



논문

# 한반도 인근의 미세먼지 시공간 농도 변화 연구

## Spatiotemporal Variations of Fine Particulates in and around the Korean Peninsula

이찬주, 홍민선\*

아주대학교 환경안전공학과

Chan-Joo Lee, Min-Sun Hong\*

Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2019년 7월 29일  
 수정일 2019년 8월 22일  
 채택일 2019년 9월 25일

Received 29 July 2019  
 Revised 22 August 2019  
 Accepted 25 September 2019

\*Corresponding author  
 Tel : +82-(0)31-219-2404  
 E-mail : msh@ajou.ac.kr

**Abstract** In this study, spatiotemporal variations of fine particulates were analyzed using published data of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> from 2001 to 2018 in and near the Korean peninsula coupled with upper (850 hPa) wind vectors. Six sites were chosen, two in remote islands, three in the Seoul metropolitan area and one on East Coast to investigate hourly, monthly and annual variations of fine particulates. Other than the above six sites, 5 more sites were chosen each along the West and East Coast of the Korean peninsula to investigate the hourly variations of fine particulates. Data were analyzed using Pandas, Seaborn, Windrose package in Python. PM<sub>2.5</sub> concentrations are higher than annual ambient standards, 15 µg/m<sup>3</sup> and PM<sub>10</sub> concentrations were more related to man-made emission sources compared to PM<sub>2.5</sub>. Hourly variations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at West Coast cities are apparently different from those located along the East Coast of the Korean peninsula. Upper air data analysis in remote islands shows that transboundary transport of fine particulates from China and the Korean peninsula are comparable to each other.

**Key words:** Fine particles, Secondary particles, Spatiotemporal variation

### 1. 서론

최근 미세먼지와 초미세먼지에 대한 주의보 횟수가 증가하고 있다. 2019년 1월부터 6월까지 6개월 만에 서울지역에서 총 4회의 미세먼지 주의보, 14회의 초미세먼지 주의보와 2회의 초미세먼지 경보가 발령되었다(AirKorea, 2019). 또한, 미세먼지와 질병발생률에 대한 각종 논문들이 발표됨에 따라 미세먼지 문제는 사회적으로 심도 있게 다루어야 하는 문제로 급부상하였다(US EPA, 2019; Kim, 2017) 그로인해 미세먼지 관련 광학적 분석(Yu *et al.*, 2011), 이온 성분분석(Lee *et al.*, 2014) 등 다양한 접근 방법들을 통한 연구가 활발하게 이뤄지고 있다.

본 연구에서는 국내에 축적된 미세먼지 데이터와 상층(850 hPa) 기류 데이터를 정리·분석하였으며, 한반도 인근 미세먼지의 공간 및 시간별 농도 변화를 도출하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 데이터 수집

국내 미세먼지 데이터는 에어코리아([www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr))에서 최종확정측정자료를 시간자료 형태로 공개하고 있다. 공개대상 항목으로는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO 총 6개 항목이며 PM<sub>2.5</sub>를 제외한 항목들

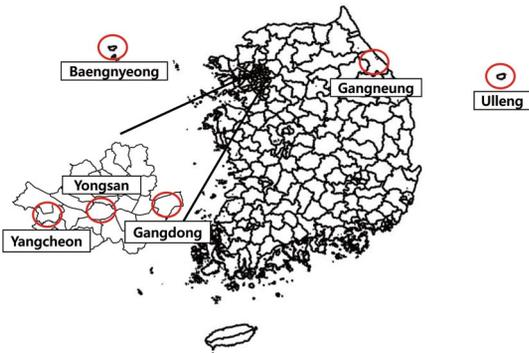


Fig. 1. Six locations in and near Korean Peninsula.

은 2001년부터 제공되고 있으며,  $PM_{2.5}$ 의 경우 2015년부터 제공되고 있다.

기상정보 데이터는 기상청 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr>)에서 공개하고 있다. 고층 기상 정보에 대한 데이터도 제공되는데 본 자료에서는 레윈존데로 관측된 고층기상 자료 중 850 hPa 기압의 풍향 데이터를 사용하였다. 850 hPa는 해발 약 1.5 km 상공의 등압면으로서 기존 하층 대류권 분석에 이용되고 있어 지표상의 풍향으로 분석했을 때보다 미세먼지의 흐름 분석에 더 적합한 것으로 판단된다(Papagiannaki *et al.*, 2014; Lolis *et al.*, 2002).

레윈존데로 관측된 자료는 6시간 또는 12시간 간격으로 데이터를 공개하고 있기 때문에 해당 관측시간을 기준으로 미세먼지 데이터와 병합(merge)하여 분석에 이용하였다.

## 2.2 대상지역 선정

### 2.2.1 대상지역

대상지역은 남한의 서해(백령도), 내륙(양천구, 용산구, 강동구), 동해(강릉시, 울릉도) 총 6개 지역을 선정해 시간별 농도 변화를 추측하였다. 이는 기상학적으로 편서풍대에 위치한 한반도를 고려하여 선정하였다.

대상지역은 그림 1에 나타나있다.

## 2.3 데이터 분석

데이터 분석은 Python을 활용하였다. 사용 패키지는 Pandas, Seaborn, Windrose를 사용하였다. Pandas 패키지는 Python에서 데이터 조작과 분석을 위해 만들어진 소프트웨어 라이브러리로서 숫자 표와 시계열을 조작하기 위한 데이터 구조와 연산을 제공한다. Seaborn 패키지는 matplotlib를 기반으로 하는 Python 시각화(Visualization) 라이브러리이며 통계적 그래프를 시각화하여 표현해 준다. Windrose 패키지는 풍향, 풍속 데이터를 바람장미로 쉽게 구현해주는 패키지로서 850 hPa의 고도풍향 데이터를 바람장미로 시각화하는데 이용하였다(Massarone *et al.*, 2016; Joel Grus, 2015).

Data table의 NaN값은 모두 빈칸(Blank)처리하였으며,  $PM_{2.5}$ 를 변수로 이용한 분석은 모두 2015년 이후의 데이터를 사용하였다. 분석에 사용한 데이터의 row 개수는 각 지역별로 양천구 148,728, 용산구 131,136, 강동구 144,894, 강릉시 139,203, 울릉도 131,403개이다. 백령도의 경우 2014년 이후의 데이터만 존재하여 39776개의 row를 분석에 사용하였다.

본 자료의 데이터 분석은 각 요소별 상관관계수 분석과 회귀직선식을 이용한 다중회귀분석, 지역별 년, 월, 시간 평균 추세 분석과 850 hPa 풍향에 따른 농도분석을 수행하였다. 상관관계수 분석은 데이터를 최대 최소 정규화(min-max Normalization) 방법을 이용해 1~5의 값으로 하여 피어슨 상관관계수 분석을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 요소별 상관분석

요소별 피어슨 상관분석을 진행한 결과는 표 1과 같이 나타났다.  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 와 가장 상관관계수가 낮은 요소는  $O_3$ 로 각각 0.0582, 0.0072의 낮은 상관관계를 보였으며,  $SO_2$ 와  $NO_2$ 는 각각  $PM_{10}$ 과의 상관관계수 0.3028, 0.2212와  $PM_{2.5}$ 과의 상관관계수 0.3970, 0.3554로  $PM_{10}$ 보다는  $PM_{2.5}$ 에 보다 관련이 있는 것으로 나

타났다. 가장 높은 상관관계를 보인 요소는 CO로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와의 상관계수를 각각 0.3510, 0.5421로 나타났다. CO의 대류권 내 체류시간은 65일로서 미세먼지와 같이 배출되는 배출원과 관련이 높은 것으로 판단된다. 대기오염물질의 체류시간은 표 2와 같다.

### 3.2 다중회귀분석

1차 생성먼지와 2차 생성먼지의 입경에 따른 분류는 명확치 않아 미세먼지 측정자료를 PMC (PM<sub>10</sub>~PM<sub>2.5</sub>로 정의함)와 PM<sub>10</sub> 그리고 PM<sub>2.5</sub> 세 그룹으로 나누어 식(1)과 같이 Geometric식을 가정하여 가스농도에 의한 영향을 분석하였다. 각 인자의 단위는 µg/m<sup>3</sup>

이다.

$$C = a(SO_2)^b (NO_2)^c \tag{1}$$

식(1)의 C는 각각 PMC와 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도를 나타낸다. 분석자료와 결과는 표 3에 나타나 있다.

PMC와 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 회귀분석은 각각 117307, 186182, 181463의 관측수를 통해 분석이 이루어졌으며, 결정계수(R-square) 값은 각각 0.0453, 0.1299, 0.1599로 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>만으로 미세먼지 값을 예측하기에는 무리가 있어 보인다. 하지만 PMC에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>로 갈수록 결정계수의 값이 0.0846, 0.03 증가하여 2.5µm 이하 입경일 때 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub> Data를 통한 분석에 더 적합하다는 점을 알 수 있다. 회귀분석식의 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 계수는 PMC일 때 0.2701, 0.0082, PM<sub>10</sub>일 때 0.3214, 0.0592, PM<sub>2.5</sub>일 때 0.3244, 0.1068로 PMC일 때보다 PM<sub>2.5</sub>일 때 각각 0.0543, 0.0986 상승하여 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>의 기여도가 PM<sub>2.5</sub>일 때 더 높다는 점을 알 수 있다. 이는 선행연구(Yao, 2002) 결과와도 일치한다.

**Table 1.** Regression coefficient of air pollutants.

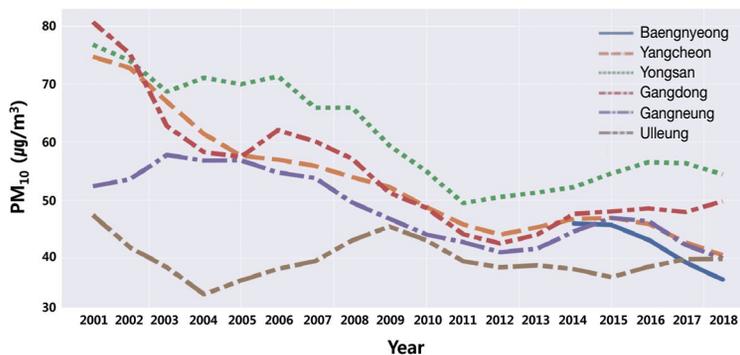
	SO <sub>2</sub>	CO	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
SO <sub>2</sub>		0.5592	-0.2543	0.5286	0.3028	0.3970
CO			-0.4484	0.6865	0.3510	0.5421
O <sub>3</sub>				-0.5841	0.0582	0.0072
NO <sub>2</sub>					0.2212	0.3554
PM <sub>10</sub>						0.7005
PM <sub>2.5</sub>						

**Table 2.** Residence time of air pollutants (Seinfeld et al., 1998).

Gases	Residence time (days)
NO <sub>x</sub>	1
NH <sub>3</sub>	20
SO <sub>2</sub>	40
CO	65

**Table 3.** Coefficients in eq (1).

	PMC (PM <sub>10</sub> -PM <sub>2.5</sub> )	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Observations	177307	186182	181463
Standard error	0.7802	0.6078	0.6678
R-square	0.0453	0.1299	0.1599
y-intercept, a	8.7907	15.1027	6.4773
SO <sub>2</sub> coefficient, b	0.2701	0.3214	0.3244
NO <sub>2</sub> coefficient, c	0.0082	0.0592	0.1068



**Fig. 2.** Moving average (3 years) PM<sub>10</sub> concentration at 6 locations.

### 3.3 지역별 평균 그래프

#### 3.3.1 연평균 농도 분석

그림 2는 2001년부터 2018년까지 6개 지역의 년 평균  $PM_{10}$  농도 변화를 연도별 기상 조건의 영향을 줄이기 위하여 이동평균(3년 기준) 분석방법을 사용해 나타낸 것이다.  $PM_{10}$ 은 울릉도를 제외한 모든 지역이 2001 이후 전체적으로 감소하는 모습을 보이다가 2011년, 2012년 이후 다시 소폭 증가한 것으로 나타났다. 2018년 용산구( $54.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 제외한 모든 지역이 국내 미세먼지 환경기준인  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족하고 있지만 6개 지역 모두 WHO에서 권고한 Air quality guideline(AQG)의 기준( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과하고 있다.

그림 3은 2015년부터 2018년까지 6개 지역의 년 평균  $PM_{2.5}$  농도 변화를 나타낸 것이다. 백령도의 경우

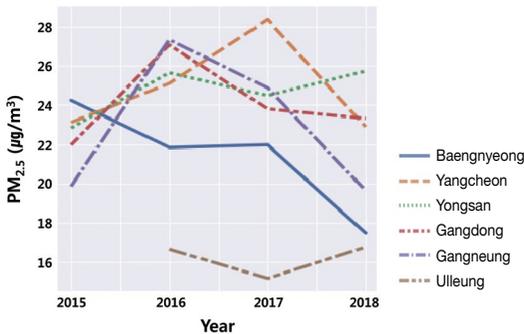


Fig. 3. Annual average  $PM_{2.5}$  concentration at 6 locations.

2015년 이후 농도가 감소하는 경향을 띄었으며, 용산구의 경우 2015년 이후 농도가 증가하는 경향을 띄었다. 하지만  $PM_{2.5}$ 의 년 평균 데이터는 2015년부터 측정을 시작하여 아직 많은 데이터가 축적되지 않아 특별한 경향성을 보기는 어렵다. 6개 지역 모두 2018년 강화된 국내기준인  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족하지 못하였다.

#### 3.3.2 월평균 농도 분석

그림 4는 1월부터 12월까지 6개 지역의 월 평균  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 농도 변화를 나타낸다.

월별  $PM_{10}$ 의 증감변화는 6개 지역 모두 봄(3~4월)에 가장 높고 서서히 감소하여 여름(7~8월)에 가장 낮은 농도를 띄며 다시 증가하는 경향을 띤다.

월평균  $PM_{2.5}$ 의 경우  $PM_{10}$ 과 비슷한 경향을 띠는데 경향성이 더 뚜렷하다. 울릉도(4월)를 제외한 모든 지역이 3월에 최고농도를 띄고 점점 감소하여 6개 지역 모두 8월에 최저농도를 기록하였다.

#### 3.3.3 시간평균 농도 분석

그림 5는 00시부터 23시까지 6개 지역의 시간 평균  $PM_{10}$ 과  $PM_{2.5}$ 의 농도 변화를 나타낸다.

시간별  $PM_{10}$ 의 변동은 도시 4개 지역의 농도가 06시 이후로 11시 경까지 계속해서 증가하고 있고, 백령도와 울릉도의 시간별 변화가 도시 4개 지역과 상이한 결과를 보여주고 있어 주간 경제활동이  $PM_{10}$ 의 농도 증가에 기여하고 있다고 판단된다.

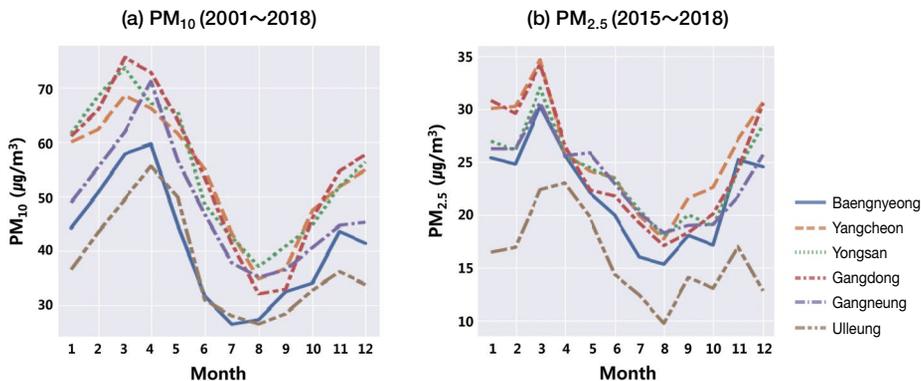


Fig. 4. Monthly variation of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  at 6 locations.

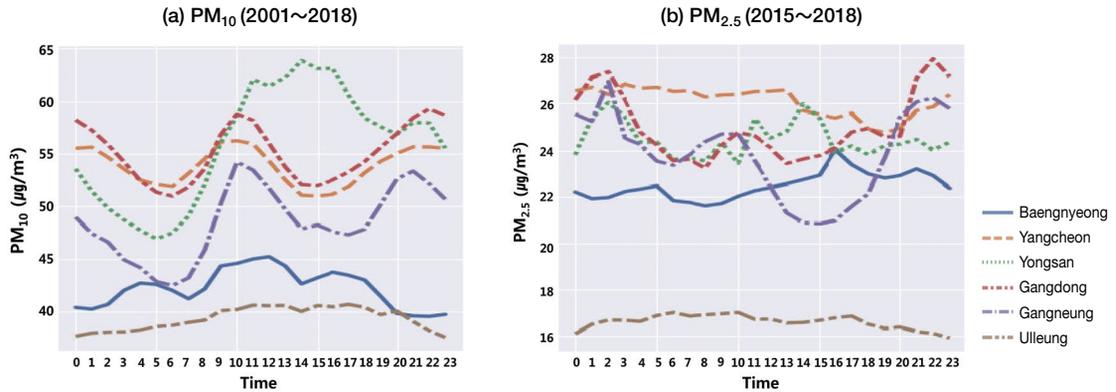


Fig. 5. Hourly variation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at 6 locations.



Fig. 6. Twelve locations at West Coast & East Coast.

시간별 PM<sub>2.5</sub>의 변동은 지역별로 모두 다르게 나타나 특별한 경향성을 보이지 않았다. 그림 5에서 PM<sub>2.5</sub>는 PM<sub>10</sub>에 비해 경제활동에 의한 변화가 작은 것을 알 수 있어 경제활동 이외의 다양한 변수에 의해 영향 받는 것으로 판단된다.

### 3.3.4 서해안, 동해안 지역 시간평균 농도 분석

6개 지역 시간평균 농도 분석 결과 시간변화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도의 특별한 경향성을 찾지 못하여 더 자세한 분석을 위해 서해안 6개 지역과 동해안 6개 지역을 선정하여 분석하였으며, 선정된 지역은 그림 6에 나타냈다.

그림 7은 서해안 지역의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 시간평균 농도를 나타낸다.

서해안지역은 PM<sub>2.5</sub>뿐만 아니라 PM<sub>10</sub>의 농도변화에 있어서도 지역별로 다른 추이를 보이고 있다. 타 지역과 공통적인 부분은 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 농도가 주간 경제활동이 활발할 시간인 09~12시경에 높은 농도를 띠는 점이다. 군산의 경우 새벽 2시에 가장 높은 PM<sub>10</sub> 농도를 기록하고 있으며 목포의 경우는 16시경 가장 높은 PM<sub>10</sub> 농도를 나타내며 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. PM<sub>2.5</sub>의 경우 서산에서 15시경 가장 낮은 16.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하고 이후 농도가 증가하는 특이한 양상을 띤다. 목포의 경우 10시에 최저 농도를 기록한 뒤 18시에 최고 농도를 나타내 타 지역과 상이한 시간별 농도변화를 보여준다. 백령도의 경우 시간에 따른 PM<sub>2.5</sub>의 농도변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 8은 동해안 지역의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 시간평균 농도를 나타낸다. 동해안의 6개 지역은 서해안과 달리 지역별 특성이 크지 않고 비슷한 경향성을 띤다. 동해안 지역 시간평균 PM<sub>10</sub> 농도는 서울지역의 특성과 비슷하게 10~11시경 높은 농도를 기록하고 있다. 특이한 점은 강릉과 동해에서 02시경 가장 고농도의 PM<sub>2.5</sub>를 기록하고 있는 점이다. PM<sub>2.5</sub>의 경우도 PM<sub>10</sub>의 추세와 유사한 경향을 보여 다른 변수의 영향을 적게 받은 것으로 판단된다.

서해안 지역과 동해안 지역의 시간평균 농도 분석 결과 동해안 지역은 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>이 지역별 특성이

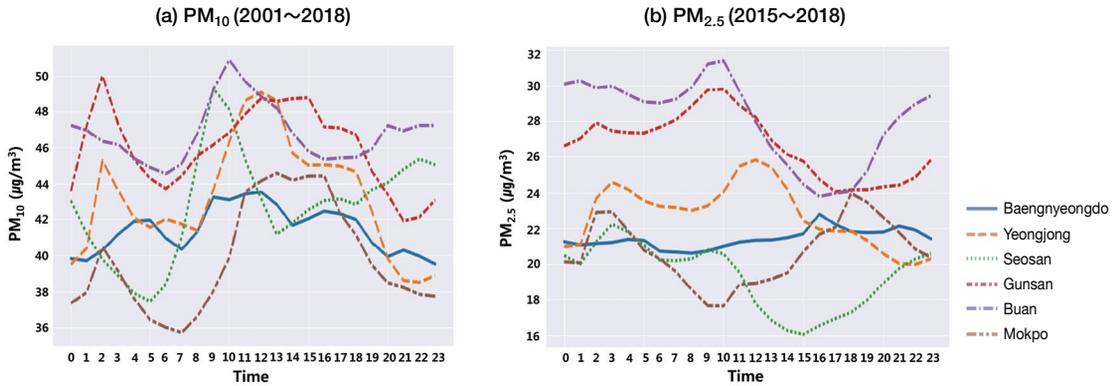


Fig. 7. Hourly variation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at 6 locations West Coast.

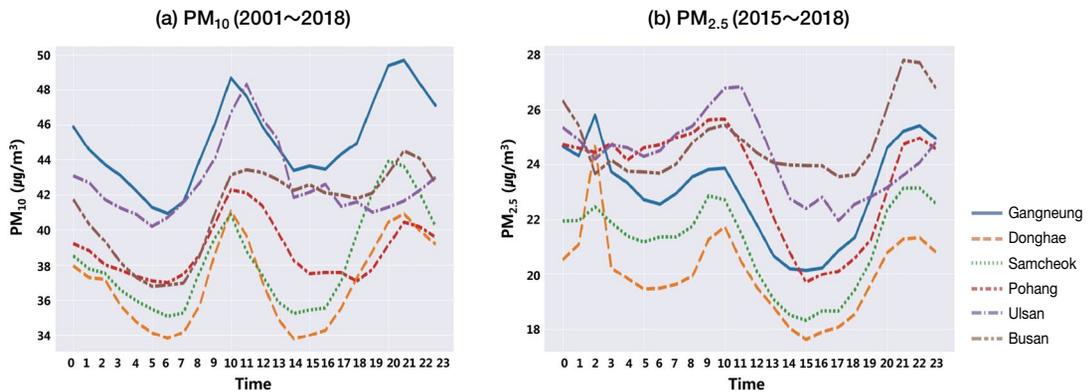


Fig. 8. Hourly variation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at 6 locations East Coast.

강하지 않았던 반면 서해안은 지역별로 다양한 경향을 띄어 외부에서의 유입 등 다양한 변수의 영향을 받는 것으로 판단된다.

### 3. 4 풍향에 따른 미세먼지 농도

850 hPa 고도에서 측정된 풍향 데이터를 분석에 이용하기 위해 백령도 지역은 백령도 측정소, 양천구, 용산구, 강동구 지역은 오산시 측정소, 강릉시, 울릉도 지역은 강릉시 측정소 데이터를 이용하였다. 그림 9는 세 측정소에서 측정된 850 hPa의 바람장미를 나타낸다.

850 hPa 고도에서 측정된 풍향 데이터를 NW, SW, NE, SE 4 방향으로 분류하여 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 평균농도를

계산하여 표 4에 나타냈다. PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 서풍 계열일 때의 농도가 동풍 계열일 때의 농도보다 높은 것으로 나타났다. PM<sub>2.5</sub>의 경우 NW와 SW의 서풍 계열일 때 NE와 SE의 동풍 계열일 때보다 23.1~42.39%의 농도 증가를 보여주고 있다. 특히 백령도의 경우 차이가 23.1%로 울릉도의 42.39% 차이를 고려하면 중국과 북한 그리고 우리나라에서 고르게 영향을 받았다고 추측할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구는 프로그래밍 언어인 Python을 이용하여

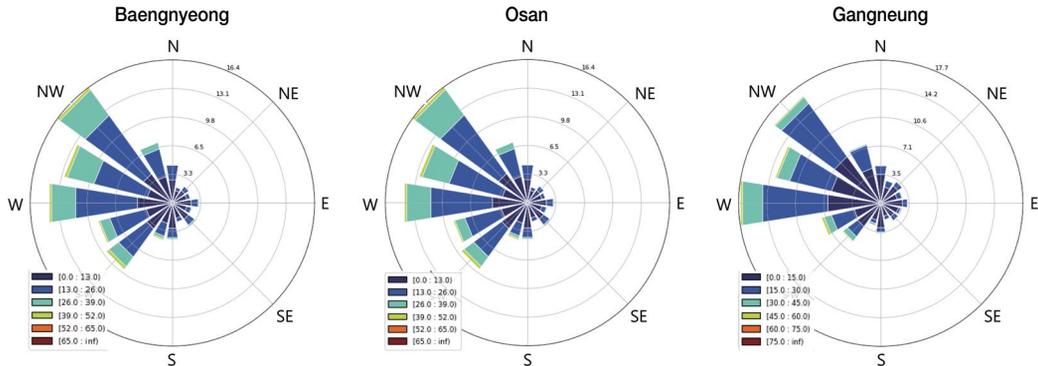


Fig. 9. Upper air (850 hPa) wind rose at 3 locations.

Table 4. Fine particle concentrations at different wind directions at 850 hPa.

	NW		SW		NE		SE	
	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Baengnyeong	44.53	21.86	42.11	22.90	35.72	17.25	35.10	19.11
Yangcheon	46.86	26.07	44.13	26.14	35.12	19.79	33.78	19.80
Yongsan	47.42	24.62	45.82	26.16	35.60	19.48	35.94	20.65
Gangdong	51.91	25.48	47.54	24.85	35.73	17.86	34.78	18.32
Gangneung	46.18	25.38	44.96	24.61	35.19	19.22	39.43	20.81
Ulleng	44.85	17.42	40.12	16.44	30.27	11.75	30.57	12.03

2001년부터 2018년까지 공개된 국내 미세먼지 농도와 고층기상(850 hPa) 자료를 이용하여 각 요소별 상관관계 분석, 회귀직선식을 통한 다중회귀분석, 지역별 년, 월, 시간 평균 추세 분석과 850 hPa 풍향에 따른 농도분석을 수행하였다.

피어슨 상관관계 분석결과 미세먼지와 가장 높은 상관관계를 보인 요소는 CO였으며, 그 뒤로 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>가 상관관계가 많은 것으로 나타났다. SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>를 변수로 한 다중회귀 분석결과 또한 R-square와 각각의 coefficient가 (PM<sub>10</sub>~PM<sub>2.5</sub>), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>순으로 높게 나타나 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>가 PM<sub>2.5</sub> 생성에 관여도가 높은 것으로 판단된다. NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>와 같이 2차 생성먼지 생성에 관여하는 오염물질로 알려져 있는 NH<sub>3</sub>의 농도가 공개된다면 더 심도 깊은 연구가 이루어질 수 있을 것이라 판단된다.

한반도를 동서로 가로지르는 6개 지역을 선정하여 시간별 공간별 분석결과 PM<sub>10</sub>의 경우 2001년 이래로

꾸준히 감소하다가 2011~2012년 이후 다시 증가하는 추세를 보였다. PM<sub>2.5</sub>는 데이터 축적이 2015년부터 이뤄져 경향성을 보기에 데이터 축적이 부족한 상황이다. 다만 6개 지역 모두 국내 PM<sub>2.5</sub> 기준인 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하여 PM<sub>2.5</sub> 저감이 필요한 것으로 판단된다. 월별 농도 분석 결과 봄(3~4월)에 미세먼지 농도가 가장 높고, 여름(6~8월)에 미세먼지 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 시간별 농도 분석 결과 PM<sub>10</sub>는 대조군(백령도, 울릉도)에 비해 4개 지역의 농도가 경향성을 띄며 주간 경제활동과 관련 있는 결과를 나타냈다. PM<sub>2.5</sub>는 특별한 경향성을 띄지 않고 저마다 다른 결과를 나타내었다. 추가적으로 동해안과 서해안 지역을 분석한 결과 동해안 지역은 지역에 상관없이 유사한 공간적 특성을 나타냈으며, 서해안지역은 지역별로 다양한 특성을 띄어 다양한 변수의 영향을 받는 것으로 나타났으며 향후 이에 대한 정밀한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

고층기상(850 hPa) 풍향에 따른 미세먼지 농도 분석 결과 동풍계열일 때보다 서풍계열일 때 미세먼지 농도가 23.1~42.39% 가량 높게 나타났다. 하지만 동풍계열 일 때의 풍속이 서풍계열일 때보다 낮은 것으로 나타났으며, 고층기상 데이터의 측정이 6시간 또는 12시간 주기로 이루어져 데이터의 수가 많지 않기 때문에 선불리 결론내리기엔 추후 연구를 통한 세부적인 분석이 필요해 보인다.

본 연구의 결과는 기존의 연구결과들과 유사한 패턴을 보이나, 기존의 연구들과 차이점을 보이기 위해서 더 많은 정보의 공개와 다양한 시각으로 더 많은 변수들을 분석한다면 추후의 연구를 통해 미세먼지 관리방안에 대한 경제적 가치를 창출 할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 평택시의 “평택시 환경보전계획 수립 연구용역”의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호: 20180610518-00). 이에 감사드립니다.

### References

- Joel, G. (2015) Data Science from Scratch, O'Reilly Media, U.S.A., pp. 59-191.
- Kim, J.-B. (2017) Assessment and estimation of particulate matter formation potential and respiratory effects from air emission matters in industrial sectors and cities/regions, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 39(4), 220-228, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.4491/KSEE.2017.39.4.220>.
- Korea Environment Corporation (KECO) (2019) Air korea last amb hour data, [http://www.airkorea.or.kr/web/last\\_amb\\_hour\\_data?pMENU\\_NO=123](http://www.airkorea.or.kr/web/last_amb_hour_data?pMENU_NO=123) (accessed on Jun. 22, 2019). (in Korean)
- Lee, K.-B., Kim, S.-D., Kim, D.-S. (2015) Ion compositional existence forms of PM<sub>10</sub> in Seoul Area, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 37(4), 197-203, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.4491/KSEE.2015.37.4.197>.
- Lolis, C., Bartzokas, A., Katsoulis, B. (2002) Spatial and temporal 850 hPa air temperature and sea-surface temperature covariances in the mediterranean region and their connection to atmospheric circulation, *International Journal of Climatology*, 22(6), 663-676, <https://doi.org/10.1002/joc.759>.
- Massaron, L., Boschetti, A. (2016) Regression Analysis with Python, Packt Publishing, U.K., pp. 29-148.
- Papagiannaki, K., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Papagiannakis, G. (2014) Agricultural losses related to frost events: Use of the 850 hPa level temperature as an explanatory variable of the damage cost, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(9), 2375-2386, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2375-2014>.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2019) Particulate Matter (PM) Basics, <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics> (accessed on Jun. 22, 2019).
- Yao, X., Chan, C.K., Fang, M., Cadle, S., Chan, T., Mulawa, P., He, K., Ye, B. (2002) The water-soluble ionic composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai and Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 36(26), 4223-4234, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00342-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00342-4).
- Yu, X., Zhu, B., Yin, Y., Yang, J., Li, Y., Bu, X. (2011) A comparative analysis of aerosol properties in dust and haze-fog days in a chinese urban region, *Atmospheric Research*, 99(2), 241-247, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.015>.

### Authors Information

이찬주(아주대학교 환경안전공학과 석사과정 학생)  
홍민선(아주대학교 환경안전공학과 교수)