

ORIGINAL ARTICLE

광주 평동 산업단지 대기 중 중금속 농도의 변동 특성 연구

김환기* · 윤상훈 · 이우진 · 박원형 · 신선오 · 김난희

광주광역시보건환경연구원

Characteristics of Variations in Atmospheric Heavy Metal Concentrations in the Pyeong-Dong Industrial Complex, Gwangju

Hwan-Gi Kim*, Sang-Hoon Yoon, Woo-Jin LEE, Won-Hyeong Park, Sun-oh Shin, Nan-Hee Kim

Health and Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju 61954, Korea

Abstract

This study investigated the long-term concentration characteristics, seasonal variations, and potential sources of atmospheric heavy metals measured at the Pyeong-Dong Industrial Complex in Gwangju, Korea, using five-year monitoring data (2020-2024). A total of 12 elements (Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Mn, Ca, Mg, Al, Fe, As, and Be) were analyzed. The results showed that crustal elements, including Fe, Ca, Al, and Mg, dominated the overall composition, whereas anthropogenic trace metals such as Cr, Cd, Ni, and As were generally observed at relatively low concentration levels. Most elements exhibited a common increase in 2023, and clear seasonal patterns were identified, with lower concentrations in summer and higher concentrations in winter and the transitional seasons (spring and autumn). Factor analysis classified atmospheric heavy metals into three major source-related factors. Factor 1 was a crustal source associated with soil and resuspended dust, characterized by Ca, Mg, and Al; Factor 2 was an industrial and metal-processing source characterized by Pb, Fe, Mn, and Cu; and Factor 3 was a combustion and metal-smelting source dominated by Cd, Cr, Ni, and As. Polar plot analysis incorporating wind speed and wind direction revealed that the contributions of all three factors increased predominantly under low wind-speed conditions, indicating that local emission sources and stagnant atmospheric conditions exert a stronger influence than long-range transport at the study site. Seasonal polar plots further showed distinct directional dependencies among the factors, with the industrial and combustion-related factors exhibiting higher contributions during autumn and winter. These results provide useful baseline information for source-oriented management strategies and for improving heavy-metal monitoring networks in industrial areas similar to the Pyeong-Dong industrial complex.

Key words : Atmospheric heavy metals, Source apportionment, Polar plot analysis, Pyeong-Dong industrial complex

1. 서론

최근 도시화나 산업화의 가속화로 인해 대기오염에 대한 관심이 전 세계적으로 증가하고 있다. 특히 대기 중 입자상 물질은 인체 건강에 위해를 초래하는 주요 오

염물질로 인식되고 있으며, 그 건강 영향은 단순한 질량 농도뿐만 아니라 화학적 조성에 따라 달라질 수 있음이 보고되고 있다(WHO, 2021). 이러한 입자상 물질에는 중금속이 포함되어 있으며, 이들 중 일부 금속 및 금속 화합물은 발암성이 있는 것으로 평가된 바 있다(IARC,

Received 26 February, 2026; Revised 31 March, 2026;

Accepted 8 April, 2026

*Corresponding author : Hwan-Gi Kim, Health and Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju 61954, Korea

Phone : +82-62-613-7620

E-mail : khg9044@naver.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2013). 대기 중 중금속은 광산 산업, 연료 연소, 산불, 암석의 풍화 등 다양한 인위적 및 자연적인 발생원을 통해 대기 중으로 배출된다. 배출된 중금속은 환경에서 쉽게 분해되지 않으며, 여러 경로를 통해 체내에 축적되어 인체 건강에 악영향을 미쳐 호흡기 및 순환기계 질환, 신경계 손상, 면역 기능 저하, 발암 위험 증가 등 각종 건강 장애를 유발할 수 있다(Kang et al., 2018; Choi et al., 2021; Matei et al., 2025). 특히 산업지역이나 교통량이 많은 공업지역에서는 일반 대기 환경에 비해 중금속 농도가 높게 나타나며, Pb, Cu, Cr, Ni 등 주요 금속은 산업시설에서 인위적으로 배출되는 대표적인 오염물질로 알려져 있다(Park et al., 2022). 이에 따라 국내에서도 산업지역과 도시지역을 중심으로 대기 중 중금속 농도 특성과 발생원에 관한 연구가 수행되어 왔다. 울산 등 산업 도시를 대상으로 한 연구에서는 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 내 중금속의 계절적 변동 특성과 발생원을 분석하여, 산업활동, 연료 연소 및 재비산 먼지가 주요 기여 요인임을 보고하였으며, 또한 수도권 및 대도시 지역을 대상으로 한 연구에서도 대기 중 중금속의 공간적 분포와 조성이 지역의 산업 구조와 교통 여건에 따라 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다(Jeong et al., 2023; Ju et al., 2025; Matei et al., 2025). 광주광역시에서는 6개 대기 중금속측정소를 통해 12개 항목에 대한 월별 5일간의 일평균 농도를 조사하고 있다. 6개의 대기 중금속측정소는 녹지지역 2개소, 공업지역 2개소, 주거지역 2개소에 운영되고 있으며, 2020년부터 2024년까지의 관측자료를 보면 공업지역에 위치한 평동측정소에서 Cr, Pb, Mn 등 인위적 배출 기원의 중금속 농도가 다른 측정소에 비해 상대적으로 높게 나타났다(Gwangju Institute of Health and Environment, 2025). 평동지역은 다양한 산업 활동과 연료 연소가 복합적으로 작용하여 배출 특성이 상이한 여러 중금속이 존재하며, 주변 지형과 기상 조건의 영향을 받아 농도 분포가 복잡하게 나타나는 특성을 가진다(Kim et al., 2023). 따라서 본 연구에서는 평동지역 대기중금속 측정소에서 채취된 대기 중 미세먼지(PM₁₀)를 대상으로 12종 중금속 장기 관측자료를 활용하여 농도 수준과 오염 특성을 파악하고, 오염원의 공간적 분포 특성을 종합적으로 평가하여 향후 배출원 관리 및 대기중금속 측정망 운영 개선을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 측정지점

Fig. 1은 광주광역시 평동 산업단지 내 시료 채취 지점을 나타낸 것이다. 해당 지점은 산업단지 중심부에 위치하여 인근 주요 산업시설의 영향을 종합적으로 반영할 수 있는 지점으로 판단된다. 산업단지 주변 지형적 특성으로는 북쪽 및 북서쪽에 해발 200 m의 북룡산과, 해발 300 m 어등산이 위치하여 산간지역을 형성하고 있다. 이러한 산간 지역에서는 지형 국지풍(local circulation)이 형성되어 대기오염물질의 수송 경로와 체류시간, 확산 양상이 변화되거나 재순환, 정체, 국지적 축적 등이 발생하며 이는 산지와 평지가 인접한 지형적 특성이 대기오염물질의 확산과 대기 흐름에 중요한 영향을 미칠 가능성이 있다(Seinfeld and Pandis, 2016). 남쪽에는 두 개의 주요 간선도로가 인접해 있으며, 북쪽에는 도시철도가 운행되고 있어 차량 배출가스 등 이동오염원에 대한 일정 부분이 대기 중 중금속 농도에 기여할 것으로 예상된다. 또한 측정지점 인근에는 소규모 상업시설이 분포하고 있어, 상업 활동에 따른 배출원이 국지적으로 대기 중 중금속 농도에 영향을 미칠 가능성도 존재한다. 한편 평동 산업단지 내 배출 시설들은 금속, 전자 및 전기, 자동차, 플라스틱 및 고무, 화학제품 관련 업종 외 기타 업종으로 구분되며, 금속 관련 업종은 18.2%로 나타났고, 자동차 부품 관련 업종은 13.9%, 전자 부품 관련 업종은 20.5%, 플라스틱 및 고무 관련 업종은 11.2%, 화학 제품 관련 업종은 11.2%, 기타 20.0%를 차지하는 것으로 조사되었다(Gwangju Metropolitan City, 2025).

2.2. 채취 및 분석

본 연구에서는 대기환경측정망 설치·운영지침에 따라 유해 중금속 12항목(Pb, Cd, Cr, Ni, Cu, Mn, Ca, Mg, Al, Fe, As, Be)을 조사항목으로 선정하여 분석하였다. 시료 채취 기간은 2020년 1월부터 2024년 12월 까지 5년간 매월 5일씩 수행되었으며, 고용량공기시료 채취기(DHA-80, Digitel, Switzerland)를 이용하여 지상으로부터 약 2.5 m 높이에서 시료를 채취하였다(Climate Energy and Environment Department, 2025). 시료채취 시 채취 유량은 약 68 m³/hr으로 석영섬유필터(Quartz fiber filter, 직경 150 mm, Pall, U.S.A)에 24시간 동안 포집하였으며, 매월 5일간 총 5개의 필터를 사용하여 대기 시료를 채취하였다. 필터에

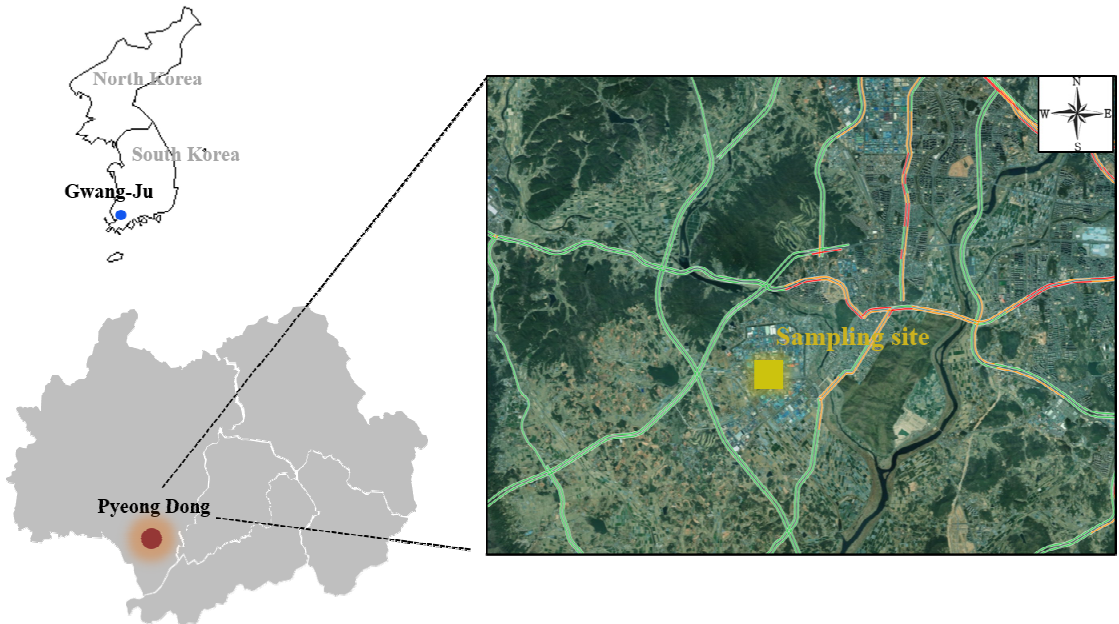


Fig. 1. Location of sampling in Pyeong-Dong industrial complex.

포집된 미세먼지 중 중금속 분석은 대기오염공정시험 기준 환경 대기 중 금속화합물-유도결합플라즈마 분광법(ES.01700.2)에 따라 수행하였으며, 전처리 방법은 질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법을 사용하였다. 시료 분석을 위한 전처리 과정에서는 시료를 채취한 필터를 4등분한 후 균등하게 절단하여, 1.03 M 질산과 2.23 M 염산의 혼합액(1:1) 30 mL를 주입하여 분석용 시료를 준비하였다. 그 후 100°C 항온 수조에 가열하면서 28 kHz 초음파 추출기로 2시간 동안 추출하였으며, 처리 후 상온에서 냉각하였다. 추출이 완료된 시료는 여과지(110 mm, 5A filter, ADVANTEC)를 이용하여 2차 여과한 후, 최종 용액이 100 mL가 되도록 분석 시료를 준비하였다. 시료 분석 과정에서는 유도결합플라즈마 분광계(ICP-OES, Avio 500, PerkinElmer, U.S.A.)의 기기분석 장비와 분석에 필요한 표준용액은 ICP 전용 Instrument Calibration Standard 2 (100 ug/mL, Perkin Elmer, U.S.A.)을 사용하였다.

2.3. 정도관리(QA/QC)

중금속 12종에 대한 정도관리는 검량선용 표준물질의 농도를 0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 mg/L로 제

조하여 검량선을 작성하였다. 방법검출한계(method detection limit, MDL)는 저농도 표준용액인 0.05 mg/L를 이용하여 7회 반복 분석한 결과를 바탕으로 산정하였으며, 정확도 및 정밀도 평가는 0.1 mg/L 농도의 표준용액을 이용하여 4회 반복 분석하여 Table 1에 제시한 바와 같이 산출하였다. 그 결과 항목별 방법검출한계는 0.0001~0.0054 mg/L의 범위로 나타났으며, 12개 전 항목의 정밀도는 10% 이내, 정확도는 75~125% 이내로 확인되었다. 또한 검량선의 결정계수 (R^2)는 모든 항목에서 0.98 이상으로 나타나, 이 결과를 토대로 본 정도관리는 대기오염공정시험 기준을 만족하였다. 한편, 분석 과정 중 오염 여부를 확인하기 위하여 동일한 전처리 과정을 수행한 공시료(blank)를 함께 분석하였다.

2.4. 통계분석

본 연구에서 통계분석은 R 통계프로그램(version 4.5.2, R Core Team)을 이용하여 실시하였다. 중금속 항목별 특성을 파악하기 위해 농도에 대한 기술통계를 산출하였으며, 성분 간 선형적 상관성을 평가하기 위한 피어슨 상관분석(Pearson's correlation analysis)을

Table 1. QA/QC data for heavy metals

Metal	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	As	Fe	Mn	Al	Ca	Mg	Be
Calibration curve (R ²)	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
Standard deviation (ug/L)	0.8	0.1	0.4	0.4	0.4	1.7	0.3	0.1	0.3	0.7	0.6	0.1
MDL (ug/L)	2.6	0.3	1.2	1.3	1.3	5.4	1.0	0.1	1.0	2.2	1.9	0.3
Precision (%)	0.6	0.4	0.4	0.7	0.2	2.1	0.3	0.6	0.2	0.3	0.8	0.2
Accuracy (%)	101.9	101.6	99.9	101.3	100.7	102.8	100.7	101.2	98.2	101.0	107.8	101.6

Table 2. Statistic of atmospheric heavy metals in Pyeong-Dong industrial complex (2020-2024)

	Concentration (ug/m ³)												PM ₁₀
	Soil						Artificial						
	Fe	Ca	Al	Mg	Pb	Mn	Cu	Cr	As	Ni	Cd	Be	
Max.	3.0883	2.0515	1.8731	0.9550	0.1380	0.3049	0.0460	0.0200	0.0312	0.0086	0.0040	N.D.	110
Min.	0.1197	0.0005	0.0042	0.0089	0.0001	0.0030	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	N.D.	4
Med.	0.6595	0.2872	0.1538	0.1072	0.0183	0.0516	0.0085	0.0023	0.0013	0.0008	0.0001	N.D.	31
Ave.	0.7929	0.3834	0.2085	0.1377	0.0228	0.0667	0.0105	0.0031	0.0030	0.0014	0.0003	N.D.	35
S.D.	0.5326	0.3475	0.2670	0.1197	0.0191	0.0500	0.0075	0.0033	0.0044	0.0014	0.0004	N.D.	18

실시하였다. 또한 중금속 성분들의 공통적인 변동 특성을 기반으로 오염원을 분류하기 위하여 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 이용한 요인분석을 실시하였다. 요인의 추출은 고유값(eigenvalue) 1.0 이상을 기준으로 정의하였으며, 추출된 요인에 대해서는 베리맥스(varimax)회전을 적용하여 요인 적재량의 해석성을 향상시켰다. 추가적으로 중금속 농도에 영향을 미치는 요인의 정량적 관계를 평가하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다.

2.5. Polar plot 분석

중금속 성분의 풍향 및 풍속에 따른 공간적 기여 특성을 파악하기 위하여 극좌표 분석(polar plot analysis)을 수행하였다. 극좌표 분석은 풍향을 각도, 풍속을 반경으로 표현하고, 해당 조건에서의 중금속 농도 또는 요인 기여도를 색상으로 나타내어 오염물질의 잠재적 배출원 방향과 거리 특성을 시각적으로 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 R 통계프로그램의 openair 패키지를 이용하여, 통계분석 결과로 도출된 요인별 농도와 동일 시간대의 풍향 및 풍속 자료를 결합하여 요인별 극좌표 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 중금속 농도 분포 특성

Table 2에서는 광주광역시 평동 산업단지에서 2020년부터 2024년까지 결측값을 제외한 57회(매월 5일간) 측정된 대기 중금속 12항목(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, Al, Ca, Mg, As, Be)에 대한 농도 분포를 제시하였다. 전체 중금속 중 Fe, Ca, Al 및 Mg은 자연 기원인 지각 성분으로 분류되며, 그 외 Cd, Cr, Ni, Cu, Mn, As 및 Pb은 주로 산업활동, 연소, 공정배출 등 인위적 기원 성분으로 알려져 있다(Alloway, 2013). 본 연구 결과에서는 지각 기원의 특성을 가진 성분들이 인위적 기원 성분에 비해 상대적으로 높은 평균 농도를 보였다. 특히 Fe의 평균 농도는 0.7929 ug/m³으로 가장 높은 수준으로 나타났으며, 최대값은 3.0883 ug/m³으로 나타나 시기별 및 기상 조건에 따라 변동성이 큰 특성을 보였다. Ca, Al, Mg의 평균 농도는 0.3834, 0.2085, 0.1377 ug/m³로 비교적 높은 수준을 유지하고 있어, 측정 지점이 토양 재비산 및 자연 기원 입자의 영향을 크게 받는 것으로 판단되었다. 반면 인위적 특성을 가진 Cr, Cd, Ni, Cu, Mn, Pb 및 As와 같은 중금

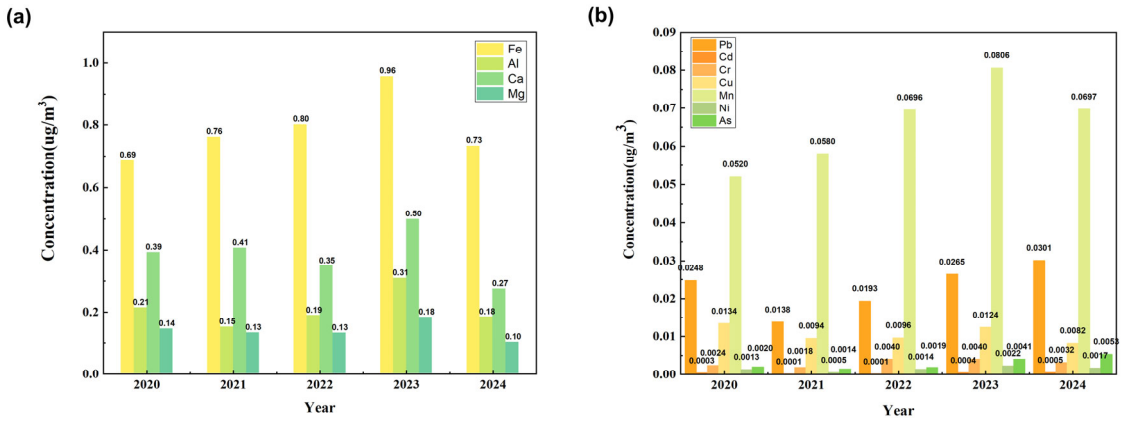


Fig. 2. Yearly mean concentration of atmospheric metals in Pyeong-Dong industrial complex: (a) soil-derived metal components and (b) artificial metal components.

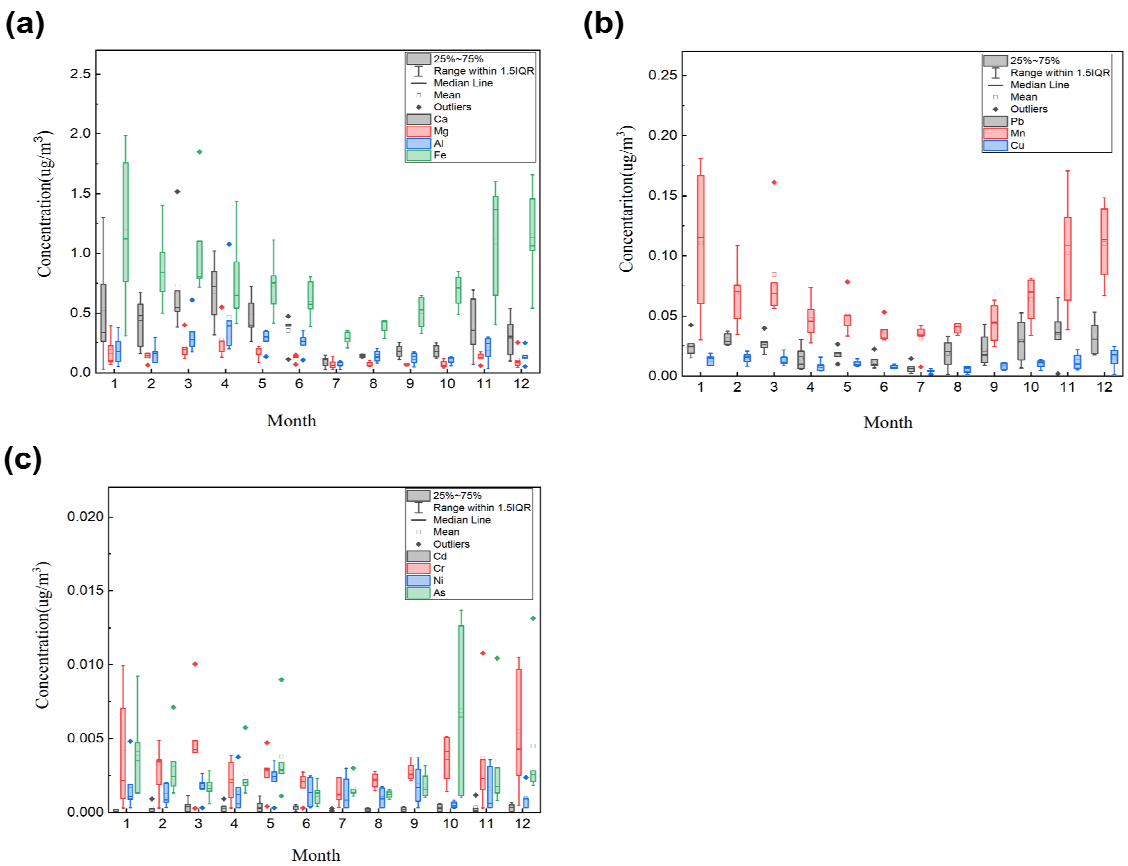


Fig. 3. Monthly mean concentration of atmospheric metals in Pyeong-Dong industrial complex: (a) high concentration range, (b) medium concentration range, and (c) low concentration range.

속은 전반적으로 낮은 수준을 나타냈으며, 이는 기존 산업단지에 미세먼지 내 중금속 특성에 대한 연구와도 유사한 특성을 보였다(Kang et al., 2018; Ju et al., 2025). Cr, As, Ni 및 Cd의 평균 농도는 각각 0.0031 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0030 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 0.0003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮게 나타났으며, 중앙값 대부분 최소값에 근접하여 전반적으로 낮은 배경농도 수준을 나타냈다. 반면 Pb, Mn 및 Cu의 평균 농도는 각각 0.0228 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0667 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미량 금속에 비해 상대적으로 높은 농도 수준을 보였으며, Mn은 인위적 기원의 중금속 중 가장 높은 평균 농도를 나타냈다. 이러한 특성은 일부 시기에는 고농도 사례가 관측되어 국지적 배출원의 영향이 반영된 것으로 해석된다. 한편 Be은 전 기간 동안 검출되지 않아 해당 지역 대기 중 기여도가 매우 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 연구 대상 지역의 대기 중 중금속 농도는 지각 기원 성분이 우세한 특성을 보였으며, 인위적 배출과 관련된 일부 중금속은 상대적으로 낮은 농도 수준을 유지하되, 일부 항목은 국지적 오염원의 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.2. 연도별 중금속 평균 농도

본 연구에서는 장기적인 농도 변화 추세와 특정 연도의 이상 변동 여부를 파악하기 위하여 12개 항목에 대한 연도별 평균 농도를 구하였다. Fig. 2는 광주광역시 평동 산업단지에서 2020년부터 2024년까지 측정된 대기 중 중금속 성분의 연평균 농도 변화를 나타낸 것으로, 금속 성분의 발생 특성에 따라 자연 지각 기원과 인위적 기원 금속 성분으로 구분하여 나타내었다. 지각 기원 성분에 해당하는 Fe, Al, Ca 및 Mg은 전 분석 기간 동안 다른 중금속 성분에 비해 상대적으로 높은 농도 수준을 보였다. 특히 Fe의 경우 모든 연도에서 가장 높은 농도를 나타내었으며, 2020년 0.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년 0.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 증가한 후, 2024년에는 0.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 감소하는 경향을 보였다. Ca 과 Al 역시 2023년에 각각 0.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 값을 나타내었으며, Mg 또한 2023년에 0.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최대값을 보여, 지각 기원 성분 전반에서 2023년에 농도가 동시에 증가하는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 측정지점이 토양 재비산 및 자연 기원 입자의 영향을 지속적으로 받고 있으며, 특히 2023년에 일시적으로 농도가 증가한 것은 국지적 환경 요인이나 기상 조건

의 영향이 있음을 나타낸다. 한편 인위적 배출원 특성을 반영하는 Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni 및 As는 지각 기원 성분에 비해 전반적으로 낮은 농도 수준을 유지하였다. 이들 성분 중에서는 Mn이 모든 연도에서 가장 높은 농도를 나타내었으며, 2020년 0.0520 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2023년 0.0806 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 점진적으로 증가한 후 2024년 0.0697 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소하는 경향을 보였다. Cu 역시 2023년 0.0301 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대값을 나타내어, Mn과 함께 비교적 뚜렷한 연도별 변동 특성을 보였다. 반면 Cd, Cr, Ni 및 As는 전 기간 동안 매우 낮은 농도 수준을 유지하였으며, 연도별 변동 폭 또한 제한적인 것으로 나타났다. 연도별 평균 농도 분석 결과, 평동 산업단지 대기 중 중금속 농도는 Fe, Ca, Al, Mg와 같은 지각 기원 성분이 우세한 조성을 보이며, 인위적 배출과 관련된 중금속 성분은 상대적으로 낮은 수준을 유지하는 특성이 나타났다. 특히 대부분의 성분에서 2023년에 농도가 일시적으로 증가한 공통적인 특성이 확인되어, 본 연구 대상 지역의 중금속 농도 변동은 장기적인 단조 추세보다는 특정 연도의 기상 또는 국지적 환경 요인의 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3.3. 월별 중금속 평균 농도

Fig. 3에서는 광주광역시 평동 산업단지에서 2020년부터 2024년까지 측정된 대기 중금속 성분(Ca, Mg, Al, Fe, Pb, Mn, Cu, Cd, Cr, Ni, As)의 월별 농도 분포를 나타낸다. 금속 성분의 농도 수준에 따라 상대적으로 고농도 범위에 해당하는 Ca, Mg, Al 및 Fe과 중간 농도 범위의 Pb, Mn 및 Cu, 그리고 저농도 범위의 Cd, Cr, Ni 및 As로 구분하여 제시하였다. 월별 농도 분포를 보면 전체적으로 대부분의 중금속 성분은 겨울과 봄철인 1월에서 4월까지 상대적으로 높은 농도 분포를 보였으며, 여름철인 6월부터 8월까지 낮은 농도 분포를 나타냈으며, 가을철인 10월에서 12월까지 다시 증가하는 계절적 특성을 보였다. 이는 여름철 강수와 상대습도 증가로 인한 세정 효과와 온도 증가에 따른 대기확산이 증가한 영향으로 농도가 감소한 것으로 판단된다. 지각기원 성분인 Ca, Mg, Al, Fe은 모든 해당 월에서 다른 인위적 성분에 비해 상대적으로 높은 농도 수준을 보였으며, 특히 Fe와 Ca는 겨울철과 봄철에 농도와 농도 범위 폭이 크게 나타났고, 여름철에는 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 겨울철 계절별 기상 조건에 따른 먼지의 유입 영향이 나타난 것으로 판단되며, 봄철은 먼

지뿐만 아니라 황사 및 장거리 이동 영향이 복합적으로 작용한 것으로 나타난다. 인위적 기원 성분 중 상대적으로 높은 농도 수준을 보이는 Pb, Mn, Cu에서는 Mn이 모든 월에서 농도와 분포 범위가 크게 나타났다. 특히 Mn, Pb의 경우 다른 금속 성분에 비해 농도 분포의 차이가 비교적 뚜렷하게 나타나 본 지역의 산업활동에 따른 인위적 배출 영향이 비교적 크게 반영된 성분으로 판단된다. 미량 성분인 Cd, Cr, Ni, As 역시 전반적으로 여름철인 6월에서 8월까지 낮은 농도 분포를 보이고, 10월 이후 다시 증가하는 경향을 나타내었으며, Cr, Ni, 및 As는 농도 분포 범위의 차이가 크게 나타나 도금 혹은 해당 금속 제련 공정에 따른 영향이 나타난 것으로 판단된다. 또한 다른 농도 범위의 금속에 비하여 이상치(outlier)가 종종 발견되었으며, 이는 국지적 산업활동의 영향에 따른 고농도 사례로 판단된다. 종합적으로 보면 대기 중 중금속의 월변화는 여름철에 가장 낮고, 겨울 및 환절기인 봄-가을철에 상대적으로 높은 농도를 보이는 전형적인 계절 변동 특성이 나타났으며, 성분별 농도 분포 범위에서는 지각 기원 성분 Fe, Ca과 인위적 기원 성분 Mn, Pb, Cr, Ni, As에서 일부 월에서 사분위 범위(IQR)와 전체 분포 폭이 크게 나타나 국지적 영향이 나타난 것으로 여겨진다.

Team)을 이용하여 Pearson 상관분석을 실시하였으며 분석한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 12개 중금속 항목 중 Be은 전 기간 동안 검출되지 않아 분석에서 제외하였다. 제시된 상관계수는 모두 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의하였다. 분석 결과, 지각 기원 성분으로 분류되는 금속 간에 비교적 높은 상관관계가 나타났다. 특히 Al-Ca ($r=0.90$), Ca-Mg ($r=0.86$), Al-Mg ($r=0.82$), Al-Fe ($r=0.63$)의 상관계수가 높게 나타났으며, Fe 또한 다른 지각 기원 금속 성분들과 유의한 상관관계를 보였다. 이러한 결과는 Ca, Mg, Al, Fe 등이 주로 토양 성분이나 도로 재비산 먼지 등 공통된 발생원을 갖는 성분을 나타낸다. 한편 Pb, Cu, Mn, Fe의 상관관계를 보면 Mn-Fe ($r=0.85$), Cu-Fe ($r=0.74$), Cu-Mn ($r=0.68$), Pb-Mn ($r=0.60$), Pb-Fe ($r=0.60$), Pb-Cu ($r=0.59$)로 비교적 높은 상관관계를 보였으며, 이는 해당 성분들이 금속 가공 및 산업활동 등과 같은 유사한 특성을 보였기 때문으로 판단된다. 반면 Cd, Cr, Ni 및 As는 성분 간 상관계수가 전반적으로 낮은 수준을 보여 공통된 발생 특성이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 해당 금속들이 특정 발생원에 의해 형성되기보다는, 소규모 사업장, 개별 공정, 간헐적 배출 등 다양한 배출원이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 종합하면 평동 산업단지의 대기 중 중금속은 특정 단일 배출원보다는 소규모의 다양한 산업공정 및 개별 배출원의 영향이 복합적으로 작용하는 지역적 특성을 가지는 것으로 판단된다.

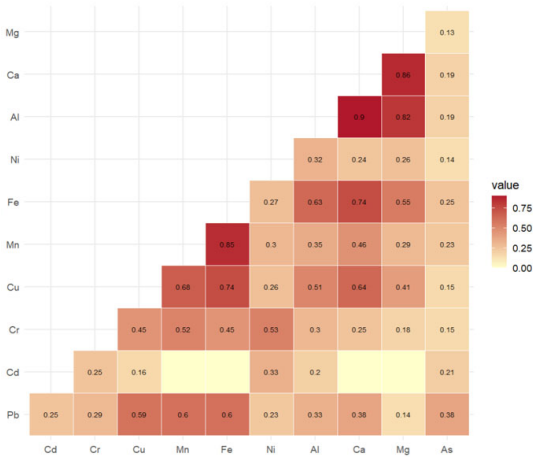


Fig. 4. Pearson correlation matrix of heavy metals in Pyeong-Dong industrial complex.

3.4. 중금속 상관성 분석

광주지역 대기 중 중금속 성분 간의 상관성을 파악하기 위하여 통계프로그램 R (version 4.5.2, R Core

3.5. 중금속 요인분석

발생 요인에 대한 분석과정은 측정 정확도와 해석의 신뢰성을 확보하는데 있어 중요한 절차이다. 이에 본 연구에서는 요인분석을 통해 Table 3과 같이 항목별 통계적 검정을 수행하였다. 먼저 요인분석의 적절성을 평가한 결과 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)측도 값은 0.766으로 나타나 요인분석에 적합한 수준임을 확인하였다. 또한 Bartlett의 구형 검정 결과 $\chi^2=2241.273$ ($p<0.001$)로 변수 간 상관관계가 통계적으로 유의하게 나타나, 본 연구에 적용된 자료가 요인분석에 전반적으로 적합한 것으로 판단 되었다. 요인 수의 결정은 고유값(eigen value)이 1이상인 요인의 개수($n=3$)와 스크리 도표(scree plot)에서 변곡점이 3번째 요인 이후에서 나타난 것을 종합적으로 고려하여 수행하였다.

Table 3. Factor analysis statistics for determining the number of factors (N=285)

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Ca	83.4	4.6	12.0
Mg	78.7	0.9	20.4
Al	80.8	2.0	17.2
Fe	28.6	55.3	16.1
Mn	0.0	86.5	13.5
Pb	1.7	98.3	12.0
Cu	2.8	87.7	9.5
Cd	11.0	2.3	86.7
Cr	0.0	0.0	100.0
Ni	13.2	3.8	83.0
As	16.7	15.0	68.3
Eigen value	4.652	1.857	1.318
Variance (%)	42.143	16.954	12.250
Cumulative (%)	42.143	59.097	71.347
KMO test		0.766	
Bartlett's test		$\chi^2 = 2241.273$ (p<0.001)	

Table 4. Factor-based multiple regression analysis for total heavy metal concentration

	Parameter	Coefficients	R ²	p-value
Pyeong-Dong	Constant	0.097	0.899	0.000
	Factor-1	0.838		
	Factor-2	0.501		
	Factor-3	0.193		

총 3개의 요인이 최종적으로 선정되었으며, 이들 요인이 설명하는 누적 분산의 비율은 71.3%로 나타나 전체 자료의 변동성을 충분히 설명하는 것으로 판단 되었다. 본 연구에서는 도출된 3개 요인을 기반으로 주성분분석(PCA, principal component analysis) 수행하여, 항목별 발생 기여도 특성을 평가하였다. 도출된 요인 수 3개는 수용모델 요인 수 설정 범위인 2~7개 내에서 반복 수행한 결과와도 일치하였으며, 잔차분포(Q값)과 요인 해석 가능성 및 타당성을 종합적으로 고려할 때 가장 합리적인 요인 수로 판단되었다(Jeollabuk State Institute of Health and Environment Research, 2011; Shi et al., 2016). Table 3은 평동 산업단지 대기 중 중금속 측정 결과에 대한 요인분석 결과를 나타내며, 각 금속 성분의 요인별 고유값, 설명

분산 비율 및 누적 분산 비율을 제시하였다. 전체 분산의 42.1%를 설명하는 요인 1에서는 Ca, Mg, Al이 상대적으로 높은 기여도를 보여 지각 기원 요인으로 해석되었다(Seinfeld and Pandis, 2016). 이러한 원소들은 일반적으로 토양 기원과 밀접하게 연관된 성분으로 해당 요인은 평동 산업단지 주변의 토양 재비산 및 자연 기원 입자의 유입 영향을 반영한 것으로 판단된다. 17.0%를 설명하는 요인 2에서는 Fe, Mn, Pb, Cu에서 비교적 높은 기여도가 나타나 금속가공 요인으로 해석되었다(Mohiuddin et al., 2014). 이들 원소는 연마, 절단, 연소, 코팅 등 금속 가공 공정에서 주로 배출되는 성분으로, 평동 산업단지 내 산업활동에 기인한 인위적 배출 영향과 관련된 것으로 판단된다. 12.3%를 설명하는 요인 3에서는 Cd, Cr, Ni, As가 낮은 농도 수준을 보

임에도 불구하고 높은 기여도를 보여 금속 제련 및 연소 요인으로 해석되었다(Cai et al., 2022). 이들 원소는 고온의 금속 제련 및 연소 과정에서 부산물로 주로 배출되는 특성을 가지며, 절대농도는 낮으나 독성이 강한 유해 중금속으로 건강 영향 측면에서 주의 깊은 해석이 요구된다. 한편 Fe은 요인 1과 요인 2에 모두 비교적 높은 적재값을 보여, 토양 기원과 산업활동 기원의 복합적인 영향을 동시에 반영하는 성분으로 해석된다. 최종적으로 세 요인은 전체 자료 분산의 71.3%를 설명하며, 각 요인에 대한 해석은 기여도가 높게 나타난 금속 성분의 조성 및 선행 연구 결과를 종합적으로 고려하여 결정되었다.

3.6. 요인분석을 이용한 회귀분석

본 연구에서는 요인분석에서 산출한 요인들이 중금속의 농도에 어느 정도 영향을 미치는 알아보기 위한 회귀분석을 실시하였으며, 중금속에 대한 회귀방정식 및 결정계수를 Table 4에 나타내었다. 평동측정소 중금속의 경우 요인 1은 0.838 ug/m^3 씩, 요인 2는 0.501 ug/m^3 씩, 요인 3은 0.193 ug/m^3 씩 높아지는 것으로 나타났다. 결정계수(R^2)는 0.899로 추정된 회귀식에 의해 전체 중금속 농도의 89.9% 설명할 수 있으며, 유의수준 0.01 이하로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

3.6. 요인별 공간적 특성

본 논문에서는 Fig. 5와 같이 기상청 방재기상관측(AWS, automatic weather station)의 기상자료인 풍향, 풍속과 관측된 농도 결과를 결합한 극좌표 그림을 이용하여 각 요인의 공간적 기여 특성을 분석하였다(Korea Meteorological Administration, 2022-2024). 요인 1의 극좌표 그림에서는 저풍속인 1-2 m/s 조건에서 기여도가 가장 크게 나타나며, 풍향은 북동, 북, 북서 계열에서 상대적으로 높은 분포를 보인다. 반면, 남쪽 계열에서는 기여도가 비교적 낮게 나타났다. 이러한 결과는 기여도가 높은 영역이 특정 한 방향에만 집중되기보다는, 측정소 주변 여러 방향에서 저풍속 조건을 중심으로 분포하는 특징을 보이며 이는 원거리 수송보다는 측정소 인근에서 발생한 국지 배출원의 영향이 우세할 가능성을 시사한다. 본 요인은 Ca, Mg, Al의 금속 성분으로 구성되어 있으며, 이러한 성분 조성 및 저풍속 조건에서 기여도 증가 특성은 토양 비산먼지 및 도로

재비산에 기인한 토양기원 요인의 전형적인 특성과 일치한다. 다만 Ca 등 해당 금속은 광물성 입자의 대표 성분으로 장거리 이동에 의한 외부 유입 가능성도 존재한다. 따라서 본 요인은 국지적 비산먼지를 주된 기원으로 하되 외부 입자의 기여가 일부 포함된 혼합 요인으로 해석하는 것이 타당하다. 요인 2의 극좌표 그림에서는 특정 풍향에서만 기여도가 두드러지게 증가하는 양상은 관찰되지 않았으며, 전반적으로 저풍속인 1~2 m/s 구간에서 기여도가 상대적으로 높게 나타나는 특징을 보였다. 이는 단일한 방향의 외부 유입원보다는, 측정소 인근 산업활동에 의해 발생하는 배출원의 영향을 받는 것으로 해석된다. 요인 3은 뚜렷한 풍향 의존성이 나타나지 않는 요인 2에 비해 남쪽 부분의 기여도가 일부 존재하였으며, 저풍속 조건에서 기여도가 증가하는 경향이 확인되었다. 이러한 결과는 남쪽 인근의 고온 공정 및 제련 공정과 같이 국지적 배출 특성이 강한 발생원의 영향을 반영하는 것으로 해석된다. 이러한 결과를 종합하면, 세 요인 모두 저풍속 조건에서 기여도가 증가하는 공통적인 특성을 보여 관측 지역의 중금속 농도 특성이 원거리 수송보다는 지역 배출원과 대기 정체 조건의 영향을 크게 받았음을 나타낸다. 따라서 본 측정 지점의 대기 중 중금속 오염은 토양 재비산, 금속 가공 등 산업활동, 고온 연소 및 제련 활동 등 다양한 지역 배출원의 영향과 대기 정체가 발생하는 기상 조건이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

3.7. 요인별 계절적 공간 분포

Fig. 6은 계절별 요인 기여도의 공간적 분포 특성을 비교하기 위해 극좌표 분석을 수행한 결과이다. 요인 1(Ca, Mg, Al)은 모든 계절에서 특정 단일 방향에 국한되지 않고 비교적 넓은 풍향 범위에서 나타났으며, 특히 봄과 겨울철에 북동 및 서남서 계열 풍향에서 상대적으로 높은 기여도가 나타나, 토양 재비산 먼지와 같은 국지적 발생원과 광역적 배경 기원의 영향이 동시에 작용하는 것으로 해석된다. 요인 2(Pb, Fe, Mn, Cu)는 봄과 겨울철에 넓은 풍향 범위에서 상대적으로 높은 값이 나타났으며, 이는 인근 산업단지에서의 금속 가공 등 인위적 산업활동에 의한 배출원의 영향이 해당 계절에 강화됨을 나타낸다. 반면 여름철에는 풍향 의존성이 비교적 약하고 전반적으로 낮은 기여도를 보여, 강수 및 대기확산 등 기상 조건의 영향이 상대적으로 큰 것으로 판단된다. 요인 3(Cd, Cr, Ni, As)은 가을과 겨울철에 남쪽 계

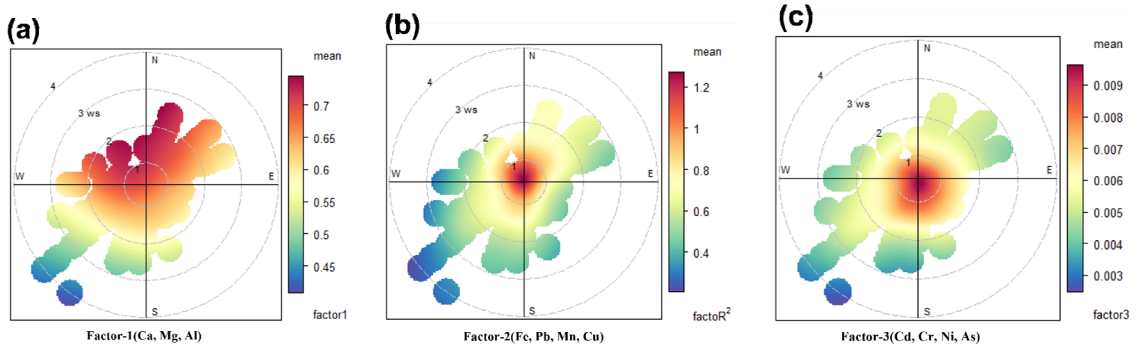


Fig. 5. Polar plots of factor contributions as a function of wind direction and wind speed in the Pyeong-Dong industrial complex: (a) factor-1 (Ca, Mg, Al), (b) factor-2 (Fe, Pb, Mn, Cu), and (c) factor-3 (Cd, Cr, Ni, As).

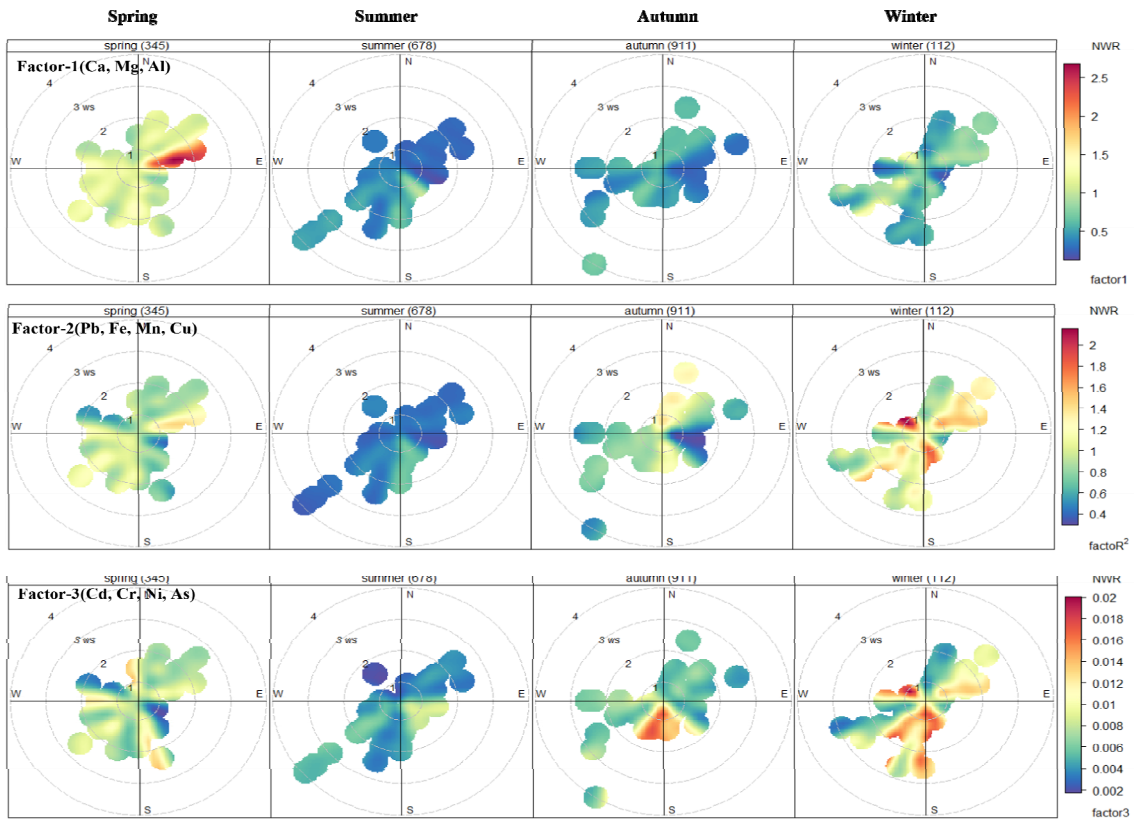


Fig. 6. Seasonal polar plots of factor contributions as a function of wind direction wind speed in the Pyeong-Dong industrial complex.

열 풍향에서 높은 기여도가 나타나 연소 및 제련 활동 산업과 관련된 국지 배출원의 기여가 해당 계절에 상대적으로 증가하는 특성을 보였다. 반면 여름철에는 전반적으로 낮은 기여도와 뚜렷하지 않은 풍향 의존성을 보였다. 이러한 결과는 평동 산업단지 인근 대기 중금속 오염원이 요인별로 상이한 계절성과 풍향 의존성을 보이나, 여름철에는 강수 및 대기확산 등 기상 영향으로 모든 요인이 기여도가 낮게 나타나는 유사한 특성을 보였다. 또한 사계절에 대한 요인 모두가 2 m/s 이내의 저 풍속 조건에서 고농도가 나타난 특성을 보여 중금속의 농도가 원거리 수송보다는 계절별 기상 조건과 지역 배출원의 영향을 주로 받는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 2020년부터 2024년까지 광주 평동 산업단지 대기중금속 측정소에서 관측된 12종 중금속 자료를 활용하여 장기 시공간 변동 특성과 발생 요인을 종합적으로 분석하였다. 평동 산업단지의 대기 중 중금속 조성은 Ca, Al, Mg 등 지각 기원 성분이 우세하게 나타났으며, 인위적 기원 성분 중에는 Pb, Cu, Fe 및 Mn이 비교적 뚜렷한 농도 수준을 보였다. 반면, Cd, Cr, Ni 및 As는 대부분 기간에서 비교적 낮은 배경농도 특성을 유지하여 미량 성분으로 분류되었다. 연도별 변동 특성에서는 자연적 및 인위적 발생 중금속이 2023년에 일시적으로 증가하는 공통적인 특성을 보여 해당 시기의 국지적 영향이 나타났다. 월별 분포에서는 대부분의 중금속이 여름철에 낮고, 겨울 및 봄, 가을 환절기에 상대적으로 높은 농도를 나타내는 뚜렷한 계절성을 보였으며, 일부 항목에서는 높은 농도 분포 범위가 나타나 주변 환경 조건에 따른 영향이 나타남을 관찰하였다. 통계분석에서는 항목별 상관성이 있는 금속이 자연적 발생원과, 인위적 발생원에서 일부 나타났으며, 주 성분(PCA)기반 요인분석 결과에서는 평동 산업단지 대기 중 중금속은 토양 및 재비산 먼지에 기인한 지각 기원 요인 1(Ca, Mg, Al, Fe)과 금속가공 및 산업활동과 연관된 인위적 특성을 가진 요인 2(Pb, Fe, Mn, Cu), 그리고 연소 및 금속 제련 공정과 관련된 요인 3(Cd, Cr, Ni, As)의 세 가지 주요 요인으로 구분되었다. 이러한 세 요인이 중금속 농도에 미치는 영향을 보면 요인 1, 요인 2, 요인 3 순으로 나타남을 회귀분석을 통해 확인하였다. 극좌표 분석 결과, 세 요인 모두 저 풍

속 조건에서 기여도가 증가하는 공통적인 특성을 보여, 원거리 수송보다는 측정소 인근의 지역 배출원과 대기 정체 조건의 영향이 우세한 것으로 판단되었다. 풍향 조건에서는 요인 1은 북쪽 계열이 남쪽 계열보다 기여도가 높게 나타났으며, 요인 2는 뚜렷한 풍향 의존성이 나타나지는 않았으며, 요인 3은 남쪽 일부에서 기여도가 나타났다. 또한 요인들은 계절에 따라 상이한 풍향 의존성과 공간 분포 특성을 보였으며, 여름철에는 강수 세정과 대기확산이 활발해져 모든 요인의 기여도가 전반적으로 감소하는 특성을 보였다. 본 연구는 장기간 분석한 자료를 기반으로 평동 산업단지 대기 중 중금속 농도 특성과 주요 발생 요인 및 계절별 공간적 기여 특성을 평가하였다. 이러한 결과는 평동 산업단지 및 유사 산업지역의 중금속에 대한 정책자료와 대기중금속 측정망 운영 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2025년 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 NIER-2025-01-03-002)과 광주광역시 보건환경연구원의 지원(연구지원 및 역량강화)을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Alloway, B. J., 2013, Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, 3rd ed., Springer Science & Business Media, Dordrecht, Netherlands, 1-614.
- Cai, A., Wu, X., Zhang, J., 2022, Quantitative source apportionment of heavy metals in atmospheric deposition using PMF and UNMIX, *Front. Environ. Sci.*, 10, 950288.
- Choi, S. H., Choi, S. W., Kim, D. Y., Cha, Y. W., Park, S. W., Lee, S. I., Yoo, E. C., 2021, Evaluation of health risk from concentrations of heavy metal in PM-10 and PM-2.5 particles at Sasang industrial complex of Busan, Korea, *J. Environ. Anal. Health Toxicol.*, 24(3), 133-148.
- Cho, H. J., 2023, A Study on particle size distribution and heavy metal concentrations of particle matter in the ambient air around the steel industrial complex, M.S. Thesis, Hanseo University, Seosan, Korea.
- Climate and Energy Environment Department, 2025, Guidelines for installation and operation of air quality

- monitoring networks, NIER-GP2025-042, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.
- Gwangju Institute of Health and Environment, 2025, 2024 air quality assessment report, Gwangju, Korea.
- Gwangju Metropolitan City, 2025, Status of air pollutant emission facilities in 2024, Report, Gwangju, Korea.
- IARC (International Agency for Research on Cancer), 2013, Outdoor air pollution, Research report, Lyon, France.
- Jeong, J. Y., Lee, H. W., Park, S. H., Lee, J. I., Yoon, D.-G., Lee, C. M., 2023, Health risk assessment by exposure to heavy metals in PM_{2.5} in the Ulsan industrial complex area, *J. Environ. Health Sci.*, 49(2), 108-117.
- Jeollabuk State Institute of Health and Environment Research, 2011, Bulletin of Jeollabuk-do institute of health and environment, Imsil-gun, Korea.
- Ju, S. R., Park, H. S., Kim, G. H., Yoo, H. S., Lee, B. R., Cha, Y. K., Wi, E. H., Yang, J. G., 2025, Evaluation of PM-10 and heavy metal characteristics in the atmosphere of Jeollanam-do-focusing on areas adjacent to industrial complexes, Korea, *J. Environ. Anal. Health Toxicol.*, 28(2), 112-124.
- Kang, B. W., Kim, M. J., Baek, K. M., Seo, Y. G., Lee, H. S., Kim, J. H., Han, J. S., Baek, S. O., 2018, A Study on the concentration distribution of airborne heavy metals in major industrial complexes in Korea, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 34(2), 269-280.
- Kim, M. J., Park, O. H., Yang, Y. C., Park, J. H., Yoo, J. Y., Jeong, H.-Y., Seo, G. Y., Kim, J. M., 2023, Distribution characteristics and source estimation of volatile organic compounds in the ambient air of industrial complex in Gwangju, Korea, *J. Environ. Sci. Int.*, 32(6), 403-417.
- Korea Meteorological Administration, 2024, Weather data open portal, Government Web Portal, Seoul, <https://www.kma.go.kr>
- Matei, E., Rapa, M., Mates, I. M., Popescu, A. F., Badiceanu, A., 2025, Heavy metals in particulate matter - Trends and impacts on environment, *Molecules*, 30(7), 1455.
- Mohiuddin, K., Strezov, V., Nelson, P. F., Stelcer, E., Evans, T., 2014, Mass and elemental distributions of atmospheric particles near blast furnace and electric arc furnace industrial areas, *Sci. Total Environ.*, 487, 323-334.
- Park, H. Y., Park, H. S., Lee, B. R., Choi, H. J., Kim, H. R., Lim, H. J., Park, C. O., Kim, I. S., Park, G. H., Jeon, D. Y., Bae, M. S., 2022, Source assessment of PM-2.5 in a residential areas of Gwangyang Bay using source apportionment model(II), *J. Environ. Anal. Health Toxicol.*, 25(1), 18-32.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2016, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Shi, G. L., Chen, H., Tian, Y. Z., Song, D. L., Zhou, L. D., Chen, F., Yu, H. F., Feng, Y. C., 2016, Effect of uncertainty on source contributions from the positive matrix factorization model for a source apportionment study, *Aerosol Air Qual. Res.*, 16(7), 1665-1674.
- WHO (World Health Organization), 2021, WHO global air quality guidelines: particulate matter(PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Research report, Geneva, Switzerland.

-
- Researcher. Hwan-Gi Kim
Health and Environment Research Institute of Gwangju
khg9044@korea.kr
 - Researcher. Sang-Hoon Yoon
Health and Environment Research Institute of Gwangju
enoughface@korea.kr
 - Researcher. Woo-Jin Lee
Health and Environment Research Institute of Gwangju
lwj2301@korea.kr
 - Researcher. Won-Hyeong Park
Health and Environment Research Institute of Gwangju
Byeolnim88@korea.kr
 - Researcher. Sun-Oh Shin
Health and Environment Research Institute of Gwangju
sunoh91@korea.kr
 - Director of Micro dust Research Department. Nan-Hee Kim
Health and Environment Research Institute of Gwangju
knhhee68@korea.kr