

우리나라 성인의 체내 중금속 3종에 대한 노출수준과 주요 인구사회학적 영향요인에 관한 연구 - 제1~3기 국민환경보건 기초조사(2009-2017) 결과 -

주영경 · 권영민 · 김성연 · 최경호* · 이철우 · 유승도 · 유지영†
국립환경과학원 환경보건연구과, *서울대학교 보건대학원 환경보건학과

A Study on Heavy Metals Exposure and Major Sociodemographic Influence Factors among Korean Adults - Korean National Environmental Health Survey (2009-2017) -

Youngkyung Joo, Young Min Kwon, Sung Yeon Kim, Kyungho Choi*,
Chulwoo Lee, Seung Do Yu, and Jiyoung Yoo†

Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research
**Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University*

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to examine heavy metal exposure levels in the blood and urine of a nationally representative adult population in Korea, and to identify the major influence factors for exposure through linkage analysis using questionnaire data.

Methods: Biological samples and questionnaire data were collected from adults aged 18 and over who had participated in the Korean National Environmental Health Survey from 2009 to 2017. Lead, mercury, and cadmium exposure levels were presented with geometric mean and 95th percentiles. Multiple regression analysis was performed to determine the factors affecting heavy metal concentrations.

Results: Blood lead levels increased slightly in Cycle 2 compared to Cycle 1, but decreased in Cycle 3. Blood and urinary mercury and urinary cadmium levels decreased over time. The main influence factors included gender, age, and smoking status for blood lead levels; gender, age, and intake of fish at least once a week for blood mercury levels; and age for urinary cadmium levels.

Conclusion: The Korean National Environmental Health Survey is an effective tool for confirming over-time changes in exposure to lead, mercury, and cadmium in Korean adults and to identify its influence factors. The results of this study are expected to present basic data for calculating reference values and baseline exposure levels for environmental chemicals in Korean adults.

Key words: Heavy metals, adult, biomonitoring, KoNEHS

I. 서 론

납(Pb), 수은(Hg) 및 카드뮴(Cd)과 같은 중금속은

자연발생 오염 물질로 인간의 활동에 의해 환경수준이 증가되었다. 중금속은 인간에게 유독하며, 환경과 유기체에 축적될 수 있으므로 노출 수준이 낮더라도

†Corresponding author: Environmental Health Research Division, National Institute of Environmental Research, Hwankyung-ro 42, Seo-gu, Incheon, 22689, Republic of Korea, Tel: +82-32-560-7129, Fax: +82-32-568-2035, E-mail: yjy0216@korea.kr

Received: 17 September 2019, Revised: 14 October 2019, Accepted: 15 October 2019

건강에 여러 가지 악영향을 끼칠 수 있다.¹⁾ 일반적으로 섭취(음료 또는 식사), 흡입(호흡) 또는 피부(접촉)에 의해 노출되며, 중금속과 그 화합물을 사용하는 산업 현장에서 일하거나 그 근처에 거주하거나 부적절하게 폐기한 장소 근처에 거주하는 것은 노출 위험을 높인다.²⁾

중금속 축적이 인체에 미치는 영향은 국내외에서 다수의 연구를 통하여 밝혀졌으며, 납은 심혈관계, 신장계, 내분비계 등 거의 모든 장기에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 국제 암연구소(IARC)는 무기 납을 Group 2A로 인체 발암 가능성이 있는 물질로 분류하고 있다.³⁾ 수은은 신경계, 신장계, 심장 및 생식계 장애 등 유전적 손상의 원인이 되는 것으로 밝혀졌다.⁴⁾ 카드뮴에 장기간 노출되면 신장 손상, 폐 질환 및 골다공증이 발생할 수 있으며, IARC는 카드뮴을 Group 1로 사람에게 암을 일으키는 물질로 분류하고 있다.⁵⁾

환경유해물질의 바이오모니터링은 1890년대 작업장에서 근로자의 납 노출평가를 위해 처음 시작되었으며, 점차 확대되어 미국 National Health and Nutrition Survey (NHANES), 캐나다 Canadian Health Measures Survey (CHMS), 독일 German Environmental Survey (GerES) 등에서 국가 단위의 모니터링 연구가 진행되고 있다.⁶⁻⁸⁾ 국내에서는 환경보건법 제14조에 따라 2009년부터 3년 주기로 생체내 환경유해물질의 농도와 영향요인 파악 등을 수행하는 국민환경보건 기초조사를 하고 있다. 이를 통해 우리나라 국민에 대한 환경유해물질 노출수준의 대푯값을 확인하고, 미국 등 외국과의 노출수준을 비교하고 노출요인에 대한 평가를 하고 있다.⁹⁾

본 연구는 한국의 대표성 있는 성인 인구를 대상으로 혈액 및 요 중 중금속 노출 수준을 살펴보고, 그동안 수행된 3차례에 걸친 조사결과를 토대로 경시적 변화양상을 파악하였다. 또한 수집된 설문자료와의 연계분석을 통해 주요 노출 기여요인들을 파악하고자 하였다. 이를 위해 2009년부터 2017년까지 환경부에서 수행한 국민환경보건 기초조사 자료를 활용하였다. 이 연구의 성과는 현재 우리나라 성인의 주요 중금속 노출 실태와 최근 9년 동안의 노출수준 변화 경향을 파악함으로써 중금속 환경보건 관리대책 마련을 위해 활용될 수 있다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상자

국민환경보건 기초조사의 표본설계는 인구주택총조사 자료를 기본 추출틀로 사용하였으며, 행정구역과 해안층으로 1차 층화하였고 사회·경제적 수준에 따라 2차 층화를 하였다. 추가적으로 중금속 측정망 설치지역을 고려하여 표본 조사구를 선정하였으며, 지역별 배분은 인구제곱근비례 방식을 적용하였다.

만 19세 이상 성인을 대상으로 1기('09-'11) 6,311명, 2기('12-'14) 6,478명, 3기('15-'17) 3,787명의 참가자를 모집하였으며, 그 중 크레아티닌 적합 범위(0.3~3.0 g/L)를 벗어나는 참가자를 제외하여¹⁰⁾ 최종적으로 1기 5,700명, 2기 5,550명, 3기 3,338명을 대상으로 하였다.

중금속 노출과 관련된 설문조사는 전문 조사원을 통해 일대일 면접조사를 실시하였고, 인구학적·사회경제적 특성, 식습관, 생활습관 등에 대한 정보를 수집하였다.

본 조사는 국립환경과학원 생명윤리위원회(IRB) 검토 및 승인을 받았으며(NIER-2015-BR-006-01), 조사 참여자에게 사전 동의를 받아 수행하였다.

2. 생체시료 채취 및 분석

조사항목은 납(혈액), 수은(혈액, 요), 카드뮴(요)이며, 생체시료 채취 및 분석은 국립환경과학원에서 발간한 제3기 국민환경보건 기초조사 분석매뉴얼과 생체시료 관리 지침서에 따라 수행하였다.^{11,12)} 혈액 시료는 진공관 채혈법에 따라 채취하고 요 시료는 대상자들에게 채뇨법을 숙지시킨 후 일시뇨를 채취하였다. 채취된 시료는 이송 시 온도데이터 로거를 장착하여 일정온도를 유지하였으며, 분석 전까지 -20°C에서 동결 보관하였고, 이후 분석기관에서 일괄 분석하였다.

혈중 납은 혈액시료 0.1 mL를 분취하여 희석액(0.2% 트리톤 X-100 -0.2% 인산 수소이암모늄 용액) 0.3 mL와 정제수 0.1 mL를 넣어 사용하였고, 흑연로 원자흡광분석기(GF-AAS)로 진공음극관 램프를 이용하여 283.3 nm 파장에서 분석하였다.

혈중 수은은 시료의 특별한 전처리 없이 석영가열튜브에서 시료를 열분해 시켜 골드아말감법으로

수은전용분석기(DMA-80)를 사용하여 254.65 nm 파장에서 분석 하였다.

요 중 수은은 boat에 BHT 시약(첨가제)을 바다에 깔고 요시료를 100 μ L 주입 후 BHT 시약을 시료 위에 덮어주고, 최종적으로 MHT 시약(첨가제)으로 덮고, 준비된 boat를 Autosampler에 넣어 사용하였으며, 골드아말감법으로 수은전용분석기를 이용하여 253.7 nm 파장에서 분석하였다.

요 중 카드뮴은 요시료 0.2 mL를 분취하여 희석액(0.2% 트리톤 X-100 -0.2% 인산 수소이암모늄 용액) 1.5 mL와 1% 질산 0.2 mL를 넣어 사용하였고, 흑연로 원자흡광분석기로 228.8 nm 파장에서 분석하였다.

납, 수은, 카드뮴 분석은 1, 2, 3기 모두 동일한 방법으로 수행하였다.

생체시료 분석결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 연 2회 이상 국내의 정도관리 프로그램(독일 G-EQUAS, 국립환경과학원 숙련도평가 등)에 참여하였으며, 매년 주기적으로 내부정도관리를 실시하였다. 정확도는 QC 시료 결과 평균 \pm 2SD 이내, 정밀도는 QC 시료 분석결과 상대표준편차 10% 이내로 관리하고 있으며, 1-3기 납, 수은, 카드뮴 모두 내부정도관리 기준 이내로 관리되었다.

검출한계(LOD)는 방법검출한계로 표준용액 7개 시료를 분석한 결과의 표준편차 \times 3.14 에 해당하는 값을 사용하였으며, 납과 카드뮴은 각각 1~3기 0.3 μ g/dL, 0.05 μ g/L였고, 수은은 1기 0.2 μ g/L, 2-3기 0.1 μ g/L였다.

3. 통계분석

통계 분석은 층화, 집락화, 가중치 등의 복합표본 설계를 반영한 SAS 분석법(PROC SURVEYFREQ, PROC SURVEYMEANS, PROC SURVEYREG)을 사용하였다. 중금속 농도의 분포가 한쪽으로 치우친 분포를 보여 자연로그로 변환하였고, 검출한계 미만의 값은 LOD의 $1/\sqrt{2}$ 로 대체하였다. 요 중 크레아티닌 농도가 0.3 g/L 미만 및 3.0 g/L을 초과하는 대상자는 통계분석에서 제외하였다. 결과표는 산술평균(AM), 기하평균(GM)과 95백분위수에 대한 95% 신뢰구간으로 나타내었다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$ 로 설정하였고, 모든 통계분석은 SAS 소프트웨어 9.4 버전을 사용하였다.

III. 결 과

1. 대상자의 일반적 특징

1~3기 조사 대상자는 남성보다 여성의 참여가 높았으며, 대상자들의 평균 연령은 1기 45.2세, 2기 46.0세, 3기 46.9세로 비슷하게 나타났다. 교육 수준은 1~3기 모두 대학교 이상의 비율이 가장 높았으며, 기수별로 비교했을 때 3기의 비율이 가장 높았다. 생활습관과 관련하여 흡연자는 1기 25.3%, 2기 22.7%, 3기 20.5%로 점차 감소하였고, 음주자는 1기 61.9%, 2기 65.8%, 3기 84.7%로 증가하였다. 주1회 이상 생선을 섭취한다고 응답한 사람은 1기 57.8%, 2기 57.0%, 3기 51.1%로 감소하였다(Table 1).

2. 생체시료 중 중금속 농도

Figure 1은 2009년부터 2017년까지 한국 성인의 중금속 농도 추이를 살펴보고자 기하평균과 95% 신뢰구간으로 나타낸 것이다. 혈중 납은 2기에 다소 높아졌으나, 1기에 비해 3기에는 혈중 납(1기 1.79 μ g/dL, 2기 1.96 μ g/dL, 3기 1.61 μ g/dL)의 농도가 감소한 것으로 나타났다. 혈중 수은(1기 3.12 μ g/L, 2기 3.17 μ g/L, 3기 2.80 μ g/L), 요 중 수은(1기 0.56 μ g/L, 2기 0.42 μ g/L, 3기 0.39 μ g/L), 요 중 카드뮴(1기 0.61 μ g/L, 2기 0.43 μ g/L, 3기 0.40 μ g/L)은 점점 낮아지는 경향을 보였다. 중금속 별 세부 결과는 다음과 같으며, 시료 부족 등의 이유로 물질별 대상자 수가 차이가 있었다.

2.1. 혈중 납

성별과 연령에 따른 혈중 납 농도는 남자가(1기 2.17 μ g/dL, 2기 2.31 μ g/dL, 3기 1.87 μ g/dL) 여자보다(1기 1.47 μ g/dL, 2기 1.64 μ g/dL, 3기 1.37 μ g/dL) 더 높게 나타났으며($p < 0.0001$), 70대 이상 그룹을 제외한 모든 연령그룹에서 유의하게 증가하는 것으로 나타났다($p < 0.0001$). 교육수준의 경우 교육수준이 가장 낮은 그룹에서 혈중 납 농도가 가장 높았으며, 교육수준이 높을수록 혈중 납 농도가 감소하는 경향을 보였다($p < 0.0001$). 흡연 여부에 따른 농도는 흡연자가 비흡연자보다 혈중 납 농도가 높게 나타났고($p < 0.0001$), 음주여부에서도 음주자가 비음주자보다 혈중 납 농도가 높게 나타났고($p < 0.01$). 또한 주 1회 이상 생선 섭취하는 그룹이 그렇지 않은 그룹보

Table 1. Characteristics of participants in KoNEHS cycle 1~3

	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3	
	N	weighted percent	N	weighted percent	N	weighted percent
Total	5700	100	5550	100	3338	100
Gender						
Male	2744	50.4	2555	52.2	1527	52.1
Female	2956	49.6	2995	47.8	1811	47.9
Age						
20-29	672	18.6	477	17.8	250	17.6
30-39	1077	21.3	920	20.1	489	18.4
40-49	1229	22.4	1065	21.7	530	20.0
50-59	1330	17.8	1241	19.8	784	20.3
60-69	1000	10.7	1118	10.7	827	12.7
≥70	392	9.2	729	9.8	458	11.0
Education level						
≤middle school	1881	26.4	1882	22.3	1119	20.8
High school	1861	32.5	1695	31.0	1039	29.9
≥college	1958	41.1	1973	46.7	1180	49.3
Smoking status						
Non-smoker	4387	74.7	4494	77.3	2782	79.5
Smoker	1311	25.3	1056	22.7	556	20.5
Alcohol consumption						
No	2344	38.1	2218	34.2	674	15.3
Yes	3356	61.9	3332	65.8	2664	84.7
Fish consumption≥1x/week						
No	2305	42.2	2269	43.0	1501	48.9
Yes	3395	57.8	3281	57.0	1837	51.1

다 혈중 납 농도가 통계적으로 유의하게 높게 나타났다($p<0.05$)(Table 2).

2.2. 혈중 및 요 중 수은

성별에 따른 혈중 및 요 중 수은 농도는 남자가 여자보다 더 높게 나타났으며, 혈중 수은의 농도는 연령에 따라 통계적으로 유의한 차이를 보였으며($p<0.0001$), 50대에서 가장 높은 농도수준을 보였다. 요 중 수은의 농도는 40대 이후부터 감소하였다. 흡연여부는 흡연자가 비흡연자보다 혈중 수은 농도가 높게 나타났고($p<0.0001$), 음주여부에서는 음주자가 비음주자보다 혈중 및 요 중 수은의 농도가 높게 나타났고($p<0.0001$, $p<0.01$). 주 1회 이상 생선 섭취하는 집단이 그렇지 않은 집단보다 혈중 수

은 농도가 통계적으로 유의하게 높게 나타났고($p<0.0001$)(Table 3, 4).

2.3. 요 중 카드뮴

성별과 연령에 따른 요 중 카드뮴 농도는 여자가 (1기 0.66 $\mu\text{g/L}$, 2기 0.45 $\mu\text{g/L}$, 3기 0.44 $\mu\text{g/L}$) 남자보다(1기 0.57 $\mu\text{g/L}$, 2기 0.41 $\mu\text{g/L}$, 3기 0.37 $\mu\text{g/L}$) 더 높게 나타났으며($p<0.01$), 연령대 별로 연령이 증가함에 따라 요 중 카드뮴의 농도도 증가하는 경향을 보였다($p<0.0001$). 교육수준의 경우 교육수준이 가장 낮은 집단에서 요 중 카드뮴 농도가 가장 높았으며, 교육수준이 높을수록 요 중 카드뮴 농도가 감소하는 경향을 보였다($p<0.0001$)(Table 5).

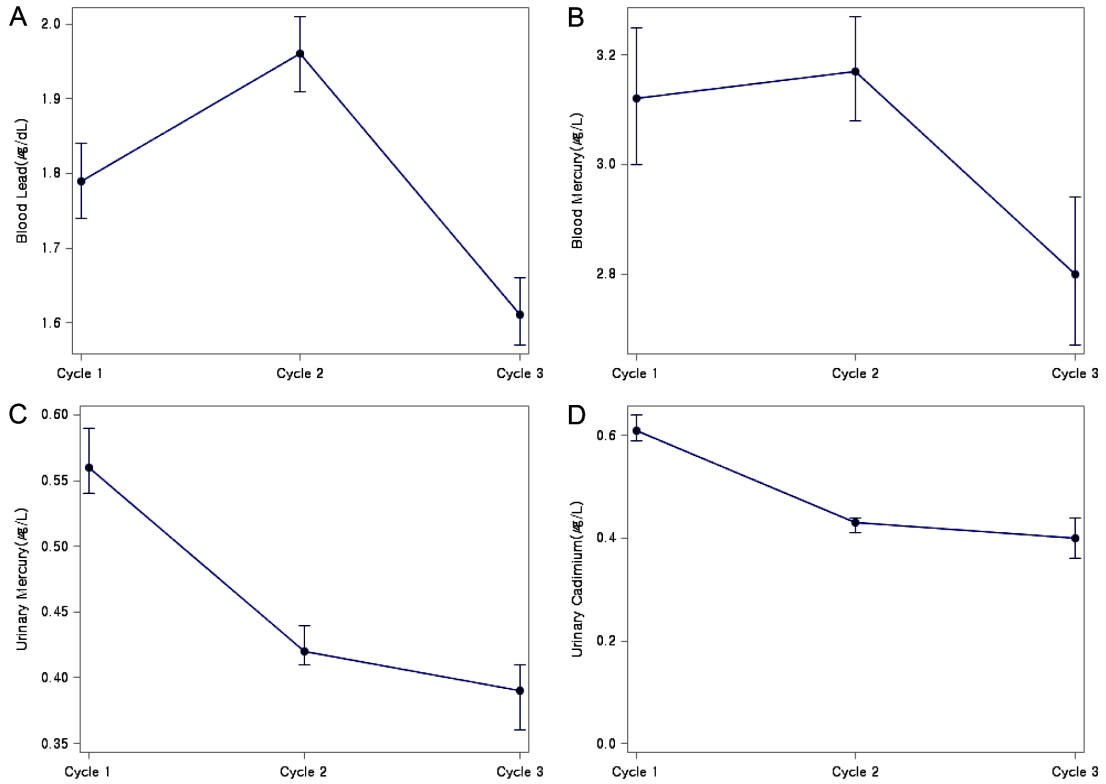


Fig. 1. Temporal trends in measured metals. (A) Blood lead, (B) blood mercury, (C) urinary mercury, and (D) urinary cadmium among general adult Korean population measured in KoNEHS 2009-2017. Geometric mean and 95% confidence interval (error bars) are shown

3. 다중회귀분석

중금속 농도에 영향을 미치는 요인들을 알아보기 위하여 성별, 연령, 교육수준, 흡연 및 음주여부, 주 1회 이상 생선섭취를 독립변수로 하여 다중회귀 분석을 실시하였다.

1기, 2기, 3기 모두 공통적으로 유의한 영향을 주는 변수는 혈중 납에서는 성별, 연령, 흡연여부였으며, 혈중 납의 농도는 남성이 여성보다 더 높았으며 ($p < 0.0001$), 20대를 기준으로 모든 연령대에서 증가하였다 ($p < 0.0001$). 또한 흡연여부에 따라 흡연자가 비흡연자 보다 더 높은 것으로 나타났다 ($p < 0.0001$).

혈중 수은에서는 성별, 연령, 주 1회 이상 생선섭취가 유의한 영향변수였으며, 혈중 수은의 농도는 남성이 여성보다 더 높았으며 ($p < 0.0001$), 20대를 기준으로 모든 연령대에서 증가하였고 ($p < 0.0001$), 주 1회 이상 생선을 섭취한 집단이 그렇지 않은 집단보다 더 높은 것 ($p < 0.0001$)으로 나타났다.

요 중 카드뮴에서는 연령이 유의한 영향변수였으며, 요 중 카드뮴의 농도는 20대를 기준으로 모든 연령대에서 증가하였다 ($p < 0.0001$). 또한 3기를 제외한 1, 2기에서는 여성이 남성보다, 흡연자가 비흡연자보다 더 높은 것으로 나타났다.

III. 고 찰

현재까지 발표된 3차례의 국민환경보건 기초조사 결과를 토대로 우리나라 국민의 주요 중금속 노출수준을 평가한 결과 일부 중금속의 경시적 변화 양상을 확인하였다. 혈중 납은 1기에 비해 2기가 다소 증가하였으나 3기에는 감소하는 경향을 나타냈으며, 혈액 및 요 중 수은과 요 중 카드뮴은 시간이 지남에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 생체 내 중금속의 전반적인 감소는 휘발유에서의 납 제거, 어류 소비권고, 금연프로그램 등의 지속적인 노력이 환경 노

Table 2. Arithmetic and geometric mean and 95 percentiles of blood lead concentrations (µg/dL) for the Korean adult population

	Cycle 1					Cycle 2					Cycle 3					
	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)
Total	5688	2.06	1.79(1.74-1.84)	3.94(3.76-4.12)	5531	2.21	1.96(1.91-2.01)	4.12(3.94-4.29)	3304	1.81	1.61(1.57-1.66)	3.38(3.21-3.54)				
Gender**																
Male	2740	2.43	2.17(2.10-2.24)	4.41(4.20-4.61)	2548	2.55	2.31(2.24-2.37)	4.55(4.28-4.81)	1520	2.07	1.87(1.81-1.93)	3.76(3.55-3.97)				
Female	2948	1.68	1.47(1.43-1.52)	3.24(3.08-3.41)	2983	1.85	1.64(1.60-1.69)	3.34(3.22-3.47)	1784	1.51	1.37(1.33-1.42)	2.74(2.61-2.87)				
Age**																
20-29	672	1.51	1.32(1.25-1.40)	2.91(2.54-3.28)	476	1.64	1.48(1.40-1.56)	2.89(2.61-3.17)	248	1.36	1.22(1.15-1.31)	2.37(1.95-2.80)				
30-39	1073	1.83	1.62(1.55-1.69)	3.37(3.14-3.59)	918	1.96	1.78(1.71-1.85)	3.60(3.28-3.93)	484	1.61	1.46(1.39-1.53)	2.83(2.47-3.19)				
40-49	1226	2.12	1.86(1.80-1.92)	3.89(3.58-4.21)	1063	2.24	2.01(1.93-2.09)	4.27(3.94-4.60)	525	1.78	1.62(1.55-1.69)	3.14(2.62-3.66)				
50-59	1329	2.45	2.19(2.12-2.26)	4.41(4.12-4.70)	1238	2.56	2.32(2.25-2.41)	4.38(4.14-4.62)	776	2.13	1.92(1.84-2.00)	3.56(3.33-3.79)				
60-69	998	2.49	2.23(2.15-2.31)	4.51(4.19-4.83)	1110	2.67	2.33(2.22-2.43)	4.85(4.09-5.61)	820	2.10	1.91(1.82-2.00)	3.70(3.47-3.93)				
≥70	390	2.27	2.01(1.89-2.15)	4.63(3.97-5.30)	726	2.54	2.24(2.14-2.34)	4.66(4.08-5.23)	451	1.98	1.76(1.65-1.88)	3.73(3.26-4.20)				
Education level**																
≤middle school	1876	2.38	2.09(2.02-2.16)	4.65(4.34-4.96)	1872	2.60	2.29(2.21-2.36)	4.53(4.19-4.86)	1107	2.06	1.84(1.77-1.92)	3.74(3.48-4.01)				
High school	1857	2.11	1.87(1.81-1.93)	3.99(3.82-4.16)	1693	2.29	2.06(1.99-2.13)	4.32(4.03-4.61)	1030	1.92	1.72(1.66-1.79)	3.49(3.19-3.80)				
≥college	1955	1.80	1.57(1.51-1.63)	3.41(3.28-3.53)	1966	1.98	1.77(1.71-1.83)	3.65(3.44-3.85)	1167	1.63	1.47(1.41-1.52)	3.04(2.78-3.30)				
Smoking status**																
Non-smoker	4378	1.91	1.66(1.61-1.71)	3.73(3.62-3.84)	4478	2.09	1.84(1.79-1.89)	3.93(3.77-4.09)	2752	1.71	1.53(1.48-1.57)	3.18(3.07-3.29)				
Smoker	1308	2.49	2.25(2.17-2.33)	4.46(4.24-4.67)	1053	2.65	2.43(2.35-2.51)	4.77(4.28-5.26)	552	2.20	1.99(1.90-2.08)	3.95(3.56-4.35)				
Alcohol consumption**																
No	2340	1.84	1.61(1.56-1.66)	3.54(3.36-3.72)	2207	2.05	1.80(1.74-1.86)	3.91(3.65-4.17)	663	1.68	1.52(1.45-1.60)	2.87(2.59-3.15)				
Yes	3348	2.19	1.91(1.86-1.97)	4.17(3.99-4.35)	3324	2.30	2.05(1.99-2.11)	4.26(4.09-4.42)	2641	1.83	1.63(1.59-1.68)	3.44(3.28-3.60)				
Fish consumption≥1x/week*																
No	2299	2.03	1.75(1.69-1.81)	3.94(3.75-4.13)	2259	2.10	1.87(1.82-1.93)	3.94(3.73-4.16)	1487	1.71	1.52(1.47-1.58)	3.18(2.95-3.41)				
Yes	3389	2.08	1.82(1.77-1.88)	3.94(3.73-4.14)	3272	2.30	2.03(1.97-2.09)	4.27(4.09-4.44)	1817	1.90	1.70(1.65-1.76)	3.55(3.31-3.79)				

*p<0.05, **p<0.01

Table 3. Arithmetic and geometric mean and 95 percentiles of blood mercury concentrations (µg/L) for the Korean adult population

	Cycle 1					Cycle 2					Cycle 3					
	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)
Total	5687	4.01	3.12(3.00-3.25)	10.0(9.38-10.7)	5532	3.91	3.17(3.08-3.27)	9.21(8.64-9.79)	3302	3.57	2.80(2.67-2.94)	9.00(8.28-9.72)				
Gender**																
Male	2740	4.76	3.66(3.49-3.84)	12.1(11.1-13.1)	2549	4.55	3.74(3.60-3.87)	10.2(9.21-11.3)	1520	4.27	3.33(3.12-3.55)	10.1(9.09-11.1)				
Female	2947	3.25	2.66(2.55-2.77)	7.38(7.00-7.76)	2983	3.22	2.66(2.56-2.76)	7.19(6.68-7.71)	1782	2.80	2.32(2.21-2.43)	6.34(5.63-7.06)				
Age**																
20-29	672	2.91	2.38(2.20-2.57)	6.51(5.81-7.21)	476	2.91	2.41(2.25-2.57)	7.10(6.14-8.05)	248	2.28	1.94(1.73-2.17)	4.84(3.96-5.73)				
30-39	1073	4.02	3.23(3.03-3.43)	10.1(8.55-11.7)	918	3.79	3.21(3.06-3.38)	8.20(7.01-9.39)	484	3.52	2.88(2.68-3.10)	8.45(1.02-6.42)				
40-49	1226	4.40	3.49(3.27-3.71)	10.4(9.39-11.5)	1064	4.45	3.69(3.52-3.86)	9.68(9.09-10.3)	524	3.88	3.14(2.94-3.35)	8.73(7.56-9.90)				
50-59	1329	4.96	3.81(3.58-4.05)	12.6(10.9-14.4)	1238	4.52	3.71(3.52-3.91)	10.9(9.47-12.4)	776	4.27	3.33(3.10-3.56)	10.2(8.79-11.7)				
60-69	997	4.09	3.09(2.90-3.30)	10.2(8.73-11.7)	1110	4.20	3.29(3.09-3.51)	9.44(7.64-11.2)	819	4.07	3.13(2.89-3.39)	9.97(8.39-11.5)				
≥70	390	3.38	2.65(2.41-2.91)	7.74(6.33-9.15)	726	3.27	2.57(2.39-2.76)	7.98(5.81-10.2)	451	3.29	2.51(2.24-2.82)	8.69(6.09-11.3)				
Education level																
≤middle school	1875	4.04	3.03(2.87-3.20)	10.2(9.22-11.3)	1872	3.78	2.96(2.81-3.13)	8.87(7.40-10.3)	1106	3.56	2.74(2.53-2.97)	9.33(7.17-11.5)				
High school	1857	4.09	3.26(3.09-3.43)	9.53(8.60-10.5)	1693	4.05	3.34(3.20-3.49)	9.34(8.19-10.5)	1029	3.68	2.91(2.73-3.10)	8.91(7.42-10.4)				
≥college	1955	3.94	3.08(2.92-3.25)	10.1(8.92-11.3)	1967	3.89	3.17(3.04-3.30)	9.33(8.62-10.0)	1167	3.51	2.76(2.59-2.94)	8.76(7.75-9.77)				
Smoking status**																
Non-smoker	4377	3.75	2.95(2.83-3.07)	9.04(8.52-9.56)	4479	3.70	3.00(2.91-3.11)	8.97(8.26-9.68)	2751	3.36	2.67(2.54-2.80)	8.02(7.24-8.80)				
Smoker	1308	4.78	3.70(3.48-3.94)	11.7(10.6-12.9)	1053	4.63	3.83(3.65-4.02)	10.2(8.67-11.8)	551	4.37	3.37(3.09-3.69)	10.8(9.21-12.3)				
Alcohol consumption**																
No	2339	3.55	2.77(2.65-2.90)	8.75(7.91-9.59)	2207	3.40	2.75(2.64-2.87)	7.83(7.02-8.63)	662	3.01	2.47(2.30-2.65)	6.82(5.74-7.90)				
Yes	3348	4.30	3.36(3.21-3.52)	10.7(9.97-11.4)	3325	4.18	3.42(3.30-3.53)	9.58(9.01-10.1)	2640	3.67	2.86(2.72-3.02)	9.25(8.56-9.94)				
Fish consumption≥1x/week**																
No	2298	3.41	2.69(2.56-2.83)	8.37(7.56-9.19)	2259	3.39	2.76(2.65-2.87)	7.76(7.01-8.52)	1487	3.08	2.41(2.26-2.56)	7.39(6.02-8.76)				
Yes	3389	4.45	3.48(3.33-3.64)	10.7(9.90-11.6)	3273	4.31	3.53(3.41-3.65)	9.60(8.99-10.2)	1815	4.05	3.23(3.08-3.40)	9.61(8.77-10.5)				

*p<0.05, **p<0.01

Table 4. Arithmetic and geometric mean and 95 percentiles of urinary mercury concentrations (µg/L) for the Korean adult population

	Cycle 1					Cycle 2					Cycle 3					
	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)
Total	5697	0.72	0.56(0.54-0.59)	1.71(1.58-1.83)	5550	0.55	0.42(0.41-0.44)	1.29(1.22-1.36)	3334	0.55	0.39(0.36-0.41)	1.47(1.30-1.64)				
Gender																
Male	2744	0.73	0.58(0.55-0.61)	1.68(1.52-1.84)	2555	0.55	0.43(0.41-0.45)	1.26(1.19-1.33)	1526	0.58	0.42(0.39-0.45)	1.53(1.26-1.81)				
Female	2953	0.72	0.55(0.52-0.57)	1.71(1.58-1.84)	2995	0.55	0.41(0.39-0.43)	1.30(1.15-1.46)	1808	0.51	0.36(0.33-0.38)	1.38(1.18-1.58)				
Age**																
20-29	670	0.81	0.61(0.56-0.66)	1.94(1.62-2.26)	477	0.55	0.41(0.37-0.45)	1.34(1.07-1.61)	249	0.48	0.34(0.30-0.39)	1.22(0.00-2.45)				
30-39	1076	0.82	0.61(0.57-0.65)	1.87(1.58-2.15)	920	0.58	0.47(0.44-0.49)	1.32(1.07-1.57)	488	0.60	0.43(0.39-0.48)	1.56(1.16-1.95)				
40-49	1229	0.71	0.59(0.56-0.62)	1.55(1.44-1.66)	1065	0.59	0.45(0.42-0.48)	1.30(1.15-1.45)	530	0.59	0.42(0.39-0.46)	1.54(1.25-1.84)				
50-59	1330	0.71	0.57(0.54-0.60)	1.64(1.48-1.80)	1241	0.55	0.43(0.41-0.45)	1.20(1.10-1.29)	783	0.58	0.40(0.37-0.45)	1.65(1.37-1.93)				
60-69	1000	0.61	0.48(0.45-0.50)	1.47(1.32-1.61)	1118	0.57	0.39(0.37-0.42)	1.16(0.91-1.41)	826	0.52	0.37(0.34-0.40)	1.32(1.14-1.49)				
≥70	392	0.54	0.42(0.38-0.47)	1.35(1.06-1.63)	729	0.43	0.32(0.30-0.34)	0.96(0.81-1.11)	458	0.46	0.32(0.29-0.36)	1.29(0.88-1.69)				
Education level																
≤middle school	1881	0.63	0.49(0.47-0.52)	1.59(1.44-1.74)	1882	0.52	0.38(0.36-0.40)	1.15(1.01-1.28)	1118	0.51	0.35(0.32-0.39)	1.49(1.22-1.77)				
High school	1860	0.70	0.56(0.54-0.59)	1.60(1.44-1.75)	1695	0.55	0.42(0.40-0.44)	1.26(1.17-1.36)	1039	0.56	0.40(0.36-0.43)	1.50(1.26-1.74)				
≥college	1956	0.80	0.61(0.58-0.64)	1.85(1.66-2.05)	1973	0.58	0.44(0.42-0.47)	1.31(1.16-1.47)	1177	0.55	0.40(0.37-0.43)	1.42(1.19-1.65)				
Smoking status																
Non-smoker	4384	0.72	0.56(0.54-0.58)	1.71(1.58-1.83)	4494	0.55	0.42(0.40-0.43)	1.25(1.17-1.34)	2779	0.53	0.38(0.35-0.40)	1.42(1.26-1.59)				
Smoker	1311	0.73	0.58(0.54-0.62)	1.71(1.51-1.91)	1056	0.55	0.43(0.41-0.46)	1.30(1.18-1.41)	555	0.60	0.43(0.39-0.47)	1.54(1.09-1.99)				
Alcohol consumption**																
No	2344	0.67	0.50(0.48-0.53)	1.55(1.39-1.71)	2218	0.50	0.37(0.35-0.39)	1.13(1.03-1.22)	672	0.45	0.34(0.31-0.37)	1.19(1.02-1.37)				
Yes	3353	0.76	0.60(0.58-0.63)	1.81(1.69-1.92)	3332	0.58	0.45(0.44-0.47)	1.34(1.23-1.45)	2662	0.56	0.40(0.37-0.42)	1.52(1.30-1.74)				
Fish consumption≥1x/week																
No	2304	0.69	0.54(0.51-0.57)	1.59(1.41-1.77)	2269	0.54	0.41(0.39-0.43)	1.26(1.14-1.39)	1500	0.53	0.37(0.35-0.40)	1.34(1.15-1.53)				
Yes	3393	0.75	0.58(0.56-0.61)	1.79(1.67-1.90)	3281	0.57	0.43(0.41-0.45)	1.30(1.19-1.39)	1834	0.57	0.40(0.37-0.43)	1.54(1.27-1.81)				

*p<0.05, **p<0.01

Table 5. Arithmetic and geometric mean and 95 percentiles of urinary cadmium concentrations ($\mu\text{g/L}$) for the Korean adult population

	Cycle 1			Cycle 2			Cycle 3					
	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)	N	AM	GM(95% CI)	P95(95% CI)
Total	5696	0.86	0.61(0.59-0.64)	2.44(2.30-2.59)	5549	0.55	0.43(0.41-0.44)	1.41(1.35-1.47)	3334	0.65	0.40(0.36-0.44)	1.80(1.64-1.97)
Gender**												
Male	2744	0.77	0.57(0.54-0.59)	2.00(1.82-2.17)	2555	0.52	0.41(0.39-0.43)	1.31(1.23-1.40)	1526	0.59	0.37(0.34-0.42)	1.56(1.42-1.71)
Female	2952	0.97	0.66(0.63-0.70)	2.89(2.59-3.19)	2994	0.59	0.45(0.42-0.47)	1.53(1.43-1.63)	1808	0.72	0.44(0.39-0.49)	1.98(1.78-2.18)
Age**												
20-29	670	0.51	0.39(0.36-0.42)	1.29(1.13-1.45)	476	0.37	0.29(0.26-0.32)	0.92(0.73-1.12)	249	0.30	0.17(0.14-0.22)	0.87(0.60-1.14)
30-39	1076	0.70	0.52(0.48-0.56)	1.98(1.65-2.30)	920	0.46	0.37(0.34-0.39)	1.03(0.92-1.14)	488	0.46	0.30(0.26-0.35)	1.18(1.05-1.30)
40-49	1228	0.89	0.65(0.60-0.70)	2.40(2.05-2.76)	1065	0.56	0.44(0.42-0.47)	1.38(1.27-1.49)	530	0.71	0.47(0.42-0.53)	1.87(1.51-2.24)
50-59	1330	1.12	0.81(0.76-0.86)	3.26(2.93-3.60)	1241	0.64	0.51(0.48-0.54)	1.62(1.43-1.82)	783	0.77	0.54(0.48-0.61)	1.95(1.72-2.19)
60-69	1000	1.12	0.80(0.74-0.86)	3.15(2.85-3.44)	1118	0.73	0.59(0.56-0.63)	1.79(1.64-1.95)	826	0.88	0.63(0.56-0.69)	2.26(1.93-2.58)
≥ 70	392	1.13	0.84(0.76-0.92)	2.93(2.45-3.41)	729	0.69	0.56(0.53-0.59)	1.59(1.39-1.79)	458	0.92	0.66(0.58-0.75)	2.63(2.23-3.02)
Education level**												
\leq middle school	1857	1.19	0.85(0.80-0.91)	3.37(3.11-3.63)	1882	0.70	0.56(0.53-0.59)	1.81(1.66-1.96)	1118	0.95	0.66(0.59-0.74)	2.61(2.31-2.92)
High school	1859	0.86	0.62(0.58-0.66)	2.36(2.13-2.59)	1695	0.56	0.45(0.42-0.47)	1.40(1.32-1.48)	1039	0.72	0.48(0.44-0.54)	1.93(1.60-2.26)
\geq college	1956	0.67	0.49(0.46-0.52)	1.86(1.65-2.07)	1972	0.48	0.37(0.35-0.39)	1.17(1.07-1.27)	1177	0.48	0.29(0.26-0.33)	1.36(1.23-1.50)
Smoking status												
Non-smoker	4383	0.89	0.62(0.59-0.65)	2.57(2.37-2.77)	4493	0.56	0.43(0.41-0.45)	1.43(1.36-1.50)	2779	0.66	0.41(0.37-0.45)	1.82(1.66-1.97)
Smoker	1311	0.80	0.59(0.56-0.62)	2.08(1.88-2.27)	1056	0.54	0.43(0.40-0.46)	1.34(1.22-1.46)	555	0.61	0.39(0.33-0.45)	1.75(1.40-2.10)
Alcohol consumption												
No	2344	1.01	0.71(0.68-0.75)	2.96(2.66-3.26)	2218	0.61	0.47(0.45-0.50)	1.53(1.43-1.63)	672	0.79	0.52(0.45-0.60)	2.12(1.75-2.49)
Yes	3352	0.78	0.56(0.53-0.58)	2.14(1.97-2.31)	3331	0.52	0.41(0.39-0.42)	1.34(1.25-1.43)	2662	0.62	0.38(0.35-0.43)	1.74(1.55-1.92)
Fish consumption ≥ 1 x/week												
No	2304	0.87	0.62(0.58-0.65)	2.49(2.24-2.74)	2269	0.55	0.42(0.40-0.44)	1.38(1.30-1.46)	1500	0.61	0.37(0.33-0.42)	1.71(1.53-1.89)
Yes	3392	0.86	0.61(0.58-0.64)	2.40(2.19-2.62)	3280	0.56	0.43(0.41-0.45)	1.42(1.32-1.51)	1834	0.69	0.44(0.40-0.48)	1.94(1.71-2.16)

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

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

	Cycle 1			Cycle 2			Cycle 3		
	β	S.E	p-value	β	S.E	p-value	β	S.E	p-value
Blood lead									
Gender									
Male	ref.			ref.			ref.		
Female	-0.306	0.018	<.0001	-0.287	0.017	<.0001	-0.273	0.017	<.0001
Age									
20-29	ref.			ref.			ref.		
30-39	0.194	0.034	<.0001	0.168	0.028	<.0001	0.165	0.038	<.0001
40-49	0.318	0.032	<.0001	0.284	0.032	<.0001	0.256	0.040	<.0001
50-59	0.471	0.037	<.0001	0.408	0.033	<.0001	0.413	0.036	<.0001
60-69	0.504	0.039	<.0001	0.415	0.038	<.0001	0.410	0.043	<.0001
≥ 70	0.448	0.051	<.0001	0.416	0.040	<.0001	0.367	0.052	<.0001
Education level									
\leq middle school	ref.			ref.			ref.		
High school	-0.063	0.022	0.005	-0.056	0.022	0.011	-0.048	0.024	0.052
\geq college	-0.135	0.028	<.0001	-0.125	0.027	<.0001	-0.091	0.028	0.001
Smoking status									
Non-smoker	ref.			ref.			ref.		
Smoker	0.141	0.019	<.0001	0.127	0.020	<.0001	0.147	0.023	<.0001
Alcohol consumption									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	0.162	0.018	<.0001	0.112	0.018	<.0001	0.048	0.025	0.055
Fish consumption $\geq 1x/week$									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	0.004	0.016	0.803	0.023	0.015	0.133	0.045	0.021	0.032
Blood mercury									
Gender									
Male	ref.			ref.			ref.		
Female	-0.245	0.025	<.0001	-0.261	0.022	<.0001	-0.316	0.031	<.0001
Age									
20-29	ref.			ref.			ref.		
30-39	0.288	0.040	<.0001	0.280	0.040	<.0001	0.392	0.063	<.0001
40-49	0.385	0.047	<.0001	0.414	0.037	<.0001	0.480	0.059	<.0001
50-59	0.501	0.047	<.0001	0.450	0.041	<.0001	0.570	0.073	<.0001
60-69	0.337	0.052	<.0001	0.385	0.046	<.0001	0.525	0.061	<.0001
≥ 70	0.255	0.063	<.0001	0.209	0.050	<.0001	0.378	0.085	<.0001
Education level									
\leq middle school	ref.			ref.			ref.		
High school	0.010	0.034	0.767	0.052	0.032	0.108	0.029	0.050	0.560
\geq college	0.067	0.040	0.098	0.080	0.035	0.024	0.110	0.059	0.061
Smoking status									
Non-smoker	ref.			ref.			ref.		
Smoker	0.064	0.037	0.082	0.058	0.026	0.028	0.060	0.041	0.145
Alcohol consumption									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	0.128	0.022	<.0001	0.147	0.022	<.0001	0.060	0.035	0.083
Fish consumption $\geq 1x/week$									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	0.196	0.026	<.0001	0.180	0.021	<.0001	0.235	0.029	<.0001

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

	Cycle 1			Cycle 2			Cycle 3		
	β	S.E	p-value	β	S.E	p-value	β	S.E	p-value
Urine mercury									
Gender									
Male	ref.			ref.			ref.		
Female	-0.011	0.025	0.674	0.017	0.030	0.577	-0.131	0.033	0.000
Age									
20-29	ref.			ref.			ref.		
30-39	0.017	0.050	0.736	0.151	0.052	0.004	0.229	0.083	0.007
40-49	0.001	0.046	0.979	0.126	0.053	0.019	0.201	0.077	0.010
50-59	-0.009	0.047	0.842	0.101	0.053	0.056	0.163	0.080	0.043
60-69	-0.170	0.055	0.002	0.039	0.058	0.498	0.075	0.074	0.315
≥ 70	-0.254	0.073	0.001	-0.127	0.057	0.026	-0.036	0.094	0.701
Education level									
\leq middle school	ref.			ref.			ref.		
High school	0.000	0.036	0.996	0.010	0.034	0.763	0.001	0.057	0.987
\geq college	0.060	0.041	0.149	0.055	0.040	0.171	0.001	0.076	0.985
Smoking status									
Non-smoker	ref.			ref.			ref.		
Smoker	-0.030	0.034	0.376	-0.024	0.036	0.507	0.016	0.050	0.756
Alcohol consumption									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	0.133	0.025	<.0001	0.191	0.030	<.0001	0.076	0.045	0.095
Fish consumption $\geq 1x/week$									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	0.066	0.025	0.008	0.045	0.027	0.098	0.057	0.040	0.150
Urine cadmium									
Gender									
Male	ref.			ref.			ref.		
Female	0.134	0.031	<.0001	0.073	0.031	0.020	0.090	0.051	0.079
Age									
20-29	ref.			ref.			ref.		
30-39	0.271	0.050	<.0001	0.227	0.054	<.0001	0.526	0.122	<.0001
40-49	0.463	0.049	<.0001	0.420	0.060	<.0001	0.937	0.110	<.0001
50-59	0.625	0.052	<.0001	0.531	0.063	<.0001	0.989	0.112	<.0001
60-69	0.578	0.060	<.0001	0.672	0.063	<.0001	1.086	0.110	<.0001
≥ 70	0.582	0.065	<.0001	0.597	0.063	<.0001	1.111	0.131	<.0001
Education level									
\leq middle school	ref.			ref.			ref.		
High school	-0.140	0.037	0.000	-0.038	0.034	0.267	-0.097	0.057	0.093
\geq college	-0.188	0.047	<.0001	-0.074	0.042	0.077	-0.275	0.073	0.000
Smoking status									
Non-smoker	ref.			ref.			ref.		
Smoker	0.101	0.035	0.004	0.087	0.035	0.013	0.058	0.072	0.420
Alcohol consumption									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	-0.085	0.026	0.001	-0.043	0.029	0.138	-0.033	0.065	0.615
Fish consumption $\geq 1x/week$									
No	ref.			ref.			ref.		
Yes	-0.041	0.027	0.132	-0.030	0.026	0.261	0.038	0.049	0.439

출을 줄이는데 효과적인 것으로 보인다.¹³⁻¹⁵⁾

지난 수십 년 동안 납 휘발유의 단계적 폐지, 페인트 및 표면 코팅의 납 함량 감소, 수도관 교체 등의 납 배출량 제어는 혈중 납 농도 감소에 기인하였다.¹⁶⁾ 우리나라 성인의 혈중 납 농도는 1기 1.79 µg/dL, 2기 1.96 µg/dL, 3기 1.61 µg/dL로 국민건강영양조사 2.289 µg/dL보다는 낮았지만¹⁷⁾ 미국 0.92 µg/dL, 캐나다 0.95 µg/dL 에 비해 높은 것으로 나타났다.^{6,7)} 최근 들어 기존에 알려져 있던 농도(10 µg/dL) 보다 훨씬 낮은 농도에서도 건강영향이 나타나는 것으로 밝혀져 독일은 권고값 기준을 철회하였고,³⁾ 미국은 NHANES 조사 결과를 토대로 5.0 µg/dL로 변경하여 제시하였으며, 4년마다 갱신할 것을 권고하고 있다.¹⁸⁾ 혈중 납의 농도는 여자보다 남자가 더 높았으며, 이 결과는 이전 연구에서 보고된 것과 유사 하였다.^{19,20)} 한국 여성이 남성보다 야외직업을 가질 가능성이 적어 혈중 납 농도가 훨씬 낮을 것으로 예상한다고 보고하였으며,²¹⁾ 미국 EPA 조사에서도 남성과 여성의 혈중 납 농도는 1.13, 0.842 µg/dL로 직업적 노출이 큰 남성의 혈중 납 농도가 높게 나타났다.²²⁾

또한 혈중 납의 농도는 연령이 증가함에 따라 증가하였으나 70대 이상에서는 다소 감소하였다. Muntner 등이 보고한 연구에서도 혈중 납 농도는 18-39세 대상 1.28 µg/dL, 60-74세 대상 2.32 µg/dL로 연령의 증가에 따라 혈중 납 농도가 증가하는 것을 알 수 있다.²³⁾ 이는 연령이 증가할수록 체내 축적이 되고, 휘발유를 통해 환경적으로 납에 더 많이 노출되지만, 다른 연령 그룹에 비해 70대 이상 그룹에서는 납 노출에 대한 빈도가 감소하였기 때문이라고 보고하였다.²¹⁾

흡연은 혈중 납 농도를 증가시키는 것으로 알려져 있으며,^{24,25)} 본 연구에서도 흡연자가 비흡연자보다 높게 나타났다. 미국 NHANES의 성인 중 흡연자 및 과거흡연자를 대상으로 한 혈중 납 농도의 연구에서도 혈중 납 농도 증가의 연관성을 보고하였다.²⁶⁾ 우리나라의 경우 남성 흡연율이 여성 흡연율보다 현저하게 높게 나타나 흡연율과 흡연습관은 혈 중 납 농도의 성별 차이에 기인하는 것으로 보인다.²⁷⁾

일반인의 혈중 수은 노출은 메틸수은이 주된 형태로 생선과 해산물의 소비를 통해 이루어지며, 요 중 수은은 무기수은의 형태로 주로 치과용 아말감 등을

통해 노출되어진다.²⁸⁾ 우리나라 성인의 혈중 수은 농도는 1기 3.12 µg/L, 2기 3.17 µg/L, 3기 2.80 µg/L이었으며, 요 중 수은 농도는 1기 0.56 µg/L, 2기 0.42 µg/L, 3기 0.39 µg/L이었다. 혈중 수은의 농도는 국민건강영양조사 4.303 µg/L 보다는 다소 낮았지만,¹⁷⁾ 미국 0.810 µg/L, 캐나다 0.79 µg/L보다 상당히 높았다.^{6,7)} 독일 HBM I 기준(혈중 수은 5 µg/L, 요 중 수은 7 µg/L)과 비교하였을 때²⁹⁾ 우리나라 성인의 혈중 수은 95백분위수는 1기 10.0 µg/L, 2기 9.21 µg/L, 3기 9.00 µg/L로 HBM I 보다 약 2배가량 높게 나타났다.

본 연구에서 혈중 수은의 농도는 남성이 여성보다 더 높았으며, 연령이 증가함에 따라 증가하였다. 국내 일부지역에서 성인을 대상으로 혈중 수은농도를 조사한 결과에 따르면 남성 2.92 µg/L, 여성 2.09 µg/L로 남성에서 높았으며, 20-50대까지는 연령이 증가할수록 수은 농도가 높아지다 60대 이후부터는 농도가 낮아져 본 연구결과와 비슷한 경향을 나타내었다.³⁰⁾

또한 주1회 이상 생선을 섭취한 집단이 그렇지 않은 집단보다 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 한국 성인의 혈중 수은 농도는 어패류 섭취빈도와 관련성이 있다는 국민건강영양조사의 연구결과와 일치한다.³¹⁾ 미국, 캐나다 등에서 실시된 국가 바이오모니터링 조사에서도 어류소비는 혈중 수은 농도 증가와 유의하게 관련이 있는 것으로 보고되었으며,³²⁻³⁴⁾ 특히 우리나라는 바다의 접근성이 높아 혈중 수은 농도는 해산물 소비량이 많은 식습관과 관련이 많다.

일상생활 속에서 자동차 배기가스나 담배연기로부터 배출된 카드뮴은 주로 흡입을 통해 인체에 노출되며, 오염된 물이나 음식물 섭취를 통해서도 노출될 수 있다.³⁵⁾

우리나라 성인의 요 중 카드뮴 농도는 1기 0.61 µg/L, 2기 0.43 µg/L, 3기 0.40 µg/L로 점점 낮아지는 추세이나, 미국 0.17 µg/L, 독일 0.23 µg/L보다 높게 나타났다.^{6,8)} 또한 독일 HBM I (1 µg/L), HBM II (4 µg/L), 미국 BE (2 µg/L) 값보다 낮았으나, 1-3기 요 중 카드뮴의 95백분위수는 1기 2.44 µg/L, 2기 1.41 µg/L, 3기 1.80 µg/L로 HBM I보다 다소 높게 나타났다. 우리나라를 포함한 일본 및 대만과 같은 아시아 국가에서 카드뮴 농도가 미국과 유럽 등

외국에 비해 높게 나타나는 이유는 주로 쌀 등 곡식을 주식으로 섭취하기 때문인 것으로 알려져 있다.³⁶⁾

본 연구에서 요 중 카드뮴의 농도는 여자가 남성보다 더 높았으며, 연령이 증가함에 따라 증가하였고, 일부 기수에서 흡연자가 비흡연자보다 높게 나타났다. 일반적으로 여성은 남성보다 철분 저장량이 적어 더 높은 카드뮴을 흡수하는 것으로 보고되고 있으며,³⁷⁾ 특히 여성이 주기적인 혈액 손실과 출산은 신체의 철분 결핍을 유발하여 십이지장에서 금속 수송체의 증가를 통해 카드뮴 흡수를 증가시킬 수 있다.^{38,39)} 이런 메커니즘은 남성보다 여성의 카드뮴 농도가 더 높은 이유를 부분적으로 설명할 수 있다. 연령에 따라 카드뮴 농도가 증가하는 것은 연령의 증가와 함께 나타나는 신장의 기능적, 형태학적인 점진적 변화에 의한 신장 손실 증가와 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.⁴⁰⁾ 담배 1개비에 1-2 µg의 카드뮴이 포함되어 있으며, 흡연 시 1,000-3,000 ppb의 카드뮴이 연기와 함께 발생되고 이중 40~60%가 흡연으로 체내에 흡수된다. 또한 이전의 연구에서 흡연자와 비흡연자간의 혈중 및 요 중 카드뮴 농도에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며,^{41,42)} Watanabe 등의 연구에서도 흡연에 따라 카드뮴 농도가 증가한다고 보고하였다.⁴³⁾

본 연구는 일회성 자료를 이용한 단면연구로 환경유해물질과 관련된 변수들의 연관성만 확인했을 뿐 정확한 인과관계에 대해 파악하는 것은 어려웠다. 또한 각 기수별 설문조사 항목 및 항목별 범주의 개정으로 인해 일부 상이하거나 조사되지 않은 부분이 있어 각 물질에 대한 다양한 노출요인을 비교하고 파악하는데 제한적이었다. 특히 혈액 및 요 중에서 총 수은만을 측정하여 해산물 섭취나 아말감 사용으로 인해 노출되는 유기 및 무기 수은에 대해 명확히 하는데 한계가 있었으며, 요 중 수은의 주 노출요인인 치과용 아말감에 관한 정보가 누락되어 요 중 수은에 대해서는 뚜렷한 노출 요인을 찾기 어려웠다. 요 중 카드뮴의 경우 누적 평균 노출량을 나타내기 위해 최근 노출을 반영할 수 있는 혈중 카드뮴 농도 측정이 필요한 것으로 보인다. 이 외에 다른 중금속도 건강에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있어 중금속 측정 항목의 확대에 대해 고려할 필요가 있다.

3기 국민환경보건 기초조사의 경우 어린이·청소년

이 대상자로 포함되면서 성인의 표본수가 줄어들어 1, 2기에 비해 항목별 상대표준오차가 다소 증가하였다. 이에 1~3기 국민환경보건 기초조사의 통합 DB를 구축하여 통합 가중치를 산출한다면 보다 정확한 대푯값을 산출할 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 연구는 2009년부터 2017년까지 한국에서 수행한 국민환경보건 기초조사를 이용하여 우리나라 성인을 대상으로 생체 중 납, 수은, 카드뮴의 노출의 경시적 변화를 확인하고, 영향요인들을 파악하였다. 성별에 따라 혈중 납과 혈중 수은은 남성이 여성보다 높았으며, 요 중 카드뮴은 반대로 여성이 더 높게 나타났다. 연령이 증가함에 따라 혈중 납, 혈중 수은, 요 중 카드뮴의 농도가 증가하였다. 또한 흡연자가 비흡연자보다 혈중 납의 농도가 높았으며, 주 1회 이상 생선을 섭취한 집단이 그렇지 않은 집단보다 혈중 수은의 농도가 높은 것으로 나타났다. 다만 1~3기를 통합하여 분석할 수 있는 통합 가중치가 없어 자료를 분석하는데 제한적이었으며, 국민환경보건 기초조사의 통합DB를 구축하여 통합 가중치를 산출한다면 보다 정확한 대푯값을 산출할 것으로 기대된다. 향후 본 연구결과를 이용하여 우리나라 성인의 참고값(Rerence value) 산출하고 이를 토대로 국내 노출기준 설정에 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. 제1기 국민환경보건기초조사, 제2기 국민환경보건기초조사(2014-01-01-074), 제3기 국민환경보건 기초조사(NIER-2017-01-001).

References

1. World Health Organisation. Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution. Denmark: World Health Organization; 2007.
2. Martin S, Griswold W. Human Health Effects of Heavy Metals. *Center for Hazardous Substance*

- Research*. 2009;15
3. Wilhelm M, Heinzow B, Angerer J, Schulz C. Reassessment of critical lead effects by the German Human Biomonitoring Commission results in suspension of the human biomonitoring values (HBM I and HBM II) for lead in blood of children and adults. *Int J Hyg Environ Health*. 2010; 213(4): 265-269.
 4. Zahir F, Rizwi SJ, Haq SK, Khan RH. Low dose mercury toxicity and human health. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2005; 20(2): 351-360.
 5. Satarug S, Garrett SH, Sens MA, Sens DA, 2010. Cadmium, environmental exposure, and health outcomes. *Environmental Health Perspectives*. 2010; 118(2): 182-190.
 6. Centers for Disease Control and Prevention. Fourth National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals, Update Tables. Washington, DC: CDC; 2019.
 7. 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.
 8. Becker K, Kaus S, Krause C, Lepom P, Schulz C, Seiwert M, Seifert B, et al. German Environmental Survey 1998 (GerES III): environmental pollutants in blood of the German population. *Int J Hyg Environ Health*. 2002; 205: 297-308.
 9. Hwang MY, Hong SY, Kwon YM, Jo HJ, Park CH. Difference 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.
 10. World Health Organisation. Trace Elements in Human Nutrition and Health. Geneva: World Health Organisation; 1996.
 11. Yoo JY, Kim SY, Kwon YM, Jung SK, Lee CW, Yu SD. Manual for Laboratory Procedures on The Third Stage Korean National Environmental Health Survey (Heavy metals), 3rd ed. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2018. p. 1-44.
 12. Yoo JY, Kim SY, Hong SY, Lee CH. Biological Sample Management Guidelines on The Third Stage Korean National Environmental Health Survey, 3rd ed. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2019. p. 11-44.
 13. Pirkle JL, Kaufmann RB, Brody DJ, Hickman T, Gunter EW, Paschal DC. Exposure of the U.S. population to lead, 1991-1994. *Environmental Health Perspectives*. 1998; 106(11): 745-750.
 14. Cusack LK, Smit E, Kile ML, Harding AK. Regional and temporal trends in blood mercury concentrations and fish consumption in women of child bearing age in the United States using NHANES data from 1999 to 2010. *Environmental Health*. 2017; 16(10): 1-11.
 15. 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. *Maternal and Child Health Journal*. 2018; 22(5): 685-693.
 16. Health Canada. It's your health-Lead and human health. Ottawa: Health Canada; 2014.
 17. Kim Y, Lee BK. Associations of blood lead, cadmium, and mercury with estimated glomerular filtration rate in the Korean general population: analysis of 2008-2010 Korean National Health and Nutrition Examination Survey data. *Environ Res* 2012; 118: 124-129.
 18. Betts KS. CDC Updates Guidelines for Children's Lead Exposure. *Environ Health Perspect*. 2012; 120(7): a268.
 19. Falq G, Zeghnoun A, Pascal M, Vernay M, Le Strat Y, Garnier R, et al. Blood lead levels in the adult population living in France the French Nutrition and Health Survey (ENNS 2006-2007). *Environ Int*. 2011; 37(3): 565-571.
 20. Son JY, Lee JH, Paek DM, Lee JT. Blood levels of lead, cadmium, and mercury in the Korean population: results from the second Korean National Human Exposure and Bio-monitoring Examination. *Environ Res*. 2009; 109(6): 738-744.
 21. 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.
 22. Environmental Protection Agency (US). EPA's report on the environment (ROE): blood lead level. Washington D.C: Environmental Protection Agency; 2014. Available: <https://cfpub.epa.gov/roe/indicator.cfm?i=63>.
 23. Muntner P, Menke A, Desalvo KB, Rabito FA, Batuman V. Continued decline in blood lead levels among adults in the United States: the National Health and Nutrition Examination Surveys. *Arch Intern Med*. 2005; 165(18): 2155-2161.
 24. Castano A, Sanchez-Rodriguez JE, Canas A, Esteban M, Navarro C, Rodriguez-Garcia AC, et al. Mercury, lead and cadmium levels in the urine of 170 Spanish adults: a pilot human biomonitoring

- study. *Int J Hyg Environ Health*. 2012; 215: 191-195.
25. Richter PA, Bishop EE, Wang J, Swahn MH. Tobacco smoke exposure and levels of urinary metals in the U.S. youth and adult population: the National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) 1999-2004. *Int J Environ Res Public Health*. 2009; 6: 1930-1946.
 26. Mannino M, Homa DM, Matte T, Hernandez-Avila M. Active and passive smoking and blood lead levels in U.S. adults: data from the Third National Health and Nutrition Examination Survey. *Nicotine Tobacco Research*. 2005; 7(4): 557-564.
 27. Lee SR, Lee CK, Im H, Yang W, Urm SH, Yu SD, et al. Secondhand smoke exposure and urine cotinine concentrations by occupation among Korean workers: results from 2008 Korea National Survey for Environmental Pollutants in the Human Body. *J Occup Environ Hyg*. 2014; 11(5): 314-325.
 28. Mergler D, Anderson HA, Chan LHM, Mahaffey KR, Murray M, Sakamoto M, et al. Methylmercury exposure and health effects in humans. *AMBIO A Journal of the Human Environment*. 2007; 36(1): 3-11.
 29. Apel P, Angerer J, Wilhelm M, Kolossa-Gehring M. New HBM values for emerging substances, inventory of reference and HBM values in force, and working principles of the German human biomonitoring commission. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2017; 220(2): 152-166.
 30. Im JY, Chung EK, Park HJ, Yu SD, Jang BK, Son BS. A study on concentrations of heavy metal in blood and urine of local area in Korea. *Journal of the Environmental Sciences*. 2013; 22(1): 59-72.
 31. Kim YA, Kim YN, Cho KD, Kim MY, Kim EJ, Baek OH, et al. Blood heavy metal concentrations of Korean adults by seafood consumption frequency: using the fourth Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES IV), 2008. *Korean J Nutr*. 2011; 44(6): 518-526.
 32. Lye E, Legrand M, Clarke J, Probert A. Blood total mercury concentrations in the Canadian population: Canadian Health Measures Survey cycle 1, 2007-2009. *Can J Public Health*. 2013; 104(3): e246e251.
 33. Schulz C, Angerer J, Ewers U, Heudorf U, Wilhelm M; Human Biomonitoring Commission of the German Federal Environment Agency. Revised and new reference values for environmental pollutants in urine or blood of children in Germany derived from the German environmental survey on children 2003-2006 (GerES IV). *Int J Hyg Environ Health*. 2009; 212(6): 637-647.
 34. Mortensen ME, Caudill SP, Caldwell KL, Ward CD, Jones RL. Total and methyl mercury in whole blood measured for the first time in the U.S. population: NHANES 2011-2012. *Environ Res*. 2014; 134: 257-264.
 35. Lee HM, Lim CJ, Yoon YK, Kim JW, Choi SN, Kim HM, et al. Risk Assessment on Cadmium in Foods. *The Annual report of Korea food&drug administration*. 2000; 4: 66-77.
 36. Liao KW, Pan WH, Liou SH, Sun CW, Huang PC, Wang SL. Levels and temporal variations of urinary lead, cadmium, cobalt, and copper exposure in the general population of Taiwan. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019; 26: 6048-6064.
 37. Riederer AM, Belova A, George B, Anastas PT. Urinary cadmium in the 1999-2008 U.S. National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES). *Environmental Science & Technology*. 2013; 47: 1137-1147.
 38. Jarup L. Hazards of heavy metal contamination. *Br Med Bull* 2003; 68(1): 167-182.
 39. Ryu DY, Lee SJ, Park DW, Choi BS, Klaassen CD, Park JD. Dietary iron regulates intestinal cadmium absorption through iron transporters in rats. *Toxicol Lett*. 2004; 152(1): 19-25.
 40. Lee MJ, Moon DH, Cho YH, Lee JT, Han YS, Jung GO. Heavy metal concentration in serum of rural inhabitants. *J Inje Med*. 1995; 16(2): 311-325.
 41. Kim HR, Woo YJ, Kim YY. Effects of smoking on concentration of heavy metals in blood and clinical characteristics. *Public Health Weekly Report*, 10th ed. Cheongju: Korea Centers for Disease Control and prevention; 2017. p. 748-753.
 42. World Health Organisation. Recommended health-based limits in occupational exposure to heavy metals. World Health Organisation. Tech. 1980; 647: 1-116.
 43. Watanabe T, Zhang ZW, Moon CS, Shimbo S, Nakatsuka N, Matsuda-Inoguchi N, et al. Cadmium exposure of women in general populations in Japan during 1991-1997 compared with 1977-1981. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2000; 73(1): 26-34.

<저자정보>

주영경(전문위원), 권영민(전문위원), 김성연(연구사),
 최경호(교수), 이철우(과장), 유승도(부장),
 유지영(연구관)