution ($\leq 10\%$) and the highest 10% of the PM_{10} mass contribution ($\geq 90\%$).

	PM_{10} contribution	
	$\leq 10\%$	$\geq 90\%$
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	9.5 ± 3.5	113.9 ± 26.9
Temperature ($^{\circ}C$)	20.3 ± 9.1	11.2 ± 9.5
Relative humidity (%)	77.2 ± 18.5	63.9 ± 21.0
Wind speed (m/s)	2.0 ± 1.3	1.6 ± 1.2

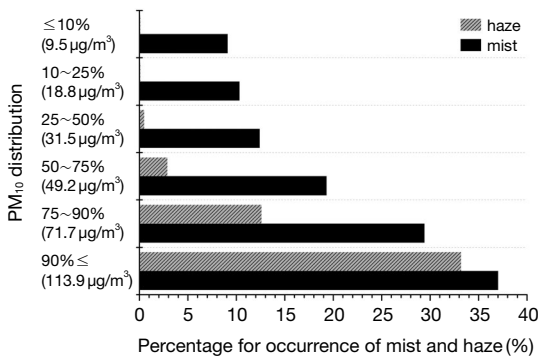


Fig. 5. Occurrence of mist and haze for the different levels of the PM_{10} mass concentrations in Jeonju (Jungang-dong).

시간 중 1655시간(33.2%)으로 발생하였다. 고농도 PM_{10} 평균 농도는 $120.7 \pm 30.25 \mu g/m^3$ 으로 나타났다. 전체 기간 동안 각 분위수별 연무 발생 시간을 계산해보면 PM_{10} 50% 이상에서 연무 발생은 약 11.8%, PM_{10} 50% 미만에서는 0.3%로 연무 발생 시 PM_{10} 의 농도는 현저히 높아지는 것으로 확인되었다. 따라서 박무와 연무는 고농도의 PM_{10} 과 깊은 관련이 있는 것으로 나타났다. 선행연구에서도 박무와 연무 발생 시 미세먼지의 농도가 증가하는 것으로 나타났으며(Song *et al.*, 2016), 특히 박무는 대기 중 부유하는 물방울과 대기오염물질이 흡수 및 흡착됨에 따라 PM_{10} 농도가 높아지는 것으로 보고되었다(Lee *et al.*, 2013).

3.4 고농도 PM_{10} 발생 시 기원 추적

2010~2015년 전라북도 전주에서 나타난 고농도 PM_{10} 장거리 수송에 의한 영향을 파악하기 위해

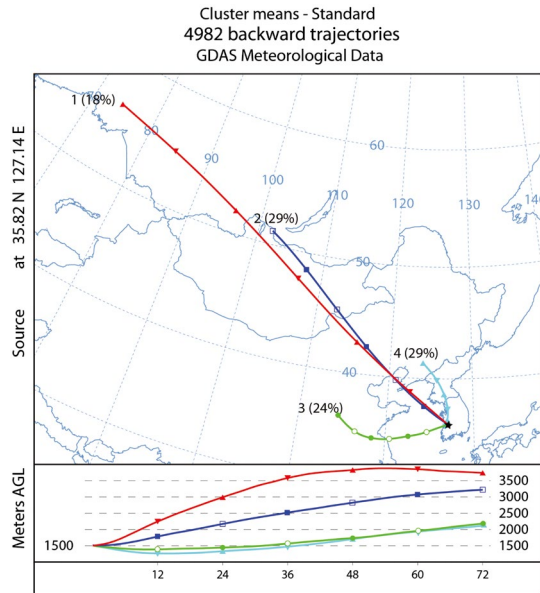


Fig. 6. Conditional probability function (CPF) plot for the highest 10% of the PM_{10} mass in Jeonju (Jungang-dong).

HYSPLIT-4 모델을 이용하여 72시간 동안의 1500 m 역궤적 분석을 수행하였다. 본 연구에서 일반적인 도시대기의 특성을 파악하기 위해 황사 데이터는 제외하였다. 역궤적 분석과 군집분석을 통해 우리나라 전주로 유입되는 공기덩어리는 기원에 따라 네 개의 군집으로 분류되었다. 그림 6은 기원별로 분석된 4개의 군집을 보여준다. 총 역궤적 중 군집 1은 18%, 군집 2는 29%, 군집 3은 24%, 군집 4는 29%를 차지하였다. 군집 1과 2는 러시아와 몽고 북부지역에서 발원하여 북서풍 계열의 바람을 타고 우리나라로 유입되는 사례이며, 특히 군집 1은 가장 먼 거리에서 유입되었다. 군집 3은 중국 화중 지역에서 발원하여 서해안을 거쳐 한반도로 유입되는 사례이다. 군집 4는 만주에서 발원하여 북한과 우리나라를 거쳐 천천히 전주로 유입되는 사례이다.

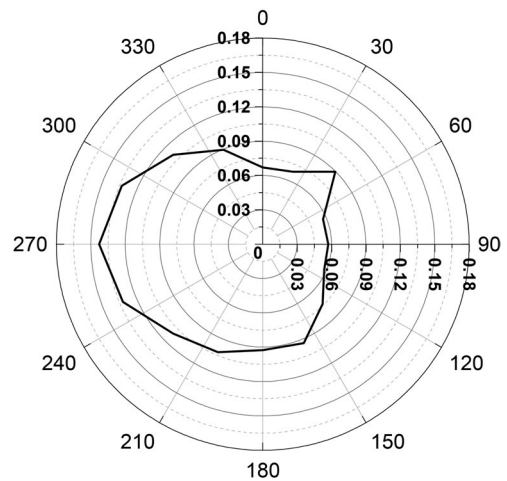
표 4는 각 군집에서 나타난 PM_{10} 농도, 가스상물질의 농도, 기상학적 특징을 보여준다. 각 군집에서 PM_{10} 의 농도는 약간의 차이를 보였다. 장거리 유입된 군집 1에서 $121.8 \mu g/m^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 가장 천천히 우리나라로 유입된 군집 4에서 $107.8 \mu g/m^3$ 로 가장

Table 4. Chemical and meteorological characteristics of the four air mass categories.

	Cluster number			
	1	2	3	4
PM ₁₀ (μg/m ³)	121.8 ± 32.7	114.9 ± 26.1	114.1 ± 27.1	107.8 ± 21.6
SO ₂ (ppb)	6.5 ± 3.6	6.4 ± 3.8	5.7 ± 3.0	5.0 ± 3.0
CO (ppb)	711.1 ± 296.7	727.2 ± 296.6	656.7 ± 269.7	629.3 ± 255.2
O ₃ (ppb)	22.6 ± 19.3	25.6 ± 21.6	30.9 ± 27.0	32.0 ± 24.5
NO ₂ (ppb)	23.5 ± 12.6	23.9 ± 13.7	24.6 ± 14.9	22.5 ± 13.6
Relative humidity (%)	67.7 ± 19.6	64.5 ± 20.4	60.5 ± 22.0	63.9 ± 21.1
Temperature (°C)	6.6 ± 6.4	8.0 ± 8.7	13.3 ± 9.7	15.5 ± 9.2
Wind speed (m/s)	1.9 ± 1.3	1.6 ± 1.2	1.6 ± 1.2	1.5 ± 1.0

낮았다. 가스상물질의 경우 장거리 수송되며 중국의 주요 도시인 베이징과 탄진(Tianjin), 하북성(Hebei)을 거쳐 빠른 속도로 전주에 유입된 군집 1과 2의 경우 고농도 SO₂, CO가 뚜렷하다. 또한 군집 1과 2에서 평균 온도는 각각 6.6°C, 8.0°C로 다른 군집에 비해 현저히 낮았다. 반면 고농도 사례 중 군집 4의 경우 중국 만주에서 발원하여 북한을 거쳐 우리나라에서 오랜 시간 머물며 천천히 유입되는 특징을 보였으며, 평균온도가 16°C 정도로 전체 네 개의 군집 중에서 여름의 비율이 26% (383시간)를 차지하는 것으로 확인되었다. 이때 오존의 농도가 32ppb로 최고치를 보였으며, 온도가 높고 현지기압이 낮은 특징을 보였다. 분석 결과에서 볼 수 있듯이, 공기의 역궤적 분석과 군집분석을 통해 전주의 고농도 PM₁₀ 발생은 중국에서 발원하거나 중국을 거쳐 온 공기에 의한 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.

중국으로부터 장거리 수송에 의한 영향이 뚜렷하나 고농도 PM₁₀ 발생 시의 국지적 기원도 추정하기 위해 CPF 모델 분석을 수행하였다(그림 7). CPF 모델은 지표면의 풍향을 이용하므로 측정 장소 주변의 국지적 오염을 파악하는 데 이용되지만, 장거리 이동에 의한 영향은 파악하기 어렵다(Kim *et al.*, 2003). 2010~2015년 전주시역의 CPF 분석 결과 PM₁₀은 서쪽(270°) 115.6 μg/m³과 남서쪽(202.5~247.5°) 113.9 μg/m³, 북서쪽(292.5~337.5°) 113 μg/m³ 순으로 높은 농도를 나타냈고, CPF 분석 결과에서도 서쪽 방향으로 모두 높은 확률값으로 확인되었다. 전주 중앙동 측정소는 약 254° 방향으로 6.5 km 떨어진 지점에 소각장이 위치하고 있고, 주변에 주거단지와 상가들이 밀집된 지역이어서 주변으로부터 인위적 오염원의 영향을 받은 것으로 판단된다.

**Fig. 7. Conditional probability function (CPF) plot for the highest 10% of the PM₁₀ mass in Jeonju (Jungang-dong).**

4. 결 론

본 연구에서는 최근 우리나라 미세먼지 농도에서 항상 상위권에 머물고 있는 전라북도 도시대기의 장기간 자료를 분석함으로써 전북 지역의 미세먼지의 특성을 이해하고자 하였다. 2010~2015년의 6년간 전라북도 시도별 대표 측정소 6곳을 선정하여 PM₁₀과 가스상물질, 기상요소가 어떻게 연관되는지 파악하였고 고농도 PM₁₀ 발생 시 기원을 추적하였다. 2010~2015년 전라북도 6개 도시대기 측정소 군산(소룡동), 익산(팔봉동), 전주(중앙동), 정읍(연지동), 고창(고창읍), 남원(죽향동)의 1시간 평균 PM₁₀ 49.3 ± 31.9 μg/m³였다. 익산 팔봉동의 PM₁₀ 평균 농도가 56.0 ± 36.1 μg/m³로 가장 높

았으며, 다음으로 정읍 연지동 $50.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 군산 소룡동 $49.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 남원 죽향동 $48.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 전주 중앙동 $46.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 고창 고창읍 $45.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다.

계절적으로는 모든 측정소에서 봄에 가장 높은 PM_{10} 평균 농도를 보였고, 고창을 제외한 5개 지역에서 PM_{10} 50% 분위수 이상이 우리나라 연평균 PM_{10} 기준치($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하는 수준으로 확인되었다. 특히 5월이 가장 높은 농도를 보였고, 이때 6개 측정소 PM_{10} 평균 농도는 $60.3 \pm 33.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 반면 여름철에는 PM_{10} 의 농도가 현저히 낮아지며 우리나라 16개 지자체 중 전라북도가 낮은 순위를 나타내었다. 시간별 분석에서는 군산의 소룡동을 제외한 5개 지역의 시간대별 PM_{10} 농도변화가 유사한 분포를 보이며, 출퇴근 시간에 높은 수치를 나타냈다.

2010년에서 2015년까지 O_3 , NO_2 , CO 농도는 대부분의 측정소에서 증가하였다. 가스상물질의 시간대별 농도 변화 분석 결과 PM_{10} 은 NO_2 와 CO 와 함께 출퇴근 시간대에 높아지는 것으로 확인되었다. 전라북도에서 NO_2 , CO 와 PM_{10} 의 유사한 경향성을 보였으며, 지속적인 O_3 의 증가는 대기 중에서 주요 화학반응을 일으켜 PM_{10} 농도를 높이는 데 기여하고 있는 것으로 사료된다.

저농도 PM_{10} 과 고농도 PM_{10} 에서 수반된 기상학적 특성은 뚜렷한 차이를 보였다. 전주에서 저농도와 고농도 PM_{10} 발생 시의 기온은 각각 20.3°C , 11.2°C , 상대습도는 77.2%, 63.9%, 풍속은 2.0 m/s, 1.6 m/s로 나타났다. 즉, 기온과 상대습도, 풍속이 낮아질수록 PM_{10} 의 농도가 높아지는 것으로 분석되었다. 또한, 박무와 연무 발생 시 PM_{10} 의 농도가 현저히 증가하였다.

전라북도 고농도 PM_{10} 의 기원을 추정하고자, HYSPLIT 모델과 군집분석, CPF 분석을 수행하였다. 역궤적 분석과 군집분석 결과 러시아에서 발원하고 빠른 속도로 장거리 유입되는 사례부터 만주에서 발원하여 북한과 우리나라를 거쳐 천천히 유입되는 사례까지 총 네 종류의 군집으로 분류되었으며, 전라북도 지역의 고농도 미세먼지는 중국의 영향이 가장 큰 것으로 확인되었다. 또한 CPF 분석 결과 국지적으로는 서쪽에 미세먼지 오염원이 위치하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 대기오염 측정소 자료를 이용하여 최근 6년간 전라북도 PM_{10} 특성과 가스상물질, 기상학적 연관성을 분석하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로

향후에는 전라북도 지역에서 미세먼지 화학조성 정량·정성분석이 심층적으로 이루어져 지역의 주요 오염성분을 밝혀내는 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 전북녹색환경지원센터의 연구사업비 지원을 받아 연구되었습니다(1701000337).

References

- Aldabe, J., D. Elustondo, C. Santamaría, E. Lasheras, M. Pandolfi, A. Alastuey, X. Querol, and J.M. Santamaría (2011) Chemical characterisation and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} at rural, urban and traffic sites in Navarra (North of Spain), Atmospheric Research, 102(1), 191-205.
- Baltensperger, U., J. Dommen, R. Alfarra, J. Duplissy, K. Gaeggeler, A. Metzger, M.C. Facchini, S. Decesari, E. Finessi, C. Reinnig, M. Schott, J. Warnke, T. Hoffmann, B. Klatzer, H. Puxbaum, M. Geiser, M. Savi, D. Lang, M. Kalberer, and T. Geiser (2008) Combined determination of the chemical composition and of health effects of secondary organic aerosols, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(1), 145-154.
- Chen, Z.H., S.Y. Cheng, J.B. Li, X.R. Guo, W.H. Wang, D.S. Chen (2008) Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China, Atmospheric Environment, 42(24), 6078-6087.
- Ghim, Y.S., Y.S. Chang, and K. Jung (2015) Temporal and Spatial Variations in Fine and Coarse Particles in Seoul, Korea, Aerosol and Air Quality Research, 15(3), 842-852.
- Choi, G.H., K.H. Kim, C.H. Kang, and J.H. Lee (2003) The influence of the Asian dust on the metallic composition of fine and coarse particles fractions, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 19(1), 45-56. (in Korean with English abstract)
- Choi, K.C., C.H. Kim, J.G. Cho, and J.H. Park (1998) Ionic Composition of Early and Succeeding Rainwater in Pusan Area, Journal of Korea Air Pollution Research Association, 14(4), 361-368. (in Korean with Eng-

- lish abstract)
- Chun, Y.S., J.Y. Lim, and B.C. Choi (2003) The Features of Aerosol in Seoul by Asian Dust and Haze during Springtime from 1998 to 2002, *Journal of Atmospheric Sciences*, 39(4), 459-474. (in Korean with English abstract)
- Hallquist, M., J.C. Wenger, U. Baltensperger, Y. Rudich, D. Simpson, M. Claeys, J. Dommen, N. M. Donahue, C. George, A.H. Goldstein, J.F. Hamilton, H. Herrmann, T. Hoffmann, Y. Iinuma, M. Jang, M.E. Jenkin, J.L. Jimenez, A. Kiendler-Scharr, W. Maenhaut, G. McFiggans, Th. F. Mentel, A. Monod, A.S.H. Prévôt, J.H. Seinfeld, J.D. Surratt, R. Szmigielski, and J. Wildt (2009) The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 5155-5236.
- Harrison R.M., D. Laxen, S. Moorcroft, and K. Laxen (2012) Processes affecting concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) in the UK atmosphere, *Atmospheric Environment*, 46, 115-124.
- Jang, Y., G. Kim, and D.A. Chiriboga (2006) Correlates of sense of control among older Korean-American immigrants: Financial status, physical health constraints, and environmental challenges, *Journal of Aging and Human Development*, 63(3), 173-186.
- Jo, H.Y. and C.H. Kim (2011) Characteristics of Air Quality over Korean Urban Area due to the Long-range Transport Haze Events, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 73-86. (in Korean with English abstract)
- Kim, C.H., H.Y. Son, J.-A Kim, and T.K. Ahn (2007a) Classification of Synoptic Meteorological Patterns for the Environmental Assessment of Regional-scale Long Range Transboundary Air Pollutants, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 16(1), 89-98. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.S. and H. Ma (2009) Characteristics of Air Quality in the West-coastal Urban Atmosphere, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25 (6), 550-561. (in Korean with English abstract)
- Kim, E., P.K. Hopke, and E.S. Edgerton (2003) Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(6), 731-739.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim, C.H. Song, S.C. Yoon, and J.S. Han (2007b) Seasonal characteristics of air masses arriving at Gosan, Korea, using fine particle measurements between November 2001 and August 2003, *Journal of Geophysical Research*, 112(D7), D07202.
- Kim, M.K., W.S. Jung, H.W. Lee, W.G. Do, J.G. Cho, and K.O. Lee (2013) Analysis on Meteorological Factors related to the Distribution of PM₁₀ Concentration in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 22(9), 1213-1226. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.D., G.H. Lee, I.D. Kim, J.S. Kang, and K.J. Oh (2013) The Influences of Concentration Distribution and Movement of Air Pollutants by Sea Breeze and Mist around Onsan Industrial Complex, *Clean Technology*, 19(2), 95-105. (in Korean with English abstract)
- Lee, P.K., J.R. Brook, E. Dabek-Zlotorzynska, and S.A. Mabury (2003) Identification of the major sources contributing to PM_{2.5} observed in Toronto, *Environmental Science and Technology*, 37(21), 4831-4840.
- Lee, S., Y.S. Ghim, S.W. Kim, and S.C. Yoon (2008) Seasonal variation of chemical composition and optical properties of aerosols at Seoul and Gosan, *Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(4), 470-482. (in Korean with English abstract)
- Myles, L., R.J. Dobosy, T.P. Meyers, and W.R. Pendergrass (2009) Spatial variability of sulfur dioxide and sulfate over complex terrain in East Tennessee, USA, *Atmospheric Environment*, 43(18), 3024-3028.
- Myles, L., W.R. Pendergrass, C.A. Vogel, A. Yerramilli, V.B.R. Dodal, H.P. Dasari, C.V. Srinivas, F. Tuluri, J.M. Baham, R. Hughes, C. Patrick, J. Young, and S. Swanier (2010) J3. 4 Evaluation of PM_{2.5} source regions over the Mississippi Gulf Coast using WRF/HYSPLIT modeling approach, 16th Conference on Air Pollution Meteorology, 17-21 January 2010, Atlanta, GA, USA.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2015) National Air Pollutants Emission in Korea 2013 (in Korean), Incheon, Korea, 157 pp.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2016) Annual Report of Air Quality in Korea 2015 (in Korean), Incheon, Korea, 362 pp.
- Pandolfi, M., Y.G. Castanedo, A. Alastuey, J.D. ed la Rosa, E. Mantilla, A.S. de la Campa, X. Querol, J. Pey, F. Amato, and T. Moreno (2011) Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions, *Environmental Science and Pollution Research*, 18 (2), 260-269.

- QUARG (Quality of Urban Air Review Group) (1996) Airborne particulate matter in the United Kingdom. Available from institute of public and environmental health, the university of Birmingham, 188 pp.
- Seoul Development Institute (2011) A Study on Building customized Management Strategies Based on Local PM₁₀ Emission Inventory in Seoul, 30-47 pp.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller (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.
- Song, J.M., J.O. Bu, S.H. Yang, J.Y. Lee, W.H. Kim, and C.H. Kang (2016) Influences of Asian Dust, Haze, and Mist Events on Chemical Compositions of Fine Particulate Matters at Gosan Site, Jeju Island in 2014, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(1), 67-81. (in Korean with English abstract)
- Song M., K.J. Moon, J.S. Han, K.R. Kim, and G. Lee (2006) Chemical characteristics of fine aerosols during ABC-EAREX2005, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22, 604-613. (in Korean with English abstract)
- Watson, J.G., L.W. Chen, J.C. Chow, P. Doraiswamy, and D.H. Lowenthal (2008) Source apportionment: findings from the US supersites program, Journal of the Air and Waste Management Association, 58(2), 265-288.
- Won, T.Y. and S.W. Jung (2013) SPSS PASW Statistics 18.0 Statistical Research Analysis, Hannarae Academy, 339 pp.