

논문

제련소 주변 지역의 PM_{2.5} 성분 내 중금속 조성 및 대기중금속측정망 기반의 지역 간 비교

Heavy Metal Composition in PM_{2.5} Components in Areas Surrounding Smelters and Inter-Regional Comparison Based on Atmospheric Heavy Metal Monitoring Networks

정민찬, 천소현, 김나현, 최진수¹⁾, 성민영¹⁾, 정지운¹⁾, 손운석*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공,

¹⁾국립환경과학원 대기환경연구부 대기환경연구과

Min-chan Jung, So-hyeon Cheon, Na-hyeon Kim, Jinsoo Choi¹⁾,
Minyoung Sung¹⁾, Jiyun Jung¹⁾, Youn-Suk Son*

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan,
Republic of Korea

¹⁾National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2026년 3월 3일
수정일 2026년 3월 27일
채택일 2026년 4월 13일

Received 3 March 2026
Revised 27 March 2026
Accepted 13 April 2026

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-629-6522
E-mail : sonys@pknu.ac.kr

Abstract In this study, we analyzed the concentration characteristics of heavy metals using time-series and correlation analyses based on data from the atmospheric heavy metal monitoring network near a smelter. Additionally, the compositional ratios of heavy metals were examined using PM_{2.5} speciation monitoring data. Heavy metal concentrations were found to be consistently higher in the vicinity of the smelter compared to reference regions, including industrial, residential, and commercial areas. Analysis of the PM_{2.5} speciation monitoring data revealed that the compositional ratios of Pb (0.149%) and As (0.076%) were the highest among the compared regions, with the smelter-affected area showing distinct enrichment. Furthermore, correlation analysis within the smelter region indicated strong associations between Pb-Cd ($r^2=0.91$) and Cd-As ($r^2=0.63$), suggesting possible shared emission influences for these metals. These results demonstrate that emissions from smelting processes exert a substantial influence on local air quality and suggest that the smelter affects heavy metal pollution in the surrounding atmosphere.

Key words: Smelter emission, Heavy metals, Air quality, PM_{2.5}, Composition

1. 서론

산업화와 도시화가 가속화됨에 따라 화석연료 연소, 제조·제련 공정, 이동오염원 등이 증가하면서 대기오염이 심각한 사회문제로 대두되고 있다. 또한, 인위적 배출은 지역적 특성에 따라 중금속 조성에 상당한 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Nirmalkar *et al.*, 2023). 특히, 산업지역 및 도시지역에서는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 농도가 높아지며, 이는 국민건강과 생

태계 모두에 장기적이고 광범위한 영향을 미칠 가능성이 크다(Alexeeff *et al.*, 2021). 미세먼지 중 PM₁₀ (지름 10 μm 이하)과 PM_{2.5} (지름 2.5 μm 이하)는 입자의 크기에 따라 구분되는데, 그중 PM_{2.5}는 입자가 매우 작아 폐포까지 침투하고 혈관 내로 흡수되어 호흡기 계뿐만 아니라 전신적 건강영향을 유발하는 것으로 알려져 있다(WHO, 2021). 또한 PM_{2.5}의 화학적 구성 성분(중금속, 이온, 탄소 등)은 지역 및 시간적 맥락에 따라 변동되므로 이에 대한 연구는 필수적이다(Fan *et*

al., 2021; Zhang *et al.*, 2021). 이러한 배경에서 $PM_{2.5}$ 의 건강위해성 평가는 단순 질량 농도에 그치지 않고 화학적 조성에 따른 차별적 영향 및 발암성의 평가가 최근 활발히 이어지고 있다(Kawichai *et al.*, 2022). 특히, $PM_{2.5}$ 내 중금속(Pb, As, Cd 등)의 유해성은 심각하다고 보고되고 있다(Park *et al.*, 2024). 제련소 및 제련 공정이 포함된 산업지역 주변에서는 대기와 기타 매체에서 중금속 농도가 인근 지역에 비해 높게 검출되는 사례가 국내외에서 다수 보고되고 있다(Nirmalkar *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2016; Lee and Lee, 2008). 울산은 국내산업단지 조성사업을 기반으로 연안부에 대규모 산업단지가 조성된 대표적 지역으로, 제련소를 비롯한 공장이 집중적으로 분포하는 특성을 나타낸다(Jo and Kim, 2015; Oh *et al.*, 2015). 그 인근 내륙은 상업 및 주거지역이 분포해 지역주민들이 높은 미세먼지에 노출될 가능성이 크다. 제련소 주변 중금속 오염에 관한 기존 연구들은 주로 특정 지역의 오염 수준 또는 단일 지표를 중심으로 오염 수준을 파악하는 데 초점을 두고 있어, 제련소 지역의 대기질 특성을 다른 토지이용 특성을 가진 지역과 비교하여 해석한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 온산국가산업단지(제련소)와 특성이 다른 4개 지역을 대상으로 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도를 비교하고, 특히 $PM_{2.5}$ 내 중금속 성분의 조성비 및 농도 패턴을 분석하였다. 이를 통해 제련소 주변 대기환경의 공간적·계절적 특성을 규명하고, 건강영향 논의 및 향후 배출 저감 및 환경관리 정책 수립을 위한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상 지역 선정

본 연구에서는 제련소 주변 지역의 대기중금속 특성과 지역 간 중금속 농도의 상관성을 분석하기 위하여 다음과 같이 연구 대상 지역을 선정하였다. 대상 지역은 제련소, 공업지역, 상업지역, 주거지역으로 구

분하였으며, 특히 공업지역은 온산국가산업단지(제련소)(Site A)와의 비교를 위하여 산업활동 특성이 분명한 지역을 선정하였다.

2.1.1 4개 비교대상 지역 선정

비교대상 연구 지역은 제련소와 비교 가능한 독립적 특성을 갖춘 지역으로 선정하였다. 공업지역으로는 철강산업과 산업단지가 위치한 포항시 대송면(Site B)과 일반 산업활동이 분포한 전북 익산시 팔봉동(남중동)(Site C)을, 상업지역으로는 도심 상업활동의 영향을 반영할 수 있는 강원도 강릉시 옥천동(Site D)을, 주거지역으로는 생활 배출원의 특성이 상대적으로 큰 대구시 대명동(수창동)(Site E)으로 선정하였다. 대상 지역 선정 시 대기중금속측정망과 $PM_{2.5}$ 성분측정망의 위치가 일치하거나, 두 지점 간 거리가 약 2~5 km 이내인 지역을 우선적으로 검토하여 지역 단위 비교가 가능하도록 하였다. 제련소 지역은 Site A로 나타내었으며, 본 연구에서 사용된 각 지역별 측정망의 위치를 그림 1에 나타내었다. 표 1에서도 제시하였듯이, Site A의 $PM_{2.5}$ 성분측정망이 위치한 지역은



Fig. 1. Monitoring site locations by region.

Table 1. Monitoring network information for each region.

Site ID	Location (Latitude/Longitude)	Land use	Monitoring site type	Period
Site A	94, Sanam-ro, Onsan-eup, Ulju-gun, Ulsan, Republic of Korea (35°26'02"N 129°20'33"E)	Industrial area	U*	'19~'24
	118, Dangwol-ro, Onsan-eup, Ulju-gun, Ulsan, Republic of Korea (35°24'42"N 129°21'15"E)		A**	'22.07~'23.12
	9, Bongwol-ro 20beon-gil, Nam-gu, Ulsan, Republic of Korea (35°32'04"N 129°18'28"E)	Commercial area	P***	'19~'23
Site B	788-1, Songdong-ri, Daesong-myeon, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea (35°58'07"N 129°21'35"E)	Industrial area	U	'19~'24
	29, Cheolgangsandan-ro 130beon-gil, Daesong-myeon, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea (35°57'47"N 129°22'36"E)		A	'22.07~'23.12
	19, Jangdong Honggye-gil, Daesong-myeon, Pohang-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea (35°58'06"N 129°21'36"E)		P	'19~'23
Site C	1338, Muwang-ro, Iksan-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea (35°57'44"N 127°00'18"E)	Industrial area	U	'19~'24
	1, Inbuk-ro 32-gil, Namjung-dong, Iksan-si, Jeollabuk-do, Republic of Korea (35°56'52"N 126°57'29"E)		A	'22.07~'23.12
			P	'19~'23
Site D	2179, Gyeonggang-ro, Okcheon-dong, Gangneung-si, Gangwon-do, Republic of Korea (37°45'30"N 128°54'15"E)	Commercial area	U	'19~'24
			A	'22.07~'23.12
			P	'19~'23
Site E	73, Suchang-dong, Jung-gu, Daegu, Republic of Korea (35°52'27"N 128°35'02"E)	Residential area	U	'19~'24
	55, Seongdang-ro 30-gil, Daemyeong-dong, Nam-gu, Daegu, Republic of Korea (35°50'43"N 128°34'15"E)		A	'22.07~'23.12
			P	'19~'23

* U: Urban air quality monitoring network

** A: Atmospheric heavy metals monitoring network

*** P: PM_{2.5} chemical speciation monitoring network

상업지역에 위치해 있는 것을 볼 수 있다. 해당 지역 내 대기중금속측정망과 PM_{2.5} 성분측정망은 모두 지도상 온산국가산업단지 내에 위치하며, 두 지점 간 거리는 약 5.4 km이다. 비록 토지이용 분류상 PM_{2.5} 성분측정망은 상업지역으로 제시되지만, 공간적으로는 온산국가산업단지 배출권역 내에 포함되는 지점으로 판단하였다. 또한 온산지역은 북풍 계열이 우세하나 남풍 계열과 해풍의 영향도 함께 나타나는 해안 산업 지역으로, 배출물질의 영향이 산업단지 전반에 걸쳐 확산될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 PM_{2.5} 성분측정망을 산업단지 영향이 반영된 대표 지점으로 선정하였다. 다만 동일 지점 관측이 아닌 측정망 기반 비교이므로, 세부 위치와 토지이용 차이에 따른 한계가 있음을 해석에 있어서 함께 고려해야 한다.

2.2 자료 출처 및 활용 범위

데이터 분석을 위하여 우선적으로 기간별 자료를 선별하였다. 본 연구에서는 ‘에어코리아(AirKorea)’(<https://www.airkorea.or.kr/web/>) 사이트의 도시대기 측정망(Air quality monitoring station; AQMS)에서 측정된 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 최종확정자료, 국립환경과학원의 PM_{2.5} 성분측정망에서 제공하는 성분(탄소·이온·금속) 자료, 그리고 대기중금속측정망에서 측정된 11종 금속 성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Al, Ca, Mg) 자료를 활용하였다. 각 지역별 측정망에 대한 자료는 표 1에 나타내었다. 본 연구에서는 PM_{2.5} 성분측정망 자료와 대기중금속측정망 자료를 병행하여 활용하였으나, 두 자료를 동일한 절대농도 체계로 직접 비교하지는 않았다. PM_{2.5} 성분측정망 자료는 PM_{2.5} 내 금속 성분의 조성비 및 지역별 상대적 특성 분석에 활

용하였고, 대기중금속측정망 자료는 지역별 대기중금속 농도의 시계열 변화 및 상관성 분석에 활용하였다. 추가로 본 연구에서는 도시대기측정망, PM_{2.5} 성분측정망 자료를 동일한 기간 단위로 직접 비교 분석한 것이 아니라, 질량농도, 성분조성, 중금속 특성을 단계적으로 검토하기 위한 상호보완적 자료로 활용하였다. 따라서 자료별 가용 기간의 차이에 따라 분석을 위한 기간을 명확히 구분하여 사용하였다.

2.2.1 도시대기측정망

도시대기측정망의 경우, 에어코리아에서 제공하는 2019년부터 2024년까지의 6년간 대기환경 월보 자료를 활용하였다. 도시대기 측정망에서 관측된 항목에는 SO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 및 기상 요소(풍향, 풍속, 온도, 습도)가 포함되며, 본 연구에서는 PM₁₀과 PM_{2.5} 자료를 사용하여 시계열 분석 및 상관분석을 수행하였다.

2.2.2 PM_{2.5} 성분측정망

PM_{2.5} 성분측정망 자료는 온산국가산업단지 및 전국의 측정망 자료와의 비교를 위해 시작 시점을 2019년으로 통일하였으며, 본 연구의 시작 당시 해당 자료가 2023년도까지 존재하여 총 5년간의 국립환경과학원에서 제공한 월자료를 사용하였다. PM_{2.5} 내 성분 측정 항목은 탄소 성분(OC, EC), 이온 성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) 8종 이외에 대기환경운영망 설치운영 지침에 따라 금속 성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As) 8종을 활용하였으며, PM_{2.5} 조성비 분석 중 금속비율 산정 과정에 측정망 설치 지침 외의 원소들(Si, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Co, Zn, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, Hg, Bi) 21종을 추가적으로 분석하였다. 추가로, Zn은 산업 및 제련 관련 배출의 영향을 반영할 가능성이 있는 원소로 판단되어 PM_{2.5} 성분측정망 자료 분석 항목에 추가로 포함하였다.

2.2.3 대기중금속측정망

에어코리아에서 제공하는 최근 3년간 대기환경 월보 및 연보 데이터를 사용하였다. 분석의 시작 시점은 4개의 비교지역과 온산국가산업단지의 자료와의 비

교를 위해 2022년 7월로 설정하였으며, PM_{2.5} 성분측정망 자료의 비교를 위해 2023년도까지의 자료를 사용하였다. 대기중금속측정망에서 측정되는 12종 중 결측값이 90% 이상인 Be를 제외한 11종(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Al, Ca, Mg)을 분석에 사용하였다.

2.3 자료 분석 방법

2.3.1 시계열 분석

입자상 물질(PM) 농도의 장기적 변동 특성을 파악하기 위해 도시대기측정 자료를 활용하였다. 온산국가산업단지 및 전국 도시대기측정망의 자료를 비교하기 위해 2019년부터 2024년까지 최근 6년간 자료를 대상으로 하였다. 이를 통해 온산국가산업단지와 전국 평균 월간 PM 농도를 대상으로 시계열 분석을 수행하여 전국 단위의 농도 경향성을 도출하였다. 이와 동시에 비교대상 4개 지역과 온산국가산업단지의 PM 농도를 비교함으로써 농도 수준 및 추이를 검토하였다. 또한 대기중금속측정망에서 측정되는 중금속 11종의 상관분석을 통해 선정한 중금속(Pb, Cd, As) 3종에 대한 시간적 흐름에 따른 중금속 농도 변화 추이를 관찰하였다.

2.3.2 조성비 분석

온산국가산업단지를 포함한 총 5개 지역을 대상으로, PM_{2.5} 성분측정망에서 2019년부터 2023년까지 5년간 측정된 월간 평균 농도 자료를 사용하였다. PM_{2.5} 내의 주요 구성 성분 및 중금속이 차지하는 비율을 파악하고자 하였다. 이를 통해 각 지역별 PM_{2.5} 내 중금속의 특성을 비교하였고, 온산국가산업단지의 중금속 조성이 다른 지역과 구별되는 양상을 나타내는지 분석하였다. PM_{2.5} 성분중량농도에서 유기탄소, 무기탄소, 이온 성분, 금속 성분 및 지침 이외의 원소들 29종 성분의 총합을 제외한 값은 Unidentified로 제시하였다. PM_{2.5} 내 원소 X의 조성은 다음 식으로 계산하였다.

$$f_X = \frac{mx}{mPM_{2.5}}$$

* f_X : 원소 X의 조성(proportion of X);

m_X : 원소 X의 질량(μg);

$mPM_{2.5}$: PM_{2.5} 총 질량(μg)

온산국가산업단지를 기준으로 제련소 대비 비율은 다음 식으로 계산하였다.

$$G_X = \frac{f_{X,A}}{f_{X,A}}$$

* G_X : 제련소 대비 상대 비율;

$f_{X,A}$: 제련소(A) 지역의 원소 X 조성;

$f_{X,x}$: 비교대상 지역의 원소 X 조성

각 지역의 원소 조성을 제련소 지역 조성으로 나누어, 제련소 대비 비율 G_X 을 산정하였고, 이를 활용하여 제련소와 비교지역 간 차이는 다음과 같이 계산하였다.

$$R = \left(\frac{G_a - G_x}{G_x} \right) \times 100$$

* R : 두 지역 간 차이를 나타내는 백분율(%);

G_a : 지역(a)의 제련소 대비 비율($G_a = 1$);

G_x : 비교대상 지역(x)의 제련소 대비 비율

위에서 계산한 원소 X의 조성은 Proportion으로, 두 지역 간 차이는 Ratio (Site A-Others) (%)로 정의하여 지역별 조성비 및 온산국가산업단지 대비 비율 분석을 수행하였다.

2.3.3 상관분석

온산국가산업단지 내 중금속 성분의 배출 특성을 규명하고 지역 간 분포 특성을 파악하기 위하여, 온산국가산업단지를 포함한 5개 지역을 대상으로 분석을 수행하였다. 대기중금속측정망에서 2022년 7월부터 2023년 12월까지 18개월간 측정된 중금속 11종 월간 평균 농도 자료를 활용하여 결정계수(r^2)를 산정하였다. 본 연구에서는 선행 연구를 참고하여 결정계수(r^2)의 분석 기준을 설정하였다. 기존 연구에서는 r^2 값이 0.6 이상의 범위일 때 모델의 신뢰성이 높다고 판단하였으며, 이를 바탕으로 $0.6 \leq r^2 \leq 1$ 를 유의미한 상관관

계, $r^2 < 0.6$ 를 낮은 상관관계로 구분하였다(Zhang *et al.*, 2022). 온산국가산업단지 내 11종 중금속 간 상관분석을 통해 유의미한 상관성을 나타내는 중금속을 파악하였고, 이를 통해 선정한 Pb, Cd, 그리고 As를 대상으로 지역 간 상관분석을 실시하여 분포 특성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PM₁₀과 PM_{2.5}

제련소 지역인 Site A의 대기오염 현황을 파악하기 위하여, 그림 2에서는 도시대기측정망 자료(2019~2024년)를 활용하여 PM₁₀과 PM_{2.5}의 월평균 농도를 나타내었다. 대기환경기준에 따르면 PM₁₀과 PM_{2.5}의 대기환경기준은 각각 연간평균치 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 규정하고 있으며, 전국과 Site A의 연간 PM₁₀ 농도 최고치는 각 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하며 대기환경 기준을 초과하는 해는 없었다. PM_{2.5}의 경우, 최저농도는 동일하게 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 최고농도는 각각 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모든 연도에 대해 대기환경 기준을 초과하였다. Site A의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 변화는 전국 평균과 전반적으로 유사한 농도 수준과 추이를 보였다. 그러나 제련소 지역 특성상 PM_{2.5}의 단위농도당 중금속 농도에 차이가 존재할 수 있으므로, PM_{2.5} 성분측정망 및 대기중금속측정망 내의 자료와 함께 비교를 수행하였다.

3.2 PM_{2.5} 성분 조성 및 지역 간 비교

3.2.1 PM_{2.5} 성분 비율

Site A의 PM_{2.5} 농도가 전국 평균 농도와 비슷한 수준이라면, Site A의 PM_{2.5} 성분 중 중금속 조성비가 높을수록 대기질 및 인체에 중금속이 미치는 영향이 크게 작용할 것이다. 이에 따라 PM_{2.5} 성분 농도값을 활용하여 제련소 지역의 대기오염 특성에 대하여 분석하였다(그림 3). 국립환경과학원에서 제공하는 PM_{2.5} 성분측정망 자료를 활용하여, Site A 및 비교대상 지역

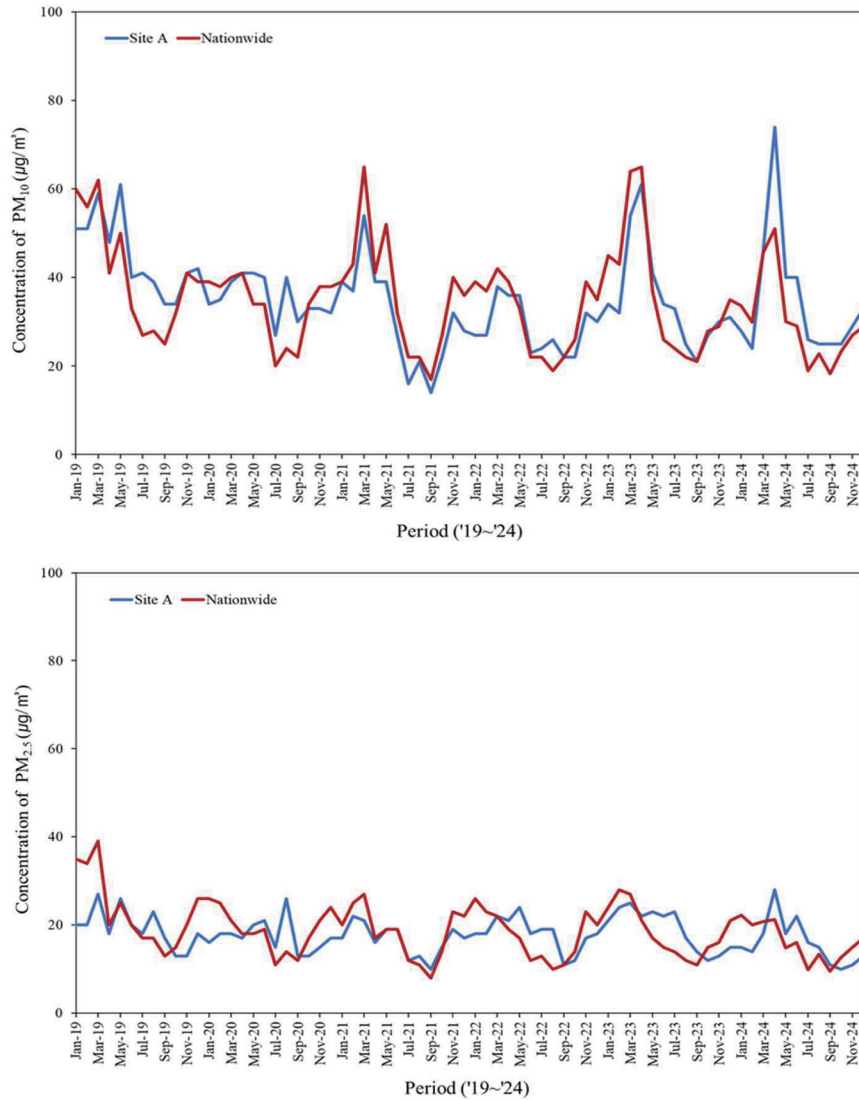


Fig. 2. Variation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in Site A and Nationwide.

(Site-B, C, D, E)을 대상으로 $PM_{2.5}$ 의 화학성분 조성에 대하여 분석하였다. Site A의 경우, $PM_{2.5}$ 내에 탄소 성분, 이온 성분, 금속 성분의 비율이 각각 30%, 41%, 17%로 나타났다. 탄소 성분은 Site A에서 30%로 비교 대상 지역(Site-B, C, D, E)보다 1~5% 높게 나타나 가장 높은 탄소 비율을 차지하였다. 이온 성분의 경우, Site A에서의 비율이 41%로, 각 비교대상 지역의 비율(37%, 43%, 43%, 45%)과 유사하거나 다소 낮은 수준

을 보였다. 제련소 지역인 Site A에서 타지역 대비 탄소 성분이 높게 나온 것은, 해당 지역이 정유 및 석유 화학 공장과 같이 탄소 성분 배출량이 높은 공정을 다량 보유한 산업단지이기 때문인 것으로 해석된다(Valle-Hernández *et al.*, 2024). 금속 성분은 Site A와 Site B에서 각각 17%로 다른 비교지역보다 1~5% 높은 수준을 보였다. 이는 Site A가 비철금속 제련소 중심의 산업단지이며, Site B가 제철소가 위치한 공업지역이라

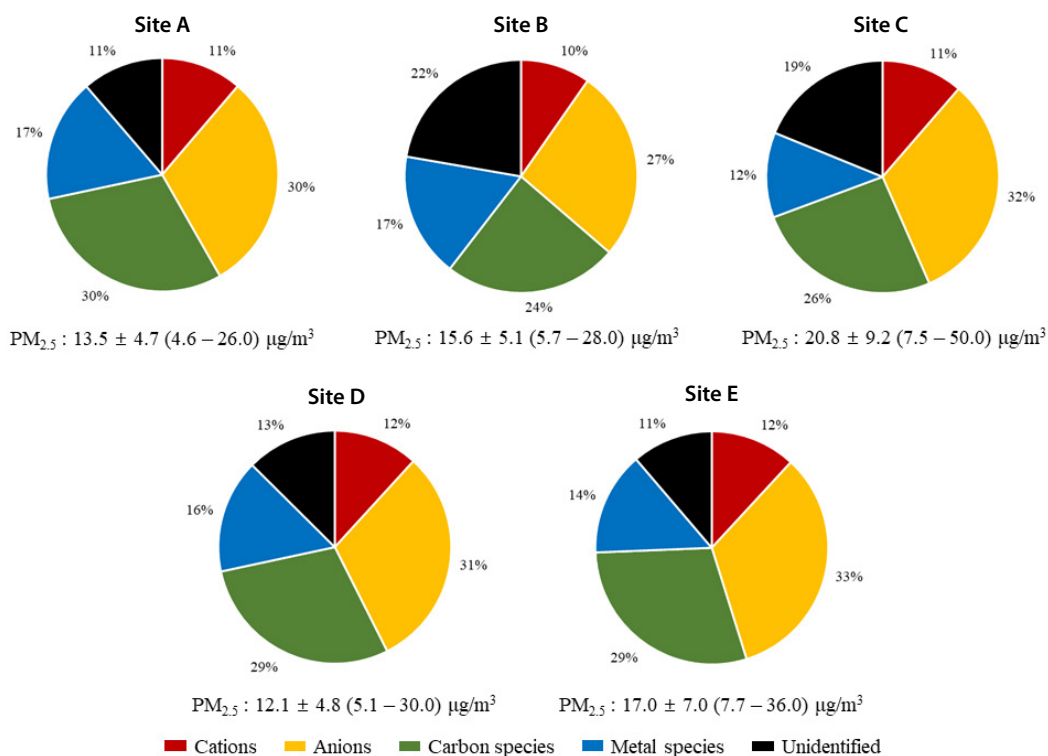


Fig. 3. Regional comparisons of PM_{2.5} chemical composition ratios (red: cations, yellow: anions, green: carbon, blue: metals and black: unidentified) across different regions (PM_{2.5}: mean ± SD (min~max) µg/m³).

는 지역 산업 특성에 기인한 것으로 판단된다. 충청남도의 2021년도 PM_{2.5} 성분측정망의 조성비를 활용한 선행 연구에 따르면 (Hwang *et al.*, 2023), 전체에서 중금속이 차지하는 비율이 11~14%로, 해당 지역의 당진 제련소와 가까운 PM_{2.5} 성분측정망이 위치한 송산면의 중금속 비율은 비교대상 3개 지역 (청정·도시·교외)과 조성비 차이가 0~3%를 기록하였다. 또한 해당 지역의 조성비가 14%인 것을 감안하면, 본 연구의 Site A, B의 중금속 조성비에 비하면 3% 낮은 수준이다. 동일 산업군에서의 이러한 비율 차이는 제련소가 위치한 지역의 산업단지 규모나 생산량 등에 의한 차이인 것으로 판단된다. 실제로 선행 연구에서 산업단지 배출이 대기중금속 성분 농도에 직접적인 영향을 미치며, 배출원 특성과 기상 조건에 따라 농도 변화가 뚜렷하게 나타난다고 보고하였다. 따라서 Site A에서 관측된 높은 금속 비율은 해당 지역 산업 활동의 특성을 받

영한 것으로 해석된다(Choi *et al.*, 2021).

3.2.2 PM_{2.5} 성분 중 중금속 조성

PM_{2.5} 성분 중 제련소 지역의 금속 성분 비율이 타 지역 대비 높게 나타났으나, 단순 비율 분석 결과만으로는 해당 지역의 금속 성분의 농도가 통계적으로 유의미하게 높다는 것을 증명할 수 없으므로 조성비 분석과 변환계수를 적용해 농도 비교를 진행하였다. Site A 및 비교대상 지역의 PM_{2.5} 성분 중 9종의 중금속 조성 (Pb, As, Cd, Zn, Mn, Ni, Cr, Cu, Fe)에 대해 분석을 수행하였고 그 결과를 표 2에 나타내었다. 이때, 9종 중금속은 제련소 및 비교대상 지역의 산업 특성상 유의미한 농도 비교가 가능한 항목으로 선정하였다. Pb, As, Cu 항목에서 Site A의 조성비는 각각 0.149%, 0.076%, 0.079%로 전체 지역 중 가장 높은 비율을 기록하였다. Cd, Zn, Mn, Ni, Cr, Fe 항목에서는 각각

Table 2. Regional composition ratios and relative excess ratios of Site A (Ratio = (Site A/Others)-1, %)

Heavy metals	Location				
	Site A	Site B	Site C	Site D	Site E
PM _{2.5} concentration*	13.5 ± 4.7 (4.6~26.0)	15.6 ± 5.1 (5.7~28.0)	20.8 ± 9.2 (7.5~50.0)	12.1 ± 4.8 (5.1~30.0)	17.0 ± 7.0 (7.7~36.0)
Regional composition ratio	0.149	0.131	0.071	0.107	0.119
Pb Concentration**	18.2 ± 16.4 (0.9~107.4)	18.8 ± 7.9 (5.0~52.8)	14.4 ± 7.2 (3.0~34.2)	12.0 ± 9.2 (2.5~60.4)	18.3 ± 8.8 (5.3~44.3)
Relative excess ratio	-	13.6	110.8	39.4	25.7
Regional composition ratio	0.037	0.028	0.028	0.046	0.030
Cd Concentration	4.5 ± 5.3 (0.7~34.1)	3.8 ± 2.8 (0.1~15.6)	4.9 ± 6.8 (0.3~48.3)	4.1 ± 5.7 (0.2~36.9)	3.8 ± 3.7 (0.2~17.4)
Relative excess ratio	-	34.5	32.4	-19.0	25.5
Regional composition ratio	0.076	0.024	0.016	0.040	0.015
As Concentration	8.5 ± 12.8 (0.4~71.2)	3.3 ± 2.2 (0.3~8.9)	3.1 ± 3.6 (0.4~22.3)	4.3 ± 3.9 (0.0~19.2)	2.2 ± 1.5 (0.4~7.7)
Relative excess ratio	-	215.0	377.7	89.3	413.5
Regional composition ratio	0.397	1.219	0.163	0.158	0.847
Zn Concentration	48.6 ± 23.5 (5.2~150.6)	163.2 ± 94.1 (42.3~645.3)	31.5 ± 13.0 (8.9~65.7)	18.6 ± 7.7 (5.4~39.4)	135.0 ± 80.5 (32.6~424.0)
Relative excess ratio	-	-67.4	144.0	151.3	-53.1
Regional composition ratio	0.061	0.052	0.047	0.094	0.040
Cr Concentration	7.7 ± 15.8 (0.5~97.7)	7.4 ± 10.5 (1.6~65.3)	8.3 ± 16.5 (0.2~74.0)	8.7 ± 16.8 (0.2~79.7)	6.6 ± 12.8 (0.1~65.4)
Relative excess ratio	-	16.0	27.8	-35.6	51.0
Regional composition ratio	0.143	0.234	0.059	0.055	0.097
Mn Concentration	17.4 ± 7.5 (3.6~35.2)	32.9 ± 13.1 (14.1~72.8)	11.2 ± 5.4 (3.9~36.8)	6.3 ± 2.5 (0.5~12.8)	15.3 ± 6.3 (5.7~31.8)
Relative excess ratio	-	-38.7	143.7	160.1	48.4
Regional composition ratio	0.017	0.020	0.007	0.006	0.009
Ni Concentration	2.1 ± 2.3 (0.2~13.8)	2.7 ± 1.6 (1.0~9.4)	1.2 ± 0.6 (0.1~2.7)	0.7 ± 0.4 (0.0~1.9)	1.4 ± 1.1 (0.1~7.3)
Relative excess ratio	-	-14.9	132.8	162.6	82.3
Regional composition ratio	0.079	0.069	0.033	0.038	0.054
Cu Concentration	9.8 ± 24.5 (0.2~136.6)	9.3 ± 12.4 (0.9~93.6)	5.6 ± 7.9 (1.0~46.1)	3.8 ± 9.4 (0.4~52.1)	7.7 ± 10.2 (0.1~62.6)
Relative excess ratio	-	15.1	135.8	107.1	45.9
Regional composition ratio	1.045	1.958	0.589	0.547	0.904
Fe Concentration	133.7 ± 60.2 (20.4~300.9)	280.2 ± 113.4 (127.7~644.5)	114.7 ± 58.1 (28.5~311.7)	64.8 ± 34.5 (7.8~187.5)	144.6 ± 63.0 (28.2~337.3)
Relative excess ratio	-	-46.6	77.4	91.0	15.7

*PM_{2.5}: mean ± SD (min~max) µg/m³**Heavy metal concentrations: mean ± SD (min~max) ng/m³

0.037%, 0.397%, 0.143%, 0.017%, 0.061%, 1.045%의 조성비로 전체 지역에서 두 번째로 높은 비율을 기록하였다. 제련소의 공정 과정 중 Pb, As 등의 유해중금속의 배출량이 높는데, 해당 결과는 이러한 요소가 잘 반영된 결과로 판단된다(Adnan *et al.*, 2024). 하지만 Site B (공업지역)의 경우 Zn, Mn, Ni, Fe 각 항목에서 Site A의 조성비에 비하여 67.4%, 38.7%, 14.9%, 46.6%만큼 높은 비율을 기록했다. 이러한 결과는 해당 지역이 인근 산업단지와 제철소의 공정 과정에서 투입되는 원료(Mn, Ni 등)와 주로 배출되는 중금속(Fe, Zn, Pb, Cr, Mn)이 해당 대기질에 영향을 끼칠 수 있으며, 생산량이나 공장가동률에 따라 제련소 지역인 Site A 대비 높은 비율로 나타날 수 있음을 시사한다(Baek *et al.*, 2019). Site C (공업지역)와 비교 시 모든 항목에 걸쳐 27.8~377.7% 높은 비율을 기록하였으며, Site D (상업지역)와 비교 시에도 대부분의 중금속에서 39.4~162.6% 만큼 높은 비율을 기록하였다. 다만, Cd 및 Cr 항목에서는 Site D에서 각각 19.0%, 35.6% 더 높게 나타났다. Site E와 비교 시에도 대부분 항목에서 15.7~413.5% 높은 농도를 보였으나, Zn의 경우 53.1% 낮은 비율로 나타났다. Site A는 Pb, As 등 제련·비철금속 가공과 직접적으로 연관된 중금속에서 뚜렷한 조성비의 우위를 보였다. 그러나 Site C 지역을 제외하고는 Zn, Cd, Cr, Mn, Ni, Fe 항목에서 중금속 비율이 Site A를 일부 상회하였으며, 이러한 결과는 산업 유형, 교통 활동 등 각 지역별 배출 특성과 연관이 있을 것으로 판단된다.

3.2.3 PM_{2.5} 성분 내 중금속 농도의 지역 간 비교

PM_{2.5} 성분 내 중금속의 조성비를 이용하여 분석하였을 때, 각 지역 특성에 맞게 타지역 대비 높은 비율을 차지하는 중금속을 찾을 수 있었다. 또한, 제련소 지역에서의 중금속 비율이 일반공업지역 및 주거, 상업지역에서의 비율에 비해 확연히 높은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 PM_{2.5} 성분 내 중금속의 농도가 매우 적은 편에 속하기 때문에, 조성비 환산 방법에 따라 비율 차이가 있을 수 있다. 또한 기간별 농도 증감추이에 따라 조성비에 변화가 있을 수 있다. 보다 정밀한

비교를 위하여, 월별 Site A의 PM_{2.5} 농도를 비교대상 지역의 PM_{2.5} 농도로 나누어 월별·지역별 변환계수를 산정하고, 이를 각 중금속 농도에 곱하여 지역별 중금속 농도를 비교하였다. 표 3은 Site A의 PM_{2.5} 농도를 기준으로 환산한 표준화 비교값으로, 지역 간 중금속 농도 특성을 동일 기준에서 비교하기 위해 제시하였다. 이는 PM_{2.5} 내 중금속의 절대농도가 매우 낮아 조성비만으로는 지역 간 차이가 과장되거나 축소될 수 있다는 점을 보완하기 위한 것이다. 이에 해당 값은 관측된 절대농도가 아니며, 환산 과정에서 시기별 농도 변화와 지역별 배출원 특성 차이가 단순화될 수 있다는 한계를 반대로 가지고 있다. 따라서 본 결과는 기존 연구의 방법론을 참고하여 지역 간 상대적 특성을 비교하는 참고지표이다(Vinson *et al.*, 2020). Pb는 2020년도에 Site A에서 0.023 µg/m³로 비교대상 지역(Site-B, C, D, E) 대비 1.6~2.9배 높은 농도를 기록하였다. 2019년도와 2023년도에는 타지역과 비교 시 각각 2, 3 번째로 높은 농도를 기록하였으나, 2020년의 Pb 농도가 타지역과 차이가 적지 않은 것을 감안하면, 해당하는 시기에 Site A 농도값이 조성비 평균값에 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다. As는 Site A가 2019~2023년 사이 전체 지역 중 가장 높은 연평균 농도를 유지하였으며, 비교대상 지역(Site-B, C, D, E)과의 최대 차이는 2021년에 나타났다. 이때 Site A (0.0075 µg/m³)는 해당 연도에 비교대상 지역 중 최저농도를 기록한 Site C (0.0011 µg/m³) 대비 약 6.9배 높았으며, 최고농도를 기록한 Site D (0.0037 µg/m³)와 비교하였을 때에도 약 2배 높은 농도를 기록하였다. Cd의 5년간(2019~2023) 전체 평균 농도를 지역별로 비교하면, Site D에서 0.0051 µg/m³로 타지역 대비 가장 높으며, Site A의 Cd 농도는 0.0045 µg/m³로, 두 번째로 농도가 높다. 2020년도에는 Site D (0.0111 µg/m³)에서의 급격한 농도 증가가 관측되었으며, Site A (0.0058 µg/m³)와 비교 시 1.9배 높은 수준이다. Site B에서 2020년도를 제외한 전체 기간의 Cd 농도 평균값은 0.0035 µg/m³이며, 해당 농도 평균값과 비교하면 2020년의 농도는 약 3.1배 높은 수준이다. 앞서 PM_{2.5} 성분측정망의 조성비 분석에서 Site D의 Cd 비율이 Site A에 비해 높게 나타

Table 3. Regional comparison values of PM_{2.5}-bound heavy metals based on Site A.

Heavy metals ($\times 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	Location	2019		2020		2021		2022		2023	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Pb	Site A	15.4	6.1	22.6	31.4	17.9	10.9	15.5	10.8	19.9	14.3
	Site B	19.2	9.3	12.7	5.4	16.2	7.8	16.1	4.0	19.3	11.9
	Site C	10.7	4.4	7.8	4.7	8.5	2.5	9.1	3.4	10.3	5.3
	Site D	11.7	5.6	9.7	5.8	10.8	6.2	11.5	7.8	25.6	26.4
	Site E	18.6	7.3	13.9	10.9	12.6	5.0	12.3	6.7	17.6	5.7
Cd	Site A	2.7	1.1	5.8	5.1	7.1	9.7	3.1	2.3	4.1	2.3
	Site B	1.7	1.3	3.2	1.7	4.6	2.7	3.6	0.6	3.8	2.6
	Site C	1.8	1.2	4.6	5.3	3.1	1.3	5.5	9.8	2.6	2.7
	Site D	2.4	1.8	11.1	19.1	5.5	4.9	2.4	1.0	3.9	1.5
	Site E	2.0	2.0	5.9	5.8	2.8	1.8	2.1	1.3	3.9	3.2
As	Site A	6.2	6.3	11.1	21.7	7.5	6.2	9.6	13.4	–	–
	Site B	3.6	2.8	1.9	1.1	3.0	2.5	3.2	2.3	–	–
	Site C	2.0	1.1	1.6	2.1	1.1	0.6	3.0	3.1	–	–
	Site D	4.7	3.9	3.8	3.3	3.7	2.7	8.5	7.7	–	–
	Site E	2.1	1.1	1.2	0.9	1.9	1.1	2.1	1.4	–	–
Zn	Site A	52.4	12.5	44.8	39.7	51.4	22.2	42.6	16.9	51.6	21.5
	Site B	146.6	69.0	94.5	47.2	152.7	82.6	143.4	43.1	190.6	161.2
	Site C	23.6	6.0	13.5	7.1	20.1	5.9	22.2	9.4	24.9	8.4
	Site D	29.1	7.8	15.2	7.6	20.2	8.9	20.9	7.8	20.9	7.9
	Site E	126.8	51.5	77.2	36.2	116.3	73.6	104.9	76.6	116.6	56.6
Cr	Site A	2.3	1.8	2.0	0.7	1.8	0.9	3.8	4.9	26.1	26.9
	Site B	3.6	1.9	2.9	1.1	2.9	1.8	4.1	1.8	21.9	18.9
	Site C	0.7	0.2	0.7	0.5	0.6	0.3	3.8	8.7	25.0	19.4
	Site D	0.9	0.3	5.7	15.8	0.8	0.3	3.4	5.6	32.9	25.9
	Site E	1.7	0.9	1.3	0.7	1.8	1.3	3.8	4.7	24.8	19.5
Mn	Site A	14.8	5.4	19.4	10.1	21.1	9.0	16.7	6.5	15.1	4.1
	Site B	28.3	14.4	25.4	14.2	34.3	12.6	28.3	6.5	27.0	9.7
	Site C	5.2	1.5	5.7	3.0	7.8	2.7	7.8	2.7	10.5	4.2
	Site D	7.4	2.2	6.8	3.3	7.2	3.3	6.9	3.0	6.9	2.6
	Site E	11.0	2.7	10.7	4.4	14.5	7.4	12.7	5.2	12.7	3.6
Ni	Site A	2.9	2.7	1.4	0.9	1.3	1.1	1.5	0.5	2.7	3.6
	Site B	2.5	1.5	1.6	0.8	1.9	1.0	3.1	1.3	3.2	2.1
	Site C	1.1	0.6	0.6	0.5	0.7	0.6	1.0	0.5	1.0	0.5
	Site D	1.2	0.3	0.5	0.2	0.8	0.8	0.7	0.4	0.8	0.4
	Site E	1.2	0.3	0.7	0.4	0.7	0.5	1.1	0.6	2.1	2.0
Cu	Site A	5.3	1.6	5.6	3.0	5.1	1.0	4.8	1.0	28.4	2.3
	Site B	7.1	5.3	5.3	2.1	5.2	1.3	6.2	1.0	17.8	1.8
	Site C	2.8	3.2	2.2	4.8	2.3	0.9	2.7	1.0	13.2	2.6
	Site D	2.5	3.3	1.9	1.8	2.1	0.9	2.1	0.7	18.0	1.2
	Site E	5.1	52.1	3.7	28.2	3.8	20.7	3.6	30.0	18.6	23.5
Fe	Site A	123.7	33.7	100.9	43.9	117.8	62.4	133.8	56.3	189.7	65.3
	Site B	293.6	111.8	186.2	94.0	228.4	80.2	233.0	65.1	280.7	105.3
	Site C	68.7	11.0	44.1	23.5	68.9	31.5	80.5	38.0	124.7	48.5
	Site D	90.8	26.5	47.2	22.2	53.4	27.2	76.8	42.6	100.0	41.1
	Site E	127.6	35.5	74.0	31.5	109.9	63.7	124.7	55.1	159.4	65.4

* Values are presented after multiplication by 10^3 .* Values in Table 3 are standardized to the PM_{2.5} level at Site A.

났으며, 해당 지역이 상업지역임을 감안하면, 산업단지의 공정과정보다는 교통량 등의 주변 환경적 요인과 연계하여 해석할 수 있다(Adnan *et al.*, 2024). Zn의 경우, Site B, E에서 Site A에 비하여 높은 농도 수준을 보인다. Site B의 농도는 2019~2023년 전 기간에 걸쳐 Site A 대비 2.5~3.7배 높았으며, Site E 또한 같은 기간 동안 2.2~2.5배 수준으로 높은 값을 기록하였다. 특히 2023년 Site B ($0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 Site A ($0.052 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 3.7배 수준으로, 가장 큰 차이를 보였다. Site A 대비 Site B에서 전반적으로 높은 농도를 기록한 중금속은 Mn, Ni, Fe이다. Mn 항목에서는 전체 기간 동안 약 1.3~1.9배, Ni에서는 2019년도를 제외하고는 약 1.1~2배, Fe 항목에서는 전체 기간 동안 약 1.5~2.4배를 기록하였다. Cr은 전체 지역에서 2019~2022년도 사이에 $0.001\sim0.006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 범위를 유지하였으며, 2023년에 모든 지역에서 동반 상승하는 패턴을 나타냈다. 해당 연도 농도는 Site D ($0.0329 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Site A ($0.0261 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Site C ($0.025 \mu\text{g}/\text{m}^3$) Site E ($0.025 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Site B ($0.022 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 관측되었다. Site D에서 가장 높은 농도를 기록하였으며, Site A 대비 1.26배 높게 관측되었다. Site A에서 Pb와 As는 제련 및 비철금속 가공과 연관된 금속에서 일관되게 가장 높은 농도를 기록하였다. 반면 Site B는 제철소 및 산업단지 영향으로 Zn, Mn, Fe, Ni에서 지속적으로 높은 수준을 보였으며, Site C는 Fe와 Cd에서, Site D는 Cd와 Cr에서 특정 연도에 Site A를 상회하였다. 또한 Site E는 Zn에서 Site A보다 2배 이상 높은 농도를 보였다. 산업단지(Site-A, B)는 Pb, Cd, As, Zn, Mn, Fe, Ni 등 특정 금속에서 높은 농도 수준을 보였으며, 주거지역(Site E) 및 상업지역(Site D) 역시 교통 및 생활 배출원의 영향으로 일부 금속(Cd, Cr)에서 산업단지 수준을 상회하기도 하였다. 이러한 결과는 PM_{2.5} 중 금속 성분 농도가 지역적 배출원 특성에 따라 다르게 분포함을 시사한다(Hwang *et al.*, 2023).

3.2.4 지역별 대기오염물질 배출 특성

Site A와 비교대상 지역(Site-B, C, D, E)의 PM_{2.5} 성

분 내 증감 추이는 대체적으로 유사한 경향을 보이며, Site A는 전반적으로 높은 금속 농도를 나타내는 산업단지 특성을 지닌다. 그러나 특정 금속은 산업 유형과 지역별 배출 특성에 따라 타지역에서 더 높은 농도가 관측되었다. 이는 PM_{2.5} 내 중금속 조성이 단일 배출원이 아닌, 지역별 다양한 배출원과 환경 요인의 복합적으로 작용하여 형성됨을 시사한다. 이러한 차이는 지역별 대기오염물질 배출 특성과 연관지어 해석하였다. Site A는 제련소 중심 산업단지로 제련 및 비철금속 가공 과정에서 발생하는 Pb와 As 등의 중금속에서 가장 높은 농도를 기록하였다. 이러한 결과는 제련 및 채굴 활동으로 인해 Pb, As, Cd 등 다양한 미량 원소가 대기 및 퇴적물로부터 방출된다는 선행 연구의 결과와도 일치한다(Adnan *et al.*, 2024). Site B는 Zn, Mn, Ni, Cu, Fe가 Site A보다 높게 나타난 대표 지역으로, 이는 제철소 및 인근 산업단지에서 발생하는 배출 특성과 밀접한 관련이 있다. Fe, Mn, Ni는 철광석, 합금 원소, 연료에서 기인하며, Zn은 고철 스크랩 내 불순물이 고온 공정에서 휘발 후 아연 산화물 형태로 대기 중에 배출된다(Xue *et al.*, 2022; Corbin *et al.*, 2018; Mbengue *et al.*, 2017). Cu는 금속 원료 자체로, 제련소에서는 광석, 원료 및 부산물에 포함되어 있을 수 있으며, 공업시설 전반에서 합금 부품으로 널리 쓰이기 때문에 나타난다. 따라서 Site B에서 Zn·Mn·Ni·Fe·Cu 농도가 높게 나타난 것은 제철소 원료 및 합금 공정에서 발생한 배출 특성을 반영한다(Zhang *et al.*, 2023). Site C는 특정 연도에 Cd 농도가 상대적으로 높았으나, 전반적으로는 Site A보다 낮거나 유사한 수준에 머물렀다. 해당 지역은 대규모 금속 제련·제철 시설이 없고, 제2일반 산업단지에 소규모 제조업(금속·기계·전자·섬유·식품 등)이 분포한다. 따라서 금속 원재료를 대량으로 사용하는 업종이 적어 Site A·Site B와 같은 대규모 산업지 대비 중금속 농도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. Site D는 Cd와 Cr에서 Site A보다 높은 수준을 보였는데, 이는 산업 배출보다는 교통 및 상업 활동의 영향으로 해석된다. 교통량이 많은 상업지역에서는 타이어 및 브레이크 마모로 인해 Cd가 일부 브레이크 마모 입

Site A	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As	Al	Ca	Mg
Pb		0.9062	0.0600	0.6824	0.2085	0.1623	0.2660	0.4755	0.0649	0.0713	0.0136
Cd			0.0834	0.6399	0.2393	0.1710	0.2510	0.6334	0.0845	0.0697	0.0291
Cr				0.0750	0.4645	0.1930	0.4461	0.0701	0.0201	0.0453	0.0035
Cu					0.3417	0.1697	0.3887	0.4244	0.0194	0.0919	0.0015
Mn						0.4530	0.7297	0.1485	0.0640	0.1862	0.0663
Fe							0.1955	0.1000	0.7120	0.8756	0.6981
Ni								0.1245	0.0079	0.0463	0.0001
As									0.0573	0.0672	0.0215
Al										0.7837	0.8705
Ca											0.8128
Mg											

Fig. 4. Correlation analysis of 11 heavy metals in the atmospheric monitoring network of Site A.

자에서 검출되며, Cr과 Cd는 교통 기원 금속으로 분류된 바 있다(Nawrot *et al.*, 2020). Site E는 Zn 농도가 Site A보다 높게 나타났으며, 이는 차량 교통량이 많은 주거지역 특성과 연관된다. Zn은 타이어 제조 시 첨가되며, 타이어 마모와 도로 비산먼지를 통해 대기 중으로 방출된다(Lopez *et al.*, 2023). 따라서 Site E에서 Zn이 두드러지게 높은 농도를 기록한 것은 산업 배출보다는 교통 및 생활 배출원의 영향으로 해석된다.

3.3 중금속 농도 분포 특성

3.3.1 중금속 간 상관분석

Site A의 중금속 성분의 배출 메커니즘을 규명하고 오염원을 특성화하기 위하여, 대기중금속측정망 자료의 11종 항목을 대상으로 상관분석을 수행하였다(그림 4). 상관분석 수행 결과, Pb-Cd, Cr-Pb, Cu-Pb,

Cr-Cd, Cu-Cd, As-Cd, Ni-Mn, Al-Fe, Ca-Fe, Mg-Fe, Ca-Al, Mg-Al, Mg-Ca 조합에서 각 결정계수 값이 0.6 이상으로 유의미한 상관관계를 보였고, 나머지 대부분의 조합에서의 결정계수 값은 0.6 미만으로 낮은 상관관계를 나타내었다. 특히, Pb-Cd, Ca-Fe, Ca-Al, Mg-Al, Ca-Mg 조합에서의 각 결정계수 값은 0.9062, 0.8756, 0.7837, 0.8705, 0.8128로 다른 조합에 비해 강한 상관관계를 나타내었다. 강한 상관관계를 보인 금속 조합 중 Pb-Cd의 결정계수가 0.9062로 가장 높게 나타났으며, 이는 다른 조합에 비해 매우 강한 상관성을 의미한다. 이는 두 금속이 동일한 배출원에서 기인했을 가능성을 시사한다(Xing *et al.*, 2020).

3.3.2 제련소와 비교지역 간 농도 특성

그림 5에서는 결정계수 상위 10개 그룹 중, 소량으로도 인체에 유해한 영향을 미치는 중금속 3종(Pb,

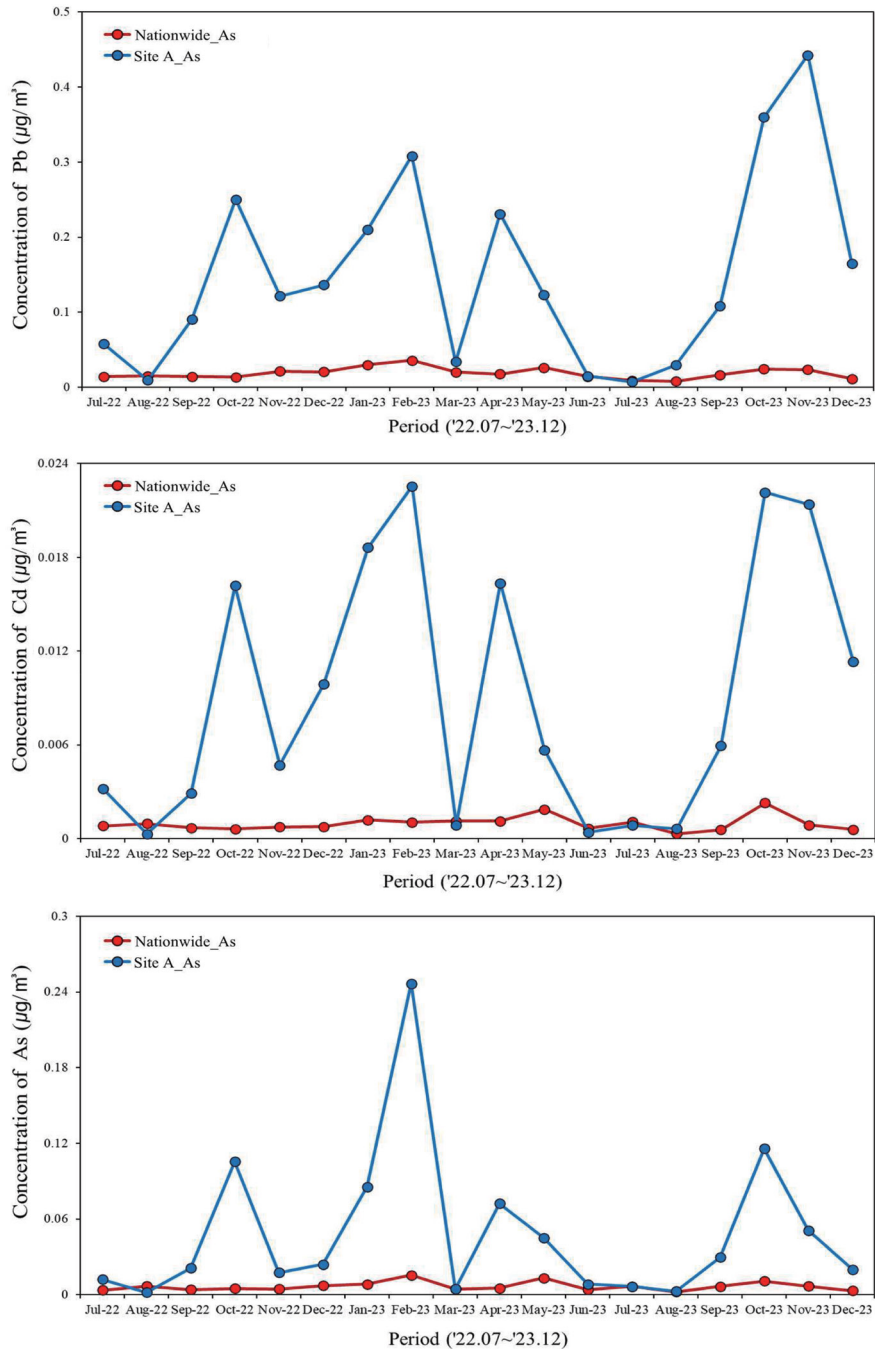


Fig. 5. Variations of atmospheric heavy metals (Pb, Cd, and As) concentrations between Nationwide and Site A.

Cd, As)을 선정하여 지역별·시기별 대기오염물질 농도 특성에 대해 분석하였다(Jaishankar *et al.*, 2014).

Site A의 대기중금속측정망 항목 중 Pb, Cd, As의 월평균 농도를 전국 평균 농도와 비교한 그래프를 그림 5

에 나타내었다. Site A의 월평균 Pb 농도는 전국 평균 ($0.008 \sim 0.0357 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 일관되게 높았다. 급격한 농도 상승 시점을 살펴보면, 2023년 11월로 농도값은 $0.4425 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 같은 연도 최저농도를 기록한 2023년 7월과 대비하여 약 60배 급증하였다. 전국의 월평균 Pb 농도와 비교 시에는 월별 최고농도와 최저농도 간의 차이가 확연하여, 전체적인 농도 비교를 하기는 쉽지 않으므로, 연평균 농도 자료를 이용하여 추가 분석하였다. Site A와 전국의 각 연도별 평균 농도로 비

교하면, 2022~2023년도에 각 연도별 Site A의 Pb 농도 ($0.1109 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.1696 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 전국의 Pb 농도 ($0.0162 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.0197 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비하여 약 7~9배의 차이를 보인다. 전체 기간에 대하여, Site A의 Cd와 As 또한 전국의 월평균 농도와 비교 시 각 항목에서 26배, 21배로 차이가 큰 구간이 나타났다. 이러한 이유로 전체적인 농도를 비교하기 쉽지 않으므로, 연평균 농도 값으로 비교를 진행하였다. Site A에서 Cd와 As의 최고 농도를 기록한 2023년 자료를 살펴보면, Site A의 경우에 각

A-B	A_Pb	A_Cd	A_As	B_Pb	B_Cd	B_As
A_Pb		0.9062	0.4755	0.0202	0.2065	0.0954
A_Cd			0.6334	0.0750	0.2665	0.0938
A_As				0.0516	0.05308	0.1038
B_Pb					0.6686	0.0964
B_Cd						0.0985
B_As						

A-C	A_Pb	A_Cd	A_As	C_Pb	C_Cd	C_As
A_Pb		0.9062	0.4755	0.1444	0.0576	0.0734
A_Cd			0.6334	0.3043	0.1537	0.1795
A_As				0.4354	0.2391	0.2222
C_Pb					0.8414	0.8143
C_Cd						0.5309
C_As						

A-D	A_Pb	A_Cd	A_As	D_Pb	D_Cd	D_As
A_Pb		0.9062	0.4755	0.0001	0.4376	0.0418
A_Cd			0.6334	0.0000	0.3839	0.0525
A_As				0.0802	0.1786	0.1337
D_Pb					0.0129	0.3509
D_Cd						0.1254
D_As						

A-E	A_Pb	A_Cd	A_As	E_Pb	E_Cd	E_As
A_Pb		0.9062	0.4755	0.0050	0.0020	0.0370
A_Cd			0.6334	0.0378	0.0005	0.0503
A_As				0.2439	0.0163	0.1184
E_Pb					0.0651	0.1019
E_Cd						0.0036
E_As						

Fig. 6. Correlation analysis of heavy metals (Pb, Cd, and As) in Site A and comparison sites (Site-B, C, D, and E).

각의 연평균 농도값이 0.011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0573 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 전국의 Cd, As 연평균 농도값이 0.0011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.0072 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것에 비해 각각 약 10배, 8배 높았다. 제련소와 대기중금속측정망의 거리가 3 km 이내인 것으로 미루어 보았을 때, Site A에서 상관성이 높게 나온 중금속 그룹(Pb-Cd)이 공정에서 함께 배출되는 물질로, 전국 배경농도와 비교 시 실제 농도값이 매우 높게 기록되는 것은 해당 중금속(Pb, Cd)이 제련소 공정과정에서 배출되며 해당 지역의 대기질에 큰 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 또한, Pb, Cd, As 모두 여름철에 농도가 급격히 낮아지는 현상은 여름철의 강수량 증가로 인한 세정효과가 원인이며, 겨울철에 높은 농도를 기록하는 것은, 겨울철 대기확산능력 감소와 함께 난방 및 산업 가동률 증가에 원인이 있을 것으로 판단된다(Ravan *et al.*, 2022).

3.3.3 지역 간 상관분석

PM_{2.5} 성분측정망 자료를 활용한 조성비 분석 및 농도 비교에서, 제련소 지역의 중금속 농도가 타지역 대비 높게 나타났으며, 그중 Pb, Cd, As가 제련소 지역에서 대표적인 중금속 물질이었다. 해당 중금속들은 제련소의 배출공정과 관련이 있는 것으로 해석되며, 대기중금속측정망 자료에서도 제련소 지역의 대기 중 중금속(Pb, Cd, As) 농도가 전국에 비해 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상이 비교대상 지역(Site-B, C, D, E)과 비교 시에 동일한 양상을 띠는지 그리고 제련소 지역만의 특수한 중금속 거동 특성이 있는지 확인하기 위하여 지역 간 상관분석을 수행하였다. 그림 6에서는 지역 간 농도의 농도 변화의 유사성을 확인하기 위하여, Pb, Cd, As 3개 항목에 대하여 Site A를 기준으로 각 비교대상 지역(Site-B, C, D, E)의 상관성을 분석하였다. Site A 지역 내부의 Cd-Pb 항목 간 결정계수 값이 0.9062이고, Cd-As 항목 간 결정계수 값은 0.6344로, 3종 중금속 간에 유의미한 상관성이 있는 것으로 보인다. 그러나 타지역과 비교 시에는 전체 항목에 대한 결정계수 값이 0.44 이하로, Site A와 각 지역의 중금속(Pb, Cd, As) 거동 특성이 다른 것을 알 수 있다. 이러한 사실을 통해, 제련소 지역의

중금속 농도가 타지역에 비하여 매우 높은 수준이며, 타지역과는 다른 중금속 분포 특성을 지니는 것으로 해석할 수 있다(Awasthi *et al.*, 2017).

4. 결 론

본 연구에서는 제련소 지역의 중금속 농도를 평가하기 위하여 2019년부터 2023년까지 5년간 PM_{2.5} 성분측정망 자료의 중금속(Pb, As, Cd, Zn, Mn, Ni, Cr, Cu, Fe) 농도 자료를 비교 분석하였다. 이와 더불어, 측정망 자료별 중금속 농도 변화의 유사성을 확인하기 위하여 대기중금속측정망 자료를 활용하여 추가적인 분석을 진행하였다. 그 결과, Pb, As 농도는 제련소 지역에서 상대적으로 고농도 특성이 관측되었으며, Pb-Cd의 동반 변동 경향성이 상대적으로 뚜렷한 것을 확인할 수 있었다. 또한 제련소 지역 내 해당 중금속 간의 결정계수가 높은 편이지만, 타지역과의 비교 시 결정계수의 최고값은 0.44 이하로 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 제련소 지역에서 Pb·Cd·As의 상호 거동이 타지역과는 다르다는 것을 의미한다. 현재 제련소 주변의 대기 중 Pb, As, Cd 농도가 뚜렷하게 감소하지 않는 경향으로 볼 때, 제련소 공정에서 배출되는 대기 오염물질을 저감하기 위한 공정별 세부 관리방안과 추가적인 배출 저감대책이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원에서 주최한 제4회 대학(원)생 미세먼지구연구아이디어공모전으로 수행되었습니다(NIER-2025-04-02-007).

References

- Adnan, M., Xiao, B., Ali, M.U., Xiao, P., Zhao, P., Wang, H., Bibi, S. (2024) Heavy metals pollution from smelting activities: A threat to soil and groundwater, *Ecotoxicology*

- and Environmental Safety, 274, 116189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116189>
- Alexeeff, S.E., Liao, N.S., Liu, X., Van Den Eeden, S.K., Sidney, S. (2021) Long-term PM_{2.5} exposure and risks of ischemic heart disease and stroke events: Review and meta-analysis, *Journal of the American Heart Association*, 10, 1-22. <https://doi.org/10.1161/JAHA.120.016890>
- Awasthi, M.K., Liao, R., Ali, A., Mahar, A., Guo, D., Li, R., Xining, S., Awasthi, M.K., Wang, Q., Zhang, Z. (2017) Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soil near a Pb/Zn smelter in Feng County, China, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 139, 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.01.044>
- Baek, K.M., Seo, Y.K., Chung, D.H., Baek, S.O. (2019) Atmospheric Occurrence and Concentrations of PAHs and Heavy Metals in Pohang, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 533-554. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.533>
- Choi, W.J., Jung, B., Lee, D., Kang, H., Kim, H., Hong, H. (2021) An investigation into the effect of emissions from industrial complexes on air quality in the ulsan metropolitan city utilizing trace components in PM_{2.5}, *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21), 1003. <https://doi.org/10.3390/app112110003>
- Corbin, J.C., Mensah, A.A., Pieber, S.M., Orasche, J., Michalke, B., Zanatta, M., Czech, H., Massabo, D., Mennucci, C., Bua-tier de Mongeot, F., El Haddad, I., Kumar, N.K., Stengel, B., Huang, Y., Zimmermann, R., Gysel, M. (2018) Trace Metals in Soot and PM_{2.5} from Heavy-Fuel-Oil Combustion in a Marine Engine, *Environmental Science and Technology*, 52(11), 6714-6722. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01764>
- Fan, M.Y., Zhang, Y.L., Lin, Y.C., Cao, F., Sun, Y., Qiu, Y., Xing, G., Dao, X., Fu, P. (2021) Specific sources of health risks induced by metallic elements in PM_{2.5} during the wintertime in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 246, 118112. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118112>
- Hwang, K., Park, S., Lee, G., Noh, S., Kim, J., Lee, J.Y., Park, J.S., Kim, J.B. (2023) Analysis of Chemical Characteristics of PM_{2.5} by Region in Chungnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 1007-1021. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.1007>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N. (2014) Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals, *Interdisciplinary Toxicology*, 7, 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Jo, Y.-J., Kim, C.-H. (2015) Assessment of Emission Data for Improvement of Air Quality Simulation in Ulsan, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 24, 456-471. <https://doi.org/10.14249/eia.2015.24.5.456>
- Kawichai, S., Bootdee, S., Sillapapiromsuk, S., Janta, R. (2022) Epidemiological Study on Health Risk Assessment of Exposure to PM_{2.5}-Bound Toxic Metals in the Industrial Metropolitan of Rayong, Thailand, *Sustainability (Switzerland)*, 14(22), 15368. <https://doi.org/10.3390/su142215368>
- Kim, Y.D., Eom, S.Y., Yim, D.H., Kim, I.S., Won, H.K., Park, C.H., Kim, G.B., Yu, S.-D., Choi, B.S., Park, J.D., Kim, H. (2016) Environmental exposure to arsenic, lead, and cadmium in people living near Janghang Copper smelter in Korea, *Journal of Korean Medical Science*, 31, 489-496. <https://doi.org/10.3346/jkms.2016.31.4.489>
- Lee, B.K., Lee, C.H. (2008) Analysis of acidic components, heavy metals and PAHS of particulate in the Changwon-Masan area of Korea, *Environmental Monitoring and Assessment*, 136, 21-33. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9721-3>
- Lopez, B., Wang, X., Chen, L.W.A., Ma, T., Mendez-Jimenez, D., Cobb, L.C., Frederickson, C., Fang, T., Hwang, B., Shiraiwa, M., Park, M., Park, K., Yao, Q., Yoon, S., Jung, H. (2023) Metal contents and size distributions of brake and tire wear particles dispersed in the near-road environment, *Science of The Total Environment*, 883, 163561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163561>
- Mbengue, S., Alleman, L.Y., Flament, P. (2017) Metal-bearing fine particle sources in a coastal industrialized environment, *Atmospheric Research*, 183, 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.014>
- Nawrot, N., Wojciechowska, E., Rezanian, S., Walkusz-miotk, J., Pazdro, K. (2020) The effects of urban vehicle traffic on heavy metal contamination in road sweeping waste and bottom sediments of retention tanks, *Science of the Total Environment*, 749, 141511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141511>
- Nirmalkar, J., Lee, K., Ahn, J., Lee, J., Song, M. (2023) Comparisons of Spatial and Temporal Variations in PM_{2.5} - Bound Trace Elements in Urban and Rural Areas of South Korea, and Associated Potential Health Risks, *Atmosphere*, 14(4), 753. <https://doi.org/10.3390/atmos14040753>
- Oh, I.B., Bang, J.H., Kim, Y.H. (2015) Meteorological Characteristics in the Ulsan Metropolitan Region: Focus on Air Temperature and Winds, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31, 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.044>

- org/10.5572/kosae.2015.31.2.181
- Park, S.Y., Jeon, J.I., Jung, J.Y., Yoon, S.W., Kwon, J., Lee, C.M. (2024) PM_{2.5} and heavy metals in urban and agro-industrial areas: Health risk assessment considerations, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 18, 16. <https://doi.org/10.1007/s44273-024-00037-w>
- Ravan, P., Ahmady-Birgani, H., Solomos, S., Yassin, M.F., Abasalin-ezhad, H. (2022) Wet Scavenging in Removing Chemical Compositions and Aerosols: A Case Study Over the Lake Urmia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(6), e2021JD035896. <https://doi.org/10.1029/2021JD035896>
- Valle-Hernández, B.L., Figueroa-Lara, J. de J., Torres-Rodríguez, M., Ginéz-Hernández, N., Álvarez-Lupercio, T., Mugica-Álvarez, V. (2024) Levels, Sources and Risk Assessment of Carbonaceous and Organic Species Associated with PM_{2.5} in Two Small Cities of Morelos, Mexico, *Atmosphere*, 15(12), 1496. <https://doi.org/10.3390/atmos15121496>
- Vinson, A., Sidwell, A., Black, O., Roper, C. (2020) Seasonal Variation in the Chemical Composition and Oxidative Potential of PM_{2.5}, *Atmosphere*, 11(10), 1086. <https://doi.org/10.3390/atmos11101086>
- World Health Organization (WHO) (2021) WHO 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> (accessed on Sep. 22, 2021).
- Xing, W., Yang, H., Ippolito, J.A., Zhao, Q., Zhang, Y., Scheckel, K.G., Li, L. (2020) Atmospheric deposition of arsenic, cadmium, copper, lead, and zinc near an operating and an abandoned lead smelter, *Journal of Environmental Quality*, 49, 1667-1678. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20151>
- Xue, Y., Hao, X., Liu, X., Zhang, N. (2022) Recovery of Zinc and Iron from Steel Mill Dust - An Overview of Available Technologies, *Materials*, 15(12), 4127. <https://doi.org/10.3390/ma15124127>
- Zhang, H., Zhao, Z., Cai, A., Liu, B., Wang, X., Li, R., Wang, Q., Zhao, H. (2022) Source Apportionment of Heavy Metals in Wet Deposition in a Typical Industry City Based on Multiple Models, *Atmosphere*, 13(10), 1716. <https://doi.org/10.3390/atmos13101716>
- Zhang, J., Shen, H., Chen, Y., Meng, J., Li, J., He, J., Guo, P., Dai, R., Zhang, Y., Xu, R., Wang, J., Zheng, S., Lei, T., Shen, G., Wang, C., Ye, J., Zhu, L., Sun, H.Z., Fu, T.M., Yang, X., Guan, D., Tao, S. (2023) Iron and Steel Industry Emissions: A Global Analysis of Trends and Drivers, *Environmental Science and Technology*, 57, 16477-16488. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05474>
- Zhang, X., Eto, Y., Aikawa, M. (2021) Risk assessment and management of PM_{2.5}-bound heavy metals in the urban area of Kitakyushu, Japan, *Science of The Total Environment*, 795, 148748. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148748>

Authors Information

- 정민찬(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 석사과정)
(chana9900@naver.com)
- 천소현(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 학사과정)
(sohyeoncheon75@gmail.com)
- 김나현(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 학사과정)
(vv60666@naver.com)
- 최진수(국립환경과학원 연구사)
(reconjs@korea.kr)
- 성민영(국립환경과학원 전문연구원)
(aweawe81@korea.kr)
- 정지윤(국립환경과학원 전문연구원)
(jyjung1006@korea.kr)
- 손윤석(국립부경대학교 지구환경시스템과학부 교수)
(sonys@pknu.ac.kr)