

논문

영주지역 PM_{2.5}의 화학조성 특성 및 PMF 기반 발생원 기여도 평가 Chemical Characterization of PM_{2.5} and Source Apportionment Using PMF in Yeongju

김지영*, 손영훈, 정영석¹⁾, 김자현, 이병근, 김호준²⁾, 박은하³⁾

경상북도보건환경연구원 대기질평가과, ¹⁾경상북도보건환경연구원 북부지원 환경분석과,

²⁾경상북도보건환경연구원 산업폐수과, ³⁾포항산업과학연구원 환경연구소 환경보건연구그룹

Ji-Young Kim*, Young-Hoon Son, Young-Seok Jung¹⁾, Ja-Hyun Kim,
Byung-keun Lee, Hyo-soon Kim²⁾, Eun-ha Park³⁾

Air Quality Assessment Division, Gyeongsangbuk-do Institute of Health & Environment,
Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

¹⁾Environmental Analysis in Northern Branch, Gyeongsangbuk-do Institute of Health &
Environment, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

²⁾Industrial Wastewater Division, Gyeongsangbuk-do Institute of Health & Environment, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea

³⁾Environmental & Health Research Group, Environment Research Laboratory, Research Institute of Industrial Science &
Technology (RIST), Pohang, Republic of Korea

접수일 2026년 4월 27일

수정일 2026년 6월 1일

채택일 2026년 6월 13일

Received 27 April 2026

Revised 1 June 2026

Accepted 13 June 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)54-339-8172

E-mail : kji535@korea.kr

Abstract This study investigated the chemical composition and source contributions of PM_{2.5} at the Yeongju-dong monitoring site from March 2024 to August 2025. Major chemical species were analyzed, and source contributions were quantified using EPA PMF 5.0, along with CPF and HYSPLIT analyses to evaluate source directionality and transport characteristics. The average PM_{2.5} concentration was 15.5 µg/m³, with eight high-concentration days (> 50 µg/m³). PM_{2.5} was mainly composed of ionic (54.5%) and carbonaceous species (38.2%). During high-concentration periods, NO₃⁻ and NH₄⁺ increased markedly, and the NO₃⁻ fraction increased from 13.8% to 28.9%, indicating the dominant influence of secondary inorganic aerosol accumulation. PMF analysis identified six source factors, with secondary nitrate (30.1%) and secondary sulfate (23.9%) accounting for approximately 54% of total PM_{2.5}. CPF analysis showed limited directional dependence for secondary nitrate, suggesting regional formation. HYSPLIT results indicated that high-concentration episodes were associated with air masses from the west and northwest. Overall, elevated PM_{2.5} levels in Yeongju were mainly driven by secondary formation, regional transport, and atmospheric stagnation rather than local emission increases, highlighting the importance of precursor gas control and regional-scale management.

Key words: PM_{2.5}, Secondary inorganic aerosols, PMF, CPF, HYSPLIT, Yeongju

1. 서론

초미세먼지(PM_{2.5})는 직경 2.5 µm 이하의 입자로, 장기간 대기 중에 체류하며 호흡기를 통해 인체 내부로 침투하여 염증 반응, 산화적 스트레스 및 심혈관계 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다(WHO, 2021; Pope and Dockery, 2006). 최근에는 PM_{2.5}의 건

강 영향이 단순 질량농도뿐 아니라 화학적 조성 및 배출 기원에 따라 상이하게 나타날 수 있음이 보고되면서(HEI, 2013) 성분 기반 발생원 분석의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

특히 동일 농도 수준에서도 지역별 배출 구조와 전구물질 배출 특성, 기상 조건, 지형적 요인 및 장거리 수송 영향에 따라 발생 메커니즘은 크게 달라질 수

있다. 분지형 지형을 가진 내륙 도시는 대기 확산이 제한되기 쉬워 외부 유입 오염물질과 지역 내 생성 입자가 축적되기 용이하다(Seinfeld and Pandis, 2016; Whiteman, 2000). 이러한 지역에서는 농도 상승이 특정 배출원의 급격한 증가에 의한 것인지, 아니면 배경농도 상승과 정체 조건이 결합된 축적형 구조인지를 구분하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 장기간의 성분 자료 축적과 함께 수용모델을 활용한 정량적 발생원 분리가 필요하다.

영주지역은 대규모 산업단지가 밀집한 지역은 아니지만 가을·겨울철 반복적인 PM_{2.5} 고농도 사례가 발생하는 지역이다(Kim *et al.*, 2024). 또한 단위 면적당 암모니아 배출량이 높은 것으로 알려져 있어(NAEIRC, 2023) 질산암모늄 및 황산암모늄 생성에 유리한 전구물질 조건을 갖는다는 점에서 2차 무기이온 중심의 농도 상승 가능성이 있다. 따라서 영주지역 PM_{2.5}의 발생 구조를 규명하기 위해서는 화학조성 특성 분석과 함께 수용모델 기반의 정량적 평가가 요구된다.

이에 본 연구에서는 2024년 3월부터 2025년 8월까지 영주동 측정소에서 확보한 PM_{2.5} 시료를 대상으로 화학적 조성 특성을 분석하고, Positive Matrix Factorization (PMF) 수용모델을 적용하여 주요 발생원을 분리하였다. 또한 Conditional Probability Function (CPF) 및 HYSPLIT 역궤적 분석을 병행하여 오염원의 영향 방향성과 고농도 발생 시 기류 특성을 종합적으로 검토하였다. 이를 통해 영주지역 PM_{2.5} 고농도의 구조적 발생 메커니즘을 규명하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 조사 지점

본 연구에서는 영주지역 PM_{2.5}의 화학적 특성과 발생 구조를 평가하기 위해 영주동 측정소(36.83°N, 128.63°E)를 조사 지점으로 선정하였다(그림 1). 영주지역에는 영주동 및 가흥동 두 개의 도시대기측정

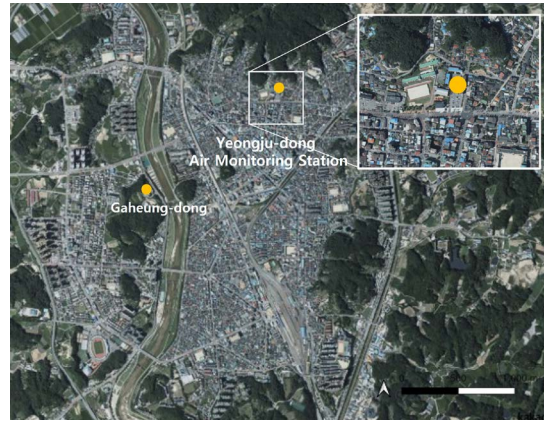


Fig. 1. Sampling location in the Yeongju area.

소가 설치되어 있으나, 영주 외곽 녹지지역에 위치한 가흥동 측정소에 비해 주거 지역에 위치한 영주동 측정소가 지역 생활권 대기질을 대표하기에 보다 적합하다고 판단하였다. 해당 지점은 영주 도심 북측의 일반주거지역에 위치하며, 북쪽 약 50 m 지점에는 철탄산이 인접해 있다. 남쪽 반경 1 km 이내에는 상권이 형성되어 있으며 측정소를 기준으로 동쪽과 서쪽 각각 약 1 km 지점에는 철도가 통과한다. 또한 측정소로부터 남쪽 4 km, 남서쪽 7 km, 서쪽 3.3 km, 북서쪽 9.5 km 범위에는 5개의 일반산업단지와 6개의 농공단지가 분포해 있다.

2.2 시료 채취 및 성분 분석

본 연구에서 활용한 PM_{2.5} 시료는 2024년 3월부터 2025년 8월까지 영주동 측정소에서 채취하였다. 시료는 low volume sampler를 이용하여 16.67 L/min 유속으로 24시간 동안 채취하였으며, 연구기간 동안 총 426개의 시료를 확보하였다.

성분 분석 목적에 따라 서로 다른 여지를 사용하였다. 질량농도 및 원소 성분 분석에는 PTFE 필터(PT48AN-KT, MTL)를 사용하였으며, 이온 성분 분석용 PTFE 필터는 초순수에 침지 후 교반·건조 과정을 거쳐 전처리하였다. 탄소 성분 분석에는 석영필터(TISSUQUARTZ 2500-QAT-UP, PALLFLEX)를 사용

하였으며 분석 전 850°C 이상에서 4시간 이상 열처리하여 유기성 오염을 제거하였다. PM_{2.5} 질량농도는 20°C, 상대습도 35% 조건에서 24시간 이상 항량시킨 후 로봇칭량시스템 (ChamBAL-500, C2K Creative, Korea)을 이용하여 포집 전·후 필터 질량 차이로 산정하였다. 이온 성분(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺, Na⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)은 필터를 초순수로 초음파 추출한 후 이온크로마토그래피 (ICS-500, Dionex)를 이용하여 정량하였다. 탄소 성분은 열광학적 투과도 방식 (Thermal Optical Transmittance, TOT)을 적용한 탄소분석기 (Model 5L, Sunset Laboratory Inc., USA)를 이용하여 OC (Organic Carbon)와 EC (Elemental Carbon)로 구분하여 분석하였다. 원소 성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Al, Zn, As, V, Sn, Ba, Sb, Se)은 질산-염산 혼합액을 이용한 초음파 추출 후 ICP-MS (JP/7900, Agilent, USA)를 사용하여 정량하였다. PMF 분석 시 중복 계산을 방지하기 위해 이온 성분으로 이미 정량된 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺는 원소 성분 자료에서 제외하였다. 최종 구축된 성분자료를 일 단위로 정리하여 수용모델 입력자료로 사용하였다.

2.3 PMF Model

PM_{2.5}의 주요 발생원을 정량적으로 분리하기 위해 EPA PMF 5.0을 적용하였다(US EPA, 2014). PMF는 관측된 농도 행렬을 요인별 기여도와 성분 조성으로 분해하는 수용모델로, 관측 자료 행렬 X는 다음 수식(1)과 같이 표현된다(Comero *et al.*, 2009).

$$X = G \times F + E \quad (1)$$

여기서 G는 시료의 수와 오염원의 수를 곱하여 나오는 기여도를, F는 오염원의 수와 분석 화학종의 수를 곱하여 나오는 오염원 분류표를, E는 잔차를 의미한다. PMF는 비음수 조건을 적용하고 성분별 불확도를 가중치로 사용하므로 신뢰도가 낮은 항목의 영향이 과대 반영되지 않는 점에서 성분 분석 자료 기반 기여도 산출에 적합하다.

PMF 수행을 위해서 일 단위 성분 농도 자료와 불

확도(Uncertainty, U) 자료를 입력 자료로 구성하였다. 불확도는 농도값(Concentration, C)과 방법검출한계(MDL)를 이용하여 식(2)과 식(3)으로 계산하였고, 여기서 P는 오차율(Error Fraction)로 10%로 설정하였다.

$$U = 5/6 \times MDL \quad (C \leq MDL) \quad (2)$$

$$U = \sqrt{(P \times C)^2 + (0.5 \times MDL)^2} \quad (C > MDL) \quad (3)$$

측정자료의 결측치와 이상치 등에 대한 처리 방법은 국립환경과학원 용역 보고서의 기준을 준용하였다(NIER, 2017). PM_{2.5} 총 질량농도가 결측치이거나 0인 시료, 모든 화학종이 결측치로 구성된 시료, 또는 신뢰도가 낮은 화학종 등은 모델 분석에서 제외하였다. 성분별 S/N비(Signal to Noise)를 검토하여 0.2 미만으로 나타나는 항목은 측정 신뢰도가 매우 낮은 자료로 판단하여 입력자료에서 제외하였으며 0.2 이상 2.0 미만의 항목은 상대적으로 불확실성이 큰 자료로 분류하여 모델 계산 시 불확도가 높게 적용되도록 하였다. 성분별 불확도를 차등 적용함으로써 입력자료 특성이 모델 계산 과정에 적절히 반영되도록 구성하였다.

2.4 CPF Model

CPF 모델은 풍향·풍속 등 기상관측 자료와 수용체에서 측정한 오염물질의 농도를 이용하여 오염원의 위치와 유입 방향을 추정할 수 있는 조건부 확률 모델이다. CPF 값은 1에 근접할수록 유입방향 부근에 오염원이 존재할 가능성이 높다는 것을 의미하고 수식(4)에 의해 계산할 수 있다(Hopke, 2016).

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (4)$$

식에서 $m_{\Delta\theta}$ 은 기여도 값이 임계값 이상일 때 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 풍향의 발생 횟수이고, $n_{\Delta\theta}$ 는 동일 영역 풍향의 총 발생 횟수를 의미한다. CPF 분석에 사용된 풍향 및 풍속 자료는 영주동측정소에 설치된 자동기상관측장비 측정자료를 활용하였다. 분석 과

정에서 풍속이 매우 낮은 조건에서는 풍향 정보가 불명확해질 수 있으므로 풍속이 0.5 m/s 미만인 자료는 제외하였다. 풍향은 24방위로 구분하여 분석하였으며, 임계값은 요인별 기여도의 75th percentile을 적용하였다. 도출된 CPF 결과는 요인별 기여도가 높은 시점의 풍향을 기준으로 우세 영향 방향을 제시하며, 이는 배출 영향 방향을 해석하는 근거로 활용하였다. 다만 영주지역의 분지 지형 특성에 따라 국지적인 풍향 영향이 일부 반영되었을 가능성이 있으므로, CPF 결과는 오염원별 영향 방향성을 보조적으로 해석하는 데 활용하였다.

2.5 HYSPLIT Model

역궤적 분석에 따른 오염물질 유입경로를 확인하기 위해 미국해양대기국(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT 5.3.0 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 활용하였다(NOAA, 2023; Stein *et al.*, 2015).

입력 기상자료는 공간 해상도 1°의 GDAS 1 (Global Data Assimilation System)을 사용하였으며(Stein *et al.*, 2015), 역궤적 분석은 영주동 측정소를 수용점으로 하여 시작 고도 100 m에서 수행하였다. 역궤적은 표준 종관시각에 맞추어 UTC 0시를 기준으로 6시간 간격으로 산출하였으며, 각 도달 시각에 대해 과거 72시간의 이동 경로를 계산하였다. 각 역궤적의 end-point는 1시간 간격으로 설정하였다.

HYSPLIT 분석은 연구기간 중 발생한 고농도 사례일을 대상으로 수행하였으며, 각 사례의 기류 이동 특성을 확인하기 위해 역궤적을 개별적으로 산출하여 제시하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 PM_{2.5}의 상대적 농도 특성 및 일변화 패턴

연구기간 동안 영주동 측정소의 PM_{2.5} 평균 농도는

15.5 µg/m³로, 영주동을 제외한 경북도 내 도시대기 측정소 평균(16.2 µg/m³)과 유사한 수준을 보였다. 그러나 평균 농도만으로는 특정 시기 영주지역의 상대적 고농도 특성과 지역적 취약성을 충분히 설명하기 어렵다. 이에 영주지역 PM_{2.5} 농도의 상대적 특성을 평가하기 위해 영주동 측정소의 일평균 농도를 도내 47개 측정소 평균과 비교하고, 도내 농도 분포의 표준편차(σ)로 정규화한 상대농도 지수를 산출하였다(그림 2). 해당 지수는 영주동 농도에서 도내 평균을 차감한 값을 도내 농도 변동성(σ)으로 나눈 값으로, 0을 기준으로 양(+)의 값은 도내 평균 대비 상대적으로 높은 농도 상태를, 음(-)의 값은 낮은 상태를 의미한다.

표준편차를 이용한 정규화는 도내 전체 농도가 계절 및 기상 조건에 따라 동시적으로 상승·하강하는 영향을 배제하고, 특정 시점에서 영주지역의 상대적 이탈 정도를 정량적으로 평가하기 위해 적용하였다. 고농도 사례 발생 시 단순 농도 비교만으로는 지역적 취약성을 구분하기 어렵기 때문에, 변동성을 고려한 상대 지표를 통해 영주지역의 구조적 특성을 보다 안정적으로 해석하고자 하였다.

분석 결과, 여름철에는 상대농도 지수가 0 부근 또는 음의 값을 보여 도내 평균과 유사하거나 다소 낮은 수준을 유지하는 경향이 나타났다(그림 2a). 또한 여름철에는 일변화 폭이 비교적 적고 시간대별 뚜렷한 패턴이 관찰되지 않았다. 이는 강한 혼합고 형성과 양호한 확산 조건으로 인해 오염물질이 특정 시간대에 축적되기보다는 비교적 균질하게 분산되는 특성이 반영된 결과로 해석된다(Stull, 1988).

반면 겨울철에는 상대농도 지수가 전반적으로 양(+)의 값을 지속하였으며, 특히 심야부터 오전 시간대(00-10 KST)에 가장 높게 나타났다(그림 2b). 이후 오후 시간대에 일시적으로 감소한 뒤 야간에 다시 증가하는 일변화 패턴이 확인되었다. 이는 겨울철 역전층 형성에 따른 수직 혼합 제한과 분지 지형에 의한 수평 기류 확산 저해가 복합적으로 작용하여 대기 정체 조건을 강화하기 때문으로 해석된다(Whiteman,

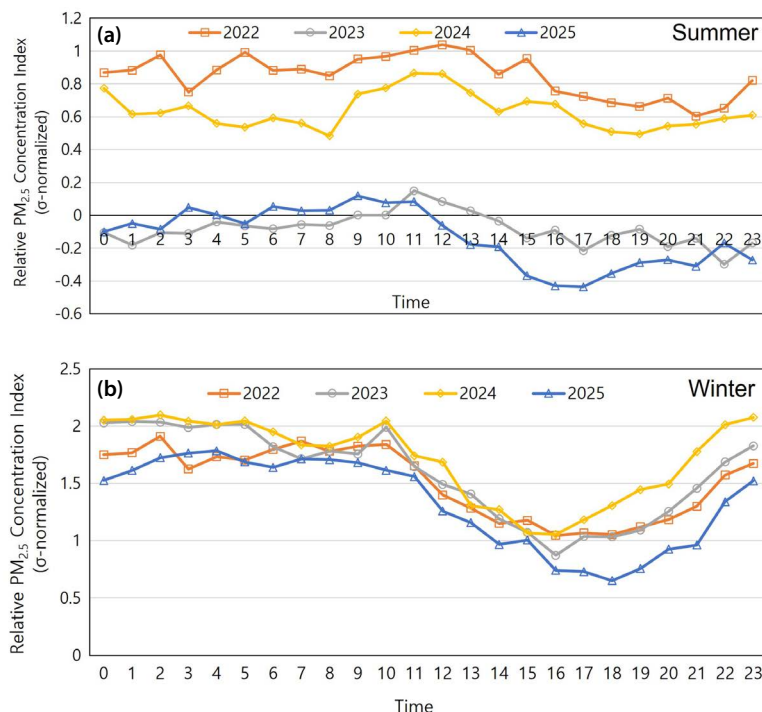


Fig. 2. Diurnal variation of normalized PM_{2.5} concentration at Yeongju-dong relative to the provincial average during summer (a) and winter (b).

2000). 이로 인해 외부에서 유입된 오염물질과 지역 내에서 생성된 입자가 원활히 확산되지 못하고, 지표 인근에서 체류·축적되면서 상대 농도 지수의 상승을 더욱 가중시키는 것으로 판단된다(Seinfeld and Pandis, 2016).

영주지역의 고농도 특성은 특정 시간대의 단기적 급상승보다는 도내 평균 대비 상대적으로 높은 농도 상태가 장시간 지속되는 축적형 구조로 설명될 수 있다. 이러한 특성은 이후 성분 분석 및 PMF 결과에서 확인된 2차 무기이온 중심의 기여 구조와도 일관된 해석 흐름을 보여준다.

3.2 PM_{2.5} 농도 및 화학적 조성 특성

연구기간 동안 PM_{2.5} 평균 농도는 15.5 µg/m³, 중앙값은 13.2 µg/m³이었으며, 최소 2.2 µg/m³에서 최대 79.0 µg/m³까지 분포하였다. 25th percentile과 75th percentile은 각각 8.6 µg/m³, 19.7 µg/m³로 나타났다.

PM_{2.5} 농도가 50 µg/m³ 이상인 고농도일은 총 8일로, 이는 상시 고농도 상태라기보다는 특정 조건에서 농도가 급격히 상승하는 구조를 보였다.

구성 성분 분석 결과, PM_{2.5}는 이온 성분(54.5%)과 탄소 성분(38.2%)이 대부분을 차지하였으며 원소성분은 3.3%, 잔여성분은 4.0% 수준이었다(그림 3a). 세부적으로는 OC(34.8%)가 가장 높은 비중을 보였고, 무기이온 중에서는 NO₃⁻(19.8%), SO₄²⁻(16.3%), NH₄⁺(13.6%) 순으로 나타났다(그림 3b).

이는 연구기간 동안 질산염 및 황산염 계열의 2차 생성 영향이 지속적으로 작용했음을 보여준다. 반면 EC는 약 3.4% 수준으로 OC에 비해 낮은 수준을 보였으며, OC/EC 비가 높게 나타난 점은 유기성분 중 2차 생성물의 형성 가능성을 시사한다(Lee and Kang, 2000).

이러한 농도 및 화학조성 특성을 고려하여 PM_{2.5} 일평균 농도가 50 µg/m³ 이상인 날을 고농도일로, 그

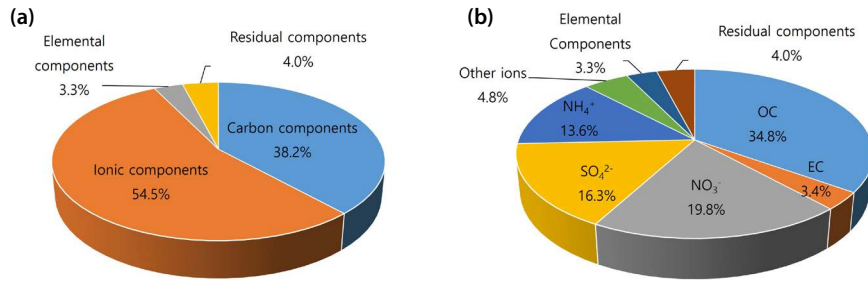


Fig. 3. Composition ratios of PM_{2.5}(a) and in detailed analysis (b).

Table 1. Comparison of PM_{2.5} concentration and major chemical species between high concentration days and non-high concentration days.

	Number of days	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC/EC ratio	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NH ₄ ⁺ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
High conc. days	8	64.8	8.5	1.1	7.6	18.7	6.8	7.0
Non-high conc. days	418	19.7	5.0	0.5	10.0	2.7	2.4	2.0
Increase ratio (High/Non-high)	—	3.3	1.7	2.2	—	6.9	2.8	3.5

외 기간을 비고농도일로 구분하여 성분 변화를 추가적으로 검토하였다(표 1). 해당 기준은 일반적인 농도 증가 사례보다는 대기 정체 및 외부 유입 영향이 복합적으로 작용한 상대적 고농도 사례의 특성을 분석하기 위한 기준으로 적용하였다. 고농도일 평균 농도는 $64.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비고농도일 ($19.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 3.3배 높게 나타났다. 특히 NO₃⁻ (6.9배)와 NH₄⁺ (3.5배)의 증가 폭이 크게 나타났으며, 구성비 비교에서도 고농도일의 NO₃⁻ 비중은 28.9%로 비고농도일 (13.8%) 대비 두 배 이상 증가하였다. 반면 OC 비중은 감소하였으며, 잔여성분은 증가하는 경향을 보였다. 이는 고농도 사례가 유기탄소의 증가보다는 무기이온 중심의 농도 축적 특성을 보였음을 의미한다.

또한 2차 무기이온(SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)의 합은 PM_{2.5} 질량농도의 월별 변화 추이와 유사한 경향을 보여(그림 4), PM_{2.5} 농도 변화와 2차 무기이온 농도 변화 간의 밀접한 연관 가능성을 나타내었다.

이상의 결과는 영주지역 PM_{2.5} 농도 변동이 특정 단일 배출원보다는 정체 조건 하에서 형성·축적되는 2차 무기이온과 밀접하게 관련되어 있음을 시사한

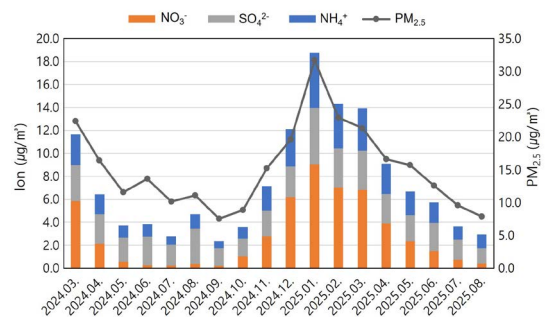


Fig. 4. Monthly variations of PM_{2.5} mass concentration and secondary inorganic ions (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺).

다. 이에 따라 다음 절에서는 성분 자료를 기반으로 오염원별 기여도를 정량적으로 분리하기 위해 PMF 수용모델 분석을 수행하였다.

3.3 PMF 모델 결과 및 오염원별 기여 특성

측정된 성분자료에 대해 PMF 수용모델을 적용한 결과 총 6개의 요인이 도출되었으며, 2차 황산염(23.9%), 산업활동(9.6%), 2차 질산염(30.1%), 이동오염원(9.8%), 생물 연소(21.8%), 토양(4.8%)으로 구분

되었다(그림 5). 전체 기여율 중 2차 무기이온 요인(황산염+질산염)이 약 54%를 차지해 연구기간 동안 $PM_{2.5}$ 농도 변동은 대기 중 반응에 의해 생성된 2차 생성물이 주도하는 특성이 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 앞선 조성 분석에서 고농도 사례에서 NO_3^- - NH_4^+ 중심의 농도 확대가 나타났던 결과와도 일관된 흐름을 보여준다.

PMF factor profile에서는 막대그래프(Conc. of species)로 요인별 질량 기여도를, 점 마커(% of species)로 전체 성분 대비 해당 요인의 설명 비중을 나타내어 핵심 추적성분을 식별할 수 있도록 제시하였다.

첫 번째 오염원은 SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 의 기여도가 높아 2차 황산염(Secondary sulfate)으로 분류하였다. 이는 황산암모늄 형태의 2차 생성 영향을 직접 반영하는 특징적 조성으로 판단된다(Heo *et al.*, 2018). EC 및 Cl^- 의 기여도가 매우 낮게 나타난 점은 1차 연소 배출 영향이 제한적임을 보여주며, 비교적 높은 OC 수준은 황산염 생성 시 유기성 입자의 동반 축적 현상을 반영한 것으로 판단된다. 전체적으로 해당 요인은 장거리 이동 또는 체류 기간 동안 대기 중 기체상 SO_2 의 산화 및 암모늄 중화 반응 결과로 형성된 2차 황산염 중심 요인으로 해석된다.

두 번째 오염원은 중금속 성분이 뚜렷하게 나타나는 특성을 보였다. 크롬(Cr), 구리(Cu), 망간(Mn), 철(Fe), 아연(Zn) 등이 높은 기여도를 보이는 반면 OC 및 무기이온의 비중은 낮게 확인되었다. 이러한 조성은 금속 가공 공정, 주조업, 용접공정 및 산업 연료 연소 배출 특성과 부합하므로 산업 활동(Industry) 오염원으로 분류하였다. 특히 Zn과 Cu는 차량 정비·운행유 계통에서, Mn·Fe는 절단 및 용접 공정에서 주로 관찰되는 조합으로 알려져 있다(Lee and Lee, 2007). 또한 Pb는 Zn 및 Cu와 함께 산업 공정 기반 배출원에서 동반 검출되는 대표적인 성분으로, 본 오염원이 금속 가공 및 관련 산업 활동의 영향을 반영하는 것으로 해석된다. 이 요인의 농도 수준은 고농도 요인에 비해 상대적으로 낮게 나타났으나, 금속류 중심의 조성이 뚜렷하고 무기이온 기여가 제한적인 점

을 고려할 때 대규모 산업단지와 같은 지속적 배출원의 영향보다는 지역 내에 분산된 금속 가공·정비 공정 등에서 기인한 산업활동 기반 금속성 PM 배출 신호를 반영하는 요인으로 판단된다.

세 번째 오염원은 NO_3^- 와 NH_4^+ 의 농도 비중이 높아 2차 질산염(Secondary)으로 해석하였다. 전체 오염원 중 가장 높은 기여율(30.1%)를 차지했으며 이는 연구기간 동안 NO_3^- - NH_4^+ 기반의 농도 증가가 $PM_{2.5}$ 농도 변동의 핵심 요소였다는 점과 일치한다.

네 번째 요인은 OC, EC 및 일부 금속류(예: Pb, Cu, Zn)가 높은 조성을 보여 교통활동을 대표하는 이동 오염원(Mobile)으로 분류하였다. OC 및 EC는 차량 연소 과정에서 배출되는 지표 성분이며(Hwang *et al.*, 2020), Pb와 Zn은 타이어 마모, Cu는 브레이크 마모에서 배출되는 대표적 금속 성분으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2021). 이러한 금속류 조합은 차량 운행 과정에서 반복적으로 발생하는 기계적 마찰에 의해 발생하는 입자 특성과 일치한다.

다섯 번째 오염원은 OC와 K^+ 가 뚜렷하게 높은 기여를 보였으며 무기이온 및 금속류의 비중은 상대적으로 낮게 확인되었다. 이러한 조성은 목재 연소, 영농 잔재 소각 등 연소 기반 배출원의 특징과 부합하여 생물 연소(Biomass burning) 오염원으로 분류하였다. 특히 K^+ 는 해당 배출원의 대표 추적자로 알려져 있으며(Heo *et al.*, 2018), 본 오염원에서 선명하게 나타나 봄철 영농폐기물 소각, 난방 연료 사용 등 지역적 연소 활동의 가능성을 보여준다. 또한 OC가 함께 높은 수준을 보인 점은 불완전 연소 과정에서 탄소계 입자가 배출되는 특성과 일치하며 연구기간 동안 약 21.8%의 기여율을 나타내 $PM_{2.5}$ 농도에 일정 수준의 영향을 미친 것으로 확인되었다.

마지막 요인은 Ca, Mg, Fe, Al 등이 뚜렷하게 도출되는 조성을 보였으며 특히 비휘발성 지각 기원 금속류의 비중이 높았다. 따라서 본 오염원은 토양 또는 비산 먼지 기원으로 해석하였으며, 기여율은 약 4.8%로 다른 오염원 대비 적은 영향을 나타냈다.

도출된 6개 오염원에 대한 분류는 주요 구성 성분

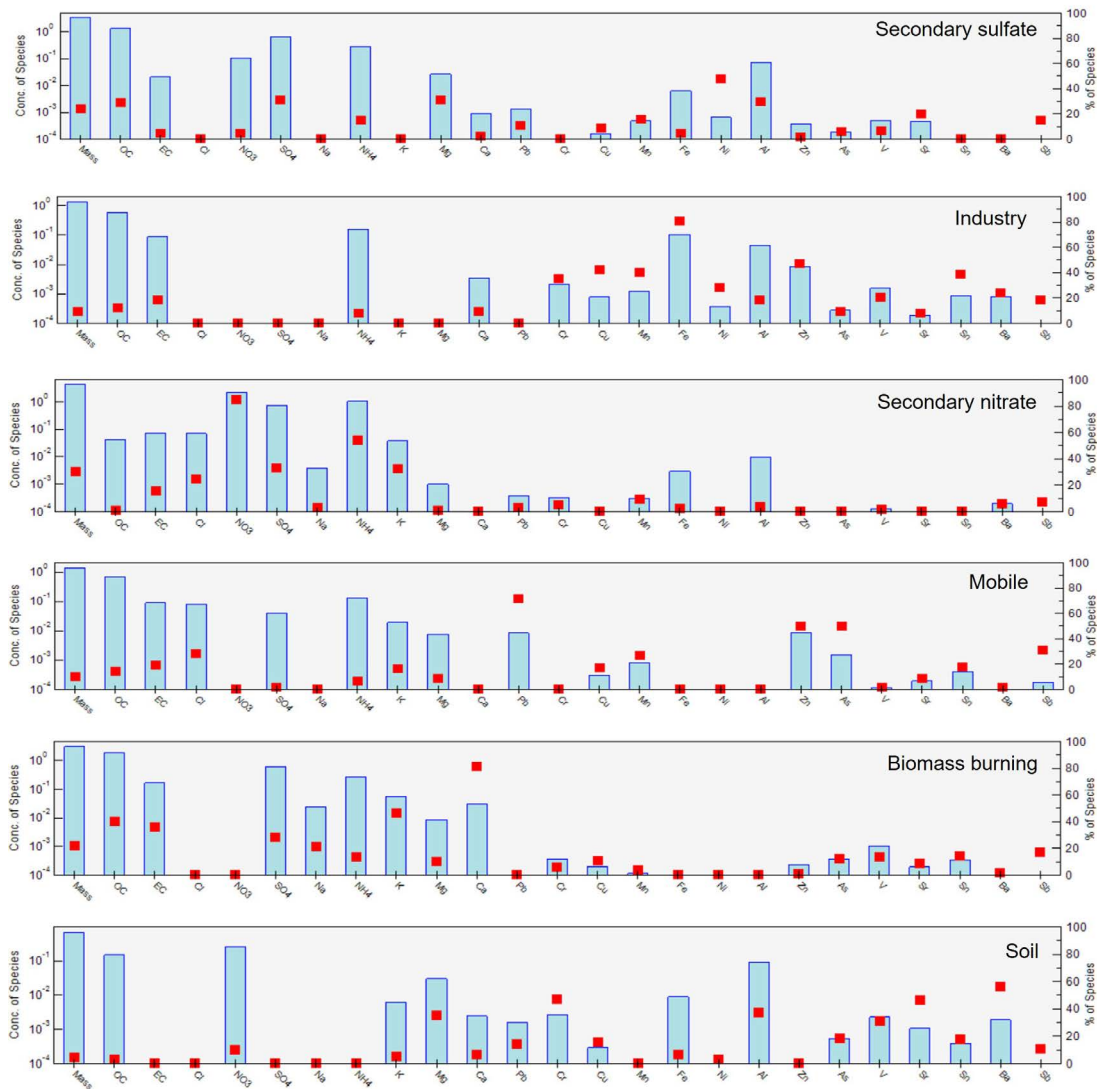


Fig. 5. Factor profiles of PM_{2.5} components identified by PMF analysis.

의 특성과 일치하였으며, 측정값과 예측값의 비교 결과에서도 PMF 모델의 적용 타당성이 확인되었다(그림 6). PMF 모델로부터 도출된 PM_{2.5} 예측값과 실제 측정값 간의 결정계수(R^2)가 0.92857로 높은 상관성을 보였다. 이는 PMF로 분리된 오염원이 실제 농도변동을 구조적으로 적절히 설명하고 있음을 뒷받침한다(Hwang *et al.*, 2020). 따라서 본 연구에서 수행된 PMF 분석은 지역 내 주요 배출원을 오염원별로 분리

하여 설명할 수 있을 뿐 아니라 각 오염원의 상대적 기여량을 정량적으로 해석하는 데에도 유효한 분석 결과를 제공한 것으로 판단된다.

3.4 CPF 기반 오염원별 배출 방향성 특성

본 연구에서는 PMF 분석 결과 도출된 오염원별 배출 영향 방향성을 검토하기 위해 조건부확률함수(CPF)를 적용하였다. CPF 분석은 각 오염원의 기여

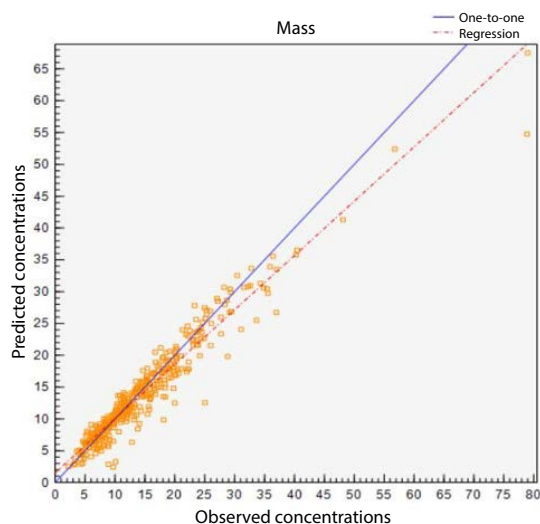


Fig. 6. Comparison of observed and PMF-predicted $PM_{2.5}$ mass.

도가 임계값 이상으로 나타난 사례를 풍향·풍속 자료와 결합하여 계산하는 방법으로, 본 연구에서는 각 오염원의 75th percentile을 임계값으로 설정하였다. 분석 결과는 그림 7에 제시하였다.

CPF 결과를 전체적으로 살펴보면 일부 오염원에서 특정 풍향 및 풍속 구간의 CPF 값이 상대적으로 높게 나타났으나, 대부분의 오염원에서는 단일 방향에 뚜렷하게 집중되는 패턴은 제한적으로 관찰되었다. 이는 영주지역 $PM_{2.5}$ 가 특정 방향의 단일 배출원 영향만으로 설명되기보다는 지역 배출, 외부 유입, 2차 생성 및 지형적 정체 조건이 복합적으로 작용한 결과임을 시사한다.

오염원별로 살펴보면, 2차 황산염(Secondary sulfate)은 동쪽 및 서남쪽에서 상대적으로 높은 CPF 값이 관찰되었다. 그러나 고값 영역이 단일 풍향에 명확히 집중되지 않고 복수 방향에서 나타난 점을 고려할 때, 특정 배출원의 직접적인 영향으로 단정하기는 어렵다. 따라서 2차 황산염은 SO_2 등 전구물질의 유입과 대기 중 산화 및 2차 생성 과정이 함께 반영된 요인으로 해석된다.

산업활동(Industry) 오염원은 서쪽(W) 방향의 비

교적 높은 풍속 구간에서 CPF 값이 상대적으로 높게 관찰되었다. 이는 측정소 서쪽 방향의 산업 관련 배출 영향 가능성을 시사한다. 다만 CPF 결과만으로 특정 산업단지의 영향을 단정하기는 어려우며, 본 결과는 산업활동 요인의 영향 방향성을 보조적으로 판단하는 근거로 활용하였다.

2차 질산염(Secondary nitrate)은 전반적으로 CPF 값이 낮고, 특정 방향에 집중된 패턴이 뚜렷하지 않았다. 이는 2차 질산염이 특정 배출원의 직접적인 영향보다는 광역적으로 유입된 질소산화물(NO_x)이 대기 중 화학 반응을 거쳐 생성된 이후 지역 내에서 축적되는 특성과 관련될 가능성을 시사한다. 특히 본 연구에서 2차 질산염 오염원이 PMF 결과 전체 $PM_{2.5}$ 기여율 중 가장 높은 비중을 차지한 점을 고려하면, 영주지역 $PM_{2.5}$ 농도 증가는 특정 풍향에서의 단발성 유입보다는 전구물질의 광역적 유입과 정체 조건 하에서의 2차 생성·축적 과정이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

이동오염원(Mobile)은 동쪽 계열에서 상대적으로 높은 CPF 값이 일부 관찰되었으나, 특정 배출 지점을 명확히 지목할 정도의 뚜렷한 방향성은 나타나지 않았다. 이는 교통 활동에 의한 배출이 특정 풍향에서만 유입되기보다는 측정소 주변 생활권에서 지속적으로 발생하고, 기상 조건에 따라 지역 내에서 확산·체류하는 특성이 반영된 결과로 볼 수 있다.

생물 연소(Biomass burning) 오염원은 동쪽 계열에서 일부 높은 CPF 값이 나타났으나, 전반적으로 특정 풍향에 뚜렷하게 집중된 패턴은 제한적이었다. 이는 생물 연소 영향이 단일 지점 배출원보다는 농촌 지역의 소규모 연소 활동, 계절적 연소 및 외부 유입 등이 복합적으로 반영된 결과로 판단된다.

토양 기원(Soil) 오염원의 경우 동쪽~남동쪽 및 서쪽에서 상대적으로 높은 CPF 값이 부분적으로 관찰되었다. 그러나 고값 영역이 특정 방향에 일관되게 집중되지는 않아, 단일 배출원의 지속적인 영향으로 해석하기는 어렵다. 이는 토양 기원 오염원의 특성이 측정소 인근의 재비산 입자, 국지적 지표 상태, 풍속

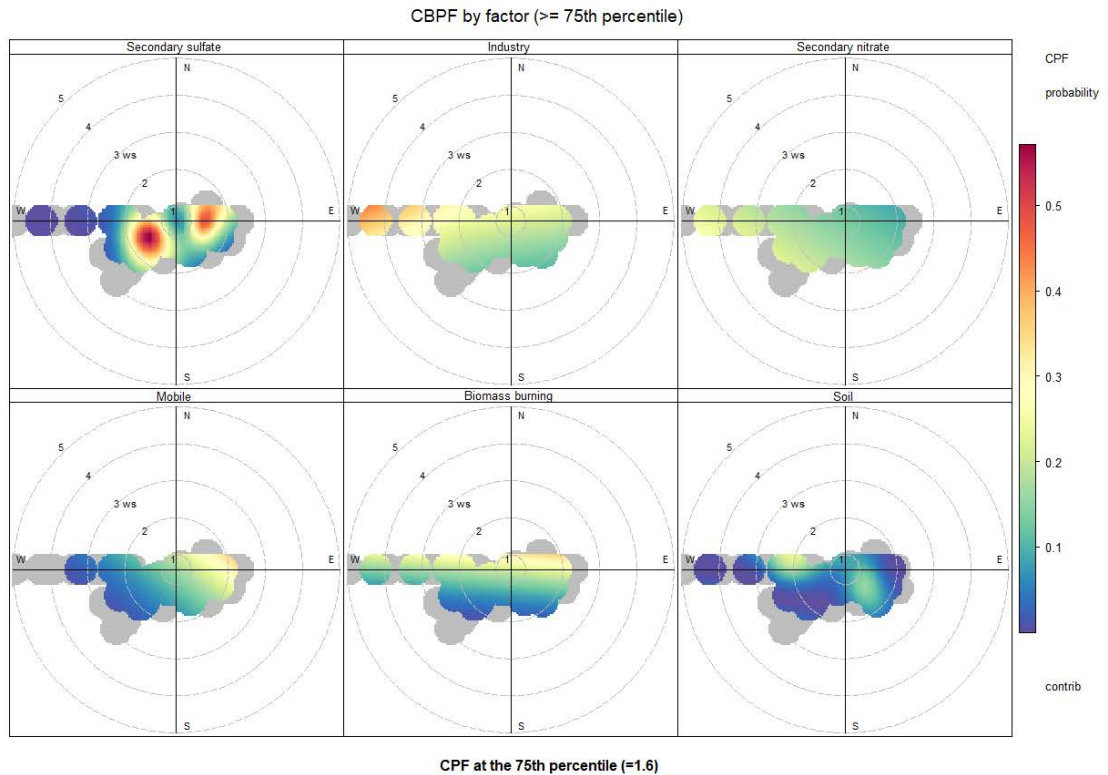


Fig. 7. CPF plots for the contributor of PM_{2.5}.

조건 및 주변 환경 변화의 영향을 복합적으로 반영한 결과로 판단된다. 특히 시료 채취 기간 동안 측정소 남동쪽 인근에서 공사가 진행되고 있었던 점을 고려하면, 자연적인 비산먼지 영향과 더불어 측정소 주변 환경 변화에 따른 재비산 영향이 일부 반영되었을 가능성이 있다.

종합하면 CPF 분석 결과, 2차 황산염은 동쪽 및 서남쪽 계열에서 비교적 뚜렷한 CPF 고값 영역을 보였고, 산업활동 오염원은 서쪽 방향에서 산업 관련 배출 영향 가능성을 보였다. 반면 2차 질산염은 특정 풍향에 뚜렷하게 집중되지 않는 특성을 보였으며, 이동 오염원, 생물 연소 및 토양 기원 오염원도 단일 방향의 명확한 배출원 영향으로 해석하기에는 제한적이었다. 이러한 결과는 영주지역 PM_{2.5}가 특정 방향의 단일 배출원 영향만으로 설명되기보다는 지역 배출, 외부 유입, 2차 생성 및 분지 지형에 따른 체류·축적

조건이 복합적으로 작용한 결과임을 시사한다.

3.5 고농도 사례일의 기류 특성

앞선 상대농도 분석 및 PMF·CPF 결과에서 영주지역의 PM_{2.5} 고농도는 단일 배출원보다는 계절적 배경 농도 상승과 정체·축적 조건의 영향을 크게 받는 것으로 해석되었다. 이에 본 절에서는 기류 이동 경로에 따른 국외 기원 오염물질의 유입 가능성을 확인하기 위해 고농도 사례일을 대상으로 HYSPLIT 역궤적 분석을 수행하였다(그림 8). 연구기간 동안 발생한 고농도 사례는 2024년 3월 4일, 2025년 1월 18, 20~23일, 2025년 2월 15~16일로 구분되며 사례별 기간 및 자료 수의 차이를 고려하여 클러스터링을 적용하지 않고 개별 궤적을 그대로 나타내었다. 고농도 사례는 대부분 겨울철에 집중되었으며, 저풍속 및 대기 안정 조건과 함께 서쪽 또는 북서쪽 기류 유입이

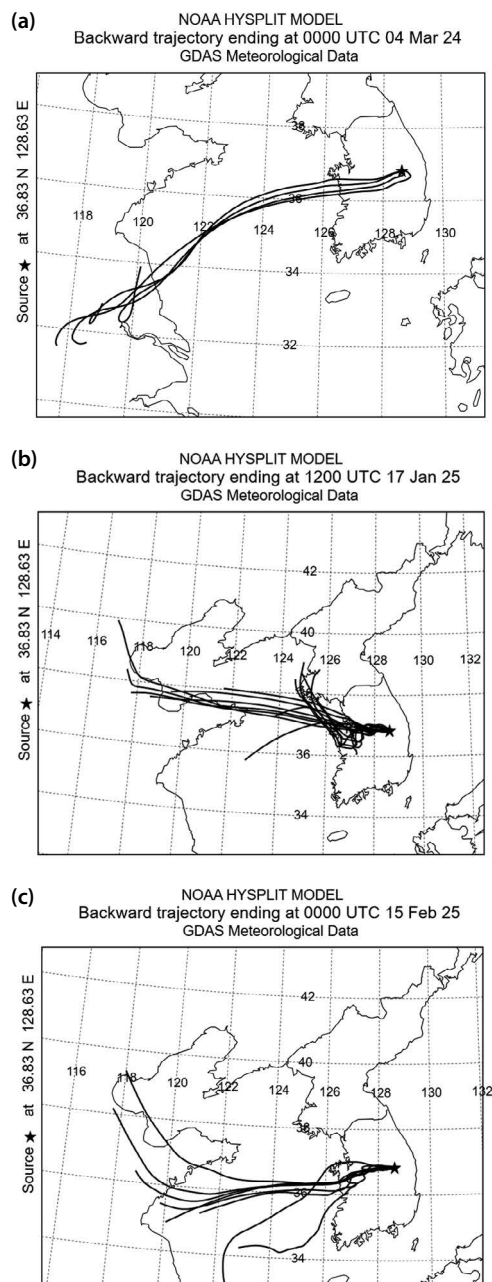


Fig. 8. HYSPLIT backward trajectory analysis for high $PM_{2.5}$ concentration episodes in Yeongju: (a) 4 March 2024; (b) 18, 20~23 January 2025; (c) 15~16 February 2025.

공통적으로 나타났다.

2024년 3월 4일 고농도 사례에서는 기류가 중국 안

후이(Anhui) 및 장쑤(Jiangsu) 지역을 거쳐 중국 동부 연안과 서해를 따라 한반도로 유입되는 경로를 보였다. 궤적의 분산이 크지 않고 비교적 일관된 서→동 이동 특성을 보여, 해당 시기의 고농도는 장거리 수송 영향이 반영된 결과로 판단된다.

2025년 1월 18, 20~23일 연속 고농도 사례에서는 보하이만(Bohai Bay) 및 산둥반도 북측 해역을 거쳐 서해를 통해 한반도로 유입되는 기류와 북한 웅진군 인근 서해상에서 비교적 짧은 이동 경로를 보이는 기류가 함께 나타났다. 이는 단순한 장거리 직선 수송보다는 대기 확산이 제한된 조건에서 복합적인 기류 구조가 형성되었음을 반영하는 것으로 판단된다. 이러한 기류 특성은 정체 조건 하에서 국외 기원 오염물질의 영향이 상대적으로 오랫동안 지속될 수 있는 환경을 제공했을 가능성을 내포한다.

2025년 2월 15~16일 고농도 사례에서도 중국 산둥성(Shandong) 연안과 산둥반도 남측 해역을 거쳐 서해를 통해 한반도로 유입되는 장거리 이동 경로가 우세하게 나타났다. 비록 분석 기간은 짧았으나, 서로 다른 시기의 고농도 사례에서 중국 동부 연안과 서해를 경유하는 유사한 기류 이동 경로가 반복적으로 확인되었다는 점에서 의미가 있다.

종합하면, 영주지역의 고농도 $PM_{2.5}$ 사례는 특정 국지 배출원의 단독 영향보다는, 서쪽 또는 북서쪽 기원의 광역적 오염물질 수송이 배경을 이루고, 여기에 영주지역의 분지 지형으로 인한 기류 정체 특성과 겨울철 대기 안정 조건이 결합되어 농도가 강화되는 구조적 특성을 갖는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 상대농도 지수 분석에서 확인된 겨울철 축적형 농도 특성, 성분 분석에서 나타난 2차 무기이온 중심의 증가, 그리고 PMF·CPF 분석 결과와도 일관된 해석을 제공한다.

4. 결 론

본 연구에서는 2024년 3월부터 2025년 8월까지 영

주동 측정소에서 채취한 PM_{2.5} 성분 자료를 기반으로 화학적 조성 특성과 발생 구조를 분석하고, PMF 수용모델 및 CPF, HYSPLIT 역궤적 분석을 통해 고농도 발생 메커니즘을 종합적으로 검토하였다.

1. 영주지역 PM_{2.5}는 평상시 도내 평균과 유사한 수준을 유지하였으나, 겨울철 정체 조건에서 상대적으로 높은 농도가 지속되는 특성을 보였다. 고농도 일에는 NO₃⁻와 NH₄⁺의 증가 폭이 크게 나타났으며, 2차 무기이온의 합은 PM_{2.5} 질량농도의 월별 변화 추이와 유사한 경향을 보였다. 이는 영주지역 PM_{2.5} 농도 변동이 주로 2차 생성 과정에 의해 좌우되고 있음을 시사한다.
2. PMF 분석 결과 총 6개의 오염원이 도출되었으며, 2차 질산염(30.1%)과 2차 황산염(23.9%)이 전체의 약 54%를 차지하여 2차 생성물 중심의 기여 구조가 확인되었다. 특히 2차 질산염 요인이 가장 높은 기여율을 보였으며 이는 고농도 사례에서 질산염·암모늄 중심의 농도 확대가 나타난 조성 분석 결과와 일관된 해석을 제공한다. 반면 산업활동, 이동오염원, 생물 연소 및 토양 기원 요인은 상대적으로 낮은 비중을 나타내어 특정 단일 배출원이 농도 변동을 주도하는 구조는 아닌 것으로 판단된다.
3. CPF 분석에서는 일부 요인에서 제한적인 방향성이 관찰되었으나, 대부분의 오염원에서 특정 풍향에 집중되는 패턴은 뚜렷하지 않았다. 이는 영주지역의 분지 지형 특성으로 인해 강한 수송보다는 저풍속 및 대기 안정 조건에서 오염물질이 지역 내에 체류·축적되는 특성이 반영된 결과로 해석된다.
4. HYSPLIT 역궤적 분석 결과, 고농도 사례일에는 서쪽 또는 북서쪽 기원의 기류 이동이 반복적으로 확인되었다. 이는 국외 기원 오염물질의 광역적 수송이 배경 농도를 형성하고, 여기에 지역적 정체 조건과 2차 생성 반응이 결합되어 농도가 강화되는 구조적 특성을 보여준다.

종합하면 영주지역 PM_{2.5} 고농도는 특정 국지 배출원의 급격한 증가보다는 광역적 오염물질 유입과 지역 내 정체 및 2차 생성 과정이 결합된 축적형 구조로

설명될 수 있다. 따라서 향후 영주지역 대기질 관리 전략은 개별 배출시설 관리뿐 아니라 질소산화물 및 암모니아 등 전구물질 저감과 계절적 정체 조건을 고려한 광역적 관리 접근이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2025-01-03-002)을 받아 수행하였습니다.

References

- Comero, S., Capitani, L., Gawlik, B.M. (2009) Positive Matrix Factorisation (PMF) - An introduction to the chemometric evaluation of environmental monitoring data using PMF, Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC52754>
- Health Effects Institute (HEI) (2013) National Particle Component Toxicity (NPACT) Initiative: Integrated Epidemiologic and Toxicologic Studies of the Health Effects of Particulate Matter Components, Research Report 177. <https://www.healtheffects.org/publication/national-particle-component-toxicity-npact-initiative-integrated-epidemiologic-and>
- Heo, J.W., Kim, C.H., Min, Y.K., Kim, H.J., Sung, Y.G., Kim, J.S., Lee, K.B., Heo, J.B. (2018) Source Apportionment of PM₁₀ at Pyeongtaek Area Using Positive Matrix Factorization (PMF) Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 849-864, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.849>
- Hopke, P.K. (2016) Review of receptor modeling methods for source apportionment, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(3), 237-259. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1140693>
- Hwang, I.J., Yi, S.M., Park, J.S. (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 abs-

- tract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.620>
- Kim, J.Y., Jung, Y.S., Ha, K.T., Lee, G.C., Kwon, S.K., Kim, T.B. (2024) A Study on Estimating the Source of PM_{2.5} in the Yeongju area through Component Analysis, *Journal of Gyeongsangbuk-do Institute of Health and Environment*, 37, 99-112, (in Korean with English abstract).
- Lee, H.S., Kang, B.W. (2000) Seasonal Characteristics of Elemental and Organic Carbon Concentrations in Fine Particles (PM_{2.5}), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 16(2), 103-111, (in Korean with English abstract). <https://kosae.or.kr:50010/sub6-3.htm>
- Lee, K.M., Lee, C.K. (2007) An Effect of Harmful Materials During Welding Work, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 17(1), 43-49, (in Korean with English abstract). <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00962413>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIRC) (2023) Clean Air Policy Support System (CAPSS). <https://www.air.go.kr/capss/emission/search.do?menuId=33>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) An estimate of internal and external sources contributing to ambient particulate matter and a guideline on the application of air quality receptor models (II), NIER-SP2016-422. <https://doi.org/10.23000/TRKO201700008054>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2023) HYSPLIT User's Guide. https://www.arl.noaa.gov/documents/reports/hysplit_user_guide.pdf
- Park, H.Y., Oh, G.Y., Park, H.S., Kim, H.R., Lee, B.R., Park, C.O., Lim, H.S., Park, G.H., Park, J.S., Bae, M.S. (2021) Assessment of Regional Source Contribution of PM_{2.5} in the Gwangyang Bay Area, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 24(2), 62-74, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.24.2.62>
- Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution : Lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, U.S.A. <https://www.wiley.com/en-au/Atmospheric+Chemistry+and+Physics%3A+From+Air+Pollution+to+Climate+Change%2C+3rd+Edition-p-9781118947401>
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., Ngan, F. (2015) NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stull, R.B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2014) EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-02/documents/pmf_5.0_user_guide.pdf
- Whiteman, C.D. (2000) *Mountain meteorology: Fundamentals and Applications*, Oxford University Press, U.K. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195132717.001.0001>
- World Health Organization (WHO) (2021) Global air quality guidelines: particulate matter(PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Authors Information

- 김지영 (경상북도보건환경연구원 대기질평가과 환경연구사) (kgy535@korea.kr)
- 손영훈 (경상북도보건환경연구원 대기질평가과 환경연구사) (syh0807@korea.kr)
- 정영석 (경상북도보건환경연구원 북부지원 환경분석과 환경연구사) (abcde12345@korea.kr)
- 김자현 (경상북도보건환경연구원 대기질평가과 환경연구사) (powe7454@korea.kr)
- 이병근 (경상북도보건환경연구원 대기질평가과 환경연구사) (yibk21@korea.kr)
- 김효순 (경상북도보건환경연구원 산업폐수과 산업폐수과장) (khskorea@korea.kr)
- 박은하 (포항산업과학연구원 환경연구소 환경보건연구그룹 수석연구원) (eunha0514@rist.re.kr)