

영주지역 초미세먼지 성분분석을 이용한 발생원인 추적 연구

김지영 · 정영석 · 하경태 · 이기창 · 권수경 · 김태분

대기질평가과

A Study on Estimating the Source of PM_{2.5} in the Yeongju area through Component Analysis

J. Y. Kim, Y. S. Jung, K. T. Ha, G. C. Lee, S K. Kwon and T. B. Kim

Air Quality Assessment Division

Abstract

This study aimed to identify the sources of PM_{2.5} in the Yeongju area by analyzing the components of PM_{2.5}. From March to August 2024, samples were collected at the Yeongju-dong monitoring station and analyzed for mass concentration, carbon, ionic, and elemental components. The major components of PM_{2.5} were ionic components (42.9 %), carbon components (40.5 %), residual components (11.4%) and elemental components (5.2%). Among the carbon components, organic carbon was primarily influenced by secondary formation through photochemical reactions while ionic components such as NO₃⁻, SO₄²⁻ and NH₄⁺ were more influenced by point sources than by road traffic sources. The mass concentration of PM_{2.5} during the study period was 15.2±7.6µg/m³, with higher concentrations in the spring and lower concentrations in the summer. This study provides foundational data for estimating the sources of PM_{2.5} in Yeongju and will be valuable for future source analysis using receptor models.

Key Words : PM_{2.5}, Component analysis, Carbon, Ion, Element, CPF, HYSPLIT

I. 연구사업

1. 서론

미세먼지는 대기 중에 떠다니는 미세한 입자로, 그 중 $PM_{2.5}$ 는 직경이 $2.5 \mu m$ 이하인 입자를 의미하며 특히 건강에 미치는 영향이 크다. $PM_{2.5}$ 는 그 미세한 크기 때문에 폐와 혈액으로 쉽게 침투할 수 있어 심혈관계 질환, 호흡기 질환, 폐암 등 다양한 만성 질환의 원인이 될 수 있다.¹⁾ 또한, 장기적인 노출은 면역 시스템에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 최근 여러 연구에서는 $PM_{2.5}$ 와 관련된 건강 문제의 심각성을 경고하고 있다. 특히, 국제암연구소(IARC)는 미세먼지를 1군 발암물질로 분류하였으며, 이는 사람에게 발암성을 확실히 가진 물질로 평가된다는 것을 의미한다. 이와 같은 사실은 미세먼지가 공공보건에 미치는 심각한 위험성을 더욱 강조하며, 이에 따라 $PM_{2.5}$ 의 농도와 성분을 정확히 분석하고 효과적으로 관리하는 연구는 대기질 개선과 건강 보호를 위한 중요한 기초 자료를 제공할 수 있다.

2023년 기준, 경북도 내 각 시·군의 $PM_{2.5}$ 농도를 시각화한 농도분포 지도를 Fig. 1에 나타내었다. 영주시는 과거부터 지속적으로 미세먼지 고농도 이슈가 제기된 지역으로, 타 지역에 비해 상대적으로 미세먼지 농도가 높게 나타나는 경향을 보인다. 고농도 원인으로는 산업화, 교통량 증가, 지형적·기후적 특성 등 복합적인 요인들이 맞물려 있어 해당지역의 고농도 미세먼지 발생 원인에 대한 명확한 규명이 필요하다.

미세먼지의 정확한 발생원인 규명을 위해 성분 분석은 중요한 역할을 한다. 이온, 탄소, 원소 성분 등은 각각 산업, 교통, 농업 등 다양한 원인

에서 발생할 수 있으며 이러한 성분들의 농도와 조성 분석을 통해 미세먼지의 주요 발생 원인을 추정할 수 있다. 성분 분석 결과는 향후 미세먼지의 명확한 발생원인 규명을 위한 PMF(Positive Matrix Factorization) 수용모델을 구동하는 데 중요한 기초 자료가 되며, 이를 통해 각 오염원별 기여도를 정량적으로 추정할 수 있다.

따라서 본 연구는 영주지역의 $PM_{2.5}$ 성분을 분석하고 그 결과와 CPF(Conditional Probability Function) 및 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory) 모델을 이용하여 발생 원인을 추정하며, 나아가 성분 분석 결과를 활용한 수용모델 구동을 통해 각 오염원별 기여도를 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 영주지역의 미세먼지 문제에 대한 심층적인 이해를 도모하고 발생원에 대한 기여도 평가와 지역 특성에 맞는 대기질 개선 방안을 마련하는데 중요한 기초자료를 제공할 것이다.

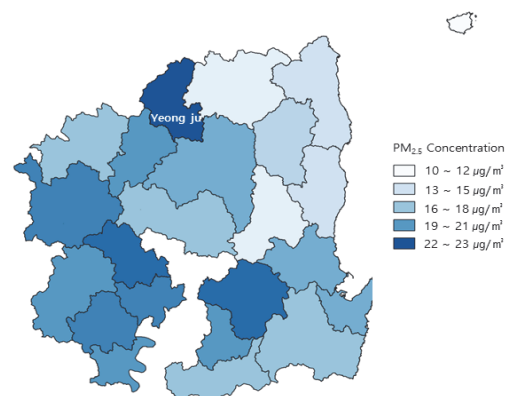


Fig. 1. Spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentrations in Gyeongbuk province, 2023.

2. 연구방법

2.1. 조사 지점

영주지역의 초미세먼지 성분분석을 위해 조사 지점으로 영주동측정소를 선정하였다. 해당지역에는 영주동과 가흥동, 두 지점에 도시대기측정소가 설치되어 있으나 영주 외곽의 녹지지역에 설치된 가흥동측정소보다는 주거지역에 설치된 영주동측정소가 영주지역의 대기질을 대표하기에 더욱 적합하다고 판단하였다.

조사지점인 영주동측정소($36^{\circ} 49'43.3''N$ $128^{\circ} 37'34.2''E$)는 영주지역 도심의 북쪽인 일반주거지역에 위치해 있다. 측정소 북쪽 50 m에는 철탄산이 있고 남쪽 반경 1 km 이내에는 상권이 형성되어 있으며 측정소를 기점으로 동쪽과 서쪽 각각 1 km에는 철도가 지나고 있다. 측정소로부터 남쪽 4 km, 남서쪽 7 km, 서쪽 3.3 km, 북서쪽 9.5 km에는 5개의 일반산업단지과 6개의 농공단지가 분포해 있다.

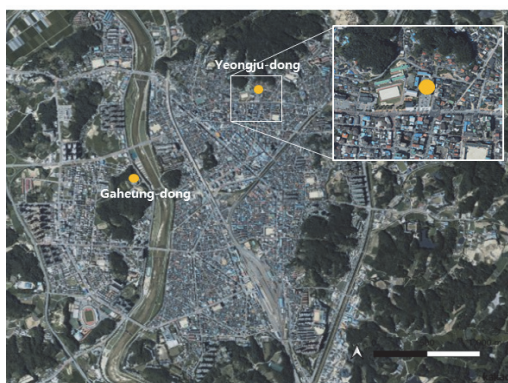


Fig. 2. Sampling location in the Yeongju area.

2.2. 시료 채취

본 연구에서 수행한 초미세먼지 시료채취는 2024년 3월부터 8월까지 6개월동안 진행되었으며, 특별한 주기 없이 가능한 많은 일수 동안 시료를 채취하고자 하였다. Low Volume Sampler 3대를 설치하여 16.67L/min 유속으로 24시간 동안 $PM_{2.5}$ 를 포집하였다. PMS-103 (APM Eng.) 채취기로 먼지를 포집한 여지는 먼저 질량농도를 분석한 이후에 원소성분 분석에 이용하였고, E-SEQ-FRM (Metone Ins.) 2대로 포집된 여지는 각각 이온성분과 탄소성분 분석에 이용하였다.

분석성분 종류에 따라 각각 다른 여지를 사용하였는데 질량농도와 원소, 이온성분은 PTFE (PT48AN-KT, MTL) 필터, 탄소 성분은 석영 필터 (TISSUQUARTZ 2500-QAT-UP, PALLFLEX)를 사용하여 시료를 채취하였다.

시료채취 전에는 여지를 전처리하는 과정이 필요하다. 질량농도 분석에 이용한 PTFE 필터는 $20^{\circ}C$, 습도 35 % 조건에서 24시간 이상 여지를 항량시킨 후 전무게 측정을 하였고, 이온성분용 PTFE 필터는 지구상에 흔히 존재하는 염소이온의 오염을 배제하기 위해 초순수에 침지시킨 상태로 120 rpm으로 1시간 교반 후 자연건조시켜 샘플링에 이용하였고²⁾, 탄소성분용 석영필터는 유기성분과 같은 불순물을 제거하기 위해 $850^{\circ}C$ 이상에서 4시간 이상 열처리한 후 사용하였다.

I. 연구사업

Table 1. Analytical conditions of ion chromatography.

	Cations	Anions
Instrument	ICS-5000(Dionex)	ICS-5000(Dionex)
Column	Ionpac CS12A	Ionpac AS19
Detector	Conductivity detector	Conductivity detector
Suppressor	CDRS 600	ADRS 600
Eluent	15mM MSA	20mM KOH
Flow rate	1mL/min	1mL/min
Injection vol.	100 μ l	25 μ l

2.3. 시료 분석

PM_{2.5}의 각 성분은 대기환경측정망 설치·운영 지침(2024)³⁾에 준하여 분석하였다.

PM_{2.5}의 질량농도 분석은 온도 20 ℃, 습도 35 %의 항온·항습 조건을 유지하는 로봇칭량시스템(ChamBAL-500, C2K Creative, Korea)을 사용해 1 μ g 단위까지 칭량하여 먼지 포집 전·후의 무게 차를 유량으로 나누어 계산하였다.

이온성분은 먼지가 포집된 필터를 50 mL 튜브에 넣고 에탄올 200 μ l에 침적시킨 후 초순수(18.2 M Ω ·cm, Milli-Q Water) 20 mL를 정확히 첨가하여 1 시간 동안 초음파(JAC-4020, KODO)로 추출하였다. 추출한 시료는 칼럼 오염 방지를 위해 나일론 재질의 0.45 μ m 멤브레인 필터로 여과시켜 분석에 이용하였다. 시료는 이온 크로마토그래피(ICS-500, Dionex)을 사용하여 Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, NH₄⁺, Na⁺의 양이온 성분과 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻의 음이온 성분으로 총 8개 항목을 분석하였으며, 상세한 분석조건은 Table 1에 나타내었다.

탄소성분은 탄소분석기(Thermal optical

OC/EC analyzer, Model 5L, Sunset Laboratory Inc., USA)를 이용하여 유기탄소(Organic Carbon, OC)와 원소탄소(Element Carbon, EC)를 분석하였다. 해당 장비는 산소 존재 유무와 레이저 투과율에 따라 탄소를 분석하는 열광학적 투과도(Thermal Optical Transmittance, TOT) 방식을 이용하며 시료가 채취된 여지는 1.50 cm² 크기로 편칭하여 분석에 이용하였다.

원소 성분은 대기오염공정시험기준(질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법)에 준하여 시료를 전처리하여 분석하였다. 전처리 용액은 0.45 μ m 멤브레인 필터로 여과한 후 유도결합플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, ICP-MS, JP/7900, Agilent, USA)를 이용하여 총 15개 항목(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Al, Zn, As, V, Sn, Ba, Sb, Se)을 분석하였다. 본 연구에서는 PMF 수용모델 입력 자료 전처리 가이드라인⁴⁾에 따라 Na, Ca, Mg 과 같이 이온성분과 원소성분으로 중복되는 물질(예. Ca vs Ca²⁺)들은 PM_{2.5} 총 질량농도를 중복

계산 할 수 있어 이온성분을 선택하였으므로 원소성분에서는 생략되었다.

2.4. CPF Model

CPF(Conditiaonal Probability Function) 모델은 풍향, 풍속 등 기상관측 자료와 수용체에 서 측정된 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 1에 의해 계산할 수 있다.

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (1)$$

식에서 $m_{\Delta\theta}$ 은 기여도 값이 한계값 이상일 때 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 풍향의 발생 횟수이고, $n_{\Delta\theta}$ 는 동일 영역 풍향의 총 발생 횟수를 의미한다. 본 연구에서는 풍속이 매우 낮을 때, 즉 0.5 m/s 미만일 경우 불확실성이 높기 때문에 이러한 경우는 제외하였다. 풍향은 24방위를 기준으로 분석하였으며, 한계값은 기여도의 90th percentile을 적용하였다.

2.5. Hysplit Model

본 연구에서는 특정기간 동안 공기의 이동경로를 파악하기 위해 미국해양대기국(NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 Hysplit 5.3.0(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 활용하였다.

모델에 필요한 기상자료로는 공간 해상도 1° 인 GDAS 1(Global Data Assimilation System)을 사용하였으며, 역궤적의 모사 시간은 72시간, 계산 간격은 6시간으로 설정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. PM_{2.5} 구성성분 및 질량농도

본 연구기간 동안 영주동 측정소에서 채취한 PM_{2.5} 시료의 분석 결과, 각 성분의 농도는 이온 ($6.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 탄소 ($6.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 기타 ($1.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 원소 ($0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났다. (Fig. 3(a)).

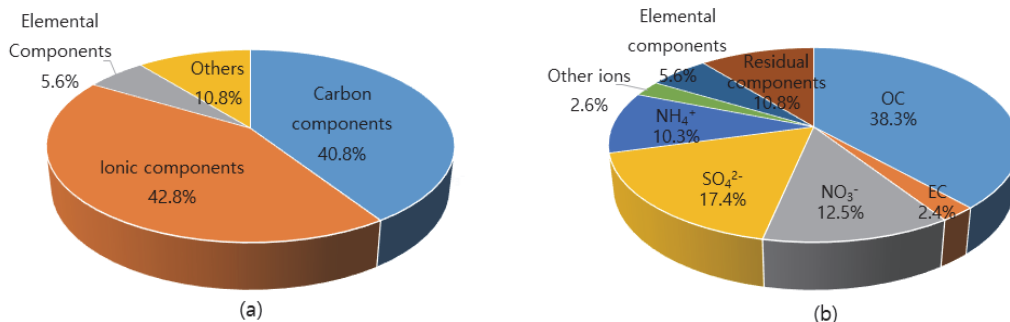


Fig. 3. Composition ratios of PM_{2.5}(a) and in detailed analysis (b).

I. 연구사업

탄소 구성성분은 유기탄소가 38.3 %로 대부분을 차지했으며 원소탄소는 2.4 %로 상대적으로 적은 비율을 나타냈다, 이온성분에서는 2차 오염물질인 SO_4^{2-} (17.4 %), NO_3^- (12.5 %), NH_4^+ (10.3 %)가 주요 성분을 구성하였고 나머지 이온(K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^-)은 2.6 %를 차지했다(Fig. 3(b)).

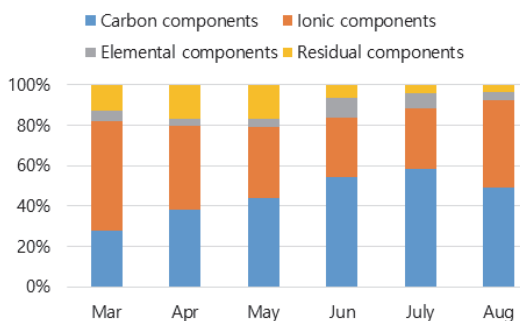


Fig. 4. Monthly variation of PM_{2.5} component composition.

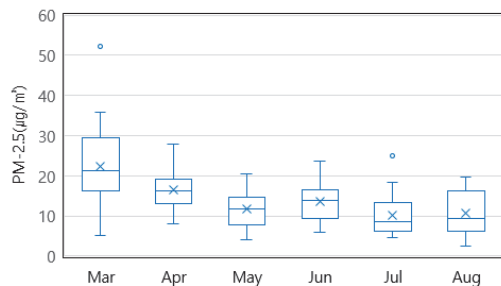


Fig. 5. Monthly concentration distribution of PM_{2.5}

Fig. 4에 나타낸 월별 구성성분 변화에서는 여름철에 이온성분의 비율이 감소하고 상대적으로 탄소성분의 비율이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 여름철에는 겨울철 대비 대기 확산이 활발하게 일어나기 때문에 대기 중에 충분

하게 존재하는 가스상 전구체(SO_x , NO_x , NH_3)들이 입자상으로 변환하여 생성되는 2차 생성 입자들이 상대적으로 감소하기 때문으로 판단된다.

영주동측정소에서의 PM_{2.5} 질량농도는 $15.2 \pm 7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었으며, 월별 변화를 살펴보면(Fig. 5) 봄철($17.2 \pm 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 높은 농도를, 여름철($12.2 \pm 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 상대적으로 낮은 농도를 보였다. 이러한 계절적 패턴은 여름철의 잦은 강우와 화석연료 사용 감소로 인해 영향을 받을 수 있다⁵⁾. 강우에 의한 세정효과와 더불어 여름철 난방수요 감소로 인해 화석연료 사용이 줄어든 점이 미세먼지 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

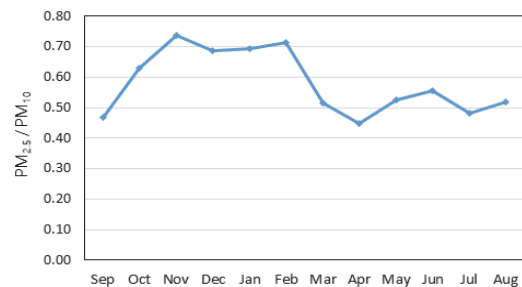


Fig. 6. Monthly variation of PM_{2.5}/PM₁₀.

Fig. 6에는 2023년 9월부터 2024년 8월까지 1년간 영주동측정소의 자동측정기 데이터를 이용하여 PM_{2.5}와 PM₁₀의 비율을 나타냈다. 가을(0.61), 겨울(0.70)철에 비해 봄(0.50), 여름(0.52)철에 PM_{2.5}의 비율이 낮고 PM₁₀의 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

가을과 겨울철에는 연소 활동 증가로 인해 PM_{2.5} 농도가 높아지는 반면, 봄과 여름철에는 황사나 먼지 재비산 등 자연적 배출원의 기여도가 커지면서 PM_{2.5-10}의 비율이 증가한 것으로

보인다.⁶⁾ 이는 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 농도가 계절별 기상 조건과 인간 활동의 영향을 받는다는 점을 시사한다.

3.2. 탄소성분

Fig. 7은 영주동측정소에서 채취한 시료의 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC)의 월별 농도분포를 나타낸다. 유기탄소의 평균 농도는 $5.8 \pm 2.2 \mu g/m^3$, 원소탄소는 $0.4 \pm 0.2 \mu g/m^3$ 로 측정되었다. Fig. 8은 월별 유기탄소와 원소탄소의 비율을 나타내는데 평균 18.4 ± 9.1 로 봄철보다 여름철에 상대적으로 증가하는 경향을 보였다. 유기탄소/원소탄소 비율이 2.0을 초과하면 이때 유기탄소는 대기 중에서 광화학 반응으로 생성된 2차 오염물질로 분류한다.⁷⁾ 따라서 영주동측정소에서 채취한 $PM_{2.5}$ 시료의 탄소성분은 주로 화학반응에 의한 2차 오염물질로 해석되며, 여름철에 유기탄소의 비율이 증가하는 이유는 높은 온·습도로 인해 광화학반응이 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

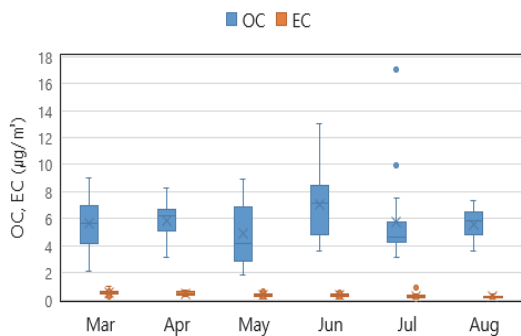


Fig. 7. Monthly distribution of OC, EC concentration.

Fig. 9에는 유기탄소와 원소탄소 간의 상관

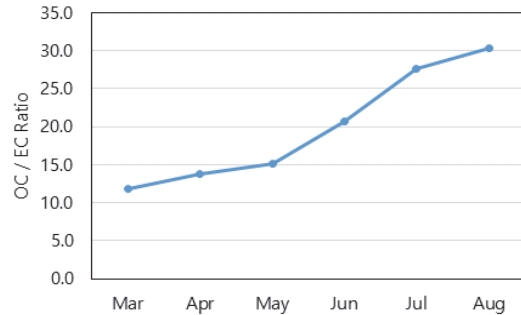


Fig. 8. Monthly variation of OC/EC ratio.

관계를 나타내었는데, 두 성분이 높은 상관관계를 보일수록 동일한 탄소원에서 배출된 것으로 해석된다⁸⁾. 원소탄소는 주로 화석연료의 연소(특히 디젤자동차)와 소각 등에서 주로 배출되는 성분으로 1차 배출원의 주요 지표로 간주되는⁹⁾ 반면, 유기탄소는 화석연료의 연소 외에도 휘발성 유기화합물(VOCs)의 광화학 반응에 의해 주로 생성된다. 상관관계수는 봄철 0.7155, 여름철 0.6635로 나타났다. 여름철에 상관관계가 상대적으로 낮은 이유는 유기탄소가 2차 생성 등 다양한 배출원의 영향을 받아 농도가 증가했기 때문으로 해석된다. 특히, 여름철에는 광화학 반응에 의한 유기탄소의 생성이 두드러지며, 이로 인해 원소탄소와 유기탄소 간의 상관관계가 상대적으로 낮아진 것으로 보인다.

3.3. 이온성분

이온성분 분석 결과, 각 항목의 평균 농도는 SO_4^{2-} ($2.637 \mu g/m^3$) > NO_3^- ($1.929 \mu g/m^3$) > NH_4^+ ($1.552 \mu g/m^3$) > Cl^- ($0.193 \mu g/m^3$) > K^+ ($0.078 \mu g/m^3$) > Ca^{2+} ($0.058 \mu g/m^3$) > Na^+ ($0.039 \mu g/m^3$) > Mg^{2+} ($0.026 \mu g/m^3$) 순으로

I. 연구사업

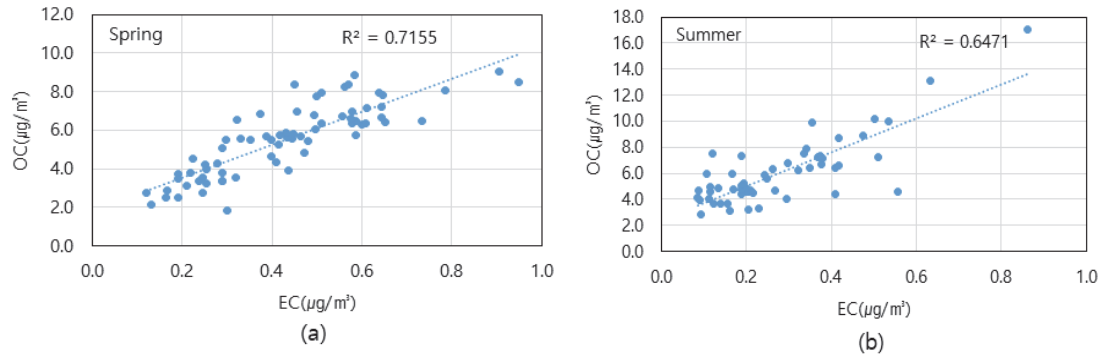


Fig. 9. Correlation of OC and EC in spring (a) and summer (b) seasons.

나타났다. 특히 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 는 2차 오염 물질로 알려져 있으며¹⁰⁾ 이 세 가지 이온성분이 전체 중 93.9%로 대부분을 차지하고 있다(Fig. 10).

이온성분 중 NO_3^- 는 도시지역에서, SO_4^{2-} 는 인위적 배출원이 있는 지역에서 주로 발생하며 NH_4^+ 는 동물농장이나 비료 사용이 많은 농업지역의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 비율을 나타내는 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 값은 0.72로 1미만의 값을 보였다. 이는 영주동 측정소의 $\text{PM}_{2.5}$ 가 도로이동 오염원보다는 점 오염원의 영향을 많이 받음을 시사한다.¹²⁾

Fig. 11에는 2차 오염물질인 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 합과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 월별 변화를 나타내었는데, 이온성분 합의 변화 추이가 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 월별 변화 추이와 유사함을 확인할 수 있었다. 이는 이온성분이 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도 변화와 밀접한 관계가 있음을 나타내며 특히 2차 오염물질이 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 주요한 기여 요소임을 보여준다.

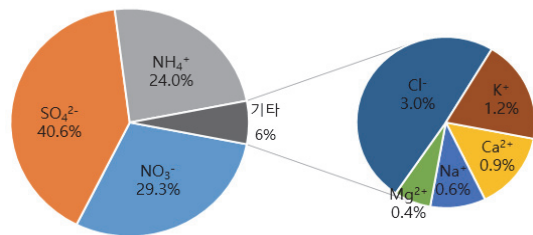


Fig. 10. Composition ratios of ionic components in $\text{PM}_{2.5}$.

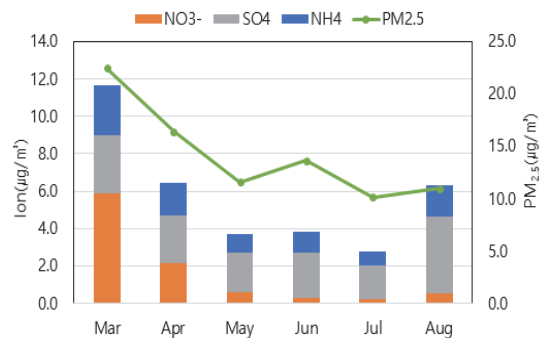


Fig. 11. Monthly variation of $\text{PM}_{2.5}$ and the sum of secondary pollutants (SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+).

3.4. 원소성분

원소성분은 크게 자연적 발생원(지각)에서 기인한 Al, Ca, Mg, Fe 등과 나머지 인위적 오염물질로 구분할 수 있는데²⁾, 분석한 15개 항목의 농도 분포는 Al > Zn > Fe > Pb 순으로 Al이 가장 높게 나타났다. 이는 Al은 지각을 구성하는 주요 원소로서 자연적으로 대기 중에 유입될 가능성이 크기 때문으로 판단된다. 또 지역 내 알루미늄 가공 및 주조 공정에서 발생하는 미세입자가 대기 중 농도를 증가시키는 요인으로 작용했을 가능성이 있다¹³⁾. 영주는 대도시에 비해 자동차 배기가스 및 산업 활동이 적어 자연적 기원의 영향을 더 크게 받을 수 있으며 이러한 요인들이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다.

하지만 자동차 활동이 완전히 배제되는 것은 아니므로 인위적 오염물질에서도 일부 자동차 관련 원소가 확인되었다. 인위적 오염물질 중에서는 Zn이 38.1 %로 가장 높은 비율을 차지했고 그다음은 Pb(1.22 %) > V(0.73 %) > Cu(0.59 %) > Cr(0.58 %) > Mn(0.46 %) > Ni(0.43 %) >

As(0.32 %) > Ba(0.27 %) > Sn(0.22 %) > Se(0.18 %) > Sb(0.06 %) > Cd(0.04 %) 순으로 나타났다. Zn과 Pb은 타이어 마모, Cu는 브레이크 마모에서 발생하는 것으로 알려져 있어¹⁴⁾ 자동차에 의한 오염 영향이 일부 반영된 것으로 판단된다.

이 외에도 V과 Ni은 주로 석유연소 과정에서¹⁵⁻¹⁷⁾, As, Pb은 석탄연소 과정에서 발생한다고^{15, 16)} 알려져 있어 지역 내 난방 또는 산업용 연료 연소가 영향을 미쳤을 가능성이 있다. Fe, Mn, Cu, Cr 등은 공업지역에서 흔히 검출되는 성분으로^{13, 14)}, 금속가공이나 용접 등 지역 내 특정 산업 활동에서 기인했을 가능성이 있다¹⁸⁾.

3.5. CPF(Conditional Probability Function)

영주동측정소에서 채취한 PM_{2.5}의 국지적 오염방향을 파악하기 위해 풍향·풍속 및 PM_{2.5} 농도를 활용하여 CPF 모델을 적용하였다. 측정소를 기점으로 철탄산이 위치한 북쪽을 제외한 동,

Table 2. Descriptive statistics of summary table of elemental components. ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)

	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	Al
Mean	0.0089	0.0003	0.0042	0.0043	0.0033	0.1217	0.0031	0.2896
S.D	0.0050	0.0005	0.0031	0.0084	0.0022	0.0828	0.0029	0.1040
Min	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Max	0.0295	0.0036	0.0164	0.0482	0.0100	0.4049	0.0195	0.6958
	Zn	As	V	Sn	Ba	Sb	Se	
Mean	0.2761	0.0023	0.0053	0.0016	0.0020	0.0004	0.0013	
S.D	0.2314	0.0016	0.0003	0.0017	0.0021	0.0004	0.0008	
Min	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	
Max	1.1352	0.0081	0.0063	0.0095	0.0085	0.0030	0.0035	

I. 연구사업

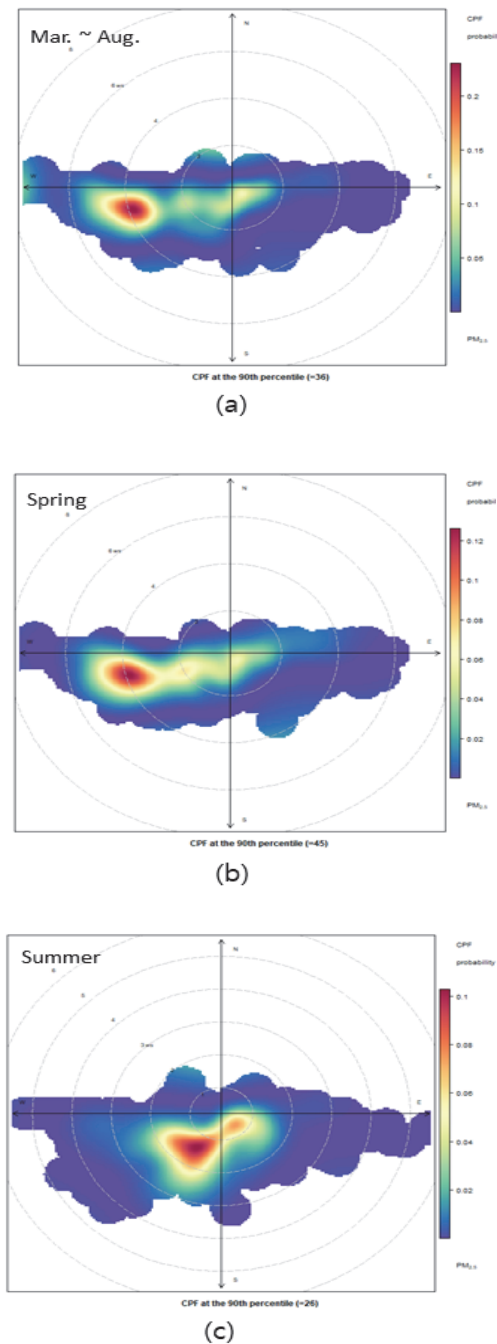


Fig. 12. CPF results of PM_{2.5} concentration.

서, 남 방향에서 고르게 바람이 불어오는 경향을 보였다. 연구기간 동안 전체적으로 약 4 m/s의 풍속의 남서서풍이 불 때 PM_{2.5} 농도가 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (90th percentile) 이상인 빈도가 가장 많이 나타났다(Fig. 12(a)). 계절별로 구분했을 때는 봄철에는 전체 기간과 유사한 경향으로 남서서풍이 약 4 m/s로 불어올 때 90th percentile 이상의 농도가 발생했으며(Fig. 12(b)), 여름철에는 약 1 ~ 2 m/s 범위의 남서풍이 불 때 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도 발생 빈도가 가장 많이 나타났다(Fig. 12(c)).

CPF 모델은 풍향과 풍속을 기반으로 국지적인 오염방향을 추정하는데 유용하지만 지형과 건물의 영향을 많이 받는다는 단점이 있다⁶⁾. 그럼에도 불구하고 이 모델은 국지적인 오염방향을 추적하는데 효과적이며 실제 측정소 주변의 배출업소 위치와 모델 결과를 비교하여 오염원 추적에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 지역적 특성에 맞춰 모델을 적용하고 오염원 위치와의 연관성을 분석함으로써 더욱 정확한 오염원 파악이 가능할 것이다.

3.6. Hysplit(Hybrid Single Particle Lagrangian Trajectory)

장거리 이동에 의한 오염 영향을 파악하기 위해 PM_{2.5}의 평균 질량 농도가 가장 높았던 3월(Fig. 13(a))과 가장 낮았던 7월(Fig. 13(b))을 대상으로 Hysplit 역궤적 모델을 수행하였다. 먼저 3월의 기류 유입경로는 3개의 군집으로 분류되었다. 첫 번째 군집(Cluster 1)은 전체 기

류 중 36 %을 차지하며 서해의 낮은 고도에서 생성되어 국내로 유입되는 경로를 나타냈다. 두 번째 군집(Cluster 2)은 가장 높은 비중인 42 %를 차지했으며 중국 고비사막 인근에서 발원하여 북한과 강원지역을 거쳐 유입되었다. 마지막으로 세 번째 군집(Cluster 3)은 22 %로 몽골 북부와 러시아 남부 경계에서 생성된 뒤 고비 사막 인근과 북한, 수도권을 거쳐 Cluster 2와 평행한 경로로 빠르게 유입되었다. 이와 같이 3월의 기류는 주로 북서풍 및 서풍을 따라 유입되는 경로가 지배적이었다.

반면 PM_{2.5} 농도가 낮은 7월의 기류 유입 경로는 6개의 군집으로 분류되었다. 첫 번째 군집(Cluster 1)은 전체의 23 %를 차지하며, 한반도의 남서해에서 생성된 뒤 서해안을 거쳐 느린 속도로 국내로 유입되는 경로를 보였다. 두 번째 군집(Cluster 2)은 22 %로 대만의 동쪽 해역에서 생성되어 동중국해를 거치는 경로로, 한반도 인근에서부터는 첫 번째 군집과 유사한 경로로 유입되었다. 세 번째 군집(Cluster 3)은 26 %로 첫 번째, 두 번째 군집과 비교하여 근소한 차이지만 가장 높은 비중을 차지하였으며 오키나와의 남서쪽에서 발원하여 제주도와 남해를 거쳐 남풍을 따라 유입되었다.

네 번째 군집(Cluster 4)과 다섯 번째 군집(Cluster 5)은 가장 낮은 비중인 5 %를 차지하며 각각 중국의 후난성에서 생성되어 서풍을 타고, 일본의 다카오카시 인근 북쪽 해역에서 생성되어 동풍을 타고 유입되었다. 마지막으로 여섯 번째 군집(Cluster 6)은 18 %를 차지하며 필리핀해에서 발원 후 동중국해와 한반도 남서해를

통과하여 국내로 유입되었다.

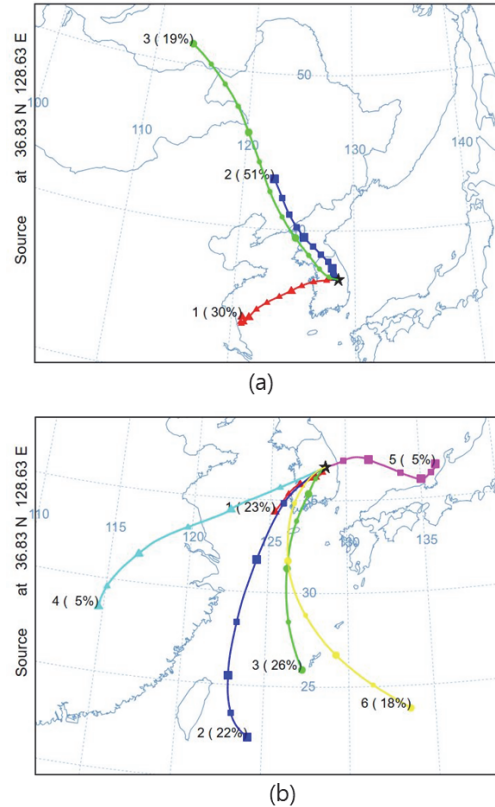


Fig. 13. Backward trajectories and cluster analysis for March (a) and July (b).

두 시기를 비교한 결과 3월에는 주로 고비사막, 몽골, 러시아 남부 등 북서쪽과 서쪽에서 유입된 기류가 우세한 반면, 7월에는 한반도 남서해, 동중국해, 필리핀해 등 남쪽에서 유입되는 기류의 비중이 증가했으며, 동풍과 서풍의 영향도 일부 확인되었다. 이는 봄철과 달리 여름철에는 북쪽의 중국지역보다 남쪽 해상의 영향을 더 크게 받는다는 것을 시사한다. 계절에 따른 기상조건 변화로 기류의 발원지와 이동 경로가 달라지며,

I. 연구사업

결과적으로 대기오염물질의 유입 경로와 농도에
도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 경상북도 영주지역의 PM_{2.5} 성분
분석을 통해 발생원인 추적을 위한 기초자료를 제
공하는 것을 목표로 하여 2024년 3월부터 8월까
지 영주동측정소에서 시료를 채취하여 질량농
도, 탄소, 이온, 원소 성분을 분석하였고 그 결과
는 다음과 같다.

1. PM_{2.5}의 구성성분 평균 농도는 이온($6.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 42.9 %), 탄소($6.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 40.5 %), 기
타($1.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 11.4 %), 원소($0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 5.2
%) 순으로 나타났다.

2. 연구기간 동안 영주동 측정소의 PM_{2.5} 평균
질량농도는 $15.2 \pm 7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 계
절별로 봄철($17.2 \pm 1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 높고, 여름
철($12.2 \pm 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 상대적으로 낮은 특
성을 보였다. 이는 봄철의 잦은 대기 정체와 여름
철의 강우량 증가 및 화석연료 사용 감소 등의 영
향으로 해석된다.

3. 탄소성분 분석 결과, 유기탄소(OC)는 $5.7 \pm 2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 원소탄소(EC)는 $0.4 \pm 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$
로 나타났으며, 총탄소의 40.5 % 중 유기탄소는
38.1 %, 원소탄소는 2.4 %를 차지했다. OC/EC
비율과 OC, EC 간의 상관관계를 고려할 때, 여름
철의 OC 농도는 광화학반응 및 2차 생성 등 다양
한 배출원의 영향을 받았을 것으로 판단된다.

4. 이온성분은 전체 PM_{2.5} 성분 중 42.9 %를
차지하며, 특히 2차 오염물질인 NO_3^- , SO_4^{2-} ,
 NH_4^+ 가 전체 이온성분의 40.3 %를 차지했다.
 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 값이 1미만으로 나타나 영주측정
소에서 PM_{2.5}의 이온 성분은 도로이동 오염원보
다는 점 오염원의 영향을 더 많이 받았을 것으로
추정된다.

5. 원소 성분은 전체 PM_{2.5}의 주요 구성 요소
중 하나로써, 분석 결과 $\text{Al} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Pb}$ 순으
로 농도가 높게 나타났다. 영주지역은 비교적 산
업시설이 적고, 농경지와 산지가 넓게 분포하고
있어 지각 기원의 원소가 높은 비율을 차지하는
것으로 보인다. 또한 Zn과 Pb의 농도가 높은 것
으로 보아 타이어 마모 등 자동차에 의한 오염 영
향을 일부 받는 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 영주지역의 PM_{2.5} 발생원과 성
분 특성을 파악하는데 중요한 기초자료를 제공
하며 향후 PM_{2.5} 발생원 추적 및 대기질 개선 방
안을 수립하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된
다. 또한 본 연구에서 도출된 성분분석 결과는 다
음 연구에서 PMF 수용모델을 위한 입력자료로
활용될 예정이며 이를 기반으로 PM_{2.5}의 주요 발
생원을 보다 정확하게 분석하고 지역특성에 맞
춘 대기질 개선 방안을 제시할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 장안수, “미세먼지가 건강에 미치는 영향”, 대한
의사협회지, 57(7), 2014.

2. 서울시보건환경연구원, “2019년 서울시 초미세먼지 성분 분석 보고서”, 2019.
3. 환경부·국립환경과학원, “대기환경측정망 설치·운영지침”, 2024.
4. “미세먼지의 국내외 기여율 산정 및 수용모델 적용 가이드라인 마련(II) 최종보고서”, 국립환경과학원, 2017.
5. 성민영, 박진수, 김현재, 전하은, 홍유덕, 홍지형, “서울과 대전지역 $PM_{2.5}$ 중 원소성분의 농도 특성”, *한국환경분석학회지*, 18(1), 2015.
6. 조성환, 김현웅, 한영지, 김우진, “강원도 춘천과 영월에서 측정한 미세먼지 농도 특성 및 고농도 원인 분석”, *한국대기환경학회지*, 32(1), 2016.
7. 이학성, 강병욱, “미세입자($PM_{2.5}$)에 포함된 탄소 농도 계절 특성”, *한국대기환경학회지*, 16(2), 2000.
8. 김효선, 정진상, 이진홍 이상일, “대전지역 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 유기탄소와 원소탄소의 계절별 특성 연구”, *한국대기환경학회지*, 31(1), 2015.
9. 이형우, 이태정, 김동술, “PMF 모델을 이용한 미세먼지의 오염원 확인과 기여도 추정 : 탄소성분을 이용한 휘발유 및 경유차량 오염원의 분리”, *한국대기환경학회지*, 25(1), 2009.
10. 엄정훈, 박세영, 권승미, 신진호, 조석주, 김현욱, “디누더(Denuder)장착 여부에 따른 초미세먼지($PM_{2.5}$) 중 암모늄 과대평가와 이온 밸런스에 관한 연구”, *환경분석과 독성보건*, 24(2), 2021.
11. 허종원, 성연국, 김현자, 김규석, 이정아, 임유진, 김찬혁, 박민빈, 문혜란, 오조교, “PMF 수용모델을 이용한 포천 지역 $PM_{2.5}$ 의 오염원 기여율 평가”, *경기도보건환경연구원보*, 32, 2019.
12. X. Xu, B. Chen, T. Wen, A. Habib and G. Shi, "Concentrations and chemical compositions of PM_{10} during hazy and non-hazy days in Beijing", *Journal of Environmental Sciences*, 87, 1-9, 2020.
13. 서정민, 박정호, “알루미늄 주조과정에서 배출되는 입자상물질의 물리·화학적 특성”, *한국환경과학회지*, 33(5), 2024.
14. 박혜영, 오길영, 박현수, 김학립, 이보람, 박찬오, 임향선, 박귀환, 박종수, 배민석, “광양만권 대기 중 초미세먼지 원인별 기여율 평가”, *환경분석과 독성보건*, 24(2), 2021.
15. 황인조, 이승목, 박진수, “EPA-PMF 모델을 이용한 집중측정소 24시간 $PM_{2.5}$ 자료에 대한 오염원 기여도 추정” *한국대기환경학회지*, 36(5), 2020.
16. 신지혜, 김영민, 박천웅, 안정준, 유하나, 김종숙, 정금희, 최진하, “충남지역 배출원별 $PM_{2.5}$ 중 이온, 탄소, 원소성분의 특성 연구”, *환경분석과 독성보건*, 24(1), 2021.
17. 방종혁, 신지혜, 진가연, 김종숙, 유하나, 김나영, 박천웅, 이병창, 정금희, “PMF 모델을 이용한 충청남도지역 $PM_{2.5}$ 오염원 기여도 추정연구”, *충청남도보건환경연구원보*, 33, 2023.
18. 강용선, 신중규, 이송권, 윤충식, 임무혁, 박만철, 심상효, “조선업 용접작업장의 공기중 입자상물질 및 구성성분에 관한 연구”, *한국산업위생학회지*, 17(3), 2007.
19. 오상민, 윤숙희, 박재선, 허유정, 이수형, 유은진, 김민섭, “충청남도 태안 교외대기 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 중금속 농도 특성과 기원 추적연구”, *한국입자 에어로졸학회지*, 19(4), 2023.

I. 연구사업

이 연구는 경상북도와 국립환경과학원(NIER-2024-01-03-001)의 지원으로 수행되었습니다.