

논문

2015년~2021년 겨울철 한반도의 미세먼지 사례의 기상학적 특징 분석

An Analysis of Meteorological Characteristics for Fine Particles on the Korean Peninsula during Wintertime, 2015-2021

지준범*, 조창래, 김상헌¹⁾, 송미정²⁾

한국외국어대학교 대기환경연구센터, ¹⁾세종대학교 기후환경융합센터,

²⁾전북대학교 지구환경과학과

Joon-Bum Jee*, Chang-Rae Cho, Sang-Heon Kim¹⁾, Mijung Song²⁾

Research Center for Atmospheric Environment, Hankuk University of Foreign Studies,
Yonin, Republic of Korea

¹⁾Climate Change & Environment Research Center, Sejong University, Seoul, Republic of Korea

²⁾Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju,
Republic of Korea

접수일 2022년 3월 21일
수정일 2022년 4월 20일
채택일 2022년 5월 16일

Received 21 March 2022

Revised 20 April 2022

Accepted 16 May 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-8020-5586

E-mail : rokmcj717@gmail.com

Abstract In order to analyze the characteristics of fine particles on the Korean Peninsula, the synoptic wind field, aerosol optical depth distribution, and surface observation data were used around the East Asia and the Korean Peninsula. In addition, the relationship and relative influence between high-concentration fine particles cases and meteorological variables were evaluated using the General Boosted Machine (GBM) model. In 2020, relatively low concentrations of fine particles appeared due to the weakening of the meridional atmospheric pressure deviation and the weakening of the zonal flow in East Asia. AOD around the Korean Peninsula was high mainly in Incheon and Taean Peninsula, and high AOD was found mainly in the West Sea due to long-range transport from China. In the case of haze or high-concentration fine particles in winter, the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio was greater than 0.6, and the ratio increased during long-range transport. In the high-concentration fine particles case, the temperature, wind speed, and boundary layer height (PBLH) were lower than the overall data, and the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio was high. When high-concentration cases were analyzed using the GBM model, the fine particles concentration had a high correlation with meteorological and temporal variables. As a result, the relative influence on the fine particles concentration was highest in order of year, week, air temperature, the day of the week, relative humidity, PBLH, hour, wind direction, and wind speed.

Key words: Fine particles, Meteorology, GBM, Relative influence, Korean Peninsula

1. 서 론

북동 아시아지역은 편서풍과 계절풍(북서풍, 남서풍)이 우세한 지역이며 우리나라 서쪽으로 베이징, 톈진, 상하이, 난징 등의 중국 거대 도시와 산업 단지가 위치하고 있어 겨울철을 중심으로 고농도 대기 오염물질이 한반도에 영향을 미치고 있다(Park et

al., 2021; Ge et al., 2017; Guo et al., 2017; Wang et al., 2016). 우리나라의 대기질은 장거리 이동과 국내 배출의 영향에 따라 겨울철을 중심으로 대기오염물질 고농도 사례가 관측되고 있다(Park et al., 2021; Kang et al., 2018; Park et al., 2018; Choi et al., 2016a, b; Lee et al., 2015; Han et al., 2006).

최근 한반도의 대기질은 COVID-19와 기상학적 특

정에 따라 변화경향이 나타나고 있다(Park *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2020). 특히, 겨울철 미세먼지는 COVID-19의 영향으로 중국의 오염물질 배출 감소와 국내 배출 감소로 인하여 감소추이를 보이고 있다(Comunian *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020). 그러나 이러한 미세먼지의 특징이 COVID-19의 영향인지 기상학적 변화에 따른 영향인지 각각의 기여도를 구분하는 것은 쉽지 않다(Park *et al.*, 2021). 우리나라에서는 미세먼지와 관련된 다양한 분석과 연구가 진행되었다. 미세먼지의 영향에 따른 인간의 건강에 관련된 연구(Myong, 2016; Sohn, 2016; Jang, 2015; Kim *et al.*, 2015), 미세먼지의 물리 화학적 특성에 대한 분석 연구(Choe *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2015; Seo, 2015; Seo *et al.*, 2015), 미세먼지의 발생원인과 이동에 대한 연구(Park, 2017; Kang *et al.*, 2015; Kwon *et al.*, 2015) 등이 수행되었고 미세먼지의 시계열적 변화에 대한 연구(Yang *et al.*, 2018; Baek, 2013)와 공간적인 변화에 따른 특징 연구(Jang *et al.*, 2017; Seo *et al.*, 2015; Jeong, 2014) 등이 수행되었다.

미세먼지를 동반한 대기오염은 국내외 주요 문제 중 하나이며 초미세먼지 및 미세먼지의 나쁜 영향으로 건강에 미치는 우려가 커짐(Sohn, 2016)에 따라 대기오염 측정에 대한 필요성이 강조되고 있으며 더 높은 정확도의 예측 모델과 실시간 모니터링을 필요로 하고 있다(Yang *et al.*, 2018; Kwon *et al.*, 2015). 국내에서는 수도권 대기 환경 개선에 관한 특별법이 통과되어 수립된 수도권 대기 환경 관리 기본계획이 있으며 2016년 정부에서는 미세먼지 관리 특별대책을 발표하였다. 또한 기존의 기상 예보 모델이 아닌 기계학습기반의 예측 모델에 대한 연구가 전 세계적으로 연구되고 있다(Park and Chang, 2021; Cho *et al.*, 2019; Huang and Kuo, 2018; Shahraiyini and Sodoudi, 2016). 복잡하고 다양한 기계학습, 인공지능기법들이 있으며 GBM (Gradient Boosted Regression Model)은 기상자료를 입력하여 대기질을 예측하고 입력변수의 기여도 분석이 가능하다(Grange and Carslaw, 2019).

본 연구에서는 대기오염물질 중 초미세먼지(PM_{2.5}),

미세먼지(PM₁₀)로 대변되는 입자상 오염물질과 기온, 습도, 강수량, 풍향, 풍속, 경계층 고도 등 기상변수를 이용하여 한반도 미세먼지의 특징을 분석하였다. 동아시아 영역의 월별 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 기상자료를 이용하여 등고도선의 분포와 바람장의 편이와 이에 따른 ECMWF/CAMS (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts/Copernicus Atmosphere Monitoring Service) 재분석자료의 AOD (Aerosol Optical Depth)의 특징을 분석하였다. 또한 한반도 초미세먼지 분포와 기상장의 분포를 분석하여 기상특성을 살펴보았다. 수도권의 서울시 중구지점의 전체 자료와 고농도자료로 분류하여 시계열분포와 기상인자의 연관성을 비교하였으며 GBM 모델을 이용하여 미세먼지 사례에 대한 기상변수의 기여도 비교하였고 고농도 미세먼지 사례와 기상변수의 연관성을 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

동아시아 영역과 한반도 영역을 중심으로 공간해상도 2.5°×2.5°의 NCEP/NCAR reanalysis I 기상자료(Kalnay *et al.*, 1996)와 공간해상도 1.25°×1.25°의 ECMWF CAMS 재분석 AOD 자료(Flemming *et al.*, 2017)를 이용하였다. 미세먼지의 장거리 이동과 국내 배출을 고려하여 NCEP/NCAR 기상자료 중 동아시아 영역은 850 hPa 등압면(약 1,500 m), 한반도 영역은 925 hPa 등압면(약 500 m)의 2021년 지위고도와 바람장의 분포 및 이들의 월별 편차(2017년~2020년 월 - 2021년 월)를 계산하였다. 또한 동일 영역의 ECMWF/CAMS의 AOD 분포를 분석하였다.

대기질과 기상변수의 연관성 분석을 위하여 지상기상 및 대기질 측정 자료와 기상모델의 대기경계층 고도 계산결과 자료를 이용하였다. 대기질 측정 자료(KECO, 2021)는 한국환경공단에서 운영하고 있는 대

기질 측정망(340여 소)의 SO_2 , CO , NO_2 , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 자료를 이용하였다. 대기질 측정망은 2002년부터 도시대기, 국가배경농도, 교외대기, 도로변대기, 항만 측정망으로 분류하여 운영되고 있으며 (Ghim *et al.*, 2014), 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 경우 2015년 이후부터 자료를 활용할 수 있다. 기상관측자료는 기상청에서 종관관측을 목적으로 운영하고 있는 ASOS (Automated Synoptic Observation System; Kim *et al.*, 2013) 관측소(95소)와 방재기상관측을 목적으로 하는 AWS (Automated Weather System; Boo *et al.*, 1999) 관측소(670여 소)에서 수집된 자료를 이용하였다 (KMA, 2021). 주요관측요소로는 기온, 습도, 기압, 강수량, 풍향, 풍속이다. 오염물질의 이동을 분석하기 위한 대기 경계층 고도는 기상청에서 운영하고 있는 고해상도 국지모델 (Local Data Analysis and Prediction System, LDAPS; Hwang *et al.*, 2021)에서 분석 및 예측된 결과를 이용하였다. 국지모델은 1.5 km 해상도를 가지며 1 시간 간격으로 생산되고 있다.

관측변수 중 자료가 누락된 경우 관측자료 부재로 표시하였고, 2015년 1월부터 2021년 7월까지 1시간 단위의 자료를 분석에 활용하였다. 최종적으로 분석에 이용한 변수는 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$, 기온, 상대습도, 풍향, 풍속, 기압, 강수량, 대기 경계층 고도이다.

2.2 방법

NCEP/NCAR 재분석 기상자료와 ECMWF/CAMS 재분석 AOD 자료는 동아시아 영역과 한반도 영역으로 한정하여 2021년 월 분포와 2018년부터 2020년까지 동일 월의 편차를 계산하여 분석하였다. 지상관측 자료는 대기질 관측소자료를 기준으로 시공간 일치된 자료를 이용하여 월별 분포와 평균값을 비교하였다. 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기준으로 나쁨 이상의 자료를 추출하여 전체 자료와 고농도 대기질로 분류하여 기상상태에 따른 미세먼지 특성을 시계열분석(월별 평균, 연별 빈도분포, 시간, 월별 boxplot 등)과 공간분포(지점별 평균값 공간 표출 및 월 평균)를

비교 분석하였다.

서울의 중구관측소 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$; 독립변수)를 예측변수로 설정하여 기상변수(기온, 상대습도, 풍속, 풍향, 경계층고도)와 시간변수(연도, 주, 요일, 시간)에 따른 상관성을 통계기반의 기계학습 기법인 GBM (Generalized Boosted Regression Model, Grange and Carlsaw, 2019; Ridgeway *et al.*, 2017)을 이용하여 예측 평가 및 기여도를 분석하였다. Boosting 방법 (Ridgeway, 1999)은 오차를 50% 이하인 변수들을 순차적으로 학습하고 단계별 잘못된 자료에 대하여 가중치를 부여하여 오류를 개선하도록 구성된다. 최소 손실 함수 (loss function; $\min$)는 비용함수 $\psi(y, f(x))$ 를 계산하여 최적의 회귀함수 (Regression function) $\hat{f}(x)$ 를 구하는 것이다 (Friedman, 2002, 2001; Friedman *et al.*, 2000).

$$\hat{f}(x) = \min_{f(x)} \psi(y, f(x)) \quad (1)$$

여기서, x 는 기상 입력변수이며 $f(x)$ 는 추정된 $\text{PM}_{2.5}$ 농도이고 y 는 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 농도이다. 즉, 비용함수 $\psi(y, f(x))$ 는 측정값과 추정값의 차이로 계산되며 비용함수가 최소가 되는 $\min_{f(x)} \psi(y, f(x))$ 을 계산하여 최적의 추정값 $\hat{f}(x)$ 를 추정하는 것이다.

본 연구에서 GBM 모델구축은 초미세먼지 측정 자료(2017년 1월부터 2021년 5월; 약 55,998개) 기준 훈련(training)과 테스트(test)를 위한 자료의 비율은 8:2로 설정하였으며 적합(fit)을 위한 트리(tree) 수는 200개, 부분 기여도 생성을 위한 bootstrap 모의는 100개로 구성하였다. 입력변수들의 전체 기여도($\hat{f}_j$)는 각각의 종속변수들의 부분 기여도(relative influence; I)의 합산으로 계산되며 GBM 예측 결과를 기반으로 Friedman *et al.* (2000) 방법을 통하여 계산되었다.

$$\hat{f}_j = \sum x_j I \quad (2)$$

여기서 I 는 분석시점에서 입력기상변수들을 x_j 로 분할하여 경험적으로 계산된다. 계산된 부분 기여도 분석 결과를 통하여 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 기상변수와 시간변수의 관련성을 분석하였다.

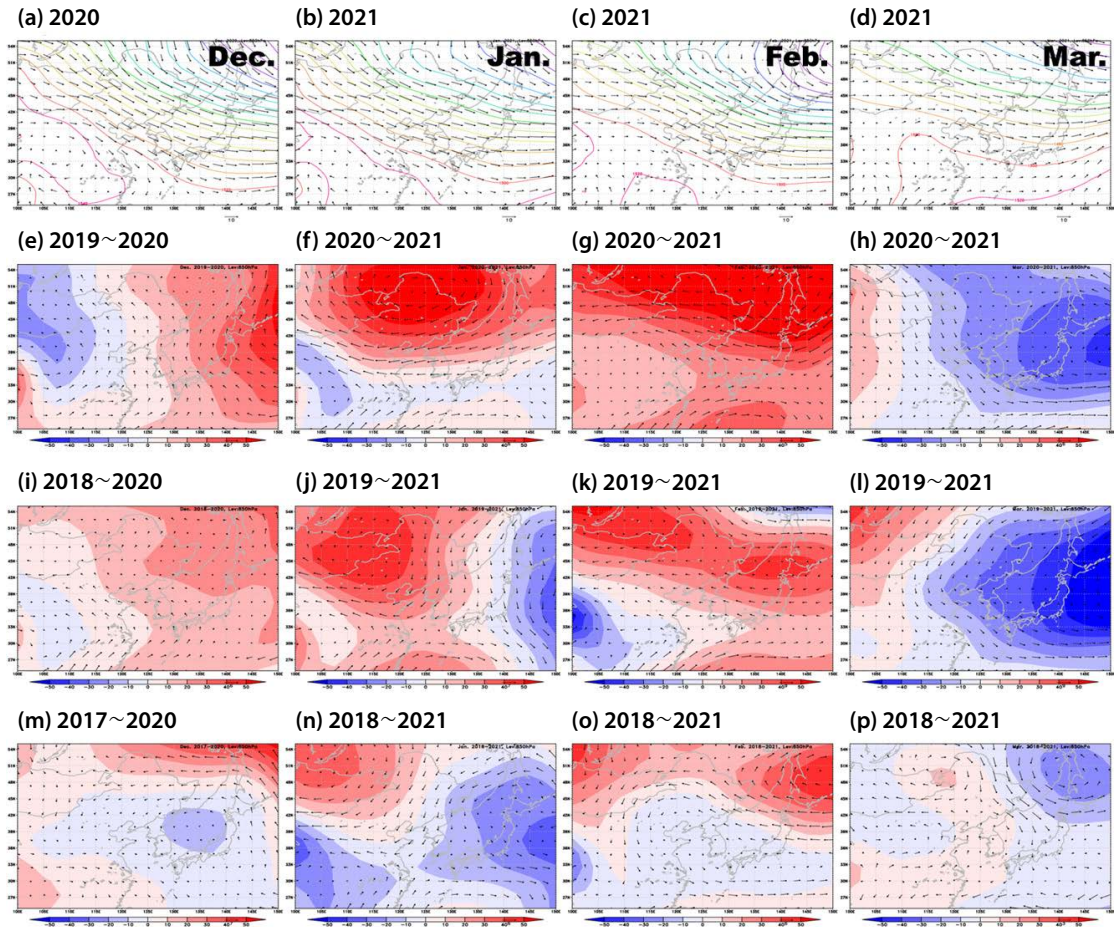


Fig. 1. Monthly geopotential height and wind field (a~d) from NCEP/NCAR reanalysis data at 850 hPa on Northeast Asia during January to April, 2021 and these differences (e~p) between 2018~2020 and 2021.

3. 결 과

3.1 종관분포 분석

동아시아 영역의 겨울철은 북쪽으로 시베리아 고기압과 오호츠크해 저기압이 위치하고 남쪽으로 양쯔강 고기압과 태평양 고기압이 위치한다. 시베리아 고기압과 오호츠크해 저기압의 강화로 고고도의 제트기류가 남하하였다가 북상하는 시기이다. 그림 1은 2020년 12월부터 2021년 3월의 850 hPa 지위고도와 바람장의 분포 및 2018년부터 2020년까지 월별 편차(2021년 월별 평균 기준)를 나타낸 것이다. 850 hPa 기압면

(1,500 m) 지위고도는 오호츠크해 저기압을 중심으로 북서-남동방향으로 등고도선이 기울어져 분포하고 풍향은 대체로 북서풍 또는 서풍이 나타난다. 2020년 12월부터 2021년 3월로 시간의 경과에 따라 북서풍의 강도가 강화되었다가 약화되고 있으며 2021년 2월 오호츠크해 저기압이 최고조로 강화된다. 풍속의 경우도 2021년 2월까지 강화되었다가 약화되는 것을 확인할 수 있다. 대체로 중국 동해안에 위치한 산업단지와 내륙에서 발생하는 미세먼지는 서풍 및 북서풍을 통하여 장거리 이동 및 한반도로 유입된다(Park *et al.*, 2021). 2018년의 지위고도와 바람장의 편차는 크지

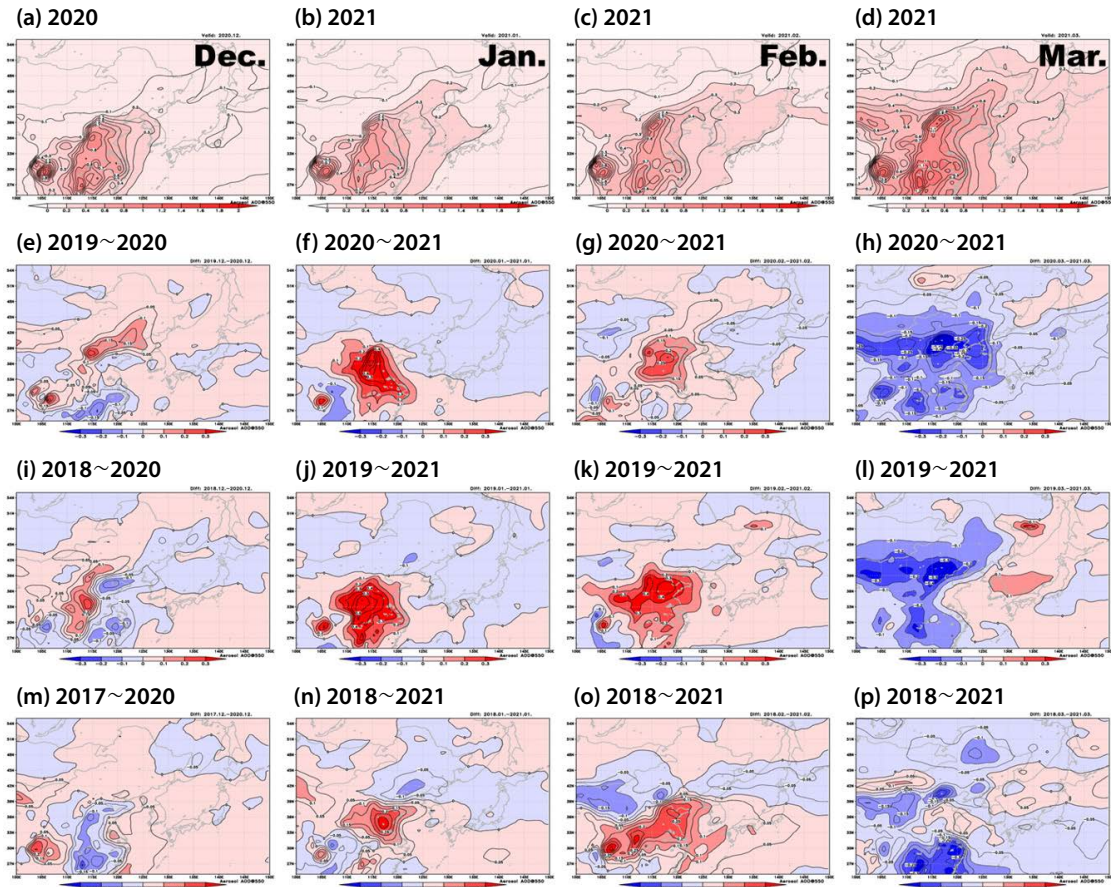


Fig. 2. Monthly aerosol optical depth (AOD, a~d) from ECMWF CAMS reanalysis data on Northeast Asia during January to April, 2021 and these differences (e~p) between 2018~2020 and 2021.

않으나 2019년과 2020년은 양의 편차가 크게 나타나고 있다. 특히, 2020년 1월과 2월은 고위도에서 지위 고도가 2021년 대비 높았으며 바람장의 편차 벡터가 지위고도 편차면을 따라 동풍으로 나타나는 것으로 볼 때 동서바람장이 상당히 약화된 것을 확인할 수 있다.

그림 2는 동아시아 영역의 월평균 AOD 분포와 연별 편차를 나타낸 것으로 AOD의 특징을 통하여 미세먼지 분포를 유추할 수 있다. 중국 동부해안과 남서쪽 지역에서 AOD의 분포가 높은 것을 볼 때 미세먼지의 발원지로 추정된다. 12월부터 3월까지 동일지역에서 지속적으로 미세먼지가 발생되고 있으며 편서풍을 따

라 한반도와 일본까지 확장 및 이동되고 있다. 2019년과 2020년 중국 동부의 AOD는 다소 증가되었으나 한반도로 이동되어 나타나는 AOD는 감소되었다. 이는 종관 기상장에서 나타나는 것과 유사하게 편서풍의 약화로 한반도로 수송되는 미세먼지의 양이 감소된 것으로 분석된다. 반면, 2018년의 한반도 주변은 지위 고도가 약화되었고 풍속변화가 적어 외부유입과 국내 발생이 합쳐져 고농도가 나타날 수 있었던 것으로 분석된다.

그림 3은 그림 1과 유사하게 한반도를 중심으로 925 hPa 지위고도와 바람장 및 연별 편차의 분포를 나타낸 것이다. 한반도 영역의 미세먼지는 상대적으로

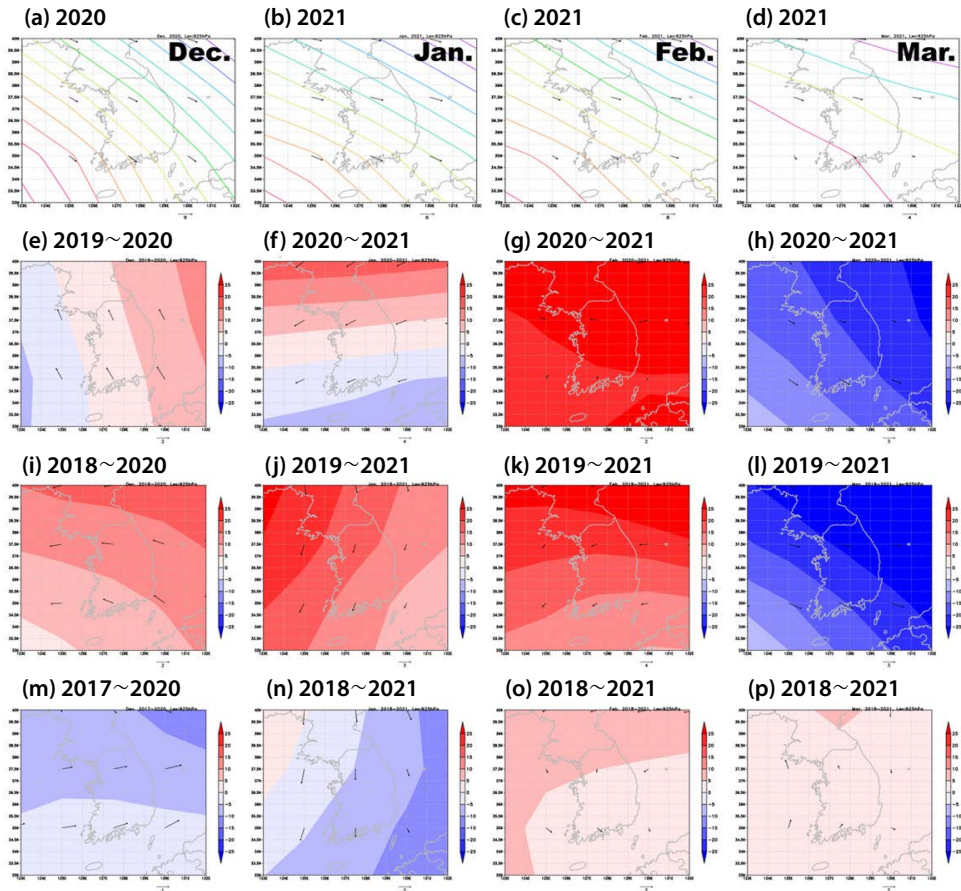


Fig. 3. Monthly geopotential height and wind field (a~d) from NCEP/NCAR reanalysis data at 925 hPa on Korean peninsula during January to April, 2021 and these differences (e~p) between 2018~2020 and 2021.

낮은 고도의 기압배치와 바람장의 분석을 통하여 분석이 가능하다. 925 hPa 기압면(500 m)에서 지위고도는 북서-남동방향으로 기울어져 서풍이 강화된 북서풍계열의 바람장이 주로 나타난다. 2018년 지위고도는 2021년과의 편차가 0을 중심으로 나타나기 때문에 유사한 분포를 가지며 남북의 지위고도의 경사는 크지 않기 때문에 풍속변화는 적다. 그러나 2019년과 2020년의 1월과 2월에는 지위고도의 상승이 뚜렷하고 남북경사가 강화되어 2021년과 비교하여 풍속의 변화가 커졌으며 북서풍계열의 풍속이 약화되었다. 또한, 2019년과 2020년 4월의 지위고도는 오히려 하락하였으나 지위고도의 남북경사보다는 동서경사가

강화되어 북풍이 강화되었다.

그림 4는 한반도 영역의 AOD 분포를 나타낸 것이다. 미세먼지는 서해상을 중심으로 높게 나타나고 있으며, 특히 인천과 태안반도를 중심으로 높은 AOD 농도가 나타나고 있다. 이러한 특징은 중국으로부터 이동한 AOD와 국내 산업단지 등에서 발생하는 미세먼지의 영향으로 나타나는 특징과 동일하다. 앞서 동아시아 영역분석과 동일하게 2020년과 2021년에 상대적으로 AOD가 낮게 분포하는 것을 볼 수 있으며 2019년은 상대적으로 고농도가 나타나고 있다. 특히, 2019년 2월(그림 4k)의 경우 인천과 태안반도 동쪽으로 상대적으로 높은 AOD를 보이는데 이는 기상조건

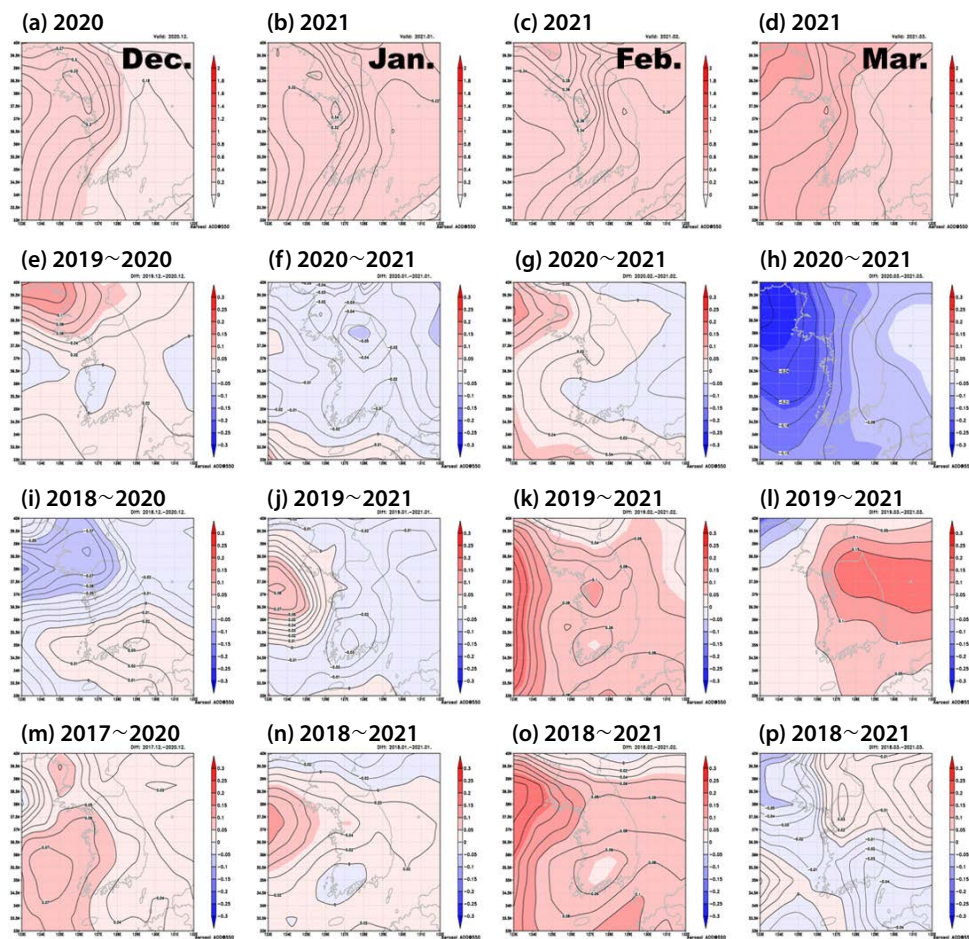


Fig. 4. Monthly aerosol optical depth (AOD, a~d) from ECMWF CAMS reanalysis data on Korean Peninsula during January to April, 2021 and these differences (e~p) between 2018~2020 and 2021.

과 함께 국내배출이 증가된 것으로 유추할 수 있다.

3.2 한반도 미세먼지와 기상변수의 공간 분포 및 관계성

한반도 대기질 관측소에서 관측된 초미세먼지 농도의 월 평균값을 측정소별로 나타내었고 전 지점의 월 평균 농도를 표기하였다(그림 5). 대체로 대도시를 중심으로 높은 농도가 나타나고 있으며 서해안 산업단지 우측에 고농도가 분포되고 있다. 난방과 계절풍의 영향을 받는 겨울철, 특히 1월과 3월에 초미세먼지 농도가 높게 나타나고 있으며, 2019년 대체로 고농도가

다수 나타나고 있다. 2020년부터 초미세먼지의 농도가 급격히 감소한 것을 볼 수 있는데 COVID-19가 발생한 2019년 12월 이후 사회적 거리두기와 경제 둔화 등과 같은 요인들이 대기오염물질의 농도에 추가적인 변화 요인으로 작용했을 수 있다(Han and Hong, 2020; Kang *et al.*, 2020; Koo *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2020). 또한, 2020년은 COVID-19와 더불어 3.1절에서 설명한 바와 같이 종관적인 편서풍의 약화 그리고 국지적인 서풍의 약화로 인한 AOD의 감소를 확인하였다. 따라서 본 절에서는 그림 5의 미세먼지 농도와 관계성 있는 기상변수들의 분포와 특징을 비교하고

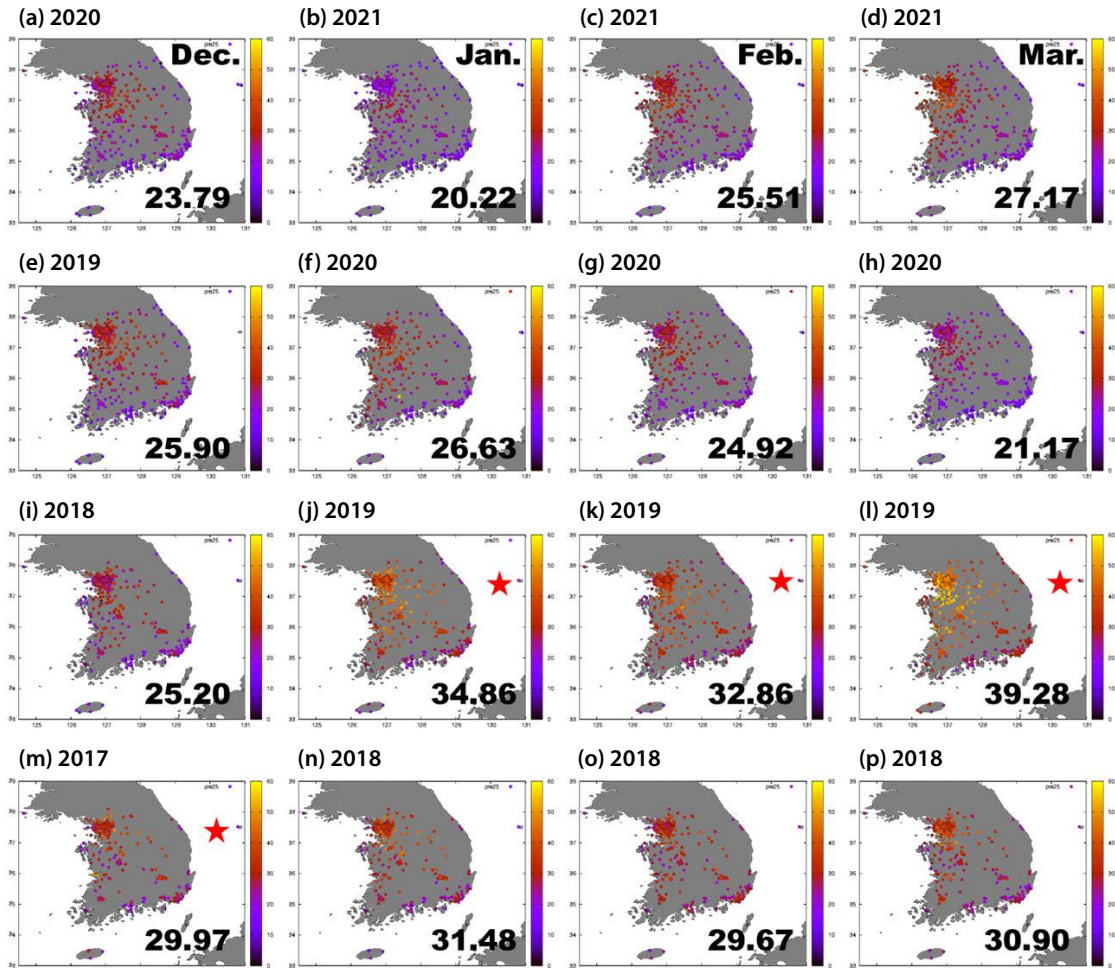


Fig. 5. Monthly mean fine particles ($PM_{2.5}$, $\mu g/m^3$) on Korean peninsula during January to April and 2018 to 2021. The value in bold within each panel represents monthly mean $PM_{2.5}$ for the entire observation stations.

관계성을 분석하였다.

그림 6에 나타난 바와 같이 기온은 월별 경향이 있어 12월부터 1월까지 하강 후 3월까지 증가 경향이 나타난다. 기온변화는 에너지 사용에 직접적인 영향을 미치므로 기온은 에너지 소비의 가장 중요한 기후인자 중의 하나이다(Sailor and Muñoz, 1997). 겨울철 월평균 기온이 상대적으로 낮게 나타나면 난방 등 화석연료 등의 에너지의 사용 증가가 고농도 미세먼지 발생의 원인으로 작용될 수 있다. 2018년과 2021년 1월의 기온은 상대적으로 낮았고 2020년 1월은 다른 해

와 비교하여 2.5°C 이상 높은 기온이 나타났으며 대체로 2020년 겨울(12월~1월)은 평균 1.5°C 이상 높은 기온을 나타냈다. 2020년 겨울의 높은 기온은 다른 요인들과 함께 난방 및 에너지 소비에 영향을 미쳐 초미세먼지 농도의 감소에 기여했을 것으로 판단된다.

풍속은 해안과 태백산맥 등 산악지역을 중심으로 강하게 나타나고 있다. 한반도 해안지역에서 풍속이 내륙보다 강하였고 남해와 동해 해안지역에서 강한 풍속을 보인다(그림 7). 종관적으로 강한 풍속은 장거리 수송과 관련이 있고 국지적으로는 배출원주변에서

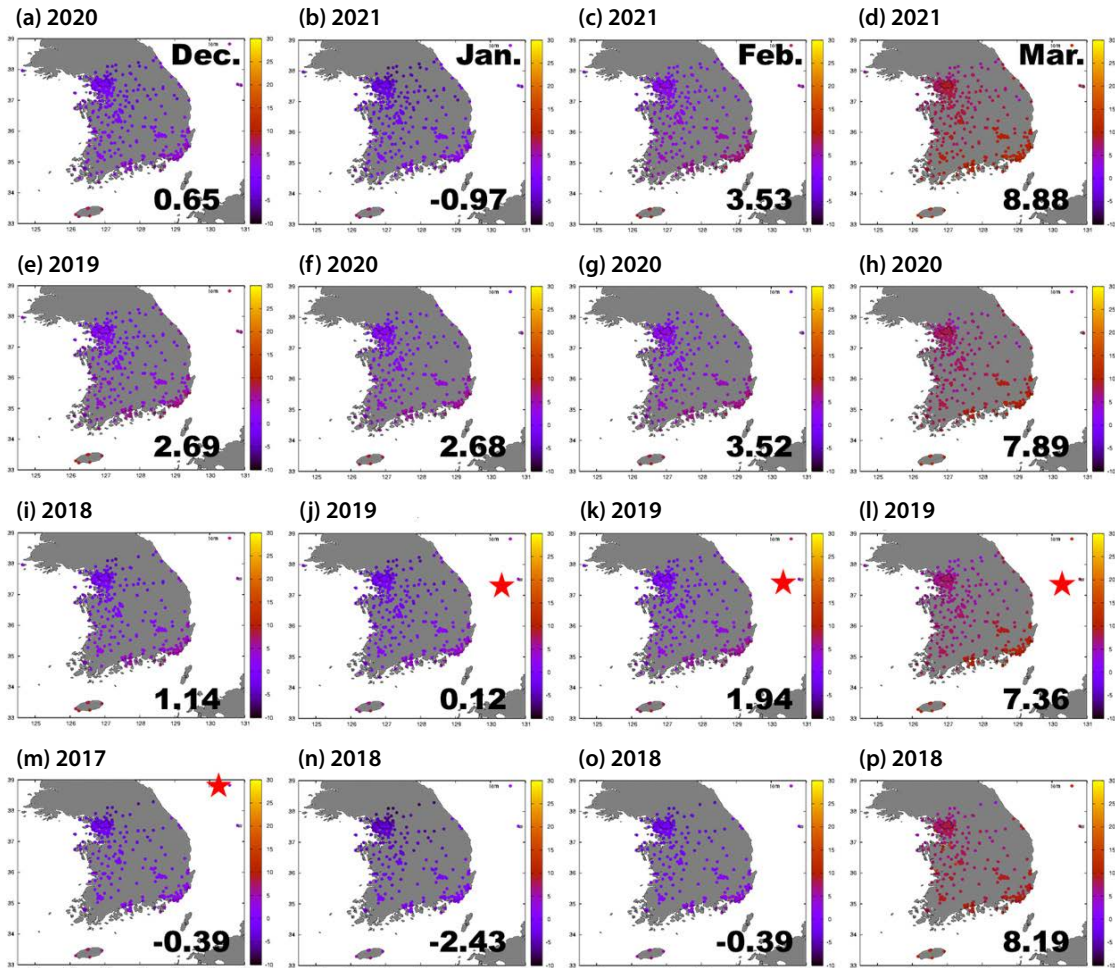


Fig. 6. Monthly mean air temperature (°C) on Korean peninsula during January to April and 2018 to 2021. The value in bold within each panel represents monthly mean air temperature (°C) for the entire observation stations.

는 환기효과를 나타낼 수 있다. 특히, 10 m 고도의 바람장은 지역적인 특성이 잘 나타날 수 있으며, 풍속이 약할 때는 미세먼지의 정체가 나타나고 강할 때는 환기효과로 주변으로 빠르게 확산시킬 수 있다. 2020년은 상대적으로 풍속이 낮아 국지적인 정체가 지역적으로 나타날 수 있는 기상조건이었으나 COVID-19로 인해 중국으로부터 장거리 수송과 국내 배출이 상대적으로 적어 (Han and Hong, 2020; Kang *et al.*, 2020; Koo *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2020) 환기조건 악화에 의한 영향이 크지 않아 고농도발생이 적었던 것으로 보

인다. 2018년, 2019년과 2021년은 달에 따른 풍속의 차이가 크게 나타나고 있으나, 2019년에는 겨울철에 3월을 제외하고는 달에 따른 차이가 크지 않고 대체로 낮은 풍속을 나타내어 국지적인 바람으로 인한 환기효과가 작았을 것으로 판단된다.

강수량은 대기 중의 미세먼지를 세정하는 효과를 나타낸다. 2020년은 다른 해와 비교하여 대체로 강수량이 많았으며 초미세먼지 농도가 낮게 나타났다(그림 8). 2019년과 2018년은 상대적으로 고농도 초미세먼지가 많이 발생되었으며 강수량이 상대적으로 적은

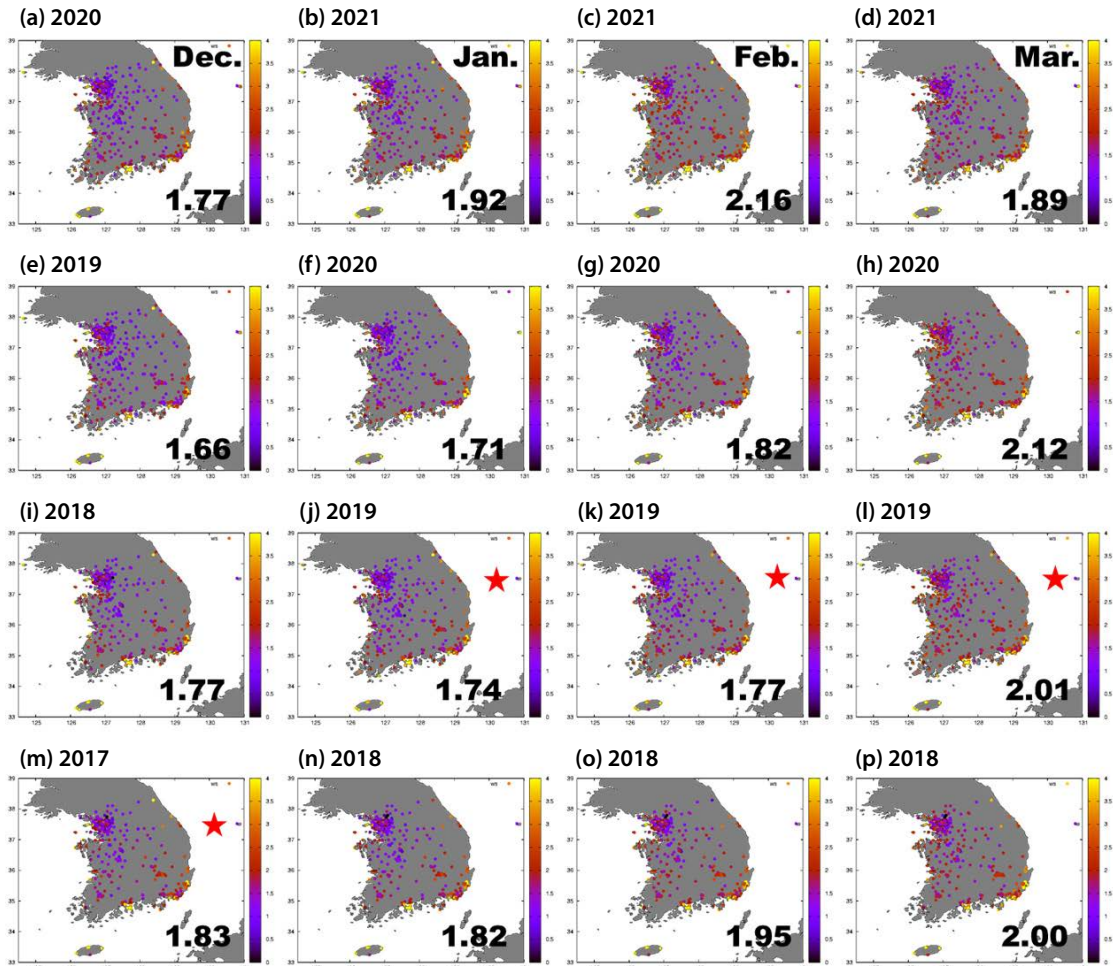


Fig. 7. Monthly mean wind speed (m/s) on Korean peninsula during January to April and 2018 to 2021. The value in bold within each panel represents monthly mean wind speed (m/s) for the entire observation stations.

해로 세정효과가 적은 것으로 분석된다. 그러나 2018년 3월은 강수량이 많았으나 미세먼지 농도는 높은 편이었다. 강수량이 특정일에 집중되는 경우는 세정 효과가 상대적으로 크지 않기 때문에 강수일과 강수 기간에 대하여 추가적인 분석이 필요하다.

대기경계층은 지상과 대기 중에서 배출되거나 생성된 미세먼지가 이동될 수 있는 고도로 대기 경계층 이상의 고도에서는 강한 편서풍을 통하여 미세먼지가 확산되고 지상에서 경계층 이하의 고도까지는 비교적 안정적으로 혼합되어 일정한 농도를 가지게 된다. 그

러나 충분히 대기 경계층이 발달하지 못하게 되면 미세먼지의 이동이 이루어지지 못하고 경계층 이상의 고도에 위치한 오염물질은 확산되어 농도가 감소될 수 있다(Qu *et al.*, 2017). 그러나 대기 경계층내 발생 및 유입된 미세먼지는 경계층의 발달로 고도가 상승되면 미세먼지 농도는 감소하게 되며 경계층 고도가 하락하면 미세먼지 농도는 증가될 수 있다(Duc *et al.*, 2022). 2018년 겨울은 대기 경계층이 다른 해에 비해 평균적으로 높았으며, 2020년 겨울은 대체로 다른 해와 비교하여 잦은 강수 등으로 인하여 대기 경계층이

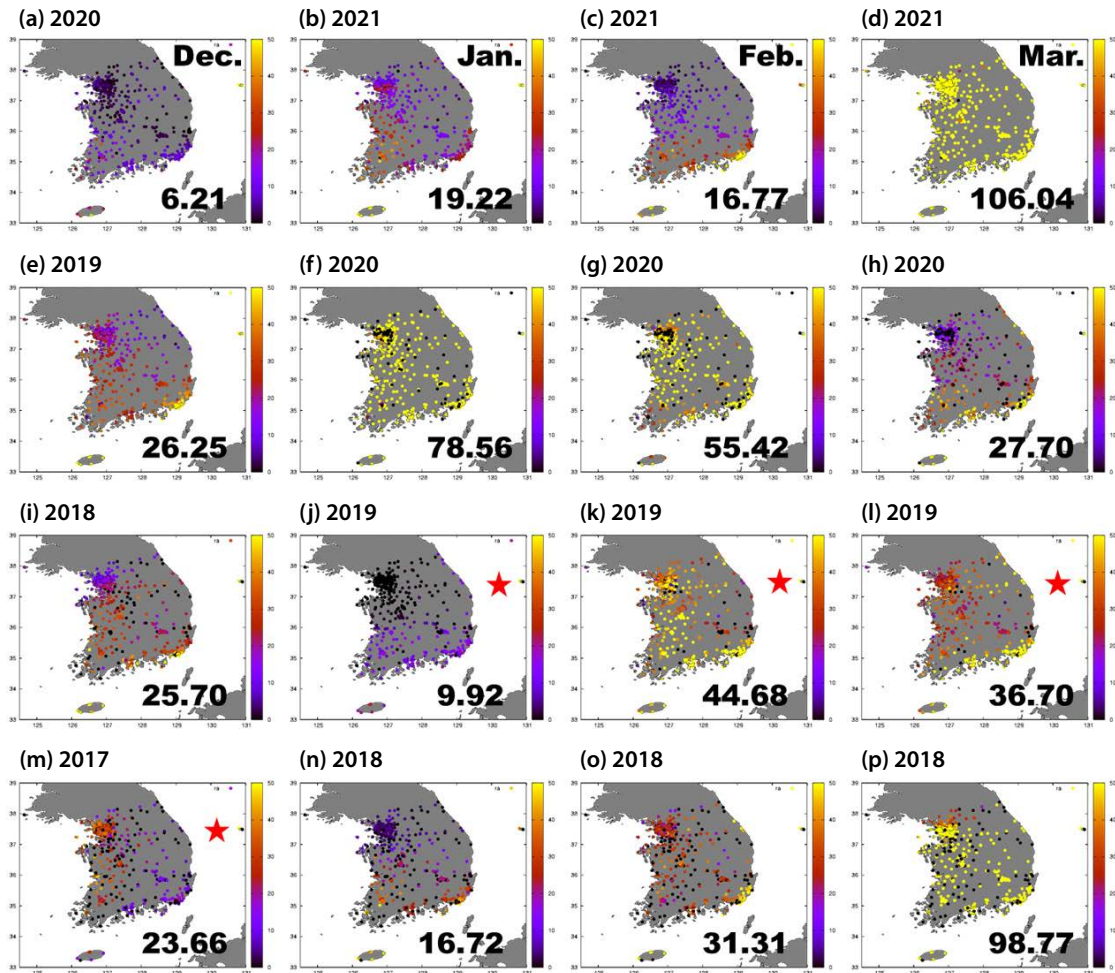


Fig. 8. Monthly accumulated rainfall (mm) on Korean peninsula during January to April and 2018 to 2021. The value in bold within each panel represents monthly accumulated rainfall (mm) for the entire observation stations.

발달하지 못한 것으로 나타났다(그림 9). 대기 경계층은 일사량, 운량, 바람, 지표면 상태 등을 포함한 여러 가지 요소들에 의해 결정되므로 같은 해에도 조건에 따라 크게 다른 양상을 보일 수 있다.

미세먼지는 $2.5\ \mu\text{m}$ 를 기준으로 초미세먼지와 미세먼지로 구분할 수 있다. 미세먼지(PM_{10})는 공기역학적 직경이 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 에어로졸, 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)는 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 에어로졸을 측정한다. 국내에 황사가 유입되었을 때 이러한 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율은 0.5 정도로 초미세입자가 적다(Li *et al.*, 2020). 그러나 겨울철

고농도 미세먼지 사례는 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율이 0.6 이상으로 초미세먼지 입자의 비율이 높아진다. 이는 국외로부터의 장거리 수송과 국내배출 증가 기상조건의 악화 등으로 인하여 장기간 고농도가 유지되는 사례에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 입자가 PM_{10} 입자보다 오랫동안 대기 중에 존재하기 때문에 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율이 증가되어 나타난다. 한반도에서 황사 사례가 있었던 사례의 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율은 0.5 이하였고 $\text{PM}_{2.5}$ 입자가 50% 이하의 비율로 구성되었다. 2020년 겨울은 종관적인 편서풍 약화, 국외 오염물질의 농도 감소(Zhang *et al.*,

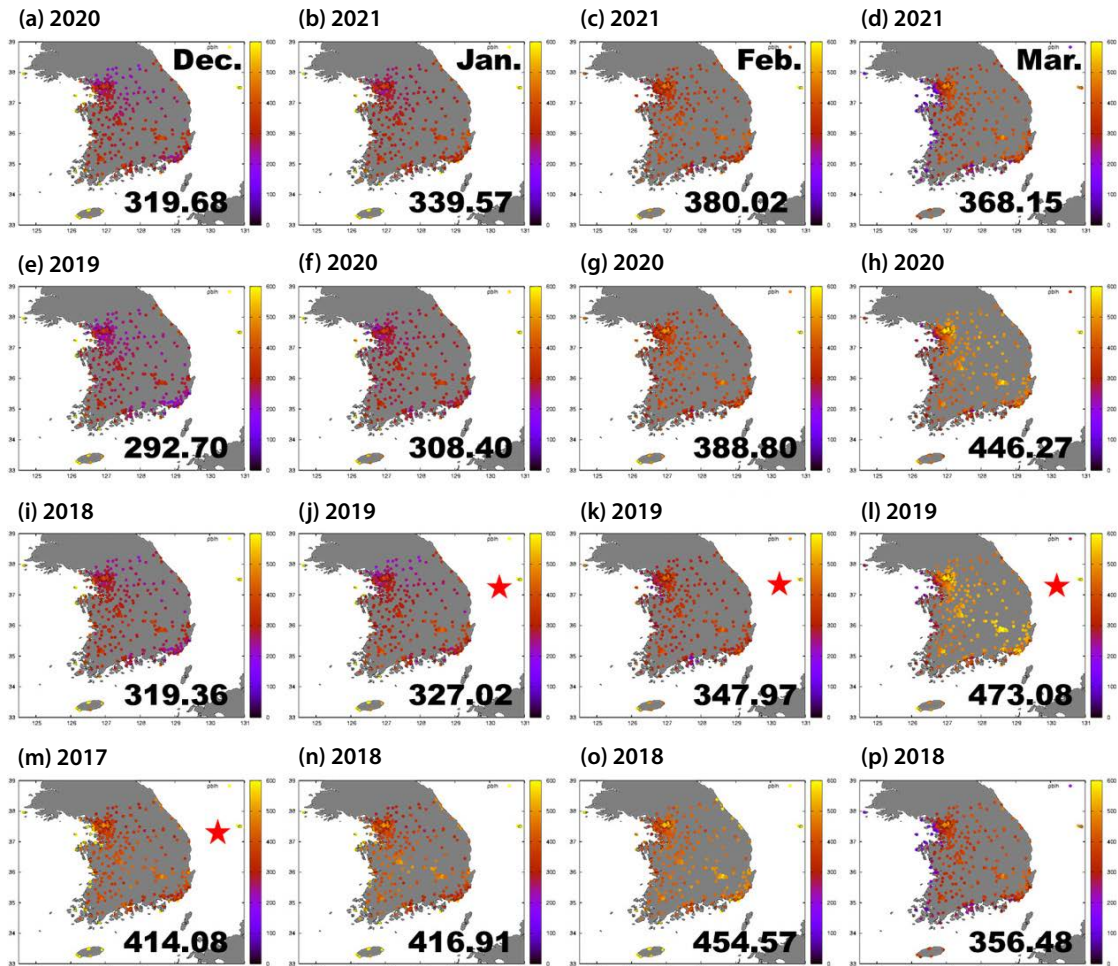


Fig. 9. Monthly mean Planetary Boundary Layer Height (PBLH, m) on Korean peninsula during January to April and 2018 to 2021. The value in bold within each panel represents monthly mean PBLH (m) for the entire observation stations.

2020) 등으로 인하여 오염물질의 장거리 이동에 의한 영향이 적었고 국내 석탄화력발전소, 산업시설, 교통 등에서 배출된 초미세먼지 입자가 지배적이었던 기간으로 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비율은 0.63 이상으로 높게 나타났다(그림 10).

3.3 지점관측자료 분석 및 기여도 분석

수도권 내의 대표지점인 서울시 중구측정소의 시간별 측정 자료 중 초미세먼지($PM_{2.5}$) 농도기준으로 오염도별 빈도분포를 나타내었다(그림 11). 2015년부터

2021년 자료(ALL)에서 $PM_{2.5}$ 농도 나쁨($35 \mu g/m^3$) 이상은 19%였다. 2020년은 13%가 나쁨 이상의 고농도였으며, 다른 해와 달리 매우 나쁨은 1% 이하로 적었다. 계절별 빈도분포를 나타내었을 때 겨울철의 나쁨 이상은 28%였고 매우 나쁨은 3% 이상으로 가장 많은 분포를 보였다.

$PM_{2.5}$ 농도 나쁨($35 \mu g/m^3$) 이상의 자료들($PM_{2.5} > 35$)만 추출하여 전체 자료(ALL)와 비교하였다. 이를 위하여 연도, 월, 시간별 박스플롯을 이용하여 각 변수들의 평균과 범위를 나타내었다(그림 12). 전체 자료와

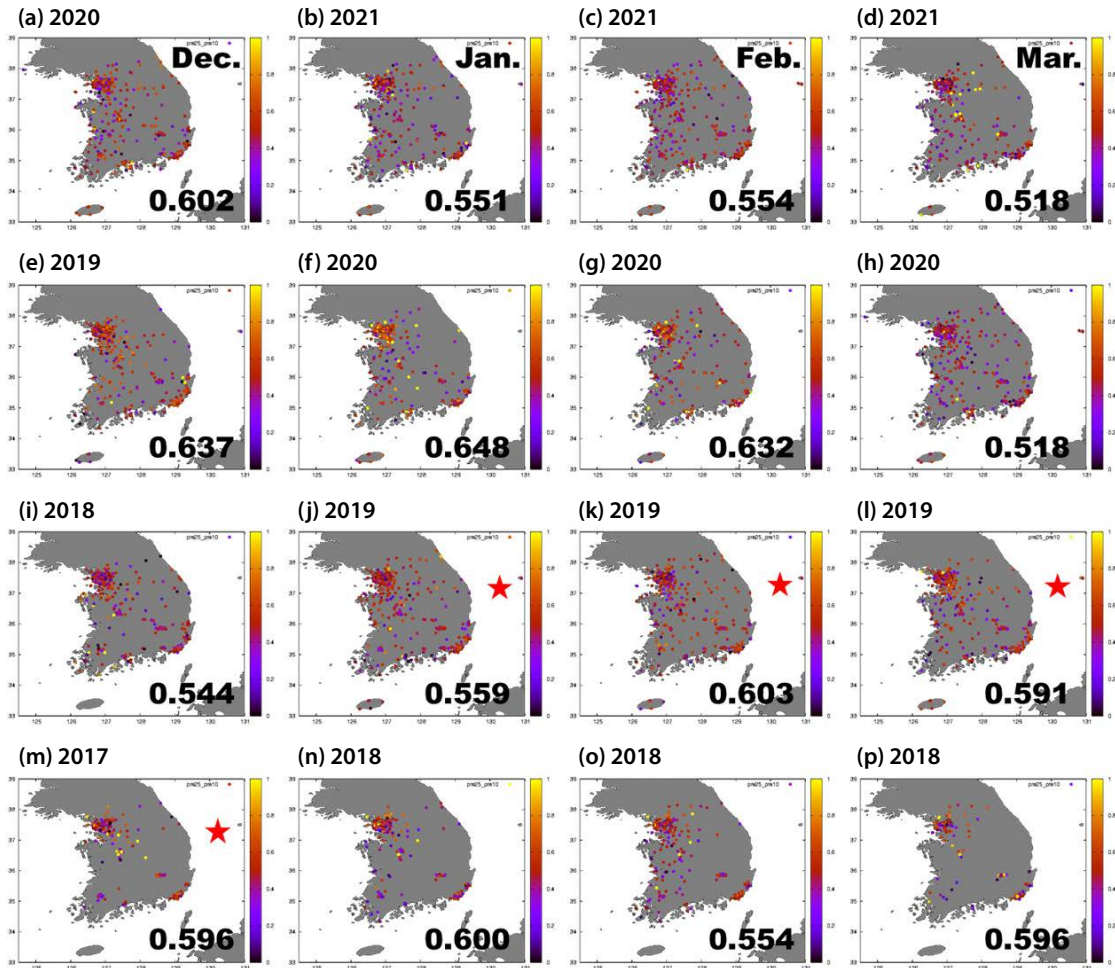


Fig. 10. Monthly mean $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio on Korean peninsula during January to April and 2018 to 2021. The value in bold within each panel represents monthly mean $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio for the entire observation stations.

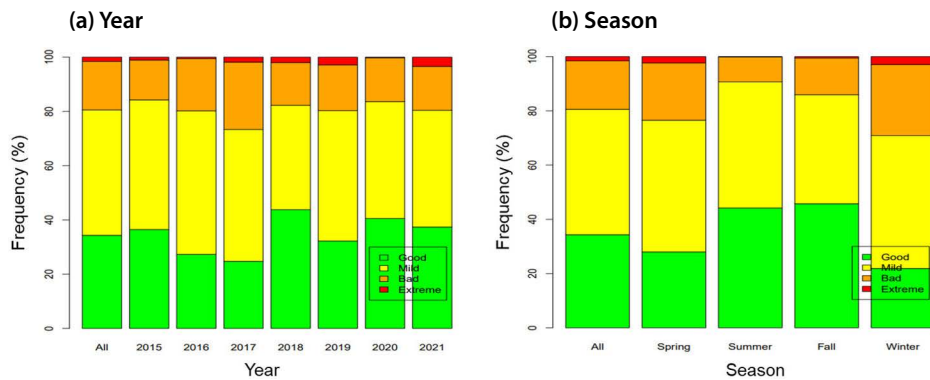
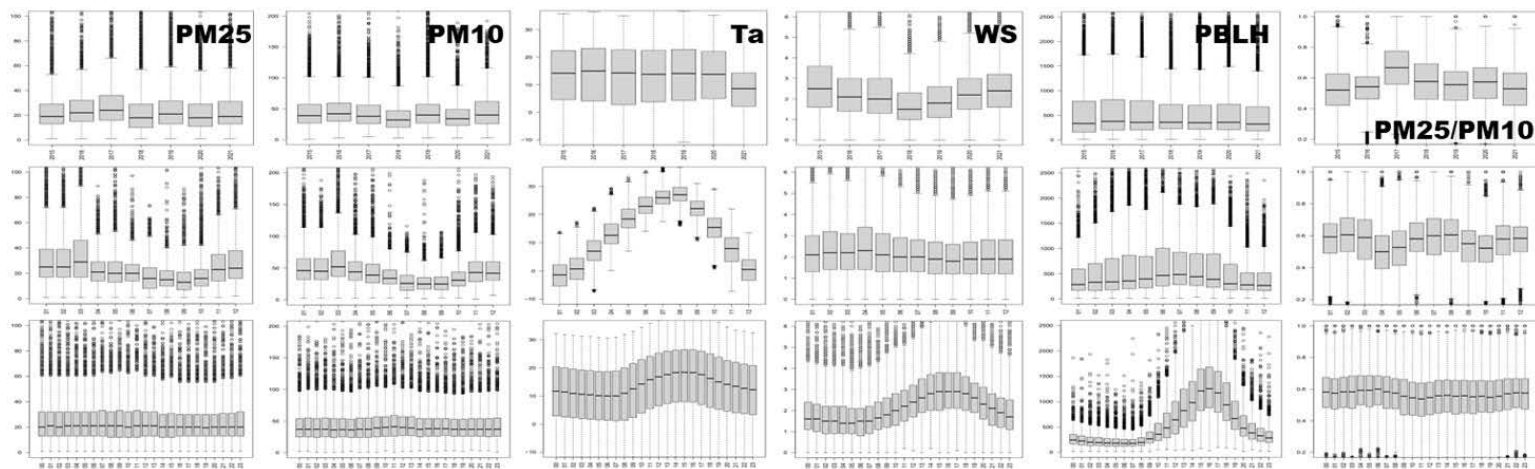


Fig. 11. Frequency (%) of pollution degree with year and season by $PM_{2.5}$ at Jung-gu, Seoul metropolitan area (SMA).

(a) All



(b) PM_{2.5} > 35

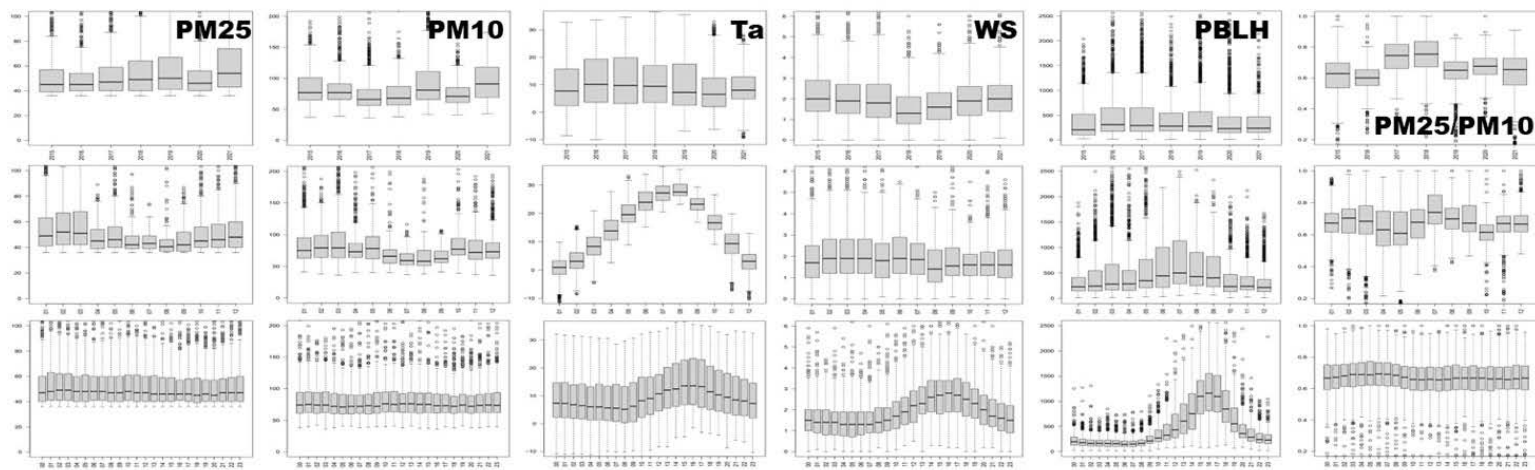


Fig. 12. Boxplot of yearly, monthly and hourly meteorological and air quality variables with All and PM_{2.5} > 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at Jung-gu, SMA.

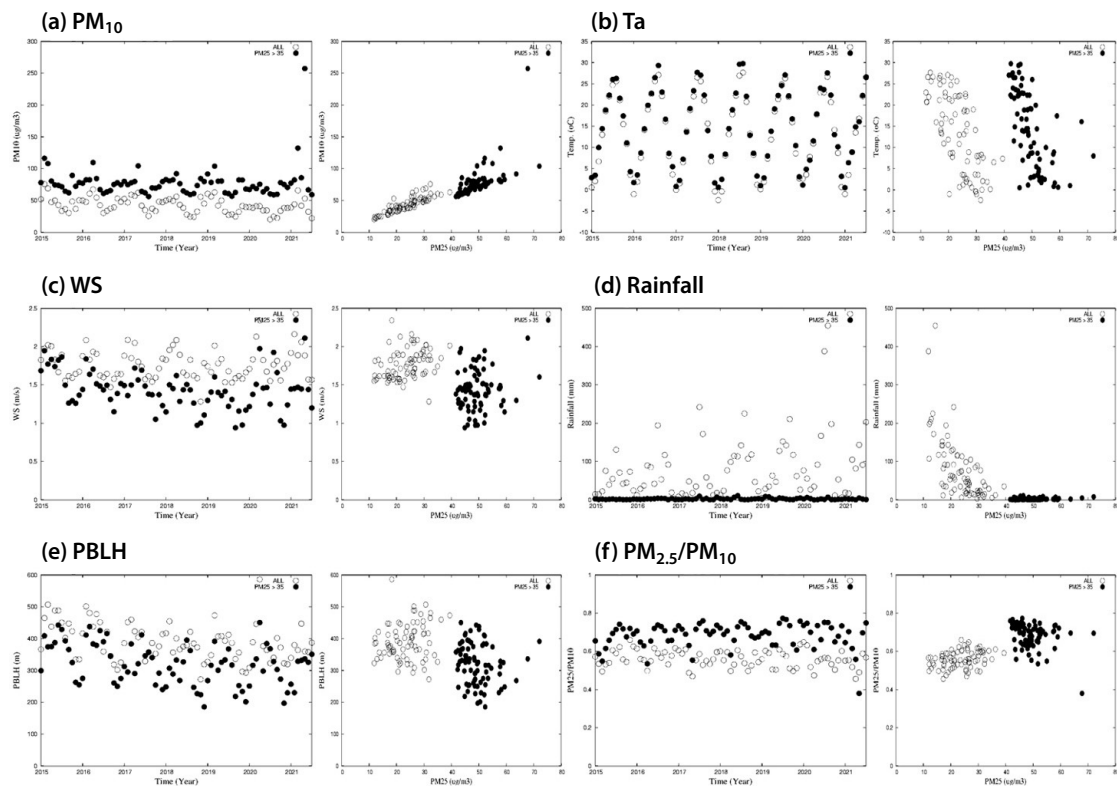


Fig. 13. Time series and scatterplot of monthly meteorological and air quality variables with All and $PM_{2.5} > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at Jung-gu, SMA.

비교하여 고농도 자료의 IQR (Inter Quartile Range)의 범위는 대체로 좁게 분포한다. 각각의 변수에 대하여 연도와 시간별로 비교하였을 때 고농도 미세먼지 자료에서 기온(Ta), 풍속(WS) 및 경계층고도(PBLH)는 전체 자료보다 낮게 나타났고 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 은 높게 나타났다. 그러나 고농도 미세먼지 발생 빈도가 높은 겨울철에는 상대적으로 기온이 높았고 경계층 고도는 낮은 것으로 나타났다. 그림 12의 월별 박스플롯과 같이 계절적인 패턴(겨울철을 중심으로 기온과 경계층 고도는 낮고 고농도 미세먼지가 주로 발생)이 존재하는 것으로 나타났다.

그림 13은 전체 자료와 고농도자료의 월별 평균을 계산하여 시계열을 나타내었고 초미세먼지와 주요 변수의 산포도를 나타내었다. PM_{10} 농도는 대체로 선형

적인 관계를 보이나 일부 고농도 황사사례에서 급격히 높은 PM_{10} 농도를 나타내고 있다. 고농도 사례의 경우 기온, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 은 전체 자료 대비 높게 나타났고 풍속, 강수량, 대기 경계층 고도는 낮게 나타났다. 기온은 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 이상 높았고 풍속은 0.5 m/s 낮았으며 강수량은 없거나 1 mm 이하로 아주 적은 강수일 때 고농도 사례가 발생되었다. 대기경계층 고도는 고농도 사례에서 100 m 이상 낮았고 초미세먼지 농도의 비율은 전체보다 10% 이상 높게 나타났다.

2.2절의 GBM 모델을 이용하여 훈련과 테스트를 수행하여 표 1에 정리하였다. 미세먼지 농도 예측을 위한 GBM 모델의 입력자료는 연별(trend), 연주기(week), 요일(weekday), 시간(hour)의 시간변수와 기온(temp), 습도(relative humidity), 풍속(wind spd.), 풍

향(wind dir.), 경계층 고도(pblh)의 기상변수로 총 9개이다. 미세먼지 농도는 시계열적(연별, 계절, 시간 등)인 변화 특성이 있어 시간 입력변수는 연, 연주기, 요일, 시간으로 세분화하여 적용하였다. 전체 자료와 고농도자료를 이용하여 평가한 상관계수는 0.75와 0.79였고 IOA (Index of Agreement)는 0.66과 0.67이며 고농도자료의 예측정확도가 높아졌으며 RMSE (Root Mean Square Error)는 $12.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $11.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하였다. 이러한 검증 결과로 유추할 수 있는 것은

Table 1. Summary of GBM model evaluation with ALL and $\text{PM}_{2.5} > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. N, MB, RMSE, r and IOA represent data number, mean bias, root mean square error, correlation coefficient and index of agreement, respectively.

	$\text{PM}_{2.5} > 35$		ALL	
	Test	Training	Test	Training
N	2068	8270	10610	42438
MB	0.21	-0.01	-0.03	0.01
RMSE	11.54	11.06	12.37	12.00
r	0.79	0.83	0.75	0.76
IOA	0.67	0.69	0.66	0.66

일반적인 사례보다는 고농도사례에서 기상변수와 시간변수와 관련성이 높은 것을 알 수 있고 고농도사례를 예측시 종속변수를 통하여 예측 가능한 것으로 분석된다.

GBM 모델을 이용하여 미세먼지 농도 예측 성능을 평가하였고 입력 변수별 기여도를 그림 14와 같이 나타내었다. 전체 자료(ALL)와 고농도 사례($\text{PM}_{2.5} > 35$) 모두 연별(trend), 연변동(week), 기온의 기여도가 중요하게 나타났다. 즉, 고농도 미세먼지는 연별 미세먼지 특징과 일년주기(겨울과 봄 집중)와 기온으로 나타나는 계절의 영향이 큰 것으로 분석할 수 있다. 전체 자료에서는 상대습도, 풍속, 요일, 풍향, 경계층 고도 및 시간 순으로 기여도가 나타난 반면, 고농도자료에서는 요일, 상대습도, 대기경계층 고도, 시간, 풍향, 풍속 순의 기여도가 나타났다. 이러한 기여도 분석 결과는 그림 13과 비교하여 고농도 사례의 특징을 설명할 수 있다. 한반도에서 나타나는 미세먼지는 연과 계절 등 시간에 따른 특징이 강하였고 기온, 상대습도, 풍속 등 기상변수에 따른 특징이 강하였다. 반면, 고농

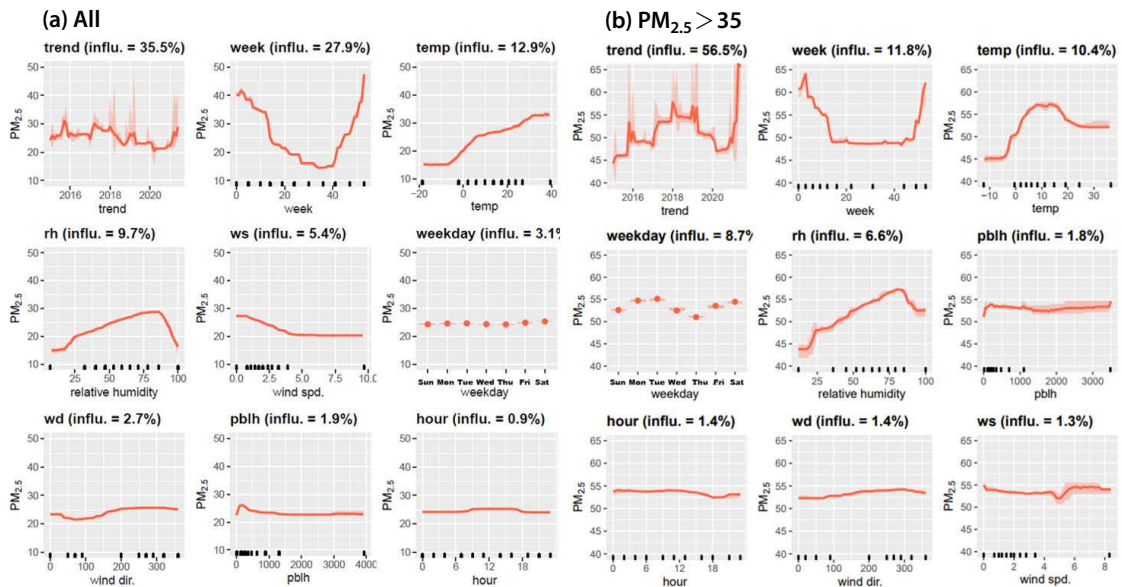


Fig. 14. Relative influence with meteorological and temporal variables at Jung-gu, SMA. (a) and (b) represent All and $\text{PM}_{2.5} > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

도 미세먼지는 인간활동(근무일) 요일의 영향이 증가되었고 기상학적으로는 경계층 고도의 영향이 증가되었으며 풍속의 영향은 감소되었다.

4. 결 론

본 연구는 한반도 초미세먼지의 특징을 분석하기 위하여 동아시아와 한반도 주변의 바람장과 AOD 분포를 살펴보고 한반도와 서울 중구에서 관측된 관측자료를 이용하여 기상변수와 초미세먼지 농도의 관계성을 분석하였다. 또한, GBM 모델을 활용하여 고농도 미세먼지 사례와 기상변수의 관계성 및 기여도를 평가하였다.

동아시아 종관분포에서 850 hPa 기압면의 지위고도 편차가 약화되었고 바람장 벡터의 편차가 지위고도 경사면을 따라 동풍으로 나타났으며 동서바람이 상당히 약화된 것으로 분석되었다. 종관 기상장에서 나타난 특징과 유사하게 편서풍의 약화로 한반도로 유입되는 미세먼지가 적은 것으로 분석되었으며 COVID-19의 사회경제적 영향을 제외한 기상학적 특징을 고려하였을 때 2020년과 2021년 저농도 미세먼지가 나타난 원인으로 사료된다. 2018년의 한반도는 지위고도 편차가 약화되었고 풍속변화가 적어 고농도가 나타난 것으로 분석되었다.

한반도 영역에 영향을 미치는 기상특징과 미세먼지의 분포 파악을 위해 상대적으로 낮은 기압면(925 hPa)의 지위고도와 바람장을 비교하였고 월평균 지상관측자료의 분포를 비교 분석하였다. 한반도 영역의 AOD는 인천과 태안반도를 중심으로 높았고 중국으로부터 장거리 이동 등의 영향으로 서해상을 중심으로 높은 AOD가 나타났다. 기온은 월별 추세가 있어 12월부터 1월까지 하강 후 3월까지 증가 경향이 나타난다. 겨울철 월 평균 기온이 상대적으로 낮게 나타나면 난방을 위한 화석연료의 사용 등이 미세먼지 증가의 원인으로 작용될 수 있다. 2018년과 2021년 상대적으로 1월 기온이 낮아 높은 초미세먼지 발생에 영

향을 주었고, 2020년은 다른 해와 비교하여 1.5°C 이상 기온이 높은 기온은 다른 요인들과 함께 난방 및 에너지 소비에 영향을 미쳐 초미세먼지 농도의 감소에 기여했을 것으로 판단된다. 한반도 해안지역에서 풍속이 내륙보다 강하였고 남해와 동해 해안지역에서 강한 풍속을 보인다. 종관적으로 강한 풍속은 장거리 수송과 관련이 있고 국지적으로는 배출원주변에서는 환기효과를 나타낼 수 있다. 대기 경계층이 발달하지 못하게 되면 연직방향으로의 미세먼지의 이동이 충분히 이루어지지 못하고, 경계층 이상의 고도에 존재하던 미세먼지는 지상의 농도에 기여하지 못하고 확산되어 제거될 수 있다. 미세먼지는 2.5 μm 를 기준으로 초미세먼지와 미세먼지로 구분되며 국내에 황사가 유입되었을 때 이러한 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율은 0.5 정도로 초미세입자가 적었다. 그러나 겨울철 고농도 미세먼지 사례의 경우는 0.6 이상으로 나타났는데 이는 초미세먼지 입자의 비율이 증가되고 장거리 이동 및 시간의 흐름에 따라 PM_{10} 입자의 침적이 많아 $\text{PM}_{2.5}$ 의 비율이 증가된 것으로 판단된다.

전체 자료(ALL) 중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 나쁨 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이상의 자료들 ($\text{PM}_{2.5} > 35$)만 추출하여 기상변수의 특징을 비교하였다. 고농도 미세먼지 사례에서는 기온, 풍속 및 경계층고도(PBLH)는 전체 자료보다 낮게 나타났다 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비율은 높게 나타났다. 그러나 고농도 미세먼지 발생 빈도가 높은 겨울철을 중심으로 상대적으로 기온이 높았고 경계층 고도는 낮은 것으로 분석되었다. 즉, 겨울철 고농도 미세먼지의 발생은 기온의 상승과 경계층 고도의 감소를 통하여 유추될 수 있다.

GBM 모델을 이용하여 고농도사례를 분석하였고 전체 자료와 고농도자료를 이용하여 평가한 상관계수는 0.75와 0.79였고 IOA는 0.66과 0.67로 고농도 미세먼지 예측시 정확도가 증가되었고 RMSE는 $12.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $11.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소되었다. 일반적인 사례보다는 고농도사례에서 기상변수와 시간변수와 관련성이 높았고 고농도사례를 예측시 종속변수를 통하여 예측 가능한 것으로 분석된다. 모델의 평가결과를 통하여

변수별 기여도를 분석하였다. 전체 자료와 고농도 사례 모두 연별 (trend), 연변동 (week), 기온의 기여도가 중요하게 나타났다. 전체 자료에서는 상대습도, 풍속, 요일, 풍향, 경계층 고도 및 시간 순으로 기여도가 나타난 반면, 고농도자료에서는 요일, 상대습도, 대기경계층 고도, 시간, 풍향, 풍속의 순서로 기여도가 높았다. 한반도에서 나타나는 미세먼지는 연과 계절 등 시간변수에 의존적이고 기온, 상대습도, 풍속 등 기상변수에 의존적이다. 반면, 고농도 미세먼지는 인간활동 (근무일)인 요일의 영향이 증가되었고 경계층 고도의 영향은 증가되었고 풍속의 영향은 감소되었다. 최근 COVID-19 확산으로 인하여 2020년 고농도 미세먼지 감소의 영향에 영향을 미쳤으나 기상학적인 특징도 무시할 수 없는 수준인 것으로 보이며 각각의 영향에 대한 추가적이고 면밀한 분석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 - 기후변화대응개발사업 (NRF-2020M1A2A2083520) 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Baek, C.R. (2013) Time Series Modelling of Air Quality in Korea: Long Range Dependence or Changes in Mean?, *The Korean Journal of Applied Statistics*, 26 (6), 987-998.
- Boo, K.O., Chun, Y.S., Park, J.Y., Cho, H.M., Kwon, W.T. (1999) The Horizontal Distribution of Air Temperature in Seoul using Automatic Weather Station data, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35(3), 335-343, (in Korean with English abstract).
- Cho, K., Lee, B., Kwon, M., Kim, S. (2019) Air Quality Prediction Using a Deep Neural Network Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 214-225, (in Korean with English abstract).
- Choe, J.I., Lee, Y.S., Lee, Y.S. (2015) A Study on the Impact of PM_{2.5} Emissions on Respiratory Diseases, *Journal of Environmental Policy and Administration*, 23(4), 155-172.
- Choi, J.S., Kim, J.H., Lee, T.H., Choi, Y.J., Park, T.H., Oh, J., Park, J.S., Ahn, J.Y., Jeon, H.E., Koo, Y.S., Kim, S.D., Hong, Y.D., Hong, J.H. (2016a) A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula I. Characteristics of PM Concentration and Chemical Components, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(5), 469-484, (in Korean with English abstract).
- Choi, J.S., Kim, J.H., Lee, T.H., Choi, Y.J., Park, T.H., Ahn, J.Y., Park, J.S., Kim, H.J., Koo, Y.S., Kim, S.D., Hong, Y.D., Hong, J.H. (2016b) A Study on Chemical Characteristics of Aerosol composition at West Inflow Regions in the Korea Peninsula II. Characteristics of Inorganic Aerosol Acidity and Organic Aerosol Oxidation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 485-500, (in Korean with English abstract).
- Comunian, S., Dongo, D., Milani, C., Palestini, P. (2020) Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality, *International Journal of Environmental Research Public Health*, 17, 4487.
- Duc, H.N., Rahman, M.M., Trieu, T., Azzi, M., Riley, M., Koh, T., Liu, S., Bandara, K., Krishnan, V., Yang, Y., Silver, J., Kirley, M., White, S., Capnerhurst, J., Kirkwood, J. (2022) Study of Planetary Boundary Layer, Air Pollution, Air Quality Models and Aerosol Transport Using Ceilometers in New South Wales (NSW), Australia, *Atmosphere*, 13(2), 176.
- Flemming, J., Benedetti, A., Inness, A., Engelen, R.J., Jones, L., Huijnen, V., Remy, S., Parrington, M., Suttie, M., Bozzo, A., Peuch, V.H., Akritidis, D., Katragkou, E. (2017) The CAMS interim Reanalysis of Carbon Monoxide, Ozone and Aerosol for 2003-2015, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 1945-1983.
- Friedman, J.H. (2001) Greedy function approximation: A gradient boosting machine, *Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232.
- Friedman, J.H. (2002) Stochastic gradient boosting, *Computational Statistics and Data Analysis*, 38(4), 367-378.
- Friedman, J.H., Hastie, T., Tibshirani, R. (2000) Additive logistic regression: a statistical view of boosting, *Annals of Statistics*, 28(2), 337-374.
- Ge, X., He, Y., Sun, Y., Xu, J., Wang, J., Shen, Y., Chen, M. (2017) Characteristics and Formation Mechanisms of Fine Particulate Nitrate in Typical Urban Areas in China, *Atmosphere*, 8(3), 62, 1-12.
- Ghim, Y.S., Choi, Y., Park, J.S., Kim, C.H. (2014) An Assessment Study for the Urban Air Monitoring Network in Seoul,

- Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(5), 504-509, (in Korean with English abstract).
- Grange, S.K., Carslaw, D.C. (2019) Using Meteorological Normalisation to Direct Intentions in Air Quality Time Series, *Science of The Total Environment*, 653, 578-588.
- Guo, H., Ling, Z.H., Cheng, H.R., Simpson, I.J., Lyu, X.P., Wang, X.M., Shao, M., Lu, H.X., Ayoko, G., Zhang, Y.L., Saunders, S.M., Lam, S.H.M., Wang, J.L., Blake, D.R. (2017) Tropospheric volatile organic compounds in China, *Science of The Total Environment*, 574, 1021-1043.
- Han, C., Hong, Y.C. (2020) Decrease in Ambient Fine Particulate Matter during COVID-19 Crisis and Corresponding Health Benefits in Seoul, Korea, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 1-12. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155279>
- Han, J.S., Kim, Y.M., Ahn, J.Y., Kong, B.J., Choi, J.S., Lee, S.U., Lee, S.J. (2006) Spatial Distribution and Variation of Long-range Transboundary Air Pollutants Flux during 1997-2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 99-106, (in Korean with English abstract).
- Huang, C.J., Kuo, P.H. (2018) A Deep CNN-LSTM Model for Particulate Matter (PM_{2.5}) Forecasting in Smart Cities, *Sensors*, 18(7), 1-22.
- Hwang, S.E., Kim, B.T., Lee, Y.T., Shin, S.S., Kim, H. (2021) A Comparative Study of the Atmospheric Boundary Layer Type in the Local Data Assimilation and Prediction System using the Data of Boseong Standard Weather Observatory, *Journal of Korean Earth Science Society*, 42(5), 504-513, (in Korean with English abstract).
- Jang, A.S. (2015) Particulate Matter and Bronchial Asthma, *The Korean Journal of Medicine*, 88(2), 150-155.
- Jang, E., Do, W., Park, G., Kim, M., Yoo, E. (2017) Spatial and temporal variation of urban air pollutants and their concentrations in relation to meteorological conditions at four sites in Busan, South Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 8, 89-100.
- Jeong, J.C. (2014) A Spatial Distribution Analysis and Time Series Change of PM₁₀ in Seoul City, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 17(1), 61-69.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetma, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437-471.
- Kang, B.W., Lee, H.S. (2015) Source Apportionment of Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) in the Chungju City, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 437-448, (in Korean with English abstract).
- Kang, E., Lee, M., Brune, W.H., Lee, T., Park, T., Ahn, J., Shang, X. (2018) Photochemical aging of aerosol particles in different air masses arriving at Baengyeong Island, Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 6661-6677. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6661-2018>
- Kang, Y.H., Yu, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B. U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) The impacts of COVID19, meteorology, and emission control policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia, *Scientific Reports*, 10, 22112.
- Kim, S.H., Yang, H.J., Jang, A.S., Kim, S.H., Song, W.J., Kim, T.B., Ye, Y.M., Yoo, Y., Yu, J.H., Yoon, J.S., Jee, H.M., Suh, D.I., Kim, C.W. (2015) Effects of particulate matter in ambient air on the development and control of asthma, *Allergy Asthma Respiratory Disease*, 3(5), 313-319.
- Kim, S.K., Seo, Y.H. (2013) Identification of sources contributing to west coast regional aerosol of Daechon city, *Journal Korea Society of Environmental Administration*, 19(1), 29-38.
- Koo, J.H., Kim, J., Lee, Y.G., Park, S.S., Lee, S., Chong, H., Cho, Y., Kim, J., Choi, K., Lee, T. (2020) The implication of the air quality pattern in South Korea after the COVID-19 outbreak, *Scientific Reports*, 10(1), 22462. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80429-4>
- Korea Environment Corporation (KECO) (2021) Final confirmation annual data download. https://www.airkorea.or.kr/web/pastSearch?pMENU_NO=123 (accessed on Mar. 20, 2022), (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2021) Synoptic observation data. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36> (accessed on Mar. 20, 2022), (in Korean)
- Kwon, J.H., Lim, Y.J., Oh, H.S. (2015) Particulate Matter Prediction using Quantile Boosting, *The Korean Journal of Applied Statistics*, 28(1), 83-92.
- Lee, K.B., Kim, S.D., Kim, D.S. (2015) Ion Compositional Existence Forms of PM₁₀ in Seoul Area, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 37(4), 197-203.
- Li, Z., Yang, X., Zhao, C., Fan, T. (2020) Ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ Mass Concentrations in Beijing and Relationships with Pollution from the North China Plain, *Asia-Pacific Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(12), 1-14.
- Liu, L., Zhang, J., Du, R., Ten, X., Hu, R., Yuan, Q., Tang, S., Ren, C., Huang, X., Xu, L., Zhang, Y., Zhang, X., Song, C., Liu, B., Lu, G., Shi, Z., Li, W. (2020) Chemistry of Atmospheric Fine Particles During the COVID-19 Pandemic in a

- Megacity of Eastern China, *Geophysical Research Letters*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2020GL091611>
- Myong, J.P. (2016) Health Effects of Particulate Matter, *The Korean Journal of Medicine*, 91(2), 106-113.
- Park, C.S. (2017) Variations of PM₁₀ concentration in Seoul during 2015 and relationships to weather condition, *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 27(2), 47-64, (in Korean with English abstract).
- Park, I.S., Park, M.S., Kim, H.S., Jang, Y.W., Lee, J., Owen, J.S., Cho, C.R., Jee, J.B., Chae, J.H., Kang, M. (2021) Meteorological Characteristics during Periods of Greatly Reduced PM_{2.5} Concentrations in March 2020 in Seoul, *Aerosol and Air Quality Research*, 21(9), 1-14.
- Park, J., Chang, S. (2021) A Particulate Matter Concentration Prediction Model Based on Long Short-Term Memory and an Artificial Neural Network, *International Journal of Environmental Research Public Health*, 18(13), 6801.
- Park, T., Ban, J., Kang, S., Ghim, Y.S., Shin, H.-J., Park, J.S., Park, S.M., Moon, K.J., Lim, Y.-J., Lee, M.-D., Lee, S.-B., Kim, J., Kim, S.T., Bae, C.H., Lee, Y., Lee, T. (2018) Chemical Characteristics of PM₁ using Aerosol Mass Spectrometer at Baengnyeong Island and Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 430-446, (in Korean with English abstract).
- Qu, Y., Han, Y., Wu, Y., Gao, P., Wang, T. (2017) Study of PBLH and Its Correlation with Particulate Matter from One-Year Observation over Nanjing, Southeast China, *Remote Sensing*, 9, 668.
- Ridgeway, G. (1999) The state of boosting, *Computing Science and Statistics*, 31, 172-181.
- Ridgeway, G., McCaffrey, D., Morral, A., Burgette, L., Griffin, B.A. (2017) Toolkit for Weighting and Analysis of Non-equivalent Groups: A tutorial for the twang package, RAND Corporation.
- Sailor, D.J., Muñoz, R. (1997) Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the USA: methodology and results for eight states, *Energy*, 22(10), 987-998.
- Seo, S.J., Lim, Y.J., Seo, Y.K., Jung, D.H., Jung, H.J., Lee, M.D., Park, J.S., Hong, Y.D. (2015) Characteristics of Particle Size Distribution during High PM and Asian dust Episode of February, 2015 in Baengnyeong Island, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 15(3), 241-250.
- Seo, Y.H. (2015) Characterization of high concentration PM_{2.5} by nitrate and ammonium ions of PM_{2.5} in Seoul, *Journal of Korean Society of Environmental Administration*, 21(1), 1-7.
- Seo, Y.H., Ku, M.S., Choi, J.W., Kim, K.M., Kim, S.M., Sul, K.H., Jo, H.J., Kim, S.J., Kim, K.H. (2015) Characteristics of PM_{2.5} Emission and Distribution in a Highly Commercialized Area in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 97-104, (in Korean with English abstract).
- Shahraiyi, H.T., Sodoudi, S. (2016) Statistical Modeling Approaches for PM₁₀ Prediction in Urban Areas; A Review of 21st-Century Studies, *Atmosphere*, 7(2), 1-24.
- Sohn, D.W. (2016) Gender-dependent Association Between the Risk of Diabetes and the Concentration of Ambient Particulate Matter, *Journal of Korea Planning Association*, 51(4), 211-223.
- Son, K., Bae, M., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, C., Kim, Y., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Meteorological and Emission Influences on PM_{2.5} Concentration in South Korea during the Seasonal Management: A Case of December 2019 to March 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 442-463.
- Wang, J., Ge, X., Chen, Y., Shen, Y., Zhang, Q., Sun, Y., Xu, J., Ge, S., Yu, H., Chen, M. (2016) Highly time-resolved urban aerosol characteristics during springtime in Yangtze River Delta, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9109-9127.
- Yang, X., Xu, J., Bi, F., Zhang, Z., Chen, Y., He, Y., Han, F., Zhi, G., Liu, S., Meng, F. (2018) Aircraft Measurement over the Gulf of Tonkin Capturing Aloft Transport of Biomass Burning, *Atmospheric Environment*, 182, 41-50.
- Zhang, J., Cui, K., Wang, Y.F., Wu, J.L., Huang, W.S., Wan, S., Xu, K. (2020) Temporal variations in the air quality index and the impact of the COVID-19 event on air quality in western China, *Aerosol and Air Quality Research*, 20(7), 1552-1568. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0297>

Authors Information

지준범 (한국외국어대학교 대기환경연구센터 센터장/연구교수)
(rokmcjib717@gmail.com)

조창래 (한국외국어대학교 대기환경연구센터 연구교수)
(crcho@hufs.ac.kr)

김상현 (세종대학교 기후환경융합센터 수석연구원)
(paulksh@sejong.ac.kr)

송미정 (전북대학교 지구환경과학과 교수)
(mijung.song@jbnu.ac.kr)