

## 기상 조건이 서울의 PM 2.5와 PM 10에 미치는 영향

유혁균\* · 홍제우\*\*† · 홍진규\*\*\* · 성선용\*\*\*\* · 윤은주\*\*\*\* · 박진한\*\* · 이진홍\*\*\*\*\*†

\*충남대학교 환경공학과 석사과정, 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 위촉연구원

\*\*한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 부연구위원

\*\*\*연세대학교 대기과학과 부교수

\*\*\*\*국토연구원 국토환경·자원연구본부 부연구위원

\*\*\*\*\*충남대학교 환경공학과 교수

### Impact of Meteorological Conditions on the PM2.5 and PM10 concentrations in Seoul

Yoo, Hyeok-Gyun\* · Hong, Je-Woo\*\*† · Hong, Jinkyu\*\*\* · Sung, Sunyong\*\*\*\* ·

Yoon, Eun Joo\*\*\*\*\* · Park, Jin-Han\*\* and Lee, Jin-Hong\*\*\*\*\*†

\*Master Student, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea  
Researcher, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

\*\*Research Fellow, Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

\*\*\*Associate Professor, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Republic of Korea

\*\*\*\*Research Fellow, National Territorial Environment & Resources Research Division, Korea Research Institute for Human Settlements, Sejong, Republic of Korea

\*\*\*\*\*Professor, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

### ABSTRACT

Meteorological conditions regulate particulate matter concentrations near the earth surface. This study investigates the impacts of meteorological conditions (yellow-dust events, wind-speed, relative humidity, days after rainfall, solar duration, downward short-wave radiation, and diurnal temperature range) on particulate matter concentration less than 10  $\mu\text{m}$  (PM10) and less than 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5) and their ratio (PM2.5/PM10) by analyzing five years (2015-2019) of in-situ surface observations in Seoul. Our results show apparent impacts of meteorological conditions on PM2.5 and PM10 concentrations and their ratio: 1) decrease in PM2.5/PM10 during yellow-dust events, 2) negative (positive) relationships of PM2.5 and PM2.5/PM10 with wind-speed (relative humidity), and 3) increase in PM10 and PM2.5 concentrations with elapsed days after rainfall.

**Key words:** Particulate Matter, PM2.5, PM10, Air-Quality, Seoul

### 1. 서론

1990년대 이후 적극적 대기관리 정책의 이행으로, 대기 중 직경 10  $\mu\text{m}$  미만의 미세먼지 농도(PM10)의 연평균 농도는 지속 감소해왔다(Kim, 2006; Kim and Lee, 2018). 이 감

소 추세는 2010년부터 정체되었고, 2013년의 고농도 미세먼지 사례를 계기로 국민들의 미세먼지에 대한 경각심이 크게 높아졌다(Hong et al., 2019a). 이런 국민들의 관심을 반영하는 미세먼지 관리 정책 수립(예: 미세먼지 관리 종합대책 (2017), 국가기후환경회의 출범(2019. 3.)), 미세먼지 관리 총

†Corresponding author : jwhong@kei.re.kr (Korea Environment Institute, 232, Gareum-ro, Sejong, Republic of Korea. Tel. +82-44-415-7567)  
jinlee@cnu.ac.kr (Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea. Tel. +82-42-821-6678)

ORCID 유혁균 0000-0003-3174-6801  
홍진규 0000-0003-0139-602X  
윤은주 0000-0002-6531-206X  
이진홍 0000-0003-4195-0259

홍제우 0000-0001-8769-0312  
성선용 0000-0002-7862-2788  
박진한 0000-0002-4186-0467

Received: September 26, 2020 / Revised: October 5 / Accepted: October 12, 2020

합계획(2020~2024) 수립(2019.11.), 미세먼지 계절관리제 시행(2019.12.) 등)과 2011년 대기환경 기준의 신설 및 대기 중 직경 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 초미세먼지(PM 2.5)에 대한 전국단위 측정 인프라가 구축되어왔다(MOE, 2017).

PM 2.5는 입자의 크기가 매우 작아서 사람이 흡입할 경우 폐포까지 침투해서 건강에 미치는 악영향이 큰 것으로 알려져 있다(PopeIII et al., 2006; Jerrett et al., 2009; Lim et al., 2012; Kim et al., 2017a). PM 10은 대부분 1차 오염물질로 구성되나, PM 2.5는 화학반응에 의해 생성되어 배출되거나, 대기 광화학반응으로 2차 생성된다(Kim, 2006; Xie et al., 2011). 따라서 PM 2.5와 PM 10 농도의 비율(PM 2.5/PM 10)의 변화를 이해하는 과정은 관측지 주변의 미세먼지 생성 요인에 대한 정보를 제공하고, 연계하여 해당 지역의 미세먼지 관리방안 추진의 방향성을 제시한다.

그간의 PM 2.5/PM 10에 대한 연구 사례를 정리하면, 배기가스에 의한 PM 2.5의 생성으로(Querol et al., 2001, 2004) 도시에서 그 외곽지역보다 높은 비율을 나타내었고(Brook et al., 1997; Chan et al., 2005; Hueglin et al., 2005; Wang et al., 2006; Zhou et al., 2016), 남부유럽에서는 사막으로부터 먼지 유입이 이루어지는 경우 그 비율이 감소하는 경향이 보고되었다(Querol et al., 2001, 2004; Zhou et al., 2016). 우리나라는 고도의 도시화가 이루어져 지역간 개발 격차가 존재하며, 중국으로부터 황사 유입의 영향, 점점 커지는 기후 변동성의 특징이 있기에 해외의 선행연구와 같이 PM 2.5 / PM 10 특성을 분석하는 기초연구가 시급하다고 할 수 있다. 중요성에도 불구하고, 국내에서는 미세먼지와 풍속(Kim et al., 2017b) 및 경계층고도(Lee et al., 2019)에 대한 연구사례나 부산지역의 연구사례가 보고되었으나(Jeon et al., 2008; Jeon, 2012) 전반적으로 PM 2.5/PM 10의 변동성에 대한 연구가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 서울시의 2015년부터 2019년까지 5년간의 관측자료를 활용하여, 기상 조건이 PM 2.5, PM 10 농도와 PM 2.5 / PM 10에 미치는 영향을 간단하게 살펴보았다. 이어지는 2절에 본 연구에서 활용한 데이터 및 방법을 설명하였으며, 3절에서 황사(3.1절), 풍속(3.2절), 강수 및 습도(3.3절), 일교차 및 일사(3.4절)의 영향을 분석한 결과를 제시하였다. 본 연구의 성과는 해외의 연구사례와의 비교를 통해 국내 미세먼지의 특성을 이해하고, 향후 효율적인 대기질 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기상조건이 PM 2.5, PM 10에 미치는 영향 분석은 향후 미래 기후변화 전망 정보와의 결합을 통해서 미래의 미세먼지 전망을 살펴보는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

## 2. 데이터 및 방법

본 연구는 기상 조건이 PM 2.5, PM 10에 미치는 영향 분석의 기초연구로서, 서울시를 대상으로 2015년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지(1,826일)를 분석 기간으로 하였다. 기상 관측자료는 기상청의 서울기상관측소(37.5714 °N, 126.9658 °E)의 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간, 일사량, 강수량 자료를 사용하였다. 서울기상관측소는 100년 이상의 장기간의 기상관측이 수행되어왔고, 종관기상관측소로 관측장비 주변환경이 양호하게 관리되어왔다(Hong et al., 2019b). 기상관측소 주변 지역은 국지기후대(Local Climate Zones; Stewart and Oke, 2012) 구분에 따르면 중층밀집형(LCZ2, compact mid-rise)로 볼 수 있다(Hong et al., 2013; 2019b). 동일한 기간에 대해 환경부에서 제공하는 서울 중구 관측지점(37.5646 °N 126.9760 °E)의 일별 미세먼지 농도 측정자료를 활용하였다. 중구 미세먼지 관측지점은 서울을 대표하는 대기오염 관측소이며, 기상관측소와의 거리가 약 1.2 km로 기상 조건과의 비교 분석에 적합하다고 판단하였다.

기상청과 환경부의 확정 자료에 데이터가 없는 경우(공백)를 결측 기간으로 보았다. 전체 기간 중 미세먼지의 결측 기간은 총 16일로 2016년 10월 5일부터 10월 20일까지이다. 기상 자료의 결측은 관측 변수별로 다르게 나타났는데(최고기온 1일, 풍속 3일, 일조시간 10일, 일사량 12일), 자료의 가용성은 99%이상으로 높았다. 기상 관측변수 중 기온은 일교차(일 최고기온과 최저기온의 차이), 강수량은 강수 종료 후 무강수 경과일수(강수일 0일, 강수일 뒤 첫 번째 무강수일 1일)로 재가공하여 분석에 활용하였다. 분석에 사용한 변수 목록을 다음의 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1. The list of variables used in this study

Category	Variable (Abbreviation)	Unit
Particulate Matter	Daily mean PM10 concentraion (PM <sub>10</sub> )	$\mu\text{g m}^{-3}$
	Daily mean PM2.5 concentraion (PM <sub>2.5</sub> )	$\mu\text{g m}^{-3}$
Meteorological Condition	Diurnal 1.5 m air-temperature range (DTR)	°C
	Daily mean wind-speed (WS)	$\text{m s}^{-1}$
	Days after rainfall (day)	day
	Daily solar duration (K <sub>hour</sub> )	hour
	Daily accumulated solar radiation (K $\downarrow$ )	$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$
	Daily mean relative humidity (RH)	%

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 황사가 PM2.5/PM10에 미치는 영향

선행연구에 따르면 사막으로부터의 먼지가 유입되는 기간에는 상대적으로 입자가 굵은 먼지 농도의 증가로 PM 2.5/PM 10 감소가 나타난다(Querol et al., 2001, 2004; Zhou et al., 2016). 본 연구의 분석기간 중 황사(yellow-dust) 발생일은 총 40일로(Table 2) 일평균 PM 2.5, PM 10 농도와 PM 2.5/PM 10의 분포를 Fig. 1에 나타내었다.

5년간 PM 10의 평균 농도는  $41.1 \pm 0.6 \mu\text{g m}^{-3}$  (평균  $\pm$  표준오차)이며, PM 2.5는  $23.4 \pm 0.3 \mu\text{g m}^{-3}$ , PM 2.5 / PM 10의 평균(일별 PM 2.5/PM 10의 평균)은 0.58( $\Sigma$ PM 2.5/ $\Sigma$ PM 10은 0.57)이었다. 황사일을 제외하면, PM 10과 PM 2.5의 관계는 선형성이 높게( $r^2 = 0.85$ ) 나타나(Fig. 1a의 회색 점선), PM 2.5/PM 10이 비교적 일정한 비율을 유지하였고, PM 10이 증가하면 PM 2.5도 같은 비율로 증가하는 특성을 나타내었다. 황사 발생일의 분석결과는 해외 연구 사례(Querol et al., 2001, 2004; Zhou et al., 2016)와 동일하게 국내에서도 황사가 발생하는 경우 상대적으로 굵은 입자를 가진 먼지 농도의 증가가 주요하게 나타나면서 PM 2.5/PM 10의 감소가 뚜렷함을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 풍속의 영향

풍속이 강한 경우 경계층 내 미세먼지의 확산과 도시 외곽으로의 유출이 활발하게 이루어져 미세먼지 농도가 전반적으로 감소할 것이 기대되었으나 분석결과는 예상과 달랐다(Fig. 2). PM 10은 풍속과의 연관성이 낮게 나타났는데(Fig. 2a), PM 2.5는 풍속이 증가함에 따라 농도의 감소 경향이 뚜렷하게 나타났(Fig. 2b). 결과적으로 PM 2.5/PM 10은 풍속이 증가함에 따라서 PM 2.5의 기여가 줄어들면서 전체적으로 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났(Fig. 2c). 풍속이 증가함에 따라서 도로와 건물로부터 비산먼지가 증가하는 도심지의 특성상, PM 10의 확산·유출 과정을 상쇄하는 효과가 있는 것이라 추정하였다.

Table 2. The yellow-dust days during the study period(2015. 01. 01.~ 2019.12.31.)

Year	Number of occurrence days	date (Month/Day)
2015	15	1/1; 2/8, 22-24; 3/1, 16-17, 20-22, 30-31; 4/16-17
2016	7	3/6, 8; 4/17, 22-24; 5/7
2017	10	1/27; 4/19; 5/5-9; 11/8, 11, 22
2018	5	4/6, 15; 5/24; 11/27-28
2019	3	10/31; 11/1, 18

#### 3.3 강수 및 상대습도의 영향

강수에 의한 미세먼지 세정효과는 간단한 연구로 소개된바 있으나(Park and Choi, 1999; Wesely and Hicks, 2000; Kim et al., 2007; Lim et al., 2013), 강수 후 무강수일 경과일수나 대기 중 상대습도에 따른 미세먼지 변화양상에 대한 연구는 찾기 어렵다. 무강수 지속 시간은 지면-대기 상호작용의 점진적인 변화 과정을 설명하는데 중요한 지표이다. 도시의 경우 무강수가 지속되면 도로와 건물 표면의 습기가 빠르게 감소하고, 열저장효과가 변화하면서 지면 에너지 평형(Ward et al., 2013; Hong et al., 2020)과 도시열섬강도(Hong et al., 2019b)에도 영향을 미친다고 알려져 있다. 무강수 일수가 증가함에 따라 PM 10과 PM 2.5 모두 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났고(Fig. 3a, b), 둘 모두 증가함에 따라서 PM 2.5/PM 10은 변화의 경향성을 보이지 않았다(Fig. 3c). 미세먼지 농도는 무강수일 4일까지 꾸준히 증가하였고, 약 10일 정도 경과할 경우 다시 증가하는 양상을 나타내었다. 분석 결과의 미세먼지 관리 측면의 시사점은 무강수일이 일주일 이상 지속되는 경우, 도시 표면의 살수 등을 통해서 적극 관리하는 경우 그 효과가 높을 것이라는 점이다.

상대습도가 80% 이상으로 높은 경우에 PM 10과 PM 2.5의 농도 감소가 크게 나타났(Fig. 4a, b). 이는 앞서 살펴본 강수일과 강수 후 경과시간이 얼마 지나지 않은 기간에 해당하여 세정효과가 강하게 나타나기 때문으로 보인다. 상대습도 80% 미만에서는 상대습도가 증가함에 따라 PM 2.5의 농도와 비율(Fig. 4c)이 증가하는 양의 상관관계를 뚜렷하게 보였다. 이는 상대습도가 증가함에 따라 핵화(nucleation) 및 응축(condensation)의 증가로 주로 2차 에어로졸인 PM 2.5의 생성이 증가하기 때문으로 보인다.

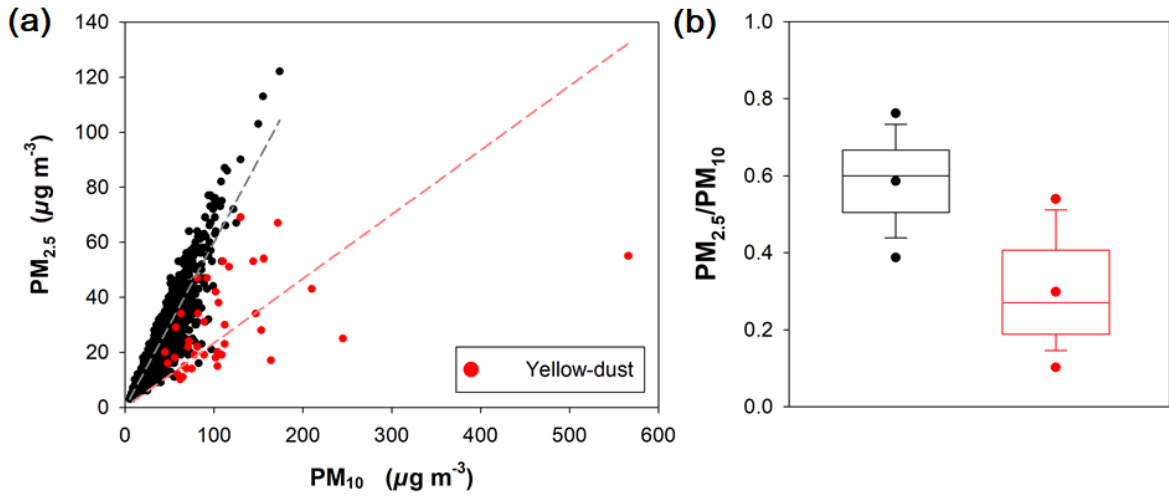


Fig. 1. Distribution of (a) daily mean PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and (b) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>. Red symbol and box indicate the data during the yellow-dust events.

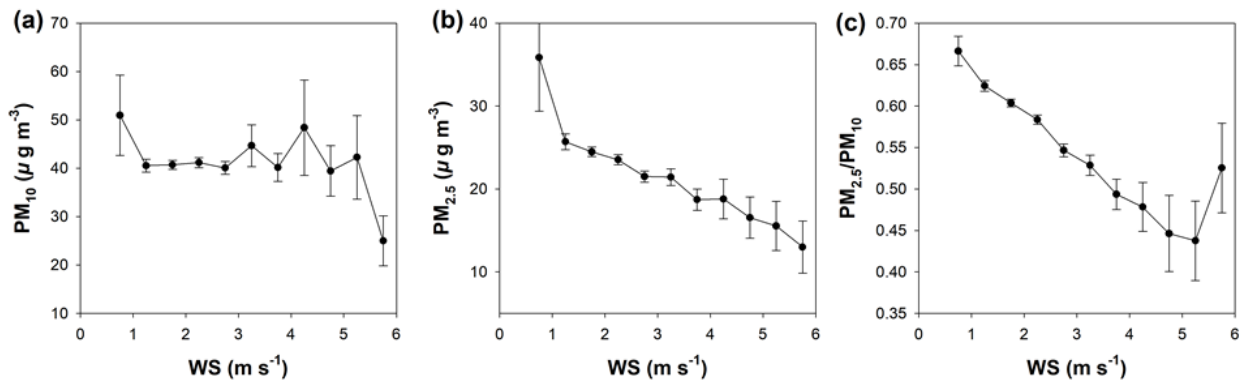


Fig. 2. (a) PM<sub>10</sub>, (b) PM<sub>2.5</sub>, and (c) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> by daily mean wind-speed (WS, m s<sup>-1</sup>).

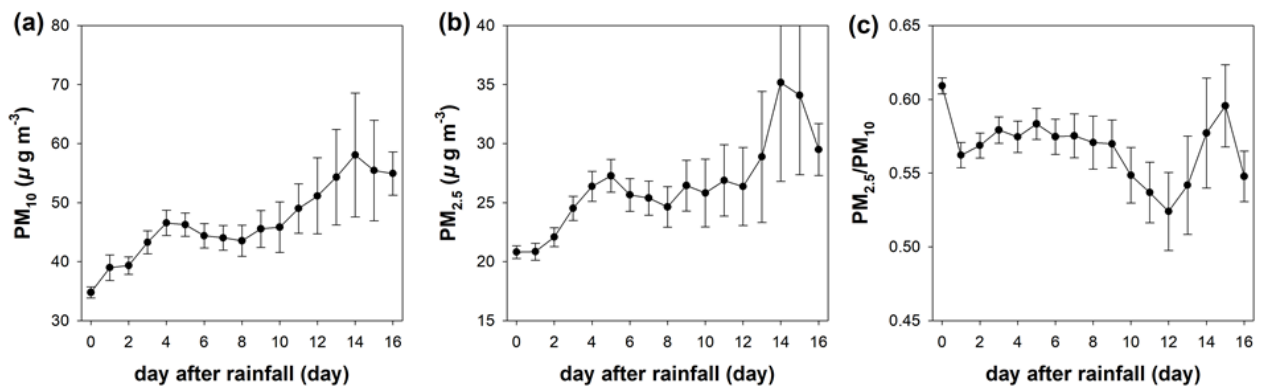


Fig. 3. (a) PM<sub>10</sub>, (b) PM<sub>2.5</sub>, and (c) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> by days after rainfall.

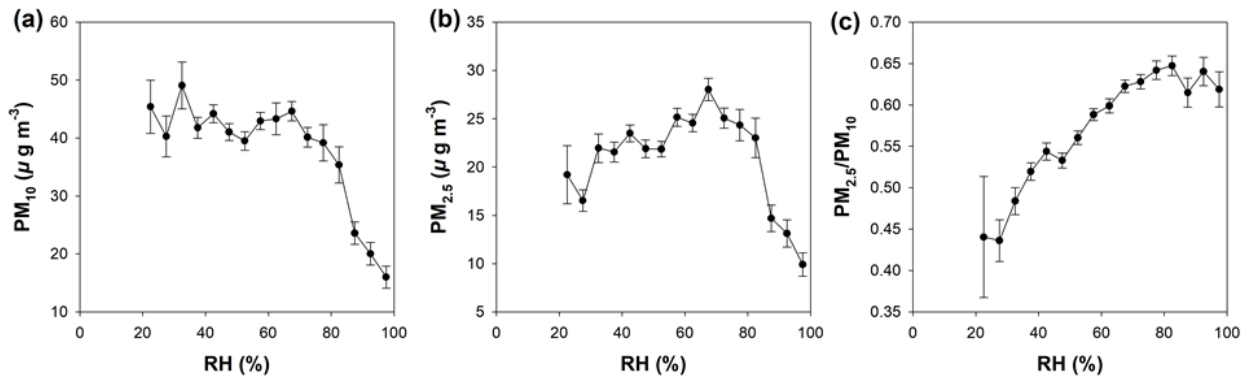


Fig. 4. (a) PM10, (b) PM2.5, and (c) PM2.5/PM10 by relative humidity (RH, %).

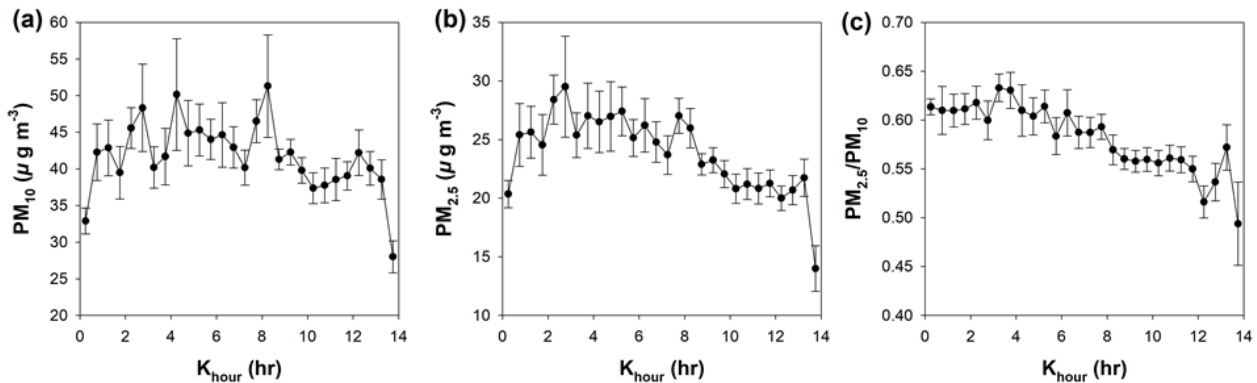


Fig. 5. (a) PM10, (b) PM2.5, and (c) PM2.5/PM10 by daily solar duration ( $K_{hour}$ , hr).

### 3.4 일조시간, 일사량, 일교차의 영향

다음의 Fig. 5-7은 일조시간과 일 누적 단파복사량, 일교차에 따른 PM 10, PM 2.5, PM 2.5/PM 10의 분포를 나타낸 그림이다. 기상청의 일조시간 기준은 WMO 기준 ( $120 \text{ W m}^{-2}$  이상의 하향단파복사량인 시간)을 따르며, 일조시간이 3시간 미만인 경우는 강수일의 확률이 높아, PM 10과 PM 2.5 모두 일조시간이 0으로 갈수록 감소하는 형태를 나타내었다(Fig. 5a, b). 3시간 이상의 일조시간에 대해서는 PM 2.5의 감소 경향이 비교적 뚜렷하게 나타났고, 동일 구간에서 PM 2.5/PM 10의 감소 경향으로 이어지는 것으로 분석되었다(Fig. 5c). 일사량(Fig. 6)도 일조시간과 큰 차이 없이 유사한 결과를 나타내었다. 일조시간과 일사량이 풍부한 늦봄부터 여름까지와 그 반대인 겨울의 계절 요인이 미세먼지의 변화 경향에 반영된 결과로도 보여, 향후 계절을 분리하는 등 추가적인 분석이 필요해 보인다.

일교차에 따른 미세먼지의 변화 경향은 매우 뚜렷하게

나타났는데(Fig. 7), 일교차가 증가함에 따라서 PM 10과 PM 2.5는 뚜렷하게 증가하는 양의 상관을 나타내었고, PM 2.5/PM 10은 뚜렷하게 감소하는 음의 상관을 나타내었다. 일교차가 크다는 것은 풍속이 약한 경우(대기가 정체되는 경우)가 많아서, 앞서 살펴본 풍속(Fig. 2)에 따른 미세먼지 변동성이 강하게 반영된 결과로 보인다. 일교차가 큰 경우 서울 도심지역에서는 도시열섬(urban heat island) 강도가 크다는 선행연구가 있고(Hong et al., 2019b), 호흡기 질환 등 시민 건강에의 악영향도 널리 알려져 있다. 미세먼지 측면에서도 일교차가 큰 날은 악영향이 뚜렷한 것으로 나타나, 향후 일교차가 큰 날에 대해서는 미세먼지와 도시열섬 및 시민들의 건강의 측면에서도 적극적인 관리 정책 이행이 필요함을 시사한다.

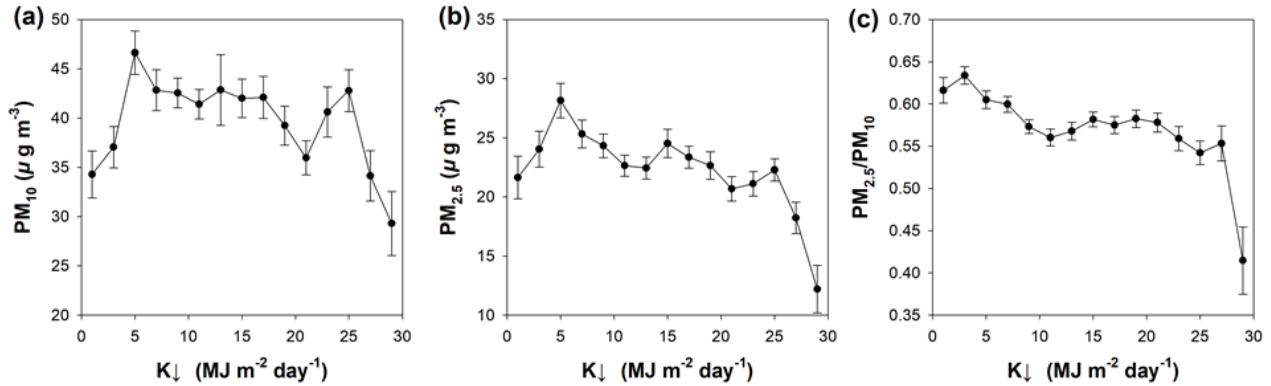


Fig. 6. (a) PM10, (b) PM2.5, and (c) PM2.5/PM10 by daily accumulated solar radiation ( $K \downarrow$ ,  $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ).

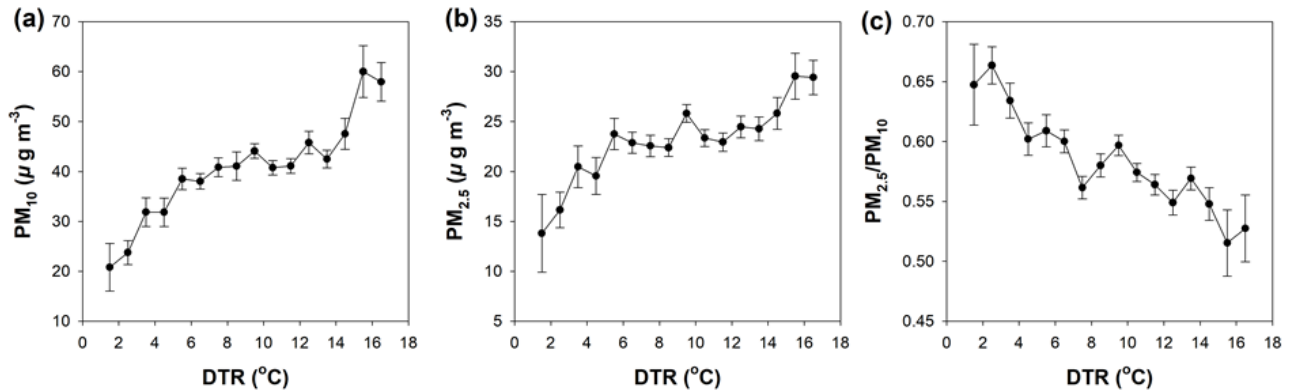


Fig. 7. (a) PM10, (b) PM2.5, and (c) PM2.5/PM10 by diurnal temperature range (DTR,  $^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4. 결론

본 연구는 최근 5년간(2015~2019년) 서울 도심지에서 기상조건(황사, 풍속, 무강우 일수, 상대습도, 일조시간, 일사량, 일교차)이 미세먼지에 미치는 영향에 대해서 간단하게 소개하였다. 분석결과, 1) 황사 기간 중 상대적으로 입자가 큰 먼지의 유입에 따른 PM 2.5 / PM 10 감소 경향, 2) 풍속 증가에 따른 PM 2.5 농도와 PM 2.5 / PM 10 감소 경향, 3) 상대습도 증가에 따른 PM 2.5 농도와 PM 2.5 / PM 10 증가 경향, 4) 무강수 기간의 증가에 따른 미세먼지 증가 경향, 5) 일교차에 따른 미세먼지 농도 증가 경향이 뚜렷하게 나타났다. 본 연구는 서울 도심지에 위치한 하나의 관측지점에서 측정한 결과만을 토대로 분석했다는 한계점이 있다. 같은 도시에서도 개발의 정도나 도시 신진대사(예, 교통량, 에너지 소비량, 상주 인구밀도 등)에

따라서 미세먼지의 변동 특성이 다를 수 있다. 향후 서울 도심지와 다른 지면 환경(예, 농경지, 산림, 하천, 바다 등)을 가진 관측지점들로 분석을 확대하여, 국내 미세먼지의 변동 특성을 면밀히 확인하고, 공간유형별 미세먼지 변동 특성에 대해서 이해하는 연구가 필요할 것이라 보인다. 본 연구에서 소개한 결과는 기상 예보(단기) 및 기후 전망(중장기)에 따른 도심지역의 미세먼지 저감 정책 수립·이행에 활용할 경우 정책 효과를 높이는 데 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 사사

본 연구는 기후변화대응 환경기술개발사업(20140013100006), 환경부의 지자체 취약성 평가 지원 기반 마련 및 도구 활용성 제고(2020-002-07) 연구, 국토연구원에서 기본과제

로 수행한 성선용·박종순·윤은주. 2020. 미세먼지 대책을 위한 국토공간 유형구분 연구. 세종: 국토연구원(3월 출간 예정)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Brook J R, Wiebe A H, Woodhouse S A, Audette C V, Dann T F, Callaghan S, Piechowski M, Dabek-Zlotorzynska E, Dlouhy J F. 1997. Temporal and spatial relationships in fine particle strong acidity, sulphate, PM10, and PM2.5 across multiple canadian locations. *Atmos Environ* 31(24):4223-4236.
- Chan C Y, Xu X D, Li Y S, Wong K H, Ding G A, Chan L Y, Cheng X H. 2005. Characteristics of vertical profiles and sources of PM2.5, PM10 and carbonaceous species in Beijing. *Atmos Environ* 39(28):5113-5124.
- Hong J-W, Hong J, Lee S E, Lee, J. 2013. Spatial distribution of urban heat island based on local climate zone of automatic weather station in Seoul metropolitan area. *Atmos* 23(4): 413-424. (in Korean with English Abstract)
- Hong J-W, Hong J, Kim J. 2019. Contingent valuation survey on changes in citizens' perception on atmospheric pollution in Seoul, Korea. *Atmos* 29(2):213-218. (in Korean with English Abstract)
- Hong J-W, Hong J, Kwon E E, Yoon D. 2019. Temporal dynamics of urban heat island correlated with the socio-economic development over the past half-century in Seoul, Korea. *Environ Pollut* 254:112934.
- Hong J-W, Lee S D, Lee K, Hong J. 2020. Seasonal variations in the surface energy and CO2 flux over a high-rise, high-population, residential urban area in the East Asian monsoon region. *Int J Climatol* 40(10):4384-4407.
- Hueglin C, Gehrig R, Baltensperger U, Gysel M, Monn C, Vonmont H. 2005. Chemical characterisation of PM2.5, PM10 and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland. *Atmos Environ* 39(4):637-651.
- Jeon B-I, Hwang Y-S, Oh K-J, Cho K-C. 2008. Characteristics of PM10 and PM2.5 concentration in Busan. *Proceeding of the 46th meeting of KOSAE*.
- Jeon B-I. 2012. Meteorological characteristics of the wintertime high PM10 concentration episodes in Busan. *J Environ Sci* 21(7):815-824.
- Jerrett M, Finkelstein M M, Brook J R, Arain M A, Kanaroglou P, Stieb D M, Gilbert N L, Verma D, Finkelstein N, Chapman K R, Sears M R. 2009. A cohort study of traffic-related air pollution and mortality in Toronto, Ontario, Canada. *Environ Health Persp* 117(5):772-777.
- Kim H, Kim J, Kim S, Kang SH, Kim HJ, Kim H, Heo J, Yi SM, Kim K, Youn TJ, Chae IH. 2017a. Cardiovascular effects of long-term exposure to air pollution: a population-based study with 900 845 person-years of follow-up. *J Am Heart Assoc* 6(11):e007170.
- Kim H C, Kim S, Kim B U, Jin C S, Hong S, Park R, Stein A. 2017b. Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. *Sci Rep-UK* 7(1):1-7.
- Kim Y G, Lee S Y, Lim Y K, Song S K. 2007. Design and assessment of an ozone potential forecasting model using multi-regression equations in Ulsan metropolitan area, *J Korean Soc Atmos Environ* 23(1):14-28.
- Kim Y P. 2006. Air pollution in Seoul caused by aerosols. *J Korean Soc Atmos Environ* 22(5): 535-553. (in Korean with English Abstract)
- Kim Y P, Lee G. 2018. Trend of air quality in Seoul: policy and science. *Aerosol Air Qual Res* 18(9):2141-2156.
- Lee J, Hong J-W, Lee K, Hong J, Velasco E, Lim Y J, Lee J B, Nam K Park, J. 2019. Ceilometer monitoring of boundary-layer height and its application in evaluating the dilution effect on air pollution. *Bound-Lay Meteorol* 172(3):435-455.
- Lim D, Lee T-J, Kim D-S. 2013. Development and validation test of effective wet scavenging contribution

- regression models using long-term air monitoring and weather database. *J Korean Soc Atmos Environ* 29(3):297-306.
- Lim S, Kim J, Kim T, Lee K, Yang W, Jun S, Yu S. 2012. Personal exposures to PM<sub>2.5</sub> and their relationships with microenvironmental concentrations. *Atmos Environ* 47:407-412.
- Ministry of Environment(MOE). 2017. Annual report of air quality in Korea 2016. (in Korean)
- Park J-H, Choi K-C. 1999. A theoretical study on wet scavenging of atmospheric aerosols by rain drops. *J Korean Soc Atmos Environ* 15(1):1-11.
- Pope III C, Muhlestein J B, May H T, Renlund D G, Anderson J L, Horne B D. 2006. Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution. *Circulation* 114(23):2443-2448.
- Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, Plana F, Ruiz C R, Cots N, Massagué G, Puig O. 2001. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. *Atmos Environ* 35(36):6407-6419.
- Querol X, Alastuey A, Ruiz C R, Artiñano B, Hansson H C, Harrison R M, Buringh E, Brink H M, Lutz M, Bruckmann P, Straehl P, Schneider J. 2004. Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in selected European cities. *Atmos Environ* 38(38):6547-6555.
- Stewart I D, Oke T R. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *B AM Meteorol Soc* 93(12):1879-1900.
- Wang X, Bi X, Sheng G, Fu J. 2006. Chemical composition and sources of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosols in Guangzhou, China. *Environ Monit Assess* 119(1-3):425-439.
- Ward H C, Evans J G, Grimmond C S B. 2013. Multi-season eddy covariance observations of energy, water and carbon fluxes over a suburban area in Swindon, UK. *Atmos Chem Phys* 13(9): 4645-4666.
- Wesely M L, Hicks M. 2000. A review of the current status of knowledge on dry deposition. *Atmos Environ* 34(12-14):2261-2282.
- Xie P, Liu X, Liu Z, Li T, Zhong L, Xiang Y. 2011. Human health impact of exposure to airborne particulate matter in pearl river delta, China. *Water Air Soil Poll* 215(1-4):349-363.
- Zhou X, Cao Z, Ma Y, Wang L, Wu R, Wang W. 2016. Concentrations, correlations and chemical species of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> based on published data in China: potential implications for the revised particulate standard. *Chemosphere* 144:518-526.