

연구논문

전남 대기 중 미세먼지 및 중금속 특성 평가 – 산업단지 인접 지역 중심으로

주서령[†] · 박현수 · 김계홍 · 유휘선 · 이보람 · 차윤경 · 위은혜 · 양정고
전라남도보건환경연구원

Evaluation of PM-10 and Heavy Metal Characteristics in the Atmosphere of Jeollanam-do – Focusing on Areas Adjacent to Industrial Complexes

Seo-Ryeong Ju[†], Hyun-Su Park, Kye-Hong Kim, Yu Hwi-Sun, Bo-Ram Lee,
Yoon-Gyeong Cha, Eun-Hye Wi, and Yang Jung-Ko

Jeollanam-do Institute of Health and Environment Research, Muan-gun Samhyang-eup, Jeollanam-do, 58568, Korea

Received March 13, 2025 / Revised April 02, 2025 / Accepted May 02, 2025

This study used monitoring data to analyze the PM-10 heavy metal concentrations in Jeollanam-do from 2022 to 2024. Samples were collected for 24 h over 5 d each month. The annual, seasonal, and site-specific variations in PM-10 and metal concentrations were analyzed, and the main sources and emission characteristics were identified through correlation and factor analyses. The average PM-10 concentration during the study period was $27 \pm 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, while the total heavy metal concentration was $1.99255 \pm 1.87673 \mu\text{g}/\text{m}^3$, accounting for $7.2 \pm 5.0\%$ of the PM-10 concentration. Fe, Ca, Al, and Mg were the dominant heavy metals, accounting for over 80% of the total, and the metals, arranged according to their concentrations, followed the order of $\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd}$. The proportion of heavy metals in PM-10 remained stable over the years. In terms of seasons, the concentrations were the highest in spring, followed by winter, autumn, and then summer. The site-specific analysis showed that the total heavy-metal concentrations were the highest in Daebul, followed by Myodo-dong, Jung-dong, Yulchon-myeon, Sindae-ri, Yecheon-dong, and then Ssangbong-dong. Factor analysis revealed three major sources: (1) soil-origin components (Fe, Ca, Mg, and Al), (2) vehicle emissions and coal combustion (Pb, Cd, and As), and (3) industrial pollution (Cr, Cu, Mn, and Ni). Furthermore, the Fe concentrations varied by site, with Daebul and Myodo-dong strongly influenced by industrial activities, while other sites were more affected by natural factors.

Key words:

1. 서 론

대기 중 미세먼지는 인류 건강과 생태계에 심각한 영향을 미치는 주요 환경 문제 중 하나이다.¹⁾ PM(Particulate matter)은 유기 및 무기 화합물이 혼합된 형태로 주요 구성 요소에는 탄소성분, 이온성분, 원소성분이 포함된다.

대기 중 중금속 농도 분포는 지역적 특성과 환경 요인에 따라 다양하게 나타나며, 크게 자연적 발생원과 인위적 발생원에 의해 배출된다. 주요 발생원으로는 화학공정, 쓰레기 소각, 화석연료 연소, 암석풍화, 산업활동 등이 있다.^{2,3)}

특히 독성이 강한 중금속은 자연적 배출원보다는 인위적인 활동에서 기인하는 비율이 더 크다. 산업단지가 밀

[†]To whom correspondence should be addressed.
Tel: 82-61-240-5377, E-mail: ryeong22@korea.kr

집된 지역에서는 다양한 산업 공정에서 방출되는 입자상 물질로 인해 중금속 농도가 일반적인 대기 환경보다 현저히 높아지는 경향이 있다. 많은 기존 연구에서는 미세먼지에 포함된 유해 중금속이 호흡기 질환과 심혈관 질환과 같은 건강 문제를 유발할 수 있다고 보고하고 있다.^{4,6)}

환경부 국가미세먼지정보센터 CAPSS의 2022년 자료에 따르면, 전라남도의 미세먼지 배출량은 경기도, 경상북도에 이어 전국에서 세 번째로 많다.⁷⁾ 전라남도는 산업 활동, 차량, 해상 운송, 농업 활동 등 다양한 대기오염원의 영향을 받는 지역이다.

지역별 특성에 따른 대기 중 중금속 농도 차이를 제시한 선행연구들이 보고되어 왔다. (Nier., 2016)은 영암군의 공업지역이자 항만 인근에 위치한 용당리와 나블리에서, 대조지점인 독천리와 비교할 때 Cr, Cu, Mn, Zn 등 산업 기원 중금속의 농도가 상대적으로 높게 나타났다고 보고하였다.⁸⁾ 또한 (Jeong et al., 2020)은 경기도 안산시와 시흥시를 대상으로 토지이용 특성에 따라 중금속 농도 차이를 분석한 결과, 교통 밀집 지역의 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb 농도가 주거지역보다 높게 관측되었다고 밝혔다.⁹⁾ 이처럼 산업단지, 항만, 교통 밀집 지역 등 지역 특성에 따라 대기 중 중금속 농도 분포에 차이가 나타날 수 있음을 시사한다.

대기 중 중금속 오염 특성을 규명하기 위한 연구는 광주광역시, 부산광역시, 춘천시 등 다양한 지역을 대상으로 수행되어 왔다.^{4,10-12)} (Jeon et al., 2001)은 부산광역시에서 2000년을 기준으로 도로변과 주거지역을 구분하여, PM-2.5 내 이온 성분 및 금속에 대한 상관분석과 주성분 분석을 통해 미세먼지의 발생 특성을 분석하였다.¹¹⁾ (Byun et al., 2018)은 춘천시에서 2012년부터 2015년까지의 PM-2.5 및 중금속 성분 데이터를 바탕으로 주성분 분석을 수행하여 배출원을 추정하였다.⁴⁾ (Na et al., 2024)는 광주광역시에서 2014년부터 2022년까지의 대기 중금속 데이터를 활용하여 주성분 분석 및 건강 위해성 평가를 수행하였다.¹²⁾ 이러한 선행연구들은 중금속 오염 특성과 주요 배출원 파악에 있어 중요한 기초자료를 제공하고 있다.

전라남도의 경우, (Chae et al., 2020)은 2016~2017년 광양산업단지 인근 지역을 중심으로 중금속의 농도 분포를 분석하였으며, 농축계수(enrichment factor : E.F)와 오염지수(pollution index : P.I)를 이용하여 중금속 오염 수준과 인위적 영향을 평가한 바 있다.¹³⁾ 그러나 최근 데이터를 기반으로 전라남도 전역의 대기 중 중금속 특성을 종합적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 전라남도의 미세먼지 및 중금속 오염 특성을 파악하고 주요 오염 요인을 추정하고자 하였다. 이를 위해 최근 3년간(2022~2024년) 전라남도 7개 대기중금속측정망에서 수집된 데이터를 활용하여 연도별, 계절별, 지점별 농도 특성을 분석하였다. 아울러 중금속 간의 상관관계를 파악하고 주요 오염 요인을 규명하기 위해 상관분석과 인자분석을 수행하였다. 본 연구 결과는 전라남도 대기환경 관리 및 오염 저감 대책 수립을 위한 과학적 근거로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 시료채취

본 연구에서는 전라남도 내 PM-10에 포함된 중금속 농도 특성을 파악하기 위해 2022년부터 2024년까지 대기중금속측정망 데이터를 활용하였다. 대기중금속측정망은 정기측정과 황사 시 추가측정으로 구분하여 운영되며, 본 연구에서는 국외 유입 요인의 영향을 최소화하고자 황사 시 측정자료를 제외한 정기측정 자료만을 분석에 활용하였다. 사용된 데이터는 대기오염정보관리시스템(National Ambient airMonitoring Information System, NAMIS)의 1차 확정자료이다.

2024년 기준 전라남도 내 대기중금속측정망은 총 8개 지점으로 목포시 연산동, 여수시 여천동·쌍봉동·울촌면·묘도동, 순천시 신대리, 광양시 중동, 영암군 대불 측정소가 존재한다. 이 중 2024년 2월에 신설된 연산동 측정소를 제외한 7개 지점의 데이터를 분석 대상으로 선정하였으며, 각 지점 위치는 Fig. 1에 나타내었다. Table 1에 지점별 샘플러 및 시료 개수를 나타내었다. 묘도동에서는 2024년 4월에, 신대리에서는 2022년 9월 5일, 2023년 4월 15일, 2023년 9월, 2024년 6월 13일부터 14일, 2024년 7월 8일부터 9일, 2024년 11월에, 중동에서는 2024년 2월 5일, 5월 7일, 5월 10일, 10월 10일부터 11일, 12월 13일에 유량 오류, 모터 과부하, 기기 고장 등의 사유로 샘플링이 중단되었다.

연구 대상 인근 지역에는 다양한 산업단지가 위치하며, 이는 대기 중 중금속의 주요 배출원으로 작용할 가능성이 크다. 여수국가산업단지는 국내 최대 규모의 석유화학 산업단지로서 석유화학 및 정유 산업을 기반으로 조선, 기계, 에너지 관련 산업이 함께 발전해 있다. 광양제철소는 철강 생산을 중심으로 금속 가공, 운송장비 제조, 비금속 광물 제조업 등이 활발한 산업단지이다. 대불국가산업단지는 조선 기자재 생산업체가 밀집해 있으며 약 76%의



Fig. 1. Location of the sampling sites (source: Google Earth).

Table 1. Sampling sites

Local	Site	Sampler	Filter Size	n
Yeosu-si	Yeocheon-dong(Y1)	DHA-80	∅ 15 cm	180
	Ssangbong-dong(Y2)	DHA-80	∅ 15 cm	180
	Yulchon-myeon(Y3)	DHA-80	∅ 15 cm	180
	Myodo-dong(Y4)	DHA-80	∅ 15 cm	175
Suncheon-si	Sindae-ri(SD)	DHA-80	∅ 15 cm	159
Gwangyang-si	Jung-dong(JD)	DHA-80	∅ 15 cm	173
Yeongam-gun	Daebul(DB)	Hivol 3000	80 × 10 cm	180

기업이 조선 산업과 관련된 생산을 담당하고 있다. 이 외에도 자동차, 기계, 제강, 석유화학 등 다양한 업종이 분포하고 있다. 울촌산업단지는 여수시와 순천시 경계에 위치하며 석유화학, 금속 가공, 기계 장비 제조업 등이 입주해있다.

시료채취는 매월 둘째 주 5일간 High Volume Air Sampler (DHA-80, DIGITEL Co, Switzerland / Hivol 3000, ECOTECH Co, Australia)를 사용하여 Quartz Fiber Filter (TISSUQUARTZ-2500QAT-UP, PALL Co, USA, ∅15cm, 80×10cm)에 흡입 유량은 1.2 m³/min ~ 1.7 m³/min 조건으로 24시간 동안 이루어졌다. 세부적인 측정 및 분석방법은 대기환경측정망 설치·운영 지침에 따라 수행하였다.¹⁴⁾

2.2. 분석방법

PM-10 질량농도는 Quartz 여지를 시료 채취 전후로 24시간 동안 데시케이터 내에서 항온·항습 조건으로 안정

화한 뒤, 전자저울을 이용하여 여지의 무게 차이를 측정하여 산출하였다. 중금속 분석을 위한 전처리 방법으로 「대기오염공정시험기준」 마이크로파 산분해법(ES 01102.a)을 사용하였다. 전처리가 끝난 시료는 ICP-OES(Perkin-Elmer, Optima 8300, USA)로 중금속 항목 12종(Pb, Cr, Fe, Cd, Cu, Mn, Ni, Be, Ca, Mg, Al, As)을 분석하였다.

대기 중금속 분석 결과에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 매년 정도관리를 실시하였으며, 이 중 2024년 결과를 예시로 Table 2에 제시하였다. 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL), 정량한계Limit of Quantitation (LOQ), 정확도 및 정밀도 평가는 국립환경과학원에서 제시한 QA/QC 핸드북을 기반으로 수행하였다. 방법검출한계 및 정량한계는 「대기오염공정시험기준」을 준용하여 산정하였으며, Ca, Mg, Al, Mn에 대해서는 대기환경측정망 설치·운영지침(2024)에 따라 EPA IO METHOD에서 제시한 검출한계를 적용하였다. 방법검출한계 및 정량한계는 7번 반복 측정하여 산정하였으며, 정확도 및 정밀

Table 2. Quality-control results for ambient-air metals (example: 2024) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Test Concentration for MDL/LOQ	Method Detection Limit (MDL)	Limit of Quantitation (LOQ)	Accuracy (%)	Precision (%)	Calibration Curve Verification(%)
Pb	0.10	0.00812	0.026	96.4%	1.1%	-4.7%
Cr	0.02	0.000689	0.002	106.4%	0.5%	1.7%
Fe	0.10	0.00141	0.004	95.2%	0.4%	0.5%
Cd	0.01	0.000919	0.003	97.9%	0.2%	-4.5%
Cu	0.04	0.000864	0.003	108.9%	0.7%	1.9%
Mn	0.04	0.000769	0.002	98.0%	0.2%	-5.9%
Be	0.01	0.000153	0.0005	102.0%	0.4%	-3.7%
Ni	0.04	0.00124	0.004	102.6%	0.3%	-1.3%
Ca	0.20	0.00377	0.012	89.2%	0.2%	-6.9%
Mg	0.10	0.000845	0.003	97.1%	0.6%	-0.5%
Al	0.10	0.00479	0.015	91.6%	1.3%	-5.0%
As	0.02	0.0114	0.036	103.2%	2.1%	-3.9%

도 평가는 4회 반복 측정하였다. 그 결과, 모든 항목의 방법검출한계 및 정량한계는 관련 기준에 적합하였다. 정밀도는 0.2~2.1%로 10% 이내였으며, 정확도는 89.2~108.9%로 확인되었다. 또한 검정곡선의 직선성 평가 결과, 모든 항목에서 상관계수(R^2)가 0.999 이상으로 나타나 분석 결과의 신뢰성이 충분히 확보되었음을 나타낸다.

2.3. 기상조건

기상자료는 기상청의 방재기상관측(AWS) 자료를 활용하였다.¹⁵⁾ 전라남도의 연평균 기온은 2022년에 14.2°C, 2023년에 14.7°C, 2024년에 15.6°C로 점진적인 상승 경향을 보였다. 연강수량은 각각 896.7 mm, 1,792.4 mm, 1,666.8 mm로, 2022년에 상대적으로 적었으며 이후 증가하는 양상을 보였다. 평균 습도는 각각 79%, 81%, 79%였으며, 평균 풍속은 2.6 m/s, 2.4 m/s, 2.5 m/s로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PM-10 및 중금속 농도 특성

3.1.1. 연도별 미세먼지 및 중금속 농도

연구기간 동안 PM-10의 평균 농도는 $27 \pm 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속 총량은 $1.99255 \pm 1.87673 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM-10의 7.2±5.0%를 차지하는 것으로 나타났다. 연도별 미세먼지 및 중금속 평균 농도는 Table 3에 제시하였다. 중금속 구성 비율을 분석한 결과, Fe, Ca, Al, Mg가 총 중금속의 80% 이상을 차지하며 주요 구성 성분으로 확인되었으며 (Fig 2), 이는 주로 자연적 발생원에서 기인한 것으로 나타난다. 이는 인위적 발생원에서 유래한 중금속에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였다.¹⁶⁾ 한편, 미량 검출된 중금속 중에서는 Mn의 농도가 가장 높았고, 그다음으로

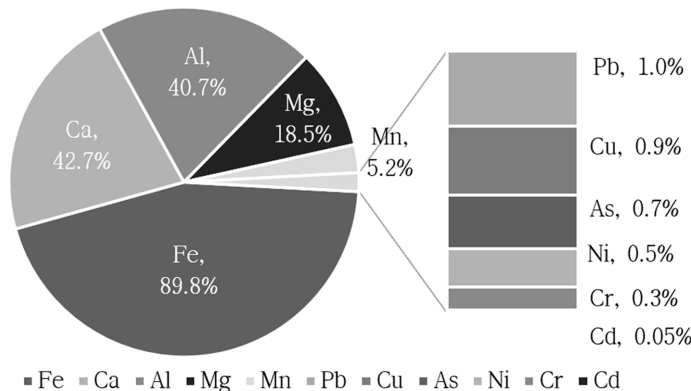


Fig. 2. Relative compositions of heavy metals(2022~2024).

Table 3. Annual variations in PM-10 and heavy metal concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Year	PM-10	Heavy metals ratio	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As	
2022	Mean	29	6.3	0.00864	0.00308	0.85340	0.00044	0.00909	0.04795	0.00493	0.42688	0.16616	0.35432	0.00188
	SD	19	3.6	0.00647	0.00274	1.05622	0.00042	0.00855	0.09443	0.00803	0.35588	0.08960	0.30017	0.00265
2023	Mean	28	8.3	0.00990	0.00359	0.99853	0.00047	0.01019	0.05449	0.00586	0.49115	0.22841	0.54739	0.00313
	SD	20	4.5	0.00820	0.00363	1.10203	0.00040	0.00970	0.10039	0.00803	0.46857	0.21662	0.69573	0.00419
2024	Mean	25	7.0	0.01135	0.00246	0.84067	0.00046	0.00803	0.05326	0.00411	0.36010	0.15045	0.30957	0.00409
	SD	11	5.0	0.00960	0.00189	1.01776	0.00035	0.00747	0.10523	0.00431	0.26669	0.09007	0.22247	0.00638
Aver	Mean	27	7.2	0.00994	0.00305	0.89764	0.00046	0.00911	0.05186	0.00497	0.42659	0.18180	0.40412	0.00301
	SD	17	5.0	0.00824	0.00289	1.06109	0.00039	0.00867	0.09999	0.00707	0.37705	0.14871	0.46742	0.00472

Pb>Cu>Ni>Cr>As>Cd 순으로 분포하였다. 현재 대기 중 중금속 항목 중에서는 Pb만이 대기환경기준물질로 지정되어 있으며, 본 연구에서 측정된 Pb 농도는 $0.00994 \pm 0.00824 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 국내 대기환경기준 연평균($0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 2.0% 수준에 해당하였다. 또한 Be의 경우 전체 1,227개 시료 중 1,154개의 시료에서 검출되지 않았다.

2022년부터 2024년까지 3년간 미세먼지 농도는 감소하는 경향을 보였으며, 미세먼지 대비 중금속 총량은 2022년 $6.3 \pm 3.6\%$, 2023년 $8.3 \pm 4.5\%$, 2024년 $7.0 \pm 5.0\%$ 로 나타났다. 연도별 중금속 비율에 대한 분산분석(ANOVA) 결과, 통계적으로 유의미한 차이가 확인되었으나($F = 12.04$, $p < 0.001$), 평균 제곱값(Mean Sq = 41.67)과 잔차(Residual Mean Sq = 3.46)를 고려할 때 실질적인 차이는 크지 않은 것으로 해석된다. 대부분의 중금속은 연도별 농도 변화가 크지 않았지만, Pb와 As는 증가하는 경향을 보였다.

한편, 2023년은 Fe, Ca, Mg, Al 등 지각 성분 농도가 다른 해보다 다소 높게 나타났다. 이는 본 연구에서 정기 측정 자료만을 활용하였음에도 일부 시기가 황사 발생일과 근접하여 황사의 영향을 받았을 가능성이 있다. 대기환경측정망 설치-운영지침에 따라 전라남도 지역의 황사 관측 기준은 목포 기상관측소를 기준으로 하며, 해당 기준에 따라 2022년 3월 5일, 2023년 1월 7일~8일, 2023년 4월 12일~13일에 발생한 황사는 정기 측정 기간과 근접하여 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

이러한 결과는 미세먼지 농도가 감소하더라도 중금속 비율은 유지되고 있음을 시사하며, 이는 지역 내 산업적 배출원이나 기타 지속적인 오염원이 영향을 미치고 있음을 의미한다. 따라서 향후 미세먼지 저감 정책과 더불어 중금속 배출 원인에 대한 구체적인 관리와 장기적인 모니터링이 병행되어야 할 필요가 있다.

3.1.2. 전라남도 및 전국 중금속 농도 비교

국립환경과학원 「2023 대기환경연보」의 자료를 바탕으로, 2022년 및 2023년의 전라남도와 전국(대기중금속 측정망 77개소, 2023년 12월 말 기준) 평균 중금속 농도를 비교하여 Fig. 3에 제시하였다.¹⁷⁾ 전라남도에서는 Fe, Ca, Mg, Al 등 지각 기원 중금속의 농도가 전국 평균보다 상대적으로 높게 나타났다. 반면, Pb, Cd, As 등 인위적 배출원에서 유래한 중금속은 전국 평균이 더 높은 경향을 보였다.

3.1.3. 계절별 PM-10 및 중금속 농도 특성

계절별 PM-10 및 중금속 농도 특성을 분석하기 위해 봄(3~5월, $n=307$), 여름(6~8월, $n=306$), 가을(9~11월, $n=302$), 겨울(12~2월, $n=312$)로 구분하여 Fig. 4에 나타내었다. 미세먼지는 봄($39 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 겨울($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을($21 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름($19 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났으며 총 중금속 평균 농도 또한 봄($2.95665 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 겨울($1.95586 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 가을($1.74240 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 여름($1.02322 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났다. 한편, 미세먼지 대비 중금속 총량은 가을($8.2 \pm 5.9\%$), 겨울($7.8 \pm 5.6\%$), 봄($7.4 \pm 3.9\%$), 여름($5.4 \pm 3.4\%$) 순으로, 중금속 농도와는 다소 다른 양상을 보였다. 이는 봄철 중금속 농도가 가장 높았음에도 불구하고, 미세먼지 총량이 많아 전체 중금속 비율은 상대적으로 낮아진 것으로 해석된다. 반면, 가을은 중금속 농도가 겨울과 유사한 수준임에도 불구하고, 미세먼지 농도가 낮아 중금속 비율이 높게 나타난 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 계절에 따라 미세먼지 내 중금속의 상대적 구성 특성이 달라질 수 있음을 시사한다.

봄철 Fe($1.16246 \pm 1.03774 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Ca($0.66094 \pm 0.47837 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Mg($0.28647 \pm 0.21582 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Al($0.75589 \pm 0.72288 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 농도는 여름철 대비 2.6, 3.0, 2.3, 4.0배 높게 나타났다. 이들은 주로 지각을 구성하는 중금속으로

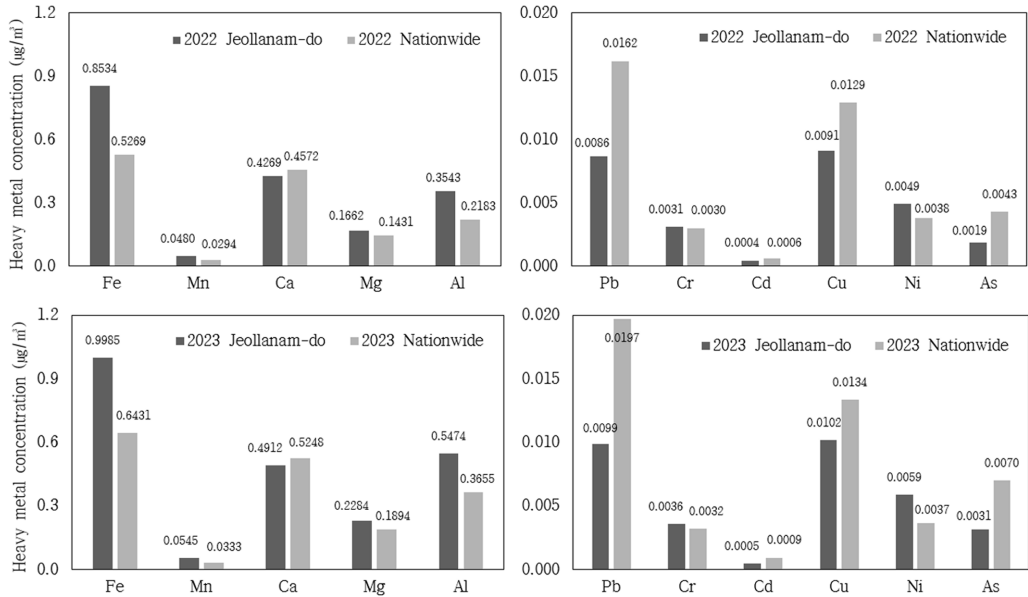


Fig. 3. Yearly mean heavy metal concentrations in Jeollanam-do and nationwide.

봄철 황사의 영향으로 인해 농도가 증가한 것으로 판단된다. 겨울철에는 난방 연료 사용 증가와 대기 정체로 인해 PM-10 농도가 상승하였고,¹⁸⁾ 특히 Pb, Cu, Mn, As가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 석탄, 석유, 나무 등 난방 연료 연소 과정에서 배출되는 중금속이 대기 중에 축적된 결과로 해석된다. 특히 석탄은 Pb와 As를 다량 함유하고 있어, 겨울철 난방기기 사용 시 이들 중금속의 농도가 더욱 높아지는 경향을 보인다.^{19,20)} 또한 겨울철은 북서풍의 계열의 대기 흐름이 우세하여, 국외 지역으로부터 수송된 미세먼지 및 중금속의 영향이 일부 반영되었을 가능성도 있다. 여름철은 잦은 강수와 높은 습도로 인해 대기 중 입자상 물질이 침강하면서 미세먼지 및 중금속 농도가 전반적으로 감소하는 경향을 보였다. 가을철부터 미세먼지 농도가 서서히 증가하기 시작하였다. Pb와 As를 제외한 모든 중금속 항목의 평균 농도는 봄철이 가을철보다 높게 나타난 반면, Pb와 As는 가을철($0.01126 \pm 0.00917 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.00365 \pm 0.00491 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 봄철($0.01035 \pm 0.00633 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.00258 \pm 0.00372 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높은 값을 보였다. 이는 가을철 난방 연료 사용 증가로 인해 중금속이 대기 중에 축적된 결과로 해석된다. 또한 가을철은 산업 활동과 농업 작업이 활발해지는 시기로, 이 과정에서 배출된 중금속이 농도 상승에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.^{21,22)}

3.1.4. 지점별 PM-10 및 중금속 농도

7개 지점에서 미세먼지와 중금속 간의 상관관계를 분

석한 결과, R²값이 0.5 이상으로 미세먼지 농도가 증가할 수록 중금속 농도도 함께 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 각 지점별 미세먼지 및 중금속 평균농도를 Table 4에 제시하였다. 지점별 PM-10 농도를 비교한 결과, 대불($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$)·묘도동($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 신대리($28 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 중동($27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 울촌면($26 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여천동($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 쌍봉동($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높았다. 중금속 총량은 대불($3.63881 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 묘도동($2.79292 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 중동($1.74614 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 울촌면($1.53764 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 신대리($1.47775 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여천동($1.42390 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 쌍봉동($1.28330 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타났다. 미세먼지 대비 중금속 총량은 대불($13.2 \pm 7.9\%$), 묘도동($8.6 \pm 4.0\%$), 중동($6.6 \pm 3.1\%$), 울촌면($5.8 \pm 2.6\%$), 여천동($5.7 \pm 3.7\%$), 쌍봉동($5.1 \pm 2.1\%$)·신대리($5.1 \pm 2.1\%$) 순으로 나타났다. 특히, 대불과 묘도동은 미세먼지 농도뿐만 아니라 중금속 농도 또한 높게 나타났으며, 미세먼지 내 중금속 함유 비율 또한 상대적으로 높았다. 이는 두 지점 인근에 위치한 산업활동의 영향으로 해석된다. 반면 쌍봉동과 신대리 등은 미세먼지 농도는 유사한 수준이나 중금속 농도가 낮아, 미세먼지 대비 중금속 비율도 낮게 나타났다. 이는 해당 지역에서 산업 활동의 영향이 적고, 자연 기원 성분의 비중이 커서 미세먼지 내 중금속 함량이 상대적으로 낮게 나타난 결과로 판단된다. 쌍봉동은 대부분의 중금속 농도가 낮고 변동이 적은 편으로 나타났다. Pb, Cr, Fe, Cd, Cu, Mn, Ca, Al의 농도가 7개 지점 중 가장 낮았으며, Ni, Mg, As도 상대적

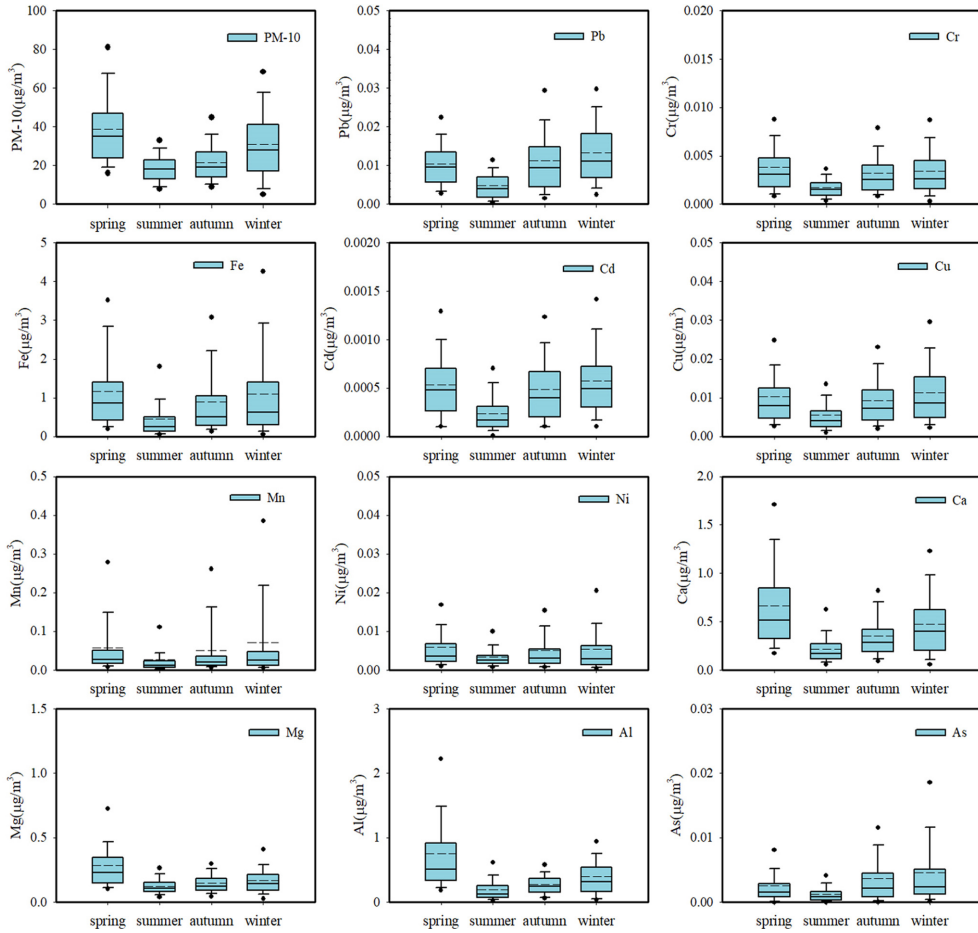


Fig. 4. Seasonal variations in PM-10 and heavy metal concentrations.

로 낮은 수준을 보였다. 특히, Fe, Mn, Cr 농도가 낮게 측정된 점은 주요 산업 배출원의 영향이 적은 지역적 특성을 반영하는 것으로 보인다. 이는 해당 측정소가 주거 지역인 쌍봉동 주민센터에 위치하고 있어 주변에 대규모 산업 배출원이 존재하지 않으며 생활 배출원이 있더라도 대기 중 중금속 농도 증가에 미치는 영향이 크지 않음을 시사한다. 그 외 중동, 울촌면, 신대리, 여천동 지점도 쌍봉동과 유사한 중금속 농도를 보였다.

대불은 중금속의 총량이 $3.63881 \pm 2.49801 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 7개 지점 중 가장 높으며 변동성도 컸다. 또한 미세먼지 중 중금속이 차지하는 비율이 13.2%로 가장 높게 나타났다. 특히 $\text{Fe}(2.14042 \pm 1.60608 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ 와 $\text{Mn}(0.21622 \pm 0.18425 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ 의 농도가 쌍봉동에 비해 5.1배, 13.3배 높게 나타났다. 이 외에도 Pb, Cr, Cd, As 등의 농도가 다른 지점보다 높은 농도를 보였다. 이는 대불산업단지 내 중공업 및 제조업 활동의 강한 영향을 받은 것으로 해석

되며 산업 배출원이 중금속 농도 증가에 기여한 주요 요인으로 판단된다.

묘도동의 미세먼지 중 중금속 비율은 8.6%로 대불에 이어 높은 값을 보였다. 특히 $\text{Fe}(1.40463 \pm 1.21186 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ 와 $\text{Ni}(0.01236 \pm 0.01392 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ 농도는 쌍봉동에 비해 3.4배, 4.3배 높은 것으로 나타났으며, Pb, Cd, Ca 농도 또한 상대적으로 높았다. 이는 묘도동 지점 인근에 위치한 광양국가산업단지과 광양제철소 등의 산업 배출원의 영향을 받은 것으로 판단된다. 이 외에도 여수국가산업단지과 울촌산업단지 등 동부권에 분포한 대규모 배출원의 영향이 미쳤을 가능성도 고려된다.

묘도동 지점이 산업활동의 영향을 크게 받았다는 본 연구 결과는 (Chae et al., 2020)의 연구 결과와 일치하였다. 해당 연구에서는 농축계수를 활용해 중금속 항목별 인위적 영향을 평가하였으며, 농축계수는 특정 원소의 조성을 기준 원소와 비교하여 자연적 또는 인위적 기원을 추정

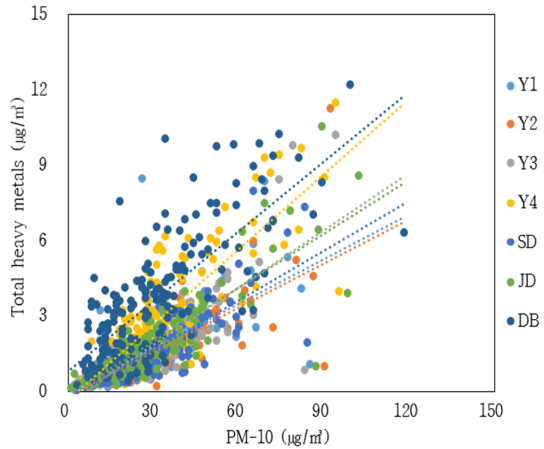


Fig. 5. Correlation between PM-10 and heavy metals.

하는 지표이다. 해당 연구에서는 농축계수 값이 1에 가까울수록 자연적 기원이 우세하며, 10 이상일 경우 인위적 배출원의 영향이 큰 것으로 간주하였다. (Chae et al., 2020)는 Fe를 기준 원소로 설정하여 분석한 결과, 묘도동 지점에서 As, Cd, Ni, Pb, Zn의 평균 농축계수가 10 이상, 특히 As, Cd, Zn은 100 이상으로 나타나 산업 활동의 영향을 받은 것으로 해석한 바 있다.¹³⁾ 본 연구의 중금속 농도 분포 또한 이와 유사한 양상을 보여, 묘도동 지점은 산업 배출원의 영향이 뚜렷하게 나타났음을 시사한다.

3.2. PM-10 및 중금속 통계분석

3.2.1. 상관분석

미세먼지 및 중금속 성분 간 상관관계를 분석하기 위

해 Rstudio 통계 프로그램을 이용하여 Pearson 상관분석을 실시하였으며 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 12개 중금속 항목 중 Be는 대부분의 시료에서 검출되지 않아 통계 분석에서 제외하였다.

전남 전체를 살펴보면 미세먼지와 Ca의 상관계수가 0.80으로 가장 높게 나타났으며, Al(0.72), Mg(0.68) 또한 높은 상관관계를 보였다. 이들은 중금속 총량의 주요 성분들로 주로 지각 성분과 관련된 자연적 발생원에서 기인하며, 토양비산먼지가 발생할 경우 미세먼지와 중금속 농도가 동시에 증가하는 경향을 나타낸다. As는 모든 지점에서 Pb, Cd를 제외한 모든 중금속 항목들과 낮은 상관계수를 보였으며 이는 As, Pb, Cd가 공통 배출원을 가질 가능성을 시사한다.

쌍봉동에서는 Fe-Mn(0.93), Ca-Al(0.89), Mg-Al(0.89), Fe-Ca(0.89), Fe-Al(0.89), Cr-Mn(0.85), Mn-Al(0.83), Mn-Ca(0.82) 등 주로 자연적 발생원에 기인한 중금속들이 높은 상관성을 보였다. 마찬가지로 여천동, 울촌면, 신대리, 중동에서도 주로 지각 성분들이 높은 상관성을 나타냈다.

반면, 묘도동에서는 Mg-Al(0.92), Fe-Ca(0.88), Mn-Ca(0.82), Cd-Ni(0.81), Ca-Mg(0.79), Cr-Ni(0.77), Pb-Cd(0.76), Fe-Mn(0.76)에서 높은 상관성을 보였다. Cd-Ni, Cr-Ni, Pb-Cd, Fe-Mn은 금속 제련소, 화학연료 연소, 폐기물 소각, 제철 및 비철금속 제련에서 함께 배출되는 것으로 알려져 있다. 이는 인근에 위치한 제철소의 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한 Cu는 다른 중금속 항목들과의 상관성이 0.3 이하로 낮게 나타났다. 이는 묘도동에서 발생한 Cu가 독립적인 배출원에 의해 유입되었을 가

Table 4. PM-10 and heavy metal concentrations by site

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Site		PM-10	Heavy metals ratio	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As
Y1	Mean	25	5.7	0.00855	0.00285	0.50370	0.00038	0.00893	0.01701	0.00361	0.35053	0.15558	0.37028	0.00246
	SD	15	3.7	0.00664	0.00278	0.46500	0.00029	0.00709	0.01541	0.00537	0.32757	0.12856	0.42067	0.00327
Y2	Mean	25	5.1	0.00792	0.00235	0.41926	0.00034	0.00650	0.01631	0.00291	0.31712	0.16308	0.34499	0.00252
	SD	17	2.1	0.00624	0.00177	0.42521	0.00027	0.00474	0.01548	0.00269	0.27141	0.13303	0.43645	0.00378
Y3	Mean	26	5.8	0.00977	0.00292	0.59331	0.00040	0.00658	0.02712	0.00395	0.35121	0.15126	0.38849	0.00264
	SD	16	2.6	0.00972	0.00329	0.54370	0.00030	0.00455	0.02691	0.00432	0.33425	0.14688	0.47889	0.00372
Y4	Mean	31	8.6	0.01292	0.00355	1.40463	0.00069	0.00770	0.02898	0.01236	0.66027	0.21692	0.44212	0.00277
	SD	17	4.0	0.00866	0.00239	1.21186	0.00058	0.00708	0.01934	0.01392	0.48646	0.14915	0.46221	0.00391
SD	Mean	28	5.1	0.00905	0.00237	0.52375	0.00036	0.00740	0.02603	0.00272	0.35376	0.15513	0.39428	0.00291
	SD	16	2.1	0.00645	0.00164	0.44426	0.00024	0.00522	0.02532	0.00246	0.31047	0.12083	0.42643	0.00422
JD	Mean	27	6.6	0.00870	0.00278	0.65961	0.00038	0.01278	0.02672	0.00369	0.46471	0.17986	0.38440	0.00251
	SD	18	3.1	0.00649	0.00321	0.62465	0.00028	0.01312	0.02062	0.00355	0.37551	0.14658	0.44774	0.00267
DB	Mean	31	13.2	0.01262	0.00444	2.14042	0.00064	0.01377	0.21622	0.00546	0.48800	0.24854	0.50344	0.00525
	SD	20	7.9	0.01062	0.00378	1.60608	0.00046	0.01140	0.18425	0.00385	0.37886	0.17949	0.56753	0.00838

Table 5. Correlation coefficients of heavy metal concentrations from PM-10

All	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As	Y1	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As
PM10	1												PM10	1											
Pb	0.50	1											Pb	0.57	1										
Cr	0.56	0.45	1										Cr	0.56	0.48	1									
Fe	0.58	0.55	0.65	1									Fe	0.70	0.51	0.77	1								
Cd	0.59	0.74	0.55	0.71	1								Cd	0.58	0.75	0.47	0.47	1							
Cu	0.44	0.40	0.46	0.46	0.40	1							Cu	0.56	0.55	0.74	0.66	0.48	1						
Mn	0.31	0.34	0.44	0.78	0.46	0.42	1						Mn	0.70	0.50	0.84	0.93	0.48	0.67	1					
Ni	0.41	0.39	0.59	0.55	0.65	0.22	0.21	1					Ni	0.38	0.29	0.87	0.58	0.37	0.50	0.69	1				
Ca	0.80	0.45	0.60	0.69	0.58	0.36	0.29	0.54	1				Ca	0.68	0.39	0.55	0.79	0.40	0.46	0.74	0.38	1			
Mg	0.68	0.26	0.50	0.53	0.36	0.25	0.28	0.29	0.81	1			Mg	0.57	0.24	0.39	0.72	0.28	0.26	0.66	0.21	0.75	1		
Al	0.72	0.28	0.52	0.51	0.32	0.30	0.24	0.25	0.81	0.89	1		Al	0.63	0.37	0.49	0.83	0.32	0.38	0.77	0.24	0.81	0.90	1	
As	0.16	0.71	0.19	0.29	0.41	0.22	0.29	0.06	0.10	0.08	0.08	1	As	0.20	0.75	0.20	0.16	0.51	0.27	0.19	0.05	0.11	0.06	0.13	1
Y2	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As	Y3	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As
PM10	1												PM10	1											
Pb	0.48	1											Pb	0.37	1										
Cr	0.69	0.45	1										Cr	0.50	0.26	1									
Fe	0.77	0.46	0.83	1									Fe	0.76	0.36	0.65	1								
Cd	0.50	0.79	0.50	0.46	1								Cd	0.64	0.54	0.48	0.68	1							
Cu	0.66	0.58	0.80	0.77	0.59	1							Cu	0.46	0.42	0.55	0.67	0.65	1						
Mn	0.73	0.43	0.85	0.93	0.46	0.75	1						Mn	0.55	0.35	0.62	0.78	0.60	0.70	1					
Ni	0.48	0.33	0.79	0.63	0.46	0.70	0.67	1					Ni	0.43	0.24	0.90	0.63	0.54	0.57	0.67	1				
Ca	0.84	0.42	0.70	0.89	0.41	0.63	0.82	0.45	1				Ca	0.85	0.30	0.57	0.89	0.58	0.45	0.62	0.49	1			
Mg	0.66	0.20	0.56	0.75	0.27	0.35	0.71	0.29	0.80	1			Mg	0.72	0.18	0.50	0.78	0.43	0.29	0.49	0.36	0.89	1		
Al	0.71	0.31	0.64	0.89	0.31	0.49	0.83	0.33	0.89	0.89	1		Al	0.74	0.20	0.53	0.81	0.42	0.33	0.51	0.37	0.90	0.95	1	
As	0.13	0.80	0.13	0.13	0.53	0.22	0.13	0.05	0.12	0.02	0.08	1	As	0.13	0.65	0.04	0.08	0.35	0.19	0.04	0.00	0.06	0.02	0.03	1
Y4	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As	SD	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As
PM10	1												PM10	1											
Pb	0.54	1											Pb	0.53	1										
Cr	0.67	0.65	1										Cr	0.69	0.33	1									
Fe	0.67	0.70	0.75	1									Fe	0.78	0.40	0.84	1								
Cd	0.63	0.76	0.73	0.76	1								Cd	0.68	0.75	0.50	0.62	1							
Cu	0.26	0.21	0.15	0.11	0.10	1							Cu	0.62	0.44	0.72	0.81	0.61	1						
Mn	0.75	0.61	0.70	0.76	0.64	0.26	1						Mn	0.54	0.22	0.68	0.70	0.41	0.67	1					
Ni	0.56	0.56	0.77	0.66	0.81	0.04	0.55	1					Ni	0.47	0.22	0.74	0.73	0.49	0.74	0.73	1				
Ca	0.84	0.61	0.75	0.88	0.69	0.16	0.82	0.63	1				Ca	0.83	0.39	0.74	0.87	0.55	0.61	0.51	0.48	1			
Mg	0.75	0.30	0.56	0.55	0.39	0.08	0.65	0.36	0.79	1			Mg	0.72	0.27	0.62	0.75	0.44	0.41	0.43	0.36	0.89	1		
Al	0.73	0.23	0.50	0.45	0.27	0.16	0.62	0.27	0.72	0.92	1		Al	0.76	0.32	0.68	0.84	0.43	0.51	0.45	0.38	0.91	0.90	1	
As	0.11	0.52	0.06	0.05	0.13	0.19	0.19	-0.01	0.05	0.01	0.03	1	As	0.12	0.77	-0.04	0.03	0.39	0.08	-0.05	-0.08	0.04	0.03	0.05	1
JD	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As	DB	PM10	Pb	Cr	Fe	Cd	Cu	Mn	Ni	Ca	Mg	Al	As
PM10	1												PM10	1											
Pb	0.63	1											Pb	0.45	1										
Cr	0.60	0.33	1										Cr	0.47	0.50	1									
Fe	0.82	0.56	0.72	1									Fe	0.61	0.62	0.66	1								
Cd	0.68	0.82	0.40	0.63	1								Cd	0.58	0.82	0.60	0.81	1							
Cu	0.48	0.47	0.30	0.46	0.48	1							Cu	0.43	0.47	0.48	0.56	0.54	1						
Mn	0.70	0.47	0.64	0.79	0.57	0.51	1						Mn	0.45	0.51	0.56	0.89	0.73	0.52	1					
Ni	0.57	0.43	0.61	0.70	0.57	0.43	0.63	1					Ni	0.49	0.44	0.78	0.70	0.57	0.50	0.66	1				
Ca	0.87	0.52	0.70	0.91	0.58	0.41	0.76	0.59	1				Ca	0.81	0.36	0.49	0.62	0.49	0.34	0.45	0.42	1			
Mg	0.71	0.35	0.71	0.73	0.39	0.29	0.59	0.43	0.85	1			Mg	0.62	0.14	0.28	0.33	0.20	0.15	0.18	0.22	0.81	1		
Al	0.76	0.39	0.76	0.82	0.40	0.37	0.67	0.49	0.88	0.92	1		Al	0.70	0.22	0.33	0.43	0.27	0.19	0.23	0.28	0.88	0.86	1	
As	0.24	0.71	0.07	0.10	0.55	0.25	0.09	0.12	0.11	0.09	0.08	1	As	0.18	0.84	0.32	0.40	0.57	0.22	0.30	0.29	0.15	0.06	0.07	1

능성을 시사한다.

대불에서는 Fe-Mn(0.89), Ca-Al(0.88), Mg-Al(0.86), Pb-As(0.84), Pb-Cd(0.82), Fe-Cd(0.81), Ca-Mg(0.81) 등 다양한 산업단지 배출 물질들이 높은 상관성을 보였다. 이들은 동일한 오염원에서 기인했을 가능성을 시사하며, 특히 Pb-As, Pb-Cd, Fe-Cd는 주로 금속 제련, 화석연료 연소, 제철 공정 등에서 배출되는 것으로 알려져 있다.

묘도동과 대불을 제외한 모든 지점에서 Fe는 Mn, Ca, Mg, Al 등 지각 성분과 0.7 이상의 높은 상관성을 보였다. 반면, 묘도동과 대불 지점의 Fe는 Mg와 Al과의 상관관계가 0.33~0.55로 비교적 낮았으나, Pb, Cr, Cd, Mn, Ni 등 산업 관련 원소들과는 0.7 이상의 높은 상관성을 나타냈다. 일반적으로 Fe는 암석의 풍화와 같은 자연적 토양 기원뿐만 아니라 석탄 및 중유의 연소, 산화철의 비산 등 인위적 오염원에서도 유래하는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 이러한 특성을 고려할 때, 묘도동과 대불 지점에서의 Fe는 자연적 요인뿐만 아니라 산업적 영향도 함께 받은 것으로 판단된다. 따라서 Fe 농도의 증가 원인을 보다 명확히 규명하기 위해서는 자연적 기여도와 인위적 기여도를 구분하는 심층적인 분석이 필요하다.

3.2.2. 인자분석

Rstudio 통계 프로그램을 활용하여 주요 인자를 도출하고 각 인자의 Factor 적재값(Factor loading)을 산출하였다. 인자 추출은 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 활용해 수행되었으며, 변수 간의 공통성은 초기 추정값을 기반으로 하였다. 인자 분석(Factor Analysis)은 변수들 간의 상관관계를 기반으로, 유사한 변동 패턴을 보이는 변수들을 하나의 인자(Factor)로 묶는 통계 기법이다. 이는 데이터 내에서 공통된 변동 구조를 파악하고, 복잡한 대기오염 배출 특성을 효과적으로 분리 해석하는 데 유용하다.

인자의 수는 상관행렬의 고유치가 1 이상이고 누적 설명률이 70% 이상인 경우를 기준으로 각 지점에서 결정하였다. 도출된 인자는 변수들 간의 상관성을 기반으로 주요 발생원을 대표하며, 이를 통해 미세먼지의 화학적 조성을 설명할 수 있다.¹¹⁾ 그러나 추출된 인자가 복잡한 구조를 가질 경우, 특정 인자가 어떤 요인을 대표하는지 명확히 해석하기 어려울 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 직교 회전 방식인 Varimax 회전을 적용하여 각 변수의 적재값을 특정 인자에 집중시켜 해석의 명확성을 높였다. Factor loading은 변수와 인자 간의 상관성을 수치화한 값으로, 본 연구에서는 인자의 특성을 명확히 설명할 수

있는 수준의 적재값을 보이는 변수들을 중심으로 해석을 수행하였다. 지점별 인자 분석 결과는 Table 6에 제시하였다.

여천동, 쌍봉동, 울촌면, 신대리, 대불 지점에서는 3개의 인자가, 묘도동과 중동 지점에서는 각각 2개의 인자가 도출되었다. 누적 설명률은 여천동, 쌍봉동, 울촌면, 신대리의 경우 90% 이상이였으며, 묘도동과 중동은 두 개의 인자를 통해 각각 80% 이상의 분산을 설명할 수 있었다.

Fe, Ca, Mg, Al의 적재값이 높게 나타난 인자는 토양 기원 성분(Soil dust)으로 해석하였다.¹⁰⁾ 여천동 Factor 2, 쌍봉동 Factor 1, 울촌면 Factor 2, 묘도동 Factor 1, 신대리 Factor 2, 중동 Factor 1, 대불 Factor 2에서 공통적으로 확인되었으며, 특히 Al은 모든 지점에서 0.9 이상의 적재값을 보여 자연적 기원의 입자가 주요 기여 요인임을 시사한다. 토양기원 인자에서 대불을 제외한 모든 지점에서 Mn은 0.37~0.73의 중간 수준의 적재값을 보였으나, 대불의 Mn은 0.08로 매우 낮게 나타났다. 이는 대불에서 발생한 Mn이 토양이 아닌 인위적인 배출원에서 주로 기인했음을 의미한다.

Pb, Cd, As의 적재값이 두드러진 인자는 자동차 배출원(Traffic)을 중심으로, 일부 산업 활동의 영향이 복합적으로 작용한 인자로 해석된다. 여천동 Factor 1, 쌍봉동 Factor 2, 신대리 Factor 1, 중동 Factor 2, 대불 Factor 1에서 해당 인자가 확인되었다. 이러한 인자는 주로 도로 인근 지역에서 발생하며, 차량의 브레이크 마모, 타이어, 윤활유, 배기관 등에서 배출되는 중금속(Pb, Cd 등)을 주요 지표 성분으로 갖는다. Pb는 타이어납(밸런스 웨이트), 배기관, 브레이크 마모 및 납 휘발유가 주요 배출원으로 작용한다.^{23,24)} Cd는 자동차 타이어, 차체의 부식, 윤활유 및 차량의 아연도금 부품의 마모에서 기인하는 것으로 알려져 있다.²⁵⁾ 한편 As는 일반적으로 야금 산업이나 석탄 연소 등의 산업활동에서 주로 발생하는 중금속으로 알려져 있다.²⁶⁾ 본 연구에서는 As가 0.77~0.86의 높은 적재값을 보였으며, 이는 단순 교통 오염으로는 설명이 어렵고, 일부 산업 배출원이 함께 작용했음을 시사한다. 따라서 해당 인자는 자동차 배출원에 기인한 인자를 기반으로 하되, 산업적 요인이 일부 반영된 복합 배출원으로 해석된다. 다만, 자동차 배출원에서는 주로 유기탄소(OC) 및 원소탄소(EC)와 같은 탄소성분이 배출되고, 중금속은 미량 수준으로 검출되므로 중금속의 기여도를 보다 정밀하게 평가하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

Cr, Cu, Mn, Ni의 적재값이 두드러진 인자는 산업 오염원(Industry)으로 판단하였다. 산업 오염원은 대표적인

Table 6. Factor analysis of heavy metal elements by site

Site	Y1			Y2			Y3			Y4	
Source of emission	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2
	Traffic	Soil dust	Industry	Soil dust	Traffic	Industry	Industry1	Soil dust	Industry2	Soil dust	Industry
Fe	0.24	0.74	0.55	0.79	0.18	0.56	0.43	0.71	0.50	0.44	0.81
Ca	0.18	0.77	0.31	0.83	0.20	0.36	0.29	0.86	0.28	0.71	0.64
Mg	0.04	0.90	0.09	0.88	0.02	0.12	0.18	0.95	0.07	0.94	0.18
Al	0.14	0.96	0.15	0.97	0.10	0.19	0.18	0.96	0.10	0.97	0.05
Pb	0.95	0.20	0.24	0.17	0.95	0.27	0.13	0.12	0.51	0.18	0.78
Cd	0.67	0.19	0.32	0.17	0.70	0.38	0.38	0.31	0.62	0.24	0.85
As	0.78	0.01	0.01	0.01	0.86	-0.05	-0.06	0.00	0.33	0.00	0.15
Cr	0.22	0.33	0.88	0.50	0.18	0.75	0.85	0.36	0.09	0.46	0.70
Cu	0.38	0.25	0.62	0.32	0.33	0.78	0.43	0.18	0.70	0.12	0.11
Mn	0.22	0.66	0.66	0.72	0.15	0.61	0.52	0.37	0.54	0.60	0.60
Ni	0.06	0.10	0.92	0.16	0.08	0.87	0.96	0.18	0.18	0.23	0.75
Eigenvalue	6.13	1.70	1.28	6.58	1.92	1.08	6.02	1.63	1.23	6.03	1.50
Cumulative variance	62	80	93	63	82	92	61	77	90	64	80

Site	SD		JD		DB		
Source of emission	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F3
	Traffic	Soil dust	Soil dust	Traffic	Traffic	Soil dust	Industry
Fe	0.14	0.67	0.87	0.33	0.25	0.28	0.90
Ca	0.16	0.86	0.93	0.27	0.12	0.86	0.39
Mg	0.07	0.90	0.89	0.08	0.01	0.89	0.09
Al	0.10	0.93	0.93	0.10	0.06	0.95	0.16
Pb	0.96	0.18	0.30	0.91	0.90	0.11	0.41
Cd	0.62	0.28	0.39	0.78	0.58	0.15	0.69
As	0.83	-0.02	-0.08	0.77	0.84	-0.01	0.19
Cr	0.10	0.52	0.76	0.12	0.26	0.25	0.60
Cu	0.23	0.28	0.35	0.41	0.27	0.10	0.53
Mn	0.01	0.27	0.73	0.30	0.14	0.08	0.92
Ni	0.01	0.16	0.57	0.32	0.15	0.17	0.70
Eigenvalue	6.28	1.80	6.29	1.72	5.69	2.06	1.09
Cumulative variance	63	81	66	84	57	78	89

지역적 오염원으로 이러한 중금속은 선철주물 제조업, 철강 산업, 도금업 등에서 주로 발생한다.^{27,28)} 여천동 Factor 3과 쌍봉동 Factor 3에서는 Ni, Cr, Cu, Mn 적재값이 높게 나타나 유사한 배출원을 가졌음을 보여주었다. 신대리 Factor 3은 Fe, Cu, Mn, Ni가 높은 적재값을 보였다. 묘도동 Factor 2에서는 Pb, Fe, Cd, Ni 적재값이 높게 나타났으며, 대불 Factor 3은 Fe, Mn, Ni 적재값이 높게 나타났다. 이처럼 중금속의 적재값 분포가 지점별로 다르게 나타났으며, 이는 각 지점이 인근 배출원 영향을 다르게 받았음을 시사한다.

울촌면 지점은 교통이나 주거 활동 등 뚜렷한 국지적 배출원이 존재하지 않아, 산업 관련 중금속 성분의 농도는 전반적으로 낮은 수준이었다. 그럼에도 불구하고 인자 분석 결과, 서로 다른 산업 배출 특성을 가진 인자가 두 개(Factor 1, Factor 3)의 인자가 도출되었으며, 이는 배출량이 적은 조건에서도 산업 오염원의 특성이 명확히 나타났음을 보여준다. Factor 1은 Cr과 Ni의 적재값이 두드러졌으며, 이는 금속 가공·제조 활동에서 기인한 것으로 해석된다. Factor 3은 Cu 중심의 인자로, 도금 및 금속가공 등 산업 활동과의 연관성이 두드러졌다.^{27,28)} 측정지점

인근에는 직접적인 배출원은 없었으나, 반경 1~5 km 내에 위치한, 울촌 제1일반산업단지 및 광양성황일반산업단지의 간접적인 영향 가능성이 제기된다.

상관분석 결과와 유사하게 여천동, 쌍봉동, 울촌면, 중동 지점의 Fe는 토양 기원 성분으로 분류되었으며 0.71~0.87로 유의미한 적재값을 보였다. 반면 신대리에서는 토양 기원과 산업 오염원에서 모두 0.6 이상의 적재값을 보이며 두 요인의 영향을 동시에 받은 것으로 나타났다. 묘도동과 대불 지점의 Fe는 산업 오염원 인자에서 0.81, 0.90으로 높게 나타나 해당 지역에서 검출된 Fe가 자연적 요인뿐만 아니라 산업 활동에 기인했음을 시사한다. 특히 묘도동과 대불 지점은 금속 가공 및 제조 공정이 활발한 지역으로, 이 과정에서 Fe가 대기 중으로 배출되었을 가능성이 크다. 따라서 해당 지역의 Fe 농도는 산업적 배출원의 영향을 강하게 받으며, 이는 지역별 배출 특성의 차이를 명확히 보여주는 결과로 해석될 수 있다.

일부 중금속은 뚜렷한 배출원의 특성을 가지며 배출원의 추적자로 활용될 수 있다. 그러나 PM-10 중 중금속 비율은 매우 낮으며 미세먼지 농도와 변동하는 경우도 있다. 또한 동일한 중금속이 다양한 배출원에서 발생하며 자연적 요인과 인위적 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 해석이 복잡할 수 있다.¹¹⁾ 보다 정밀한 배출원 추정을 위해서는 미세먼지의 주요 구성 성분인 탄소성분, 이온성분 등을 포함한 추가적인 분석 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2022년 1월부터 2024년 12월까지 전라남도 대기중금속측정망에서 측정된 미세먼지 및 중금속 농도의 연도별, 계절별, 지점별 농도 특성을 분석하였다. 또한 통계적 기법을 적용하여 중금속 발생 특성과 배출원을 파악하였다.

연구기간 동안 PM-10의 평균 농도는 $27 \pm 17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속 총량은 $1.99255 \pm 1.87673 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM-10의 7.2±5.0%를 차지하였다. 중금속 구성 비율을 살펴본 결과 Fe, Ca, Al, Mg가 전체 중금속의 80% 이상을 구성하였으며 Fe>Ca>Al>Mg>Mn>Pb>Cu>Ni>Cr>As>Cd 순으로 나타났다.

연도별로 살펴보면, 미세먼지 대비 중금속 총량은 2022년 6.3%, 2023년 8.3%, 2024년 7.0%로 대체로 일정한 수준을 유지하였다. 대부분의 중금속 농도는 연도별로 큰 변화가 없었으나, Pb와 As의 농도는 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 계절별로는 봄에 가장 높은 농도를 보

였으며, 그 다음은 겨울, 가을, 여름 순으로 나타났다.

지점별 분석 결과, 미세먼지 평균 농도는 대불·묘도동>신대리>중동>울촌면>여천동·쌍봉동 순으로 나타났다. 중금속 총량은 대불>묘도동>중동>울촌면>신대리>여천동>쌍봉동 순으로 나타났다. 특히 대불 지점의 Fe와 Mn의 평균 농도가 쌍봉동에 비해 각각 5.1배, 13.3배 높았고, 묘도동의 Fe와 Ni의 평균 농도는 쌍봉동에 비해 각각 3.4배, 4.3배 높았다. 이러한 결과는 두 지점이 인근 산업단지의 영향을 받고 있음을 시사한다.

미세먼지 및 중금속 성분 간의 상관분석에서는 전 지점에서 미세먼지와 Ca, Al, Mg와 높은 상관관계를 보였다. 쌍봉동, 여천동, 울촌면, 중동 지점의 Fe는 Mn, Ca, Mg, Al 등 지각 성분과 0.7 이상의 높은 상관성을 나타냈다. 반면 묘도동과 대불 지점의 Fe는 Mg와 Al과 상대적으로 낮은 상관관계를 보였으나($r=0.33\sim 0.55$), Pb, Cr, Cd, Mn, Ni 등 산업 기원 성분과는 0.7 이상의 높은 상관관계를 보였다. 이는 두 지점의 Fe가 자연적 요인뿐만 아니라 산업활동의 영향을 함께 받은 것으로 해석된다.

인자분석에서는 여천동, 쌍봉동, 울촌면, 신대리, 대불 지점에서는 3개의 인자, 묘도동과 중동 지점에서 각각 2개의 인자로 도출되었다. Fe, Ca, Mg, Al의 높은 적재값을 보인 인자는 토양 기원 성분으로 판단되었다. Pb, Cd, As의 적재값이 두드러진 인자는 자동차 배출원을 중심으로, 일부 산업 활동의 영향이 복합적으로 작용한 인자로 해석하였다. 또한, Cr, Cu, Mn, Ni가 높은 적재값을 보인 인자는 산업활동과 관련이 있는 인자로 해석되었다.

지점별로 보면, 쌍봉동, 여천동, 울촌면, 중동 지점의 Fe는 토양 기원 성분으로 분류되었으며 0.71~0.87의 유의미한 적재값을 보였다. 신대리는 토양 기원과 산업 오염원에서 모두 0.6 이상의 적재값을 나타내 두 요인의 영향을 동시에 받은 것으로 판단된다. 묘도동과 대불 지점의 Fe는 산업 오염원 인자에서 각각 0.81, 0.90으로 높게 보였으며, 이는 금속 가공 및 제조 공정이 활발한 지역적 특성과 연관된 결과로 해석된다. 이는 지역별 배출 특성에 따라 중금속 농도 분포가 달라짐을 보여준다.

본 연구는 전라남도 대기 중 미세먼지 및 중금속의 농도 변화를 분석하고 주요 배출원을 파악하여 대기 환경 특성을 규명하는 데 기여하였다. 특히 산업단지 인근 지역에서 특정 중금속 농도가 상대적으로 높게 나타났으며, 자연적 요인과 인위적 요인이 복합적으로 작용함을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 전남 지역의 대기질 특성을 이해하고, 효과적인 오염원 관리 및 대기 환경 개선을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 2024-01-03-001)을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- D. Roy, J. Kim, M. Lee, S. Kim, and J. Park, "PM10-bound microplastics and trace metals: A public health insight from the Korean subway and indoor environments", *Journal of Hazardous Materials*, **2024**, 477, 135156.
- S. H. Choi, S. W. Choi, D. Y. Kim, Y. W. Cha, S. W. Park, S. I. Lee, and E. C. Yoo, "Evaluation of Health Risk from Concentrations of Heavy Metal in PM-10 and PM-2.5 particles at Sasang Industrial Complex of Busan, Korea", *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, **2021**, 24(3), 133-148.
- 강병욱, 김민지, 백경민, 서영교, 이학성, 김종호, 한진석, 백성욱, "국내 주요 산업단지 대기 중 중금속농도 분포에 관한 연구", *한국대기환경학회지*, **2018**, 34(2), 269-280.
- 변진여, 조성환, 김현웅, 한영지, "춘천시 대기 중 PM2.5 및 금속성분의 장기간 농도 특성", *한국대기환경학회지*, **2018**, 34(3), 409-407.
- G. C. England, B. Zielinska, and K. Loss, "Characterizing PM2.5 emission profiles for stationary source-Comparison of traditional and dilution sampling techniques", *Fuel Proc. Technol.*, **2000**, 65-66, 177-188.
- CSIRO, "Inquiry into the impacts on health of air quality in Australia", *CSIRO Submission*, **2013**, 12/472.
- 환경부 국가미세먼지정보센터, <https://www.air.go.kr>, 2024년 2월.
- 국립환경과학원, "산단지역 유해대기오염물질 모니터링 (II)", **2016**.
- 정혜령, 최진영, 나공태, "도시지역 도로먼지의 중금속 오염 특성: 토지이용 특성에 따른 비교". *한국환경분석학회지*, **2020**, 23(2), 101-111.
- 진병일, "2002년 부산지역 봄철 황사/비행사시 PM10 중의 중금속 농도 특성", *환경영향평가*, **2003**, 12(2), 99-108.
- 전보경, 서정민, 최금찬 "부산지역 PM2.5의 이온 및 미량 금속성분의 화학적 특성", *한국환경위생학회지*, **2001**, 27(4), 63-71.
- 나혜운, 이윤국, 조민철, 김환기, 박원형, 서광엽, 이세행, "광주지역 미세먼지(PM-10) 중 중금속 농도분포 및 위해성 평가", *한국환경과학회지*, **2024**, 33(5) 283-296.
- 채정석, 박경려, 진준민, 이재영, "평양산업단지 인근지역 대기 중 중금속 오염 특성", *한국도시환경학회지*, **2020**, 20(1), 25-35.
- 환경부·국립환경과학원, "대기환경측정망 설치·운영지침", **2024**.
- 기상청, 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr>, 2024년 4월
- 서울시보건환경연구원, "2019년 서울시 초미세먼지 성분 분석 보고서", **2020**.
- 국립환경과학원, "2023 대기환경연보", **2024**.
- 진병일, 황용식, "최근 5년간 부산지역의 미세먼지 (PM10)농도 특성에 관한 연구", *환경영향평가*, **2007**, 16(6), 533-542.
- Y. Zhang, Q. Wang, and L. Li, "Seasonal variations of heavy metals in particulate matter from residential heating in northern China", *Environmental Pollution*, **2020**, 257, 113550.
- J. Kim and S. Park, "Influence of heating fuel types on particulate matter and heavy metal concentrations in winter", *Atmospheric Environment*, **2021**, 92, 92-101.
- J. H. Jeon, C. S. Park, and H. K. Lee, "Seasonal variations and sources of particulate matter in urban areas", *Atmospheric Environment*, **2007**, 41(18), 3775-3783.
- Y. Kim, S. Lee, and J. Park, "Analysis of seasonal variations in air quality and particulate matter concentrations in a metropolitan area", *Environmental Monitoring and Assessment*, **2010**, 162(1-4), 345-358.
- J. Caravanos, A. L. Weiss, M. J. Blaise, and R. J. Jaeger, "A survey of spatially distributed exterior dust lead loadings in New York City", *Environmental Research*, **2006**, 100(2), 165-172.
- P. Smichowski, D. R. Gomez, C. Frazzoli, and S. Caroli, "Traffic-related elements in airborne particulated matter", *Applied Spectroscopy Reviews*, **2008**, 43(1), 23-49.
- S. P. Raj and P. A. Ram, "Determination and contamination assessment of Pb, Cd, and Hg in roadside dust along Kathmandu-Bhaktapur Road section of Arniko Highway, Nepal", *Research Journal of Chemical Sciences*, **2013**, 3(9), 18-25.
- J. Park, H. Kim, Y. Kim, J. Heo, S. Kim, K. Jeon, S. Yi, and P. K. Hopke, "Source apportionment of PM2.5 in Seoul, South Korea and Beijing, China using dispersion normalized PMF", *Science of The Total Environment*, **2022**, 833, 155056.
- 유일한, 박지은, 김태연, 류지원, 정연승, 안준영, 이승목, "PMF(Positive Matrix Factorization) 수용모델을 활용한 오염원 기여도 분석 고도화 연구", *한국대기환경학회지*, **2022**, 38(4), 493-507.
- 강용선, 김세동, 구태형, 윤형렬, 문덕환, 한용수, "금속 제품 제조 산업장내 공기중 금속농도에 관한 연구", *한국환경위생학회지*, **1996**, 6(2), 249-264.