

경상북도 일부 폐금속광산 인근지역 주민들의 요중 카드뮴 농도 및 건강영향평가

영남대학교병원 산업의학과¹⁾, 영남대학교 의과대학 예방의학교실²⁾, 영남대학교 의과대학 내과학교실³⁾,
영남대학교 의과대학 신경과학교실⁴⁾, 영남대학교 건설시스템공학과⁵⁾, 영남대학교 환경공학과⁶⁾,
충남대학교 화학과⁷⁾, 경상북도 보건환경연구원⁸⁾

윤성호¹⁾ · 김창윤^{1,2)} · 황태윤²⁾ · 원규장³⁾ · 도준영³⁾ · 이세진⁴⁾
박영목⁵⁾ · 전관수⁶⁾ · 이계호⁷⁾ · 이도영⁸⁾ · 박광섭⁸⁾ · 사공준^{1,2)}

— Abstract —

The Concentration of Cadmium in Urine, and Its Role in Health-risk Assessment of Residents in the Vicinity of Abandoned Mines in Gyeongsangbuk-do, Korea

Sung-Ho Yun¹⁾, Chang-Yoon Kim^{1,2)}, Tae-Yoon Hwang²⁾, Kyu-Chang Won³⁾, Jun-Young Do³⁾, Se-Jin Lee⁴⁾,
Yeong-Mog Park⁵⁾, Kwan-Soo Jun⁶⁾, Gae-Ho Lee⁷⁾, Do-Young Lee⁸⁾, Kwang-Seub Park⁸⁾, Joon Sakong^{1,2)}

*Department of Occupational and Environmental Medicine, Yeungnam University Hospital¹⁾,
Department of Preventive Medicine and Public Health, College of Medicine, Yeungnam University²⁾,
Department of Internal Medicine, College of Medicine, Yeungnam University³⁾,
Department of Neurology, College of Medicine, Yeungnam University⁴⁾,
Department of Civil Engineering, Yeungnam University⁵⁾,
Department of Environmental Engineering, Yeungnam University⁶⁾,
Department of Chemistry, Chungnam National University⁷⁾,
GyeongSangBukdo Government Public Institute of Health & Environment⁸⁾*

Objectives: This study was conducted to assess the concentration of urine cadmium and health risks of residents in the vicinity of abandoned metal mines in Gyeongsangbuk-do.

Methods: The concentration of cadmium in the soil, water, and agricultural crops was measured in Gyeongsangbuk-do, Butdeun and Suksan, which have abandoned metal mines. We measured the concentration of cadmium in the urine of residents from the following areas: 78 from village A, 99 from village C and 147 from control areas. Other health-risk assessments were performed on each resident, such as measuring the concentration of β_2 -MG and a bone density test.

Results: In abandoned mine areas, the mean concentration of cadmium was higher in agricultural soil and in the crops than in that of control areas. The concentration of cadmium in the stream exceeded the guideline level. In regard to provisional tolerable daily intake (PTDI) of cadmium, the actual intake rate through crops was 33.81%, 72.74% in abandoned mine areas and 5.03%, 6.16% in control areas. Residents in abandoned mine areas, A village and C village had a geometric mean of urine Cd of 1.90 $\mu\text{g/g cr}$ and 1.45 $\mu\text{g/g cr}$. These measurements were significantly higher than those of residents in control areas, B village and D village, 0.59 $\mu\text{g/g cr}$ and 0.65 $\mu\text{g/g cr}$ ($p < 0.01$). Following adjustments for age, sex, smoking habit, and occupational history, the concentration of urine cadmium of residents in the Butdeun abandoned meta mine was higher by 1.62 $\mu\text{g/g cr}$ as compared with the control group ($p < 0.01$). Residents from the Suksan abandoned metal mine also had a higher concentration by 1.07 $\mu\text{g/g cr}$ ($p < 0.01$). A mul-

multiple linear regression analysis was performed for the factors associated with T-score, and this showed that the concentration of urine cadmium was not an influential factor.

Conclusions: Based on these measurements, areas with abandoned metal mines contaminated streams, agricultural soil, and crops of the adjacent areas, with cadmium. Because residents in the adjacent areas intake contaminated crops, their urine cadmium was increased. Despite a lack of evidence demonstrating the detrimental effect of increased urine cadmium in residents, an additional study is needed to assess the health risks of residents in the vicinity of abandoned metal mines.

Key Words: Abandoned metal mine, Urine cadmium, Health-risk assessment

서 론

폐금속광산 갱내수와 침출수, 방치된 폐광석과 광미는 토양과 하천, 지하수로 유입되어 주변 생태계를 오염시키고, 중금속의 환경내 안정성 때문에 카드뮴을 비롯한 중금속들은 인근 지역에 지속적으로 존재하면서 주민들의 체내로 유입된다고 알려져 있다^{1,2)}.

국내에 산재되어 있는 폐금속광산들은 900여개에 달하고 있으며 대부분의 폐금속광산은 채굴과 제련공정에서 발생한 폐광석과 광미가 적절한 오염방지시설 없이 방치되고 있어 인근 토양과 하천, 지하수의 중금속 오염원이 될 수 있다³⁾.

경상북도에 있는 폐금속광산 인근 지역의 토양 및 농작물에서의 중금속 농도에 관한 연구들을 보면 폐금속광산으로 인한 환경오염이 지속적으로 진행되고 있음을 알 수 있다.

1993년에 경상북도 영양군 일월폐금속광산 수계지역 내 토양의 중금속 농도 및 토양 중금속 농도와 농작물 내 중금속 농도와의 관계를 조사한 결과를 보면 토양에서는 대조지역인 칠곡에 비해 아연, 구리, 납, 카드뮴, 비소 농도가 현저히 높았고, 토양에서 납, 비소, 카드뮴 농도가 높으면 농작물의 납, 카드뮴, 비소 농도가 증가하였다. 경상북도 의성군 옥동폐금속광산지역을 조사한 결과는 옥동폐금속광산지역의 비소, 카드뮴의 유해지수 값이 1.0 보다 높으며, 오염된 토양, 지하수와 농작물을 통해 비소와 카드뮴이 체내로 유입될 가능성이 있었다⁴⁾.

경상북도 달성군에 위치하는 폐금속광산 인근 지역의 중금속 오염에 관한 조사에서 폐광석이 방치된 지역의 토양과 수질에서는 물론 인근 지역의 농작물에서도 비소, 안티몬 및 비스무트 등의 중금속이 다량 함유되어 있다고 보고되었다⁵⁾.

Chung 등⁶⁾의 연구에 의하면 수철폐금속광산 인근 지역에서는 적치장이 위치하는 계곡의 하천수를 농업용수로 이용하는 적치장 맞은편 농경지에서 납, 카드뮴, 구리, 비소의 농도가 높았으며 적치장 바로 아래 하천수에서 카드뮴과 납 농도가 하천수 및 농업용수의 수질기준을 초과

하였다. 금장폐금속광산 인근 지역에서는 광미적치장 하류방향 400 m 지점의 납 농도가 토양오염 우려기준을 초과하였으며 광미적치장 주변의 하천수에서 카드뮴 농도가 수질기준을 초과하여 폐금속광산에 의한 환경오염이 확인되었다.

폐금속광산 인근지역 하천수나 토양 등에서 카드뮴, 비소, 납의 농도가 높으면 인근 지역주민들의 체내 농도도 높을 가능성이 있기 때문에 폐금속광산지역에서 카드뮴, 비소, 납에 의한 오염이 지역주민들의 건강에 미치는 영향을 평가한 연구들이 국내외에서 보고되어왔다^{3,6-11)}.

특히 카드뮴은 토양에서 식물로 흡수되는 비율이 매우 높기 때문에 비흡연자, 직업적으로 노출되지 않는 사람들 중에서 농작물 섭취가 카드뮴 노출의 첫번째 원인이 된다^{12,13)}. 따라서 폐금속광산 인근지역 토양의 카드뮴 오염은 농작물의 카드뮴 농도를 증가시켜 그 농작물을 섭취하는 지역주민들의 건강에 영향을 미칠 가능성이 높다.

본 연구는 경상북도에 위치한 일부 폐금속광산지역의 토양과 수질에서 카드뮴의 오염수준을 측정하고 체내유입 기전으로 의심되는 농작물의 카드뮴 함량을 측정한 후 주민들의 요중 카드뮴 농도 및 건강상태를 평가하여 대조지역과 비교함으로써 폐금속광산이 인근 지역주민의 체내 카드뮴 농도와 건강상태에 미치는 영향을 평가하고자 수행되었다.

대상 및 방법

1. 폐금속광산 인근지역과 대조지역

경북 봉화군 법전면에 위치한 붓든폐금속광산은 주로 금, 은, 구리를 채굴하던 광산으로 1910년대에 채굴하기 시작하여 1984년에 폐쇄되었으며 2003년에 광해방지사업을 실시하였다. 붓든폐금속광산의 제 1적치장은 마을에서 300 m 떨어진 곳에 위치하고 있으며 제 2적치장은 마을에서 75 m 떨어진 곳에 위치하고 있다. A village 에 거주하고 있는 주민들은 붓든폐금속광산을 형성하는 수계의 물을 인근 경작지의 농업용수로 사용하고 있었지

만 식수는 다른 수계의 물을 사용하고 있었다.

경북 군위군 고로면에 위치한 석산폐금속광산은 아연광산으로 1964년부터 채굴하기 시작하여 1972년에 폐쇄되었으며 1998년 광해방지사업을 실시하였다. 마을은 갠구에서 약 825 m, 950 m 떨어진 곳에 각각 위치하고 있었는데 C village에 거주하고 있는 주민들은 석산폐금속광산에서 나오는 침출수와 하천이 만나서 이루어지는 수계의 물을 인근 경작지의 농업용수로 사용하고 있었으며, 식수는 대부분의 주민들은 다른 수계의 물을 사용하고 있었지만 일부 주민들은 자가지하수를 사용하고 있었다.

대조지역은 폐금속광산지역과 인접해 있고, 인구학적 특성과 재배하고 있는 농작물의 종류가 유사하며, 폐금속광산 지역과 전혀 다른 수계를 식수와 농업용수로 이용하며 인근에 공장 등 중금속 오염원이 없는 지역을 선정하였는데 경북 봉화군 법전면 A village에서 8 km 떨어진 경상북도 봉화군 물야면 B village와 경북 군위군 고로면 C village에서 22 km 떨어진 경상북도 군위군 효령면 D village가 선정되었다.

2. 토양 카드뮴 측정

북든폐금속광산 지역에서 토양 시료의 채취는 주요오염원으로 추정되는 서쪽 제 1광미적치장을 기점으로 하류 확산방향으로 진행되었다. 제 1광미적치장을 기점으로 확산방향 반경 2 km 내에서는 모든 경작지에 대하여 전수조사를 실시하였으며, 확산방향 2 km부터 3 km까지는 매 300 m 간격으로 시료를 채취하였다. 그리고 봉화군 물야면 B village의 농경지에서 대조지역 시료를 채취하였다. 시료의 채취는 토양오염공정시험법의 채취방법에 따라 채취하였다.

석산폐금속광산의 경우 오염추정원(석산폐금속광산의 갠구)을 기점으로 하여 해발이 낮은 남서쪽의 골짜기를 따라 확산방향과 하천방향으로 시료를 채취하였다. 광미적치장으로부터 2 km 이내 지역에서는 모든 경작지에 대하여 전수조사를 실시하였으며, 2 km 외곽 지역의 경우에는 하천변을 중심으로 확산지역까지 무작위로 시료를 채취하였고, 군위군 효령면 D village에서 대조지역 시료를 채취하였다.

채취된 토양시료의 분석은 환경부고시 1996-32호 「토양오염공정시험방법」의 시료조제방법 및 각 항목의 분석방법에 따라 수행되었는데 0.1 N 농도의 염산용액에 용출한 후 유도결합플라스마발광광도법으로 분석하였다.

3. 수질 카드뮴 측정

북든폐금속광산에서 수질시료는 제 1광미적치장을 기점

으로 하류방향으로 5곳에서 하천수를 채취하고 대조지역 2곳에서 하천수를 채취하였다.

석산폐금속광산의 수질 시료는 갠구를 기점으로 하류방향으로 6곳에서 하천수를 채취하고 대조지역 1곳에서 하천수를 채취하였다.

그리고 폐금속광산지역과 대조지역에서 식수로 사용되는 공동간이상수도과 지하수에서 수질시료를 채취하였다. 채취된 수질시료는 즉시 수질오염공정시험법에 따라 분석하였다.

4. 농작물 카드뮴 측정

북든폐금속광산의 경우 A village와 대조지역인 B village에서 농작물시료를 수집하였는데 토양시료와 마찬가지로 제 1광미적치장을 기점으로 확산방향 반경 2 km 이내에서는 재배되는 모든 농작물에 대하여 전수조사를 실시하였으며, 확산방향 2 km부터 3 km까지는 매 300 m 간격으로 시료를 채취하였는데 쌀, 고추, 콩 등을 포함하여 50점의 농작물시료를 채취하였다.

석산폐금속광산에서는 C village와 대조지역인 D village에서 쌀, 고추, 콩 등의 농작물 시료 71점을 채취하였다.

채취된 쌀과 기타 농작물시료는 미국환경보호국(EPA) 방법에 의해 분석되었는데 유도결합플라스마발광광도법을 이용하였다.

5. 농작물 섭취에 의한 카드뮴의 체내 유입량 평가 및 유해도 결정

폐금속광산지역과 대조지역에서 경작된 농작물을 섭취함에 따라 체내로 유입되는 카드뮴이 안전한지 여부를 파악하기 위해 2001년 국민건강영양조사 결과를 이용하여 카드뮴의 섭취량을 산출하고 잠정주간섭취허용량(provisional tolerable weekly intake, PTWI)과 비교하여 위해여부를 평가하였다. 국제식량농업기구(FAO)/세계보건기구(WHO)의 합동식품첨가물 및 오염물질 전문가회의(JECFA)에서는 1972년 이후 잠정주간섭취허용량(PTWI)을 산출하여 그 오염도를 비교하도록 권장하고 있다¹⁴⁾.

북든폐금속광산 및 석산폐금속광산 인근지역 주민들과 대조지역 주민들을 대상으로 쌀, 고추, 콩 섭취를 해당 지역에서 생산되는 농작물에만 의존한다고 가정하여 체내 유입량을 평가하였다. 체내 유입량 평가수식은 FAO/WHO JECFA의 만성노출평가 수식을 활용하였는데 대상 인구 집단을 체중 60 kg의 성인으로 가정하고 2001년 국민건강영양조사 보고서에 제시된 성인 평균식품섭취량(20~64

세) 자료를 활용하여 체내 유입평가를 실시하였다. FAO/WHO JECFA의 노출평가방법에 의하면 1일토양성인섭취량 50 mg/kg을 고려하여야 하지만 이 연구에서는 개별적인 생활환경의 토양오염도를 평가하지 않았기 때문에 토양에 의한 노출은 고려하지 않았다.

그리고 카드뮴의 노출에 기인한 유해도를 평가하였다. 유해도를 평가하기 위하여 JECFA에서 제안하는 잠정주간섭취허용량(PTWI)을 1일 잠정섭취허용량(provisional tolerable daily intake, PTDI)으로 변환하였다. 카드뮴의 체내 유입량 산출에 필요한 농작물의 중금속 함량은 각 폐금속광산의 인근지역과 대조지역에서 경작된 쌀, 고추, 콩에서 측정된 값의 평균값을 이용하였다. 농작물 섭취에 의한 카드뮴 유해도를 설명하는 유해지수(hazard quotient)는 카드뮴의 1일 체내유입량을 1일 잠정섭취허용량으로 나누어 구하였다.

6. 연구대상자들의 요중 카드뮴 농도 측정

요중 카드뮴을 분석하기 위해 증류수에 희석한 10% Triton-X 5 ml와 20% (NH4)2HPO4 1 ml에 HNO3 200 µl를 첨가하여 증류수로 100 ml를 맞추어 매질변형시약(matrix modifier)을 제조하였다. 1,000 µg/ml 카드뮴 표준원액을 단계별로 희석하여 표준용액으로 사용하였다. 시료의 전처리에는 매질변형시약 1.5 ml에 카드뮴 표준액 100 µl, 요 100 µl를 가하여 잘 섞어 표준물 첨가법에 의한 검량선 작성용 시료로 하였다. 원자흡광광도계(Varian Spectro AA 800-GTA)를 이용하여 비불꽃 방법으로 분석하였다.

7. 연구대상자들의 카드뮴에 의한 건강영향평가

폐금속광산지역의 경우 봉화군 법전면 A village에서 78명, 군위군 고로면 C village에서 99명이 연구에 참여하였는데 참여율은 각각 72.9%, 72.8%였다. 대조지역의 경우 B village에서 73명, D village에서 74명이 연구에 참여하여 참여율은 각각 60.8%, 54.4%였다.

연구대상자들에 대해서 가구방문 면접조사 및 카드뮴에 의한 건강영향평가를 실시하였는데 면접조사내용은 연령, 성, 흡연력, 음주력, 직업력 등의 인구학적 특성, 과거와 현재 병력, 환경노출인자, 자각증상 등이다.

카드뮴에 의한 건강영향평가를 위해서 요중 β2-microglobulin (β2-MG) 측정과 골밀도 검사를 실시하였는데 신장손상지표인 β2-MG 분석시 분석자가 시료가 채취된 지역을 모르게 하였다.

요골원위부 골밀도 검사는 손목 부위의 골밀도를 p-DEXA방식으로 측정하였다. 골밀도 측정기기로는 (주)

오스테오시스 EXA-3000을 사용하였다. EXA-3000은 약 4초 정도 X-ray를 조사하여 환자의 손목 관절 부위를 통과한 방사선을 charge coupled device 카메라로 검출 및 디지털화하여 모니터에 디스플레이 시키며, 측정 허용 오차는 15%이다. 오른손잡이는 왼쪽 손목을 왼손잡이는 그 반대쪽을 측정하였다

8. 통계 분석 방법

모든 조사 변수의 통계분석은 SPSS(ver. 12.0)를 이용하였다. 연속형 변수들의 평균비교는 독립 t-test를 이용하였고, 이산형 변수의 빈도분포의 차이검증은 카이제곱검정을 이용하였다.

다른 혼란요인을 통제한 후 폐금속광산이 요중 카드뮴 농도에 미치는 영향이나 카드뮴이 골다공증 지표에 미치는 영향을 구하기 위해 다변량회귀분석을 실시하였다. 통계적 유의성 검정수준은 p<0.05 혹은 p<0.01로 하였다.

결 과

A village와 C village 연구대상자들의 평균연령은 각각 63.0세, 64.7세였고, 대조지역인 B village와 D village 연구대상자들의 평균연령은 각각 65.4세, 67.7세로 비슷한 수준이었다. 성별 분포를 보면 모든 지역에서 남성에게 비해 여성의 비율이 높았다. 흡연자는 A village에서 20.5%, 대조지역인 B village의 9.6%와 비교하여 높았고, C village에서 11.1%, D village에서 13.5%로 비슷하였다. 음주력에 있어서 통계학적으로 유의한 차이는 없었다. 농업에 종사하는 사람이 A village와 C village에서 80.8%와 63.6%였고, 대조지역인 B village와 D village에서 79.5%, 78.4%였다. 대조지역과 비교하

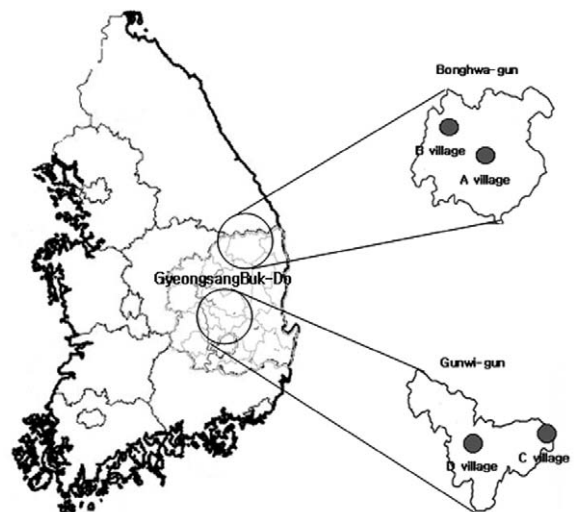


Fig. 1. Map of the study area. A village and C village are abandoned mine areas, B village and D village are control areas.

여 C village에서 농업에 종사하는 비율이 다소 낮았으나 통계적인 차이는 없었다(Table 1).

북둔폐금속광산 제 1광미적치장의 침출수와 하천수가 합류하는 지점에서 카드뮴 농도는 0.743 mg/L, 하천수와 제 1광미적치장 침출수가 만나는 지점으로부터 500 m 하류지점에서 하천수의 카드뮴 농도는 0.184 mg/L였

다. 하천수의 카드뮴 농도는 하류로 내려오면서 점차 낮아졌다. 식수로 사용하고 있는 간이상수와 지하수로부터는 기준치(0.005 mg/L)를 초과한 지점은 없었다. 대조지역인 B village의 하천수 및 식수의 모든 시료 내 카드뮴 함량은 수질기준을 초과하지 않았다. 석산폐금속광산 지역 하천수의 경우 모든 채취 시료의 카드뮴 농도는 하

Table 1. General characteristics of study population at abandoned mine areas and control areas

Characteristics	Butdeun		p-value	Suksan		p-value
	A village (N=78)	B village (N=73)		C village (N=99)	D village (N=74)	
Age (yrs)	63.0±9.1	65.4±11.1	0.15*	64.7±11.8	67.7±10.8	0.09*
Sex	Male	34(43.6)	0.89†	37(37.4)	31(41.9)	0.55†
	Female	44(56.4)		62(62.6)	43(58.1)	
Smoking	Yes	16(20.5)	<0.01†	11(11.1)	10(13.5)	0.15†
	Ex	4(5.1)		20(20.2)	7(9.5)	
	No	58(74.4)		68(68.7)	57(77.0)	
Alcohol	Yes	55(70.5)	0.25†	43(43.4)	26(35.1)	0.27†
	No	23(29.5)		56(56.6)	48(64.9)	
Job	Farming	63(80.8)	0.30†	63(63.6)	58(78.4)	0.26†
	Others	15(19.2)		36(36.4)	15(20.3)	

* T-test.

† Chi-square test.

** A village, C village: abandoned mine area; B village, D village: control area.

Table 2. Concentration (mg/L) of cadmium in water at abandoned mine areas and control areas

Areas	Cadmium concentration
Butdeun abandoned mine area	
Stream*	0 m 0.743
	500 m 0.184
	634 m 0.183
	929 m 0.097
	1954 m 0.013
	Control site 1 0.003
	Control site 2 0.001
Drinking water	Groundwater ND†
	Waterworks ND
	Groundwater at control area ND
Suksan abandoned mine area	
Stream*	0 m 0.005
	258 m 0.006
	574 m 0.004
	1057 m 0.003
	1580 m 0.002
	2811 m 0.002
	Control site 0.001
Drinking water	Groundwater 0.001
	Waterworks 0.001
	Groundwater at control area 0.001
	Waterworks at control area ND

* Distance from mine tailings waste site.

† ND: not detected.

** Stream guideline: 0.01 mg/L, Drinking water guideline: 0.005 mg/L.

Table 3. Concentration (mg/kg) of cadmium in rice farming soil and rice at abandoned mine areas

Areas	Cadmium concentration in soil	Cadmium concentration in rice
Butdeun abandoned mine area**		
477 m*	0.113	0.055
610 m	0.273	0.236
777 m	0.105	0.016
1693 m	ND [†]	0.046
1838 m	0.095	0.067
1996 m	0.637	0.056
2090 m	ND	0.015
2414 m	0.076	0.200
2671 m	0.142	0.228
3053 m	ND	0.007
Suksan abandoned mine area		
894 m	1.434	0.274
974 m	1.376	0.154
1048 m	0.834	0.134

* Distance from mine tailings waste site.

[†] ND: not detected.

** Earth brought from another place.

Table 4. Average concentration (mg/kg) of cadmium in agricultural soil and crops at abandoned mine areas and control areas

	Butdeun			Suksan		
	A village	B village	p-value*	C village	D village	p-value*
Rice farming soil	0.132	0.072	0.199	1.215	0.170	0.034
Dry-field farming soil	0.068	0.035	0.522	0.431	0.071	0.281
Rice	0.087	0.012	0.033	0.187	0.015	0.026
Red pepper	0.028	0.030	-	0.047	0.023	-
Bean	0.058	0.020	-	0.142	0.040	-

* T-test.

Table 5. In regard to provisional tolerable daily intake (PTDI) of cadmium, the actual intake rate through crops(%)

	Butdeun		Suksan	
	A village	B village	C village	D village
Rice	33.22	4.62	71.52	5.73
Red pepper	0.28	0.30	0.46	0.22
Bean	0.31	0.11	0.76	0.21
Total	33.81	5.03	72.74	6.16

천수 수질기준(0.01 mg/L)을 초과하고 있지 않았으며 하류로 내려올수록 낮아졌다. 석산폐금속광산지역에서 응용하는 식수 카드뮴 농도를 먹는 물 수질기준과 비교했을 때 기준을 초과한 시료는 하나도 발견되지 않았다. 대조 지역인 D village 하천수와 식수의 카드뮴 농도는 수질 기준을 초과하지 않았다(Table 2).

객토가 이루어져있지 않는 석산폐금속광산의 경우 오염 원으로부터 가까운 곳일수록 농토양의 카드뮴 농도가 높았다. 그리고 농토양의 카드뮴 농도가 높은 곳일수록 재

배되는 쌀의 카드뮴 농도도 높았다. 붓든폐금속광산에서는 오염원으로부터의 거리와 농토양의 카드뮴 농도와는 관련성이 보이지 않았는데 농토양의 대부분은 객토가 이루어져 있었다(Table 3).

폐금속광산지역의 경작지에서 대조지역보다 카드뮴의 평균농도가 높게 나타났다. 특히 C village에서 경작지 농토양의 카드뮴 평균농도는 1.215 mg/kg으로 D village의 0.170 mg/kg보다 통계적으로 유의하게 높았다. 농작물의 경우 A village에서 경작된 쌀의 평균 카드뮴 농도는 0.087 mg/kg으로 대조지역에서 경작된 쌀의 평균 카드뮴 농도 0.012 mg/kg보다 통계적으로 유의하게 높았다. C village에서도 경작된 쌀의 평균 카드뮴 농도는 0.187 mg/kg으로 나타나 대조지역인 D village에서 경작된 쌀의 평균 카드뮴 농도 0.015 mg/kg 보다 통계적으로 유의하게 높았다(Table 4).

폐금속광산 지역의 주민들이 해당지역에서 생산되는 농작물만을 먹는다고 가정하였을 경우 1일 잠정섭취허용량 (PTDI)에 대한 실제 섭취량의 비율(%)을 보면 A vil-

Table 6. Adjusted urine cadmium concentration ($\mu\text{g/g cr}$) of the subjects at abandoned mine areas and control areas

	Butdeun		p-value*	Suksan		p-value*
	A village (N=78)	B village (N=73)		C village (N=99)	D village (N=74)	
Mean \pm SD	2.28 \pm 1.4	0.69 \pm 0.4	<0.01	2.04 \pm 2.0	0.97 \pm 0.9	<0.01
(Geometric mean, SD)	(1.90, 1.9)	(0.59, 1.8)		(1.45, 2.3)	(0.65, 2.6)	
Range	0.33~6.66	0.07~1.98		0.05~12.65	0.04~4.17	
Percentile rank						
5th	0.66	0.21		0.42	0.13	
10th	0.80	0.28		0.53	0.18	
25th	1.26	0.41		0.91	0.26	
50th	1.97	0.58		1.36	0.81	
75th	2.74	0.88		2.56	1.22	
90th	4.73	1.20		4.32	1.89	
95th	5.62	1.54		7.21	3.58	

* T-test.

Table 7. Multiple linear regression test for urine cadmium concentration of the subjects at abandoned mine areas and control areas

Independent variables		β coefficient	S.E.	p-value	95% CI
Butdeun	area (B village=0, A village=1)	1.62	0.16	<0.01	1.30~ 1.94
	Age (yrs)	0.02	0.01	<0.01	0.01~ 0.04
	Sex (female=0, male=1)	-0.63	0.18	<0.01	-0.99~-0.27
	Smoking (no=0, yes=1)	0.08	0.25	0.76	-0.42~ 0.57
	Occupational history (no=0, yes=1)	-0.73	0.29	<0.01	-1.30~-0.16
Suksan	area (D village=0, C village=1)	1.07	0.27	<0.01	0.54~ 1.59
	Age (yrs)	0.01	0.01	0.41	-0.01~ 0.03
	Sex (female=0, male=1)	-0.35	0.29	0.23	-0.92~ 0.22
	Smoking (no=0, yes=1)	-0.01	0.4	0.99	-0.83~ 0.81
	Occupational history (no=0, yes=1)	-0.05	0.3	0.85	-0.56~ 0.46

lage의 경우는 1일 잠정섭취허용량에 대하여 A village에서 생산되는 쌀을 통해 섭취하는 카드뮴의 섭취율은 33.22%이었고, 쌀과 고추와 콩을 통한 카드뮴 섭취율을 합한 값은 33.81%로서 대조지역 5.03%보다 높은 수준이었다. C village의 경우는 쌀을 통해 섭취하는 카드뮴의 섭취율은 71.52%로 나타났고, 쌀과 고추와 콩을 통한 카드뮴 섭취율을 합한 값은 1일 잠정섭취허용량의 72.74%로서 대조지역 6.16%보다 훨씬 높은 수준이었다 (Table 5).

폐금속광산지역인 A village와 C village 주민들의 요중 카드뮴 농도 기하평균은 각각 1.90 $\mu\text{g/g cr}$ (산술평균 2.28 $\mu\text{g/g cr}$, 범위 0.33~6.66 $\mu\text{g/g cr}$), 1.45 $\mu\text{g/g cr}$ (산술평균 2.04 $\mu\text{g/g cr}$, 범위 0.05~12.65 $\mu\text{g/g cr}$)으로, 대조지역인 B village와 D village 주민들의 기하평균 0.59 $\mu\text{g/g cr}$ (산술평균 0.69 $\mu\text{g/g cr}$, 범위 0.07~1.98 $\mu\text{g/g cr}$), 0.65 $\mu\text{g/g cr}$ (산술평균 0.97 $\mu\text{g/g cr}$, 범위 0.04~4.17 $\mu\text{g/g cr}$)보다 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.01$) (Table 6).

체내 중금속 농도에 영향을 미치는 연령, 성별, 흡연습관 및 폐금속광산 관련 직업력을 보정한 후에 붓든폐금

속광산지역 주민의 요중 카드뮴 농도는 대조지역 주민에 비해 1.62 $\mu\text{g/g cr}$ 높았고($p<0.01$), 석산폐금속광산지역 주민 역시 대조지역 주민에 비해 1.07 $\mu\text{g/g cr}$ 높았다($p<0.01$) (Table 7).

폐금속광산지역과 대조지역 주민들의 평균 요중 β_2 -MG 농도는 통계적으로 차이를 보이지 않았다(Table 8).

연령, 성별, 체중, 흡연과 음주습관을 보정한 T-score에 대한 요중 카드뮴의 영향을 다중선형회귀분석으로 확인한 결과 연령, 성별 및 체중만이 골다공증 지표인 T-score에 유의한 영향을 미치는 요인이었고, 요중 카드뮴 농도의 영향은 유의하지 않은 것으로 나타났다(Table 9).

고 찰

폐금속광산 폐기물 등의 산화에 의해 생긴 산성광산배수나 선광과 제련과정에서 사용되는 유해물질, 폐광 주변에 적치된 광미에 포함된 미량의 중금속 등은 인근 지역을 오염시킬 수 있다. 광미적치장에서 나오는 침출수는 하천수와 하천 저니토를 오염시키고, 하천수를 농업용수로 사용하는 경작지 토양을 오염시키게 된다. 본 연구에

Table 8. Urine β_2 -MG concentration of the subjects at abandoned mine areas and control areas

	Butdeun			Suksan		
	A village	B village	p-value*	C village	D village	p-value*
Male	327.0±200.7	346.3±222.3	0.72	359.5±351.1	296.8±109.4	0.36
Female	498.3±264.0	448.9±269.0	0.40	404.2±223.8	414.9±221.2	0.81
Total	425.2±252.4	404.7±253.5	0.62	387.0±278.8	367.1±190.3	0.59

* T-test.

Table 9. Multiple linear regression test for the factors associated with bone mineral density (T-score)

Independent variables	β coefficient	S.E.	p-value
Urine cadmium ($\mu\text{g/g cr}$)	0.004	0.05	0.94
Age (yrs)	-0.08	0.01	<0.01
Sex (no=0, yes=1)	0.68	0.21	<0.01
Weight (kg)	0.03	0.01	<0.01
Smoking (no=0, yes=1)	-0.32	0.25	0.22
Alcohol (no=0, yes=1)	-0.39	0.17	0.02

서도 연구대상 폐금속광산지역들의 하천수 카드뮴 농도는 오염추정원 부근의 하천수 카드뮴 농도가 가장 높았고 하류로 내려오면서 점차 낮아져서 폐금속광산이 하천수 카드뮴 오염의 원인으로 생각되어진다. 특히 붓든폐금속광산지역인 A village의 하천수 카드뮴 농도를 분석한 결과 채취된 모든 지점에서 환경정책기본법의 하천수 수질 기준치를 초과하였다. 하천수를 많이 이용하게 되는 논토양 카드뮴 농도를 살펴보면 석산폐금속광산지역의 경우 추정오염원으로부터 가까운 채취지점일수록 논토양 카드뮴 농도가 높았는데 농업용수로 카드뮴으로 오염된 하천수를 이용하기 때문으로 생각된다. 붓든폐금속광산지역은 추정오염원과의 거리와 논토양 카드뮴 농도와는 관련성이 없었는데 이는 붓든폐금속광산지역의 논토양 대부분이 객토가 이루어졌기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 그리고 폐금속광산 농경지 토양의 평균 카드뮴 농도도 대조지역보다 높았다.

논토양 카드뮴 농도가 높은 곳일수록 농작물인 쌀의 카드뮴 농도도 높았는데 농경지 토양에 집적된 중금속은 지속적으로 농산물에 흡수되므로 주민들이 그 농산물을 섭취할 경우 지역주민들의 체내 중금속 농도는 높아진다. 특히 카드뮴의 경우 직업적 노출이 주로 호흡기로 이루어지는데 반해 비직업적 노출은 주로 식품을 통해 이루어지게 되는데^{12,13)} 기존의 폐금속광산 지역주민의 카드뮴 유입 경로에 관한 연구를 보면 경상남도 고성군 병산마을을 대상으로 한 연구에서 주식인 쌀을 카드뮴의 주된 체내 유입경로라고 보고하였고³⁾, Chung 등⁶⁾은 경상북도내 수철, 금장, 다락폐금속광산지역 주민들의 대조군보다 높은 체내 카드뮴 농도는 농작물에 기인한다고 보고하였다.

따라서 농작물의 카드뮴 오염수준 및 유해지수를 평가

하는 것은 필수적이다. 본 연구결과를 보면 A village에서 경작된 농작물 중 카드뮴의 전체 유해지수에 가장 큰 기여를 하는 것은 쌀로 추정된다. 즉 쌀을 통해 섭취하는 평균 카드뮴의 양은 허용섭취량의 33.22%로 대조지역의 7배 수준이었으며, 전국평균 7.30%¹⁵⁾에 비하여 4.5배에 해당하는 수준이다. C village 역시 경작된 농작물 중 전체 유해지수에 가장 큰 기여를 하는 것은 쌀의 카드뮴으로 쌀을 통한 카드뮴의 섭취량은 허용섭취량의 71.52%로 대조지역의 12배 수준이며 또한 쌀을 통해 섭취되는 전국평균 유해지수 7.30%¹⁵⁾의 약 10배이다.

이 연구에서 산출된 쌀의 유해지수는 폐금속광산 인근 지역에서 생산되는 쌀을 매일 섭취한다는 가정하에 산출되었다. 폐금속광산에서 먼 곳에 비해 가까운 곳에서 재배되는 농작물이 더 많이 시료로 채취되었고, 주민 모두가 이들 지역에서 생산되는 쌀을 섭취하지는 않고(쌀 자급자족률: A village 87.2%, C village 41.4%), A village의 경우 중금속 농도가 기준치를 초과하는 일부 쌀은 이미 정부에서 수거하고 있어 식용되지 않는다는 점을 고려한다면 실제 유해지수는 이 연구에서 산출된 값보다 낮을 것임을 고려하더라도 붓든폐금속광산과 석산폐금속광산 지역주민들의 체내로 카드뮴이 유입되는 주된 경로는 유해지수에 가장 큰 기여를 하는 쌀일 것으로 추정된다.

음용수에서는 카드뮴 농도가 먹는 물 수질기준치 이하로 나타나 카드뮴의 체내 유입과는 관련이 없는 것으로 생각된다.

폐금속광산으로 인한 토양 및 수질오염이 지역주민의 건강에 미치는 영향을 평가하는데 있어 가장 중요한 것은 체내 중금속의 측정이다. 금, 은, 아연 등을 채굴하던 폐금속광산 적치물내 중금속으로 납, 카드뮴, 비소가 가장 많다고 알려져 있다. 따라서 국내외의 다른 연구들을 보면 직업성 노출이 아닌 환경내 중금속이 주민들에게 미치는 영향을 평가하기 위한 측정치로 혈중 납, 요중 카드뮴과 요중 비소를 많이 이용하고 있다^{3,6-11)}. 이 연구에서도 요중 카드뮴을 폐금속광산 지역주민들의 건강영향평가를 위한 측정치로 이용하였다. 혈중 카드뮴의 경우 반감기가 수개월에 불과하나 요중 카드뮴은 체내 카드뮴의 총량을 반영할 수 있다¹⁶⁾.

폐금속광산이 지역주민들의 체내 카드뮴 농도를 증가시켰는지를 알아보기 위해 국내에서 발표된 기존의 연구들과 비교해보면 기존의 연구들이 보고한 요중 카드뮴 농도의 기하평균, 표준편차 및 표본수를 메타분석한 Kim¹⁷⁾의 연구에서 직업적으로 카드뮴에 폭로되지 않는 일반인의 요중 카드뮴 농도는 기하평균 1.04 $\mu\text{g}/\text{l}$ 였으며, 농촌지역인 경기도 안성 지역주민들이 대상자에 포함된 Yeon 등¹⁸⁾의 연구에서는 기하평균이 남자에서 1.19 $\mu\text{g}/\text{g cr}$, 여자에서 1.87 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 으로 보고하고 있고, 다른 농촌인 경상남도 함안의 주민 34명을 대상으로 한 Moon 등¹⁹⁾의 연구는 기하평균 3.05 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 으로 보고하고 있다. 이번 연구에서는 요중 카드뮴 농도의 산술평균과 기하평균이 붓든폐금속광산 지역주민에서 각각 2.28 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 과 1.90 $\mu\text{g}/\text{g cr}$, 대조지역주민에서 0.69 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 과 0.59 $\mu\text{g}/\text{g cr}$, 석산폐금속광산 지역주민에서 2.04 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 과 1.45 $\mu\text{g}/\text{g cr}$, 대조지역주민에서 0.97 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 과 0.65 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 으로 폐금속광산 지역주민의 요중 카드뮴 농도는 다른 연구들에 비해 다소 높은 반면, 대조지역 주민은 낮았다. 다만 그동안 직업적으로 카드뮴에 노출되지 않은 일반 성인을 대상으로 국내에서 수행되어 온 여러 연구들은 저자에 따라 농도의 변이가 크고, 분석방법과 보정방식이 다르기 때문에 이 연구의 요중 카드뮴 농도와 국내의 다른 연구들의 결과와 직접 비교하는 것은 무리가 있을 수는 있다.

연령이 증가할수록 신장내 카드뮴 증가와 함께 요중 카드뮴 농도가 증가하며, 흡연은 카드뮴 노출의 주된 원인이 된다. 따라서 폐금속광산이 인근지역 주민의 체내 카드뮴을 증가시켰는가를 확인하기 위해서는 먼저 체내 카드뮴 농도에 영향을 미칠 수 있는 연령, 성별, 흡연습관 및 폐금속광산 관련 직업력의 영향을 보정해야 한다. 체내 카드뮴 농도에 영향을 미치는 연령, 성별, 흡연습관 및 폐금속광산 관련 직업력을 보정한 후에도 붓든폐금속광산이 위치하는 A village 주민과 석산폐금속광산이 위치하는 C village 주민들의 요중 카드뮴 농도는 대조지역 주민에 비해 유의하게 높았다. 이는 붓든폐금속광산과 석산폐금속광산이 지역주민들의 체내 카드뮴 농도의 상승과 관련이 있을 가능성을 제시한다.

그리고 폐금속광산지역에서의 거주기간과 체내 카드뮴 농도의 관련성을 조사한 결과는 표로 제시하지는 않았지만 붓든폐금속광산 인근지역 주민들의 요중 카드뮴 보정농도가 거주기간이 9년 이하인 군에서 1.42 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 인데 비해 거주기간이 20~29년인 군에서 1.45 $\mu\text{g}/\text{g cr}$, 30~39년인 군에서 1.58 $\mu\text{g}/\text{g cr}$, 40~49년인 군에서 1.59 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 이었다. 거주기간이 길수록 요중 카드뮴 농도가 증가하는 것은 폐금속광산이 지역주민들의 체내 카드뮴 농도를 증가시켰다는 근거가 될 수 있다.

체내의 증가된 카드뮴은 일차적으로 신장의 콩팥노세판에 영향을 미쳐서 재흡수능력을 감소시켜 요중에 저분자 단백질 즉, β_2 -MG 혹은 레티놀결합단백질(retinol binding protein)이 증가한다. 따라서 이 물질들을 카드뮴에 의한 콩팥노세판 장애의 초기 지표로 이용한다²⁰⁻²²⁾. 본 연구에서 요중 β_2 -MG의 성별 평균농도는 지역별로 유의한 차이가 없었으며, 전체 대상자들의 평균농도도 지역별로 유의한 차이가 없었다. 카드뮴의 표적장기인 신장이 손상받을 경우 초기에 나타날 수 있는 요중 β_2 -MG의 지역별 평균농도의 비교에서 폐금속광산으로 인한 카드뮴 노출수준의 증가가 폐금속광산 지역주민들의 신장을 손상시켰다고 추정할 수 있는 근거는 없었다. 다만 연구대상자들의 연령이 대부분 고령이기 때문에 콩팥노세판장애를 유발할 수 있는 당뇨병, 고혈압 등의 만성질환을 가지고 있을 가능성이 높아서 이들이 혼란변수로 작용했을 가능성은 있다.

카드뮴에 노출된 사람에서 발생하는 골다공증이나 골연화증은 콩팥노세판의 손상으로 재흡수율이 감소하여 칼슘 및 인산이 소변으로 다량 배출됨으로써 유발된다. 또한 콩팥노세판의 기능장애는 비타민 D 대사장애를 초래하여 장에서 칼슘 흡수가 감소하고, 신장에서 칼슘의 재흡수가 둔화되어 골다공증을 일으킬 수 있다. 연령, 성별, 체중, 흡연과 음주습관을 보정한 T-score에 대한 요중 카드뮴의 영향을 다중선형회귀분석으로 확인한 결과 연령, 성별 및 체중만이 T-score에 유의한 영향을 미치며 요중 카드뮴 농도의 영향은 유의하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 폐금속광산으로 인한 카드뮴 노출수준의 증가가 폐금속광산지역 주민들의 골다공증을 유발시켰다고 추정할 수 있는 근거는 없었다.

그러나 카드뮴의 건강영향에 대한 최근 연구를 보면 Åkesson 등²³⁾은 요중 카드뮴 농도가 0.67 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 이상이면 노세판 손상이 나타난다고 보고하였고, Gallagher 등²⁴⁾은 요중 카드뮴 농도가 0.5 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 미만인 집단에 비해 요중 카드뮴 농도가 1.0 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 을 초과한 집단에서 골다공증의 위험이 1.43배 증가한다고 보고하였고, Thomas 등²⁵⁾은 요중 카드뮴 농도가 0.3 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 인 집단에 비해 요중 카드뮴 농도가 0.5 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 이상인 집단에서 초기 신장손상의 위험이 3.6배 증가한다고 보고하고 있다. 따라서 평균 요중 카드뮴 농도가 1.90, 1.45 $\mu\text{g}/\text{g cr}$ 인 본 연구에서 폐금속광산 지역주민들에서 초기 신장손상이나 골다공증 등이 나타날 가능성이 충분히 존재하는데 연구대상자 수가 충분하지 않고, 고연령대가 많아서 위음성이 나타났을 가능성을 배제할 수 없다. 따라서 추가적인 인체 위해성 평가 연구가 필요한데 추가 조사에서는 폐금속광산 지역주민 모두를 조사하여 다양한 연령대가 연구대상에 포함되도록 하고, 다른 폐금속광산도 연구

대상에 포함시킴으로써 연구 대상자의 수를 충분히 크게 할 필요가 있다.

참 고 문 헌

요 약

목적: 이 연구는 경상북도 내 일부 폐금속광산에 대해 인근 지역의 토양과 수질에서 카드뮴의 오염수준을 측정하고 체내유입기전으로 의심되는 농작물의 카드뮴 함량을 측정된 후 지역주민들의 요중 카드뮴 농도 및 건강상태를 평가하여 대조지역과 비교함으로써 폐금속광산이 인근 지역주민들의 체내 카드뮴 농도와 건강상태에 미치는 영향을 평가하고자 수행되었다.

방법: 경상북도 내 붓든폐금속광산과 석산폐금속광산을 대상으로 인근 지역의 토양, 수질, 농작물 내 카드뮴 농도를 측정하고, 폐금속광산 인근지역인 A village 주민 78명, C village 주민 99명, 대조지역 주민 147명을 대상으로 요중 카드뮴 농도를 측정하고 요중 β_2 -MG 농도와 골밀도 검사 등 카드뮴에 의한 건강영향평가를 실시하였다.

결과: 폐금속광산지역의 경작지 토양과 경작되는 농산물에서 대조지역보다 평균 카드뮴 농도가 높게 나타났고 하천수의 카드뮴 농도는 하천수 수질 기준치를 초과하고 있었다. 카드뮴의 1일 잠정섭취허용량(PTDI)에 대한 농작물(쌀, 고추, 콩)을 통한 실제 섭취율(%)을 보면 폐금속광산 지역이 33.81%, 72.74%로 대조지역의 5.03%, 6.16%보다 훨씬 높은 수준이었다. 폐금속광산지역인 A village와 C village 주민들의 요중 카드뮴 농도 기하평균은 각각 1.90 $\mu\text{g/g cr}$, 1.45 $\mu\text{g/g cr}$ 으로, 대조지역인 B village와 D village 주민들의 기하평균 0.59 $\mu\text{g/g cr}$, 0.65 $\mu\text{g/g cr}$ 보다 통계적으로 유의하게 높았다($p<0.01$). 연령, 성별, 흡연습관 및 폐금속광산 관련 직업력을 보정한 후에 붓든폐금속광산지역 주민의 요중 카드뮴 농도는 대조지역 주민에 비해 1.62 $\mu\text{g/g cr}$ 높았고($p<0.01$), 석산폐금속광산지역 주민 역시 대조지역 주민에 비해 1.07 $\mu\text{g/g cr}$ 높았다($p<0.01$). T-score 관련 요인들에 대해 다중선형회귀분석을 실시한 결과 요중 카드뮴 농도의 영향은 유의하지 않은 것으로 나타났다.

결론: 폐금속광산이 인근 지역의 하천수, 경작지 토양, 농작물을 카드뮴에 오염시키고, 인근지역 주민들이 오염된 농작물을 섭취함으로써 체내 카드뮴 농도가 증가되었다. 증가된 체내 카드뮴 농도가 지역주민들에게 건강상 위해를 초래했다는 근거는 없었지만 추가적인 연구가 필요하다.

- 1) Chatterjee A, Banerjee RN. Determination of lead and other metals in a residential area of greater Calcutta. *Sci Total Environ* 1999;227(2-3):175-85.
- 2) Small MJ, Nunn AB, Forslund BL, Daily DA. Source attribution of elevated residential soil lead near a battery recycling site. *Environ Sci Technol* 1995;29:883-95.
- 3) Kim S, Kwon HJ, Cheong HK, Choi K, Jang JY, Jeong WC, Kim DS, Yu S, Kim YW, Lee KY, Yang SO, Jhung IJ, Jang WH, Hong YC. Investigation on health effect of an abandoned metal mine. *J Korean Med Sci* 2008;23(3):452-8.
- 4) Lee JY, Kim JG, Lee IH, Lee JK. Environmental effects caused by abandoned metal mines in the Kyungpook province. *Jour. Korean Inst Mining Geol* 1993; 26(4):465-72. (Korean)
- 5) Jung MC, Thornton I, Chon HT. Arsenic, Sb and Bi contamination of soils, plants, waters and sediments in the vicinity of the Dalsung Cu-W mine in Korea. *Sci Total Environ* 2002;295(1-3):81-9.
- 6) Chung JH, Kang PS, Kim CY, Lee KS, Hwang TY, Kim GT, Park JS, Park SY, Kim DY, Lim OT, Sakong J. Blood Pb, urine Cd and health assessment of residents in the vicinity of abandoned mines in Gyeongsangbuk-do. *Korean J Occup Environ Med* 2005; 17(3):225-37. (Korean)
- 7) Park JD, Park CH, Choi BS, Kang EY, Hong YP, Chang IW, Chun BY, Yeh MH. A study on urinary cadmium concentration and renal indices of inhabitant in an abandoned mine area. *J Prev Med Public Health* 1998;31:424-39.
- 8) Gebel TW, Suchenwirth RH, Bolten C, Dunkelberg HH. Human biomonitoring of arsenic and antimony in case of an elevated geogenic exposure. *Environ Health Perspect* 1998;106(1):33-9.
- 9) Lauwerys R, Bernard A, Buchet JP, Roels H, Bruaux P, Claeys F, Ducoffre G, De Plaen P, Staessen J, Amery A, Fagard R, Lijnen P, Thijs L, Rondia D, Sartor F, Remy AS, Nick L. Does environmental exposure to cadmium represent a health risk? Conclusions from the Cadmibel study. *Acta Clin Belg* 1991;46(4):219-25.
- 10) Srikanth R, Khanam A, Rao V. Cadmium levels in the urine of male sewage sludge farmers of Hyderabad, India. *J Toxicol Environ Health* 1994;43(1):1-6.
- 11) Staessen JA, Lauwerys RR, Buchet JP, Bulpitt CJ, Rondia D, Vanrenterghem Y, Amery A. Impairment of renal function with increasing blood lead concentrations in the general population. The Cadmibel Study Group. *N Engl J Med* 1992;327(3):151-6.
- 12) Clemens S. Toxic metal accumulation, response to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 2006;88(11):1707-19.
- 13) Franz E, Römkens P, van Raamsdonk L, van der Fels-Klerx I. A chain modeling approach to estimate the impact of soil cadmium pollution on human dietary

- exposure. *J Food Prot* 2008;71(12):2504-13.
- 14) FAO. Summary of evaluations performed by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). ILSI. Geneva. 1994.
 - 15) Kim MH, Chang MI, Chung SY, Sho YS, Hong MK. Trace metal contents in cereals, pulses and potatoes and their safety evaluations. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 2000;29(3):364-8. (Korean)
 - 16) Alessio L, Odone P, Bertelli G, Foa V. Cadmium. In: Alessio L, Berlin A, Roi R, Boni M (eds) Human biological monitoring of industrial chemical series. Joint Research Centre. Ispra establishment. Ispra. 1983. pp 105-132.
 - 17) Kim H, Cho SH. Estimation of geometric means and reference values of normal tissue cadmium level among Korean. *Korean J Occup Environ Med* 1991;3(1):76-91.
 - 18) Yeon YY, Ahn KD, Lee BK. Blood and urine cadmium levels in non-exposed Korean to cadmium. *Korean J Occup Environ Med* 1992;4(1):70-80. (Korean)
 - 19) Moon CS, Zhang ZW, Shimbo S, Watanabe T, Moon DH, Lee CU, Lee BK, Ahn KD, Lee SH, Ikeda M. Evaluation of urinary cadmium and lead as markers of background exposure of middle-aged women in Korea. *Int Arch Occup Environ Health* 1998;71(4):251-6.
 - 20) Satarug S, Garrett SH, Sens MA, Sens DA. Cadmium, environmental exposure, health outcomes. *Environ Health Perspect* 2010;118(2):182-90.
 - 21) Herber RFM. Beta-2-microglobulin and other urinary proteins as an index of cadmium nephrotoxicity. *Pure Appl Chem* 1984;56(7):957-65.
 - 22) Lauwerys RR, Bernard A, Roels HA, Buchet JP, Viau C. Characterization of cadmium proteinuria in man and rat. *Environ Health Perspect* 1984;54:147-52.
 - 23) Åkesson A, Lundh T, Vahter M, Bjellerup P, Lidfeldt J, Nerbrand C, Samsioe G, Stömberg U, Skerfving S. Tubular and glomerular kidney effects in Swedish women with low environmental cadmium exposure. *Environ Health Perspect* 2005;113(11):1627-31.
 - 24) Gallagher CM, Kovach JS, Meliker JR. Urinary cadmium and osteoporosis in U.S. Women \geq 50 years of age: NHANES 1988-1994 and 1999-2004. *Environ Health Perspect* 2008;116(10):1338-43.
 - 25) Thomas LD, Hodgson S, Nieuwenhuijsen M, Jarup L. Early kidney damage in a population exposed to cadmium and other heavy metals. *Environ Health Perspect* 2009;117(2):181-4.