

Research Article

Open Access

국내 폐금속 광산지역에서의 토양, 지하수, 쌀의 중금속 노출에 따른 인체 위해성평가

나은식, 이용재, 고광용, 정덕영, 이규승*

충남대학교 생물환경화학학과

Risk Assessment for Heavy Metals in Soil, Ground Water, Rice Grain nearby Abandoned Mine Areas

Eun-Shik Na, Yong-Jae Lee, Kwang-Yong Ko, Doug-Young Chung and Kyu-Seung Lee* (Department of Bio Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 305-764. Korea)

Received: 12 March 2013 / Revised: 16 May 2013 / Accepted: 1 July 2013

© 2013 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: The objectives of this study are to investigate the contamination levels of heavy metals in soil, ground water, and agricultural product near the abandoned Boeun and Sanggok mine areas in Korea and to assess the health risk for these local residents exposed to the toxic heavy metals based on analytical data.

METHODS AND RESULTS: By the results of human health risk assessment for local residents around Boeun and Sanggok, human exposure to cadmium, copper, arsenic from soil and to lead, cadmium, and arsenic from rice grain were higher in Sanggok, but human exposure to zinc and arsenic from ground water was higher in Boeun. By the results of hazard index (HI) evaluation for arsenic, cadmium, copper, lead, and zinc, HI values in both areas were higher than 1.0. This result indicated that the toxicity hazard through the continuous exposure to lead, cadmium, arsenic from rice, ground water, and soil would be likely to occur to the residents in the areas. Cancer risk assessment

for arsenic, risks from the rice were exposed to one to two out of 10,000 people in Boeun and one of 1,000 people in Sanggok. These results showed that the cancer risks of arsenic in both areas were 10~100 times greater than the acceptable cancer risk range of US EPA ($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$).

CONCLUSION(S): Therefore, if these two local residents consume continuously with arsenic contaminated soil, ground water, and rice, the adverse health effects (carcinogenic potential) would be more increased.

Key words: Average daily dose, Ground water, Heavy metals, Health risk assessment, Rice grain, Soil

서론

우리나라의 광업활동은 해방이전에 광산 개발에 주력하여 오다가 그 후의 혼란기에 광업활동이 거의 미미한 상태였고, 1960년대부터 광산개발이 활발히 이루어졌다. 그러나 1980년대 후반부터 사회구조의 변화, 에너지 소비패턴의 변화, 3D 노동의 회피, 저렴한 가격의 광산물 수입, 부가가치의 하락 등으로 광업활동은 위축되기 시작하여 경영합리화가 되지 못한 광산들은 휴폐광하게 되었고 휴폐광 당시 철거한 광산보안조치 또는 환경보호조치가 미흡하여, 관리자 없이 방치되었

*교신저자(Corresponding author),
Phone: +82-42-821-6735; Fax: +82-42-822-5781;
E-mail: kslee@cnu.ac.kr

다. 그 결과 폐광도, 광미사나 폐석 등의 광산 폐기물과 채광 및 선광제련 등의 시설물들이 그대로 방치되어 있어 집중 가우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계에서 지속적으로 환경오염이 발생하고 있다(Thornton, 1983; Kelly, 1988; Alloway, 1990; Park, 1994; Lee et al., 2005).

이에 따라, 광산 활동에 의해 야기된 환경오염에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 선진국에서는 광산, 산업 및 농업 활동에 의해 야기된 환경오염이 인체에 미치는 부정적인 영향을 정량적으로 평가하기 위한 기법의 개발과 연구가 1980년대부터 이루어졌다(Park et al., 2003). 미국에서는 1980년에 환경오염물질 방출에 관련한 피해를 방지하기 위한 Superfund법을 제정하면서 유해물질에 대한 장단기 대책을 수립하게 되었고, 이와 동시에 공중보건을 보전하기 위하여 유독성 물질에 대한 인체위해성 평가가 연구되기 시작하였다(EPA, 1991a; EPA, 1991b). 우리나라의 경우 1990년대 중반부터 오염지역에 대한 위해성평가에 대한 중요성을 인식하고, 위해성평가에 포함되어 있는 세부적인 변수에 대한 연구를 시작하였다. 이후 광산 활동으로 인해 오염된 토양, 지하수 및 농작물 내 독성 원소들이 주변 지역 주민의 건강에 미치는 악영향을 직접적으로 평가하기 위한 기법의 개발과 연구가 이루어졌다(Gu et al., 2001; Lee et al., 2010).

본 연구지역인 보은광산은 충북 보은군 회남면의 보은탄전일대에 위치하는 석탄광의 하나로, 현재 폐광 상태이며 폐광석이 산 사면에 그대로 방치되어 있어 자연미관을 해칠 뿐 아니라, 석탄폐석 내에서 관찰되는 황화광물의 산화로 용출되어 나온 철이 수산화철을 형성하며 침전되어 하상은 이들 침전물들로 인하여 적갈색을 띠거나 부분적으로 백화현상을 보이기도 한다. 상곡광산은 충북 단양군 적성면 상원곡리에 위치한 연아연 및 금은을 채광한 광산으로 대규모의 갱도가 개설되어 있으며, 선광장 및 광미를 폐기한 것으로 보이는 계단식 야적장에 곳곳에서 침출수가 유출되어 소규모의 하천을 이루고 있는데, 이 소하천에는 적화 및 백화현상이 뚜렷해 회백색 및 적갈색의 침전물들이 많이 관찰된다.

두 광산 모두 주요오염원은 광산폐기물인 광미로서, 이들 광미가 바람에 의해 비산되거나 강우에 의한 침출수들이 광미담 하부에 위치한 농경지를 오염시키고, 오염된 농경지에서 재배되는 농작물 또한 중금속에 의해 오염된다. 따라서 이들 지역 주변에 거주하는 주민들이 농업활동을 하는 동안 중금속에 의한 위해성이 노출되어 체계적이고 종합적인 인체위해성 평가가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 폐광산인 보은, 상곡 광산지역 주변의 토양, 농작물 및 지하수 시료 중 중금속에 대한 오염수준을 조사하였고, 이들에 대한 화학분석자료를 바탕으로 독성 중금속들이 이들 지역주민의 건강에 미치는 위해영향을 정량화하는 인체위해성 평가 실시하며, 지역주민의 중금속 노출에 따른 인체위해성을 정량적으로 산출하여 이들 폐광산별 위해도 수준을 비교·평가하고자 한다.

재료 및 방법

시료채취

충북 보은군 회남면 보은광산 일대와 충북 단양군 적성면 상원곡리 상곡광산 일대를 대상으로 2002년부터 2004년 까지 토양, 농작물(쌀), 지하수를 채취하였다. 보은광산과 상곡광산 모두 폐광시설물과 광미가 방치되어 있고 그 하류로 수계와 농경지가 잘 발달되어 광미적치장으로부터 유출된 침출수가 혼합된 물을 관개수 및 식수로 사용하고 있어 폐석이 방치되어 있는 계곡의 단일수계를 따라 총 연장 약 1 km의 거리에서 100~200 m 간격으로 6개의 지하수 및 마을주민이 음용하고 있는 가정용 식수를 채취하였고, 수계를 따라 영향을 받을 것으로 예상되는 주변 논토양을 채취하였다. 각각의 토양 시료들은 대표성을 높이기 위하여 심도 0~15 cm의 상부토양을 대상으로 15~20개의 부분시료를 하나의 완전 시료로 취하였다. 또한 논토양에서 재배되는 벼 시료를 10~20개의 부분시료를 합하여 1개의 완전한 시료로서 채취하였다.

시료전처리 및 분석

토양시료는 공기 중에서 자연 건조하여 10 mesh (<2 mm)로 체질하여 토양오염공정시험법(1999)에 의하여 불산, 질산 및 과염소산을 5:4:2의 비율로 혼합한 강산으로 분해하였다. 농작물시료(벼)는 3회 이상 증류수로 세척한 후 자연 바람을 이용하여 풍건시켰으며, 건조한 식물시료는 식물용 분쇄기를 이용하여 미분쇄하여 분말시료를 제작하였다. 미분쇄한 식물시료는 ternary solution ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4:\text{H}_2\text{SO}_4 = 10:4:1$)으로 분해하였다. 수질시료는 펌프를 이용하여 동일 압력 하에서 cellulose nitrate membrane filter (0.45 μm , 동호엘앤스 71840022, 한국)에 통과시켜 부유물질을 제거한 후, 양이온 분석용과 음이온 분석용으로 나누어 보관하였으며, 양이온 분석용 시료는 시간의 경과에 따라 시료용기 벽면에 양이온(중금속)이 흡착되는 것을 방지하기 위해 질산을 가해 pH 2 이하로 조정하였다. 시료채취 이후 분석까지 모든 운반 및 보관은 아이스박스를 이용하여 저온상태(<4°C)를 유지하였다. 채취된 시료는 전처리과정을 수행한 이후, ICP-MS (Perkin-Elmer, ELAN6000)를 이용하여 비소, 카드뮴, 납, 구리 및 아연 등을 분석하였다.

위해성평가 방법

위해성평가 방법은 유해성확인(Hazard identification), 노출평가(Exposure assessment), 용량-반응평가(Dose-response assessment) 및 위해도 결정(Risk characterization)으로 이루어졌으며, 위해성평가를 하기 위해서 노출경로에 따른 일일평균노출량(Average daily dose, ADD), 발암위해도(Cancer risk) 및 비발암위해도(Hazard index, HI)등은 아래 식을 이용하여 산출하였다. 이 중 발암위해도와 비발암위해도를 결정하기 위해서는 발암잠재력(Slop factor, SF)과 참고섭취량(Reference dose, RfD)수치가 필요한데 IRIS(Integrated Risk Information System) 데이터베이스의 자료를 인용하

Table 1. Reference dose(RfD) and slope factors(SF) of Zn, Pb, Cd, Cu and As obtained from US-EPA IRIS database

Element	RfD (mg/kg/day)	SF (per mg/kg/day)
As	3×10^{-4} (1993)	1.5 (2002)
Cd	5×10^{-4} (water) / 1×10^{-3} (food) (1994)	-
Cu	1.4×10^{-1} (2001)	-
Pb	5×10^{-4} (2002)	-
Zn	3×10^{-1} (2005)	-

였다(Table 1).

결과 및 고찰

일일평균노출량(mg/kg/day) :

$$ADD(Average\ daily\ dose) = \frac{C \times IR \times ED \times EF}{BW \times AT \times 365}$$

- C = 토양, 농작물, 지하수 중금속 함량(mg/kg)
- IR = 토양, 농작물, 지하수의 섭취량 (kg/day)
- ED = 노출기간 (years)
- EF = 노출빈도 (days/year)
- AT = 평균수명 (years)
- BW = 평균몸무게 (kg)

발암위해도의 정량화 :

Cancer risk = ADD × SF (slope factor)

- ADD = 일일평균노출량 (mg/kg/day)
- SF = 발암잠재력 (per mg/kg/day)

비발암위해도의 정량화

HQ(Hazard Quotient) = ADD / RfD

HI(Hazard Indices) = ΣHQs (sum of hazard quotients)

- RfD = 참고섭취량
- HI = 비발암위해도 지수

토양, 지하수 쌀의 중금속 오염수준

폐광산 지역의 토양에 대한 중금속의 오염수준을 Table 2에 나타내었다. 논토양 내 중금속 원소들의 평균함량을 우리나라의 일반 논토양의 중금속의 평균함량과 비교해 보면, 보은광산의 경우 아연 42배, 카드뮴 10배, 구리와 비소는 8배가량 부하되어 나타났고, 상곡광산의 경우 아연 89배, 납 1.2배, 카드뮴 2배, 구리 10배, 비소는 9배가량 부하되어 있음을 알 수 있었다. Lee 등(1997)이 보고한 보은 서부지역 흑색셰일 분포지역 중 논토양의 중금속 원소 분석결과도 이와 비슷하거나 다소 높게 나타났지만 우리나라 토양환경보전법(2001)의 토양오염 우려기준과 비교해 볼 때 1/2~1/30의 함량을 보여 안전한 수준으로 나타났다.

또한 이들 폐광산 주변 농작물 및 식수로 사용되는 지하수에 대한 중금속의 오염수준을 Table 3, 4에 제시되어 있다. Kabata-pendias 등(1984)은 일반적으로 오염되지 않은 식물의 배경 값의 범위를 건조무게 기준으로 하여, 카드뮴 0.05 ~ 0.2 mg/kg, 구리 5 ~ 30 mg/kg, 납 5 ~ 10 mg/kg, 아연 27 ~ 150 mg/kg 및 비소 1 ~ 17 mg/kg 으로 제시하였으며, 독성을 보일 정도로 오염된 함량범위(excessive or toxic value)를 건조무게 기준으로 카드뮴 5 ~ 30 mg/kg, 구리 20 ~ 100 mg/kg, 납 30 ~ 300 mg/kg, 아연 100 ~ 400 mg/kg 및 비소 5 ~ 20 mg/kg으로 제시하였다. 우리나라의 경우 Jung(1995)이 제시한 오염되지 않은 지역에서 채배되는 식물의 중금속 함량범위를 카드뮴 0.1 ~ 2.0 mg/kg,

Table 2. Concentrations of heavy metals in paddy soils from the abandoned metal mine areas

Mine		Zn	Pb	Cd	Cu	As
		mg/kg d.w.				
Boeun	Maximum	278.0	5.2	1.6	35.8	10.8
	Minimum	150.0	2.2	0.5	18.3	3.5
	Average ± SD	199.7 ± 47.7	3.0 ± 1.0	0.8 ± 0.3	25.8 ± 12.1	6.8 ± 3.5
Sanggok	Maximum	917.6	11.9	3.5	37.2	12.7
	Minimum	243.9	0.5	0.7	13.5	5.2
	Average ± SD	417.5 ± 240.6	6.3 ± 5.5	1.7 ± 1.3	30.5 ± 11.7	7.5 ± 3.0
Paddy soil average ¹⁾		4.67	4.95	0.08	3.33	0.87

¹⁾kim et al (2008)

Table 3. Concentrations of heavy metals in rice grains from the abandoned metal mine areas

Mine		Zn	Pb	Cd	Cu	As
		mg/kg d.w.				
Boeun	Maximum	20.42	0.16	0.20	3.63	0.07
	Minimum	12.50	N.D. ^{a)}	0.01	1.14	N.D. ^{a)}
	Average ± SD	16.78 ± 2.62	0.06 ± 0.05	0.13 ± 0.16	1.80 ± 1.32	0.04 ± 0.03
Sanggok	Maximum	12.90	0.20	1.2	1.12	0.12
	Minimum	12.05	N.D. ^{a)}	0.01	0.18	0.04
	Average ± SD	12.49 ± 0.58	0.08 ± 0.06	0.32 ± 0.13	0.55 ± 0.47	0.08 ± 0.06

^{a)}N.D. = Not Detected

Table 4. Concentrations of heavy metals in groundwater used for drinking water from abandoned metal mine areas

Mine		Zn	Pb	Cd	Cu	As
		mg/L				
Boeun	Maximum	0.060	0.001	0.040	0.003	0.014
	Minimum	0.01	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}
	Average ± SD	0.039 ± 0.020	0.000 ± 0.000	0.008 ± 0.006	0.001 ± 0.000	0.008 ± 0.000
Sanggok	Maximum	0.036	0.1	N.D. ^{a)}	0.003	0.003
	Minimum	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}	N.D. ^{a)}
	Average ± SD	0.003 ± 0.001	0.059 ± 0.040	0.000 ± 0.000	0.001 ± 0.000	0.002 ± 0.000
U.S drinkingwater Standard ^{b)}		-	0.015	0.005	1.3	0.01
Permissible levels of drinking water ^{b)}		3	0.01	0.005	1	0.01

^{a)}N.D. = Not Detected

^{b)}Korea ministry of Environment (2011)

구리 10 mg/kg, 납 0.1 ~ 0.5 mg/kg, 아연 10 ~ 100 mg/kg으로 제시하였는데, 연구지역인 두 광산과 비교해 보았을 때 카드뮴을 제외한 나머지 원소들은 자연함유량 이하로 나타났다. 그리고 마을 주민들이 식수로 이용하는 지하수의 중금속 평균함량을 환경부(2011)에서 제시한 함량과 비교해 보았을 때, 보은광산의 경우 카드뮴, 상곡광산의 경우 납이 기준보다 다소 높게 나타났다.

노출평가

노출평가는 오염원으로부터 파악된 독성중금속들의 노출 경로에 의해 인간이 섭취하게 되는 독성중금속들의 섭취량을 정량적으로 산출하는 것으로 (DEFRA and EA 2002), 인체 노출량인 ADD를 산출함으로써 구할 수 있다. 본 연구지역 주민들이 오염원으로부터 독성중금속들에 노출되는 경로는 토양 노출경로(soil pathway), 지하수(식수)노출경로(groundwater pathway), 농작물(쌀)노출경로(rice grain pathway) 3가지로 파악할 수 있다. 폐광산 지역의 위해성평가에서 대상이 되는 수용체는 농업에 종사하는 농민들로서 이들에 대한 평균 몸무게, 평균수명, 일일섭취량 등의 인체노출인자를 투입하여

인체노출량을 산정해야 하므로 이들 인자에 대한 자료를 Table 5에 제시하였다.

오염된 토양에 노출되는 경로는 농업활동을 하는 동안에 토양과 직접적으로 접촉함으로써 더러운 손이나 호흡을 통해 발생한다. 토양노출빈도는 한국 농부들의 연평균 농사기간이 약 7개월(210 days)로 하였으며 토양섭취비는 미국 EPA에서 제시한 50 mg/day 수치를 이용하였다.

오염된 지하수에 노출되는 경로는 지하수를 직접 식수로 사용함으로써 인체로 흡수되어 발생한다. ADD 식에 투입되는 지하수(식수) 섭취 비는 환경부의 조사 자료에 의하면 2.0 L/day 이며, 지하수내 독성중금속들의 화학분석결과(Table 4)를 이용하였다.

오염된 토양에서 재배된 농작물(쌀)에 노출되는 경로는 이들 오염된 농작물을 직접 섭취함으로써 인체로 흡수되어 발생한다. 이번 노출평가에서는 농작물에 대한 섭취흡수계수를 100%로 가정하였다. 2007년도 환경부자료에 의하면 한국 농부의 쌀 섭취량은 321 g/day 이며, 쌀 내 독성중금속들의 화학분석결과(Table 3)도 이용하였다.

폐광산인 보은, 상곡광산 지역에서의 토양, 지하수, 농작물

Table 5. Exposure factors for an average korean farmer

Factor/ Parameter	Symbol	Units	Residential/ Agricultural	Source
Exposure Duration	ED	years	25	ME ^{a)} , 2007
Exposure Frequency	EF	day/year	350	ME ^{a)} , 2007
Averaging Time				
Carcinogens	ATc	year	73.5	KNSO ^{b)} , 2001
Non-carcinogens	ATnc	year	30	US EPA, 1997
Body Weight	BW	kg	62.8	ME ^{a)} , 2007
Ingestion Rate				
Soil	IRs	kg/day	5.0×10^{-5}	US EPA, 2009
Rice (Farmer)	IRr	kg/day	0.321	ME ^{a)} , 2007
Drinking water	IRw	L/day	2.0	ME ^{a)} , 2007

^{a)}Ministry of Environment

^{b)}Korea National Statistical Office

Table 6. Results of ADD for An, Pb, Cd, Cu and As with different exposure pathway

Pathway	Mine	Zn	Pb	Cd	Cu	As
		mg/kg/day				
Soil	Boeun	3.11×10^{-4}	4.67×10^{-6}	1.25×10^{-6}	4.02×10^{-5}	1.06×10^{-5}
	Sanggok	6.51×10^{-4}	9.82×10^{-6}	2.65×10^{-6}	4.75×10^{-5}	1.17×10^{-5}
Groundwater	Boeun	6.50×10^{-5}	-	1.33×10^{-5}	1.67×10^{-6}	1.33×10^{-5}
	Sanggok	5.00×10^{-6}	9.84×10^{-5}	-	1.67×10^{-6}	3.33×10^{-6}
Rice grain	Boeun	1.74×10^{-1}	6.23×10^{-4}	1.35×10^{-3}	1.87×10^{-2}	4.15×10^{-4}
	Sanggok	1.30×10^{-1}	8.31×10^{-4}	3.32×10^{-3}	5.71×10^{-3}	8.31×10^{-4}
Sum	Boeun	1.75×10^{-1}	6.28×10^{-4}	1.36×10^{-3}	1.87×10^{-2}	4.39×10^{-4}
	Sanggok	1.30×10^{-1}	9.39×10^{-4}	3.33×10^{-3}	5.76×10^{-3}	8.46×10^{-4}

(쌀)의 노출경로에 따른 중금속들의 일일평균노출량 산출결과를 Table 6에 제시하였다.

용량-반응 평가(독성평가)

노출평가를 통해 산출한 중금속의 인체노출량을 이용하여 발암위해도와 비발암(독성)위해도를 결정하기 위해서는 용량-반응평가를 통해 산출된 중금속의 발암잠재력(SF)과 참고섭취량(RfD) 수치가 필요하다. 앞서 언급한대로 이들 수치들은 미국 EPA의 IRIS 데이터베이스의 자료를 인용하여 Table 1에 제시하였다. 단, SF의 값은 발암물질인 비소에 대해서만 산정되어 있으므로 비소의 발암위해도만을 결정할 수 있었다.

위해도결정

폐광산 지역들에 대한 비소, 카드뮴, 구리, 납 및 아연의 비발암위해도를 결정하기 위해서 필요한 HQ 및 HI 지수를

Table 7, 8에 제시하였다. 납, 카드뮴 및 비소 등의 HI 지수가 두 광산 모두 1 이상으로 나타났다. 따라서 이 지역에 거주하는 주민들의 경우 지속적인 농작물(쌀), 지하수, 토양의 섭취를 통한 납, 카드뮴, 비소에 의해 비발암위해가 발생할 가능성이 크다는 것을 알 수 있었다.

앞서 언급한 것 같이 SF의 값이 비소에 대해서만 산정되어 있어 본 연구에서는 각각의 노출경로에 따른 비소의 발암위해도만을 평가하였다(Table 9). 그 결과 농작물(쌀)의 섭취를 통한 비소의 발암위해도는 보은광산의 경우 만 명 중의 수명으로 나타났으며, 상곡광산의 경우 천 명 중의 1.2명으로 나타났다. US EPA에서 제시한 위해성에 근거한 허용발암위해도는 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ 로 보은, 상곡광산 지역 모두 토양, 지하수 및 농작물(쌀)의 섭취를 통해 비소의 발암위해도가 허용발암위해도를 초과하고 있다. 따라서 이들 지역 주민들이

Table 7. Hazard quotients (HQ) of As, Cd, Cu, Pb and Zn in these study areas

Pathway	Mine	Zn	Pb	Cd	Cu	As
Soil	Boeun	1.04×10^{-3}	9.35×10^{-3}	1.25×10^{-3}	2.87×10^{-4}	3.53×10^{-2}
	Sanggok	2.17×10^{-3}	1.96×10^{-2}	2.65×10^{-3}	3.39×10^{-4}	3.90×10^{-2}
Groundwater	Boeun	2.17×10^{-4}	-	2.67×10^{-2}	1.19×10^{-5}	4.45×10^{-2}
	Sanggok	1.67×10^{-5}	1.97×10^{-1}	-	1.19×10^{-5}	1.11×10^{-2}
Rice grain	Boeun	5.81×10^{-1}	1.25×10^{-0}	1.35×10^{-0}	1.34×10^{-1}	1.38×10^{-0}
	Sanggok	4.32×10^{-1}	1.66×10^{-0}	3.32×10^{-0}	4.08×10^{-2}	2.77×10^{-0}
Sum	Boeun	5.82×10^{-1}	1.26×10^{-0}	1.38×10^{-0}	1.34×10^{-1}	1.46×10^{-0}
	Sanggok	4.35×10^{-1}	1.88×10^{-0}	3.33×10^{-0}	4.12×10^{-2}	2.82×10^{-0}

Table 8. Hazard indices (HI) of As, Cd, Cu, Pb and Zn in these study areas

Mine	Zn	Pb	Cd	Cu	As
Boeun	0.58	1.26	1.38	0.13	1.46
Sanggok	0.43	1.88	3.33	0.04	2.82

Table 9. Cancer risk of As in these study areas

Mine	Soil pathway	Groundwater pathway	Rice grain pathway	Sum
Boeun	1.6×10^{-5}	2.0×10^{-5}	6.2×10^{-4}	6.6×10^{-4}
Sanggok	1.8×10^{-5}	5.0×10^{-6}	1.2×10^{-3}	1.3×10^{-3}

비소에 의해 오염된 토양, 지하수, 그리고 농작물(쌀)을 지속적으로 장기간 섭취하게 된다면 비소가 건강에 미치는 위해 영향은 크다고 판단된다.

결론

폐광산인 보은, 상곡 광산지역 주변 토양, 농작물 및 지하수 시료 중 중금속에 대한 오염수준을 조사하였고, 이들에 대한 화학분석자료를 바탕으로 독성 중금속들이 이들 지역주민의 건강에 미치는 위해영향을 정량화하는 인체위해성 평가 실시하였다. 중금속 원소들의 인체노출평가 결과, 토양 섭취에 의한 카드뮴, 구리, 비소의 인체노출량은 상곡광산에서 높게 나타났으며, 지하수 섭취에 의한 아연, 비소의 인체노출량은 보은광산에서 높게 나타났다. 농작물(쌀) 섭취에 의한 납, 카드뮴, 비소의 인체노출량은 상곡광산에서 다소 높게 나타났다. 비소, 카드뮴, 구리, 납 및 아연의 비발암위해도(HI) 평가 결과 납, 카드뮴 및 비소의 HI 지수가 두 광산 모두 1 이상으로 나타났다. 이들 지역에 거주하는 주민들의 경우 지속적인 농작물(쌀), 지하수, 토양의 섭취를 통한 납, 카드뮴, 비소에 의해 독성위해도가 발생할 가능성이 크다는 것을 알 수 있었다. 비소에 대한 발암위해도 평가 결과, 농작물(쌀)의 섭취를 통한 비소의 발암위해도가 보은광산의 경우 만 명 중의 수명으로 나타났으며, 상곡광산의 경우 천 명 중의 1명으로 나타

났다. US EPA에서 제시한 위해성에 근거한 허용발암위해도는 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-5}$ 로 보는, 상곡광산 지역 모두 토양, 지하수 및 농작물(쌀)의 섭취를 통해 비소의 발암위해도가 허용발암위해도를 초과하고 있다. 따라서 이들 지역 주민들이 비소에 의해 오염된 토양, 지하수, 그리고 농작물(쌀)을 지속적으로 장기간 섭취하게 된다면 비소가 건강에 미치는 위해 영향은 크다고 판단된다.

References

- Alloway, B.J., 1990. *Heavy Metals in Soil*, p. 368, Blackie and Son Ltd.
- Bowen, H.J., 1979. *Environmental chemistry of the elements*. Academic Press, London.
- Gu, J.M., Kim, K.S., Dong, J.I., Park, Y.H., Bae, W.G., Yang, J.W., Yeom, I.T. Yoon, S.P., Lee, J.Y., Lee, J.S., Jang, Y.Y., Jung, J.C., Choi, S.I., Hwang, K.Y., Hwang, J.S., 2001. *Soil Environmental Engineering*. pp. 148-175, Hyangmunsa, Korea.
- Integrated Risk Information System (IRIS), <http://www.epa.gov/ngispgm3/iris>
- Kanata-Pendias, A., Pendias, H., 1984. *Trace elements in*

- soils and plants*. p. 315, CRC Press, Inc.
- Kelly, M., 1988. *Mininig and the freshwater environment*. London: Elsevier science Publishers. 9. 231.
- Lee, J.S., Chon, H.T., Kim, K.W., 2005. Human risk assessment of As, Cd, Pb, Cu and Zn in the ababdined metal mine site, *Environ Geochem Health*. 27, 185-191.
- Lee, J.S., Chon, H.T., Kim, K.W., 1997. Dispersion and Migration of potentially Toxic elements in the Rock-Soil-Plant System from the Boeun area underlain by Black Shales, Korea, *Eco. Environ. Geol.* 30(6), 587-601.
- Lee, J.S., Kim, Y.N., Kim, K.H., 2010. Suitability Assessment for Agriculture of Soils Adjacent to Abandoned Mining Area Using Different Human Risk Assessment Models, *Korea J. Soil Sci. Fert.* 43(5), 674-683.
- Park, Y.H., 1994. *Management of Wastes from Inactive or Abandoned Mines*, p. 588, Korea Environment Institute.
- Park, Y.H., Kim, M.J., Jung, S.W., Lee, Y.H., Kim, M.J., Jo, J.E., 2003. A Study for Standards of Soil Contamination and Restoration by land-use. Korea Institute of Policy Evaluations.
- Thornton, I., 1983. *Applied Environmental Geochemistry*, p. 501, Academic Press. London.
- US EPA., 1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund*, Vol. 1, Part A, EPA/540/1-89/002
- US EPA., 1991. *Risk Assessment Guidance for Superfund*, Vol. 1, Part B, EPA/540/R-92/003.
- US EPA., 1986. *Guideline for the Health Risk Assessment old Chemical mixture*, 51 Fedral Regoster 34014.
- US EPA., 1999a. Risk assessment guidance for superfund(RAGS). Volumn I : Human health evaluation manial(HHEM), part B, development of risk-based preliminary remediation goals.
- US EPA., 1999b. Risk assessment guidance for superfund(RAGS). Volumn I : Human health evaluation manial(HHEM), supplemental guidance, Standrad Default Exposure Factors, Interim Guidance.