

ORIGINAL ARTICLE

## 광주지역 미세먼지(PM-10) 중 중금속 농도분포 및 위해성 평가

나혜윤\* · 이윤국 · 조민철 · 김환기 · 박원형 · 서광엽 · 이세행

광주광역시보건환경연구원

### Concentrations Distribution and Risk Evaluation of Heavy Metal in PM-10 in Gwangju

Hye-Yun Na\*, Youn-Goog Lee, Min-Cheol Cho, Hwan-Gi Kim, Won-Hyeong Park, Gwang-Yeob Seo, Se-Heang Lee

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

#### Abstract

This study examined the distribution of airborne metals concentrations and conducted a risk assessment in PM-10 in Gwangju from 2014 to 2022. There were a total of six points, and the concentration of heavy metals at each point was highest in the order of Pyeong-dong(1.5472  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > Nongseong-dong(1.2093  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > Geonguk-dong(1.0100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > Duam-dong(0.9684  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > Seo-dong(0.9515  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > Nodae-dong(0.8321  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). In recent years, the concentration of heavy metals in the atmosphere has generally risen, accompanied by an increase in heavy metals in the soil. The average seasonal concentrations were in the following order: spring(1.4448  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > winter(1.2939  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > fall(0.8303  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > summer (0.5928  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The atmospheric heavy metals most correlated with PM-10 were Ca(0.69), Fe(0.62), Al(0.62) and Mg(0.60). Within the acceptable risk level (1.0E-06) set in this study, heavy metals in the atmosphere were found to have the most excess cancer risk, and the integrated non-cancer risk was as low as 1 or less.

**Key words** : Gwangju, PM-10, Heavy metal, Distribution, Risk evaluation

#### 1. 서론

대기 중 중금속은 분진이나 미세먼지와 같은 입자상 물질에 흡착되어 부유하거나, 2차, 3차 결합으로 대기 중에 체류하며 머무르게 된다(NIER, 2010). 중금속은 다른 물질에 비해 자체 독성이 높다는 특성 외에도 환경 내에서 잔류기간이 길며, 생태계 내에서 농축되어 인체에 흡수됨으로 인해 인체 위해성이 큰 물질로 분류되고 있어 특별한 관리가 요구된다(Park, 1997).

유해중금속은 위장과 신장, 혈액 및 신경계 독성 등에 영향을 미칠 뿐 아니라, 국제암연구소(IARC, International Agency of Research on Cancer)에서는 대기 입자상 물질에 포함된 유해중금속을 암을 유발하는 주요 성분으로 인식하고 있다(IARC, 2013). 특히, 미세먼지에 함유되어 있는 납, 카드뮴, 비소, 망간, 아연, 니켈, 크롬 등의 중금속이 인체에 흡수되어 활성산소를 생성하는 등 여러 가지 기전을 통해 호흡기 및 순환기계 등의 질환을 야기할 수 있다(Donaldson and

Received 22 February, 2024; Revised 26 April, 2024;

Accepted 29 April, 2024

\*Corresponding author : Hye-Yun Na, Health and Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju 61954, Korea  
Phone : +82-62-613-7584  
E-mail : nhy1207@korea.kr

© 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.

MacNee, 2001; Kumar and Jugdutt, 2003). 또한, 발암성이 없는 중금속도 노출 기간 및 노출 농도에 따라서 건강에 피해가 나타날 수 있다.

대기 중 중금속 농도 분포는 지역별 특성 및 다양한 환경적인 요인에 따라 달라질 수 있다. 중금속의 발생 원인으로서는 산업활동에 의한 화학공장, 금속산업, 쓰레기 소각, 화석 연료의 연소, 암석의 풍화 외 그 밖의 과정 등을 통한 자연적 발생원과 인위적인 발생원에 의해 다양한 방법으로 대기 중으로 배출된다(Leili et al., 2008; Vijayanand et al., 2008). 따라서 해당 지역의 대기 중금속 농도 분포를 파악하여 어떠한 특성이 있는지 조사하고, 이 유해중금속이 어떠한 위해성을 가지고 있는지 반드시 연구가 이루어져야 한다.

광주지역 대상으로 사전에 수행된 대기 중금속 관련 연구는 주로 황사 시 사례분석으로 짧게 1년, 길면 6년간의 황사 유입 시 미세먼지의 화학 성분 및 중금속 농도 분포를 연구한 논문이 있었으며(Shin et al, 2005; Lee et al., 2014; Yang et al., 2020), 5년간의 광주지역 대기질 특성 연구로 입자상 물질 내 포함된 중금속 특성에 대한 연구가 있었다(Jung, 2011). 하지만 최근 데이터를 이용하여 미세먼지에 포함된 대기 중금속에 대한 장기간 특성분석이나 위해성 평가에 관한 연구나 조사는 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 광주지역에 설치된 6곳의 대기중금속측정망 데이터를 이용하여 지점별, 계절별, 연도별 대기 중금속 농도분포 특성을 파악하고, 각 대기 중금속 항목간의 상관성분석 및 회귀분석을 실시하였다. 또한 PM-10 중 대기 중금속 농도를 이용하여 유해 중금속 노출로 인한 건강 위해성평가를 실시하여 광주 지역에 미치는 영향을 연구하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상 및 시료채취

본 연구에서는 광주광역시의 PM-10 중 대기 중금속 분포 특성을 파악하기 위해 2014년 ~ 2022년 중금속 측정망 데이터를 이용하여 분석하였다. 대기 중금속 측정항목은 총 12종으로, 납(Pb), 크롬(Cr), 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 망간(Mn), 철(Fe), 니켈(Ni), 비소(As), 베릴륨(Be), 알루미늄(Al), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg)이며, 이 중 알루미늄, 칼슘, 마그네슘은 2014년 ~ 2015년 자료가 없어, 2016년 ~ 2022년 자료를 이용하였다. 측

정주기는 정기적으로 매월 둘째 주 5일간 24시간 시료 채취를 하였으며, 세부적인 측정 및 분석방법은 대기환경측정망 설치·운영 지침에 따라 분석하였다.

광주광역시 내 대기 중금속 측정 지점은 총 6개 지점으로 공업지역은 건국동과 평동, 주거지역은 서동과 두암동, 녹지지역은 노대동과 농성동이다. 각 지점 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 공업지역 중 평동 지점의 산업단지는 주로 제조업이 주를 이루고 있으나, 건국동 지점의 산업단지는 첨단 산업위주로 구성되어 있다. 농성동 지점은 공원이 있는 녹지지역이었으나, 최근 측정소 주변에서 아파트 공사가 장기간 지속되었다.

건국동, 농성동, 두암동, 서동 지점은 2014년 1월부터 2022년 12월까지 매월 연속 5일간 채취하였으며, 각 지점 마다 총 540개의 시료를 채취하였다. 노대동과 평동 지점은 2020년 신설되어 2020년 1월부터 2022년 12월까지 매월 연속 5일간 채취하였으며, 총 180개의 시료를 채취하였다. 본 연구에서 사용한 지점별 분석데이터의 연도별 측정항목 수는 Table 1과 같다.

건국동, 농성동, 두암동, 서동 측정소의 PM-10 시료는 고용량공기 시료채취기(HVS-16, MCZ, Germany)를 이용하여 채취하였다. 노대동과 평동지점의 PM-10 시료채취는 고용량공기 시료채취기(DHA-80, Digital, Switzerland)를 이용하여 채취하였다. 모든 측정소의 시료채취유량은 약 68 m<sup>3</sup>/hr로 24시간 동안 대기 중 공기를 석영섬유필터(Quartz fiber filter, Ø150 mm, Pall, USA)로 채취하였다.

### 2.2. 분석방법 및 정도관리

대기 중 중금속 분석은 대기오염공정시험기준 환경 대기 중 금속화합물 - 유도결합플라즈마 분광법(ES 01700.2)에 따라 수행하였고, 전처리 방법은 질산-염산혼합액에 의한 초음파 추출법을 사용하였다. 여지는 시료채취 전·후 향온 및 향습 조건이 유지되도록 24시간 동안 데시케이터 내에 보관한 후, 전자식전자저울(AUW220D, SHIMADZU)로 여지 무게 차이를 측정하여 PM-10 농도를 산출하였다. 대기 중금속 분석은 시료 채취된 먼지필터를 4분의 1등분하여 적당한 크기로 잘라서, 1.03M 질산과 2.23M 염산의 혼합액(1:1)을 30 mL 넣어주었다. 이를 초음파 추출기로 100℃ 물을 시료액 높이만큼 채운 후 28 kHz 출력으로 2시간 추출하였다. 추출이 완료되면 여과지(110 mm 5A filter, ADVANTEC)를 올린 깔때기를 이용하여 시료용액을

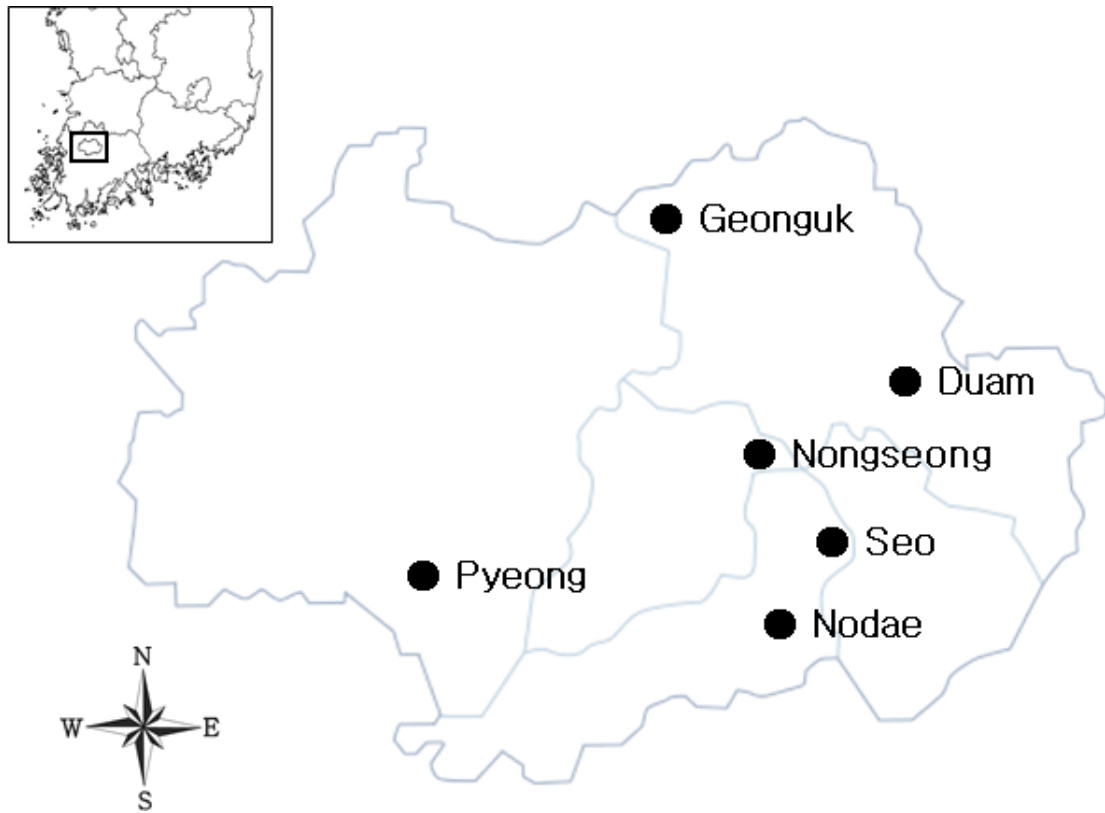


Fig. 1. Location of sampling sites in Gwangju.

여과하고, 증류수로 최종액량이 100 mL가 되도록 하였다. 이 시료용액을 정량 분석을 위해서 유도결합플라즈마 분광계(ICP-OES, Avio 500, Perkin Elmer, U.S.A.)를 이용하여 분석하였다.

ICP-OES 분석 시 검량선을 작성하고 정량하기 위해 26개 물질이 혼합된 ICP용 표준 용액 Instrument Calibration Standard 2 (Perkin Elmer, U.S.A.)을 사용하였다. 검량선용 표준물질 농도는 0.05, 0.1, 0.5, 1, 2 mg/L로 5개 농도를 이용하였고, 공시료 분석을 통해 채취된 시료 중 공시료의 농도는 제외하였다.

대기 중금속 분석결과에 대한 신뢰도를 확보하기 위해 매년 정도관리를 실시하였다. 방법검출한계 및 정량한계는 0.05 mg/L로 7번 측정하였고, 정밀도, 정확도 분석은 0.1 mg/L로 4회 측정하였다. 각 항목별 방법검출한계 및 정량한계는 대기오염공정시험기준에 적합하였다. 정밀도는 각 항목별 0.8% ~ 4.5%로 10% 이내였으며, 정확도는 94.3% ~ 109.6%로 나타났다. 또한 직

선성 평가 결과 각 성분별 상관계수( $R^2$ )가 0.99 이상으로 나타났다.

### 2.3. 통계분석

본 연구에서는 PM-10 중 대기 중금속의 특성을 파악하기 위해 통계 프로그램인 SPSS 20.0 (SPSS INC., USA)을 사용하여 상관분석과 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석은 PM-10을 종속변수로 두고, 대기 중금속 항목을 독립변수로 하였다. 대기 중금속 항목은 주성분 분석(Principle Component Analysis, PCA)을 통해 차원을 감소시킨 후, 회귀분석을 실시하였다. 주성분 분석 시 대기 중금속에 대한 물리적 해석을 용이하기 위해 베리맥스 회전법을 이용하였다.

### 2.4. 위해성평가

광주광역시의 대기 중 중금속이 인체에 어떠한 영향

을 미치지 평가하기 위해 PM-10에 함유된 대기 중금속 흡입에 의한 건강위해성 평가를 실시하였다. 위해성 평가는 환경부 예규 제 585호 환경유해인자의 위해성 평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침을 따랐다. 총 4단계로 이루어지며, 유해성확인, 용량-반응평가, 노출평가, 위해도 결정 순이다.

본 연구에서 유해성확인 및 용량-반응평가는 미국 환경보호청(US-EPA, United States Environmental Protection Agency)에서 운영하는 IRIS (Integrated Risk Information System)의 자료를 참고하였다. 발암물질과 비발암물질에 대한 분류 및 위해성평가의 기본자료와 독성값을 Table 2에 정리하여 나타내었다(US-EPA, 2023). 니켈은 제련본진에 의한 흡입 단위 위해도를 활용하였고, 크롬의 경우 6가크롬( $Cr^{6+}$ )에 의한 위해성평가를 실시하였다. 6가 크롬 농도는 많은 연구(Park, 1997; Jeon et al., 2010; Oh et al., 2013)에서 적용한 총 크롬 농도의 8%의 농도를 반영하여 평가하였다. 납의 경우 현재 US-EPA에서는 정량적인 위해도가 제시되어 있지 않아 국내 연구결과 중 하나인 TOX-RISK패키지를 이용하여 도출된 multistage 모델의 납의 단위용량 당 발생 가능한 발암잠재력을 본 연구에 적용하였다(Korea Ministry of Environment, 2005).

노출평가는 인체에 유해영향이 확인된 물질에 대해 노출량을 정량적으로 파악하는 단계이다. 본 연구에서 인체노출량을 산정하기 위한 노출계수는 국립환경과학원에서 한국인을 대상으로 조사한 노출정보를 적용하였는데, 사용된 인자들은 Table 3과 같다(NIER, 2019). 노출기간(Exposure period)은 오염지역의 건강영향을 예측하는 것으로 25년을 가정하였다(화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정 별표5). 이러한 인자를 사용하여 평생일일평균용량(LADD, Lifetime Average Daily Dose)을 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였고, 노출된 양의 100%가 흡수된다고 가정하였다.

$$LADD(mg/kg/day) = \frac{C \text{ mg/m}^3 \times IR \text{ m}^3/day \times EF \text{ day/year} \times EP \text{ year}}{BW \text{ kg} \times LT \text{ day}} \quad (1)$$

C: Contaminant concentration in inhaled air ( $mg/m^3$ )

위해도 결정은 특정 농도의 유해물질이 인체에 유해한 영향을 발생시킬 확률을 결정하는 단계이다. 암을 발생하는 발암위해도와 비발암위해도로 구분하여 결정한다. 위해성 평가 방법은 단일 평가치 분석을 실시하였으며, 사용된 농도는 중간값(CTE, Central Tendency Exposure), 평균값(Mean Exposure), 95% UCL (Upper Confidence Level) 값인 RME (Reasonable Maximum Exposure)을 이용하여 평가를 수행하였다. 이때, 사용하는 CTE 농도는 일반인들의 평균적인 노출 경향을 의미하며, RME 농도는 고노출 수준의 경향을 의미한다(US-EPA, 2005).

#### 2.4.1. 발암위해도

발암위해도는 평생일일평균용량(LADD)과 발암잠재력(CPF, Cancer Potency Factor)을 곱하여 초과 발암위해도(Excess cancer risk)를 산정한다(식 2). CPF는 발암물질의 독성 값으로, 하루에 체중 1 kg 당 1 mg의 유해인자에 노출되었을 때 증가하는 발암확률을 의미한다(Van Leeuwen and Hermens, 2001). CPF는 식 (3)을 이용하여 호흡단위위해도를 체중(70 kg)과 호흡률( $20 \text{ m}^3/day$ )을 고려한 값으로 환산하여 사용하였다(Lee, 2014; Choi et al., 2021). US-EPA에서는 자연적으로 발생할 수 있는 위해수준인  $1.0E-06$ 은 무시할만한 아주 작은 위해도로 규정한다. 반면에  $1.0E-04$ 는 법적인 규제가 필요하다고 판단되는 위해수준이다(US-EPA, 2005). 따라서 본 연구에서는 허용 위해도 수준을 US-EPA에서 규정한 무시할만한 아주 작은 위해도인  $1.0E-06$ 을 기준으로 설정하여 이보다 높으면 위해성이 있다고 판단하고, 낮으면 위해성이 낮은 것으로 판단하였다.

$$\text{Excess cancer risk} = LADD \times CPF \quad (2)$$

$$CPF(mg/kg/day)^{-1} =$$

$$\frac{\text{Inhalation Unit Risk} (\mu g/m^3)^{-1} \times 70 \text{ kg}}{20 \text{ m}^3/day} \times 1000 \mu g/mg \quad (3)$$

#### 2.4.2. 비발암위해도

비발암위해도를 나타내는 HI (Hazard Index) 지수는 모든 오염물질별로, 평생일일평균용량(LADD)을 독성참고량(RfD)으로 나눈 HQ (Hazard Quotient)

**Table 1.** Analysis items for each station used in this study (unit : species)

Station	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Geonguk	9 <sup>a)</sup>	9	12 <sup>b)</sup>	12	12	12	12	12	12
Nongseong	9	9	12	12	12	12	12	12	12
Duam	9	9	12	12	12	12	12	12	12
Seo	9	9	12	12	12	12	12	12	12
Nodae							12	12	12
Pyeong			Establishment in 2020				12	12	12

<sup>a)</sup> 9 species : Pb, Cr, Cd, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be

<sup>b)</sup> 12 species : Pb, Cr, Cd, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be, Al, Ca, Mg

**Table 2.** Toxicity information of carcinogenic and non-carcinogenic heavy metals for risk assessment

	Classification	Tumor type	Cancer assessment		Noncancer assessment	
			Inhalation unit risk <sup>a)</sup> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) <sup>-1</sup>	RfC <sup>b)</sup> ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	RfD <sup>c)</sup> ( $\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day}$ )	
Cr <sup>6+</sup>	A	Lung cancer	1.2E-02	1.0E-04	3.0E-03	
Ni (Refinery dust)	A	Lung cancer	2.4E-04	N.A. <sup>d)</sup>	N.A.	
Cd	B1	Lung, trachea, bronchus cancer	1.8E-03	N.A.	5.0E-04	
Pb	B2	-	1.2E-05	N.A.	N.A.	
Mn	D	-	N.A.	5.0E-05	1.4E-01	

<sup>a)</sup> Excess lifetime cancer risk associated with breathing 1  $\mu\text{g}$  of a chemical per 1  $\text{m}^3$  of air over a 70-year life span for a 70kg human, IRIS, US-EPA

<sup>b)</sup> Reference concentration for inhalation exposure

<sup>c)</sup> Reference dose

<sup>d)</sup> Not Assessed

**Table 3.** Exposure factor of this study for risk assessment

Variable	Unit	Factors
Body weight (BW)	kg	64.5
Inhalation rate (IR)	$\text{m}^3/\text{day}$	14.62
Lifetime (LT)	year (day)	82.7 (30186)
Exposure frequency (EF)	day	365
Exposure period (EP)	year	25

지수(식 4)의 총 합으로 나타낸다(식 5). 이 HI 지수가 1을 초과하는 경우에는 건강상 위해영향이 발생할 가능성이 있다는 것을 의미하고, 1이하인 경우에는 위해 영향 발생 가능성이 낮음을 의미한다(Lee and Kim, 2007). 비발암성 물질 평가를 위해 사용되는 RfD가 없는 경우에는 식 (6)을 이용하여 산출하였다(Julia Griselda et al, 2019; Choi et al, 2021).

$$HQ = LADD / RfD \quad (4)$$

$$HI = \sum HQs \quad (5)$$

$$RfD(\text{mg}/\text{kg}/\text{day}) = \frac{RfC \text{mg}/\text{m}^3 \times 20 \text{m}^3/\text{day}}{70 \text{kg}} \quad (6)$$

### 3. 결과 및 고찰

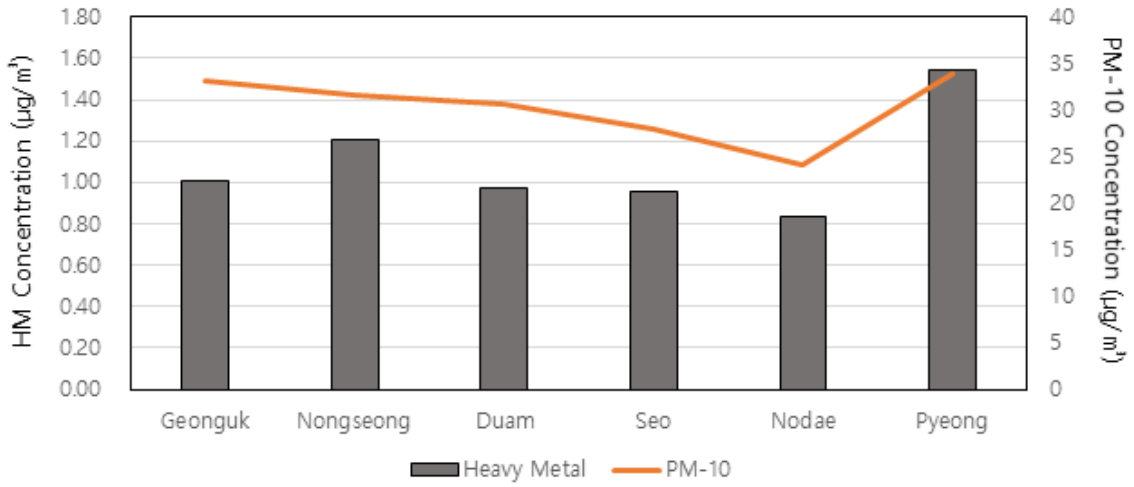


Fig. 2. PM-10 concentration and total heavy metal concentration by station. (µg/m³)

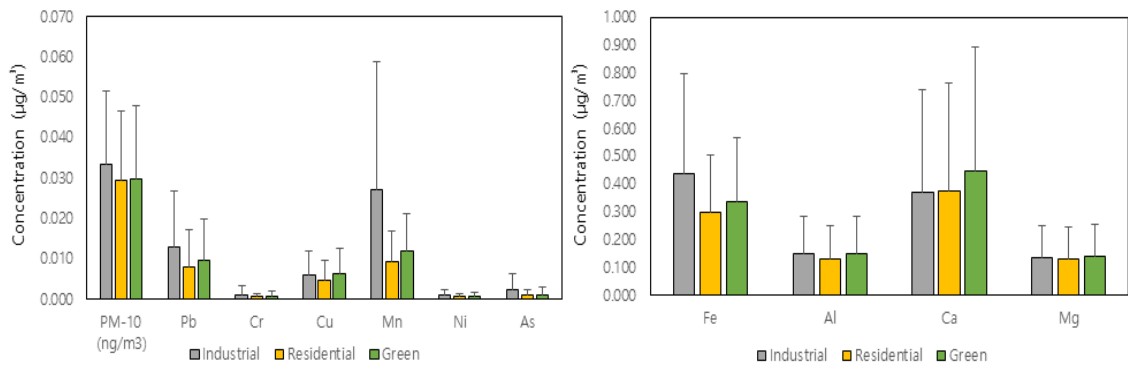


Fig. 3. Concentration of PM-10 and heavy metals by use area in Gwang-ju.(2014~2022)

### 3.1. PM-10 및 대기 중금속 농도분포

#### 3.1.1. 지점별 농도분포

측정지점별로 PM-10 농도와 총 대기 중금속 농도를 Fig. 2에 나타내었다. PM-10 농도를 살펴보면 평동(34 µg/m³) > 건국동(33 µg/m³) > 농성동(32 µg/m³) > 두암동(31 µg/m³) > 서동(28 µg/m³) > 노대동(24 µg/m³) 순으로 높게 나타났으나, 총 대기 중금속 농도는 평동(1.5472 µg/m³) > 농성동(1.2093 µg/m³) > 건국동(1.0100 µg/m³) > 두암동(0.9684 µg/m³) > 서동(0.9515 µg/m³) > 노대동(0.8321 µg/m³) 순으로 나타났다. 평동과 건국동의 경우 PM-10은 비슷한 농도를 보였으며, 공업지역에 속하므로 다른 지역에 비해 높은

농도를 나타냈다. 하지만, 이 두 지점에서의 총 대기 중금속 농도는 평동이 건국동보다 1.5배 높게 나타났다. 이러한 이유는 이들 두 지점이 위치한 지역의 산업적 특성이 다르기 때문이다. 건국동은 첨단산업단지에 위치하여 반도체, 광(光) 산업 등 ICT 관련 사업체들이 밀집되어 있고, 평동은 주로 제조업 공장들로 이루어져 있어 이러한 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 농성동의 경우에는 녹지지역에 위치하고 있으면서도, 대기 중금속 농도가 평동 다음으로 높게 나타났다. 이는 농성동 측정소 일대에서 2016년부터 2022년까지 대단지 신축 아파트 공사가 지속적으로 진행되어 이로 인한 영향이 크게 반영된 것으로 판단된다. 노대동은 녹지지역으로 측정소 주변으로 공원이 조성되어 있고, 주변 오염원이

**Table 4.** Concentrations of artificial, soil component heavy metals and ratio of artificial heavy metals

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

HM	Station						Use area		
	Geon-guk	Nong-Seong	Duam	Seo	Nodae	Pyeong	Industrial	Residential	Green
Arti <sup>a)</sup>	0.0196	0.0204	0.0145	0.0151	0.0126	0.0343	0.0232	0.0148	0.0185
Soil <sup>b)</sup>	0.9904	1.1889	0.9539	0.9364	0.8195	1.5130	1.1203	0.9449	1.0829
Arti Ratio <sup>c)</sup>	1.94	1.69	1.50	1.59	1.52	2.21	2.03	1.54	1.68

<sup>a)</sup> Concentration of artificial heavy metals (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Be)  
<sup>b)</sup> Concentration of soil composition heavy metals (Mn, Fe, Al, Ca, Mg)  
<sup>c)</sup> Ratio of artificial heavy metals to total heavy metal concentration

없기 때문에 PM-10 및 대기 중금속 모두 가장 낮게 나타났다. 그 외 건국동, 두암동, 서동 측정소는 비슷한 농도를 보였다.

Fig. 3은 용도지역별로 각 대기 중금속 농도를 비교한 것이다. 그림에서 베릴륨은 검출되지 않았고, 카드뮴은 매우 미량이며서 용도지역별로 같은 농도를 보이고 있어 분석에서 제외하였다. 그림에 나타난 바와 같이, 용도지역별로 차이가 큰 항목을 살펴보면, 망간은 공업지역이 주거지역보다 2.9배 높았으며, 철은 공업지역보다 주거지역이 1.5배 높게 나타났다. 또한, 비소도 공업지역이 주거지역보다 2.4배 높았지만, 매우 미량으로 지점간 농도 차이는 작게 나타났다. 그 외 항목들은 용도지역별 차이가 크지 않았으나, PM-10을 포함한 대부분의 대기 중금속 항목(납, 크롬, 망간, 니켈, 비소, 철, 알루미늄)은 공업지역에서 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 경기도에서의 대기 중금속 농도분포가 공업지역이 주거지역보다 낮은 1.9 ~ 2.2배, 니켈은 1.7 ~ 2.6배, 철, 망간, 크롬은 1.2 ~ 1.5배로 높게 나타난 것과, 대구광역시의 산단지역이 비산단지역에 비해 1.6배(망간) ~ 2.7배(카드뮴) 높게 나타났다는 선행연구와 유사한 결과이다(Kim et al, 2014; Song et al, 2015).

Table 4는 각 지점 및 용도지역별 대기 중금속을 인위적 중금속과 토양성분 중금속으로 나누어 전체 대기 중금속 중 인위적 중금속의 비율을 비교한 것이다. 인위적 성분에 가까운 중금속은 납, 크롬, 카드뮴, 구리, 니켈, 비소로, 토양성분에 가까운 중금속은 망간, 철, 알루미늄, 칼슘, 마그네슘으로 나누었다(Kim and Park, 2010; Kang et al., 2018, Yang et al., 2020). 먼지 지점별 인위적 중금속 농도를 비교하면, 평동(0.0343  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 농성동(0.0204  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 건국동(0.0196  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 서동(0.0151  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 두암동(0.0145  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) >

노대동(0.0126  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높게 나타났다. 하지만 총 대기 중금속 중 인위적 중금속 비율을 비교하면 평동(2.21%) > 건국동(1.94%) > 농성동(1.69%) > 서동(1.59%) > 노대동(1.52%) > 두암동(1.50%) 순으로 높게 나타났는데, 이를 용도지역별로 나누어 비교해 보면, 공업지역(2.03%) > 녹지지역(1.68%) > 주거지역(1.54%) 순으로 높게 나타난 것을 알 수 있다. 즉, 제조업 및 첨단산업 등의 기업들이 밀집해 있는 공업지역이 가장 높게 나타났으며, 녹지지역은 앞서 언급한 인근 아파트 공사의 대형 공사차량 영향으로 인위적 중금속과 토양성분 중금속이 모두 증가하여 주거지역보다 더 높은 비율이 나타난 것으로 판단된다.

### 3.1.2. 연도별 농도분포

Fig. 4는 연도별 각각의 대기 중금속 평균 농도를 나타낸 것이다. 12개의 대기 중금속 항목 중 베릴륨은 한 번도 검출되지 않았고, 카드뮴 또한 매우 미량으로 검출되지 않은 연도가 존재하여 분석에서 제외하였다. 그 외 10개 대기 중금속 항목 중 납, 비소, 니켈은 최근으로 올수록 감소하는 경향을 보였고, 다른 항목은 모두 증가하는 경향을 보였다. 이와 함께 PM-10 농도도 연도별로 어떠한 변화를 나타내는지, 그리고 총 대기 중금속 농도 중 인위적 중금속 비율과 토양성분 중금속 비율도 연도별로 어떻게 변화하는지 살펴보기 위해 분석을 수행하였다(Fig. 5). 그 결과, PM-10 농도는 최근으로 올수록 점차 감소하는 경향을 보였고, 인위적 중금속의 비율도 함께 감소하였다. 반면 토양성분 중금속의 비율은 점점 더 증가하는 경향을 보였다. 이는 유해대기오염물질의 지속적인 관리 강화 등의 영향이 반영된 것으로 판단한다.

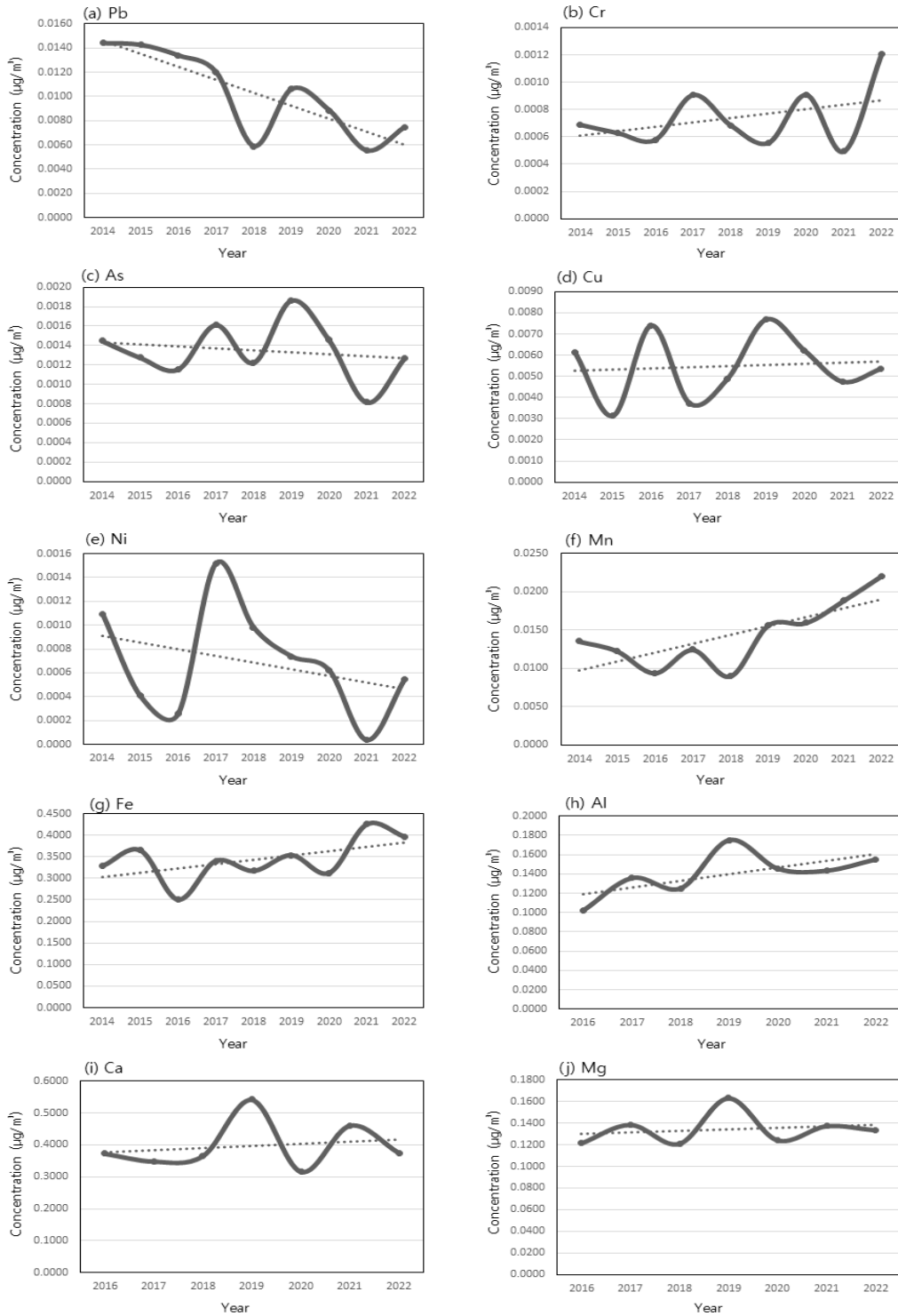


Fig. 4. Heavy metal concentration time series plot by year in Gwang-ju.(2014~2022)



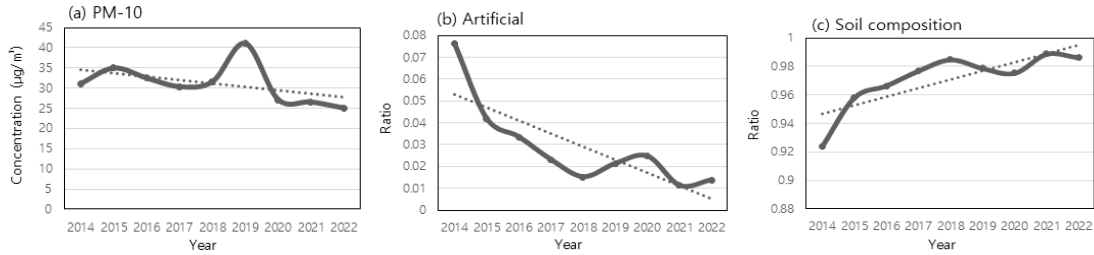


Fig. 5. PM-10 concentration(a) and artificial heavy metal ratio(b) and soil component heavy metal ratio(c) time series in Gwang-ju.

Table 5. Concentrations of PM-10 and heavy metals in seasonal (unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

HM	Spring			Summer			Fall			Winter		
	Mean	S.D.	RME <sup>a)</sup>	Mean	S.D.	RME	Mean	S.D.	RME	Mean	S.D.	RME
PM10	37	20	66	24	13	50	25	15	56	35	18	70
Pb	0.0120	0.0117	0.0345	0.0057	0.0079	0.0210	0.0086	0.0098	0.0279	<b>0.0130</b>	0.0127	<b>0.0374</b>
Cd	0.0002	0.0005	0.0008	0.0001	0.0002	0.0004	0.0001	0.0002	0.0005	0.0001	0.0003	0.0008
Cr	<b>0.0010</b>	0.0014	0.0028	0.0005	0.0007	0.0019	0.0008	0.0013	0.0024	0.0008	0.0017	<b>0.0029</b>
Cu	0.0060	0.0049	0.0142	0.0037	0.0029	0.0088	0.0049	0.0050	0.0147	<b>0.0072</b>	0.0077	<b>0.0229</b>
Mn	0.0177	0.0129	0.0432	0.0087	0.0093	0.0284	0.0147	0.0217	0.0375	<b>0.0187</b>	0.0274	<b>0.0535</b>
Fe	<b>0.4338</b>	0.2372	0.8821	0.2346	0.1902	0.5628	0.3156	0.2438	0.6991	0.4033	0.3338	<b>1.0170</b>
Ni	0.0007	0.0011	0.0027	0.0006	0.0011	0.0029	0.0005	0.0009	0.0024	0.0007	0.0013	0.0025
As	0.0014	0.0020	0.0049	0.0006	0.0013	0.0030	0.0011	0.0030	0.0050	<b>0.0021</b>	0.0033	<b>0.0071</b>
Be	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Al	<b>0.2287</b>	0.1441	<b>0.4702</b>	0.0794	0.0951	0.2500	0.0995	0.0825	0.2507	0.1526	0.1265	0.3978
Ca	<b>0.5652</b>	0.3848	1.3179	0.1861	0.1913	0.5241	0.2977	0.2650	0.7583	0.5198	0.5373	<b>1.5359</b>
Mg	<b>0.1782</b>	0.1021	0.3689	0.0762	0.0499	0.1668	0.1011	0.0685	0.2364	0.1757	0.1610	<b>0.4883</b>
Total <sup>b)</sup>		<b>1.4448</b>			0.5928			0.8303			1.2939	
Arti <sup>c)</sup>		1.47%			1.89%			1.93%			1.84%	
Soil <sup>d)</sup>		98.53%			98.11%			98.07%			98.16%	

<sup>a)</sup> Reasonable maximum exposure(95% upper confidence level)

<sup>b)</sup> Total average heavy metal data

<sup>c)</sup> Ratio of artificial heavy metals to total heavy metal concentration(Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Be)

<sup>d)</sup> Ratio of soil composition heavy metals to total heavy metal concentration(Mn, Fe, Al, Ca, Mg)

### 3.1.3. 계절별 농도분포

Table 5는 계절별 농도특성을 분석하기 위하여 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)로 나누어, 각 계절별 PM-10 및 대기 중 중금속 평균 농도(Mean)와 표준편차(S.D.), 95% 분위 값인 RME (Reasonable Maximum Exposure) 값을 나타낸 것이다. 대기 중금속 총 평균 농도는, 봄철에  $1.4448 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 농도를 보였고, 그 다음

으로 겨울( $1.2939 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 가을( $0.8303 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 여름( $0.5928 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 나타났다. 이때 봄철이 여름철보다 2.4배 높게 나타났다. 또한, 총 대기 중금속 농도 중 인위적 중금속과 토양성분 중금속의 비율도 계절별로 살펴보면, 여름, 가을, 겨울은 인위적 중금속 비율이 1.84% ~ 1.93%, 토양성분 중금속 비율은 98.07% ~ 98.16%로 비슷한 비율을 보였다. 하지만, 토양성분 중금속 비율은 봄철에 98.53%로 가장 높게

**Table 6.** Correlation coefficients among PM-10 and heavy metals ( $p < 0.01$ )

	PM-10	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As	Al	Ca	Mg
PM-10	1											
Pb	0.58	1										
Cd	0.26	0.28	1									
Cr	0.26	0.31	0.29	1								
Cu	0.50	0.53	0.32	0.43	1							
Mn	0.44	0.44	0.11	<b>0.60</b>	0.50	1						
Fe	0.62	0.48	0.13	0.48	0.51	0.80	1					
Ni	0.28	0.31	0.35	0.41	0.25	0.22	0.26	1				
As	0.20	0.28	0.24	0.08	0.14	0.12	0.14	0.20	1			
Al	0.62	0.31	0.22	0.22	0.34	0.38	0.70	0.23	0.12	1		
Ca	<b>0.69</b>	0.31	0.16	0.16	0.34	0.34	0.67	0.18	0.10	0.81	1	
Mg	0.60	0.24	0.14	0.14	0.22	0.30	0.59	0.17	0.10	0.78	0.86	1

나타났다. 이는 우리나라에서 나타나는 황사현상 대부분이 봄철에 약 80% 발생한다는 연구결과(Jeon, 2012)와 같이 봄철 황사의 영향으로 토양성분 중금속 비율이 증가한 것으로 판단된다. 황사의 영향을 많이 받는 봄일 때 대기 중금속의 전체 평균 농도가 높은 편이지만, 납, 크롬, 구리, 망간, 철, 비소, 칼슘, 마그네슘은 겨울철에 RME 값이 더 높았다. 카드뮴은 평균 농도가 0.0001 ~ 0.0002  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  범위로 나타났고, 니켈 평균 농도는 0.0005 ~ 0.0007  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  범위로 나타나 두 항목 모두 계절 상관없이 매우 미량 검출되었다. PM-10 농도도 동일하게 평균 농도는 봄(37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 겨울(35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 가을(25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 여름(24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 순으로 높지만, RME 값은 봄철이 66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 겨울철이 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 겨울철이 더 높았다. 이는 잦은 황사 등으로 봄철 미세먼지 평균 농도가 높으나, 겨울철에는 난방연료 사용 등으로 화석연료 연소가 많아져 미세먼지를 증가시킨다(Choi et al, 2022). 따라서 겨울철 대기정체 및 황사 등과 같은 기상현상이 겹치면 미세먼지가 봄철보다 더 높은 농도가 나타날 수 있다.

### 3.2. PM-10 및 대기 중금속 통계분석

#### 3.2.1. 상관성 분석

광주지역 환경 대기 중 PM-10과 대기 중금속 간의 상관관계를 살펴보기 위하여 SPSS 통계프로그램을 이용하여 Pearson 상관분석을 실시하였다. 대기 중금속 중 베릴륨은 검출되지 않아 분석에서 제외하였다. 분석

한 결과를 Table 6에 나타내었고, 모두 유의확률 0.01 이하로 유의한 것으로 분석되었다. PM-10과 가장 상관성이 높은 항목은 칼슘(0.69) 이었고, 철(0.62), 알루미늄(0.62), 마그네슘(0.60) 순으로 높게 나타났다. 이러한 항목들이 PM-10 농도 중 대부분을 차지하고 있기 때문으로 판단하였다. 대기 중금속 간 상관성을 살펴보면 칼슘-마그네슘(0.86), 알루미늄-칼슘(0.81), 망간-철(0.80), 알루미늄-마그네슘(0.78), 알루미늄-철(0.70)이 상관관계가 높게 나타났다. 이는 대부분 토양성분이나 도로비산먼지와 관련된 항목으로, 광주지역은 대규모 산업단지가 존재하지 않으므로 그 외 항목에 대한 농도가 높지 않아 다른 항목 간의 상관성이 나오지 않은 것으로 판단된다.

#### 3.2.2. 주성분분석 및 회귀분석

광주지역의 PM-10에 대한 대기 중금속의 인과관계를 알아보고자 회귀분석을 실시하였다. PM-10을 종속변수, 대기 중금속을 독립변수로 두고 다중선형회귀분석법을 이용하여 회귀식을 도출하고자 하였다. 그 전에 11개의 대기 중금속 항목을 주성분분석을 통해 비슷한 요인끼리 묶어 하나의 변수로 만들고, 이 변수를 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다.

주성분분석을 통해 3개의 인자로 나누었고, 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 인자 1은 PM-10에 대해 41.6%, 인자 2는 16.1%, 인자 3은 10.8%를 설명해주는 것으로 분석되었다. 즉, 대기 중금속을 3개의 인자로

**Table 7.** The factor loadings after PCA varimax-rotation

Heavy Metal	factor		
	1	2	3
Ca	<b>0.927</b>	0.162	0.104
Mg	<b>0.926</b>	0.082	0.082
Al	<b>0.883</b>	0.225	0.113
Mn	0.254	<b>0.866</b>	-0.038
Cr	-0.015	<b>0.796</b>	0.180
Fe	0.629	<b>0.690</b>	0.025
Cu	0.188	<b>0.663</b>	0.286
Pb	0.201	<b>0.528</b>	0.429
Cd	0.018	0.152	<b>0.749</b>
As	0.096	-0.036	<b>0.680</b>
Ni	0.070	0.312	<b>0.593</b>
Variance (%)	41.6	16.1	10.8
KMO test		0.799	
Bartlett's test		$X^2 = 12836.874$	

나뉘었을 때 총 68.5%를 설명 가능하다. 이러한 결과의 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 값이 0.799로 적합하다고 할 수 있으며, Bartlett의 구형성 검정 결과에서도 변수 간의 상관성이 인정되어 전반적으로 요인분석이 가능하다고 판단되었다( $X^2=12836.874$ ,  $p=0.000$ ). 인자 1은 칼슘, 마그네슘, 알루미늄이고, 이는 대표적인 토양기원 성분 대기 중금속으로 광주지역 PM-10에 가장 많이 포함되어 있는 항목이다. 인자 2는 망간, 크롬, 철, 구리, 납 성분이 높은 값을 보였으며, 이는 도로, 자동차에 의한 오염원으로 판단된다(Kim et al, 2005; Choi, 2008). 인자 3은 카드뮴, 비소, 니켈 성분으로 금속관련산업에서 주로 나오는 성분으로 광주지역에서는 매우 미량만 검출된 항목이다.

광주지역 대기 중금속의 주성분분석을 통해 도출된 3개의 인자를 이용하여 PM-10을 종속변수로 두고 다중선형회귀분석을 실시한 결과를 Table 8에 나타내었다. 수정된 R<sup>2</sup> 값이 0.576으로 이 회귀식으로 PM-10의 57.6%를 설명할 수 있고, 3개 인자 VIF 값이 모두 10을 넘지 않아 다중공선성은 존재하지 않았다. 이렇게 산출된 광주지역 PM-10에 대한 회귀식은 식 (7)과 같다. PM-10에 가장 많은 영향을 미치는 정도를 표준화 계수( $\beta$ )로 비교하면, 토양기원 성분인 인자 1, 도로 및 자동차 오염원에 의한 인자 2, 금속관련 산업에서 배출

되는 인자 3 순서로 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

$$PM-10 (\mu g/m^3) = 30.592 + 10.961 \times fac1(\mu g/m^3) + 6.151 \times fac2(\mu g/m^3) + 4.802 \times fac3(\mu g/m^3) \quad (7)$$

### 3.3. 위해도평가

#### 3.3.1. 발암성평가

광주지역 PM-10 중 대기 중금속의 발암성 중금속 노출에 따른 납, 카드뮴, 6가 크롬, 니켈의 초과발암위해도의 분석결과를 용도지역별로 Table 9에 정리하였다. 용도지역별 대기 중금속 평균(Mean) 농도의 초과발암위해도가 가장 높은 지역은 공업지역이었으며, 녹지지역, 주거지역 순으로 나타났다. 중간값과 평균값의 초과발암위해도는 모든 지점에서 본 연구에서 정한 허용위해도 수준(1.0E-06)을 넘는 항목은 없었다. 하지만 6가 크롬의 공업지역 RME 값은 1.0E-06 이상으로 무시할만한 아주 작은 위해도는 아닌 것으로 나타났다. 반면, 주거지역과 녹지지역에서는 RME 값이 1.0E-06 이하로 낮게 나타났다. 따라서 공업지역에서는 다른 대기 중금속에 비해 6가 크롬 농도에 대한 관리가 요구된다. 그 외 납, 카드뮴, 니켈의 모든 지점에서 무시해도 좋은 위해도인 1.0E-06 보다 낮게 나타나 발암위해도는 매우 낮은 것으로 확인되었다.

**Table 8.** Coefficients of independent variables in regression model for PM-10

Regression model	factor			Constant
	1	2	3	
B	10.961	6.151	4.802	30.592
$\beta$	0.617	0.366	0.274	
$p$	0.000	0.000	0.000	0.000
VIF	1.000	1.001	1.002	
Adjusted R <sup>2</sup>	0.576			

**Table 9.** Excess cancer risk estimates calculated of carcinogenic heavy metals in PM-10

HM	Excess Cancer risk								
	Industrial			Residential			Green		
	CTE <sup>a)</sup>	Mean	RME <sup>b)</sup>	CTE	Mean	RME	CTE	Mean	RME
Pb	2.6E-08	3.7E-08	1.1E-07	1.6E-08	2.3E-08	7.3E-08	1.9E-08	2.8E-08	8.9E-08
Cd	0.0E+00	5.6E-08	3.0E-07	0.0E+00	4.5E-08	2.2E-07	0.0E+00	5.1E-08	2.2E-07
Cr <sup>6+</sup>	1.2E-07	2.6E-07	<b>1.1E-06</b>	6.9E-08	1.2E-07	4.4E-07	9.2E-08	1.7E-07	5.5E-07
Ni	2.3E-08	5.0E-08	1.8E-07	0.0E+00	2.9E-08	1.3E-07	0.0E+00	3.6E-08	1.4E-07

<sup>a)</sup> Central tendency exposure, 50% percentile

<sup>b)</sup> Reasonable maximum exposure, 95% percentile

**Table 10.** Non-carcinogenic health risk estimates calculated of heavy metals in PM-10

HM	Hazard Quotient								
	Industrial			Residential			Green		
	CTE	Mean	RME	CTE	Mean	RME	CTE	Mean	RME
Cd	0.0E+00	1.8E-05	9.6E-05	0.0E+00	1.4E-05	6.9E-05	0.0E+00	1.6E-05	6.9E-05
Cr <sup>6+</sup>	9.1E-07	2.1E-06	8.4E-06	5.5E-07	9.8E-07	3.5E-06	7.3E-07	1.3E-06	4.4E-06
Mn	8.5E-06	1.3E-05	4.0E-05	3.8E-06	4.5E-06	1.1E-05	5.0E-06	5.8E-06	1.5E-05
HI <sup>a)</sup>	9.4E-06	3.3E-05	1.4E-04	4.4E-06	2.0E-05	8.3E-05	5.7E-06	2.3E-05	8.8E-05

<sup>a)</sup> HI represents the sum HQ value of four heavy metals.

### 3.3.2. 비발암성평가

비발암성평가는 참고 용량에 대한 평가가 되어 있는 6가 크롬, 카드뮴, 망간 3개의 항목에 대해 실시하였고, 각 용도지역별로 비발암 건강 유해영향 발생 가능성을 Table 10에 나타내었다. 공업지역, 주거지역, 녹지지역 모두 비발암위해도 지수(HQ)가 1보다 작은 수준으로 나타나, 비발암 독성에 대한 건강영향 발생가능성이 낮은 것으로 평가되었다. 용도지역별로 비교하면, 공업지역 > 녹지지역 > 주거지역 순으로 높게 나타났다. 발암위해도와 동일한 결과이며, 이는 앞서 용도지역별 대기

중금속 농도와도 같은 결과이다. 복수의 대기 중금속에 의한 비발암 독성 영향을 확인하기 위해 6가 크롬, 카드뮴, 망간의 HQ 합으로 구한 통합 비발암위해도(HI) 역시 1을 넘지 않았으므로 대기 중금속 노출에 의한 통합 비발암 위해 발생 가능성은 낮은 것으로 평가되었다.

## 4. 결론

광주지역 PM-10 중 대기 중금속의 2014년부터 2022년까지 농도분포 및 유해 중금속의 흡입으로 인한 발암위해도 및 비발암위해도를 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 지점별 농도 분포를 살펴본 결과, PM-10 농도는 평동 > 건국동 > 농성동 > 두암동 > 서동 > 노대동 순으로 높게 나타났으며, 대기 중금속 농도는 평동 > 농성동 > 건국동 > 두암동 > 서동 > 노대동 순으로 높게 나타났다. 농성동의 경우 녹지지역에 속하나, 측정소 주변에 2016년부터 2022년까지 대단지 신축 아파트 공사의 영향으로 농도가 높게 나왔다고 판단된다. 용도지역 별 농도 분포는 PM-10을 포함한 대부분의 대기 중금속 항목은 공업지역에서 가장 높게 나타났다.
- 2) 연도별 대기 중금속 농도 분포를 살펴보면, 납, 비소, 니켈은 최근 들어 감소하는 경향을 보였고, 크롬, 구리, 망간, 철, 알루미늄, 칼슘, 마그네슘은 모두 증가하는 경향을 보였다. 또한 계절별로 PM-10 및 대기 중금속 평균농도를 살펴보면 봄 > 겨울 > 가을 > 여름 순으로 높게 나타났다.
- 3) PM-10 및 대기 중금속 간의 상관성 분석 및 회귀분석을 실시한 결과, PM-10과 가장 상관성이 높은 항목은 칼슘(0.69), 철(0.62), 알루미늄(0.62), 마그네슘(0.60) 이었다. 대기 중금속 항목 간 상관성을 살펴보면 토양기원성분 간의 칼슘-마그네슘(0.86), 알루미늄-칼슘(0.81), 망간-철(0.80), 알루미늄-마그네슘(0.78), 알루미늄-철(0.70) 이 높게 나타났다. 또한 11개의 대기 중금속을 이용하여 주성분 분석을 실시하여 3개 인자로 나누었고, 이를 이용하여 PM-10에 대한 회귀식을 도출했다.
- 4) 광주지역의 위해도평가를 실시한 결과, 초과발암위해도는 평균 농도에서 모든 항목이 허용 가능한 위해 수준인 1.0E-06 이하로 발암 위해 가능성이 낮다고 평가되었다. 하지만, 6가 크롬은 농도에 따라 1.0E-06 이상으로 나와 지속적으로 모니터링이 필요해 보인다. 또한 비발암위해도에서도 모든 항목 및 통합 비발암 위해도가 1이하로 비발암 위해 발생 가능성이 낮은 것으로 평가되었다.

이와 같이 광주지역 대기 중금속에 대한 발암위해도 및 비발암위해도는 평균 농도에서 허용 가능한 수준 이하였으나, 산업단지 등 고농도 유해물질에 오래 노출되는 지역에서는 발암위해도가 기준치를 초과할 가능성이 있으므로 지속적인 농도의 모니터링이 필요한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 2023-01-03-002)을 받아 수행 되었습니다.

## REFERENCES

- Choi, D. M., 2008, A Source identification and characteristics by the airborne heavy metals of cement factory Outskirts area inhabitants, Master's Thesis, Hanyang university, Seoul, Republic of Korea.
- Choi, H., Lee, H., Kim, D. H., Lee, K. K., Kim, Y., 2022, Physicochemical and isotopic properties of ambient aerosols and precipitation particles during winter in Seoul, South Korea, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 29, 11990-12008.
- 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, 133-148.
- Donaldson, K., MacNee, W., 2001, Potential mechanisms of adverse pulmonary and cardiovascular effects of particulate air pollution (PM10), *Int. J. Hyg. Environ.*, 203, 411-415.
- International Agency for Research on Cancer (IARC), 2013, Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, Lyon, France.
- Jeon, B. I., 2012, Characteristics of wintertime Asian dust occurrence at Busan, *J. Environ. Impact Assess.*, 21, 581-591.
- Jeon, J. M., Kang, B. W., Lee, H. S., Lee, C. M., 2010, Health risk assessment of heavy metals in PM2.5 in industrial area, *J. Environ. Health Sci.*, 36, 294-305.
- Julia Griselda, C. B., Rosa Maria, C. B., Alberto Antonio, E. G., Claudio, G., and Stephanie, M., 2019, Trace metal content and health risk assessment of PM10 in an urban environment of Leon, Mexico, *J. Atmos.*, 10, 1-18.
- Jung, W. S., 2011, A Study on characteristics of air quality in Gwang-ju area, PhD Thesis., Chosun university, Gwangju, Republic of Korea.
- Kang, B. W., Kim, M. J., Beak, K. M., Seo, Y. K., 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, S. Y., Yang, W. H., Son, B. S., Choi, G. H., Jung, M. H., 2005, A Study on airborne particulate matter of a local area in Seoul, *J. Environ. Health Sci.*, 31, 301-308.

- Kim, Y. S., Park, I. S., 2010, Study on physical and chemical characteristics and effects of Asian dust, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea.
- Kim, J. S., Hong, S. M., Kim, M. S., Kim, Y. Y., Shin, E. S., 2014, Distribution characteristics of PM10 and heavy metals in ambient air of Gyeonggi-do area using statistical analysis, *J. Korean Soc. Atmos.*, 30, 281-290.
- Korea Ministry of Environment, 2005, Risk assessment of lead, cadmium and mercury, 82-119, Sejong, Republic of Korea.
- Kumar, D., Jugdutt, B.I., 2003, Apoptosis and oxidants in the heart, *J. Lab. Clin. Med.*, 142, 288-297.
- Lee, C. H., 2014, A Study on the composition of heavy metal and risk evaluation of in Changwon, Industrial City, PhD Thesis, Ulsan university, Ulsan, Republic of Korea.
- Lee, J. J., Kim, B. M., 2007, The risk assessment process of hazardous air pollutant, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 29, 296-501.
- Lee, Y. J., Jung, S. A., Jo, M. R., Kim, S. J., Park, M. K., Ahn, J. Y., Lyu, Y. S., Choi, W. J., Hong, Y. D., Han, J. S., Lim, J. H., 2014, Characteristics of PM chemical component during haze episode and Asian dust at Gwang-ju. *J. Korean Soc. Atmos.*, Vol. 30, 434-448.
- Leili, M., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Yunesian, M., Mesdaghinia, A., 2008, The study of TSP and PM<sub>10</sub> concentration and their heavy metal content in central area of Tehran, Iran, *Air Qual. Atmos. Hlth.*, 1, 159-166.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2010, The monitoring study on exposure level and biomarker of environmental pollutants in the Pohang industrial complex, 5<sup>th</sup> annual report, Incheon, Republic of Korea.
- National Institute of Environmental Research, 2019, Korean exposure factors handbook, Incheon, Republic of Korea.
- Oh, Y. H., Nam, I. S., Kim, S. D., Kim, D. S., Park, D. S., 2013, Health risk assessment for heavy metals in particulate matter(PM10, PM2.5) of indoor air in subway station, *J. Korean Living Environ. Sys.*, 20, 29-36.
- Park, J. Y., 1997, Risk assessment of heavy metals in PM10 using the spatial analysis of GIS in the Ulsan area, Thesis for Degree of Master, Hanyang university, Seoul, Republic of Korea.
- Shin, S. A., Han, J. S., Hong, Y. D., Ahn, J. Y., Moon, K. J., Lee, S. J., Kim, S. D., 2005, Chemical composition and features of Asian dust observed in Korea (2000~2002), *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21, 119-129.
- Song, H. B., Kwon, J. D., Park, S. K., Kim, E. K., Yoon, H. S., Ju, M. H., Bae, G. S., 2015, Concentrations of SPM and ambient hazardous heavy metals in an industrial complex area in Daegu city, *J. Environ. Health Sci.*, 41, 259-267.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2005, Guidelines for carcinogen risk assessment, Risk Assessment Forum (630-P03-001F), Washington D.C., United States.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA) IRIS (International Agency for Research on Cancer center), 2023, [https://iris.epa.gov/AtoZ/?list\\_type=alpha](https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha).
- Van Leeuwen, C. J., Hermens, J., L. M., 2001, Environmental risk assessment, 1<sup>st</sup> ed., Jung, M. G., Donghwa Pub., Paju, Republic of Korea.
- Vijayanand, C., Rajaguru, P., Kalaiselvi, K., Selvam, K. P., Palanivel, M., 2008, Assessment of heavy metal contents in the ambient air of the Coimbatore city, Tamilnadu, India, *J. Hazard Mater.*, 160, 548-553.
- Yang, Y. C., Lee, S. H., Park, B. H., Jo, G. U., Yoon, S. H., Park, J. Y., Jang, D., Chong, J. H., Bae, S. J., Jeong, S. K., 2020, Estimation of heavy metal contamination by PM<sub>10</sub> inflow pathways while Asian dust in Gwangju. *J. Environ. Sci. Int.*, 29, 55-68.

- 
- Researcher. Hye-Yun Na  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
nhy1207@korea.kr
  - Researcher. Youn-Goog Lee  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
inglyg@korea.kr
  - Researcher. Min-Cheol Cho  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
chomc234@korea.kr
  - Researcher. Hwan-gi Kim  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
khg9044@korea.kr

- 
- Researcher. Won-Hyeong Park  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
Byeolnim88@korea.kr
  - Director of Environmental Research Department.  
Gwang-Yeob Seo  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
sky521@korea.kr
  - Director of Micro dust Research Division. Se-Heang Lee  
Health and Environment Research Institute of Gwangju  
sehang@korea.kr