

논문

충남 내 지역별 PM_{2.5}의 화학적 특성 분석

Analysis of Chemical Characteristics of PM_{2.5} by Region in Chungnam

황규철, 박세찬, 이가혜, 노수진¹⁾, 김정호²⁾, 이재영³⁾, 박종성⁴⁾, 김종범*

충남연구원 서해안기후환경연구소, ¹⁾대림대학교 보건안전학과,

²⁾(주)미세먼지연구소, ³⁾아주대학교 환경안전공학과, ⁴⁾국립환경과학원 대기환경연구과

Kyuchool Hwang, Sechan Park, Gahye Lee, Sujin Noh¹⁾, Jeongho Kim²⁾,
Jae Young Lee³⁾, Jong-Sung Park⁴⁾, Jong Bum Kim*

Seohaeen Research Institute, Chungnam Institute, Hongseong, Republic of Korea

¹⁾Department of Health & Safety, Dealim University, Anyang, Republic of Korea

²⁾Fine Particle Lab CO., Ltd., Incheon, Republic of Korea

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

⁴⁾Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2023년 8월 11일

수정일 2023년 9월 13일

채택일 2023년 9월 18일

Received 11 August 2023

Revised 13 September 2023

Accepted 18 September 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-630-3924

E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Abstract In a national effort to enhance air quality, 923 air quality monitoring stations (AQMS) have been set up nationwide. However, AQMS measure only six pollutants (SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, CO, and O₃). To understand regional PM_{2.5} traits, it's effective to analyze its chemical composition. Our research centers on the Chungnam region, where four sites (Pado, Seonghwang, Songsan, and Sagok) conduct near real-time PM_{2.5} chemical measurements. Using 2021 data, we analyzed annual and seasonal averages for each site. Across these sites, emissions of organic carbon (OC), nitrate (NO₃⁻), and sulfate (SO₄²⁻) were predominant. SO₄²⁻ levels rose in summer, while NO₃⁻ increased in winter, displaying a typical trend. During the study period, three cases of high and low PM_{2.5} concentrations were selected for back-trajectories analysis. For high concentration cases, ion components exhibited higher proportions, whereas in low concentration cases, the proportion of OC increased, and NO₃⁻ proportions significantly decreased. To comprehend regional emission characteristics, national emission inventory data was analyzed. While NO_x and CO emissions were dominant in most areas, Seonghwang region stood out with VOC emissions predominantly influenced by organic solvents. Chungnam, although currently classified as part of the central region, is actively pursuing air quality enhancement initiatives under a standardized policy framework. Nevertheless, based on the insights gleaned from this study, there is a compelling case for the introduction of region-specific policies to yield more effective outcomes. This underscores the need to tailor air quality improvement strategies according to the unique emission profiles and characteristics of individual regions.

Key words: PM_{2.5}, Air quality, Chuncheongnam-do (Chungnam), Chemical composition, Emission

1. 서론

충청남도는 주풍이 북풍 또는 북서풍인 지역적 특성으로 중국 등으로부터 유입되는 장거리 이동 오염 물질에 대해 직접적인 영향을 받고 있으며(Oh, 2007), 지역 내 다양한 대기오염 배출시설이 위치해 있어 대

기오염 관리에 대한 관심이 높은 지역이다(Kim *et al.*, 2021a). 또한 전국 3대 석유화학단지인 울산, 여수와 함께 대산석유화학단지와 3대 제철소로 꼽히는 포항, 광양과 함께 당진 제철소가 위치해 있으며, 2023년 기준 전국에서 운영 중인 60기 석탄화력발전소 중 당진과 태안, 보령, 서천에 29기가 운영되고 있다(Kim

et al., 2020). 지리적으로는 북쪽으로 경기도 및 서울과 인접해 있고, 내륙쪽으로는 충청북도 및 전라북도와 접해 있다. 이러한 이유로 내부적으로 대형배출시설들에 의한 영향을 크게 받을 뿐만 아니라, 인근 지역으로의 영향도 미치는 것으로 보고되고 있다(Gong *et al.*, 2021).

대기 중으로 배출된 오염물질은 배출특성에 따라 점, 선, 면오염원으로 분류되며, 그 중 점오염원은 면, 선 오염원에 비해 좁은 면적에 다량의 오염물질이 배출된다는 측면에서 주요 관리오염원으로 구분된다(Jeon and Lee, 2015). 이러한 이유로 정부에서는 각 지역에서 위치한 배출원에 대한 관리 정책을 수립하여 추진하고 있으며, 개선정책 추진시에도 배출량을 근거로 삭감량을 산정하기도 한다(Park *et al.*, 2023). 하지만 최근에는 배출량 기준관리에서 농도기준 관리로의 전환이 진행되고 있다(Yoo, 2022). 오염원으로부터 배출된 오염물질은 주변의 지형, 기상조건에 따라 확산·희석되어 없어지기도 하지만 장거리 이동을 통해 다양한 지역의 환경에 악영향을 미치기도 한다(Xu *et al.*, 2021). 그 지역의 주민들이 받는 피해는 배출원에서 배출되는 오염물질에 기인하기는 하지만 결과적으로는 다양한 요인에 의해 희석 및 확산된 최종적인 결과물인 농도에 의해 영향을 받기 때문이다.

Kang *et al.* (2021)은 국가대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS)의 배출 목록을 기반으로 배출부문별 광역 지자체의 초미세먼지(particulate matter less than 2.5 μm , $\text{PM}_{2.5}$)의 영향을 분석하여 제시하였고, Moon *et al.* (2021)은 각 오염물질별로 지자체별 기여도와 전환율을 산정하여 보고였다. 이외에도 전국의 지자체별 $\text{PM}_{2.5}$ 에 기여도 분석을 위한 연구가 다수 수행되었다(Bae *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021b; Son *et al.*, 2021; You *et al.*, 2020; Ju *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017).

한편 환경부에서는 대기질 개선정책의 추진 경과 분석과 지역 대기질 현황파악을 위해 대기환경측정망을 설치하여 1998년부터 정보를 수집하고 있으며, 2023년 1월 기준 전국에 923개소의 측정망이 설치되

어 운영되고 있다(NIER, 2023). 측정망은 크게 일반 대기측정망과 배출원감시측정망, 특수대기측정망 및 장거리성분측정망으로 분류된다. 여기서 도시대기와 도로변, 대기중금속 측정망의 경우 지자체에서 관리하며, 그 외 측정망은 국가에서 운영 중에 있다(NIER, 2022a). 지자체에서 관리하는 측정망의 경우 대기환경정보전법에 따른 환경기준물질 6개 항목(SO_2 , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO , O_3)의 농도만을 측정하고 있어 지역별 미세먼지 특성을 파악하는 데는 어려움이 있다.

이에 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 성분특성 파악을 위해 성분측정망을 확대 중에 있다. 집중측정망으로 분류되는 대기환경연구소는 배경지역인 백령도와 수도권(불광동)을 중심으로 호남권, 중부권 등 10개소가 운영 중에 있다. 연속측정을 통해 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 중량농도와 금속성분, 이온성분 및 탄소성분에 대한 데이터를 시간단위로 생산하고 있으며, 여기서 생산된 자료는 전국에 분포한 각 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 성분조성과 생성특성을 밝히는 연구에 활용되고 있다(Kim *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2022; Ryoo *et al.*, 2022). 하지만 대기환경연구소에 붙여진 수도권, 중부권, 호남권 등의 명칭처럼 대기환경연구소가 각 지역에 대해 대푯값으로 활용되기에는 공간 해상도의 한계가 있다. 이러한 문제점을 보완하고자 $\text{PM}_{2.5}$ 성분측정망이 설립되었다. $\text{PM}_{2.5}$ 성분측정망은 대기오염측정소와 유사한 수준의 정보를 생산하고 있으나 대기환경측정소가 시간단위의 정보를 생산하고 있는 반면, $\text{PM}_{2.5}$ 성분측정망은 6일에 1회 측정, 일평균 데이터를 제공하고 있어 데이터 분석 시 한계로 작용하고 있다(NIER, 2022a). 하지만 공간적인 해상도를 높일 수 있다는 장점으로 지역적 특성 분석에 많이 활용될 수 있다.

충청남도의 면적은 8,246 km^2 로 대한민국 전체 면적의 8.19%를 차지하며, 서울의 13.6배, 대전의 15.3배의 크기이다(KOSIS, 2023). 하지만 면적 대비 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 성분측정 자료는 매우 부족한 실정이다. 서산시에 위치한 충청권 대기환경연구소에서 실시간 자료를 생산하고 있지만 이 자료만으로 충남지역 내 $\text{PM}_{2.5}$ 의 화학조성을 정의하기에는 어려움이 있다. 이를 보완하

기 위해 파도리 측정소를 비롯한 4개 PM_{2.5} 성분측정망이 운영되고 있다. 본 연구에서는 충청남도에 위치한 4개의 PM_{2.5} 성분측정망 자료를 기반으로 충남지역의 지역별 PM_{2.5} 특성을 분석하였다. 향후 본 자료는 충청남도 및 전국의 대기질 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역 선정

충남지역 내 PM_{2.5}의 성분분석을 위해 충남에 위치하고 있는 4개의 PM_{2.5} 성분측정망을 대상으로 선정하였고, 각 측정망의 위치를 그림 1에 나타냈다. 첫 번째 측정소인 파도리 측정소(36°44′17.5″N, 126°8′3.84″E)는 충청남도의 서쪽 끝에 위치해 있으며, 주변 지역에 별다른 배출원이 없는 청정지역이다. 충청남도의 배경농도 측정을 위해 선정된 교외대기 측정망과 동일 지점에서 운영되고 있다. 송산면 측정소(36°58′35.4″N, 126°42′59.0″E)는 충남지역 최대 배출

원으로 알려져 있는 당진 제철소와 약 500 m 이격된 거리에 위치하고 있어 제철소나 제철소로 자재를 운반하는 대형트럭들에 의한 배출영향을 크게 받을 것으로 판단되는 지점이다. 세 번째 지점은 천안시 성황동에 위치해 있는 성황동 측정소(36°48′51.4″N, 126°9′7.56″E)다. 천안시는 2021년도 기준 충남 전체 인구의 31.0%가 거주하고 있는 충남 최대도시로 우측으로는 경부 고속도로가, 좌측으로는 천안아산역을 끼고 있는 인구밀집지역으로 전형적인 도시 형태를 띠고 있다(Chungnam, 2022). 마지막으로 공주에 위치해 있는 사곡면 측정소(36°31′34.7″N, 126°1′51.2″E)는 북쪽으로는 산이 위치해 있고, 정면으로는 논과 밭이 위치해 있는 교외지역의 특징을 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 파도리 측정소를 배경농도 지역, 송산면 측정소를 산업단지, 성황동 측정소를 도심지역, 사곡면 측정소를 교외지역으로 선정하고 자료를 비교 분석하였다.

2.2 PM_{2.5} 성분측정망 자료수집 및 분석

충남지역 내 PM_{2.5}의 화학성분 특성분석을 위해 2021년 1월 1일부터 12월 31일까지 대상기간으로 선



Fig. 1. Location of PM_{2.5} component measurement stations.

정하였다. 전국의 $PM_{2.5}$ 성분측정망은 인적·물적 자원의 한계로, 매일 측정이 불가능하여 6일에 1회 24시간 측정이 이루어지고 있으며, 각 측정 지점별로는 2021년 1년간, 파도리 57일, 송산면 56일, 성황동 42일, 사곡면 49일의 자료가 확보되었다. 선정된 자료는 국립환경과학원의 기준에 따라 분류되었고, “대기환경측정망 설치·운영 지침”에 따라 자료선별 과정을 거쳐 확정된 자료를 대상으로 하였다.

$PM_{2.5}$ 내 유기탄소(organic carbon, OC)와 무기탄소(elementary carbon, EC) 그리고 지각물질(Si, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn; Crustal metal), 미량원소(S, V, Cr, Ni, Cu, As, Se, Br, Ba, Pb; Trace metal), 이온 성분 8종(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})을 대상으로 선정하였다. 이온 성분 중 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 를 제외하면 $PM_{2.5}$ 에 차지하는 비율이 매우 극소량으로 나타나 Other ions로 분류하여 그림 등에 제시하였다. 그리고 $PM_{2.5}$ 의 중량농도에 위 모든 물질의 농도를 뺀 값을 Unidentified로 제시하였다.

측정에 사용된 모든 장비는 On-line 실시간 장비이며, 국립환경과학원의 “대기환경측정망 설치·운영 지침”에 따라 장비의 측정 및 검교정이 실시되었다(NIER, 2023). 측정에 활용된 장비는 탄소성분(SOCEC model5, Sunset), 이온성분(AIM9000D, URG corp.), 지각성분 및 미량원소(XRF625i, Cooper environmental service)이며, 분석기기의 세부 정보와, 측정방법, 정확도 평가 결과는 이전의 연구 결과에서 상세히 기술된 바 있다(Shin *et al.*, 2014).

조사된 결과를 대상으로 고농도 사례와 저농도 사례를 분류하였다. 4개 지점의 비교 분석을 위해 4개 지점의 측정데이터가 확보된 구간을 대상구간으로 선정하였다. 고농도 사례의 경우 측정 결과 중 급격하게 농도상승을 보인 구간을 대상으로 선정하였고, 반대로 저농도 사례는 고농도 사례 이후 급격한 농도감소를 보인 구간으로 선정하였다. 선정된 구간에 대해서는 국내외 영향 분석을 위해 Hysplit 모델을 활용하였다. Hysplit 모델의 경우 미국해양대기청(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)에서 제

공하는 READY(real-time environmental applications and display system)를 활용하였고, 기상모델에 적용된 기상장은 GDAS(global data assimilation system)를 이용하였다(Lee *et al.*, 2014). 관측 기간 동안 고농도와 저농도 사례 총 6개에 대해 분석을 실시하였다. 일별로 고농도 발생 당일 00시를 기준으로 48시간 역궤적 분석을 실시하였으며, 고도는 500m를 대상으로 계산된 결과를 활용하여 군집분석을 실시하였다.

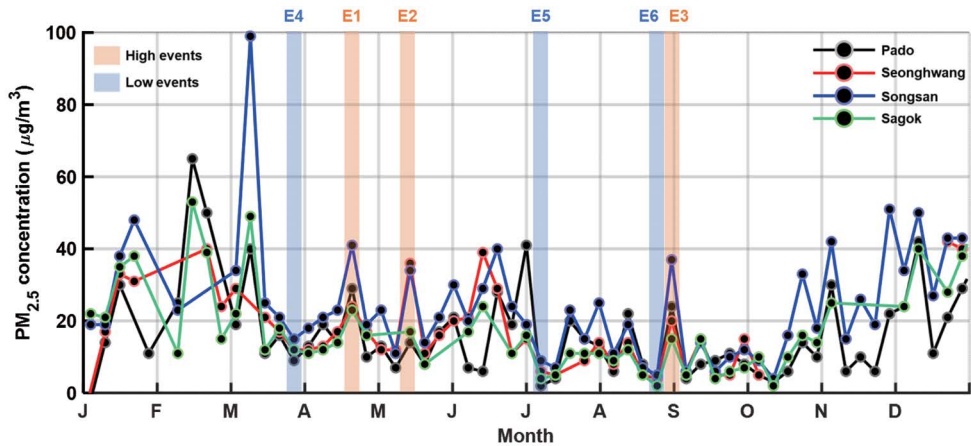
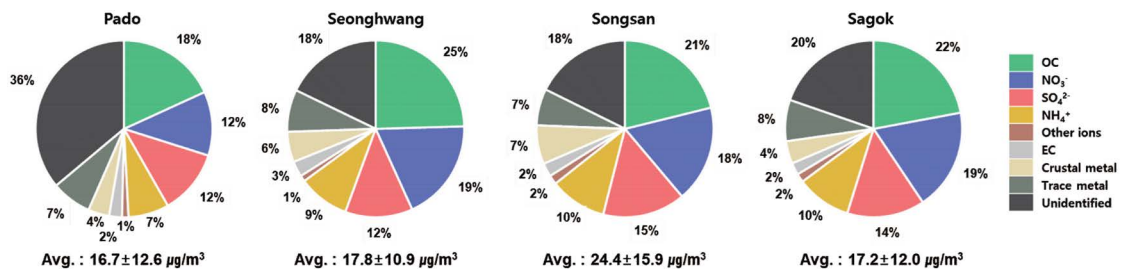
2.3 지역별 배출량 자료조사

지역의 농도는 국지적으로 생산된 오염물질과 국외로부터 유입된 오염물질의 물리화학적 반응과 생성·소멸 과정을 거쳐 영향을 미치게 된다(Panagi *et al.*, 2020). 중국 등으로부터 유입된 오염물질의 충남지역 내 영향을 배제하면, 각 지역의 $PM_{2.5}$ 화학조성은 국지적 배출원의 영향이 지배적일 것이다. 충남 지역 내 $PM_{2.5}$ 성분측정망은 서로 상이한 환경조건을 가지고 있다. 이에 각 지역적 배출특성을 비교하기 위해 CAPSS 배출량 자료를 이용하였다. CAPSS는 국가미세먼지정보센터에서 고시한 2020년 자료를 활용하였으며, 본 자료는 기존의 version 5보다 개선된 자료를 기반으로 산정된 자료이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지역별 $PM_{2.5}$ 농도 변화특성

그림 2의 (a)는 충남 내 위치하고 있는 4개의 $PM_{2.5}$ 성분측정망에서 2021년 1년간 측정된 농도이고, (b)는 각 지역에서 동일 기간 측정된 $PM_{2.5}$ 의 화학조성을 나타낸 것이다. 연 평균농도는 송산면이 $24.4 \pm 15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 성황동과 사곡면, 파도리는 각각 $17.8 \pm 10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $17.2 \pm 12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $16.7 \pm 12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 유사한 수준을 보였다. 송산면에서 측정된 최대농도는 3월 10일 $99.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 파도리는 2월 14일 $65.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 사곡면 $53.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 성황동은 12월 23일 $41.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 확인되었다.

(a) Time-series concentration change of PM_{2.5} measured in each station(b) Chemical composition of PM_{2.5} measured at each siteFig. 2. Time series and average chemical composition of PM_{2.5} measured each station.

파도리의 경우 Unidentified를 제외하면, OC가 18.2%로 가장 높게 나타났고, SO₄²⁻, NO₃⁻가 각각 11.9%, 11.7%로 나타났다. 성황동 역시 OC가 24.5%로 가장 높은 비율을 보였고, NO₃⁻ 18.7%로 높게 나타났다. 그 뒤로는 SO₄²⁻ 12.3%, NH₄⁺ 9.4% 순으로 확인되었다. 송산면과 사곡면 역시 OC가 각각 21.1%와 22.1%로 가장 높은 비율을 보였으며, 그 다음 순위도 송산면 NO₃⁻ 17.7%, SO₄²⁻ 15.1%, NH₄⁺ 10.4%, 사곡면 NO₃⁻ 18.5%, SO₄²⁻ 14.2%, NH₄⁺ 10.0%로 유사한 비율을 보였다. 4곳 모두 OC의 비율이 18.2~24.5%로 차이는 있지만 가장 높게 나타났고, 파도리를 제외한 3곳에서는 NO₃⁻이 높은 비율을 보였다. NH₄⁺은 4개 모두에서 7.4~10.4% 수준을 나타냈다. NIER (2022b)에 따르면 2021년도 충남 서산(충청권 대기환경연구소)에서 조사된 PM_{2.5}의 화학성분은 OC가 22.7%로 가장

높은 비율을 보였고, 그 뒤를 이어 NO₃⁻ 19.3%, NH₄⁺ 10.0%, SO₄²⁻ 7.8%, 중금속 (Crustal + Trace metal) 6.5% 순으로 나타났다. 전반적으로 OC와 NO₃⁻의 비율이 높게 나타났으며, 서산을 제외한 4곳 모두에서 중금속의 농도가 높게 나타났다. EC의 경우 2.2~2.9% 수준을 유지하는 것으로 나타났고, 서산 역시 2.5%로 유사한 수준으로 확인되었다.

3.2 계절별 농도 및 화학조성 변화

그림 3은 PM_{2.5} 성분측정망 4곳의 계절별 농도와 동일 기간의 화학성분을 나타낸 것이다. 계절은 봄 (3~5월), 여름 (6~8월), 가을 (9~11월), 겨울 (12~2월)로 구분하여 평균값으로 제시하였다. 파도리의 경우 겨울 농도가 29.3 ± 17.0 µg/m³로 가장 높게 나타났고, 봄 15.9 ± 8.6 µg/m³, 여름 15.0 ± 10.8 µg/m³, 가을

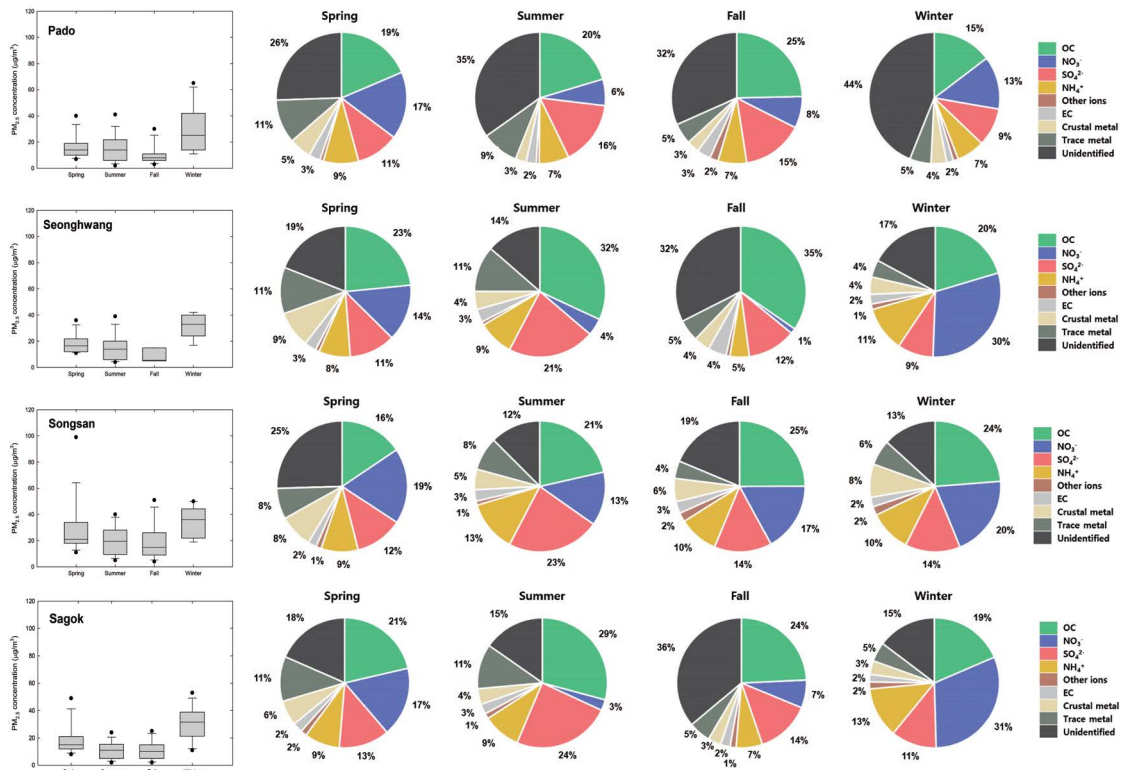


Fig. 3. Seasonal PM_{2.5} concentration and chemical composition measured each station.

10.1±7.2 µg/m³ 순으로 나타나 겨울철이 다른 계절 대비 1.8~2.9배 높은 수준을 보였으며, 편차도 가장 큰 것으로 나타났다. 화학성분은 Unidentified를 제외하면 모든 계절에서 OC가 14.7~24.7%로 가장 높은 비율을 보였고, 중금속은 지각물질과 미량원소 모두 봄철에 가장 높았다(10.8%, 5.5%). 지각물질은 여름철이 가장 낮은 비율을(2.7%) 보였고, 미량원소는 가을철에 가장 낮은 비율이 나타났다(5.2%). NO₃⁻는 계절별로 봄과 겨울에 16.6%와 13.1%로 높은 비율을 보였으나 가을과 여름에는 각각 7.8%와 6.5%로 계절 간 편차가 크게 나타났다. SO₄²⁻ 또한 NO₃⁻과 마찬가지로 계절별 편차가 큰 것으로 확인되었고(9.5~15.9%), NH₄⁺의 경우 다른 물질 대비 상대적으로 유사한 비율(6.9~8.8%)을 보였다.

성황동 역시 겨울 농도가 32.4±9.3 µg/m³로 가장

높은 농도를 보였고, 봄 17.8±7.4 µg/m³, 여름 14.7±9.9 µg/m³, 가을 8.5±5.1 µg/m³로 나타났다. 4개 측정 지점 중 가장 적은 편차를 보였지만 반대로 최대/최소 농도는 1.8~3.8배로 가장 큰 차이를 보였다. 화학성분의 경우 가을에 OC의 비율이 34.6%로 압도적으로 높은 비율을 보였고, SO₄²⁻ 11.9%, 미량원소 5.4%, NH₄⁺ 4.8%, EC 4.5%로 타 지역이나 계절과 상이한 구성을 보였다. 겨울에는 NO₃⁻의 비율이 30.2%로 가장 높은 비율을 보였고, OC 20.4%, NH₄⁺ 11.2%, SO₄²⁻ 8.9%, 미량원소 4.3%, 지각물질 4.3% 순으로 나타났다. 봄에는 OC 23.4% > NO₃⁻ 14.0% > SO₄²⁻ 11.3% > 미량원소 11.5% > 지각물질 9.1% > NH₄⁺ 7.8%였고, 여름에는 OC 32.0% > SO₄²⁻ 21.5% > 미량원소 11.4% > 지각물질 4.5% > NH₄⁺ 8.8% > NO₃⁻ 4.3%로 나타났다. 대부분 OC의 비율이 높게 나타났으며, 그 중 가장 높게 나

탄안 가을의 경우 절대적인 농도가 낮게 나타나면서 이온성분($1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 중금속성분($0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 절대적인 농도가 함께 낮아지면서 상대적으로 다른 계절 대비 낮은 OC의 농도($2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에도 불구하고 비율이 높게 나타났다.

산업단지 바로 앞에 위치하고 있는 환경적 특성상 송산면의 절대적인 농도가 가장 높게 나타났다. 겨울이 $34.4 \pm 11.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4개 지점의 계절별 평균농도 중 가장 높은 수치를 보였고, 봄 $27.9 \pm 21.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 $20.0 \pm 10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 $18.7 \pm 13.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모든 계절에서 가장 높은 농도를 보였다. 특히 봄의 경우 파도리에 비해 $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 수치를 보였고, 성황동과 사곡면 대비 $10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 것으로 확인되었다. 가장 낮은 농도를 나타낸 가을에는 타 3개 지역보다 $8.4 \sim 10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 수치를 보였다. 이는 송산면의 경우 계절별 특징에 따른 농도 차이를 보이긴 하지만 지역적인 특성상 바로 앞에 위치한 산업단지의 영향으로 기저농도(baseline)가 타 지역 대비 높기 때문이다. 화학성분의 경우 봄에는 NO_3^- 이 18.7%로 가장 높은 비율을 보였고, OC 15.5%, SO_4^{2-} 11.8%, NH_4^+ 9.2%로 나타났다. 여름, 가을, 겨울의 경우 OC가 각각 21.5%, 24.9%, 23.6%로 높은 비율을 보였고, 여름엔 SO_4^{2-} $22.9\% > \text{NO}_3^-$ $13.3\% > \text{NH}_4^+$ 12.7% , 가을 NO_3^- $17.1\% > \text{SO}_4^{2-}$ $14.2\% > \text{NH}_4^+$ 9.8% , 겨울 NO_3^- $20.1\% > \text{SO}_4^{2-}$ $13.6\% > \text{NH}_4^+$ 10.4% 로 나타났다. OC가 계절별로 가장 높은 비율을 차지한 것 외에는 4계절 모두에서 서로 상이한 구성 비율을 보였다. 제철소 바로 앞에 위치하다보니 송산면 측정소의 중금속 연 평균농도가 $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 파도리 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 성황동 $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 사곡면 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 수준을 보였으며, NH_4^+ 역시 $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 타 지역($1.3 \sim 1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높은 수준을 보였다. NH_4^+ 의 농도 수준은 대기 중 NH_3 배출에 영향을 받으며, 송산면 측정소의 경우 제철소의 생산 공정 배출 부문에 의해 농도가 상승한 것으로 나타나며, 3.4절의 지역별 대기오염물질 배출특성에서 송산면 지역의 배출량 비율이 다른 지역에 비해 생산공정 부문이 높은 비율로 차지하는 것으로 나타난다(Choi

et al., 2022).

사곡면 역시 겨울이 $30.3 \pm 12.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 봄 $17.8 \pm 10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 $10.9 \pm 5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 $10.4 \pm 6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 이는 배경지역인 파도리에 비해 소폭 낮은 농도로 별다른 배출원이 없는 교외지역 특성상 거의 유사한 수준을 보였으며, 여름철에는 파도리($15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮은 $10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. 화학조성은 여름과 가을의 경우 OC가 각각 29.2%와 24.3%로 가장 높은 비율을 보인 반면 겨울에는 NO_3^- 가 31.0%로 가장 높은 비율을 보였다. 봄 역시 OC가 21.4%로 가장 높은 비율을 보였고, NO_3^- 가 17.3%로 뒤를 이었다.

지각물질의 경우 전반적으로 황사의 영향이 크게 나타나는 봄에 농도가 높게 나타나는 경향이 있으나 상대적으로 농도가 가장 낮은 가을철에도 높게 나타났다. NO_3^- 은 4개 지점에서 겨울이 $3.9 \sim 9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보이며, 가을에 $0.1 \sim 3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 보였다. SO_4^{2-} 은 겨울과 여름에 높은 경향을 보이는데 파도리와 사곡면은 겨울철에 각각 $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보이는 반면, 성황동과 송산면은 여름에 $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보여 지역적 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. NH_4^+ 은 4개 측정소 모두에서 겨울 > 봄 > 여름 > 가을의 순서를 보였으며, 겨울의 농도가 $2.1 \sim 3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타난 가을의 $0.3 \sim 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 최대 12.7배나 높은 수준으로 확인되었다. EC는 연평균 $0.4 \sim 0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대부분의 지역에서 유사한 수준을 보였으며, OC는 송산면이 $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고, 성황동 $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 사곡면 $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 파도리 $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다.

3.3 농도변화에 따른 화학조성 변화

그림 4와 5는 2021년 기준 4개 지점에서 측정된 데이터를 기반으로 고농도와 저농도 사례를 각각 3개씩 선정한 결과이다. 고농도와 저농도 사례 선정시 4개 측정지점에서 모두 데이터가 확보된 일자를 대상으로 하였으며, 고농도는 4월 21일, 5월 15일, 8월 31일, 저

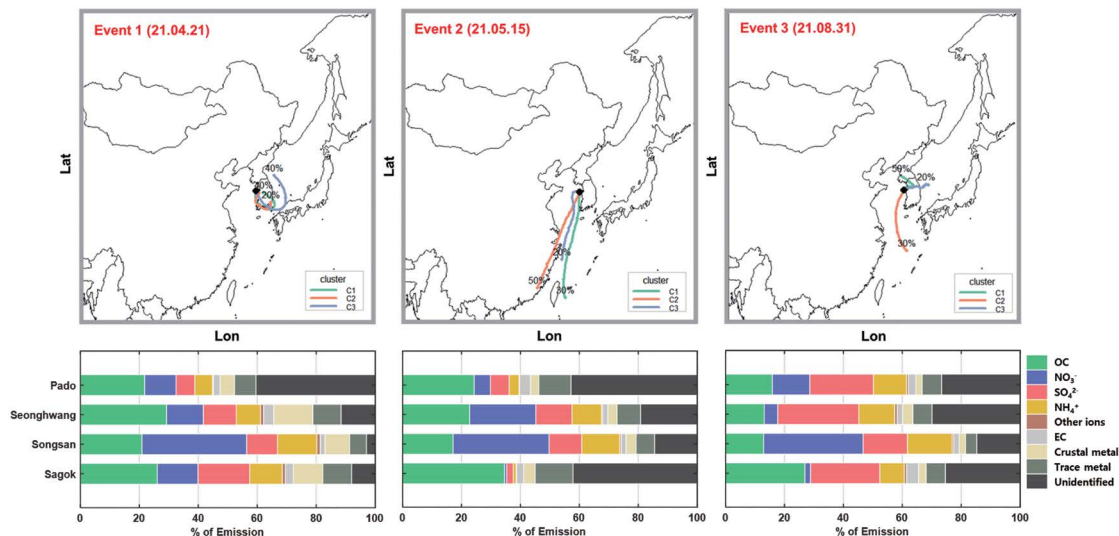


Fig. 4. Cluster analysis of back-trajectories (upper panel) and $PM_{2.5}$ chemical composition (lower panel) during high concentration events.

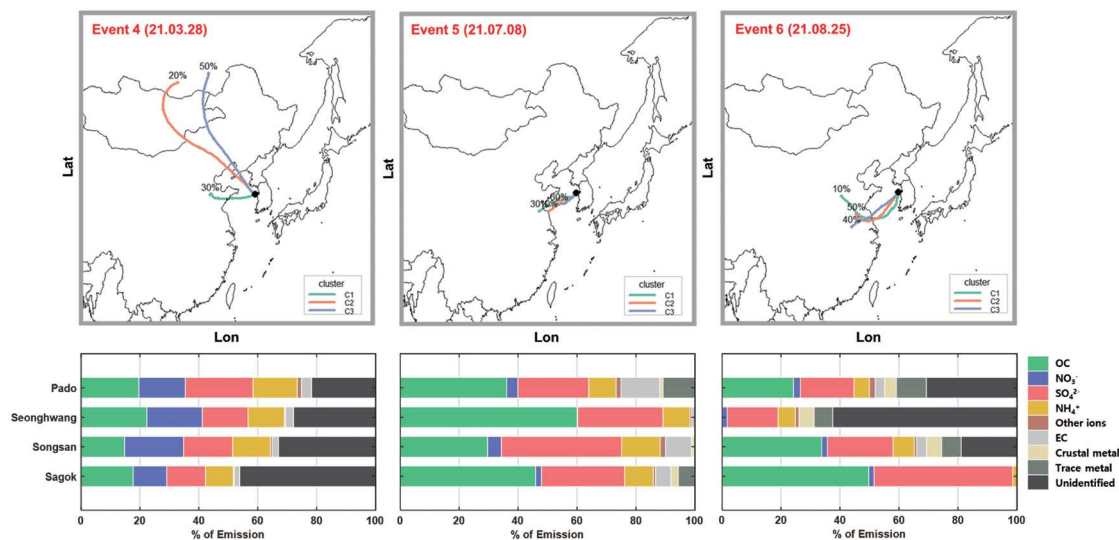


Fig. 5. Cluster analysis of back-trajectories (upper panel) and $PM_{2.5}$ chemical composition (lower panel) during low concentration events.

농도는 3월 28일, 7월 8일, 8월 25일이 선정되었다. 고농도 기간 3일의 4개 지역 평균농도는 각각 $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $21.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 저농도 기간 평균농도는 $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 저농도

대비 고농도 사례 시 농도가 약 3.5배 높게 나타났다. 지역별로는 파도리가 고농도 $20.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 저농도 $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 저농도 대비 고농도의 농도비가 4.4배 가장 높게 나타났고, 성황동의 경우 고농도 $23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 저

농도 7.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 3.2배 높게 나타났다. 송산면의 경우 고농도와 저농도의 평균농도가 각각 33.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 9.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 농도가 차이가 3.7배로 높게 나타났고, 사곡면은 각각 16.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 적은 2.7배의 차이를 보였다.

클러스터 분석에서 고농도 사례의 4월 21일의 경우 동해안을 거쳐 동남 및 동쪽 영향을 받은 것으로 나타났다으며, 5월 15일은 중국 푸젠성과 저장성, 광둥성을 거쳐 넘어오는 것으로 확인되었다. 첫 번째 이벤트는 동부 및 동남권 중 광양, 여수 등 고농도 배출지역의 오염원을 포함한 기류가 상승하면서 나타난 결과로 풀이되며, 두 번째 이벤트는 2008년 베이징 올림픽을 기점으로 중국 내륙 내 배출시설을 중국 동남쪽에 위치한 서해안으로 이주시켰고, 그 결과 이 지역을 거쳐 오는 기류가 포착되면 고농도 사례가 자주 보고되고 있다(Park 2014; Song *et al.*, 2009). 마지막 세 번째는 강원도를 포함한 경기 동부권을 경유한 기류와 북쪽에서 기인한 기류의 영향이 주로 영향을 미치고 있다. 북한의 경우 국내 에너지 생산량의 1/10 수준에 불과하나 배출시설 등의 부재로 전체적인 배출량은 국내 수준과 유사한 수준이고, 특히 중심주인 평양 인근에 발전시설들이 많이 위치해 있어 여기서 배출된 오염물질의 영향이 일부 작용했을 것으로 예측된다(Lee *et al.*, 2021; Yeo *et al.*, 2019). 본 연구의 관측지역은 지리적으로 인접해 있는 지역으로, 외부 유입이 지배적이면 공통적인 공기 플룸(Air plume)의 영향을 받을 것으로 예측된다. 하지만 각 고농도 사례에서 네 지역은 다양한 PM_{2.5} 화학 성분 분포를 나타낸다. 이는 고농도 사례 동안 역격적 분석을 통해 외부에 의한 유입이 일부 작용한 것을 확인할 수 있었으나, 세부 지점별로는 지역 배출원의 영향이 크며 내부 요인과 외부 요인이 혼재되어 있을 것으로 분석된다.

오염물질별 비율은 봄에 해당되는 첫 번째, 두 번째 이벤트에서 OC가 24.5~24.7%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 그 뒤로 NO₃⁻ 15.3~18.1%, SO₄²⁻ 8.0~11.4% 순으로 나타났다. 하지만 여름철에 해당하는 세 번째 이벤트에서는 SO₄²⁻가 21.9%로 가장 높은 비율을 보

였고, OC 17.2%, NO₃⁻ 13.3%, NH₄⁺ 11.7% 순으로 나타났다. 선행 연구에 따르면 계절별 화학조성 중 여름철 SO₄²⁻의 비율이 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 한반도 전역에 걸쳐 나타나는 특징으로 판단된다(Kim *et al.*, 2023). 농도가 낮게 나타난 네 번째 이벤트는 중국 내몽골로부터 유입되는 기류가 주류인 것으로 나타났고, 그 외 다섯 번째와 여섯 번째 경우는 산둥성과 장쑤성 지역에서 기인한 기류의 영향이 주류인 것으로 확인되었다. 우리나라의 연간 농도변화 특성상 3월은 농도가 가장 높은 달에 해당하며, 7월과 8월은 9월을 제외하고는 농도가 가장 낮은 월로 분류된다(NIER, 2022b). 3월의 경우 전날 34.4 mm의 강수량을 기록하여 강우의 세정효과로 농도가 낮은 수준을 보인 것으로 판단되며, 7월과 8월의 경우 측정 당일 높은 강수량을 보이지는 않지만 여름철 하상계수가 높고, 혼합도가 발달하여 확산·희석효과가 높아지면서 나타난 결과로 판단된다(KMA, 2021). 오염물질별 비율은 네 번째 이벤트의 경우 OC 18.6%, SO₄²⁻ 17.1%, NO₃⁻ 16.5%, NH₄⁺ 12.4% 순으로 나타났다.

화학적 조성비는 앞서 첫 번째 고농도 이벤트와 유사한 패턴을 보이지만 첫 번째 경우 동해와 내륙지역의 영향을 받는 반면, 네 번째 이벤트의 경우는 중국 내 몽골 등의 황사 발원지에서 기인하다보니 낮은 농도에도 불구하고 Unidentified의 비율이 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 측정되지 않은 지각물질과 미량 원소의 비율이 높아져 비율이 높아졌을 것으로 분석된다. 중국 본토의 영향을 받은 다섯 번째와 여섯 번째 이벤트는 OC가 42.9%, 27.0%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 그 뒤를 이어 SO₄²⁻ 30.5%, 26.2%, NH₄⁺ 10.3%, 8.9% 순으로 동일 기간대인 두 번째, 세 번째 이벤트의 경우와는 다른 비율을 보였다. 본 연구 결과에서 고농도 및 저농도의 화학조성 분석 결과 전반적으로 한반도 전역에 걸쳐 계절적 및 지역별 특성을 반영하고 있지만 일부 사례에서는 발원지의 영향이 일부 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 한반도 내 대기질 관리를 위해서는 국내 배출원뿐만 아니라 중국 등 국외로부터 유입되는 영향을 고려하지 않

는다면 국내 대기질 개선이 어렵다는 것을 의미한다.

3.4 지역별 대기오염물질 배출특성

대기질 개선을 위해서는 지역적 특성 파악이 필요하다. 배출원 관점에서 크게 국외유입과 국내배출로 분류할 수 있는데 국외유입의 경우 대기화학 모델링을 통해 그 지역에 대한 기여도를 파악하는 데는 효과적이지만, 즉각적인 개선을 위한 조치는 어렵다. 국외유입을 제외하고 국지적인 영향은 대부분 그 지역에 대한 배출원 관리가 주가 된다. 배출원에서 배출된 오염물질은 주변지형과 기상조건 그리고 인위적인 개선 정책에 따라 농도수준이 결정되어 지역에 영향을 미친다. 앞서 충남지역 내 운영되고 있는 4개 PM_{2.5} 성분측정망에 대해서 배경지역(파도리)과 도심지역(성황동), 산업단지(송산면) 그리고 교외지역(사곡면)으로 분류하였고, 지역별 PM_{2.5}의 화학조성을 분석하였다. 그리고 본 장에서는 이들 화학조성에 큰 영향을 미치는 것이 지역적 배출원에 대해 CAPSS를 기반으로 분석하였다. 그림 6은 본 연구의 대상지역으로 선정된 4개 시군의 대기오염물질 배출량을 2020년 기준

부문별, 오염물질별로 나타낸 것이다.

태안(파도리)의 경우 에너지 산업연소가 58.0%로 가장 높은 비율을 보이고 있으며, 그 뒤를 이어 생물성 연소 10.4%, 생산공정 10.3%로 상위 3개 항목이 전체 배출량의 78.7%를 차지하는 것을 볼 수 있다. 오염물질 역시 에너지 산업연소와 생산공정에서 다수 배출되는 CO와 SO_x, NO_x의 비중이 매우 높게 나타났다. 다시 말해 이들 3개 부문의 배출원을 제거한다면 지역적인 대기오염원을 제어할 수 있다. 파도리 측정소가 위치한 곳은 태안반도 서남쪽 끝으로 에너지 산업연소가 이뤄지고 있는 석탄 화력발전소와는 20 km 이상 이격되어 있으며, 북서풍과 서풍이 주풍인 지역적인 특성으로 석탄화력발전소의 영향을 크게 받기에는 어렵다. 생산공정 또한 태안의 중심인 군청을 중심으로 북서쪽에 대부분 위치해 있어 파도리 측정소에 높은 수준의 영향을 미치긴 어려울 것으로 판단된다. 이러한 특성으로 에너지 산업연소와 생산공정의 일부 영향과 생물성연소와 농업, 비산먼지의 영향이 크게 작용할 것으로 판단된다. 본 연구 결과에서도 OC의 비율이 가장 크게 나타나며, 농업 기반의 NH₄⁺ 역시

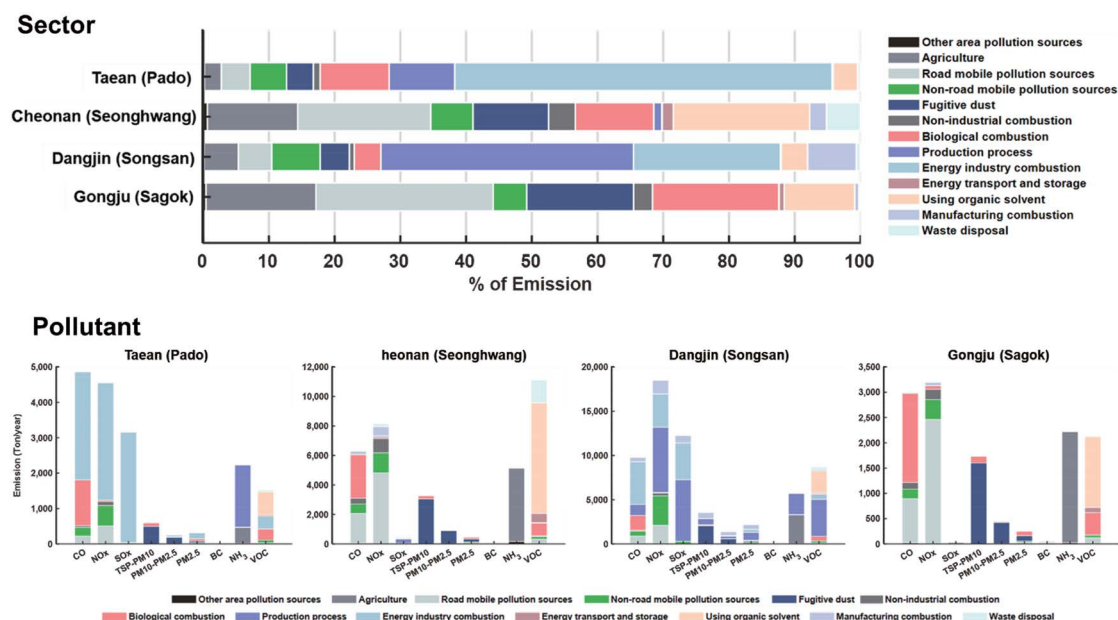


Fig. 6. Air pollutant emissions and ratios according to sector and pollutant in 4 cities.

높은 비중을 나타낸 것으로 보인다. 중금속 성분 중에서는 S와 Si가 전체 중금속의 73.1~82.6%로 나타났는데 수용모델 분류표에서 S는 석탄연소의 지시자로, Si는 토양과 비산먼지의 지시자로 활용되고 있는 만큼 파도리 측정소의 화학성분 조성은 지역적 특성이 반영된 결과로 해석된다(NIER, 2021).

천안(성황동)은 충남의 최대도시로 도시와 농촌의 특성이 혼재된 상태의 배출경향을 보인다. 도로 이동 오염원이 28.2%로 가장 높은 비율을 보이고, 생물성 연소 19.5%, 농업 17.7%, 비산먼지 12.9%, 에너지수송 및 저장 11.3%로 상위 5개 부문에서 전체 배출량의 89.6%를 차지한다. 오염물질은 VOC의 배출량이 가장 크고, 그 뒤를 이어 NO_x, CO, NH₃, TSP 순이다. 도로이동오염원에서 NO_x와 CO, VOCs가 주로 배출되고, 생물성연소와 농업, 비산먼지에서 NH₃, CO, TSP의 배출 비중이 클 것으로 예상된다. 천안의 경우 OC와 NH₄⁺의 비중이 높게 나타나는데 두 물질은 생물성연소의 지표물질로 사용되며, 특히 OC는 가솔린 자동차와 석탄연소, 생물성연소 등의 지표이고, 천안에서 높게 나타난 Ca, Fe, Zn 등의 중금속은 자동차 관련 지표(브레이크 마모, 자동차 머플러)로 도시지역의 특성을 반영한 결과로 판단된다.

당진(송산면)은 충남 최대 배출지역으로 충남의 3대 대형배출시설인 석탄화력발전소, 제철소, 석유화학단지 중 석탄화력발전소와 제철소가 위치해 있다. 특히 송산면은 제철소 바로 앞 풍하지역에 위치해 있어 지역적으로 가장 높은 농도를 나타내는 곳이다(Kim *et al.*, 2020). 전체적인 배출량 측면에서도 2020년 충청남도 배출량 기준 19.7%로 서산의 22.2%에 이어 2위의 배출량을 보이고 있으며, 절대적인 배출량 측면에서도 천안의 1.7배, 태안의 3.5배, 공주의 4.8배 등 매우 높은 수준이다. 부문별로는 생산공정이 38.8%로 가장 높고, 그 뒤를 이어 에너지 산업연소 23.0%, 비도로오염원 7.5%, 유기용제 사용 6.2%, 농업 5.6% 등으로 확인되었다. 오염물질별로는 NO_x가 가장 많은 배출량을 보이고, SO_x, CO, VOCs, NH₃ 등의 순서로 나타나 전형적인 연소와 산업설비에 의한 배

출 기여도가 높게 나타났다. 제철소 바로 앞에 위치하다보니 다른 지역 대비 중금속의 비율이 높게(12.0~20.9%) 나타났고, 상대적으로 OC의 비율이 낮게 나타났다. 중금속의 비율에서도 S, K, Ca, Mn, Zn, Pb, Cr 등의 지각물질의 비율이 타 지역보다 높게 나타났는데, 이들은 석탄연소와 금속산업 분야의 지표물질로 주변 배출원의 영향이 반영된 결과로 판단된다.

공주(사곡면)는 다른 3개 도시들 중에서 대기오염물질의 배출량이 가장 적다. 배출원 비율을 보면 도로 오염원이 28.2%로 가장 큰 비율을 차지하며, 생물성 연소 19.5%, 농업 17.7%, 비산먼지 12.9%, 에너지수송 및 저장 11.3% 등 도농 복합도시적인 배출특성을 보인다. 오염물질별로는 NO_x와 CO, NH₃, VOCs, TSP의 비중이 높게 나타난다. NO_x와 CO, VOCs의 경우 도로오염원 및 생활배출원에 의한 것이며, NH₃와 TSP는 농업과 비산먼지의 영향이 클 것으로 예상된다. PM_{2.5} 성분측정 결과에서도 다른 곳에 비해 유독 NH₄⁺의 비중이 높게 나타났으며, OC의 경우 봄~가을에 비중이 높은 반면 겨울에 비중이 상대적으로 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 배출량 부문에서 농업과 비산먼지, 생물성연소의 영향이 큰 것으로 나타난 만큼 이들에 의한 배출이 높은 계절에 비율이 증가되는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 OC의 비율이 줄어든 겨울에 NO₃⁻와 Cl⁻의 비중이 높아지면서 NO₃⁻ 풍족(Rich) 상태로 전환된 것을 볼 수 있다. Hristova *et al.* (2020)에 따르면 주로 겨울철에 풍족(Rich) 상태가 주로 나타나며, 이는 주변에 있는 화력발전이나 산업배출에서 주로 기인한다고 보고하였다. 지역배출특성의 경우 도농특성을 보이는 반면, 측정 결과에서는 계절적으로 주변 지역에 위치한 산업단지의 영향이 미치고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

전국적으로 증가하고 있는 고농도 미세먼지 사례를 관리하기 위해 정부차원의 대기질 개선정책이 수립되

어 추진되고 있으며, 그동안 수도권을 중심으로 진행되던 개선대책이 전국으로 확대되어 진행되고 있다. 하지만 장기적으로 연구와 개선대책이 추진된 수도권과 달리 그 외 지역에 대해서는 지역적 특성 분석도 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 충남은 대단위 인구가 밀집되어 있는 수도권과 인접해 있고, 석탄 화력발전소를 포함하여 제철소, 석유화학단지 등 대형 배출시설이 위치해 있어 지역 대기질 관리가 중요한 지점이다. 하지만 인력 및 인프라 부족으로 지역적 특성 분석에 많은 어려움이 있었다. 이에 본 연구에서는 충남지역 내 위치한 $PM_{2.5}$ 성분측정망 자료를 바탕으로 지역적 특성을 분석하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 충남 내 위치한 4개 $PM_{2.5}$ 성분측정망을 대상으로 2021년 기준 농도를 검토한 결과 제철소 바로 앞에 위치하고 있는 송산면이 $24.4 \pm 15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 도심지역에 위치한 성황동 $17.8 \pm 10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 교외지역인 사곡면 $17.2 \pm 12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 배령지역인 파도리가 $16.7 \pm 12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 계절별로는 겨울이 $31.4 \pm 12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 봄 $20.1 \pm 14.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 $15.5 \pm 9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 $11.7 \pm 8.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 가장 농도가 낮은 가을 대비 겨울의 농도가 2.7배나 높은 농도를 보였으며, 농도가 낮은 계절일수록 편차도 낮게 나타났다.
2. $PM_{2.5}$ 의 화학조성은 파도리의 경우 OC (18.2%) > SO_4^{2-} (11.9%) > NO_3^- (11.7%) > NH_4^+ (7.4%)로 나타났다. 성황동 OC (24.5%) > NO_3^- (18.7%) > SO_4^{2-} (12.3%) > NH_4^+ (9.4%), 송산면 OC (21.1%) > NO_3^- (17.7%) > SO_4^{2-} (15.1%) > NH_4^+ (10.4%), 사곡면 OC (22.1%) > NO_3^- (18.5%) > SO_4^{2-} (14.2%) > NH_4^+ (10.0%)로 4개 지점 모두 OC 가 가장 높은 비율을 보였다. 파도리만 SO_4^{2-} 가 그 뒤를 이었고, 그 외 지역은 NO_3^- 가 2번째로 높은 비율을 보였다.
3. 2021년을 대상으로 고농도와 저농도 사례를 각각 3일을 선별하였고, 각 날짜에 대한 역궤적 분석을 통해 지역별 영향특성을 분석하였는데 전반적으로 한

반도 전역에 걸쳐 계절 및 지역별 특성을 반영하고 있지만 해당 기간에 미치는 국외 영향 또한 크게 작용하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 지역적 특성 분석시 주요 지표로 사용되는 배출량 자료(CAPSS)를 기반으로 지역별 $PM_{2.5}$ 의 화학조성과 배출량과의 비교 분석을 통해 지역적 환경조건에 따른 배출특성을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과 지역 $PM_{2.5}$ 에 대해 국지적인 환경조건과 기상, 국외 유입에 따른 영향이 모두 반영되고 있는 것을 확인하였다. 이는 다시 말하면 국내 개선정책 추진만으로는 공기질 관리가 어렵다는 것을 의미한다. 이러한 결론 도출을 위해서는 국내 지역별 특징 분석 자료가 필요하지만 아직까지 지역별 특성 분석자료는 많이 부족한 실정이다. 향후 본 자료는 충남지역의 대기질 개선정책 추진을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 지역별 맞춤형 정책 추진을 위해서는 해당 지역에 대한 성분측정 분석자료의 지속적인 생성과 분석이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행된 과제의 일부 결과이며, 이에 감사드립니다(NIER-2023-04-02-056).

References

- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021) Local Authority Level Source Apportionments of $PM_{2.5}$ Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 37(3), 466-486, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.466>
- Chungcheongnam-do (Chungnam) (2022) Chungnam Statistical Year Book.
- Choi, S.-W., Cho, H., Hong, Y., Jo, H.-J., Park, M., Lee, H.-J., Choi, Y.-J., Shin, H.-H., Lee, D., Shin, E., Baek, W., Park, S.-K., Kim, E., Kim, H.-C., Song, S.-J., Park, Y., Kim, J., Baek, J.,

- Kim, J., Yoo, C. (2022) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2018) Data and Assessment of Emissions Based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(4), 2022084. <https://doi.org/10.5572/ajae.2022.084>
- Hristova, E., Veleva, B., Georgieva, E., Branzov, H. (2020) Application of Positive Matrix Factorization Receptor Model for Source Identification of PM₁₀ in the City of Sofia, Bulgaria, *Atmosphere*, 11, 890. <https://doi.org/10.3390/atmos11090890>
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Yoo, C., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the South-eastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.517>
- Jeon, B.-G., Lee, S.-H. (2015) A Impact Analysis of Air Quality by Air Pollution Control Facilities Improvement on Point Source Pollution, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 16(4), 2876-2882, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.4.2876>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Gong, J., Shin, C., Choi, K.-C., Gong, S. (2021) The characteristics of PM_{2.5} pollution and policy implications in Chungcheong Region, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, 43(6), 407-418, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2021.43.6.407>
- Kim, C.-H., Kim, J., Noh, S., Lee, S., Yoon, S.-H., Lee, S.-S., Park, J.-S., Kim, J.-B. (2021a) A Study on Temporal-Spatial Characteristics of Volatile Organic Compounds Distributed near Petrochemical Industrial Complex using PTR-ToF-MS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 812-828, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.812>
- Kim, C.-H., Kim, J., Hwang, K., Kim, P., Shin, S.-H., Park, J.-S., Park, S., Lee, G., Lee, J.-Y., Kim, J.-B. (2023) 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 62-76, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.62>
- Kim, E., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Son, K., Kim, S. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 292-309, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.292>
- Kim, J.-B., Yoon, S.-H., Lee, S.-S., Kim, K.-H., Noh, S., Bae, G.-N. (2020) Spatial and Temporal Distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 464-481, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464>
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.-C., Moon, N. (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.4.377>
- Kim, S., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.-C. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (II) Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 144-168, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.144>
- Kim, Y.-U., Do, H.-S., Kim, J.-H., Kwak, K.-H., Ahn, J., Kim, H. (2022) Applicability Study of Atmospheric Circulation and Ventilation Indices to Analysis of PM_{2.5} Episode in March 2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 542-556, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.542>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2021) Annual climatological report Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2023) Area by region. available URL: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ZGA17
- Lee, H.-Y., Kim, N.-K., Jo, M.-J., Lee, S.-J., Choi, J.-S., Kang, K.-S., Choi, S.-D. (2022) Characteristics of PM_{2.5} Pollution and Long-range Atmospheric Transport in Background Areas (Baengnyeong and Jeju Islands), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*,

- 38(4), 524-541, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.524>
- 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>
- Lee, Y.-W., Kim, Y.-P., Yeo, M.-J. (2021) Estimation of air pollutant emissions from heavy industry sector in North Korea, Particle and Aerosol Research, 17(4), 133-148, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.4.133>
- Moon, N., Seo, J., Kim, S. (2021) Estimation of Contribution and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rate by Each Local Government for Policy Support, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 37(6), 891-906, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.891>
- National Institute of Environment Research (NIER) (2021) The characteristics of air quality and contribution of emission sources by region (II).
- National Institute of Environment Research (NIER) (2022a) Installation an operation guideline for air quality monitoring station.
- National Institute of Environment Research (NIER) (2022b) The study of source and evolution characteristics of sub-micron aerosols based on PM_{1.0} and PM_{2.5} analysis by NIER atmospheric research center (I).
- National Institute of Environment Research (NIER) (2023) Monthly report of air quality, January, 2023.
- Oh, S. (2007) Concentrations of atmospheric fine particles measured during 2005 in Chungnam, Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 23(1), 132-140, (in Korean with English abstract).
- Panagi, M., Fleming, Z.-L., Monks, P.-S., Ashfold, M.-J., Wild, O., Hollaway, M., Zhang, Q., Squires, F.-A., Vande Hey, J.-D. (2020) Investigating the regional contributions to air pollution in Beijing: a dispersion modelling study using CO as a tracer, Atmospheric Chemistry and Physics, 20(5), 2825-2838. <https://doi.org/10.5194/acp-20-2825-2020>
- Park, B. (2014) A study on the agenda setting process of air pollution prevention policy in Beijing, Master diss, Seoul National University, (in Korean with English abstract).
- Park, S.-H., Kim, D.-S., Kim, S.-C. (2023) A study on the investigation of air pollutant emissions (2015-2-19) in Gunsan, Journal of Korean Society of Environmental Engineering, 45(4), 171-180, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2023.45.4.171>
- Ryoo, I., Park, J., Kim, T., Ryu, J., Cheong, Y., Ahn, J., Yi, S.-M. (2022) Study of PM_{2.5} Using PMF Receptor Model and Advancement of Source Apportionment, Journal of Korean Society of Environmental Engineering, 38(4), 493-507, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.493>
- 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, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 37(3), 429-455, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.429>
- Song, H.-D., Choi, J.-S., Hong, S.-C., Chang, L.-S., Kim, J.-S., Lee, S.-J. (2009) The Effect of 2008 Beijing Olympic on Korean Air Quality, Journal of the Environmental Science, 18(6), 655-665, (in Korean with English abstract).
- Yeo, M.-J., Seo, J., Kim, Y.-P. (2019) Temporal and Spatial Characteristics of Visibility in North Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(6), 726-740, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.6.726>
- Yoo, C. (2022) A Study on the Establishment System of a National Air Quality Management Policy for the Protection of Public Health, Ph.D. diss, Ajou University, (in Korean with English abstract).
- You, S., Bae, C., Kim, H., You, 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>
- Xu, L., Liu, X., Gao, H., Yao, X., Zhang, D., Bi, L., Liu, L., Zhang, J., Zhang, Y., Wang, Y., Yuan, Q., Li, W. (2021) Long-range transport of anthropogenic air pollutants into the marine air: insight into fine particle transport and chloride depletion on sea salts, Atmospheric Chemistry and Physics, 21(23), 17715-17726. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17715-2021>

Authors Information

황규철 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)

(kchwang@cni.re.kr)

박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)

(psc89@cni.re.kr)

이가혜 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)

(gahya1129@cni.re.kr)

노수진 (대림대학교 보건안전학과 교수)

(sjnoh@daelim.ac.kr)

김정호 (주미세먼지연구소 소장)

(jeonghoflux@naver.com)

이재영 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

(jaylee@ajou.ac.kr)

박종성 (국립환경과학원 대기환경연구과 환경연구사)

(psocf@korea.kr)

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)

(kjb0810@cni.re.kr)