한국환경보건학회지, 제46권 제3호(2020)
J Environ Health Sci. 2020; 46(3): 297-311

pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2020.46.3.297

원 저 | Original articles

인구집단의 비교를 통한 폐금속광산 지역 주민의 카드뮴 노출수준 및 건강영향평가

서정욱 · 김병권*,** · 홍영습*,**†
*동아대학교 환경보건센터, **동아대학교 의과대학 예방의학교실

Health Impact Assessment for Cadmium Exposure: Comparison of Residents around Abandoned Mines with the General Population

Jeong-Wook Seo, Byoung-Gwon Kim*,, and Young-Seoub Hong*,**†**
**Environmental Health Center, Dong-A University*
***Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University*

ABSTRACT

Objective: We compared the level of blood cadmium exposure with health impacts by using data from a survey of residents near an abandoned mine and a national health survey.

Methods: For this study, we used data from 7,046 individuals who participated in the Health Effects Survey of Abandoned Metal Mines (AMS, 2008-2011) and 6,871 individuals who participated in the Korea National Health and Nutrition Examination Survey IV-VI (KNHANES, 2008-2013). To evaluate the health impacts, the quartiles (S1 to S4) were classified according to blood cadmium concentration, and then the odds ratios of S2 to S4 over S1 for exceeding the reference values of renal function, blood pressure, and bone density were compared. Similarly, the odds ratio of AMS over KNHANES was confirmed.

Results: In the AMS, adjusted for general characteristics, the geometric mean of blood cadmium concentration was 1.34 μg/L, which was statistically significantly higher than that of the KNHANES 1.22 μg/L ($p<0.001$). In the integrated data of AMS and KNHANES, the estimated odds ratio of S4 over S1 for exceeding the reference value was found to be 1.70 for serum creatinine, 1.71 for hypertension, and a T-score 2.02 for the tarsal bone. They were all statistically significant.

Conclusion: Residents around abandoned metal mines had a higher blood cadmium concentration than the general population, and the odds for exceeding the reference values were higher for some health indicators. Continuous biomonitoring should be conducted for vulnerable areas such as around abandoned metal mines, and measures to reduce cadmium exposure and management of chronic diseases are needed.

Key words: Cadmium, health impact, abandoned metal mine

I. 서 론

카드뮴은 US ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry)에서 제시하는 발생빈도, 독성, 인체 노출 가능성의 측면에서 위해성이 높은 유해물질로 분류된다. 카드뮴 노출의 주요한 경로 중 하나는 오염된 토양 또는 농업용수 등을 통해 2차 오염된 식품을 섭취하는 것으로, 직업 환경 및 흡연을

†**Corresponding author:** Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University, 32, Daesingongwon-ro, Seo-gu, Busan 49201, Republic of Korea, Tel: +82-51-240-2888, Fax: +82-51-253-5729, E-mail: yshong@dau.ac.kr
Received: 21 May 2020, Revised: 8 June 2020, Accepted: 10 June 2020

제외한 일반 인구 집단에서의 카드뮴 노출은 주로 경구 섭취에 의해 발생한다. 식품 내 카드뮴 함유량은 오염된 환경 조건과 노출 경로 등에 따라 차이를 보인다.[1] 식약처(KMFDA, The Korea Ministry of Food and Drug Safety)는 농산물, 축산물, 수산물, 가공식품에서의 품목별 평균 검출량을 제시하고 있으며,[2] 우리나라의 경우 식품 섭취에 의한 카드뮴 노출 기여율은 약 95% 수준으로 추정되고 있다.[3] 식품 섭취에 의한 노출 특성은 지역 및 개인 식습관에 따라 다양한 양상이 나타날 수 있으며,[4] 일반적으로 30~50 μg/day를 섭취하고 있는 것으로 추정된다.[5,6] 한편, 경구 노출에 의한 카드뮴의 흡수 분율은 1~10% 정도로 보고하고 있다.[7]

식품 섭취에 의한 카드뮴 노출은 저농도 만성인 경우가 대부분이다. 만성 노출에 따른 건강영향으로, 대표적인 표적기관은 신장(kidney)이다. 또한 폐 및 호흡기계, 심혈관계, 골격계에 영향을 미치며 신경독성을 보고하고 있다. 각 기관에서는 발암물질 또는 발암의심물질로 분류하고 있으며 전립선암과 신장암 등을 발생시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

우리나라는 카드뮴의 위해성 평가를 위해 지속적인 바이오모니터링을 실시하고 있으며, 일반 국민 대상과 취약지역 대상으로 분류할 수 있다. 일반 국민 대상 바이오모니터링은 질병관리본부(KCDC, The Korea Centers for Disease Control and Prevention)의 국민건강영양조사(KNHANES, The Korea National Health and Nutrition Examination Survey), 국립환경과학원(KNIER, The Korea National Institute of Environmental Research의 국민환경보건기초조사(KoNEHS, Korean National Environmental Health Survey)가 실시되고 있다. 해당 모니터링은 공통적으로 카드뮴을 포함한 다종의 유해물질의 대푯값을 제시하고 각종 질환의 이환상태를 제시하는 것이 가능하다. 특히, KNHANES의 경우 일부 생체시료별 진단검사가 포함되어 유해물질 노출수준과 질환 이환 상태와의 상관성을 파악하는데 용이하다. 해당 모니터링 결과 우리나라 일반 국민들의 카드뮴의 노출 수준은 감소하는 추세에 있으나 국외와 비교하여 상대적으로 높은 수준에 있다.[8,9] FAO/WHO 합동 식품첨가물 전문가 위원회(JECFA, Joint Food and Agriculture Organization/World Health organization Expert Committee on Food Additives) 및 유럽 식품 안전청(EFSA, European Food Safety Authority) 등의 기구에서는 저농도 노출에 의해서도 장기 축적되는 카드뮴의 특성을 반영하여, 섭취량에 대한 안전 기준치를 점진적으로 하향 조정하고 있는 추세로 지속적인 모니터링이 요구된다. 한편, 제3기(2017~2019) KoNEHS에서는 취약계층이라 할 수 있는 아동에 대한 모니터링을 확대하여 실시하였다.

환경보건법은 환경유해인자가 수용체에 미치는 영향과 피해를 조사·예방 및 관리함으로써 국민의 건강을 증진시키기는 것을 목적으로 하여, 환경유해인자로 인한 건강피해가 우려되거나 의심되는 지역 주민 및 인구집단에 대한 역학조사 실시를 명시하고 있다. 특히, 폐금속광산, 산업단지, 화력발전소 등을 환경오염에 취약한 지역으로 정의하고 영향권 주민에 대한 관리를 필요로 한다. 이에 KNIER은 '폐금속광산 지역주민 건강영향조사', '국가 산단 지역 주민 환경오염 노출 및 건강영향 감시사업', '석탄 화력발전소 주변지역 주민건강영향조사'의 바이오모니터링 사업을 진행하고 있다. 해당 조사들은 기본적으로 취약지역 내 오염원을 중심으로 환경 중 유해물질 노출 수준, 노출 경로, 영향권 지역 주민 노출 수준 파악과 함께 건강영향과의 상관성을 확인하는데 그 목적이 있다. 폐금속광산은 다종의 유해금속에 의한 토양오염이 매우 우려되는 지역이다. 상대적으로 카드뮴, 비소 등의 오염도가 다른 요인에 비해 높으며, 따라서 영향권 내 거주하는 주민들에 대한 중금속의 장기간 저농도 노출에 따른 건강영향의 가능성이 높을 것으로 추측된다.

본 연구에서는 폐금속광산 주민건강영향조사(AMS[Abandoned Metal Mines survey], Health Effects Survey of Abandoned Metal Mines) 자료를 이용하여 중금속 노출 취약지역인 폐금속광산 영향권 내 거주 주민의 혈 중 카드뮴 노출 실태를 파악하고, 그에 따른 건강영향을 확인하기 위해 관련 질환 지표를 KNHANES의 일반 인구집단과 비교하였다.

II. 대상 및 방법

1. 자료

1.1. AMS

환경부(KMOE, The Korea Ministry of Environment)에서는 1996~2005년까지 158개 폐금속광산의 토양

및 수계 오염도에 대한 개황조사 및 정밀조사 결과를 보고하였고, 2005년 당시 파악된 전국 906개 폐금속광산 중 조사 완료된 219개를 제외한 687개에 대해 개황조사를 계획하였고, 실제 638개를 조사하였다. 해당 오염도 조사 결과, 납, 카드뮴 등 중금속의 우려기준 또는 대책기준을 초과한 지역에 대해 건강영향조사 필요성이 제기되었다. 이에 따라 건강영향이 우려되는 총 418개 폐금속광산 중 기존 정밀조사가 완료된 17개 지역을 제외한 401개에 대해 예비조사를 실시하였으며, 실제 358개 지역이 평가되었다. 이들 폐금속광산 지역의 환경오염 및 건강영향 정도를 반영하여 위험도를 계량화하였고, 상위 10%에 해당하는 38개 지역에 대해 추가조사인 AMS를 실시하였다.

AMS는 전국을 5개 권역으로 분류하였고 표준화된 도구와 지침에 따라 2008~2011년 동안 총 7,483명에 대해 조사가 진행되었다. 거주 지역 및 대상자 특성에 대한 설문 조사가 실시되었고, 질병 이환 상태를 파악하였다. 특히 만성 질환 유병 여부, 과거 의사 진단 여부, 진단 전 임상 증상에 대해 조사되었다. 중금속 중 혈 중 카드뮴에 대해 분석하였고, 신체 계측과 요 중 β_2-microglobulin (β_2-MG), N-acetyl-β-glucosaminidase (NAG)의 신기능 검사를 포함하여 혈액, 요의 진단 검사를 실시하였다. 38개 폐금속광산의 광종, 규모, 운영 및 폐쇄 기간, 광해 방지 처리 유무와 특성, 오염 정도 등이 상이할 수 있지만 본 연구의 영향 인자 변수로 포함되지 못하였다. 하지만 일반 인구집단과 비교하여 공통적인 특성으로 폐금속광산에 의한 직·간접적 중금속 노출 집단으로 분류될 수 있다.

1.2. KNHANES

KNHANES는 US NHANES와 유사하게 순환표본 설계(rolling sampling design)가 적용된 조사로서 전국의 표본을 3개년에 걸쳐 조사되는 독립적인 3개의 순환표본으로 구분하며, 전국을 대표하는 확률표본으로 서로의 특성이 동질적으로 유지되도록 설계된다. 따라서 각 1개 순환표본으로 전국 단위의 통계 생산이 가능하며, 3년간의 조사를 병합하였을 때 전체 표본조사 자료로써 활용이 가능하다.

KNHANES는 건강설문조사, 보건의식행태조사, 검진조사, 영양조사의 4개 영역으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 AMS가 실시된 동일 기간의 2008~2011년(KNHANES IV-2, IV-3, V-1, V-2)의 자료를 이용하였고, 비교 가능한 인구학적 특성과 생활습관 특성 그리고 신체 계측 및 진단 검사 변수들을 포함하였다. 한편, 전국 17개 특별광역시도 중 AMS의 38개 폐금속광산을 포함하고 있는 9개 지역의 6,871명의 자료를 대상으로 하였다.

2. 혈 중 카드뮴 농도 분석

2.1. AMS

AMS의 생체 시료 수집과 중금속 분석에 관련한 모든 절차는 KNIER의 표준 지침을 준수하였다.[10] 혈액 시료는 헤파린(Heparin)과 EDTA (ethylene-diaminetetraacetic acid)가 처리된 튜브(vacutainer)에 5 mL 이상 채취하였다. 응고되지 않도록 잘 섞은 후 냉장 보관하여 이송하였고, 당일 분주 후 −80°C 초저온 냉동고에 보관되었다. 혈 중 카드뮴은 Dong-A university clinical trial center에서 수행하였고, Subramanian & Maeranger (1981)의 방법을 이용하여 graphite furnace atomic absorption spectrometry with Zeeman background correction (Perkin-Elmer Model AAnalysist 600)로 측정되었다. 내부 질 보증 및 관리를 위해, 상용화 표준물질 Lyphochek Whole Blood Metals Control (Bio-Rad, Hercules, CA, US)을 사용하였다. 표준 시료의 변동 계수는 2.9~4.2%이었다. 외부 질 보증 및 관리 부분으로 분석 연구소는 Friedrich-Alexander University에 의해 운영되는 German External Quality Assessment Scheme (G-EQUAS)과 산업안전보건공단(KOSHA, Korea Occupational Safety and Health Agency)에서 운영되는 Quality Assurance Program에서 인증을 받았다. 전체 분석 시료에서 검출한계 이하는 없었다.

2.2. KNHANES

KNHANES에서 혈 중 카드뮴 농도 수준을 평가하기 위해, 나트륨 헤파린을 포함하는 상업용 표준 진공 튜브(vacutainer)에 3 mL 혈액을 투입하였다. AMS와 동일하게 graphite furnace atomic absorption spectrometry with Zeeman background correction로 측정되었고, Neodin Medical Institute에서 수행되었으며, 보건복지부(Korean Ministry of Healthand Welfare)에 의해 공식 지정되었다. 내부 질 보증 및

관리를 위해, 상용화 표준물질 Lyphochek Whole Blood Metals Control (Bio-Rad, Hercules, CA, US)을 사용하였다. 표준 시료에 변동 계수는 0.95~4.82%이었다. 외부 질 보증 및 관리를 위해 G-EQUAS 및 KOSHA의 프로그램의 인증을 받았다. 또한 해당 연구소는 고용노동부(KMEL, Korea Ministry of Employment and Labor)에 의해 중금속과 일부 유기 화학 물질을 포함한 특정 화학 물질 분석에 대한 지정 연구소로 보증되었다. 본 연구에서 사용된 혈 중 카드뮴 분석의 검출한계는 각각 0.056 mg/L이었으며 검출한계 이하의 시료는 없었다. KNHANES의 생체 시료 수집과 중금속 분석에 관련한 모든 절차는 KNHANES 전용 표준 지침을 준수하였다.[11]

3. 통계 분석

자료원에 따라 노출 집단인 AMS와 일반 인구집단의 KNHANES 간 혈 중 카드뮴의 농도 분포를 직접적으로 비교하기 위해 1:1 경향성 점수 매칭(propensity score matching, PSM)을 실시하였고, 히스토그램을 제시하였다. 이 때 혈 중 카드뮴 농도에 주요한 영향 인자로 성, 연령, 지역, 월 가구 수입을 이용하였다.

혈 중 카드뮴은 치우친 분포로(skewness >0) 중심위치 및 구간 추정량으로 기하평균과 95% 신뢰구간을 제시하였다. AMS와 KNHANES의 집단 간 비교, 집단 내 대상자 특성에 따른 농도 수준을 비교하기 위해 각 인자의 최소제곱평균(least square mean)을 검정하였다. 이 때 Bonferroni correction을 실시하였다.

AMS, KNHANES, 그리고 2개 통합 자료의 혈 중 카드뮴 농도에 따라 사분위수(S1~S4)로 구분하였고, S1을 참조 수준(reference level)으로 할 때 S2~S4의 신장기능, 심혈관계, 골밀도 지표의 기준치 초과 odds를 비교하였다. 또한 KNHANES에 대한 AMS의 기준치 초과 교차비(OR, odds ratio)를 확인하였다.

모든 추정량과 검정은 SAS (Version 9.4, SAS Institute, Cary, NC, US)를 이용하였고, 검정은 유의수준 5%하에서 실시되었다.

III. 결 과

1. 혈 중 카드뮴 농도

AMS와 KNHANES 대상자 특성 분포 및 혈 중 카드뮴 농도의 비교 결과는 Table 1 및 Fig. 2과 같다.

본 연구 자료에서 인구·사회학적 분포의 특성으로, KNHANES의 남녀 비율이 약 50%로 균등하며 저연령층의 비율이 상대적으로 높은데 반해, AMS의 경우 여성의 비율이 남성에 비해 더 높았으며 고연령층의 비율이 높아 서로 상반된 분포를 보였다. 또한 지역별 분포에 있어서 KNHANES는 지역별 인구수에 비례하여 경기 지역의 분포가 가장 높았고 AMS는 지역에 포함된 폐광산 개수에 비례하여 충북 및 강원 지역의 분포가 높았다. 그 외 AMS는 대체로 여성, 고연령, 교외 지역의 특성을, KNHANES는 상대적으로 저연령, 도심 지역의 특성을 보였다.

AMS와 KNHANES 두 집단별 요인 특성 -성, 연령, 지역, 월 가구 수입, 흡연상태, 음주상태- 에 유의한 차이가 있으므로, 혈 중 카드뮴의 농도 비교 시 이러한 요인 특성의 주효과(main effect) 및 자료원과의 2단계 교호작용(interaction) 효과를 보정하여 평가하였다. AMS의 보정된 기하평균(95% 신뢰구간)은 1.34 (1.30-1.39) μg/L로 KNHANES 1.22 (1.19-1.25) μg/L에 비해 통계적으로 유의하게 높았다. 참고로 보정 전 AMS 1.54 (1.52-1.56) μg/L, KNHANES 0.97 (0.96-0.99) μg/L로 더욱 두드러진 차이를 보였다. 이러한 보정 전·후의 차이는 일반적으로 혈 중 카드뮴이 남성에 비해 여성이, 저연령에 비해 고연령이 높은 농도를 보이는 것에 기인한다.

AMS의 경우, 남성이 여성에 비해 높은 농도를 보였고, 18~39세와 50대 이상의 연령과 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 월 가구 수입이 증가함에 따라 대체로 농도가 낮아지는 경향성이 나타났으며, 현재 흡연자가 금연, 비흡연자와 비교하여 통계적으로 유의하게 높았다. 음주 상태에 따른 농도 비교에서 유의한 차이가 발견되진 않았다. KNHANES의 특성에 따른 농도 비교에서도 AMS와 매우 유사한 경향성이 나타났다. AMS와 KNHANES의 두 집단 간 특성별 혈 중 카드뮴 농도 비교 결과, 대체로 AMS의 농도 수준이 통계적으로 유의하게 높았다.

AMS의 고유 특성 요인으로서 중금속 노출 위험 직종 종사 경험자가 높았으며, 폐금속광산과 거주지와의 직선거리를 3 km 기준으로 구분하였을 때 통계적으로 유의한 차이가 있었다.

한편, 두 집단 간 혈 중 카드뮴의 농도 분포를 직접적으로 비교하기 위해 1:1 경향성 점수 매칭

Table 1. Geometric means of blood Cd (unit: μg/L)

	AMS ('08~'11)		KNHANES ('08~'13)		p-value
	n(%)	Adjusted GM (95% CI)	n(%)	Adjusted GM (95% CI)	
Total	7,046(50.6)	1.34(1.30-1.39)	6,871(49.4)	1.22(1.19-1.25)	<.001
Sex					
Male	2,808(39.9)	1.23(1.19-1.28)	3,417(49.7)	0.98(0.96-1.01)	<.001
Female	4,238(60.1)	1.47(1.41-1.53)	3,454(50.3)	1.51(1.46-1.56)	0.343
p-value		<.001		<.001	
Age (yr)					
18-39	200(2.8)	1.13(1.04-1.23)[d]	2,613(38.0)	0.81(0.78-0.84)[e]	<.001
40-49	554(7.9)	1.35(1.28-1.42)[ad]	1,401(20.4)	1.24(1.19-1.29)[c]	0.012
50-59	1,335(18.9)	1.42(1.36-1.48)[a]	1,413(20.6)	1.37(1.32-1.42)[a]	0.166
60-69	1,927(27.3)	1.43(1.37-1.49)[a]	1,095(15.9)	1.40(1.35-1.45)[a]	0.431
≥70	3,030(43.0)	1.42(1.36-1.48)[a]	349(5.1)	1.40(1.32-1.49)[ac]	0.717
p-value		<.001		<.001	
Region					
Busan	321(4.6)	1.82(1.70-1.95)[a]	799(11.6)	1.23(1.18-1.29)[abc]	<.001
Gyeonggi	285(4.0)	0.95(0.88-1.02)[d]	2,676(38.9)	1.10(1.07-1.13)[c]	<.001
Gangwon	1,430(20.3)	1.27(1.22-1.33)[c]	357(5.2)	1.16(1.09-1.24)[abc]	0.020
Chungbuk	851(12.1)	1.42(1.35-1.50)[bc]	353(5.1)	1.15(1.08-1.22)[bc]	<.001
Chungnam	1,653(23.5)	1.53(1.47-1.60)[ab]	501(7.3)	1.26(1.19-1.32)[abc]	<.001
Jeonbuk	177(2.5)	0.99(0.91-1.08)[d]	416(6.1)	1.23(1.16-1.30)[abc]	<.001
Jeonnam	808(11.5)	1.36(1.28-1.45)[bc]	460(6.7)	1.43(1.35-1.51)[a]	0.263
Gyeongbuk	758(10.8)	1.56(1.48-1.64)[ab]	655(9.5)	1.15(1.10-1.20)[bc]	<.001
Gyeongnam	763(10.8)	1.43(1.36-1.51)[bc]	654(9.5)	1.27(1.22-1.33)[ab]	0.001
p-value		<.001		<.001	
Month income (₩10,000)					
<50	4,097(58.7)	1.44(1.39-1.50)[a]	412(6.1)	1.26(1.20-1.34)	<.001
50-<100	1,301(18.6)	1.44(1.38-1.50)[ab]	652(9.6)	1.23(1.17-1.28)	<.001
100-<200	948(13.6)	1.31(1.25-1.37)[bc]	1,271(18.7)	1.21(1.16-1.25)	0.009
200-<300	355(5.1)	1.35(1.26-1.44)[abc]	1,317(19.4)	1.21(1.17-1.26)	0.005
≥300	284(4.1)	1.20(1.12-1.30)[c]	3,142(46.2)	1.18(1.14-1.21)	0.578
p-value		<.001		0.099	
Smoke					
Currently	926(13.2)	1.56(1.48-1.64)[a]	1,722(25.6)	1.72(1.66-1.78)[a]	0.002
Former	1,144(16.3)	1.20(1.14-1.26)[c]	1,328(19.8)	1.09(1.05-1.13)[b]	0.002
Never	4,950(70.5)	1.30(1.25-1.35)[b]	3,671(54.6)	0.96(0.93-0.99)[c]	<.001
p-value		<.001		<.001	
Drink					
Currently	2,652(40.4)	1.31(1.27-1.35)	5,096(75.8)	1.19(1.16-1.22)	<.001
Former	213(3.2)	1.38(1.27-1.49)	887(13.2)	1.23(1.18-1.27)	0.013
Never	3,693(56.3)	1.35(1.31-1.40)	740(11.0)	1.24(1.18-1.29)	0.002
p-value		0.098		0.123	

Table 1. Continued (unit: μg/L)

	AMS ('08~'11)		KNHANES ('08~'13)		p-value
	n(%)	Adjusted GM (95% CI)	n(%)	Adjusted GM (95% CI)	
Education level					
Below elementary			1,410(21.0)	1.25(1.21-1.29)[ab]	
Middle			749(11.2)	1.30(1.25-1.36)[a]	
High			2,569(38.3)	1.18(1.14-1.22)[b]	
Above college			1,980(29.5)	1.13(1.09-1.17)[c]	
p-value				<.001	
Job history					
Yes	380(9.0)	1.51(1.45-1.57)			
No	3,859(91.0)	1.15(1.11-1.20)			
p-value		<.001			
Distance from mine					
<3	4,427(62.8)	1.60(1.49-1.72)			
≥3	2,619(37.2)	1.34(1.29-1.39)			
p-value		<.001			
Blood Cd					
≤Q1 (0.831 μg/L)	454(10.3)	0.55(0.54-0.57)[d]	2,518(36.6)	0.58(0.57-0.59)[d]	0.007
>Q1-≤Median (1.283 μg/L)	787(17.8)	1.04(1.02-1.06)[c]	2,020(29.4)	1.08(1.07-1.10)[c]	0.003
>Median-≤Q3 (1.901 μg/L)	1,214(27.4)	1.56(1.53-1.60)[b]	1,515(22.0)	1.56(1.54-1.59)[b]	0.975
>Q3	1,972(44.5)	2.71(2.65-2.77)[a]	818(11.9)	2.45(2.40-2.50)[a]	<.001
p-value		<.001		<.001	

Adjusted: all model is adjusted by sex, age, region, month income, smoking status, drinking status
GM (95% CI): Geometric Means (95% Confidence Interval)
[abc]: Bonferroni post-hoc; estimates with the same letter are not significantly different

(propensity score matching, PSM)을 실시하였다. 이때 혈 중 카드뮴 농도에 주요한 영향 요인으로 성, 연령, 지역, 월 가구 수입을 이용하였다. 그 결과 AMS, KNHANES 각각 2,016명의 대상자가 선정되었고, 그에 따른 히스토그램은 Fig. 2과 같다. 전체적인 분포에서 AMS의 농도가 더 높은 것으로 파악되었으며, 기하평균(95% 신뢰구간) 역시 AMS가 1.37 (1.33-1.41) μg/L로 KNHANES 1.21 (1.18-1.24) μg/L에 비해 통계적으로 유의하게 높았고, 중앙값은 AMS 1.48 μg/L, KNHANES 1.24 μg/L로 나타났다. 또한 WHO의 혈 중 카드뮴 기준인 5 μg/L 초과자의 비율(95% 신뢰구간) 역시 AMS가 0.75 (0.40-1.18) %로 KNHANES 0.30 (0.06-0.54) % 보다 통계적으로 유의하게 높았다.

2. 혈 중 카드뮴 농도에 따른 현재 유병 및 검사 기준치 초과의 OR

사분위수로 구분한 혈 중 카드뮴 농도의 최하위 구간(S1)을 참조 수준(reference level)으로 할 때, 상위 구간에서의 신장 기능, 심혈관계, 골밀도 지표 기준치 초과자의 대상자 특성을 보정한 OR (95% 신뢰구간)을 추정한 결과는 Table 2와 같다.

두 집단 통합 자료에서 신장 기능 지표 중 혈청 중 크레아티닌(Creatinine) 기준치(남성>1.3, 여성>1.1)[12] 초과에 대해 S2의 OR (95% 신뢰구간)은 1.28 (0.85-1.93)로 참조수준인 S1에 비해 odds가 1.28배 증가하는 것으로 나타났으나 통계적으로 유의하지는 않았다. S3은 S1과 유사한 수준이었고(1.06 (0.69-1.62)), S4의 경우 1.70 (1.13-2.54)로 통계적으

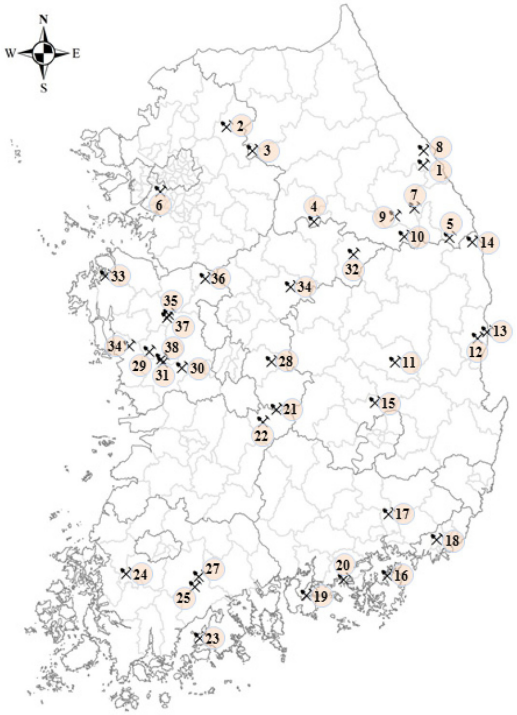

Fig. 1. Locations of the 38 abandoned metal mine areas

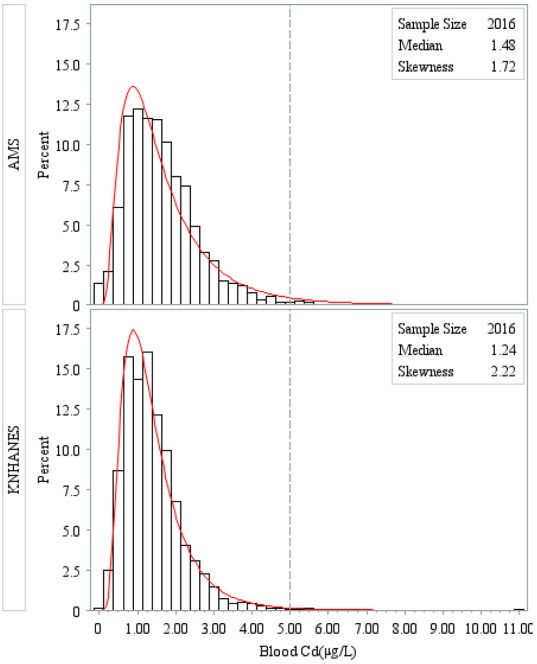

Fig. 2. Blood Cd concentration histogram

로 유의하다고 할 충분한 근거가 있었다. 요단백 양성 반응의 odds는 구간에 따라 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 혈관 관련 지표 중 수축기 혈압(systolic blood pressure, SBP) ≥140 mmHg, 이완기 혈압(diastolic blood pressure, DBP) ≥90 mmHg, 혈압 측정에 의한 고혈압, 혈압 측정 또는 문진 결과 현재 유병으로 정의된 고혈압 모두 혈 중 카드뮴 농도가 증가할수록 즉, 사분위수 하위 구간에 비해 상위 구간의 OR이 증가하는 뚜렷한 경향성이 확인되었다. 특히, 혈압 측정과 문진 결과 현재 유병으로 정의된 고혈압의 경우, S1에 비해 S2 1.20 (1.07-1.35), S3 1.31 (1.17-1.48), S4 1.47 (1.30-1.66)으로 모든 추정치가 통계적으로 유의하였다.

AMS 자료에서 신장 관련 지표로 알부민(albumin), β_2-MG, NAG가 조사되었으나 혈청 중 크레아티닌, 요단백을 포함하여 사분위수 구간에 따른 추정치에 통계적으로 유의한 차이는 발견되지 않았다. 특히 NAG 기준치(>7.0 U/L) 초과의 경우 참조수준인 S1에 비해 S4가 0.55 (0.32-0.94)로 추정되어 혈 중 카드뮴 농도가 증가할수록 odds가 유의하게 감소하는 역의 관계가 나타났다. 혈관 관련 지표 중 혈압과 관련된 모든 추정치가 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며, 하위 구간에 비해 상위 구간의 OR이 증가하는 대체적인 경향성 역시 동일하게 발견되었다. 한편, 골밀도 관련 지표 중 족근골 T-score에 의한 골다공증(osteoporosis) 유병(<–2.0)에 대해 S1과 비교하여 S2 1.45 (1.14-1.84), S3 2.06 (1.61-2.63), S4 2.02 (1.56-2.60)으로 모든 추정치가 통계적으로 유의하였다.

KNHANES 자료에서도 유사하게 신장 및 골밀도 관련 지표 모두 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났으나, 혈관 관련 지표 중 혈압과 관련된 모든 추정치가 통계적으로 유의한 것으로 나타났으며 혈 중 카드뮴 농도의 하위 구간에 비해 상위 구간의 OR이 증가하는 뚜렷한 경향성이 발견되었다.

본 분석 결과 우리나라 일반 인구집단 및 중금속 노출 취약지역의 인구집단에서 나타날 수 있는 범위 내 혈 중 카드뮴의 농도가 증가할수록 혈청 중 크레아티닌, 혈압, 족근골 T-score 기준치 초과의 odds가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Odds ratio for exceeded reference value of health indicator according to blood cadmium concentration

Data	Target organ	Clinical diagnostic test	Adjusted OR (95% CI) by qaurtile of Cd concentration (ref. level S1(≤Q1))					
			S4 (>Q3)	p-value	S3 (>Median-≤Q3)	p-value	S2 (>Q1-≤Median)	p-value
AMS (n=7,046)	Renal	Serum creatinine (M: >1.3 mg/dL, F: >1.1 mg/dL)	1.39(0.94-2.06)	0.098	0.92(0.61-1.40)	0.710	0.94(0.63-1.41)	0.761
		Proteinuria (positive)	0.74(0.52-1.06)	0.106	0.97(0.70-1.32)	0.825	1.07(0.79-1.46)	0.660
		Albumin (>5.2 g/dL)	0.46(0.09-2.43)	0.359	0.51(0.12-2.14)	0.355	0.76(0.22-2.63)	0.665
		β_2-MG (>330 μg/L)	1.13(0.78-1.65)	0.515	1.02(0.69-1.50)	0.920	1.45(0.97-2.17)	0.071
		NAG (>7.0 U/L)	0.55(0.32-0.94)	0.029	0.78(0.51-1.19)	0.246	0.86(0.59-1.25)	0.420
	Cardio-vascular	Stroke (current prevalence or anamnesis)	1.03(0.68-1.54)	0.900	1.09(0.75-1.60)	0.654	1.13(0.78-1.64)	0.503
		MI or angina (current prevalence or anamnesis)	0.99(0.71-1.37)	0.956	0.80(0.58-1.10)	0.175	0.83(0.61-1.14)	0.246
		SBP (≥140 mmHg)	1.54(1.31-1.82)	<.001	1.44(1.22-1.69)	<.001	1.36(1.15-1.59)	<.001
		DBP (≥90 mmHg)	1.49(1.20-1.85)	<.001	1.56(1.27-1.93)	<.001	1.22(0.98-1.50)	0.071
		HBP (SBP≥140 or DBP≥90 mmHg)	1.50(1.27-1.76)	<.001	1.49(1.27-1.74)	<.001	1.36(1.16-1.59)	<.001
		Hypertension	1.29(1.11-1.51)	<.001	1.25(1.07-1.45)	0.004	1.16(1.00-1.34)	0.044
	Bone density	Tarsal bone T-score (<-2.5)	2.02(1.56-2.60)	<.001	2.06(1.61-2.63)	<.001	1.45(1.14-1.84)	0.002
		Tarsal bone Z-score (≤-2.0)	1.81(0.78-4.23)	0.167	2.07(1.07-4.04)	0.032	1.66(0.89-3.09)	0.112
KNHAENS (n=6,871)	Renal	Serum creatinine (M: >1.3 mg/dL, F: >1.1 mg/dL)	1.94(0.82-4.63)	0.134	1.07(0.44-2.59)	0.880	1.29(0.56-3.01)	0.552
		Proteinuria (positive)	0.78(0.37-1.65)	0.522	0.88(0.44-1.76)	0.724	0.95(0.50-1.82)	0.881
	Cardio-vascular	Stroke (current prevalence or anamnesis)	1.06(0.52-2.15)	0.866	1.10(0.56-2.16)	0.779	0.96(0.49-1.89)	0.903
		MI or angina (current prevalence or anamnesis)	0.83(0.44-1.57)	0.574	0.83(0.45-1.53)	0.554	0.92(0.50-1.70)	0.793
		SBP (≥140 mmHg)	2.08(1.54-2.80)	<.001	1.52(1.13-2.05)	0.005	1.40(1.04-1.88)	0.027
		DBP (≥90 mmHg)	2.47(1.92-3.18)	<.001	1.68(1.32-2.15)	<.001	1.33(1.05-1.68)	0.020
		HBP (SBP≥140 or DBP≥90 mmHg)	2.17(1.73-2.71)	<.001	1.56(1.25-1.94)	<.001	1.28(1.03-1.58)	0.024
		Hypertension	1.78(1.45-2.18)	<.001	1.43(1.18-1.74)	<.001	1.08(0.89-1.30)	0.453
	Bone density	Femur T-score (Asian) (<-2.5)	0.08(0.02-0.40)	0.002	0.26(0.07-1.02)	0.053	0.17(0.03-0.93)	0.041
		Neck of femur T-score (Asian) (<-2.5)	0.73(0.35-1.52)	0.403	0.91(0.45-1.87)	0.802	0.94(0.44-2.01)	0.882
		Lumbar T-score (Asian) (<-2.5)	1.05(0.59-1.86)	0.877	0.97(0.55-1.71)	0.909	0.78(0.42-1.43)	0.421

Table 2. Continued

Data	Target organ	Clinical diagnostic test	Adjusted OR (95% CI) by qaurtile of Cd concentration (ref. level S1(≤Q1))					
			S4 (>Q3)	p-value	S3 (>Median-≤Q3)	p-value	S2 (>Q1-≤Median)	p-value
Total (n=13,917)	Renal	Serum creatinine (M: >1.3 mg/dL, F: >1.1 mg/dL)	1.70(1.13-2.54)	0.010	1.06(0.69-1.62)	0.798	1.28(0.85-1.93)	0.236
		Proteinuria (positive)	0.96(0.69-1.32)	0.796	1.12(0.82-1.52)	0.482	1.08(0.79-1.46)	0.638
	Cardio-vascular	Stroke (current prevalence or anamnesis)	0.73(0.54-0.99)	0.042	0.60(0.44-0.81)	<.001	0.85(0.63-1.14)	0.276
		MI or angina (current prevalence or anamnesis)	0.83(0.63-1.08)	0.169	0.71(0.54-0.94)	0.015	0.95(0.73-1.23)	0.682
		SBP (≥140 mmHg)	1.72(1.48-1.99)	<.001	1.45(1.25-1.68)	<.001	1.21(1.04-1.41)	0.012
		DBP (≥90 mmHg)	1.82(1.55-2.15)	<.001	1.45(1.23-1.70)	<.001	1.16(0.99-1.36)	0.062
		HBP (SBP≥140 or DBP≥90 mmHg)	1.71(1.49-1.95)	<.001	1.45(1.27-1.65)	<.001	1.21(1.07-1.38)	0.004
		Hypertension	1.47(1.30-1.66)	<.001	1.31(1.17-1.48)	<.001	1.20(1.07-1.35)	0.002

Adjusted: all model is adjusted by sex, age, region, month income, smoking status, drinking status
OR (95% CI): Odds ratio (95% confidence interval)
Total qaurtile: Q1: 0.831, Median: 1.282, Q3: 1.901
AMS qaurtile: Q1: 1.073, Median: 1.613, Q3: 2.280
KNHANES qaurtile: Q1: 0.677, Median: 1.018, Q3: 1.480
MI: myocardial infarction; SBP: systolic blood pressure; DBP: diastolic blood pressure; HBP: high blood pressure; Hypertension: BP≥140 mmHg or DBP≥90 mmHg or current prevalence

Table 3. Odds ratio for exceeded reference value of health indicator according to two group

Target organ	Clinical diagnostic test	Adjusted OR (95% CI)		Adjusted odds (95% CI)		
		AMS (ref. KNHAENS) (n=13,917)	p-value	AMS (n=7,046)	KNHANES (n=6,871)	p-value
Renal	Serum creatinine (M: >1.3 mg/dL, F: >1.1 mg/dL)	2.29(1.48-3.54)	<.001	0.021(0.014-0.033)	0.009(0.006-0.013)	<.001
	Proteinuria (positive)	3.74(2.65-5.27)	<.001	0.046(0.036-0.060)	0.012(0.009-0.016)	<.001
	Albumin (>5.2 g/dL)			<0.000		-
	β_2-MG (>330 μg/L)			0.047(0.029-0.077)		-
	NAG (>7.0 U/L)			0.482(0.337-0.690)		-
Cardiovascular	Stroke (current prevalence or anamnesis)	5.43(3.94-7.49)	<.001	0.047(0.037-0.061)	0.009(0.007-0.012)	<.001
	MI or angina (current prevalence or anamnesis)	5.06(3.80-6.75)	<.001	0.065(0.052-0.082)	0.013(0.010-0.017)	<.001
	SBP (≥140 mmHg)	1.59(1.38-1.83)	<.001	0.240(0.213-0.271)	0.151(0.136-0.169)	<.001
	DBP (≥90 mmHg)	1.42(1.22-1.67)	<.001	0.177(0.156-0.201)	0.124(0.111-0.139)	<.001
	HBP (SBP≥140 or DBP≥90 mmHg)	1.25(1.10-1.42)	<.001	0.344(0.310-0.381)	0.275(0.252-0.301)	<.001
	Hypertension	1.02(0.91-1.14)	0.770	0.609(0.554-0.670)	0.599(0.552-0.650)	0.770
Bone density	Tarsal bone T-score (<-2.5)			0.168(0.123-0.230)		-
	Tarsal bone Z-score (≤-2.0)			<0.000		-
	Femur T-score (Asian) (<-2.5)				<0.000	-
	Neck of femur T-score (Asian) (<-2.5)				0.027(0.018-0.040)	-
	Lumbar T-score (Asian) (<-2.5)				0.061(0.046-0.082)	-

Adjusted: all model is adjusted by sex, age, region, month income, smoking status, drinking status
OR (95% CI): Odds ratio (95% confidence interval)
MI: myocardial infarction; SBP: systolic blood pressure; DBP: diastolic blood pressure; HBP: high blood pressure; Hypertension: BP ≥ 140 mmHg or DBP ≥ 90 mmHg or current prevalence

3. 위험 노출 인구집단의 검사 기준치 초과의 OR, 집단별 odds

일반 인구집단 대비 위험 노출 인구집단에서의 질환 유병을 파악하기 위하여, KNHANES 대비 AMS의 검사 기준치 초과의 대상자 특성을 보정한 OR (95% 신뢰구간)과 각 집단별 odds (95% 신뢰구간)를 추정한 결과는 Table 3과 같다.

신장 기능 지표 중 혈청 중 크레아티닌 기준치 초과의 odds는 KNHANES에서 0.009 (0.006-0.013), AMS에서 0.021 (0.014-0.033)이었다. 이에 대한 OR은 2.29 (1.48-3.54)로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 또한 AMS의 요 단백 양성반응의 OR은 3.74 (2.65-5.27)로 유의한 수준으로 확인되었다.

심혈관계 지표 중 SBP 기준치 초과 OR은 1.59 (1.38-1.83), DBP 기준치 초과 OR은 1.42 (1.22-1.67)로 AMS의 odds가 KNHANES에 비해 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타났다. 혈압 측정에 의한 고혈압 정의에서도 OR은 1.25 (1.10-1.42)로 AMS의 odds가 높았다. 반면, 혈압 측정 또는 문진 결과 현재 유병으로 정의된 고혈압에서 KNHANES와 AMS의 각 odds는 0.599 (0.552-0.650), 0.609 (0.554-0.670)으로 유사한 수준이었고 OR은 1.02 (0.91-1.14)로 통계적인 유의성은 없었다.

한편, 신장 지표 중 알부민, β_2-MG, NAG의 경우 KNHANES에서 조사 되지 않아 OR를 추정할 수 없었고, 골밀도 관련 지표 역시 측정된 부위가 상이하여 집단 간 비교에 한계가 있었다.

IV. 고 찰

본 연구는 중금속 노출 취약 지역인 폐금속광산 영향권 내 인구집단을 대상으로, 일반 인구집단과 비교한 혈 중 카드뮴 노출 실태와 그에 따른 건강영향 여부를 살펴보고자 하였다. 노출 인구집단인 AMS의 혈 중 카드뮴 농도가 KNHANES에 비해 높은 수준이었고, 혈 중 카드뮴 농도에 따라 신장, 혈관, 골밀도와 관련된 주요 질환 지표의 유병 및 진단 기준치 초과에 상관성이 있음을 확인하였다.

중금속 노출 취약지역인 AMS의 혈 중 카드뮴 농도의 보정된 기하평균은 1.34 μg/L로 일반 인구집단의 1.22 μg/L와 비교해 통계적으로 유의하게 높았다. 참고로 1:1 PSM의 보정된 기하평균 역시 동일한 추정치를 보였다. AMS의 38개 폐금속광산의 성, 연령을 보정한 기하평균은 최소 0.45 μg/L에서 최대 3.31 μg/L의 농도 수준을 보였다(P50: 1.53 μg/L, P75: 2.09 μg/L, P90: 2.69 μg/L, P95: 2.95 μg/L). 38개 지역 중 31개(81.6%) 지역이 일반 인구집단의 기하평균에 비해 높았다. 개인별 농도 수준에서 AMS의 극단값은 P99 5.78 μg/L, 최대값 12.81 μg/L 수준으로 일반 인구집단의 P99 2.42 μg/L, 최대값 10.92 μg/L와 비교해 큰 차이를 보였다. 또한 KNHANES에 의한 우리나라 19세 이상 일반 인구집단의 혈 중 카드뮴 대푯값 추정치는 2008년 이후 1 μg/L 이하였고('05: 1.52 μg/L, '08: 0.93 μg/L, '09: 0.94 μg/L, '10: 1.02 μg/L, '11: 1.00 μg/L, '12: 0.96 μg/L, '13: 0.85 μg/L, '16: 0.93 μg/L, '17: 0.77 μg/L) AMS와 큰 차이를 보였다.[8] US NHANES는 0.4 μg/L 이하로('05~'06: 0.37 μg/L, '07~'08: 0.38 μg/L, '09~'10: 0.36 μg/L, '11~'12: 0.34 μg/L, '13~'14: 0.30 μg/L, '15~'16: 0.30 μg/L) AMS와 KNHANES에 비해 매우 낮은 것으로 확인되었다.[9]

다수의 연구에서 금속 광산에 의한 토양 및 수질, 식품 등의 카드뮴 오염을 보고하였고[13-15] 주요한 노출원이 될 수 있다.[16] 매체별 카드뮴의 노출량에 관한 국내 연구로, 추정에 활용된 2차 자료에 따라 다소 차이가 있으나, 20~64세 성인의 경우 섭취 식품에 의해 약 95%의 카드뮴이 노출되는 것으로 평가하였고, 그 다음 대기 흡입이 약 3%의 기여율을 가지는 것으로 추정하였다.[17] 실제 쌀을 주식으로 하는 것이 카드뮴 노출의 주요 원인이 될 수 있으며, 요 중 카드뮴 농도의 상당 수준(59~69%)이 쌀 섭취에 기인하는 것으로 제시한 연구가 존재한다.[18,19] 유사하게 요 중 카드뮴 고농도 노출 지역의 쌀을 분석한 결과, 카드뮴이 기준치를 초과한 사례도 보고되었다.[20,21] AMS에서 환경오염조사로 반경 2 km 이내의 토양시료 및 인근 하천수, 지하수, 마을상수도, 농업용수의 수질시료를 공정시험법(환경부 고시 2008-115호, 2008-99호)에 준하여 채취하였고, 카드뮴 기준치 초과 여부를 확인하였다. 토양의 경우 38개 중 23개의 폐금속광산이 우려기준 1.5 mg/kg을 초과하는 것으로 나타났다. 수질은 9개 폐금속광산이 생활 및 농업 용수 기준 0.01 mg/L를 초과하였다.[10] AMS의 연차별 보고서 내 결과로, 폐금속광산 영향권 내에서 생산되는 쌀, 그리고 쌀 이외 곡류의 섭취 비

중이 높을수록 혈 중 카드뮴 농도가 증가하는 경향성을 확인할 수 있었다.[10] 우리나라의 폐금속광산에 의한 카드뮴 만성 노출의 주요 경로는 오염된 토양 및 수질에서 오염을 흡수한 농작물의 섭취로 추론된다.

카드뮴 만성 노출에 따른 대표적 표적기관은 신장(kidney)이다. 신장 손상은 근위곡세뇨관(proximal convoluted tubule) 내 카드뮴 축적에 의해 발생하며, 세포 이상과 손상이 유발될 수 있다.[22] 크레아티닌 수치 증가는 사구체(glomerulus) 이상을 의미하는데, 본 연구에서 혈 중 카드뮴 농도가 증가에 따라 기준치 초과 odds가 통계적으로 유의하게 증가하는 경향성이 확인되었고, KNHAENS에 대한 AMS의 odds가 2.29배 유의하게 높았다. 카드뮴 노출과 혈청 중 크레아티닌과의 관련성은 다수의 연구에서 확인된 바 있다.[23,24] 요단백은 카드뮴에 의한 신장 독성의 초기 특징으로서 배출량이 증가되며,[24-26] AMS의 양성 odds가 KNHANES에 비해 3.74배 통계적으로 유의하게 높은 것으로 나타나 유사한 결과를 보였다. 하지만 각 자료에서 혈 중 카드뮴 농도에 따른 양성 odds의 선형적 관련성은 확인되지 않았다. 한편 β_2-MG, NAG는 카드뮴 노출에 따른 신세뇨관 미세손상을 확인하는 신뢰성 높은 지표이나,[27-29] AMS의 알부민, β_2-MG, NAG는 농도에 따른 기준치 초과 odds에 통계적으로 유의한 경향성은 없는 것으로 확인되었다.

카드뮴은 철분대신 뼈에 흡수되어 칼슘의 흡수를 원천적으로 차단하고, 요를 통해 칼슘의 배출을 증가시켜 뼈의 쇠약을 유발한다.[30-32] AMS의 경우 족근골 골밀도를 측정하였고, T-score 및 Z-score에서 혈 중 카드뮴의 농도가 증가할수록 기준치 초과 odds가 증가하는 경향성이 나타났다. 특히 T-score는 통계적으로 유의한 선형적 경향성을 보였다. 다양한 연구에서 골다공증(osteoporosis)과 무관하게 카드뮴 노출 수준에 따라 골밀도가 통계적으로 유의하게 감소하는 경향성이 확인된다.[25,33,34] T-score를 기준으로, 카드뮴 만성 노출과 골다공증 발생 및 유병의 상관성에 대한 확증은 어려우나 골밀도에 대한 부정적 건강영향 가능성이 우려된다.

카드뮴 노출 수준과 혈압 수치 및 고혈압에 대해, 유의한 관련성을 보고한 일부 연구와[35-38] 전향적(prospective) 연구에 따라 혈 중 카드뮴 농도와의 혈압과의 인과관계에 대한 가능성을 제시한 연구가 존재한다.[39] 반면, Gallagher 등(2010)은 체계적 문헌고찰(systematic review)을 통해 혈 중 카드뮴은 혈압 수치 및 고혈압과 양의 상관성이 확인되었으나 통계적으로 유의하지 않았으며, 요 중 카드뮴은 유의한 음의 상관성이 있음을 정리하였다.[40] 이와 동일하게 상관성이 없음을 제시하고 있는 비교적 최근의 연구도 다수 존재하는데,[41,42] 관련 연구에서 카드뮴이 고혈압 발생의 주요 원인이라는 근거 있는 결과를 제시하지 못하였으며, 고혈압의 영향 요인 중 비중이 적을 것으로 추측된다. 본 연구에서 혈압 수치의 기준치 초과 또는 문진 결과에 따라 현재 고혈압을 정의하였을 때, AMS, KNHANES, 통합 자료 모두에서 혈 중 카드뮴 농도가 증가할수록 고혈압 odds가 통계적으로 유의하게 증가하는 것을 확인하였다. 이는 우리나라 일반 인구집단에 대한 Seo 등(2018)의 연구와 일치한다.[37] 한편, AMS와 KNHANES의 odds의 크기는 거의 일치하는 수준으로 나타났다. 즉, 취약지역인 AMS의 혈 중 카드뮴 농도는 KNHANES에 비해 상대적으로 높은 수준이나 고혈압 odds에 유의한 차이를 유발할 영향 정도는 아닌 것으로 해석된다. 카드뮴과 고혈압의 관련성에 대해 아직 일치된 결론을 보이지 못하고 있으므로 추가적인 연구의 필요성이 있다.

본 연구는 취약지역 주민을 대상으로 한 대규모 바이오모니터링 자료와 일반 인구집단을 대표하는 자료를 직접 비교한 것에 가치가 있는 반면, 자료 간의 조사, 측정 내용 및 방법이 표준화되지 못한 것에 한계를 가진다. 이에 따른 자료 간 측정 오차로부터 비롯되는 비표본 오차(non-sampling error) 역시 한계점으로 지적될 수 있다. 하지만 두 자료 모두 혈 중 카드뮴에 대해 국·내외 정도관리 프로그램의 승인을 받았으며, 그 외 생체 시료 분석과 관련해 KNIER과 KCDC의 관리절차를 준수하였으므로 국내 자료 중 상당 수준의 신뢰성을 담보할 것으로 추측한다. 한편, KNHANES에서 조사되지 않은 β_2-MG, NAG의 자료 간 비교 결과를 제시하지 못한 것은 향후 추가 연구로서 보완되어야 할 부분이다. 또한 폐금속광산을 위시한 취약지역의 지속적인 바이오모니터링이 실시되어야 하며, 환경 유해물질의 복합 노출에 따른 건강영향의 확인 및 인과성 규명을 위해 전향적인 연구가 필요할 것이다.

V. 결 론

취약지역인 폐금속광산 지역 주민이 일반 인구집단에 비해 혈 중 카드뮴 농도가 높았고, 신장, 혈압, 골밀도의 일부 건강 지표와의 상관성이 확인되었다. 이러한 결과로부터 혈 중 카드뮴의 농도가 상대적으로 높은 폐금속광산 지역에서 관련 질환 지표의 유병 및 진단 기준치 초과가 더 높을 것으로 추정하였고 일부 질환 지표에서 이를 확인할 수 있었다. 환경보건 취약지역에 대한 지속적인 바이오모니터링이 실시되어야하며 카드뮴을 포함해 유해물질 노출저감 방안 및 만성질환에 대한 관리가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부 지정 환경보건센터 및 국립환경과학원의 지원으로 수행되었다.

References

1. World Health Organization. Safety Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants: Seventy-Third Meeting of Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additive. Available: http://www.inchem.org/documents/jecfa/jecmono/v64je01.pdf [Accessed 03 June 2020].
2. Korea Ministry of Food and Drug Safety. Dietary Intake and Risk Assessment of Heavy Metals. Available: http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201000000710 [Accessed 03 June 2020].
3. Korea Ministry of Food and Drug Safety. Human Risk Assessment of Heavy Metals in Food for Safety Management Systems. Available: http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201100007661 [Accessed 03 June 2020].
4. Järup L, Alfvén T, Persson B, Toss G, Elinder CG. Cadmium may be a Risk factor for osteoporosis. *Occupational and Environmental Medicine*. 1998; 55(7): 435-439.
5. US National Toxicology Program. Carcinogen Profiles. Report on Carcinogens (12nd ed). Available: https://www.ashlandmass.com/DocumentCenter/View/442/National-Toxicology-Program-Report-on-Carcinogens-PDF [Accessed 03 June 2020].
6. Satarug S, Baker JR, Urbenjapol S, Haswell-Elkins M, Reilly PE, Williams DJ, et al. A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population. *Toxicology Letters*. 2003; 137(1-2): 65-83.
7. Horiguchi H, Oguma E, Sasaki S, Miyamoto K, Ikeda Y, Machida M, et al. Comprehensive study of the effects of age, iron deficiency, diabetes mellitus, and cadmium burden on dietary cadmium absorption in cadmium-exposed female Japanese farmers. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2004; 196(1): 114-123.
8. Korea Centers for Disease Control and Prevention. Korea Health Statistics 2017: Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES VII-2). Available: https://knhanes.cdc.go.kr/knhanes/sub04/sub04_03.do?classType=7 [Accessed 03 June 2020].
9. US Centers for Disease Control and Prevention. Fourth National Report on Human Exposure to Environmental Chemicals, Updated Tables, January, 2019. Available: https://www.cdc.gov/exposurereport/index.html [Accessed 03 June 2020].
10. Korea National Institute of Environmental Research. Health Effects Survey of Abandoned Metal Mines. Available: http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201300007875 [Accessed 03 June 2020].
11. Korea Centers for Disease Control and Prevention. Clinical Laboratory Test for the Korea National Health and Nutrition Examination Survey (IV, V). Available: http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201900000133 [Accessed 03 June 2020].
12. Abcar AC, Chan L, Yeoh H. What to do for the patient with minimally elevated creatinine level?. *The Permanente Journal*. 2004; 8(1): 51-53.
13. Alghobar MA, Suresha S. Evaluation of metal accumulation in soil and tomatoes irrigated with sewage water from Mysore city, Karnataka, India. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2017; 16(1): 49-59.
14. Douay F, Pelfrêne A, Planque J, Fourrier H, Richard A, Roussel H, et al. Assessment of potential health risk for inhabitants living near a former lead smelter. Part 1: metal concentrations in soils, agricultural crops, and homegrown vegetables. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013; 185(5): 3665-3680.
15. Tóth G, Hermann T, Da Silva M, Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environ-*

ment International. 2016; 88: 299-309.
16. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for cadmium. Available: https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp5.pdf [Accessed 03 June 2020].
17. Korea National Institute of Food and Drug Safety Evaluation. Risk assessment of cadmium. Available: http://www.nifds.go.kr/brd/m_271/view.do?seq=10144&srchFr=&srchTo=&srchWord=&srchTp=&itm_seq_1=0&itm_seq_2=0&multi_itm_seq=0&company_cd=&company_nm=&page=5 [Accessed 03 June 2020].
18. Moon CS, Paik JM, Choi CS, Kim DH, Ikeda M. Lead and cadmium levels in daily foods, blood and urine in children and their mothers in Korea. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2003; 76(4): 282-288.
19. Tsukahara T, Ezaki T, Moriguchi J, Furuki K, Fukui Y, Ukai H, et al. No significant effect of iron deficiency on cadmium body burden or kidney dysfunction among women in the general population in Japan. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2003; 76(4): 275-281.
20. Jin T, Wu X, Tang Y, Nordberg M, Bernard A, Ye T, et al. Environmental epidemiological study and estimation of benchmark dose for renal dysfunction in a cadmium-polluted area in China. *Biometals*. 2004; 17(5): 525-530.
21. Nakadaira H, Nishi S. Effects of low-dose cadmium exposure on biological examinations. *Science of the Total Environment*. 2003; 308(1-3): 49-62.
22. Dorian C, Gattone II VH, Klaasen CD. Renal cadmium deposition and injury as a result of accumulation of cadmium-metallothionein (CdMT) by the proximal convoluted tubules-A light microscopic autoradiography study with 109CdMT. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 1992; 114(2): 173-181.
23. Roels H, Lauwerys R, Bernard A, Buchet J-P, Vos A, Oversteyns M. Assessment of the filtration reserve capacity of the kidney in workers exposed to cadmium. Occupational and Environmental Medicine. 1991; 48(6): 365-374.
24. Thun M, Osorio AM, Schober S, Hannon W, Lewis B, Halperin W. Nephropathy in cadmium workers: assessment of risk from airborne occupational exposure to cadmium. *Occupational and Environmental Medicine*. 1989; 46(10): 689-697.
25. Alfvén T, Järup L, Elinder C-G. Cadmium and lead in blood in relation to low bone mineral density and tubular proteinuria. *Environmental Health Perspectives*. 2002; 110(7): 699-702.
26. Järup L, Elinder CG. Dose-response relations between urinary cadmium and tubular proteinuria in cadmium-exposed workers. *American Journal of Industrial Medicine*. 1994; 26(6): 759-769.
27. Buchet J, Lauwerys R, Roels H, Bernard A, Bruaux P, Claeys F, et al. Renal effects of cadmium body burden of the general population. *The Lancet*. 1990; 336(8717): 699-702.
28. Kawada T, Shinmyo RR, Suzuki S. Urinary cadmium and N-acetyl-beta-D-glucosaminidase excretion of inhabitants living in a cadmium-polluted area. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 1992; 63(8): 541-546.
29. Kim B, Kim HY, Oh DJ, Huh W, Kim YG, Kim DJ, et al. The Efficacy of N-acety1-beta-D-glucosaminidase as a Prognostic Factor of Glomerulonephritis. *Korean Journal of Nephrology*. 1999; 18(4): 537.
30. Brzóska MM. Low-level chronic exposure to cadmium enhances the risk of long bone fractures: a study on a female rat model of human lifetime exposure. *Journal of Applied Toxicology*. 2012; 32(1): 34-44.
31. Brzóska MM, Moniuszko-Jakoniuk J. Disorders in bone metabolism of female rats chronically exposed to cadmium. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005; 202(1): 68-83.
32. Nogawa K, Kobayashi E, Konishi F. Comparison of bone lesions in chronic cadmium intoxication and vitamin D deficiency. *Environmental Research*. 1981; 24(2): 233-249.
33. Schutte R, Nawrot T, Richart T, Thijs L, Roels HA, Van Bortel LM, et al. Arterial structure and function and environmental exposure to cadmium. *Occupational and Environmental Medicine*. 2008; 65(6): 412-419.
34. Staessen JA, Roels HA, Emelianov D, Kuznetsova T, Thijs L, Vangronsveld J, et al. Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk of fractures: prospective population study. *The Lancet*. 1999; 353(9159): 1140-1144.
35. Liu H, Xia W, Xu S, Zhang B, Lu B, Huang Z, et al. Cadmium body burden and pregnancy-induced hypertension. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2018; 221(2): 246-251.
36. Satarug S, Nishijo M, Ujjin P, Vanavanitkun Y, Moore MR. Cadmium-induced nephropathy in the development of high blood pressure. *Toxicology Letters*. 2005; 157(1): 57-68.
37. Seo JW, Kim BG, Kim YM, Choe BM, Seo SM,

Hong YS. Associations of Blood Lead and Cadmium Levels with Hypertension using the Korea National Health and Nutrition Examination Survey III-VI. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2018; 44(4): 380-390.
38. Shiwen C, Lin Y, Zhineng H, Xianzu Z, Zhaolu Y, Huidong X, et al. Cadmium exposure and health effects among residents in an irrigation area with ore dressing wastewater. *Science of the Total Environment*. 1990; 90: 67-73.
39. Tellez-Plaza M, Navas-Acien A, Crainiceanu CM, Guallar E. Cadmium exposure and hypertension in the 1999-2004 National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES). *Environmental Health Perspectives*. 2008; 116(1): 51-56.
40. Gallagher CM, Meliker JR. Blood and urine cadmium, blood pressure, and hypertension: a systematic review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives*. 2010; 118(12): 1676-1684.
41. Warembourg C, Maitre L, Tamayo-Uria I, Fossati S, Roumeliotaki T, Aasvang GM, et al. Early-life environmental exposures and blood pressure in children. *Journal of the American College of Cardiology*. 2019; 74(10): 1317-1328.
42. Yao B, Lu X, Xu L, Wang Y, Qu H, Zhou H. Relationship between low-level lead, cadmium and mercury exposures and blood pressure in children and adolescents aged 8-17 years: An exposure-response analysis of NHANES 2007-2016. *Science of the Total Environment*. 2020; 726: 138446.

<저자정보>

서정욱(박사후연구원), 김병권(교수), 홍영습(교수)