

논문

고농도 PM_{2.5} 발생 시 국내외 영향에 따른 산업단지 인근 지역의 PM_{2.5} 특성 분석

Characteristics Analysis of PM_{2.5} in Industrial Complex Near Area According to Domestic and Foreign Influences in Case of High Concentration PM_{2.5} Episode Occurrence

김창혁¹, 김정호¹, 황규철², 김필호, 신수현, 박종성, 박세찬², 이가혜², 이재영³, 김중범²,*

국립환경과학원 대기환경연구과, ¹(주)한국환경과학연구소 부설연구소,

²충남연구원 서해안기후환경연구소, ³아주대학교 환경안전공학과

접수일 2022년 12월 27일
수정일 2023년 1월 13일
채택일 2023년 1월 20일

Received 27 December 2022
Revised 13 January 2023
Accepted 20 January 2023

*Corresponding author
Tel : +82-(0)41-630-3924
E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Chang Hyeok Kim, Jeongho Kim¹, Kyucheol Hwang², Pilho Kim, Su Hyun Shin, Jong-Sung Park, Sechan Park², Gahye Lee², Jae Young Lee³, Jong Bum Kim²,*

Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

¹R&D Center, Korea Environment Science Institution, Wonju, Republic of Korea

²Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

³Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

Abstract It is very important to investigate domestic and foreign influence of PM_{2.5} in case of high concentration PM_{2.5} episode occurrence. In this study, the mass concentrations and chemical compositions of PM_{2.5} were measured in the Sihwa National Industrial Complex at one-hour intervals between January 1 and December 31 2021, to determine characteristics of PM_{2.5}. High-level PM_{2.5} were identified and the characteristics of their corresponding periods were analyzed. The prevailing wind direction throughout the study period was northwesterly with a relatively high frequency of no wind (41%). NO₃⁻ (26.9%) was the highest component of PM_{2.5}, followed by NH₄⁺ (13.0%), OC (12.9%), and SO₄²⁻ (12.5%). Periods with a daily average concentration 75 µg/m³ or more were classified as high PM_{2.5} concentration cases. Five cases were identified as high concentration during the study period. The causes of these cases were presumed to originate from domestic sources for case 1 and 2, from abroad for case 3 and 4, and from a mixture of both domestic and abroad for case 5. In the cases with domestic sources, NO₃⁻ and NH₄⁺ were high contributors and in the cases with foreign sources. And, Metal was high contributors. These findings can be helpful to understand high PM_{2.5} events and can be used to establish air quality improvement policies.

Key words: PM_{2.5}, High PM_{2.5} episode, Domestic, Foreign, Influence, Industrial complex

1. 서론

산업혁명 이후 에너지사용량의 급격한 증가에 따른 화석연료 이용은 기후변화와 대기오염에 직접적인 영향을 미치고 있다(Lee *et al.*, 2021). 대기오염은 토양

이나 수질오염과 달리 광역적으로 광범위한 범위에 동시다발적으로 나타날 수 있다(Jung, 2011). 1960년대 유럽 전역에서 발생한 산성비 피해로 광역적인 대기오염 문제가 세계적인 관심과 주목을 받았으며, 마침내 1979년에 월경성 장거리이동 대기오염물질 협

약(convention on long-range transboundary air pollution, CLRTAP)이 체결되었다(Moon *et al.*, 2017). 이외에도 오존층 파괴를 막기 위한 비엔나 협약이나(UN, 1985), 기후변화에 대한 유엔 기본 협약 등(UN, 1992), 전 세계적으로 발생하고 있는 기후대기환경 문제를 해결하기 위한 노력이 진행되고 있다. 국내에서도 1970년 이후 급속한 산업화 과정에서 발생한 환경문제를 개선하기 위해 1991년 환경정책기본법이 제정되었으며(MOE, 1991a), 대기질 관리를 위한 대기환경보전법이 신설되었다(MOE, 1991b). 대기환경보전법에서는 대기환경 개선을 위한 계획을 수립하여 추진하고, 이에 대한 개선효과 분석을 위해 대기오염 측정망을 운영하도록 하고 있다(MOE, 2021). 2022년 기준 환경정책기본법 시행령에서는 미세먼지(particulate matter less than 10 μm , PM₁₀)를 포함하여 총 8가지 물질을 선정하여 관리하고 있으며(MOE, 2020a), 초미세먼지(particulate matter less than 2.5 μm , PM_{2.5})는 1급 발암물질(Group 1)에 해당한다(IARC, 2013). 2020년 4월 시행된 미세먼지법(미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법)에는 미세먼지 생성에 관련된 전구물질로 질소산화물(nitrogen oxide, NO_x), 황산화물(sulfur oxide, SO_x), 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs) 및 암모니아를 규정하고 있다(MOE, 2020b). 위와 같은 다양한 오염물질의 저감을 위해 에너지전환, 환경급전, 저황유, 고체연료 사용금지 및 오염물질 배출량 감축 등 다양한 환경정책이 추진되었으며, 그 결과 배출원에서 직접 배출되는 1차 오염물질은 뚜렷한 저감을 이루었다. 하지만 2차 생성 오염물질에서 기인한 고농도 미세먼지 사례의 발생 빈도 및 사례 시 PM_{2.5} 평균농도는 감소 경향을 보이지 않아 PM_{2.5} 전구물질 관리의 중요성이 부각되고 있다(Kang and Kim, 2022; Yoo, 2022; Bae *et al.*, 2021; Hwang and Kim, 2019; Jo *et al.*, 2018).

정부에서는 2015년부터 대기환경기준에 PM_{2.5}를 설정하여 강화된 관리대책을 추진해 오고 있다. 우리나라 PM_{2.5} 연평균 농도는 2015년 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2020년 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소한 것으로 나타났지만

(NIER, 2020), PM_{2.5} 고농도가 발생하는 사례일 수는 증가하였다(Hur and Kang, 2022). 2015년부터 PM_{2.5} 농도를 기준으로 미세먼지 주의보(PM_{2.5} 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 연속하여 지속하는 경우)를 발령하고 있는데, 전국 기준 2015년 173회, 2018년 315회 그리고 2019년 590회가 발령되어 빈도가 급격히 증가함에 따라 미세먼지에 대한 사회적 이목과 국민의 관심이 집중되고 있다(NIER, 2020). 정부에서는 대기오염물질의 정밀분석을 위해 권역별로 대기환경연구소를 확대하여 운영하고 있다(MOE, 2021). 2008년 백령도에 처음 구축된 대기환경연구소는 2021년 기준 강원권까지 10개소가 설치되어 운영되고 있으며, 각각의 대기환경연구소는 주변 환경과 입지 조건에 따라 도심지역, 산업단지, 교외지역 및 배경지역으로 구분할 수 있다(Yu *et al.*, 2018a). 대기환경연구소에서 산출한 측정 및 분석자료는 국외로부터 유입되는 장거리 이동오염물질에 대한 관측, 화학적 조성분석을 통한 기여도 추정, 화학적 성분의 계절별 특성, 초미세먼지의 광학 특성 분석과 같은 미세먼지와 관련된 다양한 연구에 활용되고 있으며(Son *et al.*, 2021; Hwang *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020; You *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2018b; Sung *et al.*, 2017; Lim *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2013), 이러한 연구 결과물은 우리나라 미세먼지에 대한 과학적 이해에 중요한 역할을 하였다. 백령도와 제주도 대기환경연구소는 배경지역으로 분류하여 국외유입 영향 검토에 사용되었고, 수도권(서울)과 중부권(대전), 호남권(광주), 영남권(울산)은 주로 도심지역 고농도 대기오염 사례분석에 활용되고 있다(Yu *et al.*, 2018a). 반면에 신규지역으로 최근 2019년 설립된 경기권 대기환경연구소는 대기오염물질 배출 시설들이 다수 밀집되어 있는 시화-안산공단지역에 위치해 있다. 시화-안산공단은 대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS) 기반 2019년 경기도의 대기오염배출량 중 9.9%를 차지하는 것으로 나타났으며, 화성시와 평택시를 제외하고 가장 높은 배출기여도를 보였다(NAEI, 2022). 특히 SO_x와 VOCs는 각각 31.0%와 16.1%로 높은 기여도를 보여

이 부분에 대한 관리대책 마련이 필요한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 경기권 대기환경연구소의 자료를 활용하여 시화-안산공단 인접 지역에 대한 $PM_{2.5}$ 의 물리·화학적 특성과 $PM_{2.5}$ 2차 생성 인자들의 영향을 파악하고, 특히 고농도 미세먼지 사례 발생 시 주요 화학성분을 밝혀내고 그 기원을 분석하고자 한다. 본 자료는 추후 산업단지 주변 지역에 대한 대기개선정책 수립 시 기초 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 측정장소 및 기간

본 연구에서는 산업단지 인근 지역의 $PM_{2.5}$ 분석을 위해 경기권 대기환경연구소(37°32'N, 126°83'E)에서 측정 및 분석한 자료를 사용하였다. 그림 1은 경기권 대기환경연구소의 위치를 나타내고 있다. 측정위치를 중심으로 반경 15 km 내에 4개의 산업단지가 위치한다. 북서쪽으로 약 15 km 거리의 남동국가산업단지, 서쪽으로 약 5 km 거리의 반월국가산업단지와 9 km 거리의 시화국가산업단지가 있으며, 남동쪽에는 반월도금공단이 약 6 km 거리에 있다. 서쪽에 바닷가가 인접해 있어 내륙과 비열 차이에 따른 해륙풍의 영향이 나타날 것으로 판단되며, 지리적 특성상 전반적으로

서풍이나 북서풍 계열의 바람의 빈도가 높을 것으로 예상된다. 경기권 대기환경연구소는 2019년 5월부터 신뢰성 있는 데이터 획득을 위한 시험운동을 진행하고 정상가동은 2020년 1월부터 실시하였다. 측정장비의 유입구는 옥상층 높이를 포함하여 지상으로부터 약 40 m 높이에 위치하고 있으며, 유입구로부터 측정장비까지 관의 길이는 약 5 m이다. 시료 채취 후 시료의 이송 손실을 최소화하기 위해 측정관을 수직으로 개별 설치하였고, 관 재질은 스테인레스 강(stainless steel)을 사용하였다. 본 연구에 사용한 데이터는 안정적으로 자료가 수집되기 시작한 2021년 1월 1일부터 12월 31일까지로 선정하였고, “대기오염측정망 설치·운영 지침(MOE, 2021)”에 따라 확정 및 검증된 자료를 사용하였다.

2.2 측정항목 및 측정장비

$PM_{2.5}$ 의 질량 및 화학적 성분들의 종류와 측정분석 장비에 대한 사항을 표 1에 정리하였다. 모든 측정 장비는 On-line 실시간 장비로 $PM_{2.5}$ 의 질량농도와 화학성분 자료는 1시간, 입경별 수농도 자료는 5분의 시간해상도로 각 장비에서 산출된다. 사용된 자료는 기준장비인 $PM_{2.5}$ 중량법 장비와 비교분석을 위해 1시간 평균자료로 정리하여 분석을 수행하였다. 대기환경연구소에서 운영하는 측정장비 구축현황과 측정분



Fig. 1. Location of sampling site, industrial complex, and AWS.

Table 1. Specification of measurement & analysis instruments used in air monitoring station.

	Species	Analytical method	Time resolution	Model	Manufacture/Nation
Mass	PM _{2.5}	Beta-ray absorption	1 hr	BAM1020	METONE/USA
Ions	NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺	Ion Chromatography	1 hr	AIM9000D	URG Corp./USA
Carbonaceous	OC, EC	Thermal optical transmittance	1 hr	SOCEC model5	Sunset/USA
Metals	Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Ba, Pb	X-ray Florescence	1 hr	XRF625i	Cooper Environmental Service/USA
Particle size distribution	Particle number concentration (0.02~0.5 μm)	Electrical mobility detection Condensation particle counter	5 min	SMPS (3938L50)	TSI Incorporated/USA
	Particle number concentration (0.5~20 μm)	Time-of-flight spectrometers Light scattering detection	5 min	APS (3321)	

석기의 자세한 정보, 측정방법, 측정농도의 정확도 평가 결과는 과거의 연구논문(Shin *et al.*, 2014)과 “2019년 대기오염집중측정소 연간 운영결과 보고서”에 상세히 기술되어 있다(NIER, 2020).

2.3 기상정보 처리 및 hysplit 모델

기상자료는 데이터의 신뢰성 확보를 위해 기상청에서 운영하는 방재기상관측(automatic weather system, AWS) 자료를 활용하였으며, 그림 1과 같이 대기환경 연구소로부터 남동쪽으로 약 4 km 떨어져 있는 곳에 자리한다. 이와 함께 hysplit 모델을 이용하여 고농도 미세먼지 발생구간에 대해 역궤적 분석을 실시하였다. Hysplit 모델은 미국해양대기청(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)에서 제공하는 READY(real-time environmental applications and display system) 프로그램의 일환이며, 기상예측 모델의 결과 값을 이용하여 공기의 흐름을 계산한다. 기상 모델을 구동하기 위해 사용한 기상장은 NECP(national centers for environment prediction)에서 제공하는 전 지구 기상장인 GDAS 1(global data assimilation system)을 이용하였다(Lee *et al.*, 2014). GDAS 1 기상장의 시간해상도는 1시간이며, 공간해상도는 1°이다. 관

측 대상지점은 경기권 대기환경연구소로 설정하였고, 역궤적 모사시간은 48시간으로 하였다. 고도는 기존 선행 연구들에서 역궤적 경로와 입자의 확산모형의 이동경로가 가장 일치하는 것으로 알려져 있는 500 m(Li *et al.*, 2010; Stohl *et al.*, 2005), 측정소 주변에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 예상되는 50 m와 100 m를 출발고도로 설정하였다.

2021년 고농도 PM_{2.5} 발생시간에 대한 물리·화학적 특성분석을 위해 PM_{2.5} 질량농도를 기준으로 1시간 및 일평균으로 정리하였고, 일평균 PM_{2.5} 주의보 발령 기준인 75 μg/m³ 이상인 지점을 고농도 사례로 정의하였다. 정의된 시점에 대해 국외유입과 국내발생 여부를 검토하기 위해 바람장미와 hysplit 모델을 활용하였으며, 이때의 화학 조성 및 입경분포 변화 특성을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상정보

그림 2는 2021년 안산 AWS를 정보를 기반으로 기상정보를 정리한 것이다. 연평균 기온은 13.1°C, 최

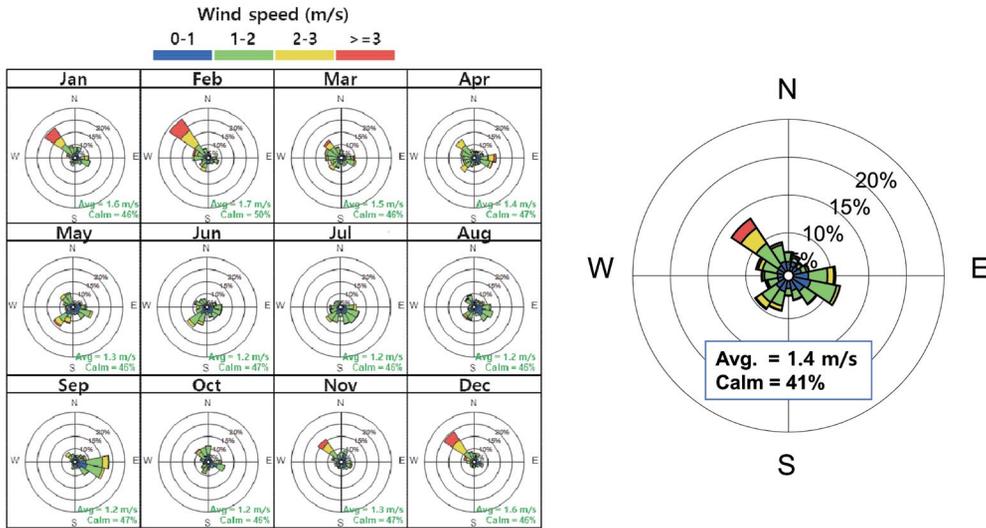


Fig. 2. Monthly wind rose diagrams over the period of 2021 (left) and wind rose diagram for the entire study period (right).

고기온은 7월과 8월에 35.9°C , 최저기온은 1월에 -21.5°C 를 기록했다. 습도는 76.6%였으며, 누적강수량은 921 mm로 5월에 가장 많은 양인 167.5 mm 내렸으며, 9월에는 4.5 mm로 가장 적은 양의 비가 내렸다. 풍속은 바람이 거의 불지 않는 정온상태 (calm, 0.5 m/s 이하)가 전체의 41%로 가장 높은 비율을 보였다. 풍향은 북서풍 22.1%, 동풍 17.5%, 남서풍 14.8%로 나타나 주풍향은 북서풍 계열인 것으로 확인되었다. 연평균 평균풍속은 1.4 m/s로 비교적 낮았으며, 2월달의 평균풍속 1.7 m/s가 가장 높은 수준으로 지역적으로 바람에 의한 희석·확산효과는 미미한 것으로 나타났다.

월별 바람장 특징을 살펴보면, 북서풍이 주로 부는 달은 1월, 2월, 11월, 12월로 최대 순간속도 3 m/s 이상의 강한 풍속과 함께 불었고, 5월부터 8월까지의 주로 1.2~1.3 m/s 풍속으로 남서풍이 불었다. 가을이 시작되는 9월에는 동풍과 동남동풍이 주풍으로 관찰되었다. 겨울로 접어드는 11월과 12월은 북서풍이 주풍으로 파악되었다. 3월, 4월 그리고 10월은 한 방향에서 우세하게 불어오는 바람은 없었으나, 동풍부터 북서풍까지 다양한 방향에서 비슷한 빈도로 나타났다. 서

쪽과 북쪽에서 불어오는 바람 방향에 영향을 받은 기간에는 시화, 반월산업단지의 영향을 받고, 도금단지가 위치한 남동쪽에서 불어오는 방향에 영향을 받을 것으로 예상되는 기간은 봄과 겨울철(1~3월, 11~12월)이다. 기간별 정온상태 비율을 살펴보면, 2월이 50%로 가장 높은 비율을 차지했고, 46%로 낮은 달은 7개월(1월, 3월, 5월, 7월, 8월, 10월, 12월) 동안 확인되었다. 전반적으로 한달 중 절반 가까운 시기가 정온을 유지하는 것으로 나타났다. 정온조건에서 기류의 정체현상은 외부유입 기원의 미세먼지를 장기적으로 지속시킬 수 있으며, 지역적 2차 생성 입자에 의한 영향이 가중될 수 있는 조건을 형성할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 산업단지 주변 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 의 특성

3.2.1 연간, 계절별 $\text{PM}_{2.5}$ 의 특징

그림 3은 2021년 1년 동안 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도와 연평균 데이터를 기반으로 화학적 조성을 나타낸 것이다. x축은 2021년도를 기준으로 시간 변화를 월 단위로 구분하여 나타낸 것이고, y축은 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도이다. 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 $26.4 \pm 22.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나

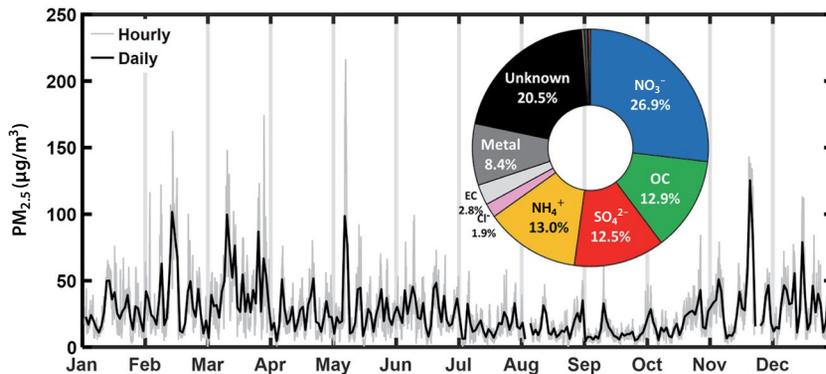


Fig. 3. Time series plot and distribution of PM_{2.5} measured in Ansan during 2021.

타났다. 확보된 자료는 1시간을 기준으로 전체 8,760 시간 중 8,526시간으로 데이터 획득률 97.3%를 나타냈으며, 그중 24.5%인 2,093시간이 일평균 기준인 35 µg/m³ 이상으로 확인되었다. PM₁₀ 중 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 비율은 각각 39.8%와 58.0%로 기존의 연구에서 나타난 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 0.5~0.6 전후인 것을 감안하면, 기존 연구 결과와 유사한 수준으로 나타났다(Fan *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2017).

표 2는 본 연구에서 측정된 PM_{2.5}와 기존 연구 문헌에 대한 연구 결과를 나열한 것이다. Yu *et al.* (2018a)은 전국에서 운영 중인 대기환경연구소의 2013~2015년 자료를 기반으로 연간 지역별 PM_{2.5}의 화학적 특성을 보고하였고, Lee *et al.* (2022)은 안산과 시화지역에서 2021년 8월부터 2022년 7월까지 1년간 시료채취한 자료를 분석하여 보고하였다. 선행 연구에서 제시된 값은 각기 다른 기간과 환경조건에서 수행된 결과로 본 연구 결과와의 직접적인 비교는 어렵지만 지역별 특성 검토를 위해 비교분석을 수행하였다. 본 연구에서 측정된 PM_{2.5} 중 2차오염물질로 분류되는 SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺은 전체 PM_{2.5}의 중량농도 중 57%로 반이상을 차지하였다. 이온성분 중 NO₃⁻이 7.7 µg/m³으로 가장 높은 농도를 보였고, NH₄⁺ 3.7 µg/m³, SO₄²⁻는 3.6 µg/m³의 순서로 나타났다. 선행 연구들에서 NO₃⁻/SO₄²⁻의 비율을 통해 오염원을 구분하는 지표로 사용하였는데, 해당 지표가 클수록 자동차와 같은

이동배출원의 기여도가 크고, 작을수록 석탄 연소와 같은 고정배출원의 기여도가 큰 것으로 판단한다(Wu *et al.*, 2020). 안산지역 NO₃⁻/SO₄²⁻의 비율은 2.14로 2015년 측정된 서울과 대전을 비롯한 다른 대기환경 연구소에 비하여 2배 이상 높게 나타났고, 안산, 시흥 산업단지에서 측정한 결과는 1.70~2.11 수준으로 수치가 근접하였다. 그중 특히 반월공단의 결과가 본 연구와 매우 비슷한 비율을 보였는데, 이는 산업단지 중 가장 우측에 위치하여 근접한 영향권에 속했기 때문으로 생각된다.

탄소성분은 PM_{2.5} 질량농도 중 17% 비율을 차지하였으며, 탄소성분 중 유기탄소(organic carbon, OC)는 직접 배출뿐만 아니라 대기 중 VOCs의 광화학 반응에 의해 2차적으로 생성된다. 원소탄소(elemental carbon, EC)는 주로 연소발생원에서 직접 대기 중으로 배출되며 화석연료와 생체연소 등의 형태로 발생되고, 1차 오염원의 지표가 되는 물질이다(Kim *et al.*, 2015). 따라서 OC와 EC의 비율을 통해 지역의 탄소발생원을 추정하는 데 이용하며, 자동차연소, 석탄연소, 생체연소 등으로 구분하였다(Cao *et al.*, 2005; Ryu *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2001). 일반적으로 OC/EC의 비율이 2.0 이상일 경우에는 대기 중에서 광화학 반응으로 생성된 2차 OC로 본다(Cho *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2009). 본 연구에서 OC와 EC 비율은 4.63으로, 안산과 마찬가지로 산업단지 주변에 위치할

Table 2. Statistics summary of annual average PM_{2.5} measured in each site.

Mean ± S.D.	Sampling period	Pollutant	PM _{2.5}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	OC	EC	Metal	NO ₃ ⁻ / SO ₄ ²⁻	OC/ EC
		Unit	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³		
This study	2021	Ansan	26.4 (±22.7)	3.6 (±3.1)	7.7 (±10.5)	3.7 (±4.0)	3.7 (±2.8)	0.8 (±0.8)	2.4 (±3.7)	2.14	4.63
		%	100.0	13.6	29.2	14.0	14.0	3.0	9.1		
Yu et al. (2018a)	2015	Bangryeongdo	24.5 (±21.5)	3.9 (±3.7)	2.1 (±3.8)	2.2 (±2.4)	3.4 (±2.9)	0.6 (±0.6)	-	0.54	5.67
		Seoul	28.0 (±19.3)	4.9 (±4.3)	4.4 (±4.9)	3.9 (±3.0)	3.7 (±2.2)	1.3 (±0.9)	-	0.90	2.85
		Daejeon	35.8 (±21.3)	6.6 (±5.3)	6.3 (±7.7)	4.9 (±3.8)	5.2 (±2.6)	1.8 (±1.0)	-	0.95	2.89
		Gwangju	28.1 (±19.7)	5.1 (±5.0)	4.3 (±5.6)	3.5 (±3.2)	4.4 (±3.2)	1.0 (±0.7)	-	0.84	4.40
		Ulsan	22.5 (±15.8)	3.5 (±3.2)	2.2 (±2.9)	2.0 (±1.8)	3.3 (±1.9)	0.7 (±0.5)	-	0.63	4.71
		Jeju	16.0 (±15.0)	3.9 (±3.9)	1.2 (±2.6)	1.5 (±1.9)	3.2 (±2.5)	0.9 (±0.6)	-	0.31	3.56
		Sihwa	32.0 (±17.9)	3.4 (±2.4)	6.6 (±7.0)	4.1 (±3.3)	7.5 (±3.2)	0.6 (±0.3)	2.9 (±0.1)	1.94	12.5
Lee et al. (2022)	2020~ 2021	Banwol	29.1 (±16.8)	3.5 (±2.5)	7.4 (±7.1)	3.8 (±3.0)	6.0 (±2.7)	0.6 (±0.2)	1.5 (±0.1)	2.11	10.0
		Sihwa	25.6 (±16.0)	3.7 (±2.6)	6.3 (±7.1)	3.3 (±3.0)	5.4 (±2.6)	0.6 (±0.3)	2.1 (±0.1)	1.70	9.0

산지역에서 측정된 결과인 4.71과 비슷한 비율을 보였다. 안산시흥산업단지에서 측정된 결과는 9.0~12.5로 본 연구 결과에 비하여 2~3배 정도 높게 나타났는데, 이는 측정지점의 국지적인 특성과 측정기간별 정온상태 유지기간과 같은 기상조건의 영향으로 결과가 상이하게 나타난 결과로 판단된다. 안산 PM_{2.5} 중 탄소성분은 1차 발생원보다 2차 생성의 기여가 더 큰 것으로 생각된다.

미량원소물질은 질량농도 중 차지하는 비중이 높지는 않지만, 미세먼지 내 존재하는 많은 유해중금속의 경우 적은 양으로도 인체에 유해한 영향을 일으킬 수 있기 때문에, 개별 원소성분의 농도 분포를 파악하고 있다(NIER, 2018). 본 연구에서는 미량원소물질 질량 농도는 총 17종(Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu,

Zn, As, Se, Br, Ba, Pb)의 합으로 나타냈으며, PM_{2.5} 중 10%가 되지 않는 비율을 차지하고 연평균 농도는 2.4 µg/m³이었다. 이는 안산시흥산업단지의 중금속 농도와 비슷한 수준인데, 북서풍이나 서풍이 불 때 산업단지 부근에서 나오는 미량금속성분이 이동하여 영향을 주었을 것으로 추정된다.

그림 4는 월별, 계절별 PM_{2.5}의 이온물질, 탄소물질의 질량농도 그리고 중금속물질 농도 합의 평균농도를 나타낸 것이다. 물질별 계절 특징을 살펴보면 PM_{2.5}는 3월이 가장 높은 농도를 보였고, 9월이 가장 낮은 농도를 보였다. 그동안 여름철이 높은 혼합고와 강우의 하상지수가 높아 대기질이 가장 낮은 것으로 알려져 있었는데(Han et al., 2017), 본 연구 결과 9월이 가장 낮은 농도를 보였다. 계절별로는 봄>겨울>

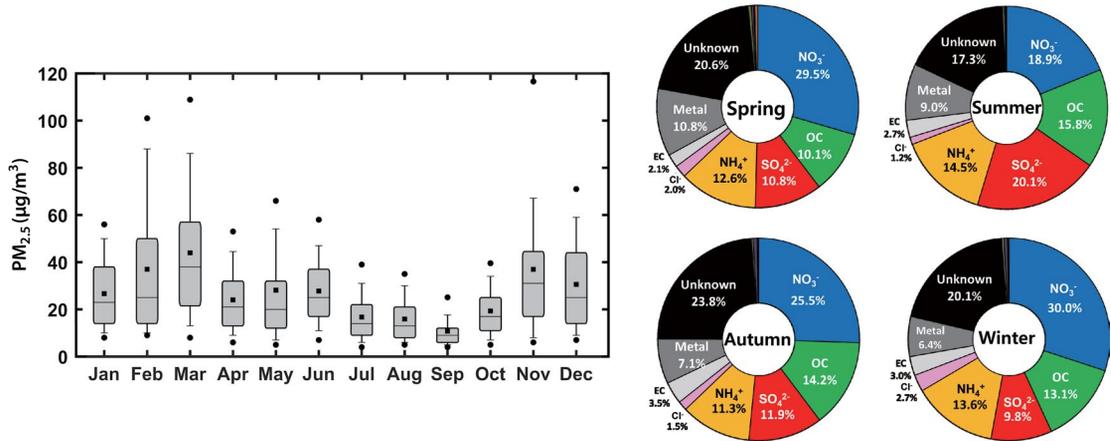


Fig. 4. Monthly variation and distribution of PM_{2.5} measured in Ansan during 2021.

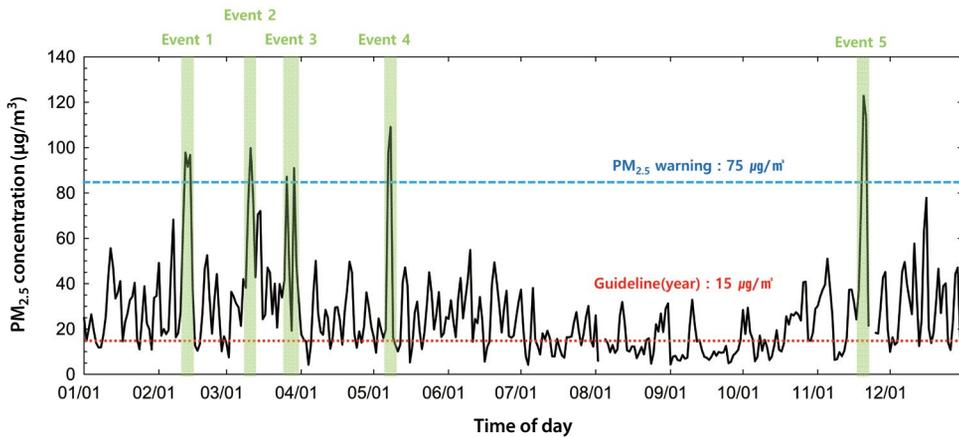


Fig. 5. Temporal variations of daily average PM_{2.5} during 2021.

가을 > 여름 순으로 겨울과 근소한 차이지만 봄철에 가장 높은 농도를 보였다. 이는 봄철 고농도 황사에 의해 PM_{2.5}의 농도도 함께 증가한 이유로 보인다 (Altindag *et al.*, 2017). SO₄²⁻는 여름에 높은 기온과 상대습도, 많은 일사량, 높은 혼합고도 등의 영향으로 가장 높은 농도가 나타났다 (Park, 2021). NO₃⁻, NH₄⁺도 겨울과 봄 순서로 높았는데, 이는 낮은 온도에 의한 상변화, 장거리 이동, 대기정체가 원인이 된 것으로 사료된다 (NIER, 2021; Kang and Kim, 2014). OC, EC 또한 겨울에 가장 높게 나타났는데, 국내의 난방연료

연소와 같은 1차적인 배출 증가에 의한 영향으로 사료된다 (Park *et al.*, 2015). 중금속 성분비는 봄철에 가장 높게 나타났으며, 이는 봄철 편서풍을 타고 중국이나 몽골의 사막으로부터 불어오는 황사에 의한 영향으로 판단된다 (Kim *et al.*, 2004; Jeon, 2003).

3.3 고농도 사례 발생 시 PM_{2.5} 특성

그림 5는 2021년 안산시 대기에 포함된 PM_{2.5}의 일 평균 그래프를 나타낸다. 그림에서 확인 가능한 PM_{2.5}의 고농도 사례는 총 5회로 2월 1회, 3월 2회, 5월 1회,

11월 1회였다. 3월에 나타난 사례 3의 경우 고농도 피크가 2개로 보이거나 이를 연속적으로 나타나 하나의 피크로 분류하여 분석을 수행하였다. 선정된 사례의 고농도 $PM_{2.5}$ 시간평균농도는 사례 4 ($128.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 사례 2 ($92.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 사례 1 ($92.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 사례 3 ($87.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 사례 5 ($76.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순서로 나타났으며 고농도 사례의 지속시간은 사례 1 94시간, 사례 2 64시간, 사례 3 46시간, 사례 4 34시간, 사례 5 37시간이었다.

기상인자 중에서도 특히 풍향 풍속 자료는 미세먼지 농도 변화에 중요한 요소이며 특히 일일 주풍향이 어떻게 변화하느냐에 따라 주변에 미치는 영향이 매우 크다 (Park et al., 2011; Guerra et al., 2006; Sanchez-Reyna et al., 2006; Yu and Chang, 2006). 이에 본 연구에서도 미세입자 농도에 미치는 주변 배출원의 영향을 알아보기 위하여 안산시의 풍향 풍속 자료를 이용한 바람장미를 이용하여 사례별 주풍향 및 $PM_{2.5}$ 의 물리·화학적 변화특징을 검토하였다. 그림 6은 2021년도를 대상으로 안산에서 측정된 $PM_{2.5}$ 에 대한 5회 나타난 고농도 사례에 대해 바람장미와 역궤적 분석, 물리·화학적 변화를 나타낸 것이다.

사례 1의 경우 서풍계열이 주풍향으로 평균풍속은 0.47 m/s 로 서해안에서 시작된 기류가 유입되면서 지역적 정체(정온상태 66%)로 인해 고농도 사례가 발생한 것으로 확인되었다. $PM_{2.5}$ 의 총 농도는 $92.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 NO_3^- 이 43.4%로 가장 큰 비율을 차지하였고, NH_4^+ 18.3%, SO_4^{2-} 10.9%, OC 10.5% 순으로 나타났다. 입경분포는 주로 30 nm에서 주 피크를 보이다가 점차 농도가 증가하면서 80~100 nm와 500~1,000 nm의 입자가 동시에 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 사례 2의 경우 서풍이 주풍이었으나 일부 동남풍이 포함되어 있었으며, 서풍계열은 지상 50 m 이내에서 발달된 기류가 유입된 반면, 동남풍이 경우 500 m 이상의 상공기류가 유입된 것으로 확인되었다. 이때도 사례 1과 마찬가지로 평균풍속 0.57 m/s , 정온이 58.7%로 유사한 상태로 내륙에서 발생한 입자가 정체되면서 발생한 고농도 사례로 판단된다. $PM_{2.5}$ 의 농도

는 $92.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 화학물질의 구성성분비와 입경분포 증가 역시 사례 1과 유사하게 나타났다. 두 사례 모두 국내 기인의 오염물질이 지역 내에서 정체되면서 나타난 사례로 유사한 농도와 패턴을 보였다.

사례 3의 경우 서풍 계열의 북서풍과 남서풍의 빈도가 높았으며, 상층 기상은 북서풍이, 하층 기상은 남서풍이 주로 영향을 미친 것으로 확인되었다. 평균풍속은 0.81 m/s 로 앞선 사례 1, 2보다는 높은 수준이었으며, 정온상태는 44.1%로 가장 낮게 나타났으나 이 역시 지역적인 정체현상을 유발할 수 있는 수준으로 확인되었다. $PM_{2.5}$ 의 평균농도는 $87.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 앞서 나타난 사례 1, 2보다 낮은 농도이다. 화학적 성분은 앞서와 다르게 금속성분이 22.1%로 가장 높게 나타났으며, NO_3^- 18.8%, SO_4^{2-} 10.3%, NH_4^+ 9.2% 순으로 나타났다. 사례 4의 경우 주풍은 남서풍으로 평균풍속 1.7 m/s , 정온상태 16.2%로 2021년도에 확인된 고농도 사례 중 가장 빠른 풍속과 가장 낮은 정온상태를 보였다. 역궤적 분석 결과 상하층의 모든 기류가 중국으로부터 유입되어 영향을 미친 것으로 나타났으며, $PM_{2.5}$ 농도 역시 연간 관측된 농도 중 가장 높은 $128.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 화학적 성분 역시 금속성분이 22.1%로 가장 높은 비율을 차지하였고, NO_3^- 3.2%, OC 2.5%, SO_4^{2-} 1.5% 순으로 나타났다. 사례 3과 4의 2021년 3월 29~30일과 5월 7일~9일 모두 황사경보가 발령된 날로 중국으로 유입된 황사입자에 포함된 토양기원 금속성분이 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다 (KMA, 2022). 입경분포 역시 미세한 입자들보다는 주로 $1 \mu\text{m}$ 전후의 초대입자에 대한 입경분포가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로 관측된 사례 5의 경우 2021년도에 확인된 고농도 사례 중 가장 낮은 농도인 $76.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 확인되었고, 주풍은 서풍, 평균풍속 0.46 m/s , 정온상태 55.1%였다. 역궤적 분석 결과 500 m 이상의 상층부는 중국으로부터 유입된 기류의 영향을 받았으며, 50 m 이하의 경우 중국 동쪽에서 기인한 기류가 서해를 거쳐 유입된 것으로 나타났다. 화학적 성분비는 NO_3^-

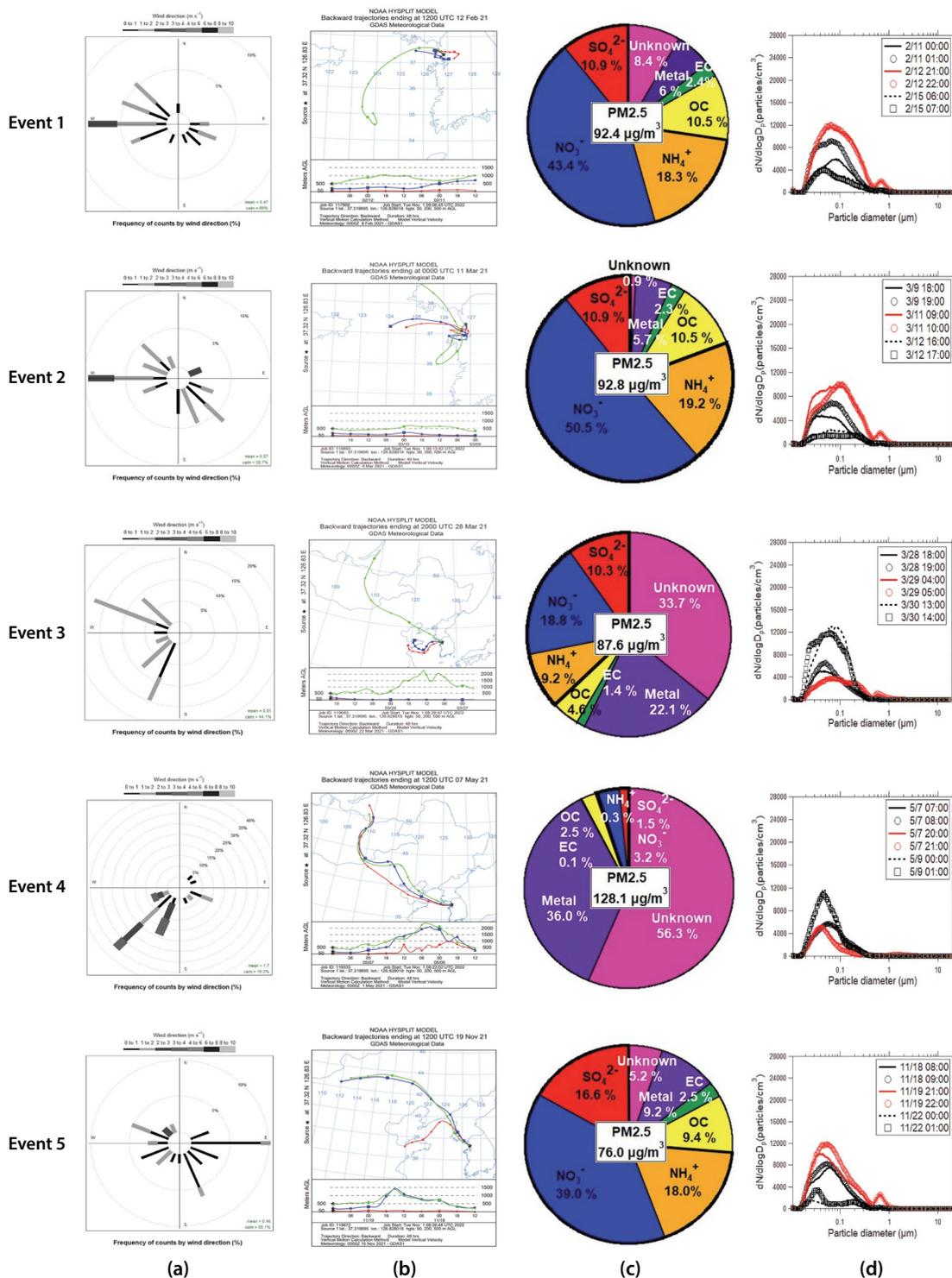


Fig. 6. (a) Windrose, (b) Back-trajectory, (c) Chemical composition ratio, and (d) Particle size distribution at each PM_{2.5} episodes.

이 39.0%로 가장 높은 비율을 차지하였고, NH_4^+ 18.0%, SO_4^{2-} 16.6%, OC 9.4%, 금속성분 9.2%로 나타났다. 입경분포는 30~100 nm와 500~3,000 nm의 입자가 동시에 커지는 것을 확인할 수 있었다. 앞선 사례 1, 2의 경우 국내발생 요인으로 확인되었으며, 사례 3, 4의 경우 국외유입이 주 영향인 것으로 확인되었다. 하지만 사례 5의 경우 국외유입과 국내발생이 혼재되면서 전체적인 화학적 성분비는 국내발생의 특성을 따라가지만, 국외유입 사례 시 금속 성분비가 높아지는 특성이 일부 반영된 결과로 사료된다. 하지만 본 사례의 경우 단년도에 발생된 일부 경우에 대한 분석 결과로 추후 장기적인 데이터 확보를 통한 정밀 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

$\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 관리 중요성이 증대되면서 기준설정 및 개선대책 추진 등 다양한 분야에서 다각적인 노력이 추진되고 있지만, 이러한 노력에도 불구하고 국내외에서 발생 및 유입된 오염물질들로 인해 고농도 미세먼지 현상은 빈번하게 발생하고 있다. 특히 안산시의 경우 산업단지의 영향과 국지적인 희석·확산 능력 저하로 다른 지역보다 높은 농도를 보이고 있으며, 이에 대한 원인분석과 관리대책 마련이 시급한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 2021년을 대상으로 산업단지 인근 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 물리·화학적 특성을 분석하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 안산지역에 대한 기상정보 분석 결과 주풍은 북서풍으로 연평균풍속은 1.4 m/s로 나타났다. 월별로는 겨울철에 해당하는 1, 2월과 12월이 1.6~1.7 m/s로 평균풍속이 가장 빠른 것으로 나타났고, 여름철과 가을철인 6월부터 10월까지가 1.2 m/s로 느린 풍속을 보였다. 다만 전체적으로 정온상태(0.5 m/s 이하)가 41%로 나타나 국내외에서 발생·유입된 오염물질에 대한 자연적인 희석·확산 능력이 떨어지는

것으로 나타났다.

- 2021년 기준 안산지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 $26.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 동일 기간대 수도권과 충청권에서 측정된 $21.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비 높은 수준을 보였다. 전체 측정기간 중 24.5%가 일평균 기준치인 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 화학성분비는 NO_3^- 이 26.9%로 가장 높은 비율을 보였고, NH_4^+ 13.0%, OC 12.9%, SO_4^{2-} 12.5% 순으로 나타났다.
- 월별로는 1월부터 3월까지 지속적인 증가추세를 보이다가 4월부터 감소하여 9월 최저 농도를 보였고, 이후 다시 증가하는 추세를 보였다. 최대인 3월 ($44.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 최저인 9월 ($10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 4.1배 높은 수준이었다. 계절별 화학조성은 여름철을 제외한 봄, 여름, 가을철에는 NO_3^- 의 비중이 가장 크게 (25.5~30.3%) 나타났고, 그 뒤를 이어 NH_4^+ 과 금속성분, OC가 유사한 수준으로 분포하였다. 특히 황사의 영향이 큰 봄철에 금속성분의 비율이 가장 큰 것으로 확인되었다.
- 2021년을 기준으로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 일평균 농도가 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도 사례를 분류하였고, 총 5회 관측되었다. 사례 1과 2는 국내발생된 사례로 NO_3^- 의 비율이 가장 크게 나타났고, 사례 3과 4는 국외유입된 황사의 영향으로 금속성분의 비율이 높게 나타났다. 사례 5는 국내발생과 국외유입이 혼재된 상태로 확인되었다.

대기관리권역법이 신설된 이후 권역별 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 원인분석 연구가 꾸준히 수행되고 있다. 본 연구 결과 $\text{PM}_{2.5}$ 의 물리·화학적 특성은 계절 및 국내외 미세먼지의 기여도에 따라 상이한 특성을 보였다. 봄철엔 중국 등 외부유입의 영향을 많이 받아 금속성분 비율이 증가하였으며, 여름철에는 황산염의 비율이 타 계절 대비 2배 가까이 증가함을 보였다. 그리고 고농도 사례 발생 시 국외유입과 국내 자체발생 오염원의 기여율에 따라 상이한 특성을 보였으며, $\text{PM}_{2.5}$ 의 성분 조성 또한 다양하게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만 본 연구는 한 지점에 대한 단편적인 데이터로 추후

에는 전국의 다양한 환경조건을 가지는 자료를 기반으로 장기간 데이터 분석과 해석을 통한 검증과 검토가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 과제의 일부 결과이며, 이에 감사드립니다(NIER-2022-04-02-087).

References

- Altindag, D., Baek, D., Mocan, N. (2017) Chinese Yellow Dust and Korean infant health, *Social Science & Medicine*, 186, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2017.05.031>
- Bae, C., Kim, E., Yoo, C., Kim, H.C., Kim, Y.M., Kim, S. (2021) Prioritizing Local Authorities Effective to Lower the Nationwide PM_{2.5} Concentrations and the Personal Exposure Based on the Source Apportionment with the CAPSS 2016 Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 410-428, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.410>
- Cao, J.J., Wu, F., Chow, J.C., Lee, S.C., Li, Y., Chen, S.W., An, Z.S., Fung, K.K., Watson, J.G., Zhu, C.S., Liu, S.X. (2005) Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(11), 3127-3137. <https://doi.org/10.5194/acp-5-3127-2005>
- Cho, S.H., Kim, P.R., Han, Y.J., Kim, H.W., Yi, S.M. (2016) Characteristics of ionic and carbonaceous compounds in PM_{2.5} and high concentration events in Chuncheon, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 435-447, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.4.435>
- Fan, H., Zhao, C., Yang, Y., Yang, X. (2021) Spatio-Temporal Variations of the PM_{2.5}/PM₁₀ Ratios and Its Application to Air Pollution Type Classification in China, *Frontiers in Environmental Science*, 14(9), 692440. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.692440>
- Guerra, S.A., Lane, D.D., Marotz, G.A., Carter, R.E., Hohl, C.M., Baldauf, R.W. (2006) Effects of wind direction on coarse and fine particulate matter concentrations in southeast Kansas, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 1525-1531. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464559>
- Han, J.M., Kim, J.G., Cho, K.H. (2017) Verify a Causal Relationship between Fine Dust and Air Condition-Weather Data in Selected Area by Contamination Factors, *The Korea Journal of BigData*, 2(1), 17-26, (in Korean with English abstract).
- Hur, Y.G., Kang, M.G. (2022) The effects of urban spatial structure and meteorological factors on the high concentration of fine dust pollution, *Journal of Korea Planning Association*, 57(1), 145-160, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.17208/JKPA.2022.02.57.1.145>
- Hwang, I., Kim, T. (2019) Chemical Characteristics of Ambient PM_{2.5} at Industrial Complex in Gyeongbuk Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 336-345, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.336>
- Hwang, I., Yi, S.M., Park, J. (2020) Estimation of Source Apportionment for Filter-based PM_{2.5} Data using the EPA-PMF Model at Air Pollution Monitoring Supersites, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(5), 620-632, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.620>
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2013) IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths.
- Jeon, B.I. (2003) Characteristics of Heavy Metallic Elements of PM₁₀ for Yellow sand and Non-Yellow sand during Springtime of 2002 at Busan, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 12(2), 99-108, (in Korean with English abstract).
- Jo, G., Kim, D., Song, M. (2018) PM_{2.5} Concentrations and Chemical Compositions in Jeonju from 2017 to 2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 876-888, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.876>
- Jung, H.D. (2011) Basic research on air pollution and environmental indicator species, Daejeon Development Institute, Daejeon, Korea.
- Jung, J.H., Kim, S.R., Choi, B.R., Kim, K.S., Huh, J.B., Yi, S.M., Han, Y.J. (2009) A study on the characteristics of carbonaceous compounds in PM_{2.5} measured in Chuncheon and Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(2), 141-153, (in Korean with English abstract).

- Kang, D., Kim, J.E. (2014) Fine, Ultrafine, and Yellow Dust: Emerging Health Problems in Korea, *Journal of Korean Medicine*, 29, 621-622. <https://doi.org/10.3346/jkms.2014.29.5.621>
- Kang, Y.H., Kim, S. (2022) Seasonal PM Management: (I) What Emissions Should be Reduced?, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 756-763, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.746>
- Kim, H.S., Jung, J.S., Lee, J.H., Lee, S.I. (2015) Seasonal Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{2.5} in Daejeon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 28-40, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.1.028>
- Kim, J.A., Lim, S., Shang, X., Lee, M., Kang, K.S., Ghim, Y.S. (2020) Characteristics of PM_{2.5} Chemical Composition and High-concentration Episodes Observed in Jeju from 2013 to 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 388-403, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.388>
- Kim, K.H., Kang, C.H., Lee, J.H., Choi, K.C., Youn, Y.H. (2004) The Influence of the Asian Dust on the Spring time Distribution of Airborne Lead, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 20(6), 833-838, (in Korean with English abstract).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2022) Weather information (URL:<https://www.weather.go.kr/w/dust/dust-obs-days.do?type=2&stnId=108&year=2021>) Accessed on Dec. 23, 2022.
- Lee, H.W., Lee, S.H., Jeon, J.I., Lee, J.I., Lee, C.M. (2022) A Study on the Characteristics of Ion, Carbon, and Elemental Components in PM_{2.5} at Industrial Complexes in Ansan and Siheung, *Journal of Environmental Health Sciences* 48, 66-74, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/JEHS.2022.48.2.66>
- Lee, S., Hong, H.S., Kim, C.H., Hwang, E.Y., Yoon, S.H., Lee, S.S., Noh, S., Kim, J.B. (2021) Characteristic Analysis of Urban Air Pollution of Northwest Cities in ChungNam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(4), 561-577, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.4.561>
- Lee, S., Park, S., Park, M.K., Jo, C.O., Kim, J.Y., Kim, J.Y., Kim, K.R. (2014) Statistical Back Trajectory Analysis for Estimation of CO₂ Emission Source Regions, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 24(2), 245-251, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2014.24.2.245>
- Li, S., Kim, J., Kim, R.K., Muhle, J. (2010) Emission Characteristics of HFC-23 (CHF₃)/HCFC-22 (CHClF₂) between Different Air Masses in Northeastern Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 490-498, (in Korean with English abstract).
- Lim, J.H., Ahn, J.Y., Seo, S.J., Seo, Y.K., Hong, Y.D., Han, J.S. (2016) Source Identification and Apportionment of PM_{2.5} in Baengnyeong Island, Korea in 2015, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 16(4), 461-471, (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment (MOE) (1991a) Framework Act on Environmental Policy.
- Ministry of Environment (MOE) (1991b) Clean Air Conservation Act.
- Ministry of Environment (MOE) (2020a) Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy.
- Ministry of Environment (MOE) (2020b) Special act on the reduction and management of fine dust.
- Ministry of Environment (MOE) (2021) Guideline for Installation and Operating of Air Pollution Monitoring Station.
- Moon, J.Y., Kim, E., Choi, E.H. (2017) International Responses to Transboundary Air Pollution and their Implications, *Policy Reference* 17-11, 55-64, (in Korean with English abstract).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEI) (2022) Emissions by Year. <https://www.air.go.kr/en/jbgg/sub03> (accessed in Jul. 21, 2022).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) 2017 annual report of intensive air quality monitoring station.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Annual report of air quality in Korea 2019.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2021) The characteristics of air quality contribution of emission sources by region (II).
- Park, A.K., Heo, J.B., Kim, H. (2011) Analyses of factors that affect PM₁₀ level of Seoul focusing on meteorological factors and long range transferred carbon monoxide, Particle and Aerosol Research, 7(2), 59-68, (in Korean with English abstract).
- Park, J.S., Song, I.H., Park, S.M., Shin, H.J., Hong, Y.D. (2015) The Characteristics and Seasonal Variations of OC and EC for PM_{2.5} in Seoul Metropolitan Area in 2014, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 24(6), 578-592, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2015.24.6.578>
- Park, S.K. (2021) Seasonal Variations of Fine Particulate Matter and Mortality Rate in Seoul, Korea with a Focus on

- the Short-Term Impact of Meteorological Extremes on Human Health, *Atmosphere*, 12. <https://doi.org/10.3390/atmos12020151>
- Park, S.S., Kim, S.J., Gong, B.J., Lee, K.H., Cho, S.Y., Kim, J.C., Lee, S.J. (2013) Investigation on a Haze Episode of Fine Particulate Matter using Semi-continuous Chemical Composition Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 642-655, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.5.642>
- Park, S.S., Lee, K., Lee, M. (2020) Light Absorption of PM_{2.5} Observed during Fall at a Seosan Site in Chungchoeng Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 404-413, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.404>
- Ryu, S.Y., Kim, J.E., Zhuanshi, H., Kim, Y.J., Kang, G.U. (2004) Chemical composition of post-harvest biomass burning aerosols in Gwangju, Korea, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(9), 1124-1137. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10471018>
- Sanchez-Reyna, G., Wang, K.Y., Gallardo, J.C., Shallcross, D.E. (2006) Association between PM₁₀ mass concentration and wind direction in London, *Atmospheric Science Letters*, 6, 204-210. <https://doi.org/10.1002/asl.117>
- Shin, H.J., Lim, Y.J., Kim, J.H., Jung, H.J., Park, S.M., Park, J.S., Song, I.H., Seo, S.J., Hong, Y.D., Han, J.S. (2014) The Characteristics of Long Term High PM Episode Occurred in Feb. 2014, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 14(3), 223-232, (in Korean with English abstract).
- Son, S.C., Ju, S., Lee, K., Park, S. (2021) Characteristics of Chemical and Light Absorption of PM_{2.5} during Winter at a Seosan Site in Chungchoengnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 759-776, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.759>
- Stohl, A.C., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., Watawa, G. (2005) Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEX-PART version 6.2, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5, 4739-4799. <https://doi.org/10.5194/acpd-5-4739-2005>
- Sung, M.Y., Moon, K., Park, J., Kim, H., Jeong, H., Choi, J., Ahn, J., Hong, Y. (2017) Chemical Composition and Source Apportionment using the PMF Model of the Ambient PM_{2.5} in 2013 over Korea, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 17(2), 145-156, (in Korean with English abstract).
- United Nations (UN) (1985) Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer.
- United Nations (UN) (1992) United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Watson, J.G., Chow, J.C., Houck, J.E. (2001) PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995, *Chemosphere*, 43(8), 1141-1151. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00171-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00171-5)
- Wu, X., Chen, B., Wen, T., Habib, A., Shi, G. (2020) Concentrations and chemical compositions of PM₁₀ during hazy and non-hazy days in Beijing, *Journal of Environmental Sciences*, 87, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.03.021>
- Xu, G., Jiao, L., Zhang, B., Zhao, S., Yuan, M., Gu, Y., Liu, J., Tang, X. (2017) Spatial and Temporal Variability of the PM_{2.5}/PM₁₀ Ratio in Wuhan, Central China, *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 741-751. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.09.0406>
- Yoo, C. (2022) A Study on the Establishment System of a National Air Quality Management Policy for the Protection of Public Health, Doctoral's thesis, Aju University, (in Korean with English abstract).
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>
- Yu, G.H., Park, S.S., Kim, Y.S., Shin, H.J., Lim, C.S., Ban, S.J., Yu, J.A., Kang, H.J., Seo, Y.K., Kang, K.S., Jo, M.R., Jung, S.A., Lee, M.H., Hwang, T.K., Kang, B.C., Kim, H.S. (2018a) Difference in Chemical Composition of PM_{2.5} and Investigation of its Causing Factors between 2013 and 2015 in Air Pollution Intensive Monitoring Stations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 16-37, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.016>
- Yu, G.H., Park, S.S., Park, J.S., Park, S.M., Song, I.H., Oh, J., Shin, H.J., Lee, M.D., Lim, H.B., Kim, H.W., Choi, J.Y. (2018b) Pollution Characteristics of PM_{2.5} Observed during Winter and Summer in Baengryeongdo and Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 38-55, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.038>
- Yu, T.Y., Chang, I.C. (2006) Spatiotemporal features of severe air pollution in northern Taiwan, *Environmental Science and Pollution Research (International)*, 13(4), 268-275. <https://doi.org/10.1065/espr2005.12.288>

Authors Information

김창혁 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(kimchanghyeok@korea.kr)

김정호 ((주)한국환경과학연구소 부설연구소 연구소장)
(jeonghoflux@naver.com)

황규철 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(kchwang@cni.re.kr)

김필호 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(blackkph@korea.kr)

신수현 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(ssh755@korea.kr)

박종성 (국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구사)
(psofc@korea.kr)

박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(psc89@cni.re.kr)

이가혜 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)
(gahya1129@cni.re.kr)

이재영 (아주대 환경안전공학과 교수)
(jaylee@ajou.ac.kr)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)