

광주지역 어린이 놀이시설 마감재의 중금속 노출에 의한 인체 위해성평가

윤상훈^{1*} , 김소영² , 조은¹ , 남태희¹ , 박진환¹ , 공화진¹ , 이기원¹ , 서광엽¹ , 박정훈³ , 민경우¹ ¹광주광역시 보건환경연구원, ²광주광역시 상수도사업본부 수질연구소, ³전남대학교 환경에너지공학과

Human Risk Assessment for Exposure to Heavy Metals within Finishing Materials of Playground Facilities for Children in Gwangju

Sang-Hoon Yoon^{1*}, So-Young Kim², Eun Cho¹, Tae-Hui Nam¹, Jin-Hwan Park¹, Hwa-Jin Kong¹, Ki-Won Lee¹,
Gwang-Yeob Seo¹, Jeong-Hun Park³, and Kyoung-Woo Min¹¹Health and Environment Research Institute of Gwangju, ²Water Quality Research Institute of Waterworks Gwangju,
³Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

Background: Children who use playground facilities are exposed to potential risks due to the high concentration of heavy metals contained in the finishing materials of facilities in children's playgrounds.

Objectives: The purpose of this study was to investigate the concentration of heavy metals in the finishing materials of outdoor children's playgrounds where harmful heavy metals exist in Gwangju and to conduct human risk assessment for children and adults by age to find the risks and limitations.

Methods: The bottom and top layers of double-painted paint were peeled off and collected together from the finishing materials of children's play facilities such as slides, swings, and seesaws in 147 children's parks in Gwangju. Heavy metals were analyzed using ICP-OES, etc., and human risk assessment was performed using the concentrations of heavy metals.

Results: Based on 1.0E-04, which requires legal regulation, CTE was found to pose a carcinogenic risk for preschool children and no carcinogenic risk for the rest of the age groups. However, RME showed that both men and women of all ages had a carcinogenic risk. For reference, when the carcinogenic risk was based on 1.0E-06, CTE was found to pose a carcinogenic risk from infants to elementary school students, and RME was found to have a carcinogenic risk in all age groups. It was judged that there is a non-carcinogenic risk if the non-carcinogenic risk exceeds 1 based on the hazard index (HI) 1. In CTE, there was no non-carcinogenic risk, and RME for preschooler males (1.49E+00) and females (1.56E+00) were found to have non-carcinogenic risk.

Conclusions: This study was meaningful in that it examines the differences in the current management of heavy metals concentration standards and potential carcinogenic and non-carcinogenic risks to the human body and discusses the relationship between heavy metals and human health effects.

Key words: Finishing materials, risk assessment, heavy metals, carcinogenic, non-carcinogenic

Received February 22, 2024

Revised April 5, 2024

Accepted April 9, 2024

Highlights:

- The highest risk for children compared to adult risk was 15.9 times higher for males of preschool age.
- As a result of the study, it was judged that oral exposure was predominant in the risk of heavy metals within finishing materials of children's play facilities.
- The contribution rate of As was found to be very high in the carcinogenic risk and non-carcinogenic risk of oral and dermal exposure.

*Corresponding author:

Health and Environment Research
Institute of Gwangju, 584 Mujindaero,
Seo-gu, Gwangju 61984, Republic of
Korea

Tel: +82-62-613-7516

Fax: +82-62-613-7619

E-mail: enoughface@korea.kr

I. 서 론

기술 발전은 인간 생활을 풍부하게 만들었지만, 동시에 환경

오염을 초래하여 왔다. 특히, 중금속은 오랫동안 환경오염의 주요 원인으로 지목되어 왔다. 납(Pb)은 어린이에게 행동 및 학습 장애, 지능저하, 뇌신경계 영향 등을 일으킬 수 있고, 크롬(Cr)

은 가스상 형태로 노출될 경우 인체 발암 물질로 분류되며, 생식 및 발달 독성 위험이 있다.^{1,2)} 이타이타이병으로 유명한 카드뮴(Cd)은 신장과 호흡기에 부작용을 일으키며 어린이 학습능력을 저하시킬 수 있으며, 바륨(Ba)은 중독될 경우 근육마비 및 고혈압 등을 일으킬 수 있다.³⁾

이러한 중금속 등의 유해물질은 어린이에게 더욱 더 민감하게 반응한다. 어린이 신체는 성인과는 달라 매우 빠른 신진대사율을 가지고 있고 유해물질 노출에 대한 저항능력도 부족하기 때문이다.⁴⁾ 또한 어린이에게 아토피 및 천식 등 환경성질환이 증가하는 경향과 더불어 어린이활동공간에 존재하는 환경유해인자에 대한 관심도 증가하고 있다.⁵⁾

이에 국내에서는 2007년 환경부와 국립환경과학원에서 어린이용품에 대한 유해물질 실태조사 및 위해성평가 사업을 시작하였고,⁶⁾ 2009년 환경부는 유해물질로부터 어린이의 건강을 보호하기 위한 환경보건법을 제정하여 어린이 건강에 영향을 주는 환경유해인자의 종류 및 유해성 목록을 관리하고 있다.³⁾

하지만 환경보건법에서 어린이 놀이시설 마감재 중 중금속은 Pb, Cd, Cr⁶⁺, Hg 4항목에 대해서만 기준이 설정되어 있고 「위해성평가 실시 등의 대상이 되는 환경유해인자의 종류 및 유해성 목록」(환경부고시 제2019-125호, 2019.7.8.)에서 규정한 Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Sn, Zn, Al, Mn 등 중금속 16종 모두가 환경보건법의 환경안전관리기준으로 관리가 되지 않고 있어 다양한 중금속 오염물질에 대한 대응 및 관리가 부족할 실정이다.⁶⁾

또한 법적 허용기준 비교를 통한 어린이 놀이시설의 중금속 노출수준의 평가는 현실적으로 어렵고, 급성이 아닌 만성노출로 인한 유해성 판단은 더욱더 힘들다. 따라서 중금속 노출농도를 이용한 인체 위해성평가가 요구되며, 특히 인체 위해성평가는 관리 기준이 없는 중금속의 경우 노출경로에 따른 만성노출을 정량적으로 평가할 수 있다.⁷⁾

토양, 대기 등 여러 분야에서 다양한 오염물질에 대한 위해성평가가 이뤄지고 있으며 최근에는 국내에서도 어린이를 대상으로 어린이용품 및 시설에 대해 중금속 등의 오염물질을 연구하고 그에 대한 위해성평가를 실시한 연구결과가 발표되고 있다. 특히, 2019년 국립환경과학원에서는 어린이를 포함한 한국인의 노출계수에 대한 더욱 향상된 연구결과를 배포하여 그동안 US EPA 등 외국의 연구자료에 의존하였던 국내 위해성평가 연구에 많은 도움을 주고 있다.^{8,9)}

기존 선행연구 중 Won 등(2018)¹⁰⁾의 경기도 내 어린이놀이터의 마감재 및 바닥재에 대한 중금속 오염실태 연구에서는 실외 어린이 놀이시설 표면 마감재인 페인트의 텃칠 문제를 언급하였다. 마감재의 경우 9.4% 기준 초과율을 보였는데 2014년 이전 환경보건법의 확인검사 시행 이전 고농도의 유해 중금속이 함유된 페인트 때문이라고 설명하였다.

지금까지 놀이시설에서 중금속 노출로 인한 잠재적 건강 위험에 대한 국내 연구는 부족한 상태이다. 이에 따라 본 연구에서는 광주지역 어린이공원에 설치된 어린이 놀이시설 표면 마감재에서 유해 중금속 농도를 조사하고, 이를 통해 어린이와 성인의 건강 위해성을 평가해 보고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 조사대상 및 시료채취

본 연구에서는 광주광역시 소재 어린이공원 14개소의 미끄럼틀, 그네, 시소 등 어린이 놀이시설 표면 마감재인 페인트를 대상으로 2022년 10월부터 2023년 4월까지 시료를 채취하였다. 기본조사는 비파괴분석법인 X-ray fluorescence spectrometry (XRF, HD Mobile, XOS, USA)를 사용하였고 Pb, Cd, Cr, Hg의 합산 농도가 환경보건법의 어린이활동공간 환경안전기준치를 초과하는 시설에 대해 정밀분석용 시료를 채취하였다. 시료채취는 어린이들이 자주 접촉하여 시설 표면 페인트가 벗겨진 곳을 대상으로, 이중으로 칠해진 페인트의 아래부분과 윗부분을 함께 채취하였다.

2. 분석방법

채취한 시료는 환경유해인자공정시험기준(국립환경과학원, 2023)에 따라 중금속 전처리 후 분석하였다. 1.0 mm 이하로 미세하게 분쇄한 시료 0.5 g을 테프론 용기에 담고 8 mL의 질산(HNO₃)을 추가하여 Microwave (CEM Matthew, USA)에 넣고 분해하였다. 분해가 끝난 시료는 50 mL 부피플라스크에 옮겨 2% 질산으로 표선을 맞췄다. Ba, Zn, Al, Pb, Mn, Cr, Cu, As, Sn, Ni, Cd, Co, Sb, Se 등 14종은 Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES, Optima 8300, Perkinelmer, USA), Hg는 냉증기 원자흡수분광광도법에 따른 Hydride generation system (FIMS-400, Perkinelmer, USA)으로 분석하였고, Cr⁶⁺은 알칼리 분해 후 UV/VIS spectrophotomet (UV-2700, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 분석 항목별 정도관리는 환경유해인자공정시험기준에 따라 방법검출한계, 정확도, 정밀도를 확인하였고, 검정곡선의 직선성은 매 실험시 결정계수(R²) 값이 0.995 이상임을 확인하였다.

3. 인체 위해성평가

어린이 놀이시설 표면 마감재 중 중금속류에 대한 위해성 평가는 유해성 확인, 용량-반응평가, 노출평가, 위해도 결정 순으로 실시하였다.

3.1. 유해성 확인(Hazard identification)

유해성 확인(Hazard identification) 단계는 평가대상의 오염물질 존재 확인, 오염물질 종류와 유해성을 확인하는 단계이

다. 본 연구에서는 어린이 놀이시설 표면 마감재에서 검출된 중금속 중 검출율에 따라 10종(Ba, Zn, Al, Cr⁶⁺, Pb, Mn, Cr, Cu, As, Hg)을 선정하여 유해성을 확인하였다.

3.2. 용량-반응 평가(Dose-response assessment)

용량-반응 평가는 인체가 유해물질의 특정용량에 노출시 유해한 영향을 받을 확률이 얼마나 있는지를 결정하는 단계로 역학연구, 독성실험 등 여러 실험자료가 이용된다. 본 연구에서도 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency),¹¹⁾ 통합위해정보시스템(IRIS), Health Canada (2007)¹²⁾의 자료를 토대로 Table 1과 Table 2를 작성하였다. Table 1의 Ba, Pb, Cr의 체내흡수계수(ABSGI)는 자료가 없어 Sim 등(2017)³⁾의 중금속 전이량 중 직접 섭취에 의한 결과를 이용하여 간접적으로 계산한 값이고, Table 2 As의 피부흡수발암계수(CSF_{abs})는 CSF₀/ABSGI의 정의에 따라 계산하여 1.58 값을 적용하였다.¹³⁾

발암계수(cancer slope factor, CSF)는 발암물질의 독성값을 표현하는데, 체중 1 kg당 1 mg의 유해인자에 노출되었을 때 증가하는 발암확률을 의미한다. 참고섭취량(reference dose, RfD)은 비발암물질의 위해성평가에 사용하며 만성 인체 노출시 유해영향이 일어나지 않을 것으로 예상되는 범위참고치를 의미한다.¹⁴⁾

3.3. 노출평가(Exposure assessment)

노출평가는 인체로의 노출경로별로 산정하였다. 노출경로는 어린이 놀이시설 표면 페인트의 섭취와 피부로의 흡수로 선택하였으며, 노출대상은 어린이와 성인으로, 어린이는 유아(0~2

세), 미취학아동(3~7세), 초등학생(8~13세), 청소년(14~18세)으로 연령별 구분하였고, 19세 이상의 성인은 어린이의 위해성 평가 결과와 비교를 위해 산정하였다. 평생일일평균노출량(lifetime average daily dose, LADD)과 일일평균노출량(average daily dose, ADD) 계산식과 관련 인자들은 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 노출빈도(exposure frequency, EF)는 어린이 놀이터 방문 횟수로, 관련된 자료 부족으로 Lee 등(2016)¹⁵⁾의 연구결과를 참고하여 미취학아동이 매주 1회 방문하는 것을 기준으로 초등학생은 2주 1회, 청소년은 4주 1회, 유아는 1달에 1회, 성인은 1달에 2회로 설정하였다. 노출기간(exposure duration, ED)은 유아 2년, 미취학아동 5년, 초등학생 6년, 청소년 5년, 성인은 남녀 평균수명에 따라 61.7년과 67.7년으로 산정하였다. 몸무게(body weight, BW)와 평균수명(life time, LT)은 국립환경과학원의 「한국 어린이의 노출계수 핸드북(2019)」⁸⁾과 「한국인의 노출계수 핸드북(2019)」⁹⁾에서 제시하는 자료를 활용하였다. 평균기간(average time, AT)은 인구유동성, 거주기간을 고려하여 25년을 적용하였다.¹⁶⁾ 어린이 놀이시설 표면 마감재에 대한 섭취율(consumption rate, CR), 피부흡수계수(skin absorption factor, AF), 접촉체표면적(exposure skin surface area, Ae)에 대한 자료가 부족하여 U.S. Environmental Protection Agency (2004),¹⁷⁾ U.S. Environmental Protection Agency (2009)¹⁸⁾에서 제시한 수치를 이용하였다. 이중 섭취율(CR)은 어린이 118 mg/day, 성인 50 mg/day의 1%를 적용하였고, 접촉체표면적(Ae)은 한국인 성인 남녀의 체표면적에 관한 연구에서 제시한 성인 17,084 cm², 어린이 7,313 cm²의 25%로 설정하였다.¹⁹⁾ 발암위해도는 어린이 놀이시설 표면 마감재 페인트의 농도와

Table 1. Exposure factors associated with heavy metals

Parameter	Abbreviation	Ba	Zn	Al	Cr ⁶⁺	Pb	Mn	Cr	Cu	As	Hg	Reference
Dermal absorption coefficient	ABS _D (unitless)	-	0.02	-	0.09	0.006	-	-	0.10	0.03	0.05	11,12)
Gastrointestinal absorption coefficient	ABS _{GI} (unitless)	0.023	-	-	0.025	0.007	-	0.006	0.57	0.95	0.95	11,12)

Table 2. Toxicity values of each heavy metal contaminant

Parameter			Ba	Zn	Al	Cr ⁶⁺	Pb	Mn	Cr	Cu	As	Hg
Carcinogenic	Oral	Cancer slope factor (CSF ₀) (mg/kg/day) ⁻¹	-	-	-	-	0.0085	-	-	-	1.50	-
	Dermal	Cancer absorption slope factor (CSF _{abs}) (mg/kg/day) ⁻¹	-	-	-	-	-	-	-	-	1.58	-
Non-carcinogenic	Oral	Reference dose (RfD ₀) (mg/kg/day)	0.2	0.3	0.0004	0.003	0.0005	0.14	1.5	0.14	0.0003	0.0003
	Dermal	Absorption reference dose (RfD _{abs}) (mg/kg/day)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00029	0.000021

Table 3. Exposure factors of human health risk assessment

Parameter	Abbreviation (Unit)	Infant (0~2 yr)		Pre-school (3~7 yr)		School (8~13 yr)		Juvenile (14~18 yr)		Adult (over 19 yr)		Reference
		Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	
Exposure frequency	EF (day/year)	4.7	4.7	56	56	28	28	14	14	9.3	9.3	15)
Exposure duration	ED (year)	2	2	5	5	6	6	5	5	61.7	67.7	-
Body weight	BW (kg)	7.0	6.1	15.4	14.7	37.4	35.4	60.3	51.9	71.5	57.7	8), 9)
Life time	LT (year)	79.7	85.7	79.7	85.7	79.7	85.7	79.7	85.7	79.7	85.7	8), 9)
Average time	AT (year)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	16)
Consumption rate	CR (mg/day)	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	0.5	0.5	17), 18)
Skin absorption factor	AF (mg/cm ²)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.07	0.07	17), 18)
Exposure skin surface area	Ae (cm ² /day)	1,828	1,828	1,828	1,828	1,828	1,828	1,828	1,828	4,271	4,271	17), 18)

Table 4. Equations for calculating the (life) average daily dose of each exposure route

Exposure route	Equations for (life) average daily dose
Oral	LADD=(C*×CR×ABS _{GI} ×EF×ED)/(BW×LT) ADD=(C*×CR×ABS _{GI} ×EF×ED)/(BW×AT)
Dermal	LADD=(C*×AF×ABS _D ×Ae×EF×ED)/(BW×LT) ADD=(C*×AF×ABS _D ×Ae×EF×ED)/(BW×AT)

*C: concentration of pollutant (mg/kg).

노출계수를 이용하여 연령별 평생일일평균노출량(life average daily dose, LADD)으로, 비발암 영향은 일일평균노출량(average daily dose, ADD) 계산식에 의해 산출하였다(Table 4).

본 연구에서는 단일 값 농도를 사용하는 결정론적 위해성평가를 실시하였다. 노출 변수에 대해 평균농도(Mean)를 중심경향노출위해도(central tendency exposure, CTE) 값으로, 95% 백분위수(95 percentile)를 최대노출위해도(reasonable maximum exposure, RME) 값으로 이용하여 노출량을 계산하였다. CTE는 평균적인 노출 경향을, RME은 고노출 수준의 경향을 평가하는 방법이다.¹⁴⁾ 「환경유해인자의 위해성평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침」(환경부예규 제585호, 2016.7.25.)에 따라 노출 대상 어린이 연령군 중 0세부터 2세까지는 연령보정계수 10, 3세부터 13세까지는 연령보정계수 3을 적용하였다.²⁰⁾

3.4. 위해도 결정(Risk characteristics)

발암위해도는 연령별 산출된 평생일일평균노출량(LADD)과 노출경로별 발암계수(carcinogenic slope factor, CSF)를 곱하여 초과발암위해도(excess cancer risk, ECR)를 산출한다. US EPA에서는 허용위해도를 자연적으로 발생할 수 있는, 무시할 수 있는 아주 작은 위해수준인 1.0E-06 (백만명당 1명의 초과발

암확률)부터 법적인 규제가 필요한 것으로 판단되는 위해수준 1.0E-04 (만명당 1명의 초과발암확률)로 보고 있다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 허용위해도 수준을 1.0E-04와 비교하여 이보다 높은 먼 위해성이 있는 것으로 판단하였다.

$$ECR=LADD \times CSF \tag{1}$$

여기서, ECR: Excess cancer risk

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

CSF: Cancer slope factor (mg/kg/day)⁻¹

총 초과발암위해도(total excess cancer risk, TCR)는 단일 오염물질 초과발암위해도를 합하여 산출하였다.

$$TCR=\sum ECR \tag{2}$$

비발암위해도는 일일평균노출량(ADD)을 참고섭취량(reference dose, RfD)으로 나누어 계산할 수 있으며, 이를 노출경로별 위험비율(hazard quotient, HQ)이라 하고, 모든 위험비율(HQ)을 합산하여 위험지수(hazard index, HI)를 산출하였다. 위험지수(HI)가 1보다 클 경우 비발암위해성이 있는 것으로 판단하였다.

$$HQ=ADD/RfD \tag{3}$$

여기서, HQ: Hazard quotient

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

RfD: Reference dose (mg/kg/day)

$$HI=\sum HQ \tag{4}$$

III. 결 과

1. 중금속 분석결과

현장에서 XRF를 이용한 기본검사 147건 중 Pb, Cd, Cr, Hg의 합산 농도가 환경안전기준치인 1,000 mg/kg의 70%를 초과하는 41건에 대해 정밀검사를 실시하였다(Table 5). 분석한 중금속 16항목 중 Sn, Ni, Cd, Co, Sb, Se는 검출된 시료의 수가 적어 제외하였다. Ba, Zn, Al은 정밀검사 시료 41개에서 모두 검출된 항목으로 나타났고 Cr⁶⁺, Pb, Mn, Cr의 검출율도 80% 이상으로 상기 7항목은 어린이 놀이시설 표면 마감재인 페인트의 주성분인 것으로 판단된다. 평균농도 중 최대값은 Pb으로 23,309.8 mg/kg이나 중간값과 차이가 크고 표준편차 역시 높은 것은 시료별 농도 차이가 컸기 때문이다. 평균농도는 Pb>Al>Ba>Cr>Zn>Cr⁶⁺>Cu>Mn>As>Hg 순이었다. 최대농도 역시 Pb으로 95,040.9 mg/kg이었으며 Pb>Al>Ba>Zn>Cr >Cr⁶⁺>Mn>Cu>As>Hg 순이었다. 본 연구에서는 위해성평가를 위한 CTE, RME 계산을 위해 각 중금속의 평균농도와 95 percentile를 활용하였다. 주요항목별 방법검출한계, 정확도, 정밀도는 Pb 0.01 mg/kg, 93.8%, 1.5%, Cd 0.01 mg/kg, 99.3%, 2.6%, Cu 0.01 mg/kg, 98.7%, 0.9%, As 0.19 mg/kg, 100.3%, 1.7%, Zn 0.01 mg/kg, 109.0%, 2.9%, Hg 0.01 mg/kg, 104.2%, 0.4%이었다. 중금속 분석결과 원자료(Raw data)는 Supplementary Table 1에 나타내었다.

2. 노출량 평가

Table 6과 Table 7에서는 노출 시나리오별, 연령별, 성별, 중심경향노출위해도(CTE)와 최대노출위해도(RME)를 구분하여 평생일일평균노출량(LADD)과 일일평균노출량(ADD)을 산출한 결과를 보여주고 있다. 경구노출과 경피노출 모두 미취학아동(3~7세)에서 최대 노출량, 청소년(14~18세)에서 최소 노출량을 나타내었다. 특히, 평생일일평균노출량(LADD)의 최소값은 남자 미취학아동인 반면 일일평균노출량(ADD)의 최소값은 여자 미취학아동으로 나타났다. 경구노출과 경피노출 모두 최

소 노출량은 남자 청소년으로 나타났다. 같은 연령대일 때 남녀 간 노출량의 차이는 거의 없는 것으로 나타났고, 이는 남녀의 평균수명과 체중의 차이에 의해 노출량은 차이가 발생하나 어린이 연령대별로 평균수명과 체중의 차이가 크지 않았기 때문이다. 경구노출 중 Zn, Al, Mn 항목은 체내흡수계수(ABSGI), 경피노출 중 Ba, Al, Mn, Cr 항목은 피부흡수계수(ABSD)의 부재로 평생일일평균노출량(LADD)과 일일평균노출량(ADD)을 계산할 수 없었다. 대체로 연령별 노출량은 미취학아동>초등학생>유아>성인>청소년 순으로 나타났다. 이는 노출량 계산시 유아는 10, 미취학아동과 초등학생은 3의 연령보정계수를 곱해주고, 노출량은 체중과 반비례 관계이기 때문인 것으로 판단된다. 특히 청소년 연령대에서 경구 및 경피 노출량이 가장 낮게 나왔는데 청소년의 체중은 성인과 비슷하지만 노출기간이 성인에 비해 짧았기 때문이다.

중금속별 평균노출량을 비교하면 경구노출의 LADD와 ADD 모두 CTE는 As>Cu>Ba>Cr⁶⁺>Pb>Cr> Hg, RME는 Pb>Ba>Cu>Cr>As>Cr⁶⁺>Hg 순이었고, 경피노출의 LADD와 ADD 모두 CTE는 Pb>Zn>Cr⁶⁺>Cu>As>Hg, RME는 Pb>Cr⁶⁺>Zn>Cu>As>Hg 순이었다. 경구노출에서는 As와 Pb, 경피노출에서는 Pb이 타 항목에 비해 노출량이 높은 것으로 나타났다.

3. 발암 및 비발암 위해도 평가

Table 8에서는 각 중금속 오염물질별 노출계수 및 독성자료(Table 1~3), 노출량(Table 6, 7) 그리고 식 (1)~(4)를 이용하여 연령별, 노출경로별로 초과발암위해도(ECR), 총 초과발암위해도(TCR), 위험비율(HQ), 위해지수(HI)를 산정하였다.

먼저 발암위해도는 본 연구에서 법적규제가 필요한 정도인 1.0E-04를 기준으로 할 경우, CTE는 미취학아동 남녀 모두 발암위해성이 있는 것을 제외하고 나머지 연령대에서는 발암위해성이 없는 것으로 나타났다. 그러나 RME에서는 전 연령대 남녀 모두 발암위해성이 있는 것으로 나타났다. 참고로 발암위해도 1.0E-06을 기준으로 하였을 경우, CTE는 유아부터 초등학생까지, RME는 전 연령대에서 발암위해도가 있는 것으로 나타

Table 5. Concentration of heavy metals contained in children's play facilities

	Ba	Zn	Al	Cr ⁶⁺	Pb	Mn	Cr	Cu	As	Hg
No. of samples detected	41	41	41	39	38	35	33	14	12	12
Detection rate (%)	100.0	100.0	100.0	95.1	92.7	85.4	80.5	34.1	29.3	29.3
Mean (mg/kg)	6,886.3	2,257.6	10,745.7	983.0	23,309.8	273.9	5,640.5	656.1	48.5	0.2
95 percentile (mg/kg)	14,776.1	8,091.9	62,764.9	3,403.1	80,717.7	663.4	19,562.8	2,272.0	125.2	0.8
Med. (mg/kg)	6,984.6	362.7	2,724.2	433.1	1,970.4	60.8	1,261.2	180.9	29.9	0.0
Max. (mg/kg)	25,413.8	23,137.6	89,011.5	8,268.6	95,040.9	5,616.1	21,493.0	2,770.0	247.8	1.5
Min. (mg/kg)	9.2	8.4	459.4	1.8	2.9	0.5	2.5	12.1	1.0	0.0
Std.	5,423.7	4,078.9	20,002.2	1,753.9	31,170.0	945.3	7,333.9	878.7	58.1	0.4

Table 6. The result of life average daily dose (LADD) and average daily dose (ADD) of oral route (unit: mg/kg/day)

Oral		Infant		Pre-school		School		Juvenile		Adult		Mean	
		Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female
		LADD	Ba	8.64E-05	9.25E-05	3.53E-04	3.43E-04	8.70E-05	8.54E-05	7.48E-06	8.08E-06	2.19E-05	2.77E-05
	Cr ⁶⁺	1.34E-05	1.43E-05	5.46E-05	5.30E-05	1.34E-05	1.32E-05	1.16E-06	1.25E-06	3.39E-06	4.29E-06	1.72E-05	1.72E-05
	Pb	9.23E-05	9.88E-05	3.77E-04	3.66E-04	9.29E-05	9.12E-05	7.99E-06	8.63E-06	2.34E-05	2.96E-05	1.19E-04	1.19E-04
	Cr	1.96E-05	2.10E-05	7.99E-05	7.76E-05	1.97E-05	1.93E-05	1.70E-06	1.83E-06	4.97E-06	6.28E-06	2.52E-05	2.52E-05
	Cu	2.03E-05	2.18E-05	8.30E-05	8.06E-05	2.05E-05	2.01E-05	1.76E-06	1.90E-06	5.16E-06	6.52E-06	2.61E-05	2.62E-05
	As	2.51E-05	2.68E-05	1.02E-04	9.93E-05	2.52E-05	2.48E-05	2.17E-06	2.34E-06	6.36E-06	8.04E-06	3.22E-05	3.23E-05
	Hg	7.97E-08	8.53E-08	3.25E-07	3.16E-07	8.01E-08	7.87E-08	6.90E-09	7.45E-09	2.02E-08	2.55E-08	1.02E-07	1.03E-07
RME	Ba	1.85E-03	1.99E-03	7.57E-03	7.35E-03	1.87E-03	1.83E-03	1.07E-04	1.15E-04	5.61E-04	7.09E-04	2.39E-03	2.40E-03
	Cr ⁶⁺	4.63E-04	4.95E-04	1.89E-03	1.83E-03	4.66E-04	4.57E-04	2.67E-05	2.87E-05	1.40E-04	1.77E-04	5.97E-04	5.98E-04
	Pb	3.20E-03	3.42E-03	1.30E-02	1.27E-02	3.22E-03	3.16E-03	1.85E-04	1.99E-04	9.67E-04	1.22E-03	4.12E-03	4.13E-03
	Cr	6.79E-04	7.27E-04	2.77E-03	2.69E-03	6.83E-04	6.71E-04	3.92E-05	4.22E-05	2.05E-04	2.60E-04	8.76E-04	8.78E-04
	Cu	7.04E-04	7.54E-04	2.87E-03	2.79E-03	7.09E-04	6.96E-04	4.07E-05	4.37E-05	2.13E-04	2.69E-04	9.08E-04	9.11E-04
	As	6.47E-04	6.93E-04	2.64E-03	2.56E-03	6.51E-04	6.39E-04	3.74E-05	4.02E-05	1.96E-04	2.47E-04	8.34E-04	8.37E-04
	Hg	4.04E-07	4.32E-07	1.65E-06	1.60E-06	4.06E-07	3.99E-07	2.33E-08	2.51E-08	1.22E-07	1.54E-07	5.20E-07	5.22E-07
ADD	Ba	2.76E-05	3.17E-05	3.75E-04	3.91E-04	9.24E-05	9.76E-05	2.39E-05	2.77E-05	6.99E-05	9.50E-05	1.18E-04	1.29E-04
	Cr ⁶⁺	4.26E-06	4.91E-06	5.80E-05	6.05E-05	1.43E-05	1.51E-05	3.69E-06	4.28E-06	1.08E-05	1.47E-05	1.82E-05	1.99E-05
	Pb	2.94E-05	3.39E-05	4.00E-04	4.18E-04	9.87E-05	1.04E-04	2.55E-05	2.96E-05	7.46E-05	1.01E-04	1.26E-04	1.37E-04
	Cr	6.24E-06	7.19E-06	8.49E-05	8.87E-05	2.09E-05	2.21E-05	5.41E-06	6.28E-06	1.58E-05	2.15E-05	2.67E-05	2.92E-05
	Cu	6.49E-06	7.46E-06	8.82E-05	9.21E-05	2.17E-05	2.30E-05	5.61E-06	6.52E-06	1.64E-05	2.24E-05	2.77E-05	3.03E-05
	As	7.99E-06	9.20E-06	1.09E-04	1.14E-04	2.68E-05	2.83E-05	6.92E-06	8.03E-06	2.03E-05	2.76E-05	3.41E-05	3.73E-05
	Hg	2.54E-08	2.92E-08	3.45E-07	3.61E-07	8.52E-08	8.99E-08	2.20E-08	2.55E-08	6.44E-08	8.76E-08	1.08E-07	1.19E-07
RME	Ba	5.91E-04	6.81E-04	8.04E-03	8.40E-03	1.98E-03	2.09E-03	3.41E-04	3.95E-04	1.79E-03	2.43E-03	2.55E-03	2.80E-03
	Cr ⁶⁺	1.48E-04	1.70E-04	2.01E-03	2.10E-03	4.95E-04	5.22E-04	8.52E-05	9.85E-05	4.46E-04	6.07E-04	6.36E-04	6.99E-04
	Pb	1.02E-03	1.17E-03	1.39E-02	1.45E-02	3.42E-03	3.61E-03	5.88E-04	6.81E-04	3.08E-03	4.19E-03	4.39E-03	4.83E-03
	Cr	2.17E-04	2.49E-04	2.95E-03	3.08E-03	7.26E-04	7.67E-04	1.25E-04	1.45E-04	6.55E-04	8.90E-04	9.34E-04	1.03E-03
	Cu	2.25E-04	2.58E-04	3.05E-03	3.19E-03	7.53E-04	7.95E-04	1.30E-04	1.50E-04	6.79E-04	9.24E-04	9.68E-04	1.06E-03
	As	2.06E-04	2.37E-04	2.81E-03	2.93E-03	6.92E-04	7.30E-04	1.19E-04	1.38E-04	6.24E-04	8.48E-04	8.89E-04	9.77E-04
	Hg	1.29E-07	1.48E-07	1.75E-06	1.83E-06	4.31E-07	4.55E-07	7.43E-08	8.59E-08	3.89E-07	5.29E-07	5.55E-07	6.09E-07

Table 7. The result of life average daily dose (LADD) and average daily dose (ADD) of dermal route (unit: mg/kg/day)

Dermal		Infant		Pre-school		School		Juvenile		Adult		Mean	
		Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female
		LADD	Zn	2.32E-05	2.48E-05	9.47E-05	9.20E-05	2.34E-05	2.29E-05	1.34E-06	1.44E-06	7.02E-06	8.88E-06
	Cr ⁶⁺	1.49E-05	1.60E-05	6.08E-05	5.91E-05	1.50E-05	1.47E-05	8.61E-07	9.26E-07	4.51E-06	5.70E-06	1.92E-05	1.93E-05
	Pb	2.36E-05	2.52E-05	9.62E-05	9.34E-05	2.37E-05	2.33E-05	1.36E-06	1.46E-06	7.13E-06	9.01E-06	3.04E-05	3.05E-05
	Cu	1.11E-05	1.18E-05	4.51E-05	4.38E-05	1.11E-05	1.09E-05	6.38E-07	6.87E-07	3.34E-06	4.23E-06	1.43E-05	1.43E-05
	As	2.45E-07	2.63E-07	1.00E-06	9.72E-07	2.47E-07	2.42E-07	1.42E-08	1.52E-08	7.42E-08	9.38E-08	3.16E-07	3.17E-07
	Hg	1.30E-09	1.39E-09	5.30E-09	5.15E-09	1.31E-09	1.28E-09	7.50E-11	8.07E-11	3.93E-10	4.97E-10	1.68E-09	1.68E-09
RME	Zn	4.98E-05	5.33E-05	2.03E-04	1.97E-04	5.01E-05	4.92E-05	2.87E-06	3.09E-06	1.51E-05	1.90E-05	6.42E-05	6.44E-05
	Cr ⁶⁺	5.16E-05	5.53E-05	2.11E-04	2.05E-04	5.19E-05	5.10E-05	2.98E-06	3.21E-06	1.56E-05	1.97E-05	6.66E-05	6.67E-05
	Pb	8.16E-05	8.74E-05	3.33E-04	3.23E-04	8.21E-05	8.06E-05	4.71E-06	5.07E-06	2.47E-05	3.12E-05	1.05E-04	1.06E-04
	Cu	3.83E-05	4.10E-05	1.56E-04	1.52E-04	3.85E-05	3.78E-05	2.21E-06	2.38E-06	1.16E-05	1.46E-05	4.94E-05	4.95E-05
	As	6.33E-07	6.78E-07	2.58E-06	2.51E-06	6.37E-07	6.25E-07	3.65E-08	3.93E-08	1.91E-07	2.42E-07	8.16E-07	8.19E-07
	Hg	6.58E-09	7.04E-09	2.69E-08	2.61E-08	6.62E-09	6.50E-09	3.80E-10	4.09E-10	1.99E-09	2.52E-09	8.49E-09	8.51E-09
ADD	Zn	7.40E-05	8.52E-05	3.02E-04	3.15E-04	7.44E-05	7.86E-05	4.27E-06	4.94E-06	2.24E-05	3.04E-05	9.54E-05	1.03E-04
	Cr ⁶⁺	4.75E-05	5.47E-05	1.94E-04	2.03E-04	4.78E-05	5.05E-05	2.74E-06	3.17E-06	1.44E-05	1.95E-05	6.13E-05	6.61E-05
	Pb	7.51E-05	8.65E-05	3.07E-04	3.20E-04	7.56E-05	7.98E-05	4.34E-06	5.02E-06	2.27E-05	3.09E-05	9.69E-05	1.04E-04
	Cu	3.53E-05	4.06E-05	1.44E-04	1.50E-04	3.55E-05	3.74E-05	2.03E-06	2.35E-06	1.07E-05	1.45E-05	4.55E-05	4.90E-05
	As	7.82E-07	9.00E-07	3.19E-06	3.33E-06	7.87E-07	8.30E-07	4.51E-08	5.22E-08	2.36E-07	3.22E-07	1.01E-06	1.09E-06
	Hg	4.14E-09	4.77E-09	1.69E-08	1.76E-08	4.17E-09	4.40E-09	2.39E-10	2.77E-10	1.25E-09	1.70E-09	5.34E-09	5.76E-09
RME	Zn	1.59E-04	1.83E-04	6.48E-04	6.77E-04	1.60E-04	1.69E-04	9.16E-06	1.06E-05	4.80E-05	6.53E-05	2.05E-04	2.21E-04
	Cr ⁶⁺	1.65E-04	1.89E-04	6.72E-04	7.01E-04	1.66E-04	1.75E-04	9.50E-06	1.10E-05	4.98E-05	6.77E-05	2.12E-04	2.29E-04
	Pb	2.60E-04	3.00E-04	1.06E-03	1.11E-03	2.62E-04	2.76E-04	1.50E-05	1.74E-05	7.87E-05	1.07E-04	3.36E-04	3.62E-04
	Cu	1.22E-04	1.41E-04	4.98E-04	5.20E-04	1.23E-04	1.30E-04	7.05E-06	8.15E-06	3.69E-05	5.02E-05	1.57E-04	1.70E-04
	As	2.02E-06	2.32E-06	8.24E-06	8.60E-06	2.03E-06	2.14E-06	1.17E-07	1.35E-07	6.10E-07	8.30E-07	2.60E-06	2.81E-06
	Hg	2.10E-08	2.41E-08	8.56E-08	8.94E-08	2.11E-08	2.23E-08	1.21E-09	1.40E-09	6.35E-09	8.63E-09	2.71E-08	2.92E-08

Table 8. Carcinogenic and non-carcinogenic risks by age group and exposure route

		Infant				Pre-school				School				Juvenile				Adult		
		Male		Female		Male		Female		Male		Female		Male		Female		Male	Female	
CTE	ΣECR	Oral	3.84E-05	4.11E-05	1.57E-04	1.52E-04	3.86E-05	3.79E-05	3.32E-06	3.59E-06	9.73E-06	1.23E-05	3.32E-06	3.59E-06	9.73E-06	1.23E-05	3.32E-06	3.59E-06	9.73E-06	1.23E-05
	Dermal	3.88E-07	4.15E-07	1.58E-06	1.54E-06	3.90E-07	3.83E-07	3.36E-08	3.62E-08	1.90E-07	2.40E-07	3.62E-08	3.62E-08	3.62E-08	1.90E-07	2.40E-07	3.62E-08	3.62E-08	1.90E-07	2.40E-07
RME	TCR	Oral	3.88E-05	4.15E-05	1.58E-04	1.54E-04	3.90E-05	3.83E-05	3.36E-06	3.62E-06	9.92E-06	1.25E-05	3.36E-06	3.62E-06	9.92E-06	1.25E-05	3.36E-06	3.62E-06	9.92E-06	1.25E-05
	ΣHQ	Oral	9.98E-05	1.07E-04	4.07E-04	3.95E-04	1.00E-04	9.86E-05	8.64E-06	9.33E-06	2.53E-05	3.20E-05	9.33E-06	9.33E-06	2.53E-05	3.20E-05	9.33E-06	9.33E-06	2.53E-05	3.20E-05
RME	HI	Dermal	1.00E-06	1.07E-06	4.08E-06	3.96E-06	1.01E-06	9.88E-07	8.66E-08	9.35E-08	4.90E-07	6.19E-07	9.35E-08	9.35E-08	4.90E-07	6.19E-07	9.35E-08	9.35E-08	4.90E-07	6.19E-07
	ΣECR	Oral	1.01E-04	1.08E-04	4.11E-04	3.99E-04	1.01E-04	9.95E-05	8.73E-06	9.42E-06	2.58E-05	3.26E-05	9.42E-06	9.42E-06	2.58E-05	3.26E-05	9.42E-06	9.42E-06	2.58E-05	3.26E-05
RME	TCR	Oral	3.78E-02	4.35E-02	5.14E-01	5.37E-01	1.27E-01	1.34E-01	3.27E-02	3.80E-02	9.58E-02	1.30E-01	3.27E-02	3.80E-02	9.58E-02	1.30E-01	3.27E-02	3.80E-02	9.58E-02	1.30E-01
	ΣHQ	Oral	2.89E-03	3.33E-03	1.18E-02	1.23E-02	2.91E-03	3.07E-03	2.51E-04	2.91E-04	1.42E-03	1.93E-03	2.51E-04	2.91E-04	1.42E-03	1.93E-03	2.51E-04	2.91E-04	1.42E-03	1.93E-03
RME	TCR	Oral	4.07E-02	4.68E-02	5.26E-01	5.49E-01	1.30E-01	1.37E-01	3.30E-02	3.83E-02	9.72E-02	1.32E-01	3.30E-02	3.83E-02	9.72E-02	1.32E-01	3.30E-02	3.83E-02	9.72E-02	1.32E-01
	ΣHQ	Oral	1.07E-01	1.24E-01	1.46E+00	1.52E+00	3.60E-01	3.80E-01	9.29E-02	1.08E-01	2.72E-01	3.70E-01	9.29E-02	1.08E-01	2.72E-01	3.70E-01	9.29E-02	1.08E-01	2.72E-01	3.70E-01
RME	HI	Dermal	7.96E-03	9.16E-03	3.25E-02	3.39E-02	8.01E-03	8.45E-03	6.89E-04	8.00E-04	3.90E-03	5.30E-03	6.89E-04	8.00E-04	3.90E-03	5.30E-03	6.89E-04	8.00E-04	3.90E-03	5.30E-03
	HI	Dermal	1.15E-01	1.33E-01	1.49E+00	1.56E+00	3.68E-01	3.88E-01	9.36E-02	1.09E-01	2.76E-01	3.75E-01	9.36E-02	1.09E-01	2.76E-01	3.75E-01	9.36E-02	1.09E-01	2.76E-01	3.75E-01

났다.

비발암위해도는 위해지수(HI) 1을 기준으로 1을 넘으면 비발암위해가 있다고 판단하는데 CTE에서는 비발암위해가 없는 것으로 나타났으나, RME의 미취학아동 남자(1.49E+00)와 여자(1.56E+00)가 비발암위해가 있는 것으로 나타났다.

Table 9에서는 어린이와 성인의 발암위해도와 비발암위해도를 비교한 것으로, 성인의 TCR과 HI를 기준으로 어린이 연령대의 TCR과 HI를 나누어 산출하였다. 어린이는 청소년, 유아기 HI (RME)를 제외하고 대체로 성인에 비해 발암 및 비발암위해도가 높았다. 가장 높은 위해도를 보인 것은 미취학 남자로 어린이가 성인의 위해도 대비 15.9배 높은 결과를 보였고, 유아와 초등학생은 비슷한 경향을 보였다. 성인의 위해도를 기준으로 유아부터 청소년까지 남자가 여자보다 위해도가 높거나 같음을 알 수 있었다.

Fig. 1에서는 연령별 ECR과 HQ의 합에 대한 경구 및 경피노출 기여도를 백분율 그래프로 나타내었다. (a)와 (b)는 ECR의 합에 대한 경구 및 경구노출의 기여도를 나타낸 것으로 CTE와 RME의 차이가 없이 경구노출의 기여율이 98~99%로 경피노출은 미미하였다. (c)와 (d)는 HQ의 합에 대한 경구 및 경구노출의 기여도를 나타낸 것으로 CTE와 RME의 차이가 없이 유아기는 약 93%, 미취학아동부터 성인은 98~99% 정도가 경구노출의 기여도였다. 본 연구결과 어린이 놀이시설 표면 마감재인 페인트 중 중금속의 인체 위해성은 경구노출에 의한 것이 우세한 것으로 판단된다.

Fig. 2에서는 노출경로별 발암위해도에 대한 중금속 항목별 기여도를 나타낸 것이다. 이를 위해 연령별 ECR과 HQ의 평균값을 구하여 기여율을 계산하였다. 기여율이 표시되지 않은 항목은 ECR 및 HQ 계산시 관련 노출계수 및 독성자료의 부재 때문이다. 경구노출 ΣECR (TCE), ΣECR (RME), ΣHQ (TCE)에서는 As 기여율이 97% 이상, ΣHQ (RME)에서는 As 기여율이 64%, Pb의 기여율이 27% 정도를 나타내었다. 경피노출 ΣECR (TCE), ΣECR (RME)에서는 As 기여율이 100%, ΣHQ (TCE)에서는 93%, ΣHQ (RME)에서는 As 기여율이 87%, Hg의 기여율이 13%를 나타내었다. As의 경우 발암계수 및 비발암참고치가 모두 존재하나 Pb의 경우 경피노출 산정을 위한 발암계수 및 비발암참고치가 없어 ECR 및 HQ를 계산할 수 없었다. 따라서 본 연구결과에 의하면 경구 및 경피노출의 발암위해도 및 비발암위해도는 모두 As의 기여율이 매우 높은 것으로 나타났다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 고농도로 검출된 중금속이 법적 허용기준으로만 평가되었던 어린이 놀이시설 마감재에 대해 인체 위해성평가를 실시하여 중금속의 잠재적인 인체 위해성을 알아보고자 하였다. 농도 기준을 초과하였다고 인체에 얼마나 위해한 지

Table 9. The ratio of children's TCR and HI value based on the adult

		Infant		Pre-school		School		Juvenile		Adult	
		Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female
TCR	CTE	3.9	3.3	15.9	12.2	3.9	3.1	0.3	0.3	1	1
	RME	0.4	0.4	5.4	4.2	1.3	1.0	0.3	0.3	1	1
HI	CTE	3.9	3.3	15.9	12.2	3.9	3.1	0.3	0.3	1	1
	RME	0.4	0.4	5.4	4.2	1.3	1.0	0.3	0.3	1	1

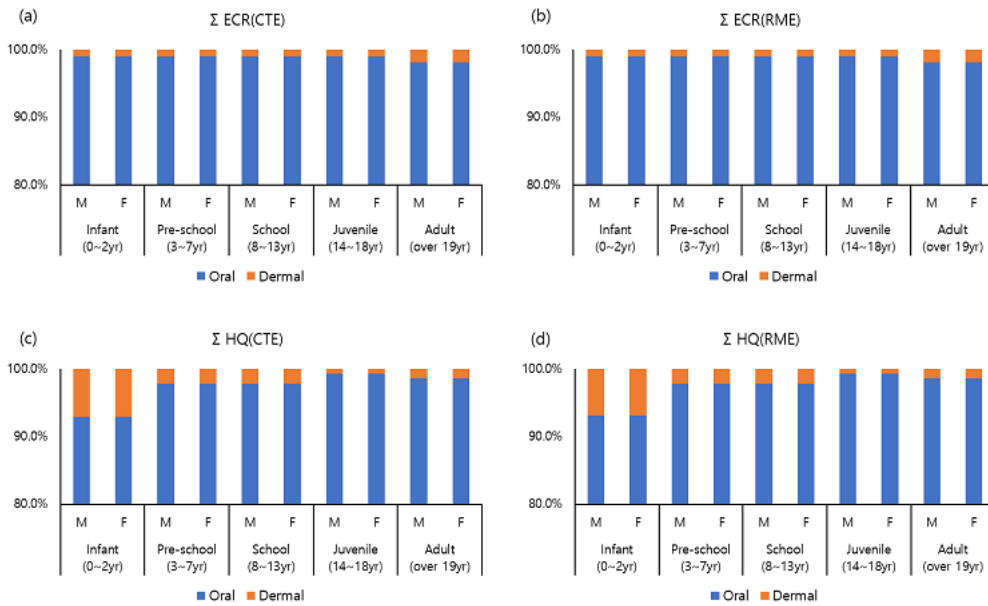


Fig. 1. Contribution rate of oral and dermal exposure to Σ ECR and Σ HQ by ages. M: male, F: female

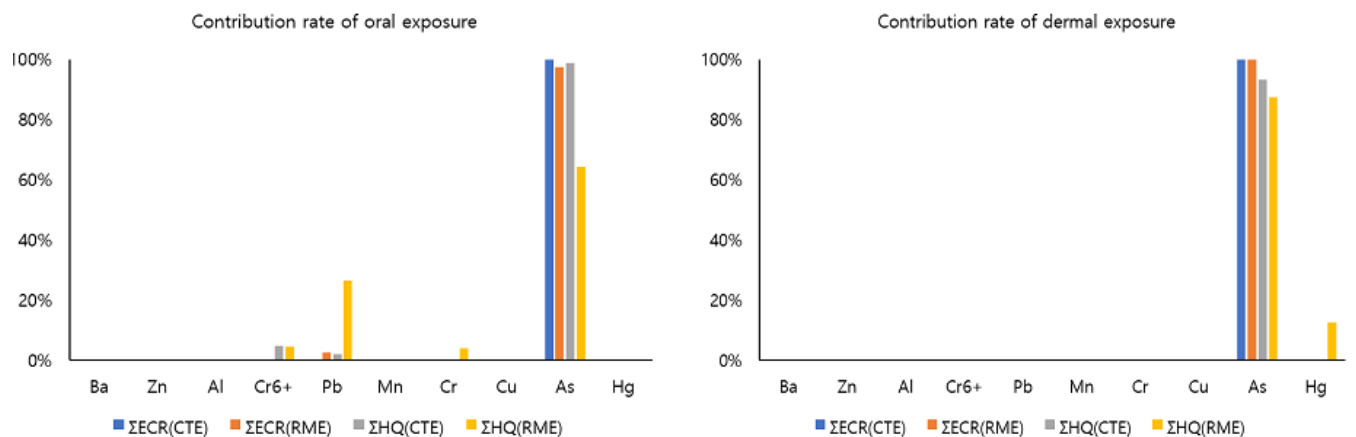


Fig. 2. Contribution rate of oral and dermal exposure to Σ ECR and Σ HQ by heavy metals

에 대한 설명이 어렵고, 초과 농도가 기준의 n배를 초과하였다고 인체 위해도도 n배 상승한다고 할 수 없기 때문이다. 더욱이 어린이 놀이시설 마감재에 대한 농도 기준은 Pb, Cd, Cr⁶⁺, Hg

4항목에 대해서만 관리되고 있어 다른 유해 중금속의 검출 농도에 대해서는 인체에 대한 위해의 정도를 판단할 수 없다는 한계가 있다.

본 연구의 중금속 분석결과를 2018년 경기도보건환경연구원에서 실시한 어린이놀이시설 페인트 마감재 연구 결과와 비교해 보면,¹⁰⁾ 경기도보건환경연구원의 XRF의 기본검사 180건 중 17건이 기준을 초과하여 초과율 9.4%로, 본 연구 기본검사 기준 초과율 27.9%보다는 낮은 초과율을 보였다. 항목별로 Pb 농도범위는 36~111,861 mg/kg, 평균 37,823 mg/kg, Cr⁶⁺ 농도범위는 0~41,210 mg/kg, 평균 4,062 mg/kg으로 본 연구 결과보다 다소 높은 결과를 보였다(Table 5). 두 연구 모두 어린이 놀이시설 표면 마감재인 페인트 중 이중으로 덧칠해져 있는 부분을 조사한 결과로 2014년 환경보건법상 확인검사제도 이전에 칠해진 고농도의 유해 중금속 함유 페인트를 벗겨내지 않고 그 위에 덧칠한 시설로 확인되었다. 어린이 놀이시설 표면 보수 시 기존의 페인트를 벗겨내고 친환경 페인트를 칠해야 하지만 그렇지 않고 덧칠만을 한 시설에서는 Pb와 Cr 등이 고농도로 검출되었고 이에 대한 법적 규제 마련이 필요하다.

본 연구는 법적 기준이 없는 중금속 항목에 대해서도 위해도 산출을 하였기에 발암위해도 기준을 1.0E-04으로 설정하였다. TCR는 평균농도를 사용한 CTE의 미취학아동 남녀 모두, RME에서는 전 연령대에서 발암위해성이 있는 것으로 나타났다. 기준을 1.0E-06으로 강화시켜보면 CTE의 유아부터 초등학생까지로 발암위해성이 확대되었다. 비발암위해도는 HI 1을 기준으로 CTE에서는 위해가 없었고 RME 중 미취학아동 남녀에서 비발암위해를 보였다. 연령대별 TCR 및 HI의 성별에 따른 차이는 노출량 결과와 비슷하게 큰 차이를 보이지 않았다.

본 연구에서 수행한 인체 위해성평가에서 Ba, Zn, Mn 등과 같이 노출농도는 있다 하더라도 노출계수, 독성참고치 등의 부재로 노출량 및 위해도가 결정되지 못한 경우가 있다. 또한 평균농도 및 최대농도에서 가장 농도가 높았던 Pb의 경우 경구노출 ECR 및 HQ 산출 관련 CSF 및 RfD가 존재하여 경구노출 TCR 및 HI 계산에는 포함이 되었으나, 경피노출 산출에서는 CSF 및 RfD 자료가 부재하여 ECR 및 HQ를 계산할 수 없었다. 이에 따라 경피노출 위해도 결정에서는 As의 기여도가 매우 높아졌다. 경구노출에서도 Pb의 농도가 As보다 약 480배 높았지만 기여율로는 As가 Pb에 비해 2배 이상 높았다. 더욱이 본 연구에서는 경피노출 As의 CSF를 타 조사에서 주로 사용하던 값인 61이 아닌 Park 등(2020)¹³⁾이 설명한 1.58을 사용하였다. 약 38.6배 높은 CSF를 적용할 경우 경피노출 발암위해의 As의 기여율이 더욱 증가할 것이다. As는 피부접촉 및 호흡보다는 물과 식품 등의 섭취에 의한 경구노출이 주요 요인이라 하였고, 폐암, 피부암 등 인간 발암물질로 IARC (International agency for research on cancer)에서 '1A' 등급으로 분류된 물질이다.²⁰⁾ 하지만 우리나라 환경보건법에서는 As의 관리기준이 없고, 본 연구에서도 검출농도 또한 타 항목에 비해 낮으나 TCR 및 HI에 큰 영향을 미치는 결과를 나타내었다.

본 연구는 여러 제한을 가지고 있고 한계점도 분명하다. 어린

이놀이터의 놀이시설 표면 마감재의 유해 중금속에 대한 농도 기준 관리와 인체 위해성평가를 통한 발암 및 비발암위해의 결과의 차이가 있었다. 이러한 차이는 환경유해인자 관련 노출인자 등이 정리되어 있지 않고 중금속 항목마다 노출계수 및 독성참고치가 없는 항목이 있었기 때문이다. 다른 인체 위해성평가 선행연구에서도 언급되었듯이 정확하고 신뢰성 있는 위해성평가를 수행하기 위해서는 필요 노출인자에 대한 국내자료 확보 및 추가 연구 등이 필요하고 이를 통해 위해성평가의 불확실성을 최소화할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구는 어린이공원 내 어린이 놀이시설 중 27.8%가 표면 마감재의 중금속 기본검사에서 기준을 초과했고, 이중으로 덧칠되어 있는 시설에 대한 정밀검사 결과 평균농도는 Pb이 23,309.8 mg/kg, Al 10,745.7 mg/kg, Ba 6,886.3 mg/kg, Cr 5,640.5 mg/kg 등으로 높은 농도를 나타내었다. 이는 과거 유해 중금속이 고농도로 함유된 표면 마감재를 제거하지 않고 이중으로 덧칠했기 때문이다. 이러한 유해 중금속에 노출된 어린이와 성인에 대한 인체 위해성평가 결과 발암위해도는 평균농도 노출시 미취학아동 남녀 모두 발암위해성이 있는 것을 제외하고 나머지 연령대에서는 발암위해성이 없는 것으로 나타났으나 고농도 노출시는 전 연령대 남녀 모두 발암위해성이 있는 것으로 나타났다. 비발암위해도는 평균농도 노출시에는 비발암위해가 없는 것으로 나타났으나, 고농도 노출시 미취학아동 남녀 모두 비발암위해가 있는 것으로 나타났다. 노출경로로는 경구노출의 영향이 높았고 중금속 항목별로 농도가 높았던 Pb, Al, Ba 등이 아닌 As가 경구 및 경피노출의 높은 기여율을 보였다. 이는 항목별 노출계수 및 독성참고치 존재 여부 때문이었다. 허용기준을 초과한 고농도의 중금속은 연령별로 인체에 대한 위해가 있음을 확인하였으나 발암 및 비발암위해성에 대한 신뢰성 있는 인체 위해성평가 수행에는 어려움이 있었다. 하지만 현행 중금속의 농도 기준 관리와 인체에 대한 잠재적인 발암 및 비발암위해성에 대한 차이를 이해하고 복합적으로 작용하는 중금속과 인체 건강 영향과의 관련성을 고찰해 보았다. 이를 통해 놀이시설 마감재의 안전성을 강화하고, 공공의 건강 보호를 위한 정책과 규제 개발에 기여할 수 있는 기초자료를 제공하였다는 점에서 본 연구의 의의가 있다고 하겠다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 NIER-2023-01-03-002)과 광주광역시 보건환경연구원원의 지원(연구지원 및 역량강화)을 받아 수행하였습니다.

Conflict of Interest

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

Supplementary Materials

Supplementary materials can be found via <https://doi.org/10.5668/JEHS.2024.50.2.146>

References

1. Park MK, Son HS, Son JY, Lee HY, Cho IG, Choi SD. Contamination characteristics of lead in urethane tracks and suggestions for human health risk assessment. *J Environ Anal Health Toxicol.* 2017; 20(2): 59-67.
2. Braun JM, Sathyanarayana S, Hauser R. Phthalate exposure and children's health. *Curr Opin Pediatr.* 2013; 25(2): 247-254.
3. Sim KT, Noh S, Song KB, Kim IG, Seok KS, Kim DH. Oral exposure to heavy metals in children's products and risk assessment of ingestion. *J Environ Anal Health Toxicol.* 2017; 20(2): 68-80.
4. Becker M, Edwards S, Massey RI. Toxic chemicals in toys and children's products: limitations of current responses and recommendations for government and industry. *Environ Sci Technol.* 2010; 44(21): 7986-7991.
5. Choi IS, Choi SC. Contents and migration of heavy metals and phthalates in children's products and phthalates in children's products. *J Korean Soc Environ Eng.* 2014; 36(2): 127-138.
6. Ministry of Government Legislation. Korean Law Information Center. Regulations on environmental hazards factors subjected to health risk assessment. Available: <https://www.law.go.kr/LSW/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000180187> [accessed 30 January 2024].
7. Lim YW, Yang JY, Kim HH, Yang SH, Kim SD, Lee CS, et al. Health risk assessment of trace elements exposure through multi pathways in children's facilities. *J Odor Indoor Environ.* 2011; 8(1): 20-38.
8. Seo JK, Yoon HJ, Kim TS, Yoo SK, Kim PJ, Yu SD. Korean exposure factors handbook for children. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2019.
9. Seo JK, Yoon HJ, Kim TS, Yoo SK, Kim PJ, Yu SD. Korean exposure factors handbook. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2019.
10. Won JM, Bynn JH, Kim WS, Kim EA, Kim MJ, Choi YH, et al. A study on the environmental hazard factors within children's play facilities in Gyeonggi-do province. *J Environ Health Sci.* 2018; 44(4): 340-347.
11. U.S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund, Volume I: human health evaluation manual (Part E, supplemental guidance for dermal risk assessment, OSWER 9285.7-02EP). Washington DC: US EPA; 2004.
12. Health Canada. Federal contaminated site risk assessment in Canada. Part I: guidance on human health preliminary quantitative risk assessment. Canada: Government of Canada; 2007.
13. Park SJ, Kim J, Jo YT, Shin D, Nshizirungu T, Moon DH, et al. Risk assessment for co-contaminated soil including as and hg in the vicinity of abandoned metal mine. *J Korean Soc Environ Eng.* 2020; 42(2): 75-87.
14. Choi SH, Choi SW, Kim DY, Cha YW, Park SW, Lee SI, et al. 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.* 2021; 24(3): 133-148.
15. Lee DH, Lee SH, Back KY. A study on children's park facility planning scheme according to user behavior and characteristics. *J Korea Acad-Ind Coop Soc.* 2016; 17(12): 232-241.
16. Lee JJ, Gim BM. The risk assessment process of hazardous air pollutants. *J Korean Soc Environ Eng.* 2007; 29(5): 496-501.
17. U.S. Environmental Protection Agency. Framework for inorganic metals risk assessment. Washington DC: US EPA; 2004.
18. U.S. Environmental Protection Agency. Exposure factors handbooks. Washington DC: US EPA; 2009.
19. Lee JY. Study on the body surface area of Korean adults [dissertation]. [Seoul]: Seoul National University; 2005.
20. 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.

〈저자정보〉

윤상훈(환경연구사), 김소영(환경연구사), 조은(환경연구사), 남태희(환경연구사), 박진환(환경연구사), 공화진(환경연구사), 이기원(공무직), 서광엽(환경연구관), 박정훈(교수), 민경우(환경연구관)