

## 한국인의 체내 중금속(납, 수은, 카드뮴)의 노출수준 및 노출경로별 기여율 평가 - 제4기 국민환경보건 기초조사(2018~2020) -

민기홍<sup>1</sup> , 신지훈<sup>1\*</sup> , 김동준<sup>1</sup> , 우재민<sup>1</sup> , 성경화<sup>2</sup> , 조만수<sup>1</sup> , 양원호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 보건안전학과, <sup>2</sup>대구가톨릭대학교 환경보건모니터링센터

## Assessment of Heavy Metal Exposure Levels (Pb, Hg, Cd) among South Koreans and Contribution Rates by Exposure Route - Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS) Cycle 4 (2018~2020) -

Gihong Min<sup>1</sup>, Jihun Shin<sup>1\*</sup>, Dongjun Kim<sup>1</sup>, Jaemin Woo<sup>1</sup>, Kyeonghwa Sung<sup>2</sup>, Mansu Cho<sup>1</sup>, and Wonho Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, <sup>2</sup>Center of Environmental Health Monitoring, Daegu Catholic University

### ABSTRACT

**Background:** Exposure levels for heavy metals such as lead (Pb), mercury (Hg), and cadmium (Cd) have increased due to human activities. They are known to be a public health concern.

**Objectives:** This study aimed to determine the exposure levels to heavy metals in the blood and urine of South Korean adults and to present the contribution rate of exposure pathways using an exposure algorithm for men aged 19~64, women aged 19~64, and all seniors aged 65 or older.

**Methods:** We analyzed data from the Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS) Cycle 4 (2018~2020). A total of 2,646 participants aged ≥19 years were included. Multiple regression analysis was performed to determine the factors affecting heavy metal concentrations. The contribution rate was calculated by applying three exposure algorithms for ingestion, inhalation, and dermal exposure.

**Results:** Factors that commonly affect heavy metal concentrations in blood and urine were gender and age. The main influencing factors for Pb and Cd were education level and smoking status, while frequency of fish consumption and of alcohol consumption were indicated to be the main influencing factors for mercury. The contribution rates of lead and cadmium from food ingestion were 78.03~79.62% and 88.39~92.89%, respectively. Additionally, the highest contribution for mercury was accounted for by food at 81.69~85.77%. As a result of the risk assessment, cadmium was found to pose a potential health risk with total cancer risk (TCR) of more than  $1 \times 10^{-6}$ .

**Conclusions:** The KoNEHS could be an important study for determining the level of exposure to heavy metals and their influencing factors. Integrated exposure to heavy metals could assess the main exposure pathways, and this methodology could be applied to exposure management of heavy metals.

**Key words:** Heavy metals, exposure algorithm, risk assessment, contribution rate

Received September 30, 2023

Revised October 20, 2023

Accepted October 25, 2023

### Highlights:

- The highest contribution to lead, mercury, and cadmium levels in the human body was due to food ingestion.
- Blood mercury levels were associated with increased fish consumption.
- Risk assessment using exposure algorithms found that cadmium was a potential health risk.

### \*Corresponding author:

Jihun Shin: Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea  
Tel: +82-53-850-3739  
Fax: +82-53-850-3736  
E-mail: shinjs1130@naver.com  
Wonho Yang: Department of Health and Safety, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Hayang-eup, Gyeongsan 38430, Republic of Korea  
Tel: +82-53-850-3739  
Fax: +82-53-850-3736  
E-mail: whyang@cu.ac.kr

## I. 서론

납(lead, Pb), 수은(mercury, Hg) 및 카드뮴(cadmium, Cd)과 같은 중금속은 사람의 활동으로 인해 노출수준이 증가하였고, 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에 따르면 공중보건 문제가 되는 물질로 알려져 있다.<sup>1,2)</sup> 중금속에 의한 환경매체(대기, 토양/먼지, 수질)의 오염은 세계 여러 지역에서 심각한 문제를 야기하였고, 중금속 노출로 인한 건강위해가 우려된다.<sup>3,4)</sup> 경구 섭취, 흡입 및 피부 접촉은 일반 인구의 주요 노출 방식(exposure route)이고, 중금속을 주로 사용하는 산업 현장에서 근무하거나 인근 지역에 거주하는 것은 노출의 위험을 높일 수 있다.<sup>5,6)</sup> Pb, Hg, Cd의 주요 노출 방식은 식품으로 알려져 있으며,<sup>7-9)</sup> 물과 호흡을 통한 공기 매체 또한 중요하게 고려되고 있다.<sup>10-12)</sup> 또한, Cd과 Pb의 경우 흡연 시 높은 농도로 노출될 수 있고, Hg은 치과용 아말감 등을 통해 노출될 수 있다.<sup>13,14)</sup>

중금속 노출에 따른 축적이 인체에 미치는 영향은 국내외 선행연구에서 보고되었으며, Pb과 Hg은 신경발달 독성을 유발하고, Cd은 인체 발암 물질이며, 사람, 환경 및 유기체에 축적될 수 있으므로 노출수준이 낮더라도 잠재적인 건강 영향을 끼칠 수 있다.<sup>15,16)</sup> 무기납(inorganic lead)은 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)의 유전독성을 근거로 하여 Group 2A로 인체 발암가능성이 있는 물질로 분류하고 있다.<sup>17)</sup> Hg은 필수금속의 대사 항상성을 방해하여 신경염증을 유발할 수 있으며, 신장독성과 신경독성을 야기한다.<sup>18,19)</sup> Cd은 IARC에서 Group 1로 사람에게 암을 일으키는 물질로 분류하였고, 장기간 노출 시 신장과 뼈에 영향을 미치며 급성 노출은 호흡기계에 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.<sup>20-22)</sup>

환경유해물질의 바이오모니터링(bio-monitoring)은 미국 National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), 캐나다 Canadian Health Measures Survey (CHMS), 독일 German Environmental Survey (GerES) 등에서 진행되고 있고, 국내는 2009년부터 3년 주기로 국민환경보건 기초조사(Korean National Environmental Health Survey)를 시행하고 있다.<sup>23-25)</sup> 국민환경보건 기초조사 결과를 통해 환경유해물질의 노출수준을 확인하고, 국외 노출수준과 비교하여 노출요인에 대한 평가를 실시하고 있다.<sup>26)</sup>

우리나라 성인의 주요 중금속 노출 실태와 노출수준을 저감하기 위해서 주요 노출경로를 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구는 한국 성인을 대표할 수 있는 자료인 국민환경보건기초조사 제4기 자료를 활용하여 혈액 및 요중 중금속 노출수준과 영향 요인에 대해서 분석하고, 한국인 대표노출계수를 이용하여 연령별 노출경로에 따른 기여요인을 확인하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 연구대상자 선정

본 연구의 대상자는 한국 성인 인구집단을 대표할 수 있는 자료인 제4기 국민환경보건 기초조사 자료를 활용하였다. 1차 층화기준은 지역적 행정구역과 해안층으로 분류하였고, 아파트 조사구와 일반 조사구로 구분하여 2차 층화를 진행하였다. 추가적으로 환경부에서 운영하고 있는 대기중금속 측정망이 있는 지역을 고려하여 표본 조사구를 선정하였고, 지역별 배분은 인구제공근비례 방식을 적용하여 한국 성인의 일반인구를 대표하고자 하였다.

본 연구는 만 19세 이상의 성인을 대상으로 진행하였고, 국민환경보건 기초조사 제4기 성인참가자 4,239명 중 혈액가중치가 없고, COVID-19 확산으로 인해 혈액 채취가 진행되지 못한 인원을 1차 제외하였고, 요중 크레아티닌 적합 범위(0.3~3.0 g/L)를 벗어나는 참가자와 측정하지 않은 인원을 제외한 2,646명을 대상으로 하였다(Fig. 1).<sup>27)</sup>

### 2. 생체시료 채취 및 분석 조건

성인의 생체시료는 Pb (혈액), Hg (혈액, 요), Cd (요)이며, 생체시료 채취 및 분석은 국립환경과학원에서 발간한 제4기 국민환경보건 기초조사 생체시료 중 생체시료(혈액, 요) 중 중금속 분석메뉴얼을 참고하였다.<sup>28)</sup> 혈중 Pb과 요중 Cd은 흑연로 원자흡광분석기(Graphite Furnace-Atomic Absorption Spectrometer, GF-AAS)로 분석하였고, 혈중 Hg과 요중 Hg은 골드아말감법으로 수은전용분석기(DMA-80)로 분석하였다. 검출한계(Limit of Detection, LOD)는 방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)로 표준용액 7개 시료 분석 결과의 표준편차(s)×3.14에 해당하는 값을 사용하였고, Pb과 Cd은 각각 0.17 µg/dL, 0.04 µg/L였고, 혈중 Hg은 0.1 µg/L, 요중 Hg은 0.04 µg/L였다.

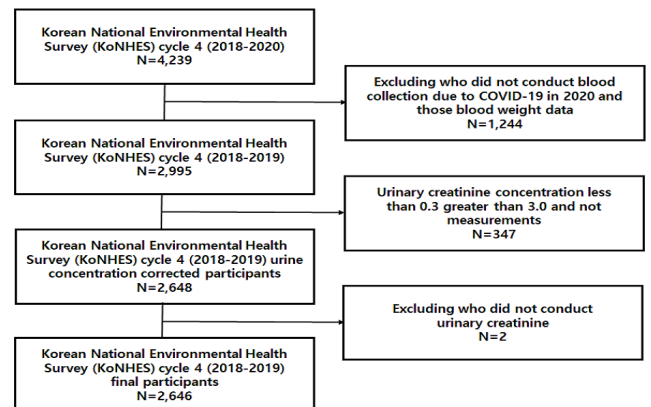


Fig. 1. Flow diagram according to the selection of the study population

### 3. 중금속 경로별 기여율

#### 3.1. 노출평가

노출경로에 따라 흡입, 경피, 경구 노출알고리즘을 구분하였고, 기여율을 산출하였다. 기여율 산출 대상 연령 기준은 성인을 기준으로 선행연구를 참고하여 총 3개 그룹으로 19~64세 남성, 19~64세 여성, 65세 이상 노인집단으로 구분하였다.<sup>29)</sup> 흡입 노출은 실내·외 공기 중 중금속 흡입 및 흡연, 경피는 토양 및 먼지의 피부 흡착, 경구는 식품, 음용수, 토양 및 먼지 섭취를 고려하였다. 노출알고리즘에 따른 노출계수는 Table 1에 정리하였다. 19~64세 남성, 19~64세 여성, 65세 이상 노인의 체중, 체표면적, 호흡률은 각각 평균값을 적용하였다.<sup>30)</sup> 노출빈도는 토양과 먼지의 비의도적 섭취 및 접촉의 경우 350일, 음식 및 물 섭취, 흡연의 빈도는 365일로 가정하였고, 노출기간은 25년, 평균화시간은 비발암 25년, 발암 82.7년으로 적용하였다.<sup>31)</sup>

식 (1)의 실내·외 공기 중 농도는 2021년 대기환경연보를 참고하여 Pb, Hg, Cd 순서로 각각 15.7 ng/m<sup>3</sup>, 2.07 ng/m<sup>3</sup>, 0.57 ng/m<sup>3</sup>을 적용하였다.<sup>32)</sup> 흡연으로 인한 노출농도(mg/day)는 담배 1개비당 농도(µg/cig)는 Pb 0.05 µg/cig, Hg 0.0027 µg/cig, Cd 0.103 µg/cig을 적용한 후, 흡연자의 하루 평균 흡연량(cig/day)을 곱하여 계산하였다(식 (2)).<sup>29)</sup>

$$ADD_{inh}, LADD_{inh} = \frac{CA \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

여기서, ADD<sub>inh</sub>=average daily dose of inhalation (mg/kg/day) CA=concentration in air (mg/m<sup>3</sup>), IR=inhalation rate (m<sup>3</sup>/day), EF=exposure frequency (day/year), ED=exposure duration (year), BW=body weight (kg), AT=averaging time (day).

$$ADD_{inh}, LADD_{inh} = \frac{C \times IR_{cig} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

여기서, ADD<sub>inh</sub>=average daily dose of inhalation (mg/kg/day), C=concentration in cigarette (mg/cig), IR<sub>cig</sub>=inhalation rate of cigarette, EF=exposure frequency (day/year), ED=exposure duration (year), BW=body weight (kg), AT=averaging time (day).

경피 노출 식 (3)의 토양의 중금속 농도는 2021년 토양측정망 데이터를 참고하여 Pb 21.10 µg/g, Hg 0.04 µg/g, Cd 0.1 µg/g 값을 적용하였다.<sup>33)</sup> 실내침적먼지(indoor dust)의 농도 중 Pb은 노령인구의 환경유해인자 노출 및 건강영향 연구의 24.2 µg/g을 적용하였고, Hg은 식약처 통합위해성평가 자료를 활용하여 0.03 µg/g을 적용하였으며, Cd은 매체통합 위해성평가 보고서를 참고하여 4.05 µg/g을 적용하였다.<sup>34-36)</sup> Pb, Hg, Cd의 피부 흡수율은 선행연구를 참고하여 각각 0.001, 1, 0.01을 적용하였다.<sup>37-39)</sup>

$$ADD_{der}, LADD_{der} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (3)$$

여기서, ADD<sub>der</sub>=average daily dose of dermal (mg/kg/day), C=concentration in soil and dust (mg/g), SA=surface area (cm<sup>2</sup>), AF=adherence factor (mg/cm<sup>2</sup>), ABS=absorption rate (fraction), EF=exposure frequency (day/year), ED=exposure duration (year), BW=body weight (kg), AT=averaging time (day).

경구 식품 중 농도는 식품의약품안전처(Ministry of Food Drug and Safety, MFDS)에서 제공하는 보고서를 참고하여 2015~2017년 국민건강영양조사에서 조사된 회상 식품 섭취량을 바탕으로 연령군 및 식품별 섭취 경로로 인한 결정론적 노출량을 중금속별로 식품 총 합계를 적용하였고, 식품 중 중금속 오염도는 식약처에서 제시하는 식품별 오염도의 평균값을 사용하였다.<sup>40,41)</sup> 음용수에서의 중금속 농도는 Pb 0.0025 mg/L, Hg 0.0005 mg/L, Cd 0.001 mg/L를 적용하였다.<sup>29)</sup>

**Table 1.** Exposure factor according to sub-population

Variable	19~64 male	19~64 female	65 over
Body weight	72.4 kg	58.1 kg	59.7 kg
Inhalation rate	15.7 m <sup>3</sup> /day	12.8 m <sup>3</sup> /day	14.6 m <sup>3</sup> /day
Surface area	6,254 cm <sup>2</sup>	5,315 cm <sup>2</sup>	5,353 cm <sup>2</sup>
Inhalation rate of cigarette	14.3 cig/day	8 cig/day	12.4 cig/day
Exposure frequency		350 day (soil, dust), 365 day	
Exposure duration		25 year	
Averaging time		Non cancer: 25 year, Cancer: 82.7 year	
Adherence factor		0.00006 g/cm <sup>2</sup> (soil), 0.0003 g/cm <sup>2</sup> (dust)	
Ingestion rate		10 mg/day (soil), 20 mg/day (dust)	

$$ADD_{ing}, LADD_{ing} = \frac{C \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

여기서,  $ADD_{ing}$ =average daily dose of ingestion (mg/kg/day),  $C$ =concentration in food, soil, dust and water (mg/kg, mg/L),  $IngR$ =ingestion rate (kg/day, L/day),  $EF$ =exposure frequency (day/year),  $ED$ =exposure duration (year),  $BW$ =body weight (kg),  $AT$ =averaging time (day).

### 3.2. 위해성평가

중금속 경로별 독성참고치(Reference Dose, RfD)와 발암잠재력(Cancer Slope Factor, CSF)은 Table 2에 제시하였다.<sup>42-48)</sup> 유해지수(Hazard Quotient, HQ)는 용량-반응평가를 통해 도출한 RfD와 노출평가에서 산출된 일일평균노출량(Average Daily Dose, ADD) 값을 적용하였고, HQ가 1 이상일 경우 잠재적인 건강 위해가 있는 것으로 판단하였다.<sup>49)</sup> 총 유해지수(Hazard Index, HI)는 흡입, 경피, 경구의 유해지수를 모두 합하여 산출하였다.<sup>50)</sup> 발암물질의 위해도 산출을 위한 발암위해도(Cancer Risk, CR)는 평생일일평균노출량(Lifetime Average Daily Dose, LADD)과 CSF를 곱하여  $1 \times 10^{-6}$ 을 기준으로 해당 물질의 발암위해 가능성을 판단하였다.<sup>49)</sup> 총 발암위해도(Total Cancer Risk, TCR)는 흡입, 경피, 경구의 발암위해도를 모두 합하여 산출하였다.<sup>51)</sup>

$$HQ = \frac{ADD (inh, der, ing)}{RfD (inh, der, ing)} \quad (5)$$

여기서, HQ=hazard quotient, ADD=average daily dose (mg/kg/day), RfD=reference dose (mg/kg/day).

$$HI = \sum HQ = HQ_{inh} + HQ_{der} + HQ_{ing} \quad (6)$$

여기서, HI=hazard index,  $HQ_{inh}$ =hazard quotient of inhalation,  $HQ_{der}$ =hazard quotient of dermal,  $HQ_{ing}$ =hazard quotient of ingestion.

$$CR = LADD (inh, der, ing) \times CSF (inh, der, ing) \quad (7)$$

여기서, CR=cancer risk, LADD=lifetime average daily dose (mg/kg/day), CSF=cancer slope factor (mg/kg/day).

$$TCR = \sum CR = CR_{inh} + CR_{der} + CR_{ing} \quad (8)$$

여기서, TCR=total cancer risk,  $CR_{inh}$ =cancer risk of inhalation,  $CR_{der}$ =cancer risk of dermal,  $CR_{ing}$ =cancer risk of ingestion.

### 4. 통계분석

통계분석은 추정 통계량의 선택편향과 측정오류를 고려하여 층화, 집락화, 가중치를 적용한 복합표본설계를 반영하여 복합표본분석을 수행하였다. 성인의 생체시료는 대수정규분포

Table 3. Characteristics of participants in KoNEHS cycle 4

Variable	KoNEHS cycle 4	
	n	Weighted percent (%)
Sex	Male	1,222 49.8
	Female	1,424 50.2
Age	20s	202 18.7
	30s	346 16.6
	40s	507 18.9
	50s	587 19.5
	60s	658 14.2
	≥70s	346 12.1
Education level	≤Middle school	722 19.3
	High school	790 27.4
	≥College	1,134 53.3
Smoking status	No smoking	1,650 62.9
	Before smoking	559 18.0
	Current smoking	437 19.1
Alcohol drinking	<1/week	1,673 61.1
	≥1/week	973 38.9
Fish consumption	<1/week	1,192 48.9
	≥1/week	1,454 51.1
Big fish consumption	<1/month	1,520 51.8
	≥1/month	1,126 48.2
Total		2,646 100.0

Table 2. Reference doses (RfD) and cancer slope factor (CSF) for the heavy metals

Heavy metal	RfD <sub>inh</sub>	RfD <sub>der</sub>	RfD <sub>ing</sub>	CSF <sub>inh</sub>	CSF <sub>der</sub>	CSF <sub>ing</sub>
Pb	$3.52 \times 10^{-3}$	$5.25 \times 10^{-4}$	$3.50 \times 10^{-3}$	$1.20 \times 10^{-5}$	$8.50 \times 10^{-3}$	$8.50 \times 10^{-3}$
Hg	$8.60 \times 10^{-5}$	$3.00 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$	-	-	-
Cd	$5.70 \times 10^{-5}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$5.00 \times 10^{-4}$	$6.10 \times 10^0$	$6.30 \times 10^0$	$6.30 \times 10^0$

로 로그 변환하였고, 검출한계 미만의 값은 LOD의  $1/\sqrt{2}$ 로 대체하였다. 제4기 국민환경보건 기초조사 결과를 참고하여 한국 성인의 사회인구학적 특성과 그룹 간 생체시료 농도의 평균을 비교하기 위해 독립 표본 t-test와 Wald F-test를 사용하였다. 또한, 설문항목에서 사전 연구를 바탕으로 성별, 연령, 음주 및 흡연 여부, 교육수준 등 사회인구학적 특성을 독립변수로 선정하고,<sup>1)</sup> 생체시료 농도를 종속변수로 선정하여 다중회귀분석을 실시하였다. 설문조사 결과 및 연구 결과의 통계적 검정은 SPSS ver. 19 (IBM Co., USA)를 사용하였고, 양측검정에 대한 유의수준은  $p < 0.05$ 로 하였다.

### III. 결 과

#### 1. 연구대상자 특성

Table 3은 국민환경보건 기초조사 성인의 생체 내 중금속 농도를 기준으로 연구대상자들의 사회인구학적 특성을 나타내었다. 여성 참여자( $n=1,424$ )가 남성 참여자( $n=1,222$ )보다 많았고, 연령은 60대( $n=658$ )에서 가장 높았고, 20대에서 가장 낮았다( $n=202$ ). 교육수준은 대학교 이상( $n=1,134$ )>고등학교( $n=790$ )>중학교 이하( $n=722$ )로 나타났고, 흡연력은 비흡연자

( $n=1,650$ )>과거 흡연자( $n=559$ )>흡연자( $n=437$ ) 순으로 나타났다. 음주력은 일주일에 1번 미만( $n=1,673$ )이 일주일에 1번 이상( $n=973$ )보다 많았다. 어류 섭취량은 일주일에 한번 이상( $n=1,454$ ) 섭취하는 사람이 한번 미만( $n=1,192$ ) 섭취하는 사람보다 많았고, 대형어류 섭취량은 한 달에 한번 미만( $n=1,520$ ) 섭취하는 사람이 한달에 한번 이상( $n=1,126$ ) 섭취하는 사람보다 많은 것으로 나타났다.

#### 2. 연구대상자의 생체시료 중 중금속 농도

혈중 Pb 농도는 남성( $1.73 \mu\text{g/dL}$ )이 여성( $1.53 \mu\text{g/dL}$ )보다 더 높게 나타났으며( $p < 0.001$ ), 70대 이상 그룹을 제외한 모든 연령그룹에서 유의하게 증가하였다( $p < 0.001$ ). 교육수준은 최종학력이 높아질수록 Pb 농도가 감소하는 경향을 보였고( $p = 0.001$ ), 흡연력에 따른 농도는 흡연자가 과거흡연자와 비흡연자에 비해 높았고( $p < 0.001$ ), 음주력에서는 음주 횟수가 증가할수록 유의하게 높았다( $p < 0.001$ ).

혈중 Hg 농도도 혈중 Pb 농도와 동일하게 남성( $3.48 \mu\text{g/L}$ )이 여성( $2.73 \mu\text{g/L}$ )보다 높게 나타났고( $p < 0.001$ ), 20대에서 50대까지 유의하게 증가하였고, 60대부터는 감소하는 경향으로 나타났다( $p < 0.001$ ). 음주력에서는 음주 횟수가 증가할수록 유

Table 4. Sociodemographic characteristics of study participants by blood and mercury concentration

Variables	Blood lead concentration (n=2,641)			Blood mercury concentration (n=2,641)			
	AM	GM (95% CI)	p-value	AM	GM (95% CI)	p-value	
Sex	Male	1.89	1.73 (1.67~1.79)	<0.001	4.40	3.48 (3.29~3.69)	<0.001
	Female	1.73	1.53 (1.45~1.61)		3.47	2.73 (2.48~3.00)	
Age	20s	1.37	1.23 (1.15~1.30)	<0.001	2.75	2.22 (2.02~2.45)	<0.001
	30s	1.61	1.44 (1.37~1.52)		3.68	2.99 (2.76~3.24)	
	40s	1.81	1.63 (1.53~1.75)		3.96	3.20 (2.99~3.43)	
	50s	2.05	1.89 (1.73~2.06)		4.79	3.97 (3.75~4.20)	
	60s	2.04	1.88 (1.80~1.97)		4.44	3.62 (3.35~3.91)	
	≥70s	1.97	1.81 (1.72~1.91)		4.00	2.81 (2.35~3.36)	
	Education level	≤Middle school	1.91	1.75 (1.68~1.83)	0.001	4.11	3.17 (2.86~3.52)
High school		1.80	1.60 (1.51~1.69)		3.69	2.94 (2.80~3.09)	
≥College		1.72	1.54 (1.47~1.61)		4.00	3.14 (2.83~3.49)	
Smoking	No smoking	1.66	1.49 (1.43~1.56)	<0.001	3.77	2.92 (2.75~3.11)	0.092
	Before smoking	1.87	1.66 (1.59~1.74)		4.21	3.31 (3.02~3.62)	
	Current smoking	1.91	1.74 (1.63~1.85)		3.83	3.03 (2.75~3.33)	
Alcohol consumption	<1/week	1.73	1.55 (1.49~1.61)	<0.001	3.45	2.76 (2.61~2.92)	<0.001
	≥1/week	1.89	1.71 (1.64~1.79)		4.42	3.44 (3.21~3.68)	
Fish consumption	<1/week	1.79	1.61 (1.55~1.68)	0.301	3.45	2.74 (2.58~2.91)	<0.001
	≥1/week	1.82	1.64 (1.58~1.71)		4.42	3.47 (3.26~3.69)	
Big fish consumption	<1/month	1.86	1.65 (1.57~1.73)	0.346	3.80	2.93 (2.75~3.13)	0.003
	≥1/month	1.76	1.61 (1.54~1.67)		4.07	3.24 (3.04~3.44)	

AM: arithmetic mean, GM: geometric mean, CI: confidence interval.

의하게 증가하였다( $p < 0.001$ ). 어류 섭취량에서는 빈도가 증가할수록 Hg 농도가 증가하였고( $p < 0.001$ ), 대형어류에서도 동일한 경향을 보였다( $p = 0.003$ ). 연령에 따른 요중 Hg 농도는 혈중 Pb 농도와 동일하게 20대에서 50대까지 증가하였고, 60대부터는 감소하였다( $p = 0.004$ ). 음주력에 따른 요중 Hg 농도는 음주 빈도가 증가할수록 통계적으로 유의한 것으로 나타났다( $p < 0.001$ ). 요중 Cd 농도는 여성( $0.61 \mu\text{g/L}$ )이 남성( $0.43 \mu\text{g/L}$ )보다 높게 나타났고( $p < 0.001$ ), 연령이 증가할수록 농도가 증가하였다( $p < 0.001$ ). 흡연력에 따른 요중 Cd 농도는 흡연자가 과거흡연자와 비흡연자보다 높았다( $p = 0.016$ ) (Table 4, 5).

성별, 연령, 교육수준, 흡연력, 음주력, 어류 섭취, 대형어류 섭취를 독립변수로 사용하고, 체내 중금속 농도를 종속변수로 하여 다중회귀분석을 실시하였다(Table 6, 7). 혈중 Pb 농도에 영향을 주는 독립변수는 성별, 연령, 교육수준, 흡연력, 음주력으로 나타났다. 혈중 Pb 농도는 남성이 여성보다 높았고( $p < 0.001$ ), 연령에서는 20대에서 50대까지 증가하는 경향을 보이다가 60대부터 감소하였다( $p < 0.001$ ). 교육수준에서는 학력이 높아질수록 감소하였고( $p < 0.001$ ), 흡연력에 따라 흡연자가 비흡연자와 과거흡연자 보다 더 높은 것으로 나타났다( $p < 0.001$ ). 혈중 Hg 농도에 영향을 주는 독립변수는 성별, 연

령, 음주력, 어류 섭취량, 대형어류 섭취량이었다. 혈중 Hg 농도는 남성이 여성보다 높은 것으로 나타났고( $p < 0.001$ ), 연령은 혈중 납과 동일한 경향을 보였다( $p < 0.001$ ). 음주력은 주 1회 이상 술을 마신 경우 주 1회 미만 술을 마신 집단보다 증가하였다( $p < 0.001$ ). 어류 섭취량은 1주에 1회 이상 섭취할 경우 증가하였고( $p < 0.001$ ), 대형어류 섭취량에서도 1달에 1회 이상 섭취한 집단에서 높았다( $p = 0.003$ ).

요중 Hg 농도에 영향을 주는 독립변수는 연령과 음주력으로 나타났다. 연령에서 요중 Hg 농도는 60대에서 감소하였고( $p = 0.028$ ), 음주력은 주 1회 이상 술을 마신 집단에서 높았다( $p < 0.001$ ). 요중 Cd 농도에 영향을 주는 독립변수는 성별, 연령, 흡연력으로 나타났다. 요중 Cd 농도는 요중 Hg 농도와 동일하게 여성이 남성보다 높았다( $p < 0.001$ ). 연령에서는 모든 연령대에서 증가하는 경향을 보였고( $p < 0.001$ ), 흡연력은 흡연자가 비흡연자와 과거흡연자보다 높은 것으로 나타났다( $p = 0.008$ ).

### 3. 경로별 기여율 및 위해성 평가

연령 기준으로 나눈 3개 그룹의 Pb, Hg, Cd의 경로별 ADD는 경구>흡입>경피 순으로 나타났다(Table 8). Pb의 경로별 ADD를 고려하였을 때 경구 노출경로의 식품 섭취

**Table 5.** Sociodemographic characteristics of study participants by urine mercury and cadmium concentration

Variables	Urine mercury concentration (n=2,646)			Urine cadmium concentration (n=2,644)			
	AM	GM (95% CI)	p-value	AM	GM (95% CI)	p-value	
Sex	Male	0.42	0.30 (0.28~0.33)	0.558	0.68	0.43 (0.39~0.49)	<0.001
	Female	0.42	0.32 (0.28~0.35)		0.85	0.61 (0.54~0.69)	
Age	20s	0.34	0.26 (0.22~0.31)	0.004	0.43	0.24 (0.19~0.30)	<0.001
	30s	0.43	0.33 (0.29~0.37)		0.57	0.38 (0.32~0.45)	
	40s	0.45	0.31 (0.27~0.35)		0.69	0.50 (0.46~0.55)	
	50s	0.48	0.36 (0.32~0.39)		0.94	0.68 (0.60~0.78)	
	60s	0.46	0.34 (0.30~0.39)		0.98	0.77 (0.69~0.85)	
	≥70s	0.39	0.27 (0.22~0.34)		0.97	0.79 (0.69~0.89)	
Education level	≤Middle school	0.39	0.29 (0.26~0.33)	0.197	0.81	0.53 (0.48~0.59)	0.302
	High school	0.42	0.31 (0.28~0.33)		0.77	0.53 (0.47~0.60)	
	≥College	0.46	0.33 (0.30~0.37)		0.71	0.48 (0.44~0.53)	
Smoking	No smoking	0.42	0.30 (0.28~0.33)	0.139	0.70	0.46 (0.41~0.51)	0.016
	Before smoking	0.46	0.33 (0.30~0.37)		0.71	0.51 (0.44~0.58)	
	Current smoking	0.40	0.29 (0.26~0.33)		0.88	0.59 (0.52~0.68)	
Alcohol consumption	<1/week	0.36	0.27 (0.25~0.29)	<0.001	0.75	0.49 (0.44~0.54)	0.069
	≥1/week	0.49	0.36 (0.33~0.39)		0.77	0.54 (0.50~0.60)	
Fish consumption	<1/week	0.41	0.30 (0.27~0.32)	0.058	0.76	0.50 (0.46~0.55)	0.224
	≥1/week	0.44	0.32 (0.30~0.35)		0.77	0.53 (0.49~0.58)	
Big fish consumption	<1/month	0.42	0.30 (0.28~0.32)	0.393	0.78	0.53 (0.49~0.58)	0.274
	≥1/month	0.43	0.32 (0.29~0.35)		0.75	0.50 (0.45~0.56)	

AM: arithmetic mean, GM: geometric mean, CI: confidence interval.

**Table 6.** Multiple regression analysis of lead and mercury concentrations in blood

Variables		Blood lead concentration (n=2,641)			Blood mercury concentration (n=2,641)		
		$\beta$	S.E.	p-value	$\beta$	S.E.	p-value
Sex	Male	ref.			ref.		
	Female	-0.124	0.029	<0.001	-0.245	0.059	<0.001
Age	20s	ref.			ref.		
	30s	0.161	0.036	<0.001	0.296	0.062	<0.001
	40s	0.287	0.050	<0.001	0.364	0.055	<0.001
	50s	0.431	0.054	<0.001	0.580	0.047	<0.001
	60s	0.427	0.040	<0.001	0.488	0.057	<0.001
	≥70s	0.390	0.042	<0.001	0.234	0.102	0.022
Education level	≤Middle school	ref.			ref.		
	High school	-0.092	0.031	0.003	-0.076	0.055	0.165
	≥College	-0.126	0.029	<0.001	-0.009	0.077	0.903
Smoking	No smoking	ref.			ref.		
	Before smoking	0.110	0.029	<0.001	0.124	0.051	0.017
	Current smoking	0.152	0.030	<0.001	0.035	0.062	0.569
Alcohol consumption	<1/week	ref.			ref.		
	≥1/week	0.101	0.018	<0.001	0.220	0.032	<0.001
Fish consumption	<1/week	ref.			ref.		
	≥1/week	0.018	0.018	0.301	0.236	0.030	<0.001
Big fish consumption	<1/month	ref.			ref.		
	≥1/month	-0.026	0.027	0.346	0.098	0.033	0.003

**Table 7.** Multiple regression analysis of mercury and cadmium concentrations in urine

Variables		Urine mercury concentration (n=2,646)			Urine cadmium concentration (n=2,644)		
		$\beta$	S.E.	p-value	$\beta$	S.E.	p-value
Sex	Male	ref.			ref.		
	Female	0.036	0.060	0.558	0.343	0.092	<0.001
Age	20s	ref.			ref.		
	30s	0.217	0.079	0.007	0.476	0.127	<0.001
	40s	0.170	0.101	0.092	0.754	0.127	<0.001
	50s	0.305	0.080	<0.001	1.061	0.137	<0.001
	60s	0.263	0.118	0.028	1.175	0.134	<0.001
	≥70s	0.028	0.158	0.860	1.200	0.137	<0.001
Education level	≤Middle school	ref.			ref.		
	High school	0.044	0.062	0.482	-0.007	0.058	0.903
	≥College	0.123	0.066	0.063	-0.101	0.069	0.141
Smoking	No smoking	ref.			ref.		
	Before smoking	0.091	0.065	0.218	0.104	0.090	0.250
	Current smoking	-0.034	0.069	0.103	0.265	0.099	0.008
Alcohol consumption	<1/week	ref.			ref.		
	≥1/week	0.279	0.046	<0.001	0.111	0.061	0.069
Fish consumption	<1/week	ref.			ref.		
	≥1/week	0.085	0.044	0.058	0.060	0.049	0.224
Big fish consumption	<1/month	ref.			ref.		
	≥1/month	0.050	0.059	0.393	-0.068	0.062	0.274

**Table 8.** ADD values from inhalation, dermal, and ingestion according to sub-population

Heavy metal	Group	ADD <sub>inh</sub> (mg/kg/day)			ADD <sub>der</sub> (mg/kg/day)		ADD <sub>ing</sub> (mg/kg/day)			
		Indoor air	Outdoor air	Smoking	Soil	Dust	Food	Water	Soil	Dust
Pb	19~64 male	3.40E-06	3.40E-06	9.88E-06	1.05E-07	6.01E-07	1.94E-04	3.97E-05	2.79E-06	6.41E-06
	19~64 female	3.46E-06	3.46E-06	6.88E-06	1.11E-07	6.37E-07	1.90E-04	3.77E-05	3.48E-06	7.99E-06
	65 over	3.84E-06	3.84E-06	1.04E-05	1.09E-07	6.24E-07	1.70E-04	3.59E-05	3.39E-06	7.77E-06
Hg	19~64 male	4.49E-07	4.49E-07	5.33E-07	2.07E-07	7.77E-07	8.40E-05	7.94E-06	5.30E-09	7.95E-09
	19~64 female	4.57E-07	4.57E-07	3.72E-07	2.19E-07	8.22E-07	6.50E-05	7.53E-06	6.60E-09	9.90E-09
	65 over	5.07E-07	5.07E-07	5.61E-07	2.06E-07	7.74E-07	6.10E-05	7.19E-06	6.42E-09	9.64E-09
Cd	19~64 male	1.24E-07	1.24E-07	2.03E-05	4.97E-09	1.01E-06	3.96E-04	7.94E-06	1.32E-08	1.07E-06
	19~64 female	1.26E-07	1.26E-07	1.42E-05	5.26E-09	1.07E-06	3.19E-04	7.53E-06	1.65E-08	1.34E-06
	65 over	1.40E-07	1.40E-07	2.14E-05	5.16E-09	1.04E-06	2.38E-04	7.19E-06	1.61E-08	1.30E-06

**Table 9.** LADD values from inhalation, dermal, and ingestion according to sub-population

Heavy metal	Group	LADD <sub>inh</sub> (mg/kg/day)			LADD <sub>der</sub> (mg/kg/day)		LADD <sub>ing</sub> (mg/kg/day)			
		Indoor air	Outdoor air	Smoking	Soil	Dust	Food	Water	Soil	Dust
Pb	19~64 male	1.03E-06	1.03E-06	2.99E-06	3.17E-08	1.82E-07	5.86E-05	1.20E-05	8.45E-07	1.94E-06
	19~64 female	1.05E-06	1.05E-06	2.08E-06	3.36E-08	1.93E-07	5.74E-05	1.14E-05	1.05E-06	2.41E-06
	65 over	1.16E-06	1.16E-06	3.14E-06	3.29E-08	1.89E-07	5.14E-05	1.09E-05	1.02E-06	2.35E-06
Cd	19~64 male	3.76E-08	3.76E-08	6.15E-06	1.50E-09	3.04E-07	1.20E-04	2.40E-06	4.00E-09	3.24E-07
	19~64 female	3.82E-08	3.82E-08	4.29E-06	1.59E-09	3.22E-07	9.64E-05	2.28E-06	4.99E-09	4.04E-07
	65 over	4.24E-08	4.24E-08	6.47E-06	1.56E-09	3.16E-07	7.19E-05	2.17E-06	4.86E-09	3.93E-07

**Table 10.** HQ and HI values from inhalation, dermal, and ingestion according to sub-population

Heavy metal	Group	HQ <sub>inh</sub>			HQ <sub>der</sub>		HQ <sub>ing</sub>				HI
		Indoor air	Outdoor air	Smoking	Soil	Dust	Food	Water	Soil	Dust	
Pb	19~64 male	9.67E-04	9.67E-04	2.81E-03	2.00E-04	1.15E-03	5.54E-02	1.13E-02	7.98E-04	1.83E-03	7.55E-02
	19~64 female	9.83E-04	9.83E-04	1.96E-03	2.12E-04	1.21E-03	5.43E-02	1.08E-02	9.95E-04	2.28E-03	7.37E-02
	65 over	1.09E-03	1.09E-03	2.95E-03	2.07E-04	1.19E-03	4.86E-02	1.03E-02	9.68E-04	2.22E-03	6.86E-02
Hg	19~64 male	5.23E-03	5.23E-03	6.20E-03	6.90E-04	2.59E-03	2.80E-01	2.65E-02	1.77E-05	2.65E-05	3.26E-01
	19~64 female	5.31E-03	5.31E-03	4.32E-03	7.31E-04	2.74E-03	2.17E-01	2.51E-02	2.20E-05	3.30E-05	2.60E-01
	65 over	5.89E-03	5.89E-03	6.52E-03	6.88E-04	2.58E-03	2.03E-01	2.40E-02	2.14E-05	3.21E-05	2.49E-01
Cd	19~64 male	2.18E-03	2.18E-03	3.57E-01	9.94E-06	2.01E-03	7.92E-01	1.59E-02	2.65E-05	2.15E-03	1.17E+00
	19~64 female	2.22E-03	2.22E-03	2.49E-01	1.05E-05	2.13E-03	6.38E-01	1.51E-02	3.30E-05	2.67E-03	9.11E-01
	65 over	2.46E-03	2.46E-03	3.75E-01	1.03E-05	2.09E-03	4.76E-01	1.44E-02	3.21E-05	2.60E-03	8.75E-01

가 1.70E-04~1.94E-04 mg/kg/day로 가장 높게 나타났고, 경피 노출경로의 토양의 피부 접촉은 1.05E-07~1.11E-07 mg/kg/day로 가장 낮았다. Hg은 경구 노출경로의 식품섭취에서 6.10E-05~8.40E-05 mg/kg/day로 가장 높았고, 경구 노출경로의 토양의 비의도적 섭취에서 5.30E-09~6.60E-09 mg/kg/day로 가

장 낮게 나타났다. Cd의 경로별 ADD는 경구 노출경로의 식품섭취에서 2.38E-04~3.96E-04 mg/kg/day로 가장 높았고, 경피 노출경로의 토양의 피부 접촉에서 4.97E-09~5.26E-09 mg/kg/day로 가장 낮았다. Pb, Cd의 경로별 LADD는 경구 노출경로의 식품섭취에서 각각 5.14E-05~5.86E-05 mg/kg/day, 7.19E-05~1.20E-04



mg/kg/day로 가장 높았다(Table 9).

Pb의 전체 경로별 HQ를 고려하였을 때 경구 노출경로의 식품 섭취에서  $4.86E-02 \sim 5.54E-02$ 로 가장 높았으나  $HQ < 1$ 로 잠재적인 건강위해가 없었다. Hg의 경로별 HQ는 Pb와 동일하게 경구의 식품섭취에서  $2.03E-01 \sim 2.80E-01$ 로 가장 높았으나 잠재적인 건강위해가 없었다. Cd의 경로별 HQ도 동일하게 식품 섭취에서  $4.76E-01 \sim 7.92E-01$ 로 잠재적인 건강위해가 없었다. 모든 경로의 HQ를 고려한 HI는 Cd에서  $8.75E-01 \sim 1.17E+00$ 로 19~64세 남성에서  $HI \geq 1$ 로 잠재적인 건강위해가 있는 것으로 나타났고, Pb와 Hg의  $HI < 1$  미만으로 잠재적인 건강위해가 없었다(Table 10). Pb와 Cd의 전체 경로별 CR은 경구 노출경로의 식품에서 각각  $4.37E-07 \sim 4.98E-07$ ,  $4.39E-04 \sim 7.30E-04$ 로 가장 높았고, CR이  $1 \times 10^{-6}$  이상으로 Cd은 잠재적인 건강위해가 있는 것으로 나타났(Table 11). 노출경로별 HQ를 기준으로 Pb, Hg, Cd의 기여율 평가 결과 식품 섭취에서 각각 70.85~73.69%, 81.69~85.77%, 54.38~70.02%로 가장 높았고, CR을 기준으로 Pb, Cd의 기여율은 식품 섭취에서 각각 78.03~79.62%, 88.39~92.89%로 나타났(Fig. 2).

#### IV. 고 찰

본 연구는 제4기 국민환경보건 기초조사 결과를 바탕으로 우리나라 성인의 체내 중금속 노출수준을 평가하였다. 국민환경보건 기초조사 자료를 이용하여 성인의 사회인구학적 특성과 하위 인구집단 간 생체시료 농도의 평균을 비교하였고, 다중회귀분석을 실시하여 생체시료 농도에 영향을 줄 수 있는 요인을 분석하였다. 또한, 노출방식(흡입, 경피, 경구)별 노출알고리즘을 이용하여 기여율을 분석한 결과 경구가 가장 높았고, Bian 등<sup>52)</sup> (2015)의 연구에서 Pb, Cd의 식품섭취로 인한 기여율이 약 70%로 나타났는데 이 결과는 본 연구와 유사하였다.

생체 내 중금속의 감소는 휘발유의 Pb 제거와 휘발용첨가제 및 식품 캔의 땀납의 규제, 어패류 섭취의 제한 권고, 금연

프로그램이 개인노출 및 환경노출 수준을 줄이는데 기여하였다.<sup>53,54)</sup> 혈중 Pb 농도는 선행연구와 동일하게 남성이 여성보다 더 높게 나타났고, 음주 횟수 빈도가 증가할수록 더 높았다.<sup>1)</sup> 이것은 사회적인 노출기회, 직업적 노출, 적혈구 수가 남성이 여성보다 높은 영향인 것으로 알려져 있다.<sup>55,56)</sup> Hg의 혈중 농도는 Mckelvey 등<sup>57)</sup> (2007)의 연구와 동일하게 50대에서 가장 높은 것으로 나타났으며, BMI가 증가할수록 농도가 증가하였다.<sup>58)</sup> 또한, 주 1회 이상 어류섭취와 한달에 1회 이상 대형어류 섭취 시 혈중 Hg 농도가 유의하게 증가하였는데 이는 국내·외 연구 결과들과 일치하였다.<sup>59,60)</sup> 본 연구에서 요중 Hg 농도는 여성이 남성보다 높게 나타났고, 비슷한 수의 치과용 아말감 사용 시 여성이 더 높은 것으로 보고되었다.<sup>61)</sup> 요중 Cd 농도는 여성이 남성보다 높았고, 연령의 증가에 따라 농도도 함께 유의하게 증가하였다. 이는 가임기 여성이 주기적으로 체내 철(iron, Fe) 함량이 낮아지고, Fe 결핍 상태에서 Cd 흡수율이 증가하여 남성보다 높은 것으로 판단된다.<sup>62)</sup> 또한, 연령의 증가에 따른 요중 Cd 농도 증가는 노화의 영향으로 장기의 크기가 줄어들며 따라 축적된 Cd이 혈류로 유입되고, 신장에서 소변으로 대사되어 증가하는 것으로 보고되었다.<sup>63)</sup>

중금속 3종의 경로별 ADD, HQ, LADD, CR은 경구>흡입>경피 순으로 나타났다. CR을 기준으로 Pb, Hg, Cd의 기여율은 경구 노출경로에서 91.55~99.70%로 가장 높았고, 식품 노출로 인한 기여율이 78.03~92.89%로 나타났다. Liu 등<sup>64)</sup> (2013)의 연구에서 식품 섭취, 물, 공기의 경로별 기여율을 산출한 결과와 유사하여 이를 통해 다양한 식품의 경구 노출경로의 관리의 필요성 및 우선관리 순위를 제시할 수 있다. 그러나, 산업단지 주변의 경우 실내 침적먼지 섭취로 인한 기여율이 약 70% 이상으로 나타나 침적먼지의 대표 노출계수를 산출하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.<sup>65,66)</sup> 또한, 위해성평가의 결과는 평가의 방법에서 불확실성을 내포할 수 있기 때문에 확률론적 노출평가를 수행하여 민감도 분석 결과를 제시하는 것이 필요하다.<sup>67)</sup>

본 연구는 제4기 국민환경보건 기초조사 결과를 이용하여

**Table 11.** CR and TCR values from inhalation, dermal, and ingestion according to sub-population

Heavy metal	Group	CR <sub>inh</sub>			CR <sub>der</sub>		CR <sub>ing</sub>				TCR
		Indoor air	Outdoor air	Smoking	Soil	Dust	Food	Water	Soil	Dust	
Pb	19~64 male	1.24E-11	1.24E-11	3.58E-11	2.69E-10	1.55E-09	4.98E-07	1.02E-07	7.18E-09	1.65E-08	6.26E-07
	19~64 female	1.25E-11	1.25E-11	2.50E-11	2.85E-10	1.64E-09	4.88E-07	9.67E-08	8.95E-09	2.05E-08	6.16E-07
	65 over	1.39E-11	1.39E-11	3.77E-11	2.80E-10	1.60E-09	4.37E-07	9.23E-08	8.71E-09	2.00E-08	5.60E-07
Cd	19~64 male	2.29E-07	2.29E-07	3.75E-05	9.47E-09	1.92E-06	7.30E-04	1.46E-05	2.44E-08	1.98E-06	7.87E-04
	19~64 female	2.33E-07	2.33E-07	2.62E-05	1.00E-08	2.03E-06	5.88E-04	1.39E-05	3.04E-08	2.47E-06	6.33E-04
	65 over	2.59E-07	2.59E-07	3.95E-05	9.82E-09	1.99E-06	4.39E-04	1.33E-05	2.96E-08	2.40E-06	4.97E-04

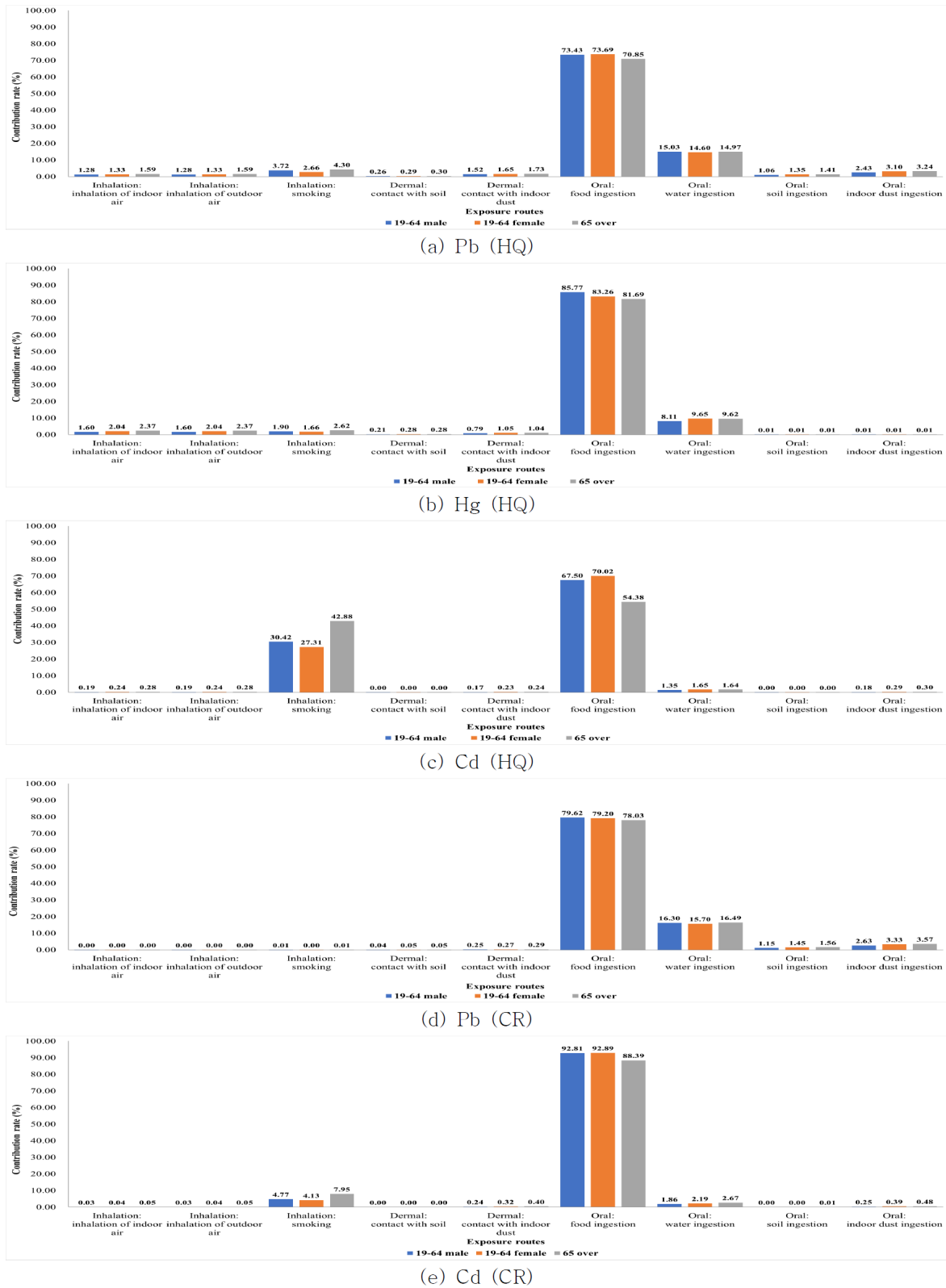


Fig. 2. Assessment of contribution rates by sub-population exposure route and pathway for heavy metals (Pb, Hg, Cd)

한국 성인의 체내 중금속 노출수준과 사회인구학적 특성을 고려하여 통계분석을 진행하였고, 노출알고리즘을 이용하여 경로별 기여율을 제시하였다. 식품 섭취로 인한 건강위해 가능성이 높게 나타났으나 전체 식품의 총 노출량으로 평가하였다는 한계점이 존재한다. 또한, Pb와 Hg과 통일되게 혈중 Cd 농도 측정이 필요할 것으로 보이고, 비타민 등의 건강보조식품은 체내 중금속 농도 감소에 영향을 주는 요인으로 설문지에 추가로 고려할 필요가 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 2018년부터 2020년까지 국립환경과학원에 서 수행한 국민환경보건 기초조사 제4기 설문조사 결과를 통해 한국 성인 2,646명의 체내 중금속 3종의 노출수준과 영향 요인에 대해서 파악하였고, 노출경로별 기여율을 제시하였다. 혈중 Pb와 Hg은 남성이 여성보다 높았고, 반대로 요중 Hg과 Cd은 여성이 높은 것으로 나타났다. 혈중 Pb와 요중 Cd은 학력이 높아질수록 농도가 감소하였고, 혈중 Hg에서는 어류 섭취량과 대형어류 섭취량 빈도가 증가할수록 농도가 높게 나타났다. 경로별 기여율 산출결과 Pb, Hg, Cd은 경구 노출경로의 기여율이 가장 높았고, 그 중 식품 섭취에서 가장 높은 것으로 나타나 체내 중금속 노출수준을 낮추기 위한 우선순위를 제시할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 국립환경과학원 제4기 국민환경보건기초조사 자료(NIER-GP2022-016)를 제공받았으며, 환경부·환경보건학회 환경보건센터 “2023년 환경보건 전문인력 양성사업 위탁사업(환경보건학회)”에서 지원받아 수행된 결과이며, 환경부 환경산업기술원의 환경성질환사업(과제번호: 2021003320008, NTIS: 1485019274) 수행 중 작성되었으며 이에 감사드립니다.

## Conflict of Interest

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

## References

- Joo Y, Kwon YM, Kim SY, Choi K, Lee C, Yu SD, et al. A study on heavy metals exposure and major sociodemographic influence factors among Korean adults - Korean National Environmental Health Survey (2009-2017). *J Environ Health Sci*. 2019; 45(5): 541-555.

- World Health Organization (WHO). 10 chemicals of public health concern. Available: <https://www.who.int/news-room/photo-story/photo-story-detail/10-chemicals-of-public-health-concern> [Accessed 23 September 2023].
- Kumar V, Parihar RD, Sharma A, Bakshi P, Singh Sidhu GP, Bali AS, et al. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: a meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*. 2019; 236: 124364.
- Li K, Wang J, Zhang Y. Heavy metal pollution risk of cultivated land from industrial production in China: spatial pattern and its enlightenment. *Sci Total Environ*. 2022; 828: 154382.
- Health Canada. Fourth report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada. Results of the Canadian health measures survey cycle 4 (2014-2015). Ottawa: Health Canada; 2017.
- Giwa AS, Xu H, Chang F, Zhang X, Ali N, Yuan J, et al. Pyrolysis coupled anaerobic digestion process for food waste and recalcitrant residues: fundamentals, challenges, and considerations. *Energy Sci Eng*. 2019; 7(6): 2250-2264.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for lead. Atlanta: ATSDR; 2020.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for mercury. Atlanta: ATSDR; 2022.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological profile for cadmium. Atlanta: ATSDR; 2012.
- World Health Organization (WHO). Lead in drinking-water. Geneva: WHO; 2011.
- World Health Organization (WHO). Mercury in drinking-water. Geneva: WHO; 2005.
- World Health Organization (WHO). Cadmium in drinking-water. Geneva: WHO; 2011.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 100E. Personal habits and indoor combustions. Lyon: IARC; 2012.
- Mergler D, Anderson HA, Chan LH, Mahaffey KR, Murray M, Sakamoto M, et al. Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern. *Ambio*. 2007; 36(1): 3-11.
- World Health Organization (WHO). Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution. Geneva: WHO; 2007.
- Amaya E, Gil F, Freire C, Olmedo P, Fernández-Rodríguez M, Fernández MF, et al. Placental concentrations of heavy metals in a mother-child cohort. *Environ Res*. 2013; 120: 63-70.
- International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, volume 87. Inorganic and organic lead compounds. Lyon: IARC; 2006.
- Zhu G, Fan G, Feng C, Li Y, Chen Y, Zhou F, et al. The effect of lead exposure on brain iron homeostasis and the expression of DMT1/FPI in the brain in developing and aged rats. *Toxicol Lett*. 2013; 216(2-3): 108-123. Erratum in: *Toxicol Lett*. 2013; 218(3): 308.
- Bridges CC, Zalups RK. The aging kidney and the nephrotoxic effects of mercury. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*. 2017; 20(2): 55-80.
- Satarug S, Garrett SH, Sens MA, Sens DA. Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environ Health Perspect*. 2010; 118(2): 182-190.

21. Zhang L, Gao Y, Wu S, Zhang S, Smith KR, Yao X, et al. Global impact of atmospheric arsenic on health risk: 2005 to 2015. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2020; 117(25): 13975-13982.
22. Godt J, Scheidig F, Grosse-Siestrup C, Esche V, Brandenburg P, Reich A, et al. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health. *J Occup Med Toxicol.* 2006; 1: 22.
23. Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Fourth national report on human exposure to environmental chemicals, updated tables, January 2019, volume one. Atlanta: CDC; 2019.
24. Health Canada. Fifth report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada. Results of the Canadian health measures survey cycle 5 (2016-2017). Ottawa: Health Canada; 2019.
25. Becker K, Kaus S, Krause C, Lepom P, Schulz C, Seiwert M, et al. German Environmental Survey 1998 (GerES III): environmental pollutants in blood of the German population. *Int J Hyg Environ Health.* 2002; 205(4): 297-308.
26. Hwang MY, Hong SY, Kwon YM, Jo HJ, Park CH. Differences of chemical exposure levels according to residential and personal life-style characteristics of Korean adult population - from Korean National Environmental Health Survey. *J Environ Health Sci.* 2019; 45(2): 142-153.
27. World Health Organization (WHO). Trace elements in human nutrition and health. Geneva: WHO; 1996.
28. Jeong S, Park S, Gil J, Kim O, Lee C, Kim S, et al. Manual for Laboratory Procedures on the Fourth Stage Korean National Environmental Health Survey (Heavy metals). Incheon: National Institute of Environmental Research; 2022.
29. Kang H, Kim S, Kim H, Park J, Song Y, Shin M, et al. Development of integrated risk assessment methodology for five heavy metals. Osong: Ministry of Food and Drug Safety (MFDS); 2020 Nov. Report No.: TRKO202100007668.
30. National Institute of Environmental Research (NIER). Korean exposure factor handbook. Incheon: NIER; 2019.
31. National Institute of Environmental Research (NIER). Guidelines for preparing data on the risks of chemical substances. Incheon: NIER; 2021 Feb. Report No.: NIER-GP2016-163.
32. National Institute of Environmental Research. Annual report of air quality in Korea 2021. Sejong: Ministry of Environment; 2022. Report No.: NIER-GP2022-048.
33. Ministry of Environment. Soil measurement network and soil pollution survey. Available: [https://sgis.nier.go.kr/web/soilMeasure?pMENU\\_NO=16](https://sgis.nier.go.kr/web/soilMeasure?pMENU_NO=16) [Accessed September 27 2023].
34. Choi Y, Lim Y, Bae S, Park H, Cho K, Choi Y, et al. Environmental exposures and health effects in elderly population (I). Sejong: Ministry of Environment; 2012 May. Report No.: TRKO201300007682.
35. Ministry of Food and Drug Safety. Mercury integrated risk assessment. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2014.
36. National Institute of Environmental Research (NIER). Aggregate risk assessment report: cadmium. Incheon: NIER; 2017 Dec. Report No.: NIER-GP2017-247.
37. Xu DM, Yan B, Chen T, Lei C, Lin HZ, Xiao XM. Contaminant characteristics and environmental risk assessment of heavy metals in the paddy soils from lead (Pb)-zinc (Zn) mining areas in Guangdong Province, South China. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2017; 24(31): 24387-24399.
38. Health Canada. Federal contaminated site risk assessment in Canada, Part II: Health Canada toxicological reference values (TRVs) and chemical-specific factors, version 2.0. Ottawa: Health Canada; 2010.
39. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (part E, supplemental guidance for dermal risk assessment). Washington, D.C.: EPA; 2004.
40. Ministry of Food and Drug Safety. Development of integrated risk assessment methodology for five heavy metals. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2020 Nov. Report No.: TRKO202100007668.
41. Korea Institute of Science and Technology Information. Study of heavy metals in food safety control. Cheongju: Ministry of Food and Drug Safety; 2016 Nov. Report No.: TRKO201700017543.
42. Heidari M, Darijani T, Alipour V. Heavy metal pollution of road dust in a city and its highly polluted suburb; quantitative source apportionment and source-specific ecological and health risk assessment. *Chemosphere.* 2021; 273: 129656.
43. She W, Guo L, Gao J, Zhang C, Wu S, Jiao Y, et al. Spatial distribution of soil heavy metals and associated environmental risks near major roads in Southern Tibet, China. *Int J Environ Res Public Health.* 2022; 19(14): 8380.
44. Gui H, Yang Q, Lu X, Wang H, Gu Q, Martín JD. Spatial distribution, contamination characteristics and ecological-health risk assessment of toxic heavy metals in soils near a smelting area. *Environ Res.* 2023; 222: 115328.
45. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Exposure factors handbook 2011 edition (final report). Washington, D.C.: EPA; 2011.
46. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual, supplemental guidance: "standard default exposure factors". Washington, D.C.: EPA; 1991.
47. Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). Technical Support Document for Cancer Potency Factors 2009: OEHHA; 2009.
48. Wu L, Yue W, Wu J, Cao C, Liu H, Teng Y. Metal-mining-induced sediment pollution presents a potential ecological risk and threat to human health across China: a meta-analysis. *J Environ Manage.* 2023; 329: 117058.
49. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Guidelines for carcinogen risk assessment. Washington, D.C.: EPA; 2005.
50. Chonokhuu S, Batbold C, Chuluunpurev B, Battengel E, Dorjsuren B, Byambaa B. Contamination and health risk assessment of heavy metals in the soil of major cities in Mongolia. *Int J Environ Res Public Health.* 2019; 16(14): 2552.
51. Karimi A, Naghizadeh A, Biglari H, Peirovi R, Ghasemi A, Zarei A. Assessment of human health risks and pollution index for heavy metals in farmlands irrigated by effluents of stabilization ponds. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2020; 27(10): 10317-10327.
52. Bian B, Zhou LJ, Li L, Lv L, Fan YM. Risk assessment of heavy metals in air, water, vegetables, grains, and related soils irrigated with biogas slurry in Taihu Basin, China. *Environ Sci Pollut Res Int.*

- 2015; 22(10): 7794-7807.
53. Oh SE, Kim GB, Hwang SH, Ha M, Lee KM. Longitudinal trends of blood lead levels before and after leaded gasoline regulation in Korea. *Environ Health Toxicol.* 2017; 32: e2017019.
  54. U.S. Food and Drug Administration (FDA). Advice about eating fish: for those who might become or are pregnant or breastfeeding and children ages 1-11 years. Available: <https://www.fda.gov/food/consumers/advice-about-eating-fish> [Accessed 23 September 2023].
  55. Li H, Hansen AR, McGalliard Z, Gover L, Yan F, Zhang J. Trends in smoking and smoking cessation during pregnancy from 1985 to 2014, racial and ethnic disparity observed from multiple national surveys. *Matern Child Health J.* 2018; 22(5): 685-693.
  56. Kim NS, Lee BK. National estimates of blood lead, cadmium, and mercury levels in the Korean general adult population. *Int Arch Occup Environ Health.* 2011; 84(1): 53-63. Erratum in: *Int Arch Occup Environ Health.* 2011; 84(1): 65.
  57. McKelvey W, Gwynn RC, Jeffery N, Kass D, Thorpe LE, Garg RK, et al. A biomonitoring study of lead, cadmium, and mercury in the blood of New York city adults. *Environ Health Perspect.* 2007; 115(10): 1435-1441. Erratum in: *Environ Health Perspect.* 2011; 119(2): A57.
  58. Pyo SS. The association of mercury and ALT with obesity in Korean adults: using data from the Korea National Health and Nutrition Examination Survey for 11 years (KNHANES 2005, 2008~2017). *Korean J Clin Lab Sci.* 2022; 54(3): 192-200.
  59. Chung JW, Acharya D, Singh JK, Sakong J. Association of blood mercury level with liver enzymes in Korean adults: an analysis of 2015-2017 Korean National Environmental Health Survey. *Int J Environ Res Public Health.* 2023; 20(4): 3290.
  60. Miao J, Feng S, Dou S, Ma Y, Yang L, Yan L, et al. Association between mercury exposure and lung function in young adults: a prospective cohort study in Shandong, China. *Sci Total Environ.* 2023; 878: 162759.
  61. Hazelhoff MH, Bulacio RP, Torres AM. Gender related differences in kidney injury induced by mercury. *Int J Mol Sci.* 2012; 13(8): 10523-10536.
  62. Zhang X, Wei H, Guan Q, Yang X, Yu Q, Zhang M, et al. Maternal exposure to trace elements, toxic metals, and longitudinal changes in infancy anthropometry and growth trajectories: a prospective cohort study. *Environ Sci Technol.* 2023; 57(32): 11779-11791.
  63. Somporn R, Chaiwong N, Hasan MM, Chaiwong S. Cadmium exposure and renal function biomarkers: a 10-year follow-up of Thailand's Tak Province population. *Sustainability.* 2023; 15(14): 11291.
  64. Liu X, Song Q, Tang Y, Li W, Xu J, Wu J, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: a multi-medium analysis. *Sci Total Environ.* 2013; 463-464: 530-540.
  65. Chen L, Xu Z, Liu M, Huang Y, Fan R, Su Y, et al. Lead exposure assessment from study near a lead-acid battery factory in China. *Sci Total Environ.* 2012; 429: 191-198.
  66. Zheng J, Chen KH, Yan X, Chen SJ, Hu GC, Peng XW, et al. Heavy metals in food, house dust, and water from an e-waste recycling area in South China and the potential risk to human health. *Eco-toxicol Environ Saf.* 2013; 96: 205-212.
  67. Asante-Duah K. Principal elements of a public health risk assessment for chemical exposure problems. In: Asante-Duah K. editor. *Public health risk assessment for human exposure to chemicals.* Dordrecht: Springer; 2017. p.149-167.

#### 〈저자정보〉

민기홍(연구원), 신지훈(연구원), 김동준(연구원),  
우재민(연구원), 성경화(연구원), 조만수(교수),  
양원호(교수)