



울산 산업지역 PM_{2.5} 중 중금속 노출에 의한 건강위해성평가

정지윤¹ , 이해원² , 박시현¹ , 이정일³ , 윤단기¹ , 이철민^{4*}

¹서경대학교 환경화학공학과, ²(주)환경보건연구소, ³한국화학융합시험연구원 기후기술센터, ⁴서경대학교 나노화학생명공학과

Health Risk Assessment by Exposure to Heavy Metals in PM_{2.5} in Ulsan Industrial Complex Area

Ji-Yun Jung¹, Hye-Won Lee², Si-Hyun Park¹, Jeong-Il Lee³, Dan-Ki Yoon¹, and Cheol-Min Lee^{4*}

¹Department of Environmental & Chemical Engineering, Seokyeong University, ²Institute of Environment & Health, ³Climate Change Action Center, Korea Testing & Research Institute, ⁴Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University

ABSTRACT

Background: When particles are absorbed into the human body, they penetrate deep into the lungs and interact with the tissues of the body. Heavy metals in PM_{2.5} can cause various diseases. The main source of PM_{2.5} emissions in South Korea's atmosphere has been surveyed to be places of business.

Objectives: The concentration of heavy metals in PM_{2.5} near the Ulsan Industrial Complex was measured and a health risk assessment was performed for residents near the industrial complex for exposure to heavy metals in PM_{2.5}.

Methods: Concentrations of heavy metals in PM_{2.5} were measured at four measurement sites (Ulsan, Mipo, Onsan, Maegok) near the industrial complexes. Heavy metals were analyzed according to the Air Pollution Monitoring Network Installation and Operation Guidelines presented by the National Institute of Environmental Research. Among them, only five substances (Mn, Ni, As, Cd, Cr⁶⁺) were targeted. The risk assessment was conducted on inhalation exposure for five age groups, and the excess cancer risk and hazard quotient were calculated.

Results: In the risk assessment of exposure to heavy metals in PM_{2.5}, As, Cd, and Cr⁶⁺ exceeded the risk tolerance standard of 10⁻⁶ for carcinogenic hazards. The highest hazard levels were observed in Onsan and Mipo industrial complexes. In the case of non-carcinogenic hazards, Mn was identified as exceeding the hazard tolerance of 1, and it showed the highest hazard in the Ulsan Industrial Complex.

Conclusions: This study presented a detailed health risk from exposure to heavy metals in PM_{2.5} by industrial complexes located in Ulsan among five age groups. It is expected to be utilized as the basis for preparing damage control and industrial emission reduction measures against PM_{2.5} exposure at the Ulsan Industrial Complex.

Key words: Risk assessment, PM_{2.5}, industrial complex, heavy metals

Received April 3, 2023

Revised April 18, 2023

Accepted April 20, 2023

Highlights:

- The main source of PM_{2.5} emissions in South Korea's atmosphere has been surveyed to be places of business.
- A health risk assessment was performed to present baseline data for preparing control measures against harm from PM_{2.5}.
- It is expected to be utilized as the basis for preparing damage control and industrial emissions reduction measures to counter PM_{2.5} exposure.

*Corresponding author:

Department of Nano Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, 124 Seogyong-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02710, Republic of Korea
Tel: +82-2-940-2924
Fax: +82-2-940-7616
E-mail: cheolmin@skuniv.ac.kr

I. 서 론

미세먼지 문제는 연평균 농도의 개선추세에도 불구하고 국민은 여전히 불편함을 느끼고 있으며,¹⁾ 미세먼지 건강피해에 대한 관심도 지속적으로 증가하고 있다. 2015년부터 대기환경

기준으로 설정된 PM_{2.5} (Particulate matter with a diameter of less than 2.5 μm)는 세계보건기구(World Health Organization, WHO)가 1급 발암물질로 지정할 정도로 건강에 치명적이다.^{2,3)} 이러한 PM_{2.5}는 PM₁₀ (Particulate matter with a diameter of less than 10 μm)에 비해 입자의 크기가 훨씬 작아 호흡을 통해 인



체에 흡수될 경우 폐 깊숙이 침투하여 인체의 조직과 작용하게 되면 폐질환, 순환기질환, 심혈관질환, 암 등을 일으키는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 또한, PM_{2.5}는 단위 체적당 입자의 수가 훨씬 많고 표면적도 넓어서 여러 화학물질을 더 많이 흡착할 수 있으며,²⁾ 일반적으로 50개 이상의 탄소화합물(carbonaceous components), 미세금속물질(trace metal), 이온 성분(ionic components) 등으로 구성되어 PM₁₀보다 독성이 높은 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 이러한 PM_{2.5}는 대기 중 체류시간도 약 7일로 PM₁₀에 비하여 2~3배 길기 때문에 장기간 이동하여 주변 지역 및 국가에도 영향을 미친다.⁶⁾

중금속은 주기율표 상 80여 개의 원소가 해당되며, 그중 30여 개의 중금속은 인체에 독성을 발현하는 것으로 알려져 있고, 일부는 발암성을 가지고 있다.⁷⁾ 대기 중 중금속은 입자상 물질과 결합하거나 2차 화학반응을 거쳐 대기 중에 체류하며 인체 건강에 영향을 미친다.⁸⁾ 특히, PM_{2.5} 중 중금속에 과도하게 노출되면 호흡기 자극과 염증, 심혈관질환, 심장질환 및 암 등을 유발할 수 있다.⁹⁾

국내 산업단지는 2022년 기준으로 총 1,200여 개가 넘는 산업단지가 개발되어 운영되고 있다.¹⁰⁾ 각종 생산활동으로 인해 주변지역의 대기는 산업단지에서 배출되는 가스상 물질과 더불어 다량의 미세입자가 공존하여 환경유해인자에 상시 노출되어 있고, 인체의 건강에 악영향을 미칠 수 있다.^{11,12)} 또한, 이러한 특성에 따라 산업단지의 경우 일반적 대기환경의 PM_{2.5}보다 이를 구성하고 있는 화학성분의 농도가 높을 것으로 예상되며, 산업단지 내 PM_{2.5}를 효율적으로 관리하기 위해서는 발생원과 화학조성 등에 대한 정성적·정량적 분석이 필요하다.

특히 울산은 국가산업단지조성사업으로 연안을 따라 대규모 산업단지가 형성되어 공장이 밀집되어 있고,^{13,14)} 그 인근 내륙으로 상업 및 주거지역이 집중 분포하는 특징을 가지고 있다.¹⁴⁾ 울산은 초미세먼지 배출량이 연간 약 2,500톤으로 서울과 비슷한 수준이며,¹⁵⁾ 「환경정책기본법」 제38조에 따라 대기보전특별대책지역으로 지정될 만큼 대기질의 문제가 꾸준히 제기되고 있다.¹⁶⁾ 이와 같은 상황을 고려할 때 울산 산업단지 인근 주민의 경우 높은 PM_{2.5} 및 유해화학성분에 노출될 가능성이 클 것으로 예상된다. 이러한 울산의 공기오염과 건강영향에 대한 기존의 연구결과는 제한적으로 발표되었으며, 그중에서도 특히

중금속과 관련된 연구는 더욱 부족한 실정이다. 또한, 이들 연구 모두 울산에 위치한 산업별 중금속 노출 및 건강영향조사가 이루어지지 못한 한계점을 지니고 있다.

이에 본 연구는 울산에 위치한 산업단지별 PM_{2.5} 내 중금속의 농도를 측정하여 분석하고, 산업단지별 PM_{2.5} 함유 중금속 노출에 의한 건강위해성 평가 및 평가 결과를 비교하였다.

II. 재료 및 방법

1. 측정지점

본 연구는 산업단지 특성별 PM_{2.5} 함유 중금속 노출에 따른 주민들의 미치는 영향을 비교 분석하기 위하여 Table 1과 같이 4개의 산업단지 울산·미포산업단지-1 (A1), 울산·미포산업단지-2 (A2), 온산산업단지(A3), 매곡일반산업단지(A4)로 구분하였다. 측정지점은 산업단지 내 주거지점을 우선순위로 하되, 산업단지 내 주거지가 위치하고 있지 않는 경우 풍하지역에 위치한 주거지를 선별하였다. 그중 주변에 높은 건물과 수목에 의한 바람의 집중, 난기류 등의 영향을 받지 않는 지점이 대기질을 대표할 수 있을 것으로 판단하였다. 선별된 건물 중 옥상에 측정기기의 설치 동의를 받은 지점을 최종 선정하여 PM_{2.5} 시료를 채취하였다.

울산·미포산업단지 및 온산산업단지는 울산 내 국가산업단지이며, 이들의 면적은 울산·미포산업단지, 온산산업단지 각각 48,444 km², 25,939 km²로 국내 대규모 산업단지 중 하나로 알려져 있다.¹⁷⁾ 울산·미포산업단지의 경우 총 813개의 입주 업체 중 기계, 석유화학, 운송장비 업종이 전체의 67%로 조사되었으며, 이 밖에 전기전자, 철강 등 다양한 업종이 분포하고 있다. 온산산업단지는 총 330개의 입주 업체 중 석유화학, 기계, 운송장비 업종이 전체의 71%를 차지하고 있으며, 울산·미포산업단지와 달리 석유화학 업종 업체가 37%로 가장 많이 입주한 것으로 조사되었다.¹⁸⁾

또한, 울산 내 13개의 일반산업단지 중 하나인 매곡(1~3)일반산업단지는 전체 면적이 800 km²로 총 89개의 업체가 입주한 것으로 조사되었다.¹⁹⁾ 매곡(1~3)일반산업단지는 주로 자동차 부품 제조업과 기계 및 장비 관련 제조업 등으로 이루어져 있어,²⁰⁾ 국가산업단지 내 입주 업체와 특성이 다를 것으로 예상

Table 1. Information of measurement sites in this study

Measurement sites	Industrial complex	Main industry ^{18,20)}	The number of samples
A1	Ulsan · Mipo-1	Petrochemical, transport equipment	116
A2	Ulsan · Mipo-2	Petrochemical, transport equipment	113
A3	Onsan	Petroleum refining, transport equipment	112
A4	Maegok	Automobile parts manufacturing, equipment manufacturing	110

되어 추가로 선정하였다.

2. 시료 채취 및 분석

본 연구는 2020년 8월부터 2021년 7월까지 약 1년간 미세먼지 농도가 높은 것으로 알려져 있는 겨울³⁾과 황사 영향이 많은 봄²¹⁾의 경우 주 2회, 여름과 가을은 주 1회 측정하였다. 태풍이나 폭우와 같은 기상조건 또는 장비의 고장으로 시료의 손실이 발생한 경우 채취 시료 수 및 시료 분석에서 제외하였다. 시료 포집을 위해 미국 환경보호청(US EPA) FRM PM_{2.5} 측정 방법에 적합하게 설계된 PM_{2.5} sampler (PMS-204, APM Co., Korea)를 사용하여 16.7 L/min의 유량으로 24시간 동안 포집하였으며, 미량원소의 분석을 위해 테플론 필터(PTFE 2.0 µm,

Ø47 mm)를 사용하였다. 시료의 채취 및 운반은 국립환경과학원 「대기오염측정망 설치·운영지침」²²⁾에 따라 수행하였다.

필터는 시료 채취 전·후로 24시간 항온·항습 과정 진행 후 무게를 측정하였으며, 공시료를 이용하여 PM_{2.5}의 질량농도를 보정하였다. PM_{2.5} 중 중금속은 국립환경과학원 「대기오염측정망 설치·운영지침」에서 제시하고 있는 ED-XRF (Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analyzer) 방법을 적용하여 중금속 18종을 분석하였다. 중금속 농도는 0°C, 760 mmHg로 환산한 공기 1 m³ 중 원소성분의 질량으로 산출하였다.

Table 2. Exposure factor of this study for risk assessment

	Variable		Mean±SD*	CTE [†]	RME [‡]	Source		
Body weight (kg)	Infants	0~3 months	5.6±1.03	5.6	5.6	NIER, 2019 ²⁶⁾		
		3~6 months	7.5±1.02	7.5	7.5			
		6~9 months	8.7±1.07	8.7	8.7			
		9~12 months	9.7±1.11	9.7	9.7			
		1~2 years	12.2±3.92	12.2	12.2			
	Young children	3~6 years	18.8±4.05	18.8	18.8			
	Elementary school children	7~9 years	30.0±7.29	30.0	30.0			
		10~12 years	43.8±10.52	43.8	43.8			
	Adolescent	13~15 years	57.4±12.72	57.4	57.4			
		16~18 years	62.4±13.27	62.4	62.4			
	Adults	19~24 years	63.8±13.52	63.8	63.8		NIER, 2019 ²⁵⁾	
		25~34 years	67.0±14.73	67.0	67.0			
		35~44 years	67.0±13.63	67.0	67.0			
		45~54 years	65.3±11.28	65.3	65.3			
55~64 years		63.4±10.37	63.4	63.4				
Inhalation rate (m ³ /day)	Infants	0~2 years	9.49±0.41	9.49	10.2	NIER, 2019 ²⁶⁾		
		Young children	3~6 years	10.38±0.81	10.38		12.02	
	Elementary school children	7~9 years	10.93±0.84	10.93	12.18			
	Adolescent	10~12 years	12.74±1.05	12.74	14.46			
	Adults	13~15 years	14.38±1.85	14.38	17.13			
		16~18 years	14.98±1.92	14.98	18.37			
	NIER, 2019 ²⁵⁾	19~24 years	13.09±3.17	13.09	16.68			
		25~34 years	14.53±3.00	14.53	18.64			
		35~44 years	15.96±3.17	15.96	18.92			
		45~54 years	14.62±3.32	14.62	19.01			
		55~64 years	14.79±2.71	14.79	18.01			
	Exposure duration (day)			300±19	300		330	This study
		Lifetime (year)		83.6	83.6		83.6	

*S.D: Standard Deviation

[†]CTE: Central Tendency Exposure

[‡]RME: Reasonable Maximum Exposure

3. 건강위해성평가

3.1. 유해성 확인

산단지역에서 검출된 미량원소 중 중금속에 대한 독성정보는 US EPA의 IRIS (Integrated Risk Information System)에서 제공하는 발암력 분류, 발암 유형, 흡입단위위해도(Unit Risk, UR) 및 참고치(Reference Concentration, RfC)를 조사하였다. 분석대상 중금속 18종 중 US EPA에서 독성 정보가 제시된 물질은 총 5종(Mn, Ni, As, Cd, Cr⁶⁺)이며, 최종적으로 이들 물질만을 대상으로 위해성평가를 수행하였다. 최종 선정된 대상 물질 중 UR이 제시된 물질은 Ni, As, Cd, Cr⁶⁺이며, 각각의 UR 값은 2.4.E-04 (µg/m³)⁻¹, 4.3.E-03 (µg/m³)⁻¹, 1.8.E-03 (µg/m³)⁻¹, 1.2.E-02 (µg/m³)⁻¹로 조사되었다. 또한, RfC가 제시된 물질은 Mn, Cr⁶⁺이며, 각각의 RfC값은 5.0.E-05 mg/m³, 1.0.E-04 mg/m³로 조사되었다.²³⁾

3.2. 용량-반응 평가

발암물질의 독성 값은 발암잠재력(Carcinogenic Potency Factor, CPF)으로 표현하며, 선형계수(Slope Factor, SF)로 나타낸다. 이 값은 하루에 체중 1 kg당 1 mg만큼의 유해화학물질에 노출되었을 때 증가하는 발암 확률을 의미한다. CPF는 용량-반응 곡선에서 SF의 95% 상한값을 의미한다.²⁴⁾ 본 연구에서는 UR을 체중과 호흡률을 고려한 값으로 환산하여 사용하였으며, 이는 Eq. 1에 제시한 것처럼 성인이 70년 평생동안 20 m³/day의 호흡률로 노출되었을 때의 위해도를 나타낸다.

$$CPF(mg/kg/day)^{-1} = \frac{Unit\ Risk(\mu g/m^3)^{-1} \times 70\ kg \times 1,000\ \mu g/mg}{20\ m^3/day} \quad (1)$$

비발암위해도 산출을 위해 사용되는 독성참고치(Reference Dose, RfD) 값을 산출하기 위해 RfC 값을 Eq. 2에 대입하여 계산하였다.

$$RfD(mg/kg/day) = \frac{RfC(mg/m^3) \times 20\ m^3/day}{70\ kg} \quad (2)$$

3.3. 노출평가

본 연구에서는 산단지역 인근 주민들의 유해대기오염물질 흡입에 대한 건강위해성평가를 수행하기 위해 국내·외 자료를 기반으로 주민들의 특성을 반영할 수 있는 노출계수를 선정하였다(Table 2). 노출대상은 연령에 따라 영유아(0~2세), 유치원생(3~6세), 초등학생(7~12세), 청소년(13~18세), 성인(19~64세) 총 5개의 그룹으로 나누어 평가하였으며, 환경부 「한국인의 노출계수 핸드북(2019)」²⁵⁾ 및 「한국 어린이의 노출계수 핸드북(2019)」²⁶⁾에서 제시하고 있는 연령별 체중과 호흡률을 활용하였다.

기대수명은 통계청에서 제시하고 있는 2021년 기대수명

83.6년을 노출계수 값으로 선정하였다.²⁷⁾ 평균 노출시간은 환경부 노출계수 핸드북에서 제시하고 있는 체중을 세분화하는 연령의 범위를 일수로 환산하여 사용하였다. 노출기간은 산단지역 인근에서 출생부터 사망까지 거주하는 것으로 가정하였으며, 연간 평균 300일(표준편차 19일), 최대 330일을 거주하는 것으로 가정하였다.²⁸⁾

유해성 확인 단계에서 최종 대상물질로 선정된 5종의 중금속 중 Ni은 산업단지의 특성을 고려하여 정련 과정에서 배출되는 먼지에 부착된 Ni의 UR을 이용하여 초과발암위해도(Excess Cancer Risk, ECR)를 평가하였다. 또한, Cr⁶⁺의 농도는 총 Cr 농도의 8%의 농도를 반영하여 건강위해성 평가를 수행하였다. 이는 Kang 등(2009)²⁹⁾에 의해 국내 산업단지에서 조사된 총 Cr 농도 중 Cr⁶⁺의 비율은 평균 0.7~2.4%로 조사되었으며, 외국의 도시지역에서 조사된 비율 3~8%를 함께 고려하여 가장 높은 비율인 8%를 적용하여 평가하였다.

발암물질의 경우 물질별 공기 중 농도와 노출계수를 활용하여 Eq. 3에 따라 연령별 평생일일평균용량(Lifetime Average Daily Dose, LADD)을 산출하였으며, 노출된 양의 100%가 인체에 흡수된다고 가정하였다.

$$LADD = \frac{C \times IR \times ED}{BW \times LT} \quad (3)$$

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

C: Concentration of pollutant (mg/m³)

IR: Inhalation rate (m³/day)

ED: Exposure duration (day)

BW: Body weight (kg)

LT: Lifetime (day)

비발암물질은 Eq. 4에 따라 연령별 일일평균용량(Average Daily Dose, ADD)을 산출하였으며, 이 역시 노출된 양의 100%가 인체에 흡수된다고 가정하였다.

$$ADD = \frac{C \times IR \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

여기서, ADD: Average daily dose (mg/kg/day)

C: Concentration of pollutant (mg/m³)

IR: Inhalation rate (m³/day)

ED: Exposure duration (day)

BW: Body weight (kg)

AT: Average time (day)

3.4. 위해도 결정

발암성 물질의 위해도 결정은 산출된 각 연령별 LADD를 합한 값과 CPF를 곱하여 ECR을 산출하였다(Eq. 5). 산출된 ECR

은 1×10^{-6} 을 기준으로 해당 물질의 발암위해 가능성을 판단하였다.³⁰⁾

$$ECR = \sum LADD \times CPF \quad (5)$$

여기서, ECR: Excess cancer risk

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

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

비발암성 물질의 위해도 결정은 산출된 각 연령별 ADD를 합한 값을 물질별 RfD로 나누어 위해지수(hazard quotient, HQ)를 산출하였다(Eq. 6). 산출된 HQ가 1보다 큰 경우 해당 물질의 노출에 따른 위해의 가능성이 있다고 판단하였다.³⁰⁾

$$HQ = \frac{\sum ADD}{RfD} \quad (6)$$

여기서, HQ: Hazard quotient

ADD: Average daily dose (mg/kg/day)

RfD: Reference dose (mg/kg/day)

III. 결 과

대상물질로 선정된 중금속 5종의 평균농도 및 표준편차 값을 제시하였으며, 단일 평가치 분석을 위해 CTE (Central Tendency Exposure) 및 RME (Reasonable Maximum Exposure) 값을 함께 제시하였다(Table 3).

1. 초과발암위해도(ECR)

Table 4와 Fig. 1은 산업단지 인근 PM_{2.5}에 함유된 중금속의 노출에 따른 ECR을 산업단지별 대상 연령군으로 구분하여 나타냈다.

Ni의 노출로 인한 ECR의 경우, 울산·미포산업단지-2 (A2)를 제외한 나머지 산업단지에서는 전연령 건강위해 발현 가능성이 없는 것으로 나타났다. 울산·미포산업단지-2 (A2)의 RME 수준에서 영유아와 성인에게 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 나타났다.

As의 노출로 인한 ECR의 경우, 4개의 산업단지 모두 전연령 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 모든 산업단지의 CTE 및 RME 수준 모두 영유아의 ECR이 가장 높게 조사되었다. 또한, As 노출에 대한 ECR은 온산산업단지(A3)가 다른 산업단지에 비해 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

Cd 노출에 의한 ECR의 경우, 울산·미포산업단지-1 (A1)가

Table 3. Concentration of heavy metals by measurement sites

	Variable	Mean±SD	CTE	RME
A1	Mn	43.48±32.24	43.48	101.78
	Ni	2.54±1.77	2.54	2.020
	As	8.98±10.26	8.98	30.55
	Cd	2.78±4.87	2.78	7.97
	Cr ⁶⁺	0.23±0.25	0.23	0.43
A2	Mn	25.62±22.06	25.62	62.64
	Ni	3.39±3.15	3.39	9.37
	As	7.63±9.76	7.63	28.28
	Cd	2.34±2.54	2.34	8.30
	Cr ⁶⁺	0.29±0.20	0.29	0.62
A3	Mn	19.95±14.94	19.95	46.65
	Ni	1.92±1.27	1.92	4.78
	As	14.01±24.51	14.01	57.86
	Cd	3.65±4.47	3.65	14.16
	Cr ⁶⁺	0.23±0.16	0.23	0.49
A4	Mn	28.88±22.78	28.88	66.86
	Ni	1.68±1.27	1.68	3.90
	As	4.76±4.29	4.76	12.18
	Cd	1.78±1.92	1.78	5.73
	Cr ⁶⁺	0.28±0.18	0.28	0.65

Table 4. Carcinogenic risk assessment of heavy metals by measurement sites

Pollutant	Age groups	CTE				RME			
		A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Ni	Infants	3.6E-07	4.9E-07	2.8E-07	2.4E-07	8.5E-07	1.6E-06	8.1E-07	6.6E-07
	Young children	4.6E-08	6.2E-08	3.5E-08	3.1E-08	1.2E-07	2.2E-07	1.1E-07	9.1E-08
	Elementary school children	4.1E-08	5.5E-08	3.1E-08	2.7E-08	1.0E-07	1.9E-07	9.6E-08	7.8E-08
	Adolescent	3.1E-08	4.1E-08	2.3E-08	2.0E-08	8.1E-08	1.5E-07	7.7E-08	6.3E-08
	Adults	2.2E-07	2.9E-07	1.6E-07	1.4E-07	5.9E-07	1.1E-06	5.6E-07	4.6E-07
As	Infants	2.3E-05	2.0E-05	3.6E-05	1.2E-05	9.3E-05	8.6E-05	1.8E-04	3.7E-05
	Young children	2.9E-06	2.5E-06	4.6E-06	1.6E-06	1.3E-05	1.2E-05	2.4E-05	5.1E-06
	Elementary school children	2.6E-06	2.2E-06	4.1E-06	1.4E-06	1.1E-05	1.0E-05	2.1E-05	4.4E-06
	Adolescent	2.0E-06	1.7E-06	3.1E-06	1.0E-06	8.8E-06	8.2E-06	1.7E-05	3.5E-06
	Adults	1.4E-05	1.2E-05	2.1E-05	7.3E-06	6.4E-05	5.9E-05	3.9E-05	2.6E-05
Cd	Infants	3.0E-06	2.5E-06	3.9E-06	1.9E-06	1.0E-05	1.1E-05	1.8E-05	7.3E-06
	Young children	3.8E-07	3.2E-07	5.0E-07	2.4E-07	1.4E-06	1.4E-06	2.5E-06	1.0E-06
	Elementary school children	3.4E-07	2.8E-07	4.4E-07	2.2E-07	1.2E-06	1.2E-06	2.1E-06	8.6E-07
	Adolescent	2.5E-07	2.1E-07	3.3E-07	1.6E-07	9.7E-07	1.0E-06	1.7E-06	6.9E-07
	Adults	1.8E-06	1.5E-06	2.3E-06	1.1E-06	7.0E-06	7.3E-06	1.2E-05	5.0E-06
Cr ⁶⁺	Infants	1.7E-06	2.1E-06	1.7E-06	2.0E-06	3.6E-06	5.3E-06	4.2E-06	5.5E-06
	Young children	2.1E-07	2.6E-07	2.1E-07	2.6E-07	5.0E-07	7.2E-07	5.7E-07	7.6E-07
	Elementary school children	1.9E-07	2.3E-07	1.9E-07	2.3E-07	4.3E-07	6.2E-07	5.0E-07	6.5E-07
	Adolescent	1.4E-07	1.7E-07	1.4E-07	1.7E-07	3.4E-07	5.0E-07	4.0E-07	5.3E-07
	Adults	1.0E-06	1.2E-06	9.9E-07	1.2E-06	2.5E-06	3.6E-06	2.9E-06	3.8E-06

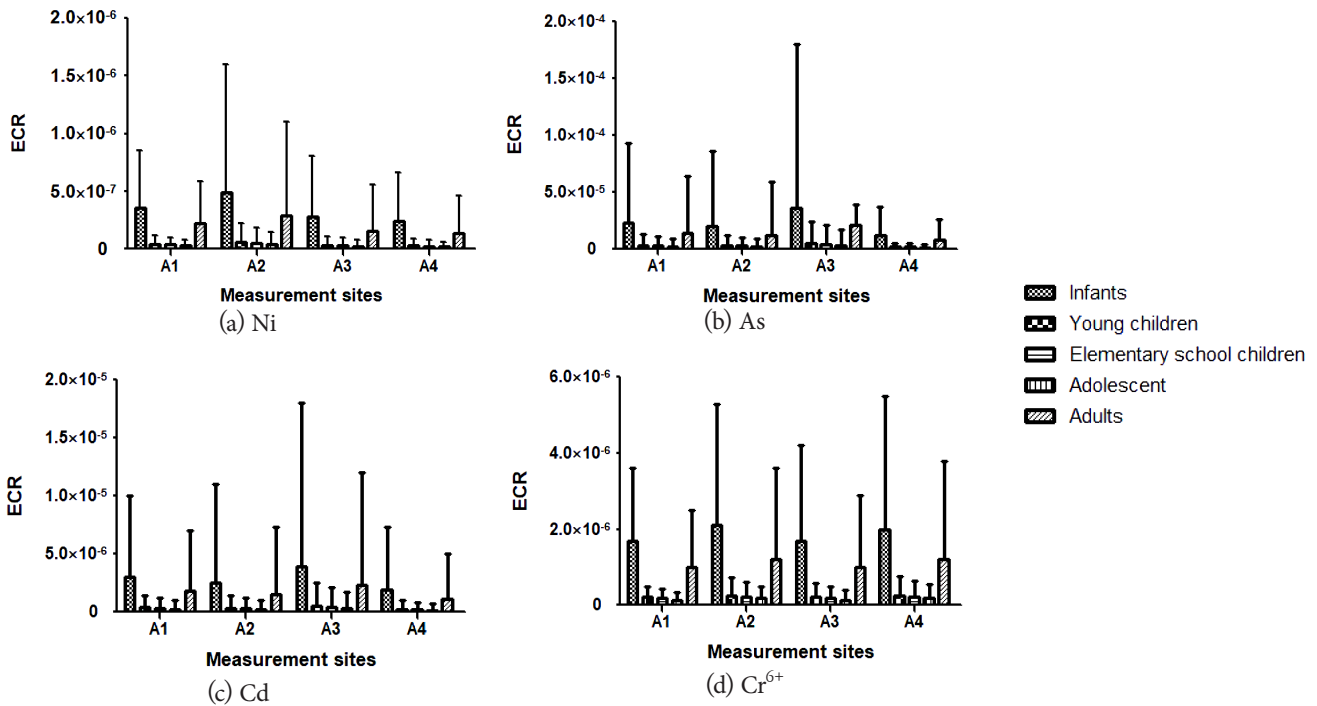


Fig. 1. Carcinogenic risk assessment of heavy metals by measurement sites (a~d) (Bar is mean and error bar is standard deviation)

가장 넓은 범위의 연령군에서 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 나타났다. 울산·미포산업단지-2 (A2)와 온산산업단지 (A3)는 CTE 및 RME 수준 모두 동일한 연령군에서 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 그중 영유아의 ECR이 가장 높은 것으로 나타났다. 매곡산업단지(A4)는 CTE 및 RME 수준 모두 영유아와 성인에게 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 나타났다. 또한, Cd의 노출로 인한 ECR은 As와 마찬가지로 온산산업단지(A3)가 다른 산업단지에 비해 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

Cr⁶⁺ 노출에 의한 ECR의 경우, 울산·미포산업단지-1 (A1), 울산·미포산업단지-2 (A2) 및 매곡산업단지(A4)는 CTE 및 RME 수준 모두 동일한 연령군에서 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 온산산업단지(A3)는 다른 산업단지와 달리 CTE 수준의 영유아에게만 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 또한, Cr⁶⁺의 노출로 인한 ECR은 CTE 수준에서 울산·미포산업단지-2 (A2), RME 수준에서 매곡산업단지(A4)가 다른 산업단지에 비해 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

2. 비발암 위해지수(HQ)

Table 5와 Fig. 2는 산업단지 인근 PM_{2.5}에 함유된 중금속의 노출에 따른 HQ를 산업단지별 대상 연령군으로 구분하여 나타냈다.

Mn의 노출로 인한 HQ의 경우, 울산·미포산업단지-1 (A1)는 CTE 및 RME 수준 모두 전연령 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 나타났다. 울산·미포산업단지-2 (A2)와 온산산업단지 (A3)는 CTE 및 RME 수준의 동일한 연령군에게 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 매곡산업단지(A4)는 CTE 수준에서 영유아, 초등학생, 성인에게 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 4개의 산업단지 모두 영유아의 HQ가 가장 높은 것으로 나타났으며, Mn 노출로 인한 HQ는 울산·미포산업단지-1 (A1)가 다른 산업단지에 비해 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

Cr⁶⁺ 노출에 의한 HQ의 경우, 울산·미포산업단지-1 (A1)는 전연령 건강위해 발현 가능성이 없는 것으로 조사되었다. 울산·미포산업단지-2 (A2), 온산산업단지(A3), 매곡산업단지 (A4)는 동일한 연령군에서 건강위해 발현 가능성이 있는 것으

Table 5. Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals by measurement sites

Pollutant	Age groups	CTE				RME			
		A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
Mn	Infants	1.6E+02	9.4E+01	7.3E+01	1.1E+02	4.4E+02	2.7E+02	2.0E+02	2.9E+02
	Young children	1.4E+00	8.1E-01	6.3E-01	9.2E-01	4.1E+00	2.5E+00	1.9E+00	2.7E+00
	Elementary school children	1.6E+00	9.7E-01	7.5E-01	1.1E+00	4.7E+00	2.9E+00	2.2E+00	3.1E+00
	Adolescent	1.2E+00	7.2E-01	5.6E-01	8.2E-01	3.8E+00	2.4E+00	1.8E+00	2.5E+00
	Adults	2.8E+00	1.6E+00	1.3E+00	1.9E+00	9.0E+00	5.5E+00	4.1E+00	5.9E+00
Cr ⁶⁺	Infants	4.3E-01	5.2E-01	4.2E-01	5.2E-01	9.2E-01	1.3E+00	1.1E+00	1.4E+00
	Young children	3.7E-03	4.6E-03	3.7E-03	4.5E-03	8.6E-03	1.2E-02	1.0E-02	1.3E-02
	Elementary school children	4.4E-03	5.4E-03	4.4E-03	5.3E-03	9.9E-03	1.4E-02	1.1E-02	1.5E-02
	Adolescent	3.3E-03	4.0E-03	3.3E-03	4.0E-03	8.0E-03	1.2E-02	9.3E-03	1.2E-02
	Adults	7.5E-03	9.2E-03	7.4E-03	9.1E-03	1.9E-02	2.7E-02	2.2E-02	2.9E-02

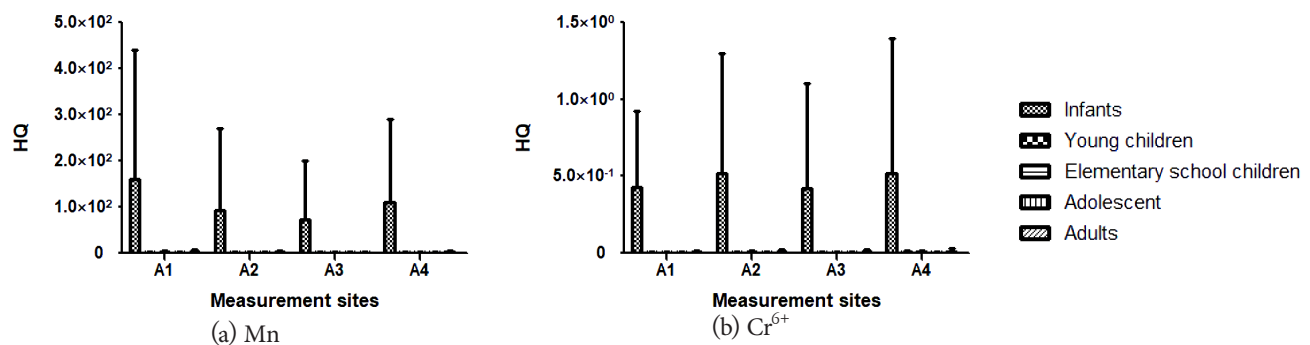


Fig. 2. Non-carcinogenic risk assessment of heavy metals by measurement sites (a~b) (Bar is mean and error bar is standard deviation)

로 나타났으며, 특히 RME 수준의 영유아에게 건강위해 발현 가능성이 있는 것을 확인할 수 있었다. Cr⁶⁺의 노출로 인한 HQ는 매곡산업단지(A4)가 다른 산업단지에 비해 가장 높은 것으로 조사되었다.

IV. 고 찰

현재 PM_{2.5} 관리를 위해 다양한 정책이 마련되어 추진되고 있으나, PM_{2.5}의 배출량과 농도에 대한 총량적 접근의 양적 관리 중심으로 이루어지는 한계점을 지니고 있다. 이에 본 연구에서 울산 내 산업단지 인근 주민들의 PM_{2.5} 노출 피해 관리의 필요성을 확인하여 체계적인 PM_{2.5} 피해관리 방안을 마련하기 위한 일환으로 산업단지 인근 주민들의 PM_{2.5} 중 중금속 노출에 의한 건강위해성 평가를 수행하였다.

본 연구의 연령 구분 중 전체 연령기간(0세~64세) 동안의 노출에 의한 ECR은 As>Cd>Cr⁶⁺>Ni 순의 결과를 나타냈다. 먼저, As의 건강위해 발현 가능성은 온산산업단지(A3)에서 가장 높은 것으로 조사되었다. As가 금속제조 및 화석연료 사용 등 산업활동으로 인해 환경 중으로 배출된다는 사전 연구결과³¹⁾를 고려할 때 온산산업단지(A3) 및 산업단지 내 높은 비율을 차지하는 기계 및 석유화학업종에 대한 관리가 우선적으로 필요함을 확인할 수 있는 결과이다. 2020년 기준 대기 중금속 측정망 자료 분석 결과 중 비소의 대기 중 농도는 울산·미포산업단지(A1과 A2)에서 가장 높게 나타나 온산산업단지(A3)에서 가장 높은 농도 및 ECR을 나타낸 본 연구 결과와 차이를 나타냈다.³²⁾ 이와 같은 결과는 본 연구의 경우 측정망이 측정대상 산업단지 내 주거지역에 위치한 반면 국가측정망의 경우 국가산업단지 인근에 위치하고 있어 기인된 결과로 사료된다.

Cd의 경우, CTE 노출과는 달리 RME 노출시 두 산업단지(A1과 A2)의 ECR 간에 차이를 보이지 않는 것으로 조사되었다. 이는 울산·미포산업단지-1 (A1)에 비해 울산·미포산업단지-2 (A2) 내 Cd의 출현 가능 농도 범위가 넓고, 고농도의 Cd가 출현 가능함을 시사하는 결과이다. Choi 등(2006)³³⁾에 따르면 Cd은 울산·미포산업단지(A1과 A2)에서 주로 배출되는 것으로 조사되었으나 본 연구는 온산산업단지(A3)에서 가장 높은 ECR을 나타내 Choi 등(2006)³³⁾과는 다른 결과를 보여주었다. 그러나 두 연구에서 언급된 산업단지(A1, A2, A3) 모두 Cd의 주배출원으로 조사된 화석연료 사용 산업활동이 분포하고 있다.⁸⁾ 또한, 해당 산업단지는 모두 국가산업단지이므로 국가산업단지의 Cd의 배출저감 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

환경부 화학물질안전원의 화학물질 배출·이동량 정보에 따르면 2020년 기준 온산산업단지(A3)가 포함되어 있는 울산 울주군의 As와 Cd 배출량은 각각 23 kg/년, 857 kg/년으로 확인되었다.³⁴⁾ 이에 온산산업단지(A3)의 As 및 Cd에 대한 보다 적극적인 관리의 필요성을 확인할 수 있었다.

Choi 등(2006)³³⁾에 따르면 Cr⁶⁺은 울산·미포산업단지(A1과 A2)가 주배출원으로 파악되었다. 이는 CTE 노출시 울산·미포산업단지-2 (A2)에서 가장 높은 ECR을 나타내는 본 연구의 결과와 유사함을 확인할 수 있었으며, 도금 및 석유공정이 주배출원인 사전 조사와 일치함을 확인할 수 있었다.⁸⁾ 이에 울산·미포산업단지-2 (A2)의 Cr⁶⁺ 농도가 현 평균 농도 수준 이하로 저감하기 위한 배출원 관리 방안 마련이 필요할 것으로 사료된다. Cr⁶⁺의 비발암 평가에서 CTE 노출시 건강위해 발현 가능성이 없는 것으로 조사되었지만, RME 노출시 건강위해 발현 가능성이 있는 결과를 고려할 때 고농도 배출 발생 빈도를 줄이며 현 평균 농도 수준을 유지하기 위한 배출원에 관한 관리 방안이 우선적으로 요구되며, 추후 대기 중 Cr⁶⁺ 저감을 위한 관리방안 검토가 이루어지는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Mn에 대한 Wu 등(2019)³⁵⁾의 평균농도는 35.6 ng/m³으로 조사되었으며 본 연구의 Mn 평균농도와 비교하였을 때, 울산·미포산업단지-1 (A1)를 제외한 모든 측정지점의 Mn의 농도가 Wu 등(2019)³⁵⁾의 조사결과보다 낮은 것으로 조사되었다. 그러나 Mn 노출에 대한 HQ는 Wu 등(2019)³⁵⁾에서 어린이와 성인 모두 1을 초과하지 않아 건강위해 발현 가능성이 없는 것으로 조사되었으며, 본 연구에서는 모든 측정지점의 다양한 연령군에서 건강위해 발현 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 노출 연령군의 세분화와 설정된 노출 기간의 차이에서 나타난 것으로 사료되며, 향후 환경오염 취약계층인 영유아 및 어린이, 노인계층으로 구분하고 보다 정확한 노출계수의 사용하여 건강위해성평가 및 이의 결과를 기초로 한 관리방안 수립이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 위해성평가가 수행된 모든 물질에 대하여 지속적 모니터링 및 주기적 위해성평가를 통한 관리를 제언하는 바이다.

본 연구는 울산 산단지역 인근 주민에 대한 실측자료가 부족한 실정으로 한국인의 일반적인 노출계수를 적용하여 위해성평가를 수행한 한계를 지니고 있다. 추후 실제 주민을 대상으로 수집한 노출계수를 적용한 연구의 수행이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 평균값을 사용하는 CTE만 제시하여 단일값 사용에서 오는 불확실성을 해결하기 위해 RME도 함께 제시하였지만 위해성평가 수행시 각 단계에서 발생할 수 있는 불확실성 및 다양성을 감소시키기 위해 향후 확률론적 위해성평가의 수행이 필요하다고 판단된다.³⁶⁾

V. 결 론

본 연구는 울산 산업단지의 PM_{2.5} 및 유해중금속 관리를 위한 일환으로 산업단지 내 거주하고 있는 거주자를 대상으로 PM_{2.5} 구성물 중 중금속 노출로 인한 건강위해성평가를 수행하였다. 발암 위해도평가 결과 As, Cd, Cr⁶⁺은 모든 산업단지에서

위해허용기준인 10^{-6} 을 초과하는 것으로 조사되었으며, 온산 산업단지(A3) 및 울산·미포산업단지-2 (A2)의 배출원 관리가 필요함을 확인할 수 있었다. 또한, 비발암 위해도평가 결과 Mn은 모든 산업단지에서 위해허용기준인 1을 초과하는 것으로 조사되었으며, 울산·미포산업단지-1 (A1)의 배출원 관리가 필요함을 확인할 수 있었다.

울산 산업단지 내 실제 주민들의 실측값을 사용하지 못한 점을 고려했을 때 향후 주민들을 대상으로 실측값을 조사하여 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 5개의 연령군으로 구분하여 조금 더 세분화된 연령군의 위해성평가를 수행하여 산업단지 내 중금속 노출 저감 방안 수립 시 연령별 생활환경에 맞추고 산업단지 간 비교를 통해 피해 관리 방안과 산업단지별 배출저감 방안 수립을 위한 기초자료를 마련했다는 점에서 의미가 있다.

감사의 글

본 연구는 2023년 환경부 지원과제(과제번호: 202301440001)의 일환으로 수행되었으며, 2023년도 환경부 주관 「화학물질 안전관리 전문 인력 양성 사업」의 화학물질 특성화 대학원 지원 사업을 통한 성과물임을 밝힙니다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

1. Sin DW, Ju HS, Lee GE. Survey on public awareness of fine dust. *KEI Focus*. 2019; 7(2): 3-20.
2. Gong SY, Bae HJ, Hong SP, Park HY. A study on the health impact and management policy of $PM_{2.5}$ in Korea. Sejong: Korea Environment Institute; 2013 Oct. Report No.: 1105008024.
3. Park S, Shin H. Analysis of the factors influencing $PM_{2.5}$ in Korea: focusing on seasonal factors. *J Environ Policy Adm*. 2017; 25(1): 227-248.
4. Kang BW, Lee HS. Source apportionment of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) in the Chungju city. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2015; 31(5): 437-448.
5. Bae HJ, Lee SM, Jung DU, Oh GR, Kim SJ, Lee JT. Study on the health effects of $PM_{2.5}$ constituents for health risk reduction management plan. Sejong: Korea Environment Institute; 2019 Sep. Report No.: 2019-16.
6. Lee SB, Jung DS, Cho EK, Kim HA, Hwang EY, Kang CH. Composition and pollution characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particles at Gosan site of Jeju Island in 2008. *Anal Sci Technol*. 2011; 24(4): 310-318.
7. Na DJ. A study on the characteristics of PM_{10} and air-borne heavy metals produced in the city with industrial complex [dissertation]. [Ulsan]: University of Ulsan; 1998.
8. Kim YJ. Evaluation of the trace metals in atmospheric PM_{10} and $PM_{2.5}$ at the southern outskirts of Wonju. [dissertation]. [Seoul]: Yonsei University; 2019.
9. Zhang X, Eto Y, Aikawa M. Risk assessment and management of $PM_{2.5}$ -bound heavy metals in the urban area of Kitakyushu, Japan. *Sci Total Environ*. 2021; 795: 148748.
10. Korea Industrial Complex Corporation. National Industrial Complex Statistics statistics table (2 quarter 2022). Available: https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD_selectBbs.do?q_bbsCode=1036&q_bbscttSn=20220915134756358&q_order=&q_clCode=2 [accessed 17 April 2023].
11. Kim YH, Yu CI, Lee JH, Sim CS, Oh IB, Sung JH, et al. Environmental pollutant exposure and monitoring of health effects on people living near industrial areas in Ulsan (Ulsan, the 3rd year of the 2nd step study). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2015 Jun. Report No.: NIER No. NIER-SP-2015-009.
12. Kang BW, Jeong MH, Jeon JM, Lee HS. The characteristics of $PM_{2.5}$ and acidic air pollutants in the vicinity of industrial complexes in Gwangyang. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2011; 27(1): 16-29.
13. Jo YJ, Kim CH. Assessment of emission data for improvement of air quality simulation in Ulsan. *J Environ Impact Assess*. 2015; 24(5): 456-471.
14. Oh I, Bang JH, Kim Y. Meteorological characteristics in the Ulsan metropolitan region: focus on air temperature and winds. *J Korean Soc Atmos Environ*. 2015; 31(2): 181-194.
15. Song CK. 'Season of fine dust' Ulsan's response efforts. *Ulsan Dev*. 2020; 67: 8-15.
16. Ulsan Metropolitan City. 2022 White paper of environment. Ulsan: Ulsan Metropolitan City; 2022.
17. Ulsan Metropolitan City. National industrial complex. Available: <https://www.ulsan.go.kr/u/economy/contents.ulsan?mId=001011003003000000> [accessed 17 April 2023].
18. Ministry of Interior And Safety. Korea industrial complex corporation national industrial complex industry trend information current status of tenant companies by industry. Available: <https://www.data.go.kr/data/15085901/fileData.do#tab-layer-openapi> [accessed 17 April 2023].
19. Korea Industrial Complex Corporation. National industrial complex statistics statistics table (3 quarter 2022). Available: https://www.kicox.or.kr/user/bbs/BD_selectBbs.do?q_bbsCode=1036&q_bbscttSn=20221214183413546&q_order=&q_clCode=2 [accessed 17 April 2023].
20. Korea Industrial Complex Corporation. Status of general industrial complexes of Ulsan Metropolitan City. Available: <https://www.data.go.kr/data/3081762/fileData.do> [accessed 17 April 2023].
21. Myong JP. Health effects of particulate matter. *Korean J Med*. 2016; 91(2): 106-113.
22. National Institute of Environmental Research. Air pollution monitoring network installation and operation guidelines. Sejong: Ministry of Environment; 2021.
23. U.S. Environmental Protection Agency. IRIS advanced search.

Available: <https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/search/index.cfm> [accessed 17 April 2023].

24. Yu M. Human health risk assessment of hazardous air pollutants matter by particle size in urban ambient air [dissertation]. [Seoul]: University of Seoul; 2011.
25. National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factors handbook. Incheon: NIER; 2019.
26. National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factor handbook for children. Incheon: NIER; 2019. Report No.: NIER-GP2019-038.
27. Jeon JM, Kang BW, Lee HS, Lee CM. Health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in industrial areas. *J Environ Health Sci.* 2010; 36(4): 294-305.
28. Statistics Korea. Simple life table (by 5 years old). Available: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B41&conn_path=I2 [accessed 17 April 2023].
29. Kang BW, Han JS, Lee MD, Lee HS, Kim JH, Son ES, et al. Concentration characteristics of airborne hexavalent chromium in the industrial area. *J Korean Soc Atmos Environ.* 2009; 25(3): 179-187.
30. National Institute of Environmental Research. Regulations on specific methods of chemical risk assessment. Available: <https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%ED%99%94%ED%95%99%EB%AC%BC%EC%A7%88%EC%9C%84%ED%95%B4%EC%84%B1%ED%8F%89%EA%B0%80%EC%9D%98%EA%B5%AC%EC%B2%B4%EC%A0%81%EB%B0%A9%EB%B2%95%EB%93%B1%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%A0%95> [accessed 17 April 2023].
31. Sim KT, Kim DH, Lee JW, Lee CH, Park SY, Seok KS, et al. Exposure and risk assessments of multimedia of arsenic in the environment. *J Environ Impact Assess.* 2019; 28(2): 152-168.
32. National Institute of Environmental Research (NIER). Annual report of air quality in Korea 2020. Incheon: NIER; 2021. Report No.: NIER-GP2021-072.
33. Choi BW, Jung JH, Choi WJ, Jeon CJ, Shon BH. Distribution characteristics of ambient heavy metals based on the emission sources and their carcinogenic risk assessment in Ulsan, Korea. *J Environ Health Sci.* 2006; 32(5): 522-531.
34. National Institute of Chemical Safety. Pollutant release and transfer register. Available: <https://icis.me.go.kr/prtr/prtrInfo/mtrSearch.do> [accessed 17 April 2023].
35. Wu Y, Lu B, Zhu X, Wang A, Yang M, Gu S, et al. Seasonal variations, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in Ningbo, China. *Aerosol Air Qual Res.* 2019; 19(9): 2083-2092.
36. Kim JC, Kim YS, Roh YM, Hong SC, Lee CM, Jun HJ. Health risk assessment of indoor HAPs in new apartments. *J Environ Health Sci.* 2007; 33(1): 1-10.

〈저자정보〉

정지윤(연구원), 이해원(이사), 박시현(연구원),
이정일(단장), 윤단기(연구원), 이철민(교수)