

연구논문

부산 공단지역 PM-10, PM-2.5 중 유해중금속 농도분포 및 위해성 평가 - 사상공단을 중심으로 -

최성화[†] · 최성우 · 김동영 · 차영욱 · 박승우 · 이서이 · 유은철

부산광역시보건환경연구원

Evaluation of Health Risk from Concentrations of Heavy Metal in PM-10 and PM-2.5 particles at Sasang Industrial Complex of Busan, Korea

Seong-Hwa Choi[†], Seong-Woo Choi, Dong-Yeong Kim, Young-Wook Cha, Seung-Woo Park, Seo-I Lee, and Eun-Chul Yoo

Team of Environmental Health, Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Busan 46616, Korea

Received August 2, 2021 / Revised September 23, 2021 / Accepted September 27, 2021

We investigated the distribution of hazardous heavy metals (As, Cr⁶⁺, Ni, Cd, Pb, and Mn) and estimated the health risk related to the heavy metals in fine dust (PM-10 and PM-2.5) of Sasang industrial complex, Busan, Korea. The concentration of fine dust in the industrial complex was 1.2 times higher than in a residential area, while harmful heavy metals showed a difference of at least 1.3 times (Cd) and up to 6.5 times (Ni). The concentration of fine dust and carcinogenic heavy metals in the industrial complex increased significantly compared to the residential area in spring (March to May) and winter (December to February) months. A risk assessment was performed using Monte-Carlo simulations containing a four-step procedure. During hazard identification, As, Cr⁶⁺, Ni, Cd, and Pb were categorized as human carcinogens and probable human carcinogens and evaluated for their levels of excess cancer risk. For concentrations of over 90% Cr⁶⁺ and As, the excess cancer risk was over 10⁻⁵ (1 person per 100,000). The non-cancer hazard index of As, Cr⁶⁺, Cd, and Mn was below the limit value of 1.

Key words: PM-10, PM-2.5, risk assessment, human carcinogen, heavy metal, industrial area

1. 서 론

대기 중 중금속은 입자상물질에 흡착되어 부유하는 것으로 알려져 있으며 유해 대기오염물질 중 중금속은 다른 물질에 비해 자체 독성이 높다는 특성 외에도 환경 내에서 소멸기간이 길며, 생태계 내에서 농축되어 인체에 흡수됨으로 인해 인체 위해성이 큰 물질로 분류되고 있어 다른 대기환경 오염물질에 비해 특별한 관리가 요구된다.¹⁾

대기 중 중금속 농도 분포는 지역별 특성과 환경적 요인으로 인해 다양하게 나타날 수 있다. 화학공장, 금속용융, 쓰레기소각, 화석연료 연소, 암석의 풍화, 산업 활동, 광산 그리고 그 밖의 과정 등을 통해 자연적이거나 인위

적인 발생원에서 대기 중으로 배출된다.²⁾ 그 중 독성이 있는 중금속은 지각물질과 같은 자연적인 배출원에 의한 배출보다는 인위적인 활동으로 인한 것이 더 많은 부분을 차지하는데, 산업단지의 경우 다양한 산업 활동에 의해 입자상물질에 포함된 중금속의 농도가 일반적인 대기 환경과 비교하여 매우 높은 편이다. 대기 중 중금속 성분은 분진이나 미세먼지 등에 결합되거나 2차, 3차 결합으로 대기 중에 체류하며 머무르게 된다.³⁾ 대기오염물질 배출원이 설치 및 운영되고 있는 각종 공단지역 및 산업시설에서는 미세먼지와 함께 다양한 형태의 금속물질이 대기 중으로 배출되고 있다. 특히 기존의 산업공정에 설치되어 가동 중인 대기오염물질 저감장치를 통과한 이후에

[†]To whom correspondence should be addressed.

도 100% 제거되지 않는 미세한 형태의 환경오염물질이 대기 중으로 배출되고 있다.^{3,4)}

미세먼지의 흡입은 천식과 같은 호흡기관련 질환 및 심혈관계 질환 발생과 저체중이나 조기출산과 같은 생식 관련 이상에도 관여하는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 또한 미세먼지에 포함되어있는 유해중금속은 위장과 신장, 혈액학적 및 신경계 독성 등에 영향을 미칠 뿐 아니라, 국제암연구소(IARC)에서는 대기 입자상 물질에 포함된 유해중금속을 특히 암을 유발하는 주요 성분으로 인식하고 있으며⁶⁾, 이는 대기오염과 중금속 물질의 건강 영향에 관한 여러 연구 결과들에서 제시되고 있다.⁷⁻¹⁴⁾ 또한, 발암성이 없는 중금속이라 할지라도 오랜 기간 어느 수준의 농도로 노출되는지에 따라 그 건강피해를 반드시 고려해 봐야 한다.

부산지역에서는 박¹⁰⁾에 의해 2008~2013년 부산 주거지역(연산동)을 중심으로 대기 중 PM-2.5의 조성 연구와 건강위해도 평가 연구가 이루어진 바 있지만, 위해가 더욱 우려되는 공업지역을 중심으로 인근 주민 건강에 미칠 영향에 대한 연구는 전무한 상황으로 관련 연구가 반드시 이루어져야 할 시점이라고 판단하였다.

이에 본 연구에서는 부산지역 대표 공업지역인 사상공업단지를 중심으로 최근 6년간 장기 수집된 미세먼지 및 중금속 농도 자료를 토대로 농도 분포 특성을 파악하고, 대기 유해중금속 노출에 의한 공업지역 인근 주민 건강에 미칠 영향에 대한 위해성 평가를 실시하여 보다 과학적이며 건강영향이 고려된 공업지역 대기환경 관리대책 수립을 위한 자료를 확보하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구기간 및 대상

본 연구는 부산 공단지역 미세먼지 중 유해중금속 농도 평가를 위해 부산광역시 보건환경연구원에서 운영하

는 대기환경종합측정소 중 사상 공업단지 내 확장동 측정소와 대조지역으로 주거지역인 (구)연산동 측정소의 최근 5~6년간의 PM-10, PM-2.5 농도와 PM-10과 PM-2.5에 흡착된 대기중금속 수동 분석 자료를 대상으로 하였다. PM-10의 경우 2014년에서 2019년까지 6년간의 조사 자료를 이용하였으며 PM-2.5의 경우 2013년에서 2017년까지 5년간의 조사 자료를 대상으로 하였다. 연구대상 항목은 PM-10, PM-2.5 농도 그리고 포함된 유해중금속 6개 항목(As, Cr, Ni, Cd, Pb, Mn)을 대상으로 하였다.

2.2. 연구지점 특성

연구대상 지점인 확장동 측정소는 부산의 대표적인 공업단지인 사상공업단지의 중심지에 있는 사상구 확장동 확장초등학교 옥상(시료채취구 높이:12.6 m)에 위치해 있으며 인근 직선거리 0.5~2 km 반경 내에 사상공단업체들이 밀집해 있다(Fig. 1). 2020년 기준 확장동 소재 대기배출시설은 총 210여개로 그 중 금속 및 도금 관련 업체가 40.9%, 자동차수리업 18%로 주종을 차지하고 있다. 또한 직선거리 1~2 km 반경 너머에는 아파트 등 주택단지가 인접하여 이어진다. 대조지역으로는 부산지역을 대표할 수 있는 연제구 연산동 소재 연제초등학교 옥상에 위치한 (구)연산동 측정소(시료채취구 높이: 12.4 m)를 선정하였으며, 시료채취지점 주변은 아파트, 빌라, 주택 등 전형적인 주거 밀집 지역으로 주변에 규모가 큰 대기오염물질 배출시설은 존재하지 않는다.

2.3. 시료채취 및 분석

미세먼지 농도측정은 Impactor type의 PM-2.5 전용 채취기를 이용해 흡인유량은 16.7 L/min의 유량으로 매일 7일~10일간 24시간 연속 채취하였으며, PM-2.5 중량농도 및 금속성분 분석을 위해 PTFE 여지(pore size 2.0 μm , 47 mm, Pall Corporation, USA)를 사용하였다. PM-10 농도 측정에는 하이볼륨에어샘플러(Micro PNS HVS-16,

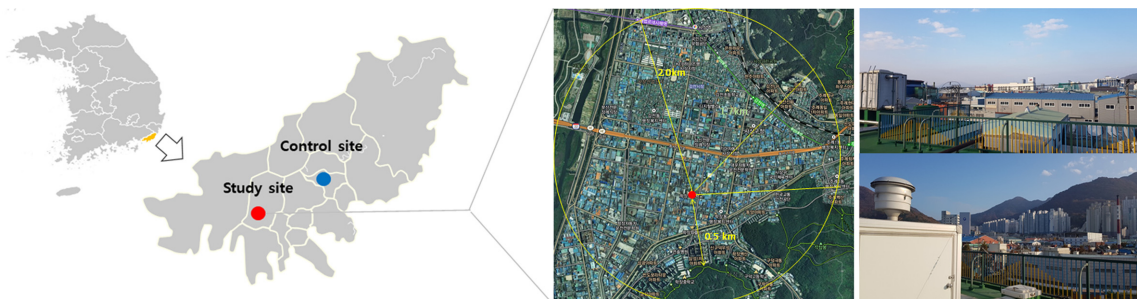


Fig. 1. Map of the Sasang industrial complex, Busan, and its surrounding area.

MCZ, Germany)로 1,130 L/min의 유량으로 매월 5일간, 24시간 연속 채취하였고 중량농도 및 금속성분 분석을 위해서는 15 cm 석영여지(QFH 150, Hahnemuehle, Germany)를 사용하였다. 각각의 여지는 시료채취 전후 항온 및 항습 조건이 유지되도록 24시간동안 데시케이터 내에 보관한 뒤 0.1 µg까지 측정할 수 있는 저울(ME5-F, Satorius, Japan)로 무게를 측정하였다.

PM-2.5 중 중금속분석을 위해 PTFE 여지를 분해용기(Teflon vessel)에 넣고 12% 질산(미량분석용) 10 mL를 가한 다음 분해용기의 마개를 닫아 마이크로웨이브오븐(Multiwave PRO, Anton Paar, Austria) 안에 넣고 600 W 200°C 20분간 추출한 후 5A 여지로 여과하여 최종 15 mL를 맞추었다. PM-10 중 중금속분석을 위해서는 15 cm 석영여지의 전용커터를 사용해 1/4로 절단해서 뚜껑이 있는 100 mL Pyrex 유리병에 넣고 1.0M 질산과 2.23M 염산의 혼합액(1:1)을 30 mL 가한 다음 뚜껑을 느슨하게 잠근 후 초음파 추출기(BC-1200W, BOSCO, Korea)에서 28 kHz로 100°C, 2시간 동안 추출하고 식힌 후 5A 여지로 거른 뒤 최종액량이 100 mL가 되도록 여지를 행구어 주었다. 각각 바탕시험을 위해 공여지를 동일한 방법으로 전처리 수행하였다. 전처리 후 유도결합플라즈마 분광광도계 ICP-OES(Varian 720-ES, USA)를 사용하여 중금속 농도를 분석하고 공여지 시료 값을 보정하여 중금속 농도값으로 사용하였다.

2.4. 인체위해성 평가

PM-10 및 PM-2.5에 포함된 중금속의 흡입에 의한 건강위해성을 비교 평가하기 위하여 가장보편적으로 받아들여지고 있는 위해성 평가방법인 미국국가연구위원회(NRC:National Research Council)와 국립과학원(NAS:National Academy of Science)에서 고안한 평가방법 등에 따라 유해성확인(Hazard identification), 용량-반응평가

(Dose-response assessment), 노출평가(Exposure assessment), 및 위해도결정(Risk characteristics)의 4단계로수행하였다.¹⁶⁾

2.4.1. 유해성 확인 (Hazard identification)

유해성확인 은 대상물질이 인체에 유해한 결과를 초래하는지 아닌지를 정성적으로 평가하는단계이며, 기존에 연구된 역학자료, 독성자료, in vivo 및 in vitro 실험자료, 물리화학적 성질에의한 실험자료 등을 종합하여 평가한다. 이 단계에서는 세계보건기구(WHO) 산하기구인 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on cancer)와 미국 환경청(USEPA,United States Environmental Protection Agency)의 발암분류표(Table 1)를 주로 이용하였다. IARC와 US EPA의 등급 분류 체계는 5가지그룹으로 나누는데, 각각 발암물질인 Group 1 및 Group A, 발암 가능성이 유력한 Group 2 및 Group B, 발암 가능성이 있는 Group 2B 및 Group C, 비분류 발암물질인 Group 3 및 Group D, 비발암성물질인 Group 4 및 Group E로 되어있다. US EPA의 경우 Group B는 발암성이 역학적으로 확인된 등급은 B1 그룹, 인체 실험자료는 불충분하지만 충분한 동물실험자료가 있는 등급을 B2 그룹으로 분류하여 IARC 분류체계보다 인체발암성 증거에 비중을 크게 두어 분류하는 점에서 다소 차이가 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾

2.4.2. 용량-반응평가(Dose-response Assessment)

용량-반응평가는 인체가 유해물질의 특정용량에 노출되었을 경우, 과연 얼마나 유해한 영향을 받을 확률이 있는지를 결정하는 단계이다. 일반적으로 역학연구, 제한된 인체실험연구, in vivo 및 in vitro 실험, 독성실험 및 여러가지 동물실험등의 자료가 이용된다.

본 연구에서는 IRIS와 US EPA 자료 등을 참고하여 발암물질과 비발암물질에 대한 분류 및 위해성평가의 기본

Table 1. Carcinogenic classification of IARC and US-EPA

IARC ^a		US-EPA ^b	
Group 1	Carcinogenic to human	A	Human carcinogen
Group 2A	Probably carcinogenic to human	B	Probable human carcinogen
		B1	Indicates limited human evidence
		B2	Indicates sufficient evidence in animal & inadequate or no evidence in human
Group 2B	Possible human carcinogen	C	Possible human carcinogen
Group 3	Not classifiable as to its carcinogenicity to human	D	Not classifiable as to human carcinogenicity
Group 4	Evidence of probably carcinogenicity to humans	E	Evidence of non-carcinogenicity for human

^aInternational Agency for Research on Cancer, ^bUnited State Environment Protection Agency

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

	Classification		Tumor type	Cancer assessment		Noncancer assessment		Reference
	US-EPA	IARC		Inhalation unit risk ^{a)} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	RfC ^{b)} (mg/m^3)	RfD ^{c)} ($\text{mg}/\text{kg}\cdot\text{day}$)		
As	A	1	Lung cancer	4.3E-03	1.5E-05	3.4E-04	US-EPA IRIS ²³⁾ Korea MOE(2008) ²⁴⁾	
Cr ⁶⁺	A	-	Lung cancer	1.2E-02	1.0E-04	3.0E-03	US-EPA IRIS ⁷⁾ Korea MOE(2008) ²⁴⁾	
Ni (RD) ^{e)}	A	1	Lung cancer	2.4E-04	NA ^{d)}	NA	US-EPA IRIS ²³⁾	
Cd	B1	1	Lung, trachea, bronchus cancer	1.8E-03	NA	5.0E-04	US-EPA IRIS ²³⁾	
Pb	B2	2A	-	1.2E-05	NA	NA	US EPA IRIS ²³⁾ Korea MOE(2005) ²⁰⁾	
Mn	D	-	-	NA	5.0E-05	1.4E-01	US-EPA IRIS ²²⁾	

^{a)}Excess lifetime cancer risk associated with breathing 1 μg of a chemical per 1 m^3 of air over a 70-year life span for a 70 kg human, IRIS, EPA

^{b)}Reference concentration for inhalation exposure

^{c)}Reference dose

^{d)}Not Assessed

^{e)}Refinery dust

자료와 독성값을 Table 2에 정리하여 나타내었다. 니켈의 경우 IRIS에서 제안한 니켈(Ni) 제련분진(refinery dust)에 의한 흡입단위위해도를 활용하였고, 납의 경우 현재 US EPA에서 발암분류 정량적인 위해도가 제시되어 있지 않은 관계로 TOX-RISK패키지를 이용하여 도출된 multistage 모델의 납(Pb)의 단위용량 당 발생 가능한 발암잠재력을 산출한 국내 연구결과를 인용²⁰⁾하여 본 연구에 적용하였다.

호흡단위위해도(Inhalation Unit Risk)는 사람들이 대기 중에서 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 존재하고 있는오염물질을 평생 동안 흡입했을 때 발암가능성의 상한값이다.²¹⁾참고섭취량(RfD, reference dose)은 만성 인체 노출 시 유해 영향이 일어나지 않을 것으로 예측되는 섭취참고치를 의미하고, 호흡노출참고치(Inhalation RfC)는 일반적인 인구집단이 평생 동안 같은 농도로 매일 흡입하였을 때, 해(deleterious effect)를 일으키지않는 수준의 농도예상치를 의미하는데, RfD와 RfC는 일반적으로비발암성물질의 위해도평가에 적용한다.²¹⁾

발암물질의 독성 값은 발암잠재력(CPF, cancer potency factor)으로 표현하는데, 이 값은 하루에 체중 1 kg 당 1 mg의 유해인자에 노출되었을 때 증가하는 발암확률을 의미한다. CPF는용량-반응곡선에서 95% 상한값에 해당하는 기울기, 즉 선형계수(Slope factor)로써 평균 체중의 건강 한성인이 어떤 화학물질의 단위노출용량($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)으로 오염된 환경매체를 평생 동안 접촉하고 살 때 이로 인해

발생 가능한 초과발암확률의 95% 상한값을 의미한다.²¹⁾ 본 연구에서는 호흡단위 위해도를 체중과 호흡율을 고려한 값으로 환산하여 사용하였다.²²⁾

2.4.3. 노출평가(Exposure assessment)

노출평가는 위험성이 확인된 어떤 물질에 대하여 여러 가지 환경매체들과의 접촉을 통해서 얼마만큼 노출되고 있는지 또는 앞으로 노출이 예상되는지를 정량적으로 파악하는 단계이다. 본 연구에서는 미세먼지 중 중금속 인체위해도를 평가하기 위해 대기를 통한 흡입 만을 고려하였고, 조사대상의 체중 및 호흡량, 평균수명, 노출빈도 및 노출기간 등은 국립환경과학원 위해성평가지침(2012)¹⁵⁾의 노출계수를 채택하였다.

위해도평가에 사용된 인자들은 Table 3에 나타내었다. 성인평균체중(Body weight)은 62 kg을 적용하였고, 호흡율(Inhalation rate)은 하루 중 호흡 시 흡입하는 공기의 양을 말하는 것으로 성인평균 13 m^3/day , 확률론적 위해성 평가를 위해 호흡율의 분포는 삼각분포를 적용하였다.^{9,10)} 기대여명은 어느 연령에 도달한 사람이 그 이후 몇 년 동안 생존할 수 있는가를 계산한 생존연령이다. 이중에서 특히 출생 시 평균 기대여명을 평균수명(lifetime)이라고 정의할 수 있다. 국내통계청시도별 기대여명자료(2017)에 따르면 부산광역시 인구의 기대수명(남: 78.9년, 여: 84.9년, 전체: 81.9년)을 확인할 수 있으나 대기오염물질 위해성

Table 3. Exposure factor of this study for risk assessment

Variable	Unit	Distribution Type	Factors	Source
Concentration of air pollutants	ng/m ³	Gamma	Gamma distribution estimates based on actual results	KoreaMOE2012 ⁵⁾
Body weight	kg	Lognormal	Mean=62 (S.D.=8.8)	
Inhalation rate	m ³ /day	Triangle	Maximum=14 Minimum=12 Likeliest=13	
Lifetime	year	Point	Carcinogenic = 70 Non-carcinogenic = 75	
Exposure frequency	day	Point	365	
Exposure period	year	Point	25	

평가 관련 이전 연구들^{9,10,12,25-28)}과의 결과 비교를 위해 위해도평가에서 주로 사용하는 평균수명 75년(발암성평가 70년)을 기준으로 정하였다. 노출빈도(Exposure frequency)는 365일, 노출기간(Exposure period)은 오염지역의 건강영향 예측의 경우에는 인구유동성, 거주기간을 고려하여 95% 신뢰구간 상한값인 25년을 가정하여 적용하였다.²²⁾ 확률론적 위해성평가를 위해 체중은 정규분포(normal distribution)를 가정하였다.^{9,10)}

발암물질의 경우 발암이나 만성영향으로 인한 평생노출로 가정하였으며, 기대수명을 사용하여 평생일일평균용량(LADD, Lifetime Average Daily Dose)을 다음의 식(1)을 이용하여 계산하였고, 인체에 노출된 양의 100%가 흡수된다고 가정하였다.

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

LADD: lifetime average daily doses
 C: contaminant concentration in inhaled air
 IR: inhalation rate(m³/day)
 EF: expose frequency(day/year)
 EP: expose period(year)
 BW: body weight(kg)
 LT: lifetime(day)

2.4.4. 위해도 결정(Risk characteristics)

위해도 결정은 용량-반응 평가와 인체 노출평가에서 산출된 정보를 종합하여 유해대기오염물질에 특정 농도로 노출되었을 경우, 개인이나 인구집단에서 유해한 영향 즉, 암과 같은 영향이 발생할 확률을 결정하는 단계이며 발암위해도 및 비발암위해도로 구분하여 결정한다.

본 연구에서는 As, Cr⁶⁺, Ni, Cd, Pb에 대한 발암위해도와 As, Cr⁶⁺, Cd, Mn에 대한 비발암위해도를 구하고자

하였다. Cr⁶⁺농도는 총 Cr 농도의 8%의 농도를 반영하여 평가하였다. 이는 강 등¹¹⁾에 의해 국내 산업단지에서 조사된 총 Cr 중 6가 크롬의 함유율은 평균 0.7~2.4%로 조사된 바 있고, 외국의 도시지역²⁹⁾에서 조사된 함유율 3~8%을 고려하여 총 Cr 중 6가 크롬 함유율 8%를 적용하여 평가한 연구^{1,9,30)}를 토대로 총 Cr 중 8%를 적용하였다.

본 연구에서는 단일 평가치 분석(fixed point analysis)과 단일평가치 분석에서 발생할 수 있는 불확실성과 가변성을 반영하기 위하여 확률론적 위해성 평가(probabilistic risk assessment) 방법을 함께 실시하였다. 단일 평가치 분석은 각 노출변수에 대해 단일 값 농도를 사용하여 대표적인 위해도를 분석하는 간단한 방법으로 중간값(CTE, central tendency exposure), 평균값(mean exposure) 및 95% UCL(upper confidence level) 값인 RME(reasonable maximum exposure)값을 이용하여 평가를 수행하였다. CTE 농도는 일반인들의 평균적인 노출 경향을 의미하는 것이고, RME 농도는 고노출 수준의 경향을 나타내는 평가 방법이다.³¹⁾ 확률론적 위해성평가를 위해서는 Crystall ball(Clorado, Denver, USA, ver 11.1.2.1)을 활용하여 Monte-carlo simulation을 실시하였다. Monte-carlo simulation을 통해 검출된 전체 농도자료를 대상으로 10,000번의 반복 실행을 수행하여 위해도 범위와 발생확률에 대한 결과값(25%, 50%, 75%, 90%, 95%, 100% 값)을 산출하여 발암성 위해도 분포수준을 파악하였다.¹²⁾

2.4.4.1. 발암평가를 위한 위해도 결정

발암물질의 경우 용량-반응평가를 통해 산출된 발암잠재력과 인체 노출평가를 통해 얻어진 일일평균인체노출량을 곱하여 초과발암위해도(Excess Cancer risk)를 산정하게 된다. US EPA에서는 허용위해도를 자연적으로 발생할 수 있는 위해수준 1.0E-06(백만명당 1명의 초과발암확률)을 무시해도 좋을 아주 작은 위해도(de minimis

risk)라고 규정한다. 반면, 법적인 규제가 필요하다고 판단되는 위해수준은 1.0E-04로 보고 있다. 일반적으로 발암성 물질의 위해도를 초과발암위해도라고 하면 인구 백만명당 1명~만명당 1명의 초과발암 확률수준에서 그 허용농도를 결정하게 된다²²⁾. 본 연구에서는 허용위해도 수준 1.0E-05와 비교하여 이보다 높은 수준이면 위해성이 있음을 의미하며 낮은 수준이면 위해성이 낮음으로 간주하였다.

발암위해도는 유해오염물질에 장기간의 인체 노출의 결과 암이 발생할 수 있는 확률을 10의 (-)지수값으로 산출하며, 이 위해도는 산출된 평생일일평균용량(LADD)과 한국인의 평균체중 및 평균 호흡량으로 보정된 발암잠재력(CPF, cancer potency factor)을 곱하여 발암위해도를 산출하였다(식 2). 또한 CPF는 식 (3)을 이용하여 호흡단위위해도를 체중과 호흡율을 고려한 값으로 환산하여 사용하였으며, 성인이 70년 평생동안 20 m³/day의 호흡률로 발암물질에 노출되었을 때의 위해도를 나타내는 것이다.^{26,32)}복수의 발암물질(multiple carcinogenic chemicals)의 흡입에 기인한 통합발암위해도는 CTE 및 RME 상태의 각 오염물질별 단일 발암위해도를 합하여 산출하였으며, 확률론적 통합발암위해도 역시 각각의 확률론적 단일 발암위해도를 합하여 산출하였다.⁹⁾

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

LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)

CPF : Cancer potency factor(mg/kg/day)⁻¹

$$\text{CPF (mg/kg/day)}^{-1} = \quad (3)$$

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

2.4.4.2. 비발암 평가를 위한 위해도 결정

비발암평가를 위한 위해도 결정은 용량-반응 평가를 통해 산출된 평생 일일평균 섭취량을 참고 섭취량(RfD)으로 나누어 평가할 수 있으며, 비발암위해도는 위험성 몫인 HQ(Hazard Quotient) 지수로 나타낸다(식 4). 또한 모든 오염물질에 따른 비발암위해도는 이들 HQ 지수들을 총합한 HI(Hazard Index) 지수로 나타낸다(식 5). 이들 수치가 1을 초과하는 경우에는 건강상 위해영향(독성)이 발생할 가능성이 있음을 나타내며, 1 이하인 경우에는 위해영향 발생 가능성이 낮음을 의미한다. 그러나, 위해도 지수의 크고 작음에 따라 위해도의 정도는 평가되지 않는다.²²⁾비발암성 물질 평가를 위해 사용되는 RfD가 없는 경우에는 식 (6)을 이용하여 RfC를 산출하였다.^{25,26)}복수

의 발암물질 흡입에 기인한 통합 발암 위해도는 CTE, RME 상태의 각 오염물질별 단일 발암 위해도를 합하여 산출하였으며, 확률론적 통합 발암위해도는 역시 각각의 확률론적 단일 발암 위해도를 합하여 산출하였다. 복수의 비발암물질(multiple non-carcinogenic chemicals)의 흡입에 의한 통합 비발암위해도 지수는 CTE 및 RME 상태의 각 오염물질별 단일 비발암위해도 지수를 합하여 산출하였다.⁹⁾

$$\text{HQ} = \text{LADD}/\text{RfD} \quad (4)$$

LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)

RfD : Reference dose (mg/kg/day)

$$\text{HI} = \sum \text{HQs} \quad (5)$$

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

RfC : reference concentration for inhalation exposure (mg/m³)

3. 결과 및 고찰

3.1. 연구대상 농도특성

3.1.1. 미세먼지 및 중금속 농도 분포

부산의 대표 공업지역(학장동)과 대조지역인 주거지역(연산동)의 중금속 농도 분포 특성을 파악하기 위해 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 농도 및 미세먼지에 포함된 유해중금속(As, Cr⁶⁺, Ni, Cd, Pb, Mn)의 CTE(=50% 백분위수), RME(=95% 백분위수), Mean(평균) 및 S.D.(표준편차), 유의성 분석결과(p-value) 등을 Table 4에 정리하였다. 통계적으로 공업지역과 주거지역과의 농도 차이를 확인하기 위해 t-test를 통해 유의성을 분석한 결과, 두 지역은 비소(As) 농도(p > 0.05)를 제외하고는 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 및 유해중금속 농도 분포에 있어서 유의한 차이(p < 0.05)가 있음을 확인하였다. As의 경우 공업지역과 주거지역 간 농도 분포 차이를 나타내지 않았는데, 이는 경기도 지역 대기 중 미세먼지 및 중금속 분포 특성 연구¹³⁾에서도 공단지역(안산)이 주거지역(수원)에 비해 Pb이 1.9~2.2배, Ni이 1.7배~2.6배 높게 나타난 것에 비해, As는 지역 간 농도차가 거의 없다고 한 것과 일치하는 결과였다.

공업지역의 PM-10 및 PM-2.5 평균 농도는 주거지역에 비해 1.2배 정도 높는데 반해 포함하고 있는 중금속은 주거지역에 비해 1.3~6.5배 정도 높은 수준으로 나타났으며, Ni(2.8배~6.5배) > Mn(3.9~4.4배) > Cr⁶⁺(1.6~2.1배)

Table 4. Concentrations of PM-10, PM-2.5 and their heavy metals in each industrial and residential area (unit: ng/Sm³)

	Industrial area					Residential area					<i>p</i> -value ^b
	CTE ^c	RME ^d	Mean	S.D. ^e	N	CTE	RME	Mean	S.D.	N	
PM-10 ^a	47.0	85.0	49.0	20.0	360	39.0	77.0	41.7	17.7	339	0.000
As	3.4	15.7	4.9	5.7	360	3.0	15.2	4.6	6.0	339	0.286
Cr ⁶⁺ (Cr×8%)	1.3	3.0	1.5	0.9	360	0.1	0.4	0.7	0.1	339	0.000
Ni	12.4	38.1	15.5	12.6	360	1.7	6.5	2.4	2.1	339	0.000
Cd	0.6	2.3	0.8	1.2	360	0.3	1.8	0.6	0.8	339	0.000
Pb	25.9	61.1	29.6	17.6	360	14.0	39.7	17.3	13.1	339	0.000
Mn	66.5	191.9	83.1	61.9	360	18.6	49.2	21.2	14.3	339	0.000
PM-2.5 ^a	30.0	65.0	32.4	15.7	300	23.7	53.5	27.1	14.6	269	0.000
As	0.9	15.3	3.4	5.5	300	0.2	14.1	2.9	5.1	269	0.156
Cr ⁶⁺ (Cr×8%)	1.0	4.7	1.6	2.2	300	0.1	1.1	0.0	0.7	269	0.000
Ni	7.8	35.5	12.2	15.2	300	1.5	11.9	4.3	12.6	269	0.000
Cd	0.5	2.2	0.7	1.2	300	0.3	1.6	0.4	0.7	269	0.001
Pb	18.1	65.7	24.3	21.7	300	9.5	40.2	12.9	13.1	269	0.000
Mn	48.2	177.8	65.8	62.7	300	9.4	38.6	14.9	21.8	269	0.000

^aunit: μg/m³, ^b*p* < 0.05, ^cCentral tendency exposure, 50% percentile, ^dReasonable maximum exposure, 95% percentile, ^eStandard deviation

> Pb(1.7배~1.9배) > Cd(1.3~1.8배) 순으로 나타났다. 대구 안심연료단지 직접영향 권역이 대조지역에 비해 Cr(3.6배) > Mn(2.1배) > Cd(1.9배), Ni (1.9배) > Pb(1.4배) 농

도 수준을 나타낸 것³³⁾과 비교하면, 공업지역 업종 특성에 따른 중금속 농도분포 차이를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 대상으로 한 사상공단의 경우 금속 및 도금관련

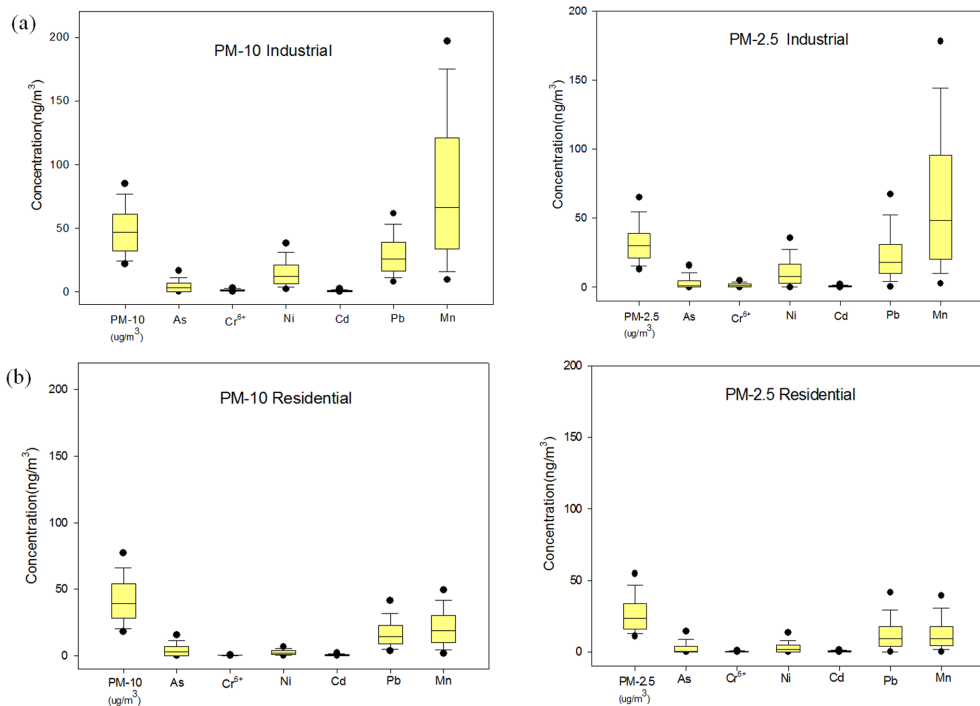


Fig. 2. Boxplots of PM-10, PM-2.5, and the heavy metals present in (a) industrial area and (b) residential area. The central horizontal bars represent median values. The lower and upper limits of the box are the first and third quartiles, respectively. Black dots represent 5th and 95th percentile values.

업체의 밀집으로 Ni, Mn, Cr⁶⁺ 농도가 대조지역에 비해 높게 나타났으며, 강 등¹⁴이 산업단지 중금속 조사에서 반월과 시화산업단지는 도금산업으로 인해 Cr과 Ni 농도가 높다고 한 것과 유사하였다.

공업지역과 주거지역 간 중금속 농도 분포를 보다 명확히 보기 위하여 그린 상자도표(Fig. 2)에서도 공업지역 Ni와 Mn의 농도분포 범위가 주거지역 분포와 대비되는 것을 확인할 수 있었다. Ni의 경우 주거지역 PM-10과 PM-2.5 중 중앙값과 95% 백분위수(팔호)가 1.7(6.5)ng/m³

과 1.5(11.9)ng/m³를 나타내며 반해, 공업지역에서는 각각 12.4(38.1)ng/m³ 와 7.8(35.5)ng/m³로 차이를 나타내었다. Mn도 주거지역 PM-10과 PM-2.5 중에는 18.6(49.2) ng/m³ 과 9.4(38.6) ng/m³ 농도 범위를 나타낸 것에 비해 공업지역에서는 각각 66.5(191.9) ng/m³, 48.2(177.8) ng/m³를 나타내어, 연구대상으로 한 공업지역 미세먼지 중에는 대조지역에 비해 Ni와 Mn이 다른 유해중금속에 비해 뚜렷하게 고농도를 나타내고 농도분포 범위도 넓게 존재함을 확인할 수 있었다.

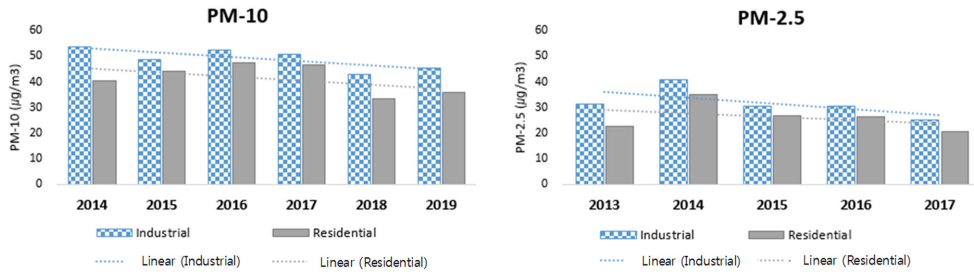
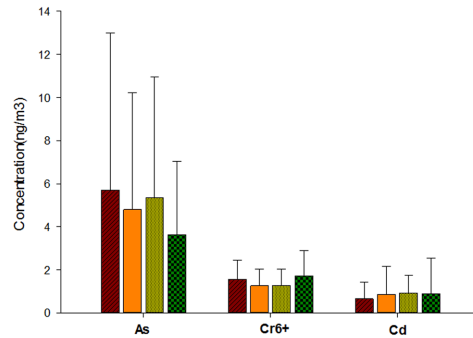
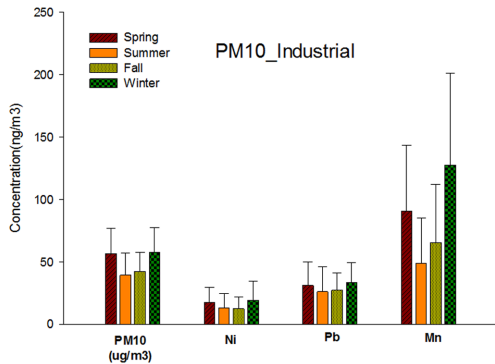


Fig. 3. Annual variation of PM-10 and PM-2.5 concentration during study period.

a) PM-10 - Industrial



b) PM-2.5 - Industrial

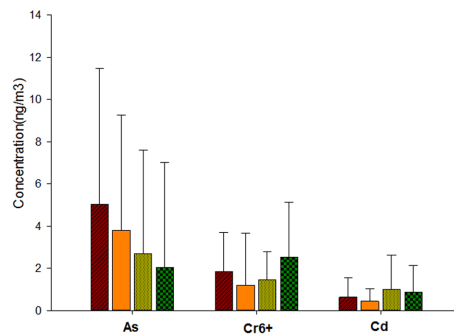
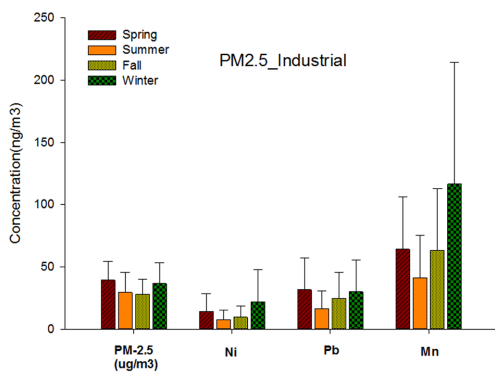


Fig. 4. Seasonal variation in the distribution of PM-10, PM-2.5, and heavy metals in the Sasang industrial complex. Error bars indicate standard deviations.

3.1.2. 연도별 미세먼지 분포

Fig. 3은 PM-10(2014~2019) 및 PM-2.5(2013~2017)에 대한 공업지역과 주거지역 연도별 평균농도를 나타낸 것이다. 연도별 PM-10의 공업지역/주거지역 연평균 농도 비는 평균 1.2배(1.1~1.3배), PM-2.5도 평균 1.2배(1.1~1.4배)로 비슷하게 나타났다. 연도별 PM-10, PM-2.5 농도 증감 추이 또한 유사한 경향으로 나타났으며, 추세를 통해 공업지역과 주거지역에서 최근 5~6년간 PM-10과 PM-2.5 모두 대체적으로 감소하는 경향을 보였는데 이는 대기배출시설에 대한 지속적 관리 강화 및 저감시설 설치 확대 등의 영향이 있었을 것으로 판단한다.

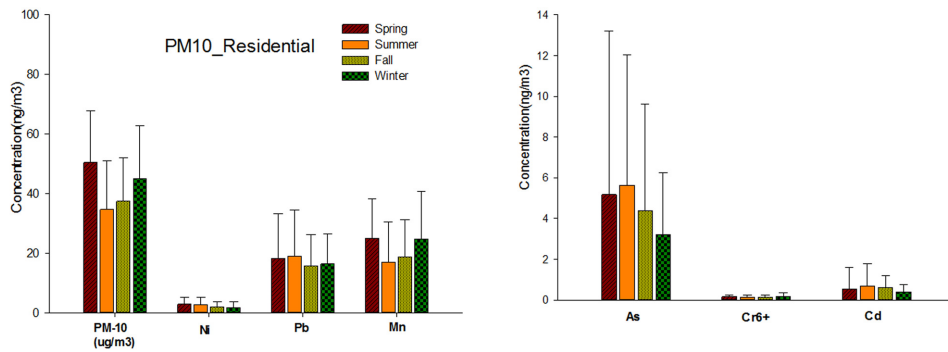
3.1.3. 계절별 미세먼지 및 중금속 농도 분포

계절별 미세먼지 및 중금속 농도 분포를 확인하기 위해 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)로 구분하여 미세먼지 및 중금속의 평균농도와 표준편차를 공업지역(Fig. 4)과 주거지역(Fig. 5)을 구분하여 나타내었다. 공업지역에서는 PM-10과 PM-2.5 모두 겨울~봄

사이 농도가 증가하였다가 여름~가을 사이 농도가 감소하는 경향을 나타내었으며 포함된 중금속 중 Ni, Pb, Mn, Cr⁶⁺의 농도가 미세먼지 증감 경향과 비슷하게 나타났다. 반면, 주거지역에서는 미세먼지(PM-10, PM-2.5)의 농도 분포와 각 중금속 간 농도분포가 다양하여 계절적 경향성을 찾기가 어려웠다. 대구 안심연료단지 주변지역 직접 영향 권역 미세먼지 및 중금속 조사³³⁾에서 겨울철이 여름~가을에 비해 1.4배~1.9배 높게 나타난 것으로 제시하여, 공업지역의 겨울철 농도 증가 경향이 본 연구와 유사하였다.

As 농도의 경우 특징적으로 공업지역과 주거지역 모두에서 겨울 농도가 봄~가을 보다 낮게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 앞서 3.1.1에서 As 농도는 공업/주거지역 간 분포의 차이를 확인하지 못했으나 계절적 분포 차이가 있음을 보여주는 결과라고 하겠다. 이는 As가 토양과 광석 등 자연계에 널리 분포되어 있고, 벽지, 조화(artificial flower), 색소, 그리고 살충제, 구충제, 목제 보존제 등에서 기원하는 바³⁴⁾, As가 특정 배출원 보다는 살

a) PM-10 - Residential



b) PM-2.5 - Residential

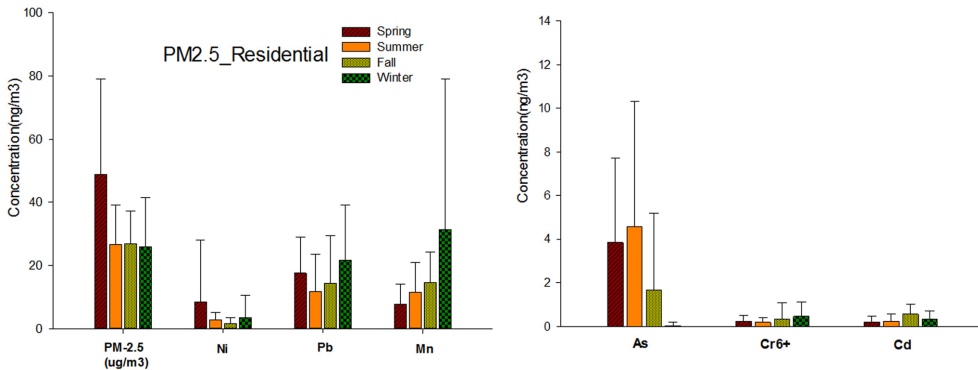


Fig. 5. Seasonal variation in the distribution of PM-10, PM-2.5, and heavy metals in residential area. Error bars indicate standard deviations.

총계 살포 시기, 인위적인 인테리어, 가공 및 제작 시기 등과도 연관되어 있을 것으로 추측한다. 경기도 지역 PM-10과 중금속의 계절적 중금속 변화 특성연구¹³에서도 겨울~봄철(12~5월)이 여름~가을(6~11월) 보다 PM-10은 1.7배, Pb와 As는 각각 3.5배와 3.4배로 높게 나타나, Pb와 As의 분포는 계절적 경향이 있음을 나타낸 바 있는데

As의 농도분포가 겨울철에 감소하는 경향을 보인 분 연 구결과와는 다소 차이가 있었다.

3.1.4. 미세먼지 농도와 중금속 항목 간 상관성 분석
 공업지역과 주거지역에서의 미세먼지 농도와 중금속 항목 간 상관성 분석 결과는 Table 5와 Table 6에 각각 나

Table 5. Correlation coefficients between the measured heavy metal concentrations in PM-10 and PM-2.5 in the industrial area

Industrial	PM-10						
	PM-10	As	Cr ⁶⁺	Ni	Cd	Pb	Mn
PM-10	1.000						
As	0.170	1.000					
Cr ⁶⁺	0.497	-0.061	1.000				
Ni	0.524	-0.024	0.914	1.000			
Cd	0.142	0.464	0.032	0.014	1.000		
Pb	0.365	0.330	0.397	0.349	0.500	1.000	
Mn	0.650	-0.015	0.734	0.726	0.029	0.350	1.000
Industrial	PM-2.5						
	PM-2.5	As	Cr ⁶⁺	Ni	Cd	Pb	Mn
PM-2.5	1.000						
As	0.119	1.000					
Cr ⁶⁺	0.197	0.008	1.000				
Ni	0.257	0.017	0.703	1.000			
Cd	0.073	0.360	0.059	0.055	1.000		
Pb	0.310	0.204	0.270	0.292	0.429	1.000	
Mn	0.240	-0.025	0.636	0.681	0.112	0.390	1.000

*Correlation is significant at the 0.01 level

Table 6. Correlation coefficients between the measured heavy metal concentrations in PM-10 and PM-2.5 in the residential area

Residential	PM-10						
	PM-10	As	Cr ⁶⁺	Ni	Cd	Pb	Mn
PM-10	1.000						
As	0.115	1.000					
Cr ⁶⁺	0.482	0.111	1.000				
Ni	0.493	0.078	0.669	1.000			
Cd	0.100	0.641	0.001	0.099	1.000		
Pb	0.412	0.543	0.225	0.233	0.722	1.000	
Mn	0.626	0.289	0.737	0.590	0.104	0.307	1.000
Residential	PM-2.5						
	PM-2.5	As	Cr ⁶⁺	Ni	Cd	Pb	Mn
PM-2.5	1.000						
As	0.121	1.000					
Cr ⁶⁺	-0.002	0.179	1.000				
Ni	0.150	0.215	0.051	1.000			
Cd	0.098	0.454	0.133	0.050	1.000		
Pb	0.301	0.374	0.081	0.100	0.555	1.000	
Mn	0.117	-0.030	0.340	0.198	0.105	0.238	1.000

*Correlation is significant at the 0.01 level

타내었다. 공업지역과 주거지역 통틀어 대체적으로 PM-10과 중금속 간의 상관성이 PM-2.5와 중금속 간 상관성에 비해 높은 것으로 나타났다. 앞서 미세먼지와 계절별 증감 경향이 유사했던 Mn, Ni, Cr⁶⁺, Pb 항목의 경우, 미세먼지와 상관성이 Mn (r=0.650) > Ni (r=0.524) > Cr⁶⁺ (0.497) > Pb(0.365) 순으로 높게 나타났다. 배출지역별 분포의 차이보다 계절별 분포 특징을 일부 나타냈었던 As 항목의 경우 미세먼지와 상관계수가 0.115~0.121로 매우 낮게 나타났다. 중금속 항목 간 상관성에서는 공업지역 PM-10 중 Cr⁶⁺과 Ni의 상관계수가 0.914로 가장 높고, Mn과 Cr⁶⁺(r=0.704) 그리고 Mn과 Ni 간 상관성(r=0.703)이 높게 나타났다. 이는 김 등¹³⁾이 경기도 지역 대기에서 PM-10과 Mn 및 Ni와의 상관계수가 각각 0.82, 0.61로 높게 나타난 것과 일치하였으나, PM-10과 Cr과의 상관계수는 0.28로 낮고 As(0.78), Pb(0.60) 항목과의 상관성이 높게 나타난 결과와는 다소 차이가 있었다.

3.1.5. 미세먼지 농도구간별 중금속과의 상관성 분석
미세먼지 농도구간별로 포함된 중금속과의 상관성에 차이가 있는지 확인하고자 환경부 통합대기환경지수(CAI, Comprehensive air-quality index)에서 정한 미세먼지 농도 구간으로 구분하여 상관성 변화를 검토하였다. CAI는 대기오염도 측정치를 국민이 쉽게 알 수 있도록 하고 대기오염으로부터 피해를 예방하기 위한 행동 지침을 국민에게 제시하기 위하여 대기오염도에 따른 인체 영향 및 체감오염도를 고려하여 개발된 대기오염도 표현방식³⁵⁾으로 그 중 PM-10 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 PM-2.5 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 각각 “좋음(PM-10 \leq 30, PM2.5 \leq 15)”, “보통(31 \leq PM-10 \leq 80, 16 \leq PM2.5 \leq 35)”, “나쁨(81 \leq PM-10 \leq 150, 36 \leq PM2.5 \leq 75)”, “매우 나쁨(151 \leq PM-10

\leq 600, 76 \leq PM2.5 \leq 150)”의 농도 구간으로 구분한다. 본 연구에서는 해당데이터가 없는 PM-10 “매우 나쁨” 구간을 제외하고 각 미세먼지 농도별로 구간을 구분하여 중금속 항목과의 상관성 분석을 실시하였다.

3.1.5.1. PM-10

PM-10 농도구간별 상관계수 변화를 Fig. 6에 나타내었다. PM-10 “좋음(Good)”에서 “보통(Normal)”, “나쁨(Bad)” 구간으로 갈수록 중금속 항목 간 상관계수가 Ni-Cr⁶⁺(0.86 \rightarrow 0.94), Mn-Cr⁶⁺(0.66 \rightarrow 0.90) 그리고 Mn-Ni(0.74 \rightarrow 0.88)로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, PM-10 농도와 중금속 항목과의 상관성도 PM-10 “좋음” 구간 보다 “나쁨” 구간에서 증가한 것을 보여주고 있으며 특히, PM-10 “나쁨” 구간에서 사상공단 주요 업종인 도금과 금속 관련 항목인 Cr⁶⁺, Ni, Mn항목 간 상관성이 각각 Mn-Cr⁶⁺(0.90) Mn-Ni(0.88), Ni-Cr⁶⁺(0.92) 로 더욱 높아진 것을 확인할 수 있었고, As와의 상관성도 “좋음~보통 구간”(0.11) 보다 “나쁨” 구간(0.38)에서 다소 증가 한 것으로 나타났다.

3.1.5.2. PM-2.5

Fig. 7은 PM-2.5 농도구간별 상관계수 변화를 나타낸 것이다. PM-2.5 “좋음(Good)”에서 “나쁨(Bad)” 구간으로 갈수록 Mn과 Cr⁶⁺의 상관계수(0.53~0.66)는 거의 일정하였고 Mn과 Ni의 상관계수는 증가(0.29 \rightarrow 0.67)하였다. 또한, PM-2.5 “매우나쁨(Very bad)” 구간에서는 중금속 항목 간 상관성이 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었는데 그 중 Cd와의 상관성을 제외하고는 대체로 항목 상관성이 낮았던 Pb과 다른 항목 간 상관성이 Pb-Cd(0.86), Pb-Mn(0.83), Pb-Ni(0.67), Pb-Cr⁶⁺(0.53) 으로 나타나 다른 농

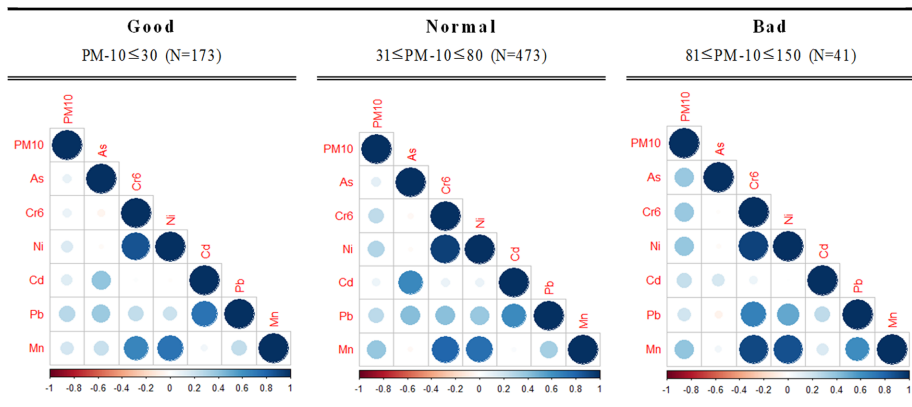


Fig. 6. Correlation coefficients of heavy metal concentrations from PM-10.

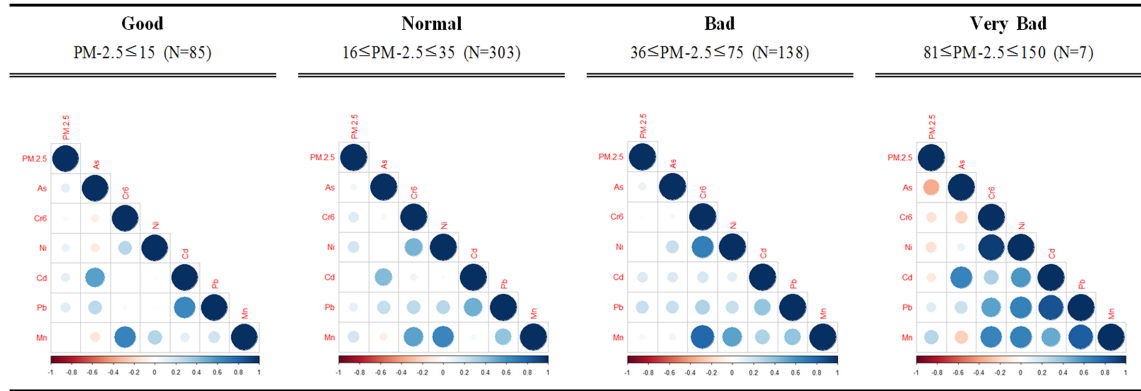


Fig. 7. Correlation coefficients of heavy metal concentrations from PM-2.5.

도구간에 비해 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 이는 앞선 결과에서 지역적, 계절적 특성이 뚜렷하지 않았던 Pb 농도가 PM-2.5 농도 수준과는 연관성을 일부 나타내고 있음을 보여주는 결과라 하겠다.

3.2. 위험도 평가

3.2.1. 발암성평가

3.2.1.1. PM-10

PM-10에 함유된 발암성 중금속의 노출에 따른 초과발암위험도의 단일평가치 분석 및 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 확률론적 분석 결과를 Table 7에 정리하였다.

As의 노출로 인한 초과발암 위험도는 평가 대상 항목

중 발암위험도가 가장 높은 것으로 나타났다. 단일평가치 분석 평균농도 노출 시에는 공업과 주거지역 모두 RME (상위 5%농도) 노출 시 공업지역에서 1.8E-5, 주거지역에서 1.7E-5로 본 연구에서 정한 허용위해도 기준인 1.0E-05(100,000명당 1명이 암에 걸릴 확률)를 초과하였으며, 몬테카를로 분석 결과에서는 90% 이상에서 1.0E-05 수준을 초과하는 것으로 조사되었다. 또한 25%에서도 무시해도 좋을 만한 위험도 기준인 1.0E-6보다는 높게 나타나 다른 중금속에 비해 관리가 요구되는 항목임을 확인할 수 있었다. 또한, As농도는 앞서 기술한 바와 같이 농도분포 특성상 지역적 분포의 차이가 없어 공업과 주거지역 모두 As 고농도 노출에 의해서는 발암위험도가 있

Table 7. Excess cancer risk estimates calculated using fixed-point (CTE, RME, mean) and Monte-Carlo simulations of carcinogenic heavy metals in PM-10

		Excess Cancer risk								
		Fixed point			Monter Carlo					
		CTE ^a	RME ^b	Mean	Percentiles					
					25	50	70	90	95	100
As	Industrial	3.8E-6	1.8E-5	5.5E-6	1.7E-6	4.3E-6	6.9E-6	1.2E-5	1.5E-05	4.4E-5
	Residential	3.4E-6	1.7E-5	5.2E-6	1.3E-6	4.0E-6	6.7E-6	1.2E-5	1.5E-5	4.3E-5
Cr ⁶⁺	Industrial	4.0E-6	9.3E-6	4.6E-6	2.5E-6	4.1E-6	5.7E-6	8.7E-6	1.1E-5	2.4E-5
	Residential	3.8E-7	1.2E-6	4.9E-7	2.2E-7	3.9E-7	5.9E-7	1.0E-6	1.3E-6	6.8E-6
Ni	Industrial	7.8E-7	2.4E-6	9.8E-7	4.3E-7	8.0E-7	1.2E-6	2.0E-6	2.6E-6	8.7E-6
	Residential	1.1E-7	4.1E-7	1.5E-7	4.5E-8	1.2E-7	2.0E-7	3.6E-7	4.4E-7	1.0E-6
Cd	Industrial	2.8E-7	1.1E-6	4.0E-7	1.4E-7	3.2E-7	4.9E-7	8.2E-7	1.0E-6	2.5E-6
	Residential	1.4E-7	8.5E-7	2.7E-7	7.2E-8	2.0E-7	3.3E-7	5.7E-7	7.3E-7	1.9E-6
Pb	Industrial	8.1E-8	1.9E-7	9.3E-8	5.3E-8	8.3E-8	1.2E-7	1.7E-7	2.0E-7	5.3E-7
	Residential	4.4E-8	1.2E-7	5.4E-8	2.8E-8	4.6E-8	6.6E-8	1.1E-7	1.4E-7	5.0E-7
Total	Industrial	8.9E-6	3.1E-5	1.2E-5	4.8E-6	9.6E-6	1.4E-5	2.4E-5	3.0E-5	8.0E-5
	Residential	4.1E-6	2.0E-5	6.2E-6	1.7E-6	4.8E-6	7.9E-6	1.4E-5	1.8E-5	5.3E-5

^aCentral tendency exposure, 50% percentile, ^bReasonable maximum exposure, 95% percentile

는 것으로 나타났다.

Cr⁶⁺ 노출에 의한 초과발암위해도는 주거지역의 경우 모든 수준에서 1.0E-05를 넘는 농도가 없었다. 공업지역의 경우, 단일평가에서는 1.0E-05 수준을 넘는 농도가 없었으나, 몬테카를로 분석 결과 95% 이상에서 1.0E-05 수준을 넘어 허용 발암 위해도를 초과하는 것으로 나타났다.

Ni의 노출에 의한 초과발암위해도는 공업지역과 주거지역 모두 1.0E-05 를 넘는 수준은 나타나지 않았다. 국내 대기중금속측정망 조사 결과 부산지역 Ni 농도가 최근 5년간 국내 7대 대도시 중에서 가장 높은 것³⁶⁾으로 조사되었으나, 위해도 평가 결과 초과발암위해도는 미국 환경청(US EPA)이 허용하는 위해도 수준 이내 인 것으로 나타났다.

Cd과 Pb의 노출에 의한 발암위해도는 대부분의 수준에서 무시해도 좋은 위해도인 1.0E-06보다 낮게 나타나 발암위해도는 매우 낮은 것으로 확인되었다.

복수의 발암관련 중금속에 의한 통합 초과발암위해도를 구한 결과 공업지역 단일평가치 분석 평균농도와 RME 수준에서 1.0E-05 수준을 넘었고, 확률론적 분석에서는 70% 수준 이상에서 발암위해도가 있는 것으로 나타났다. 평가된 발암중금속들의 통합 발암위해도에 대한 기여율은 As > Cr⁶⁺ > Ni > Cd > Pb의 순으로 조사되었다.

3.2.1.2. PM-2.5

PM-2.5에 포함된 발암성 중금속의 노출에 따른 초과발암위해도 단일평가치 분석 및 몬테카를로 시뮬레이션에

의한 확률론적 분석 결과를 Table 8에 나타내었다.

As의 노출로 인한 초과발암 위해도는 평가 대상 항목 중 발암위해도가 가장 높은 것으로 나타났다. 단일평가치 분석 평균농도 노출 시에는 공업과 주거지역 모두 RME (상위 5%농도) 노출 시 공업지역에서 1.7E-5, 주거지역에서 1.6E-5로 본 연구에서 정한 허용위해도 수준인 1.0E-05(100,000명당 1명이 암에 걸릴 확률)를 초과하였으며, 몬테카를로 분석 결과 90% 이상에서 1.0E-05 수준을 초과하는 것으로 조사되어 PM-10에 의한 발암위해도 결과와 유사하였다.

Cr⁶⁺ 노출에 의한 초과발암위해도는 주거지역은 모든 수준에서 1.0E-05를 넘지 않았으나, 공업지역에서 단일평가 RME 수준에서 1.0E-05 수준을 넘는 것으로 나타났고, 몬테카를로 분석 결과 90% 이상에서 1.0E-05 수준을 넘어 허용 발암 위해도를 초과하는 것으로 나타나, PM-10에 의한 초과발암위해도 보다 PM-2.5에 의한 초과발암위해도 영향이 다소 높은 것으로 조사되었다.

Ni, Cd, Pb노출에 의한 발암위해도는PM-10과 마찬가지로 모두 1.0E-05 수준보다 낮은 것으로 나타나 발암위해도가 낮은 것을 확인하였다.

복수의 발암관련 중금속에 의한 통합 초과발암위해도를 구한 결과 PM-10 분석 결과와 마찬가지로 공업지역 단일평가치 분석 평균농도 이상과 RME 수준에서 1.0E-05 수준을 넘었고, 확률론적 분석에서는 70% 수준 이상에서 발암위해도가 있는 것으로 나타났다. 평가된 발암중금속들의 통합 발암위해도에 대한 기여율은 As > Cr⁶⁺ >

Table 8. Excess cancer risk estimates calculated using fixed-point (CTE, RME, mean) and Monte-Carlo simulations of carcinogenic heavy metals in PM-2.5.

		Excess Cancer risk								
		Fixed point			Monter Carlo					
		CTE ^a	RME ^b	Mean	Percentiles					
					25	50	70	90	95	100
As	Industrial	1.0E-6	1.7E-5	3.8E-6	-1.8E-7	9.7E-7	3.9E-6	1.3E-5	1.8E-5	4.6E-5
	Residential	2.3E-7	1.6E-5	3.3E-6	-2.5E-7	6.8E-7	3.3E-6	1.1E-5	1.6E-5	4.6E-5
Cr ⁶⁺	Industrial	3.3E-6	1.5E-5	5.2E-6	1.7E-6	4.2E-6	6.5E-6	1.1E-5	1.4E-5	3.9E-5
	Residential	3.3E-7	3.4E-6	9.1E-7	1.6E-8	1.1E-7	4.8E-7	3.6E-6	9.3E-6	1.2E-5
Ni	Industrial	4.9E-7	2.2E-6	7.7E-7	2.5E-7	6.0E-7	9.5E-7	1.6E-6	2.0E-6	5.9E-6
	Residential	9.4E-8	7.5E-7	2.7E-7	3.6E-8	1.8E-7	3.2E-7	6.0E-7	7.6E-7	2.3E-6
Cd	Industrial	2.4E-7	1.0E-6	3.4E-7	9.1E-8	2.6E-7	4.2E-7	7.3E-7	9.0E-7	3.6E-6
	Residential	1.4E-7	7.4E-7	2.1E-7	5.2E-8	1.6E-7	2.7E-7	4.8E-7	6.0E-7	2.3E-6
Pb	Industrial	5.7E-8	2.1E-7	7.6E-8	3.1E-8	5.9E-8	9.1E-8	1.6E-7	2.2E-7	1.1E-6
	Residential	3.0E-8	1.3E-7	4.1E-8	1.5E-8	3.4E-8	5.1E-8	8.4E-8	1.1E-7	3.0E-7
Total	Industrial	5.1E-6	3.5E-5	1.0E-5	1.9E-6	6.1E-6	1.2E-5	2.6E-5	3.5E-5	9.6E-5
	Residential	8.2E-7	2.1E-5	4.7E-6	-1.3E-7	1.2E-6	4.4E-6	1.6E-5	2.7E-5	6.3E-5

^aCentral tendency exposure, 50% percentile, ^bReasonable maximum exposure, 95% percentile

Table 9. Non-carcinogenic health risk(HQ) using fixed-point(CTE, RME, Mean) estimates on As, Cr⁶⁺, Cd and Mn in PM-10 and PM-2.5

		HQ ^a					
		PM-10			PM-2.5		
		CTE	RME	Mean	CTE	RME	Mean
As	Industrial	7.0E-4	3.2E-3	1.0E-3	1.9E-4	3.2E-3	7.0E-4
	Residential	6.2E-4	3.1E-3	9.5E-4	4.1E-5	2.9E-3	6.0E-4
Cr ⁶⁺	Industrial	2.9E-5	6.9E-5	3.4E-5	2.4E-5	1.1E-4	3.8E-5
	Residential	2.8E-6	9.2E-6	3.7E-6	2.4E-6	2.5E-5	6.8E-6
Cd	Industrial	8.4E-5	3.2E-4	1.2E-4	7.0E-5	3.1E-4	1.0E-4
	Residential	4.2E-5	2.5E-4	8.0E-5	4.2E-5	2.2E-4	6.3E-5
Mn	Industrial	3.3E-5	9.6E-5	4.1E-5	2.4E-5	8.9E-5	3.3E-5
	Residential	9.3E-6	2.5E-5	1.1E-5	4.7E-6	1.9E-5	7.4E-6
HI ^b	Industrial	1.9E-2	3.7E-3	1.2E-3	3.0E-4	3.7E-3	8.7E-4
(Σ HQ)	Residential	6.7E-4	3.4E-3	1.0E-3	9.0E-5	3.2E-3	6.8E-4

^aHazard Quotient reveals thenon-carcinogenic health risk. Potential non-carcinogenic effect would occur when HQ>1.

^bHI represents the sum HQ value of four heavy metals.

Ni > Cd > Pb의 순으로 조사되었다. 이는 전준민 등³⁷⁾이 일부 공단지역 PM-2.5에 부착된 중금속 노출에 의한 건강위해성 평가에서 제시한 기여율 결과인 As > Cr⁶⁺ > Ni 순으로 평가한 것과 동일한 결과를 나타내었으며, As와 Cr⁶⁺에 대한 보다 적극적 관리가 요구됨을 확인할 수 있었다. 특히, 앞서 기술한 바와 같이 본 연구에서는 총 Cr 중 Cr⁶⁺의 비율을 8%로 가정하고 분석을 진행하였으나 총 Cr 중 Cr⁶⁺의 비율을 14%로 가정한 연구^{10,34)}들이 있는 것을 감안하면 Cr⁶⁺의 발암위해도는 다소 높아질 가능성이 있으므로 Cr에 대한 관리가 더욱 필요할 것으로 여겨진다.

3.2.2. 비발암성 평가

비발암 독성평가는 참고 용량에 대한 평가가 되어 있는 As, Cr⁶⁺, Cd, Mn 4개의 항목에 대해 실시하였고, 공업지역과 주거지역 PM-10과 PM-2.5 중에 포함된 비발암 건강 위해영향 발생 가능성을 Table 9에 나타내었다. 공업지역과 주거지역 모두 비발암위해도 지수(HQ)가 1보다 작은 수준으로 나타나, 비발암 독성 건강영향 발생 가능성이 낮은 것으로 평가되었다. HQ는 1을 기준으로 독성의 유무를 판단하는 지표이므로 수치의 크고 작음에 따라 위해도의 정도를 비교 평가하지 않았다. 복수의 중금속에 의한 비발암 독성 영향을 확인하기 위해 As, Cr⁶⁺, Cd, Mn의 HQ의 합으로 구해진 통합 비발암위해도(HI) 역시 1을 넘지 않았으므로 중금속 노출에 의한 통합 비발암 위해 발생 가능성은 낮은 것으로 평가되었다.

미세먼지에 부착된 중금속 중 독성정보가 확인된 중금

속을 대상으로 통합위해도를 평가한 결과, 건강에 유해한 영향이 나타날 가능성이 낮은 것으로 평가되었다. 그러나, 사상 공업단지에 특히 높게 나타나는 Ni, Cu, Fe 등에 대한 독성정보가 없어 함께 평가하지 못한 것을 고려하면 건강위해 가능성은 다소 높아질 가능성이 있으므로, 산업 단지에 대한 입자상물질 관리는 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단한다.

부산지역 대표 공업지역을 중심으로 대조지역과 비교하여 농도특성을 분석하고 건강피해 위해정도를 파악하여 보았다. 환경오염에 대하여 농도를 파악하고 인과관계를 규명하는 것에서, 이제는 오염 피해의 정도를 계량적으로 평가하고 이를 홍보하는 것이 중요한 일이라 판단한다. 현재와 같이 고도 산업화된 시대에 환경이 함께 공존하기 위한 적절한 관리방안 마련도 중요하지만, 과연 우리 지역에서 허용될 수 있는 오염수준이 어느 정도인가를 장기적으로 파악하고 자료의 불확실성을 최소화시켜 그 위해도를 평가하는 일이 중요해졌다. 현재 부산광역시 보건환경연구원에서 장기적으로 수행하고 있는 대기중금속 조사 자료는 데이터의 축적을 넘어 지역 건강위해도 등을 판단하는데 유용한 정보를 제공할 수 있는 것으로 여겨진다. 추후 축적된 자료에 대한 더욱 다양한 해석이 이루어져 미세먼지로 인한 지역 건강 위해관리 등 폭넓은 관리방안이 제시되기를 기대한다.

4. 결 론

부산지역 대표 공단지역 사상공단을 중심으로 최근 6년

간 PM-10과 PM-2.5 농도분포 및 미세먼지 중에 포함된 유해 중금속의 오염도 특성을 대조지역(주거지역)과 비교 분석하고, 중금속 흡입으로 인한 발암 및 건강위해 가능성을 평가한 결과는 다음과 같다.

1) 공업지역의 PM-10 과 PM-2.5 평균 농도는 주거지역에 비해 1.2배 높은 반면, 유해중금속 농도는 공업지역이 주거지역의 1.3~6.5배 수준이었으며, 니켈(2.8~6.5배) > 망간(3.9~4.4배) > 6가크롬(1.6~2.1배) > 납(1.7배~1.9배) > 카드뮴(1.3~1.8배) 순으로 나타났다. 다만, 비소는 공업지역과 주거지역 간 농도 차이가 없었으며 겨울에 감소하는 계절적 특성은 확인되었다.

2) 연구대상지역의 최근 6년간 연도별 미세먼지 농도 추이는 대체적으로 감소하는 경향을 보였으며, 계절적으로는 봄과 겨울에 공업지역 미세먼지 농도 및 발암관련 중금속 농도가 대조지역에 비해 더욱 뚜렷하게 증가하는 것을 확인하였다.

3) 미세먼지와 유해중금속 농도 간 상관성은 PM-10이 PM-2.5에 비해 높게 나타났고, 공업지역 PM-10 농도와 니켈 및 망간의 상관성이 가장 높게 나타나, PM-10 대기 중금속 조사자료의 활용성이 높다고 판단하였다. 또한, 미세먼지 농도가 “좋음~보통” 보다 “나쁨~매우나쁨” 시기에 이들 항목 간 상관성은 더욱 높아지는 것으로 드러나, 공단지역 입상상 물질에 대한 계절 중점관리의 필요성이 더욱 부각되어야 할 것으로 판단하였다.

4) 대기중금속 측정망 운영을 통해 최근 6년간 부산시 공업지역 니켈 농도가 7대 광역시 중 가장 높은 농도로 조사되었으나, 건강위해도 평가에서 발암 관련 위해도 수준은 100,000명당 1명이 암에 걸릴 확률보다 낮은 것으로 나타나 미국 환경청(US EPA)이 정한 허용위해도(1,000,000명당 1명이 암에 걸릴 확률~10,000명당 1명이 암에 걸릴 확률) 수준 이내 인 것으로 확인되었다. 그러나, 공업지역 주민들이 지속적으로 고농도 미세먼지에 노출된다면 6가크롬과 비소에 의한 발암위해 가능성이 다소 높아질 수 있는 것으로 나타나, 특히 동절기 미세먼지 계절감시 및 관리를 강화하는 등 미세먼지 고농도 발생 예방 노력이 요구된다.

결론적으로, 이번 연구는 부산광역시 보건환경연구원 에서 장기적으로 축적한 대기중금속 측정망 자료를 토대로 공단지역 유해중금속 농도 특성을 면밀히 분석하고, 불확실성을 감안한 주민 건강 위해도 평가를 통해 주민 건강 우려를 해소함과 아울러 향후 발생 가능한 위해 가능성을 염두에 두고 관리방안을 모색하고자 한 것에 의의가 있다고 하겠다.

감사의글

이 연구는 환경부 국립환경과학원 환경분야시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. J. Y. Park, “Risk assessment of heavy metals in PM10 using the spatial analysis of GIS in the ulsan area”, *The-sis for Degree of Master, Hanyang university*, 1997.
2. M. Leili, K. Naddafi, R. Nabizadeh, M. Yunesian, and A. Mesaghina, “The study of TSP and PM10 concentration and their heavy metal content in central area of Tehran, Iran, Air Quality”, *Atmosphere and Health*, 2008, 1, 159-166.
3. National Institute of Environmental Research (NIER), “The monitoring study on exposure level and biomarker of environmental pollutants in the Pohang industrial complex”, 5thannual report, 2010.
4. J. H. Jung, “Health risk assessment and concentration of environmental pollutants in an industrial complex”, *Dong-guk University Ph.D Dissertation*, 2012
5. J. T. Lee, “Dust on the health effects of domestic dynamics case”. *Society of Environmental Toxicology Conference*, 2003, 129-142.
6. International Agency for Research on Cancer (IARC), “Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths”, 2013.
7. C. B. Julia Griselda, C. B. Rosa Maria, E. G. Alberto Antonio, G. Claudio, and M. Stephanie Martinez, “Trace Metal Content and Health Risk Assessment of PM10 in an Urban Environment of Leon, Mexico”, *Atmosphere*, 2019, 10(573), 1-18.
8. A. Hernandez-Pellon, W. Nischkauer, A. Limbeck, and I. Fernandez-Olmo, “Metal(loid) bioaccessibility and inhalation risk assessment: A comparison between an urban and an industrial area”, *Environmental Research*, 2018, 165, 140-149.
9. J. M. Jeon, B. W. Kang, H. S. Lee, and C. M. Lee, “Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM2.5 in Industrial Area”, *Journal of Environmental Health Sciences*, 2010, 36(4), 294-305.
10. 박기형, 부산지역 대기 중 PM2.5의 화학적조성과 건강 위해도 평가 연구, *울산대학교 건설환경공학과 박사학위논문*, 2013.
11. B. W. Kang, J. S. Han, M. D. Lee, H. S. Lee, and J. H. Kim, “Concentration characteristics of airborne hexavalent chromium in the industrial area”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environmental*, 2009, 25(3),

- 179-187.
12. Y. J. Oh, Y. D. Han, Y. J. Kim, S. H. Jung, and W. H. Jung, "Heavy metals exposure and health risk assessment of PM10 particles in indoor air in industrial area", *Journal of Odor and Indoor Environment*, **2019**, 18(1), 18-27.
 13. J. S. Kim, S. M. Hong, and M. S. Kim, "Distribution Characteristics of PM10 and Heavy Metals in Ambient Air of Gyeonggi-do Area using Statistical Analysis", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2014**, 30(3), 281-290.
 14. B. W. Kang, M. J. Kim, K. M. Baek, Y. K. Seo, and H. S. Lee "A Study on the concentration distribution of airborne heavy metals in major industrial complexes in Korea", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2018**, 34(2), 269-280.
 15. 국립환경과학원, 위해성평가의 대상물질 선정기준, 절차 및 방법등에 관한 지침, 국립환경과학원 고시 제2012-30호, **2012**.
 16. 환경부, 환경유해인자의 위해성 평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침, 환경부 예규 제585호, **2016**.
 17. United States Environmental Protection Agency (US EPA), Lead and Compounds (Inorganic) (CASRN7439-92-1), <http://www.epa.gov/iris/subst/0277.html>, November **2015**.
 18. International Agency for Research on Cancer (IARC), "Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Inorganic and Organic Lead Compounds", **2006**.
 19. United States Environmental Protection Agency (US EPA), "Risk assessment guidance for super fund volume, Human health evaluation manual (Part A)", **2004**.
 20. Korea Ministry of Environment, "Risk Assessment of lead, cadmium and mercury", **2005**, 82-119.
 21. C. J. 리우웬, "환경위해성평가", **2001**, 동화기술 단행본.
 22. J. J. Lee, and B. M. Kim, "The risk assessment process of Hazardous air pollutant", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **2007**, 29(5), 496-501.
 23. United States Environmental Protection Agency (US EPA) IRIS (International Agency for Research on Cancer center), https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha, October **2020**.
 24. 환경부, 위해성 기준 설정 방안연구, **2008**.
 25. C. B. Julia Griselda, C. B. Rosa Maria, E. G. Alberto Antonio, G. Claudio, and M. Stephanie "Trace Metal Content and Health Risk Assessment of PM10 in an Urban Environment of Leon, Mexico", *Atmosphere*, **2019**, 10(573), 1-18.
 26. 유숙진, "부산시 공업지역 환경 대기중 VOCs의 거동 및 발생원 규명" *경성대학교 박사학위논문*, **2012**.
 27. B. W. Choi, J. H. Jung, W. J. Choi, C. J. Jeon and B. H. Shon, "Distribution Characteristics of Ambient Heavy Metals based on the Emission Sources and their Carcinogenic Risk Assessment in Ulsan, Korea", *Korean Journal of Environmental Health*, **2006**, 32(5) 522-531.
 28. E. J. Park, M. K. Kang, D. E. You, D. S. Kim, and S. D. Yu, "Health Risk Assessment of Heavy Metals in Fine Particles Collected in Seoul Metropolitan Area", *Environmental Analysis Health and Toxicology*, **2005**, 20(2), 179-186.
 29. Scorecard, <http://www.scorecard.org/chemical-profiles/html/chromium.html>, **2007**.
 30. Y. H. Oh, I. S. Nam, S. D. Kim, D. S. Kim, and D. S. Park "Health Risk Assessment for Heavy Metals in Particulate matter(PM10, PM2.5) of Indoor Air in Subway Station", *Journal of Korean Society of Living Environmental System*, **2013**, 20(1), 29-36.
 31. US EPA, "Guidelines for carcinogen risk assessment", *Federal Register*, **1986**, 51(185), 33992-34003.
 32. 이창흠, "산업도시 창원시의 초미세먼지(PM2.5)의 중금속 조성과 위해성평가 연구", *울산대학교 건설환경공학과 박사학위논문*, **2014**.
 33. J. H. Jung, Y. G. Phee, J. J. Lee, I. B. Oh, and B. H. Shon, "Exposure Assessments of Environmental Contaminants in Ansim Briquette Fuel Complex, Daegu(II)- Concentration distribution and exposure characteristics of TSP, PM10, PM2.5, and heavy metals", *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, **2015**, 25(3), 380-391.
 34. 정치현, "대기 중 유해금속 수준 및 인체 위해성평가", *금오공과대학교 석사학위논문*, **2007**.
 35. 환경부 에어코리아, https://www.airkorea.or.kr/web/khaiInfo?pMENU_NO=129, November **2020**.
 36. 국립환경과학원, 대기환경연보, **2019**.
 37. J. M. Jeon, B. W. Kang, H. S. Lee, and C. M. Lee, "Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM2.5 in Industrial areas", *Journal of Environmental Health Sciences*, **2010**, 36(4), 294-305.